

# 从欧姆定律 到微型计算机

活死人 著

**FROM Ohm's Law TO Microcomputer**

Reanimator, [www.cookmoon.org](http://www.cookmoon.org)

# 从欧姆定律到微型计算机

FROM Ohm's Law TO Microcomputer

活死人 著

Reanimator

[www.cookmoon.org](http://www.cookmoon.org) , [bbs.genie52.com](http://bbs.genie52.com)

## 更新历史

2015-11-29	Reanimator	V1.0	第 1 版第 1 部分首发
2017-05-16	Reanimator		2005-06-30 这一节中图 figure0180 存在问题没有讨论，这次进行了补充。
2017-08-17	Reanimator		增加了作者简介和章节内容简介
2017-12-03	Reanimator		2005-05-23 这一节增加了一点关于“电流源”的内容。2005-07-07 这一节也有少许增补。
2018-01-05	Reanimator		2005-07-10 这一节补了两个图。
2018-03-01	Reanimator		21ic 论坛的 xukun977 网友指出 2005-04-23 这一节有一个错误。同时指出 2005-04-29 这一节中提及 1/6W 额定功率的电阻是否常见值得商榷。

# 写在前面

这是一部介绍电子技术与计算机科学的作品，为那些对电子计算机世界一无所知、或一知半解、或自认为非常精通、或发现自己其实不那么精通的读者所写。这部作品适合所有希望学习这项技术的人阅读，若你真的与科学技术有缘，这部作品可能会给你的生活增添些许乐趣。

以上是我开篇所写的第一句话，我希望通过第一句话你就可以做出决定：是否还要继续读下去。

## 学习的困惑

首先问你一个问题：**你爱学习吗？**

注意我不是知名的学者，也不是教育局的领导，更不是媒体记者穷追不舍拿着摄影机。我和你一样是群众，我现在刚睡醒，只穿了内裤坐在网络的这一端，写着这样一篇文章，我牙齿还没刷呢。所以我希望你不要用那些冠冕堂皇的词藻来搪塞我，老老实实用掏心窝子的话来回答：**你爱学习吗？**

**“我——爱——学——习！”**

你不配合我？你不按照我的路数出牌？你猜出了我想得到的答案？你故意不说那个答案将我一军？那么祝贺你，你这么鸡贼非常适合阅读我这部作品，不论你是否真的爱学习。

有相当一批人是不爱学习的，而且不知道为什么不爱学习，就是不爱学习，就是不爱，这真的让人很遗憾。要知道我们自从出了娘胎之后，天生的对周遭这个世界具有无限的好奇之心。探索是我们的本能，一些孩子还曾经以破坏手段来了解未知领域，比如说拆了家里的什么东西。当然多数是拆自家的东西，少数，，是拆公家的。步入青春期，大家的好奇之心大都偏向于异性（也可能是同性），这也正常，毕竟异性也是你周遭这个世界的一个组成部分。以肉体的碰撞来深度诠释灵魂的共鸣也没什么大不了，别在特定的历史时期弄出人命就好。

成年之后，我们之中的很多人，对于除了异性之外的其它未知世界没了好奇之心，这就是我们不爱学习的原因。我们不再好奇，我们好，，色？也不尽然，我们还贪财媚权呢。如何从批判的角度辩证地看待权财色之间的因果关系不是我们要讨论的重点，我只是想知道：**为什么你对身边的这个未知世界，就没了好奇心呢？**

**“是谁出的题这么的难？到处全都是正确答案。”**

我也没法说出真正的原因，我只能提出我自己的一个观点：**你失去好奇心是因为你接受了教育。**

这真是比天还大的笑话啊？你非常鸡贼地，，，哦不，是非常敏锐地发现了我的逻辑错误：如果异性也是我们周遭这个世界的的一个组成部分，那么我们接受的教育何尝不是？那些初次走进学校的孩子们，哪个不是对课堂对书本充满了好奇心呢？

如果你的好奇心都得到了满足，你一定会爱上学习的。很遗憾，你的好奇心，谁在乎呢！体制告诉你：你该学的东西就是这些，该怎么学我知不到，学会没学会由考试来检验。那个考试，居然还不只是检验你学没学会，它，TMD 还有别的作用，据说是为了公平分配有限的教育资源。你爸爸你妈，为了让你得到那些教育资源，拼了命地押着你应付考试。这个说法你爹妈不是很爱听哈？他们争那些教育资源最终是想让你成材的。我想说如果你连好奇之心都没有了，那些教育资源于你而言又还有什么意义呢？你成不了顶梁柱，也就是一块垫脚石。

我无意于抨击现行的教育体制，无论这体制有多烂，终究还是出了几个像样的人才的，只是少了点而已。其实现在连体制内的人都在揭示这个体制的种种弊端了，还要我说什么呢？我写下这部作品，是想实践一个已经被喊了很多年的口号——**寓教于乐**。我要做两点尝试：**第一，重新激发你对未知世界的好奇心；第二，满足你的好奇心。**通过此两点我最终要达到的目的，就是在未来**让你有能力通过自己的不懈探索来满足自己的好奇心，不再需要别人教给你怎么做。或者说，让你爱上学习。**

那么现在，你是否对我这部作品有了些许好奇呢？

就写这些吧，还有什么问题吗？

**如何才能快速得到权财色？**这个，，，我不能免费告诉你，先把你的财给我。

你好像知道该如何快速发财了？



# 内容和形式

这是一部介绍电子**技术**与计算机**科学**的**文学**作品。听着有点奇怪？也没什么特别奇怪的，技术与科学是内容，文学是形式。

为什么要选择电子与计算机做为内容？首先，我懂一些这方面的技术；其次，这应该是离你生活最近而且最容易探索的一个神秘未知世界了。电子产品与每个人朝夕相处，甚至可以说各式各样的电子产品构成了现代人的生活方式，那么你买了那么多电子产品来玩，就从来没想研究过这玩意儿到底是怎么运转的吗？

**从来都没想研究过？现在也没在想？那你居然还能读到这里？看来我真的写了部文学作品啊？！**

我这部作品，记录了一台微型电子计算机从无到有的诞生过程，具体来说，此作品记录了一个对电子计算机原理一无所知的人想亲手设计并制造出一台计算机所必须掌握的全部知识和技能。这话说着费劲听着很高大上，我再仔细地给你解释一下。

如果你上过大学且学过电子或计算机专业，你一定上过一大批专业课程，从数学开始，到电路，到模拟电子，到数字电子，到微机原理，到程序设计，还有什么算法数据结构操作系统等等等等，我且问你，学过了所有这些知识以后，我现在让你设计并制造一台微型计算机，有键盘鼠标，可以连接音箱显示器，并且人家真的可以操作它，你准备怎么做？

我相信，多数人是两手（一手成绩单一手毕业证）一摊表示无能为力，少数人会跑去购买主板显卡硬盘内存条拼装一台 PC 机，只有极个别的人会选择一堆电子零件，画出电路图，设计电路板，真正焊接出一台电脑来。但他们，还不一定能开发出软件，以便让别人能真正操作这台电脑。好了，现在我继续问这极个别的人：**你在完成这项工作的过程中，到底用了多少课堂上学过的知识呢？**

**“每门课程都用到了。”**

确切地说，每门课程都用到了一点儿。其实还有相当一部分知识是课堂上没讲过的，是你自己向某宝上的店主咨询来的对吧？

现在我告诉你，我把你每门课程中用到的那一点儿知识，和那些课堂上永远没机会讲却又必须用到的知识，汇总在一起写进了我这部作品里。而且，我们真的是要动手制造出这台电脑来，你将会学习到动手实践所必需的全部技能。

而我们将要设计并制作出的那台电脑，其性能并不是非常高的，这意味着其线路和结构不是特别复杂。通过这台电脑，我们将重温历史，近似地经历一下上世纪 70 年代史帝夫·乔布斯和史帝夫·沃兹尼亚克在自家车库中共同设计 APPLE-II 型计算机的过程。当然，我们要学习并使用技术与 APPLE-II 时代是大不相同的。

内容就是如此，那么形式呢？我说过这是一部文学作品，我没有像编写常规教材那样去罗列知识点，再去辅以 N 个数学方程式以显示科学技术的高深莫测。我写了一个故事，虚构了两个人物，一位老师一位学生，我记录了这一对师生间就一个个知识点所展开的讲解和讨论，全篇几乎就是整理了一套网络聊天记录。而且，这套记录不是由这个老师进行整理的，而是由这个学生整理的，他把他自己的思考也融入了这部作品中。

抽取各种课程中的部分内容写在一部作品中不太容易，可能写成十三不靠式的大杂烩，各项内容单摆浮搁相互缺乏联系，搞得读者只能死记硬背，因此在知识点的布局安排上要求很细致。我努力做到了“递进”式布局，前文讨论的知识点通常会在后文的讨论中用到，或者被重复提起，实践中发现的问题总可以利用文中讨论过的知识来解释和解决。

既然我要实践“寓教于乐”这个古老的议题，显然我不能把这本作品写成学术味的，我强调直观地理解科学技术，而不是通过高度严谨的数学方程式去理解，我同时强调实践。在这部作品中时常会用比喻或类比的方式去说明某些原理，有时甚至是暗示，一些知识点是通过在实践中发现问题来引出的。有一位知名的学者曾经说过这样一句话：“**在我写的书中，我每增加一个数学方程式，其读者数量就会减少二分之一。**”这句话说明了一个简单的道理：**书籍是为读者服务的，而不是为作者。**

## 缺点和遗憾

### 这部作品不是从零起步的。

我要求读者上过初中，学习过初中物理课程中电学部分的欧姆定律，能够使用电脑上网。还在上小学的读者需要有长者引领，个别天才除外。应该说我对读者自身程度的要求还不是很高，我也读过一些号称从零起步的书籍，通常没人说清楚“零”到底意味着什么。

### 这部作品对技术的讲述和讨论不够准确。

这真的是没办法，我要寓教于乐，我要放低对读者自身程度的要求，所以我无法用精准的学术语言来写作。这部作品完全是口语化的，在“实用，够用”的前提下对很多知识的讨论很粗浅，更有甚者这部作品中写了很多作者对知识点的个人理解而非公认的正确结论，这导致此作品中一些内容可能是错误的。这虽然有助于引发读者思考，但也容易使读者接受不确切的信息。因而单凭本教程仅能入门，大家若想进一步深入学习还要再读其它经典教材。

### 这部作品可能存在逻辑混乱。

我努力做到后文中讨论的内容总能在前文中找到铺垫，这其实是比较困难的。因而这部作品中可能存在一些“后语不搭前言”的情况，某些章节中会突然出现一些知识点或名词术语前文从没提过，根本不知道是什么意思就被当成已知来用了。这种情况作者自己和一些经验丰富的高手是很难发觉的，因为那些知识点早就在我们头脑之中，根本不会觉察出它们“从来没提过”，只有那些一穷二白的读者才能发现此类问题。

### 这部作品没有完全符合科学技术发展的内在规律。

科学技术的发展演化遵循一个简单的规律：**实践——经验——理论——再实践**。我们总是通过实践总结经验，然后形成科学理论，再用理论指导实践。很遗憾我这部作品没有完全反映这个规律，我们不是从实际动手制作电路开始，而是首先讨论一些必备的知识点，再到实践之中去运用。毕竟我对读者有一个最低程度的要求，在读者已具备的知识体系之上直接开始讨论比较顺畅。

# 知识产权声明

这部作品受知识产权相关法律的保护，作者保留对此作品的所有权利。这表示：

- (1) 你不可以声明这部作品是你独立创作或与原作者联合创作的；
- (2) 直接引用这部作品中的全部或部分内容的时，必须注明这些内容的出处；

让更多的人能够更有效的使用这部作品，同时也为了让这部作品更好的发展下去，作者另外做出以下明确的声明：

- (1) 这部作品通过网络分发，任何人都可以免费取得此作品的电子版本，并自由地将此电子版本分发给其他人；
- (2) 在没有改变这部作品原貌的前提下，你可以在此作品之外附加你自己的创作，并共同分发给其他人。附加内容包括但不限于阅读笔记，实践心得，评论和勘误等；
- (3) 在没有改变这部作品原貌的前提下，你可以重新改编此作品，并分发给其他人。改编形式包括但不限于增加新的人物和讨论内容，以老师为整理者重新编排此作品等；
- (4) 在没有改变这部作品原貌的前提下，你可以依此作品的框架和内容重新编写成直叙形式的书籍或讲义，并分发给其他人，或用于商业出版；
- (5) 在进行第(3)(4)项再创作活动时，你必须将这部作品声明为参考文献记录在你的作品之中；

作者同时做出以下声明：

- (1) 本人有权根据他人的再创作作品对本作品进行修订，且在修订了本作品之后，必须注明被引用内容的出处；
- (2) 由于他人再创作作品可能在分发过程中被修改，本人在引用这些内容之后，仅需注明这些内容的最近出处，本人没有义务追寻这些内容的原始出处；

最后说明两点：

- (1) 本作品中有很多图片经由搜索引擎从网络上获取，但多数图片的原始出处已经无从考证了，因此有大量图片没有注明出处；
- (2) 不论我是否注明了原始出处，图片的原始上传者都有权要求我删除这些图片，但我不接受以任何条件要求我在图片上或正文中增加其它内容，包括但不限于商业宣传，政治口号等；

# 我的前半生

本来没想写这个作者简介的，不过最近刚好有个电视剧在热播，我就凑个热闹把我自己的一些经历写写。看别人的故事应该是个有意思的事，最重要的是，看过这篇作者简介之后，你大约能明白为什么这部作品最终写成了这个模样。

四十二年前，我出生在北京市朝阳区一个小村子里，这地方位于朝阳区、顺义和通州交界的地方，近首都机场，现在属城乡结合部，三个区政府都不太爱搭理这一亩三分地儿，一切迹象表明这是个开辟革命根据地的好地方。村外，有一条大河自西向东日夜流淌，名曰“温榆河”，在通州汇入京杭大运河，承载着祖辈世代代代留下的故事奔向远方。

我这写得还有点诗意哈，但现实总是骨感的。这条河曾经洪水凶猛，后来一度成为北京重要的污水排放渠道，现在一直在大力治理。如今生我养我的这一片热土都快拆平了，没拆的人家都在“自拆”，大搞房地产建设，推倒旧屋盖两层楼，租给来北京打拼生活的所谓“外地人”。别说什么革命根据地了，蚰蚰儿蛤蟆都已经绝了迹。

上小学的时候我是个尖子生，12岁那年升初中，家里的堂姐夫问了我一句话：“上中学了，有点什么爱好啊？”我那时候只知道念几本课本，哪有什么爱好？于是姐夫给了我一个建议：“自己攒个收音机玩怎么样？”毫不夸张地说，我的前半生大约就是从这一个人说了这一句话而开始的。

我姐夫那时是北京天竺百货商场大肉组的售货员，卖猪肉的，现在这单位早就没了。他是戏迷，没事儿爱唱两句，也喜欢听音乐听歌，前不久还参加了“崔各庄乡葫芦丝暨巴乌协会”，很有才的一个人。那个时候听戏听歌主要靠收音机，所以他自己学了攒收音机，也能给人修理电器。他觉得我也可以试试玩这个，就把他的一堆东东传给了我，包括十来个真空电子管，一大本收音机电路图集，里边有什么“**熊猫牌 507 型五灯收音机电路图**”之类的内容，还有其它一些很古老的电阻电容元件。而当时的我连初中物理课上那点电学知识都还没学，于我而言这些真空管除了看着好玩之外没什么别的意义。

那时候我家已经搬离了那个小村子，倒是也没搬多远，我当时住在朝阳区酒仙桥，这个镇，可以说是苏联援建的，镇上有N个军工厂，什么国营738厂、798厂、北京电子管厂等等吧，都是电子工业的，不过我搬去的时候这些工厂都已经没落了。

我家住在北京人民广播电台804发射台，这单位通过近百米高的天线把无线电广播信号发射出去，在台里随便拿起一部电话放在耳边，就能听见北京人民广播电台828千周的节目，根本不用收音机。要知道828千周具有50千瓦的发射功率，发射机末级功放由巨大的真空电子管组成，是水冷的，冷却水直接输送到职工浴室。因而每到828千周开机广播的时候，就有一群职工家属组团去浴室洗澡，别的时候没热水。

跟我家住对门的是一位在台里工作的行政人员，别看是行政人员，人家五岁起就跟着哥哥学习制作收音机和音响动放了。他得知我开始玩收音机了，就把他的一堆宝贝也传给了我，我记得是装了半个蛇皮袋，那一大堆电阻器啊，都是工厂测试不合格的等外品，用万用表重新测量了阻值，别在一条条像电影胶片似的纸带上。还有若干1950年代和1970年代出版的《无线电》杂志合订本。

这就是我最初的“财产”，可以说物质极大丰富，唯独没有老师教，这使得我没有取得啥大的成就。整个初中我只制作出一台收音机，是从1979年第3期《无线电》杂志上看到的：**《使用低阻耳机的两管机》**，这篇文章由“**杨克信、安玉璟、董旭**”三位作者联合署名。制作这个收音机很不容易，我找个一块废电路板，把所有铜皮都扒掉，利用已有的孔安装元器件，再焊接导线连成电路。有一个叫“高频扼流圈”的元件我还没有，是台里的副台长给我找了一个，应该是维修发射机时拆下来的旧件。由多股的丝包线绕成蜂房式线圈，还有个可调节的磁芯，很有意思。至于其它什么小制作就没啥可说的了，只是些“叮咚门铃”啊，“会眨眼的小猫”之类的小玩意。

貌似我的动手能力还不错哈？这都得感谢三位作者，人家生怕我做起来太困难以至半途而废，特意画出了评细的装配连线图，完全手工绘制，这是何等的耐心啊！这张图就附在本篇文字后面，来自于《无线电》1955年至2005年合订本光盘。现在轮到我开始写作了，我没有这样强大的制图能力，只会利用搜索引擎盗图，惭愧啊。

初中毕业那年我在1989年的《无线电》杂志上看到了一篇介绍“**中华学习机**”的连载文章，“中华学习机”相当于美国“**苹果II**”型计算机在中国的仿制品。那时候正流行家用录像机，我看过一些录像带，《机械战警》（Robocop），《街鹰》（Street Hawk）这类科幻片看得多，对计算机这个东东有一些模糊的了解，于是我就向父亲申请购买一台中华学习机。家父是在报社做编辑工作的，对科学技术没啥了解。好在那时代中国的印刷业正在摆脱“铅与火”的痛苦，他们报社的印刷厂刚引入了**北大方正公司**研制的电脑激光照排系统，于是父亲便向负责照排系统的主管询问给孩子买中华学习机合不合适。

人家给的建议是：“**那电脑已经过时了，买咱们现在用的电脑比较好，用到2000年没问题。**”

印厂有很多用于打字录入的电脑，是与**IBM PC-XT**型电脑兼容的香港组装机，使用日本**NEC**公司的**V20**型中央处理器，这是**INTEL8088**处理器的仿制品，具有640KB的“庞大”内存，无硬盘，只有两台5.25英寸软盘驱动器，还有一台单色显示器。在1991年这台电脑在中国可真算是尖端科技了，至少寻常百姓很少有见过这玩意儿的，但是说这东东能用到2000年就有点太夸张了，要知道仅仅两年后我就买了一台新的386电脑，



换掉了这台机器。

刚刚买这台电脑的时候，家父的同事们都非常不解：“这不咱印厂车间里设备么？家里要这个干嘛？”父亲虽不懂科技，但仍然信心满满地跟大家说：“你们什么都不懂，以后你们家家都得买这个。”真想不到这本是逗贫的一句话竟然一语成谶，现在家父时常提起此事突显其高瞻远瞩，但他从来没学会使用电脑，如今更是连手机都不会用了。

这台电脑刚进家门的那天，我非常兴奋地打开机箱，非常兴奋地看着那几块电路板和板上的一堆芯片，又非常兴奋地把一个拆了外壳的游戏卡插到主板的扩展插槽中，再非常兴奋地打开电源开关，非常兴奋地等着看奇迹，然后奇迹真的发生了，电脑主板非常兴奋地烧掉了，显示器上一片花纹，啥也看不见了。

那个游戏卡是游戏机上用的，可能有人还记得那句广告词哈：“小霸王其乐无穷”。“小霸王”游戏机相当于日本“任天堂”游戏机在中国的仿制品，那时代大家都在玩仿制，日本仿制美国的，中国仿制日本和美国的，现在中国仍然在努力仿制别人的东东，但我们已经开始认识到“原创”的重要性了，必须承认我们一直在进步。

电脑修好后我就不敢瞎折腾了，开始认真地学习一些技术，内心里最期待的还是用这电脑玩游戏。这电脑附带两张 5 寸软盘，一张载有微软公司的 MS DOS 2.1 版操作系统，另一张软盘里有什么我不记得了，似乎是带有“五笔字型”输入法的某个中文系统。我后来自己买了一盒软盘，店家附送了一张游戏盘，有一个赛车游戏，还有一个名为“挖金子”(Digger)的游戏，引导扇区里藏了一个名为“合法大麻”的电脑病毒，这病毒是我后来掌握了一些“高端技术”才知道的。我当时的困惑是为什么赛车游戏可以玩而挖金子却不能玩？我用的 HGC 型显示卡可以显示图型，但板载的 BIOS 并不支持图型功能，那个赛车游戏可以自己启用显卡的图形功能，但挖金子这个游戏却不行。

当时我正读高中一年级，在北京第八中学，这是北京市的重点中学，学校有图书馆和阅览室，阅览室竟然订阅了《计算机世界》这个月刊，其中一期刊载了一篇文章，提出了在 HGC 显卡上仿真 CGA 图形显示模式的方法，但随附的程序是用“汇编语言”写的。我当时只学了“BASIC 语言”，还半生不熟的，为了玩个游戏，我开始学习 INTEL 8088 这个处理器的汇编语言程序设计，从位于北京西四北大街的一间小书店里淘到一本书，汇编编译器没有，就用操作系统中的调试器“DEBUG.COM”将就，折腾了很长时间，终于把那个显卡的图形模式整了出来。

也就是这期间，我发现了在这个游戏软盘上有一个电脑病毒，这类病毒会把正常的磁盘引导程序从引导扇区转移到其它未用的扇区储存，而它自己占据引导扇区，这样操作系统启动前病毒程序先进入内存获得控制权，然后病毒自己再把真正的磁盘引导程序加载至内存中，以便正常启动操作系统。我设计了一个反病毒的方案：当病毒把正常的磁盘引导程序加载至内存执行后，引导程序把磁盘引导扇区的内容读至内存和自己对比一下，如果跟自己不一样，就把它自己重新存回到引导扇区，把里面的病毒覆盖掉。实现这个方案有些小难度，我需要把一个正常的磁盘引导程序改造了，增加一部分代码完成比较回存这样的功能，同时要保证程序总长度不超出 512 个字节，因为引导扇区只有 512 字节容量。这个方案最后还真的成功实现了，并且在报刊上发表了，也正是因为这一点小成绩，家父拿出 8900 块人民币给我买了一台 386 电脑，在 1993 年这可真的是一大笔钱啊。

上高二的时候我拿到了一份微软公司的 MASM 4.0 汇编编译器，这是一起上晚自习的一个女同学帮忙找来的。她表哥当时在北京四通公司工作，四通和联想和方正等等当时都是中关村的招牌企业。很遗憾这位同学给我的帮助最大我却没记住她的名字，这大约是因为她长的不够漂亮吧，那几位班花的名字我就记住了。

后来我考了北京工业大学，学习机械电子专业，整个大学期间我最大的兴趣就在电脑病毒和加密软件的破解这两方面，临毕业前我开始学习一些硬件方案的知识，这主要是为了应付毕业求职，找工作时手里托几小块自己焊的电路板显得比较高大上。

1999 年我大学毕业，这时期互联网开始进入普通市民的家中，我也买了一个调制解调器，经一根电话线接入互联网。我毕业后在北京飞天诚信科技有限公司工作，整整 15 年没有跳过槽，一路做到资深技术员的位置。而入职当时这只是一个算上老总和我一共才 10 个人的小公司。你可能惊奇是什么原因让我为企业服务 15 年之久？这个小公司是由一个 4 人团队创建的，一个非常精练能干的团队，4 个人能力刚好互补，每个人都有独到之处，而且最重要的，这个团队很团结，在企业的发展壮大过程中没有因利益纷争闹分手。我很乐于跟这些开明进取的领导者合作，这使得我的前半生稍微简捷高效一点。

当时公司的主要研究方向是软件版权的保护，产品是一个叫做“软件加密锁”的小硬件，这个小东东安装在计算机的打印机接口上，其内部的处理器能提供一些密码算法，主机上的软件在运行的时候会使用这些密码算法，从而使得软件不能脱离这个小设备独立运行。对盗版者而言他可以简单地复制那个软件，但这个小设备不容易复制，这样软件的版权就得到了保护。我的工作，是给这个小设备开发主机上的“驱动程序”，从而让这个设备能够在“WINDOWS NT”这样的操作系统上正常运转。

对于什么是“驱动程序”你可能完全没有概念，“驱动程序”和操作系统内核一起运行，可以算是操作系统核心的一个组成部分，更高层的应用软件必须通过驱动程序才能操作电脑的硬件。驱动程序出现了错误，会导致操作系统崩溃。很多使用电脑多年的老同志都知道，微软公司的 WINDOWS 系列操作系统有一个著名的“蓝屏”(BlueScreen)，操作系统用一个蓝底白字的屏幕告诉你：“我现在死悄悄了，死之前存储器里有这样一些数据，请你帮我看看我是怎么死的。”

专业人员或许能看懂这个“蓝屏”的意义，但普通用户看不懂。所以当你看到这个“蓝屏”时，你一般只能重启你的电脑，除此外没有别的处理办法，没有保存的文件都会丢失，甚至已经保存的文件都可能出现被破坏的现象。我猜你一定不只一次暗骂微软公司的产品太 LOW 了，现在我郑重地告诉你：很多蓝屏都是由于“驱

动程序”出现错误造成的，跟微软公司没什么关系。

之后公司把安装在打印机端口上的软件加密锁转换到 USB 端口上，这可是有一定难度的，因为在当时“WINDOWS NT”是一个非常重要的主流操作系统，但它不支持 USB 端口，我必须在这个操作系统上开发一整套**驱动程序**，支持 UHCI 和 OHCI 两种不同的 USB 主机控制器，还要支持 USB HUB，最后才是支持我们自己的加密锁。我找了一个简单的路子：从一个名为“**LINUX**”的开源操作系统中提取了 USB 总线驱动程序的源代码，改造之后用到了 WINDOWS NT 上，这使得我们的加密锁比较及时顺利地推上市场。

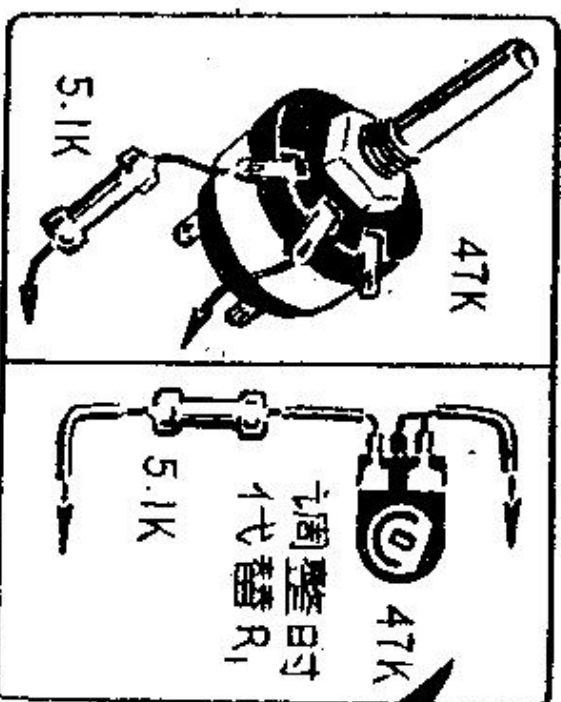
后来某天白天我正在办公室睡觉，我们老总拿来电话告诉我有一位软件工程师从四川打来长途，询问我们是谁开发了 WINDOWS NT 系统上的 USB 驱动程序？因为他也成功开发了这样一套驱动程序，却苦于无人交流，发现我们公司具有了这样的技术能力后，特意打来电话想和我聊聊。我们聊了近一个小时吧，期间我只是“嗯啊这是”的应付，几乎都是对方在说。这倒不是我对前辈满心敬畏，或是我有所保留不愿把自己的经验分享给同行，实在是因为这位前辈说的一口四川普通话过于偏四川了，不是非常普通，我听不太懂啊。

我可以大白天的在办公室睡觉，因为我们老总在办公室里加了隔间，里面放了床，我们技术人员工作累了就可以睡，睡醒了就继续工作，没有固定的工作时间表。这也是一个我为何选择留在这个小公司的原因之一。再之后我们又把“**智能卡**”使用的高安全处理器应用到加密锁之中，并且把网络浏览器使用的“数字证书”存储到高安全处理器内部，这就形成了现在广为使用的用于保护“**网上银行**”安全的“**U 盾**”。“U 盾”的大规模应用使得我们公司获得了迅猛发展，并于 2014 年在 A 股创业板成功上市（**股票代码：300386**）。然后，我就离开了这个公司。

2017 年的我移居到加拿大，PEI 省，大西洋上一个新月形的小岛。我现在投身于“**科学普及**”领域，重点在“**电子与计算机教育**”这个方向。事实上多年以前我就打算自己设计并制作一台微型计算机了，最初的设想是这台计算机具有和“其乐无穷的小霸王游戏机”相当的性能，且能连接键盘鼠标音箱显示器，并具有简单的软件系统能供人实际操作。这个 Project 一直拖拖拖，最后演变成了“**From Ohm's Law to Micro Computer**”这样一个大目标。而在真正写作这个作品时我才发现其实我在电子技术这方面有很大的知识欠缺，甚至有些知识点我是“现学现写”的，因此这个作品最终写成了这样一种风格。我想你通过我上面的介绍也能发现，我这些年真正的工作重点是软件开发，所做的硬件规模是很小的，而学生时代所学习的电子技术非常细碎，不全面且非常业余。

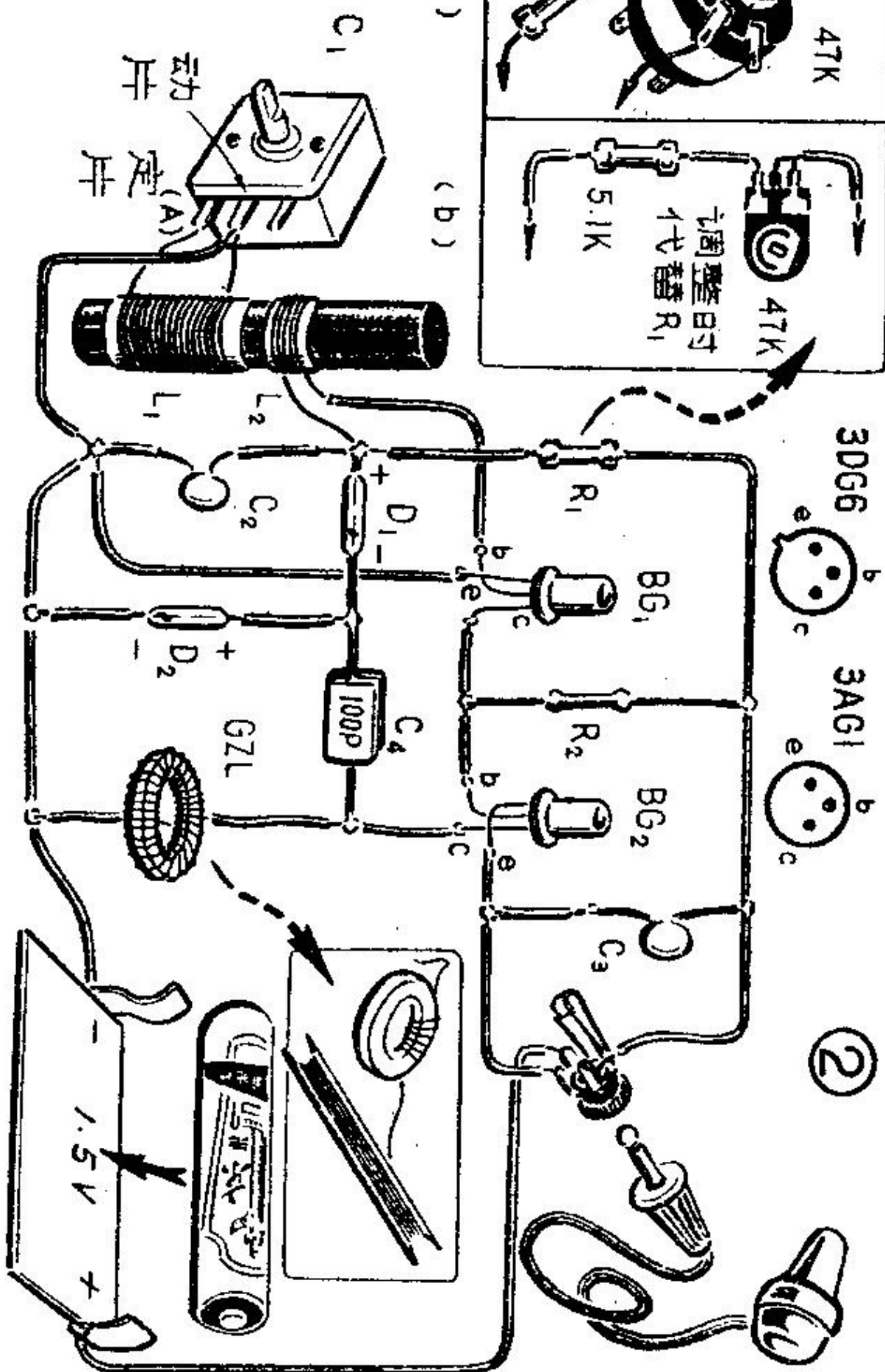
那么以我这样的状况写出这样一个奇异的作品，会不会误人子弟呢？我觉得不会，我认为我的读者普遍具有独立思考能力，具有敢于质疑的精神，我努力做到引导大家思考和提问，而不是全盘接受。我一直相信我们不应该低估当今的这些子弟们，他们没那么容易就被人误了。

如果这个作品能够被大家接受，我在未来打算继续按此风格把整个计算机世界完整地呈现给各位读者，包括但不限于“**C 语言、操作系统、更高性能的 CPU、密码学、图形用户介面、虚拟机、硬件描述语言、编译原理**”等等，甚至“**人工智能**”。这将是一个非常浩大的工程，和王老板那个“先赚它一个亿”的小目标相比可能要更艰巨一点，让我们一起努力吧。



(a)

(b)



## 目 录

第一季剧透.....	- 1 -
第 0 章 引子.....	- 2 -
一、我是一棵小小草.....	- 2 -
二、我的寨主叔叔.....	- 2 -
三、我的电脑.....	- 3 -
四、拜师学艺.....	- 3 -
第 1 章 千里之行，始于足下.....	- 5 -
2005-04-09：这种基础也行？.....	- 5 -
2005-04-13：什么是电.....	- 11 -
2005-04-16：发电与放电.....	- 15 -
2005-04-19：认识电池.....	- 19 -
2005-04-20：电工材料.....	- 22 -
2005-04-21：接插件.....	- 26 -
2005-04-23：印刷电路板.....	- 33 -
第 2 章 初试欧姆定律.....	- 37 -
2005-04-29：认识电阻器（一）.....	- 37 -
2005-04-30：认识电阻器（二）.....	- 41 -
2005-05-02：用开关搭电路.....	- 47 -
2005-05-03：开关与电阻.....	- 51 -
2005-05-04：数字与模拟.....	- 57 -
2005-05-05：二进制数.....	- 62 -
第 3 章 晶体二极管.....	- 64 -
2005-05-09：半导体.....	- 64 -
2005-05-10：PN 结原理.....	- 67 -
2005-05-12：晶体二极管.....	- 72 -
2005-05-15：二极管电路（一）.....	- 77 -
2005-05-17：二极管电路（二）.....	- 82 -
2005-05-18：二极管电路（三）.....	- 88 -
2005-05-20：发光二极管.....	- 92 -
第 4 章 基本电路定理.....	- 98 -
2005-05-23：内阻，极其重要.....	- 98 -
2005-05-24：戴维南定理.....	- 102 -
2005-05-25：叠加原理.....	- 109 -
2005-05-27：基尔霍夫定律.....	- 111 -
小花絮 第一次实验.....	- 114 -
2005-05-29：点亮 LED 数码管.....	- 114 -
第 5 章 电容器.....	- 120 -
2005-05-31：交流电和方波.....	- 120 -
2005-06-01：认识电容器（一）.....	- 125 -
2005-06-04：认识电容器（二）.....	- 128 -
2005-06-05：电容器的品牌.....	- 134 -
2005-06-08：电容与电阻（积分电路）.....	- 136 -
2005-06-10：电容与电阻（微分电路）.....	- 140 -
2005-06-14：电容与二极管（整流滤波）.....	- 144 -
2005-06-15：滤波与隔直.....	- 149 -
小花絮 实践出真知.....	- 153 -
2005-06-18：小游中关村.....	- 153 -
2005-06-19：失败是成功之母.....	- 155 -
第 6 章 电感器.....	- 160 -
2005-06-22：电与磁.....	- 160 -

2005-06-25: 认识电感器 (一) .....	- 164 -
2005-06-27: 认识电感器 (二) .....	- 168 -
2005-06-30: 电感与电阻 .....	- 172 -
2005-07-04: 电感与二极管 .....	- 176 -
2005-07-07: 电感与电容 .....	- 181 -
2005-07-09: 压电元件 .....	- 187 -
小花絮 偷工减料 .....	- 191 -
2005-07-10: 插线板中的小学问 .....	- 191 -
第 7 章 晶体三极管 .....	- 195 -
2005-07-12: 从“话筒”开始 .....	- 195 -
2005-07-15: 晶体三极管原理 .....	- 198 -
2005-07-19: 三极管开关电路 (一) .....	- 204 -
2005-07-20: 三极管开关电路 (二) .....	- 209 -
2005-07-24: 三极管开关电路 (三) .....	- 214 -
2005-07-26: 三极管开关电路 (四) .....	- 219 -
2005-07-29: 场效应晶体管 .....	- 224 -
小花絮 神奇的三极管 .....	- 230 -
2005-07-30: 有趣的三稳电路 .....	- 230 -
2005-07-31: 要命的发射极 .....	- 234 -
2005-07-31: 最后的答疑 .....	- 240 -
第一季终 .....	- 242 -

## 第一季剧透

这一季主要讨论一些电子技术基础知识。

单就“设计并制作一台小电脑”这个目标来说，我们所讨论的基础知识有点过于丰富了，这一季中有些内容其实以后是用不到的，但我认为多说一些有好处，如果你以后真的愿意在电子与计算机领域里深耕，这些额外的内容可以给你打一个很初级的基础。

第一章首先确认一下读者的基础，初中物理课的那一点电学内容还记不记得？而后我们简要说了一下“原子”及其内部结构，这有助于后面理解“半导体”器件的工作原理。本章其它内容与实践密切相关，包括怎样看电路图，实践中所要用的材料、开关/插头类的元件，以及电路板的构造等。

第二章我们首先具体地讨论“电阻器”这种元件，之后把第一章所讨论的“开关”和“电阻器”相结合，讨论仅凭这两个元件能构成什么电路。这里面就包括了在计算机电路中常见的基本概念，比如数字“0”和“1”是怎样用电压高低予以表达的，“上拉”和“下拉”以及“三态输出”，用“欧姆定律”解释“D/A 变换”的原理等。

第三章我们讨论“晶体二极管”，因第一章介绍了“原子”，这一章当然要趁热介绍“半导体”了。之后我们把“二极管”和“电阻器”组合成电路，引出计算机中常见的“与”和“或”两种逻辑电路。这一章最后介绍了“发光二极管”，这是个比较有趣的半导体器件，我们讨论了如何用电阻器配合发光管工作，这也用到了“欧姆定律”。

第四章主要讨论一些基本的电路定理，“内阻”这个很重要的概念，“叠加”我们以后会用到，至于“戴维南”和“基尔霍夫”两个定理则是给你打基础的，在我们以后的学习中它们没有直接的应用。

第五章属于“超纲”的内容，“电容器”这种元件虽然在计算机电路中及常见，但它基本上是用在“电源”线路中，它也用于“振荡”线路中，但是“振荡”是一个偏复杂的概念，我们只讨论了一些简单的原理。这一章把“电容器”和前面讨论的“电阻器”、“二极管”以及“开关”结合成电路，对这些电路我们更多的是从“直观”的角度加以讨论，比较浅显。

第六章和第五章一样属于“超纲”内容，“电感器”也是更多的用于“电源”线路中，我们所制作的小电脑因为比较简单，根本用不到“电感器”。这一章介绍了“继电器”，这是一种很重要的元件，但在我们以后的探讨中依旧是用不到，你自己以后的研究过程中可能会遇到这种元件。这一章依旧要把“电感器”和“二极管”以及“开关”结合成电路，同样是从“直观”的角度加以理解。而把“电感器”和“电容器”组成“谐振”电路就更麻烦，我们只是简单地“定性”讨论一下，主要是为了引出“压电”元件，“石英晶体”和“压电陶瓷”在计算机线路中是用到的，当然，其用法非常的单一，所以我们简单定性讨论就够了。

第七章介绍了“晶体三极管”，非常的重要，大家需尽可能多的理解这一章的内容。我们会把“三极管”和前面章节讨论的所有元器件结合成电路，使大家认识到“三极管”可以做为一种自动化的“开关”加以运用，这是构成现代计算机的基础。

第一季真正需要动手制作的电路是很少的，而且可以不去实做，仅从原理上做些了解即可。我希望读者在经过第一季的学习之后能够对自己的动手能力做个评估，看看自己究竟适不适合继续学习下去。如果连这一季几个简单的线路都不能顺利制作成功，那么你恐怕无法应对从第二季开始的海量的动手实践。当然，做这样的自我评估不应花费太多，所以制作这一季的简单电路不必装备很多工具仪器，也不用购买很多材料，这样即使你确认自己没法继续学下去了，在金钱上也不会有太大损失。



## 第0章 引子

纵观历史，像我这样的纨绔子弟，通常都是要败家的。不过我多少有点好运气，败家之前竟然鬼使神差地迷恋上了“CS”，没错，就是“CS”——“Computer Science”，你以为是哪个“CS”？

所谓“迷恋”，其实就是“上瘾”。现在大家似乎对于“电脑成瘾”都很有反感，我是很不理解为什么不能对电脑上瘾，这是件好事嘛，总比恋上谁的床好很多。

至于我是如何入了“CS”的门，那可是小孩儿没娘——说来话长了。

### 一、我是一棵小小草

其实我并非生来就是纨绔子弟的命，我想这大概就是上天如此眷顾我的原因吧。

二十世纪八十年代的最后一年，我降生在一个普通的工人家庭中。父母总说我生的有点困难，你可别以为是我妈难产，因为我的生日恰好是六一儿童节。呵呵，我一直都知道你那年夏天干了什么<sup>①</sup>。

我的父母亲都在那种“国有大中型企业”工作，这种企业通常和这个词关联紧密——下岗。我到现在也搞不清楚为什么非要把失业叫下岗，把解雇叫减员增效，满员增效不行吗？没那么大本事？那就直接说减员嘛，非要加上个“增效”，还以为你怪不错的呢！

父亲的情况要好些，他有中专的学历，在厂子里干了几十年的“模具”，技术很强。所以父亲没有被贯以“下岗”的名头，而是被“买断工龄”了。还不错啦，总算拿到点补偿，不过我还是依稀记得那一段时间家里的状况“很闷”。

父亲对我的管教相对松懈，这里的“相对”指得是和父亲那些同事相比较而言的。人家那些当爹的大都希望自己的孩子“十年寒窗”求取个功名，想来他们是没经历过这个，觉得自己的孩子应该走走这条道路吧。我父亲对此不以为然，在他看来，“十年寒窗”不如“见多识广”。因此我小时候确实比其它孩子知道的多一些，小学四年级时我就知道怎么样开动“数控铣床”，当然，只是“开动”而已。其他孩子进厂里通常是去浴池的，去过车间的可没几个。按厂里的规定，小孩是不允许进车间的。你知道就行了，这事儿别人我不告诉他。

但是老妈对我可是“呵护”有加，考大学那是顶顶重要的事情。老爸迫于压力，也不得不经常口头关照一下我的学习近况。至于学习成绩嘛，我虽是算不上优等，但也没差到哪儿去，因为我并不厌烦学习，有个别时候我也觉得做习题也蛮有意思的。

说了这许多，你也许有些急了：“我知道你不是个纨绔子弟，你就是个草根。怎么还没提到打CS的事呢？”稍安勿躁，咱马上就入正题。

### 二、我的寨主叔叔

我没提过我有个叔叔对吧？是的，我有个叔叔，清华大学毕业的，学的那是“通信”技术，很牛吧？

叔叔确实很牛，我一直都是这样认为的，不过在我看来他可不是牛在从名牌大学毕业，而是牛在他自己能做收音机。你可能对此不屑一顾：“中学生劳技课上都学做收音机”。呵呵，俺叔儿可是在小学就能自己做收音机了，还是“矿石”收音机呢，这可是高级货，没听说过吧你？

叔叔大学毕业后在一个研究所工作，父亲被买断工龄那年，叔叔也辞了职，跑去深圳找他一个高中的同学合伙办厂，要制造汽车音响。给他们投资的，是他那个高中同学的幼儿园暨小学同学（北京方言管这叫“发小儿”）一个初中毕业后就跟着家长南来北往捣腾音像制品后来去香港发展还被警察抓过（应该是因为盗版）的有钱人。

父亲对叔叔总是支持的，尽管对他那同学的发小儿有点不待见。两年后叔叔回来探家，眉眼间都带着喜气，他们的企业开始赚钱了，但不是造汽车音响，而是造汽车防盗器。很长一段时间我都不知道叔叔的企业究竟是制造什么的，他们好像什么都造，电子玩具，电脑摄像头，网卡，U盘，MP3随身听，后来居然造手机。2008年一个新词开始在中华大地上流传——“山寨”，我才知道原来叔叔跑去深圳“落草为王”当寨主去了。

叔叔对我家和我的影响是巨大的，他借给我父亲一笔钱，让我父亲开了家模具厂，专门制造各种塑料外壳的。有叔叔不断地给订单，父亲的厂也很快发展起来，我也就随着发展成纨绔子弟了。而我用过的两台电脑，也是我这寨主叔叔送的。

<sup>①</sup> 源自恐怖电影《去年夏天》三部曲。

### 三、我的电脑

得到第一台电脑的那年恰好是我升初中，叔叔打着“祝贺咱家这个独苗顺利升入重点中学”的名目，要送给我一台“顶级配置”的电脑以资鼓励。我本以为他会从深圳带个电脑回来，结果他回来是两手空空。不过到家第二天他就拉着我去中关村，进了那个很有名气的大楼<sup>②</sup>里面。

这是我第一次实地领略高科技集散地的风采，感觉和我们家边上的小吃城也差不多。一个一个柜台排得很严实，人倒是比小吃城多，挤来挤去的。我们挤了两层楼，买齐了东西大包小裹的搬回家。叔叔把那些红红绿绿的电路板一块块装进铁箱子里，最后接上电源按下开关，哇！真是一台电脑啊！

我发现我学用电脑还是很有灵性的，一教就会一点就通，甚是轻松。呵呵，我可不是什么神童，从电子游戏开始学当然是一教就会啦，不教都应该会。然而遇上真正的问题可就掉链子了，叔叔回深圳后我有一天突然心血来潮，用螺丝刀把这电脑拆了个七零八碎，把那些电路板挨个儿“研究”了一遍，然后把它们重新装好。接上电源再按开关，显示器一团黑半天啥动静都没有。我有点懵了，把所有电路板拆开又装上，接电按开关，这回有动静了，“嘀——嘀——”地叫个不停，显示器还是一团黑。没办法再拆再装再通电，这回叫声变成了“嘀——嘀嘀嘀”，还是不行。老爸要下班回来了，我只好把铁箱子扣上盖放桌上摆好，装成没事人一样。

这事是不可以和父亲说的，这是台“顶级配置”的电脑，可没少花钱。后来叔叔托以前的同事来我家，以“维护和升级软件”为名把机器修好。我一直看着他弄这个电脑，也无非是全拆开再重新装上，居然就工作正常了。想来高科技的东西最会欺负不懂的人吧。电脑修好后他又教了我一些上网的知识，发电子邮件，查找网页之类。他走了以后我趁身边没人，跑去 YAHOO 查了个“SEX”，呵呵那是相当的火爆啊。

好景不长，才一个学期电脑就被父亲大人没收了，理由是“玩物丧志影响学习”。其实我晓得这都是妈妈策化的，但喊话的必须是老爸：

**“这是给你练打字的！不是玩游戏的！”**

之后我那台电脑被送进父亲的工厂里，把技术员原来用的电脑换掉了。无利不起早，老爸上赶着放话出来也不单是迫于妈妈的压力。

在老爸看来“打字”是件顶重要的技术，他不会用电脑，平时写点什么总得跑去厂里找技术员帮忙。我后来去过厂子里，我那电脑被技术员用来设计图纸，不是打字用。那技术员跟我说这电脑配置高，做三维设计很合适，下了班打游戏也是相当的爽，简直要气死我了。

等我升高中后叔叔又送了我一台电脑，名目是“祝贺咱家这个独苗顺利升入重点高中”，一点创意都没有，还是我初中那个学校嘛。这台电脑是“Dell”牌子的，不是自己买件组装。拿到电脑后我首先把机器拆散了然后再装上，通电开机一切正常，这让我感到心灵深处的阴影被稀释了一些。

可还是好景不长，一个月不到这机器就中了病毒，启动不了了。我找来一个也是正在学电脑的同学一起研究了半天，毫无头绪。最后只好把机器送到维修点，结果被告知机器拆开过了，不能免费保修。机器要先放在那儿，修好后电话通知去取。没办法只好把机器弄到父亲的厂里，让技术员帮助重装了操作系统。

又过俩月，电脑再度罢工，还得找厂里的技术员重装系统。等第三次中招时那技术员一见着我就问：“你经常去那种网站啊？”天啊我无非是下载点软件游戏和电影而已，那些网站只是偶尔，偶尔啊大哥，太冤了我！

不过这屡次中招也确实是刺激了我，我知道那些所谓病毒木马都是些电脑黑客编写的程序，对于数度被别人整治我心里当然是忿忿不平：“就你们厉害啊？凭啥我就是那挨整的呢？不行，我也要学真正的技术，我就不信我练不成高手！”

### 四、拜师学艺

听说我想学习“真正的电脑技术”，父亲高兴的不得了，当即给叔叔打了电话：“你侄儿这回可出息了，准备研究电脑技术了，你可得好好带带他，将来保准不比你差……”。真受不了这些家长，这还八字没一撇呢。

叔叔也甚是欢喜，隔着电话和我聊了一个多钟头，全是他念小学时跟着邻居家老电工师傅学装收音机的事，什么淘矿石绕线圈上房拉天线之类的，我听的云里雾里，那年还没我呢。没过几天叔叔从深圳递过来一个小箱子，里面有一块仪表，一把电烙铁，还有钳子一类的工具，以及若干电子零件。“这犯得着从深圳递回来吗？黑客就用这搞病毒？”

箱子里还带了一封信，读了才知道这些东西都是叔叔正在用的，他怕我不会买这些东西。信里还写了些和那天电话聊的差不多的事情，最后又说什么工作繁忙不能带着我学，什么互联网是个知识宝库要多多搜索之类。

读罢来信我心里忽然有点泄气，他们完全没搞明白我想的是啥，我是对那些搞病毒的看不顺眼想跟他们

<sup>②</sup> 这里指得是“海龙大厦”，现在这个市场不再以电脑配件为主营业务了。

斗斗，给我一把电烙铁干嘛？不过还好，老爸终于不提练打字的事了，想必这些年了他也知道打字不是什么特要紧的技术。

又过了两天我忽然收到叔叔发来的 EMAIL：

我给你找了个老师，他的 MSN<sup>®</sup>为 C++++@163.com。我和这个人常在 www.21ic.com 的论坛上混，此人算不上牛人，但是我觉得由他带你入门还是很适合的。我和他已经打过招呼了，你直接把他加为联系人就行。

也不知道这个叫做“C++++”的人懂不懂病毒和木马，俺叔儿给介绍的应该是还行吧。我特意到 www.dict.cn 上查了下“C++++”的中文意思，竟然是“×-ΦΩΣ”的意思，这人不会有点自卑吧？

我还是把这个“自卑的人”加到了我的 MSN 中，他不在线。于是我慎重且郑重地给他发了个 MAIL：

C++++教授，您好。

我是一个正准备深入学习电脑技术的高中生，是我叔叔把您推荐给我的，他说和您认识，经常去 21ic 的论坛，而且已经和您说好了带我入门。我特意来拜您为师，希望您能在百忙之中给我一些指教。

一个对电脑技术一无所知的孩子

发出这封 EMAIL，我心里忽然有些忐忑，人家要不搭理我可怎么办？不过叔叔和他已经说好了，叔叔不会那么没面子吧？可我现在还是一点基础都没有呢，他会不会教半截就烦我了？唉，我这叔叔也是，只管自己赚钱，赚那么多干嘛，带一带我多好！

---

<sup>®</sup> 以此纪念离我们远去的 MSN。

## 第1章 千里之行，始于足下

我没想过这一封 EMAIL 究竟会给我带来什么，我当时发出邮件后甚至有些后悔，不过现在想来就这一封 EMAIL 使我的生活轨道发生了重要的转变。有时候我常常想，在另一平行时空中的我此时此刻在干什么呢？不会是正在网上找“有色”图片吧？

公元两千零五年四月九日，我终于在 MSN 上收到了一条来自 C++++的消息。

### 2005-04-09：这种基础也行？

C++++：“你还没睡啊？”

凌晨1点，我正在网上漫无目的的闲逛着，MSN上有人加我好友，然后就这样一句，我心中不觉一动：“有门儿啊！？”

Reanimator：“是C++++教授？你也不睡啊？”

C++++：“别喊我教授。你在练哪个游戏？魔兽世界还是CS？”

Reanimator：“没有，我现在不打游戏了，改邪归正了，呵呵。您收着我发的EMAIL了？”

C++++：“是的，你叔叔和我打过招呼了，说让我带一带你。”

C++++：“不过这不表示我就必须收你这个学生。”

这下要完了，遇上了耍大盘儿的。看来我这老叔的面子也不是很大嘛。

Reanimator：“那您干嘛还要加我的MSN？”

C++++：“我得先了解了解你的功底。你叔把你捧得很高，说你特有电子电脑方面的天赋。我想看看是不是那么回事。”

Reanimator：“看来这回我肯定是要摔死了。我叔太不懂得低调了。”

C++++：“也没那么严重。你以前学习过电子相关的技术性的东西吗？或者了解过这些技术类的知识没有？”

Reanimator：“没有学过电子方面的，就物理课上学点电学，这算吗？”

C++++：“电脑方面了解哪些？”

Reanimator：“电脑方面更是啥都不懂啦，只知道上网，打游戏，看片聊天之类娱乐的。”

C++++：“你打字还挺快，还会发电子邮件，你用什么EMAIL客户端？”

Reanimator：“打字我专门练过。”

Reanimator：“啥叫EMAIL客户端？”

发出这条消息我忽然有点后悔，这下可露怯了，没事瞎问这干嘛，不懂就装没看见好啦。

C++++：“好了，说说你的物理课吧。欧姆定律学过了吧？说说是怎么回事。”

我想我给他的第一印象恐怕是恶性的了，他懒得

给我讲什么是EMAIL客户端，看来是想给我出点难题，看我说不出来什么就一推六二五了。

Reanimator：“欧姆定律说的是电压电流和电阻三者之间的关系，就是说流过导体的电流(I)等于导体两端的电压(U)除以导体的电阻(R)。电流=电压/电阻( $I=U/R$ )。”

C++++：“那么电流流过电阻之后，这个电阻发出的热量怎么计算？”

Reanimator：“干嘛要问发热啊？”

C++++：“我问什么还要先征求你的意见？那你认为我应该问什么呢？”

他好像已经有点烦了，我这字打得还真是快啊，竟整这没用的。

Reanimator：“我以为你会问电阻的串联并联和混联呢。”

C++++：“这很重要吗？我为什么要先问这个？”

Reanimator：“这块儿是重点，经常出综合题的，不少分呢。”

C++++：“你可真行，离开分数都不知道这辈子为什么而活着了吧？”

C++++：“还是回答我的问题吧。发热该怎么算？”

Reanimator：“我知道电功率(P)等于电压(U)乘以电流(I)，算发热的话应该再多乘一个时间(t)。”

C++++：“哪儿的电压乘以哪儿的电流啊？”

Reanimator：“是电阻两端的电压乘以流过这个电阻的电流，没错吧？”

C++++：“没错。现在问一下你最关心的那块儿重点，两个电阻串联后的总电阻是怎么计算？并联后的总电阻怎么计算？”

C++++：“两个电阻的大小分别设为R1和R2。”

Reanimator：“串联后总电阻 $R=R_1+R_2$ ，并联后总电阻 $R=(R_1 \times R_2)/(R_1+R_2)$ 。”

C++++：“那么为什么两电阻串联后总电阻要增大而并联后总电阻要减小？”

Reanimator：“电阻串联后相当于导体长度增长了，所以总电阻就增大。并联后相当于导体变粗了，所以总电阻就减小。”

C++++：“不错。看来导体的长度与横截面积与导体的电阻是有联系的，那么是哪一个物理量把它们关

联在一起的？”

Reanimator: “不太明白你说的是什么意思。”

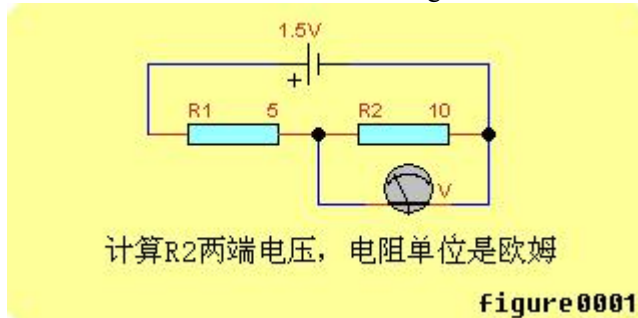
C++++: “如果你知道一根导体的长度和横截面积，你应该能计算它的电阻的，但好像还缺个东西？”

Reanimator: “缺‘肉’<sup>④</sup>！就是电阻率啦。我打不出那个字母。”

C++++: “电路图能看懂吧？我传个图给你。”

Reanimator: “要只有电阻的图还行吧，物理课上学了点。”

C++++: “这个题怎么做？（figure0001）”



Reanimator: “那个V是个电压表吗？”

C++++: “是的。你物理课做过电路实验？”

Reanimator: “做过。您这俩电阻选的很有个性，把数弄复杂一下也算有点难度嘛，完全是送分的题。”

C++++: “我哪有分送给你啊？你就说说思路，整那么难算干什么？”

Reanimator: “这两个电阻总值是15欧，R1是5欧占三分之一，所以它从1.5V电池上分到的电压是 $1.5V \times 1/3 = 0.5V$ ，R2上就是 $1.5V - 0.5V = 1V$ 了。”

C++++: “说得不错，思路十分清楚。”

Reanimator: “这还要思路？还有另一种解法的。”

Reanimator: “总电阻15欧，电池1.5V，所以电路中的电流 $I = 1.5V / 15 = 0.1A$ 。对于R1来说，当0.1A电流流过它时，它上面的电压应该是 $0.1A \times 5 = 0.5V$ ，R2上就是 $0.1A \times 10 = 1V$ 了。”

Reanimator: “这相当于0.1A电流流过R1后，电压在R1上‘降落’了0.5V。”

C++++: “你还知道‘电压降’？”

Reanimator: “当然，这点东西我们物理老师还是门儿清的。”

C++++: “呵呵，你基础还不错。是个可教之材。”

Reanimator: “您先别下结论，怪不好意思的。两个电阻并联分流就不算一道题啦？”

C++++: “你都门儿清胡牌了还算什么啊？”

Reanimator: “就这么点东西咱们就够用啦？这也太简单了吧？”

C++++: “够用一阵子的，不够用的时候再说。”

有门儿啊？我这心里略微踏实了一些。近而我心里忽然觉得又有点好笑，这就算基础不错？咱高中的会考也不只这个水平吧？不过终究是没被人家直接拒了，俺的未来恐怕不是梦了。

C++++: “你看过哪些电影，科幻类的片子多吗？”

Reanimator: “周星星的看得多，科幻类的也多，《终结者》，《侏罗纪公园》，《哈里波特》。”

C++++: “《哈里波特》是科幻电影？”

Reanimator: “《哈里波特》是魔幻类的。”

C++++: “你爱看恐怖片是吗？你的网名是个恐怖片的名字。”

Reanimator: “你也看过这个片啊？这种欧美片子只是恶心，还不是特恐怖啦。日本片子才是真恐怖，我看过《午夜凶铃》。”

C++++: “我说一些片子，你看看有哪些是看过的：《回到未来》，《黑客帝国》，《异形》，《星球大战》，《铁甲威龙》，《第六日》，《人工智能》。”

Reanimator: “《黑客帝国》我看过，没太看懂。《星球大战》和《第六日》我也看过，《异形》听同学说过但没看，是个恐怖的吧？其它的没看。”

C++++: “好吧，电影就谈到这里吧。你小时候有什么玩具值得跟我聊聊吗？”

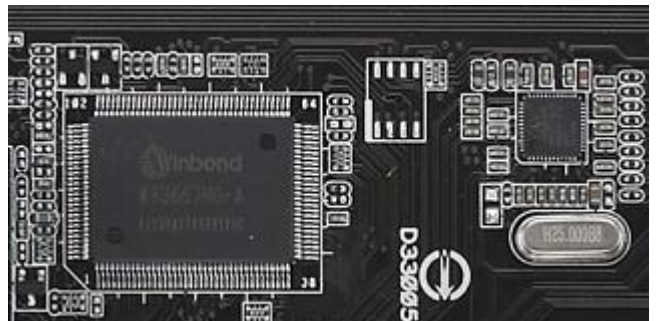
Reanimator: “我不记得有什么好玩的玩具了，我小时候家里也不给买啥玩具。”

C++++: “你小时候拆坏过家里什么东西没有？或者觉得有什么物件比较神奇，特想拆开研究一下？比如闹钟之类的。”

Reanimator: “没有，前两年拆过电脑。头一回拆完再装上就开不了机了。”

C++++: “那你为什么要拆电脑呢？看见什么好玩的东西吗？”

Reanimator: “对那些板上粘的圆的方的东西比较有兴趣。那些黑的方块儿就是集成电路吧？”



C++++: “对，也叫‘芯片’，我们以后也会学到这东西。”

Reanimator: “这么说你决定收我这个学生啦？”

C++++: “我感觉你有可能是块学习技术的材料，何况还有你叔叔的推荐。你在班上成绩排在多少？”

Reanimator: “中间偏上一点吧。我数学和物理不错，英语和化学弱一点。”

C++++: “英语弱的话你得赶一赶，英语很重要。”

Reanimator: “早就知道啦。所有人都说英语很重要。我就觉得学舌挺没劲的。”

C++++: “我不是说套话，我们以后会有很多英文的技术资料，看来你只能在不理解之中加深理解了。”

Reanimator: “了不起查字典呗。我在dict.cn上查过你的网名C++++了，干嘛用这个名字？”

C++++: “C++++这个词在计算机技术中有用到。”

C++++: “好了，我得下去了，过两天我们就开课，我得准备一下。你也早点睡了吧。”

<sup>④</sup> 指得是希腊字母  $\rho$ 。



Reanimator: “那好吧，晚安。”

第一次网聊就这样结束了。我心里说不上是个什么滋味，兴奋是有一点，但也有一些紧张，因为我不知道就凭我物理课上学的那点东西到底算不算“基础不错”。关上电脑后我躺在床上有点睡不着，折腾到凌晨3点多我又爬起来，重新打开电脑，写了一封EAMIL:

C++++教授，您好。

很高兴您能收下我这个学生，您刚才离开的有点匆忙，我还有些疑虑需要和您聊聊。

我觉得您所提出的有关欧姆定律的问题有些过于简单了，我们会考的难度都比您所提的问题要大。就凭这样简单的问题就能认定我适合学习电子与计算机技术，这是不是太草率了？我好歹也拆过两台电脑，那里面的东西看上去是相当复杂，我想起码要考上硕士博士才能研究这些高深的技术吧？

我这不是要打退堂鼓，实在是心里没底，希望能得到您的鼓励。

信发出去，我的心里突然又变得空落落的，我的这个学习的历程究竟会如何开始呢？就在我百无聊赖准备继续睡去的时候，MSN上忽然又有了动静。

C++++: “不要再叫我教授了，我不在学校教书。”

Reanimator: “您还没睡吗？”

C++++: “我有失眠的毛病。你好像没什么信心？”

Reanimator: “吃些枣仁粉之类的，安神。”

C++++: “你认为电子与计算机技术很深奥？”

Reanimator: “当然，反正不是随便谁就能玩的。”

C++++: “万丈高楼也得平地起。”

Reanimator: “坑里起吧，得先开槽挖地基。”

C++++: “我觉得你已经有地基了。”

Reanimator: “就那一点欧姆定律？那算个啥？”

C++++: “我就在你这点基础上，一步一步给你搭台阶。我最终带你制作出一台小电脑来。”

Reanimator: “您这台阶不会很高吧？我一步上不去怎么办？”

C++++: “手脚并用吧，我拽着你。”

C++++: “实在不行我拆两层砖，肯定是搭出适合你的台阶。”

Reanimator: “那您可是够累的了。”

C++++: “好在我只教你一个学生。”

C++++: “不过，我还得提醒你一点。”

C++++: “天才等于 99% 的勤奋加上 1% 的灵感。”

Reanimator: “不说这些套话好吗？说干脆的吧。”

C++++: “说干脆的，这 1% 的灵感更重要。你得经常活动你的脑筋才行。”

Reanimator: “那我現在算有灵感还是没有啊？”

C++++: “我不知道，这得问你自己。”

C++++: “现在我们试着磨合一下，我给你补一点‘电路图’方面的基础。”

Reanimator: “好，没见识过真正的电路图呢。”

C++++: “刚给你那张图上（figure0001）的几个符号都认识？”

Reanimator: “最上面一长一短两竖线是电池的符

号，中间蓝色长方形是电阻，最下面的是电压表。”

C++++: “再加上这个图（figure0002）就是你现在掌握的基础对吧？”

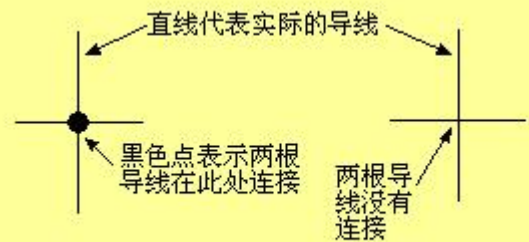


figure0002

Reanimator: “是啊，不过俺还知道开关的符号。”

C++++: “这直线叫‘Wire’，这黑点叫‘Junction’。”

Reanimator: “这就要用英语了？”

C++++: “这些词汇还是积累一些吧。看这个图。（figure0003）”

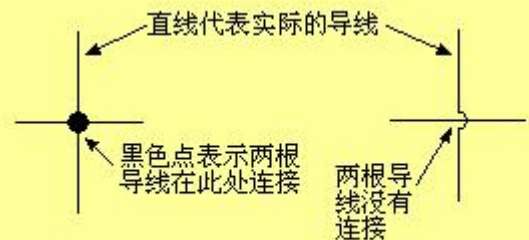


figure0003

Reanimator: “右图画半个圈又是为了啥啊？”

C++++: “半个圈只是一种表达方式，就是声明两根线在这里不连接。现在告诉你省得你以后疑惑。”

C++++: “电源也有多种表达方式。（figure0004）”

Reanimator: “画个电池已经很明确了。”

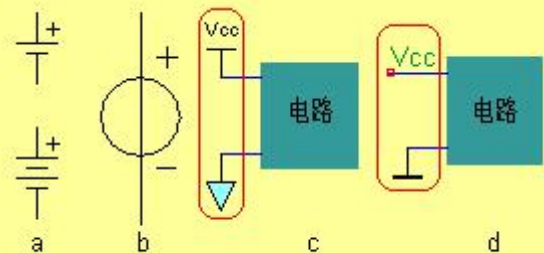


figure0004

C++++: “a 图是电池，b 图是‘电压源’的画法，c 图和 d 图中红色框内是我们常用的表示法。”

Reanimator: “c 和 d 这两种画法可有说道吗？”

C++++: “通常我们把电源的‘负极’选做电路的‘参考点’，规定这一点电压是 0V。图 c 红框中那个三角形和图 d 中的粗横线就表示了参考点。”

Reanimator: “这两个符号就表示电源负极啊？”

C++++: “选电源正极做参考点也行，但负极最常选。如果选负极做参考点，那个 Vcc 就是电源正极。”

C++++: “我们常把‘参考点’称为‘地’，就是 Ground，简称为 GND。”

Reanimator: “为何要有个参考点呢？”

C++++: “电路中其它线路上的电压有多高，都要相对这个参考点来说。因为这个点我们定为 0V。”

C++++: “那三个字母‘Vcc’也有个名字，它叫

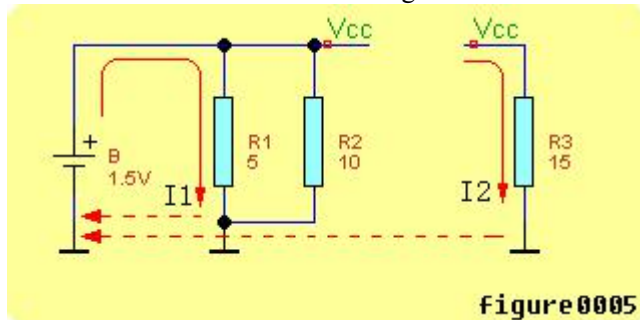


做 LABEL，是个标签。”

注意 LABEL 可以是任意字母和数字的组合，M1/ABC/V89 等等都行。

Reanimator: “你这么说我有点乱。”

C++++: “我们用这个图 (figure0005) 来说事。”



C++++: “第一，图上 3 个 GND 符号，其实它们是连接在一条 Wire 上的。”

Reanimator: “它们其实都是电源的负极？”

C++++: “是同一个电源的负极，只是没有画一条 Wire 把它们连在一起而已。”

Reanimator: “那两个 ‘Vcc’ 也是连在一起的吧？”

C++++: “是的，那两根 Wire 虽然没有用线连接在一起，但由于它们有相同的 LABEL，都是 ‘Vcc’，所以它们实际也是连接在一起的。”

Reanimator: “那就用线把它们接上多好？”

C++++: “很多电路非常复杂，全都明确画出线来连接，那得画多少条线啊？”

C++++: “何况一大堆线挤在一起，你一眼都看不出来谁连着谁，反而更乱。”

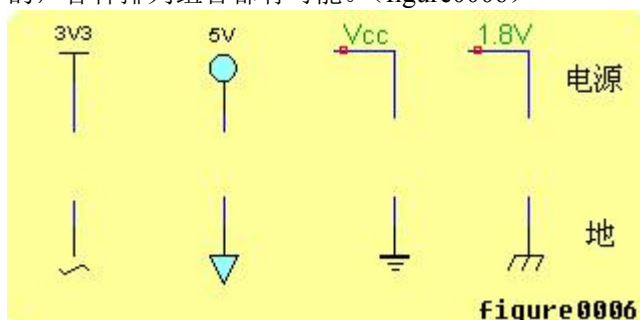
Reanimator: “那红色箭头说明什么？”

C++++: “那是电流，从 Vcc 出来，入 ‘地’。”

Reanimator: “还好不是入 ‘地狱’。这听着倒是有点专业的味道。”

C++++: “其实 ‘入地’ 也就是回到电源的另一极而已啦，没啥专业的。”

C++++: “这个 ‘电源’ 加 ‘地’ 的画法很麻烦的，各种排列组合都有可能。(figure0006)”



一般来说电路图中统一使用一种形式的 GND 符号，有时电路图中有多个形式的 GND 符号，注意只有形式相同的 GND 符号是连接在一起的。不同的 GND 符号之间有何关系通常在图纸上会有明确指示。

Reanimator: “这个 3V3 是个啥？”

C++++: “也是个 LABEL，直接给出了电源电压。3V3 表示 3.3V。如果电阻标了 1K5 就表示 1.5K。”

Reanimator: “这不是自虐吗？就没个标准？”

C++++: “当然是有标准的，但现实是大家经常随意使用符号，各种各样。”

Reanimator: “你还给电阻的符号涂颜色？”

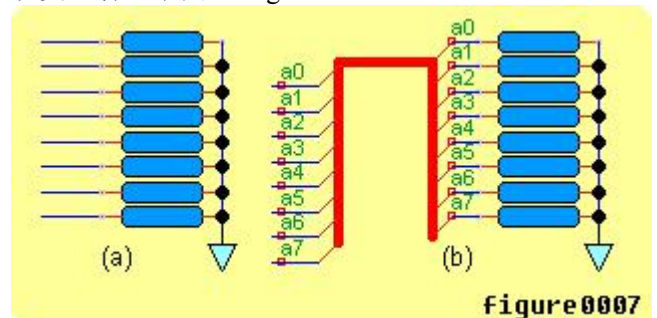
C++++: “是啊，我以后给你的图纸中还有彩色的 ‘象形’ 画法呢。”

Reanimator: “就是按照实际零件的外形来画？”

C++++: “对啊，略微做些抽象。”

Reanimator: “你不会还教美术吧？”

C++++: “就为了活泼一些而已，你得习惯面对现实。看这个图。(figure0007)”



C++++: “图 (a) 和图 (b) 是一个意思，只是两种不同的表达方式。”

Reanimator: “8 个电阻左边连接 8 条线？连接了什么啊？”

C++++: “先不管它连什么吧。有时候我们不愿意画出很多条 wire，所以会把一些性质一样的线汇成一根粗线代替。”

Reanimator: “图 (b) 中的红色粗实线是表示一捆 8 根线？”

C++++: “是的，但每个电阻究竟连接到哪里，要用 LABEL 明确指出来，所以有 a0 到 a7。”

Reanimator: “这好像也没简单啊？”

C++++: “因为我们只画了 8 根线而已。实际的电路图中经常是这边 8 根线一组，那边 16 根线一组，线很多的时候你就看出这种画法的好处了。”

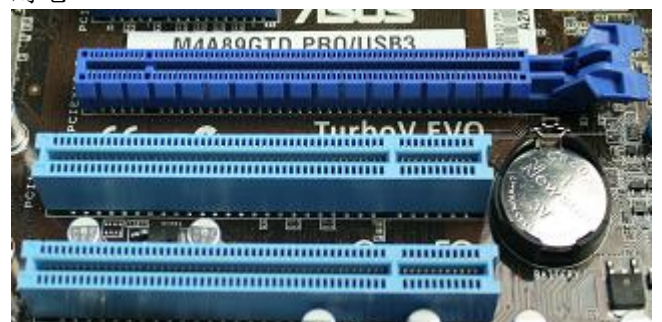
Reanimator: “我不画那根粗实线也可以的吧？”

C++++: “可以，真正有用的是那一组 LABEL。”

C++++: “这根粗实线称为 ‘总线 (bus)’，那些直接连在 ‘bus’ 上的细斜线称为 ‘bus entry’。不画出它们也可以，但画上会有很清楚的指示作用，沿着粗线找 LABEL 就行，不用整张图中到处查找。”

Reanimator: “总线这个词听着耳熟啊。”

C++++: “你电脑的主板上有一些 ‘总线扩展槽’ 对吧？”



Reanimator: “是啊，显卡插那种槽上。”

有些电脑的显卡做在主板上，不是独立插在扩展槽上

的。若不涉及保修问题，你不妨打开电脑机箱看看。

C++++：“总线是计算机技术中的一个专门称谓，就是把一些性质相似的信号线汇集在一起形成的。一组总线上可以连接多个设备。”

这只是对“总线”最浅显的解释，并不严格。

Reanimator：“没听懂。”

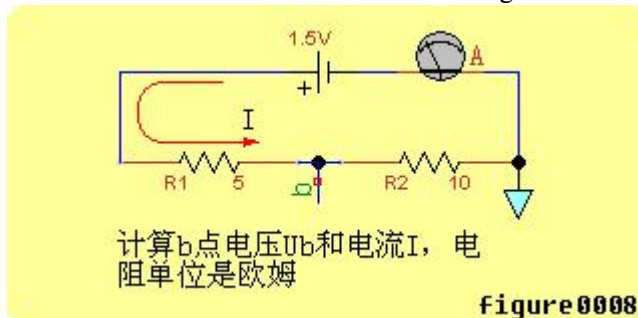
C++++：“你电脑主板上是不是有多个扩展槽？”

Reanimator：“是啊，显卡插哪个槽都可以。”

C++++：“你还可以同时插两个显卡呢。”

Reanimator：“这我还真没玩过。”

C++++：“最后做一下这个题吧。（figure0008）”



Reanimator：“这波折线的也是电阻的符号啊？”

C++++：“对啊，是电阻很常见的画法。”

Reanimator：“为什么要画成波折线呢？”

C++++：“等你真正了解到电阻器的内部结构就明白了，先做题。”

Reanimator：“b点电压是1V，电流I是0.1安。”

C++++：“b点电压相对哪里是1V啊？”

Reanimator：“相对于那个三角形所代表的‘地’。”

C++++：“好了，有关电路图的事，以后随时给你补充。”

Reanimator：“这些图可真够闹腾的。”

C++++：“习惯成自然。”

C++++：“我有一些以前写的东西，你可能已经了解了这些东西，不过还可以再看一看，当做复习吧。”

Reanimator：“那现在传给我吧。”

C++++：“我得从以前刻的光盘上去找，找着了发邮件给你。你先去睡吧，我也要下去了。”

Reanimator：“好吧。晚安。”

再次躺到床上，我还是睡不着。你说，一个超级黑客究竟会是什么样子呢？是不是满脸冷漠整天呆在不見天日的地下室里面对冰冷的电脑屏幕发呆？又或者，是个超级帅歌，在美女解开他裤腰带的瞬间突破了五角大楼的防火墙？<sup>⑤</sup>也可能，是个穿着黑皮衣的美女，靠一根电话线横行在全球的电脑网络中？<sup>⑥</sup>

我想，他最可能是一个普普通通的老百姓，扔到人堆里就找不着的那种，没准儿我住的这座楼里就存在着那么一位。那么，未来的我会是什么样子呢？我可不要满脸冷漠，我最希望身边美女如云，冷漠？那绝不属于我。现实中的C++++又是什么样子？他怎么失眠呢？失眠就容易抑郁，他不会像某央视名嘴那样心理也有障碍了吧？不过从今天的网聊来看好像没那回事，他现在干嘛呢？躺在床上瞪着天花板发呆吗？

他要教我一些什么内容呢？从欧姆定律开始起步，最终制作出一台电脑来，这可真是搭万丈高楼啊。他难道要把计算机的终级原理都教给我吗？黑客难道都要学到这一步吗？去电脑城买配件装个电脑不行么？嘿嘿，要是去电脑城装电脑还用学？连我同学都会啊。还是不想了吧，再想我都要失眠了，天都快亮了，还得早起上学呢。

<sup>⑤</sup> 参见电影《剑鱼行动》。

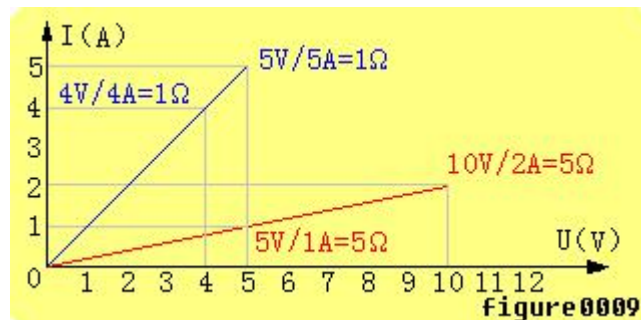
<sup>⑥</sup> 参见电影《黑客帝国》。



## 本节补充说明

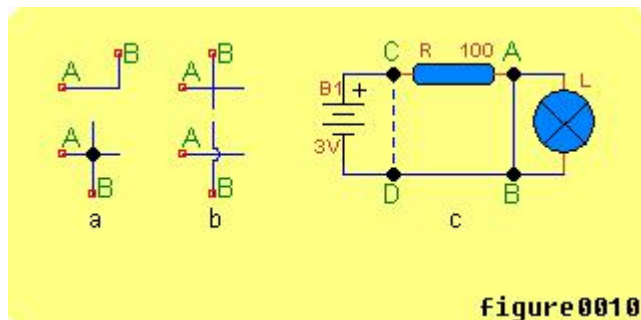
想通过本教程进行学习，你需要具备何种基础？这在本节之中做了些概括，就是你初中物理课上学的：

欧姆定律的内容，也就是电阻、电流和电压之间的关系。或者说，针对电阻这种元件，它两端的电压（伏特）与流过它的电流（安培）之间的关系。我们称之为电阻元件的“伏安特性”，这可以用一个图（figure0009）来表达，红色和蓝色的斜线表达了电阻，需注意它们都是直线，在这些直线上任取一点计算出的电阻都是同一个值，这个特点我们常称其为“线性”。



应牢记电阻的串联与分压，并联与分流。电功率的概念和计算方法。一些基本的电路图符号，如电池、电阻、开关、灯泡的画法。用电压表测量电压时应将仪表“并联”在被测的两点，而用电流表测电流时则应将仪表“串联”进线路中。我们没有提及电源的“串联”，这算是个生活常识，两节 1.5V 的干电池“串”在一起，可以形成 3V 电压。那么两节电池“并联”会怎么样呢？这种情况略有复杂，现在暂不讨论。

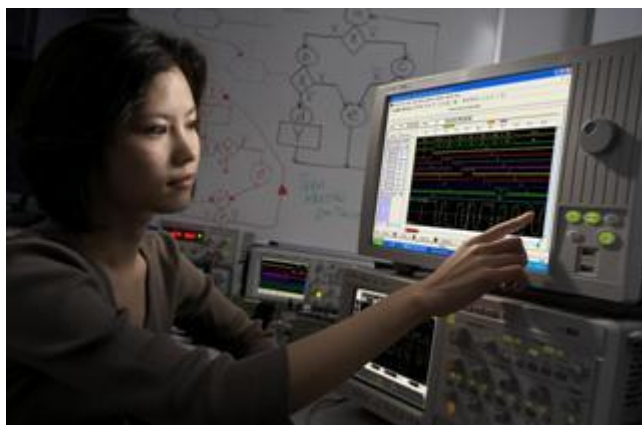
电路中两点之间可以通过电流，可称此两点间为“通路”。无法通过电流的称两点间“断路”或“开路”。若两点间的“用电器”直接并联了一根导线，使得电流直接流过导线而不流过“用电器”，则可称用电器被“短路”。图（figure0010）中（a）部分 AB 间是通路，（b）部分 AB 间是断路，（c）部分 AB 间是短路。如果 CD 间也被导线连接的话，那么 CD 间也是短路的，而且此时是电池被直接短路。会造成电池（和导线）大量发热，是不能接受的。而 AB 间仅是用电器（灯泡）被短路，当电阻 R 较大时（如图示的 100Ω 或更大）不会对电池有任何影响。当然，两种短路都会造成灯泡不亮的情形，因为电流将通过导线流动，不会再经过灯泡。或者说，电流爱走阻力最小的线路。



你初中应该没了解过“电路参考点”的，其实就是我们在电路中约定电压为 0 的一点。多数情况选在电源的负极上。比如由一节干电池形成一个电源，当参考点选在电池负极时，电池正极就对外供出 +1.5V 电压。而如果将参考点选在电池正极时，电池负极就对外供出了 -1.5V 电压。而如果是两节电池“串联”，参考点还可以选在两节电池的中点，这时电池正极对外供出 +1.5V 电压，同时电池负极对外供出 -1.5V 电压。这是“正负双电源”供电，需注意正负电源不是一定要对称的，+5V 搭配 -15V 完全可以，一切由实际需要决定。

我无意界定究竟具有何种个性和爱好的人才能学习电子技术与计算机科学，本节中所提及的“爱好喜剧、科幻乃至恐怖电影”仅是作者自己的一些兴趣而已，并不意味着只有具备这些爱好的才适合继续学习。不过“业内”确实有一种另类的看法可以介绍给诸位，那就是“女性一般被认为不适合研究电子与计算机”。支持这个观点的“理论基础”是女性的思维方式过于“感性”，逻辑和推理能力太差。尽管在现实中确实可以发现多数企业的研发部门中很少见到女性的核心人物，但我仍然认为这个结论过于扯淡。我认为关键问题还是在于你到底是不是觉得研究这些东西“很有意思”？这跟什么感性思维并无太大关系。女性不太容易对科学技术之类的内容发生兴趣，因为她们自小就（被）喜欢毛绒玩具洋娃娃这样的东东。

为了鼓励更多的女孩子对科学研究产生兴趣，我在本节的最后放上两张照片，是关于女电子工程师的。照片来自于互联网，我并未获得任何授权在本篇文档中使用这些照片。如果照片所摄的当事人认为我使用此照片不妥，请告知我删除这些照片。



## 2005-04-13：什么是电

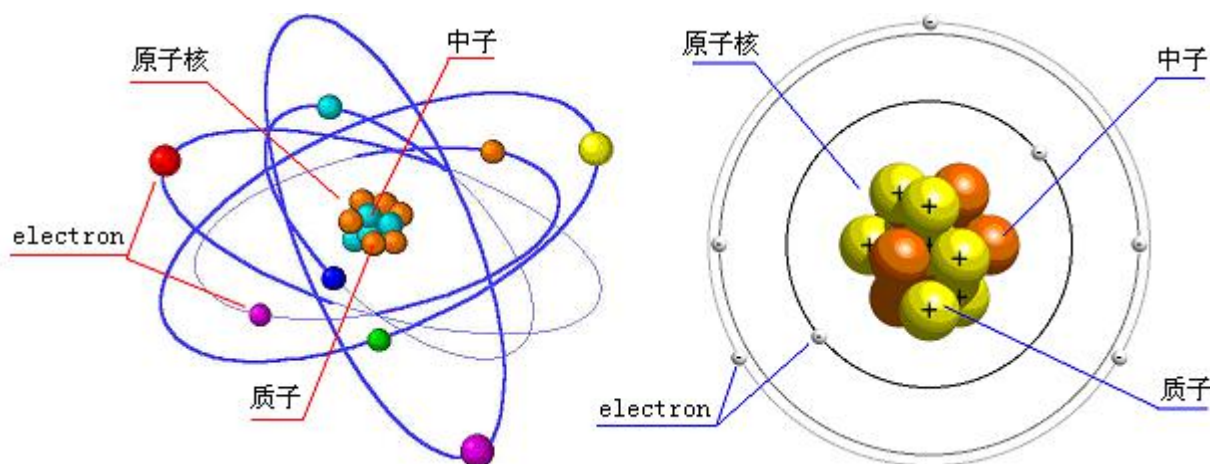
百无聊赖地在网上闲逛了一会儿，跑去查了下电子邮件，收件箱空空如也，硬挺着耗了半个小时左右，终于收到了一封电子邮件，还附了一个 PDF 文件的。

附件中的“PDF”文件让我有点犯难，PDF 是个什么东西？不过我这回留了个心眼儿，没有着急忙慌地就回信询问，而是跑去 [www.google.com](http://www.google.com)<sup>⑦</sup>上搜了下：“怎样看 PDF”。哈，挺简单的嘛。

### 我们这样理解“电”

C++++: 2003-08-26

通过中学的物理与化学课程，我们已经知道物质都是由“分子”、“原子”这样一些小微粒组成的。这其中的“原子”则是体现物质的物理化学性质的最重要的粒子。它可以细分为一个原子核与围绕原子核不断运动的一些更小粒子组成，图（1）是表达原子结构的一些示意图。



图（1）原子结构

原子核仍然可以细分为两种更小的粒子——质子和中子，而绕核旋转的小粒子则被称为“electron”。这些“electron”之所以要围绕原子核转动，是因为质子对它们有吸引力，每有一个质子就可以吸住一个“electron”，因而在“正常”的原子之中，质子的数量与“electron”的数量相等的。稍后我们会了解到，物质的物理化学性质与“electron”关系密切，其中质子对“electron”的吸引力与“电”的关系尤为重要。

以上给出的，是表达原子结构的一个“模型”，这是一种“观点”，说得再明确一些，那就是“我们认为”原子的结构是这样的。那么现实世界中的原子究竟是什么样子的呢？这我只能说：“呵呵”。

这个模型基于经典力学理论建立的，现在物理学已经进入的“量子”时代，以量子力学的视角重新审视原子时，我们会得出完全不同的原子结构模型。但就我们将要学习的内容而言，采用这种经典力学模型已经可以正确解释很多现像了。

有关这些小粒子的种种性质我们没有足够多的基础知识将它们全部研究透彻，然而有一个要点我们必须牢牢把握：不同物质的原子各不相同，然而各种原子所具有的“electron”都是一个模样的。把铁原子和铜原子的“electron”各取一个交换一下，铁仍是铁，铜仍是铜。而铁之所以不是铜，那是因为铁原子有 26 个质子，而铜原子有 29 个质子，或者说原子核中的质子数决定了它们是不同的物质。

由于各种元素的原子核中质子数都不相同，所以我们可以按质子数的多少把各种原子排成队列，比如按质子数从少至多的顺序可以得到图（2）所示的队列（每小格左上角的数字为质子数）：

1	H2	He3	Li4	Be5	B6	C7	N8	O9	F10	Ne11	Na12	Mg13	Al14	Si15	P16	S17	Cl18	Ar19	K20	Ca
氢	氦	锂	铍	硼	碳	氮	氧	氟	氖	钠	镁	铝	硅	磷	硫	氯	氩	钾	钙	

图（2）原子顺序排列

然而这个队列无法解释很多特殊的现像，比如“氢、氦、氩”这三种气体具有十分相似的化学性质——特

<sup>⑦</sup> 以此纪念离我们远去的谷歌。无法使用谷歌的读者请自传行换用其它搜索引擎。



别的稳定，很难发生化学反应，而它们在这个队列中却看不出有什么关联。

进一步的研究表明，原子核外的“electron”排布是有规律的，这些“electron”只能沿一些固定的“轨道”绕核运动，离核最近的一条轨道上最多只能容纳两个“electron”，且一旦这条轨道上真的存在两个“electron”，那么在这条轨道运动的“electron”就会进入一个特别稳定的状态。

这可以解释为何“氢”的化学性质十分稳定，氢原子只有两个“electron”，刚好稳定地运行在第一条轨道上。相对而言“锂”的化学性质就很活泼，因为它有三个“electron”，其中两个处在稳定的第一条轨道上，第三个被挤到第二条轨道上，非常不稳定，容易逃离原子核的束缚。

当第二条轨道上的“electron”达到八个时，这条轨道上的“electron”们就会进入稳定状态，因此第 10 号元素“氖”的化学性质也是特别的稳定，它的十个“electron”刚好占满两条轨道。同样的第 11 号元素“钠”因为多了一个“electron”在第三条轨道上转动，所以其化学性质也是异常的活泼，遇到水就能燃烧爆炸。

对于第 18 号元素“氩”，它有 8 个“electron”排列在第三条轨道上，由于第三条轨道是最外层轨道，这条轨道上就只能是 8 个“electron”，此时该条轨道也是稳定状态。而“氩”元素的原子核外有四条电子轨道，由于第三轨不是最外层，所以该轨道上有 18 个“electron”，第四轨上有 8 个“electron”，也是稳定的。

由此我们可以把图（2）那个“一条龙”式的队列重新整理一下，得到图（3）所示的一个大表格，这就是鼎鼎大名的“化学元素周期表”。可以看到最右侧的一个竖列（粉色）中都是化学性质相当稳定的“惰性元素”，在它们的原子核外，“electron”们都稳定地排布在每一层轨道上。

1 H 氢																	2 He 氦				
3 Li 锂	4 Be 铍															5 B 硼	6 C 碳	7 N 氮	8 O 氧	9 F 氟	10 Ne 氖
11 Na 钠	12 Mg 镁															13 Al 铝	14 Si 硅	15 P 磷	16 S 硫	17 Cl 氯	18 Ar 氩
19 K 钾	20 Ca 钙	21 Sc 钪	22 Ti 钛	23 V 钒	24 Cr 铬	25 Mn 锰	26 Fe 铁	27 Co 钴	28 Ni 镍	29 Cu 铜	30 Zn 锌	31 Ga 镓	32 Ge 锗	33 As 砷	34 Se 硒	35 Br 溴	36 Kr 氪				
37 Rb 铷	38 Sr 锶	39 Y 钇	40 Zr 锆	41 Nb 铌	42 Mo 钼	43 Tc 锝	44 Ru 钌	45 Rh 铑	46 Pd 钯	47 Ag 银	48 Cd 镉	49 In 铟	50 Sn 锡	51 Sb 锑	52 Te 碲	53 I 碘	54 Xe 氙				
55 Cs 铯	56 Ba 钡	57 La 镧	72 Hf 铪	73 Ta 钽	74 W 钨	75 Re 铼	76 Os 锇	77 Ir 铱	78 Pt 铂	79 Au 金	80 Hg 汞	81 Tl 铊	82 Pb 铅	83 Bi 铋	84 Po 钋	85 At 砹	86 Rn 氡				
87 Fr 钫	88 Ra 镭	89 Ac 锕	104Rf 𬓪	105Db 𬓫	106Sg 𬓭	107Bh 𬐭	108Hs 𬐮	109Mt 𬐱	110 Uun	111 Uuu	112 Uub										

图（3）化学元素周期表

这个表不仅反映物质的化学性质，也反应物质在电学应用中的不同行为表现。比如对于最外一层“electron”数量偏少的元素，像“铝、铁、铜”等，它们通常容易导电，因为最外层的少数“electron”们很容易离开原子核跑掉。而最外层“electron”数量达到稳定状态的元素，像我们刚才提到的“氢、氖、氩”等，都不易导电。像“硅、镓、锗”之类的元素，其最外层“electron”数量居中，它们具有一些独特的电学性质。

有了以上一些基础知识，我们就可以了解电是怎么回事了。正如前文所述，质子对“electron”具有吸引力，当质子总数与“electron”的总数量相等时，这种吸引力我们是觉察不到的，而当质子数与“electron”数不相等了，比如一个“electron”离开了原子核落在地上，这个原子就会“发飙”，或者说它“来电”了。它会努力从周围其它物质的原子中抢一个“electron”过来，以便重新达到“质子和 electrons”的平衡。

如果你的手指不幸触碰到这个原子，手指上的一个“electron”就会被抢走，这个手指会抢胳膊上的“electron”，胳膊会抢身体上的“electron”，身体会抢腿上的“electron”，腿会抢脚的“electron”。如果你的脚恰好踩到了落在地上的那个“electron”，那么一切都恢复平衡。而你，很幸运，你被“电”到了。

你被“电”到的全过程相当于什么呢？是不是相当于那个落在地上的“electron”经过你的身体重新回到了失去它的那个原子？那么“电”又是什么？“电”其实就是质子与“electron”之间的吸引力，就是一群在质子的吸引下沿着一条道路快速且整齐地奔跑着的“electron”们。

这并非是对“电”所做的严谨的定义，但于你而言说到这个程度已经足够了。

这篇短文写得挺有意思，但我不明白他为何要夹杂一个英文词“electron”，这不就是“电子”吗？如果这个词必须使用英文的话，那为何质子和中子却用了中文？真的是搞怪啊。而且这短文中漏了一个要点，电子带负电，质子带正电，异种电荷相吸引，但同种电荷要相排斥才对吧？另外，这个原子为何要失掉电子而产生电呢？他要失掉质子的话也应该产生电吧？

还好不到 11 点的时候 C#（++++排成两行两列就是#）登录上 MSN，聊聊吧，看他有何说法。

我：“你的文章中为何夹杂英文？”

师：“我不是海龟，没那些习惯。”

我：“海龟也未必都这习惯吧？您这是什么用意？”

师：“我是想暗示你注意一点：名称只不过是代号，不要过于注意名字。”

我：“注意名字也没什么大不了吧？”

师：“我怕你抠字面的意思搞名词解释，比如问这个为什么叫‘电’子而不叫其它什么子？”

我：“呵呵，你这倒提醒我了，我还真想钻一回牛角尖，这个绕原子核转动的小微粒为什么叫‘电’子，不能在‘子’前面冠上其它字吗？”

师：“能啊，可以冠其它的字，甚而可以冠上多个字，比如叫‘伊莱克纯’子。”

我：“这像是个日本 AV 女优？”

师：“呵呵，其实‘electron’这个词源自古希腊语，它的原本意思是‘琥珀’，所以这个词译成中文应该是‘琥珀’。”

我：“虎子是条狗，住我们家楼上。经常半夜乱叫，可招人恨了。”

师：“西方人先观察到由琥珀引起的电现象，后来发现这个小微粒是电的缘故，于是就把‘琥珀’这个词变化了下给这个小微粒命名了。”

我：“我们是先观察到雷公电母，后来知道西方人用了个‘琥珀’来解释这个，我们感觉不太合中国的理念，于是就把它译为‘电子’了？”

师：“应该是这样吧。所以如果是由你给这小微粒起名字，你大概会把个阿猫阿狗的名字安在它身上，也就不会问‘为什么叫这个？’了。”

我：“别人恐怕会问我为什么它叫阿猫阿狗，呵呵。”

我：“你没有写电荷之间‘同性相斥，异性相吸’这个现象。”

师：“对，这点忽略了。多谢提醒。”

我：“那你说，质子都带正电，它们之间如果相排斥的话，它们又是如何组成原子核的呢？”

五分钟过去了，MSN 上一直静悄悄的。他难道走了吗？好像没有，他还在“联机”状态。再等等吧，也许在接电话。又过了一会儿，我有点等不及了。

我：“在吗？忙什么呢？”

师：“我在 GOOGLE 上搜‘质子 排斥 组成原子核’这几个关键字。”

我：“你不知道啊？我还以为你什么都知道呢。”

师：“你特失望是吧？心都碎了？”

我：“没那么严重，早知道你答不了这个问题我就不问了，我自己也会搜啊。”

师：“好啊，你自己知道上网搜资料，我能省不少心。”

我：“你都搜到了什么？”

师：“强相互作用力，是质子和中子结合成原子核的作用力。这已经不是电学问题了，我不懂。”

我：“那就算了吧，你说原子为何要失去电子而显示电现象呢？”

师：“它不失去电子还能失去什么呢？”

我：“它可以失去质子吧？”

师：“这你还是仔细想想吧，我这短文中有些提示的。”

这回还看走眼了，我心里有点郁闷，在哪里有提示呢？难道是这两句：“把铁原子和铜原子的‘electron’各取一个交换一下，铁仍是铁，铜仍是铜。而铁之所以不是铜，那是因为铁原子有 26 个质子，而铜原子有 29 个质子。”

我：“是我读的不仔细。如果铜原子失去的是一个质子而不是一个电子，那它就变成镍了，就不再是铜了。”

师：“你可以在搜一下‘裂变 核反应 原子弹’这样的关键字，可以了解更多一些。”

我：“怎么还有原子弹的事啊？”

师：“质子在原子核里，原子失去质子的话，应该算‘核’反应了。”

我：“好吧，我感觉还是有些收获，你这小文章挺好玩的，以后还有吗？”

师：“有啊。这些小文章不一定叙述的准确，仅做科普用。”

我：“对我来说也够了。我们下次聊些什么内容？还是欧姆定律？”

师：“我们下回聊有关发电、放电的话题。”

师：“你这就要走了？”

我：“我还没写作业呢。明天还有考试。”

师：“真够累的！忙去吧。”

下了 MSN，我抻了个懒腰：“作业、考试，是够累的。查一下原子弹再受累去。”

打开浏览器上了 GOOGLE，打上“裂变 核反应 原子弹”几个字，居然搜出来一篇《业余条件下如何自制原子弹》的文章来，敢情还有比我更累的呢？



## 本节补充说明

了解一些原子结构的基本知识,有助于我们了解电子技术中经常用到的材料,比如最常见的导体“铜”、“银”和“金”,它们扎堆在一起,属于“过渡元素”。其原子的最外层电子很容易脱离原子核的束缚成为“自由电子”,因此它们很容易导电,所以称其为“导”体。最常见的“半导”体材料“稼”、“锗”、“硅”、“砷”,它们的最外层电子数通常为3个、4个或5个,常称为“III-V族元素”,它们有一些独特的电学特性。

我们现在说导体中的“自由电子”定向运动形成了“电流”,这很不确切,稍好一点的说法是“电荷”的定向运动形成“电流”。不过既然我们更多的提到“电子”,那就直接用“电子”来说事。我们可以观察导体内部的一个“截面”,如果1秒钟内有 $6.24146 \times 10^{18}$ 个电子从此截面上通过,我们说此导体中流过的“电流”是1“安培”。这种用数电子个数的形式给“电流”定量是很不严谨的,稍好一点的说法,是 $6.24146 \times 10^{18}$ 个电子所带的“电量”是1“库仑”,1“安培”等于1“库仑”每“秒”。我不愿纠缠于这些文字之中,大家可上网去找更严谨的定义。

想理解“电压”稍微麻烦一些,我们弄几杯水来类比一下,说地面上有3杯一样的水,我左手把1杯水托到1米高,这我肯定付出了“能量”,如果我就这么托着杯子不动,那么这些能量就成为这杯水的“势能”。我现在用右手把另外两杯水托到0.5米高,水多一倍但高度减了一半,我右手付出的“能量”和左手是一样的,问题是我左手一歪的话,左手杯中的水会流到右手杯中,而我右手一歪,右手杯中的水却只能流到地上,不能流进左手杯中,这是为什么呢?

**“废话,水往低处流嘛。”**你心里是这么想的吧?

我们这样解释这个事:我们现在把“势能”平摊到一杯水上,左手只有一杯水,所有势能都是它的。右手有两杯水,虽然其总的势能和左手杯一样,但一平摊的话一杯水就只有一半势能了。我们把“一杯水”具有的势能称为这杯水的“水势”,所以左右手的“水势”不同,而水只能从“水势高”的地方流到“水势低”的地方,水势之差可称为“水压”(这不同于我们通常了解的那个用“大气压”来衡量的水压)。而三杯水的起点,也就是那个“地面”,我们可规定其水势为0,称之为“水势零点”或“水势参考点”,这三杯水的水势都是相对这个“地”来算的,这样就可以定量研究水势了。

现在把水换成“电荷”,把一个电荷从“电势零点”移走一段距离,再把两个电荷从电势零点移走一半距离,它们的“电势能”相同,把电势能按电荷数量平摊一下,就有了“电势”的概念,它们的“电势”可是不同的。电荷可以从电势高的地方向电势低的地方运动,电势之差就是“电压”了,其单位是“伏特”。

“安培”可用字母“A”表示,取单词“Ampere”的首字母。“伏特”可用字母“V”表示,取单词“Volt”的首字母。1000伏特可写成1kV(1千伏),这里的“k”就是“kilo”的首字母,大写还是小写大家经常不讲究,应该是小写的。1/1000伏特可写成1mV(1毫伏),这里的“m”就是“milli”的首字母,一定要小写,因为大写的“M”表示“Million”,是1000000(100万)的意思,1MV(1兆伏)实在是够高的,大自然中的闪电或许有如此高的电压。1/1000000伏特可写成1 $\mu$ V(1微伏),这里的“ $\mu$ (读做‘缪’)”代表“micro”,因为大小写的M都被用到了,只好用个希腊字母对付过去。更小的量还有1nV(1纳伏:1/1000000000伏特)和1pV(1皮伏:1/1000000000000伏特),“n”是“nano”的首字母,“p”是“pico”的首字母,都是小写的(可见k也应该小写)。把“V”换成“A”之后,就是针对电流单位“安培”来说了。

**“兆千毫微纳皮(Mkm $\mu$ np)”**我们以后会经常使用,大家必须记住。

关于字母的大小写问题还是再补充一点,大写的“M”表示100万,却读作“兆”,这算约定俗成吧,感觉上有点别扭。有人认为它之所以是大写并非因为小写字母“m”被“毫”占用了,而是它本来就该大写。因为比“兆”更大的单位还有“吉”,用大写的“G”表示(Giga: 1000000000),比“吉”更大的单位是“替”,用大写的“T”表示(Tera: 1000000000000),既然更大的单位都用大写字母,显然“兆”也应该用大写的“M”,“千”也应该是大写的“K”,只有比1小的单位才用小写字母。这也是一种观点,大家了解一下即可。

## 2005-04-16: 发电与放电

这两天有点背，上上次考试成绩提高了一截，老师给老爸打了电话表扬我一把，结果这老两口甚是欢喜，给我开了个会，要我再接再厉。

“平时多用功做点习题集，那不给你买了不少吗，没事儿别老玩儿电脑上网，老上那网有什么用啊？考学靠那个啊？”老爸喝点小酒就爱唠叨这个。

我真受不了了，要不不看他是一家之主我非把他那箱子五粮液折马桶里。老喝那个有什么用啊？健康靠那个啊？

耗到夜里 11 点多，我打开电脑登上 MSN，C# 已经在网上了。

师：“怎么才来？这两天干什么去了？”

我：“没事，这两天作业多了点。”

我：“上回考得不错，老爸让我再接再厉，少玩电脑多做习题。”

师：“就是前天的考试？”

我：“不是，更早一次的。别提前天的考试了！”

师：“好吧，不提了。我们今天聊一下有关发电放电的内容。”

师：“所谓发电，就是让原子失掉一些电子。”

我：“就这么简单啊？有啥可说？”

师：“道理确实简单，实践起来就有的说了。”

我：“用丝绸摩擦玻璃棒，用毛皮摩擦橡胶棒。实践也很简单。”

师：“你这只是发电的方法之一。而且古希腊没有玻璃棒橡胶棒。”

我：“想起来了，是琥珀。用狗皮摩擦琥珀，琥珀从狗皮上得到电子带负电，狗皮失去电子带正电。”

这里对正负极性的判断是否正确？

师：“有狗招你啦？你不会是恨透了楼上那条狗了吧？”

我：“它现在正叫得欢呢！你听！”

师：“我上哪儿听去啊？”

师：“摩擦能起电的一个要点就是我们借助摩擦向原子中注入了能量，从而使电子与原子核分离。”

我：“所谓‘机械能转化为电能’？别再说这些东西了行么？物理课上听够了。”

师：“这种办法形成的是‘静电’，在电子技术中这个东西是有害的。”

我：“生活中它也不是有益的吧？”

师：“光也具有能量，光线照射到某些材料也可以使电子脱离原子核的束缚。”

我：“这就是太阳能电池了吧？”

师：“对。按现代物理学的世界观，光具有‘波粒二像性’，你可以把光看作是由很多‘光子’组成的。”

我：“又得上网查了。你肯定说不清楚啥是‘波粒二像性’对不对？”

师：“呵呵。你可以理解为‘光子’撞击原子后把电子从原子中撞出来。这被称为‘光电效应’。”

师：“光电效应由德国物理学家赫兹发现，而爱因斯坦因为成功地从理论上解释了光电效应的原理

而获得诺贝尔奖。”

我：“爱因斯坦说的‘光子撞原子’？”

师：“我只知道他解释了这个，具体怎么解释的我不清楚。”

我：“爱因斯坦因为这个获诺贝尔奖？不是相对论啊？”

师：“我们下面要讨论一个非常重要的发电方法。有一类化学反应与原子的核外电子密切相关，叫‘氧化—还原’反应。”

我：“又是化学，这不是我强项。”

师：“比如氢气在氧气中燃烧，实际上就是两个氢原子各自献出一个电子供给一个氧原子。进而和氧原子结合在一起，成为水分子。”

我：“氧原子最外层是 6 个电子，加上两个氢原子贡献的，就是 8 个电子了，这就达到了稳定结构对吗？”

试问如此一来氢原子核外有几个电子环绕呢？

师：“你化学怎么会学的不好呢？”

师：“不说化学了。总之在这种反应之中，出现了电子的转移，这是发电的基础。”

我：“你不是说我们平时喝的水都有电吧？煤气灶点着了是在发电？”

师：“我是说这类反应是发电的基础，‘着火’不是发电，但‘长锈’的过程就是发电的过程。”

师：“我给你发个图片，你看看。”



图片来自 2lic 论坛，保存图片时未记录发布者，后期考证应该是 sharks 网友发布的。

我：“这个是什么戏法儿？”

师：“那三片水果是柠檬，上面贴了铜钥匙和硬

币，底面可能贴了螺丝钉，就是锌，而柠檬中有酸。”

我：“螺丝钉不是铁么？”

师：“它表面通常会镀锌。”

师：“也没准儿是别的金属。总之它们发生化学反应的结果是令铜和锌上的一些电子被柠檬酸夺走。也就是金属被‘腐蚀’了。”

我：“那发出的电在哪儿？铜和锌失去电子带正电？柠檬得到电子带负电？”

师：“如果反应就这样进行下去是不会有电的，但我们可以用一根铜线把钥匙和锌连在一起。”

师：“这时会有个特别的现像产生，锌中的电子会沿着铜线跑到钥匙这边，从这边与柠檬酸结合。而钥匙自身的电子却不那么容易被柠檬酸夺走。”

我：“那就是螺丝钉比钥匙烂得快些？”

师：“对，螺丝钉和一些铁质水管上经常镀锌，目的就是牺牲掉锌而让铁慢点生锈。”

我：“锌失去电子带正电，钥匙带负电。”

师：“先别急着下结论。在这样的反应中，化学的能量推动电子运动，也就是转化成电能，这就是现在我们使用的电池的原型。”

我：“水果电池是吗？图片上好像有个电子表，是怎么回事？”

师：“那是一个小电脑，里面用程序给你呈现了一个电子表。这个‘柠檬电池’给它供电。”

我：“这玩意儿也是个电脑？我以为电脑都是大铁箱子的。”

师：“这个电路板背后有一颗集成电路。集成电路里面的电路结构与基本工作原理和你那大铁箱子里面是相同的。这个集成电路是由德州仪器公司设计制造的。”

我：“你能看透电路板却不能看透柠檬？不是吧？”

师：“你还真有点幽默感？！这是来自 21ic 论坛上的图片，人家原作者在论坛上发帖时说了芯片型号的，我哪儿看得见？”

我：“德州仪器？除了扒鸡外德州还能制造这么神的东西？”

师：“受不了您这点幽默感了，这个德州是美国的德克萨斯州。”

师：“你别再神侃了，说正经的。还有一种重要的发电方法，你玩过磁铁没？”

我：“玩过，从音箱的喇叭上拆下来的。针掉床底下我妈就拿这东西找。”

师：“磁铁分南北两极，同极相斥，异极相吸，这个知道吧？”

我：“知道。这好像和电很相似，只是不叫正负极。干嘛叫南极北极呢？”

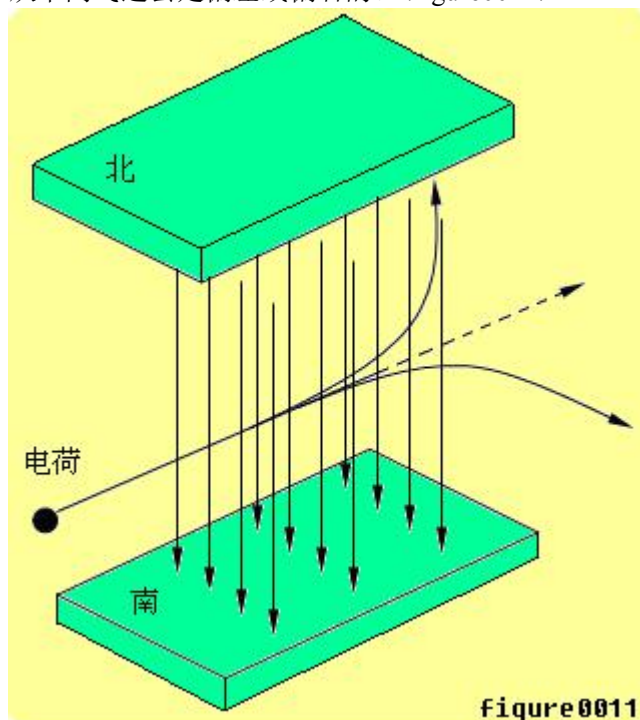
师：“因为人类先观察到磁针能指南北嘛。不叫这个叫什么？男极女极？这只是个名字而已。”

师：“重要的是南北异极相对时它们之间有吸引力，而一个电子从相对的两极间飞过它也会受到力的作用。”

我：“那是被吸向南极还是北极呢？”

师：“都不是。如果两个磁极是一上一下，电子

从中间飞过去是偏左或偏右的。(figure0011)”



我：“那到底是偏左还是偏右啊？”

师：“我不记得该怎么判断了。总之电子受力和磁极间的吸力是垂直的。”

我：“你当老师还能‘不记得了’？”

师：“如果磁性足够强劲的话电子可以转圈盘旋在两个磁极之间。”

我：“这倒有点意思。”

师：“我们把电子受到的力称为‘洛伦兹力’。”

现代物理研究中常用到一种极重要的设备，叫“回旋加速器”，大家可自行了解一下。

我：“这跟发电有什么关系吗？”

师：“你可以设想如果一根铜杆横着从两磁极之间穿过，那么铜杆中那些‘自由电子’在‘洛伦兹力’的推动下就会偏到铜杆的一端。”

师：“如果磁极之外有一圈导线连着铜杆两端，这些电子就会顺着导线回到铜杆另一端，然后继续被‘洛伦兹力’推动，如此循环。”

我：“这东西也就想想罢了，能做出什么实际模型之类的么？”

师：“你肯开动想像力琢磨这个情景就行，就怕你想都不想。你可以设想用两根绳子吊着铜杆在磁极之间摆动。”

师：“这就是‘发电机’的基本原理。我们墙壁插座上出来的电就是由‘洛伦兹力’发出来的。”

我：“原理倒是不难，可我想不清楚发电机会是个什么样子，真是绳子吊起来一根杆？”

师：“那是个机械原理问题，先不必深究。肯定不是绳子吊着棍子摆来摆去。”

师：“好了，有关发电我们就讨论这些。下面来说放电。”

我：“放电就是那些被拉走的电子重新回到原子中的过程对不？”

师：“原理就是这么简单，不过从实践的角度来看还有一些可讨论的内容。”

师：“你设想一下：两个电极分别有正电和负电，也就是一个电极上缺电子另一个电极上多电子，你把它们相对放置。”

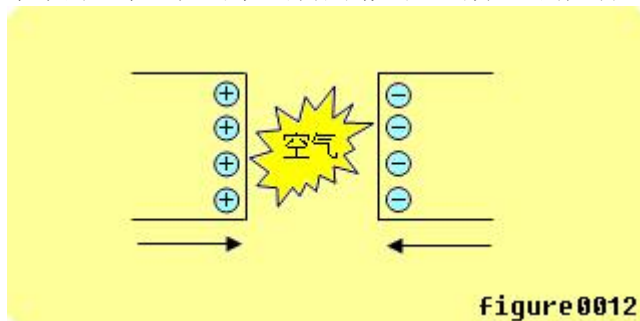
我：“两个电极互相吸引？用导线把它们连起来吗？”

师：“不连。你现在把它们慢慢靠近，距离越近吸引力越强对不？（figure0012）”

我：“对啊。近到一定程度后电子因为受引力太大就直接飞到对面去了，不用导线连接。”

师：“你还真机灵，这都想到了？”

师：“电子飞过去的速度是很快，很有力量。它会和隔在电极中间的空气激烈摩擦碰撞，把空气分子中的电子也撞出来。形成闪光和‘噼叭’的声音。”

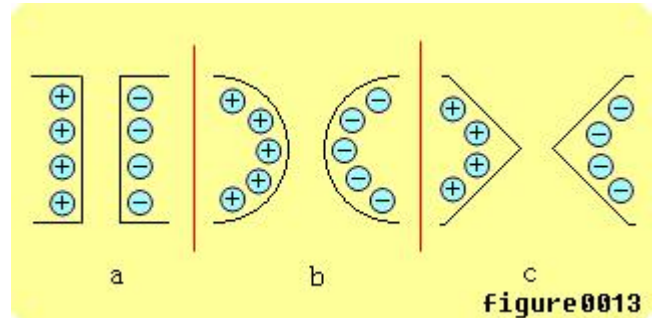


我：“这个叫‘电离’对吗？是闪电的成因吧？”

师：“这个情形我们也说电极间的空气被‘击穿’了。”

师：“像这样激烈的放电通常不是我们需要的，必须加以避免，所以要弄清楚这种放电现象何时容易发生。”

师：“我再发你一个图（figure0013），有这样三种电极，你看看哪个容易发生这种激烈的放电。”



我：“这个我学过了，我选 C，尖端放电原理。”

师：“这回对了。尖锐的电极容易激烈放电，简称为‘尖端放电’。”

师：“所以高大的建筑物上经常看见尖儿朝上的铁叉子，那就是为吸引闪电雷铁叉子而不露建筑。”

我：“我知道，那个是‘避雷针’。不过我觉得应该叫‘引雷针’才对。”

师：“避雷针通过电线接到了大地上，闪电打中避雷针后电流直接被引入了大地，对建筑物不会有损伤。”

我：“要这样看那么地球可以容纳很多很多的电流啊？”

师：“那些电子本来就是它的。”

师：“不早了，今天就聊这么多吧，下次我们从电池开始聊。”

我：“离欧姆定律还远着呢吧？啥时候复习完啊？”

师：“那么想尝鲜？慢慢来吧。”

已经快凌晨 1 点了，我匆匆关了电脑，爬上床躺下却又毫无困意，脑子里还想着“电池”。“对了，差点忘了。”我翻身从床上下来，披件衣服打开电网连上网络，打开 GOOGLE 的主页输入了“水果电池”几个字。这时房门开了一条缝：“你还不睡啊？明天不上学了？快睡觉！”妈妈在门外低低的声音说。



## 本节补充说明

静电在电子技术中的害处，是它经常造成一些半导体器件的损坏，所以工厂中负责焊接的工人一般会配备一个叫“防静电手环”的防护用品，套在手腕上，用于及时放掉身上产生的静电荷。对于我们这些爱好者在家中进行焊接，大可不必过于担心静电。现在的集成电路（芯片）对于静电的耐受能力还是比较强的，不能耐受静电的器件我会提醒你注意。

本节提及“光电效应”，仅是为后面进一步讨论半导体器件做些铺垫，本教程中并未有实际的电路运用了感光元器件或光电池。

对电池和发电机原理的讨论其实是为揭示“电源”的功用，它就是推动电子运动起来的动力源。而电源推动电子运动的能力，我们称其为“电源电动势”，它的单位也是“伏特”，和“电压”是一样的，所以通常就被称为“电源电压”。

“洛仑兹力”除了解释发电机原理外，将来还会在讨论“显像管”原理时用到，大家需注意正电荷在磁场中运动一样受“洛仑兹力”影响，但“偏转”方向与负电荷相反。

“击穿”这个词以后会很常用，不单空气会被击穿，其它绝缘材料在过高电压的作用下都可能被击穿。“尖端放电”原理我们将在讨论“电路板”和“焊接”时用到。



## 2005-04-19：认识电池

晚上一直忙于写作业做一些习题集，顾不上打开电脑了。折腾到近 11 点钟，总算把第二天要交上去的活儿忙完了。我觉得应该把刷牙洗脸拉粑粑的时间挤出来，看看 C# 是否把他的短文发来。

果不其然，一封来自 C# 的 EMAIL 已经在收件箱之中了，附件里有个 PDF 文件。

### 认识电池

C+++: 2003-04-17

相信这世上每个人都用过电池，即使刚出生的小宝宝，恐怕也有一两件玩具是要装电池的。一般人都清楚电池有 5 号、7 号之分，有干电池和充电电池（不能说是湿电池）之分这样一些简单常识，但是**不同厂家不同品牌不同新旧的电池最好不要混起来用**，这样的注意事项就不是所有人都清楚了。而对于我们将要成为电子爱好者的这一群人，我们又应该了解哪些关于电池的知识呢？

很遗憾一个电子爱好者对电池的了解并不需要比一个普通人多很多，但是爱好者需要了解得更“专业”一点。这种专业不是指把“5 号电池”说成“AA 型电池”，而是指真正知道“5 号”究竟意味着什么。

这个“号”的含义，就是指电池的外形尺寸，而电子元件的外形尺寸，“圈内”人通常将其称为“封装（Package）”。对电池来说我们应该知道普通干电池和充电电池都是圆柱形的，不同的“号”数对应不同的高度和直径。当然我们还需知道电池正负极的结构，普通干电池和充电电池的正极是一个凸起的小圆台，负极则是底部一个平面。

确切地说，我们使用电池时仅将顶部凸台做为正极，将底平面做为负极，其实整个电池外壳应该都是负极。正负极的“结构”中不只包括一个凸台和底平面的。

电池也存在着特殊的构造——纽扣电池是一个好例子，它是“扁平”的圆片状，正极是一个平面，通常有“+”号指示，另一面是负极；手机用的锂离子充电电池的形状和电极引出方式各不相同。这两类电池应该说多数普通人都很了解，而有一种电池相信很多人都不太熟——“积层电池”，也常被称为“叠层电池”。这种电池是方形的，正负极是“子母扣”式引出。



图（1）纽扣电池

图（2）积层电池

了解了这些眼睛能看得到的内容，我们还应该知道一些用眼睛看不到的内容，比如制造电池所用的材料和方法。这决定了电池的性能，通常是关系到电池能使用多长时间。你可能认为这似乎并不是一个工程师应该关心的事，工程师只管设计电子产品，使用产品的用户才会考虑买哪种电池。其实工程师们也仅仅可以对电池漠不关心，除电池外的其它各种元件我们都需要仔细了解制造它的材料和方法，以及它的内部结构，否则你要用错了元件，原理上正确的电路未必能实际制作出来，制作出来也未必能达到设计的性能。

如果你制作一个充电器，或者你的产品中内置了不可更换的充电电池，那么你必须对电池有深入的了解才行，否则你无法给它充电。当然，现在有很多现成的电池充电管理方案，但我仍然建议你对电池做些研究。

现在常用的干电池制作材料以锌和锰为主，价格低廉容量适中，可用于收音机、电子钟这类耗电较小的电子装置。改进型的锌锰电池称“碱性锌锰电池”，容量较大，可用于相机、电动玩具。这类电池经常使用汞之类的重金属材料，因此必须回收妥善处理以免污染环境。

现在此类电池有低汞环保型的。



我们生活中常用的充电电池以镍镉和镍氢为主，镍镉电池含有重金属镉，不利于环保且多次充电后性能会下降，因而已经淘汰。镍氢电池做为镍镉电池的换代产品，具有镍镉电池的优点，且能耐受更多次数的反复充电。

充电电池中目前较优秀的品种就是“锂”电池，很多人认为这种电池除了价格贵之外几乎没什么缺点，其实它有一个很神奇的特点：如果**充电不当**它有可能爆炸。而最古老的品种是“铅酸”电池，顾名思义是以金属铅和酸性液体构成的。这种电池也不够环保，但是它的容量可以做的很大，或者说“单位容量”的成本较低，因而目前在车辆上仍然广泛使用。

最前沿的电池是“燃料电池”，其中之一利用氢和氧化合成水的过程来发出电力，这种反应可不是氢气在燃烧，我们大可以理解为“氢在生锈”。燃料电池可输出强劲的电，未来将用在电动汽车上。

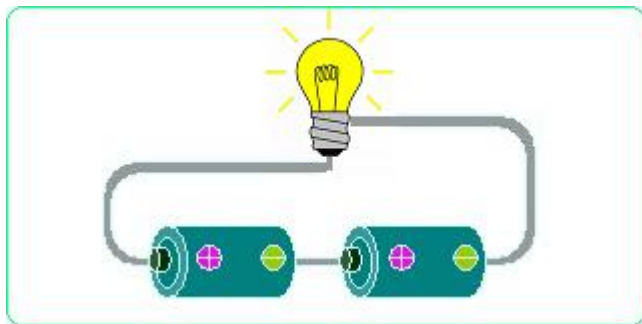
最后是我们这些电子爱好者最需要了解的内容，那就是电池的电学参数和它们的应用方法。对于普通的干电池，每一节可以对外提供 1.5V 电压，单节镍氢充电电池可供出 1.2V 电压。这是尽人皆知的常识，但一些特殊构造的电池就不是大家都清楚的，比如常用的积层（叠层）电池单块可供出 9V 电压（还有 6V 和 15V 规格的），单颗纽扣电池可供出 3V 电压，单块锂电池可供出 3.6V 电压。

如果新买回来的 5 号干电池尚未投入使用，用仪表测量其电压，可发现电压高过 1.5V，甚至高过 1.6V。刚充满电的镍氢电池其电压也过高过 1.2V。

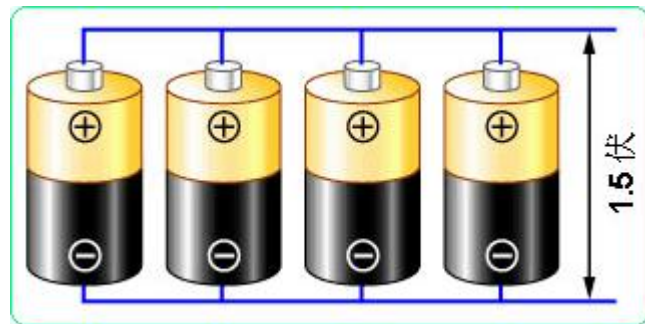
随着使用时间的推移，电池所能提供的电压会逐步下降，当电压低到一定程度时，这个电池就不能继续使用了。充电电池可以进行充电，干电池就只能报废。充电电池通常使用“安时（Ah）”或“毫安时（mAh）”来表达容量，“1000mAh”的意思是指这节电池如果对外输出 1000mA 电流，那么它可以连续放电 1 个小时。在这 1 小时之内，它能把输出电压维持在可接受的范围内，1 小时以后就保证不了电压了。

这里对“Ah”及“mAh”所做的解释是很粗糙的，也无需精确地搞名词解释。一些电池的技术文档中会有“放电曲线”图，可以给你很直观地说明这个电池放电过程。

若要获得比单节电池更高的电压，可以把多节电池“串起来”用，也就是前一节电池的负极接后一节电池的正极，所获得的电压为所有电池电压之和。如果希望获得“大电流”而不是高电压，那么**理论上**可以将电池“并起来”用，也就是两节电池的正极连接在一起共同做为正极，负极连接在一起共同做为负极。



图（3）电池串联



图（4）电池并联

生活中常见电池串联，但是不常见到电池并联，原因在于电池“理论上”可以并联使用，但是真想并联的话其实还需要解决一些问题，是略有些麻烦的。

读罢这一篇短文，我赶紧拿出我的 CD 机，掏出里面的电池仔细研究了起来。那是镍氢充电电池，外皮上印了“MAXWELL”商标，还写了“ダイナミック 1700”。这就是容量吧？1700mAh？不敢确定。转圈把外皮看了个遍，最后发现一行小字“1.2V/min.1600mAh”，容量在这儿呢。

之后又从老爸手里抢来电视机的遥控器，把里面的 7 号南孚电池掏出来研究了下，1.5V 是不用说，死活没找着是多少 mAh，外皮上印了个“聚能环”字样，看了下电池负极，好像是有个环。“这个圈儿可以聚能？一节顶六节？不懂。”

“你小子发什么神经呢？习题册都做了么？”老爸又冲我瞪眼，“把遥控器拿过来，你弄它干嘛呀？”

“给你！”我没好气儿的说，一股脑把遥控器和电池塞到老爸手里，转脸儿赶紧回了屋。

老爸这回倒是没死乞百赖地冲我吼，他惦记着那下半场球呢。

再度阅读了一下这篇短文，一些疑问在脑子里逐渐形成，我本想给 C# 回了一封 EMAIL 的，可忽然想起来，为何不先问问谷歌呢？于是我重新接上网络，打开 GOOGLE 主页，输入了一个关键字——3 号电池。

说不好到底有没有 3 号电池，4 号和 6 号电池也从没看见过。GOOGLE 搜出的结果显示不少人和我有同

样的疑问。从 GOOGLE 给出的一些页面可以了解到 3 号电池是有的，只是不多见，4 号和 6 号电池应该没有。

之后我输入了第二个关键字——干电池充电。我印象中似乎听同学说过，碱性电池也能充电。GOOGLE 显示了不少干电池充电器的广告，看来是真的有这回事儿。翻了几页后发现一个有点技术内容的页面，该页面提到干电池充电器并不是真正为电池充电，而是利用电刺激干电池内部的化学物质，激发它的活性，使电池能发挥一下余热而已。干电池顶多刺激一次，再用完了就没法充第二次了。

我是没法判定这种说法有没有科学依据的，不过现在所有干电池都印有“不可充电”的警示，相信这个警示应该是有它的道理。没想到两个问题这么容易就解决了，再搜个一个“电池并联”吧。

这次倒是搜出了不少技术贴，但是看得一头雾水，有些名词比如“内阻”不大清楚是怎么回事。不过通过几个网页倒是可以看出如 C# 的短文所提及的，电池并联使用确实是有些麻烦。

“嘿哟！这大臭脚诶！！算了，这破球实在没法看了！！”，老爸突然发了神经，半夜猛的来这么一嗓子，惊的我小心肝扑腾扑腾的。楼上的虎子是烦人，老爸这是吓人，也太震撼了点。

“你让不让人睡觉啦？怎么那么讨厌呢！！”老妈也在卧室喊了起来，“你别看了行不行啊？孩子明天还上学呢你不知道啊？”

“他还没睡呢，你喊什么啊？刚跟我抢遥控器呢。”老爸从来都有话说，“你先睡，我不喊了行不行？让我看完了，哈！”

我断开网络关上电脑，不早了，洗洗睡喽，楼上的虎子，你可千万别学俺老爸啊！

## 2005-04-20：电工材料

今天可是难得有点清闲，我吃过晚饭就爬到网上，一边查阅八卦新闻一边和一个空姐 MM 聊天。正聊得高兴，C# 突然插进话来。

师：“我给你的短文看过没？没问题吧？”

云上漫舞：“等一下，我这就发给你，上星期新照的。”

“云上漫舞”这个网名纯属虚构，如有雷同实属巧合。

我：“你来啦。我的问题我自己都‘放狗’解决了。”

Google 音译为“谷歌”，但也被音译为“狗狗”。

云上漫舞：“收啊。这张是在我家小区院里照的，光线有点暗。”

我赶紧接收 MM 发来的照片，这照片有点大了，也不知道几百万像素的，传起来还挺费劲。

师：“你还真长进了啊？问题全搞掂了？”

我：“还行吧，还有一些不是很把握的。你说干电池到底能不能充电？”

师：“碱性电池没电之后可以做些处理。不过普通的充电器不好使。”

云上漫舞：“衣服穿得有点随便，不显胖吧？”

我：“不胖不胖，你经常去健身？”

我：“那么干电池的充电器有什么特别之处？”

云上漫舞：“是啊。我们要求很严，体重超了可不行。”

我：“体重超标影响飞行安全是吗？什么飞机这么敏感？”

云上漫舞：“没有的事。再发你一张艺术照，很好的。”

师：“我没深入研究过这东西，只是了解一点。据说干电池充电器是‘脉冲’工作的，不是连续地为电池提供充电电流。”

我：“脉冲？就是充 1 秒停 1 秒再充 1 秒这样？”

师：“可能吧，我了解的就只有这些。最好不要给干电池充电，要充漏了汤很麻烦的。”

我：“漏汤是什么意思？”

我：“有漏汤的没有？”

云上漫舞：“什么漏汤啊？”

我：“我是说有漏点的没有？”

云上漫舞：“有啊，当然。”

师：“漏汤就是电池里面有液体渗出来，那些液体有腐蚀性。”

云上漫舞：“我发一个给你吧，一定要看哟。”

我知道她肯定发来一些恐怖的东西，想整蛊我？嘿嘿，俺可是老油条了。

我：“南孚电池那个聚能环是什么？一节顶六节那个？”

师：“这个我也不知道，你可以去专利局的网站上查一下，<http://www.sipo.gov.cn>。”

我：“那就先不忙了，以后再说吧。”

我：“我搜到一个新名词，内阻，是什么意思？”

云上漫舞：“怎么样，这张很过瘾吧？”

师：“内阻我们以后会讨论的。今天要讨论一下电工材料。”

我：“不错，有点新意，不是复习那些陈谷子烂芝麻。”

师：“呵呵。我们以后要接触到的电工材料无非两种——导体和绝缘体，先说哪个？”

半导体材料的相关知识我们以后专门讨论。

我：“怎么又是这些东西？还以为这回能有点新鲜玩意儿呢。”

师：“不把这些东西给你串一下没法开始后面的内容。你在学校了解过‘焊锡’吗？”

我：“这个还真不知道，那你就说一说吧，我听着。”

师：“常见的导体无非‘金、银、铜、铁、锡’，其中‘铁’在电子学中用的不多，它通常用于高压远距离输电。”

我：“高压线啊？这个我见过，一座一座的铁塔，上面的电线是铁的？”

师：“可能是铝包铁吧，铁比较结实，而且便宜，远距离输电很合适。”

师：“我们以后最常接触的导体是铜，铜的导电性能世界第二。”

我：“那世界第一肯定是黄金了。”

师：“错啦，你个傻小子就这水准？给你复习一下你还不耐烦呢！”

我：“不是黄金吗？我还真忘了，初中物理教过这个没有？”

师：“导电性能世界第一的金属是银，不是金。银的电阻率是最小的。”

我：“是电阻率‘肉’，我想起来了。”

师：“黄金也经常被用到，不是因为它的电阻率小，而是因为它化学性质稳定，不爱长锈。”

师：“不长锈是一个特别吸引人的优点。因为像那些插头插座之类的装置，是靠‘接触’来导电的。”

我：“爱长锈的导体长期使用可能接触不良吗？”

师：“是的。但是由于黄金价格很贵，所以它一般不单独使用，通常用作‘铜’表面的镀层。”

我：“我家的插销板没见镀金啊？我那 CD 机的耳机插头据说是镀金的。”

师：“谁会对一个插销板要求那么高呢？不过战

斗机或坦克车上如果用了插头插座的话恐怕会要求镀金的。”

我：“这倒是，导弹因为开关接触不良没发射出去，那可死得太搞笑了。”

师：“最后就是‘锡’了。我们用的焊锡通常是‘丝状’，它不是纯锡，而是铅和锡的合金。”



师：“其中铅的含量约 40%，锡的含量约 60%，大约能算四六分成吧。”

此处提及的百分比并不精确。

我：“焊锡丝挺好玩的，用烙铁一烫，马上就变成一个小圆球了。”

师：“是这现像。有没有发现什么特别之处？”

我：“这有啥特别的？焊锡化了会冒烟，挺好闻。我爸说是松香的味儿。”

这不是简单的松香，应该说以松香为主。焊锡丝所发出的烟气常被认为对人体有害，我对此倒不以为然。

师：“你在炉子上烧过铁丝之类的金属吗？”

我：“这个玩过啊，以前住平房生炉子，烧过火筷子，烧红了会变软，然后放水里就滋滋响冒热气。”

我：“我爸说这叫‘沾火’，可以让铁变得更硬。”

师：“那叫‘蘸火’，金属热处理的一种方法。能让一些钢材变得更硬，铁可硬不了。”

最正规的叫法是“淬火”。

我：“你也懂这个啊？”

师：“你说火筷子烧红后会变软，那么你看过焊锡先变软后熔化吗？”

我：“这个好像不是，似乎是突然之间就化成一个球了。”

师：“对了，焊锡是不会先变软后熔化的，它是达到熔点后直接就化成液态。”

我：“这有啥？先软后化也是化了啊？”

师：“关键是焊锡凝固过程也是这样，直接就从液态变成完全的固态。”

师：“你知道什么是‘软’吗？”

我：“举而不坚？那好像叫‘痿’吧？”

师：“我应该掌你嘴！给你俩脆的！！”

师：“这个‘软’意味着固态金属和液态金属混合在一起。焊锡如果有这样的状态那么它焊成的电路十有八九是有故障的。”

我：“是叫‘虚焊’吗？我叔说过这词。”

师：“对，像豆腐脑儿一样干稀搭配的焊锡肯定容易虚焊的，所以焊锡之中铅和锡的配方必须是铅和锡四六开，这叫做‘共晶合金’，能保证焊锡在融化

和凝固过程中只有固态和液态两种状态。你考大学如果学机械类或材料科学专业，应该能够学习到这些知识。”

我：“我想学电子专业或者计算机。”

师：“好了，导电材料里还有一个‘石墨’，也就是‘碳’，常用作电极。下边说绝缘材料。”

从元素周期表中可以看到碳和半导体材料挤在一起，那么碳是不是可以做半导体材料？

我：“绝缘材料，不就是橡胶和塑料吗？”

师：“那我说玻璃和陶瓷。”

我：“这个也是，我知道，只是没说而已。”

师：“你还是谦虚一点吧，谁的导电性能最好都说错。”

师：“说到绝缘材料，首先应该想到的是‘空气’。空气不绝缘咱们全玩儿完。”

我：“对，空气得绝缘。嘿嘿。”

师：“纸也是常用的绝缘材料，包括一些化纤，像涤纶之类，也是绝缘材料。”

我：“这个没想到。这些东西很常用？”

师：“玻璃纤维也是一种重要的绝缘材料，‘玻璃布’和一些‘树脂’材料粘合，比如环氧树脂，再压成薄板就是我们常用的‘电路板’。”

我：“这个东西不是叫‘玻璃钢’吗？听我爸说起过。我电脑里那些板子就是这个东西啊？”

师：“纸和化纤也能用于制造电子元件。你电脑中那些板子就是‘环氧玻璃布’板。”

师：“一些漆类物质也有很好的绝缘性能，它们可以涂在导线外表，代替塑料皮做绝缘层，这称为‘漆包线’。漆皮比塑料皮要薄得多，所以漆包线总的直径会比较细。”



如果线外的漆皮是“聚酯”的，会阻碍焊接，所以焊接聚酯漆包线时需刮去线头部分的漆皮，或用化学方法除漆。也有些线用“聚氨酯”漆皮，是直接可焊的。

师：“看来今天讨论的内容已经不少了，剩下一些内容我还是给你整理一个短文吧，这样进度能快一点。”

我：“是啊，咱这课程有点慢了，还没用上欧姆定律呢。”

师：“这个短文是对一些常用导线和接插件进行说明，这之后就没啥基础知识了，我们下次就进入欧姆定律这个部分。”

我：“终于见着曙光了，我都有点急了。”

师：“好吧，我先下了，你有啥问题可以先去网上搜。”

我：“嗯，晚安，我还想多玩会儿，今天难得有 | 闲。”

C# 离开了，我打开专利局的那个网站看了下，这网站有个查询用的页面，我在“名称”栏内输入了“聚能环”，查到的居然是“外观专利”。没办法只好在“申请人”一栏填上“南孚”重新查，这回还真查到了不少内容，其中有一个《带垫圈的碱锰电池》，这个不会就是“聚能环”吧？点开这个链接，网页中有一个简单的“摘要”，里面提到这个所谓垫圈其作用是更好的隔离电池的正负极，避免短路隐患的。哪里体现“一节更比六节强”啊？

重新回到搜索页面，我在“名称”一栏内填上了“电池”两个字，这回搜出来的内容可是真不少，有一万多项。随便翻了几页，居然发现了一个《电动自行车用带电池箱的菜篮》，这也是高科技啊？真没想到。

之后我又跑去 GOOGLE，输入了“焊锡 松香”，搜出的页面中有很多“松香芯焊锡丝”的广告，看来那些焊锡丝是空心的管状，里面灌进去松香了。仔细在 GOOGLE 的页面上巡视了一下，发现了一个新名词——助焊剂。重新让 GOOGLE 搜“助焊剂”，又出来一堆广告。再搜“松香 助焊”，还是成群结队的广告。最后查询“松香 加热 作用”，这回搜到一些有点技术性的内容，看了一些页面略作总结，大体知道了松香受热熔化后有弱酸性，可以清除铜表面的脏东西，所以能助焊。同时也查到除松香外还有一些化学合成的助焊剂，常以什么“溴化水杨酸”这类酸性物质为主要原料，助焊性能更好但具有腐蚀性，通常不建议使用。

云上漫舞：“你还不睡？我可要走了。”

不知不觉都 11 点多了，这儿还一个 MM 呢，怎么把她给忘一边儿了？

我：“我这就走，你应该多玩会儿，早睡爱发胖。”

云上漫舞：“我扛不住了。我给你的漏点的照片

看了没有？”

我：“看了，你的裸体确实很美。”

云上漫舞：“你说啥？你看了吗？”

我：“看了啊，你光溜溜的样子，靓死人喽。多大罩杯？”

云上漫舞：“你就骗我吧你，根本就没看！我走了，不理你了！”

不容我再逗这 MM 就跑了，我心里暗笑：“想弄个恐怖的恶心的图片忽悠我看？小把戏不好使。”我随手双击了下那张照片，屏幕上的画面着实让我差点喷血：“不是吧？真裸啊？”

屏幕上一个光溜溜的小婴儿躺在床上，眯着眼睛冲着我笑呢。



## 本节补充说明

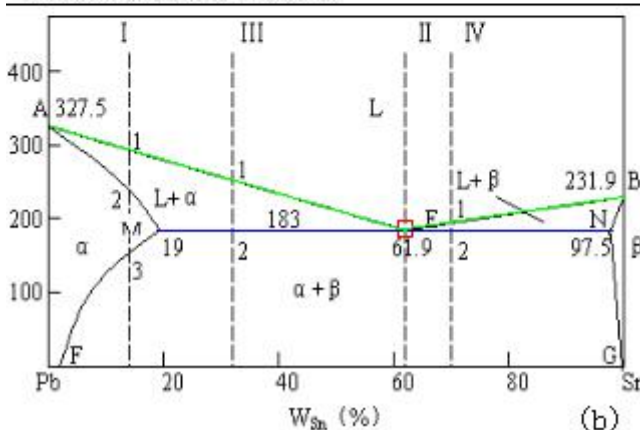
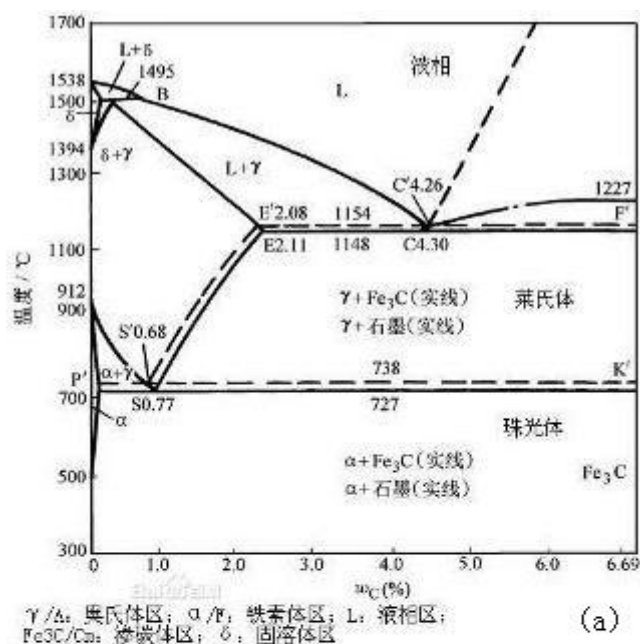
在大学里学习《金属材料及其热处理》这门课时，会了解到“合金相图”这个知识，这种相图反映了不同“配方”的合金材料在加热/冷却过程中的“形态”与“性能”的变化。右上图(a)就是“铁碳合金”相图，所谓“铁碳合金”，其实就是“钢材”。底下的横轴是钢材中的碳含量，左边纵轴是加热温度。在对钢材进行热处理时，含碳量多高的钢材加热到何种温度在以何种方式冷却可以获得何种性能，都由这张图决定。这不是你随便找块钢板烧红了扔水里再捞出来都能磨成刀的。

我们祖先以前应用青铜时已经知道铜与锡的比例不同最终获得的青铜性能也不同，他们甚至在铸造青铜剑时可以用不同的“配方”分别铸造剑身和剑刃，确保剑身有足够的韧性而剑刃有足够的硬度。

我们现在使用的“焊锡”也有其“相图”，参见右下图（b），中间红线框住的点锡含量为 61.9%，绿线之上是液态，蓝线之下是固态，蓝绿线之间是固态和液态混合的。可见红线框住的这个点是没有固态和液态混合的。蓝色线对应的加热温度是 183℃。

焊锡的成份都接近于红线框住的这个点，但不完全是这个比例。注意焊接时对焊锡的加热温度并不是这个183℃，而是要高很多，这是为了让融化的焊锡具有充分的“流动性”，保证焊接质量。

由于现在主张保护环境，因而焊锡中已经逐步取消铅了（无铅：Pb-Free），欧盟曾于 2003 年发布过“RoHS”指令，限制在电子产品中使用某些有害物质，其中包括铅。在欧盟成员国家里废旧电子产品是不可以随意丢弃处理的，现在很多电子垃圾都运到发展中国家抛弃，中国是个电子垃圾的重灾区，某些地区用很简陋的方法从这些垃圾中回收电子零件（拆机件）和金银等贵金属，造成了严重的铅、汞、镉等重金属污染。



大家对于专利应该具有一个清醒的认识，所谓“专利”，顾名思义就是“专门获利”的意思，这跟科学没有什么必然的联系，这是个法律问题。法律保护那些首次发明新装置新方法的人通过他们的发明获得经济利益，交换条件是发明人要“完全公开”他的技术。另外，“科学发现”不能授予专利，比如牛顿是不能将“万有引力”申请专利的，“万有引力”是个自然规律，牛顿只是“发现”了它而不是“创造”了它。

你做出一个新鲜东东究竟算不算“发明”，能不能授予“专利”，要看它是否符合法律规定，符合法律规定的就可以授予专利，至于其中的技术含量有多少并没人在意。当然，法律规定了你做的这个东东应该具有“新颖性”，也就是以前没人做过这个。但具体到专利审查员，他又不是全科大夫，他哪里知道以前有没有人做过这个？他只能从已有的专利中查询，查不到他就认为你是第一个做这个东东的。这确实不够合理，所以专利在授权之前都有一个公开征求意见的时期，你若发现某项专利申请保护的技术以前已经公开了，可向专利局提供证据，经核实采纳后该专利就不会授权。这种证据，可以是一件实物或某刊物上的一篇文章，但电子刊物或论坛帖子之类的不会采纳。

申请专利需要向专利局交纳费用，每年还要交纳维持费。发明专利的保护期在中国是 20 年，过期的专利成为公知技术可以被他人自由使用。对于已授权的专利，你同样可以申请无效它，当然你也得交纳费用，还得请有经验的律师，这花费是不低的，所以专利经常被用作一种商业竞争手段。有些经济实力雄厚的企业每年申请成百上千项专利，其中仅有很少一部分是他们的核心技术，多数为很普通的技术，还有一部分“垃圾”专利，所有这些专利组织成“专利网”（或称“专利池”），你若敢于进入他们的技术地盘参与竞争，他们就会举起专利大棒狠狠敲你。你固然可以申请那些垃圾专利无效，但花费的金钱和时间可能会活活拖垮了你。

## 2005-04-21：接插件

C# 的短文还真是多，都是以前就写好了的，也许是以前给别人讲的时候就预备下的吧。晚上 11 点，照例赶在犯困之前连到网上，翻开 EMAIL 的收件箱，C# 的邮件已经到了。

活死人同学：你好！

附件中是一篇介绍“接插件”的短文，这是我们首次接触到具体的电子元件，希望你能仔细阅读，以后到电子市场买这些东西时别露怯。

我这几天事情比较多，可能到周日才能有空和你聊。另外，我给你发了快递，是一套电路板，我们以后会利用这套电路板做一些实验，最终要做出一台小电脑来，你要妥善收好。

另：快递费到付啊。

到付就到付吧，这也要提前打招呼？我打开附件中的 PDF 文件，“接插件？啥东东啊？”

### 接插件简介

C++++: 2003-04-12

当两个导体互相接触时就可以导电，这使得我们可以制造开关与插头插座这类电子元件，这类元件统称为“接插件”。

对于任何电子元件，我们都需要了解它的三个方面：一是电学特性（Electrical Characteristics），二是机械特性（Mechanical Characteristics）。“机械特性”这个词听上去有些费解，我们不妨把“机械特性”之中一条最重要的内容提取出来，那就是这个元件的“外形尺寸”（或者“封装”）是怎样的，这可关系到该元件如何安装到那些电子装置之中。第三就是制造这种元件所用的材料和方法，也就是这个元件之所以具有那样一种电学特性和机械特性和原因。

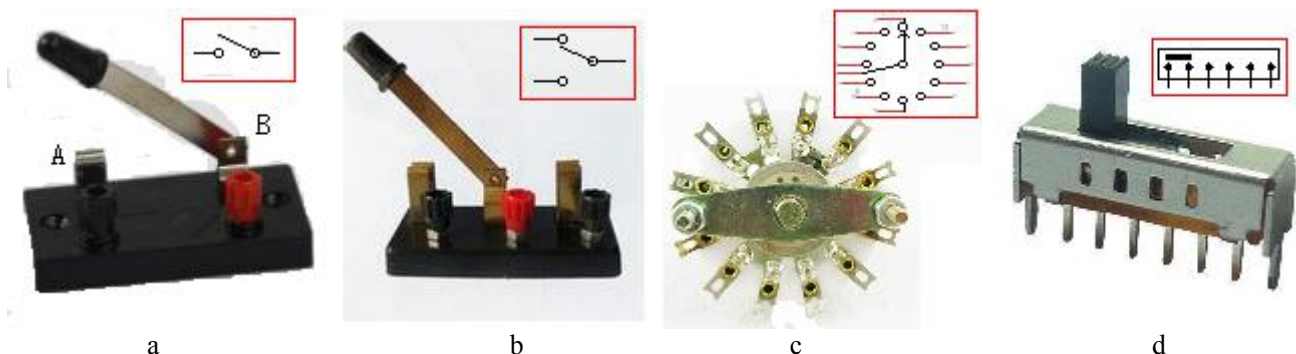
开关与插头插座的种类繁多，我们只是把今后需要用到的很小一部分提取出来加以介绍。在介绍具体的元件之前，我们需了解一些基本的常识。可以想到既然是靠接触导电，那么接触的是否紧密可靠就是很重要的一个指标。因此接插件使用的导体必然是有硬度有弹性的，靠弹性保证接触在一起的导体互相压紧，必要的话还要外加弹簧。我们还常常在导体互相接触的表面镀上金银等贵金属，这是为了避免金属生锈导致接触不良。

电子零件常根据适用范围不同而分等级，常见的分级有民用级、工业级和军用级。有时军用级中还会分出宇航级，也就是要求在外层空间强辐射的环境下也能正常工作。实际上在考虑核战争的前提下，军用级电子零件都应该耐辐射。不同等级对应用环境的适应性不同，可靠性要求也不一样。比如民用级要求在 $-20^{\circ}\text{C}$ 到 $+55^{\circ}\text{C}$ 温度范围（这个范围仅是我给的示意而非规范）内正常工作，而工业级则要求在 $-40^{\circ}\text{C}$ 到 $+85^{\circ}\text{C}$ 温度范围内正常工作。又比如军用级接插件对镀金层的厚度和强度要求肯定要高过工业级的，而民用级的要求应该是最低的。

我们从电子市场买到的很多廉价的接插件并不会真正镀上黄金，尽管它看上去确实是金灿灿的，但那完全是幻觉。我不知道国家标准或者行业标准是如何规定的，这样做是否合乎标准，但事实就是如此。

初中的物理实验课中接触过开关，其结构可以由图（1-a）示意，A 和 B 是两个连接电路的接点，B 接点安装着一把可摆动的“铡刀”，这把刀压下后可以和 A 接点接触，从而接通电路。这样的开关我们称为“单刀单掷”开关。而如图（1-b）所示出的，就是“单刀双掷”开关，“铡刀”可以分别压向左侧或右侧。

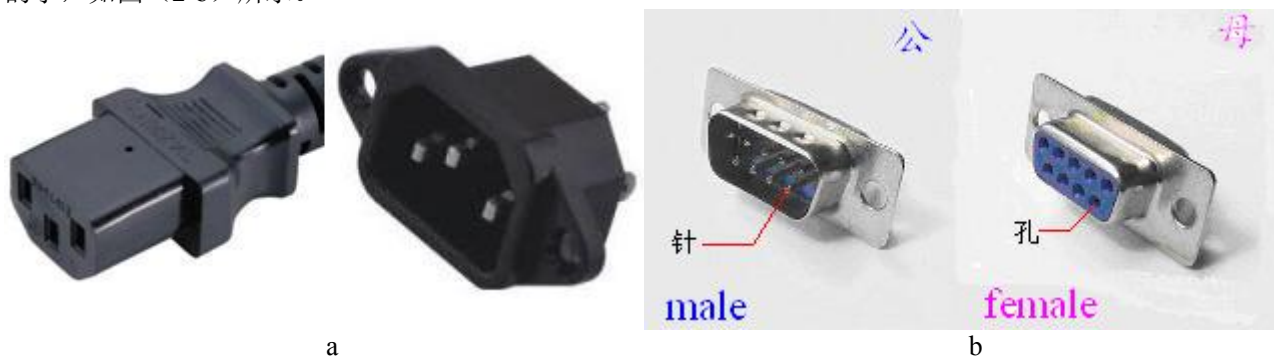
“刀”不仅可以做成左右摆动的形式，还可以做成转动的形式，这种形式可以做出比较多的“掷”，见图（1-c）。刀还可以做成滑动的形式，如图（1-d）所示，这种开关任意两个相邻接点均可被接通。



图（1）各式开关

插头插座没有开关这么麻烦，通常插座上制成孔洞，里面有金属“卡子”，而插头就是简单的金属片（或金属针），插入插座后会被“卡子”夹住，使电路接通。需注意的是有时孔洞会做在插头上，而插座上是金属片（针），你所用的桌面电脑电源线和机箱上的电源线插座就是这样的，如图（2-a）。它搞成这样的结构是为了遵循一条基本的安全准则：**经常（或可能已经）通着危险电压的导体是不允许“暴露”在外的**。这是为防止发生触电事故。

另外插头插座也有一些独特的称谓，就像开关的“刀”和“掷”那样。凡是做成“孔洞”式的插头插座都称为“阴性”的或者干脆说成“母（female）”的，那些“针片”式插头插座自然就是“阳性”的或者“公（male）”的了，如图（2-b）所示。



图（2）插头和插座

了解了一些基本的知识，我们接下来就要学习一下今后将会用到的一些接插件，首先看开关有哪些。

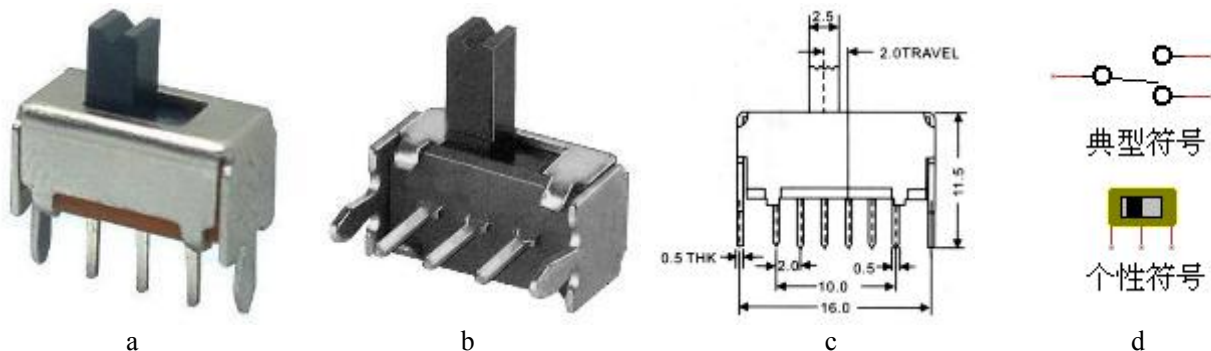
### （1）拨动开关

此类开关品种极多，我们只选最为普通的单刀双掷拨动开关加以介绍，这也是以后我们会用到的。

这种开关的操纵部分是一个滑块，滑块本身是绝缘的，底部安装着导体。滑块沿直线滑动，底部的导体可以将开关内部的不同触点连接在一起。这些触点分别由一个个“焊片”引出到开关外部。

拨动开关的外形常见的有两种：直柄（立式：图 3-a）和横柄（卧式：图 3-b），引脚和手柄也有长短不同的尺寸规格。图（3-c）给出了一个尺寸图，这只是截取了三视图（学习机械制造专业可知）中的主视图。如果我们设计的电子装置有外壳，那么选择开关时就要注意这些机械特性，因为要在外壳上开孔使开关的手柄露出适当的长度。

单刀双掷开关的原理图符号列在图（3-d）中，本教程的图纸中常用个性符号画法，这主要为了有趣。此类开关的电气特性，主要是两脚接通后允许流过的最大电流是多少，以及允许运用在有多高电压之下。我们以后将使用此类开关控制电源通断，或产生不同的控制信号，因电压电流都不很大。此种开关随便选也能满足要求，因而不强调它的电气特性具体有多高的指标。



图（3）拨动开关

### （2）按键开关

这是我们今后大量使用的一种开关，就是“按钮”，种类也是繁多，也只能选最普通的加以介绍。

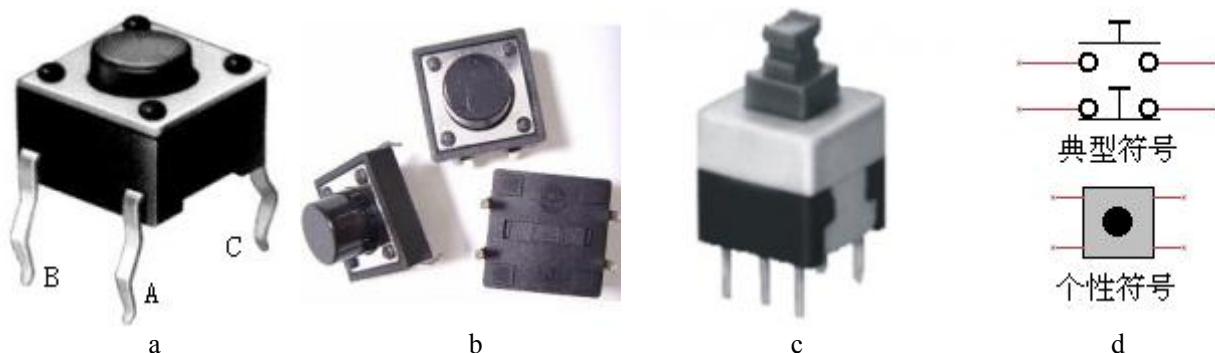
图（4-a）是我们选用的小型按钮，长宽都只有 6mm，高度则因黑色按键柄的露出高度不同而有多种规格，我们选的是 6mm 高，常称为“6×6×6”按钮。把那个突出的黑色按键柄按下，A 和 B 两对焊片就会接通，松手后按键柄会自己弹起，A 和 B 两对焊片就断开了。至于 C 和 D（D 被挡住）两对焊片，C 和 A 其实是一根焊片，它们在按钮内部是一体的，D 和 B 也是一根。

图（4-b）是一种大尺寸的按钮，长宽为 12mm，高度也有多种规格，结构与图（4-a）一样。这两种按钮还有半尺寸大的，就是把 4 引脚变成 2 引脚，宽度减为一半。另外还有一种“自锁”式按钮开关，见图（4-c）把按钮按下后松手，按钮不会自己弹起来，开关会保持在接通状态。如果想断开，需把按钮再按一下才行。

图（4-d）是按钮开关常用的原理图符号，注意典型符号中下面那个，那个按钮不按下的时候是接通的，按



下反而断开。我们使用按键开关产生各种控制信号，电压电流都很小，因此完全不考虑电气特性。



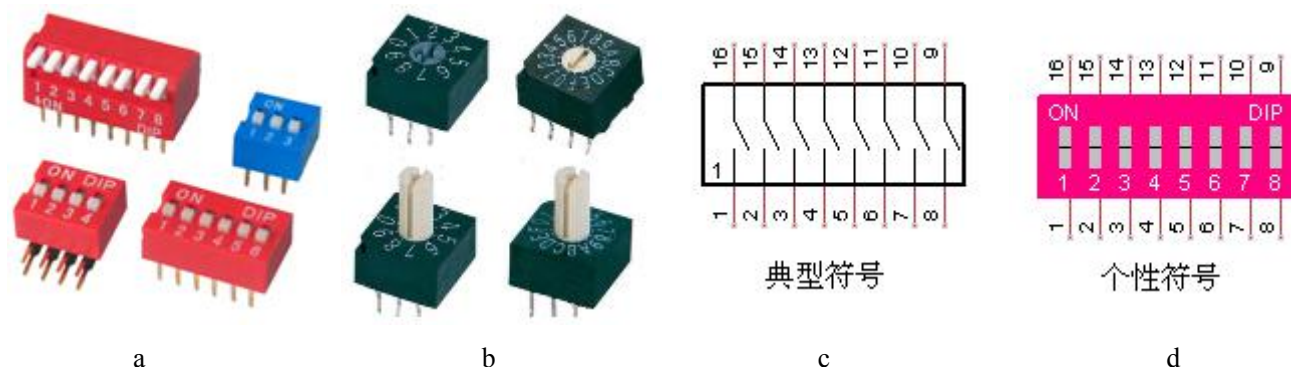
图（4）按键开关

### （3）拨码开关

这又是一种我们今后要用的开关，此种开关为单刀单掷，通常多个开关做成一个整体，每个开关为一“位”，可独立通断，常用的从两位一体到十位一体的都有，见图（5-a）。图（5-a）中的开关也被称为“DIP 开关”，因其引脚的排列和一类集成电路的引脚相似而得名。

另有旋转式的拨码开关，它不是多个单刀单掷开关组合，本质上它是一个单刀多掷开关，掷的数目是比较多的，可多到 16 位。但它的引脚数目有限，这让人困惑它是怎么工作的。此种开关内部结构略复杂，引脚上输出一个“二进制数”，它经常被称为“8421 拨码开关”。

我们以后将使用图（5-a）所示的拨码开关，仅用于产生一些低电压小电流控制信号，对电气特性没什么严格限制。图（5-c）和图（5-d）是此种开关的原理图符号。

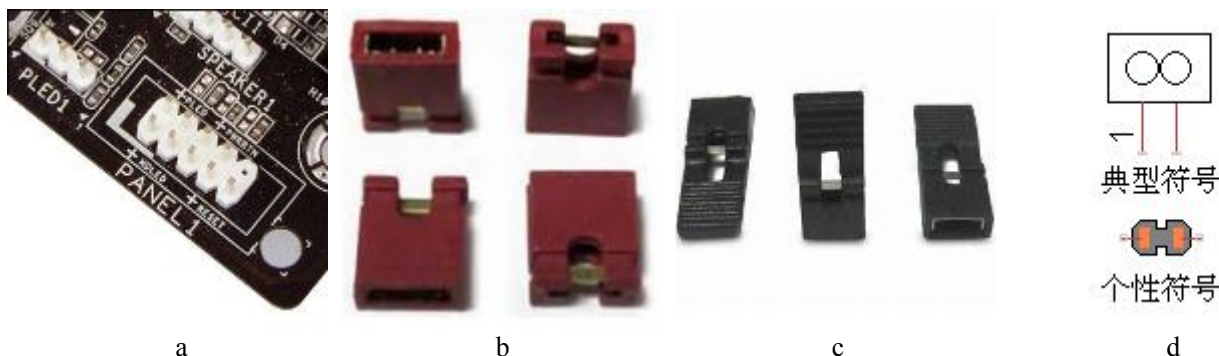


图（5）拨码开关

### （4）跳线

这个东东在你的电脑主板上很常见，把它归为“开关”似乎有些不妥，不过从本质上讲它确实当成一个单刀单（双）掷开关来用的。只是操作起来略有麻烦，需拔插那个“短路块（跳线帽）”，图（6-b）所示为短路块。多位跳线并排在一起时拔插会更不方便。当然，现在有带“手柄”的跳线帽，可以解决这个问题，如图（6-c）所示。图（6-d）是跳线的原理图符号，此符号最重要的是引脚，至于引脚连接到一个方框或其它图形都无所谓。

多位跳线其实可以用一个 DIP 开关代替了，然而实际的情况是我们经常用跳线取代 DIP 开关，一则这种跳线便宜，当不需频繁通断时用跳线也不麻烦。而且跳线为电路设计者带来了灵活性，相邻的插针总是可以两两接通的，不论横向还是纵向。再者，跳线的位数可多可少，没什么限制。



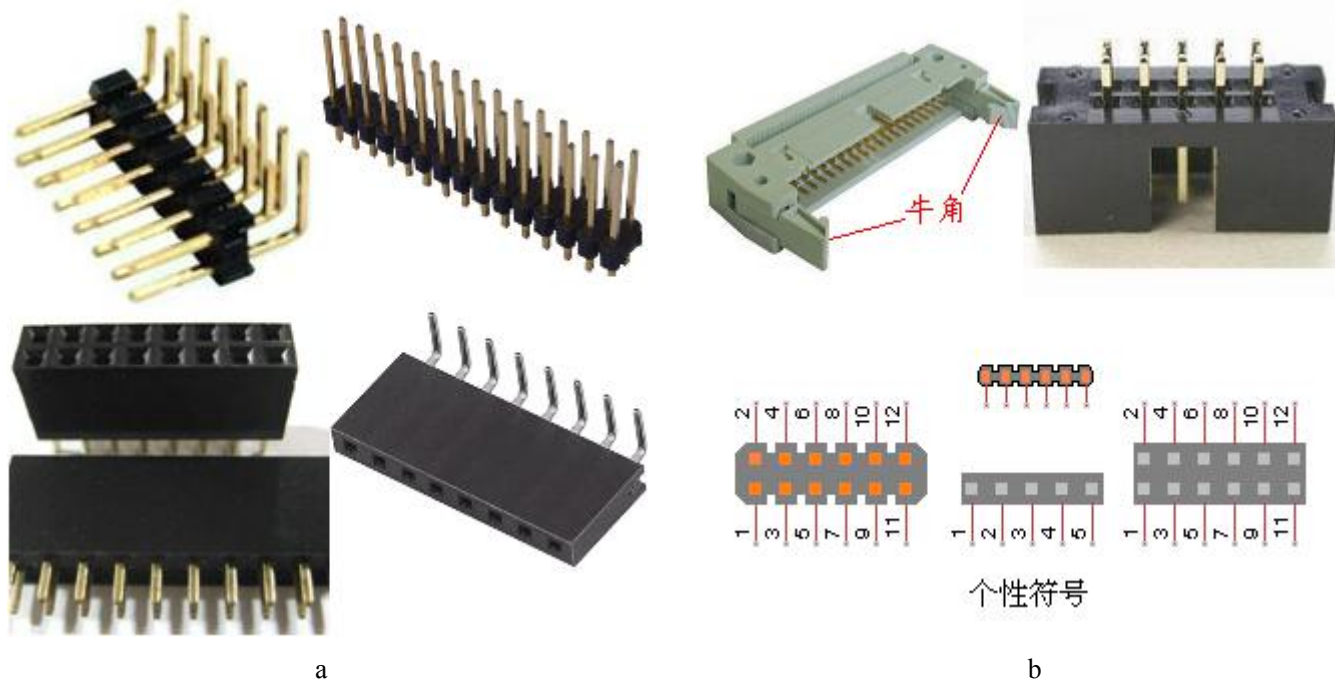
图（6）跳线

插座并不是指日常生活中安装在墙壁上的那种，我们今后要使用的多是一些小巧型的，这类插座通常直接焊接在电路板上。

### （1）排针排母

这是电路板上十分常用的接插件，有单排有双排，有直脚有弯脚，有方孔有圆孔（图 7-a）。排针配上“短路块”就是所谓“跳线”了，当然，排针排母更常用的功能是把两块电路板连接起来。有时电路板需对外部引出电缆线，我们会将一个排针焊在电路板上当座子，然后利用“扁平（带状）电缆（后文介绍）”输出信号。

一种更规范的方法是在电路板上焊一个“牛角”座（图 7-b 上方），这种“牛角”座相当于排针外围圈了一个框，“牛角”指得是两端加的“撬杠”。由于扁平电缆的端头中部有一个突块，而牛角座的外框中部有一个豁口，所以电缆端头只能沿一个方向插入，而且由于有两个像牛角一样的撬杠，电缆端头也很容易拔出来。不过牛角座可不是想要几针就有几针的。另有一些“简易牛角”座，在排针四周有框，但没有像牛角那样的撬杠。图（7-b）下方有排针排母的原理图符号，和跳线一样，重要的是引脚而非图形形状。



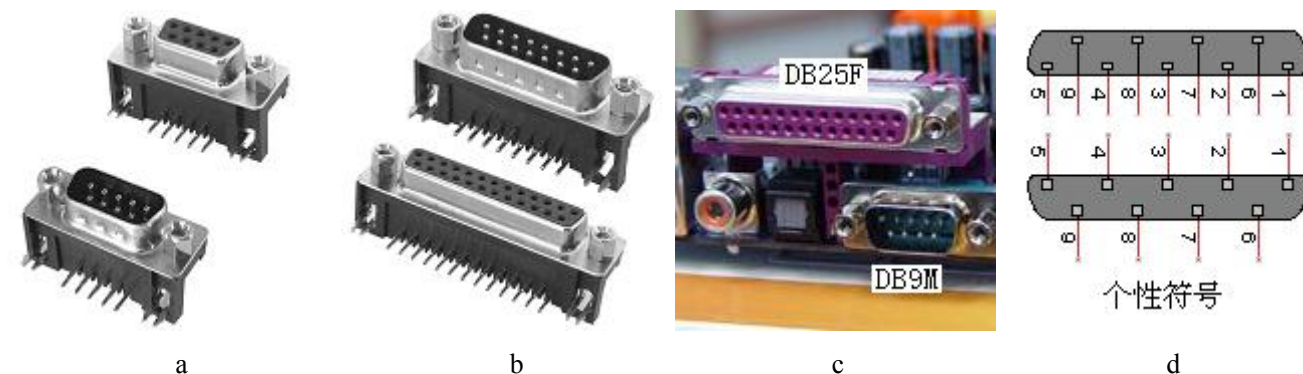
图（7）排针排母

### （2）D 型连接器

这种接插件带有一个金属外框，框的形状像一个大写字母 D，所以叫“D 型”连接器。你的桌面电脑主机背板上通常会有一个 D 型连接器，它有 3 排共 15 个孔洞，是个母座，用于连接电脑显示器。这个座常称为“DB15F”其中 15 表示有 15 个引线，F 则表示“Female”。

如果你的桌面电脑够“古老”，你还会在背板上看到其它 D 型连接器，比如有两排共 9 根针的公座（DB9M），还有两排共 25 个孔的母座（DB25F），见图（8-c）。这些连接器在很多新型电脑上都被“USB”口取代。

很不幸的是对我们这帮研究技术的爱好者来说，那个双排 9 针的公座（DB9M）其实有很大的用处，我建议你们搬过电脑机箱来看一下，如果找不到这个 9 针的公座，那么对于本教程后面的技术研究和实践来说就有点不便了。当然，我们有别的办法解决这个问题。



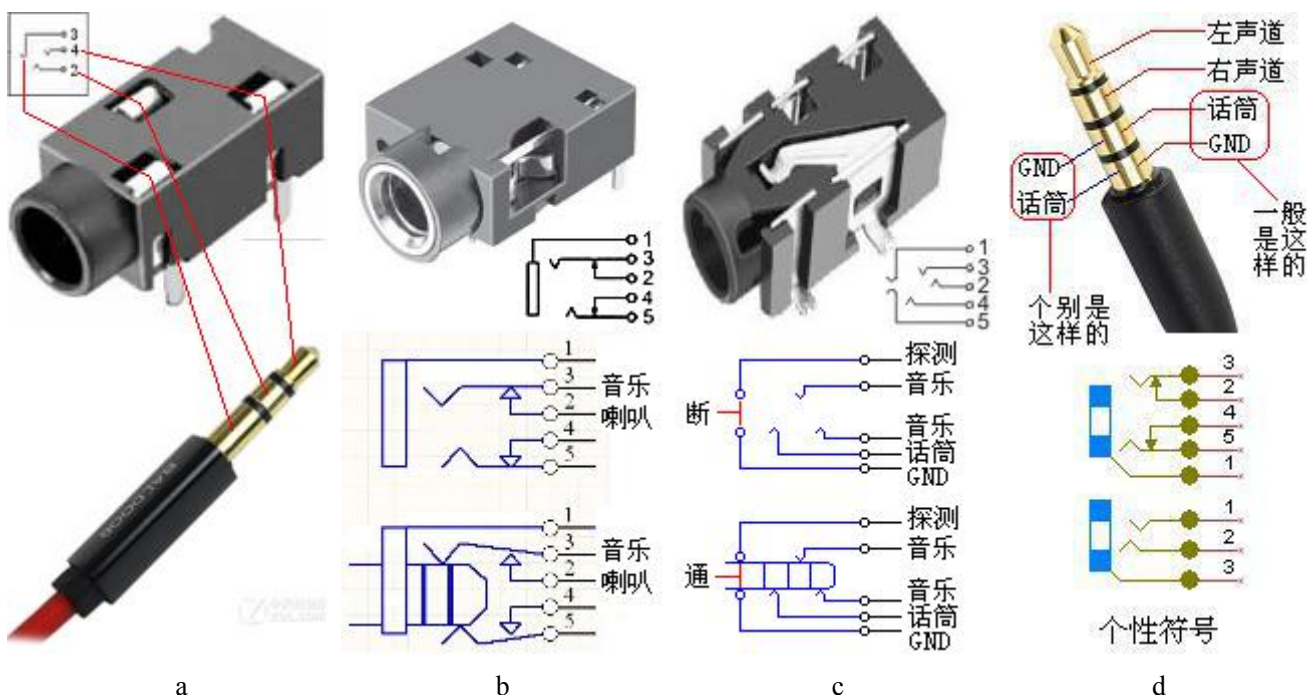
图（8）D 型连接器



### （3）音响连接器

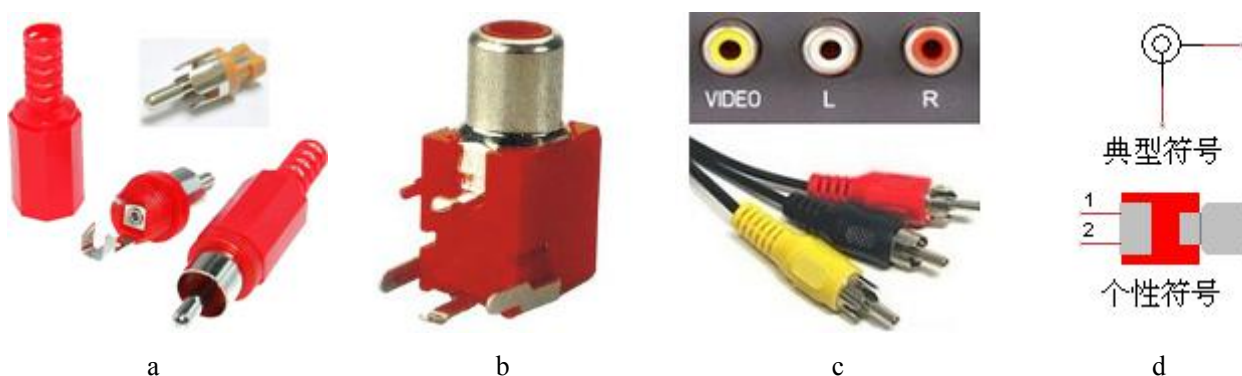
最常见的音响连接器当然是耳机插头和插座了，耳机插头较简单，其直径常见 2.5mm 和 3.5mm，通常有 2 线（单声道）、3 线（立体声）和 4 线（立体声加话筒）。耳机插座种类繁多，其口径当然是和插头配合的，关键是其内部结构花样较多。

图（9-a）是最简单的一种，只有 3 个引脚，和耳机插头配合时的连接关系用红线示意出。图（9-b）是一种复杂的，它内部带有开关，3-2 引脚在不插入插头时是接通的，我们称其为“常闭开关”，所以 3 脚的音乐可传给 2 脚连接的喇叭。当插头插入后，3-2 引脚就被撑开，3 脚的音乐经插头传给耳机，喇叭就不响了。4-5 脚同理。另有一种带“常开开关”的耳机座，插头插入后 1 和 5 脚就会接通，这可以用于接通电源或通过电路检测这个开关接通进而识别出耳机插入插座。注意图（9-d）上方的四芯插头，左右声道是不会反的，但话筒和 GND 的位置并无规范。



图（9）耳机插头插座

另有一种“RCA”插头插座，俗称“莲花”插头插座。插头中间有一根金属柱，外围是一圈金属框，有时这个金属框会制成花瓣形状，故以“莲花”称之。你的电脑如果有外接音箱，两个音箱之间应该用这种插头连接的。另外一般 DVD 机和电视机之间也会采用这种插头座相连。



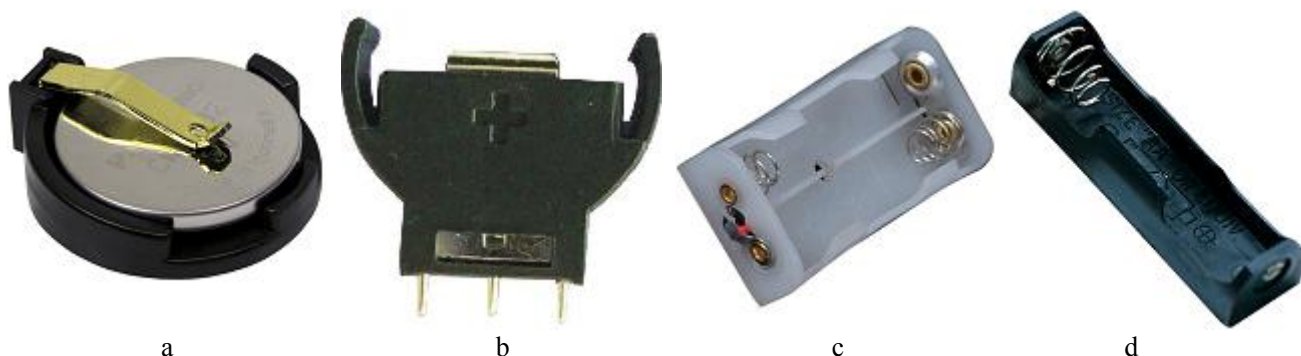
图（10）莲花插头插座

### （4）电池座与直流电源座

一般来说只有纽扣电池需要用电池座安装到电路中，但是也有相当多的纽扣电池自带焊接引脚，可以直接焊到电路中，我们在《认识电池》一文中给了一个图片。当然，焊到电路中的电池是无法更换的，可以推测这种电路耗电量极少，一个纽扣电池能用好几年。一种可能是这个设备如果取下电池，就会因为丢失了数据而失效，所以它们没必要更换电池。另一种可能是它用了充电电池，不必将电池取下更换。

5 号和 7 号电池有配套的电池盒，还有两节一体或更多节一体的，多数都是引出一段焊接线，一部分还带有开关。另有一些单节电池盒引出了正负极两个引脚，可以直接焊到电路中。对于 2 号和 1 号电池，由于体积

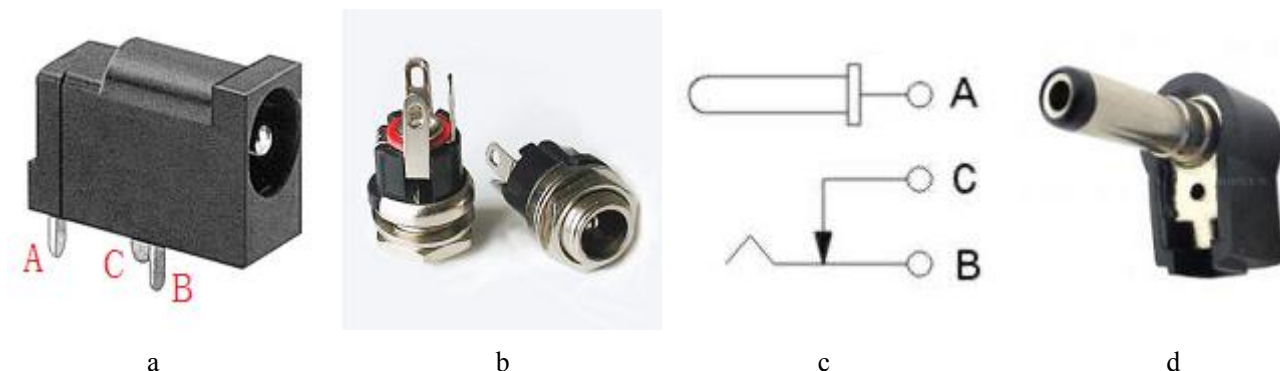
太大，不会直接焊到电路中。原理图中只会画出电池，不会画出电池座。



图（11）电池座电池盒

直流电源座与耳机插座有一拼，图（12-a）和图（12-b）是常见的两种结构。图（12-c）是 3 个引脚的关系，电源插头（图 12-d）插入后会与 A 和 B 两个引脚接触，C 脚会自动与 B 脚断开，当插头拔出后 C 与 B 相接。这意味着 C 脚可以连接到一个由电池组成的“后备”电源上，外部供电插头拔出后电池自动接入电路中。

此种插座有外径和内径两种尺寸参数，外径是指开孔的直径，常见 5.5mm 和 3.5mm 两种。内径是指孔内那个接线柱的直径，当外径为 5.5mm 时，内径通常为 2.1mm，也有其它规格的。

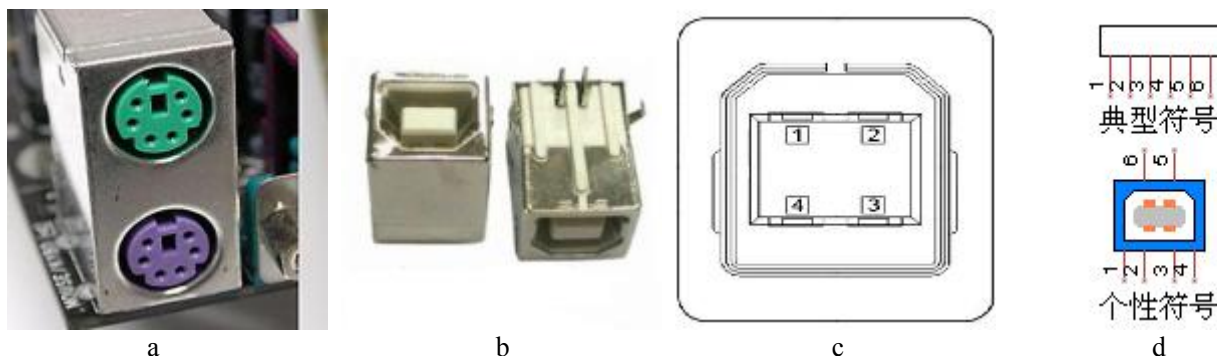


图（12）直流电源座

### （5）USB 与 PS/2 连接器

USB 插口现在已经大行其道了，哪个电脑上都得有那么一堆。你的 MP3 播放器上还有个 MINI(或者 Micro) 的 USB 口，而像图（13-b）所示这种方块的 USB 座你大概没有见过。至于 PS/2 座，你的电脑背板上应该有两个的，一个紫色一个绿色，分别接键盘和鼠标器（图 13-a）。如果你找不到这两个座子也没关系，这说明你的电脑太过“新型”了，要求你必须用 USB 的键盘和鼠标。

也许你在电脑背板上看到了一个 PS/2 座，是个阴阳脸，一半是紫色一半是绿色，这是电脑主板制造厂想舍去这种 PS/2 座而又有些纠结，所以给你留了一个，不论键盘鼠标，你都可以接在这个座上。坦白说 PS/2 座还是留着好，USB 口用于接键盘鼠标实在有些浪费了。



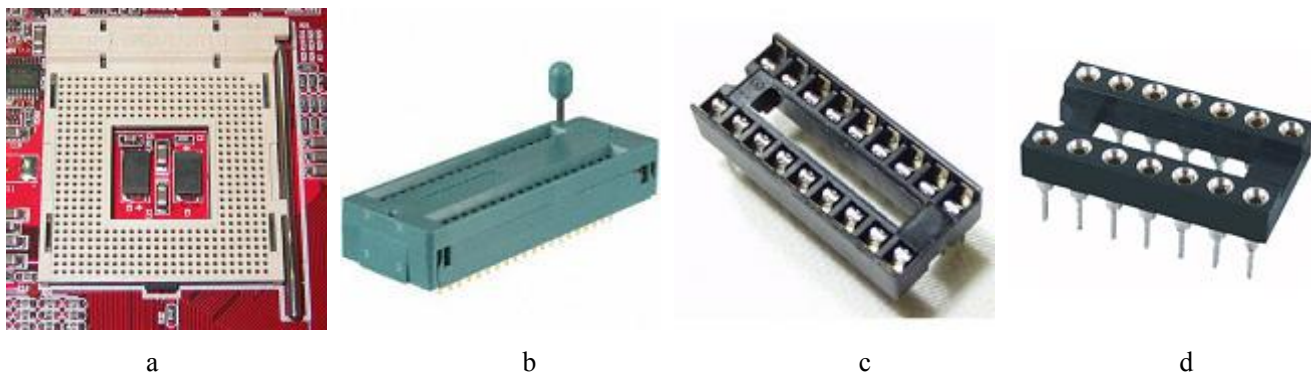
图（13）PS/2 和 USB 插座

### （6）集成电路插座

集成电路并不总是焊接到电路之中，因为有些时候它们是要“更换”的，可能是因为损坏而更换，也可能是为了“升级”。你的桌面电脑中的 CPU，就是安装在一个插座上的（图 14-a），这个插座上带有一个锁紧杠杆，松开这个杠杆 CPU 就可以取下来，然后换一个新的上去再锁紧。



我们以后也会用到这种插座，只是外形和你电脑主板上的那个很不同，如图（14-b）所示，毕竟我们用的芯片没有那么复杂。像这类带锁紧机构的插座统称为“ZIF 插座”，“ZIF”意思是“零插入力（Zero Insertion Force）”，此类插座结构复杂成本高。我们还常使用一些简易的芯片插座，如图（14-c）和图（14-d）所示，其中图（14-c）是“扁孔”的，孔内部是两个弹性金属片。图（14-d）是“圆孔”的，价格比扁孔的略贵。此类插座拔插芯片并不方便，因而不适应频繁更换芯片的应用场合。原理图中只会画出集成电路，一般不画出插座。

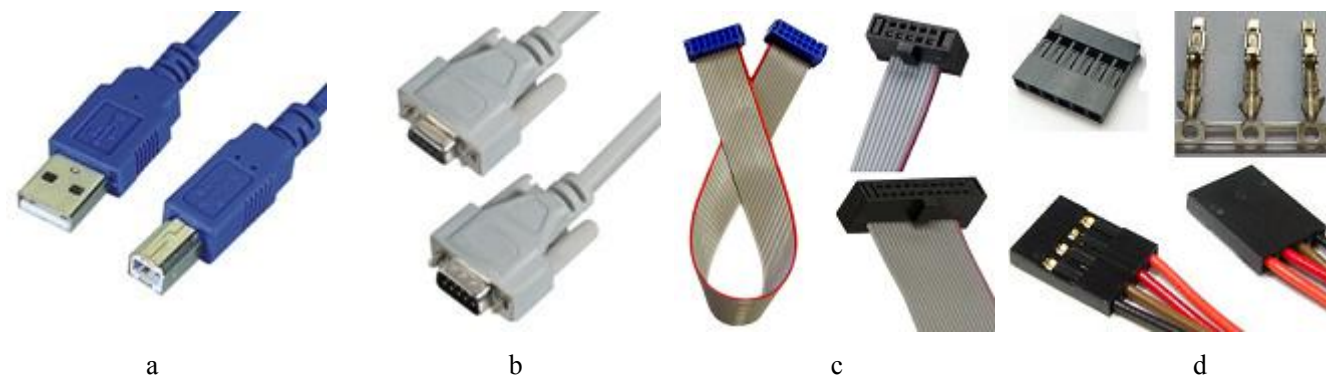


图（14）集成电路插座

除了开关和插头插座之外，我们还要使用一些线材，典型的有“USB 连接线”，如图（15-a）所示，扁口一端称“A 型接头”，连接桌面电脑，方口一端为“B 型接头”，连接设备。图（15-b）所示为“串行（xíng）通信电缆”，通常一端为 DB9M 公头另一端为 DB9F 母头，当然有时也用两公头或两母头的。至于何为“串行通信”我们以后会讨论到。

图（15-c）所示是利用“带状电缆”（也称“扁平电缆”或“排线”）制作的连接线，这种带状电缆并列了很多根导线，线与线间是绝缘的，通常最边上有一根线是红色，这根红线连接到接头上所标的“1 号孔（针）”，有时我们买到电缆和接头自制连接线，需要注意安排好这根红线的位置。带状电缆有花色的，其中每根导线的绝缘皮有不同的颜色，这便于看出线的两端的连接关系。

图（15-d）是用“杜邦接头”制作的连接线，你的桌面电脑机箱中应该有很多这样的线，把机箱上的电源开关和硬盘灯连接到主板上。杜邦接头可以自制，塑料外壳和内部的接线卡是分离的，买来后把导线压进线卡，再把线卡插到胶壳中即可。

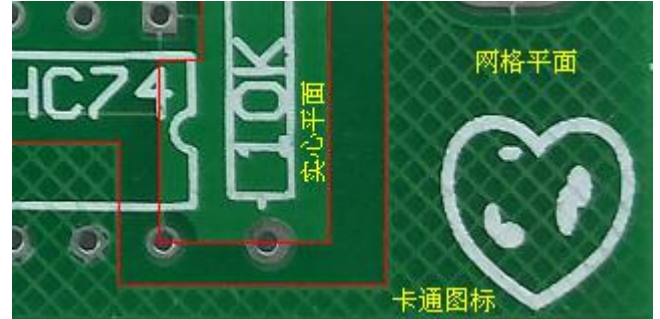
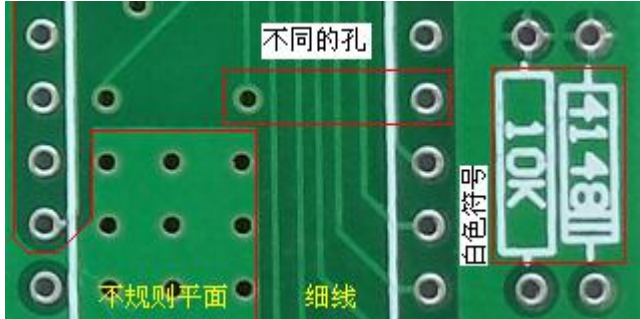


图（15）连接线缆

最后小结一下，接插件的种类实在是太多了，根本不可能完全介绍给大家，我们有时需要向厂家索要产品目录，其中不仅有产品实物照，还有机械和电气特性的说明，以便在设计电路时选择合适的零件。现在网络十分发达，一般厂商会在自家网站上公开产品信息，透过互联网获得相关信息也是很便捷的途径。

## 2005-04-23：印刷电路板

昨天收到了 C# 寄来的电路板，一大块加六小块，那些小板子长宽尺寸全一样，每块板的一个角上都印了一个卡通小图标，这大概是为了区分吧？大板子的中央竟然印了一头卡通猪，板子宽度和小板子的长度一样，它们放一起可以拼接成一块完整的大板。我仔细琢磨了一下这几块板，发现了一些有意思的地方。



首先引起我注意的就是板子上打的孔，很多孔周围都有一圈亮白色的边，我感觉这个亮白色的边应该是一层焊锡。那些有“腿”的零件把腿从孔中穿过来，在另一面用锡焊住，这个零件就安装好了。

很多孔之间画着白色的符号，还标有文字，比如一个长方块上面写了“10K”，这是电阻吗？另一个写了 4148，这个方框下端还带一条短竖线，这难道也是个电阻？但有不少孔孤零零地呆在板子上，四周也没有一圈锡，看上去不像要装一个零件在这个孔的位置，不知有何作用。

板上的图形也很好玩，多是由细线构成，也有一些宽的外形不规则的平面，这些东西以前拆电脑时就见过了。不过有些板子上的大平面是“网状”的，有些是实心，怎么会弄的不一样呢？那块大板的边缘有几个比较大的孔，这个我倒是能猜到用意为何，一定是拧螺丝的，在我电脑主板上见到这样的孔。

晚上 9 点多钟，C# 出现在 MSN 上。

师：“电路板收了？对那篇短文有啥疑问？”

我：“有啊。有没有女性当电子工程师？”

师：“有。你问这个跟那篇短文有什么关系？”

我：“我随便问问。你说插头插座分‘公的’和‘母的’对吧？挺形像的。”

师：“你小子就对这个敏感是吧？”

我：“呵呵，我很好奇那些女工程师学这个的时候会有何想法？”

师：“人家没啥想法，就你有想法。”

我：“不可能！出头的是‘公的’，有孔的是‘母的’，怎么会没想法？”

师：“这个东西有讨论的价值？大家都成年人了。说点正经的吧！”

师：“咱们今天还不能开始讨论欧姆定律，还有一个重要的基础知识没说。”

我：“我也不打算开始欧姆定律。我觉得那电路板有点意思。”

师：“是啊？说说看，你觉得哪点有意思？”

我：“这种板子本来就是绿色的吗？怎么我电脑里那个显卡是红的呢？”

师：“这说明颜色是后染的。电路板本底颜色是白色半透明的。”

这里仅指“环氧树脂玻璃纤维”板的本色。其它材料的板材可能有不同的颜色。

我：“染上颜色干嘛？为了好看？”

师：“不是好看。你有没有发现并非板子上每一个角落都是绿色？”

我：“很多孔周围一圈没有绿色，是很亮的，应该是焊锡吧？”

师：“对了，是焊锡。这个孔和围着它的一圈焊锡叫作‘焊盘（pad）’，这个孔要插入元件引脚的。”

师：“我们焊接这个板子，肯定希望只在需要焊锡的地方沾锡，其它地方不应该能挂上焊锡。你觉得呢？”

我：“你是说那些绿颜色的涂料可以防止焊锡挂到板子上？”

师：“是的，这种涂料称为‘阻焊剂’，可以把焊锡与电路板隔绝开，还具有绝缘性。俗称‘绿油’。”

我：“我前两天刚查到一个词叫‘助焊剂’，今天又来了个‘阻焊剂’。那红色是不是叫‘红油’？蓝色叫‘蓝油’？”

师：“也可以这么叫吧。不过绿色用的时间最久远，通常大家只叫‘绿油’。”

现在阻焊的颜色除去绿色外，“红黄蓝白黑”都有，也有一定的装饰作用。

我：“那还有白色的图形符号呢？那些符号表示在那里要装个零件对吧？”

师：“对，不同的白色符号表示不同类型的元件。这些符号组成了‘丝印图’，俗称‘白油图’。”

我：“怎么又是‘油’啊？‘丝印’是什么意思？没听过这个词。”

师：“丝网印刷。制造电路板使用的技术和印刷行业有很多相同之处，所以这电路板常称为‘印刷电路板’。”



我：“难道那些连在孔上的细线是印上去的？那些细线就是电路中的连线吧？”

师：“你是指和焊盘连接的浅绿色线条？那确实是线路，由铜箔制成的，你以为是油墨啊？”

注意焊盘也是铜箔制成的，焊锡镀在铜箔的表面。

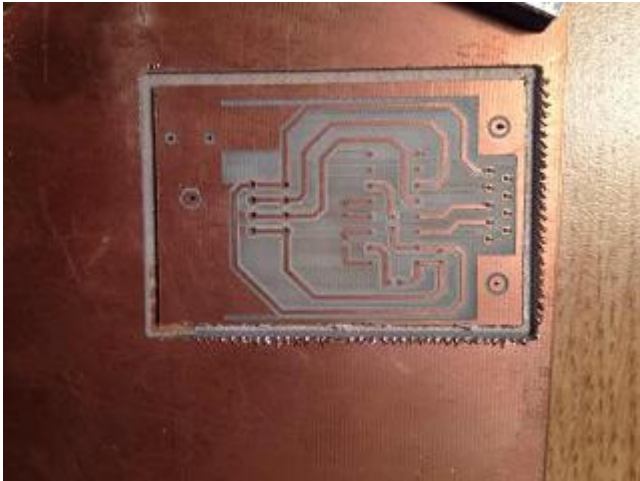
我：“我不知道这是什么，瞎猜的。”

师：“我们上次说过这板子的材料是玻璃纤维加树脂压制的。”

我：“这个叫玻璃钢，我爸懂这个。”

师：“学名是‘玻璃纤维增强塑料’。在压制板子的同时我们还把一层铜箔压在板子表面，铜箔和板面间有一些粘结材料。”

师：“这种板叫‘覆铜板’，这层铜箔本来是完整的一片，我们需要把它变成相互分离的线路，方法是用特殊的化学物质在铜箔上画出线路，然后把板子泡进‘药水’中，被化学物质盖住的线路和药水是隔离的，没有盖住的铜箔和药水发生化学反应，溶解在药水中。剩下的铜就形成了你看见的线路图形。”



图片来自矿石收音机论坛，由“其实不想走”网友发布，<http://www.crystalradio.cn/thread-495309-1-1.html>为排版方便图片做了编辑。此图中是用“雕刻机”分割铜箔面形成线路，非化学腐蚀方法。

我：“做电路板是个化学问题啊？什么药水能把铜溶解了？”

师：“你以后的化学课上会学习到一个重要的化学反应：三氯化铁+铜=氯化铜+氯化亚铁。 $\text{FeCl}_3 + \text{Cu} = \text{CuCl}_2 + \text{FeCl}_2$ 。”

不好意思，这个化学方程式是错的。2lic 论坛上的网友 xukun977 指出了这个问题，在此表示感谢。我是从哪里找的这个方程式？我已经不记得了。但使用三氯化铁吃掉铜这是没问题的。

师：“除三氯化铁外还可以用‘盐酸+双氧水’。当然专业工厂中用的药水更复杂一点。”

我：“你的意思是说这个板子我们自己在家里也能动手做？”

师：“当然可以。三氯化铁是种很好买的化工原料，盐酸和双氧水在卖装修建材的地方就能买到。盐酸刷厕所用的。”

现在由于制毒贩毒严重，政府对化工原料的销售有管控，很多东西都不方便购买。

我：“那得是多脏的厕所啊？我们家刷厕所可没用过盐酸。”

师：“画线路用毛笔蘸油漆就行，‘油性记号笔’也凑合能用。”

也有用虫胶片酒精溶液绘制线路的。

我：“那能画得这么细这么整齐吗？”

师：“手工画当然不能。为什么叫‘印刷电路板’？这耐蚀涂料是用类似印刷的技术做到板子上的，所以整齐精细。”

我：“明白点了。在完整的铜箔上用抗腐蚀的涂料印出线路图，然后泡药水，没有被涂料盖住的铜箔溶了，剩下的就是有用的线路。”

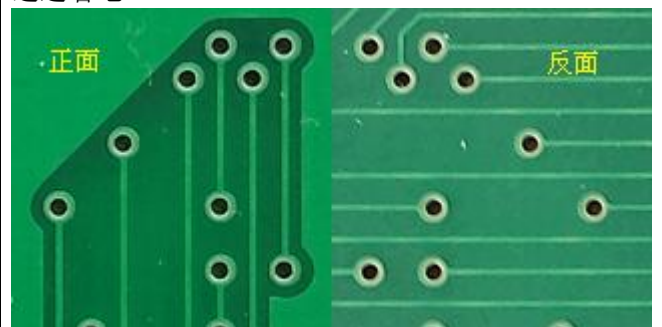
我：“还有个问题，是不是所有的孔都是焊盘？”

师：“你提这个问题肯定因为你怀疑有一些孔不是焊盘？”

我：“是啊。那些画了白油符号的孔应该是焊盘，但我发现有些孔没有一圈锡，也不带着白油符号，那些孔上应该不会焊个元件的，不是‘焊’盘。”

师：“你观察的很细。你再仔细看看，那种孔正反两面肯定各连了一条铜箔线。”

我印象中好像正如 C# 所说的，孔在板子两个面上各自连着线路。为了确证一下这个情况，我赶忙把板子拿出来，认真的看了几个孤立的孔，没错，确实两面都有线路交汇在一个孔上。这两面的线路不会是连通着吧？



我：“我猜这两面的线路通过这个孔连接在一起了吧？”

师：“你真的是明察秋毫啊。孔的作用就是把两面的线路连接在一起。”

我：“呵呵，您夸奖。可这是怎么做到的呢？想不明白。难道是要用焊锡焊这个孔？”

师：“不用锡焊。孔钻出来之后，用特殊的化学药水浸泡板子，这种药水中会析出金属铜，沉积在孔的内壁上，刚好把两面的铜箔连通。之后再用电镀的方法把这些沉积的铜加厚加固，这样两面的线路就通过孔连通了。”

我：“这是电子啊还是化工啊？也太有创意了。”

师：“这个工艺在电路板加工业内称为‘孔的金属化工艺’，所以这种孔常称为‘金属化孔’，俗称‘沉铜孔’。”

师：“你看到那些孤立的孔不是为焊接元件而设，



它们专用于连接两面的线路，所以叫‘过孔（via）’而不叫焊盘。当然焊盘孔也经常兼做过孔。”

我：“这个东西太强了。我看我电脑的主板上得上千个孔，每一个都连通两面的线路？”

师：“当然都连通，连不通你这电脑能正常工作吗？”

师：“实际上工厂并不能确保每块加工出来的电路板上所有孔都连通，这和孔的直径大小有关系。孔的直径要足够大，太小的孔就容易出问题。”

我：“我看电脑主板显卡上的孔都特小，比你这些板子上的孔要小。”

师：“对，那个电脑主板加工就很困难，有些板子会有没连通的孔。所以每块板子做好后，工厂都会检测，把不通的板子挑出来，保证送去焊接的板子都是没问题的。”

我：“今天算是学到新东西了，这些东西学校会教吗？”

我：“我是说大学，电子专业的。”

师：“应该会的。大学里会有‘电子制造工艺’相关课程，还会有实习的。”

师：“好了，我得走了，你有啥问题还是先自己搜

索吧。”

我：“还早呢，你最近很忙吗？”

师：“最近事情比较多，今天是抽空上来。”

我：“最后一个问题，板子上有大片的不规则的铜箔面，是什么？”

师：“那个是大面积‘铺铜’，或者叫‘铺地’。”

我：“这个‘地’是啥意思？”

师：“就是电路中的‘GND’。这大片的铜皮和电源负极相连，就是 GND 的实际走线。”

我：“为何 GND 的走线要这样而不是那种细线呢？”

师：“简单说一句话，我们需要让 GND 线的电阻尽可能小，所以它的走线要粗。”

我：“不是粗是宽吧？”

师：“所以我们用‘铺铜’，这已经是最宽了。”

师：“有时 Vcc 的走线我也用铺铜。”

我：“是否可以认为电源的两根走线因为流过的电流较大，所以用尽量宽的线？”

师：“就是这样。”

我：“好吧，你去忙吧。我再琢磨琢磨这些电路板。”

师：“晚安吧。”

C# 走了，我继续端详着这些电路板，糟了，忘了问怎么有的铺铜是“网格”样的了。这要怎么 GOOGLE 呢？我打开 GOOGLE 主页，输入“电路板 铺铜”，翻出来的页面中大都提到了“降低地线的阻抗”，不知道这个“阻抗”是个什么，应该就是 C# 所说的电阻吧？这些页面还提到了铺铜可以“提高抗干扰能力，减小环路面积，增强电磁兼容性”之类的优点，而我对这些说法就完全没有概念了。

继续搜索“电路板 网格铺铜”，一些页面对这个“网格”给了解释，大都是说网格铺铜“散热”好，还有一些页面说到抗干扰要求较高时使用网格铺铜。没明白这种网格跟散热有何关系？继续耐着性子翻看 GOOGLE 给出的页面，发现 21ic 论坛上的一张贴子的讨论中给出了一个新的说法，大意是铜箔和基板之间存在气体，受热时气体膨胀，实心铜箔可能会“鼓包”。这样来看网格铺铜应该不是散热好，而是“透气”吧？

参见 <http://bbs.21ic.com/icview-57543-1-1.html>，截止到 2013 年 8 月 12 日此贴尚可打开。

我又搜了下“电路板 制造”，这回搜出来一些电路板加工厂的网站。打开一个厂商的主页，我随意点了下“生产技术”，出来的内容让我一下泄了气，完全的不懂。“热风整平？化学镍金？”不明所以。“单/双面？”这个懂，C# 那些板都是两面有线路的，算双面的吧？还有单面有线路的？“4 层？6 层？”不明白，难道是板子中间还夹着铜箔？这有点神了，不可能吧？”

疑问太多了，我只好关了网页，“还是以后慢慢向 C# 请教吧。”我重新在 GOOGLE 上搜了一下“绿油 白油 过孔 焊盘”，第一页中有个链接引起了我的注意——“怎样给过孔涂上绿油？”过孔周围本来就是绿油，怎么还要再涂上呢？

点开这个链接我被引到一个论坛上，看他们的讨论大概了解到过孔周围本来也是露一圈锡的，但也可以让它四周完全被绿油盖住，毕竟过孔上是不会焊一个元件的，露锡也没有用。至于他们讨论的那个软件如何操作之类的就完全不明白了。

耗到 11 点多了，老妈又来“催眠”了，我很不情愿的关了电脑。空姐 MM 今天没来，我特想问一下那个光光的小婴儿是不是她。

## 本节补充说明

我在上小学时曾协助老师印刷试卷，那是用非常简陋的手工丝网印刷技术，姑且称之为技术吧。老师用一支“铁笔”在蜡纸上写好试题，把蜡纸衬到印刷机的丝网下面，蜡纸下面是一叠白纸，而丝网上面涂满蓝色油墨。用一个滚子把整个丝网轧一遍，油墨就会透过丝网和蜡纸印到白纸上，当然，蜡纸上只有被铁笔划过的地方才会透墨，所以白纸上会出现老师写的字而不是一片蓝色。

而当时的印刷工业，也是“重体力”劳动之一，是“火与铅”铸成的工业。那时候用“铅活字”印刷，印刷工人从成千上万的活字中挑出需要的拼到铅版之中，那一版“重金属”可是死沉死沉的。特殊的文字图案要熔化铅水铸造出来，这项工作对健康的损害是很大的。

现在这些都已经成为往事了，现代印刷工业使用“激光照排”工艺，版面都是在计算机上排成的，然后控制“照排机”用“激光”扫描感光底片，从而形成一张“胶版”，然后再向纸上印刷。而制造印刷电路板，前期工作也是利用计算机绘制“版图”，然后利用“光绘”技术制成胶版（也称“菲林”，英文 Film 的音译），再进一步制成电路板。于是我们称之为“印刷电路板”，英文“Printed Circuit Board”，简称“PCB”。当然，在运用计算机制图和“光绘”技术出现之前印刷电路板就已经出现了，只不过那时是手工制图，然后用“照相”的方法制成胶版。

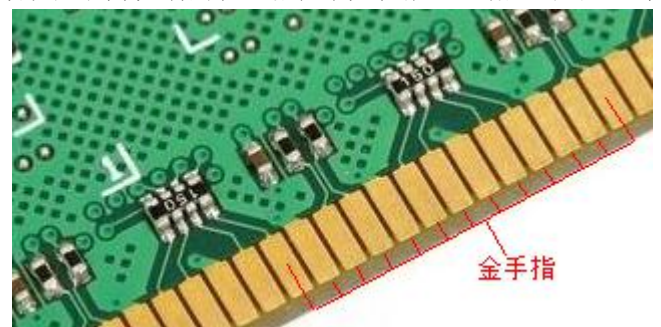
PCB 板所用的材料不仅有我们介绍的“环氧玻纤”板，还有别材料。单就树脂材料来说，常用的除“环氧树脂”之外还有“酚醛树脂”，填料也不仅是“玻璃纤维”，还有用纸做填料的。不同材质制成的电路板性能不一样，“环氧玻纤”板性能很好，在计算机线路中用的非常普遍，其中代号为 FR-4 的板材应用尤其广泛。

板面上覆盖的铜箔，原则上应该以“厚度”来计量，但实际上是以“单位面积的铜箔重量”来计量的，其重量单位是“盎司”，简称为“oz”。通常原材板上的铜箔为“0.5oz”，约  $17.5\mu\text{m}$  厚，电路板厂在做金属化孔的过程中会用电镀的方法将其加厚到“1oz”。现在原材板的生产厂家还能供应“薄铜”料，铜箔不足  $17.5\mu\text{m}$  厚，价格较低。按说提供多种规格的原材供客户选择是件好事，但有一些电路板厂有意采购薄铜料降低成本<sup>®</sup>却不与自己的客户说明，这是非常恶劣的行径。对于本教程中要制作的电路来说电路板铜厚不是一个重要的指标，但有些产品设计对铜厚确实是有要求的。

铜箔与基板的结合不是非常的牢固，特别是在焊接时的高温作用下，铜箔易于从基板上脱落，当然不会是烙铁一烫就掉，制板厂会保证铜箔在多高温下多长时间内不会脱落，但这仍然要求我们不能没完没了的用烙铁烫它。

我们以双面板为例简单说一下制板的过程。板子不会首先制造出线路，而是先钻孔，在铜箔面完整的时候钻出所有需要沉铜的孔，之后就是“孔的金属化”，这会在整个铜箔面和孔的内壁上沉积一层铜，然后进行电镀，使铜箔面加厚，孔内壁的铜加固。可以看出之所以保持铜箔面完整是为了电镀的需要。再之后就是制作线路，做阻焊和丝印，利用“喷锡”工艺处理焊盘，最后加工外形和无需沉铜的孔，然后测试出厂。当然这只是一个粗略的过程描述，实际的流程要复杂很多。

有时板子上会有一些镀金的触点，比如你电脑的“独立”显卡插进扩展槽的那一排触点就是镀金的，这是由接触的可靠性所要求的。镀金的触点称“金手指”，制板厂做金手指时要单独计价的。有时整板的焊盘都做镀金处理，这主要是由于板上有大量的焊盘非常精细，以“喷锡”工艺处理后表面平整度不高，因而选择镀金。镀金的板子本身也属“无铅”的，但无论如何以镀金工艺做表面处理成本都比较高。



最后简要说一下电路板上的“孔”，这是个很闹心的东东，本身它占了板子的面积，孔之间的距离也不能很小，所以用“插装”元件制作的电子产品体积都会大一些。我们现在广泛使用“贴装”元件（后文有说明）制作产品，这减少了板子上的焊盘孔，但增加了过孔。不过由于过孔不用插入零件的引脚，它可以做的较小较密集，所以总体上说板面尺寸会减小。但是，孔不能无限的减小，学过机械制造的朋友都知道，孔的加工常用“钻削（xuē）”，钻头是个细长杆，受到压力要弯曲，所以如果孔太细又太深的话很可能钻成斜孔。

<sup>®</sup> 电镀之后也达不到“1oz”的铜量。若仍然靠电镀达到“1oz”铜量那就不是欺诈了。

## 第2章 初试欧姆定律

C# 所说“还有一个重要的基础知识没说”，指得是对一些利用开关组成的实际电路进行讨论，大概是因为我催的太急，C# 把这部分内容挪到了后面去。公元两千零五年四月二十九日，在经过了一个星期“漫长”等待之后，C# 终于重新出现在 MSN 上。

### 2005-04-29：认识电阻器（一）

有那么句话：“没吃过猪肉，还没见过猪跑吗？”这话到我这儿似乎掉过个儿来了，“欧姆定律”这块猪肉咱已经吃过了，但是“电阻器”这头猪长什么样儿？怎么个跑法？咱是真没见过。这回跟着 C# 复习初中这点物理知识，还真长见识了。

我：“你终于出现了啊！可想死个人喽！！”

师：“不致于的吧？我不来你上网都不知道干嘛了是么？”

我：“那倒不是，N 个漂亮 MM 陪我聊。”

师：“你怎么知道就一定是漂亮 MM 呢？真不是恐龙？”

我：“光光的照片都传给我了，这还有假？可惜是 5 个月大时照的。”

我：“女大十八变，人家现在是空姐。”

师：“你是以不变应万变对吧？你 5 个月大时就色迷迷现在还那样。”

我：“你怎么这么了解我啊？”

师：“别瞎扯了。今天我们开始了解真正的电阻器是怎么回事。”

我：“怎么这么突然？我一点思想准备都没有。不是说还有个什么基础知识没说呢吗？”

师：“本想在了解了各种开关之后跟你讨论一些由开关组成的电路，算了往后放一放吧。”

我：“这个有意思，物理课上倒是没见过实际的电阻器是啥样子。”

师：“电阻器有各种各样不同的外形，或者说‘封装’。你还记得这个名词吗？”

我：“我记得，通常都把电子零件的外形尺寸称之为‘封装’。Package 没错吧？”

师：“最常见到的一种封装叫做‘轴向引线式’封装，你收个图。（figure0014）”

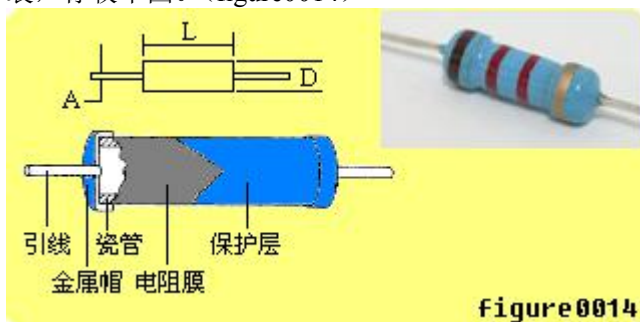


figure0014

我：“右上角那一道道彩色条是什么？”

师：“那是印在电阻器表面的色环，用这个标出阻值的。”

我：“形成电阻的材料被做成一层膜裹在瓷管外

层？干嘛要这样呢？”

师：“这个我也没研究，搞成这样肯定有一些道理的。极可能是这种结构制造简单，也可靠。”

注意电阻器中并非只有“膜式”结构一种，还有其它的结构。电阻膜也不是简单的覆盖一层材料就行。

师：“这种封装具体的尺寸，也就是瓷管的直径（D）长度（L）之类的参数，是与这个电阻通电后发热的情况有关。”

师：“如果是 1 欧姆的电阻器流过 1 安培电流，我们说它的‘功耗’是 1 ‘瓦特（W: Watt）’。”

我：“你是想说选择一个 1 欧姆的电阻器，必须能扛得住这个功耗对不对？”

师：“是的，它要承受不了这种发热那就要烧毁的。冒烟的干活。”

我：“你真能绕弯子。直接说结论行不？”

师：“我直接告诉你怕你印象不深。任何一个电阻元件都有一个‘额定功率’的参数，我们以后常用的多为 1/4 瓦的，那么 1/4 瓦 1 欧的电阻只能允许最多流过 0.5A 电流。”

我：“那 1/4 瓦 100 欧电阻就只能允许流过 0.05A 电流了？”

师：“你还挺会挑数字，选个 100 欧的电阻。你也厌烦计算啊？”

这里对额定功率的说明不够完善，本节后有补充说明。

我：“嘿嘿，小聪明而已。我猜瓦数越大电阻的个头就应该越大吧？”

师：“是的，常见的瓦数有 1/16W, 1/8W, 1/6W, 1/4W, 1/2W, 1W 这些，也有更大的。（figure0015）”

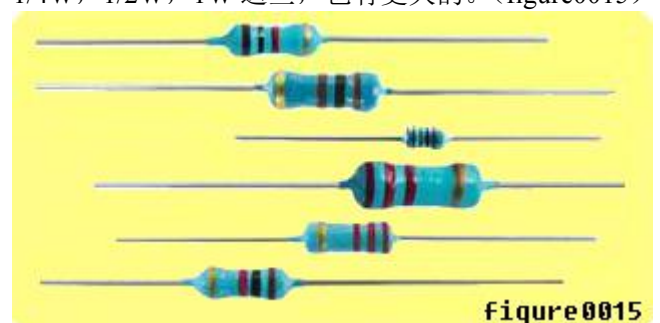


figure0015



1/6W 的额定功率？这个规格有点奇怪。我隐约记得 N 年前买的一个收音机套件中出现过此种规格的金属膜电阻，现在到某宝上搜一下也能找到此种规格的电阻，但这个瓦数，很有必要吗？有一种说法是这根本就是 1/8W 的，可能是因为有人想买 1/6W 的电阻，一些厂家干脆就在包装盒上标上 1/6W 了。

我：“有更小的瓦数吗？”

师：“很少见到更小的。封装说完了，一个电气参数‘额定功率’也说了，下面就是‘阻值’了。”

这里我们仅讨论了“插装”电阻，对于“贴装”电阻由于其体积更小，其“额定功率”有另外的规格。

我：“这有啥好说的？阻值不是根据需要算出来的吗？”

师：“那你举个例子算一下？”

我：“一节 1.5V 电池接在一个电阻两端，我想得到 1A 的电流，那么电阻值就是  $1.5V/1A = 1.5\Omega$ 。”

师：“那我要获得 0.5208A 的电流呢？电阻是多大？”

我：“大约是  $2.88\Omega$ 。你不是不给出这些怪数字吗？”

师：“很遗憾， $2.88\Omega$  的电阻市场上买不着，没有卖的。”

阻器都可以认为是‘合格’的。”

我：“其实不应该说成  $1\Omega$ ，应该明确说成‘ $1\Omega \pm 10\%$ ’比较好吧？”

师：“你还真有点专业的意思哈？”

我：“俺见过俺爹的模具图纸。”

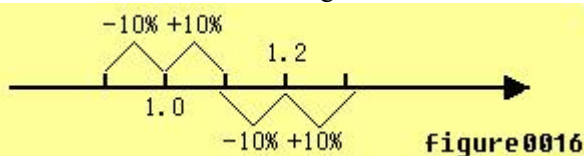
师：“这个  $1\Omega$  叫做‘标称阻值’。这个事情暗示我们在允许误差为  $\pm 10\%$  的前提下，把  $1\Omega$  定为一个标称阻值之后再把  $1.05\Omega$  也定为一个标称阻值是不合理的。”

我：“因为在制造标称值为  $1\Omega$  的电阻时已经造出很多事实上是  $1.05\Omega$  的电阻？”

师：“所以继  $1\Omega$  之后的下一个标称阻值一定要距离  $1\Omega$  充足的间隔。”

我：“那就应该是  $1.1\Omega$  喽？间隔  $10\%$ 。”

师：“不对，是  $1.2$ ，注意是  $\pm 10\%$ 。1 的右侧有  $10\%$ ，1.2 的左侧也有  $10\%$ 。（figure0016）”



我：“忘了左边还有  $-10\%$  了，呵呵。”

师：“所以市场上能买到的电阻器，标称阻值都是根据精度要求按这个表来选择的。（figure0017）”

序列	精度	从 1	到 10
E12	$\pm 10\%$	1.0 1.2 1.5 1.8 2.2 2.7 3.3 3.9 4.7 5.6 6.8 8.2	
E24	$\pm 5\%$	1.0 1.1 1.2 1.3 1.5 1.6 1.8 2.0 2.2 2.4 2.7 3.0 3.3 3.6 3.9 4.3 4.7 5.1 5.6 6.2 6.8 7.5 8.2 9.1	
E96	$\pm 1\%$	1.00 1.02 1.05 1.07 1.10 1.13 1.15 1.18 1.21 1.24 1.27 1.30 1.33 1.37 1.40 1.43 1.47 1.50 1.54 1.58 1.62 1.65 1.69 1.74 1.78 1.82 1.87 1.91 1.96 2.00 2.05 2.10 2.15 2.21 2.26 2.32 2.37 2.43 2.49 2.55 2.61 2.67 2.74 2.80 2.87 2.94 3.01 3.09 3.16 3.24 3.32 3.40 3.48 3.57 3.65 3.74 3.83 3.92 4.02 4.12 4.22 4.32 4.42 4.53 4.64 4.75 4.87 4.99 5.11 5.23 5.36 5.49 5.62 5.76 5.90 6.04 6.19 6.34 6.49 6.65 6.81 6.98 7.15 7.32 7.50 7.68 7.87 8.06 8.25 8.45 8.66 8.87 9.09 9.31 9.53 9.76	

figure0017

我：“赶上我想用的就没有卖的了？”

师：“这个  $2.88\Omega$  如果有得卖那么  $2.89\Omega$  是不是也应该有得卖？那  $2.8853\Omega$  有没有得卖呢？”

我：“这倒也是，不能每一个数值都制造一个电阻，那简直多的没边儿了。”

师：“不单是数值太多的问题，假如说有个工厂真的制造了  $2.8853\Omega$  的电阻器，你买到家用仪表一量，是  $2.8813\Omega$ ，那么你会如何看待这个问题？”

我：“那工厂粗制滥造，不准。”

师：“总是人家有问题啊？你那块仪表就是绝对准的？”

我：“也对啊，凡是制造出来的东西总是多少有些误差的，不可能绝对准啊。”

师：“所以说制造  $1\Omega$  的电阻，如果把误差限制在  $\pm 10\%$ ，那么阻值落在  $0.9\Omega$  到  $1.1\Omega$  这个范围内的电

我：“难道最多只有 10 欧姆？”

师：“具体阻值是表中的数乘以 10 的某次方。”

10 的 0 次方，10 的 -1 次方，这是初中数学课讲的吗？我不记得了。10 的 0 次方等于 1，10 的 -1 次方等于 10 分之 1。

我：“你说的这个我倒是理解了，可我有个疑问：如果我算出来的电阻值是  $2.88\Omega$ ，而根据这个表我只能选一个接近的，那我就不得到  $0.5208A$  的电流了，这行吗？”

师：“你这脑子怎么又木头了？你这  $2.88$  本就是‘大约’啊？”

师：“你要用一个什么样的仪表才能测量出那电路中的电流确实是  $0.5208A$  分毫都不差呢？”

我：“我们先不管仪表，我是说如果实际值和我计



算出来的值相比有误差，这到底行不行？”

师：“这要看你想达到的那个设计目标对于精确度有什么要求。举个生活中的例子，你去买白菜，小贩少称了 10 克，你会去找他说理吗？”

我：“少 2 两会找回去，10 克也就不费那劲了。我在家不买菜的。”

师：“但是你买黄金就没这么大方，少半克你也受不了对不？”

师：“所以如果那电路上流过 0.4A 到 0.6A 电流都能满足实际要求，那你会强求必须与理论值 0.5208A 完全一致吗？”

我：“就和为 10 克白菜找后帐一样，还不够累的呢。”

师：“工程实践就是这样：一切以满足实用要求为主，在满足要求的前提下，怎么简单就怎么来。”

我：“这个‘实用要求’总是有一个范围的吗？某

某数值‘左右’？”

师：“是啊，理论上计算出一个数值，实际往往是取小一点大一点都可以的。但究竟允许小多少大多少，要具体问题具体分析。”

我：“会计的帐本应该是个例外吧？那可是要分毫不差的。呵呵。”

师：“会计的帐本也可能有误差，也可能出现半分钱的时候。”

师：“何况在实践中你要用一个多么精确的仪表才能测出那个值就是你算出的数值呢？仪表也不是绝对准啊？”

我：“我也没真正实践过什么，我就先听你的吧。”

师：“很快就会接触到实践的，等我们把电阻的事说完就要看欧姆定律在实践中的应用。”

师：“行了，我现在要走了，你继续等空姐聊天吧。”

我：“好吧，晚安。我们下回讨论什么？”

没有回音，C# 没有看到我最后这句晚安就跑掉了。我一边在网上闲逛一边回想着今天聊的内容：电阻器常见轴向引线式封装，形成电阻的材料制成一层膜，电阻器具有“额定功率”，这是不能超过的，电阻按“标称阻值”制造，依所要达到的精度不同标称阻值分 E24/E48/E96 等不同系列，最后电路计算可以很精确，但实际把电路制作出来时元件参数通常要做近似，精确到何种程度要根据实际要求决定。

似乎有个封装尺寸被忽略了，就是图（figure0014）中的“A”，这应该是引脚的直径。感觉这个尺寸和散热应该无关，这个尺寸应该与流过电阻器的最大电流相关：引线直径越大就允许流过更大的电流。这引线的材料也是很重要的，应该，，，是铜的吧？是吗？

那么我在网上该搜索些什么呢？就直接查一下“电阻器 膜”吧。我打开 GOOGLE 的主页，输入了“电阻器 膜”这两个关键字。GOOGLE 给出的摘要中有很多“碳膜”、“金属膜”这样的字眼，这应该是制造电阻器的材料。“碳”好理解，“金属”好像不那么具体，很多页面上只是泛泛提了下“一些合金材料”。不过总的来看“金属膜”电阻要比“碳膜”电阻高级。

继续在 GOOGLE 上搜“电阻器 结构 封装”，可惜没有发现带有“轴向引线”这种字眼的页面，不过很多页面中有一些新名词引起了我的注意：“热敏电阻、压敏电阻”。热敏电阻想来是对温度敏感的电阻器，温度变化它的阻值也随着变，初中物理老师曾说过灯泡的灯丝在凉的时候电阻小，点亮之后变热了电阻也随着增大了。“压”敏有点奇怪，对压力有反应？不可思议。有没有“光敏电阻”啊？不是有“光电效应”吗？

我继续在 GOOGLE 上输入了“光敏电阻”这个词，还真的这个东西啊？GOOGLE 搜出了好几万个页面。我又想起了做物理实验用的滑动变阻器，搜了一下，出来的大都是一些物理教学之类的内容，难道电子工程中不用可以调节的电阻？继续搜“可以调节的电阻”，我想这种元件肯定是有，只是我不知道它的学名而已。我很幸运地找到了“可变电阻器”这个词，而继续搜“可变电阻器”，结果又找到了“半可变电阻器”。这也太麻烦了，还是算了吧。

又查了下“电阻器 额定功率”，一些页面上给了定义：“**额定功率是指电阻器在规定的环境温度和湿度下，假设周围空气不流通，在长期连续工作而不损坏或基本不改变电阻器性能的情况下，电阻器上允许消耗的最大功率。**”也不知道严不严谨，但至少和我理解的相当，不过这里提到了“假设周围空气不流通”，那么看来如果有风吹着的话，额定功率 1W 的电阻也许能扛得住 2W 的功率。

再查“电阻器 标称阻值”，一个新名词又冒出来——色标法。C# 给发的图片上（figure0015），那些电阻的确有一圈圈彩色环的，这又是怎么标阻值的呢？打开一个博客看了下，原来电阻值是用 4 个色环（或者 5 个）表示的。好生奇怪，印上字不是挺好吗？干嘛要画上圈呢？

不知不觉又临近半夜了，当空姐 MM 上了 MSN 时恰好老妈过来赶我上床。还是不聊了吧，我也确实有了些困意，匆匆关上电脑，将床板背在背上。

## 本节补充说明

除了膜式电阻器外，尚有一种“有机实芯”电阻器，此种电阻器的可靠性很高，但在本教程中涉及不到，仅在此提一下。膜式电阻器中还有“金属氧化膜”电阻器，此种电阻器可以在高温环境下工作，不用担心电阻材料受热变化。另有一种“线绕电阻”下节会提及。

当一个1欧姆电阻两端加1伏特电压流过1安培电流时，我们是否可以选额定功率为1W的电阻器？这是不可以的，我们必须选择额定功率至少2W的电阻器。因为电子元件的选用要遵循一个基本原则，就是“降额使用”。额定功率是1W的电阻，只能用于实际功耗小于0.5W的场合，或者说额定功率要降低50%后再用到电路中。这完全出自可靠性要求，并无其它特殊原因。当然可以更大幅的降额，比如把额定功率10W的电阻用到实际功耗1W的场合，但这没有必要，因为10W的电阻无论体积还是价格都要高于2W的电阻。具体降额多少，原则上要根据可靠性要求确定，通常50%就可以了。

我们在选择电阻器时，有时还不能完全依靠E24/E96之类的标称阻值，因为市场并不为技术导向。我曾试图购买过4.99K精度1%的金属膜电阻，但并未买到，相反却有供应商能提供5K的电阻，显然这是非标准的电阻。其实5.11K精度1%的电阻恐怕也不好找，但5.1K精度1%的电阻却有，或者说E24系列阻值也常被制造成1%精度的。这个结论有些奇怪，或许是我调查的不够广泛吧。E12/E24系列用的十分广泛，有可能很多人需要使用1%的电阻时，也从这两个系列中选阻值。大家以后不妨找一些商家沟通一下，看看业界到底是什么个情况。

## 2005-04-30：认识电阻器（二）

没有 MM 陪聊确实是很没意思，而且 C# 这家伙也是太不积极，又是耗到快 10 点才跑上网来。没等他说话，我便急切地发问了。

我很奇怪电阻表面为什么要印“色环”表示阻值，放狗搜了下，大家只是解释了如何根据这些色环计算出实际的电阻值，还有人编了根据色环计算阻值的小软件呢，但却没人讨论为什么要这样做。

我：“才来？赶紧给说说‘色标法’是怎么回事。”

师：“你搜到了‘色标法’？都搜到了还问？”

我：“我没仔细看，只记住了有些电阻有 4 个色环，有些有 5 个色环。干嘛非要印上环呢？”

师：“色环看着方便，印字的话焊接时还得保证字朝上能看见，太麻烦了。”

我：“好像有些道理啊。”

这个理由只是作者所认为的，不一定确切。也可能是在制造过程中印色环比印字简单。

师：“那些环中有一圈是精度，有一圈代表 10 的 n 次方。”

我：“好像是这个样，有点印象了。剩下的环是有效数字。”

师：“所以 4 个环的电阻只有两个环表示标称值的有效数字，只能是两个数字的，5 个环的电阻有 3 个环表示标称值。你对一下上次发给你的那个表格。”

我：“就是那个什么 E12/E24 的表？”

我赶紧找出上次的图片文件（figure0017），打开了下，E96 系列的标称值有 3 个数字，小数点后是 2 位。最常用的 E24 系列有两个数字。

我：“5 个环的电阻是精密电阻对不对？”

师：“对，那些精度为 1% 的电阻都是有 5 个环的，表示精度的那个环是棕色。”

从网上可以搜到另一种说法：黑色环表示精度时是  $\pm 1\%$ ，棕色环是  $\pm 2\%$ 。所以 E24 和 E96 之间，应该还有个 E48 系列。但我倾向于认为棕环表示的精度是 1%。

我：“有问题！我印象中好像只有金、银和棕环用来表示精度，那就只有 3 种精度的电阻啊？”

师：“最常用的精度是 10%、5% 和 1%，其它的并不常用。应该是还有其它色环用于表示精度的，没必要深究吧？”

我：“那好吧，不深究了。那些色环对应的数字怎么记？我记不住啊。”

师：“棕一红二橙是三，四五是黄绿六是蓝，七紫八灰白是九，黑色圈圈是零蛋。你记不住因为懒！”

我：“哈哈，最后这句我记住了。怎那么了解我呢？”

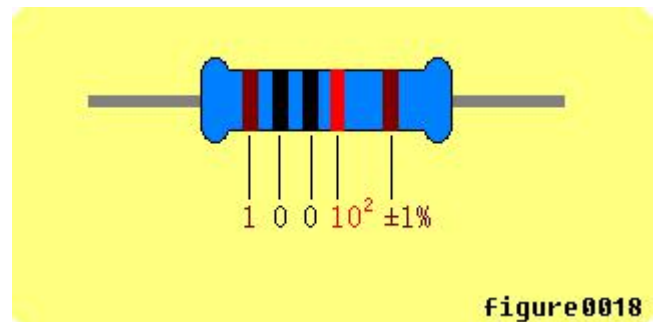
师：“咱做个题吧，本题 10 分。”

我：“咋又搞这个了呢？”

师：“有一个 5 色环电阻，颜色分别是‘棕黑黑红棕’，试算出此电阻的阻值，并说出精度。”

精度当然是最简单的，最后的棕环代表 1%。棕

左边的红，是数字 2，表示  $10^2$ 。剩下的棕黑黑，就是 100，而  $100 \times 10^2$ ，就是 10000 欧姆。（figure0018）



我：“是 10000 欧姆对吗？”

师：“说 10K 欧姆就行了。”

师：“实际上我通常不看色环的，我总是用表量一下。有些颜色不那么容易区分，比如红和橙。”

师：“有时候你也分不清哪个环是第一个有效数字，哪个环是精度。比如‘棕黑黑红棕’，你完全有可能看成‘棕红黑黑棕’的。”

我：“表示精度的那个环应该距离其它环稍远一些吧？”

师：“经常遇到印得不准的，特别是额定功率 1/16W 的电阻，它个头本来就小，印那环更没法看。”

我：“为什么说‘金属膜’电阻比‘碳膜’要好？‘金属膜’是用什么东东做成的？”

师：“我也没了解过‘金属膜’是用什么合金材料。材料确实对元件的性能有重要的影响。感觉上‘合金’比‘碳’要好很多。”

我：“感觉上‘碳’比‘合金’便宜很多。”

师：“呵呵，正是如此。”

我：“那么金属膜到底好在哪里呢？有没有什么具体的差异？”

师：“你知道电阻随温度不同是会变的吗？”

我：“这我知道，灯丝在凉的时候电阻小，点亮一会儿电阻就变大了。”

师：“随着环境温度的变化，电阻器的实际阻值也会发生一些变化，这被称为‘温度变化造成阻值发生漂移’，简称‘温漂’。”

我：“你的意思是‘金属膜’电阻的‘温漂’比‘碳膜’电阻要小喽？”

师：“是这样。你可以想像一个精度为 1% 的‘金属膜’电阻在 70 度高温时阻值增大了 0.1%，而同样是精度 1% 的‘碳膜’电阻的阻值却增大了 1.5%。这些数据不是准确的，只是供你想像一下而已。”

这里只是为了提出“温漂”这个概念，我甚至没有仔

细研究过金属膜电阻的温漂参数是否真的就比碳膜电阻要好。

我：“有了点感性的认识。说到温度，我搜到了‘热敏电阻’这个东西，这种电阻随温度变化很敏感吧？随温度升高阻值变大好多？”

师：“是对温度非常敏感。但并不是所有热敏电阻都随温度升高阻值就变大，多数是反着来的。”

我：“这我倒没听说，我只知道灯丝烧热了电阻是变大的。”

师：“电阻随温度升高变大，这叫做‘正温度系数’，英文是‘PTC: Positive Temperature Coefficient’。还有‘负温度系数’的。”

我：“知道了。‘负温度系数’的英文我自己去查吧。”

师：“你对英文有点抵触情绪？”

我：“那个‘压敏电阻’是什么东东？对压力敏感的电阻？”

师：“对‘力’敏感的电阻是有，不过这个‘压敏’是对‘电压’敏感。当它两端的电压升高时它的电阻会减小。”

有一种电阻应变片，能算是对“力”敏感的吧。

我：“有点意思，这个有用吗？”

师：“你可以想像那些电话线如果雷雨天被闪电劈了，你肯定不想家里的电话机也跟着报销了吧？”

我：“这个可以防雷劈啊？好像比避雷针要高级多了。”

师：“说是防雷，哪有靠一个压敏电阻就能防住雷的，不能太小瞧雷公了。”

师：“其实压敏电阻是用于防止电压在瞬间突然升高很多而损坏电路，而有一类正温度系数的热敏电阻能当保险丝用。”

我：“保险丝我懂，像焊锡丝一样容易熔化，所以如果电线有短路导致电流过大，保险丝就会因为大量发热而烧断了。”

师：“那么你想一下热敏电阻怎么能当保险丝用呢？注意是‘正温度系数’的。”

我：“你直接告诉我行不行？”

其实这事我自己能想明白的：正温度系数，意味着随温度升高电阻值是增大的。那么假设这个电阻平时只有 0.1 欧姆，它接在电源入口等于直通，电阻太小了。如果发生了短路流过它的电流突然增大很多，这个电阻也肯定发热，这时它的阻值就变大了，当然了，阻值变大了就会令电流减小啊。如果阻值能大到 100MΩ 那不就约等于切断电路了吗？

我：“我想清楚了，短路后的大电流让这种电阻发热阻值变大，大到一定程度就相当于切断电路了。”

师：“你能猜到这种电阻有些什么特性吗？”

我：“它必须对温度变化特别敏感，温度一高它的阻值也要非常迅速的升高，否则来不及了。”

师：“还有其它的没有？比较独特的有意思的特性？”

我：“想不出了。”

师：“普通保险丝烧断了要更换，这种保险是不用换的对不？”

我：“对啊！短路故障排除后就没有大电流了，这个电阻不再发热了阻值又会重新变小，它自己能恢复啊。”

师：“哈哈，转过一个弯的感觉很爽是吧？这个东东叫‘自恢复保险’，像保险丝一样‘串联’在电源线上。”

以上只是用 PTC 热敏电阻解释自恢复保险的工作原理，自恢复保险与电阻还是有区别的。

我：“那么防高压的压敏电阻应该跨在两根电线之间对吧？”

师：“这你也自己想明白了？不简单嘛！”

我：“我瞎猜的，我琢磨着怎么着也得和那个保险有些区别吧。还真蒙对了。”

师：“好了，还有没有什么其它的问题？”

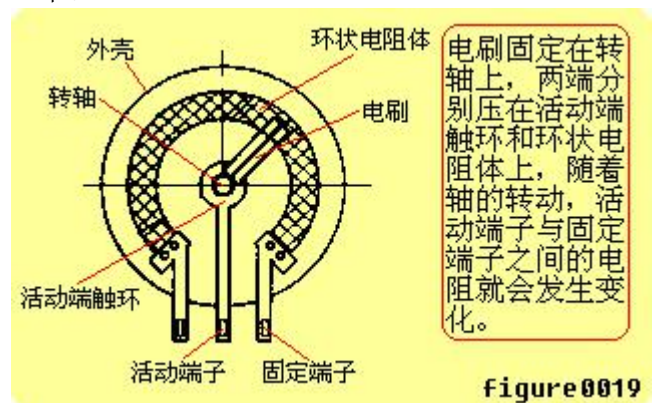
我：“还有一个问题，‘可变电阻器’是怎么回事？咋还有‘半可变’的呢？”

师：“那和你们物理实验课用的‘滑动变阻器’是一回事，只是外形不一样。”



我：“是不是把我们物理实验中的滑动变阻器外形缩小了？”

师：“还不完全是，我发你个图（figure0019）看一下。”



果然与我们做实验用的滑动变阻器不同，电阻本身做成了半环形，中间的那个可以活动的电刷安装在一个转轴上，随着转轴的旋转，这个触点可以扫过电阻环上的任一个位置，于是活动端与固定端之间的电阻膜长度就变了，电阻值也就变了。

师：“这个是最常用的一种结构，收音机和音响上调节音量的那个钮就是这种东东。”

我：“明白了，不过收音机上那个音量钮本身还是



个开关啊？”

师：“对，再给你个图（figure0020）。这是个‘机械’问题，与电学没关系。”

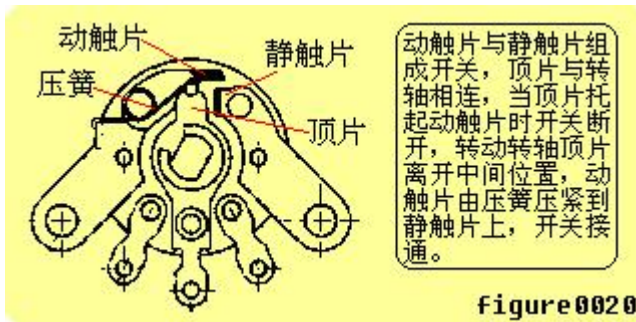


figure0020

师：“可变电阻器也叫‘电位器’，是一种重要的电子元件。也有‘直滑式’的电位器，用的略少。”

我：“这个东西也用什么‘碳膜’之类的材料制造？总感觉不那么牢靠。”

师：“是的，那个半环形的电阻也常用‘碳膜’和‘金属膜’。不牢靠那是肯定的，电阻膜会磨损，活动端触环那个地方可能接触不良，如果有脏东西进去那么触点与电阻环之间也可能接触不良。”

我：“我想起来了，我叔以前给人修收音机时有的就是调音量时喀啦喀啦响，他就把那钮拆了，然后用我爸的二锅头滴几滴。”

师：“应该用工业酒精，二锅头那是凑合。”

我：“呵呵，俺家不缺二锅头，工业酒精还是有的好，俺担心老爸不留神给喝了。”

师：“没啥问题了吧？咱们开始说点别的内容好不？”

我：“行，你先说，末了我再问。”

师：“制造膜式电阻有一个问题，就是如果我想制造  $4.7\text{K} \pm 5\%$  的电阻，我怎样做到那层‘碳膜’一做出来就恰好是我想要的  $4.7\text{K}$ ？”

我：“你根本就做不到。那个电阻膜不可能一做出来就恰好是想要的阻值。”

师：“是的，所以电阻膜制好之后，每个电阻都必须‘修正’，以使它们达到我们需要的阻值。修正的方法，是把本来完整包在瓷管表面的电阻膜，切成螺旋形。”

我：“没明白，给找个图吧。”

师：“所以膜式电阻中的电阻膜的实际形式是这个图中所画的那样。（figure0021）”

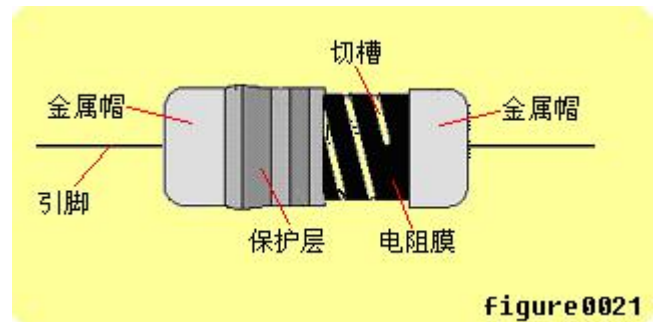


figure0021

我：“我明白电阻的符号为什么画成‘波折线’了。电阻膜实际像一条丝带盘绕在瓷管上，并不是瓷管表面都涂满电阻膜。”

师：“另外还有一种‘线绕电阻’，是把合金材料拉成细丝，表面上绝缘漆，之后一圈一圈绕在绝缘骨架上。”

我：“这好像有点麻烦？绕啊绕的。”

师：“这种线绕电阻可以做的特别精确，也容易做成低阻值大功率的电阻，但做高阻值的电阻不太方便。”

我：“做高阻值的线绕电阻要用更长的电阻丝，绕的圈太多吧？”

师：“是，线圈太多体积肯定是大，安装不便。”

我：“这个我搞清楚了。还有什么新东西要讲？”

师：“没了，有关电阻元件的内容就先说这么多，应该够用一段时间。”

我：“就这么点东西啊？还以为有什么更高深的呢。那我还有个问题。”

师：“抓紧说，我一会儿还有的忙。”

我：“如果我给一个  $1\text{W}$  额定功率的电阻吹风扇，那么它实际能用在  $2\text{W}$  的功率下对吗？”

师：“对，只要能把发出的热量及时散出去，保证元件本身温度不升高太多就没问题。”

我：“好吧，没别的了，剩下的东西我再去 GOOGLE 吧。”

师：“你电脑里不是有好几个风扇吗？”

我：“那也不是吹电阻的。”

师：“甭管吹什么了，只要散热及时充分，元件功耗过重也不会烧。”

师：“我先走了，下回我们开始讨论一些用开关组成的简单电路。”

我：“嗯，晚安。”

本想再去 GOOGLE 一些有意思的东东，可是打开 GOOGLE 的主页，却感觉想不出什么有意思的关键词了。当然，问题还是有一个的，那就是如果阻值是  $0.1$  欧姆的话，用色环该如何表达呢？既然没得可搜，那就搜这个吧。GOOGLE 给出的答案是：金环和银环也可用来表示  $10$  的  $N$  次方，金环是  $N = -1$ ，银环是  $N = -2$ 。

“唉，既然欧姆定律到此为止了，不妨把这两天讨论的内容小结一下吧。”想到此，我便关上了电脑，拿了纸笔坐到书桌前面。

(1) 欧姆定律看来是不用搞得太难，知道两电阻串联和并联怎么计算就行了，至少是够用一阵子的。不过功率这个内容比较重要，搞不清楚会把元件烧了。

(2) 关于电阻元件，第一项内容是“封装”，这是看得见摸得着的东西。封装尺寸至少和功率是有点联系的，外形尺寸大的电阻器往往扛得住大的功率。另外还需要考虑散热条件。

(3) 电阻元件的第二项内容，就是那个“电阻膜”。制造这个电阻膜所用的材料经常是碳（称碳膜电阻）与一些合金材料（称金属膜电阻），目前了解的是“金属膜”的性能比“碳膜”的要好，好在哪里与为什么好不是很清楚，只是在“温漂”这一个方面有所讨论。这个膜如何制造目前也不完全清楚，只知道电阻膜制成后有

一步“修正”工作，要刻螺旋槽。今天补充了一个“线绕电阻”的内容。

（4）电阻元件的第三项内容，就是标称阻值与额定功率，这是两个最重要的电性能参数。标称阻值和精度有关，依精度不同分成多个系列，常用的是 E12（10%精度）、E24（5%精度）和 E96（1%精度）。额定功率则有 1/16W、1/8W 等不同取值。标称值常用“色标法”，5 个环的是精密（1%）的电阻，4 个环是普通的。颜色与数字之间的对应关系有个儿歌，不过 C# 说辨别色环不太方便，还是用表量一下比较靠谱。

（5）其它一些类型的电阻元件：压敏的热敏的常用做电路保护元件，光敏的应该可以测量光照强弱吧？热敏的还分正负温度系数。还有可变电阻器，也叫电位器，“半可变”的这回没提啊？

嗯，看来就是这样一些内容了。我一边仔细回想这两天的讨论，一边在纸上星星点点地写着想起来的要点。背后的房门打开了又慢慢关上，想必是老妈又来检查工作了吧，还以为我在苦读圣闲书呢。

“如果坐在电脑前，肯定要被赶上床的，坐书桌前熬得再晚也不会有人打扰，这就是一个高中生的现实。实在生不起这份气。睡觉喽！”

## 本节补充说明

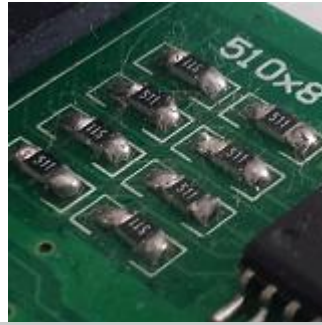
有一些人在为企业招聘工程师，面试求职者时往往问起色环电阻的阻值计算方法，确实会有很多人被问倒，其中不乏一些已经有工作经验的求职者，近而面试官会感叹工程师一代不如一代。其实这个面试题实在是挺没劲的，首先这个题没什么难度，网上搜一下答案一大把，背背儿歌就能过。其次就算能识别色环其实用性也不大，如文中所说这些色环不太容易看清楚。因而用仪表量一下电阻值是最靠谱的。何况现在的电子产品中越来越多的使用“表面安装”（又称“贴装”或“表贴”）的电阻，其阻值是“字标”，直接印上有效数字和10的方次。比如51欧的电阻，会印上510，其中5和1是有效数字，0表示 $10^0$ 。不要误解为510欧，510欧要印成511的。那么5.1欧呢？这是10的几次方啊？5.1欧会印上5R1。因为贴装的电阻器体积很小，有些厂商根本不在每个电阻器上都印阻值，只在大的外包装上标出阻值。



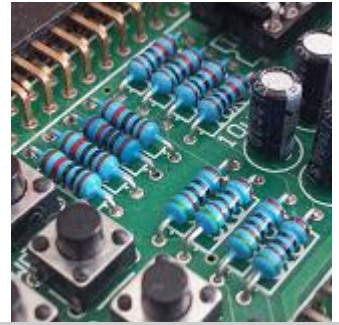
贴片电阻



贴片电阻外包装



贴片电阻手工焊接



插装电阻焊接

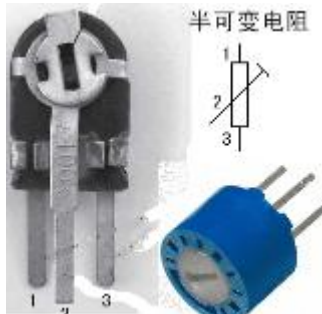
电阻值的温漂，或者说电阻的温度系数，是由电子的“热运动”（或者说“布朗运动”）造成的。想让电子整齐划一地沿同一方向运动不太容易，它受热后总有一股横冲直撞的冲动，致使碰撞摩擦加剧，增加很多磕磕拌拌，表现为电阻值增大。当然这里所说的为正温度系数，负温度系数在讨论“半导体”时会加以解释。

温漂的单位为“ppm/°C”，其中“ppm”指“百万分之几”，200ppm就是“百万分之二百”。多数情况下我们对这个指标并不关心。

各种敏感电阻在本教程中都未涉及，电位器也没有用到，但电位器是个常用元件。“半可调”电阻其实就是个简易的电位器，另有一种“精密可调”电阻，它的旋柄附加了一个“蜗轮蜗杆”组成的机械结构，使得阻值能比较精确地调节。以下一些图片供大家参考。请大家注意电路图符号中“可调”的表示法，一个带箭头的斜线。而“微调”的表示法则是一个带“钉头”的斜线。



电位器



半可变电阻



精密可调



直滑式

各种可调电阻

电位器的阻值变化和旋转端转动角度之间的关系也值得了解一下，一种最好理解的关系是“转动1度阻值就变1欧”，这叫做“线性”关系，具体几度对应几欧并不重要。然而当我们把电位器用作音响系统的音量控制时，这种“线性”的关系就会引发问题，这和我们的“耳朵”相关。我们的耳朵在感知声音音量的变化时有特殊的规律，简单来说当音量从1级变到2级时，我们觉得音量增大很明显，当音量从2级变到3级时，我们就觉得音量增大得不那么明显了，当音量从3级变到4级时，我们会觉得音量增大得更不显著（见图 figure0022）。换句话说人耳感觉声音音量的变化呈现近似“对数”的规律，音量越大，人耳就越迟钝。所以“音量电位器”的阻值随旋转角度变化的规律是配合耳朵的，刚开始旋转电位器增加音量时，旋转的角度虽大但音量实际增加不大，但此时我们的耳朵感觉灵敏，我们会觉得音量增加很大。继续旋转电位器时音量开始大幅升高，但我们的

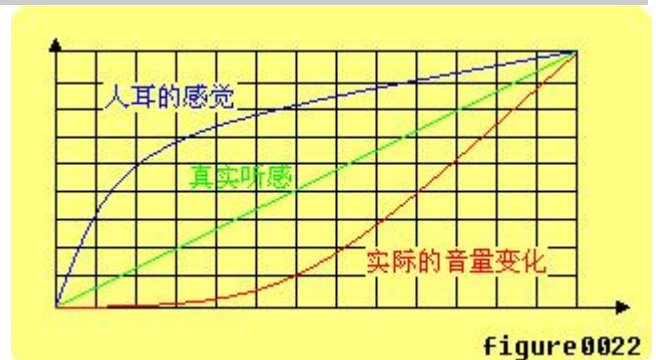


figure0022

耳朵变迟顿了，反而觉得音量增加的程度和开始一样。

膜式电阻中电阻膜的螺旋结构很重要，我们现在可以想像一个高阻值的电阻器，其电阻膜肯定是“窄且长”的，这意味着电阻膜上的切槽很细很密，有一些场合应用这样的电阻就会出现特殊的问题。另外，膜式电阻和线绕电阻在某些时候还不能简单地看作电阻，这些我们以后会逐步加以讨论。

最后，我不得不把一些负面的东西传递给大家：你从市场上购买了五色环的金属膜电阻器，你认为它的精度确实可以达到 1% 吗？它确实是金属膜的吗？这很难说。现在市场上有大量名为金属膜实为碳膜的电阻，精度也很难保证，而且两根引线是铁的，不是铜的，这几乎成了业内的潜规则。还好，对于我们以后的制作而言，对电阻器并无很高要求。



## 2005-05-02：用开关搭电路

说句实在话，咱物理课上也学了电学的，那些习题中最简单的也得有几个电阻吧，而完全用“开关”组成的电路，咱还真是没见着过，确切地说是听都没听说过。一堆开关挤在一起能有什么说道吗？

一直担心 C# 今天不会来了，不过耗到晚上十点多钟，C# 还是跑上来了。

师：“忙什么呢你？你总是比我先跑上来？”

我：“以为你不来了，正想给你写个 MAIL，有几个问题想问一下。”

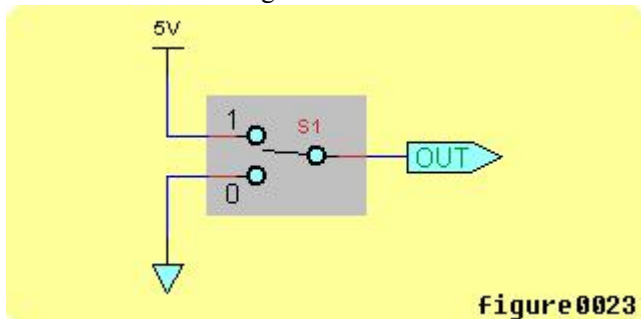
师：“待会儿再写，我们今天要开始新的内容，用开关组合成几个典型的电路。”

我：“不能先讨论下我的几个问题吗？”

师：“问题 EMAIL 给我，时间不够了。”

我：“好吧，你可真够忙的。”

师：“好了，我们今天讨论的第一个电路，就是这个图。收一下。(figure0023)”



我：“这还需要讨论吗？太简单了吧？”

师：“你先跟我说说指向右方的那个箭头是什么意思？”

我：“那是个‘标签’？名字是 OUT？”

师：“OUT 是个 LABEL，外面框了一个箭头，组成了一个‘PORT’。”

我：“这你以前没说过。”

师：“今天告诉你。那个箭尖的方向指示了信号传输方向。”

我：“是指电流的流动方向？”

师：“不是电流，是信号的传输方向。”

我：“不解。”

师：“慢慢来吧，再说尖朝下的那个箭头。”

我：“那是个三角形好吗？是‘接地’，电源的负极。”

师：“这个图里实际包括一个 5V 电压的电源，并未直接画出来。”

我：“故弄玄虚！就直接画个电池出来有何不好？”

师：“你慢慢习惯这样的原理图吧，以后的图都是这模样的。”

师：“现在你说一下这个电路开关拨动后 OUT 端的电压会怎样变化？”

我：“天啊！说点别的行吗？这也太低级了吧？”

师：“你先说说看，说完我给你添点高级料。”

我：“灰色框里是个单刀双掷开关，拨到 1 处则 OUT 端有 5V 的电压，拨到 0 处 OUT 端是 0V，你来说点高级的说法？”

师：“我们把 5V 电压用数字‘1’来表示，把 0V 用数字‘0’来表示。你觉得如何？”

我：“这个说法有点新意，要扯到‘二进制’数上了吗？”

师：“是啊，二进制计数法中就只有两个数字 0 和 1，在电路之中我们用两个不同的电压‘表达’这两个数。”

我：“测量到 5V 就相当于看见数字 1 了？这个 1 必须是 5V 吗？”

师：“这个问题提的好，这个‘1’究竟是多高的电压，这是一种人为约定。既然是人为的，那么怎么约定都是可以的，只要大家都统一在一个标准上就行了。”

我：“要这样说那么 1 节干电池负极可以定为 0，正极 1.5V 可以定为 1，这也没啥问题吧？”

师：“负极-1.5V 定为 1，正极做参考点定为 0 都没问题。”

师：“实际上我们常把电源负极做为电路参考点，就是那个‘地’了。当电路中某一点的电压与‘地’‘相当’时我们就说那一点是‘低电平’，而电路中某一点的电压与正电源端‘相当’时我们就说那一点是‘高电平’。”

我：“高电平用来表达 1，低电平用来表达 0。反过来低电平当做 1 高电平当做 0 也可以吧？”

师：“是的。重要的要有两种不同的‘电平’，谁是 0 谁是 1 根据需要来定。”

我：“好吧，这个清楚了。这个图还有什么门道吗？”

师：“呆会儿再说。收这个图先，这个图和前一个图有点类似。(figure0024)”

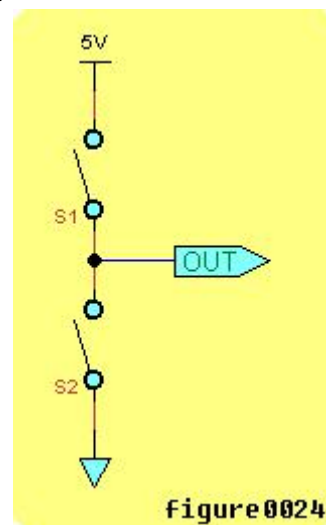
我：“这也太类似了。上面那个开关 S1 接通下面的 S2 断开，OUT 端就是 1，如果下通上断则 OUT 端就是 0。”

我：“总整这种东东有什么意思吗？”

师：“这个图和前一个图还是有不同之处的，你挑出来说。”

我：“开关不一样啊，上个图是一个单刀双掷，这个图是两个单刀单掷。”

师：“所以这两个图我们要真动手操作一下开关肯定会有所不同的，第一个图 (figure0023) 开关随便拨，



而第二个图（figure0024）得加点小心对吗？”

我：“第二个图中无论如何两个开关是不能同时都通的，那样电源就被直接短路了。”

师：“继续说，比如现在 OUT 端是 1，我想让 OUT 端变 0，怎么动开关？”

我：“那就必须先断上面的开关 S1，再接通下面的开关 S2，不能先接通 S2 后断 S1。”

师：“这是显而易见的。这个图还有一个非常重要的特色。”

我：“就这么个图还有特色呢？”

师：“两个开关全接通是不允许的，但两个开关全断开是允许的。”

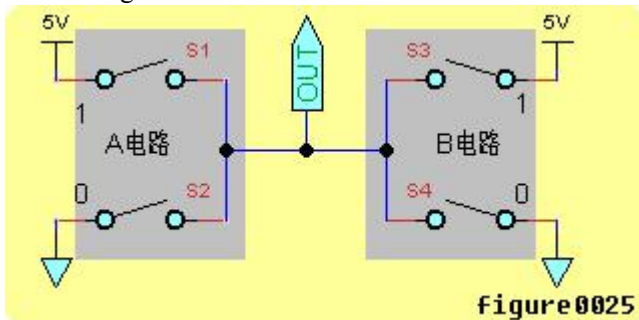
我：“就这个啊？我还以为是什么高深的东东等着我呢。”

师：“相对于上个图（figure0023）来说，两个开关使得这个电路可以有 4 种不同的情形——上通下断、下通上断、上下都断、上下都通。其中‘上下都通’不允许出现。”

我：“这确实是两个图的差异。这有什么用呢？”

我：“我是说上下都断那个状态有什么用呢？”

师：“这就是我发给你的这个图所要说明的，收一下吧。（figure0025）”



师：“这个图的意思是 A 和 B 两个电路的 OUT 接在一起，两个电路都想控制 OUT 端是 0 还是 1。”

我：“这不可能，如果 A 电路想让 OUT 端是 1，它是上通下断，B 电路想让 OUT 端是 0，它下通上断，那么电源还是被短路了啊。”

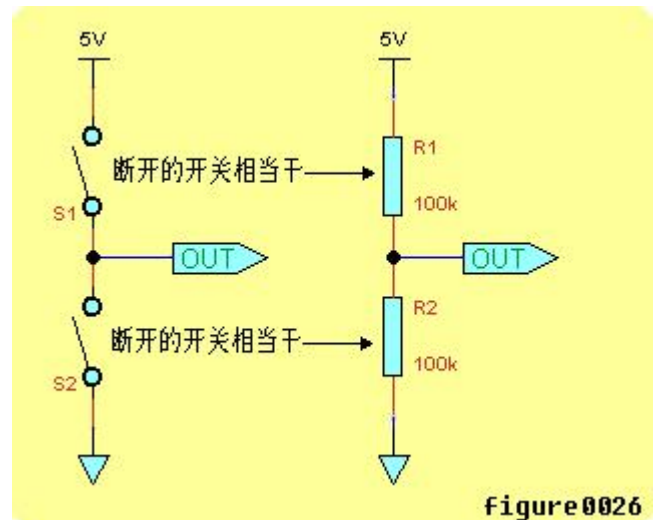
师：“是这样的。所以 A 和 B 同时只能有一个电路起作用。当 A 电路要控制 OUT 端时，B 电路就必须上下都断，反过来也是一样。”

我：“有点意思，只用一个单刀双掷的开关确实无法实现这个目标。”

师：“所以由上下两个单刀单掷开关所产生的 4 种状态中，这个‘上下都断’的状态被称为‘输出端浮空态’，也常称为‘输出端高阻态’。”

我：“就是说 OUT 端对 5V 电源和地都呈现出一个很大很大的电阻？”

师：“是的，相当于上下两个开关都换成一个大电阻，比如 100K 的。（figure0026）”



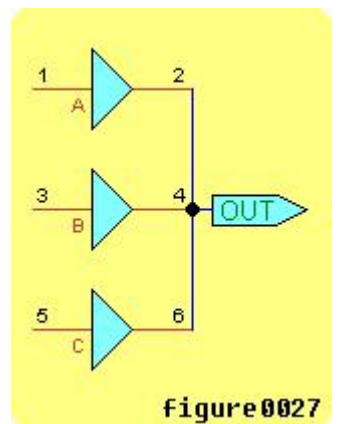
我：“100K 不够大吧？”

师：“这就是个意思而已。”

我：“明白了，这样来看这个两开关的电路比第一个图（figure0023）那个单开关的有优势。”

师：“我们可以用抽象点的形式总结一下（figure0027）；我们把每个三角框看做一个电路，它内部的具体是什么不去管，框左边标了‘1/3/5’的线就是‘输入’端，右边标了‘2/4/6’的线就是输出端。”

我：“多个电路的输出端如果想直接连在一起，那么这些电路的输出就应该能设置为‘高阻态’才行？怎么设置啊？”



此说法不够完善，下一节的补充说明中会有进一步讨论。

师：“完全正确，当 A/B/C 中任何一个电路要输出 0 或 1 时，其它两个电路就必须设置成‘输出端高阻态’。怎么设置我们以后再说。”

师：“这些电路所能输出的‘高阻态’，加上这些电路能输出的‘0 状态’和‘1 状态’，我们说三角框中这些电路是‘三态’输出型的。”

我：“那第一个图（figure0023）可以说是‘两态’输出吗？”

师：“两态就不必强调了。”

师：“其实第一个图也具有三态，因为开关由 0 拨到 1 是需要时间的，那把‘刀’离开 0 而又没接触到 1 时的状态就是‘高阻态’。”

注意上面对单刀双掷开关的说法只是理论上的，或者说是根据图上的开关符号来说的。实际上如果是单刀双掷的“拨动”开关，它在结构上存在一个小细节导致它的动作完全不是我们上面所说的那样。我们以后会另做讨论。

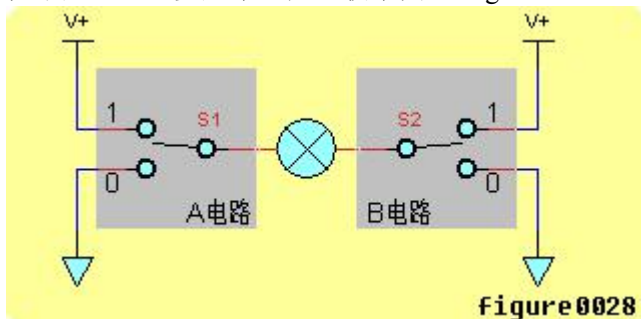
我：“那么短的时间可以忽略了吧？”

师：“那个时间可不短。我们研究的是‘电路’，

对‘电路’来说，1 秒钟实在太漫长了。1mS 都太长，我们经常用 $\mu\text{S}$  和  $\text{nS}$  为时间单位。”

我：“我以为‘一眨眼的工夫’是可以忽略不计的，没想到还真要搞清楚‘一眨眼的工夫’到底是几个毫秒？”

师：“其实第一个图也可以把输出端连接在一起，但不是直连，要加个电阻。收个图。（figure0028）”



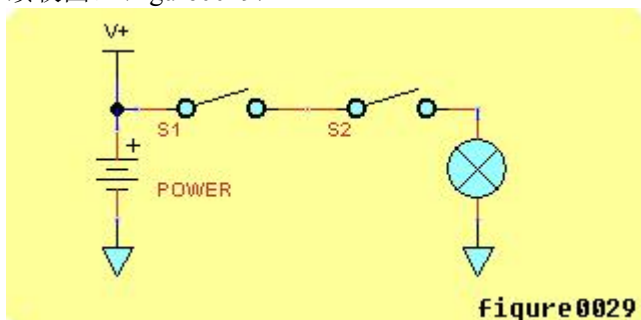
我：“灯泡是有电阻的，换成电阻器也是没问题的对不对？”

师：“对。不是三态输出的两个电路，如果输出端要接在一起的话，就必须加个电阻，避免出现把电源直接短路的情况。”

师：“这个图中我用个灯泡是想体现出这个电路的实用性。”

我：“这么简单还具有实用性呢？”

师：“好了，我们继续用两个单刀单掷开关来组成电路。为了方便叙述，这些电路都是带个灯泡的。继续收图。（figure0029）”



师：“两只开关‘串联’，怎么样？如何才能让那个灯泡亮起来？”

我：“简单，两只开关都接通灯就亮了。”

师：“反过来说呢？”

我：“灯亮是因为两个开关都接通了。”

师：“我不是这个意思。‘反过来说’是‘两个开关中有任何一个不接通灯就不亮’。”

我：“呵呵，我以为是在讨论语文。”

师：“两个开关同样是 4 种状态：左通右断、左断右通、全断和全通。灯只有两种状态：亮和灭。你再收图。（figure0030）”

S1	S2	灯
通	断	灭
断	通	灭
通	通	亮
断	断	灭

A	B	O
1	0	0
0	1	0
1	1	1
0	0	0

**figure0030**

我：“一块儿都发给我不行吗？这一张一张的，比空姐 MM 还能钓胃口。”

师：“这是用表格总结了开关的 4 种状态与灯的两状态的对对应关系。右边的表最重要。”

我：“就是那个有字母 ABO 和数字 0 与 1 的最重要？”

师：“如果仍然以自然语言来说这个表，我们可以说‘A 与 B 同时为 1，O 的输出才是 1；A 与 B 任何一个为 0 或都为 0，则 O 输出 0。”

我：“你真能绕弯子。A 和 B 是某种电路的输入，O 是输出对吧？”

师：“你真机灵，就是这个意思。这个电路实现了‘与’逻辑关系。”

我：“那俺的天份是不是可以加上 0.1%了？还等着到 1%呢。”

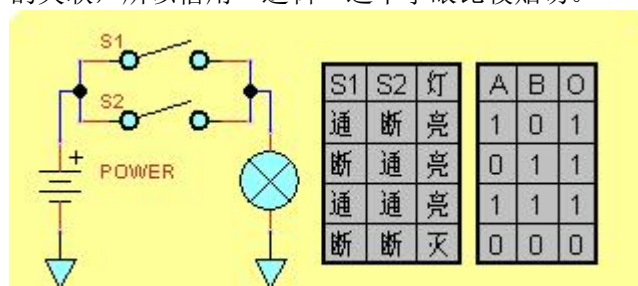
师：“说你胖你就喘。再收图。（figure0031）”

我：“来点名词解释吧，这个‘与逻辑’仨字儿应该怎么理解？”

师：“首先‘与’这个字表示两个开关‘都’要接通，或者说 A 和 B ‘都’要为 1，这时输出才是 1，两个输入与一个输出之间存在关联，我们称这种关联为输入与输出之间的‘逻辑’。”

我：“这不是推理探案的那种逻辑啊？”

师：“其实输入和输出之间就是一种‘因’和‘果’的关联，所以借用‘逻辑’这个字眼比较贴切。”



**figure0031**

我：“总算是一块发过来了。这个我自己总结一下：两个开关并联，只要有一个开关接通，灯就亮了。”

我：“反过来说是‘两个开关都不接通灯就不亮’。用语言表述这个表是‘A 与 B 同时输入 0，O 的输出才是 0；A 与 B 任何一个输入 1 或都输入 1，则 O 输出 1。”

师：“这是个什么逻辑关系？”

我：“这个还是‘与’逻辑关系啊？”

师：“这个不是‘与’逻辑。你应该说‘A 或 B 任何一个输入 1，O 就输出 1。’这个是‘或’逻辑。”

我：“总是对应着‘输入 1’说啊？”

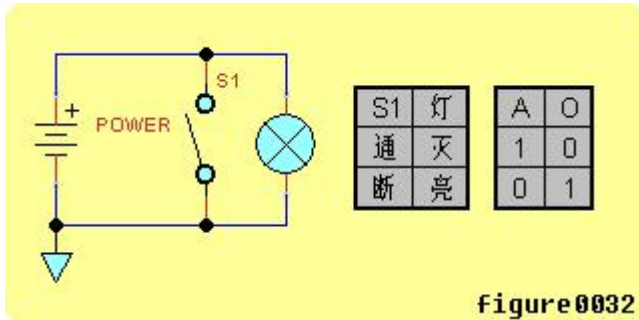
师：“不是总对应着‘输入 1’说，你不能前一个



图（figure0030）对应着‘输入 1’说而这个图又对应着‘输入 0’说，前后得一致啊。”

师：“最后还有一个图，这是我们今天讨论的最后一个电路。（figure0032）”

我：“我还以为所有的图都发了呢，还有存货？”



我：“这个图完全的不好使，开关 S1 不能接通啊？”

师：“先不去管图的合理性，配的那个表能明白不能？”

我：“表倒是好理解，开关断开则灯亮，接通则灯

灭，这是个‘反’逻辑对吗？”

师：“学名叫‘非’逻辑，其实就是‘反’，输入 1 则输出 0，输入 0 则输出 1。”

我：“这些就是我们今天讨论的电路？怎么感觉这么弱啊？”

师：“一点也不弱，至少那个‘三态’输出你是从来没想到过？”

我：“这倒是，怎样把多个电路的输出端连在一起也是从没接触过的内容。不过我仍然觉得比我们物理考试要容易得多。”

师：“容易点也好，省点脑细胞挑逗空姐用。”

我：“嘿嘿，空姐 MM 还没来呢。我们下回要讨论些什么？”

师：“下回说一些用开关和电阻共同组成的电路。我先撤了，你想一下那个实用电路（figure0028）究竟是怎么回事。”

我：“就是那个两个单刀双掷开关控制一个灯的？”

没等我说完，C# 这家伙便以迅雷不及掩耳盗铃之速度冲下 MSN。这个图要怎么 GOOGLE 呢？盯着这个电路看了会儿，实在想不出应该搜什么关键字比较好。要不咱也试着画个表格来分析一下？

我仿照 C# 发来的图画了一个表（figure0033），两个开关仍然有 4 种状态组合，灯亮为 1，灯灭为 0。表格填好后我仔细地对比了一下 C# 发来的表格，这个电路似乎实现的是‘或’逻辑，然而又不完全是‘或’，因为当两个开关都接‘1’时，灯却是输出了‘0’。

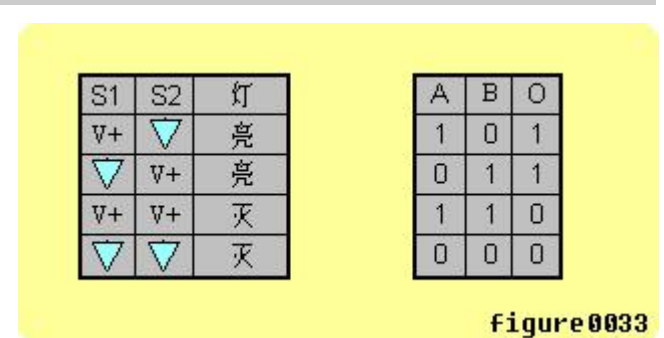
看来通过这个表发现不了什么“实用性”。再仔细思考一下这两个开关对灯的影响，我发现这两个开关并没有确定“开灯状态”和“关灯状态”，更细致地说，当左边开关为 1 时，右边开关为 0 则灯亮，为 1 则灯灭；而如果左边开关为 0，那右边开关的行为就反过来了。

如果左右手分别控制两个开关呢？左手拨开关灯亮，右手拨灯灭，左手再拨灯又亮……

师：“想一下一条走廊中间只有一个灯，怎样避免长明灯。”

我：“你怎么又冒上来了？”

C# 这家伙竟然冷不丁地又上来了，可是只说了一句话又溜了下去。“搞什么搞？还神龙见首不见尾了？”不过这句话还是让我恍然大悟：如果这灯装在一条走廊中间而开关装在走廊两个门口，那么一个人进走廊时拨下开关灯亮，从另一端出走廊时拨下那边的开关灯就灭，这不会浪费电，而且其它的人不论从哪个门进入哪个门出去总是可以开关灯的。有点意思啊。





## 2005-05-03：开关与电阻

说实在的，有点不大愿意和空姐 MM 聊天了，没啥有意思的话题。除了那些艺术照之外，这 MM 最热衷的话题是——爱情。而且，人家男朋友居然是中国人民解放军现役军官诶，“一毛二（一杠两星）”的小中尉。我们高一开学也军训了，班上还真有几个女生喜欢军训教官。不可否认地说，我们教官确实是帅爆了，连我都有点喜欢他。但我总觉得，这个小兵能依靠什么养家呢？细想一下现在的小女生哪管什么家不家的啊，浪漫至上冲动为王，青春苦短，再不疯狂我们就老了。

不过我还是没耐住寂寞和空姐 MM 说了几句，主要是这回人家主动打招呼。

云上漫舞：“你干嘛呢？帅锅。”

我：“怎么主动和我打招呼了？每回不都是我骚扰你吗？”

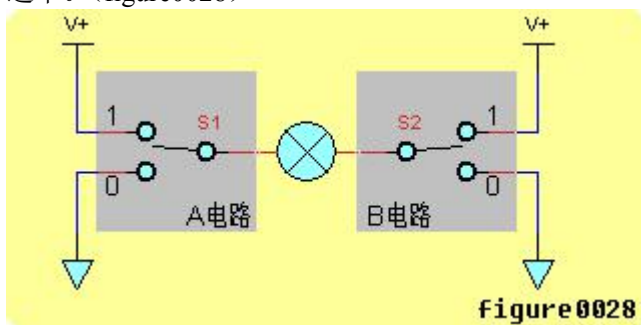
云上漫舞：“别的帅锅都没上来，就你在啊。”

我：“别这样，你首长不高兴了。”

我：“挺好的黄金周怎么不去玩？”

云上漫舞：“我只有这一天的假，明天还得飞，累死了。你不也没出去？”

我：“我忙，我在研究最尖端的科学技术。你看看这个。（figure0028）”



云上漫舞：“就这还尖端呢？这不是个楼梯照明灯吗？楼上楼下都可以开关的。”

我：“哇塞！你可真是惊到我了！你不是空姐吗？怎么还看得明白这个？”

云上漫舞：“我是空姐，我爸爸不是啊，我爸懂这些东西。”

我：“咱爸是中科院的吧？要不就是清华教授？”

云上漫舞：“呵呵。我爸在一个物业公司上班，是电工。”

云上漫舞：“我从小就被老爸灌输这些电啊线的，烦死了，我特别不喜欢这些东西。不过老实说，我学这些东西还是很快的。”

我：“我记着咱爸还向你请教 WINRAR 的用法？”

云上漫舞：“对啊，那都是我自己先学然后教他。他跟不上时代了，倒退 20 年还凑合，现在笨死了。”

我：“不错啦，一把年纪还要学用电脑，精神可嘉。咱爸会装收音机不？”

云上漫舞：“不会。那是我爸，别咱爸咱爸的。”

我：“真是没想到，美女一眼就知道这个图（figure0028）是怎么回事，我可费了牛劲呢。”

云上漫舞：“行啦，我爸老早就给我讲过这个东西，不过好像图不太一样。”

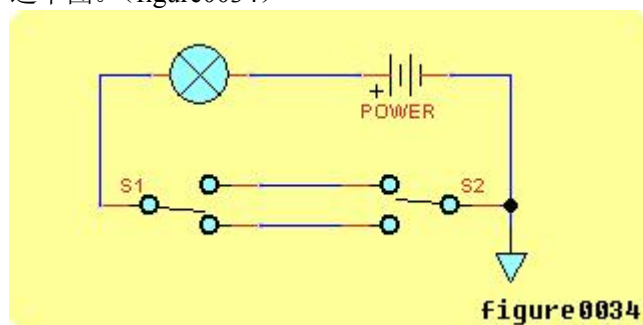
我：“啊？还有别的电路也能做出这功能？你看的图什么样？”

云上漫舞：“我哪记得啊。我看这图有点面熟，就随便猜了下。”

师：“你在忙什么呢？不先打招呼？”

我：“忙着逗空姐。那个走廊灯是不是还有别的电路接法？”

师：“有啊，你自己想出了一种不同的电路吗？收这个图。（figure0034）”



我：“你再看看这图，是不是你以前跟咱爸学的是这个？（figure0034）”

云上漫舞：“你烦不烦啊，我不记得那些东西了。别打搅我。”

师：“你到底有什么心得啊？折腾什么呢？”

我：“没折腾啥，空姐 MM 一眼就看出那是个走廊灯了。太受打击了。”

师：“你费了半天劲就只弄明白这是个走廊灯？没点其它的想法？”

我：“我学着你那样画了个表格，等我截个图给你。（figure0033）”

S1	S2	灯
V+	▽	亮
▽	V+	亮
V+	V+	灭
▽	▽	灭

A	B	O
1	0	1
0	1	1
1	1	0
0	0	0

Figure 0033

师：“这个好，这个总结的不错，比照亮走廊有意义。”

我：“这个也是一种逻辑关系吗？看着像‘或’逻辑，但又不是。”

师：“这个当然是一种逻辑关系，这叫‘异或’，那是‘相——当——’的重要。”

师：“你小子水平不低嘛，这表格都能自己分析出

来？”

我：“我是瞎猫碰见死耗子，这个‘异或’没那么夸张吧？”

师：“以后你就知道异或的重要性了。你先记住异或的规律：两个输入只要相同，输出就是 0，不同则输出就是 1。”

我：“相同为 0 不同为 1，这个好记。”

师：“和‘异或’相对应的还有个‘同或’，就是‘相同为 1 不同为 0’的。”

我：“好像就是‘异或’后面加一个‘非’对吗？”

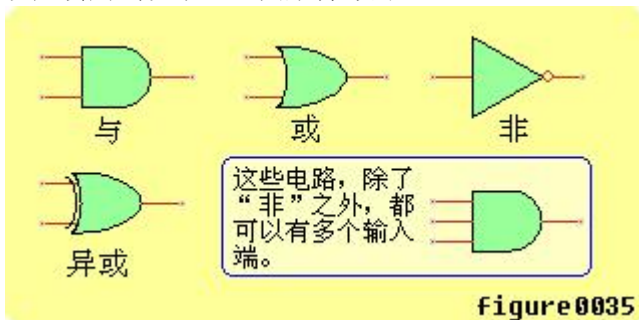
师：“您这就会把不同的逻辑连接到一起啦？太强了你！”

我：“这很强吗？”

师：“四种逻辑关系各有一个表格，这种表格叫‘真值表（Truth Table）’，我们讨论的‘与或非’3个表加这个‘异或’是最简单的，必须牢记于心，倒背如流。”

我：“没问题，死记硬背俺最拿手。”

师：“再给个图（figure0035）总结一下这些电路，以后会用到以下这些图形符号的。”

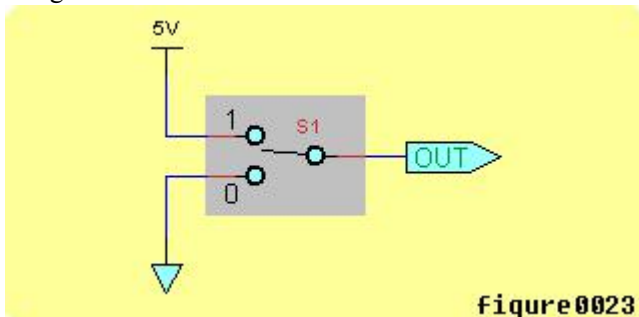


我：“感觉这个‘非’的符号有点意思。”

师：“输出端有个小圆圈，表示‘内外有别’。”

我：“就是说如果内部为 1，输出到外部就为 0？”

师：“就是这个意思。今天我们还是要从这个图（figure0023）谈起，我们要先看这个图的一个缺陷。”

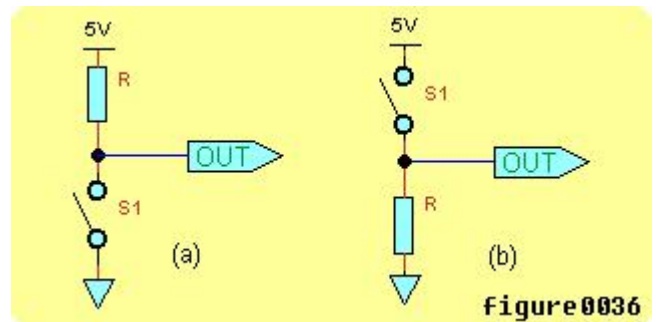


我：“开关在从 1 拨到 0 的过程中有个瞬时‘浮空’状态，这个能算缺陷不？”

师：“你行，记性还不错。我们现在要克服这个瞬时的‘浮空’状态，不让它出现。”

师：“线路是‘相——当——’的简单，收这个图。（figure0036）”

我：“看来我挂了小儿科的号了，真的就是这样的简单？”



师：“看（a）图，开关接通，OUT 输出 0，开关断开，OUT 输出 1。OUT 端从来没有上不着村下不着店的状态，它要么经开关接 GND，要么经电阻 R 接 5V 电源。”

我：“OUT 端经电阻接 5V 也行？OUT 端也会是 5V？”

师：“那它不是 5V 又是多少呢？你觉得 OUT 端是小于 5V 的？那会小多少呢？”

我：“我一时没想清楚，电阻上有电流流动时才有电压降落，没电流电阻上就没电压降，OUT 端只能是 5V。”

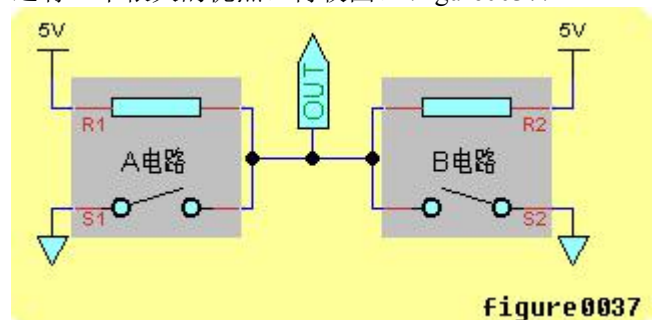
师：“这个电路中的电阻叫‘上拉电阻’，电阻和开关可以换个位置的。”

我：“（b）图中的电阻叫‘下拉电阻’对吧？为什么要用‘拉’呢？”

师：“一直就叫做‘拉’的，形像一点而已。当开关断开时，电阻把 O 点‘拉’到 5V 或 GND。”

我：“真没觉得形像，气味有点怪怪的。”

师：“这个电路不仅保证 OUT 端非 0 即 1，同时还有一个很大的优点。再收图。（figure0037）”



我：“两部分电路的输出端可以直接连在一起？没问题吗？”

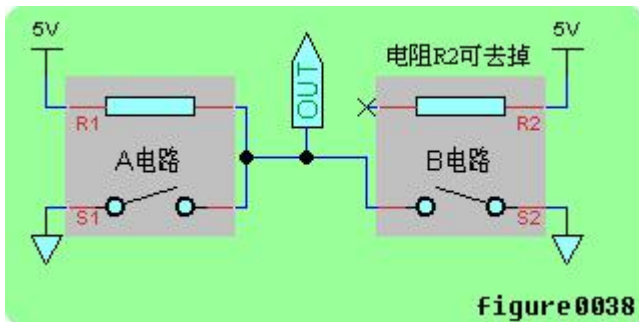
师：“没有任何问题。不论开关是通是断，电源是绝不会被短路的。”

我：“电源肯定没短路的问题。我还观察到一个特点：两个上拉电阻其实是并联在一起的。”

师：“耶！你的天份再加上 0.1%！我越来越喜欢你这个学生了。”

我：“咱别每次只涨 0.1 了，你就说我有那 1% 的天份就行了。”

师：“两个上拉电阻可以只留下一个，或者说两个输出端可共用 1 个上拉电阻 R1，这是没问题的。（figure0038）”



师：“好了，就这个两个开关加一个上拉电阻的图（figure0038）我们还可以继续挖掘一下：由于两开关是接 GND 的，所以我们将开关接通定为 0，把开关断开定为 1，两个开关有 4 种状态组合，O 端对应着有 4 个输出。你来填个表格。（figure0039）”

S1	S2	OUT
通	断	▽
断	通	
通	通	
断	断	

A	B	O
0	1	0
1	0	
0	0	
1	1	

figure0039

当 S1 接通 S2 断开时，OUT 端被 S1 接到了 GND 上，实际上两个开关无论谁接通（或都接通），OUT 端就一定是被接到 GND 的，只有两个开关全断开，OUT 端才被 R1 “上拉”到 5V。

我：“哈哈，这个是‘与’逻辑啊，真是没想到。（见 figure0040）”

S1	S2	OUT
通	断	▽
断	通	▽
通	通	▽
断	断	5V

A	B	O
0	1	0
1	0	0
0	0	0
1	1	1

figure0040

师：“两开关加下拉电阻呢？开关接通定为 1，断开定为 0，不用我再多说什么了吧？”

我：“不用多说了，那个是‘或’逻辑，简单。”

以上的讨论有点不完善，见本小节后的补充说明。

我：“我认为今天讨论的电路比昨天讨论的要好，线路简单，也不用两个开关，输出还能直接连接在一起。”

师：“总结的还真及时？我们下面来讨论一下这种电路的缺点。收图

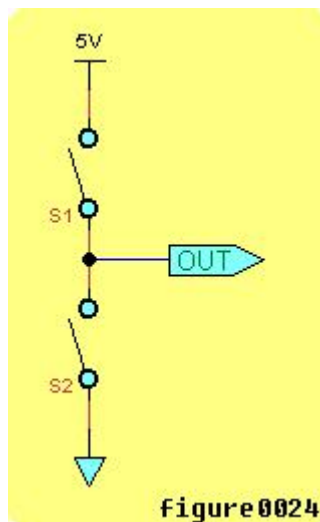


figure0024

吧。（figure0024）”

我：“我倒！你是存心要打击我啊？还是上回的图？”

师：“这个图可以输出 0 或 1，或者输出端为高阻态，不论输出哪个状态这个电路都是不耗电的。”

我：“对，只要两开关不同时接通，这个电路中总是没有电流流动。”

师：“如果你用两只手‘同时’拨动开关，比如左手把上面的拨通同时右手把下面的切断，那么有可能出现上面的开关接通时下面的开关还没断这样一个瞬间。”

后面说到“集成电路”时会用到上面描述的这种情形。

我：“嗯，没有可丁可卯正合适的时候，可能有瞬间两开关都是通的，这会烧保险丝吗？”

师：“保险丝烧断也需要一点时间啊，两开关造成短路的时间如果实在是非常的短那就没问题。”

师：“我们今天讨论的一开关加上拉电阻的电路不是这种特点，它在输出 0 的时候是一定要耗电的，很容易想到吧？（figure0041）”

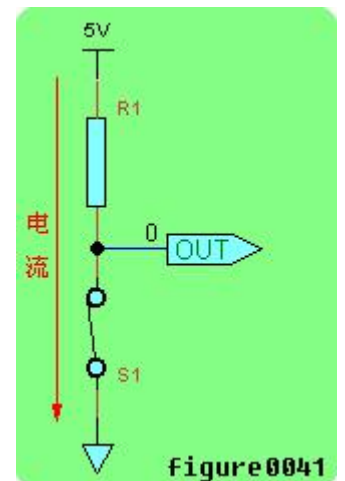


figure0041

（figure0041）”

我：“开关接通后是有电流流过上拉电阻，经开关到地。这算是缺点吗？”

师：“算不上是什么严重的缺点吧，应该说是一个特性。这类型的电路还有其它一些特色，收图。（figure0042）”

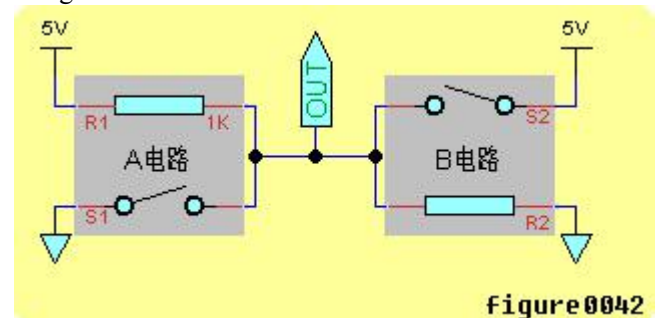


figure0042

我：“这样两个电路的输出还是不能直接连在一起，两开关都接通电源又短路了。”

师：“如果 B 电路把开关拆了，只保留一个下拉电阻呢？电源被短路的危险肯定是没有了，但是有别的问题对不？”

我：“OUT 端不能输出 1 啊。当 A 电路的开关 S1 断开后 O 点的电压是两电阻 R1 和 R2 串联分压，不可能是 5V 的。”

师：“这就是开关加上拉电阻这种电路的缺点所在：对 A 电路来说，它输出端如果对地接了一个电阻（R2）的话，这个电阻不能太小，必须‘远远大于’上拉电阻（R1）才行，否则 OUT 端的电压就不对了。”



我：“可不不论这个对地的  $R2$  电阻有多大，它总是和上拉电阻  $R1$  串联的，它分到的电压总会小于  $5V$  的啊？”

师：“这个我昨天和你说过了， $5V$  表示 1， $0V$  表示 0，这是人为的约定，不是自然规律。”

我：“这么说这规矩是可以改的对吗？那又怎么改呢？”

师：“我们可以重新约定  $4V$  到  $5V$  之间的电压都算 1，这样一来问题就解决了。”

我：“这样的话只要那个对地的电阻达到  $4K$  就可以让  $O$  点输出 1 了，比  $4K$  大当然更好，而且越大越好对吧？”

师：“就是这个意思。那么这个图也就不成问题了吧？收一下。（figure0043）”

我：“开关  $S1$  接通可使  $OUT$  端为 1，断开时  $OUT$  端靠  $1K$  下拉电阻输出 0，只要重新约定  $0V$  到  $1V$  之间的电压都算 0 就行了。”

师：“实际上我们需要把这个电路（figure0044）重新划分一下，分成两级：开关与上拉电阻组成前级电路，那个单独的下拉电阻算是后级。”

我：“就三个零件还要分两级啊？”

师：“先把这个图收下来，我是为了把一些概念说清楚。（figure0044）”

师：“后级这个电阻  $R2$  是接在后级电路的输入端到地之间，可称之为后级电路的‘输入电阻’。而对于前级电路来说，这个电阻  $R2$  接在输出端到地之间，是它的‘负载电阻’。”

师：“我们所约定的那个‘1’是一个信号，这个信号从前级电路传到后级依靠电子的运动，也就是靠电流。”

我：“数字‘1’是由电压表示的，它在电路之间传输却是靠电流的流动？”

师：“对了，这是个关键，很多人都忽略这个事实，所以有时遇到让他们很‘费解’的问题。”

师：“这个电流怎么流动？从  $+5V$  电源出来，经过前级电路的上拉电阻  $R1$ ，从  $O$  点出来，流入后级电路的输入端，经过后级输入电阻  $R2$  进入  $GND$ ，从  $GND$  线上回到电源负端。”

我：“在电源内部电流从负极流到正极，从正极再

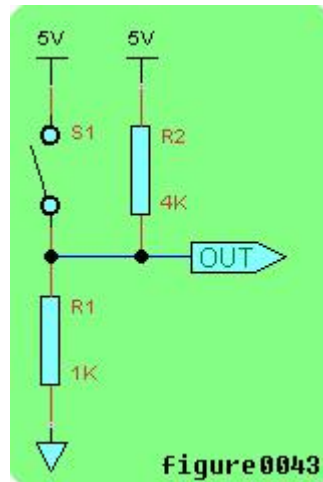


figure0043

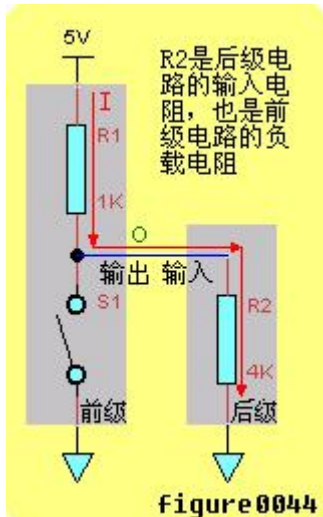


figure0044

出来。”

师：“是的，电流总是要形成一个‘环路’，或者说‘回路’，这也是一个很重要但又常被忽略的事实。”

我：“我也想忽略这些事实，这有那么重要吗？”

师：“前级电路之所以无法输出  $+5V$ ，就是因为它必须输出电流。你没法认为第一个事实不重要。”

我：“这倒也是，只要有电流流过上拉电阻  $R1$  就必然有电压降落的，所以这前级电路总也出不来  $+5V$ 。”

师：“后级电路的输入电阻阻值越小，前级电路就必须能输出更大的电流才能维持住  $O$  点的电压不下降。我们说这时前级电路的‘负载’很‘重’。”

我：“为了能输出大一些的电流，前级电路的上拉电阻就必须减小才能保证输出电压不降低。”

师：“也不是那么绝对，如果你不在乎前级电路输出电压降低的话就不必减小上拉电阻。”

我：“这得在乎啊，输出电压过低就不能当做数字 1 了。”

我：“那我们干脆凡是上拉电阻都用 1 欧姆，这就能适应很大范围的负载了吗？”

我：“我是想保持前级电路输出电压尽可能不降低。”

师：“那你还得考虑输出 0 的情况呢？要输出 0 开关就得闭合，那 1 欧姆电阻上流过多大电流啊？”

我：“ $5A$  的电流，电压是  $+5V$ ，这个 1 欧的上拉电阻上有  $25W$  的功耗。”

师：“你终于想起来计算发热了。 $20W$  的电烙铁能产生  $200$  度以上的高温，这一个电阻上就有  $25W$  的功耗？”

我：“焊电阻的锡都化了。啥叫‘终于’想起来啊？”

师：“说到减小上拉电阻，这里有个重要的概念需要说下。”

师：“阻值越小的上拉电阻越有能力把输出端拉到高电平，所以小阻值的上拉电阻常被称为‘强上拉’电阻，大阻值的上拉电阻则被称为‘弱上拉’。”

我：“强与弱有什么明确的分界线没有？多少欧姆算强啊？”

师：“没有什么具体的界线，大体上超过  $50K$  就算弱， $10K$  以下就算强。”

我：“那要是负载电阻（figure0044 中的  $R2$ ）为  $50$  欧姆的话  $5K$  的上拉电阻能算强吗？”

师：“你也知道强与弱是需要比较才分得出的，那还问有什么具体的界线？那个  $50$  欧的电阻相对  $5K$  的上拉电阻来说是个‘强下拉’电阻。”

师：“我所说的  $50K$  以上为弱  $10K$  以下算强只是一种大家习惯上的分界，其实我们说‘这个是弱上拉’只是暗示上拉电阻的阻值比较大而已。”

我：“明示学起来都费劲，还暗示？我想对于任何电路而言，它的后级电路的输入电阻应该越大越好，减轻前级的负担。”

师：“如果你需要前级电路输出一个尽可能高的电压，那么你的总结是正确的。并不总是要求后级电路的输入电阻必须非常高。”

后面讨论“内阻”时我们会进一步说明上面的结论。



师：“好像时间不早了？我要走了。”

我：“你怎么总是这么急啊？多聊一会儿不行？”

师：“我明天有事情，今天基本上把重要的内容都

说了，剩下的你可以自己回顾总结一下。”

我：“好吧，师傅领进门，修行靠个人。俺自力更生吧。”

送走了 C#，我继续回顾着这次讨论的全部内容，“异或”这种逻辑关系并不难，C# 说这个“异或很重要，想了又想也没看出这有什么特别与众不同的，它和“或”只差了一点点，怎么就重要了呢？开关加上拉下拉电阻输出 0 和 1 时有自己的特色，首先是非 0 即 1，没有其它状态。两个电路的输出可以直接相连，甚至共用一个上（下）拉电阻。昨天讨论的开关电路要求两个电路必须具有“高阻”输出，两组电路输出端相连接时，其中一组电路控制输出端的状态时，另一组电路必须是输出端“高阻”状态的。开关加上下拉电阻看来值得再深思一下。

如果两个开关加上拉电阻的电路（figure0037）输出端直连，如果 A 电路的开关 S1 总是接通的，那么输出端 OUT 肯定输出 0，这时如果 B 电路相让输出端 OUT 变 1，它的开关 S2 断开了，输出端 OUT 会是 1 吗？肯定不会，输出已经被 A 电路中的开关 S1 短路到 GND 了，总是输出 0 的。所以 B 电路想控制输出端变化，就要求 A 电路中的开关必须断开才行。这样 A 电路的输出端对 Vcc 有一个电阻，对 GND 是断路的，这难道不属于“高阻”态吗？好像不属于，因为对 Vcc 的电阻 R1 不一定是“高”阻。可是上拉的“强弱”又是相对的啊，那么所谓的“高阻”就一定要求电阻要用“高”阻值吗？这有些说不清楚了。看来这样的电路输出端直连只是没有把电源直接短路的危险，两个电路还是只能“分别”控制输出端的状态。

信号在电路中传递是靠电流的，而信号 0 或 1 又是靠电压高低来表达，既有电流又有电压的话，这不就是“功率”吗？看起来信号其实是一股“能量”啊。C# 说这个很重要却有很多人总是忽略这个事情，这一点我没什么体会，这有什么高深的？“输入电阻”看来是个重点，这个电阻必须尽量大一些才能在其两端分到高一些的电压。这样来看前级电路的上拉电阻可以命名为“输出电阻”了，输出电阻应该越小越好。不对不对，这个电阻越小在开关闭合输出 0 的时候就越费电。看来这种电路确实不是那么特别的理想，存在着一些矛盾。

夜已深了，老妈并没来紧着催眠，毕竟是长假嘛。看来老爸虽然总是和妈妈统一战线，但还是对妈妈施加了一些影响的，要知道不少同学在这个假期里被赶着上补课班呢。刷牙的时候我仍然在想着讨论过的所有内容，突然一个问题冒了出来，我顺手用牙刷在镜子上画了个图（figure0043）：这个电阻 R2 也是后级电路的“输入电阻”吗？输入电阻不是一端要接 GND 的吗？

这个问题不想清楚恐怕是甭想睡觉了，我躺在床上越来越精神，满脑子都是接 GND 的输入电阻。突然间，答案一下子闯进了我的脑海里：GND 的选取是一种人为的约定，我们通常把它选在电源的负极，这个规矩是可以改的。我如果把 GND 选在电源正极呢？问题迎刃而解啊！哈哈，这么简单！

## 本节补充说明

对于（figure0038）这张图，我们进一步做些说明，主要是重新定义其中的开关。我们现在假设这两个开关不是手动的，而是由一个电信号（I1/I2）自动控制。以 S1 为例当 I1 为 1 时，开关 S1 接通，这时 A 电路向 OUT 端输出一个 0，反之当 I1 为 0 时，开关 S1 断开。也就是说，单看 I1 与 OUT 之间是“非”的关系。同理 I2 信号控制着 S2，单看 I2 与 OUT 之间也是“非”的关系。由此我们得到一个新的真值表（figure0045）。

在这个表中，右侧表格中的 A 和 B 我们可以不理，我们现在看 I1 和 I2 与 O 之间的逻辑关系，这一眼看不出来，所以我们增加一个中间结果 T（figure0046），有助于我们理解。可见 I1 和 I2 相“或”之后可得出 T 的值，而从 T 到 O 则是“非”的关系，所以我们称 I1/I2 与 O 之间的关系是“或非”。

I1	I2	S1	S2	OUT
1	0	通	断	▽
0	1	断	通	▽
1	1	通	通	▽
0	0	断	断	5V

A	B	O
0	1	0
1	0	0
0	0	0
1	1	1

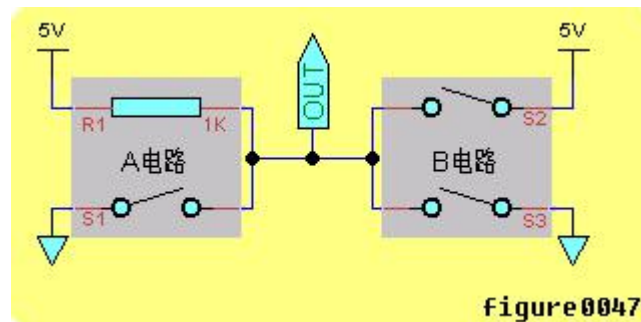
figure0045

I1	I2	T	O
1	0	1	0
0	1	1	0
1	1	1	0
0	0	0	1

figure0046

所以图（figure0038）所给出的电路，有时候我们称其为“与”，这在前文中我们讨论过，有时候这个电路的接法还被称为“线或”，这多少让人有些费解，至少难以理解哪里出来的“或”呢？我可以告诉大家它究竟是“与”还是“线或”跟那个“开关”有密切联系，当开关具有“反向”的功能时，这里就有了“或”。现在大家不太容易理解，后面我们讨论“晶体二极管”和“晶体三极管”时会对这个电路做更详细的讨论。

学习与计算机相关的电路，我们常把注意力集中的“电压”上，因为我们需要用不同的电压表达数字 0 和 1，这令我们时常忽略“电流”，因此有时会遇到一些困惑：“这个点明明应该是高电平 1 啊？怎么会不是呢？”这里我再次强调一下，“信号”是一股“能量”，它同时包含“电压”和“电流”，大家不能只强调其中一个元素而忽视另一个。在我们今后的学习中，我们将真实的看到这个要点。



最后我们来看这样一张图（figure0047），请问当 A 电路的开关 S1 断开后，B 电路能否控制 OUT 端的输出电平？显然是可以的。由此可见当两部分电路的输出端直接连在一起时，也不是必须要求两部分电路的输出端都具备“高阻态”。或者，当 A 电路的 R1 阻值较大时，比如 100K，你说 A 电路开关 S1 断开时它的输出端是“高阻态”也未尝不可。

## 2005-05-04：数字与模拟

一直都想学点复杂的东西，至少，至少一个电路图中所用的元件应该不少于4个吧？这个标准可能有点太低了。说实在的，我有点怀疑C#这家伙是不是每天只琢磨一个开关或者两个开关组成的东西？以前听说有科学家毕生研究 $1+1=2$ 的，C#不会也是这类专家吧？

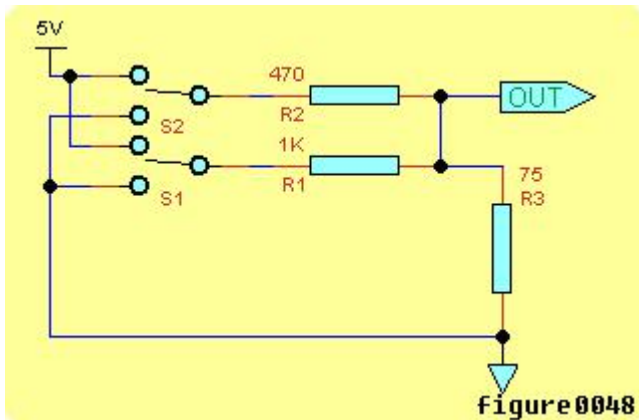
我：“这么晚才来？今天不会是佳人有约吧你？”

师：“你真是冰雪聪明啊，这都被你猜中啦！”

我：“真的啊？那赶紧谈谈师母姓甚名谁？芳龄几何？生辰八字？我给你参谋参谋。”

师：“你还是省点心思吧。今天我们继续用开关和电阻连接成电路，这次比较复杂，收图先。（figure0048）”

我：“终于上难度啦？看来我真得谢谢师母。”



我：“这就是你所谓的复杂？我受不了你了都。”

师：“同样是两个开关共4种状态，我现在要计算每种状态时OUT端对地的电压各是多少。你列个表。”

我：“开关拨到+5V用1表示，拨到GND用0表示没错吧？（figure0049）”

S2	S1	OUT
0 (GND)	0 (GND)	
0 (GND)	1 (+5V)	
1 (+5V)	0 (GND)	
1 (+5V)	1 (+5V)	

figure0049

师：“表格没错，你填一下吧。”

我：“我想两个开关都接GND是最简单的一种情况，OUT端肯定是0V。”

师：“你还有点小心眼儿。两个开关都接+5V呢？”

我：“都接+5V的话，那等于1K电阻和470欧的并联，再和75欧的串上，这是个最简单的混连电路而已。”

我：“并联总电阻 $(1000 \times 470) / (1000 + 470) = 320$ 欧，和75欧串联，75欧电阻上分到 $5 \times 75 / (320 + 75) = 0.95V$ 。”

师：“那么开关S1接+5V，S2接GND呢？”

我：“这都是简单的混连电路而已，不过这次是470欧和75欧并联，然后和1K的串联罢了。”

我：“470欧和75欧并联， $(470 \times 75) / (470 + 75) = 65$ 欧，和1K的串联分压， $5V \times 65 / 1065 = 0.31V$ 。”

我：“这个题不难啊？只是算起来稍微麻烦点。你不是一贯不喜欢计算麻烦吗？”

师：“因为这个电路有实用性，所以电阻的取值都是真实的标称值，不信你可以查以前发给你的标称阻值表。”

我：“又有实用性？你给的这些所谓‘实用电路’好像都特简单，上回那个走廊灯也是。”

师：“不要把‘有用’和‘复杂’混为一谈，‘有用’的东西不一定很‘复杂’。把第三行填了。”

我：“1K和75欧并联， $75000 / 1075 = 70$ 欧，再和470欧串联， $5V \times 70 / 540 = 0.65V$ 。（figure0050）要找点什么规律不要？”

S2	S1	OUT
0 (GND)	0 (GND)	0V
0 (GND)	1 (+5V)	0.31V
1 (+5V)	0 (GND)	0.65V
1 (+5V)	1 (+5V)	0.95V

figure0050

师：“那就找找吧。”

我：“我们是不是又要重新定义0和1的电压范围了？”

师：“就知道你找不出来，又扯到0和1上去了？”

我：“这几个电压怎么都算是0啊？这怎么看逻辑关系？”

师：“这里面没有逻辑关系。如果把‘00/01/10/11’看做数字0、1、2和3的话，那么这个电路的作用是把4个数字分别转换成0V到1V之间的4种不同的电压。相邻数字对应的电压相差大约是0.3V。”

我：“你说这个‘00/01/10/11’就是‘二进制’数吧？对应十进制0/1/2/3，这个我了解一点。”

师：“你要了解二进制数的话我以后倒是省得教了。‘二进制’数很重要。”

师：“你把470欧的电阻换成510欧的，那么就可以发现相邻两个数字对应的电压相差0.3V这个规律更准确一些。”

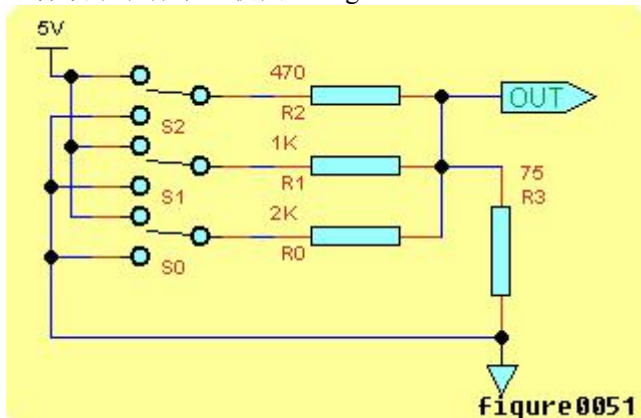
我：“510欧和1K？它们俩好像是2倍的关系？可以这么近似吗？”

师：“就是这样。其实用500欧算出来最准，不过标称值中没有500欧的。”

师：“再进一步观察，还可以发现数字0对应的电压就是 $0 \times 0.3V = 0V$ ，数字1对应的电压就是

$1 \times 0.3V = 0.3V$ ，数字 2 对应的电压是  $2 \times 0.3V = 0.6V$ ，3 对应  $3 \times 0.3V = 0.9V$  这样的规律。”

师：“如果我想把电压切成 8 份，那么只要把电路这样改下就行了。收图。（figure0051）”

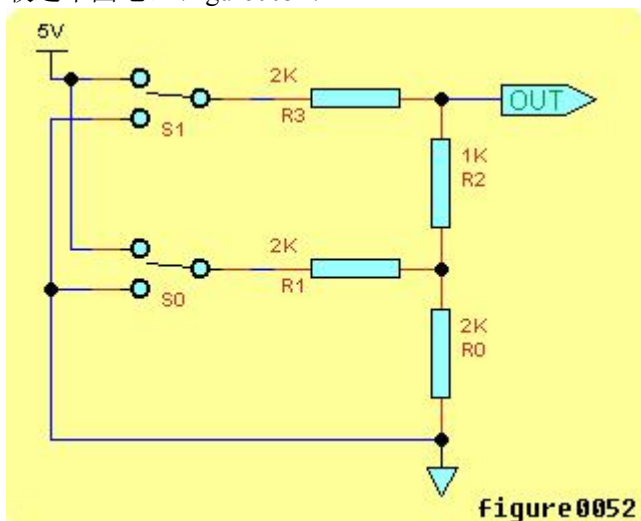


我：“增加的 2K 电阻和那个 1K 的仍然保持 2 倍的关系？”

师：“是的。这个图你可以自己画表和计算。实际上只要再增加 4K、8K、16K 的电阻和开关，那就能把电压切分的更细。”

我：“问题是如果只使用标称值的电阻，那要怎样才能凑上整 2 倍关系的一系列阻值呢？”

师：“这就是这个电路最大的问题所在，凑不出来所需要的阻值。用这个新的电路就可以解决这个问题。收这个图吧。（figure0052）”



我：“这个有点不太好计算啊？两个开关都接 GND 最简单，输出 0V。”

师：“S0 接 GND，S1 接 +5V 也不困难吧？”

我：“S0 接 GND，R1 和 R0 就并联了，是 1K，和 1K 的 R2 串上是 2K，再和 2K 的 R3 串联分压，输出 2.5V。”

师：“那么 S0 接 +5V 而 S1 接 GND 呢？这个有点烦，该怎么想？”

我：“此时 OUT 端输出的电压，就是电流从右向左流过 R3 时在 R3 上形成的电压，所以要找一下 R3 上流过多少电流。”

我：“R3 和 R2 串联，之后和 R0 并联，再和 R1 串联。R3+R2=3K，3K 和 2K 并联是 1.2K，和 2K 串联分 +5V，应该分到 1.875V，所以流过 R3 的电流是

$1.875V/3K$ ，2K 的 R3 上的电压是  $1.875V \times (2/3) = 1.25V$ 。”

师：“这是 2.5V 的一半对吧？所以当两个开关都接 +5V 时，OUT 端应该输出 3.75V，比 2.5V 高出一个 1.25V。”

我：“应该是吧？算一下看看。”

我：“这个很好算啊，还是 3K 并 2K 得 1.2K，然后串 2K 电阻分 +5V，还是分到 1.875V。”

我：“不对啊？1K 的 R2 从 1.875V 中分到 0.625V 啊？不是 3.75V 啊？”

师：“你这个错误太低级了。0.625V 是 R2 两端的电压，我们现在要计算 OUT 端对 GND 输出的电压。是相对 GND 的，你的明白？”

我：“我忘了。还要加上 R0 两端的 1.875V 电压呢。”

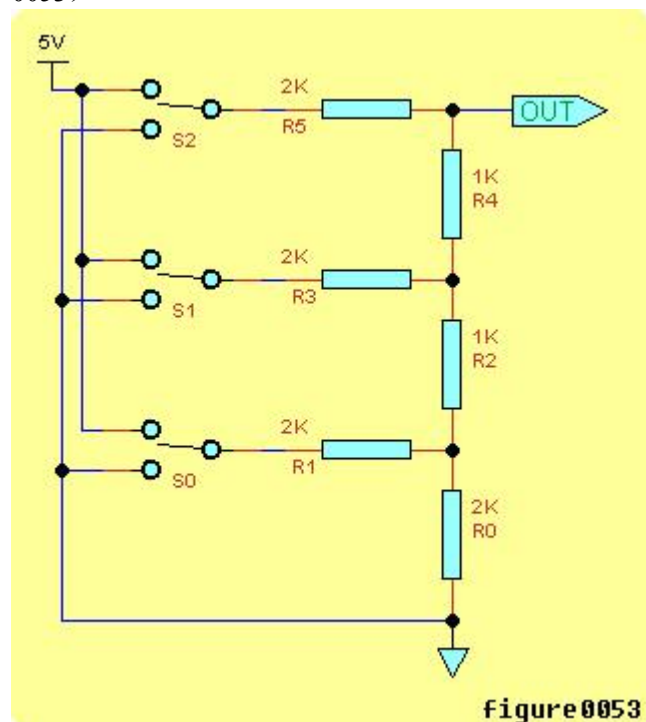
师：“其实你应该知道 R3 两端电压是 1.25V，从 +5V 中减去这个 1.25V 不就行了？”

我：“我糊涂了，这个简单，OUT 端输出 3.75V 没错。”

师：“我们只用 1K 和 2K 的电阻，就可以获得以 1.25V 为间隔的 4 个均匀的电压。两个电阻阻值恰为 2 倍关系。”

我：“想得 8 份电压呢？应该怎么增加电阻？”

师：“收图。就是这样往上堆电阻即可。（figure 0053）”



我：“这个倒是显得很简单，可用的电阻数量太多了吧？”

师：“多乎哉？不多也。才两个阻值。”

我：“我是说电阻的个数多了。”

师：“知道。首先这个电路的性能好过前个电路，如果我们需要获得间隔很均匀的电压，肯定要用这个电路，多买几个电阻也值得。”

师：“其次，零件的规格少一点有好处，你是没啥体会啦，你叔叔办企业的有体会。你以后可以打听一



下他们企业一共用多少种螺丝钉。”

我：“但是我还有问题。假如我去找工厂，定做一批 500/1K/2K/4K 这样的电阻，不用标称阻值，那么就解决了电压均匀间隔问题，用电阻个数还少。”

师：“不，解决不了电压均匀间隔问题。还记得电阻的‘精度’这一说吗？”

我：“记得，我都订做 1%精度的，应该没问题啊？”

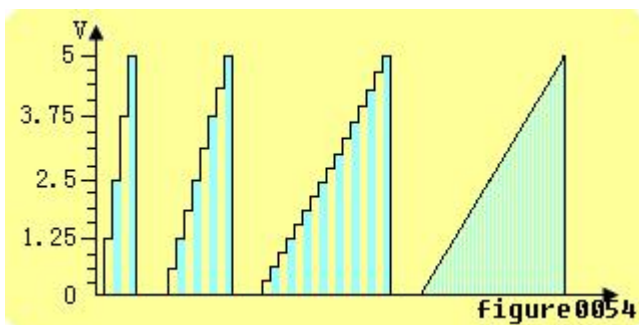
师：“500 欧电阻 1%的精度，误差的实际数值是 5 欧姆。那么 32K 电阻 1%的精度呢？误差的实际数值是 320 欧姆。”

师：“不能光看都是 1%的，基数越大折算出来的误差值就越大。”

我：“也对啊，这样看后一个电路还真是有优势，两个阻值只差 1 倍，如果都选小一点的阻值那误差的实际值都可以比较小的。”

注意“精度”总是用个百分数来表示，所以这里关于电阻精度和输出电压精度之间的关系并没有说明，32K 电阻的误差实际数值较大，但是否使输出电压的误差（也就是那个百分数）变得不可接受？还是值得深入探讨的。

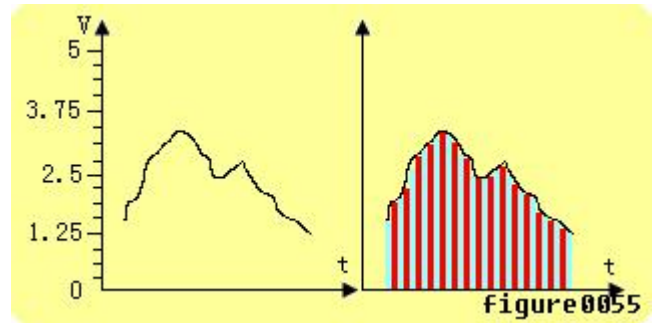
师：“好了，研究完这样两个电路，那么这个图你就能看明白了。收一下。（figure0054）”



纵轴是电压，0V 到 5V，横轴应该是切割的份数吧？切的份数越多，那么相临两份之间的差值就越小。最后一条直线是什么意思？

我：“我想这个图的意思是把 0V 到 5V 之间的电压等分成许多份，分得越多相临两个电压之间的差就越小，如果小到用仪器都分辨不出来的话，那就可以认为电压不是阶梯跳跃变化的，而是连续变化的。”

师：“大意是对的，不过我要给你一个新的说法。再收这个图吧。（figure0055）”



师：“左图是一个电压随时间  $t$ （横轴）连续变化的信号，你看看右图是个什么意思？”

我：“右图是不是说我们可以用一组‘阶梯跳跃’的电压把左图这个变化规律‘凑合’出来？”

师：“完全正确。而且只要这一组‘跳跃’的电压足够多，相临两电压差值足够小，那么凑出来的信号就越像左图的原始信号。”

我：“对啊，这个有点意思。”

师：“为了获得好的效果，首先要把某个范围内的电压（比如 0-5V）细分，分的越细越好。其次，这个图横轴是时间，它说明了在‘单位时间’内，能够给出差值小的电压越多，就越能获得细腻的效果。”

我：“这个倒是挺好玩的，这有实际的用处吗？”

师：“有啊，你听的 CD 盘，看的 DVD 电影，打的电话都和这个有极密切的关系。我们以后会深入地讨论这个内容。”

我：“一杆子给支到以后去了，今天不能多说点？”

师：“对于那些电压随时间连续变化的信号（左图），我们称其为‘模拟’信号，而我们以前讨论的信号，要么是‘高电平’+5V，要么是‘低电平’0V，之间的 2V 啊 3V 的我们全不理睬。这个由所谓‘高电平’和‘低电平’组成的信号我们称之为‘数字’信号。”

我：“因为高低电平可以用数字 1 和 0 来表示，所以叫‘数字’信号对吧？”

师：“可以这么理解。我们今天所讨论的内容，其实是在‘模拟’和‘数字’之间搭了个桥。”

师：“称之为 Digit to Analog Converter，简称 DAC 或 D/A 变换。”

我：“有 DAC 也得有 ADC 吧？怎么搞？”

师：“‘模拟’变‘数字’，那是我们以后要讨论的内容。我们今天就说到这儿了。”

我：“又到这儿了，跟你学点东西真费劲，你总是不给多说一点。”

师：“剩下的靠你自己啦，吃别人嚼剩下的馍可不香啊。我先走。”

我：“走吧。剩下那口馍俺自己咬啦。”

还真不知道该如何进一步学习“模拟”和“数字”这方面的知识，要不就 GOOGLE 一下“数字变模拟”吧，这是今天讨论的主题。

GOOGLE 的结果并不令人满意，都是些与今天的讨论没什么关系的内容。进而再查了下“数字信号 模拟信号”，这回倒是有些内容，不过翻过几个网页都是不知所云。看来选不好关键词是没法找到适合我的内容了。

还是研究一下“二进制数”吧，以前了解过一点，今天把这个重要的内容彻底弄懂。于是重新 GOOGLE 了“二进制数”，呵呵，还是这个简单。

看过几个页面，加上以前的一些印象，“二进制数”的基本内容大体上搞清楚了。突然间一个念头闪现在脑

海之中：要不像 C# 那样写一个小短文吧？给 C# 发过去，看看他会有何评价？

## 本节补充说明

形如（figure0050）那样的 D/A 转换电路，我们称之为“权电阻网络”，除去那个 75 欧接 GND 的电阻，其它 3 个呈 2 倍阻值关系的电阻就是“权”电阻。这个“权”字本意指“称砣”，电阻的阻值相当于称杆上的“星”。或者这样理解，不同阻值的“权”电阻对于最终输出电压所做的贡献是不同的，贡献大小与它的阻值相关。而形如（figure0052）那样的 D/A 转换电路，我们称之为“R-2R 梯形电阻网络”。

## 2005-05-05：二进制数

俺自己写的短文虽然得到了 C# 的肯定，但实在是拿不出手来。毕竟那是根据几个网页的内容熬夜拼凑出来的。不过 C# 在我那篇短文的基础上做了一些增删，修补出一篇还算规整的文字，放在这里供大家参考吧。

在此篇短文中，我们没有讨论数的“正负号”问题，也没有讨论“小数点”。其中有关“正负号”的表达方法在我们开始真正制作计算机并且开始编写程序的时候加以讨论。“小数点”的表达方法，就要放到更远的时候进行讨论了。

### 二进制数

Reanimator & C++++ 2005-05-04

现代电子计算机中使用的数字都是二进制数，其原因我们前面有所讨论，即二进制数只有 0 和 1 两个数字，便于用两种不同的“电平”来表达。或许你还听说过计算机中还常用十六进制数，其实十六进制数大可以看做是二进制数的一种简单记法而已，二进制才是基础。

学习二进制数之前，我们不妨先回顾一下司空见惯的十进制数，主要是重温几个概念。随手写出几个十进制数：0、9、283、9876，第一个重要的概念就是“位”，也就是一个数是由几个单独的数字组成，该数字就是“几位”数。

两个位数不同的数字，我们往往称其为“相差几个数量级”，在十进制数中，一个数量级指得是 10 倍，两个数量级就是  $10^2$ ，也就是 100 了。或者说每个数字所在的“位”都对应着 10 的某次方。具体来说，最右一位（也就是平常说的“个位”）对应着  $10^0$ ，右向左数第 2 个数位（十位）对应着  $10^1$ ，第 3 个数位（百位）对应着  $10^2$ 。以此类推。

我们现在要抛弃以前所学习的“个位”、“十位”、“百位”这样的称谓，改称其为“第 0 位”、“第 1 位”、“第 2 位”，直到“第 N 位”。你可能不习惯从 0 开始计数，从现在起你必须习惯于从 0 开始。第 N 位数对应着  $10^N$ ，所以像 283 这样一个数字其实可以写成一个算式： $2 \times 10^2 + 8 \times 10^1 + 3 \times 10^0$ 。

$10^N$  这样一个倍数中，由于底数是 10，所以称“十进制”，这个 10 也被称为“权”，“权”的本意是指“秤砣”，这样来看指数 N 的意义就显而易见了，它是称杆上的那些“星”。同样的秤砣放在不同的星处所代表的“权重”是不一样的。

了解了“位”，剩下一个概念“数”就很简单了，它是指每个“位”上那个数。对于十进数，每个位上的数可取值的范围是 0 到 9，它一共有“权”那么多个可取的值，最大的值是“权”减 1，最小值当然是 0 了，所以你必须习惯从 0 开始计数。

好了，二进制数的基本概念和十进制数是一样的，只不过“权”是 2，每个“位”上的数有 2 个可取的值，最大值是 2 减 1，也就是 1 了，最小值是 0。

这样一来二进制数 101101 该如何写成一个算式呢？“第 0 位”是 1，它要乘上  $2^0$ ，“第 1 位”是 0，它要乘上  $2^1$ ，“第 2 位”是 1，它要乘上  $2^2$ ，以此类推，这个算式可以写成： $1 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0$ ，计算一下可知这个二进制数相当于十进制数 45。

或许我们应该看下给定一个十进制数，该如何将其转换成二进制，实际上我们常用电脑上带的那个“计算器”程序做这种转换。手工计算可以用所谓的“短除法”，其核心是“除以 2 取余数”。如果你想知道如何手工计算，那么我想请你首先注意一下这个简单的事实：一个十进制的偶数转成二进制数，“第 0 位”肯定是 0，而奇数转成二进制“第 0 位”肯定是 1。所以把一个十进制数转成二进制，你把它除以 2，那个余数就是二进制数的“第 0 位”，那么“第 1 位”呢？继续把商除以 2，这时的余数就是“第 1 位”了。以此类推每个位上的数都是除以 2 取余数。

图（figure0056）给出了一个计算实例，十进制数 37 转成二进制数 100101。我们首先计算“37 除以 2”，余数 1 就是二进制数 100101 最右边的“第 0 位”。而商 18 继续除以 2，余数 0 是 100101 的“第 1 位”，商 9 继续除以 2，余数 1 是 100101 的“第 2 位”。这样一直算下去，直到商是 0 时结束。

以下我们用一些表格总结了一些最简单的二进制数——十进制数对应关系，没什么理解上的难度，关键是把它们背下来。





表（1）：2 位二进制数

二进制	十进制	二进制	十进制
00	0	01	1
10	2	11	3

表（2）：3 位二进制数

二进制	十进制	二进制	十进制
000	0	001	1
010	2	011	3
100	4	101	5
110	6	111	7

表（3）：4 位二进制数

二进制	十进制	十六进制	二进制	十进制	十六进制
0000	0	0	0001	1	1
0010	2	2	0011	3	3
0100	4	4	0101	5	5
0110	6	6	0111	7	7
1000	8	8	1001	9	9
1010	10	A	1011	11	B
1100	12	C	1101	13	D
1110	14	E	1111	15	F

从表（3）可以看到，所谓十六进制数，无非是把一个二进制数中从“第 0 位”起向左每 4 位用一个单独的数字写出来。0 到 9 都是借用十进制数字，从十进制的 10 开始由于没有可供借用的单个数字了，所以就借用英文字母“A 到 F”。比如二进制数 01011010，以十六进制表达就是 5A。由此看来“ $2^N$  进制”数，比如二进制、四进制和八进制等，其实都是二进制数，只不过是把二进制数从“第 0 位”向左每 N 位用一个单独的数字写出来而已，当然，超过十六进制之后（32 进制、64 进制、甚至 256 进制等）通常没法书写，因为那要“发明”很多现实找不到的单个数字，直接借用英文字母也是不够的。

有时候二进制数还有一种特殊的用法，从表（3）我们已经知道“0000”到“1001”分别对应十进制数 0 到 9，所以有时我们利用二进制数重新“编码”十进制数。比如说十进制数“35”，它转成二进制数是“100011”，对应十六进制数“23”。但我们知道十进制的“3”对应二进制“0011”，十进制的“5”对应二进制的“0101”，所以我们可以把十进制的“35”写成“0011 0101”，这可不是把“35”转成二进制，而是借用二进制重新“表达”十进制数。这种编码我们称其为“BCD 码”，也就是“Binary Coded Decimal”，以二进制形式编码的十进制数。这个 BCD 码我们以后会用到，但实际上在现代计算机中它的用途不是非常广泛。

## 第3章 晶体二极管

不知不觉的和 C# 学习电子技术已经一个月了，总得感觉就是太浅，没难度，不大像尖端科技。不过现在情况终于发生了改变，在复习完欧姆定律之后，C# 居然开始讲解“半导体”了，这跨度，有点大了吧？

### 2005-05-09：半导体

连续 3 天没有上网，因为 C# 已经打了招呼，有事情要忙，想必是又跟佳人有约了。俺虽然一心惦记着研究尖端科技，可也不能全然不顾学业，老妈可是盯的紧呢。今天总算有些闲空儿，可以玩一玩电脑了。

我：“才来？这两天你们俩都去哪儿疯狂了？”

师：“我这两天在加班啊！你当我又去会佳人了？”

我：“哦？那师母可是怪可怜的，孤单单的啊。”

师：“她不可怜，仨好的俩厚的陪着四处游玩，充实着呢。我们同事比较惨，五一根本没休，一直忙。”

我：“做电子或者计算机这一行是不是很苦啊？经常加班？”

师：“市场压力大，新的东西出的快了点，所以总是要忙。”

我：“那我得考虑考虑，将来是不是要干这行。”

师：“你还有得是时间考虑。今天我们要研究一些尖端技术：半导体。”

我：“我等到花儿都谢鸟，总算有点上难度的了。”

师：“你以前对‘半导体’有什么了解吗？”

我：“没有。我们初中物理老师给介绍过一点儿。半导体就是导电能力介于导体和绝缘体之间的东东。”

师：“导电能力介于导体和绝缘体之间。你对这句话是怎么理解的？”

我：“就是这东西能够导电，但又不像铜啊铝的那么容易导电，就是电阻比较大一点吧？”

师：“其实这句话说得有点笼统，所以你也无法做到正确地理解半导体。”

我：“这就是你的不对了，明知道这句话笼统还问我是怎么理解的。”

师：“先别急，我们拿‘硅’做个例子，把半导体的性质讨论一下。”

我：“半导体不就是‘硅’吗？难道还有别的？”

师：“‘硅’只是半导体材料的一种，当然还有别的。你怎么会认为半导体就是硅呢？”

我：“不是有个地方叫‘硅谷’嘛，那地方咋偏叫‘硅谷’呢？应该叫‘半导谷’才对啊。”

师：“你可真行。我且问你，你叔叔自己做的第一台收音机你有印象吗？”

我：“他做那玩意儿的时候还没我呢。我老爸印象深刻，那是一台‘矿石收音机’。我爸直到现在还留着呢，我没听它响过。”

师：“没听过也应该意识到那个‘矿石’就是一种半导体啊。”

我：“别说，还真没意识到。那么土的东西也是尖端技术啊？”

师：“那个‘矿石’是‘方铅矿’，化学成份是‘硫

化铅’。现在它不算尖端科技了，但是尖端科技是从研究这些很土的东西起步的。”

据说黄铁矿也可用于制作矿石收音机，我不太确定。

我：“长见识了，你是头一个告诉我那个东东叫‘方铅矿’的。”

师：“我们还是谈谈‘硅’，这个元素在地球上含量极多，可以说到处都是。”

我：“有那么多吗？太夸张了吧？”

师：“沙子里面含有大量的‘二氧化硅’，你说这种元素多不多？”

我：“我又长见识了，玩高科技就是玩沙子啊？！”

师：“呵呵，还真就是这样。沙子也有不同的玩法，你这水平的只会撒尿和泥。”

我：“歇吧，我小时候可没干过这个。”

师：“研究半导体的人把硅从沙子里提纯出来，弄的很纯很纯很纯很纯很纯很纯，纯度达到 99.9999999%。”

我：“九个 9，这个我印象深，当初我们物理老师说到这个百分数眼里直放光，尖端啊。”

师：“九个 9 不算什么，还有十一个 9 的。这么纯的半导体材料叫做‘本征半导体’，你想知道它的导电能力如何？”

我：“我想知道它为什么叫‘本征’半导体？”

师：“你又开始抠字面，这就是起的一个名字而已。本征半导体导电能力很差，几乎就不能导电。”

此种说法存在缺陷。

我：“那这是半导体啊还是绝缘体啊？”

师：“它也不是永远不能导电，你可以用光照射它，或者给它加热，它的导电能力就会明显改变。”

谈论本征半导体的导电能力要附加条件，直接就说‘几乎不能导电’是不合适的。

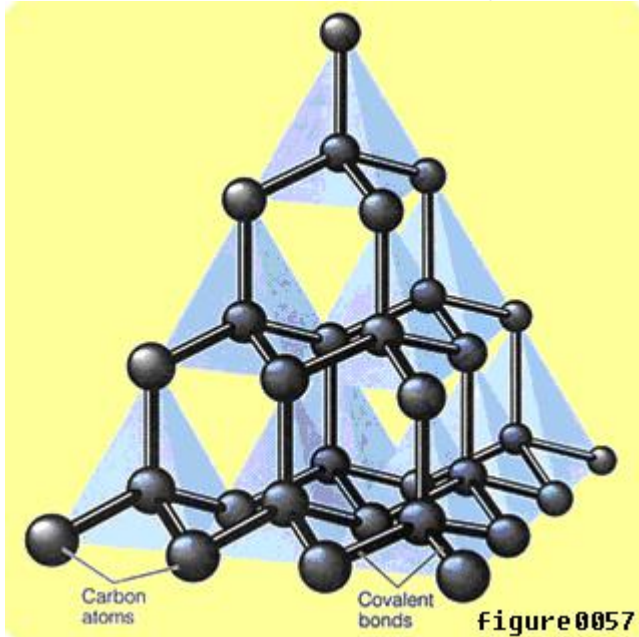
我：“放太阳底下晒它一天一夜它就老实了，呵呵。”

师：“所以我们不能简单地说‘半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间’，应该说半导体的导电能力就像墙头草，它可以偏向绝缘体，也可以偏向导体，全看你用什么手段整治它。”

以上仅是作者个人的一些理解，有待商榷。

我：“那这些整天玩沙子的科学家都有些什么新鲜的手段？”

师：“想知道科学家怎么玩，要先弄清楚‘本征半导体’究竟是个什么结构。收图吧。（figure0057）”



我：“眼熟，好像一个钻石？”

师：“这就是一个钻石，是碳的单晶体。”

我：“不带这么忽悠人的好吗？”

师：“没找着硅单晶的图，搜一个钻石的图片凑合一下，都差不多。”

我：“差多了老大。”

师：“硅原子最外层有 4 个电子，本来不是稳定的结构。不过从这个图中可以看到，每个硅原子都和相邻的 4 个硅原子‘手牵手’。”

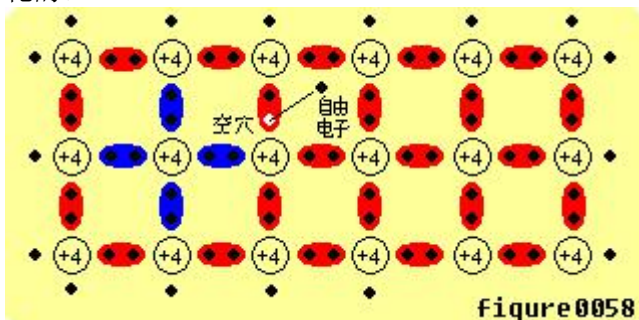
我：“硅‘单晶’是个什么东东？”

师：“先不管‘单晶’，我们可以看到最外层的每个电子都与相邻原子的最外层电子结合在一起，这在化学上叫做‘共价键’，这两个电子实际是同时绕着两个原子核运动的。”

我：“4 个共价键的话，那相当于每个原子最外层都有 8 个电子绕着跑了？这就算稳定了？”

师：“是的，所以‘本征半导体’有点像绝缘体，导电能力很差。”

师：“但这些硅原子又不是绝对稳定，只能算‘凑合’。共价键中个别电子还是会偶尔跳出来成为自由电子（figure0058），这种情况是随着环境条件变化而变化的。”



我：“光照或加热能促使更多的电子跳出共价键，所以导电能力就发生了很大变化，对否？”

师：“对，少了电子的共价键中多了个‘坑’，周边其它电子可能会跳进来把‘坑’填上，然后又可能跳出去填进别的‘坑’里，从外部观察似乎这些坑也在运动着。”

我：“一个萝卜一个坑，改种菜了哈。”

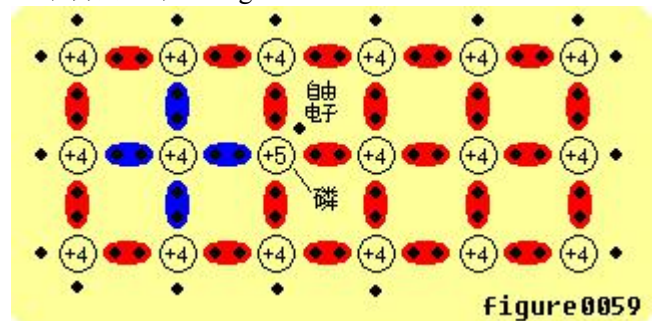
师：“这些‘坑’被称为‘空穴’，玩沙子玩的是什么？玩的就是‘电子’和‘空穴’。”

我：“那么要怎么样来玩呢？”

师：“我们可以在本征半导体中掺点假，比如在纯净的硅中掺少量的磷进去。”

我：“必须掺磷？味精加白糖不行吗？”

师：“磷原子最外层有 5 个电子，少量的磷原子夹杂在硅原子之间，它们也和硅原子以共价键连接，这只用了 4 个外层电子，还剩一个电子，这个电子成了一个自由电子。（figure0059）”

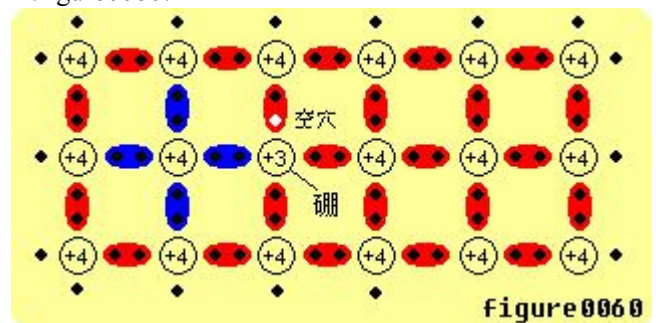


我：“这帮玩沙子的还挺会琢磨，这也想得出来。”

师：“掺了磷的硅由于有了很多的自由电子，所以它的导电能力可是极大的增强了，强的有点像导体。我们将这种多出了很多自由电子的半导体称 N 型（Negative）半导体。”

我：“这个 E 文词眼熟。”

师：“除了掺磷外，我们还可以在硅中掺入硼，硼原子最外层有 3 个电子，它和硅原子以共价键相连接刚好亏一个电子，这形成了一个天然的‘空穴’。（figure0060）”



我：“那这个东西还是导不了电啊，没自由电子。”

师：“你首先应该看出原子最外层只能有 7 个电子对不？它们不是最稳定的。”

我：“那它们就能导电？也不是吧？也算接近稳定的。”

师：“实际上这些坑容易被其它电子占了，若某个电子占了人家一个坑，那它自己又制造出一个坑来。”

我：“就是说这些外层电子们虽然不是绝对自由，可也没闲着，打一枪换一个地方，不停地换坑？”

师：“是啊，从宏观上看这些坑似乎也在非常活跃地运动着。实际上大量的空穴可以为自由电子的运动提供一条通道。”

师：“不过电子想从这种空穴通道中过去，只能老老实实地一个坑一个坑的跳，沿着定好的路线走。”

是否确实是这种运动规律有待探讨。

我：“我查了 Negative 这个词，是‘负’的意思，因为电子带负电，所以电子多的半导体叫‘N’型对吗？”

师：“你没查过‘负温度系数’吗？”

我：“查过，要不怎么感觉这词眼熟呢。就是没记住。”

师：“自由电子多的半导体叫 N 型，‘空穴’多的半导体叫 P 型（Positive）半导体。”

师：“P 型和 N 型半导体统称为‘杂质’半导体，这是相对‘本征’半导体命名的。”

我：“搞不明白既然要掺杂质，那是先提纯到九个 9 又是为何？自讨苦吃？”

师：“我刚说过掺入的杂质是‘少量’的，不妨按重量来说，假如 100 克硅中掺 0.1 克磷。那么用什么手段能确保每次都能精准地掺进去 0.1 克？分毫不能差？”

我：“这里也有个误差问题？”

师：“重量上差那么一丁点，获得的自由电子总数会差上多少呢？百八十万个算不上夸张吧？”

我：“是，电子实在是太小了。这个有误差会出啥问题吗？”

师：“有问题啊，用半导体制造同一种电子器件，永远不会有两个完全一样分毫不差的。即使是同一个工厂同一批器件同一天同一时刻制成的，也找不出两个完全一样的。”

我想大家已经注意到了，提及半导体材料制成的电子零件，我们常使用“器件”一词，非半导体材料制成的零件，则称为“元件”，这是约定俗成的说法。

我：“不一样就不一样呗，电阻器不也个个都不一

样吗？这也没什么关系吧？”

师：“关系大了，半导体器件的差异，不是用 1% 或者 5% 来衡量的，可能是 100%，甚至更大。”

我：“这么严重啊？那这玩意儿能使吗？我造电视机，前 10 台好好的，后 10 台不出影儿，只因为一个半导体零件是新一批制造的，和前 10 台所用的不一样？”

师：“你肯定受不了这事对不？所以早期半导体制造厂努力解决的一个问题就是如何成批生产出性能大体上一致的器件。把原材料提纯到 99.9999999% 就是一个关键，没有办法允许原料里面含有我们不知道是什么的东西。”

我：“要这样看这个‘一致’的问题已经解决了吧？这么多年了。”

师：“没有完全解决，只能说‘凑合能接受’。你以后接触到实际器件的说明书就知道怎么回事了。”

我：“听你这么一说我都不敢再买电器了，怎么那么悬啊？”

半导体器件性能参数过于分散的缺点，可以通过一些电路设计技巧加以克服，以后会有讨论。

师：“先不说这个了。还有最后一个知识点要记住：‘本征’半导体的一个性质在‘杂质’半导体中仍然存在，就是‘共价键’中的电子偶尔会跳出来成为自由电子。知道这意味着什么吗？”

我：“是不是说 P 型半导体中也有很少的自由电子？”

师：“对，相对于 P 型半导体中大量的空穴来说这些自由电子叫‘少子’，空穴是‘多子’。”

我：“那么 N 型半导体中也有‘少子’空穴喽？”

师：“把篮子放下吧，别搂了。就是这个样子。”

我：“明白啦。再见，晚安。”

师：“你怎么知道我这就要走？”

我：“你说的，最后一个知识点啊？”

上过今天这一课，我隐约有了一点感觉：如果用半导体材料做成一个电阻的话，它应该是“光敏”的，也就是说光照到它身上它的电阻就会减小，光照越强它的电阻就会越小，因为光照促使更多被共价键绑住的电子变自由了，导电能力就会增强。

那么它会不会是“热敏”的呢？如果受热也导致更多被共价键绑住的电子变得自由，那它就应该是“热敏”的，而且，它是“负温度系数”的诶？！温度高了电子变得活跃，它导电能力是增强的，所以电阻应该是减小的，这跟灯丝受热后电阻变大不一样啊？

放狗搜了一下“硅单晶”，倒是找到了一些名词解释，什么“具有完整的点阵结构的晶体”之类，也弄不明白是怎么个意思，不过“单晶硅”还真是具有金刚石那样的结构，它的导电能力确实是随温度升高而增强的，这证实了我刚才对“热敏电阻”的猜测。而且我还知道了“多晶硅”这么个东东，还查到了半导体材料中有一种叫做“锗”的，这个东东好像少有人提起诶？

还有什么其它的半导体材料吗？查了下“元素周期表”，那个“硫化铅”距离“硅”和“锗”不远诶，这玩意儿能当半导体使，恐怕不是没有缘由的吧？继续搜索了“半导体材料”，发现很多半导体材料在“元素同期表”上都围绕在“硅”和“锗”的周围，连“锡”都具有半导体的形态，只是不稳定。“碳”竟然也算半导体材料，难道说 C# 找了一颗钻石的图冒充硅单晶也不是差很多啊？看来这些年围绕着“半导体”人们已经找到了相当多的材料了，还有什么东西等着我去发现吗？

再次搜索“电子 空穴”，这回找出来一个比较唬人的名词——载流子，意思大概就是说电子和空穴都能“运载”电流吧，这让我觉得有点难受。至于那些什么“禁带”、“导带”、“跃迁”之类的就完全不知所云了，看来咱这点水平，也就到这儿了，就别指望还有啥新东西留给我去发现了吧。



## 2005-05-10: PN 结原理

正在琢磨着玩沙子的事，空姐 MM 跑了上来，显然她的帅锅们没在网上，要不她不会主动搭理我这个垫底帅哥的。

云上漫舞：“你在忙什么？研究走廊照明？”

我：“没有，这回是真的尖端科技了。我在研究怎么玩沙子。”

云上漫舞：“和尿泥啊？你还小点儿。呵呵。”

我：“这你都想到了？经验还真丰富，小时候没少干这事吧？”

云上漫舞：“干过，还是和帅哥一起和的泥呢。”

我：“真的啊？我想知道究竟是谁撒的尿谁的泥？”

云上漫舞：“哈哈，帅哥撒的，我们一起和的泥。帅哥撒尿会准一点。”

师：“你在忙什么？研究怎么玩沙子？”

我：“对啊。空姐 MM 说她小时候和帅哥一起和尿泥的事。”

师：“我们今天讨论 PN 结，没时间了，先别泡 MM 了。”

我：“为什么总在关键时刻禁止我和 MM 们聊天？”

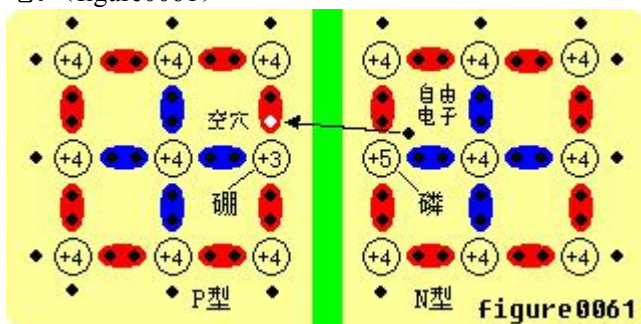
师：“MM 们？你小子胃口还真不小。是不是只有我一个不是 MM？”

我：“差不多是这样。不过还有一个同学是男的。”

师：“好了，不扯这些了。我们今天要把一块半导体材料一半做成 P 型另一半做成 N 型，然后看看有什么有趣的事情发生。”

我：“切两半还能发生啥有趣的事情？”

师：“我说要切成两半吗？还是一个整体。先收图吧。(figure0061)”



我：“整个的？这会出现有趣的事情？”

师：“当然会。N 区有很多自由电子，而 P 区有很多空穴，它们又是一个整体，显然 N 区的电子会跑到 P 区去‘占坑’。”

我：“这样 P 区的共价键就补全了，这不又成了一块‘本征’半导体了吗？”

师：“补不全。N 区虽然有自由电子，但因为质子数和电子数相等，所以不显出带电。然而一旦当 N 区的电子跑去 P 区‘占坑’后，N 区的质子数就比电子数多了，它显出带正电。”

我：“P 区多了很多电子，带上负电。这不就是一

节电池了吗？”

师：“这时 N 区会努力将电子重新吸回来，P 区也会努力把电子推回去。”

师：“不是电池。N 区的电子跑去 P 区是为了寻求‘共价键’的平衡，然后造成 N 区质子与电子的不平衡。这是为了达到一个平衡而制造了另一个不平衡，这不是发电。”

我：“可我们以前说的电子在一个物体内存布不均就是发电啊？”

师：“你用根导线把电池正负极接一起，负极的电子会沿着导线流回正极，我们才说电池‘发出’了电。你把 P 型和 N 型半导体两头用导线连上可没这效果。”

我：“P 区多的电子不会沿导线回到 N 区吗？”

师：“它若想回到 N 区，从半导体里面回去最方便了，为何要绕道走呢？”

我：“那电池负极的电子怎么就必须绕道呢？”

师：“电池内部在发生化学反应啊？！是那个化学反应把电子‘强行’搬到负极去，根本就不允许电子从内部回去啊。我们以前的讨论都白瞎了！”

我：“先别急嘛，我一时绕不过来，等我想想。”

我回忆了一下以前讨论的内容，不论是电池还是发电机，总是有一股“力量”“迫使”电子重新分布。对电池来说是化学反应的力量，对发电机来说则是电子在磁场中运动受的“洛伦兹力”。而在这个半导体中，N 区电子是自发地跑到 P 区，它不是受空穴的吸引？不会，只有质子会吸引电子，P 区虽然有空穴，但总质子数并不超过总电子数，它不会吸引电子。相反 N 区的电子过去后，P 区总电子数反超总质子数，它会带上负电的。

我：“那么如果有能量注入到这个半导体里面，比如说光能，应该会让那些电子绕道外面的导线回 N 区吧？这就是发电了？”

师：“你这句话多少让我舒坦了一点，以前聊的终于没有变成废话。我们继续。”

以上是对太阳能电池所做的极粗糙的解释，仅供了解。

师：“刚刚说 N 区会吸引那些跑去 P 区的电子，而 P 区也会排斥它们，这使得这些电子只能‘越界’一点点，它们集中在 P 区和 N 区的‘交界’处的一个‘薄层’里，这个‘薄层’的厚度以‘微米’计。”

我：“这个能理解。那么有什么办法能让电子充满整个 P 区呢？”

师：“充满干嘛？这个处于交界面的薄层我们将其称为‘耗尽层’，有耗尽层的交界面我们称为一个‘结(Junction)’，由于是由 P 型和 N 型两种半导体形成，所以叫‘PN 结’。”

“耗尽层”也常被称为“阻挡层”。

我：“不让电子充满整个 P 区啊？”

师：“电子没法充满整个 P 区啊！它刚过去一点 N 区的质子就要把它拉回来了。”

我：“那之后呢？该怎么玩这些电子和空穴？”

师：“之后我们就给 PN 结通电（figure0062），外面放一个电源，正极接 P 区，负极接 N 区，电压调到很低，就设到 0.1V 吧。”

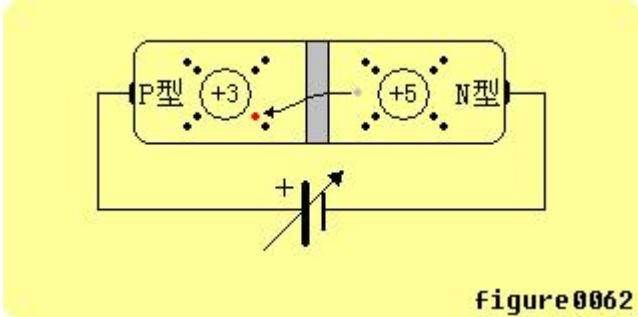


figure0062

我：“干嘛这么低？设 1V 多好算啊？”

师：“0.1 和 1 不是一样好算吗？这不为了计算方便，为了把事情说清楚。你先别打断。”

师：“电压虽低，但电源的正极也一样想从 P 区得到一些电子，电源负极也想把一些电子推进 N 区。但 P 型半导体的性质我们已经说过了，它有空穴但没有那么多自由电子。”

我：“不是从 N 区过来了一些电子吗？把这些电子交出去不就行了？”

师：“P 型半导体也是这么想的，但是总得征求一下 N 区的意见啊？那是人家 N 区的电子。结果当然是 N 区不同意交出这些电子，它还一心想着把这些电子拉回来呢。”

我：“真够抠门儿的，斤斤计较。”

师：“P 型半导体没办法，只好对电源说了：‘哥们儿，还真帮不了你，人家那头不答应。要不你给加点电压怎么样？那头受不了一松手就 OK 了。’”

我：“你还挺能拽的，呵呵。”

师：“电源没办法，‘行，那咱就加点压！’，0.2V，0.3V，0.4V，电源开始发力，可是 N 型半导体还就跟电源‘铆上了’，死活不松手。直到电源加到 0.7V，N 型半导体扛不住了，电子开始沿着 P 区那条由空穴铺成的路流出来，进入电源正极。”

我：“那 N 区还得供应电子去补 P 区的共价键？这样电源负极的电子肯定会补进 N 区吧？”

师：“那是自然。这个电源还有点不满足，它的电压又悄悄增大了一点点，这下不得了，N 型半导体崩溃了，流过 PN 结的电流忽的增大了好多。电源很是惊奇：‘这么爽啊？我再大一点成吗？’于是电源又升高了一点点电压，流过 PN 结的电流又是迅猛上升。”

师：“电源觉得好玩：‘再大一点试试吧。’它又升高一点点，电流继续急剧地增大。这时电源有点含糊了，它不敢再增大，因为那块半导体开始发烧了。”

我：“这个是不是说，此时 PN 结的电阻已经非常的小，以致于电压升高一点点电流就会增大很多？”

师：“嗯，可以拿电阻来类比。”

师：“P 区接电源正，N 区接电源负，这就是‘正

向接电’。PN 结正向接电时，当电压高于 0.7V 后就会‘导通’，然后就变得类似一个很小的电阻，像短路一样。”

注意用电阻类比 PN 结是非常重要的，但并非像上面所说的这样简单，后文还会继续讨论。

我：“干嘛非‘导通’呢？这些词怎么都这么别扭啊？我就说‘P 正 N 负，电压高于 0.7V 就通了’，这行不行？”

师：“行啊，其实就是这个意思。我们现在来看 P 区接电源负极 N 区接正极会怎么样。”

我：“这先让我想想，我试着分析分析。”

P 区接电源负极，电源负极想把电子送到 P 区，而 P 区有很多空穴，正好需要这些电子。而 N 区接正的话 N 区的自由电子刚好被电源吸走啊。

我：“这样连接也应该能通，P 区的空穴刚好需要电源负极的电子，而 N 区的电子刚好被电源正极吸走，这样电子刚好运动起来了。”

师：“如果是这样的话，可以想像 P 区的空穴都被填满，N 区的电子也跑光了，那这块半导体不就成了‘本征’半导体了吗？两头都是稳定的共价键结构，还能导电吗？”

我：“是我想错了吗？怎么会这样啊？”

师：“实际上，PN 结这样‘反向接电’，还真真是不‘导通’的。”

我：“那我继续加压可以吗？”

师：“可以加，但你要注意，N 区的电子跑到 P 区后，P 区已经带上负电了啊，电源负极还想把自己的电子塞进 P 区，这恐怕要遭排斥。”

我：“没天理啊！N 区的电子到 P 区不受排斥，电源负极的电子就受排斥啊？”

师：“谁说 N 区来的电子不受排斥？N 区的电子只能进到 P 区一丁点啊？PN 结的厚度以微米计的。刚说过的就忘啦？”

我：“怎么那么绕啊这个弯子！这么说电源正极也无法继续从 N 区得到电子了？”

师：“没错。N 区已经有一些电子跑到 P 区了，电源的正极还想再拿走一些，这也太欺负人了？”

我：“不行也得行！加压！我加！我加！我加加加！”

师：“你加吧，0.7V 肯定是不行的。再高！再高！再高高高！”

我：“那要高到什么程度才行？”

师：“少则几伏，多则几十伏上百伏，个别的需要上千伏的高压。”

我：“这么夸张？我要加够了电压会怎么样呢？”

师：“电压加到足够高后这材料本身就扛不住了，‘共价键’会被摧毁，PN 结只能导通。这时如果电压再高一点点，流过 PN 结的电流就会剧烈增大。比正向接电还要剧烈。我们把这个现象叫 PN 结‘反向击穿’。”

我：“‘击穿’啊？我们以前讨论过空气被击穿，有闪光和喇叭的响声。PN 结击穿也是带声光效果的吗？”

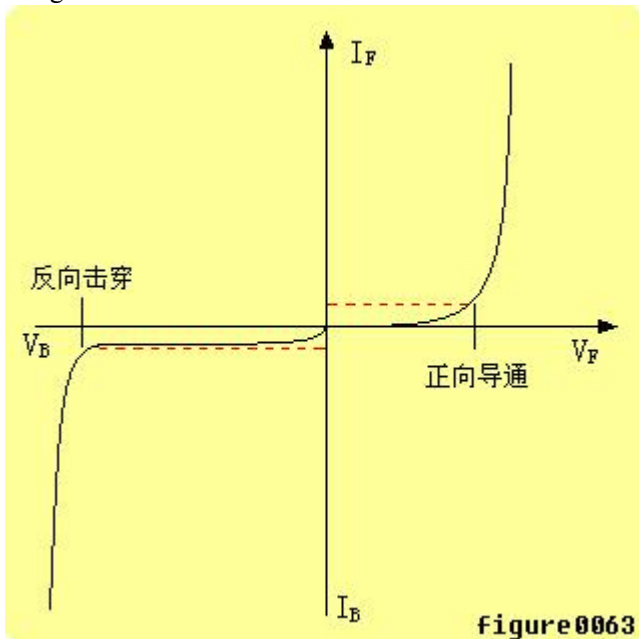
师：“据说是发光的现像，我可是没看见过。发声没有人提起过。”

我从哪里得知 PN 结反向击穿会发光的？不好意思我已经想不起来了。它会发光么？

师：“这事可以用你的风格来总结：‘P 负 N 正，PN 结不通。电压升高的某个值后 PN 结就穿了。’是这样吧？”

我：“PN 结‘反向接电’是不‘导通’的，当反向电压高到某个值后会导致 PN 结‘反向击穿’。就是这个意思。”

师：“你小子也够能拽的！你收这个图看看。（figure0063）”



这张图仅做示意，并非来自真实器件实测出的数据。

我：“Y 轴是电流？X 轴是电压？”

师：“对。Y 轴原点上方表示电流从 P 区流向 N 区，原点下方表示电流从 N 区流向 P 区。”

我：“这我就知道了。X 轴原点右侧是‘正向接电’，P 正 N 负，原点左侧就是反向接电了。”

师：“是的。这个图是 PN 结两端电压和流过 PN 结的电流之间的关系。你看看有什么疑问？”

我：“当然有疑问。正向加电时当电压小于 0.7V 的时候 PN 结应该不导通，这个图上怎么会有电流呢？反向也是，击穿之前就有反向电流啊？”

图中由红色虚线指出。

师：“正向电压达到 0.7V 之后，以及反向电压达到击穿点之后能看明白吧？”

我：“这个明白，电压增大一点电流就急剧增大，所以那条线有点‘直上直下’的模样。我是说正向导通和反向击穿之前，这条线为什么不是和 X 轴重合在一起的？”

师：“所以我首先告诉你，当 PN 结正向导通或反向击穿之后，它两极之间的电压‘基本上’就保持不变了，我们常把这个电压称为‘管压降’。”

我：“什么是‘管’啊？”

师：“一个 PN 结可以做成一个晶体二极管。”

我：“要看图的话电压还是变的，毕竟不是垂直 X 轴的直线。”

师：“是变的，但变化不大。至于这条线为何不与 X 轴重合，这就是 PN 结的局限性所在。如果是单刀单掷的普通开关，那接通就是彻底地‘短路’，断开就是彻底的‘断路’。用半导体材料制成的 PN 结没有这么好的性能，它有‘漏电’的情况。”

我：“我越来越不信任电子产品了，漏电！？我这台电脑里那些东东都在漏电是吗？”

师：“不是那种造成人身伤害的漏电，用‘泄漏’这个词好一点。”

师：“所以我们要把半导体材料提纯到 99.9999999%，其实就算能提纯到 100% 也没用。还记得‘少子’这个东西吗？”

我：“‘少子’？就是 P 型半导体中也有少量自由电子，N 型半导体中也有少量空穴。”

师：“对，PN 结反向接电的时候‘少子’就在发挥作用，所以无论如何反向击穿之前都会有微弱的反向电流流过 PN 结。”

我：“这个得容我琢磨琢磨。想不清楚这些弯弯绕儿。”

师：“你在不理解之中加深理解吧。我可是要走了。”

我：“又要走，好像上网就是为了教我似的。要不我把空姐 MM 介绍给你，你们先聊着？”

师：“我已经有佳人了，再多一个太劳神了。”

我：“您别假清高啦！人家空姐 MM 帅锅一堆，才不鸟你呢。”

师：“那我就放心了。你自己玩吧，有啥问题先 GOOGLE。”

我：“好吧，再见吧。你们俩晚安。”

对于 PN 结反向接电时“少子”的作用还是比较好理解的，可以认为“少子”也形成了一个 PN 结，这个 PN 结恰好和“多子”形成的 PN 结是反方向的。这样一来 PN 结反向接电时这个“少子 PN 结”却是正向接电导通，有电流流动那是不可避免。不过这个反向电流应该很微弱，因为是“少子”嘛，数量很少，比正向未导通之前的漏电流要小才对，这张图（figure0063）恐怕不够准。

打开 GOOGLE 主页，搜索了一下“PN 结”，打开了一个感觉上比较专业的页面看了看，发现这个页面讲的东西和 C# 所说的有些差异，它提到了“带正电的空穴”，这有点难以理解，C# 说 P 型半导体中的电子数与质子数相等，并不带电啊？到底谁说对呢？

继续翻看了一些页面，又发现了一些网站对 PN 结的说明和 C# 的类似，看来网上的这些内容并非总是确切的，对我这样的菜鸟而言根本搞不清谁对谁错，站错了队可就惨了。也不知道 C# 这家伙是不是有真材实料，以后跟人家切磋这些东西可得谨慎，万一 C# 教的是错的呢？说出去可是会让人鄙视的。

又搜索了“PN 结 耗尽层”，有一些页面说这个耗尽层的宽度与杂质浓度有关系，还有一些页面说耗尽层宽度与接电方向有关，正向接电耗尽层宽度变窄，窄着窄着就没了，PN 结就导通了，这大概就是那个 0.7V 电压的由来吧？反向接电时耗尽层会变宽，反向电压越高耗尽层就越宽。这不相当于绝缘能力越来越强吗？那又怎么会“击穿”呢？

GOOGLE 出来的一些页面说这个 PN 结是“半导体二极管”的基础，于是又搜了下“二极管”，排第一个的页面下有两行小字：

“二极管种类有很多，按照所用的半导体材料，可分为锗二极管（Ge 管）和硅二极管（Si 管）。... 按照管芯结构，又可分为点接触型二极管、面接触型二极管及平面型二极管。...”

看上去道儿挺深的啊？“点接触”是个什么东东？点开来看了下，这个页面上罗列了诸多类型的二极管，还都有介绍，可就是看不懂。再搜了下“点接触二极管”，第一个页面第一句就给了一个定义：**“点接触型二极管是在锗或硅材料的单晶片上压触一根金属针后，再通过电流法而形成的。”**就这一句话咱就看得一脑袋浆糊。又翻了一些页面，好像都在说这同一句话。不过总算找了个图片，一根金属触丝“扎”在一片“N 型锗片”上，只有一个 N 型锗片吗？P 型的在哪儿啊？继续翻看其它页面，有些页面上说是“钨丝”或“金丝”扎在 P 型硅晶片或 N 型锗晶片上，可这似乎，不是一个 PN 结吧？



## 本节补充说明

PN 结正向导通所需的电压与材料有关，由硅制成的 PN 结，正向接电电压达到 0.7V 时就会导通，（也有说是 0.6V 的，这关系不大），由“锗”制成的 PN 结，正向接电电压达到 0.3V 时就会导通。对于图（figure0062）来说，我们直接把可调电源加到 PN 结两极上，因而 PN 结上可以加上任意数值的电压，实际上这图仅用于说明原理，它并不合理。应该说 PN 结导通之后，它两端的电压只会围绕着 0.7V（仅以硅为例）有较小的变化，因而我们经常认定一个导通的 PN 结两端（从阳极到阴极）电压就是 0.7V 不变，或者说阳极电压总比阴极高 0.7V，这是根据实践需要理想化了的，其实会有小的变化。

PN 结反向接电与正向差不多，只是反向击穿电压要高很多，而且击穿后的电流曲线比正向电流曲线要“陡峭”，也就是更显得“直上直下”，这在图（figure0063）中示意的不够充分。

不难看出图（figure0063）给出的曲线，表达了 PN 结的“伏安特性”，我们在讨论电阻时说过这个词，电阻的“伏安特性”是一根过原点的直线，称其为“线性”，显见 PN 结的“伏安特性”是“非线性”的，这是与电阻的最明显的差别。以后大家在进一步学习的过程中可能会遇到“非线性电阻”这样的元件，这是一种抽象化的说法，你别指望能买到“非线性电阻”这种东西。

## 2005-05-12：晶体二极管

对于“二极管”这种东西，我虽然早就听叔叔说过，但是实在是一点概念都没有。姑且不说“点接触二极管”为何没有 P 型半导体这样的问题，单是这名字中的“管”我就很是不理解。难道这个东西是一根水管或者吸管似的吗？

我：“今天来的早啊，没跟佳人多温柔一会儿？”

师：“你更早啊？最近不忙？没人盯着你的考分了？”

我：“小声点，老虎也有打盹的时候。今天老爸带着老妈出去玩了，嘿嘿。”

师：“怎么没带着你啊？故意一漏？”

我：“我才不给他们当灯泡呢。问个事，为什么叫‘二极管’？那个‘管’是怎么个说法？”

师：“你的进度还挺快，开始接触实际的器件啦？之所以叫‘管’是个历史沿习。”

我：“历史沿习？就是说以前还有过其它一些叫‘管’的东西？”

师：“对，几十年前的电子产品使用‘电子管’，那确实是在一个密封且抽成真空的玻璃管中做的。也叫做‘真空管’，你可以查一下‘vacuum tube’这个词。”

我：“但是现在的二极管可不用在真空的玻璃管中做了吧？干嘛还称为‘管’呢？”

师：“沿习嘛，就是沿用以前的习惯。为了和以前的技术相区分，我们特意用‘晶体’两个字代替了‘真空’，叫做‘晶体二极管’。”

师：“英文中每种真空管有不同的名字，真空二极管的英文名是‘diode’，‘di’表示‘二’，‘ode’就是‘极’。真空三极管是‘triode’。晶体二极管也用这个‘diode’。”

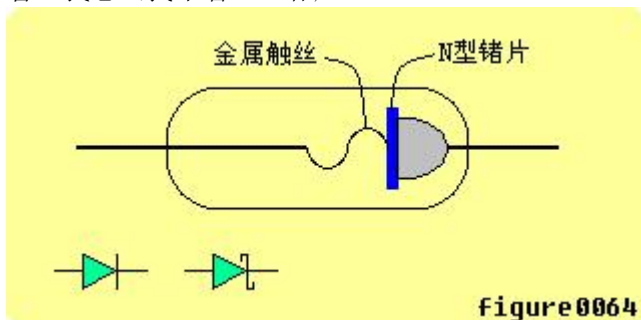
我：“这样看‘tri’就是‘三’，那‘tube’这个词就是‘管子’的意思了。”

师：“是，但晶体三极管可不叫‘triode’了。”

我：“我对‘点接触’有一些疑问？”

师：“你搜到‘点接触’和‘面接触’了？这有什么疑问呢？”

我：“我下载了一个图片（figure0064），传给你看看。我怎么找不着 PN 结呢？”



此图左下角是晶体二极管的电路图符号，左边为普通二极管，三角形代表 PN 结的 P 区，短竖线则代表 N 区。右边是“肖特基二极管”，后面会谈到。

师：“你小子挺细心的啊！这种细微的问题你都发现了？我刚开始学习这东西时都没想过这个问题，你比我可强了。”

我：“不是吧？我对 PN 结印象太深了，所以一看这个图就纳闷儿，怎么只有个‘N 型锗片’而找不到另一半‘P 型锗片’呢？”

师：“但是你至少知道了‘半导体材料’除了‘硅’之外还有‘锗’的。”

我：“这倒是，‘锗’这种材料也是常用的半导体材料吗？”

师：“‘锗’曾经是一种常用的半导体材料，但是现在不常用了。它与硅比有一些特色，但是它存在一个严重的缺陷：对环境温度的变化太敏感，温度高点低点它的性能就随着发生改变。”

这个说法不是特别严格。本节后有补充说明。

我：“这不是‘半导体’的一大特色吗？”

师：“是啊，可我们不喜欢这样的特色啊，总不能做一台收音机冬天能收 7 个电台到夏天就只能收 5 个台了吧？”

我：“这么夸张啊？很早以前的收音机都有这样的问题？”

师：“我这只是故意说得夸张一点，当然不至于到这种程度。不过既然有‘硅’这种更好用的材料，那么‘锗’也就慢慢用得少了。”

我：“这个了解了。还是说说‘点接触’吧，为什么只有 N 没有 P？”

师：“我以前发现这个问题后一开始以为那根扎在 N 型锗片的金属触丝前面是 P 型半导体做的尖。”

我：“这也行啊？难道 P 型半导体尖和金属丝是焊在一起的？”

师：“不是啦，有人说金属针扎在 N 型锗片上然后通过大电流，发出的热可以让金属针的尖端与 N 型锗片融成合金，形成了 P 型半导体。”

注意 P 型和 N 型半导体材料确实是可以互相转化的，重要的是什么样的杂质占优势。

我：“怎么听着跟炼钢的似的？这也太悬了吧？”

师：“我也觉得有点悬，不过早期制造晶体管确实是有‘合金法’的。我不确定‘点接触’二极管是不是这样的。”

我：“你怎么会有不确定的东东呢？”

师：“我并不了解半导体材料的加工方法啊。不过我现在还有另一种观点，不妨给你介绍一下。”

我：“好啊，洗耳恭听。”

师：“并非只有 PN 结才具有单向导电特性，金属

与单一类型的杂质半导体‘接触’后也有单向导电性，这是因为在接面处形成了‘肖特基势垒’。”

我：“受不了了，我可拿这些名词怎么办呢？”

师：“Walter H. Schottky 博士深入研究过这个东西，他提出的这个‘势垒’理论被大家广为接受。”

师：“你可以称之为‘肖特基结’或者‘金属——半导体结’，它和 PN 结一样‘单向导电’，但一些具体的指标不太一样。”

在图（figure0064）给出的肖特基二极管的电路图符号中，三角形一端为金属极，弯折线代表 N 型半导体。

我：“有什么不一样？它比 PN 结是好还是差？”

师：“首先它正向导通所需的电压比 PN 结低，就管用硅制成的肖特基结，正向电压在 0.3V 到 0.5V 就可以导通，这是个优点。但它反向接电时漏电流比较大，反向击穿电压也低，通常在几十伏，100V 以上的不多见。”

随着技术的发展，肖特基结的反向漏电流是否只能偏大？反向击穿电压是否只能做得低？也不一定。

师：“硅材料的 PN 结反向漏电流通常在 nA 级，而肖特基结反向漏电流则在  $\mu$ A 级，可以说有‘数量级’上的差异。”

我：“也不过是  $\mu$ A 而已，不是很大啦。要这样说这个所谓‘点接触’二极管其实可以称为‘肖特基二极管’了？”

师：“我不知道是不是这样，没找到过来自半导体业界的确切说法。”

我：“怎么这里面还有悬案啊？就没人彻底把这事说清楚？”

师：“不知道，或者是我掌握的资料太少吧，可能在半导体器件制造工艺相关的书籍中对此有说明。也可能这种‘点接触’二极管太过古老，大家都没兴趣再提起这东西。”

师：“其实 Schottky 博士提出的‘势垒’理论也是个悬案，还有其它人提出的不同理论，这块儿有争论。”

我：“敢情我搜到的都是些老掉牙的内容啊。那是不是有专门制造的‘肖特基二极管’？”

师：“是的，1N5817 就是一个十分常见的‘肖特基二极管’。”

我：“1N5817 是个型号吗？”

师：“是啊，这是美国的半导体器件的命名规则。1N 中的 1（是数字 1，不是字母 I）指‘1 个 PN 结’，而 N 表示这个器件已在美国电子工业协会（EIA）注册登记。之后跟着由 2 个到 4 个数字组成的具体型号，比如这个 5817，这些数字同时也是在 EIA 登记的顺序号。”

我：“各个国家都有自己的半导体器件命名规则吗？我们国家的规则是怎么定的？”

师：“相当多的国家都采用美国的规则，我们国家是有自己的规则的，不过现在已经难以见到用我们的规则命名的器件了。”

我：“我们国家的半导体行业都垮了吧？工人全下

岗买断工龄了？像我老爸那样？”

中国的半导体工业仍然存在并且发展着，但目前鲜有我们自己独创的技术。

师：“这让我说什么好呢？反正你是不必理会我们国家自己的半导体器件命名规则了。但是需要知道日本的半导体器件命名规则。”

我：“我很难受，为什么是日本？”

师：“日本规则中二极管的型号命名都以‘1S’打头，其中‘1’仍然表示‘1 个 PN 结’。‘S’表示这个器件已在日本电子工业协会（JEIA）注册登记。‘1S’后面通常多加一个字母表示管子的类型和用途，这之后也是跟着几个数字组成的具体型号，该型号同时也是在 JEIA 登记的顺序号。”

我：“这不是抄人家美国的规则吗？就多一个字母？没什么创意！”

师：“你还是个反日的粪青啊？粪青情结对于研究技术没有任何帮助。”

我：“我不是粪青，我们班上好几个哈日哈韩的，搞得我对日本和韩国有点反感而已。”

师：“型号的最末尾还经常以大写字母标出分档号，比如 1N5817A，这个 A 表示这个 1N5817 二极管的性能参数属于 A 级。日本规则也含有这样的分档号。”

师：“惨了，日本和韩国都是半导体技术很强的，还都是你反感的。”

我：“唉，总是人家比我们强，我们怎么就这么弱呢？”

师：“别抱怨了。最后提醒你，很多半导体企业还经常使用自己的型号命名规则，不一定总是 1N 和 1S。所以还是要经常找到厂商给的产品技术文件，网络很发达了，从厂商的网站上了解产品信息最方便直接。”

我：“你又要走了啊？又是最后提醒？”

师：“没有啊？还有一个重要的内容没说呢，我们今后经常使用的一个二极管，型号是 1N4148。我把它的技术文件传给你。”

我：“PDF 格式的？你怎么这么喜欢用 PDF 呢？”

师：“这个 PDF 是厂家发布的，全世界的半导体企业都喜欢用这种文件格式发布资料。这个‘1N4148.PDF’是美国‘仙童半导体’公司的技术文件，这种技术文件一般被称为‘Datasheet’。”

我：“‘仙童’公司？名字不错啊。就是 PDF 文件左上角显示的‘FAIRCHILD’？”

师：“你居然没抱怨‘怎么全是英文？’很多人都抱怨这种通篇英文的资料。”

我：“怎么全是英文啊？这怎么看啊？”

师：“英文的怎么就不能看了？以后全英文的资料多了去了！”

我：“这个英文也太专业了吧？Small Signal Diode 是啥意思？小什么二极管？”



师：“Signal 是‘信号’的意思。‘小信号’二极管。”

我：“那就是说这个二极管适用于‘小信号’？那什么是‘小信号’？我们以前说的高电平是 1 低电平是 0 那算‘大信号’还是‘小信号’啊？”

师：“怎么说呢？这个‘小信号’应该算是一种观念。”

我：“是不是和我们以前讨论的‘强上拉’和‘弱上拉’一样，没有什么明确的标准？”

我：“或者说电流在  $\mu\text{A}$  级或  $\text{mA}$  级，电压在  $\mu\text{V}$  级或  $\text{mV}$  级，就算是‘小信号’吧？”

师：“你先这么理解吧，这个目前还真不容易说清楚。”

我：“怎么又是这种不清不白的样子啊？下面那图应该是 1N4148 的外形吧？”

师：“叫‘封装’好吗？你得专业一点啦。左边那个‘轴向引线式’封装的是我们以后会用到的，右边那个没有引线，是‘贴装’的器件。”

我：“贴装？不懂。左边那个封装下的一行英文是啥意思？”

注意在 Datasheet 首页上方的外形图下有一行英文：  
**Cathode is denoted with a black band**

师：“我发你一个图吧，这是对实际器件拍摄的。”



左下图可见“DO-35”和“LL-34”两种封装的样子。

我：“是红色的啊？我以为是黑色的，这个 PDF 上的图是黑色的。”

师：“别管颜色了。看到管子一端有个黑色的窄条

吗？那就是‘black band’。”

我：“那我查一下‘cathode’的意思。等一会儿。”

师：“刚说了‘ode’是‘极’的意思。”

我：“‘cathode’是‘阴极’的意思，有黑环的这一侧的引线是‘阴极’？”

师：“对了。这一侧的引线连接着 PN 结的 N 区。这句英文的意思：‘阴极由一个黑色条带标出’。”



注意色带颜色不同，但指示的都是阴极。

我：“那么接 P 区的引线就是‘阳极’了？为何不说‘正极负极’？”

师：“我们不能这样讨论下去了，说一晚上也说不完。如果让你把这个二极管用在电路中，你首先想了解有关这个二极管的什么内容呢？”

我：“我哪儿知道该了解些什么啊？先了解一下封装？”

师：“我会首先了解一下这个管子反向击穿电压是多大？不能超这个参数对不对？”

我：“对，那么我们可以先忽略其它诸多内容，先找这个最关心的。”

师：“‘反向’的英文是‘reverse’，你快速地在 PDF 中找一下这个词。”

我：“一眼就找到了。下边表格中第一项就有‘reverse’和‘voltage’这两个词。

师：“这是个极限参数啊？Absolute Maximum Ratings。”

我：“那还找哪个？”

师：“下一页，Electrical Characteristics 那张表有‘Breakdown Voltage’参数，这个是反向击穿电压。”

我：“可这个是有两个值的啊？100V 和 75V，哪个是呢？”

我：“而且还各对应着一个电流。那个‘ $I_R$ ’是个啥电流啊？”

师：“这个表下面就有  $I_R$  的。”

我：“Reverse Leakage？反向泄漏？可怎么又有  $V_R$  是 20V 呢？”

师：“我错了，我不应该让你看这个 PDF。这个技术资料带给你的不是知识，而是一堆疑问。”

我：“是啊，看上去跟天书一样，还是英文版的天书。要不你给通篇翻译讲解一下？”

师：“今天有点晚了，我要走了。我们先把这个 PDF 放一放吧。”

我：“你不能这样啊？太不负责任了！那我今天可怎么弄啊？”

师：“你也别弄了。下次我们讨论二极管怎样接在



电路中，讲这个的同时我们再来从这个 PDF 中找出对我们有用的内容。我觉得这样更有针对性。”

我：“那好吧。问一下像这样的资料是不是必须每个细节都要弄懂才行？否则就无法正确地使用这个器件？”

师：“也不是必须每个细节都要弄的很透彻。不要急啦，我们最终的目标是把 1N4148 使用起来，倒不

是把这个 PDF 彻底研究透。”

我：“这让我稍微踏实了一点。你先走吧，我再泡一会儿。”

师：“晚安。我后天才能再与你讨论二极管电路，明天有些事情。”

我：“好吧，我多忍一天吧。”

送走了 C#，我觉得这个 PDF 文件还是应该自己再琢磨一下，难道真的是一点能看懂的都没有吗？我于是仔细琢磨起那个给出“极限参数”的表格来。

$V_{RRM}$  下一行是  $I_O$ ，Parameter 一栏写的是“Average Rectified Forward Current”，很惨，前三个词一个都不认识，只好上 dict.cn。查出的 4 个单词堆在一起是“平均 订正 向前的 电流”。这是个什么东西呢？“向前的电流”我猜可能是“正向接电”时流过二极管的电流，“Average”应该表示“这个电流的平均值”，那个“订正”是怎么回事？dict.cn 没把它当一个电学用的专业技术词汇吧？

再下面一栏是  $I_F$ , DC Forward Current, 这还是正向接电时流过的电流吧？DC 是个啥缩写啊？还得上 dict.cn。这回还不错，查出 DC 是“直流”的意思。这我多少了解一些，我们用的 220V 电是“交流”的，像电池出来的电则是“直流”的。那么这一栏是说二极管接电池正向流过电流最大是 300mA 吧？好吧，这个就算看明白了，问题是这究竟想告诉我什么？我不能让电流超过 300mA 吗？

再下面的两栏都有“Forward Current”字眼，应该是都和正向接电相关，也不知道正向接上电怎么这么麻烦？其中最大的一个电流竟然是 4A。再下面有个  $T_{STG}$ ，看单位这个是和温度相关的。查了下“Storage”，是“储存”的意思，这下明白了，这一栏是说 1N4148 可以储存在 -65°C 到 +175°C 这样的环境里。怪了，谁会把个二极管储存在零下 65 度的冰柜里啊？

最后一栏  $T_J$  还是和温度有关的一个数据，“Tempera”不会是个错别字吧？有意思。“Operating”是“操作”的意思，“Junction”是“PN 结”的“结”啊？这是说“操作 PN 结的温度范围”？怎么“操作”“结”啊？会不会是说这个二极管能在 -65°C 到 +175°C 范围内正常工作，超过这个范围就不行了？

就这样跟这个表格斗争了一下，我决定——还是睡觉去吧。真的是搞不清楚，除了那个  $T_{STG}$  我有点把握之外，其它只是瞎蒙而已，而且还有蒙都蒙不出来的。还是等 C# 下回分解吧。

## 本节补充说明

我们以“反向漏电流”为例说一下硅和锗两种半导体材料的区别。每当温度升高  $12^{\circ}\text{C}$  时，锗晶体二极管的反向漏电流会增大 1 倍。每当温度升高  $8^{\circ}\text{C}$  时，硅二极管反向漏电流会增大 1 倍。看上去似乎硅管的温度特性要差，但需要注意，锗管的反向电流在“ $\mu\text{A}$ ”数量级，若温度持续升高到超过  $70^{\circ}\text{C}$  时，锗管因反向电流过大，基本上已经不能正常工作了。而硅管的反向电流在“ $\text{nA}$ ”数量级，它允许在更高的温度下正常工作，因此我们认为硅管的温度特性要好于锗管。

锗这种半导体材料并非一无是处，衡量半导体材料的性能还有一个重要的指标，叫做“载流子迁移率”，锗的这个指标比硅要好，这意味着锗材料制作的半导体器件比硅器件有更高的性能。所以现在有一种新的半导体工艺——锗硅工艺，是把锗和硅联合应用，两种材料相互取长补短，以获得更高的性能。我们人手一个的手机之中通常会用到锗硅器件。

## 2005-05-15：二极管电路（一）

坦白说，还是很想把那个 PDF 再研究研究，真是有点不服气。我想就算那些表格中的专业术语确实弄不懂，那些图表呢？难不难的总得看看再说吧。于是我又打开了那个 1N4148.PDF。

第 2 页紧接在表格下方就是一组图表，左起第 1 个图（Figure 1）的标题为“Reverse Voltage vs Reverse Current”。“vs”这个词很熟悉，一些电子游戏里很常见到。这个图肯定是“反向电压”和“反向电流”之间的关系，不过标题之下另有一行“BV - 1.0 to 100 $\mu$ A”，这是在说什么呢？

图表的横坐标是“反向电流”，纵坐标是“反向电压”，这个反向电压居然从 135V 起始，不是 100V 就击穿了吗？怎么会这样？横轴最右端电流值是 100 $\mu$ A，这时对应电压大约是 145V 多点，从 135V 变化到 145V，应该算升高了  $(145-135)/135 \times 100\%$ ，大概是 7.4%，电流则从 1 $\mu$ A 增大到 100 $\mu$ A，增大了足有 100 倍。这倒是如同 C# 所说，反向击穿后反向电压升高 1 点点，电流就会剧烈的增大。可剧烈了半天也只是  $\mu$ A 级啊？这也太小了点吧？

右边一个图看标题仍然是“反向电压”和“反向电流”之间的关系，只不过横轴变成了电压而纵轴变成了电流而已。这种反向接电的图不是应该画在坐标系的第 3 相限吗？从横轴上看在 70V 之后电流开始“直线上升”，看来反向电压到了 75V 确实让 1N4148 击穿了。当反向电压达到 100V 时反向电流已经是 110 $\mu$ A 了，这和表格上写的并不一致啊？我仔细看了下纵坐标，这个电流单位怎么是 nA？这也太小了吧？难道印错了？像那个叫“Tempera”的错别字一样？

看过两个图表之后我算是彻底泄气了，实在是看不明白这些曲线到底在说些什么。C# 这家伙也不知道忙什么去了，可能又找佳人去了吧，我可咋整呢？干瞪眼对着一屏幕的曲线加英文，毫无办法。

师：“这么晚了还没睡去？明天想逃课啦？”

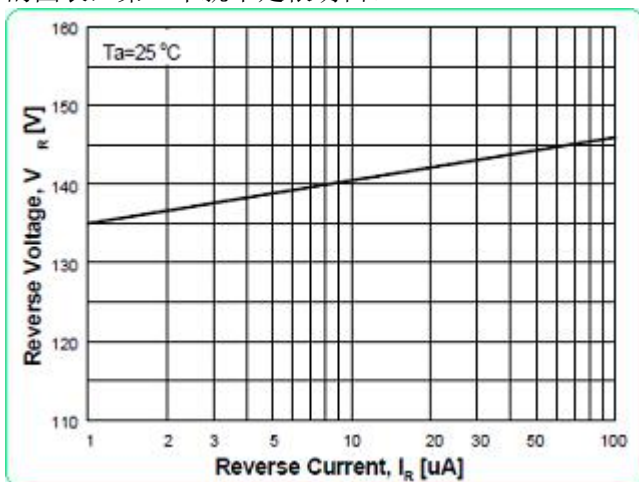
我：“可逮着你了！你不是有事情吗？”

师：“是有事情，不过还是觉得应该上来看看你不在。觉得今天不跟你聊聊有点对不住你。”

我：“我有这么大面子啊？好开心。我又看了下那个 PDF 文件。”

师：“这回有心得了吗？说说吧。”

我：“没心得，仍然全是疑问。这回我看了下后面的图表，第一个就不是很明白。”



师：“就是这个反向电压和反向电流的图？这有什么问题？”

我：“反向电压怎么从 135V 开始啊？到 100V 不是就击穿了吗？”

师：“这个图好像是击穿之后的电压和电流的关系啊？电压变化不大，大约从 135V 变到 146V，但是电流变化了 100 倍。”

我：“这个规律我也看出来了。你怎么说‘好像’啊？你不确定吗？”

师：“这个 PDF 里没给出测试电路，搞不清楚做

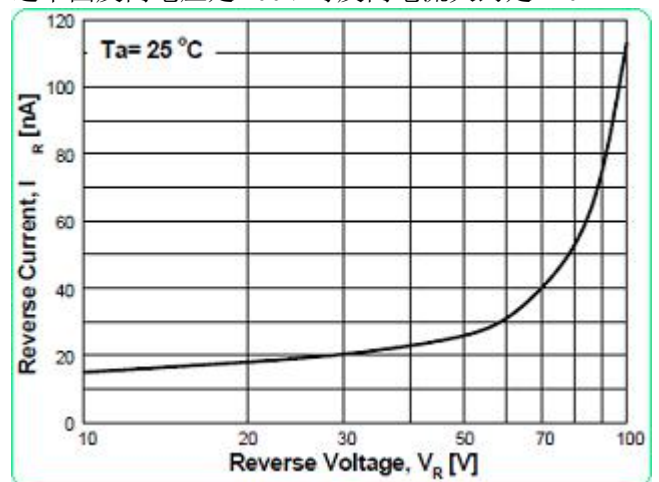
实验的那哥们儿焊了一个什么样的电路。”

我：“这些图表是通过焊接一个真实电路用仪表量出来的啊？”

师：“它还能怎么画出来呢？你上物理课没做过实验吗？你们做的实验不用仪表？”

我：“我们做实验是照猫画虎啦，老师怎么说就怎么做呗。”

师：“说实话我还真没怎么注意过这些图表。右边这个图反向电压是 100V 时反向电流大约是 110nA？”



我：“我一开始差点认为是  $\mu$ A 呢，后来看到单位是 nA。这个图是在说啥啊？”

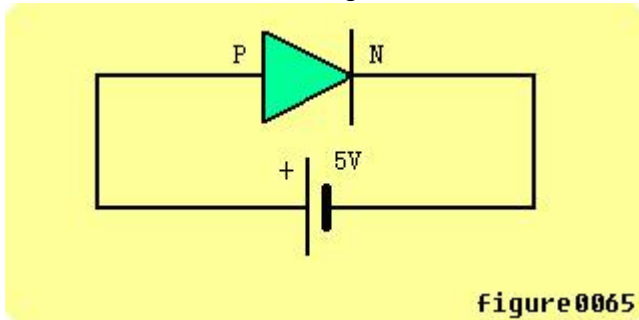
师：“这个图应该是在击穿之前反向电压和漏电流之间的关系。不知道测试电路是什么样子，也说不清楚这个图是怎么得出来的。”

我：“干嘛把横纵坐标交换了呢？”

师：“这样看这条曲线顺眼一点吧？谁知道作图的人是咋想的呢？”

我：“那为什么不给出测试电路呢？这还要保密吗？”

师：“不知道。我们还是讨论我们自己的内容吧。从这个电路开始。收图。（figure0065）”



我：“这图在讲 PN 结的时候说过了吧？这样接电要导通的。”

师：“是的，这个图是‘正向接电’，接电源正极的三角形是 P 区了，也就是你昨天说的‘阳极’啦。你认为流过二极管的电流会不会很大？”

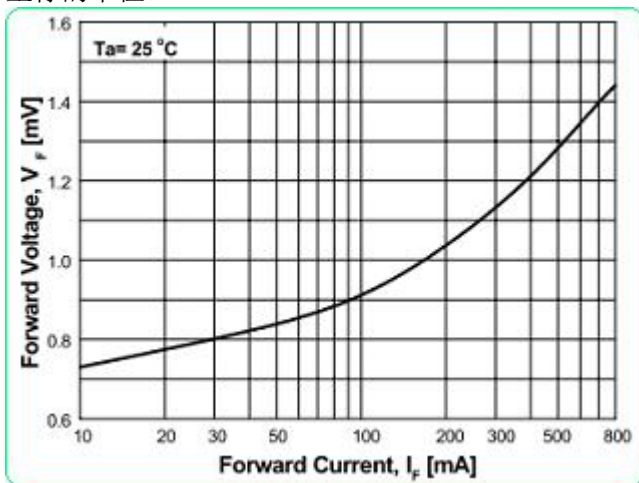
我：“应该很大。正向电压超过 0.7V 二极管就导通了，之后电压增大一点点电流就会迅速增大。现在电压都到 5V 了，那电流肯定是‘贼大’了。”

师：“我们查一下那个 Datasheet，看看哪个图表反应正向电压与正向电流的关系。”

我：“Figure 3 和 Figure 4 应该是吧？”

师：“还有 Figure 5 也是。”

师：“这些图表有错吧？你看看 Figure 5，看看纵坐标的单位。”



我：“是 mV，不对吗？”

师：“你对照 Figure 4 看看，你觉得应该是 mV 吗？应该是 V 才对，不是 mV。”

我又看了下 Figure 4，正向电压大约在 730mV 时，正向电流已经是 10mA 了。再看 Figure 5，最左侧正向电流为 10mA，电压则是 0.7 高一点，那么只能是 0.7V 高一点，不可能是 0.7mV。

我：“呵呵，如果单位是 mV，二极管根本就通不了。肯定是错了，够次的。”

师：“不去管这个错误了。总之按我刚传你的图（figure0065）来看流过二极管的电流确实是太大，大到通过这个 Datasheet 都查不出来的程度。我们需限制这个电流。”

我：“你是说 1N4148 受不了这么大的电流？那它能受多大的电流？”

师：“这个还得从 Datasheet 上查，你来。”

我：“我昨天就查过了，一共有 5 种完全不同的正向电流极限值，最小 200mA，最大的是 4A。”

师：“那么应该参考哪个值呢？”

我：“我哪知道这些电流都是什么意思啊？我正想问你应该用哪个呢！”

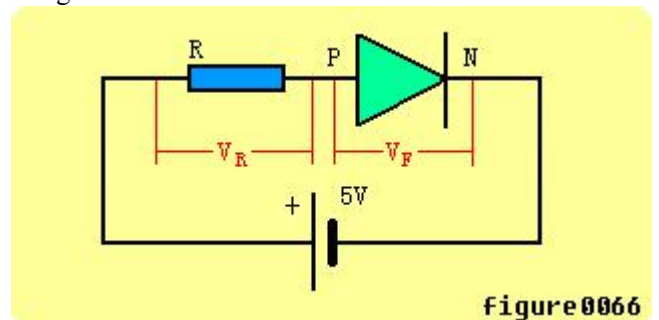
师：“我们限制电流不能太大是为了安全，为了防止 1N4148 烧了，所以你即使不知道这 5 个电流都是怎么回事，也可以做出正确地选择啊。”

我：“那就选 200mA 吧，这个本身就是 5 个电流中最小的，比这个还小那肯定是安全啦。”

师：“对头，这样想就对啦。你小子确实有点机灵劲儿啊！”

我：“怎么限制电流不超过 200mA 啊？”

师：“二极管和一个电阻串联，收这个图。（figure0066）”



电阻接在二极管的哪一极都是可以的，这是串联电路的特点。

我：“就这么简单？这个电阻要用多大的合适？有得算吗？”

师：“至少你可以确定流过这个电阻的电流和流过二极管的一样，串联电路嘛，最大只能是 200mA 对吧？如果我们能找出电阻两端的电压降  $V_R$ ，那么  $R = V_R / 0.2$ ，OK 啦。”

师：“ $V_R$  加上 1N4148 的正向电压  $V_F$  应该等于 5V，这你应该能理解吧？所以要找出  $V_F$  来。”

我：“ $V_R$  加  $V_F$  应该等于电源电压吗？我只知道两个电阻串联时是这样，把一个电阻换成二极管也是这样？”

师：“当然是这样。从 Datasheet 上的 Figure 5 我们可以查到正向电流 200mA 对应正向电压约 1.05V，你算下电阻 R 的值。”

我：“ $(5 - 1.05) / 0.2 = 19.75$  欧姆，取标称值的话，R 应该是 20 欧姆，5% 精度。”

师：“你还定了一个精度？”

我：“随便一说罢了。”

师：“要跟你较真儿的话，5% 有点问题。19 欧姆比 19.75 小了。”

师：“所以应该是‘不小于’20 欧姆，可以取更大一些的。”

我：“这倒是，阻值越大电流就越小，更安全。”

师：“紧跟着的一个问题就是要看这个电阻应该具有多大的额定功率了，额定功率还记得吧？”

我：“记得，要看在在这个电阻上会发出多大的热量，



选一个抗得住发热的电阻。”

师：“计算也很简单，这个电阻两端的电压是 3.95V，流过的电流是 0.2A，可算出功率为  $3.95V \times 0.2A = 0.79W$ ，应该选 2W 的电阻。”

我：“这有点大了吧？1W 的不行吗？”

师：“这里有个‘降额使用’的问题，1W 的电阻通常用于功耗不大于 0.5W 的场合，额定功率降 50% 使用。”

请注意复习第 2 章有关“降额使用”的补充说明。同时想一下，如果考虑“降额使用”的话，我们应该让 1N4148 承受 200mA 正向电流吗？

我：“这是为了可靠性对不？可我们常用 1/4W 的电阻啊？”

师：“其实我们把电流选太大了，我们确定的电流是 200mA 啊。如果我们决定只让 1N4148 流过 10mA 的正向电流呢？”

我：“这个好算，二极管流过 10mA 电流时两端电压是 0.73V，所以电阻值为  $(5-0.73)/0.01=427$  欧姆，可取标称值 430 欧姆。功率是  $4.27 \times 0.01 = 0.0427W$ ，取 1/8W 的就够用了。”

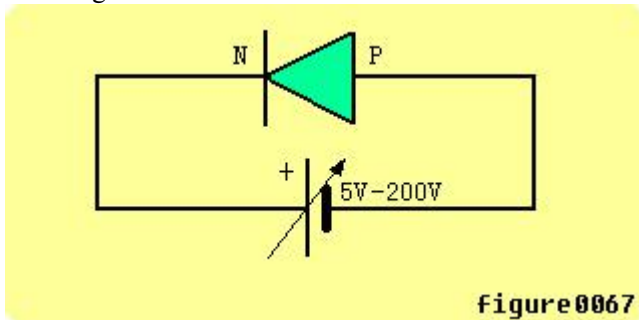
师：“我们以后就会了解到，让 1N4148 二极管流过 10mA 电流有点太大了，白费电。”

我：“难道要流过  $\mu A$  级的电流？”

师：“确实，它只需流过  $\mu A$  级的正向电流，实在不必太大。”

我：“那这帮玩沙子的人还把它正向电流上限做到 200mA 以上？完全没必要嘛！”

师：“好了，得抓紧时间，我们还要讨论一下这个图。（figure0067）”



我：“这简单，电阻都可以省了。反向击穿电压 100V，反向接 5V 电压太低了。”

师：“是的，反向电压只有 5V 的话，这个电路中只会有极微小的漏电流流过二极管，不到 20nA，可以忽略不计了。”

我：“你怎么知道不到 20nA？”

师：“还是 Datasheet，Electrical Characteristics 那表中就有  $I_R$  啊。”

我：“可是有 3 个数值啊？怎么办？”

师：“唉，我真不应该让你看这个 PDF。”

师：“别管那么多了，现在我们开始加压，直到把二极管击穿，然后继续加。二极管会很快冒烟的。”

我：“发热量很大吗？从 Datasheet 上看反向电压 100V 时电流只有 100 $\mu A$  啊？”

师：“还是那句话，不知道测试用的电路是什么样

子的，那个 100 $\mu A$  可能是用电阻限流后测得的。”

我：“那这么说反接和正接是一样的，反接也要加个电阻限流，确保击穿后电流不很大？”

师：“何况反向击穿后二极管两端的电压有 100V，哪怕流过二极管的电流只有 10mA 那也有 1W 的功率了。”

师：“是的，反向击穿的二极管肯定要限流电阻，而且阻值还得比较大，把电流限制的很小，这可以防止二极管击穿后迅速烧毁。当电压降回到击穿点以下时，PN 结还能恢复正常。”

我：“这么说，二极管击穿后只要限制电流不很大，那它是不会坏掉的？”

师：“是的，不会损坏。但不能因为这样就任凭它总处在反向击穿状态，不必要的击穿必须避免。”

我：“言外之意是还有‘必要的击穿’？”

师：“再看一下 Datasheet 中那个  $V_R$  的指标，在 Electrical Characteristics 表格里。它的意思是如果要求反向电流不能超过 100 $\mu A$ ，那么可以给 1N4148 加上 100V 的反压把它击穿，不会造成损坏。”

我：“那个 5 $\mu A$  对应 75V 怎么讲？”

师：“如果对反向电流限制的更严，不能超过 5 $\mu A$ ，那么反压就不能高于 75V 了。”

我：“你知道这些不早告诉我，让我费劲瞎琢磨半天！”

师：“我这也是猜测，是不是这样解释我也没有十成的把握。”

我：“我就倒！你怎么也是个半吊子啊？”

师：“还是那句话，不知道测试用的电路是什么样，也不知道实验过程是怎么个做法，所以也就只能猜这些参数的意思。”

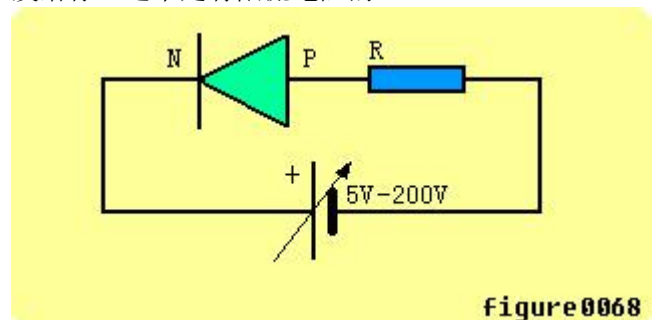
我：“我心里反而踏实了，你对这个 PDF 并不完全理解，但却是一个专业的电子工程师，我业余的弄不懂这些有啥可怕呢？”

师：“从实际使用 1N4148 的情况看确实没必要把 Datasheet 彻底搞清楚，我们以后用到的电压都很低，反向击穿的情况根本就没有。”

师：“但这可不意味着这些 Datasheet 完全不重要。这个 1N4148 有点太简单了。”

我：“还真没觉得这个 1N4148 很简单。难道是简单到连你都要瞎猜？”

师：“好了，最后把反向接电的图（figure0068）发给你，这个是有限流电阻的。”



我：“没必要啦，我知道是怎么回事了。”

师：“还要提醒一下，有这个限流电阻时，二极管反向击穿后，我们再升高反向电压，这只会让流过二

极管的电流增大，而二极管两端的电压只会‘小幅’上升，可以说基本稳定在击穿点那个位置。”

我：“那这和正向接电是一样的吧？正向导通后再

升高正向电压，只会让正向电流增大，而二极管两端电压基本稳定在 0.7V 那个位置，只会小幅上升。”

师：“是的。我走了你自己玩吧。”

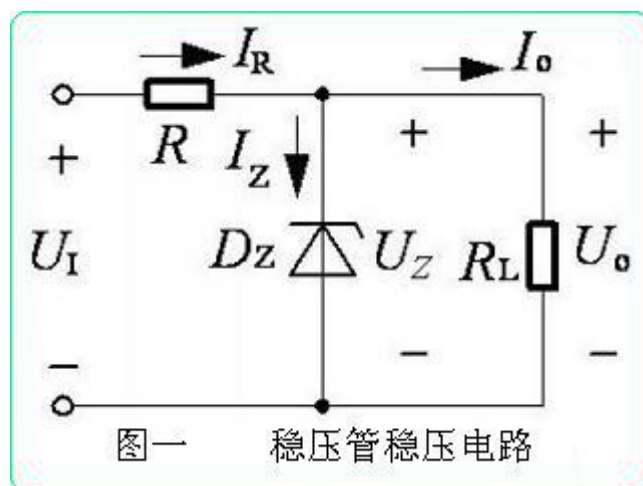
重新回顾了一下今天讨论的内容，我感觉二极管这个东西正向接电和反向接电其实有不少相似性，比如都要用一个电阻把电流限制住，电流太大可能把管子烧了。不论是正向导通还是反向击穿，二极管两端的电压是基本稳定的，正向导通后会稳定在 0.7V，反向击穿后则稳定在反向击穿电压处。这时如果外加电压再升高，那么高出来的电压就会由限流电阻负担，二极管两端的电压变化是很小的。

不过从 1N4148 的 Datasheet 上看不大明白反向击穿到底是怎么回事。按 C# 所说反向击穿后如果没有限流电阻，那么二极管会因流过大电流而烧毁。有电阻限流的话二极管不会损坏。看来制造二极管的专家们测量反向击穿电压时应该不会不加限流电阻，否则他们得在二极管冒着火爆炸之前的一瞬间从仪表上读出电压值来，这有点夸张了。

说句实话我真觉得这类 Datasheet 太闹心了，罗列了一堆数据和图表，却不说这些东东是怎么来的。当然或许我这么说有点冤枉人家了，毕竟人家在 Electrical Characteristics 表和中给出了“Test Conditions”嘛。就比如反向击穿电压，100V 是对应着反向电流 100uA 的。反向电流  $I_R$  也是一样，25nA 是在反向电压  $V_R$  等于 20V 时测出的，C# 说反向电压为 5V 时漏电流不到 20nA，大约是根据这个 20V-25nA 推测来的吧？

或者 GOOGLE 能把“反向击穿”说明白？查一下吧。打开 GOOGLE 的主页，搜了下“反向击穿”，头一页居然冒出个“稳压二极管”来。这是个啥东东？点开这个页面看了下，“稳压二极管”又叫“齐纳”二极管，感觉它就是那种“必须被击穿”的二极管，击穿后二极管两端的电压就基本稳定了，这个电压可以作为其它电路的“电源”。这倒是有点儿意思。

在 GOOGLE 上搜了下“稳压二极管 电路”，翻出一些电路图来，稳压二极管的电路符号有点特殊，小三角上顶的不是个短直线，而是个折线。不过电路中确实有一个限流电阻  $R$  的。我忽然觉得不同种类的二极管可能电路图符号都会有些区别的，于是又 GOOGLE 了一下“肖特基二极管 电路”，翻出来一张电路图，这图上肖特基二极管的电路符号竟然和稳压二极管一样？不对啊？肖特基二极管应该是三角形头顶一个曲里拐弯的折线啊？重新搜了“肖特基二极管 符号”和“稳压二极管 符号”，我只能说，真是怎么画的都有啊！电路图不应该是個很严肃的东西吗？怎么这么随意？这帮工程师们就不怕别人误解他画的图吗？



## 本节补充说明

从本节开始我们接触到了电子元器件的技术手册，这些手册几乎都以 PDF 格式的文件来发布，如果你获得过以其它形式发布的技术手册，比如 WORD 文件形式，那我只能说你要用的那个元器件实在太新了，厂家还没准备好批量生产这个元器件。我拿到过 WORD 文件形式的手册，全世界大约也只有中国的半导体厂商会给我这种手册，为了用最新的产品抢占市场，我们中国人真的是蛮拼的。

PDF 是“Portable Document Format”的简称，由 Adobe Systems 公司开发，不论你用什么样的电脑和打印机，你都能从屏幕上看到一模一样的文档，印到纸上也不会有任何差别。此种文件你还不能随意修改它，还可以加上水印等等，用来发布技术手册是很适宜的。在电脑上阅读 PDF 文件可以采用 Adobe Arcobat Reader 这个软件，我个人更愿意使用 PDF-Xchange Viewer，这些软件都是可以免费下载使用的。

元器件厂商给出的技术手册称之为“Datasheet”，这些手册是第一手资料，是最准确的，但如我们所见这些手册也难免有错，所以它们也不定期的会有新版本发布。大家记得尽量去元器件厂商自己的网站上下载这些资料，网上传播的不一定是最新的。有时厂商发布“Datasheet”的同时还会配套发布“Errata sheet”，这个 sheet 中列出的都是元器件目前已经发现的缺陷，以及如何克服这些缺陷的方法，这同样是一份非常重要的资料，单凭一篇 Datasheet 是不够的。

至于电路图中使用的图形符号过于繁杂这个问题，我只能说：“就这样吧。”标准是有的，但你有你的标准我有我的标准，而且，标准也在发展变化之中。在我这部教程中，我也无心采用某种制图标准去规范化我的电路图。等你的知识越来越丰富，见过的电路图越来越多之后，你也就见怪不怪了。

## 2005-05-17：二极管电路（二）

时间还早，C# 和空姐 MM 都没有在 MSN 上，我于是想应该重新搜一下二极管的种类，毕竟有了点基础，现在不至于啥都看不明白了吧？打开 GOOGLE 的主页，搜了下“二极管种类”，有个页面链接到一个论坛之中。

打开这个帖子仔细阅读了一下，二极管的分类大概有根据构造分和根据用途分这样两种分的方法。“点接触”和“面接触”属于按构造分类，属于这种分类法的还有“合金型”、“扩散型”、“台面型”、“平面型”和“外延型”等。至于每种构造形式的二极管怎样制造怎么使用之类对我来说就显得过于专业了。

按用途分类看似较容易理解一些，“稳压管”就是按用途分成的一类，还有“检波管”、“开关管”、“限幅管”、“续流管”、“变容管”、“发光管”，甚至还有“激光管”。这个东西好像有点神啊？仔细想一下也没什么夸张的，不是有一种“激光教鞭”吗？打火机那么大的东西，装上电池就能发出一束红光来，应该就是“激光二极管”做的吧？

师：“今天这么早啊？又泡 MM？”

我：“没有啦。我再查二极管的分类。‘面接触’是怎么回事啊？”

师：“我不想给你说二极管的制造方法，不怎么实用还有点难。”

我：“你不肯教我怎么玩沙子？看来我只能和尿泥了。”

师：“我也没玩过沙子啊，教你也只能照本宣科人云亦云。就算教会你玩沙子你也玩不起来啊？上哪儿能买到那九个 9 的‘硅’？”

我：“那这些分类看来是没什么用处喽？那怎么还有人写那么大的帖子给人介绍？”

师：“介绍这些太没意思，我认为这种分门别类大可以淡化。我们以后会讨论一点‘平面’二极管的相关内容，更多地是讨论二极管的具体用法。”

我：“就是讨论按用途分类是吗？”

师：“我不会给你分那么多类，你以后根据我们讨论的内容到这些分类里对号入座吧。”

我：“那咱先讨论一下‘稳压管’吧，这个东西总是被击穿后才起‘稳压’作用？”

师：“你总是打乱我的计划，你又搜到稳压二极管了？”

我：“是啊，我是想查一下‘反向击穿’的，结果查出了‘稳压管’。”

我：“这个‘稳压管’就属于‘必要的击穿’吧？”

师：“这个稳压管还是可以给你说一说，以后用得着。首先这个‘稳压管’的用途是获得一个稳定的电压，这个电压可用作电路的供电电源。”

注意是“可”用作电源，实际是仅在某些情况下用作电源，并不是经常用做电源。

我：“这个我已经查到了，我是说它是利用了‘PN 结反向击穿后两端电压基本保持不变’这个特性吧？”

师：“对，就是这个特性。我们经常需要不同的电源电压，比如 1.5V，5V 或 12V 等等，所以稳压管肯定有很多型号，以便于我们根据需要选择电压合适的管子。”

我：“就是说某个型号反向击穿电压是 5V，另一个型号是 10V，还有 20V 的等等？”

师：“对，我传个 PDF 文件（1N4728-4764.pdf）给你，这是十分常见的稳压管。”

我：“型号真多，Electrical Characteristics 表中的数据都是什么意思啊？”

师：“这些数据只会给你带来疑问，先别去琢磨它。你看一下这一系列管子的稳压值有什么规律？就是最左有  $V_Z$  的那一列数据。”

Type	at I <sub>ZT</sub> V <sub>Z</sub> V	I <sub>ZT</sub> mA
1N4728	3.3	76
1N4729	3.6	69
1N4730	3.9	64
1N4731	4.3	58
1N4732	4.7	53

我：“好像跟电阻的标称值很相似啊？”

师：“没错，就是 E24 系列标称值，从 3.3V 起。我们的问题是 PN 结反向击穿电压的高低跟什么有关？怎样才能获得我们需要的反向击穿电压？这是个重要的知识点。”

师：“在研究‘绝缘体击穿’这个问题的科学家中，有个名叫‘克拉伦斯·梅尔文·齐纳（Clarence Melvin Zener）’的人很有名，他的理论发现促使贝尔实验室开发出稳压二极管。”

我：“我明白稳压二极管为什么又叫做‘齐纳二极管（Zener diode）’了？”

师：“是的，以这位科学家的名字命名的。”

师：“PN 结反向击穿电压的高低和杂质半导体掺杂的浓度有关。如果半导体掺入的杂质很多，会产生较大数量自由电子和空穴，这时 PN 结反向击穿电压就比较低。而掺入杂质较少的话 PN 结反向击穿电压就高。”

我：“那这又是什么个道理呢？”

师：“这个道理我可是说不清楚了。你现在只需记住高掺杂 PN 结的反向击穿被称为‘齐纳’击穿，所需电压较低，大约在 5V 以下。而低掺杂 PN 结反向击穿被称为‘雪崩’击穿，所需电压较高，常在 5V 以上，高到几十伏或者更高。”

我：“雪崩？听着挺疼人的。是形容电流像雪崩一



样先小后大起来越猛烈地增大吗？”

师：“差不多是这个意思吧。”

我：“啥时候能有个‘C#二极管’啊？‘活跳尸二极管’也行啊？”

师：“本世纪之内俺是没希望了。下个世纪的重任就落在你肩上了。”

我：“能活到下个世纪我真成了‘活跳尸’了。”

师：“好了，我们得按我的计划来讨论了，没时间了。今天的内容是二极管的串联和并联。”

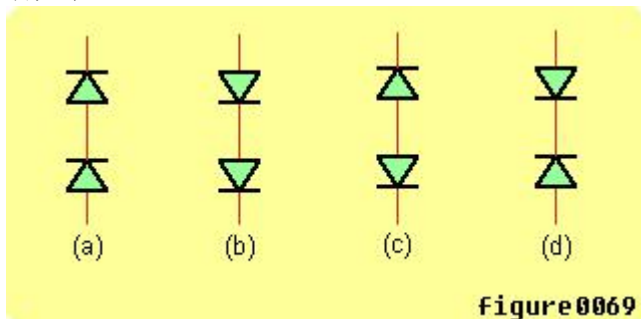
我：“怎么这也要串联并联啊？”

师：“呵呵，我喜欢用这两个词，可能除我之外没人把这些称为串联和并联。”

我：“那我要跟别人讨论时用你这说法会不会被认为‘外行’啊？”

师：“也可能被认为是高手高手高高手呢。”

师：“好了，说正经的，两个二极管串联后有 4 种电路形式（figure0069），更多的管子串联我们就不研究了。”



我：“4 个图里 (c) 和 (d) 完全没意义，不论正向接电还是反向接电都应该是不通的。”

师：“你说的没错。那么图 (a) 和图 (b) 呢？这两个图有点讲究。”

我：“这两个分明是一个图嘛？只不过画的方向不一样而已。搞什么啊？”

师：“是啊，这两个图确实是一样的。我们就研究一下两个二极管这样串联。”

师：“首先是两个管子正向接电，电源电压要达到多高两个管子才能导通？”

我：“一个管子是 0.7V，两个叠一起应该是 1.4V 吧？”

师：“对了，两个管子的正向压降加在一起。那么反向接电呢？电压多高两个管子击穿？”

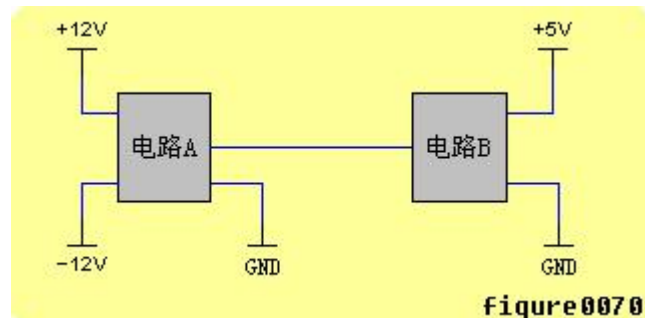
我：“那就是 200V 了，每个 100V。这很简单啊？这也算是‘研究’吗？”

以上二极管均以 1N4148 为例。

师：“那我们来一点新鲜的，收这个图看看吧。（figure0070）”

我：“这个图是啥意思？左边的电路可以输出 +12V 或 -12V 的信号？0 和 1 的定义又改了吗？”

师：“是啊，+12V 是 1，-12V 是 0。关键是右边的电路仍然是 +5V 为 1，0V 为 0，它的电源只有 5V。”



我：“那么左边电路的输出不可以直接连接到右边电路的输入吗？”

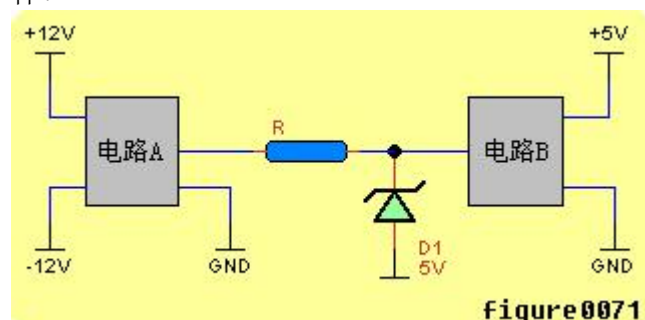
师：“电路 A 输出 1 时，信号电压比电路 B 的电源还要高出 7V，输出 0 时电压比 GND 低 12V，这很可能是不允许的。”

我：“很可能不允许？就是说也有可能是允许的？”

师：“你怎么总爱瞎猜啊？右侧电路不允许输入超出电源电压范围太大的信号，超一点可以。你想想应该怎么办？”

+12V 不能直接连到右侧电路的输入端，那就把 +12V 降低到 +5V 然后再接到右边电路的输入端呗？这可以用个电阻加 5V 的稳压管来做。+12V 经电阻加到稳压管上，把稳压管击穿后就只有 +5V 了，多出来的 7V 落在电阻上。

我：“就是这个图了（figure0071）。你觉得怎么样？”



注意此图中稳压二极管的电路图符号，代表 N 区的是一折线，与肖特基二极管有区别。另外，此图中稳压值 5V 也不是标称值。

师：“我发现你小子是真聪明啊！现学现用？刚知道稳压管怎么回事这就用上啦？”

我：“听这话好像我这个图对啦？哈哈。”

师：“稳压管用的电路图符号是对的。”

我：“就对了这么一点？”

师：“稳压管的接电方向是对的。阳极接的是 GND 吧？”

我：“是 GND，我没标出来。难道要接 -12V 吗？”

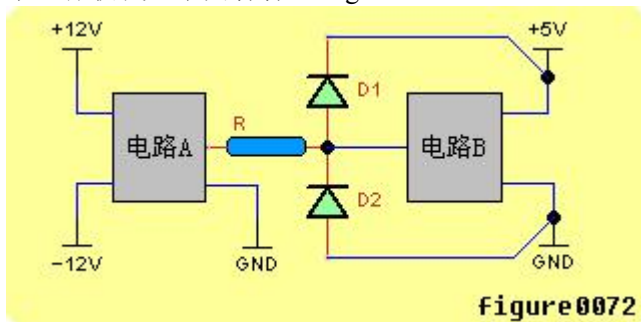
师：“当然要接 GND 了。当‘电路 A’输出 +12V 时 D1 会击穿，把电压限制在 5V，+12V 出来的电流经 D1 入地。”

我：“我没算稳压管的限流电阻应该多大，假设没有问题吧。”

师：“另外稳压管也没有 5V 的，只有 5.1V。”

师：“应该说原理上是对的，可不是我想讨论的样

子。你收我这个图看看。(figure0072)”



我：“你这算俩二极管串联？”

师：“只是形式上像是串联。呵呵。”

我：“你用普通二极管行吗？D2 反向击穿电压算 100V，加上+12V 可是起不到作用啊？”

师：“加上+12V 电压时 D1 在起作用。它的阴极只有+5V，阳极是+12V，它会导通的。导通之后右侧电路只加上了 5.7V 电压，比电源只超了一点。”

我：“5.7V 是怎么来的？”

师：“D1 阴极是+5V，阳极比阴极要高 0.7V，加起来不是 5.7V 吗？”

我：“12V-5.7V=6.3V，这 6.3V 降到电阻 R 上了？”

师：“就是这样。你还是不太适应这种计算。”

我：“这行吗？这不还是比电源高吗？”

师：“我说了允许比电源超一点的。”

我：“你说可以比电源超一点原来是为了这个啊？有点像我们老师出考题了。自己给自己铺好后路，然后迷糊别人玩。”

师：“那么左边输出-12V 也没问题了吧？”

我：“-12V 经电阻加到 D2 的阴极，D2 的阳极是 0V，所以 D2 导通，导通后右侧电路只加上-0.7V 电压，也是比电源只超了一点。”

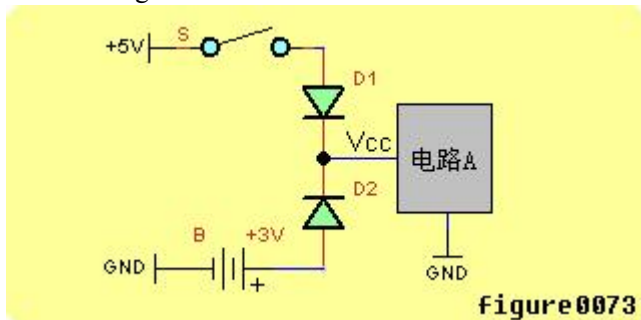
师：“这两个二极管这么使用，就叫做‘箝位(clamp)’二极管，它可以把过高或过低的电位‘箝制’在一个能接受的范围内。”

我：“这个就叫‘箝位’二极管啊？按用途的分类有这个说法。”

师：“下面我们就要谈谈图(c)和图(d)了。”

我：“不是说这两个图没有意义吗？”

师：“你收这个图(figure0073)分析分析。形式上和图(figure0069-d)相似。”



这个图上+5V 的电源经二极管 D1 给电路 A 供电，同时有 3V 电池 B 也通过二极管 D2 给电路供电，这两个二极管都导通吗？显然如果 D1 导通了的话那么 D2 是导通不了的，因为 D1 导通了之后 Vcc 这一端有 4.3V 的电压，而 D2 阳极只有 3V 比阴极电压低，它

无法导通。那么如果+5V 电源开关断开了呢？这时 3V 电池就应该通过 D2 给电路供电了，但只能供出 2.3V 的电压来，有 0.7V 降在二极管 D2 上了。

我：“我知道了，如果+5V 电源有电，那么电路就由+5V 电源供电；如果+5V 电源断开了，那么电路将由 3V 的电池供电。”

师：“完全正确。这个电池就是这个电路的‘后备’电池。”

我：“有问题！如果这个电路应该使用+5V 的电源，那么主电源经一个二极管少了 0.7V，给电路供出 4.3V 电，这个电路还能工作吗？要是不能工作那后备电池就更没戏了，它只能供出 2.3V 电压来。”

师：“这个电路肯定设计成能适应‘宽电源电压’，电源从 2V 到 5V 都能正常工作。”

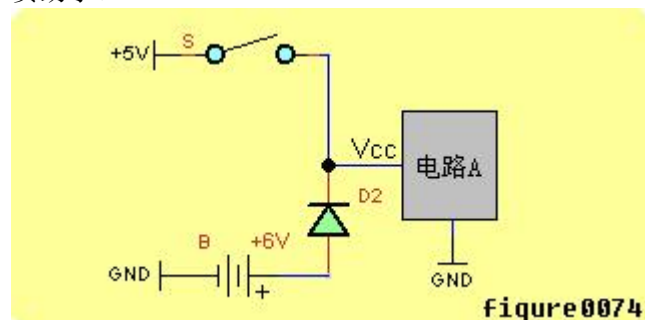
我：“你这个解释太牵强了吧？我有个更好的想法。”

师：“是啊？那你说说，这回我洗耳。”

我：“你慢慢洗，我还没想好呢。呵呵。”

假设这个电路必须用+5V 的电源，一点都不能少，那么二极管 D1 应该去掉，这样电源就没有 0.7V 的电压降落了。电池接的 D2 得留着，总得和+5V 主电源隔离开。电池应该用 5.7V 的，不过用能买到的电池还凑不出这个电压来。4 节干电池串联总电压为 6V，如果二极管上能降 1V 就好了。印象中好像 1N4148 能降下 1V 的电压来，我重新打开 1N4148.PDF 查了下，果然，1N4148 在流过 10mA 电流时有 1V 的压降，(见 1N4148.PDF 中 Electrical Characteristics 表格  $V_F$  栏中第 3 个数值)，一切刚刚好。

我：“我画了个图(figure0074)你看看，画图太费劲了。”



师：“我洗的是耳不是眼，你给说说你是怎么想的？”

我：“我是假设电路必须使用 5V 电源，所以+5V 直接连到 Vcc，电池用一个 1N4148 和 5V 电源隔离，当 5V 电源断开后，6V 的电池通过 1N4148 给电路供 5V 电源。”

师：“你干嘛要用 D2 隔离+5V 和电池？”

我：“不知道，就是有这么个感觉，觉得应该隔开。”

师：“你 6V 的电池通过 1N4148 给电路供 5.3V 电源啊？这比 5V 要高！”

我：“哈哈，早就想到你会说这个。你对 Datasheet 显然不重视。我查了 1N4148.PDF，当 10mA 正向电流流过 1N4148 时，它有 1V 的电压降。”

师：“真的啊？这我还真没注意。怎么会不是 0.7V

呢？”

我：“哈哈，你这个老鸟也不是处处比我这菜鸟强啊！仔细阅读 Datasheet 吧，谦虚使你进步，下不为例。”

师：“说你胖你还就喘上了。是你该仔细阅读 Datasheet，正向电压分成两个竖列，表头上分别注明了 Min. 和 Max.，知道什么意思吗？”

我：“Min. 是‘最小’的意思，Max. 是‘最大’，这怎么啦？”

师：“100 万个 1N4148 每个都流过 10mA 正向电流，其中质量最差的那个有 1V 的电压降。绝大多数都到不了 1V。明白了没？”

我：“这个 1V 也是个极限值吗？我还以为每个 1N4148 都是这么大呢。”

师：“这个 1V 上面标着 Max 啊。这是生产厂商给你质量担保的值，意思是‘我不论卖给你多少 1N4148，其中正向管压降最大的也保证不会超过 1V，如果超了你可以去法院告我销售劣质产品。’，就是这样。”

我：“那它怎么会没有最小值呢？左边是空着的。”

师：“最小值没有保证，多小都有可能。如果你因为买到了一个管子由于正向压降非常小导致你的电路不能正常工作，那是不能投诉的。”

这里对“最小值”为空的解释未必正确，有待探讨。

我：“可上面一行就是有两个值的，正向压降最小有 630mV。”

师：“那一行的管子型号是 1N916B 啊。那个字母 B 你应该知道什么意思吧？”

我：“这个 1N916 的性能参数分在 B 档？”

师：“对，B 档的 1N916 在流过 5mA 正向电流时，正向电压被严格控制在 630mV 到 730mV 之间。”

我：“那 A 档的在什么数值之间？”

师：“不知道。可能不再生产 1N916A 了。”

我：“我还以为我这个想法怪不错的呢，这回受打击了。”

师：“有想法就好，有不成熟的甚至不对的想法更有助于学习。你发现没，Datasheet 中的‘图形’比‘表格’更有参考价值。”

我：“对啊，我昨天查的是‘Figure 4.’这个图，今天怎么查这个表格了呢？”

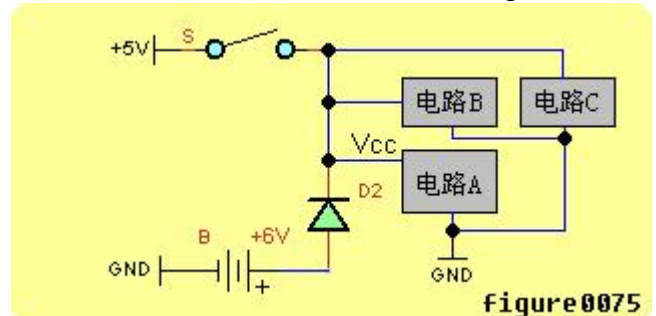
我：“因为表格里的数值刚好对你的心思。我再给你指两个毛病出来。”

我：“还有两个呢？受不了了。”

师：“第一，当 5V 电源接通时，D2 阴极为 5V 而阳极为 6V，那它正向通还是不通？”

我：“应该会导通，6V 的电池还是有电流流过二极管 D2 到 Vcc 的，它根本就没有隔离开 5V 电源和后备电池是吗？”

师：“第二，我画个图给你看看。(figure0075)”

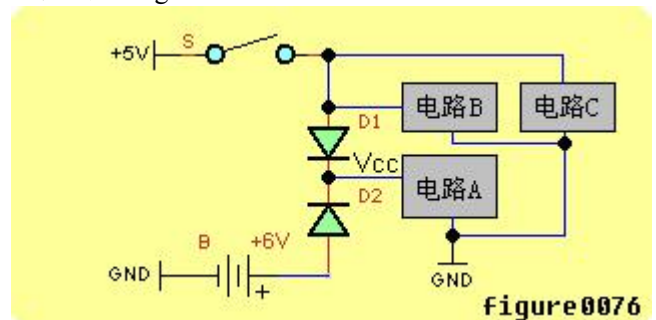


师：“5V 电源断开后，后备电池将同时为 A/B/C 三部分电路供电对吗？”

我：“你是想说其实只有电路 A 需要后备电池维持供电，而电路 B 和 C 是不需要继续供电的？”

师：“对啊，就是这个意思。现在电池要为那些根本不需要电的电路供电，太费了吧？”

我：“原来二极管 D1 是不能省的。你等我把它补画回去。(figure0076)”



我：“这个画对了吧？5V 电源断开后，后备电池经过 D2 接在 D1 阴极，不可能有电流流过 D1。除了那点 nA 级的漏电流。”

师：“这个图没问题了，电池电压还需考虑。”

我：“不用 6V 还能怎么办？”

师：“没有哪些电路会要求电源电压分毫都不能差的。时间不早了，我们下回再讨论两个二极管并联。”

我：“今天学的比较爽，有点技术的味道了。晚安吧。”

时间不早了，在老妈赶来催眠之前，我重新回顾了一下今天讨论的内容，突然发现今天讨论的“箝位”电路 (figure0072) 和“后备电池”电路似乎有一些矛盾之处。我把后备电池加到 6V，并且把 D1 去掉，这造成了 +5V 电源和后备电池之间没有隔离，D2 总是导通的。如果这是不允许的话那么“箝位”二极管难道不也是造成 +12V 电源和 +5V 电源未能隔离吗？

不过这两者之间还是有所区别的，“箝位”电路不单是有两个二极管，同时还有一个电阻串在 +12V 输出和 5V 输入之间，这个电阻有何作用？它肯定能限流的，当 +12V 信号电压令 D1 导通后这个电阻限制了经 D1 流向 +5V 电源的电流，这样来看的话如果我分别有 +12V 和 +5V 两个电源，这两个电源之间接一个电阻，那么两个电源应该不会互相影响，12V 仍是 12V 而 5V 仍是 5V。

至于我自己设想的使用一个稳压管限制 12V 信号电压的方法 (figure0071)，C# 说“原理上是对的”，这什么意思？难道不实用？对了，我没考虑 -12V 信号加到稳压管上的情况，不过如果是输入 -12V 信号的话那么稳压管好像也起到“箝位”的作用啊？它的阴极经电阻接 -12V，阳极接 0V，它这是正向接电啊？稳压管正向接

电会怎么样呢？应该和一个普通二极管一样吧？两端电压达到 0.7V 就导通？如果真是这样那我这个方法显然比用两个箝位二极管要好，省了一个二极管。

老妈终于及时地出现了，就到这儿吧，睡觉去。



## 本节补充说明

对于元器件的 Datasheet，我们确实是没必要把它通读后再彻底弄清楚的，一般来说我们只有根据实际需要到 Datasheet 中查找要用到的参数。而查找的时候需要注意以下几点：

第一、参数表的标题，说明了此表中各数据的用意。比如 1N4148.PDF 中的第一张表，标题为“Absolute Maximum Ratings”，指出表中的数据是“绝对的极限”，也就是我们无论如何也不能超过这些数据限定的范围，超过了就可能导致器件损坏失效。这标题还带了一个“\*”注释，“**These ratings are limiting values above which the serviceability of the diode may be impaired.**”，明确地告诉我们“**这些参数都是限制性的数值，超过任何一个都会削弱二极管的耐用性**”。下一个表标题为“Thermal Characteristics”，说明表中的数据与器件“发热”有关系。虽然这里没说这是极限值，但一般的常识是表格中的数据往往都是极限值或边界值，也就是不应（或不会）超出的数值。

第二、表格中各参数的测试条件，还以第一张表为例，标题旁有一句“ $T_a=25^{\circ}\text{C}$  unless otherwise noted”，这就告诉我们以下数值是在环境温度为  $25^{\circ}\text{C}$  时成立，这个“ $T_a$ ”是否确实为“环境温度”没有说明，我推测是。那么如果环境温度高了或低了会怎样？大家要记住超出了测试条件之后器件的各项极限指标通常是变差的。非极限的指标会怎样？比如第三张表“Electrical Characteristics”，表中明确给出了“Test Conditions”一栏，可见 1N4148 的  $V_F$  在正向电流  $I_F$  为 10mA 时最大值是 1V，那么  $I_F$  不是 10mA 时该怎么办？

第三、图形曲线反映了真实器件的性能，若 1N4148 正向电流  $I_F$  不是 10mA，我们应该从“Figure 3”到“Figure 5”中去查  $V_F$ 。这些曲线更具参考价值。

第四、表中的数据和图形曲线都是“统计”出来的结果，是测试了很多器件之后的一个“平均化”的结果。比如说 1N4148.PDF 中的那些“Figure”，都是“Typical”Characteristics。当然用“平均化”这个词不准确，我想说的是若你真买一个 1N4148 二极管去测试它的参数时，你会发现这个 1N4148 和 Datasheet 中的 1N4148 还是不一样的。你的电路如果要求实际器件的性能与 Datasheet 上描述的必须一模一样才能正常工作，这种电路必然失败。实际上你想设计出这样苛刻的电路也不可能。

## 2005-05-18：二极管电路（三）

很奇怪，二极管的串联和并联似乎不像 C# 所说的那样特立独行，我在 GOOGLE 上搜了一下，有好多页面都提到二极管串联和并联。大略浏览了一些页面，它们大都是在说“发光二极管”串联和并联使用，也有一些页面提到了“整流二极管”串和并，大意是串联可提高“耐压”，也就是反向击穿电压提高了，并联后每个管子流过的正向电流相加可以得到更大的总电流。但是却没有哪个页面提到“箝位”和“后备电池”之类的内容，看来是 C# 这家伙特立独行，非把“箝位”和“串联”捏到一起。

师：“早啊，又在 GOOGLE 上趴着呢？”

我：“你终于没猜我在泡 MM。我查了下‘二极管 串联 并联’，发现你真的有点色。”

师：“此话何意？是我讲的内容有错？”

我：“不是，只有你把‘箝位’和‘串联’硬捏在一起。人家说‘串联’只是为获得更高的反向击穿电压而已。”

师：“并联为了流过更大的正向电流对吗？”

我：“对，就是这个目的。每个管子能流过 1A 电流，两个一并就能流过 2A 了。”

师：“行，我们就从这个‘并联’流过更大电流说起。你了解到这种‘并联’有什么问题吗？”

我：“我没仔细看，这又有问题啊？”

师：“就从这个图（figure0077）开始。两个二极管并联，我调节电源电压，当正向电压大于 0.7V 后，原则上两个管子都开始导通。”

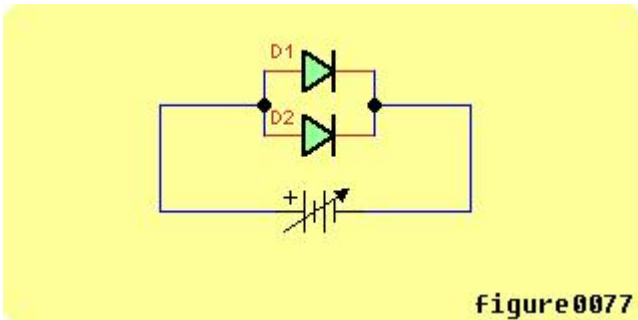


figure0077

我：“等等，我先琢磨琢磨这个‘原则上’仨字。咱就爱研究弦外之音。”

昨天已经讨论过 1N4148.PDF 上对“正向电压”所给的参数了，分最小值和最大值，这是个区间，并非固定在某一个值上。0.7V 是个“典型”的数值。

我：“这两个管子正向导通电压可能不一样是吗？”

师：“对，问题就在这里。假设 D1 正向导通电压为 0.8V，而 D2 为 0.6V，那么当正向电压达到 0.6V 后，D2 首先导通了。”

我：“对啊，当电压升高到 0.8V 后 D1 也会导通了，这怎么了？”

师：“D1 两端的电压怎么能到 0.8V 呢？它两端的电压会卡在 0.6V 啊？因为 D2 正向导通了啊？”

我：“我明白了，你的意思是说 D2 正向导通后两端电压 0.6V 基本稳定了？”

师：“对 D1 来说 D2 其实是个‘箝位’二极管，你认为呢？”

我：“真的啊？这个也叫‘箝位’啊？”

我：“不对！差点被你忽悠住。我们老早就从 Datasheet 上的曲线里查到过，正向压降和正向电流大小有关系。”

师：“没错，你只要继续增加电压，D2 的正向电流会增大，它的正向压降也会小幅增大，肯定能到 0.8V 的。”

我：“这就可以了，D1 还是能够导通的。”

师：“更可能出现的一种情况是还没等 D1 导通呢，D2 就因为流过电流太大烧掉了。”

我：“那就加限流电阻。（figure0078）”

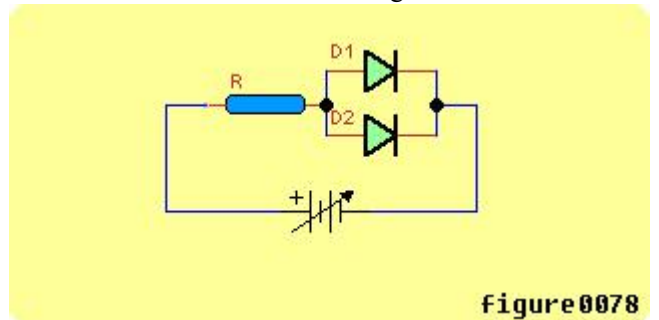


figure0078

师：“你限制了电流，就回到那个问题了：D2 两端电压怎样达到 0.8V 呢？”

我：“那这样来看这种并联肯定是不能用了？”

师：“能用，你可以一次买 100 个二极管，然后从中挑出参数很接近能配成对使用的。”

我：“这有点累，也有点太烧钱了吧？”

师：“或者这样加限流电阻。（figure0079）”

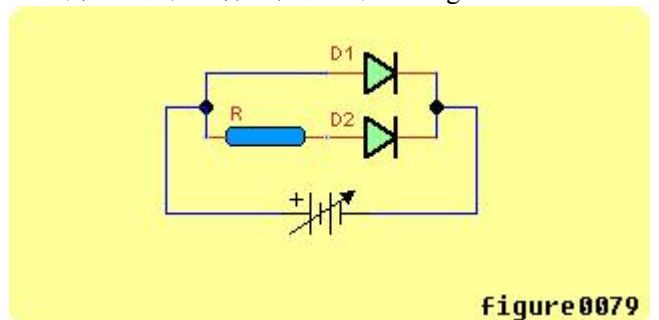


figure0079

我：“这个行，电阻限制了流过 D2 的电流，而且它上面有压降，和 D2 的 0.6V 加一起就很容易到 0.8V 了。”

师：“但问题是如果 D1 的正向电压是 0.6V 而 D2 是 0.8V 呢？这个电阻就要加到 D1 上了。”

我：“对啊，这不很简单吗？还用说？”

师：“要说。因为你在焊接电路时把两个二极管搞混了，D1 和 D2 颠倒了。”

我：“我受不了了。这样看来这种并联还是不好使

啊？要不我给俩二极管各串一个电阻？”

我：“就是这个图，(figure0080) 这回焊错了也不怕了。这个行吗？”

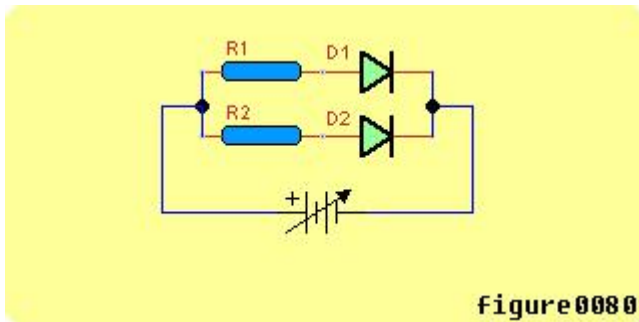


Figure0080 这个图是正确的,电阻 R1 和 R2 被称为“均流电阻”。

师：“好了，我们不在这个问题上费周折了。这种并联确实存在一些不好处理的地方，我们以前讨论电池的时候也说过，两节电池并联理论上可以输出更大的总电流，但有些麻烦之处。”

我：“你一说电池并联我想起个事，假如有个 3V 电压的电池，它和另一节 1.5V 电压的电池就那么直接并联起来，会有什么问题？(figure9003-a)”

师：“3V 的电池会给 1.5V 的电池‘充电’，你难道不认为这就是个充电器吗？”

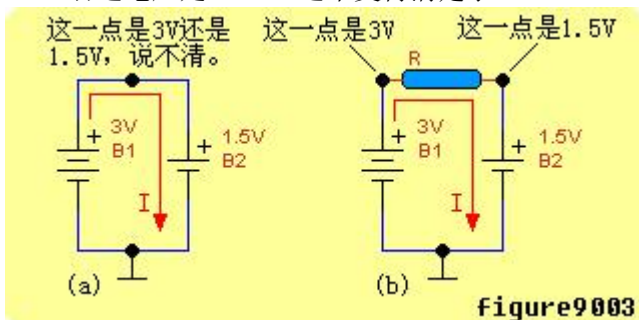
我：“对啊？真的是充电器啊！电流会从 3V 电池流出再进到 1.5V 电池里。”

此说法有待商榷，难道没有电流从 1.5V 电池流向 3V 电池吗？

师：“更要命的是我们搞不清楚这个‘电池组’正负极间的电压到底是多高，3V 还是 1.5V？”

我：“所以 3V 电池正极和 1.5V 电池正极间应该接个电阻？(figure9003-b)”

师：“这仍然是充电器，但是电阻左边的电压是 3V，右边电压是 1.5V，这个变得清楚了。”



我：“那上回讨论的‘箝位’二极管就有点问题了，左边电路输出 12V 电压的信号使上部‘箝位’二极管导通，这时会有电流流向右边电路的 5V 电源啊？”

师：“是有这样的问题，不过 12V 输出与 5V 输入之间是有个电阻的。这成与不成要看 5V 电源是否允许有电流流向它了。”

一般来说都是没问题的，但当低压电源端使用的是电池时，我个人觉得还是应该琢磨一下。

我：“原来你出这主意成与不成还得看具体情况啊？我以为万试万灵屡试不爽呢。”

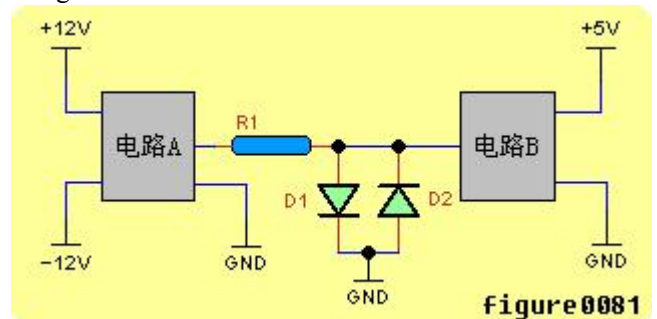
师：“一般来说都是可以的。”

我：“好了，‘并联’相关的内容就到这儿了，还有什么其它的内容？”

师：“什么就到这儿了？我准备要讨论的‘二极管并联’的内容还没开始呢。”

我：“那我们刚才都在说什么呢？”

师：“是说你搜出来的东西啊？收这个图吧 (figure0081)，这才是我想谈的‘并联’。”



我：“这有什么新鲜的？不论怎样接电，总有一个二极管是通的。这想干嘛呢？”

我：“这和‘头碰头’、‘背靠背’串联的两个二极管 (figure0069 的 c 和 d) 是一类，那样串联的两个管子不论怎么接电都是不通的。”

师：“这个图 (figure0081) 是两个管子这样并联的实际应用，你完全能自己分析一下。”

如果电路 A 输出+12V 电压的话，那么 D1 就会导通而 D2 不通，当然电流被 R1 限制不会很大，但电路 B 实际收到的电压就只有 0.7V 了。而电路 A 输出-12V 呢？这时 D2 会导通而 D1 不通，R1 仍然限制了电流，电路 B 将收到-0.7V 的信号。

我：“难道表达 1 和 0 的电压又要重新变了？电路 B 只能收到最高±0.7V 的电压。”

师：“干嘛总扯到 0 和 1 上去啊？”

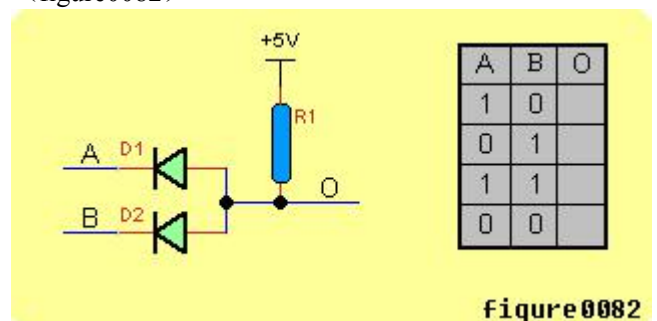
我：“这也是‘箝位’二极管啊？把电位箝的太低了吧。”

师：“这个是‘限幅’二极管，两个管子限制了电路 A 输出的信号电压的幅度。”

我：“这个又叫‘限幅’啦？‘幅度’是个什么概念？”

师：“‘幅度’我们以后谈，反正你是知道这两个二极管的效果了，这就行了。”

师：“下面是非常重要的内容，收这个图。(figure0082)”



我：“这个不是刚说完吗？D1 和 D2 正向压降不一样大？”

师：“你就不能看仔细点？这跟刚才讨论的两个管子并联一样吗？”

我：“两个管子只有阳极接一起了，阴极是分开的。这有什么说道？”

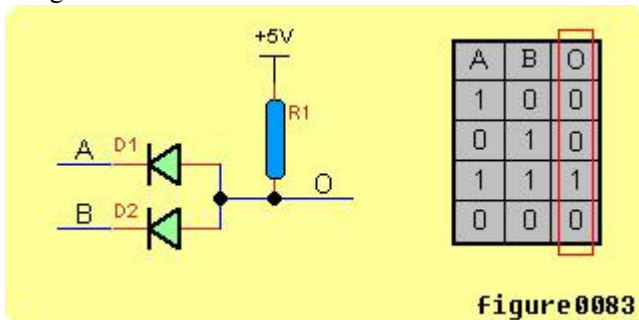
师：“D1 和 D2 的阴极分别称为 A 和 B，每个点都可以接 Vcc 或接 GND，也就是输入 1 或 0，我们来看 O 点输出和 A 与 B 之间的关系。”

A 与 B 的输入仍是那四种组合，下面就是分析 O 与 A 和 B 的关系。毫无疑问，当 A 和 B 都输入 1（也就是接+5V）时，由于它们的阳极也通过电阻 R1 接+5V，并不比阴极高 0.7V，这时两个二极管都不导通，这时 O 点只能是 1 了，这是被电阻 R 拉高到 1 的。

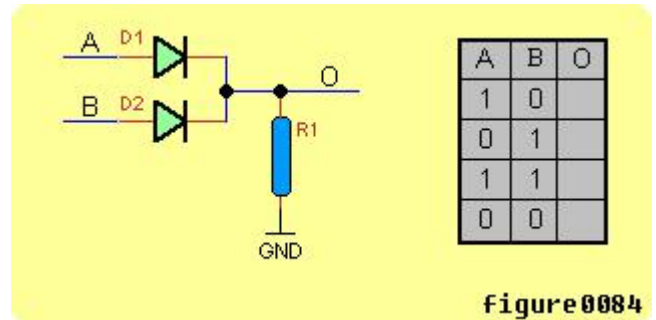
当 A 与 B 都是 0（接 GND）时，原则上两个管子都导通，而实际上由于管子之间的差异，只有正向压降小的那个管子导通。但即使只有这一个管子导通，O 点电压也会被‘箝制’在 0.7V，也就是输出 0 了。

那么 A 与 B 一个是 0 一个是 1 会怎么样？显然阴极接 0 的那个二极管肯定导通，而只要有一个二极管导通，O 点电压只能是 0.7V，输出就一定是 0 啊。

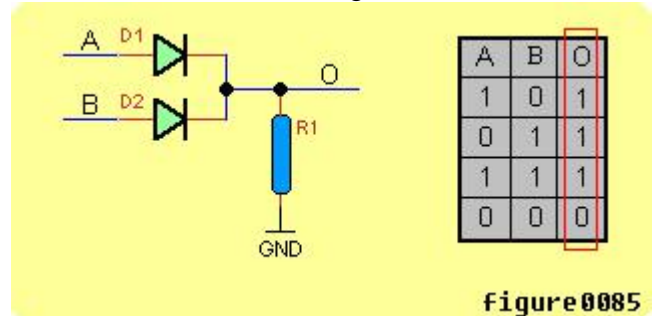
我：“这是个‘与’逻辑对不对？看看我填的表。（figure0083）”



师：“完全正确。那么这个图也就没什么可细想的了吧？”



我：“这个是‘或’逻辑，两个输入端 A 或 B 只要有一个是 1，就有一个二极管导通，那么 O 点就输出 1；两个输入都是 0 时两个二极管才能全截止，此时 O 点被电阻下拉到 0。（figure0085）”



师：“好了，今天要讨论的内容就是这些了。”

我：“不是吧？不是说有‘十分重要’的内容吗？就是这个？”

师：“对，就是这个‘与’和‘或’了。”

我：“就这么点内容啊？怎么会没有‘非’逻辑呢？”

师：“‘非’逻辑用二极管实现不了，你自己琢磨琢磨就知道了。我先走了。”

我：“还有个问题：稳压管正向接电是个什么情况？”

师：“那和普通二极管一样的，正向电压降 0.7V 左右。”

我：“行了，剩下的问题我自己琢磨了。”

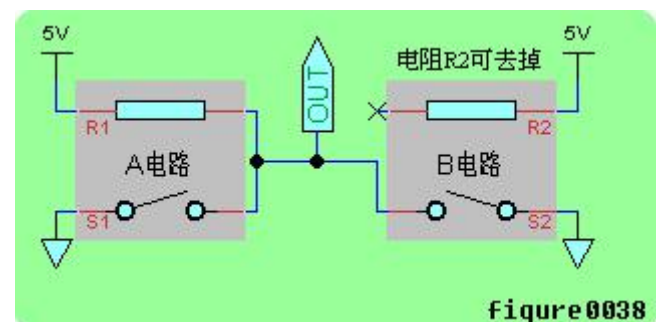
我感觉，这个二极管似乎可以看做是一个开关，导通的二极管相当于接通的开关，没导通的二极管相当于断开的开关。我们以前讨论的“与逻辑”时曾经用两个开关加一个上拉电阻（figure0038）来说事的，现在两个开关换成两个二极管，结果是一样的。唯一一点区别，就是二极管阳极比阴极电压高 0.7V，普通开关两端可没有这个电压差。当然这关系不大，我们只要定好 0 和 1 的电平范围就可以了。

那么对于图（figure0080）所示的这种并联电路呢？

我是否可以把二极管换成开关来看待？估且不去考虑二极管正向 0.7V 的压降，我们这样并联二极管，是为了能通过更大的正向电流，而现在这张图上的电流，是由两个电阻决定的。显然，这电阻不应该很大，这要阻值太大，我们还怎么能获得大的电流呢？

可是这电阻的值应该怎么算呢？这要只是一个电阻串一个二极管我倒是会算，现在是两路，难道可以分开计算吗？分开计算好之后，把它们并联到一起，相互之间会不会有影响呢？这可真是麻烦啊。

反过头来再看“与逻辑（figure0083）”和“或逻辑（figure0085）”电路，电阻 R1 又该如何计算？就拿 figure0083 为例吧，假设 A 端输入 0，相当于接 GND，B 端接+5V，显然二极管 D1 导通了，流过它的电流应该是被 R1 限制了，这个电流要多大？肯定不应该很大，这个电流如果大了 D1 上的电压降就高过 0.7V 了，何况电流大了还要发热，这是白费电嘛。对于 1N4148 来说，它两端电压为 0.7V 时流过它的电流只有 5mA，这从 Datasheet 上的图 Figure 4 就可以查到，这样电阻 R1 的取值应该是  $(5-0.7) / 0.005 = 860\Omega$ ，我取  $1K\Omega$  是不是也行啊？把





电流限制的更小会让二极管两端的电压降更低，这个电压降我感觉上是越小越好，它越小 O 点输出的电压就越接近 GND，而且，二极管发热还少了很多，这岂不是很省电么？

## 2005-05-20：发光二极管

在按“用途”分的类别中，“稳压”、“箝位”和“限幅”都已经了解了，上回讨论的用二极管组成“与”和“或”逻辑电路，相当于把二极管当作开关，算是“开关管”吧。那就还剩下“检波”、“续流”、“变容”和“发光”管了。这里边只有“发光管”比较好理解，似乎也挺好玩的，我想今天要讨论的东西可能就是这个了。

我：“来了？今天要讨论‘发光二极管’了？”

师：“未卜先知啊？你怎么知道今天要说这个？”

我：“猜的，感觉这东西应该挺好玩的。”

师：“但我们不从‘发光’开始讨论。还记得你把 PN 结当成一节电池的事吗？”

我：“哪壶不开提哪壶，你竟捡这让人惭愧的说。”

师：“惭愧什么啊？PN 结在某些情况下确实能成为一节电池。”

我：“你怎么不早说呢？让人家白惭愧了好几天！”

师：“你不是已经提到过了，当我们把能量注入 PN 结时，它就变成一节电池了。所以我们把 PN 结暴露在阳光之下。”

我：“这是太阳能电池？也是‘光电效应’原理？”

师：“我可没想给你讲太阳能电池，还记得 1N4148 的封装吗？插装的那个？”

我：“就那个 PDF 上写的‘DO-35’？那不也是‘轴向引线’封装吗？”

师：“‘DO-35’是一个‘玻璃管’，PN 结密封在里面，有一层保护漆遮光。”

其实那个 LL-34 封装也是个玻璃管，只是没引线而已。

我：“还是用玻璃管啊？那叫二极‘管’倒是恰如其份了。”

师：“那层保护漆有可能脱落。”

我：“懂了，PN 结是‘见光死’的东东，保护漆掉了一露光，这个管子就变电池了，就没什么‘单向导电’的性质了。”

师：“也不好说就不能‘单向导电’了，反正它的性能要变的。所以使用玻璃壳的二极管要留点神，透光的不行。好了我们该说说能‘发光’的了。”

光电池是否就是一个简单的 PN 结？这个问题我并未研究过。这里只需了解普通二极管的 PN 结不能暴露在光照之下，其原因是否因为 PN 结变为一个光电池也待商榷。总之以上讨论不够严谨，只是提出了一个原则。

师：“制造 PN 结不单可以用‘硅’，还可以用‘磷化镓’和‘砷化镓’之类的半导体材料。”

我：“用这种材料做的 PN 结就能发光？你不是说 PN 结反向击穿时是可以发光的吗？”

师：“那是我听到的传闻，我没证实过。发光二极管的 PN 结在正向导通时发光，跟反向击穿没关系。而且这种 PN 结还有其它一些特性。”

我：“还有啥其它特性？”

师：“首先它正向导通需要接较高的电压，通常最低也在 1.5V 以上才行，绝非 0.7V。”

我：“一节电池不足以让它发光是吗？”

师：“对，一节电池没戏。其次它反向击穿电压很低，最低的 5V 到 6V 就击穿，高的也就 30V 左右。”

以上所给反向击穿电压数值范围从何而来我已经不记得了，具体的参数还要以厂家的 Datasheet 为准。

我：“这么低啊？是齐纳击穿吗？”

师：“应该跟齐纳击穿没什么关系了。”

我：“还以为能当稳压管用。还有什么特别之处吗？”

师：“重要的电参数就这么两个。我们下面讨论一些看得见摸得着的内容。收图。”



上图来自“电子爱好者”网站 (<http://www.dianziahaozhe.com/erjiguan/2283/>) 转载的一篇发表于《无线电》杂志上的文章，作者是张晓东先生。

师：“这些都是发光二极管，怎么样？猜下我们要讨论些什么？”

我：“‘颜色’多样，‘形状’各异。OK？”

师：“对，其它二极管都有个‘型号’，比如‘1N4148’，发光管也有型号，但是很少有人把发光管的型号挂在嘴边。”

我：“那我们怎么买发光二极管啊？”

师：“你到电子市场去问卖发光管的：‘我买Φ3 的圆形绿色高亮度的发光管，有吗？’这就行了。”

我：“Φ3 的圆形，是直径 3 厘米的圆型管子？”

师：“是 3 毫米直径，你倒没说是 3 米直径。直径都用毫米。”

我：“这个‘高亮度’是怎么个意思？”

师：“发光管的亮度跟流过的电流有关，电流越大发的光越强，当然也就越费电。”

我：“高亮度是指这个管子允许流过很大电流从而发出强光？”

师：“不是，高亮度是指这个管子‘不需要’流过很大电流就能发出比较强的光。”

我：“那应该算是‘省电’，干嘛要说成‘高亮度’呢？”

师：“发光管有‘普亮’、‘高亮’和‘超高亮’的。

‘普亮’就是‘普通亮度’的意思。”

师：“普亮、高亮其实是让它们流过相同的电流，然后比较亮度后得出的结论而已。”

我：“你给的图颜色全吗？”

师：“不全，红色绿色黄色是极常见的，很早就研制成功了。近些年研制成功的是蓝光和白光的。”

我：“蓝光很时尚啊，记得 NOKIA 最早出了一个屏幕能发蓝光的手机，后来很多东西都用蓝光了。”

师：“但是目前蓝光的管子稳定性稍差一点，相对红绿黄这种成熟的产品来说。”

我从何处得知蓝色发光管的稳定性稍差？不好意思我不记得了。

我：“发白光的管子干什么用的？难道是当灯泡照亮儿用？”

师：“还真是当灯泡用，有些新型的手电就是用白光的发光管代替灯泡的。”

我：“那这么说我同学那个头灯就是发光二极管的了， he 说是 LED 头灯。”

师：“发光二极管的英文 ‘Lighting Emit Diode’，字头缩写当然是 ‘LED’ 啦。”

我：“我看到有方形的发光管，常见的就是圆的和方的吧？”

师：“肯定是圆的和方的最常见，那些怪异形状的是针对特殊需求做的。”

我：“这个发光二极管是不是常用作‘指示灯’？我看我电脑的插销板上有一个，ADSL 猫上也有 4 个，U 盘上有一个。”

师：“是常用作指示灯，但白光的一般不会当指示灯用。LED 和灯泡相比有相当大的优势。”

我：“它不怎么发热对吗？我刚摸了下插板上的 LED。如果是灯泡的话肯定是发热的。”

师：“发热少是优势之一。LED 省电，就算是‘普亮’的管子也只需 10 几个 mA 的电流就能发出很亮的光来。”

我：“LED 还不会‘憋’，它没灯丝不会烧断，对不对？”

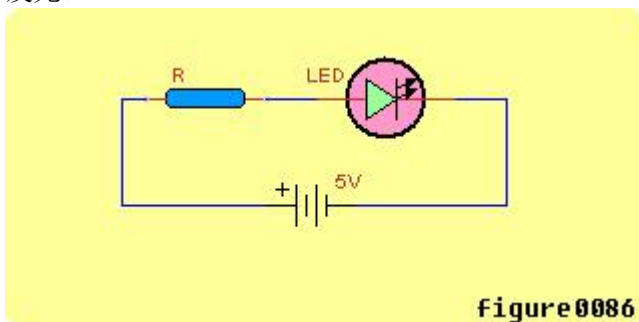
师：“你应该说‘LED 寿命长’，显得专业一点。但正向电流太大它还是会烧的。”

我：“这个咱懂，加个限流电阻呗。”

师：“对啊，就是这个图（figure0086）。说说限流电阻该取多大？”

我：“发光二极管的电路图符号就是这样啊？”

师：“对，二极管的符号再加俩指向外的箭头表示发光。”



LED 正向电压在 1.5V 以上，这个“以上”有点别扭，要不就取成 1.8V，在 1.5V 和 2V 之间，这样电阻两端的电压是 3.2V，剩下就要看有多大电流流过电阻了。C# 刚提到‘普亮’的管子流过 10 几个 mA 的电流就能发出很亮的光来，要不就把电流取成 10mA 吧，好算。

我：“我假设这个 LED 是‘普亮’的，流过 10mA 电流，它两端的电压取 1.8V，所以限流电阻是  $(5V - 1.8V) / 10mA = 320$  欧。”

师：“思路很清晰，注意电阻要取‘标称值’。”

我：“这还要思路呢，取标称值 330 欧姆。这时电流略小于 10mA，亮度稍低一点。”

师：“这么一点亮度上的差异人的眼睛根本分辨不出的。”

我：“您老眼昏花的当然分不出，我可是火眼金睛啊。”

师：“LED 两端电压取 1.8V，这比较粗略一点。实际上 LED 正向导通电压范围比较宽。”

我：“范围比较宽？是说正向压降随正向电流增大而上升？”

师：“这个规律是有的，但我现在想说的不是这个。而是不同颜色的 LED 正向导通所需的电压不一样。”

师：“你可以记住一些经验性的东西：红色黄色的 LED 正向导通电压大约在 1.8V，一部分红色的管子能低到 1.5V，绿色的一般要高一点，算 2V 吧，蓝光白光的更高一点，能到 3V。”

黄色 LED 的正向导通电压为 1.8V，这个我不太确定，有待证实。

我：“跟颜色相关？那这怎么做计算啊？还得去 Datasheet 上查吗？”

师：“其实是跟‘材料’有关系，不过不用搞太精确，怎么简单怎么来吧。比如把正向电压取为 2V 整数。总之实际流过 LED 的电流大点小点其实无所谓，对‘视觉效果’几乎没什么影响。”

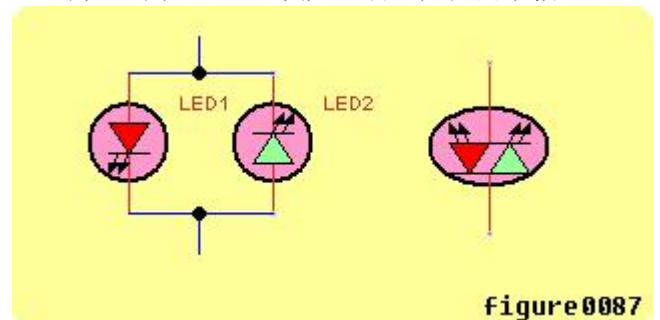
师：“下面我们继续谈 LED 的串联和并联。”

我：“这串和并还没完了！就没有更新鲜一点的东西可说了吗？”

师：“先看看这个图，两个 LED 并联，你有什么看法？（figure0087）”

我：“这要用来‘限幅’吗？”

师：“我想让它‘发光’啊，限哪门子幅？”



我：“不论怎么接电，总有一个管子能发光。我不想再弄这些小儿科的东西了。”

师：“这两个 LED 一个红一个绿，而且它们装在

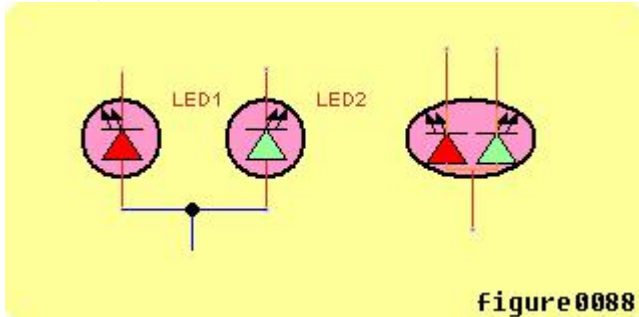


一个管壳内。这有点意思了吧？”

注意也有一红一黄组合的。

我：“你是说一个 LED 内部有两个芯，接电方向不同颜色也不同？”

师：“对，这是一种双色的 LED。再来这个图看看。(figure0088)”



我：“这个也是双色的？”

师：“这个是三色的。如果红的和绿的同时点亮，则会混合成一种橙色光。”

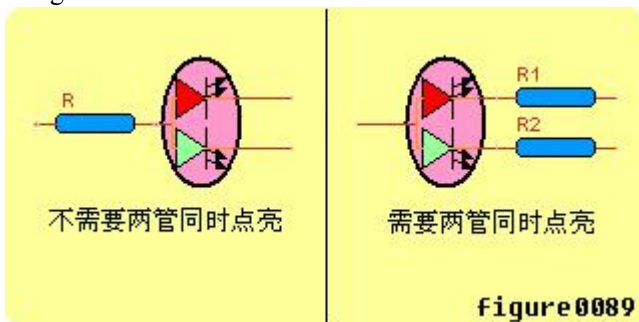
注意当红光和绿光的强弱比例可以调节时，此种管子所发出的混合光也可以有不同的色彩变化。

我：“对了，这两个芯可以同时亮的。”

师：“接在一起的电极叫‘公共端’，如果是阴极，那就叫‘共阴’；是阳极就叫‘共阳’，请问限流电阻应该怎么接？”

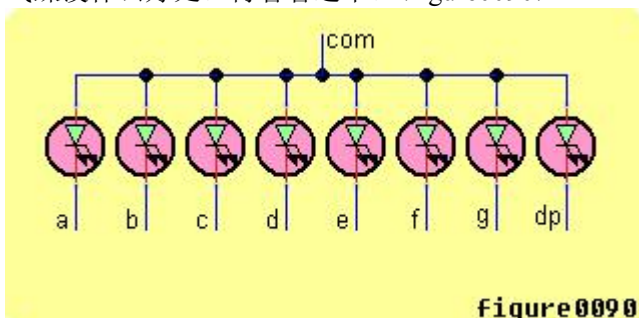
我：“这个蒙不了我了，在没相连的两个电极上各接一个限流电阻。哈哈。”

师：“正确答案：如果只想让它发红光或绿光，那么只需在公共端接一个限流电阻；需要发三色光时最好分别为红绿 LED 各接一个限流电阻。哈哈哈。(figure0089)”



我：“I 服了 U！我又没想全面。”

师：“所以说不要总认为这些东西都很简单，心浮气躁没什么好处。再看看这个。(figure0090)”



我：“不会吧？还有 8 色的管子？”

师：“你拍拍脑袋想一想再说！两个芯放一壳里已

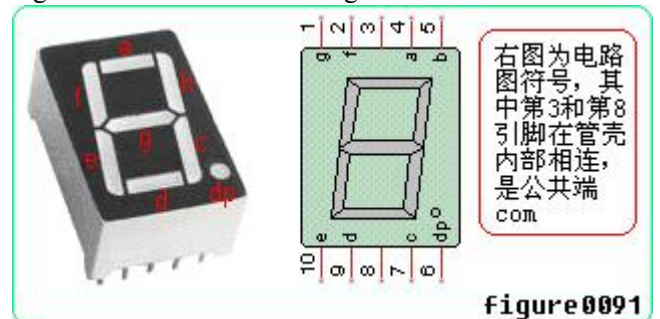
经能发 3 色了，8 个芯怎么会是 8 色呢？”

我：“还真算不清楚了，这应该算几色？”

师：“LED 现在只有红绿黄蓝白最常见，谁没事弄 8 种颜色凑一个管子里啊？这个东西不看颜色要看形状了。”

我：“不懂？不是圆的么？”

师：“8 个 LED 里有 1 个圆的 (dp)，7 个方的 (a-g)，排列成这个样子。(figure0091)”



我：“这个我见过，电梯上那个显示楼层数字的就是这个东西。”

师：“这个叫‘LED 数码管’，因为是用 7 个 LED 组成 10 个阿拉伯数字的笔画，也叫‘七段数码管’。”

我：“那个圆的 dp 怎么不算在内啊？它当成小数点用吧？”

师：“对，那个圆的是小数点。再发你一个图片，看看这些数码管的样子。”



我：“有大有小，有多有少。”

师：“这个东西常按‘字高’和‘位数’分类，我们以后用 0.3 英寸和 0.56 英寸字高的。而颜色以红和绿最常见，其它颜色也有，但不那么常用了。”

我：“是那个 8 字的高度？怎么会用英寸呢？怪怪的。”

师：“这都是西方世界舶来的，人家先玩这个，标准当然是人家定的。”

我：“图片中下部是多个字一体的吧？”

师：“对，中间那个带‘冒号’的，专为显示时间设计的。”

我：“这也分‘共阴’和‘共阳’？”

师：“当然分，这还有必要问吗？给你的图上 (figure0090) 画的是‘共阳’的。”

我：“问一下嘛，不是很自信啊。嘿嘿。”

师：“实际上每个数码管引出 10 个脚，其中有两个是公共端 com，在管壳内部相连。”

市面上数码管种类繁多，引出脚并没有固定的规则，



这里对引脚的介绍是最常见的。在图（figure0091）中，引脚 3 和 8 就是公共端 com。

师：“现在你设想一下这 7 个 LED 都能组成什么符号？”

我：“不是 10 个数字吗？还有别的？”

师：“你说大写字母 A 能不能显示？”

我：“把‘8’的下面一横灭了，算是个‘A’吧？没有尖儿。”

师：“有点抽象哈？那么大写字母 B 呢？”

我：“那不就是‘8’吗？和‘8’分不开。”

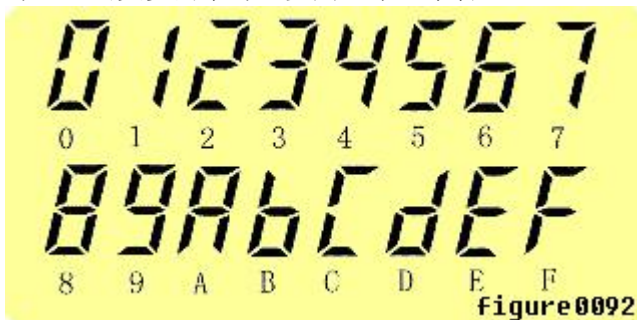
师：“所以只能显示小写字母‘b’对吧？”

我：“小写的 b 和数字‘6’分不开。”

师：“是‘6’的话可以把最上面一横点亮，这就行了。”

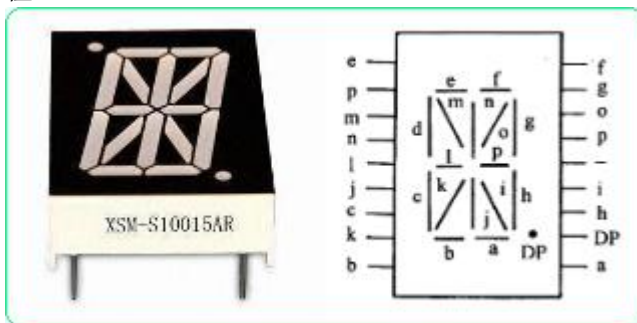
我：“你还真能对付，这个 8 字的管显示不了多少字母吧。”

师：“以下（figure0092）是它能显示的数字和字母，想出更多的字母，要用‘米’字管。”



我：“就是用 8 个方 LED 摆成‘米’字？4 个直的 4 个斜的？”

师：“还要再加 8 个 LED 摆成一个框把‘米’框住。”



我：“真够累的。这得引出多少条腿啊。”

师：“多引出几条腿没什么啊，能显示更丰富的文字符号才是重要的。”

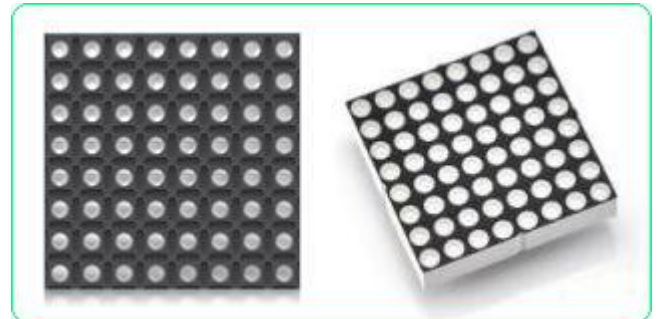
我：“这些文字符号太刻板。我看公交车箱里那个显示屏多少还像点样，显示的汉字一笔一画的颇有古

风。”

师：“那个是‘点阵’屏，每个 LED 是屏上的一个圆点，一串圆点亮起来就是一条线，它能显示比较复杂的东东，比如汉字。”

我：“那么多 LED 也有一个‘公共端’吗？好像有几十个 LED，得引出多少个脚啊？”

师：“怎么会是几十个？上千个吧？”

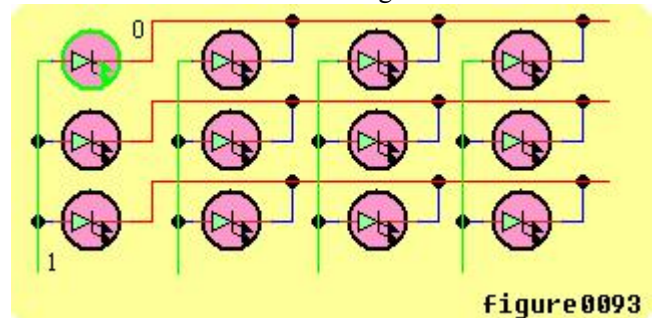


我：“8 行 8 列，这是 64 个 LED 组成的，得引出 65 个脚来？”

师：“这么一块每边长只有 30 毫米，你想想公交车上那个屏得用多少 LED。”

此器件也是有不同封装尺寸的，边长并不一定。

师：“这东西引出脚不是很多，看看这些 LED 是怎么接的就知道了。收图。（figure0093）”



上图并未画出完整的 64 个 LED，仅用于示意原理。

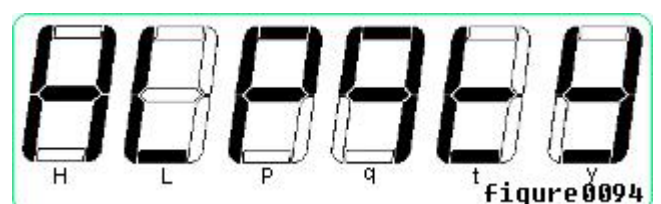
我：“这算是共什么极啊？竖着看 LED 的阳极接一起，可横着看是 LED 阴极接一起啊？”

师：“就是这么接的。干嘛非要分出共阴还是共阳呢？你知道它是怎么接的不就行了吗？”

有些人还是把此种点阵管分成“共阴”和“共阳”，不知道他们依据什么而分。

师：“给留个作业：这个 LED 点阵管上，如果显示出大写字母 A，应该让哪些 LED 亮起来？行线和列线上的电压该怎么加？”

我：“啥是‘行线’啥是‘列线’啊？”



研究了一下数码管这 7 个段位的组合，我认为它不能显示 16 个十六进制数字，至少还能多显示 6 个字母，如图（figure0094）所示。除了小写字母“t”有些牵强之外，其它几个字母还挺像那么回事的。这里的小写字母“q”和数字“9”也易混，就像小写字母“b”和数字“6”一样。

这个数码管在使用时也要限制每段 LED 的电流吧？这又要加限流电阻了，而且很显然，每个段都要加一个限流电阻，而不能在公共端 com 上加一个，这好像挺壮观啊，8 个电阻在电路板上排成排。这还只是一颗数码

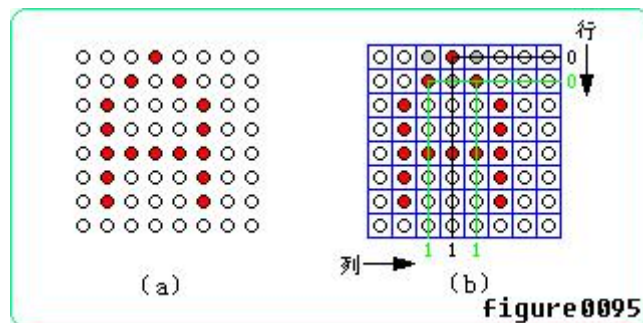
管，我要做个电子钟的话，“时分秒”加一起要 6 个数码管，那可就是 48 个限流电阻了，总感觉有点别扭啊？

而对于 LED 点阵，细想一下“行线”与“列线”并没有什么难理解的，横着是行竖着是列而已。所以对于图（figure0093）来说，3 根红线是“行线”，4 根绿线是“列线”。每一颗 LED 都是接在“行线”与“列线”的交汇点上，相点亮某个 LED，比如左上角第 1 颗，要把它阴极所接的行线设为 0，阳极所接的“列线”设为 1 即可。

而大写字母 A，我觉得它是如图（figure0095-a）那样显示出来的，如果行线为阴极列线为阳极，可见最顶端的 LED 要亮起来的话，要求左数第 4 列为 1 上数第 1 行为 0，图（figure0095-b）中的黑色线指出了电流路径。

问题在于第 2 行的两个 LED，如果它们要亮起来，上数第 2 行必须是 0，第 3 和第 5 列需设为 1，可参考图（figure0095-b）中的绿色线。显然第 2 行的第 3 和第 5 个 LED 肯定会亮，而这两个红色 LED 之间夹着的那个灰色的 LED，它亮不亮呢？它会亮的，因为为了点亮它头上的那一颗 LED，我们已经把左数第 4 列设为 1 了。也可以说，黑色的竖线与绿色的横线交点处的 LED 也是亮的，那么绿色竖线与黑色横线交点处的 LED 呢？第 1 行第 3 和第 5 列的两个，我也涂了灰色，它们会亮吗？

由此看来我们虽然知道如何点亮一颗 LED，但对于如何控制全部 LED，让该亮的亮不该亮的灭掉，这还是个问题啊。如何是好呢？



## 本节补充说明

发光二极管的颜色还是挺复杂的，单就绿色而言，还可细分为“翠绿”、“黄绿”等细类，一般来说我们不需要细致到这种程度。另外，有可以发射红外线的 LED，生活中广泛使用的各种家电的“遥控器”，如电视机和空调，都是依靠红外线 LED 发出控制信号的。目前还有发射紫外线的 LED，这个我们以后用不到。发射激光的 LED 我们也用不到，你只需知道你电脑的光驱和你的便携 CD 机中都应用了激光 LED 即可。

其实发白光的 LED 是由蓝光 LED 改造的，它发出的光本质上是蓝光，由于其管壳中增加了特殊的荧光材料，此种材料在蓝光的激发下发出黄光，再与蓝光混合，最后呈现出白光。当然我说的只是白光 LED 中的一类，据称利用此类 LED 做环境照明，其中的蓝光成份会对人的视力有不良的影响，但我没有找到过业内对此问题的确切结论。现在很多液晶屏使用白光 LED 做“背光”，我想大家还是不要长时间的对着电脑或手机屏幕看。读完下面一点内容就去休息一下把。

PN 结暴露在光照下，会呈现出特殊的电学特性，因此我们可以利用 PN 结探测外部环境光照，这就有了“光电接收二极管”，它的电路图符号与发光二极管类似，只不过表示光线的小箭头指向了 PN 结。另外还有一种“光敏电阻”用于检测光线，其原理我们不做讨论了。实际上电视遥控器发出的红外线信号就是用红外线接收二极管来检测的。

必须注意到一点，普通二极管的 PN 结不能暴露在光照下，但 LED 的 PN 结必须暴露在光照下，当然这是为了发出光来，但实际上这种结构特点使得 LED 也可以用于检测环境光，我们不对 LED 的这种另类应用做讨论，大家只需心中有数即可。

我们以后会使用两种不同封装的 LED 数码管，在图（figure0091）中展示的是字高 0.56 寸的，其管脚排列顺序标在（figure0091）右边的原理图符号中。字高 0.3 寸的小型数码管如图（figure0096）所示，7 个段的命名（a - dp）与图（figure0091）相同，但管脚排列有差别，注意其中引脚 1 和 6 是公共端 com。

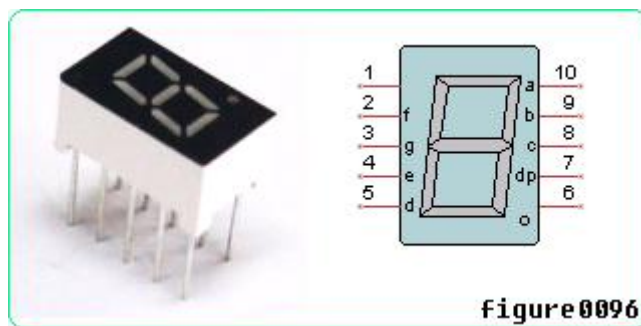


figure0096

## 第4章 基本电路定理

本以为自二极管之后会继续学习更尖端一些的东东，比如我电脑主板上那些大黑方块，叫做“集成电路”的玩意儿。可 C# 这家伙完全不顾我的想法，讨论了半导体二极管之后，居然又调头跑去折腾电阻了。

我也知道这些是基础知识，可这些东西确实有那么重要吗？莫名其妙。

### 2005-05-23：内阻，极其重要

闲来无事在网上瞎逛，忽然想到一个问题：“学了半天二极管数码管，这些东西该去哪儿买呢？”中关村这地方应该是有这些东西卖的，不过我去的那些市场里似乎只有电脑，还真没注意过有没有二极管。或者“某宝”上有这东西卖？

我没在“某宝”上面买过东西，至少对我来说付钱实在太费劲。银行卡俺倒是有一张，可是俺叔却不让俺开通“网上银行”，说什么不安全，我这电脑上病毒木马一大堆，很容易让人把密码给盗了。真是小题大做，估且不说我这电脑上是不是病毒木马一大堆，就我那卡上一共也没有几两银子嘛，盗就盗呗。

打开“某宝”的主页，搜索栏里输入一个“LED 数码管”，哇塞还真不少，搜出一大片卖家。换了个“金属膜电阻”重搜了一下，又是一大把店铺，这些元器件这么容易买啊？

师：“没看见我来了吗？招呼也不打一个？”

我：“我在‘某宝’上查了下‘LED 数码管’，好家伙不少人卖啊。”

师：“这些东西当然到处都是，‘某宝’上还有不少高级货呢。”

特别提醒：“某宝”上也有不少假货，呵呵。

我：“我在中关村怎没见着这些东西呢？看来以后就得从网上买了？”

师：“你若没去那些电子元器件卖场，当然看不见这些东西了。你打算买什么呢现在？”

我：“现在是不买什么，以后肯定要买啊，得做些真格的电路啊。”

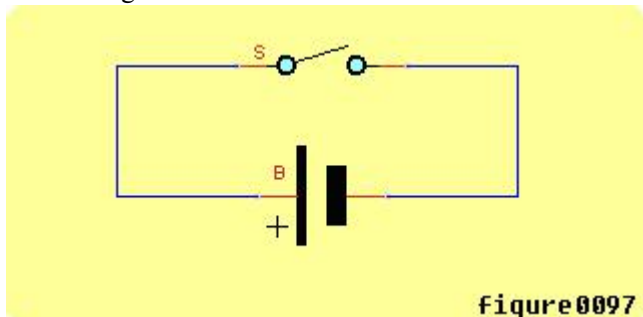
师：“你小子还真是个实干派啊，怎没说让我出个卷子考个分数啊？”

我：“歇吧！在学校做卷子头都大了，回家再被你一通‘拷’，还活不活了！”

师：“慢慢来，离真正焊个电路出来还有一段距离。我们还得讨论欧姆定律。”

我：“这还没个完了？我以为该集成电路了呢，怎么又回去了？”

师：“你还急茬子的？先收这个图看看吧，这事急不得。（figure0097）”



我：“英雄！你放过我吧！你这些图都‘简单的令人发指’！以前还有个电阻，怎么现在连电阻也没了

呢？”

师：“有个电阻那是‘简单的令人发指’，现在电阻没了，这事就复杂了。”

我：“这怎么复杂了？开关一接通，电源被短路，歇菜！”

师：“先别歇菜！先歇饭！你给算算有多大电流流过了导线行吗？”

这个电流并不好计算，因为不知道导线的电阻。想知道导线的电阻，就必须知道这根线是什么材料，也就是电阻率‘肉’，还得知道线的长短和粗细。不过这根线终究是导体，电阻肯定是很小的，那么我要把它的电阻取为 0 呢？肯定不行，除数能是 0 吗？

我：“你先说导线和开关的电阻是多少？要不没法算。”

师：“你已经假设过这根导线和开关的电阻是 0 了对吗？”

我：“那不还是没法算嘛！你当我是一年级的小豆包啊！”

师：“我们这样想：导线的电阻是很小的，而且随着线径加粗，电阻会越来越小，越来越接近 0，可是它就是不能到 0。”

我：“这样倒是没有分母为 0 的情况了，可还是算不出电流多大啊？”

师：“电流随着电阻的减小而增大，电阻越来越接近 0，电流就越来越接近‘无穷’大。”

以上说法用了一些非常初级的微积分概念。

我：“这都什么乱七八糟的啊？‘无穷’大是多大？你这结论有什么意义吗？”

师：“‘无穷’小和‘无穷’大只在数学中有意义，在工程实践中没什么意义。所以我得给你说点有意义的东西，要不你又急了。”

我：“不急不急，我先去洗手间把耳朵洗了，等会



儿回来听有意义的。”

我以迅雷不及掩耳盗铃之速度冲向洗手间，还好没人占着坑，赶紧把下半身存的水放出去，然后返回电脑旁。C# 这家伙根本没有等我，已经把问题放出来了。

师：“我们说过电流总是环形流动的，从电源正极出来流向负极，然后在电源内部回到正极。这个还记得吧？”

我：“这个当然记得，这个很重要哈？”

师：“电子在导线中运动会遇到阻力，也就是电阻，那么它在电源内部运动时是不是也应该遇到阻力呢？”

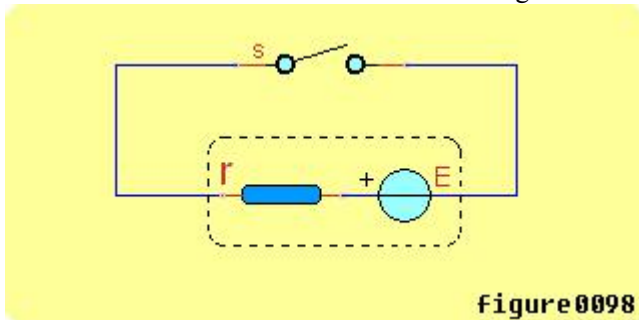
我：“它在电源内部应该遇到动力啊？什么‘洛伦兹’力和化学反应之类的。”

师：“有动力就没阻力啊？汽车有动力没阻力刹得住车吗？得撞死多少人啊？”

我：“也对啊，如果没阻力也就不需要有动力了。”

为打破静止还是需要“第一推动”的。

师：“所以电子在电源内部运动也是要遭遇电阻的，这个电阻叫电源的‘内阻’。收图。（figure0098）”



师：“虚线框中是实际的电源‘等效’电路，它由一个‘理想电压源 E’和一个‘内阻 r’组成。我们要通过这个图讨论 5 个知识点。”

我：“就这么个图有 5 个知识点呢？你比我们班主任不能说略高一畴也是不相上下了。”

师：“第一：‘理想电压源’内阻是 0，对电子运动无阻碍。或者说对‘电流’而言相当于‘短路’。”

我：“这个可以理解。实际电源就得把那个 r 带上。”

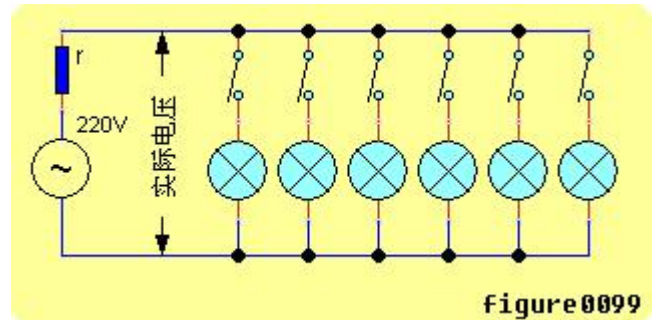
师：“第二：如果电源开路不接负载，那么实际电源输出的电压等于这个电路中‘理想电压源 E’输出的电压。”

对于图（figure0098）来说，当开关 S 断开时，S 两端的电压就等于理想电压源 E 的电压。

我：“这个早知道了，r 上没有电流流过就不会‘降落’电压。”

我：“第三点我猜到了：如果接了负载，那实际电源输出的电压就比理想电压源 E 低，因为内阻 r 和负载串联分压了。”

师：“还挺能猜啊你？那你猜猜这图想说明什么呢？（figure0099）”



我：“这个电源的符号咋回事？”

师：“这表示你家墙壁上那个 220V 电源。”

很多电灯并联在一起，如果所有的灯都关着，那么“实际电压”就是电源输出的 220V 电压，开了一盏灯，灯的电阻和 r 分压，“实际电压”就会降低一点，再开一盏灯，由于两盏灯并联后总电阻变小了，而电源内阻没变，那么两盏灯分到的电压就更低一点。如果再开一盏灯呢？

我：“这个图的意思是灯开的越多，电源实际能输出的电压就越低？”

师：“就是这意思。你有没有在农村生活过？”

我：“我知道了。我有亲戚在外地农村，前些年他们那边电力不足，晚上用电高峰时管儿灯一闪一闪的亮不起来。”

师：“用电高峰时电压变得很低，使用普通镇流器的日光灯就亮不起来了。”

我：“镇流器是个什么东西？没听说过。”

师：“这个以后再跟你说。不过我想现在你对‘内阻’应该没什么好感了吧。”

我：“对，这个内阻白费电。这个内阻会不会发热呢？”

师：“它当然会发热，它发热就表现为电源在发热。随着负载变重电源越来越热。这就是我要总结的第四点。”

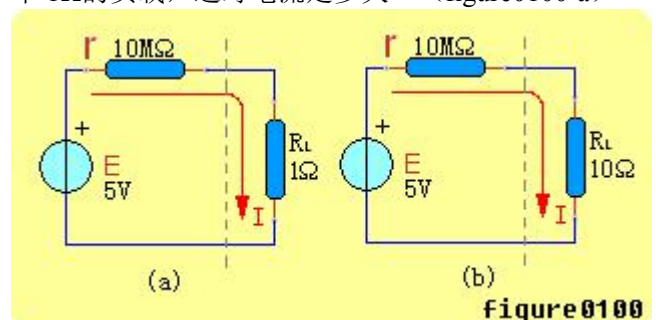
一点提示：为了让电源适应轻重不同的负载，它的内阻应该尽可能的小才好。

我：“咱这脑袋瓜子就是灵！嘿嘿。”

师：“先别吹了，还有第五点：如果一个电源内阻‘特别大’，那么当它接一个小阻值的负载后，我们可以认为这个电源输出的电流不随负载电阻的大小而变化。”

我：“这个不太好懂。”

师：“假设电源是 5V，内阻 10MΩ，我们外接一个 1Ω 的负载，这时电流是多大？（figure0100-a）”



我：“ $5V/10000001\Omega \approx 0.0000004999A$ 。”

师：“从实践的角度来看， $1\Omega$ 相对于 $10M\Omega$ 来说可以忽略不计的，所以电流取 $0.0000005A$ 。”

师：“现在负载电阻变为 $10\Omega$ 呢？增大10倍。（figure0100-b）”

我：“ $10\Omega$ 相对 $10M\Omega$ 也忽略不计吧？”

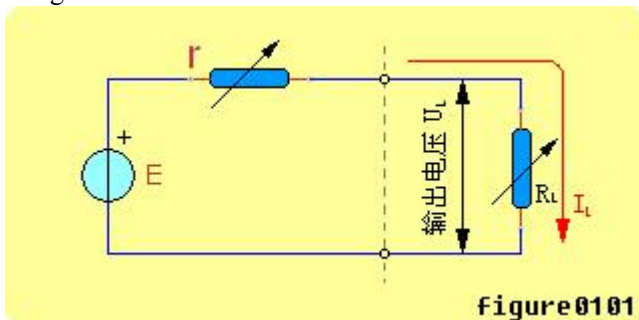
师：“所以，我们认为这个电源输出的电流 $I$ 不随负载电阻 $R_L$ 变化而变化，仅取决于内阻 $r$ 。”

我：“但是负载电阻 $R_L$ 增大到 $1M\Omega$ 就不能不考虑了。”

师：“对啊。这就是我们得出结论必须附加的限定条件：负载电阻‘远小于’电源内阻。”

我：“这 $0.5\mu A$ 的电流够干嘛的？这有什么意思呢？”

师：“我们现在把电源的内阻变成一个‘可调电阻’，再来看看这个电源能有什么特性。收这个图。（figure0101）”



师：“如果负载电阻 $R_L$ 变小，负载变重，这时电源实际输出电压会降低。如果我们把可变内阻 $r$ 也调小，那么电源实际输出电压就会保持不变。”

我：“如果 $R_L$ 变大，那么内阻 $r$ 也可以调大，一样保持实际输出电压不变？”

师：“是的。这个电源就是‘稳压电源’，或者称‘恒压源’。我们以后会接触到‘稳压电源’。”

注意实际的“稳压电源”不仅是在负载 $R_L$ 变化时可以稳定输出电压，在电源 $E$ 升高或降低时也可以保持输出电压不变。

我：“看来还应该有个‘稳流电源’啊？‘恒流源’？”

师：“我们刚说的那个 $5V+10M$ 内阻的电源就是一个‘恒流源’啊？”

这里大家可记下一个粗略的结论：当我们遇到一个‘恒流源’（或者‘电流源’）时，一般认为它有高内阻。

我：“那个算是近似的恒流吧？ $R_L$ 变小时把内阻调大，保持总电阻不变，那样电流才是恒定的。”

我：“你说的‘稳压电源’是不是用一个稳压二极管就可以做？这和内阻有什么关系？”

师：“稳压二极管可以做，我们以后再说。下面要讨论一下‘电压源’输出的能量如何才能最大限度的供给负载，让内阻浪费的能量最小。”

我：“这还讨论？负载电阻值越大越好啊？越大的话它两端获得的电压就越高。”

师：“我在说‘能量’，不是单纯的电压，还要考虑电流。先别打岔！”

师：“还是看这个图（figure0101）。负载 $R_L$ 两端的电压怎么算？”

我：“这太小儿科了。 $U_L=E \times R_L / (R_L+r)$ 。没错吧？”

师：“我这样给你计算一下吧。”

师：“流过 $R_L$ 的电流， $I_L=E / (R_L+r)$ 。所以 $R_L$ 获得的能量可以用 $P_L=U_L \times I_L=E^2 \times R_L / (R_L+r)^2$ 来表达。我们想知道 $P_L$ 在什么情况下能取到最大值？”

师：“这之后的内容就不是电学了，而是数学。因为 $E^2$ 是个常数，所以当 $R_L / (R_L+r)^2$ 取最大值时 $P_L$ 就是最大值。”

师：“ $R_L / (R_L+r)^2$ 可以改写成 $1 / ((R_L+r)^2 / R_L)$ ，所以当分母 $((R_L+r)^2 / R_L)$ 取最小值时这个分式取最大值。”

师：“ $(R_L+r)^2$ 可以展开成 $R_L^2+2rR_L+r^2$ ，进一步改写成 $R_L^2-2rR_L+r^2+4rR_L$ ，再整理成 $(R_L-r)^2+4rR_L$ ，这样分母 $((R_L+r)^2 / R_L)$ 就变成 $(R_L-r)^2 / R_L+4r$ 。”

师：“好了， $4r$ 又是常数，所以 $(R_L-r)^2 / R_L$ 取最小值时分母最小。 $(R_L-r)^2 / R_L$ 的最小值只能是0了。所以 $(R_L-r)^2=0$ ，所以 $R_L=r$ 。”

师：“结论就是当负载电阻 $R_L$ 和电源内阻 $r$ 相等时，负载上能获得最多的能量。该能量可表达为 $P_L=E^2 \times R_L / (R_L+R_L)^2=E^2 / 4R_L$ 。”

我：“不是吧？当 $R_L=r$ 时理想电压源 $E$ 提供的总能量可是 $E^2 / 2R_L$ ，负载只拿到一半，另一半耗在内阻上？”

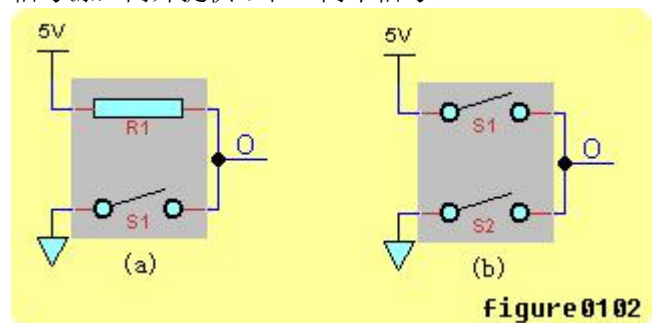
方程式写得比较乱，大家只要记住“ $R_L=r$ ”即负载电阻等于电源内阻时负载可获得最大能量这个结论就可以了。

我：“这也太夸张了，内阻总是存在的，所以这些发电厂水电站发出的电能最多也有一半送到我们家了？”

师：“这就是现实。你对‘内阻’更没有好感了吧？我也很烦这个东西。”

我：“在 $R_L=r$ 这种情况下负载两端的电压也只有 $E$ 的一半了。”

师：“对啊，实际上电源有内阻，‘信号源’也有内阻。这个图（figure0102）的灰色框实际上代表一个信号源，向外提供0和1两个信号。”



我：“（a）图向外输出1的时候内阻就是上拉电阻的值对吗？”

师：“它输出1时内阻‘在数值上’等于上拉电阻的值。输出0时内阻‘在数值上’为0。”

我：“因为开关把输出端和GND短路了，所以内阻为0？这样看（b）图上下两个开关的电路很有好处啊？”

师：“对啊。（b）图的电路无论输出0还是1内阻

都很小而且相等，(a)图这种开关加上拉电阻的电路就不是这样，它输出0和输出1时内阻差异很大。”

我：“内阻有点变化也没什么问题吧？只要后面电路的输入电阻足够高，就不会影响0和1的表达。”

师：“这个问题以后我们讨论‘电容器’的时候再说。今天的内容就只有这么多了。”

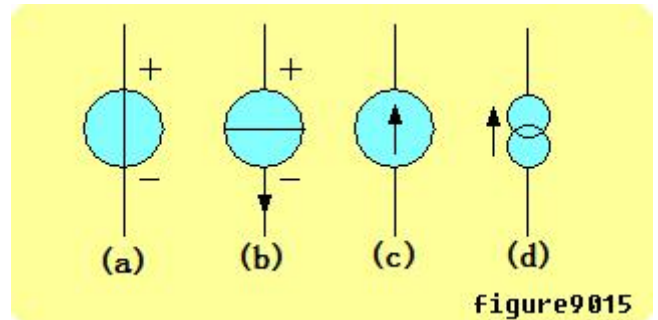
我：“OK，我自己再琢磨琢磨今天讨论的内容。”

师：“再见，晚安。”

除了“理想电压源”之外还有没有“理想电流源”呢？应该是有，这种理想电流源内阻应该是“无穷大”的吧？可如果是这样，这电流就是无法通过它的，那这电路中怎么还会有电流呢？整个环路在电流源这里“断路”了啊？难不成电流又不能流成一个环路？

放狗搜了下“理想电流源”，看到有人跟我有同样的疑问。翻看了几个页面，我感觉这个电流源的特色是“确保流过一个恒定的电流”，电流可以从电流源中流过，但电流的大小受到电流源的限制，只能是一个固定的取值。或者说当我试图取得一个更大的电流时，这个电流源会偷偷摸摸地升高它的内阻，限制流过它的电流就只有那么大。

我感觉，这个“电流源”在电路中不是当成电源用，应该把它看做一个“限流元件”比较好一点。这个电流源的原理图符号也是满有特色的，figure9015中包括了网上搜来的图符，(a)是电压源符号，(b)到(d)是电流源的符号，可见表示电源的圆圈中有一道横线截断了线路，这大约是暗示“高内阻”吧？电流源的符号上都带一个箭头指出电流的方向，然而(b)图中还带了表示极性的正负号，这个电源极性和电流方向好象反了吧？另两个符号上只带了箭头没有极性，搞不明白是怎么回事。



而关于负载上如何获得最多的能量这个问题，我还是有一些困惑，因为一直以来我们都是在强调“后级电路的输入电阻越大越好”。当然这说法是有前提的，我们的目的一直是为获得尽可能高的输入电压，在此目的之下我们需要高输入电阻。现在着眼点变成了“能量”，于是负载电阻与电源的内阻就必须相等了，这要不等会有什么什么问题吗？主要的问题当然是负载得不到最多的能量，还有别的问题吗？如果负载电阻小于电源的内阻呢？这时不仅负载上得不到最大的能量，而且电源的内阻上还要发热，这恐怕有风险。那么负载电阻大于电源的内阻又会怎样？这应该没有什么发热的风险了，但这似乎是浪费了电源的“能力”吧？

对于图中的 (figure0102-a)，C# 说过“输出1时内阻在数值上等于上拉电阻的值。输出0时内阻在数值上为0。”我不理解为何要强调“在数值上”等于，在我看来输出1时内阻就是上拉电阻啊？难道还掺乎着别的？

## 2005-05-24: 戴维南定理

如果不是叔叔打电话过来，我还真不知道 C# 对“二极管并联”所做的结论是存在问题的。这也算是机缘巧合，叔叔打电话过来时恰好老爸老妈出去散步，所以这电话我接了起来。

我：“喂，找谁啊？”

叔：“你有来电显示还问我找谁，你爸呢？”

我：“出去了。你打他手机。再见。”

叔：“你等会儿！急什么呢？最近学得怎么样？”

我：“再见。”

叔：“我问你电子学得怎么样了！怎么老烦呢？”

我：“我们二极管学完了，现在是欧姆定律。”

叔：“二极管都学完了怎么还欧姆定律呢？”

我：“师傅就是这么排的课啊。”

叔：“怎么是先学二极管啊？电容学了么？”

我：“电容？好像听人说过。啥是电容啊？”

叔：“二极管都研究什么了？LED 是不是研究了一下？”

我：“你怎么会想到 LED 呢？我们刚学完这个。”

叔：“这个能发光，多少有点意思。除了 LED 还有什么别的？”

我：“PN 结原理，然后是 1N4148，然后稳压管，箝位，还有串联并联，等等吧。”

叔：“怎么这也串联并联呢？又不是电阻，怎么并联啊？”

我：“两个管子阴极接一起阳极接一起，当一个用。这不是并联吗？”

叔：“就这个啊？这不是为了通过更大的电流吗？现在很少这么用了。”

我：“你怎么也犯这种错误啊？你不应该啊？都老手了？”

叔：“我怎么错啦？错哪儿啦我？”

我：“两个管子正向导通电压不一样大，小的那个管子一导通大的就通不了啦，被箝位啦，你的明白？”

叔：“我的不明白！还真没想到这块儿，这家伙你行啊现在，能鄙视我了都？”

我：“哈哈爽！我再考你一个，LED 数码管用过没？你接几个限流电阻？”

叔：“8 个啊，每段一个。你想在公共端接一个电阻是吧？”

我：“你怎么又猜到了？你肯定干过这个吧？偷工减料！”

叔：“哈哈，这么干不大好，数码管亮度不匀。”

我：“啥不匀啊，只可能有一段 LED 亮，就是导通电压最低的那一段亮，其它都不亮。”

叔：“我说这都是 C# 教你的？不应该啊？”

我：“怎么了？什么不应该啊？这有问题吗？”

叔：“我还有事，你爸回来让他打我手机，我挂了啊。”

我：“别挂！还没说完呢！数码管有什么问题吗？”

叔：“我这是长途，一两句说不清楚，我明天有快件发给你爸，顺便把我手头不用的元器件给你发过去一些，自己试试就知道了。”

我：“你就现在说说不行吗？我老得惦记着这事。”

叔：“好啦有电话来了，我先挂啦。让你爸打我手机，啊！”

我真是搞不明白以他的经济实力怎么会这么在意这点长途电话费呢？想来还是懒得跟我多说。没想到 C# 这家伙的课程中竟然有错的内容，他跟俺叔相比不能说略高一畴，也应该是不相上下吧？怎么会这样呢？

我：“你可算来了，正急着找你呢！”

师：“你那些 MM 朋友又都不在线？”

我：“说正经的，你所说的‘二极管并联’的那些内容不对，被否了！”

师：“都不对？全都被否了？”

我：“两个管子并联，只有导通电压低的那个能通，另一个不通，这个说法不对！”

师：“这个？谁告诉你这个说法有问题的？”

我：“我根据你这个说法自己想了下数码管的限流电阻，我认为公共端串一个限流电阻可能导致 8 个段中只有一段亮。”

师：“对，是这个道理，需要接 8 个限流电阻，每段一个。”

我：“啥道理啊？我叔说公共端接一个也行，不致于只有一段能亮，只是亮度不均。”

师：“他怎么给你解释的？我没这么用过。”

我：“没给解释，说要给我递过来一些元件让我自己试验。”

师：“嗯，我手边没有数码管，你把试验结果给我说一声，我还真没这么搞过。”

我：“你怎么会没试过呢？你没想过 8 个电阻太多了点吗？只用一个多好？”

师：“想过。我最早是照猫画虎，看人家用 8 个我也用 8 个，也想过在公共端接一个比较省。”

师：“不过我后来对这个东西的分析跟你一样，我认为只能有一段管子导通，所以也就没试验。”

我：“这么说两个普通二极管并联能通过更大的正向电流你也没试验过，就直接否定了？”

师：“是的，这确实是我不够严谨。我向你道歉，并且郑重向你声明一下我关于二极管并联使用的结论因为缺乏实验支持可能存在缺陷。”

我：“哈哈，你这个老师还挺逗的。等我试验一下再说吧。”

师：“这不叫逗，科学研究是应该严谨，我们有点太粗糙了。现在得赶紧开始今天的内容，收图。（figure0103）”



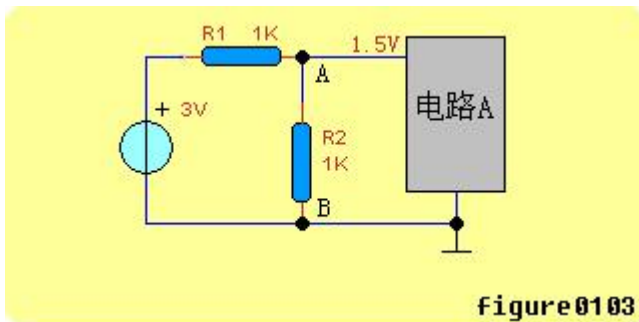


figure0103

我：“又是俩电阻串联，我都快烦死了！”

师：“你猜我发的这个图隐含着一些什么想法在里面？”

我：“右侧的‘电路A’需要1.5V电源，你打算用俩电阻从3V电源中分出1.5V给这个电路用对不对？我告诉你这肯定不行！”

师：“你已经知道这样做不行啦？”

我：“这样做真的不行啊？我知道你就爱在这些小电路中下套，就蒙了一下，又蒙对了。”

师：“你个瞎猫！你倒分析分析怎么不行啊？”

右边这个“电路A”只是个框，不具体，那么我想在里面画上个灯泡应该没问题，或者干脆画上一个电阻  $R_L$ 。很显然，(figure0104) 这个  $R_L$  接在 A 和 B 两端后，和  $R_2$  构成了并联，总电阻必然小于  $R_2$  的。它们再和  $R_1$  串联分压，肯定分不到 1.5V。

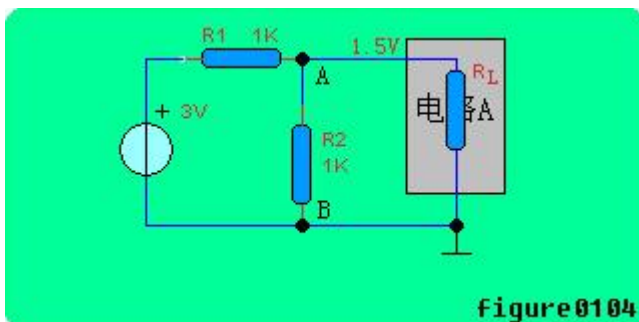


figure0104

我：“右侧的那个方框可以接一个‘负载电阻’，它接在 AB 端实质是与  $R_2$  并联，再与  $R_1$  串联分压，当然是分不到 1.5V 的。”

师：“那么这个接在 AB 之间的‘负载电阻’如果阻值非常的大呢？”

我：“如果负载电阻  $R_L$  远大于  $R_2$ ，则可以认为对  $R_2$  没影响。”

师：“行！你小子这回总算是长了心眼儿了，还想到了‘负载电阻远大于  $R_2$ ’。”

我：“呵呵，我这都是你给磨练出来的。”

师：“我们把‘负载电阻’具体化，就在 AB 端接一个 1K 的负载电阻  $R_L$ ，现在你算下这个 1K 电阻实际获得了多高的电压？”

我：“1V 好吗？咱别在算这个了，我实在不想当小学生了！”

师：“现在我假定你就是这 1K 的负载电阻  $R_L$ ，你脑瓜顶出引一根线接 A 点，脚丫子出一根线接 B 点，我且问你当你把目光投向电源时，你看到了什么？”

我：“好大的棉花糖啊！”

师：“别打岔行吗？说正经的！”

我：“我看见  $R_2$  和  $R_1$  串在一起接在 3V 的电源上。”

师：“不，你看不到这些细节。你只看到一股电流从 A 点流向你的脑瓜顶。”

我：“噢！原来是悟空！我还以为是片雨云。”

师：“这股电流如‘提壶灌顶’般倾泻而下，穿过你的身体，从你的脚丫子奔流而出，涌向 B 点。”

我：“不会是开水吧？我有点热！”

师：“你当然知道，电流总是流成一个环路的，那一股电流肯定会从 B 点回到 A 点，然后再度灌向你的脑瓜顶。”

我：“又来了，到底是不是开水啊？怎么那么热啊？”

师：“突然间，你像被开水烫了一般嚎叫起来：‘为什么？为什么我只获得了 1V 电压？电流啊，你从 B 点流到 A 点究竟遇到了多大的内阻啊？’”

我：“我的显示器全湿了，刚喝的一口水。你拿我搞什么搞啊？”

师：“谁让你总念叨开水开水来着？现在算一下给你供电的这个 1.5V 电源内阻有多大？”

毫无疑问任何非理想的电压源都是有内阻的，这个由两个串联电阻分出来的 1.5V，如果看做是一个电源的话也不会例外。当我这个 1K 的负载没接到 AB 两端时，它输出 1.5V 电压，当我接到了 AB 两端时，它输出的电压就只有 1V 了，这意味着有 0.5V 电压降落在它的内阻上。如果能知道流过内阻的电流则可以算出内阻。这个电流应该就是从我身体里流过的那个电流，是  $1V/1K=1mA$ 。则内阻  $r=0.5V/1mA=500$  欧姆。

我：“这个内阻够大的，有 500 欧姆。”

师：“非常好！所以这个 3V 电源加俩电阻分压最终等效成一个内阻 500 欧电压 1.5V 的电源。如这个图 (figure0105) 所画。”

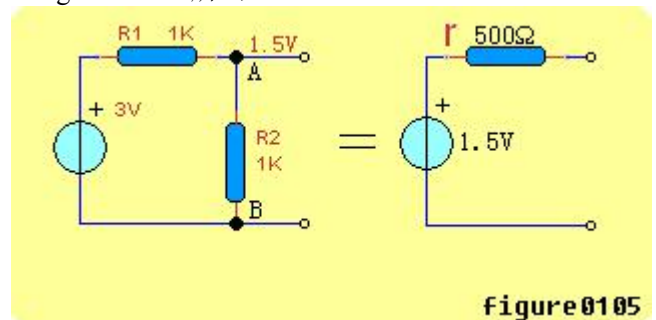


figure0105

我：“我觉得很别扭。内阻为什么不是  $R_1$  呢？电流是经过  $R_1$  流向我的啊？”

师：“如果你看到了 3V 的电源在为你供电，那它的内阻就是  $R_1$ 。而此时  $R_2$  和你的地位一样，也是负载电阻了。”

我：“那么我可不可以认为  $R_2$  就是 AB 两点间的内阻？电流从 B 到 A 应该是流过它的啊？”

我：“怎么看也出不来 500 欧的内阻啊？为何不是 1K 呢？”

师：“这是个重点。我们上回说过了，理想电压源对于电流的流动而言是‘短路’的。”

我：“你是说那个 3V 的电源是短路的？”

师：“对。电流从 B 向 A 回流时，一半经 R2 到 A 点，另一半穿过 3V 电源经 R1 到 A 点。”

我：“怎么会这样呢？我的世界观都快被你颠覆了！”

师：“你还真得重新认识周围的世界。当 3V 电源被视为短路后，R1 与 R2 就并联在一起了，总电阻是 500 欧，这就是内阻。”

我：“到底是串联还是并联啊？完全晕菜了！”

师：“等会儿再晕。我们今天讨论的内容，蕴涵着一个重要的电路定理——戴维南定理。”

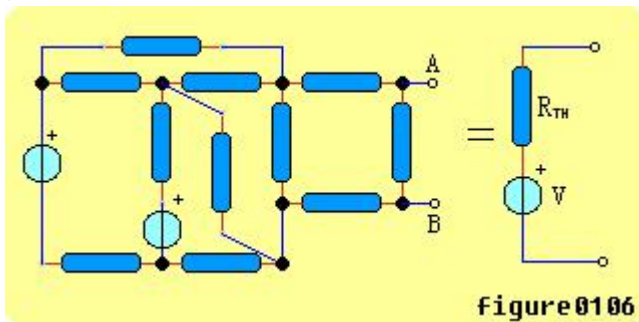
“戴维南”是个人名，也经常译做“戴维宁”。全名为“莱昂·夏尔·戴维南”，一位法国的电信工程师。

我：“目前为止只听说过‘欧姆’，‘戴维南’是谁？男的女的？”

师：“连‘库仑’你都忘了。戴维南定理指出任何一个具有电阻和电压源的‘一端口网络’可以等效成一个电压源 V 和一个电阻  $R_{TH}$  的串联电路。”

我：“这都什么乱七八糟的？‘一端口网络’是什么东东？”

师：“收个图吧（figure0106），看这个图能清楚一点。”



我：“看这个图还能清楚一点？我怎么越看越晕啊？我现在可以晕菜了吗？”

师：“这个图的意思是不论一个电路中有多少电阻和电源，也不论它们之间都怎么连接的，它总能等效成一个电压源 V 串一个电阻  $R_{TH}$ 。”

我：“等号左边这就是‘一端口网络’？那右边这个图里的电阻  $R_{TH}$  怎么计算啊？”

“一端口网络”有时也称“二端网络”，注意不是“二端口”，“端（terminal）”与“端口（port）”并不一样。至于这个“网络”，理解为各元件之间的连接即可。

师：“不是刚讨论过吗？把左边图中的电压源都变成一根导线然后计算那一堆电阻混联啊？”

我：“这也太麻烦了吧？这么多电阻？”

师：“正因为这个图麻烦所以我只拿俩电阻给你说这事啊？还有一种类似实验的计算法。”

师：“AB 两点间可以测量出一个电压值来，当然在 AB 之间什么都不接的情况下测量，这个叫‘开路电压’。”

师：“然后把 AB 两点直接短路，可以测量出这根短路线上流过多大电流。这个叫‘短路电流’。”

师：“开路电压就是等效后的 V，这个 V 除以短路电流就是电阻  $R_{TH}$  的值。”

我：“这个好像简单一点，等我拿那俩电阻的电路

试试。”

对于图（figure0104）来说，“开路电压”当然是把  $R_L$  切断的，那么自然是 R1 和 R2 串联后 R2 上分到的电压，这应该是 1.5V。然后把 AB 两点短路，这相当于 R1 直接并在 3V 电源上，电流是 3mA。这样内阻  $r=1.5V/3mA=500$  欧。

我：“这个‘开路电压’除以‘短路电流’没问题了。下面还有什么内容？”

师：“与戴维南定理相对应的，还有个诺顿定理，这是针对‘电流源’的。”

我：“那个算了，先不学了，这个戴维南就够乱的了，再弄个电流源进来。”

师：“那好吧，我们下面来研究一下怎么样分出一个内阻小一些的 1.5V 电源来。”

我：“既然内阻是 R1 和 R2 并联，那么把它们减小内阻自然也小了。”

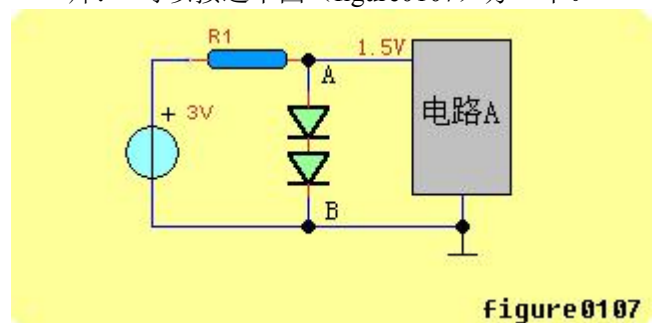
师：“没错。但是这俩电阻越小它们就越费电啊？你用俩 1 欧的电阻算算，不接负载的情况下单这俩电阻就耗多少电？”

我：“电流有 1.5A 了，是挺费的。那用一稳压管代替 R2 应该可以吧？”

师：“对了！是这个思路。不过从上回给你的 PDF 中你能查到稳压值是 1.5V 的稳压管吗？”

我：“从 3.3V 开始的。没有 1.5V 的可怎么办呢？”

师：“可以按这个图（figure0107）办一下。”



我：“这也可行啊？这不是 1.4V 吗？”

师：“调整 R1 的阻值，让合适的电流流过两个二极管，能得到 1.5V。”

我：“要这么说我用个红色的 LED 代替两个二极管也行啊？还是个指示灯呢。”

师：“是啊。如果正向压降在 1.5V 左右的 LED 也可以用。”

师：“这种电路的好处在于二极管正向导通后电阻变得很低，再和 R1 并联形成的内阻就更低。”

此说法不够准确，后面继续讨论。

我：“等等，我算一下试试。”

还是让 R1 等于 1K，这样俩二极管流过 1.5mA 正向电流，两管总压降不够 1.5V 了，就当是 1.5V 吧。这是开路电压。短路电流呢？把俩二极管短路，电流是  $3V/1K=3mA$ 。内阻是  $1.5V/3mA=500$  欧？不是吧？

我：“有问题啊！我用开路电压除以短路电流算内阻，还是 500 欧啊？”

我：“我让  $R_1$  还是等于  $1K$  不变。”

师：“所以我们今天要对‘二极管’做些深入的讨论。戴维南定理不能适用这种电路。”

我：“又不能用啦？你刚说二极管的电阻和  $R_1$  并联是内阻啊？”

师：“内阻的形成仍然是那样的，但是‘开路电压除以短路电流’这个计算方法是不可以用的！”

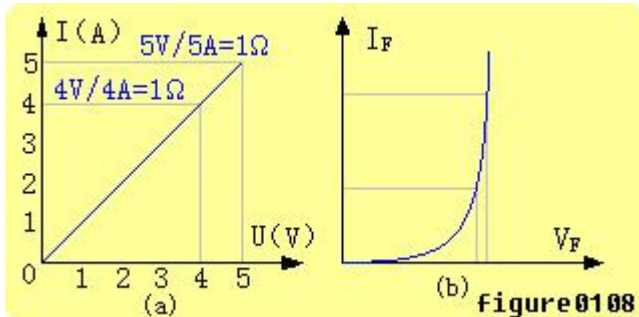
师：“因为戴维南定理要求‘一端口网络’之中必须都是‘电阻’。”

上述说法有些问题，后面有补充。

我：“二极管不是电阻？”

师：“它当然不是电阻，它是二极管啊！收这个图看看。（figure0108）”

师：“这个图左边（a）图是电阻，右边（b）图是二极管。横轴是‘电压’纵轴是‘电流’。这个图反应两种元件的‘伏-安’特性。找区别。”



我：“电阻上电流随电压变化是条直线，二极管是弯的？”

师：“什么叫二极管是弯的？电阻是一种‘线性’元件，而二极管是‘非线性’的。”

我：“直的叫‘线性’，弯的叫‘非线性’？”

有一种观点是“经过坐标原点”的直线特性才叫线性。

师：“进一步说一个真实的电阻它的阻值不随加电情况改变。你在直线上任取一点，用这点的 X 坐标除以 Y 坐标，得出的电阻  $R$  都是一样的。”

我：“不论给它加上多高电压，变化的只有电流，它自己的电阻值并不变？”

师：“电阻是这样，但二极管不是这样。你在（b）图的‘伏-安特性曲线上找俩点，它们的 X 坐标除以 Y 坐标肯定有不同的结果。”

我：“然而电压除以电流就应该是电阻啊？欧姆定律吗？”

师：“把‘欧姆定律’换成‘电阻的定义’比较好一点。”

我：“差不多吧？为啥？”

师：“对二极管而言正向电压除以正向电流得出的结果，可以和电阻使用同样的单位——欧姆。这也可以叫做二极管的‘直流电阻’，但一定要知道它是非线性的。”

我：“这种非线性导致戴维南定理没法应用？那也就是说那个‘一端口’网络中都必须都是线性的元件？”

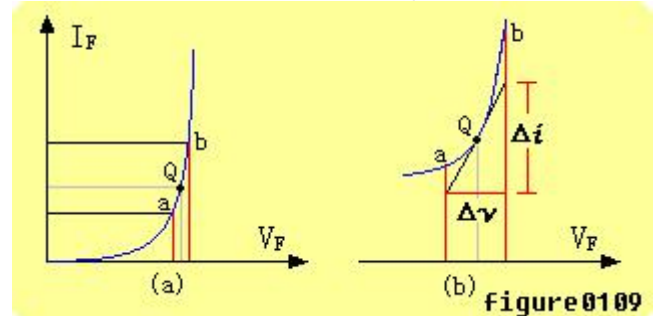
所以“一端口网络”中不是必须只有电阻。

师：“是啊，所以二极管其实是个很麻烦的东东，

我们需要换一种视角来看待它。为二极管引入了一个‘动态电阻’的概念。”

我：“完全晕死！”

师：“其实也没什么特别麻烦之处，就是多做一些前提条件的限制。看这个图。（figure0109）”



师：“（a）图的意思，是我在二极管正向伏安特性曲线上取一点  $Q$ ，然后我限制二极管正向电压在两条红色竖线之间允许做微小的变化。”

我：“对应电流在 Y 轴上也只在一个范围内变化了？”

师：“对啊。（b）图是局部放大，过  $Q$  点我画了一条曲线的切线，就是那条黑色斜直线。这条切线和它右下方的红线组成了一个直角三角形。”

师：“两条直角边分别是  $\Delta v$  和  $\Delta i$ ，这个  $\Delta v$  是个电压值， $\Delta i$  是电流值，我现在计算  $\Delta v / \Delta i$ ，这又得出一个以欧姆为单位的的结果。这个结果，就是二极管在  $Q$  点的‘动态电阻’。”

“动态电阻”也称为“微分电阻”，学到微积分课程的时候你就会明白“切线”、“求导”之类的含义。“动态电阻”还被称为“微变等效电阻”，“微变”你大可以理解为“微小的变化”。

我：“ $Q$  点选的位置不同，这个动态电阻也不一样大吧？”

师：“是不一样，但如果我们只看从  $a$  点到  $b$  点这个小区间，那根切线代替曲线，就有了‘线性’。”

我：“那就是在这样的小范围内，即使是非线性的二极管，也可以用戴维南定理了？”

师：“不单是戴维南定理，很多电路定理都可以使用了，这就允许我们用数学方法分析电路。”

我：“可是用切线代替曲线有误差吧？”

师：“没错，这个误差最终会体现在信号上，信号会‘走形’，这叫做信号‘失真’。”

我：“这么小的区间有啥意思呢？怎样算是 0？怎么又算是 1？”

师：“这已经无关 0 和 1 了。其实我们架起一座天线，接收到来自宇宙空间的无线电信号，那信号真的就是在一个很小区间内变化的。”

我：“那个所谓的‘小信号’指得就是这个  $\Delta v$  吧？”

师：“差不多吧。所以‘小信号’是一种观念，强调‘小信号’目的是把非线性近似成线性。”

这里对“小信号”的解释仍不够完善，尚有很多值得探讨的内容。



我：“那这小信号到底是多大电压范围啊？”

师：“你对那个误差如何要求呢？你能接受多大的误差？”

我：“这么说 $\Delta V$  范围没有一定之规？”

师：“对，你对‘失真’要求不一样，那个 $\Delta V$  的范围也就不一样，具体问题要具体分析。”

师：“实际上二极管的反向伏安特性曲线和正向是一样对待的，反向接电时也存在‘动态电阻’。”

我：“那我就能理解稳压二极管了。”

师：“那你给我说说看？”

我：“我如果用 5.1V 的稳压管做一个电源给负载  $R_L$  供电，应该是这个图对不对？（figure0110）”

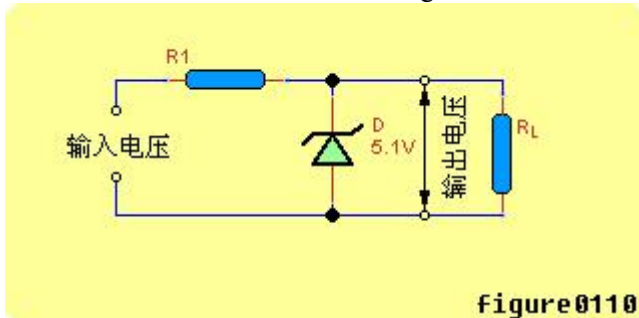


figure0110

师：“对，电阻  $R_1$  做什么用？”

我：“限制流过  $D$  的电流，因为  $D$  是反向击穿的。”

我：“实际上  $D$  两端的电压不会是定死在 5.1V 上，应该会围绕着 5.1V 有小范围变化。”

师：“为何会有变化？”

我：“我想负载  $R_L$  如果变小，则流过  $R_L$  的电流就会变大， $R_1$  上应该多降落电压， $D$  上的电压自然会变。”

师：“这么说可以啊，那你认为这个 5.1V 的电源要怎么搞才能有最好的性能？”

我：“让  $D$  的‘动态电阻’最小，这样它和  $R_1$  并联形成的电源内阻是最小的。”

师：“有这句就行了。我给你的那个稳压管的 PDF 资料还有吧？打开瞧瞧。”

我：“打开了。这个动态电阻在哪儿？”

师：“看表格中的  $Z_{ZT}$  和  $I_{ZT}$ ，这个  $Z_{ZT}$  就是动态电阻。”

Nominal Zener voltage <sup>(3)</sup> at $I_{ZT}$ $V_Z$ V	Test current $I_{ZT}$ mA	Maximum Zener impedance	
		$Z_{ZT}$ at $I_{ZT}$ $\Omega$	$Z_{ZK}$ $\Omega$
3.3	76	10	400
3.6	69	10	400
3.9	64	9	400
4.3	58	9	400

我：“看表头  $Z_{ZT}$  和  $I_{ZT}$  之间有个‘at’，这表示什么？”

师：“ $Z_{ZT}$  是稳压管处在‘最佳工作状态’时呈现出的动态电阻，而  $I_{ZT}$  就是这个‘最佳工作状态’。”

我：“就是说如果我用 1N4733 做 5.1V 的稳压电源，需要让 49mA 电流流过稳压管才行？”

1N4733 的参数不在所给的图中，请参考 Datasheet 文件中的“Electrical Characteristics”表。

师：“对了，就是这个意思。这时稳压管呈现出最小的动态电阻，7.0  $\Omega$ ，这个稳压源也就有最好的效果。”

我：“那右边的  $Z_{ZK}$  怎么又说稳压管呈现出 550 欧的动态电阻呢？”

师：“这也有对应的电流啊？右边还有‘at  $I_{ZK}$ ’呢。”

“at  $I_{ZK}$ ”一栏不在所给的图中，请参考 Datasheet 文件中的“Electrical Characteristics”表。

我：“那就是稳压管流过 1mA 电流时，动态电阻是 550 欧？”

师：“对，K 就是‘Knee’的首字母，表示‘膝点’，就是稳压管刚刚击穿的那一点。（figure0111）”

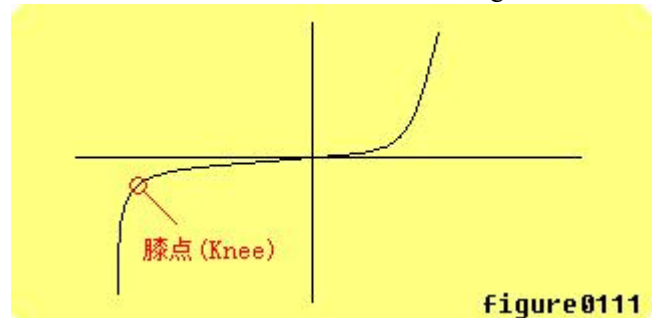


figure0111

我：“这倒是很像，反向伏安特性曲线如同我的腿坐在椅子上膝盖弯曲的样子。”

师：“所以用稳压管做一个电源，单是让它击穿还不够，还得给它灌进充足的电流才行，达到  $I_{ZT}$  那么大，否则效果很差的。”

我：“又是个白费的东东。 $V_Z$  那个指标也是‘at  $I_{ZT}$ ’的啊？”

师：“这就顾不上它费不费电了。呵呵。”

师：“好了，今天内容结束了。别忘了弄那个数码管的实验。”

我：“又要闪啦？再见吧，剩下的我自己来。”

以前说过所谓“二极管串联”，今天又见识到了，俩二极管一串还能当 1.5V 的稳压管用，我查了 1N4728-4764.pdf，那里面的稳压管是从 3.3V 起步的，看来想获得 1.5V 的电压，似乎只能用俩二极管啊？可是这俩二极管正向流过多少电流它的“动态电阻”最小呢？我查了 1N4148.PDF，找不出正向导通时的动态电阻与正向电流之间的关系。

不过我可以想到这个正向电流不会很大，因为二极管的正向电压降与正向电流有关系，电流太大正向电压降可以大到 1V 的。这样来看计算图（figure0107）中电阻  $R_1$  的取值时倒不必去考虑动态电阻了，而是要考虑让每个二极管的正向电压降达到 0.75V。这可以凑出 1.5V 的输出电压，至于此时二极管的动态电阻有多大，还

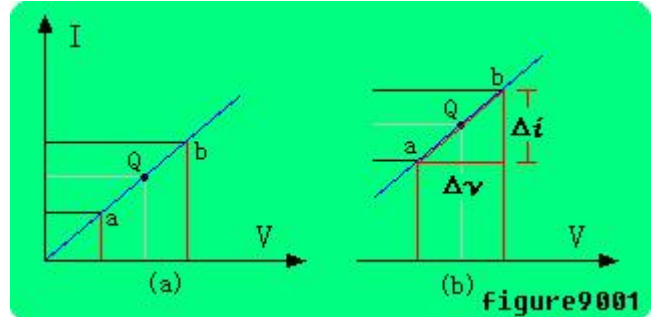
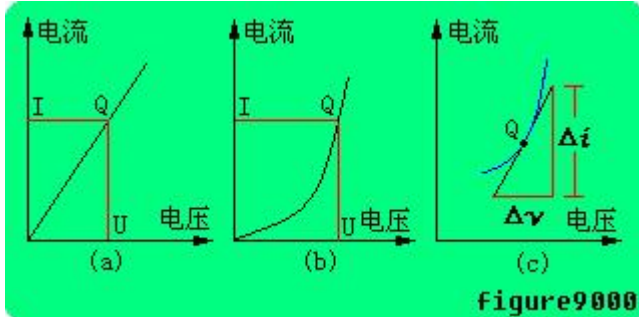


是听天由命吧，应该不会很大的吧？那么，这个二极管的正向电压降为何会随着正向电流的增大而变大呢？二极管里，难道也有一个真实的电阻吗？

我有一种感觉，让稳压管工作在动态电阻最小的状态，是一件挺烦人的事。我不是说电路有多复杂，那电路并不复杂嘛，我是想那样一个电流流过稳压管，它不发热吗？发热是一定的，而且这个热完全是浪费掉了，这电流并不经过负载啊。由此看来这个电流还是小一点比较好，但电流小了稳压管又不能工作在最佳状态上了，问题是，稳压管就必须要在最佳状态上吗？对于图（figure0110）来说，如果负载电阻  $R_L$  是  $10M\Omega$  呢？那还有必要要求稳压管的动态电阻必须最小吗？一切，还得从实际需要出发吧？

## 本节补充说明

“动态电阻”是一个真真实实的“电阻”吗？说句实话有些东西真的是不便深究，至少在我们现在这个阶段不便深究，深究容易使人舍本逐末钻牛角尖，不过关于这个“动态电阻”还是可以多想一想的。如图（figure9000）所示，（a）图是真正的电阻，Q点的阻值由“ $U/I$ ”确定。（b）图其实和（a）图一样的，虽然不是直线，但Q点的电阻同样是由“ $U/I$ ”确定的，（c）图，就不是这样了。因此我认为，“动态电阻”和“电阻”其实不是一回事。



这就如同 100 元金币和 100 元纸钞的关系一样，虽然计量单位都是“元”但其本质并不一样。寻找冶炼黄金要付出大量的劳动，这金属中包含了人类的血汗，它本身是有价值的。但纸钞不是这样，它是因为我们嫌黄金太沉重而发明的一种数字符号，本质上它只有一张纸的价值。科学技术发展到今天，我们连那张纸都觉得沉重，所以我们倾向于在只在电脑系统中保留那个数字，不再把它印到纸上。所以有金融危机的时候大家都会留下黄金而放弃那张纸。

现在我们回到“动态电阻”这个问题上来，它如果和“电阻”不是一回事，那么它和“电阻”能“串联”或者“并联”吗？如图（figure0110）所示，我们能认为稳压管的“动态电阻”和“电阻  $R_1$ ”并联形成电源内阻吗？

一下子大脑就乱了哈？我们得想办法把“动态电阻”和“电阻”搞成一回事，现在“动态电阻”没法成为一个真实的“电阻”，那我们就反过来想这个事，一个真实的“电阻”，它也有“动态电阻”吗？它的“动态电阻”是多大？这就是图（figure9001）所示的，在一个真实电阻的“伏安”特性曲线上取一点 Q，限制信号电压仅在 ab 两点之间变化，然后考察这个电阻的动态电阻。

这就要过 Q 点做切线了，这根直线的“切线”是什么？好像就它自身对么？然后再计算“ $\Delta V/\Delta I$ ”，这么一折腾我们发现，这个真实电阻在 Q 点的“动态电阻”，就是它自己的“真实电阻”。好了，现在我们搞出来两个“动态电阻”了，它们，可以“并联”了吗？

## 2005-05-25: 叠加原理

匆匆吃过晚饭，顾不得和老爸老妈聊天，糙糙了了地做了作业，九点整准时上了网，心中居然有几分急切。C# 这家伙又是不在，难道这佳人还没搞掂吗？和 MSN 上的俩 MM 耍了一会儿贫嘴，C# 总算是上来了。

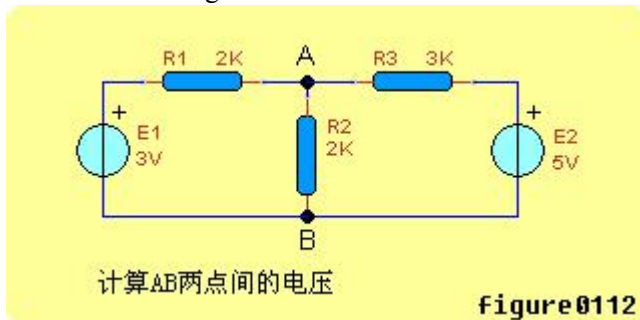
师：“怎么样？数码管的实验做了没？”

我：“东西还没有呢，怎么那么急？”

师：“我忘了，这才刚过一天是吧。”

我：“都忙晕了吧？”

师：“我们得开始新的内容了，你先收个图，说说你的想法吧。（figure0112）”



这是一个具有“两个电源”的电路，需要计算 AB 两点之间的电压。显然 B 点直接连接到两个电源的负极，那么以 B 点为“地”应该是可以的。而 A 点相对 B 点的电压，应该既受电源 E1 的影响，又受电源 E2 的影响，这个有点麻烦。

那么是否可以认为，A 点的电压，就是 R1 和 R3 对 E2-E1 之差的分压呢？感觉这如果没有 R2 的话应该是可以的。现在 R2 接在 A 点到参考点之间，相当于 A 点对“地”的“负载”，根据我们前面讨论的内容，这个“负载”电阻是要影响到 R1/R3 电阻分压器的输出电压的。

我：“我想把 B 点做‘参考点’行吗？”

师：“当然可以了。”

我：“这是一个‘一端口’网络对吗？”

师：“怎么又想到‘一端口’网络了呢？”

师：“A 端和 B 端好像还真是一个‘一端口’啊？”

我：“你不会是在讽刺我吧？我承认我是根据上次的讨论猜了一下。”

师：“不，这真可以看做一个‘一端口’网络，我倒没往这个方向上考虑。”

我：“这我就踏实了。这个电路 AB 点之间可以等效为一个电压源串联一个内阻，内阻是 R1/R2/R3 的并联。”

师：“很正确，但我们现在要算的是等效出来的电压源有多高，没有内阻的事。”

我：“我这是答非所问了啊？这个电压源应该同时受 E1 和 E2 的影响对吧？”

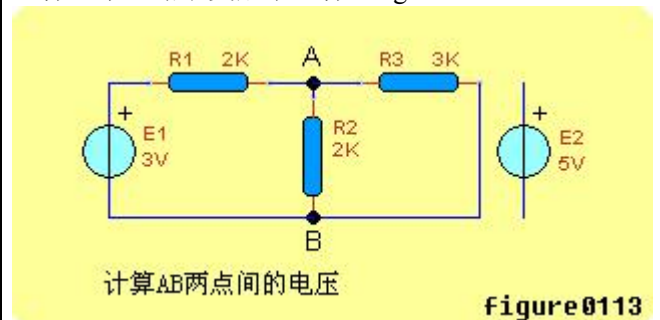
师：“对，这正是我们今天讨论的内容。”

师：“不过我现在倒是想先琢磨一下能不能使用戴维南定理算一算。”

我：“这回可是你跑题啦，不能怨我。”

有 C# 出手，咱就先不管啥戴维南定理啦。我想如果 E1 和 E2 对 AB 两点间的电压都有影响，那么我是否可以先计算 E1 对 AB 间电压的影响，再计算 E2 对 AB 点电压的影响，然后把两个结果相加呢？

如果这样的话，那么现在的问题就是当我计算 E1 对 AB 间电压的影响时，那个 E2 该如何处理？按我们前两天的讨论，E2 应该用一根导线直接短路，这样一来电路就变成了这样（figure0113）。



这是个简单的电阻混联电路，R2 和 R3 并联后电阻为 6/5K，和 2K 电阻 R1 串联分 3V 的 E1，可算出 E1 能使 AB 间电压达到 9/8V。同样计算 E2 对 AB 间电压的影响时，E1 应该用导线短路，R1 和 R2 并联后为 1K，与 3K 电阻串联分 5V 的 E2，可算出 E2 能使 AB 间电压达到 5/4V。这样 AB 间的实际电压为  $9/8 + 5/4 = 19/8V$ 。

我：“AB 间电压为 19/8V 对吗？”

师：“你这么快啊？对了，是 19/8V。我这儿还有点问题。”

我：“欧耶！爽啊！爽！！哈哈！”

师：“给你点儿阳光你就灿烂哈？”

师：“我这边也做完计算了，先说说你是怎么算的？”

我：“这个 EASY。先算 E1 对 A 点的贡献，这时要把 E2 短路。然后再算 E2 对 A 点贡献，这时要把 E1 短路。最后把两个贡献加一起。”

师：“完全的正确。这就是我们今天讨论的主题——叠加。”

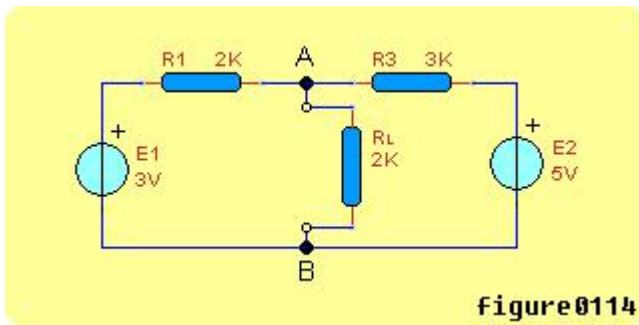
我：“我太强了是吧？这可是我独立思考出来的。”

师：“不过我现在想讨论一下‘戴维南定理’，先不管这‘叠加’了。”

我：“一遇上我的强项你就岔开话题。怎么又转到戴维南定理去了？”

师：“这用戴维南定理也可以计算的。”

师：“我把刚才的图整理了一下，你考虑这个图（figure0114），看看有什么心得？”



其实这个图和以前讨论的图 (figure0103) 是相似的, 由两个电阻  $R_1$  和  $R_3$  分压形成一个电源, 从 AB 两端输出电压, 为负载电阻  $R_L$  供电。当然, 这个图里两个电阻不是从一个电压源分出电压, 而是在分两个电压源的差值, 也就是在分  $2V$  ( $E_2 - E_1$ ) 的电压,  $R_1$  上分到  $4/5V$  的电压。

我: “你把  $R_2$  独立出去当负载了? 我们要考虑由  $E_1/E_2$  和  $R_1/R_3$  组成的 ‘一端口网络’ 的等效电路?”

师: “就是这个意思, 这比较简单一点。”

我: “我想被  $R_1/R_3$  分割的电压应该是  $E_2$  与  $E_1$  的差值, 也就是  $2V$ 。  $R_1$  上分到  $4/5V$  的电压。”

师: “但是负载电阻  $R_L$  跨接在  $E_1$  和  $R_1$  上, 它两端的电压是  $E_1$  与  $R_1$  两端电压之和, 也就是  $3V + 4/5V = 19/5V$ 。”

我: “不是, 只有  $R_L$  没接到 AB 两点之间时才有  $19/5V$ 。”

师: “我没说清楚,  $19/5V$  应该负载开路时 AB 两

点间电压。”

我: “分子的 19 有了, 下面看分母怎么出来 8 对不?”

师: “是的, 其实就是算出 ‘戴维南等效电路’ 中的内阻, 你来算下。”

我: “把  $E_1$  和  $E_2$  都短路, 内阻就是  $R_1$  与  $R_3$  并联的总电阻, 是  $6/5K$ 。这个  $6/5K$  与  $2K$  负载串联分压对吧?”

师: “当然对啦! 这还要问? 算出来吧。”

我: “串联总电阻  $16/5K$ , 其中  $2K$  的  $R_L$  占  $5/8$ , 所以  $R_L$  上分到的电压是  $19/5V \times 5/8 = 19/8V$ 。欧耶!”

师: “这验证了刚才你使用的 ‘叠加法’ 的计算结果。”

我: “我刚才用的那叫 ‘叠加法’? 不明白, 到底什么是 ‘叠加’?”

师: “这个 ‘叠加’ 我们以后再说吧。我得走了。”

我: “得! 又把我扣住了, 你不会学过说评书吧你?”

师: “你自己搜一下 ‘叠加原理’ 吧, 也不是什么很困难的东西。”

师: “我本来想用 ‘基尔霍夫’ 验证这个 ‘叠加法’ 的, 没想到 ‘戴维南’ 也行。”

我: “怎么这里边还有个俄国人啊? 这都什么跟什么啊?”

师: “人家是德国人好吧?”

师: “下回再说啦。我走了, 你自己想办法吧。”

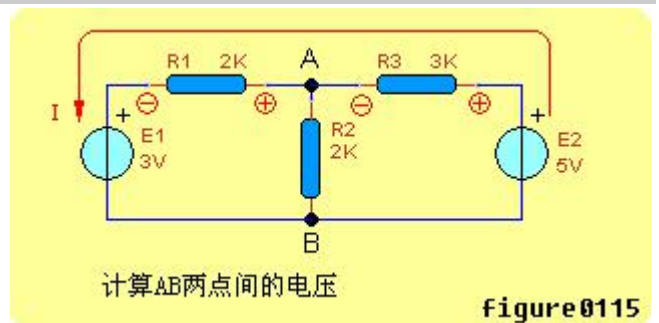
我: “好吧, 我在不理解之中加深理解吧。再见。”

很多事情不能细想, 细想起来容易绕进去出不来。你说一个电路之中为什么要有两个电源呢? 就像图 (figure0112) 中那样, 这个  $5V$  的电源, 会不会给那个  $3V$  的电源 “充电” 呢? 应该会的, 那  $3V$  的电源  $E_1$ , 会有电流流向  $5V$  的  $E_2$  吗? 我在计算  $E_1$  对 A 点的贡献时把  $E_2$  短路了啊? 我想不清楚这个问题, 还是先放一放吧, 先看电流从  $5V$  的电源流向  $3V$  这个情况, 这样在电阻  $R_1$  和  $R_3$  上的电压降就很清楚了 (figure0115)。不难看出如果从  $R_3$  和  $E_2$  这一侧来计算 A 点的开路电压, 应该是  $5V - 6/5V = 19/5V$ 。

网上搜了一下 “叠加原理”, 找到了这么一大段话: 在物理学与系统理论中, 叠加原理 (superposition principle), 也叫叠加性质 (superposition property), 说对任何线性系统 “在给定地点与时间, 由两个或多个刺激产生的合成反应是由每个刺激单独产生的反应之和。”

我只能对着屏幕苦笑, 这说得都是什么啊? “多个刺激” 指得是个啥? 算了, 不去咬这些文嚼这些字了。不过我还是从这文字之中发现了一些有意义的内容: “对任何线性系统”, 看到了没? 这不是随便什么元件都适用的, 像二极管这种东东就不能随便叠加, 想叠加, 恐怕就只能祭出 “小信号” 这面大旗来。

难道这半导体器件就没个 “线性” 的吗? 晶体三极管又会怎么样呢? 随手搜了一下 “三极管 线性”, 头一个页面就是讨论 “三极管非线性失真” 的。我想, 我还是放弃了吧。



计算AB两点间的电压

figure0115



## 2005-05-27：基尔霍夫定律

按照我家的惯例，家庭会议总是在晚饭桌上召开，今天由老妈组织了一次会议，内容居然与我的学业无关，而是——咱家该换一辆什么车？讨论的很热烈啊！老爸一向节俭，又懂机械，家里的那辆捷达虽然一直“私车公用”，为他的厂子跑业务，但一直保养的很好，很好开的，所以凭心而论老爸是不想再添新车的。但这次我站在老妈一边，尽管老爸平时对我比较宽松。

晚上 9 点，照例连上 MSN，难得这次 C# 提前到了，但这家伙竟然不理我。

我：“我来了，怎么连招呼都不打？”

师：“我在和佳人聊天，没顾上你。”

我：“不是吧？原来你是网恋啊？还挺赶时尚的。”

师：“我现在出差在外，不和老婆网聊难道打长途不成？话费你给报销？”

我：“你怎么出差了呢？才一天没聊给发配出去啦？”

师：“火烧眉毛的事情，只能我亲自顶上去。你搞掂‘叠加’啦？”

我：“火烧屁股吧？哈哈。‘叠加’还凑合吧，就算是清楚了。”

我：“你有车没有？我指四个轱辘的。”

师：“我开个二手夏利，两厢的那种。”

我：“不至于是吧？这么惨？又加班又出差还就只开得上二手车？”

师：“什么叫‘只’开得上二手车啊？没必要买新车啊。”

我：“看来我说什么也不能干专业电工这行了，还是业余点好。”

师：“这车是一个朋友换下来的，保养得不错，知根知底儿的。”

我：“感觉你和我爸属同一类人。”

师：“你问这个干嘛？”

我：“我们家打算添个新车了。现在这捷达准备专门当厂子的公车使。”

师：“好事啊。打算换大奔还是宝马？”

我：“老爸认为帕萨特就可以了，1.8T 的那种。那个‘T’什么意思？”

师：“Turbine，‘涡轮儿’的意思。就是带增压的，马力大一点。”

我：“老妈不同意，老妈想买个保时捷。哈哈。”

师：“挺有档次的嘛。为什么非要上高档？”

我：“因为人家虎子出来进去的坐一奥迪啊。呵呵。”

师：“就是你们家楼上那条狗？虎子家条件不错啊？”

我：“虎子爹是包工头儿，干建筑口儿的。人挺好的，很低调。”

师：“虎子妈很高调是吧？哈哈。”

我：“没错。要不怎么我老妈总惦记着保时捷呢。呵呵。”

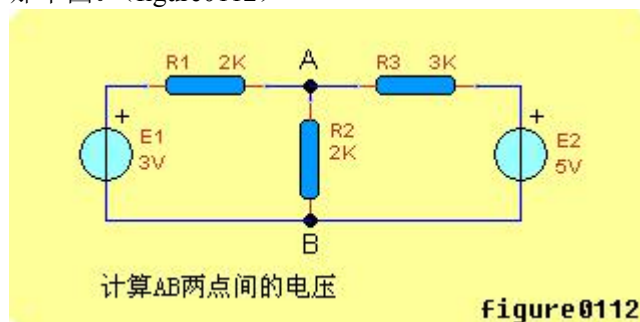
师：“女人爱斗富。要都是二奶的话，斗一斗富还情有可原，一把年纪的原配没必要斗。”

以上结论纯属本人臆测，请各位女生谅解。

我：“实话说，我也想买保时捷，没坐过这个。哈哈。”

师：“你比虎子还差点。”

师：“行了，不说闲话了，谈正事儿吧。还是上回那个图。（figure0112）”



我：“这回该说那俄罗斯人了是吗？”

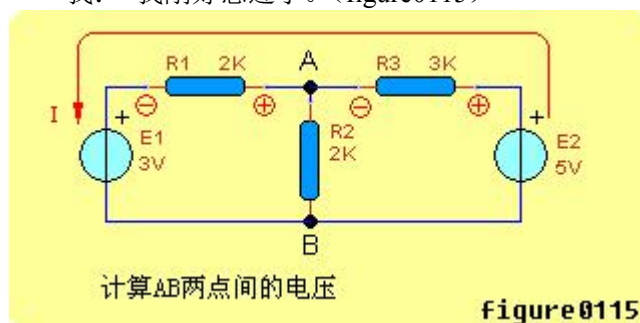
师：“古斯塔夫·罗伯特·基尔霍夫是德国人。”

但他的出生地，普鲁士的哥尼斯堡，在二战后割让给前苏联，现今为俄罗斯的加里宁格勒。伟大的哲学家康德也出生在这里。

师：“A 点是个‘节点’，三个电阻都接这个点上，形成了三条‘支路’。”

师：“这三条支路上都有电流流过，先不管大小，你能先判断一下三股电流各自的方向吗？”

我：“我刚好想过了。（figure0115）”

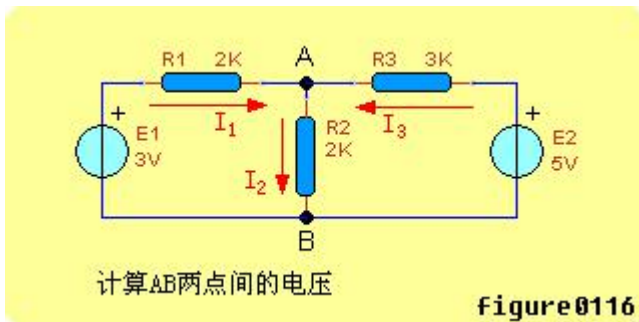


师：“R2 上的电流没画？”

我：“R2 上的电流应该从 A 流向 B，B 点是参考点嘛。”

师：“来看看我的图吧（figure0116），颠覆一下你的世界观。”

我：“这不科学！R1 上的电流  $I_1$  怎么会从 E1 流向 A 点呢？”



师：“先不管  $I_1$ ， $R_2$  上的电流  $I_2$  从 A 流向 B， $R_3$  上电流  $I_3$  从 E2 流向 A 没问题吧？”

我：“这个没问题。”

师：“好了，我们现在就可以用‘基尔霍夫’定律了。你是否能理解‘ $I_1 + I_3 = I_2$ ’这个公式？”

我：“就是 A 点向外冒的电流和向里灌的电流相等吧？”

师：“行，能理解到这一步算不错了。对于 A 这个节点来说，一些支路把电流‘注入’A 点，而另一些支路从 A 点‘吸出’电流，‘注入’电流总和与‘吸出’电流总和一定是相等的。”

师：“这就是‘基尔霍夫’‘电流’定律的内容。还有‘电压’定律，我们今天不提了。”

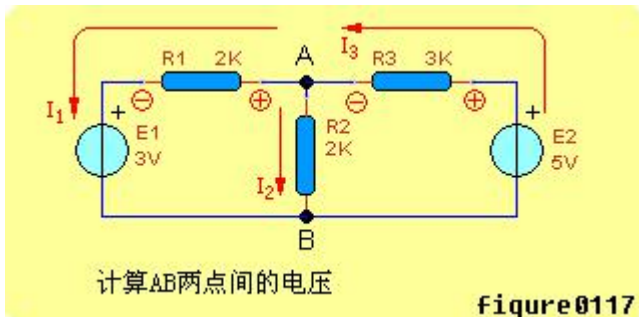
我：“不提了？太好了！嘿嘿嘿。”

师：“我们现在利用基尔霍夫电流定律来计算 A 点电压，设 A 点电压为  $U_A$ 。”

师：“三股电流可以分别列出表达式： $I_1 = (E1 - U_A) / R1$ ， $I_2 = U_A / R2$ ， $I_3 = (E2 - U_A) / R3$ 。你可以列出一个方程来解出  $U_A$ 。”

我：“就是  $(3 - U_A) / 2 + (5 - U_A) / 3 = U_A / 2$ ，解出  $U_A$  肯定是  $(19/8) V$  了，不做计算了，呵呵。”

师：“你可真够懒的。我且问你如果按你给的图（figure0117）， $I_1$  的方向反过来从 A 点流向 E1，你这个方程怎么列？还能解出  $(19/8) V$  吗？”



我：“这成了  $I_1 + I_2 = I_3$  了吧？”

师：“对啊，那么方程式呢？”

我：“应该是  $U_A / 2 + (3 - U_A) / 2 = (5 - U_A) / 3$ ，解不出正确的  $U_A$  来。”

师：“错啦！应该是  $U_A / 2 + (U_A - 3) / 2 = (5 - U_A) / 3$ ，还  $3 - U_A$  呢？你就不能踏实一点！”

我：“明白了， $I_1$  方向反过来意味着  $U_A$  比 E1 高了。所以要  $U_A - 3$  了。俺一时忘了，呵呵。”

师：“你什么忘了，你老老实实解一下这个方程吧！教你点东西费死劲了！”

我：“出差在外的别这么大火气，我算一次还不行吗？呵呵。”

我：“等号左边就是  $U_A - (3/2)$ ，于是  $U_A - (3/2) = (5 - U_A) / 3$ 。”

我：“两边乘以 6，得出  $6U_A - 9 = 10 - 2U_A$ ，再整理得  $8U_A = 19$ ，所以  $U_A = (19/8) V$ 。”

师：“电流的真实方向不重要。因为假设电流的方向变了后，并不只是简单地多一个负号。”

我：“计算电压差的减法也变了，被减数和减数换位，其实是‘负负得正’了。”

师：“就是这个意思。好了，我准备睡了，明天还得顶住。”

我：“电压定律确实不说啦？”

师：“不说了。你到大学里学习《电路》这门课时会学到的。我这儿就起个头。”

我：“那我还有个问题。”

师：“什么问题？抓紧问。”

我：“你要换一辆车的话，会换什么车？”

师：“就这么个问题啊？我会换一辆 JEEP。”

我：“你这品位有点特，‘怯懦鸡’是吗？不会是‘BJ2020’吧？”

师：“是‘牧马人’，不是所有吉普都可以叫做‘JEEP’的。”

师：“‘牧马人’和‘怯懦鸡’和‘BJ2020’有共同的祖先，其实我更喜欢它们的那个祖先。还有什么像样的问题？”

我：“喜欢‘JEEP 老爷’是吗？你可真够逗的。没什么问题了，晚安。”

师：“你还是搜一下 JEEP 的历史吧，并不比你那保时捷差。晚安。”

好吧，既然基尔霍夫电压定律不讲了，那我就放狗来搜吧，这外事不决当然要问谷歌了。直接查找“基尔霍夫电压定律”，搜出的说法五花八门，其中一个页面是这样说的：“**基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law)**，简称为 KVL，基尔霍夫电压定律描述电路中各电压的约束关系，可以表示为：对于任何集总参数电路的任一回路，在任一时刻，沿该回路全部支路电压的代数和等于零，其数学表达式为： $\sum u = 0$ 。”

我相信人家给出的这一段话肯定是正确的，问题在于如此正确的一段话，于我而言有何意义呢？我不但还是搞不清基尔霍夫先生究竟想说什么，而且我还又多了一个困惑：集总参数是个啥？

其实这个页面上的内容挺丰富的，人家还给画图举例子，生怕我弄不懂。但我真的是看见这第一句话就得够了，实在没心情继续去解读后面的内容。显而易见，这要不是被考试逼的，谁他娘愿意念这种书啊！

也许别的页面上会有些容易理解的说法吧，随手翻了几个页面看了看，我想，还是算了吧，大家说的都差不多。

那还要继续琢磨点什么呢？我搜了一下“吉普 历史”，有意思啊！这个车果然不简单。它的原型是第二次世界大战期间美军的一种四驱小卡车，代号是“JEEP”，由“威利斯-奥夫兰多 (Willys-Overland)”车厂制造，

后来福特车厂也被授权制造这个车。这车在二战期间广泛使用，运武器弹药，运士兵，运伤员，运死人，运一切需要运的东东。战后大量的“JEEP”留在欧洲各地，成为“马歇尔计划”中的一部分援欧物资。因为如果想把它们运回美国的话，运费实在高昂，还不如留在当地给老百姓用了。这个车深受欧洲农民的欢迎，优异的越野性能使其广泛地代替拖拉机用于田间作业。后来“JEEP”成为一个国际化的品牌商标，隶属于克莱斯勒公司。最具代表性的车型，就是“牧马人”和“怯懦鸡”。同时此车在其它国家也有改制，英国的将此车发展为“路虎”，日本将此车发展为“陆地巡洋舰”，前苏联将此车发展为“嘎斯 60”，并传入到中国，这就是“北京 212”车的鼻祖。

再次搜索“Wilys jeep”，这个“吉普老爷”至今仍然受到全球众多粉丝的关注。很多网站都展示出了他们翻新过的威利斯，似乎还有翻新车大赛举办。有个网站出售完整的威利斯吉普的蓝图供人仿制此车。最另我惊奇的是，北京一位名叫“李亚生（<http://www.jeepwilys.com.cn>）”的吉普车迷真的自己仿制了这个车，全手工制作！真能开起来跑的！我必须惊叹：“这高手都在民间啊！”





## 小花絮 第一次实验

### 2005-05-29: 点亮 LED 数码管

叔叔给的元器件今天终于到了，晚上老爸下班回家拿了一大纸箱，打开来瞧了下，一片混乱。这一回倒是见到真正的电阻器了，原来是像子弹链一样整整齐齐的排成一行，引脚尖端用不干胶带粘住。这样的“弹链”有好多，看色环都不大一样，大概是不同阻值的每种一条链吧。

随手取了一条“弹链”，看了下电阻的色环，是“棕黑黑红棕”，这应该是  $10K \pm 1\%$  的。细看一下似乎当成“棕红黑黑棕”也可以，这可就变成 120 欧了。看来 C# 说的有理，这东西最好用表量一下。再拿起另一条弹链，不干胶纸带上写着 51K 100PCS，原来已经写好阻值了？重新拿起刚才那一排 10K 的，果然不干胶纸带的另一面上写了 10K。

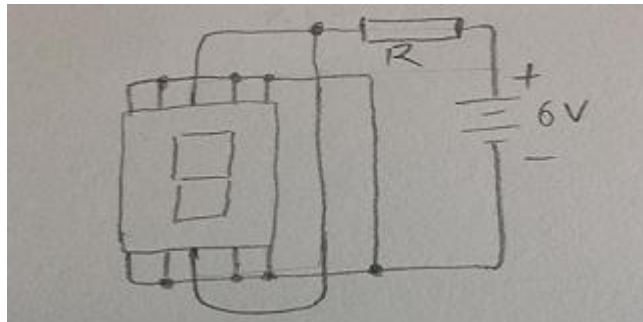
除去电阻器之外，其它的元器件我认得出的不多。二极管也找见了，和电阻一样粘成弹链的样子，不干胶纸上写着 1N4148，还真是这个型号啊？还有一些外形稍粗大的二极管，散乱地装在小塑料袋中，黑色管壳上印着 1N4001，这个 C# 没有提过，不知道是干什么用的管子。



LED 可是真不少，有一大包红红绿绿的，绿的偏多，想必是装混在一起了，也不知道干嘛要买这么多，难道高手买这东西都批发吗？箱子底下还真有一些 8 字数码管，都是个子比较大的那种，正面是灰色的，看反面的引脚很短，似乎还带着焊锡，这是不是曾经用过了？不知道里面的字点亮后是什么颜色。我还找到了 LED 点阵管，横竖都是 8 个 LED，老叔这些家当还挺全的。

剩下的东西中有一些开关，单排的和双排的插针（排针）和插座（排母），集成电路插座，D 型接头等等，这些就是所谓的“接插件”了，上个月有所了解。还有一些可能是“集成电路”了，装在一些塑料管子里，和我在电脑主板上看见的一些黑方块有点相像，确切的说，就颜色和表面印字有点像，外形差异很大。我还找到了一个电池盒，能装 4 节 5 号电池，这个刚好用得着。

第一次自己做一个电路实验，有点无所适从，还是该先画一个电路图吧。我在草稿纸上画了一个简单的图，第 1 个问题就是要算一下 R 应该是多大。330 欧可能是不行，因为用 5V 的电源时，330 欧的电阻会把电流限制在 10mA，如果只接一段 LED 当然是够了，我现在想让 8 段 LED 共用一个限流电阻，8 段 LED 分这 10mA 电流，每段分到的太少了点。



或许可以把 R 缩小 8 倍，减到 41.25 欧，标称值是 47 欧啦，这样可以有约 80mA 电流供给 8 段 LED 分配，不过这也有些问题，万一其中一段 LED 分到的电流太大烧了呢？半导体这东西可没谱，一段 LED 与其它 7 段特性相差太大恐怕有可能。这样来看应该用一个 100 多欧的限流电阻比较靠谱。

把大盒子里的电阻挨着个拎出来找，最后找到了一串 180 欧的，就这个吧，稍微大了点。这个电阻怎么接

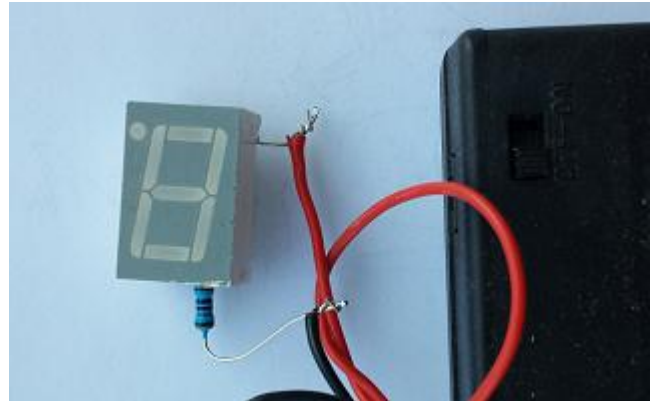
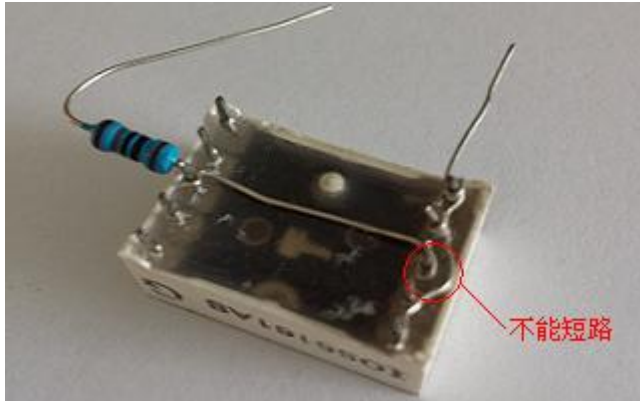


在数码管上？用烙铁焊上？烙铁倒是玩过，把焊锡化成圆球，闻了闻松香的味，这要把俩元件的脚焊在一起？有点手潮。这烙铁那么热，不会把元件烫坏了吧？干脆把电阻的引线在数码管的脚上绕两圈算了，能接触上不就行了？

下一个问题是怎样把那 8 段 LED 的阴极接一起，没有导线啊？没办法只好又取了一个电阻，把两条引线齐根断下来当导线用。有点短了，无法连接全部 8 个引脚，只好连接了 4 段 LED，只用 4 段也能看见效果了。

电池只有两节用过的，只好又从电视遥控器中取了两节电池凑数，这两节也快没电了，将就一下吧。这电源虽然不是 5V，但我觉得这也可以凑合一下。器材现在是准备好了，现在就给数码管通上电看看效果。我把电池装进电池盒，然后把电池盒的红线接在限流电阻上，红线嘛，这应该是电池的正极，黑线接在另外 4 个引脚上。惨！竟然一段都不亮。

对这样的结果我还是有点心理准备的，但是真出了这结果还是不免有些挠头。这个数码管是共阳还是共阴的？我那个图是按共阳画的，这个数码管如果是共阴的呢？要不就换个接电的方向试试吧，把黑线搭在公共端的限流电阻上，红线搭在 4 个管脚上，居然还是一段都不亮。



糟糕，这个数码管不会被我弄坏了吧？LED 反向击穿电压很低，我可是用了 6V 的电池。如果第一次接电恰好是反向的，那这 4 段 LED 会不会就完蛋了？还是不要自己整了，打电话找高手帮忙吧。我于是拨通了叔叔的手机。

叔：“喂？谁啊？”

我：“是我，你大侄子。你给我的数码管是共阴还是共阳的？”

叔：“我给你那堆东西里有数码管？”

我：“有啊，我想实验一把，看一个限流电阻到底啥效果。”

叔：“开始实验啦？够快的啊！不是共阴就是共阳的。”

我：“到底是共啥的啊？”

叔：“什么颜色的数码管？”

我：“我哪知道什么颜色？还没亮起来呢。”

叔：“我是问管壳表面是什么颜色，有 8 字那个面，是灰白还是黑？”

我：“我用的是灰白的。”

叔：“那可能是共阴。那是拆机件吧？”

我：“引脚上有锡，好像是用过。”

叔：“那就难说是好坏了。你两个方向都接电试试不行吗？”

我：“我两个方向都接过电，全不亮啊？会不会管子烧了？”

叔：“也那么容易就烧啊？你焊好了么？”

我：“我没焊，就是用电阻的引线在数码管的脚上绕了下。”

叔：“那恐怕接触不良。你还真能凑合！”

我：“不会接触不良吧？线绕得挺紧的，我都拿尖嘴钳子夹过一遍呢？”

叔：“你用什么电源试的啊？”

我：“电池啊。你给我那个电池盒我用上了。”

叔：“那个电池盒可有年头了，买了就没用过。”

我：“不知道电池盒有没有问题，那里边的弹簧挺紧的。不过电池都是快没电的。”

叔：“你拿那万用量表一下电池盒的电压？”

我：“你上回给我那块表？那玩意儿怎么使啊？”

叔：“你拿出来，我告诉你怎么用。”

我：“拿来了，怎么弄？先按开关？”

叔：“对，先按那个 ON/OFF 钮，左上角那个长圆的钮。”



本教程中只使用数字式万用表，不用指针式的。有些型号的万用表可能把电源开关标成“POWER”而不是“ON/OFF”。有些表的电源开关和中间的圆形旋钮开关结合在一起。“AUTO POWER OFF”表示这个表在长时间不测量时会自动关闭电源，这可以节约表内的 9V 积层电池。万用表型号繁多，我们只能介绍一种典型的，使用其它型号的万用表还需参考配套说明书。

我：“行了，有字出来了。那个小圆钮按吗？”

叔：“那个 HOLD 钮要弹起来，不能按下去。中

间那个大圆的旋钮，往右边转，让它指向右边的那个20。”

我：“右边有俩20，上边的还是下边的？”

叔：“上边那个，那个区域不是标了一个字母‘V’又加了两道横线吗？”

我：“对，上面一道实线下面一道虚线？像个等号。”

叔：“那表示测直流电压明白不？20表示能测出的最高电压是20V，再高就测不出了。”



我：“那下边那个字母‘V’加一道波浪线表示测交流电压吧？”

叔：“你还知道交流电呢？不简单啊！把红表笔接电池盒的红线，黑笔接黑线。”

我：“表笔？就是插在下边孔里的那两条线？你等我免提啊。”

我按下电话的免提键，放下电话听筒，然后按叔叔所说将红笔接在电池盒的红线上捏住，又把黑笔按在黑线上。

叔：“成了吗？显示的数字是多少？”

我：“显示是4个0。变了，是-0.001，又变4个0了。”



如果电池盒与数码管不连接，单独测量电池盒的两根引出线，那么测量结果通常是“0.00x”这样的值。上图中电池盒与数码管是连通的，可见表上显示了0.045V，我曾经在阳光明媚的阳台上做这样的测量，表上显示了1.221V。这个电压不是由电池给出的，还记得PN结暴露在光照下会怎么样吗？

叔：“哎呀没电啊！电池盒有问题根本没电！你查查吧。”

我：“不会吧？我装的电池没觉得很松啊？这电池盒上有个开关？”

叔：“咳！我想起来了，这个电池盒带开关的。那开关你没开吗？”

我：“我不知道这开关干嘛使的，没管它。我现在

开了。”

叔：“你再量一下，看看有电没？”

我：“有了。5.311V，不到6V。”

叔：“谁让你用旧电池来着，旧电池内阻大，别和新的混着用。”

我：“找不着4节新的，还是从电视遥控器里卸俩凑的呢。那数码管如果接电接反了会坏吗？”

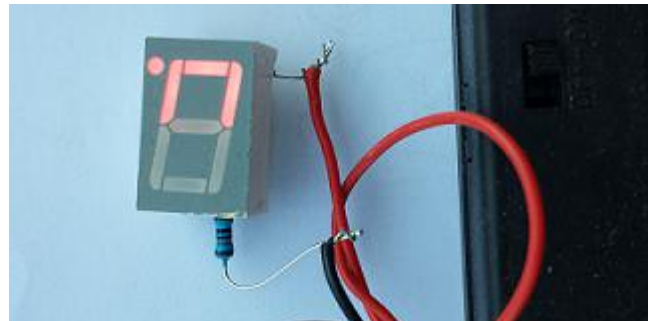
叔：“不致于坏。不是有个限流电阻吗？你接电阻了吧？”

我：“接了一个180欧的。LED反向击穿电压很低啊？”

叔：“没事，坏不了。”

我小心地把电池盒的红线搭在限流电阻上，黑线搭在另外4个管脚上，奇迹出现了，数码管上亮起了3个笔画和小数点，红颜色的。

我：“亮啦亮啦，是共阴的不是共阳。4段全亮了。”



叔：“你接了4段啊？也够了，能说明问题了。就为一开关费了我这么多口舌。”

我：“哈哈，我这不是着急嘛，要知道是那开关的问题就不用麻烦您了。呵呵呵。”

叔：“行了，回头跟C#说一声，他说的那什么并联都不靠谱。”

我：“行。您上回说用一个限流电阻亮度不均是怎么回事？”

叔：“你仔细想想，显示数字1的话亮几段？只亮右侧两段吧？显示8呢？7段全亮。一个限流电阻能供出的总电流是不会自己增大的吧？”

我：“好像是吧？那又怎么样啊？”

叔：“你可真行！假设经过电阻供出的电流是10mA，亮两段，每段电流是5mA，亮7段呢？每段电流就只有1个mA多点了。”

我：“您是说显示数字1时字比较亮，等显示数字8时整个字就比1暗了是吗？”

叔：“就是这样啊！反应太慢了！还重点中学的呢！”

注意人的眼睛分辨能力有限，你不一定真能看出8字比1字暗淡。

我：“重点中学也不教这个啊？我这不刚开始学吗？要求不能太高吧？”

叔：“行了，我还有事呢，你和C#探讨这个吧。好吧？”

我：“好吧，您忙吧，我再琢磨一下这玩意儿。有点意思。”



数码管当然是没啥可再琢磨的了，这个万用表倒是让我觉得很有意思。这块表的液晶屏上可以显示 4 个数字，看上去和 7 段 LED 数码管很相像。那个大圆旋钮的圆周被不同的颜色分成了几个区域，右侧标了“V=”的区域是测直流电压的，这个刚刚了解了，这样来看左侧标了“A=”的区域应该是测直流电流的。上方标了“Ω”的区域是测电阻，而标了“V~”和“A~”的区域一定是测“交流电压”和“交流电流”了。

另外的几个区域就不知道是啥意思了，其中最下方一个区域标了一个大写字母“F”，不知是什么。左上角有一个档位标了“Hz”，紧挨着“Hz”的另一个档位画了个二极管的符号，这个档位是测量二极管的吗？

右上角一个档位标了“hFE”，和那个二极管档一样是蓝色标识，这是巧合吗？长圆形的按钮开关之下有一个小圆钮，我按了一下，没有任何反应，再按一下，小圆钮弹了起来，看不出来是个啥作用。不过这个钮旁边写了一个“HOLD”，我查了一下字典，是“保持，维持”的意思，还是不明白要保持什么呢？

下方有一排 4 个插孔，我把两个表笔拔下来，插黑表笔的孔也是黑色的，上方标了一个“COM”，另外 3 个孔是红色，想必红表笔可以接在其中任一个孔上吧。不过每个红色孔上方的标识不一样，左边第一个标的“10A”，第二个标的“mA”，最右边的则标了“VΩHz”。这样来看左边两个孔可用来测“电流”，最右边这个红孔用来测电压电阻和那个“Hz”的。

这是否意味着，当我把大旋钮开关拨到“A=”那个区域时，红表笔必须重新插到左边两个红孔之中呢？那么两个孔用哪个？“A=”区域一共4个档位，2m/20m/200m三个档是测“mA”级电流的吧？选这三个档时红表笔应该插“mA”那个红孔吧？剩下一个档标了10，这应该是10A，这时红表笔就应该插“10A”那个红孔了。看了下“A~”区域，也是这4个档，我觉得我的推测应该是没问题的。

可问题是为何要分成两个表笔插孔？我看到“mA”红孔下标了“FUSED”，这是“保险丝”的意思，这孔里边带保险丝吗？为什么“10A”红孔却是“UNFUSED”的呢？怎么大电流的插孔反而没保险丝呢？



到目前为止只会测量直流电压，我试着把大圆旋钮拨到直流电压的 200 那个档位，然后重新测了下电池盒的电压，这回测出了 5.29，和刚才测的 5.311 有些区别，但是不大，而且这个数也会跳到 5.30，但 5.29 出现的多。

再次把大旋钮拨到 2 那个档，重新测试电池盒的电压，这回测出了一个 1，怎么会是 1V 呢？这个档位标了 2，按叔叔的说法这一档最高测到 2V，高于 2V 就测不出了，那也不应该显示 1V 吧？我仔细看了下屏幕的显示，突然发现这个屏可以显示 5 个数字的，这个 1 出现在屏幕最左侧，不是刚才看到的 4 个数字中最左边的一个。

这玩意还真有点意思啊？看来测电阻也是可以照猫画虎的。标了“Ω”的那个区域一共有 7 个档位，从 200 开始到 200M。如果我想测一下那个 180 欧的电阻，拨到 200 那个位置应该可以，这个档应该可以测到 200 欧的。我将大旋钮拨到 200 那一档，然后找出一个 180 欧的电阻，用两个表笔分别接在电阻的两根引线上，哈哈，屏幕上显示出 179.1。

如果要测那个 51K 的电阻，大旋钮应该拨到 200K 那个档位，小于 200K 的档位应该测不了 51K 的电阻。我找出一个 51K 的电阻，用刚才的 200 那一档测了一下，屏幕上仍然显示一个 1。搞笑，怎么会测出 1 欧姆呢？试了下 2K 和 20K 两档，都只测出一个数字 1，最后用 200K 档，这下测出了 51.2K，这才对嘛。

还有一个画了二极管的档位，我觉得这也可以试试。于是我取了一个 1N4148，把大旋钮拨到二极管档，突然间这个万用发出了“嘀——嘀——”的叫声，怎么回事？我一时懵了，赶紧按下 POWER 开关，叫声停止了。这表有毛病了？让我弄坏了？不会吧？我小心地按了下 POWER 开关，这次表很安静，没有发出奇怪的叫声。我重新拨到 200 欧电阻档测了下 180 欧的电阻，仍然显示 179.2 欧，用 200K 档测 51K 电阻，正常，用 20V 直流电压档测电池盒的电压，仍然正常。我稍微松了口气，看来这表没坏。

重新拨到二极管档，这回表没有滴滴叫。我注意到在二极管符号的旁边还有一个“(C•)”符号，难道这个档还能唱歌吗？不管它，把 1N4148 的两个引线分别接在红黑表笔上，屏幕上只显示了一个孤单单的“1”。这是什么意思？换一个“发光二极管”试试吧，我取了一个红色的 LED，把两根引线接在表笔上，这个 LED 居然发出的微弱的亮光，强啊？！又取了一个绿色的 LED，这回它没有亮起来，而表的屏幕上仍是显示了一个“1”，看来不是表坏了，是这个 LED 坏了。重新取了一个红色的 LED 测了下，又点亮了，不会只是红的能亮绿的不能亮吧？再测了下另一个绿色的，果然不亮。看来只有红色的 LED 能亮了。

时间过得很快，不知不觉已过了 11 点，还有一些习题册没有做呢，反正也来不及了，干脆等明天再说吧。我打开电脑连上网络，C# 没有在 MSN 上，想搜一下怎么使用万用表，刚打开 GOOGLE 老妈就出现在房门口，我赶忙关了显示器，然后脱了衣服躺到床上睡去。待老妈走后，我重新开了显示器，光溜溜地只穿个裤头坐在电脑前。

C# 竟然出现了，我忽然觉得我们应该各自弄个摄像头视频一下，他现在是否也光着呢？

我：“数码管的实验做了，公共端接 1 个限流电阻是可以的，不会只有一段亮。”

师：“这个事我想了一下，我想出一种解释。”

我：“事后诸葛亮啊？怎么个解释法？我洗耳恭听。”

师：“不用洗耳了。这个还得从‘内阻’说起。”

我：“怎么又是‘内阻’啊？没完没了的欧姆？”

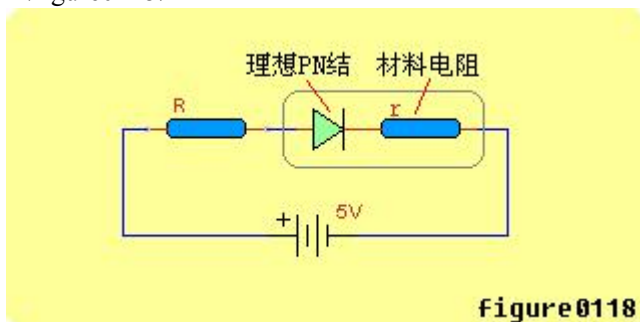
师：“电子穿过电源会受到阻碍，那么电子穿过二极管会不会受到阻碍？”

我：“二极管是个 PN 结啊？你不是说 PN 结有个什么‘动态电阻’吗？”

师：“我指得是制造 PN 结的那些材料，你说有没有电阻率？”

我：“应该有，任何材料都有电阻率，没有那是超导，就不是半导了。”

师：“所以一个真实的二极管应该是这个样子的。（figure0118）”



我：“一个‘理想 PN 结’加一个电阻？这个电阻是二极管的‘内阻’？”

师：“就是材料具有的真实电阻了。所以 8 个 LED 并联每一段其实是带了一个‘限流电阻’的。”

我：“那还要外接限流电阻干吗？”

师：“这个‘内阻’不够大啊，它没法把电流限制到合适的范围内，何况它还是个热源。”

我：“这么说 LED 点亮后也会发热？”

师：“有一点点热，肯定不会像灯泡啦。”

我：“做数码管的也够呛，把 8 个限流电阻一起放到数码管壳里不好吗？干嘛让外接呢？”

师：“好像是有一些数码管内部集成了限流电阻的，但是我没用过。”

我：“我有一些关于万用表的问题，能不能说说？”

师：“你都开始研究万用表啦？什么问题？”

我：“万用表为什么会‘嘀——嘀——’的叫啊？”

师：“万用表有一档用来测量电路通断的，你调到

这档把两个表笔碰在一起就会响。”

我：“是我把两个表笔碰一起了啊？我还以为给弄坏了呢。”

师：“这个档经常和二极管档放在一个档位。一般来说两个表笔之间的电阻小于 70 欧姆都会响。”

注意不同的万用表这个参数可能有区别，不一定是 70 欧姆。

我：“对啊，我看见二极管档那个位置还画了个声波的符号，我以为这一档会唱歌呢。”

师：“哪有唱歌啊，这个‘蜂鸣’档很有用，检查电路是否接通或者短路很方便。不过不是所有的表都有这个档。”

DT830B 型万用表就没“蜂鸣”档，这个表的成本已经做到 10 块钱以下，当然你也别指望东西有多好了。

我：“还有一个问题，我用电阻 200 欧姆档测 51K 电阻，为什么测出 1 欧姆？”

师：“那不是 1 欧姆，那个 1 表示被测的电阻阻值超出了量程。这个 1 在屏幕最左侧对不？”

我：“没错，是在最左边。‘量程’就是那个档能测出的最大值对吗？”

师：“对，就是这个意思。你的表上很多档的量程都是 2XX 对吗？”

我：“还真是，几个电阻档都是 2XX 的。”

师：“所以它能显示出来的最大值是 199.99、1.9999、19.999 等等，小数点的位置随量程变化，但数字最大就是一个 1 四个 9。”

我：“这小数点我没注意，你等我看看。”

我取出万用表按下 ON/OFF 钮，然后把大旋钮拨到电阻区，从 200 到 2K 到 20K 这样一路拨过去，小数点的位置确实随着改变的。

我：“小数点的位置是变的。最左边的这个数字总是 1？”

师：“对啊，它没有必要比 1 大啊。所以它不是一个完整的 8 字，我们管它叫‘半字’。你那块表除了这个 1 还有几位数字？是 4 个吗？”

我：“对，除了 1 还有 4 位数字。”

师：“所以你这块表是‘4 位半’的，稍微有那么点小档次。一般普及型的是‘3 位半’的。”

我：“3 位半？有啥区别吗？”

师：“精度不一样，也就是小数点后面有多少位有



效数字。”

我：“了解，位数越多肯定是越高级了。”

我：“还有怎么测二极管？我用二极管档测了个 1N4148，显示也是最左侧一个 1 啊？”

师：“红表笔接二极管阳极，黑表笔接阴极，可以测出二极管正向压降。”

我：“这个有极性啊？我说怎么这么奇怪呢。如果测 LED，LED 会发光是吗？”

师：“对，只要阴极阳极接对了就会发光，但不一定能测出正向压降。”

我：“我测俩红色 LED 亮了，测俩绿的都不亮，我以为只有测红的亮呢。”

师：“恰好那俩绿的极性没接对吧？是个巧合。不过巧合经常让人当成经验。就像有人梦见亲人故去，结果亲人真的故去了一样。”

我：“心灵感应？这个我倒有几分相信。我一个同学确实有一次真实的经历。”

师：“你这个想法不可取，与科学的精神不相容。”

从‘统计学’的角度来说，你同学做了 100 个梦，有 99 个都在现实中发生了，才能认为你同学‘可能’具有一些特殊的能力。”

我：“这怎么可能呢？100 个梦 99 个是真的？”

师：“你又觉得不可能了，你到底是相信还是不相信呢？这种超能力的事娱乐一下就可以了。”

我：“信则有不信则无。不过现实之中确实有很多事情是无法用科学来解释的。”

师：“无法解释就是无法解释，你不能因为科学无法解释就换个别的什么来解释啊？那你是否还继续从科学的角度去探索这个无法解释的事情呢？”

我：“那你认为宗教是垃圾了？或者是‘统治阶级麻痹人民思想的工具’？”

师：“我认为宗教是人类的一种精神慰藉，与科学完全不一样，是没有必要证真或证伪的。”

师：“我们扯太远了把？还有什么问题？”

我：“木有了，你去忙吧。”

我忽然想起了一个问题，不过 C# 真的跑得非常之快，已经下线去了。不过我觉得这个问题我自己能弄清楚，只要试试即可。我拿出万用表，按下 ON/OFF 键之后，屏幕上出现了一排跳动的数字，现在是 20V 直流电压档，表上最后一位小数不断地在 0 和 1 之间变化。我按下了 HOLD 键，表上的数字停止在“-0.001”上再也不动了。再按一下 HOLD 键让它弹起来，数字又开始不断地变化起来。

这个 HOLD，是“保持”的意思，看起来只要这个键按下去，表上的数字就会“保持”住不再变了。这样还能进行测量吗？我再次按下 HOLD 键，然后去测电池盒的输出电压，表上的数字仍然是“-0.002”不变化。我忽然感到自己有些可笑，我分明应该先弹起 HOLD 键再去测量，测出电压之后按下 HOLD，这个电压读数就会停留在表上，这是为了方便人观察啊。可惜我只有两只手，各拿一支表笔测量电压，哪有第 3 只手去按 HOLD 键呢？

这表上最左边的“半”个字让我好生奇怪，为何只能显示数字 1？我感觉这表头虽是液晶的，但显示出的数字也是“7 段数码管”的形式，显示数字 1 的话，只需要最右边的两个段（对应数码管的 b/c 两段），这是不是能便宜一些？不过我感觉这个 1 的左边仍然可以显示三个横划的（对应数码管的 a/g/d 三段），这样就可以显示数字 3 了，这是否叫做“三分之二”？不对，多加这 3 段没法显示数字 2 的，这个“半”字到底意味着啥呢？

我只能放狗去搜了，查了下“四位半 万用表”这两个词，总算找出了答案。当最左边这个数字是 1 时，由于读数的上限只能是“2000”，所以把 2 做分母，1 做分子，称为“二分之一”，或者“半字”。最左边这个数可以做成显示“1/2/3”的，这时读数的上限是“4000”，把 4 做分母 3 做分子，称“四分之三字”。最左边这个数还可以做成显示“1/2/3/4”的，这就有了“五分之四字”。看来这不是为了减少段数而设计的，还是为了获得所需的量程。

还有一个问题我也想通了，二极管正向电压降为何随着正向电流的增加而变大？我以前觉得二极管中带一个电阻，正向电流在此电阻上形成的电压降是会加大的，导致了二极管两端的电压随着加大。现在看来还真是如此啊，二极管并非是一个理想的 PN 结，它其实是一个理想的 PN 结和一个电阻串联的产物，就像真正的电源是一个理想电压源和一个内阻串联一样啊。

然而这样一来一个新问题又出现了：“理想 PN 结”的“伏安特性”又是什么样子呢？难道说理想 PN 结当它两端（从阳极到阴极）电压达到 0.7V 之后就彻底没有电阻了吗？就像一个开关接通那样？或者说，它的“伏安特性”可以画成图（figure0119）这样？我忽然又没把握了，要知道“材料电阻  $r$ ”应该是“线性”的，它的“伏安特性”就是一根直线，现在如果理想 PN 结的伏安特性也是这种直直的线，它们俩放在一起怎么会出来一根圆弧状的曲线呢？这从直觉上就难以接受啊？看来还不能轻易认为二极管正向压降随电流上升完全是由材料电阻贡献的啊。就先想到这一步吧，谁让咱功底薄呢。

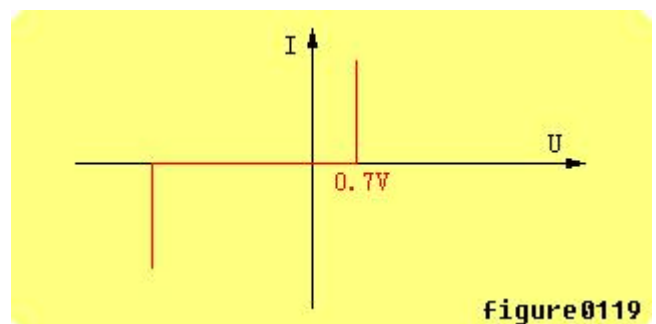


figure0119

## 第 5 章 电容器

相对于“电阻器”来说，“电容器”是比较复杂一点的元件，这里的复杂指得是当你想通过“数学”来理解这种元件的特性时，需要用到“高等数学”，也就是“微积分”了。这不像欧姆定律只是乘除法那样简单。

不过 C# 这家伙不大乐于玩高深，他有意回避了数学，这倒是让我这么个高中生也能接受。不过我偷偷告诉你，C# 这家伙很可能“高数”学得不怎么样，所以才对数学避而不谈的。这事儿我只告诉你了，你可别跟其它人说去。

### 2005-05-31：交流电和方波

好几天没见着 C# 了，看来他压力很大，没想到当个电子工程师这么辛苦。期间和叔叔通了个电话聊了聊，叔叔的看法很激进：“他苦什么苦？这才出了几天差啊？”这更加坚定了我“不做专业电工”的决心。

折腾到晚上 10 点半，总算把那些习题做完了。洗了把脸醒了醒脑子，我打开电脑登录到 MSN 上。C# 又出现了。

我：“还在和师母网聊呐？”

师：“没，我回来了，下午到的北京。这些日子有什么进步没？”

我：“没啥进步，研究了下 JEEP 车。你的问题都搞掂了？”

师：“没有，只是发现了问题的原因。回来还要重新修订软件。”

我：“真够累的，我以为三拳两脚一切平趟呢。”

师：“不说这个了，今天讨论交流电。”

我：“就是墙上那个二百二的插座吗？我们有用到那么高的电压？”

师：“你还知道墙上那个插座是 220V 的交流电？不简单。你用万用表量过那个 220V 的电压吗？”

我：“没有。我怕被电死。那个表能直接捅到插座里？”

师：“你那个表‘V~’区是不是有个 700V 的档？有的话就把大旋钮拧到那一档，然后把两个表笔捅到插座里看一下。”

我把万用表取出来看了下，果然“V~”区有个 700V 的档位，按 C# 所说把大旋钮调到这里，然后把两个表笔分别插到一左一右两个插孔中，液晶屏上显示出 226.8V。我又把一个表笔插到中间的插孔中，这回液晶屏上显示的是 000.2V，那个.2 还在不断变化，看来是没电。我还怕接触不良，把两个表笔晃了几晃，依然是没电。



这一项测量，你确定真的要做吗？那我只能给你一点安全用电的提醒了，你的肉体不要触碰万用表笔的金属部分，万用表笔的导线绝缘外皮必须无破损。

我：“插板中间的那个孔好像没电？”

师：“中间那个孔是‘地线’，是没电的。左右的两个孔中有一个对中间的孔是有电的。”

我：“我再试一下吧，刚才量了左边的孔对中间的孔是没电的。”

我把万用表打开，一个表笔捅到插板中间的孔中，另一表笔换到右边的孔中，这回屏幕上显示出 227.1V。

我：“右孔对左孔有电，右孔对中孔有电，就是说只有右边这一个孔有电吗？”

师：“右边的孔是‘火线’，左边的是‘零线’。”

以上只是说明了分辨火线和零线的方法，不是说所有的插板都是右孔为火线。另外，墙壁插座上究竟哪个孔应该是火线，这应该是有规矩的对不？给你家装修的电工做得对吗？

我：“我知道‘火线’这玩意儿。手碰到‘火线’会触电，碰‘零线’没事。”

师：“手单碰到火线，如果你的身体和地球之间绝缘的话是不会触电的。”

这就是为什么鸟儿站在电线上不会触电的原因。

师：“安全用电的事先不提了，我先给你个图片，是发电机的原理。”

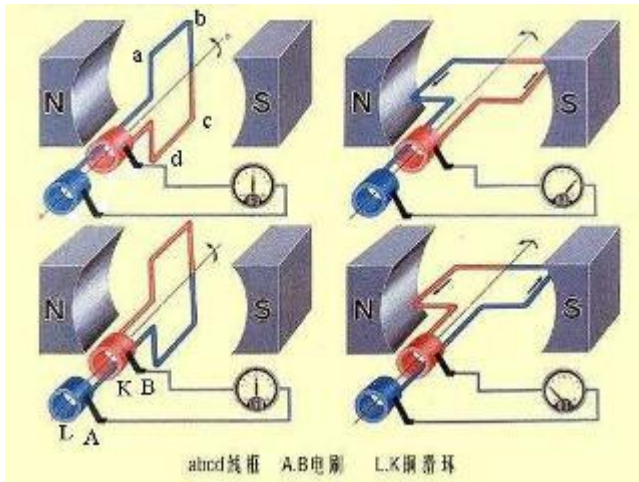
我：“有个问题，为什么测插板上的电压，两个万用表笔就不分正负了呢？”

师：“你测量之前怎么不问？”

我：“测量之前我也没想过这个问题，这不刚想起来嘛。”

师：“因为插板上是‘交流’电啊？先看发电机的图吧。”

我：“不就是个‘洛伦兹力’吗？这个说过了啊？”



师：“这个图中标了‘abcd’的方框是由导体制成，这个框在一对磁极中匀速旋转着。”

我：“ab边和cd边会从两个磁极间穿过，导体中的自由电子被‘洛伦兹力’推着运动。”

师：“是的。不过ab边在前半圈时是从上到下通过两个磁极，cd边从下到上穿过两磁极。关键是后半圈呢？”

我：“后半圈变方向了，ab边从下到上穿越磁极了。”

师：“对，所以电子运动的方向在两个半圈中是不一样的，如果前半圈从b到a，那后半圈从a到b。”

我：“怎么是‘如果’从b到a啊？到底从哪儿到哪儿？”

师：“判断‘洛伦兹力’的方向要用左右手定则，我不记得是左手还是右手了。”

我：“你可真是半吊子，对待科学怎么能这么不严肃呢？”

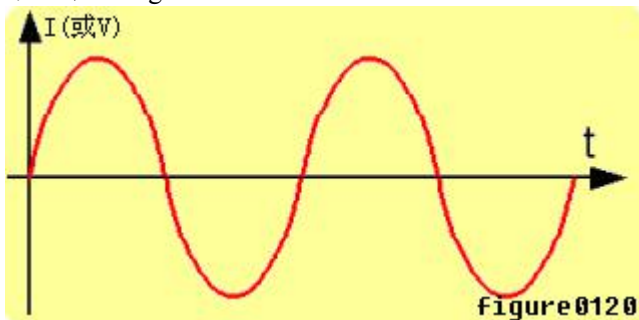
师：“你别像我这样就行了。总之，线框中电子的运动形成的电流会通过‘铜滑环（L/K）’传到与之接触的‘电刷（A/B）’上，引出来流向电流表。”

我：“那就是说这块仪表中的电流一会儿从左向右流，一会儿又从右往左流，全看那个线框转到什么位置了？”

师：“是的。这就是‘交流’的意思，交叉着流，电流的方向总在变化。相对而言电池出来的电流就永远是从正极到负极，这便是‘直流’电。”

我：“所以万用表就不分正负极了？”

师：“电流表中的电流可以用一个图来描述，收一下这个。（figure0120）”



我：“怎么是个曲线啊？很麻烦啊？”

师：“因为那个线框在‘转动’，ab边从两磁极间

穿过的速度不均匀。”

我：“不对啊？你刚说过是‘匀速’转动的，怎么又不均匀了？”

师：“匀速是‘转动’，不均匀的是从上向下垂直方向上的速度。”

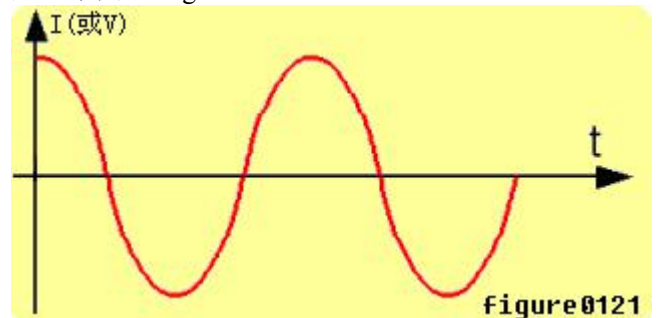
初中的物理课是否涉及到“线速度”和“角速度”？我不记得了。

我：“就是说线框竖直着的时候垂直方向上的速度为0，转到平躺位置后垂直方向上速度最大？这好像是三角函数啊？”

师：“对啊，是三角函数，sin 和 cos。”

我：“那到底是 sin 还是 cos 啊？”

师：“我给你的图是按 sin 来画的，如果按 cos 画是这个图。（figure0121）”



我：“把 sin 和 cos 画成图咱懂，我是说 sin 和 cos 都可以用是吗？没区别？”

师：“这么说吧，如果线框从竖直着的状态开始转一圈，那就是 sin，如果从平躺的状态开始转一圈，那就是 cos。你的明白？”

我：“没明白。就只差了一个 90 度角吗？”

师：“ $\cos(\alpha) = \sin(\pi/2 + \alpha)$ ，我这个没错吧？就差一个  $\pi/2$  啊。”

我：“您还记得这个？不容易。”

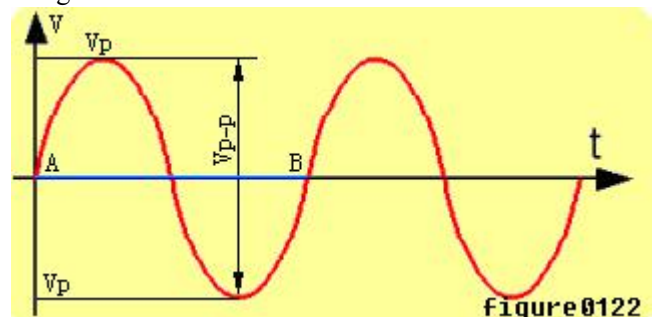
师：“电压的变化和电流也是一样的，这是由欧姆定律所决定。”

我：“懂！电压=电流×电阻，电流弯弯绕则电压也弯弯绕，因为电阻是没有变的。”

师：“从 Y 轴来看，电压（或电流）有正有负，这里的正负表示方向，也就是电压哪边高哪边低，电流从哪一头流向哪一头。”

我：“真够麻烦的。”

师：“抛开正负不管，电压由小到大变化是‘封顶’的，有个最大值，这个最大值叫‘峰值’，记做‘ $V_p$ ’。（figure0122）”



我：“就是每个鼓包的尖儿到 X 轴这个值吗？”

师：“就是这个值。正负两个尖儿之间也有一个电



压差值，是‘峰到峰’的值，这叫做‘峰-峰值’，记做‘ $V_{p-p}$ ’。”

我：“双峰？我喜欢高耸的双峰。”

师：“特别是一上一下的，你最喜欢。是吗？”

我：“没，开个玩笑啦，你又瞪眼了？”

师：“线框每转一圈，这两个峰就会完整地出现一次。所以我们将 X 轴上从 A 到 B 点所经历的时间称为‘一个周期’。”

我：“你等会儿，我想起了初中时学习的‘简谐运动’。”

我：“那两个峰应该叫做‘振幅’吧？”

师：“真不容易，我以为你只惦记着‘高耸的双峰’呢。你还记得那个‘单摆’？”

我：“振幅，周期和频率，我还记得。这个交流电也有这些概念啊？”

师：“有啊。只不过振幅的单位是‘伏特’或者‘安培’了。周期的单位还是‘秒’，频率的单位还是‘赫兹’。”

我：“我对‘限幅’这个词有点明白了。”

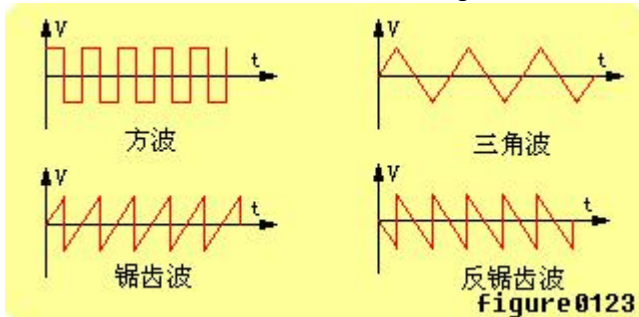
师：“我们国家的二百二交流电的频率是 50Hz，对应周期 20ms。这个频率简称为‘工频’。”

我：“频率应该反应了那个线框转的快慢吧？转得快周期就短，频率就高？”

师：“完全正确。你总算说了点正经的。”

我：“你怎么又开始打击我了？应该给我的灵感再加 0.1%才对嘛。”

师：“这种图我们称之为‘波形图’，当然是只画了两个周期，可以画很多周期的。(figure0123)”



我：“图上这些都是插板上出来的交流电？”

师：“插板上只出来‘正弦波’，这些图画的是些常见的‘交流信号’的波形，它们通常没有 220V 那么高的电压。”

我：“一说二百二我想起来了，这个电压是‘峰值’？还是‘峰-峰值’？”

师：“都不是。这个 220V 是‘有效值’，也叫‘均方根’值。”

我：“不解。只听说过‘均田地’，没听过‘均方根’。”

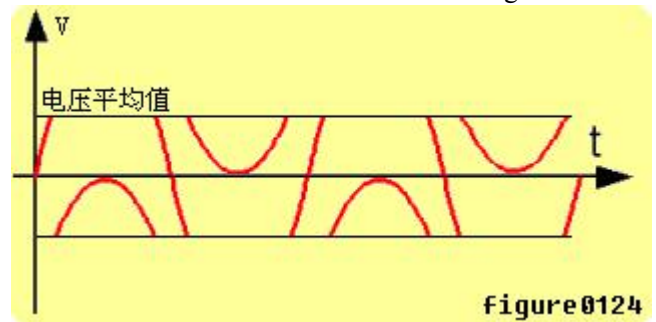
师：“首先，你墙上的那个插座，它在某个特殊的瞬间是‘没电’的，这个你清不清楚？”

我：“这个从波形图 (figure0120) 上能看出来。那个红色曲线和 X 轴的交点是电压为 0 的。”

师：“对，这些交点叫做‘过零点’。所以插座上的交流电压肯定不能用一个数字来表达，它无时无刻都在变化，每一时刻都不同。”

我：“那就不存在‘二百二’这个值了？这个说法怎么来的？”

师：“还得上图，你看看这个图。(figure0124)”



师：“我把波形切一刀，把一些尖儿砍下来填坑里，这样一来就‘平均’了。切那刀口就是电压的‘平均值’。”

这个图是极不严谨的，仅作为一种形象化的示意。

我：“那么‘平均值’就是‘均方根’值？不对吧？”

师：“电压的‘平均值’不是‘均方根’值，但是如果我们把‘能量’给切一刀平均一下，就能得出‘均方根’值。‘能量’怎么计算来着？”

我：“算功率呗。功率是电压乘电流，能量的话就再乘时间。”

师：“如果只考虑电压和能量关系，那么功率  $P=U^2/R$ ，然后乘时间。”

我：“这里有个平方，均的是这个方？”

师：“我们把一个电炉插在插板上，放一壶凉水，假设 10 分钟后水烧开了。现在我们换直流电接这个炉子，同样的一壶水也是 10 分钟后水烧开了，你说这个直流电应该多高电压？”

我：“二百二！这个直流电是 220V。我碰见死耗子了吧？”

师：“能与交流电产生同等效果的直流电压值，就是此交流电的‘有效值’，记做  $V_{rms}$ 。这个  $V_{rms}$  和峰值  $V_p$  之间的关系是： $V_p = \sqrt{2} V_{rms}$ 。你算一下插板的峰值。”

以上并非给出“有效值”的严谨的定义，仅作为一种理解。有效值与峰值之间的倍数关系是对的。

我：“峰值是  $220V \times 1.414 = 311V$ 。”

师：“好了，关于二百二的插板我们就谈这些，下面我们还要说说‘变化的信号’。”

我：“我还听说有三百八的交流电，我爸厂子里用的就是这个。”

师：“那是三相的交流电，工业用的，也叫‘动力电’，这说起来话就长了。”

我：“我随便问问而已，话长就先不要说了，继续今天的内容吧。”

师：“你听说过 110V 的交流电吗？频率 60Hz 的？”

我：“知道。有些国家用 110V 的交流电，日本应该是 110V。”

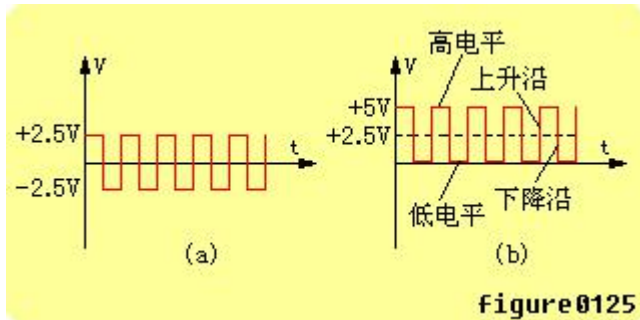
师：“三相交流电在大学的《电路》课程中可以学到。我们后续的学习中用不到的。”



师：“你刚才收的那个图（figure0123）中有个‘方波’信号，那是我们今后遇到的最多的信号。”

我：“这和二百二交流电的区别很大吗？波形是不一样，峰值也可以 300 多伏啊？就只是波形不同吧？”

师：“那你再看看这个图吧（figure0125），图（b）和‘交流电’区别巨大。”



我：“波形的‘中点’抬高了 2.5V，这就算‘区别巨大’？没看出来。”

师：“图（b）画的可是‘直流电’，你还说区别不大？你再想想吧。”

我：“懂！电压的‘方向’没有掉个儿的时候，只是电压值在改变。所以不是‘交流’的。”

师：“这算是一种‘脉动’的直流。它也有‘峰值’，这个图上是 5V。每一个‘峰’我们称之为一个‘脉冲’。”

我：“你这个 5V 的峰值不就是我们以前提到的‘高电平’吗？也就是 1？”

师：“是的，波峰的 5V 是高电平，或者说数字 1；波谷的 0V 是低电平，也就是数字 0。每个脉冲还有两面‘峭壁’。”

我：“竖着画的两条线就是‘峭壁’？”

师：“脉冲左侧那根竖线表示从低电平跃到高电平，它被称为‘脉冲’的‘上升沿’。”

我：“右边那根竖线就叫‘下降沿’喽？”

师：“所以一个‘脉冲’包括两种电平和两个边沿，这是我们以后经常要使用的重要概念。”

我：“那电平先处于+5V，然后下降到 0V，再返回到+5V，这是不是脉冲？”

师：“是啊，这也是一个脉冲，常称为‘负脉冲’。”

我：“那先上升后下降的叫‘正脉冲’？这都是一回事吧？”

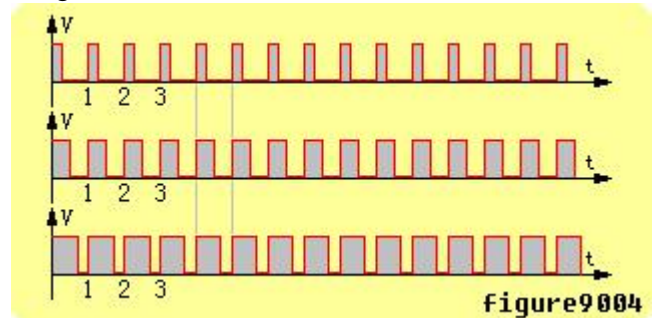
师：“是的，其实更多的时候我们关注那两个边沿。”

我：“那些‘锯齿波’和‘三角波’之类的肯定就没这些概念了？”

师：“你还真聪明，这都让你看出来啦？那些信号我们目前不会用到。”

我：“你就别寒碜我啦。这是秃头上的虱子——明摆着。”

师：“再来一个图吧，看看这些波形有什么异同？（figure9004）”



我：“这些个波，好像周期是一样的，但是波形不一样。”

师：“你还能看出周期相同？这有点难度。我这可不是寒碜你。”

我：“有啥难度，用鼠标描一下，看着差不多。这些个波的有效值也不一样吧？”

师：“你小子还真有两把刷子，这也看出来啦？说说你是怎么想的？”

我：“有脉冲时电压是 5V，就是有电，无脉冲时电压是 0，也就是没电。那么同样长的时间（一个周期）内有电的时间越长能量当然也越多了。”

我：“所以说脉冲比较宽的那个波形有效值就比较高。”

师：“非常好。一个周期的总时间被高低两种电平瓜分，高电平占的时间我们叫它‘脉冲宽度’，简称‘脉宽’，高电平占的时间与一个周期的总时间有个‘比值’，这个‘比值’我们叫它‘占空比’。”

其实从“低电平”的角度去说也无不可，只要大家统一标准就行。现在的标准都是以高电平来说的。

师：“这三个波形中，中间一个高低电平各占半个周期，所以占空比为 50%，上面的是 25%，下面的是 75%。”

师：“那么一个占空比为 100%的‘方波’波形是什么样子的呢？”

我：“那不就成了了一根水平线了吗？还会有‘波形’吗？”

师：“好啦，关于交流电和这些变化的信号我们就谈这些了。我得走了。”

我：“小别胜新婚，你悠着点。”

师：“我说你这知识面怎么这么宽呢？自学能力也太强了吧？”

我：“没两把刷子哪敢拜您为师啊。”

师：“行，我的学生都有获得诺贝尔医学生理学奖的潜质。下回我们要讨论电容器，我撤了先。”

我：“晚安。”

这回总算对“发电机”有了点初步印象了，真的不是两根绳子吊一根铜棒在磁铁之间摆来摆去啊。居然是绕个线框在磁铁之间转，还弄了两个环和电刷把电流引出来。原来以为老爸学的机械制造专业太老土，现在看来也不是诶，至少这个发电机的结构还真挺巧妙的。

不过这发电机只能发交流电么？它有没有可能发出直流电来？我倒是能想到一个办法：当线框转过半圈之后让 A/B 两个电刷交换一下位置，这样虽然后半圈电流方向反了，可两个电刷也反了，这不就是负负得正吗？当然我这也是胡思乱想，我哪晓得弄个啥结构让电刷能自己换位置啊。

这个“有效值”我感觉 C# 没给说明白，这真的就就是“能量的平均”吗？确实功率  $P$  中有个电压的平方，这一平方之后单位就不能是“伏特”了吧？可“有效值”的单位仍然是“伏特”，难不成功率  $P$  还要开个方？这“均方根”三个字到底有何来历呢？

这种事大概都要问谷歌了，我搜了下“均方根”，得出的答案是“**将  $N$  个项的平方和除以  $N$  后开平方的结果，即方均根的结果**”，这似乎是个从数学角度给出的说法。在另一个博客页面上给出了交流电的均方根值的说法，是“**周期电压  $u$  的平方在  $0-T$  上的积分值除以  $T$  后再开方，所以又称均方根值**”，这一出来“积分”我这水平的就没法办了，好在人家又有个简单的说法：“**先平方，再平均，再开方**”，要这样来看把它理解成“能量的平均”倒是直观一点。不过有一个结论是大家都认可的：“**交流电压  $u$  在电阻  $R$  上一个周期内所做的功与直流电压  $U$  在电阻  $R$  上同时间内做的功相等，则称此直流电压的量值为此交流电压的有效值**”，C# 没有强调“一个周期内”，他说的是“十分钟水烧开”，算是同一个意思吧。

至于图（figure0125-b）中那个方波，把它的中点提高 2.5V，这要怎么做呢？难不成是不久前提到过的，叠加原理？把交流信号叠加到 2.5V 的直流电压上？这要怎么连接电路才能把它们叠上呢？对于图（figure0126）中这 3 组波形，它们的峰值相同但有效值是不同的，这是因不同的“占空比”导致的。由此也可以看出“有效值”并不是只针对“交流”而言，这些波形不算纯粹的“交流”啊。

## 2005-06-01：认识电容器（一）

“电容”这个东西似乎并不复杂，在 GOOGLE 上搜了下“电容”，诸多广告之中找到一些技术类的页面。大略看了下，一个“电容”无非是上下两块金属“极板”中间夹着一层绝缘体而已（figure0126）。两块“极板”上各自引出一个“引脚”，用来连接到电路之中。就这么个东西会很难吗？

多翻了一些页面，发现了有介绍电容器的分类和用途的站点，打开看了下，电容器的类别有“陶瓷电容”、“涤纶电容”等等门类，这大概是按制造电容器所用的材料来分的吧？当初讨论电工材料的时候都说过这些东西的。至于电容器的用途，那些什么“滤波”、“退耦”、“隔直”之类的术语就完全地不明所以了。搞不清楚一个毫无基础的菜鸟该如何通过这些杂乱的页面来学习呢？

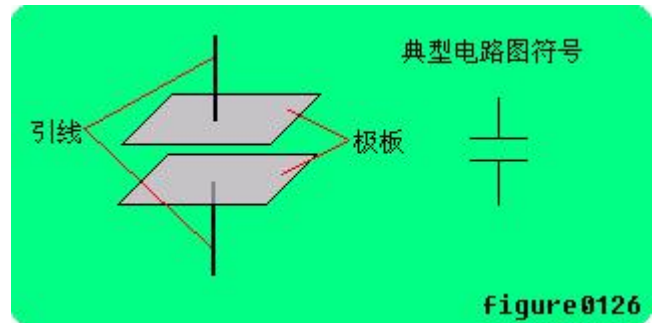


figure0126

师：“节日快乐，孩子。”

我：“我有个故事，你听不听？”

师：“孩子的故事当然要听，说吧。”

我：“小白兔抓着绳子爬山崖，大灰狼拿着一根点着的蜡烛站在上面说：‘我要把绳子烧断摔死你！’小白兔急中生智说了一句话，结果大灰狼马上把蜡烛吹灭了。问小白兔说了句什么话？”

师：“祝你生日快乐！哈哈。”

我：“哈哈，你听过这个故事啊？”

师：“你师母不久前刚讲过这个故事，当时没听明白。”

我：“你这怎么行呢？师母的生日你都敢忘了？跪搓板还是跪电路板了？”

师：“哪有！说正事吧，今天要谈一下电容。这个比电阻麻烦得多。”

我：“不至于吧？不就是俩极板中间夹一层绝缘体吗？”

师：“要说成‘中间夹一层绝缘介质’，用词要显出一点‘专业’来。”

师：“电容的结构简单，它通上电可就麻烦了。你收个图先。（figure0127）”

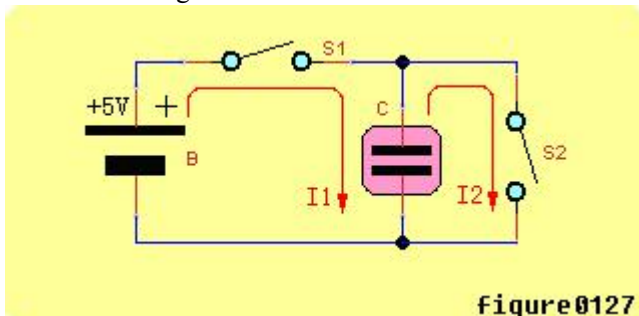


figure0127

我：“你用的电路图符号太特殊了，电容加个外框干嘛？”

师：“我喜欢弄得好玩一点，其实有两根短横线表示两个极板就行了。”

我：“这俩开关怎么弄？”

师：“我们要研究开关 S2 断开时 S1 闭合后电路中电流的流动情况。”

我：“不是吧？怎么会有电流？那电容中间夹着绝缘介质啊？”

师：“开关 S1 闭合的这一‘瞬间’，电源的正极就要把导线和电容上极板的自由电子吸过去，有自由电子的定向运动线路上就有电流。”

我：“我还以为是连续的电流呢，敢情电流  $I_1$  只是‘瞬间’出现。”

师：“一瞬间也是一段时间，这个瞬间的长短和电容极板的面积有关系，越大个的极板能供出越多的自由电子，这一瞬间就越长。”

师：“另一方面，从导线和电容上极板上取得的自由电子马上被电源运输到负极，从那里流动到电容下极板上储存起来。”

我：“电容下极板平白无故地多了一堆自由电子？”

师：“怎么叫‘平白无故’？都说了是电源推着这些电子去电容里的。”

师：“毫无疑问电容上极板是很想把失去的电子拉回来的，但它是斗不过电源的，它只能试着透过绝缘介质从下极板上把电子拉回来。”

我：“它也斗不过那层绝缘介质对吧？”

师：“它是否斗得过那层介质要看电源电压有多高了。如果电源电压超高那么介质就可能‘击穿’。”

我：“噢？这里面还有狗仗人势？我想起了上楼板上的那条狗。”

师：“这儿谈正事呢，你别打岔！”

我：“上回虎子叫得太厉害，把我们家给击穿了，我们楼下的找上去了。”

师：“别老提虎子，我让你搅得我想从哪儿说来着？”

师：“当电路中的电子不再运动了，我们把开关 S1 断开，这时缺少电子的上极板仍然保持着对下极板上多余电子的吸引。”

我：“这时电容好像是一个电池？”

师：“是的，所以当我们把 S2 开关接通，上下两个极板就短路了，下极板上的电子就会通过 S2 被吸回上极板。”

我：“所以这一瞬间导线上有电流  $I_2$  的，电子全回去了电流也就没了？”

师：“就是这个样子。S2 接通这个过程叫做电容器‘放电’，S1 接通电源的那一瞬间叫做‘充电’。”

我：“这个我了解了，也不是很难啊。”

师：“必须要注意的是，电容放电时电流总是从电压高的极板流向电压低的极板。总是从一个极板到另一个，不会跑到其它什么地方。”

我：“我都说了它像是一个电池嘛。”

师：“现在我们重新断开 S2 接通 S1，电容器充电后，我们把开关 S1 也断开，这时电容器的上极板对下极板有一个+5V 的电压，这不难理解吧？”

我：“还行。上极板的电压最多到 5V，不可能比电源还高。”

师：“如果我们不把 S2 接通，电容器上的这个 5V 电压就会保持住。”

我：“没有放电的通路吧？可这能保持多久呢？”

师：“理论上永远保持着。实际上不能，能保持一段时间。我们把这个现象称为‘记忆’。你把一个‘1’输进电容器，它会记住你给了它一个‘1’，过一会儿才‘忘掉’。”

我：“哈哈，这离‘计算机’有点近了。”

师：“计算机广泛使用的一种‘存储器’利用了电容的这个‘记忆’力，我们以后会了解到。”

师：“现在我们在电容器没有失去记忆之前再次接通开关 S1，这时导线中就没有电流流过。”

我：“这个电容上极板电压是 5V，和电源一样，所以没法有电流。”

师：“这个电容上次充的电没有放，所以也就不会再有充电过程。”

我：“想再充，必须先放？”

师：“是，想看到一次电容的充电过程，必须把它已经充的电放了。放电并不一定短路上下极板，把电源倒过来也可以。”

我：“把电源负极接上面正极接下面？”

师：“是的，这时电容下极板上的多余电子会被电源搬到电容的上极板上。”

我：“不只是多余的电子吧？还有本来就属于下极板的电子也会被电源搬走。”

师：“对，电源的极性一变电路中就重新有了电流，但是电流的方向有变化。如果电源的极性总是不停地变来变去，那么两根导线上就总有电流，一会儿从左向右，一会儿从右向左。”

我：“你想引到‘交流电’上去对不对？你就直说好了，何必这么绕呢？”

师：“对，我是想说‘交流电’的。一个交流电源接一个电容，尽管电容两极板间是绝缘的，但是我们仍然可以在线路中观察到交流电流，好像那个层绝缘介质没起作用一样。”

我：“实际上电子确实是被绝缘层挡住了，只是我们在线路上的观察碰巧不受影响而已。”

师：“所以我们可以‘认为’交流电能穿过电容器，尽管电子真的穿不过电容器。”

我：“这个有点意思。就是说电容器是‘通交流，

断直流’的？我 GG 到‘隔直’电容这个东西，就是这个意思？”

师：“你对‘隔直通交’的理解还很初级，并不完善。以后慢慢来吧。”

我：“这家伙，电容这道儿还深了去了？”

师：“可以先给你曝点料：电容对交流也是有阻碍的，不是百分百畅通无阻。”

我：“电容对交流电也有电阻？”

师：“你这说法不对，电容是电容，电阻是电阻，两码事。”

师：“电容对交流电的阻碍称为‘抗’，它的计量单位也是‘欧姆’，但它不是‘阻’。”

我：“那我就放狗搜下‘电容抗’吧。”

师：“待会儿再放狗。我们下面对电容做点定量的讨论，不能总是定性。”

师：“首先是电容的‘容量’，如果把电容上极板上的 1 库仑电子搬到下极板上，这时我们测出两极板间的电压是 1V，那么我们说这个电容的容量是 1 个‘法拉’，用字母‘F’表示。”

我：“‘法拉’？不会是以‘法拉弟’的名字命名的吧？”

师：“应该是，我没查过这个单位的由来。你小子还知道‘法拉弟’？你倒没说是‘法拉利’！”

我：“你也不能太贬低我啦，我有那么俗吗？”

师：“‘法拉’这个单位是很巨大的，更常用的单位是‘微法（ $\mu\text{F}$ ）’，‘纳法（ $\text{nF}$ ）’和‘皮法（ $\text{pF}$ ）’。”

我：“不是吧？起步就是一百万分之一法拉？难道就没有容量 1 法拉的电容？”

师：“有。那已经算是‘超级电容’了，并不常用。”

超级电容也称为“法拉电容”，它的最常见用途真的是当做电源（电池）的。

师：“好了，这个  $C=Q/U$  是对电容的定义，如同  $R=U/I$  一样。实际上制造出来一个电容器，它的容量是由极板面积、极板间距离和绝缘材料是什么之类的条件决定的。”

我：“就像电阻，是由导体的长度、横截面积和电阻率‘肉’决定的。”

师：“就是这样。简单来说极板面积越大，电容量就越大；而极板距离越近，电容量也越大。这可以解决电容器串并联的问题。”

我：“串联后总电容增大？并联后总电容减小？”

师：“正相反。电容可不是电阻。两电容并联后相当于极板面积增大了，此时电容量增大。”

我：“这么说俩电容串联起来电容量反而要减小了？”

师：“是，电容串联之后相当于两极板距离增大了，所以电容量变小。”

我：“这个不明白。怎么叫‘相当于两极板距离增大’？”

师：“我要不说‘相当于两极板距离增大’，只告诉你两电容串联后总容量变小，那么你也就不问这问题了，对不？”

我：“我也很想不求甚解，可你非要多说啊？这不



能怨我。”

师：“两电容串联，那么一共有 4 片极板两层绝缘介质，你可以无视中间的两片极板，这样一来就成了上下两片极板之间夹两层绝缘介质了。于是极板间距离就增大了。”

我：“这不是个‘原理’吧？凭什么无视中间的极板呢？”

师：“嘿嘿，跟你交一实底，我当初学习电容器的时候就弄不清为何可以无视中间的两片极板。”

我：“我实在受不了你了。这事儿我如果自己弄明白了我是不是可以给你当老师？”

师：“可以啊。我可以拜你为师重新学习电容器。我们本来就是‘平等’的。”

我：“恐怕我没机会搞清楚这件事了。我想这个东

西肯定不重要。”

师：“你为何会有这样的想法？”

我：“如果这个十分重要那你早就把它研究清楚了。实践中应该不需要知道为何可以无视中间的两个极板，只要知道俩电容一串总容量变小就够了。”

师：“呵呵，从实用角度来看是这样的。其实我们很少把电容串联使用。”

有一种特殊情况会用到电容串联，我们后文会提到。

师：“好了，最后是串并联后总容量计算公式，我们以两个电容为例。两电容并联： $C_T = C_1 + C_2$ ；两电容串联： $C_T = (C_1 \times C_2) / (C_1 + C_2)$ 。下课喽。”

我：“师母来催你了吧？你得有点男人的气魄才行，不要理她。”

师：“权衡了一下，还是不要理你更有利。拜拜了。”

首先放狗去搜“电容 抗”这两关键字，我查到了一个新的关键字：“容抗”。继续搜这个关键字，找出了对“容抗”的一种解释：“**由于电容器的不断充电、放电，所以电容器极板上所带电荷对定向移动的电荷具有阻碍作用**”，这种解释，多少让我有些困惑，怎么就阻碍了呢？我怎么就觉得没有阻碍呢？好在我已经习惯了这种困惑，先死记硬背一下，在不理解之中加深理解吧。

不仅搜到了“容抗”，我还搜到了“阻抗”和“感抗”，难道说电阻对于交流电也不能叫阻而必须叫抗？再搜“阻抗”一词才知电阻对于交流电而言仍然叫电阻，只是当电阻和电容同时用在电路中时，它们对交流电的阻碍作用合在一起叫“阻抗”。至于“感抗”，那是“电感”对交流电的阻碍作用，这个电感咱还没学到呢。

“容抗”是与电容的容量和交流电的频率相关的，我不愿意去背那些公式，这里边有什么“角频率”之类的说法，好像还用到了“复数”，这没法继续扩大搜索范围了，再搜指不定又出什么新的关键字。不过大体上可以定性记点结论：“**电容量越大容抗越小，交流电频率越高容抗越小。**”这应该够用了吧？

再搜“电容 串联”，搜到的内容也无非就是“电容串联相当于两极板距高增大”之类，看来真的可以不必去管中间的那些极板要怎么看了。不过有一项内容引起了我的注意：电容串联后的“耐压”怎么算？C# 说如果电容两端的电压过高会把介质击穿的，那么“耐压”就是确保介质不击穿的电压吧？这肯定也要降额使用吧？我想俩电容串联后总耐压应该是俩电容耐压之和，和二极管类似的。然而搜到的一些页面似乎不支持我这种看法，这里又有哪些门道儿呢？

最后，又搞清楚万用表上那个标了“F”的区域有何作用了，这个“F”就是“法拉”嘛，这些档位是测量电容器容量的。

## 2005-06-04：认识电容器（二）

今天是个特别的日子，至少我 MSN 上有几个网友是这样认为的，比如空姐 MM。我叔以前也认为这一天很重要，我老爸对此不以为然，在我爸看来，没有什么比安安宁宁地过日子更重要的了。现在似乎俺叔也被老爸同化了，每天忙着赚钱，乐此不疲。搞不明白老叔当初为何那么激情澎湃，难道说，他当初那么激情，也不过就是为了能赚大钱享受生活吗？

我登上 MSN 时碰巧空姐 MM 在网上，似乎，她很忙诶？

我：“忙啥呢？今天还挺早的你？”

云上漫舞：“我在看一组图片。”

我：“又上黄网？这东西看多了会减弱欲望的。”

云上漫舞：“你个小屁孩儿不好好念书，每天琢磨这干嘛？看过不少黄网吧你？你不举了吧？”

我：“我这么纯洁又有才华的帅哥怎么会上黄网？很多 MM 巴不得给我发裸照呢。给个链接吧，我也看两眼。”

云上漫舞：“是一个论坛，贴了好多和十六年前的今天有关的图片。”

我：“哦？我有所耳闻，那年夏天你都干什么了？快点交待！”

云上漫舞：“那年夏天我和一帅哥撒尿和泥来着。”

师：“你早啊？折腾什么呢不理我？”

我：“今天是个特别的日子。那年的今天你都干什么了？”

师：“那年？那年我只是个小屁孩儿而已。想去瞧热闹被家长按住了。”

我：“那太遗憾了。俺叔儿去了，俺老爸没按住他。嘿嘿。”

师：“也没啥遗憾。现在想想没去反而对了。”

我：“你们这些成年人好奇怪啊？好像都活在莫名其妙之中。”

师：“何出此言呢？”

我：“俺现在的叔儿张口闭口都是‘坚决拥护中国共产党的领导’，说这话还满面红光的，跟那什么似的。”

师：“到底跟哪什么似的？哈哈，不要背后说长辈的坏话！”

云上漫舞：“回帖瞬间上三百了，此贴必火。”

我：“你倒是让我看看啊？快发链接！”

师：“好了，我们今天来讨论一下以后我们可能用到的一些电容元件。”

我：“就是那什么‘陶瓷电容’？”

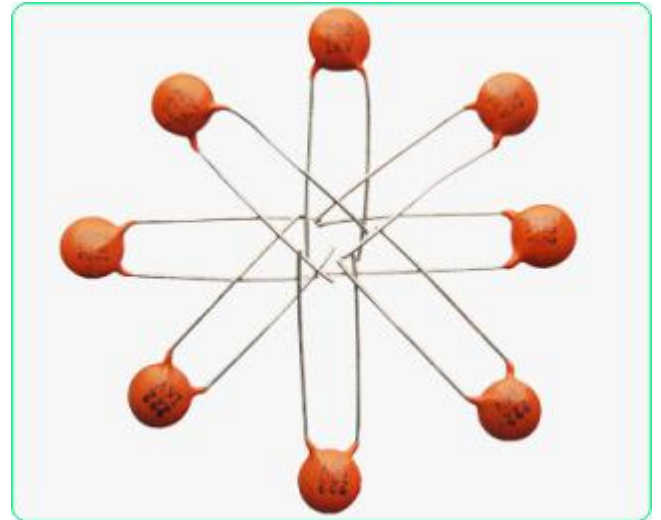
师：“那是我们常用到的一种。电容器这种元件通常按‘介质’的材料来分类。”

我：“那就是说所谓‘陶瓷电容’是指绝缘介质为陶瓷材料？”

师：“对，就是陶瓷圆片两面镀上金属当极板，然后引出管脚，再包上保护材料。这也叫瓷片电容，收个图片。”

我：“这种电容很二吗？怎么是‘222’？”

师：“这是电容量的一种表示方法，前面两个数是有效数字，第三个数是 10 的几次方。”



我：“是 22 乘 10 的 2 次方？”

师：“单位是‘皮法’。图上是 2200pF 的。”

我：“陶瓷电容恐怕容量很小吧？显然极板面积做不大。”

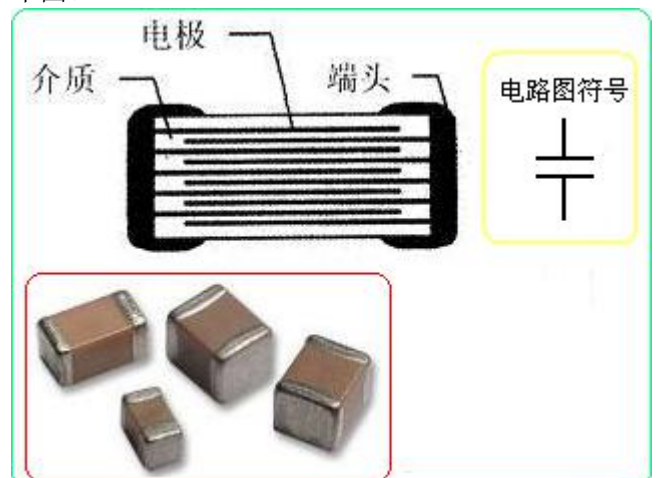
师：“对，瓷片电容的容量从几个‘皮法（pF）’开始，到 0.1‘微法（μF）’，这之间最常见。”

我：“这么小啊？这有啥用啊？”

师：“听你这话好像电容越大才越有用？”

我：“陶瓷电容不能做成大容量的吗？”

师：“能，可以做成‘多层陶瓷电容’，看一下这个图。”



这里给出的电路图符号并不特指多层陶瓷电容，一般电容器都用这个符号。

师：“其实就是相当于把多个非常薄的陶瓷电容并联起来做成一体的。这个也被叫做‘独石电容’。容量能大到 10‘微法（μF）’。”

我：“才 10 ‘微法 ( $\mu\text{F}$ )’ 啊？还以为能做多大呢。”

师：“除了陶瓷之外，另一种常用的绝缘介质就是纸。”

我：“我们以前讨论绝缘材料时说过纸，在这儿用上了？”

师：“纸介电容在以前是常见的，现在似乎不常用了。”

我：“那又是老掉牙的内容了？像那个‘点接触’二极管？”

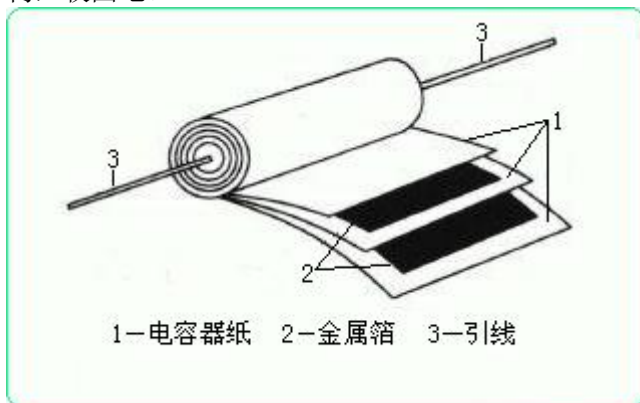
师：“纸介电容现在虽然少见，但它的结构很有意思，你必须了解。”

我：“是一张纸片两面弄上电极吗？”

师：“你还真会借用？刚说了陶瓷电容就用在这儿了？”

我：“难道是‘多层纸介电容’？”

师：“别瞎联想了。纸介电容用了一种‘卷绕’结构，收图吧。”



我：“三层纸加两层金属箔，把美味和营养，卷一起来——来！”

师：“康师傅蛋卷是吧？你闹馋虫了你？”

师：“实际上很多种类的电容都用这种卷绕结构，我们可以把纸换成一种布，比如‘的确良’，学名是‘涤纶’，然后卷成‘涤纶电容’。”

我：“保鲜膜也能卷成‘保鲜电容’了？”

师：“塑料薄膜确实被用作电容的介质，比如‘聚丙烯’薄膜电容，在‘Hi-Fi 音响’界很受推崇。”

我：“你是说‘发烧音响’吧？听说过这词儿。不明白为什么叫‘发烧’呢？”

师：“能卷起来的介质都会卷起来，而之所以要卷，其实是想把电容做的体积小点而容量大点。”

我：“大了半天才 10 个‘微法 ( $\mu\text{F}$ )’，有没有大到 1 ‘毫法 ( $\text{mF}$ )’ 的？”

师：“有啊，电解电容可以做到 1000 个‘微法 ( $\mu\text{F}$ )’，10000 个‘微法 ( $\mu\text{F}$ )’ 也不在话下。”

我：“电解？这不是化学上的概念吗？”

师：“这种电容用一条铝箔做一个电极，另一个电极是一种化学溶液，称电解液。”

我：“那戒指呢？让谁带走了？”

师：“阳极铝箔预先做‘氧化’处理，表面形成一层‘三氧化二铝’，这个氧化层是‘介质’。”

我：“这个‘电解液’也能卷起来吗？”

师：“是的，我们用一种特别的纸浸湿电解液，然后一层铝箔一层纸这样叠起来再卷绕，引出引线，再

装进外壳中密封。”

我：“这个是多层的？难怪容量大。”

师：“它容量大有特殊的原因。铝箔表面并不光滑，而是预先腐蚀成坑洼不平的粗糙面，这样一来它的‘实际表面积’可就大了很多。”

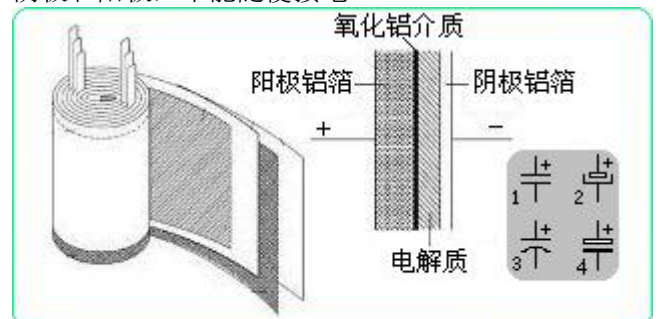
我：“打住！这个我得琢磨琢磨。”

表面如果坑洼不平，则实际表面积就很大，我想这可以用“地上挖坑”来解释：一块长宽各一米的地面，平地的话只有一平米的面积，如果挖了一个 1 米深的方坑，那就多出了四个“墙壁”，加上底面就成了五平米的表面积了。

我：“这个我想明白了，就是把平面变成立体的了。”

师：“因此这种电容容量大的主要原因是极板的‘实际面积’很大。”

师：“电解电容有一个重要的特征，它两个引脚分阴极和阳极，不能随便接电。”



带有氧化铝介质的铝箔是阳极，电解液是阴极。以后我们总将电解电容称正负极，而将二极管称阴阳极。4 个常见电路图符号中除“1”之外其它 3 个经常不标出表示阳极的“+”号。

我：“你不会又要扯到‘矿石收音机’上去了吧？”

师：“矿石？你的意思是说‘氧化铝’有‘单向导电性’？”

我：“对啊，那个什么铝不是有‘单向导电性’吗？这层‘氧化铝’也是这样吧？所以接电时要保证接它不导电那个方向，这样它才相当于‘绝缘介质’啊？”

师：“你这个理解很独特啊？通常的解释是不同的接电方向会导致氧化铝与电解液之间发生不同的化学反应，正着接氧化铝介质会加强，反过来接电氧化铝层会溶解掉。”

我：“溶了之后就变成直接短路了？”

师：“不是短路，这个过程会产生很多的气体，而外壳又是密封的，所以就会‘砰’的一声。”

我：“这个会爆炸呀？会造成伤亡么？”

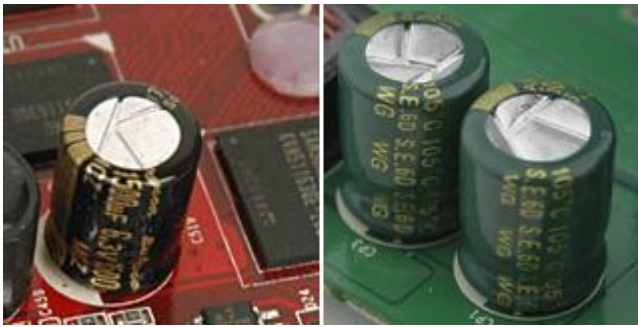
师：“伤的话算你倒霉，亡的话，你也太倒霉了吧？”

我：“电容有风险，接电需谨慎。”

师：“你不接错极性就没问题。电解电容头顶一般会刻上‘防爆槽’，不至于很凶险。”

师：“你收个图片，这都是电解电容，你可以看看它头顶上刻的花。”





我：“好像是个字母‘K’？”

师：“也有字母‘T’、‘X’和‘Y’形状的。”

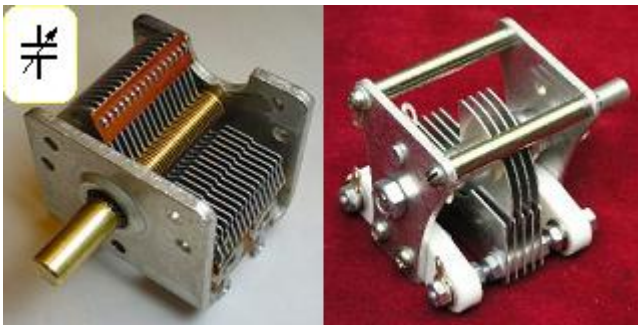
师：“好了，说了许多能卷绕的电容，最后还要说一种不能卷的。”

我：“玻璃怎么样？我认为这是一种很好的绝缘介质。”

师：“我不想说玻璃，尽管确实有一种‘玻璃釉’电容。我想说‘空气’。”

我：“想起来了，我们以前讨论的第一种绝缘体就是空气。”

师：“两片极板，中间隔着空气，这就是电容。实际上我们常用多片极板。”



我：“这个就叫‘多层空气电容’吗？”

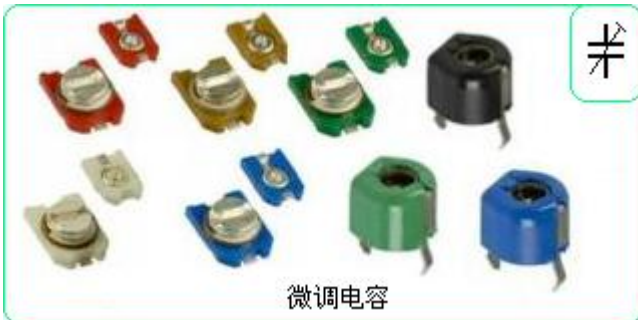
师：“这个叫‘空气可变电容器’。它一组极板装在一个转动轴上。把轴一转，两组极板相重叠的部分面积就变了，所以电容量可变。”

我：“这样来看电容量只跟两极板相对着的那部分面积有关啊？”

师：“嗯。这种电容用得不多，在一些无线电台中有使用。现在收音机里调台用的可变电容不是空气介质，而是塑料薄膜介质的。”

我：“原来收音机里调台是用可变电容？调音量是电位器吧？”

师：“对，这种电容如果把体积做的比较小，那就成了‘微调’电容。收图。”



微调电容

我：“这东西在计算机上怎么用？”

师：“计算机中顶多会用到微调电容，可变电容是不会使用的。”

我：“那你讲这个干嘛？还以为能用它调计算机的快慢呢。”

师：“既然说了电位器，那也要说说可变电容嘛。”

师：“好了，最后我们谈几个关于电容器的性能指标，首先是容量的标称值。”

我：“又是那个 E24 和 E96 之类的数字？”

师：“是的，不过电容器的容值不大容易做得很准，误差通常较大，电解电容误差尤其大。”

我：“这个可以理解。电解电容那个极板面积不那么容易做准。”

师：“所以很多时候电容器的容值使用 E12 系列标称值，甚至 E6 系列。”

我：“整个儿就是一没谱儿，电容得蒙着用？”

师：“也有精度高的，比如聚丙烯薄膜电容就有高精度的。电容误差允许多大还是要看用途。”

我：“我还想了解一个名词。”

师：“电容器还有另一个指标就是耐压，这是指那个介质在多大的电压之下是保证不会击穿的，超过这个电压就不保证了。”

师：“你了解什么名词？”

我：“呵呵，就是这个‘耐压’。这跟绝缘介质的材料有关系？”

师：“有啊。通常像陶瓷啊涤纶啊之类的耐压都在几十伏到几百伏，有的高压电容可到上千伏。”

我：“你没提电解电容，这个氧化膜看来是不牢靠。”

师：“你真机灵。电解电容的耐压通常为 6.3V，10V，16V，25V，35V 和 50V，更高耐压的也有，但用的不多了。”

这组数字总会让人奇怪，6.3 是怎么来的呢？你是否又联想到 E12/E24/E48 了呢？但 6.3 不是这些系列中的值。这应该是个独立的数字序列，我没考证过这数系的由来，但你应该能想到各种电容的耐压应该都是这一系列数字乘上  $10^n$  的。

师：“第三个指标就是漏电了，充满电的电容如果和电源断开，它充着的电会慢慢漏光。”

我：“还以为又会电死人呢。我想电解电容肯定容易漏电？”

师：“又被你蒙到了，电解电容漏电流确实比较大，呵呵。”

我：“呵呵，看来这个电解电容除了容量大之外一无是处？还有什么其它缺点没有？”

师：“有啊，它不能耐高温，这个好理解吧？”

我：“电解液会‘开锅’是吗？不会用烙铁一焊就完蛋吧？”

师：“当然不会那么弱了，不过它不能总在高温环境下连续工作。它的温度指标常分两档：+85 度和 +105 度。”

我：“+85 度表示它能在 85 度以下的环境中长期工作？这个比我强，我耐不住 85 度。”

师：“呵呵，你可以看看你电脑主板上的电解电容，在 CPU 散热风扇旁边的几个是经常被烤着的。”

我：“电解液会不会被烤干了？密封的按理说不会



蒸发。”

师：“会的，电解液迟早会干的，所以电解电容有寿命限制。不过倒是不短。”

我：“长了也没用，能挺个三四年就差不多，我这电脑过不了三年就会换了。”

师：“不单是有寿命，你买个 100 $\mu$ F 的电解电容，放了三年不用，它的容量可能只剩 70 $\mu$ F 了。”

我：“就这么放着电解液也会干吗？”

师：“那层氧化铝膜会慢慢退化。不过你给它正确通上电之后氧化膜又增强了，容量会恢复。”

我：“看来这个电解电容器的门道儿很深啊？想制造的很好不容易吧？”

师：“是不容易。我有个 PDF 发给你，你收一下。有空儿自己看看，我要走了。”

我：“好吧，我一会儿看看。”

空姐 MM 的精神头儿挺足的，现在还坚守在线上，看来帅哥的吸引力很大，肯定不是被那一堆图片和几百跟贴吸引住的。

我：“还在看贴？把那链接发给我啊。”

云上漫舞：“发什么发？贴子已经给删除了。你还不撤？”

我：“那你直接把图片发给我，你硬盘里能找到的。”

云上漫舞：“我没保存啊？我上哪儿找去？”

我：“电脑自动给你保存了，你看过的图片电脑通常都自动给你存一份。”

云上漫舞：“天啊！那我以前看过的图片这电脑上都有啊？这有点夸张了吧？”

我：“哈哈，我就知道你上黄网，这回漏底了吧？”

空姐 MM 是个技术盲，我想她周围的人大概也是。只要她没把电脑送出去修理过，恐怕没人知道她到底看过什么图片的。费了半天劲总算教会她如何查找浏览器自动保存的图片了，她居然嫌麻烦不肯给我找那个贴子的图片，想必是帅哥太多应付不过来吧。

感觉电容器的原理图符号还挺复杂，特别是那个电解电容，居然有 4 种画法，就为了表达出正负极来要费这么大劲啊？显然，没有极性的电容就只有一种符号了。我觉得除了电解电容之外，其它的电容大概都没有极性，那么我在一张电路图中看见一个电容器，它到底是什么介质的呢？难道电路图上要加说明，告知哪个电容是“纸介”，哪个电容是“陶瓷”吗？

至于电解电容器那个温度指标，我现在觉得应该不是指这个电容器可以在这个温度下长期工作。要知道在 105 度的温度下电解液应该一定开锅的，产生的蒸汽无论如何会让这个电容爆掉的，这个温度值到底是啥意思呢？放狗搜了下“电解电容 温度”这两个关键字，似乎这个温度指标真的是表示电解电容器能在这个温度下长期工作诶？有点难以理解。不过我居然还搜到了电解电容器的工作温度同时还有下限的，在特别冷的温度下工作也有问题，难道是电解液会冻冰么？

关于收音机调台要使用可变电容，这我有个疑问，我当然知道一些收音机确实有个调台的旋钮，但是现在很多收音机都不用旋钮调台了，你只要按一个按键，它就会自动找一个电台出来，这又是为什么？难道还有自动可调的电容器吗？

时间不早了，C# 给的 PDF 也顾不上看了，睡觉去也。

## 本节补充说明

其实陶瓷也分不同的种类，所以陶瓷电容根据陶瓷材料的不同还可以细分，这决定了电容的性能特点，同时也决定了电容的用途。我们现在只需了解有些陶瓷电容可用于“高频”场合，与其它一般用途的陶瓷电容不太一样。这类“高频瓷片”电容有个外观特征，就是在电容顶端通常点一些蓝色（或红色）的涂料，表明这电容用的是“高频瓷”。而且此类电容的容量一般都不大，常在十几个或几十个  $\text{pF}$  左右。



高频瓷片电容

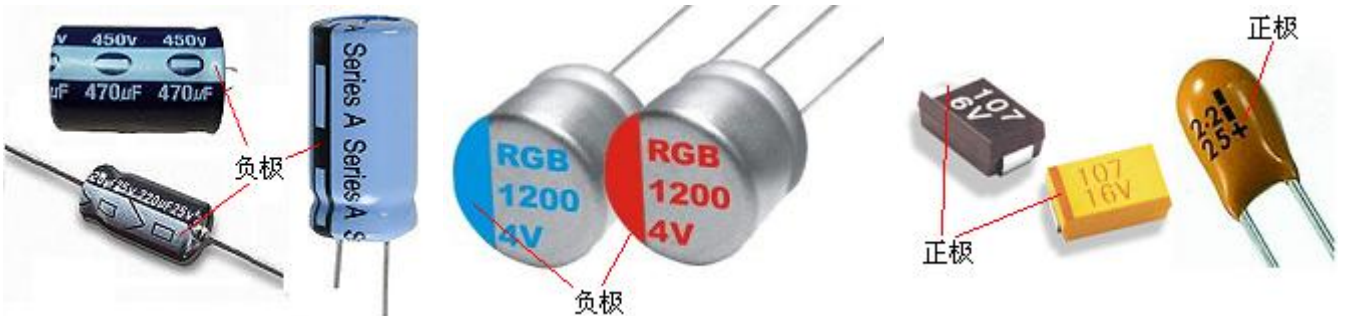


插装独石电容

我们给出的“多层陶瓷电容”的图片显示出这种电容是“贴装”的，实际上此类电容有“插装”的，但有时我们会发现此类插装电容具有这样一种结构（见上方右图，图片来自阿莫电子论坛“[www.amobbs.com](http://www.amobbs.com)”，由LCRPN网友贴出，为排版方便而做了编辑处理）。可见其内部是一个“贴装”电容引出了引脚而已，很多网友认为这是造假，其实不是，现在贴片电容产量大价格低，将其变通为插装的应用一下是很方便的，根本没必要为插装再搞新结构。

电解电容器也不是只用“铝”做电极，另一种常见的电解电容使用了“钽（tǎn）”电极，这字经常被误读做“胆”，这是不对的。“钽”电解的某些电学性能比“铝”电解要好，但它的价格较贵，且极性接错后不仅爆炸，还会有起火的情况。当然还有一种看法认为钽电容极性接错不至于爆炸起火，过压击穿时才会。这个我没有实验过，我建议你也不要去实验。另外还有一种用“铌（ní）”做电极的电解电容，这是比较少见的。

电解电容极性的标识是比较简单的，下图显示了一些常见的方式。通常插装的铝电解塑料外皮上印有一条灰白色（或黑色）的条带，上面印一个“-”号，有时还印一个箭头“>”，箭头指向的（或与此条带靠近的）引脚为“负极”。另有一些没有塑料外皮的电容会在顶端用色带指示负极。需要注意的是钽电容似乎总是标识正极，用一个“+”号或一根色带。



我们前面提到过电容“串联”应用是比较少见的，但有个特例，那就是电解电容有时会按特殊方式串联：两个电解电容把“正极”相连，各自的“负极”引出做为串联后的电容引脚。这样做可以形成一个“无极性”的电解电容。当然，把“负极”相连，各自的“正极”引出也是可以的。据说这种把有极性电容转变成无极性电容的接法被国内某大型公司申请了专利，其实你很容易从以前的电子刊物上找到这种技术的资料，进而把这项专利无效掉。但是，你得花钱才行。

对于收音机自动调台，这里不妨多说一些。早期实现此技术是利用电机带动调台旋钮转动，这主要应用于一些高档的汽车收音机中，为避免司机分心。现在使用新型的半导体器件实现此技术，但其原理仍是一个“可变电容”，只不过不用转轴带动一组“动片”了。

最后我们说一下电容器的容量如何标识，通常是“字标”，单位常用“皮法（ $\text{pF}$ ）”和“微法（ $\mu\text{F}$ ）”。对于容量  $100\text{pF}$  以下的电容，直接用数字标出容量，比如  $22\text{pF}$  的瓷片电容就直接标出数字“22”。容量大于  $100\text{pF}$  的电容常用“两位有效数字加 10 的方次”来标识，比如文中所给的  $2200\text{pF}$  瓷片电容就标为“222”， $0.01\mu\text{F}$  和



0.1 $\mu$ F 的电容标为“103”和“104”，这单位实际也是“pF”，100pF 的瓷片电容会标成“101”。有时候数字后面会附加字母，如“104K”或者“472J”等，字母大约与精度相关，我没有详细考证过。插装的电解电容直接用数字标出容量，比如 470 $\mu$ F 的电解电容就直接标出“470 $\mu$ F”，如上方右图中所示的贴片电解电容却是“有效数字乘以 10 的方次”来标的，“107”表示“ $10 \times 10^7 = 100000000 \text{pF} = 100 \mu\text{F}$ ”。具体怎么标大约全看印字是否方便而定吧。必须注意贴片的陶瓷电容通常是没有任何容量标识的，少量购买时商家都会手工在外包装上写上容量，否则你肯定没法分辨。若使用万用表测量电容量，需注意电容器往往设一个独立的插座（上图中 Cx 插座），不是用表笔测量电容器的两根引线。

## 2005-06-05：电容器的品牌

我确实不是一个粪青，只不过班上几个哈日哈韩的同学让我多少有些反感，这种反感影响了 C# 的这篇短文带给我的感受。难道我天朝泱泱几千年的文化积淀却连个小小的电容器也做不好吗？

### 名牌电容器

C++++: 2005-5-27

我们已经学习过一些电子元器件了，但是自始至终我们未着重讨论过这些元器件的“品牌”，制造这些元器件的厂商有很多，究竟谁做的东西非常“地道”呢？

半导体器件确实是要看品牌的，不过由于全球能制造半导体器件的企业比较少，可以说这些企业都是“大牌”和“名牌”，它们各自的产品虽然存在着一些功能相近之处，但都能做的“各有千秋”，或者说是“差异化”竞争。而像电阻电容，或者开关接插件这类元件，由于制造厂商实在很多，大家又难于做到“差异”，所以有时就必须考虑“品牌”，货比三家才能买到好东西。

对“品牌”的追求可能源自于“音响”界，为了追求从喇叭箱中听到最完美最真实的声音，自己制作（或者是“摩”<sup>①</sup>）“放大器”的“骨灰级发烧友”们可以说不惜血本，不要说电路中的各种元器件来自哪家厂商，甚至连“电线”都要琢磨一下“这根线里的铜是哪家工厂炼出来的”。这样说固然有些夸张，不过来自“音响”界的声音确实反应出一部分人对“选料”已经到了“偏执狂”的程度。

而不少偏执狂对音乐本身似乎不那么挑剔，倍受推崇的“试音碟”上录制的是一些打破玻璃或者擦着火柴的声音，也有很多录着不怎么为人知晓的歌手的作品，他们花费巨资所追求的即是享受这些“如天际回声般曼妙的噪音”，更有甚者仅仅是为了“分辨出火柴在火柴盒上划过了多长距离”。有时候我觉得说他们“发烧”并不为过。

在这一篇短文中，我们将着重讨论一下“电容器”的几大品牌。电阻器比较简单，容易制造得比较好，而电容器则有一些“门槛儿”，特别是“电解电容器”，想制造得很好是要一下一些功夫的。因此我们就从“电解电容器”开始。



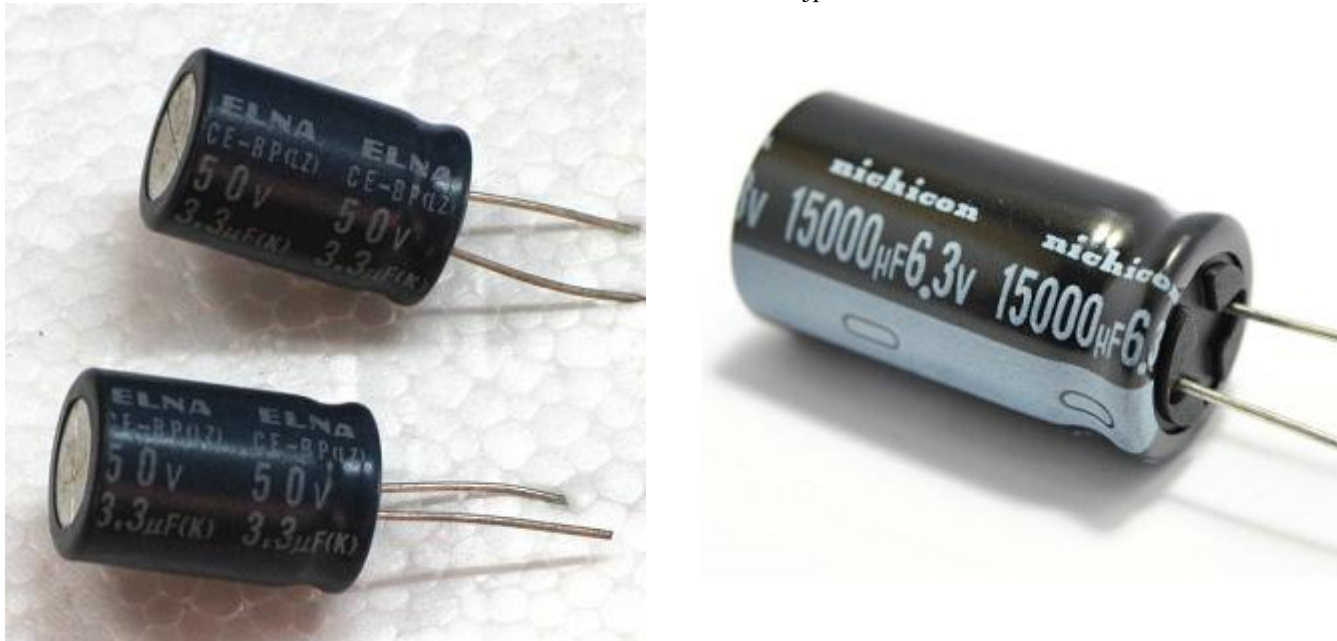
从我接触电子学的经历来看，我第一次听说的“名牌电解电容器”是“红宝石”电解电容，它的英文标识为“Rubycon”，这是一家日本企业制造的。很长一段时间我都不清楚这个牌子的电解电容究竟好在什么地方，因为很多“音响发烧友”们写的文章总是描述把放大器中的普通电解电容换成（或者说“摩”成）“红宝石”后“音质”如何如何提高了，以此反衬出“红宝石”确实和其它杂牌电容不一样，却没有人评述这个牌子的电容器制造工艺怎样先进，具体性能指标如何高超。这大约是日本人的商业秘密吧，我想很多人恐怕没有条件用仪器测出数据来说明名牌电容器的魔力，更可能没那心思。关于“Rubycon”的更多信息可以从“[www.rubycon.co.jp](http://www.rubycon.co.jp)”获得。

继“红宝石”之后，我听说的第二种名牌电解电容就是“黑金刚”，也被称作“嘉美工”，它的英文标识为

<sup>①</sup> “摩”就是“改造”的意思，英语 Modify 简写为 Mod，再音译成“摩”。

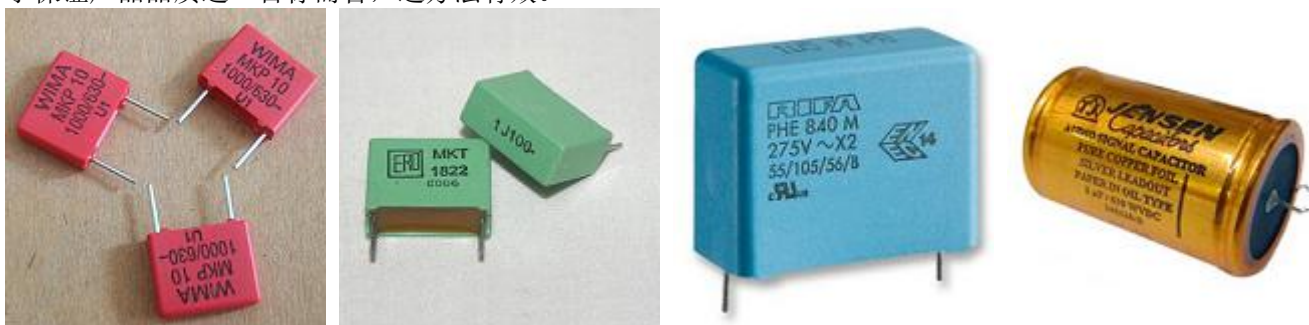


“NIPPON CHEMI-CON<sup>®</sup>”，同样的，这个牌子的电解电容究竟好在哪里我还是不很清楚，事实上我也没心思用仪器来分析这些电容的好坏，当然也没有钱置办那些仪器，最关键的是我从未真正焊出一台“发烧级功放”来。因此除了听说过这两款电解电容是“名牌”之外我其实并没有真正使用过它们，也没有亲耳体验过使用不同品牌电容器的音响放大器在音质上是否真有很大差别。说句实在话，我对自己的耳朵并没有什么信心。关于“NIPPON CHEMI-CON”的更多信息可以从“[www.chemi-con.co.jp](http://www.chemi-con.co.jp)”获得。



我在上大学的时候自己攒下些零花钱买了一块“SOUND BLASTER<sup>®</sup>”电脑声卡，一位对音响有些研究的同学指着电路板上的一只电解电容说：“这块声卡用料很不错。”那是一个 10μF 的小电容，我看了下那个电容的商标——ELNA，中文可译做“伊娜”，这是我听说过的第三种名牌电解电容器。这一时期的我对“音响”已经完全没有任何兴趣了，不过这一块声卡仍然给我留下了深刻的印象，当然，这并不是因为我听出了它发出的声音比别的声卡好很多，而是因为它使用了“ELNA”电解电容，这电容是名牌耶。关于“ELNA”的更多信息可以从“[www.elna.co.jp](http://www.elna.co.jp)”获得。没错，这仍然是一家日本企业。

还有其它一些比较有名气的电解电容器品牌，比如说“尼吉康(NICHICON)”，其网站为 [www.nichicon.co.jp](http://www.nichicon.co.jp)。又比如“三洋(SANYO)”还有“松下(Panasonic)”，这两家公司大家都很熟悉了，只是很多人不知道它们还生产“电容器”这种玩意儿。据说这些日本企业有个习惯，就是把一件电器中所用到的全部电子元器件统统自制，而不去采购其它厂商的现成产品，他们用这种办法保证最终产品的质量。这办法似乎很笨，但我觉得，对于保证产品品质这一目标而言，这办法有效。



不仅名牌电解电容器多为日本企业制造，很多优质的陶瓷电容器也由日本企业生产，比如“村田制作所”制造的陶瓷电容器就很有名，可从“[www.murata.co.jp](http://www.murata.co.jp)”网站获得相关信息。另外 TDK 的陶瓷电容器也非常不错。音响界还很推崇“聚丙烯”或“聚苯乙烯”薄膜电容器，WIMA 的此类电容相当著名，这是家德国企业，另外 ERO 薄膜电容也是一个很有名气的德国品牌，而 RIFA 薄膜电容则来自瑞典，JENSEN 油浸纸介电容则产自丹麦。与电解电容相对应，高品质的薄膜电容器似乎大都来自欧洲。

<sup>②</sup> 也有一种说法认为“黑金刚”电容指的是“尼吉康(NICHICON)”这个牌子，本文不再做考证了。

<sup>③</sup> 这是来自新加坡“创新”公司的产品，音译为“声霸”卡。此公司在早期计算机多媒体领域十分著名。

## 2005-06-08：电容与电阻（积分电路）

对于“名牌电解电容器都来自日本”这样的情况，我确实有些耿耿于怀的，今天闲来无事，上网 GOOGLE 了一下“国产电容精品”，结果嘛，说实在话，我要不搜这个心情本来还算凑合的。

九点多钟，C# 这家伙跑了上来。不知怎的，我忽然有点气儿不打一处来。

我：“国产电解电容没一个好的是吗？”

师：“有啊。我听说江苏南通江海公司出的电解电容是很不错的。”

我：“那你的短文中怎么不提呢？全是日货？”

师：“我提的全是倍受大家追捧的品牌，国产的东西我怕说出来让人笑话。”

我：“你得了吧！只要真是精品就不会被人笑话！”

师：“我是怕人家笑话我没见过世面。你今天气儿不顺啦？”

我：“江海的电解电容有牌子吗？不会也是叫‘什么什么 CON’吧？”

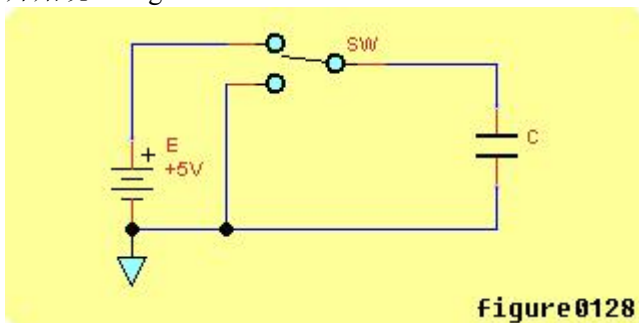
师：“大概就是叫‘江海’吧？我不知道。没使用过。”

我：“那你用什么牌子电容？不会非日货不用吧？”

师：“我不在意电容这东西的品牌。业余研究实验随使用啥都行，没那么高标准的。”

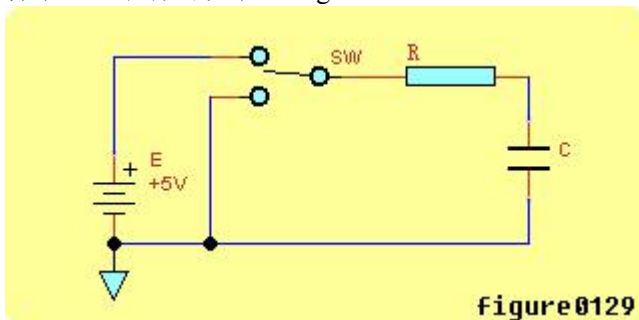
我：“那你还给我发个短文？说一大堆日货？我都闷半天了。”

师：“好了，不提日货了。我们今天还要从这个图开始说。（figure0128）”



我：“开关  $SW$  接通电源一瞬间线路上有电流，电容充满了就没电流了。开关接  $GND$  的一瞬间线路上也会有电流。还要说什么？”

师：“我们给这个图加一个电阻  $R$ ，把它改成这个样子，这就有的说了。（figure0129）”



我：“多了这个电阻给电容充电就困难了吧？”

师：“是的。这个电阻限制了充电电流，所以电容充满电所需的时间就加长了。”

师：“我们现在来研究一下开关接通后，电容两端的电压随着时间的变化规律是怎么样的。”

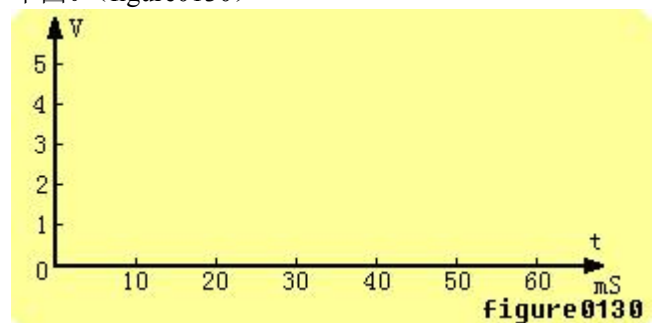
我：“随着时间加长逐渐升高呗。”

师：“你这纯粹是废话，当然是逐渐升高啦。我们要看一下这电压每一分每一秒到底升高多少。”

师：“首先，我们假设电容没充过电。所以开关接通+5V 的那一刻，电容两端的电压为 0V，这应该没问题吧？”

我：“你是说开关接通电源，电流正在线路上狂奔但还没有到达电容极板的那个瞬间？”

师：“就是这个意思，这个时候电容两端电压是 0V。我们把这一时刻定为坐标原点，来准备一起画一个图。（figure0130）”



师：“我们假设，5 个毫秒过去，电容两端电压升高到 1V。我的问题是如果想看到电容两端电压升到 2V，我们得再等多长时间？”

我：“肯定不是再等 5 个毫秒。这个好猜。”

师：“又是蒙，你猜这个到底有什么意义呢？动脑子分析才有意义。”

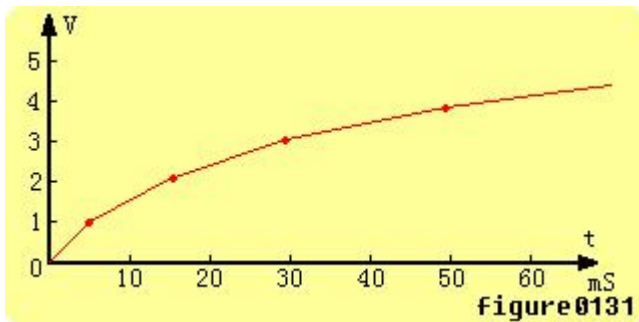
充电电流的大小其实可以通过两个量计算出来，一是电阻  $R$  的阻值，二是电阻两端的电压，这是欧姆定律的简单应用。当电容两端电压为 0V 时， $R$  两端电压就是电源  $E$  的 +5V，而 5ms 过去后电容上有了 1V 的电压，那么  $R$  两端的电压只剩下 4V 了，充电电流随之减小，那么这时想让电容两端电压再升高 1V 所需的时间比前一个 1V 要长才对。

我：“应该是比 5 毫秒要长才对，因为电阻两端的电压差变小了，充电电流也小了。”

师：“嗯，这一句才算有点意义。我们假设这个 1V 到 2V 的过程用了 10 个毫秒。”

我：“从 2V 到 3V 用的时间更长？”

师：“没错。可以假定从 2V 到 3V 用 15 个毫秒，3V 到 4V 用 20 毫秒，4V 到 5V 用 25 毫秒。最后这个图是这个样子。（figure0131）”



我：“我觉得这图不应该是 5 段直线，应该是个曲线吧？”

师：“很好啊，说说你是怎么想出是曲线的？”

我：“我是觉得电容两端电压无时无刻都在上升，它只要升高一点充电电流就会立刻减小一点，那这电压也会立刻升高的慢了一点。”

师：“所以我们可以把坐标轴的刻度分细一点，比如考虑 0 到 0.5V，0.5V 到 1V，1V 到 1.5V。”

师：“还可以细到每格 0.25V，或者 0.125V，这个格分得的越细，这个线就越光滑。”

我：“这坐标轴的小格如果分到‘无穷小’，那这根线就彻底变光滑了？”

师：“没错。给你加上 0.1% 的灵感。”

我：“不用加了，我这段时间偷学了一点微积分。嘿嘿。”

师：“收获不少啊看来？ $dV/dt$  之类的符号也能明白了？”

我：“糙糙了了看了点书，收获约等于 0。不过这个‘分到很小很小很小很小’倒是理解了。”

师：“那我倒省了事了，不用把那些数学推导告诉你了。咱定性讨论一下就行了。”

我：“定性最好，可别再写方程式了，我会烦死的。”

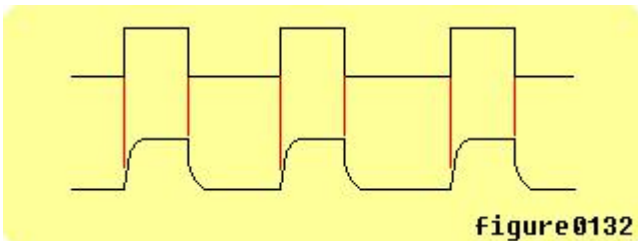
这里我们略去了一个问题：电容上的电压最高能充到多高？能否充到和电源 E 一样高？我们估且认为是可以的。

师：“我们再看开关 SW 接 GND 的情况，这时电容要通过电阻 R 放电。”

我：“放电应该是先快而后慢？”

师：“你这回说到点儿上了。最初电容上电压很足，放电电流较大。而一旦放出了电，那么电容上的电压就低了，放电电流就会减小，这导致电容上电压的下降速度慢了下来。”

师：“好了，我们把开关的状态用一个‘脉冲’来表示，就可以画出这样一个图（figure0132）。开关接 +5V 对应脉冲上升沿，接 GND 对应下降沿。”



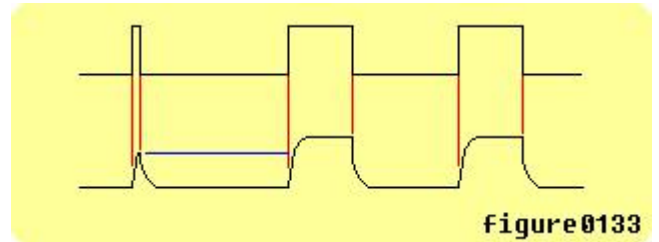
我：“脉冲经过这个电阻电容之后，两个边沿就没了吗？”

师：“严格来说是两个边沿变‘斜’了，不‘陡峭’

了，还不是没了。”

师：“实际上，这个脉冲的‘顶’有可能变没了，只要这个脉冲宽度够‘窄’。（figure0133）”

我：“如果脉宽太窄，那么电容可能还没充满电就开始放电了。”



师：“就是这个意思。电容器上的电压‘幅度’不够高了。所以我们引出这个电路的一项实用功能。”

我：“这个实用啊？愿闻其详。”

师：“图（figure0134）上这个开关的‘刀’和‘掷’刚刚触碰上的那一瞬间，应该是不稳定的。也就是说‘刀’和‘掷’压的不紧，接触了一下又断开了，然后又接触上，可能又断开了。直到‘刀’和‘掷’充分的

压在一起。”

我：“这会打出火花吗？我小时候在厂子里看见过，合闸的时候辟哩啪啦的。”

师：“电源才 5V 哪至于打火啊？不过开关的‘抖动’会产生我们不想要的信号，就像这个图（figure0134）上所画的那个信号。”

我：“这个抖出来的脉冲很窄啊？这不能让电容充满电。”

师：“你提前把我要说的给说了。呵呵。”

师：“这种很窄的脉冲我们称之为‘毛刺’。对我们的大脑来说 1mS 的时间是可以忽略不计的，但是对电子线路来说，1mS 时间那是相当长。”

我：“所以电路会认为开关连续接通了两次，我们却认为开关明明只接通了一次？”

师：“是的。为了让电路不要‘误会’，我们可以用上一个电阻和一个电容。（figure0135）”

我：“这个毛刺变矮了很多，电路无法再把它识别成高电平‘1’了。”

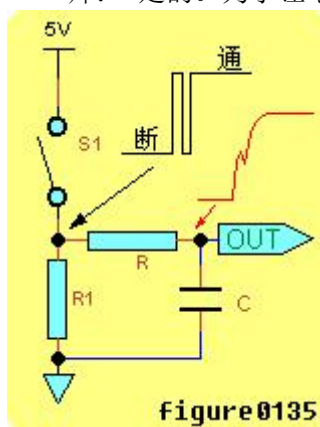
师：“嗯。所以这个简单的阻容电路可以为开关‘消抖’，这是很有用的功能。”

我：“可这与电容器的容量有关系吧？如果电容特别的小，比如

0.1pF，那即使这么窄的脉冲也能把它充满电啊？”

师：“太棒了！你的观察力真是惊天地泣鬼神啊！”

我：“真的啊？看来我真是天才啊？啊哈哈哈哈！”





师：“但还是疏漏了一点：你忘了电阻的阻值了。”

我：“我就倒！以后千万别捧我了！这下把我捧的！”

我：“电阻如果很大，那即使电容容量小充电也困难？”

师：“对了。所以这个‘阻容电路’充放电的难易程度与 R 和 C 都有关。具体来说是与 R 和 C 的乘积有关。”

此乘积称 RC 电路的“时间常数”，记做  $\tau = R \times C$ 。

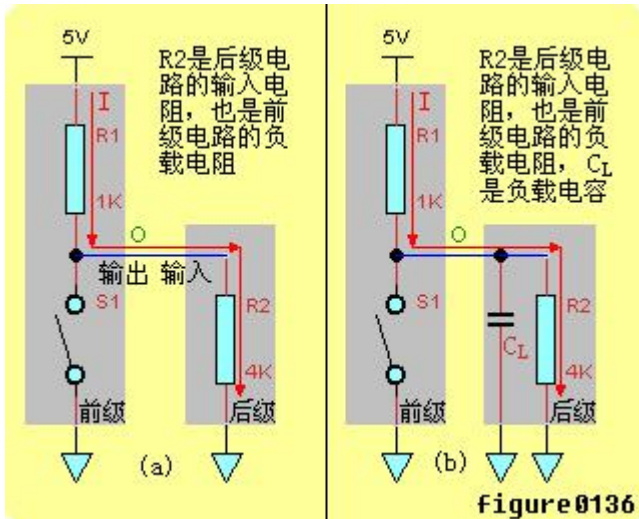
师：“这种阻容电路也有它不好的一面，你是否注意到开关接通电源到电容上出现高电平有一个时间差？”

我：“这好理解啊，那个上升沿斜了嘛。”

师：“打游戏的时候，你肯定不希望鼠标左键按一下，一秒钟之后才开炮。”

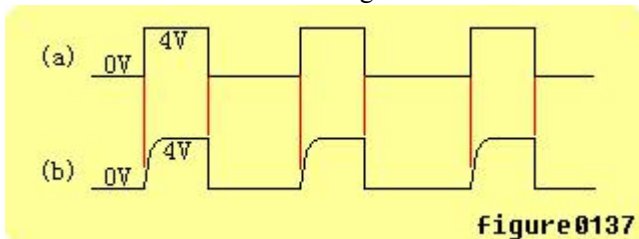
我：“拖后几毫秒没问题，最牛的玩家恐怕也觉察不出几毫秒的延迟。”

师：“收这个图（figure0136），（a）图我们以前已经讨论过，现在要说（b）图。假设开关不抖动。”



师：“开关 S1 连续地接通又断开的话，O 点的电压会出现如何的变化呢？”

我：“我画了个示意图（figure0137）给你。嘿嘿。”



我：“开关断开时 O 点被 R1 上拉到 1，在有电容 CL 的时候，必须等到 CL 充满电时 O 点才输出 1。开关接通 CL 直接短路，放电极快，所以 O 点变成 0 是非常快的。”

师：“我们在说‘内阻’的时候提到过，开关加上拉电阻形成的‘信号源’，在输出 1 和 0 时的内阻不一样。”

我：“我现在明白了，这会导致信号的上升沿和下降沿不一样。”

师：“对了。现在我希望这个脉冲的上升沿比较陡一点，或者说从 0 到 1 的延迟短一点，应该怎么办？”

我：“减小负载电容 CL。”

师：“又没说全。还可以减小上拉电阻呢。”

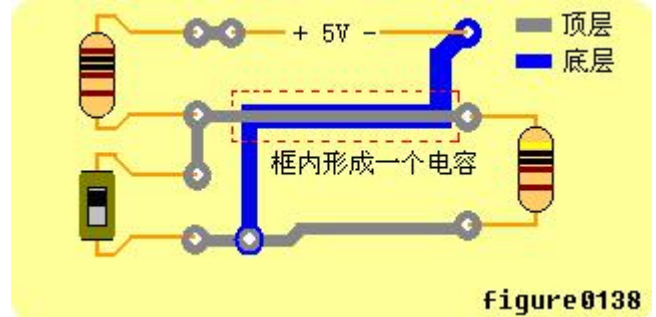
我：“我正要说减小上拉电阻呢。”

我：“其实我觉得如果能回避‘容性负载’就没这问题了。就像（a）图。”

师：“（a）图也有问题，你以为它没有 CL？”

我：“难道有吗？我没瞧见啊？我用的显示器太次了是吗？”

师：“我用这样一块双层电路板把（a）图做出来了（figure0138）。你看看有没有电容 CL。”



我：“这也算？这我哪儿想得到啊？”

师：“两面都有铜膜线做电极，中间的‘玻璃纤维板’就是介质，这就是电容啊。”

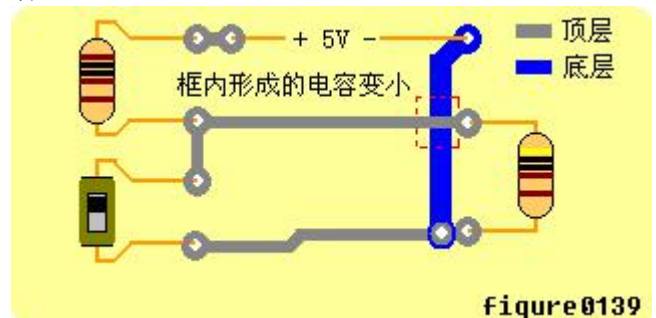
我：“底面那条铜膜线还刚好是连接 GND 的，这也太巧了。”

师：“算不上巧，这样的情形很难避免的。”

我：“原理图上没有电容，做到电路板上就有电容了，这让人怎么弄啊？”

师：“这个由铜膜线和电路板组成的电容叫做‘分布电容’，它会影响到开关断开后的脉冲上升沿。”

师：“这有办法弄。你收这个图（figure0139）看看吧。”



我：“底层走线改了，这个只是减小了电容，没有完全消除啊？”

师：“如果这个电容减小后对信号的影响已经可以忽略了呢？必须追求完全消除它吗？”

我：“你这是在凑合啊？科学难道是可以凑合出来的吗？”

师：“科学不能凑合，可工程就需要凑合。还记得那个‘标称值’吗？不凑合就没法‘实践’。”

师：“其实‘凑合’也是一门科学。精于‘凑合’的工程师设计电路板会仔细安排线路走向，力争‘分布参数’对电路的影响最小。”

我：“这‘分布参数’又是啥？不是分布电容吗？”

师：“电路板上分布着的不只是电容。‘分布参数’是它们的总称。”

我：“受不了了。我这辈子都不弄电路板。太难了



这个。”

师：“呵呵，别那么丧气，‘分布参数’对很多不那么高级的电路影响都不大的，可以忽略。”

我们将来要制作的小电脑，其实属于“不那么高级”的电路，大家不必紧张。

我：“我这辈子都不弄高级电路的板。太难了。”

师：“你小子，没牙吃柿子——专拣软的捏。有点志气好不好？”

我：“力有余而心不足啊。嘿嘿。”

师：“不用过于担心这个‘分布参数’，它通常不会让你的电路板不正常。不过如果有一天你发现你头一次做的高级电路的板工作不正常，你心里要有根弦儿：分布参数可能没搞好。”

师：“今天的讨论到此为止了。最后告诉你：这个电阻加电容组成的电路，被称为‘积分电路’。闪人了。”

我：“为什么叫‘积分’呢？‘微分’不行吗？”

送走 C#，我重新分析了图（figure0135），用一个 R 和一个 C 去除信号中的毛刺，是用个大的 R 小的 C 好还是小的 R 大的 C 好？我的结论是：小 R 和大 C 比较好。这是因为当开关 S1 断开之后，OUT 端输出的低电平不是只由 R1 下拉获得，而是由 R1+R 共同获得，可见 R 取值太大的话，这就成了“弱下拉”了，至少我感觉不是很好。至于  $R \times C$  的乘积应该是多大，那要看那个毛刺的宽度了，应该远大于毛刺的宽度才好。

之后我对这个“容性负载”略做了些思考。在图（figure0136-b）中，电路左侧这个“信号源”，是用一个开关和一个上拉电阻形成的，当开关断开时，电容通过上拉电阻充电，这是个比较慢的过程。而开关一接通，电容却是直接被短路的，放电的速度远大于充电的速度，这意味着这个“信号源”输出 1 和 0 的速度是有很大差异的。

而从我们以前的讨论来看，这个“开关+上拉电阻”的电路“输出电阻”有很大的变化性：输出 1 时输出电阻是上拉电阻的值，当然要从“戴维南定理”的角度来看输出电阻是上拉电阻和开关 K 的并联，只不过现在开关 K 是开路的，所以输出电阻“在数值上”等于上拉电阻。而电路输出 0 时开关 K 则把上拉电阻短路了，因而电路呈现出“零内阻”。

那么现在有了“容性负载”的概念，特别是 PCB 上还有“分布电容”，那么这个“开关+上拉电阻”的电路比起上下都是开关的电路就要差了，它输出 1 和 0 的速度不一致。这样看来还是上下两个开关的电路比较有优势，在有容性负载的前提下，它可以形成比较一致的脉冲边沿。

## 2005-06-10：电容与电阻（微分电路）

这两天闲来无事，放狗搜了一下“微分电路”，想看看单凭一己之力能不能学会这个东西。钻研的结果可以用一个词来形容：“一头雾水”。以下是我在一个网页上看到的说明：

“使输出电压与输入电压的时间变化率成比例的电路。微分电路主要用于脉冲电路、模拟计算机和测量仪器中。最简单的微分电路由电容器  $C$  和电阻器  $R$  组成（图 1a）。若输入  $u_i(t)$  是一个理想的方波（图 1b），则理想的微分电路输出  $u_o(t)$  是图 1c 的  $\delta$  函数波：在  $t=0$  和  $t=T$  时（相当于方波的前沿和后沿时刻）， $u_i(t)$  的导数分别为正无穷大和负无穷大；在  $0 < t < T$  时间内，其导数等于零。”

我想图就不必给出来了，因为即使对照着图，我仍然理解不了“ $\delta$  函数波”以及“导数分别为正无穷大和负无穷大”究竟意味着什么。当个菜鸟真痛苦，人家那么辛苦地给我讲知识，可我却啥也听不明白，还不好意思告诉人家我没听明白，只有说“谢谢”的份儿。

我想还是应该听听 C# 会如何说这个东西，他应该不会整什么“导数”之类的出来吧？

我：“老大，关于‘开关加上拉’和‘上下两开关’的电路我又有了些新的理解。”

师：“好啊，说来听听。”

我：“开关加上拉电阻这个电路输出 1 和 0 时内阻不一样，上下两个开关的电路内阻一致。”

师：“这我们以前说过了吧？在讨论‘内阻’的时候？”

我：“是啊，但我这回用了下戴维南定理。内阻是由上拉电阻和开关并联形成的。”

师：“给你个新名词：上下两开关的输出方式叫做‘推挽’或者‘推拉’式输出，英文‘push-pull’，它能有效地克服内阻不一致的问题，非常重要。”

我：“内阻不一致是个很严重的问题吗？现在咱只说了外部有容性负载时它输出 1 时速度慢。”

师：“速度慢就已经是很严重的问题了。这事我们以后还会讨论。说说你这两天还琢磨什么了？”

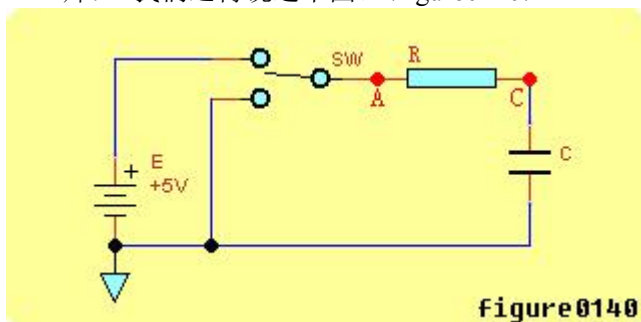
注意我们并不总是追求速度，所以脱离了实际单纯认定“速度慢就是问题”并不可取。

我：“我自己搜了一下‘微分电路’，必须要学习‘导数’才行吗？”

师：“不用。重要的是掌握‘电容器’的特性。你知道我们要讨论‘微分电路’？”

我：“说完了积分应该说微分了吧？我还是听你说吧。”

师：“我们还得说这个图。（figure0140）”



我：“哇塞！你果然是有新意啊！用积分电路说微分电路的原理？”

师：“我们上回说这图时是讨论‘电容’两端电压

的变化，这回我们讨论‘电阻’两端电压的变化。”

我：“就是 A 点到 C 点的电压降？”

师：“A 点对 GND 有个电压  $U_A$ ，C 点对 GND 有个电压  $U_C$ ，我们讨论  $U_A - U_C$ 。”

我：“这不就是 A 点到 C 点的电压降嘛！真够绕的。”

师：“当开关 SW 接 GND 时， $U_A = U_C = 0V$ ，这是显而易见的。”

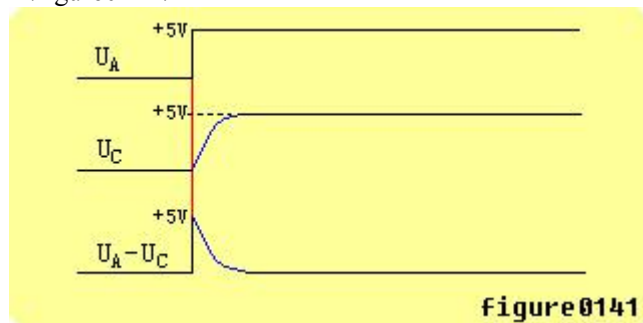
师：“我们把开关接到 +5V 上，此一瞬间  $U_A$  已经是 +5V 了，那么  $U_C$  呢？”

我：“上回说了， $U_C$  是 0V，充电电流还在路上狂奔呢。”

师：“所以此一瞬间  $U_A - U_C$  是 +5V。”

我：“随着电容充电， $U_C$  上升，则  $U_A - U_C$  就下降了。”

师：“很好。 $U_A - U_C$  是按这样的规律下降的。收图。（figure0141）”



我：“最底下那个曲线部分就是电容充电的那个曲线上下颠倒一下？”

师：“是啊。当电容最终充满了电以后， $U_C$  也是 +5V 了，所以  $U_A - U_C$  就是 0V。”

我：“现在把并关重新拨到 GND 上吗？”

师：“对啊，你来试着分析一下吧。”

我：“当开关拨到 GND 上时，电容通过电阻放电， $U_C$  逐渐下降到 0V。”

师：“你这儿分析什么呢？你说  $U_C$  降到 0V 干嘛？”

我：“我们上回不就是这么说的吗？”

师：“我们上回说的是‘积分’电路，研究  $U_C$  的

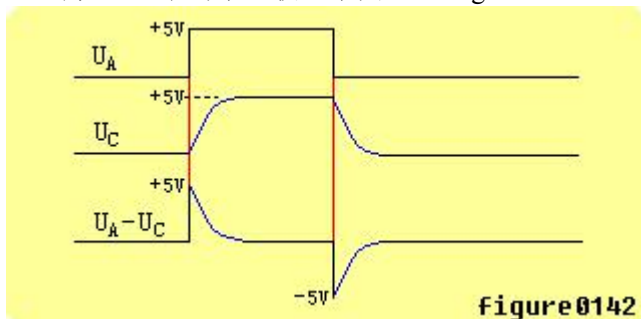
变化规律。今天我们讨论  $U_A-U_C$  啊？你减了吗？”

我：“我马上就要减啦。”

师：“开关接 GND 的瞬间， $U_A$  是 0V 没问题，那么  $U_A-U_C$  呢？”

我：“电容刚开始要放电，但还没有真正放，所以  $U_C$  还是 5V， $U_A-U_C$  是 -5V 啊？”

师：“这就对了。收这个图吧。(figure0142)”



师：“这之后随着电容放电， $U_C$  下降， $U_A-U_C$  则上升，最后升到 0V。”

我：“有点意思。你通过积分电路画出这个波形和我放狗搜到的图完全一样。”

师：“所以我说与其死乞百赖地分清‘积分电路’和‘微分电路’这俩名词，还不如搞清楚‘电容器’究竟有什么特性更实在。”

我：“那电容器有啥特性？没看出来。”

师：“以前说过电容器隔直流通交流，今天给你说个新鲜的：电容器‘两端电压’不能‘突变’。”

我：“只听说过基因突变，电容这个是怎么回事？”

师：“当电容器两极板的电压差值稳定下来之后，你改变电路的状态，比如拨那个开关，此时电容器‘倾向于’维持以前的极板间电压状态，它只会随着充放电过程慢慢改变两极板间电压，而不会立刻就发生变化。”

我：“等等，我琢磨一下。”

当开关接在 GND 的时候，电容两极板都是 0V，压差自然是 0V 了。这时我把开关拨到 +5V，此一瞬时电容器会倾向于维持两极板电压差为 0 这个状态，而下极板是接 GND 的，那么上极板的电压就只能保持在 0V。随着电容器逐渐充电，上极板电压才慢慢升高到 +5V。

而开关再次拨到 GND 的一瞬间，电容器倾向于维持两级板电压差为 +5V 这个状态，随着电容放电，上极板的电压才降回 0V。

我：“这很像力学上的‘惯性’啊？”

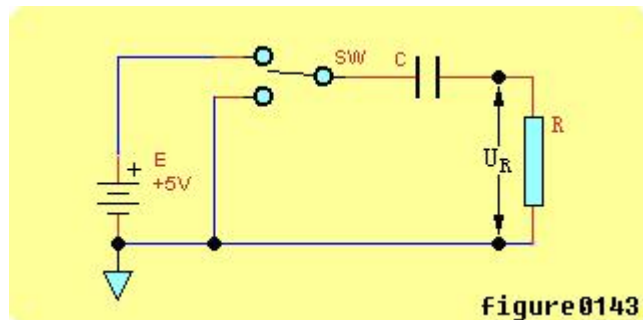
师：“你还想到了‘惯性’？我还真没想到。有道理啊。”

我：“哈哈，小意思啦。”

师：“好了，现在我们可以讨论一下你搜到的那个‘微分电路’了。”

我：“这还要说啊？”

师：“看这个图 (figure0143)。我们还是从开关接 GND 开始。你试着说一下  $U_R$  的变化。”



我：“开关接 GND 的话， $U_R$  应该是 0V。”

师：“没说电容？”

我：“说啥？电容两极板压差是 0V 啊？”

师：“很好啊。继续说开关接 +5V 会怎么样？”

我：“开关接 +5V 的瞬间，电容倾向于维持住两极板电压差是 0V 这个状态。左极板是 +5V 了。”

师：“对啊？怎么不说全了呢？继续。”

我：“右极板也是 +5V？这个对吗？”

师：“完全正确！怎么很不自信呢？”

我：“这个电容难道瞬间‘短路’了吗？好奇怪啊？”

师：“太棒了！‘短路’这个词用的相当地道。不过应该说‘相当于短路’比较好。”

我：“瞎猫又碰见死耗子啦？俺运气咋那么好捏？”

师：“电容器的另一个特性，就是电容‘在开始充电的瞬间相当于短路’。你继续吧。”

我：“电容右极板电压是 +5V，意味着  $U_R$  是 +5V，这时候是电源负极经 GND 线和电阻给电容右极板充电了？”

师：“这么说也行。关键是  $U_R$  的变化。”

我：“ $U_R$  会慢慢降低到 0V，此时电容两极板电压差是 +5V。”

师：“对，左边比右边高 5V。现在把开关拨到 GND 了。”

我：“开关拨到 GND 的话，电容左极板电压为 0V 了，但它要维持左边比右边高 5V 这个状态，那么右极板就跌到 -5V 了， $U_R$  也是 -5V 了。”

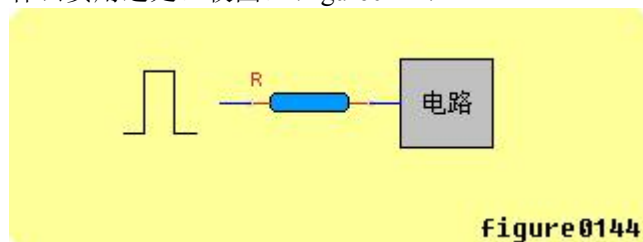
师：“嗯，这回没有疑虑了？”

我：“随着电容经电阻 R 放电， $U_R$  会逐渐升高到 0V。OK 了。”

师：“波形呢？还是那个图 (figure0142) 对不？”

我：“对，波形还是上边一个刺儿下边一个刺儿，这个挺好理解的。有意思啊。”

师：“我们现在看一下这个‘微分电路’的原理有什么实用之处。收图。(figure0144)”



我：“就一个电阻？你就喜欢拿简单的说事儿。”

师：“电阻后面还有一大方框呢，那里面不简单，只是没画而已。”

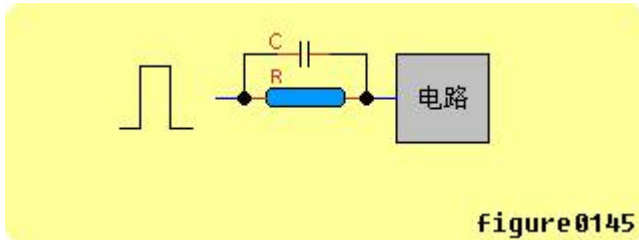
师：“电阻左边我们输入一个脉冲，这个脉冲要注入右边的方框中，但隔了一个电阻，注入到方框中有点困难。”

我：“把电阻去掉不就行了？”

师：“这个电阻必须有，它保证了电路正常工作，副作用是影响脉冲信号传输。我们想办法克服这个副作用。”

我：“难道要在电阻上并联一个电容吗？这不顶用吧？”

师：“还就是并联一个电容。（figure0145）你为什么认为不顶用呢？”



我：“电容只是在脉冲边沿那个瞬间相当于短路啊？”

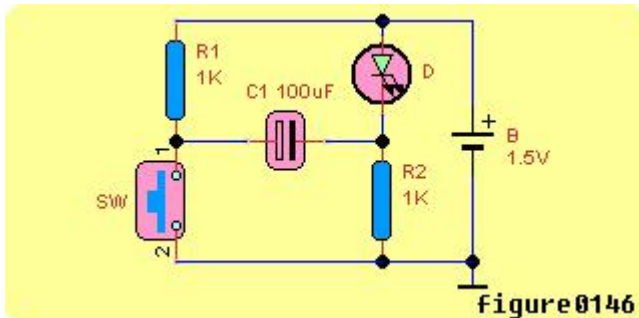
师：“这已经改善了这个电路的性能啦？难道指望彻底消除电阻的副作用？”

我：“我哪知道只要改善一下就行了？你也不交待清楚了？”

师：“好了，这个电容叫做‘加速电容’，是一个简单的小技巧。输入脉冲信号的边沿可以从电容通过，绕过电阻。”

我：“倒是能听懂你说的意思，但是缺乏‘恍然大悟’的感觉。”

师：“那你收这个图吧。（figure0146）这个应该有点意思。”



我觉得，对于图（figure0142），有一个问题值得思考，那就是  $U_A$  输入的这个脉冲如果非常的窄会怎么样呢？显然那个  $-5V$  的尖刺就要向左移动了，这是否会形成图（figure0147-a）这样的波形？显然是有问题的，起码  $U_C$  就不应该从  $+5V$  开始下降，这样窄的脉冲无法让  $U_C$  升到  $+5V$ 。而如果  $U_C$  达不到  $+5V$ ，那么  $U_A - U_C$  就降不到  $0V$ ，这个时候就出现了脉冲的下降沿，这一猛子不可能扎到  $-5V$  那么低。所以我认为图（figure0147-a）中被绿色方框圈起来的部分还要继续向左移动，进而形成图（figure0147-b）中被绿色方框圈住的波形。这才是窄脉冲经过微分电路之后的结果，图（figure0147-c）看得更清楚一些。

对于图（figure0146）所示的这个电路，我认为还可以有另一种理解。当开关 SW 断开时，电容 C1 经 R1 和 R2 充了电，它是左正右负的。当开关 SW 接通后，电容就会放电，放电电流从左极板经开关 SW，流过电阻 R2 到电容右极板。可以看到电流是“自下而上”流过 R2，在 R2 上形成“自下而上”的电压降落。而 R2 的下

我：“看见 LED 了，要让它亮起来对吧？”

师：“对，但是你注意到电源电压了没有。”

我：“只有  $1.5V$ ，这个发光管亮不了的。”

师：“发光管正向接电要达到  $1.5V$  以上才能亮，所以我们要制造一个超过  $1.5V$  的电压。”

我：“难道是把按钮 SW 接通就能制造出高电压吗？”

师：“你又来猜，我不明白你竟这么猜有什么意义呢？”

我：“我这点能耐只能猜啊？”

师：“SW 接通之后 LED 确实会亮，你猜完之后分析一下原理行吗？不难的。”

我：“SW 断开的时候电容 C1 应该充上了电是吗？”

师：“这还用问吗？C1 正极经 R1 接  $1.5V$  电源，负极经 R2 接 GND 啊？”

我：“好吧，现在电容 C1 正极有  $1.5V$  电压，负极是  $0V$ 。如果 SW 按下，电容左极板就成  $0V$  了，那么右极板就应该比  $0V$  还要低才对。”

师：“你说这 LED 是不是亮了？电容 C1 的负极正好接着 LED 的阴极。”

我：“这 LED 阳极相对 GND 是  $1.5V$ ，而阴极比 GND 还要低，所以它两端电压就超过了  $1.5V$ 。”

师：“其实电容 C1 和 R2 就是一个微分电路，C1 左边接的，相当于开关加上拉电阻。”

我：“都是以前讨论过的简单电路拼在一起，呵呵。”

师：“这个电路我要求你在电路板上把它焊出来实验一下。”

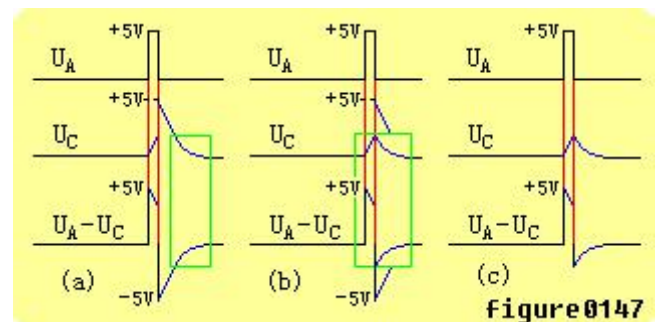
我：“要焊东西啦？咋这么突然呢？”

师：“我们讲的够多的了，应该开始实践了。后面我们讨论集成电路时全是实践。”

我：“可我没东西可焊啊？我只有发光管和一些电阻。”

师：“去买啊，中关村黄庄路口有中发和知春两个电子城，买东西不成问题。”

我：“那都买什么啊？就买一个电容和一个开关？”





端是 GND，显然它上端的电压就要比 GND 低了。

那么流经 LED 的电流是多大？我不知道应该如何去计算。看上去 C1 右端的电压应该会跌到 -1.5V，那就是有 3V 的电压直接加到 LED 两端了，这电流是不是有点大了？LED 会损坏么？不过这个 3V 的电压不会持续很长时间的，电容 C1 的充的电放光了，它右端的电压就恢复到 0V 了，这个 LED 只是闪一下而已。短时间内流过一个大电流，应该没啥事吧？烧一个元件总得需要充足的能量吧？

我想起了以前读过 1N4148 的 Datasheet，1N4148 正向允许流过的电流有多个指标的。我打开 1N4148.pdf 找了下，第一页“Absolute Maximum Ratings”表格中有个“ $I_{FSM}$ ”，这个电流最大值竟然是 4.0A。还好我现在知道了看这些参数要注意“条件”，人家前面写了“Pulse Width = 1.0 microsecond”，这是“脉冲宽度=1.0 毫秒”的意思，那我就可以理解为如果只给 1N4148 通过 1 毫秒的电流，则此电流最大可以是 4 安培了。

$I_{FSM}$	Non-repetitive Peak Forward Surge Current		
	Pulse Width = 1.0 second	1.0	A
	Pulse Width = 1.0 microsecond	4.0	A

LED 想来也是这样的，如果只是让它闪一下就灭掉，那么这一瞬间它允许流过的电流也应该是相当大的。具体允许多大只要阅读对应的 Datasheet 即可。现在的问题是針對图（figure0146）所示的这个电路，这“一瞬间”是多长时间呢？我感觉，这似乎又与 C1 和 R2 的乘积相关吧？

## 2005-06-14：电容与二极管（整流滤波）

今天的心情极其不爽，因为晚饭之后老爸老妈给我开了个会，讨论我升高中至今的学习状况。首先由老妈报告了她与我班主任深入沟通的结果，他们双方一致认为我的学习成绩不很稳定，开学时表现平平，后来一度上升势头良好，期中受挫之后大幅回踩，跌破 30 日线并持续低迷，至今没有反弹迹象。

对于我正在研究尖端科技的事老妈向班主任做了汇报，老师的态度是“不支持也不反对”。但她强调了“学生还是要以课业学习为重，这是本；课外的智力开发为末，不能舍本逐末”。莫名其妙，这明明就是反对嘛！

之后由老爸对我正在研究的尖端技术进行质疑，问我这些日子没事儿就上网，到底学着什么了？我向他们仔细讲解了“欧姆定律、印刷电路板、PN 结”等部分内容，但显然是对牛弹琴。最后这老牛下了结论：“学习课外知识可以，但必须不影响课内学习。”老妈理所当然对这种立场不坚定旗帜不鲜明的结论很是不满，散会之前又补充了 N 多句，简直烦死了。

为这些习题折腾到 10 点多，总算可以到网上来玩一下了，老妈一如既往的一副苦大仇深的尊容，倒是老爸显得有点通情达理：“就让他玩会儿，他上网不也在学东西呢嘛？”还好啦，尽管老爸没听明白什么是 PN 结，但他知道那不是纯娱乐的内容。

师：“这么晚才来？我们今天内容很多的。”

我：“接受老妈的再教育，学生要以课内学习为主。”

师：“呵呵，我们讨论的内容早晚都是你课内要学习的知识。”

我：“这不还没考上大学呢嘛？考不上这就成不了课内的。”

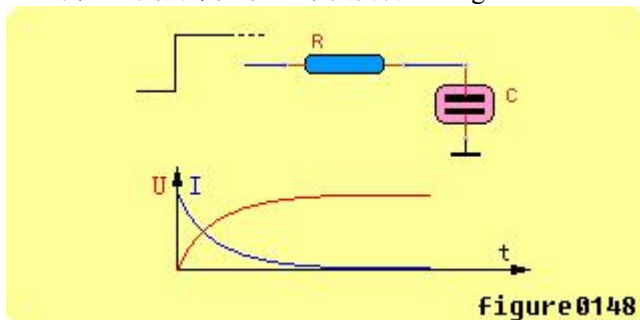
师：“你考不上大学也能学会大学的知识，那你考它干嘛？”

我：“现在哪儿不要文凭啊？”

师：“你考得上！现在每年都扩招的。”

我：“不考清华，也得是个一本吧？难道考个大专？”

师：“我们今天从这个图开始。（figure0148）”



我：“这图还有什么可说的？”

师：“你想一下这个电容的发热该怎么算。”

算发热，这又要用那个电功率了，也就是“电压×电流”。很不幸，对于电容来说，充电的短暂过程中电压电流无时无刻总在变化，充满电后只有电压而无电流，这是不是说充电过程结束后就没有功率了？那么充电起始呢？那个时候电容上的充电电流是很大的，可电压为 0，功率还是 0 啊？

我：“不会算。我只能确定在充电开始的瞬间和充满电后功率是 0。”

师：“不用算。你只要考虑一下‘电子是否真的穿过了电容器’就行了。”

我：“这样的话就是说电容器接在交流电源上也不

消耗能量？即使交流电能通过电容？”

师：“我们是在线路上观察到交流电通过电容的，而观察不到电子穿过了电容器两极板间的介质。”

我：“线路上那个电阻 R 是会发热的？”

师：“你真机灵，把我要说的给说出来了。电源的内阻上也会发热。知道这意味着什么吗？”

我：“不知道，有什么感人的故事吗？”

师：“是意味着你把一个电容器接在二百二的墙壁插座上（figure0149），你不能说‘这个电容不消耗能量，所以我不付电费’。”

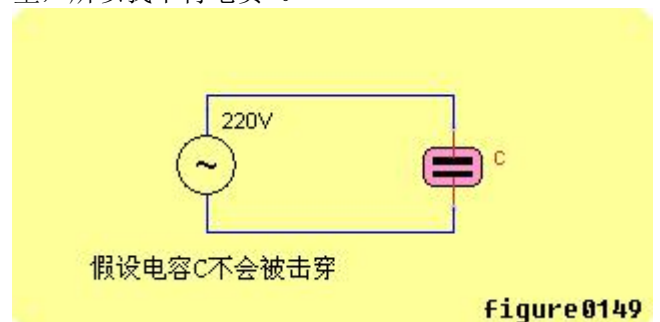


figure0149

我：“哈哈，发电机内阻和输电线路消耗了能量，这都得算我帐上是吗？”

上述讨论只为说明“理想电容器”不消耗能量，它只会把能量“储存”和“释放”，所谓“吞吞吐吐”。电学中还有“有功功率”和“无功功率”这样的概念，这里不做赘述。另外，国家电网究竟怎样计算电费？会把发电机和线路损耗算到用户帐上吗？有谁知道？

师：“好了，我们下面把这个图改造一下，你看看这个图。电容两端的电压是多少？”

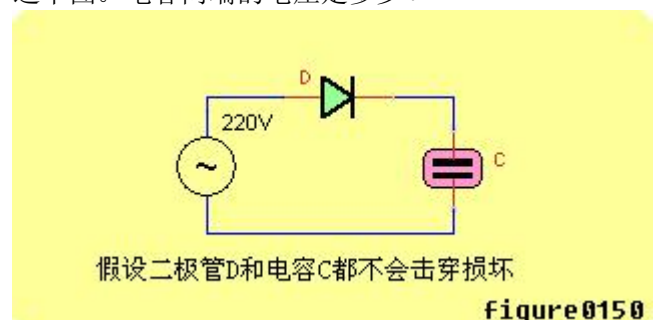


figure0150

我：“电容两端的电压是 110V 对吗？”

师：“不对。说说你是怎么考虑的？”

我：“不对还要说思路？我觉得交流电源只有在上正下负时二极管导通，负半周被切去了。”

师：“思路完全正确，但 110V 这个答案错误。电源上正下负，二极管导通，电容会被充电到‘峰值’电压的。”

我：“311V 啊？”

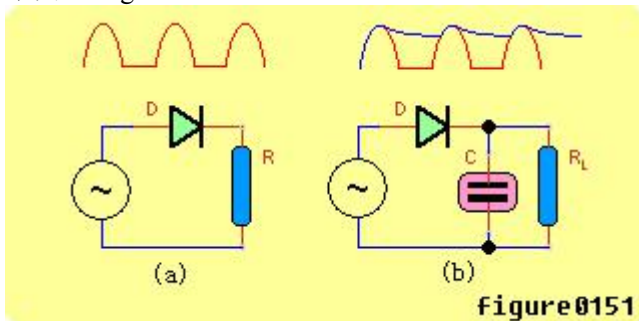
师：“算 310V 吧，二极管有 1V 的正向压降。”

师：“电源上负下正时，二极管截止，这时电容没有‘放电回路’，你发现了吗？”

此时二极管承受的“反向电压”是多高？见补充说明。

我：“对啊，这个电容只充电不放电啊，所以能充到峰值。它充满之后就再也充不进电了。”

师：“如果把电容换成电阻，情况就不是这样了。电阻两端确实是有完整的‘正半周’的。你看一下这个图。（figure0151）”



我：“对于（figure0151-b）图是不是说电阻 R<sub>L</sub> 为电容 C 的放电回路？”

师：“是的。就是说交流正半周时电源既给电阻 R<sub>L</sub> 供电，同时又给电容充电。负半周你来说说？”

我：“负半周时电源被二极管截住了，这时电容开始通过电阻放电。”

师：“如果电容的容量够大，或者说电阻的阻值够大，那么电容在交流电半个周期的时间里不一定把电放干净。看波形图上的蓝色线。”

我：“你就说  $R \times C$  的积够大不就得了？”

师：“对，电容没放干净电，而电源的下一个正半周又给它补充了电，这意味着电容两端获得了一个相对稳定一点的电压。”

我：“要是没有电阻 R<sub>L</sub> 那电容两端电压不是更稳定吗？”

师：“我们之所以把电阻打上 R<sub>L</sub> 的标号表明这是一个‘负载’电阻。”

师：“交流电源加上二极管和电容，组成了一个新的电源，一个‘直流’电源。”

我：“还真是直流，电阻 R<sub>L</sub> 上的电流总是从上向下一个方向流动的。这是二极管的功劳。”

师：“是的，二极管把交流电整理成直流，这个就叫‘整流’电路。”

师：“其实（figure0151-a）图那个只有二极管没电容的也是直流电源，但它只能向 R<sub>L</sub> 提供‘脉动’直流。”

我：“这样来看这个电容很重要啊？”

师：“那是肯定的。这个电容被称为‘滤波’电容，可初步理解为‘过滤掉波动’的意思。”

我：“看图（figure0151-b）的蓝色线还是有残余的波动啊？这个残余总是要存在的对吗？”

师：“这个残余叫做‘纹波’，是一种有害的干扰。没有负载就没有‘纹波’，接上负载就会出现一点纹波，但只要让纹波比较小，能接受就行了。”

师：“如果这个直流电源用来给一个复杂的电路供电，那么这个复杂电路相当于一个多大的 R<sub>L</sub> 很不好说。”

我：“尖端技术中尽是些说不清道不明的东西。”

师：“而  $R \times C$  的积又很重要，所以我们可以考虑‘R<sub>L</sub> 非常小’这样一种恶劣的情况。”

我：“那么电容 C 就必须很大喽？”

师：“对，电容 C 往少说也要几百个‘μF’，经常是上千‘μF’，音响界还推崇多少万个‘μF’的电容，他们把这大电容叫‘水塘’。”

我：“这么大啊？这得用电解电容才达得到吧？”

师：“是要用电解电容的。这个电容用得大可以保证直流上带的那个‘纹波’幅度很低。即使 R<sub>L</sub> 比较小也有保证。”

我：“嗯，感觉用词很贴切的，‘水塘’、‘纹波’，呵呵。”

师：“这个‘纹波’是个正规的专业术语，‘水塘’可不是。”

我：“‘水塘’是这帮发烧友说的胡话吧？烧的真够厉害的。”

师：“说到电解电容我想问一下，你认为电解电容能不能直接连到交流电源上？就是最开始我发的图？（figure0149）”

我：“我猜肯定是不行。”

师：“又来了！你就猜吧你！”

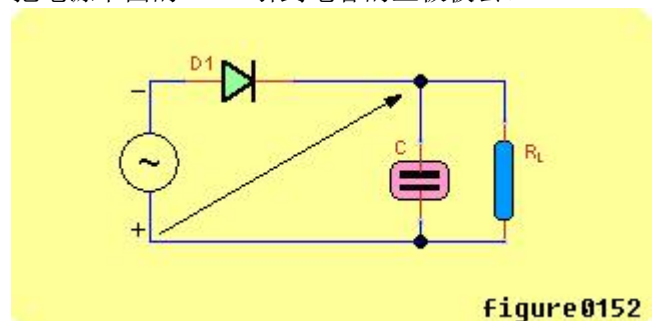
我：“不是猜，电解电容有极性，它不允许电源的极性变来变去的。”

这个说法不是非常准确，仅供强化对电解电容“有极性”的认识。

师：“这还差不多。我们下一问题，是如何把交流电源的负半周也利用上。”

我：“好啊，砍一半儿下去是太亏了。”

师：“所以我们从这个图（figure0152）入手，这个图画的是电源向外提供负半周的情形，我们现在要把电源下面的‘+’引到电容的上极板去。”



我：“难道用一个二极管引上去？”

师：“你这个猜我就不反对。而且猜得很对。收图



看看。(figure0153)”

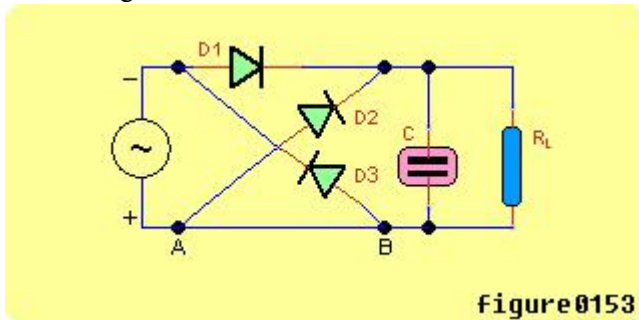


figure0153

我：“哈哈，就是这个样子，D3 是把电源的负端引到电容下极板吧？”

师：“正是。这时候从 A 点到 B 点的这根线就有问题，实际上当电源上负下正时，这根线和二极管 D3 把交流电源短路了。”

我：“可它不能切断啊？电源上正下负时这根线给电容下极板充电的。”

师：“所以要把它换成一个二极管。看这个图 (figure0154) 中的 D4。”

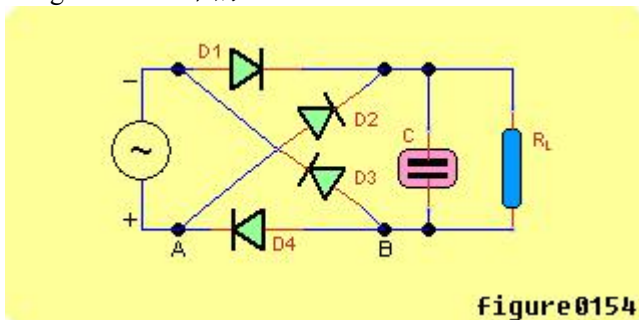


figure0154

注意二极管的正向压降，现在是两个。

我：“哇塞，4 个二极管好和谐啊？怎么这么养眼呢？”

师：“尖端技术中也有很多让人赏心悦目的地方。这个电路叫‘桥式整流’电路。”

我：“D1 和 D2 负责引导‘+’电，D3 和 D4 负责引导‘-’电？”

师：“对啊，确保不浪费。”

我：“四个二极管搭一座立交桥？这比西直门立交桥可是强多了。”

西直门立交桥是北京最复杂难走的桥，时常有司机在桥上迷路。

师：“这个整流桥有多种画法，你收个图看看整完的波形。(figure0155)”

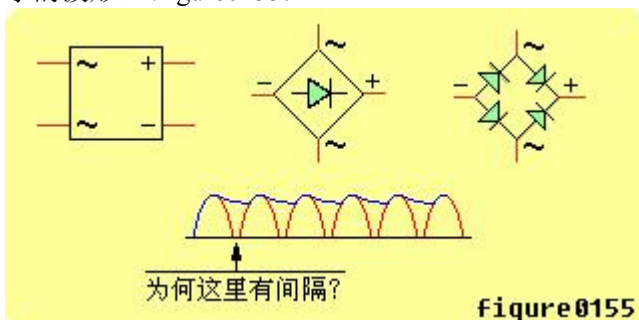


figure0155

我：“负半周翻到上面去波形就密集了。”

正负半周都被利用的称为“全波”整流，而前面切掉一个半周的称为“半波”整流。

师：“所以你要在整流桥后面加上一个电容的话，容量可以小一点，也能得到较小的纹波。”

我：“明白，单纯由电容向  $R_L$  供电的时间几乎没了。”

师：“好了，有了这些知识，我们现在可以理解这个图 (figure0156) 所表达的意思了。”

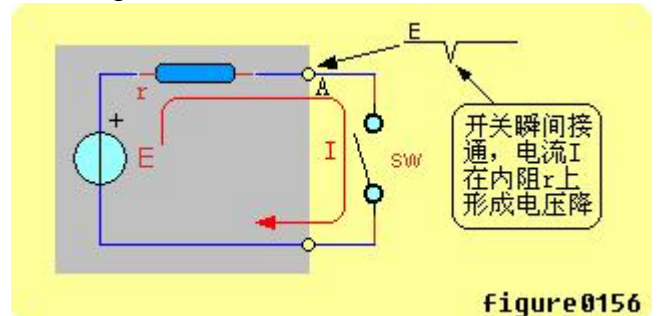


figure0156

我：“开关闭合时，由于电流  $I$  在电源内阻  $r$  上形成压降，致使 A 点电压瞬时降低了一点。”

师：“你这个理解不错。这个开关如果一通一断的反复，则 A 点电压会出现一连串细小的‘毛刺’。”

我：“这个也叫‘纹波’吗？”

师：“你可以这么叫，但‘此纹波’可不是‘彼纹波’。不过它们都是有害的。”

师：“如果有多块电路共用同一个电源，那么‘此纹波’会通过电源线传播到各块电路中，我们说‘此纹波’经过电源线‘耦合’到其它电路中。”

我：“可以用电容把‘此纹波’滤了？”

师：“就是这个意思，你收个图 (figure0157) 看一下。”

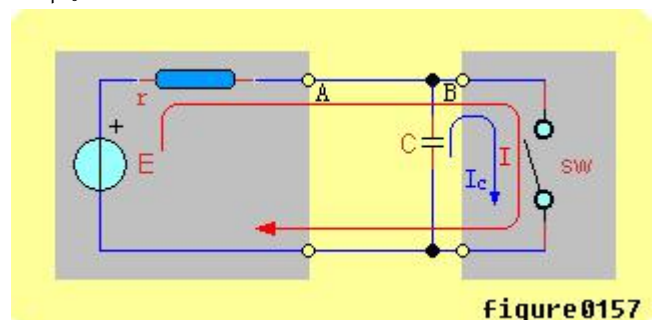


figure0157

我：“哈哈，右边电路的电源入口点 B 放一条电容狗把门儿。”

师：“你可以从这个角度来理解：开关断开时电容 C 被电源 E 充了电，开关一闭合，电容 C 会和电源 E 一起给电路供电，电容 C 供出的电流  $I_c$  会绕过电源内阻  $r$  的。”

我：“如果把充满电的电容看成一个电池的话，它的内阻一定是极小？”

师：“是这样的。你注意到没有，这个电容 C 必须安装在离它守卫的这块电路非常靠近的位置。”

我：“可以理解。线路板上的铜线也是有电阻的，这个电阻也是越小越好。”

师：“这个电容 C 被称为‘去耦’电容，或者‘退耦’电容。是‘去掉耦合’的意思。”

我：“这不也是‘滤波’吗？怎么又叫‘退耦’了？”



麻烦死了。”

师：“你知道它是怎么工作的就行了，不用死抠字面的解释。‘退耦’电容容量不用很大，我们以后常用 $0.1\mu\text{F}$ 和 $0.01\mu\text{F}$ 的。”

这个电容的容量选择其实是有门道的，但本教程不做详细讨论，仅按经验值取。

我：“这与开关通断速度的快慢应该有关吧？如果开关通和断的时间都特长，比如通1秒断1秒，那这个退耦电容就得很大吧？”

师：“仍然不用很大，甚至于反而可以不用。呵呵。”

我：“与我推测的结论又不同？这下麻烦大了。”

师：“我有个小短文，你自己读一下，应该能对这个结论有所理解。”

我曾经把如图（figure0125-b）所示的信号看做一个“交流”信号“叠加”到一个稳定的“直流”上，当然，我不是很确定我这个想法是否正确，假设我想的没错，那么图（figure0151）中的“脉动直流”呢？它是否也可以看做某种交流叠加到一个稳定的直流上？因开关通断制造的“此纹波”（figure0156），是否也是某种交流叠加到直流电源 $E$ 上？若真如此那么我对“滤波”和“退耦”电容就有另一种理解了：电容可以把这些交流成份“分流”，只保证稳定直流成份到电源线上。因为电容器“隔直流通交流”嘛。

我有一种感觉，二极管之中，应该隐藏着一个电容的。正如我对电解电容的理解那样，把那个“氧化铝”视同一个单向导电的PN结，我们把它反向接电，它就成了电容中的绝缘介质了。而二极管之中，是一个真真正正的PN结啊，反向接电的二极管，难道不是一个电容吗？如此看来想彻底搞清一个二极管的内幕还真不容易，我们已经知道它是一个“理想PN结”串联一个“电阻”了，现在又出来一个电容。

我放狗去搜了下“二极管 电容”，还真被我言中了哎，我看到了“二极管反向电容的测量方法”，还有“二极管的电容效应”。原来不仅是反向接电的二极管可视做电容，即使给二极管正向接电让它导通，PN结上也存在一个“扩散电容”的，这个“结电容”和PN结并联在一起。而反向接电的二极管更有特色，它称之为“势垒电容”，和PN结也是并联关系。关键是这个电容竟然是“可变”的，随着反向电压的高低电容量会发生改变。这怎么解释呢？我想似乎是因为PN结上的“耗尽层”充当绝缘介质，它的宽窄是随反向电压高低而改变的，反向电压高它就加宽，这电容就变小了。利用“势垒电容”的可变性还专门造出了“变容二极管”，那自动调台的收音机，不会就是用这个东西做成的吧？

我想我也知道二极管为何做成“点接触”了，那根金属触丝就是电容的一个极板啊，极板的面积越小，电容也就越小，此种结构有助于减小结电容。

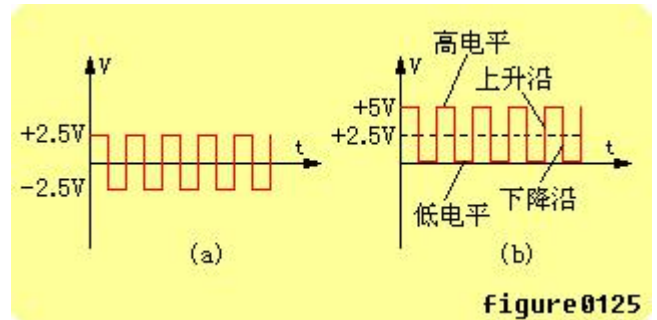
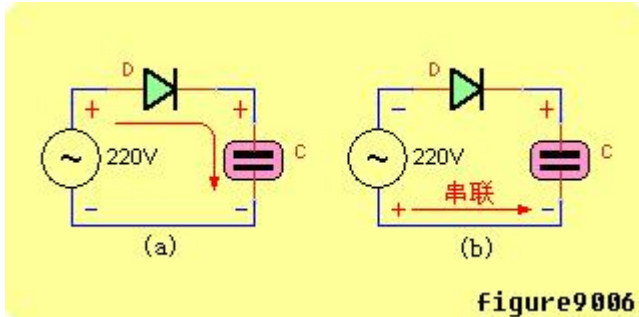


figure0125

## 本节补充说明

对于图（figure0150），我们在文中提出了一个问题：当交流电源上负下正导致二极管 D 截止时，二极管承受的反向电压有多高？我们仍假设交流电源有效值为 220V，当交流电源正半周时，二极管 D 导通，电容 C 充上了 310V 的电；那么二极管 D 截止时，它承受的反压就是这个 310V 吗？



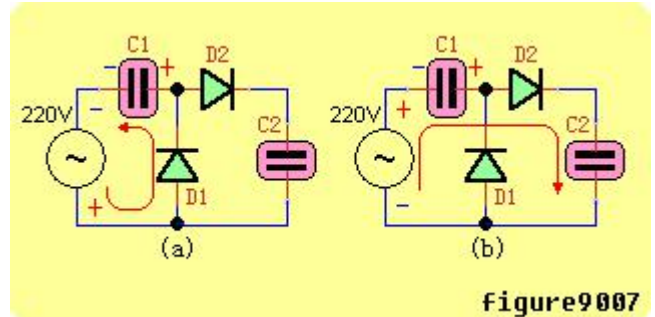
图（figure9006）为展示了电源正负变化的情形，（a）图中电源上正下负，电容 C 上充的电也是上正下负。（b）图电源极性反过来，上方是 -310V 峰值，而 C 的上方是 +310V 峰值，所以二极管 D 承受的反压是 620V。从另一个角度说，充了电的电容相当于一个上正下负的电池，电源的极性变成上负下正后，刚好和电容“串联”在一起加到二极管两端，所以二极管要承受 620V 的反向电压。

由此我们分析图（figure9007），（a）图电源上负下正，二极管 D2 肯定不能导通的，但 D1 可以导通，D1 导通致使电容 C1 充上了 310V 的电，极性为左负右正。（b）图电源变成上正下负了，可见电源与电容 C1 相串联，形成了 620V 的高压，此高压不仅反向加到 D1 上，同时它也正向加到 D2 和 C2 上，此时 D2 是可以导通的，D2 导通使得电容 C2 上充了 620V 的电压。这个电路称之为“倍压整流”电路，我们在 C2 上可以获得比电源高 1 倍的电压输出。

那么二极管 D2 所承受的反向电压是多高？我们知道 D1 承受的反压是 620V，D2 承受的反压似乎是 930V，因为当电源重新变成上负下正时，电源和 C2 串联加到 D2 阴极了，这不是 930V 吗？其实不然，必须注意当电源上负下正时二极管 D1 是导通的，C1 上充了 310V 电。或者说虽然 D2 的阴极是 930V，但它的阳极是 310V，这样它真正承受的反压仍是 620V。

倍压整流固然可以获得比电源还要高的电压，那么它能获得更多的能量吗？显然是不可能的。它输出了高 1 倍的电压之后，能输出的电流就得减一半了。或者说，它的内阻增大了，当我们要它供应更大的电流时，它输出的那个高压是维持不住的。

我们可以获得更高倍数的输出电压吗？完全可以，大家自行搜索“倍压整流”即可。



## 2005-06-15：滤波与隔直

今天收到了一篇短文，印证了我的一个想法：就是如图（figure0125-b）所示的信号，确实可以看做一个交流信号叠加在一个直流信号之上，类似的整流之后的脉动直流等等都可以这样看待。显然对滤波（退耦）电容也就不必从“充放电”这个角度来理解了。不过，我们也不能认为所有的交流成分都可以被电容滤掉，这里还有一点说道的。

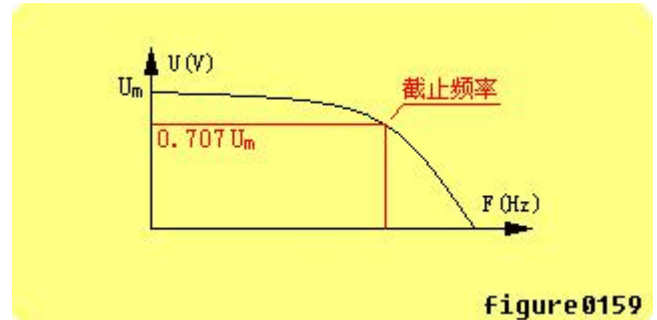
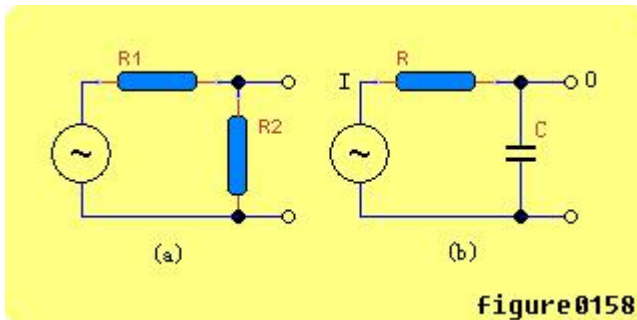
### 滤波电路

C++++: 2003-05-10

我们首先对“电容器隔直流而通交流”做一点更明确的说明，补充前面讨论中的不足。电容器对交流信号也是有一定“阻碍”的，不是随便一个交流信号加到随便一个容量的电容上都可以畅通无阻。具体来说，当信号的频率固定时，电容器的容量越大，那么信号就越容易过，容量越小信号就越不容易过。而当电容容量为固定的比较小的值时，则频率越高的信号越容易过，频率越低的信号越不容易过。

电容的这个特性和“电阻”近似，也以“欧姆”为单位，但它并不被称为“阻”。“阻”对交流直流都是一样的，而电容这个“阻”和输入的交流电的频率有关联，所以电容这个“阻”不被称为“阻”，而被单独命名为“抗”，或者称为“电抗”。而又由于是“电容”所具有的“抗”，所以可进一步称为“容抗”。“容抗”与电容的容量成反比，容量越大则容抗越小。容抗与信号的频率也成反比，频率越高容抗也越小。有这样一种说法：当信号频率为 0 赫兹（也就是直流）时，容抗可认为是“无穷大”，我个人觉得这样说“学术味”重了点。

了解了“容抗”的概念，我们可以对比看一下图（figure0158）中两个电路，（a）图为两电阻串联，（b）图则是积分电路。对于（a）图，无论输入直流或交流信号，两电阻都会“串联分压”，R2 上分到的电压总是固定不变的。而对于（b）图，当输入交流信号时，“阻”和“抗”也会“串联分压”，但由于“容抗”与信号频率成反比，当信号频率升高后，电容的“容抗”上分到的电压会降低，因为“容抗”变小了，而 R 的电阻没变，所以随着信号频率的上升，电容上分到的电压会越来越小，这样一来电容上的信号电压与信号频率之间的关系是一条“曲线”，由图（figure0159）所示。这意味着“低频”信号可以从图（figure0158-b）中的 I 端进入大部分从 O 端跑出，而“高频”信号从 I 进入后大部分却从电容 C 回到源了，只有小部分从 O 端跑出。因而这样一个简单的“阻容”电路其特性我们称之为“低通”，就是“低频可以通过”的意思。



我们没说“高频”信号频率到底是多高，实际上只有频率高到让容抗为 0 的信号才会完整地通过电容回到源，低于这个频率的信号总还是有一部分从 O 端输出的。当我们测到某一频率的信号在 O 端的电压只有 I 端的 0.707 倍时，我们就把此频率称为该低通电路的“截止频率”。这个“0.707”显得有点怪，我们不妨从“能量”的角度来看，从“电压”到“能量”是要有一个“平方”的，“0.707”的平方是“0.499849”，这不就是 0.5 吗？所以说频率恰为截止频率的信号只能有“一半的能量”从 O 端输出，频率更高的信号“衰减”的更多。那么“直流”呢？稳定的直流如果从图（figure0158-b）图的 I 端进入，它会毫无损失的从 O 端输出，因为电容 C 对于直流而言根本就是断路的。

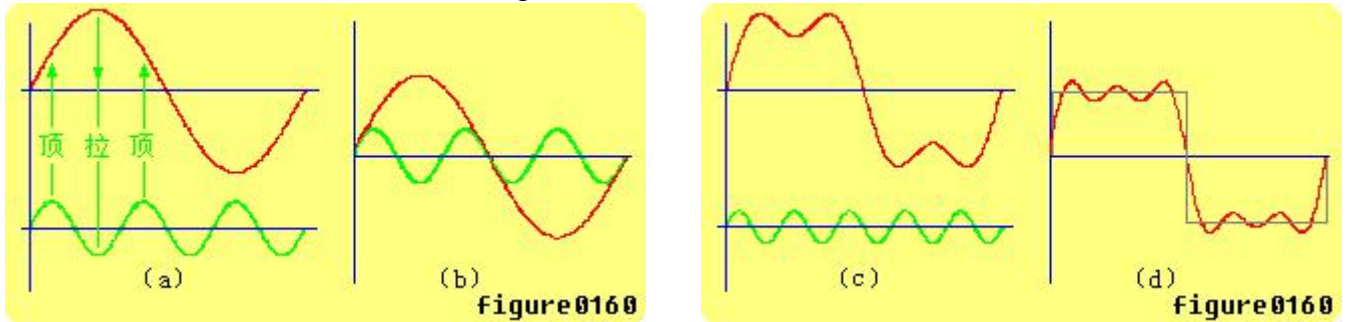
现在我们要对“方波”信号做一些深入的了解了。我们直观上认为“方波”是一连串“矩形”的脉冲，产生“矩形”脉冲的方法很简单，无非就是电路的输出端不断反复地接通电源正端和负端。而实际上，我们完全可以用另一种不同的方法来产生方波，此方法较复杂，但有助于说明问题。

如图（figure0160-a）所示，我们取一个 50Hz 的“正弦波”如图（figure0160-a）上部所画，再取的它的“三倍频”150Hz 的正弦波，而这个三倍频的信号其“幅度”（也就是峰值）是 50Hz 信号的 1/3，如图（figure0160-a）下方所画，这样两个信号“叠加”后（figure0160-b），我们会得到一个很特别的信号。50Hz 信号的波形变形了，两个“斜坡”被三倍频信号顶得有点直了，而“波峰”则对着三倍频信号的“波谷”，被拉的凹了。如图（figure0160-c）上方所画的样子。

如图（figure0160-c）下方所画，我们再取 50Hz 的五倍频（250Hz）信号，“幅度”为 50Hz 信号的 1/5，把它“叠加”到图（figure0160-c）上方变了形的信号上，则这个信号会变形的更严重，左右两边的“斜坡”被进



一步顶直，而顶部的“峰”和“谷”则被拉（托）得更“平”了（figure0160-d）。同样的，我们可以叠加上“七倍频”、“九倍频”和“十一倍频”等信号，幅度分别为 50Hz 信号的 1/7、1/9 和 1/11，这样叠加下去的结果，使得本来为 50Hz 的正弦波逐渐逼近图（figure0160-d）中的灰色线，它变成 50Hz 的方波了。

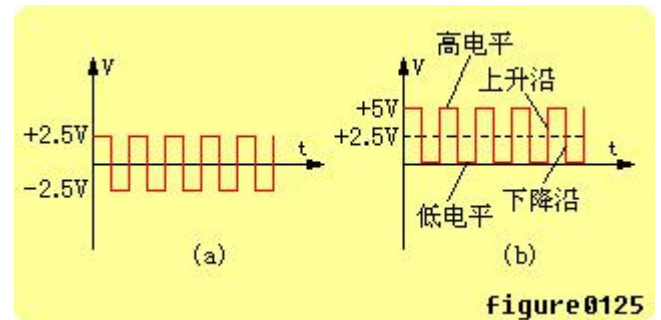
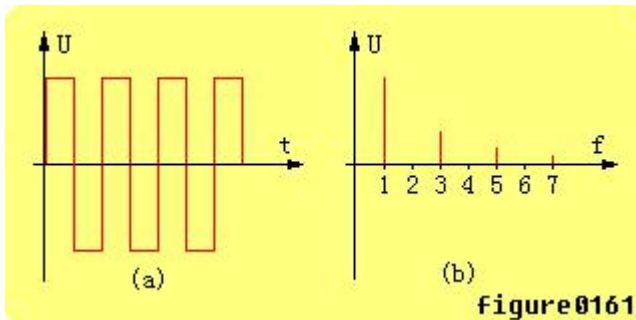


这就是“方波”信号的本质。从直观上看它是一系列“矩形”的脉冲，而实际上它却是“一系列正弦波”叠加在一起形成的。这里 50Hz 的信号是一个“基准”，它决定了最终获得的方波信号的频率，它被称为“基波”。而其它的“倍频”信号则被称为“谐波”，这个方波信号中所包含的都是“奇次谐波”。由于谐波成份不只一个，所以方波信号经常被称为“多谐”信号。

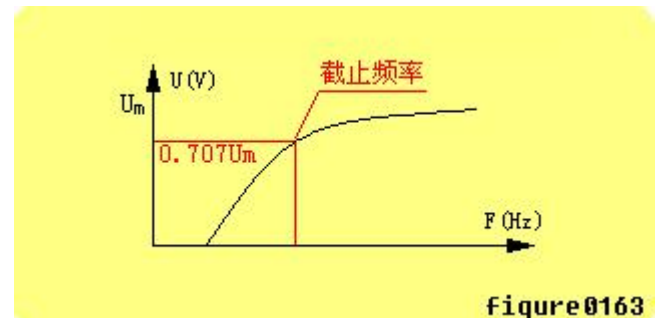
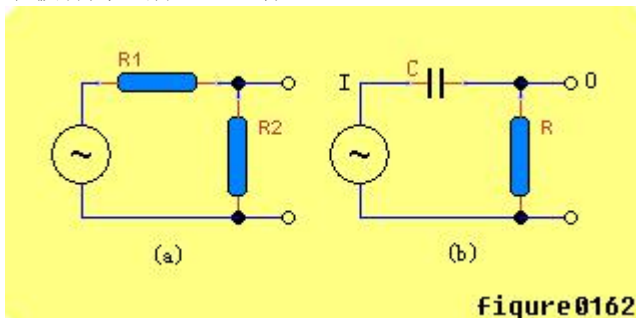
我们以前给出的各种“波形”图中，横坐标通常都是“时间”，纵坐标是“幅度”，图（figure0161-a）显示了这样一个波形，我们常说这是在“时域”观察这个信号。当我们把横坐标换成“频率”时，我们可以把一个信号中各个“谐波”的幅度用一根直线绘制出来，形成图（figure0161-b）所示的样子，此时我们说这是在“频域”观察这个信号。你也不妨把这个图称为“频谱”图。

对方波的这样一种看法有数学理论上的基础，在高等数学中有一个很重要的内容叫做“傅立叶级数”，简单的说就是各种“函数”都可以视为由一系列“三角函数”相加而得到。这里的“函数”就是我们面对的具有各种波形的信号，这些信号都可以利用“傅利叶变换”转化一系列“正弦信号”相加。而余弦，我们认为它和正弦是一回事，角度上差 90 度而已。

这样来看当电平从“低”向“高”（或相反）只发生一次“跳变”时，也就是仅形成了一个陡峭的“边沿”，这一个“边沿”也可以视同一系列“正弦波”叠加出来的。所以这种“边沿”可视作交流信号，或者说它具有“交流成份”，所以这个边沿是可以通过电容器的。而除了这个边沿，稳定的高低电平则不能通过电容器。



由此我们需进一步审视“电容器能隔直流”这样的结论，确切地说应该是“电容器能隔断稳定的直流”。而对于如图（figure0125-b）所示的信号来说，严格来说它是个“直流”，因为电流的“方向”是不变的，它不应该能通过电容器。而事实上当它通过电容器之后，我们可以从电容后面取得如图（figure0125-a）所示的信号，它变成“交流”信号了。其原因就是图（figure0125-b）所示的信号可以看做是图（figure0125-a）叠加到 2.5V 的稳定直流信号上形成的，当它经过电容时，稳定的直流过不去，而那个“交流成分”能过去。此时这个电容就被称为“隔直”电容。



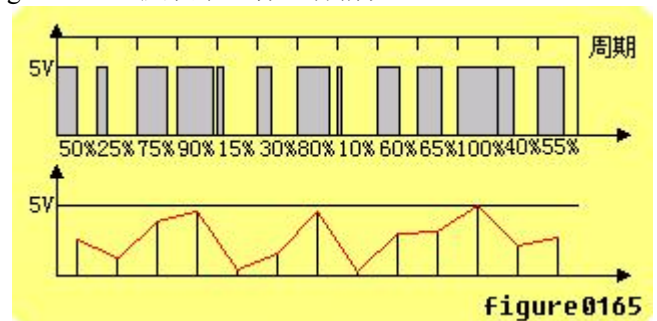
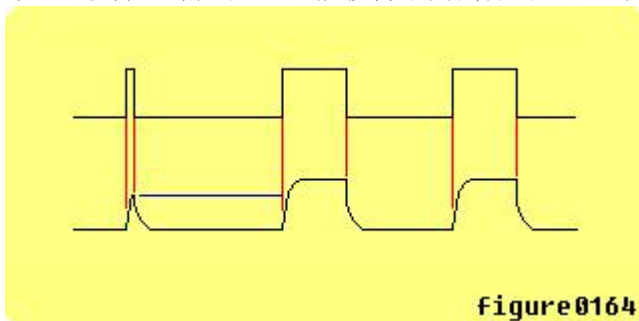
我们更进一步来重新看一下“微分电路”，如图（figure0162-b）所示，电容 C 不仅是用来隔直的，它的“抗”和 R 的“阻”也对输入信号的交流成份分压，显然输入信号的频率越高 C 的“抗”越小，所以 R 上分到的电压也就越高，这电路是“高通”的。它同样有一个“截止频率”（figure0163），低于这个截止频率的信号也是被“衰减”的。这意味着图（figure0125-b）中的信号虽然可以通过电容，但它的“基波”和“低次谐波”会有一些损



失，所以我们不会得到如图（figure0125-a）中所示的那么规矩的方波信号，我们得到的信号会有变形。如果我们想获得很规矩的方波信号，就需要确保“基波”和“谐波”都能顺畅地通过电容器，那么对电容器 C 的容量和电阻 R 的阻值就有一些要求。

而图（figure0125-b）所示的信号通过前面讨论的“低通”电路，也会出现变形的情况，因为信号中的“高次谐波”会有损失。极端的情况是所有“高次谐波”都被电容 C 滤掉了，只有“基波”通过。当然这样做不是很容易，想如此干净地去掉谐波，仅凭一个 R 一个 C 是做不到的。然而假定我们真的去掉了所有谐波，那么我们得到的信号就是一个“正弦波”，根本不再是方波了。所以如果我们想获得很规矩的方波信号，一样需要选择电容 C 的容量与 R 的阻值，保证“高次谐波”不会被电容滤掉。似乎，没有这个电容只剩那个电阻最好诶？那么你还记得 PCB 板上的“分布电容”么？

我们最后再回顾一下把一个矩形脉冲输入到 RC 积分电路后获得的波形，如图（figure0164）所示，可以看到脉冲的两个边沿变形的状况。当脉冲宽度很窄时，电容两端的电压有可能充不到最大值，这个时候电容两端的电压高低和脉冲宽度之间就会出现某种关系，简单来说宽度大的脉冲可以在电容两端获得高的电压，宽度小的脉冲则只能在电容两端获得低电压。也就是说，不同宽度的脉冲，其电压的“有效值”不一样的，这个有效值可以通过 RC 积分电路取得。这样一来如果多个脉冲信号具有相同的周期而“占空比”不同的话，在通过一个 RC 积分电路后在 O 点能获得不同高低的电压。图（figure0165）反映了这样一种情况。



显然，O 点所获得的高低不同的电压是一种“模拟”信号，而一系列脉冲的宽度，则是以时间为单位，可以用多少 ms，或多少 ns 等一系列“数字”来表达（“占空比”也是一个数字）。那么，这是否意味着我们继“权电阻网络”和“R-2R 梯形电阻网络”之后又找到了一种新的“数字到模拟（D/A）”的变换方法呢？

是的，这确实是一种新的“D/A”变换方法，像这种具有固定的周期但每周期内的占空比不同的信号，实际上是蕴含了一个低频的模拟信号和其它一些高频成份，这个模拟信号对我们来说是有用的，我们利用“低通”电路去掉其它无用的高频成份之后即可取得其中的模拟信号为我们所用。

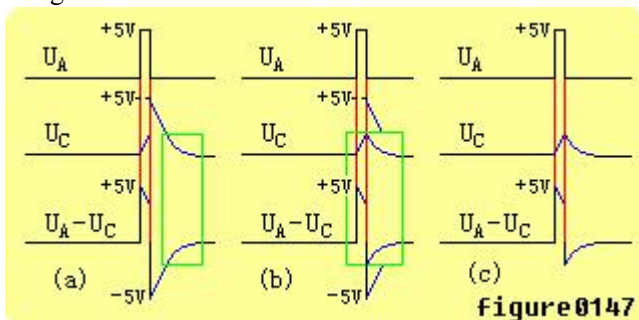
若按这篇短文所说，不论何种奇形怪状的波形，都可以分解成一系列的正弦波叠加，是这样的吗？我确定不了，我可没学过“傅立叶”先生的高论，这应该是个人名吧？假设事实就是如此，那么，经二极管整流之后的那个“脉动直流”，应该也可以看做一个稳定的直流加一系列的交流。这可是“一系列”的交流，靠一个电容器能把所有的交流成份都滤掉吗？如果有残存的交流成份，这些交流是否就形成了“纹波”呢？

我这也是胡思乱想，越想越觉得难，还是从电容的“充放电”角度来看更容易理解。不过有一个问题让我觉得奇怪，那就是如图（figure0125-b）所示的信号，经过一个微分电路之后，为什么会得到图（figure0125-a）所示的交流信号？我曾经自己画图（figure0147）分析过这个问题，应该不是这样子的吧？

我：“我对滤波电路有些疑问。”

师：“直接说。”

我：“应该是对‘隔直’有疑问，一个窄脉冲输入到微分电路，应该会得到这种输出吧？（figure0147-c）”



师：“没错，就是这个样子。”

我：“那为什么图（figure0125-b）那些脉冲经过

电容就变图（figure0125-a）那样了？”

师：“你只分析了一个脉冲，图（figure0125-b）那是一连串的脉冲啊？”

我：“那我把图（figure0147-c）延长成一串不行吗？那也不是图（figure0125-a）那样啊？”

师：“你这么直眉瞪眼地复制一个脉冲是不行的。你现在需要考虑，你这一个脉冲的下降沿之后，输出信号为何会回到 0V 呢？”

我：“这个脉冲之后的输入信号都是 0V 啊？输出只能是 0V。”

师：“那么在此脉冲之后又有一个脉冲过来了呢？两脉冲之间的低电平也很窄？这会怎么样？”

我：“你是说输出信号跌到 0V 以下之后，没有足够的时间回到 0V？”

师：“对，还没有回到 0V，下一个脉冲的上升沿

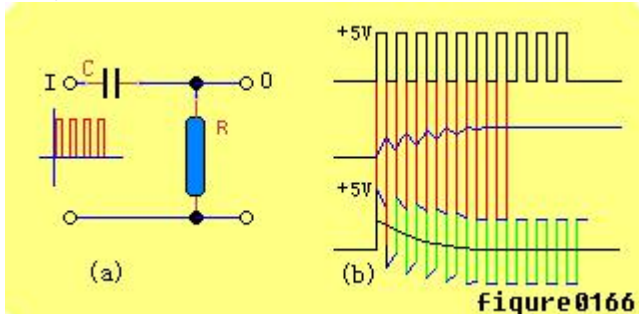
到了。”

我：“输出端又跳到+5V了？”

师：“怎么能跳到+5V呢？从0V起跳才能到+5V啊？”

我：“现在是从0V以下起跳，虽然也是向上跳了5V，但达不到+5V那个高点？”

师：“所以这一串脉冲经过电容C，是按这个图（figure0166-b）来变化的。”



我：“是逐渐下降的？”

师：“每个脉冲的起跳点都是越来越低的，虽然都是向上跳5V，但最高点也越来越低。”

我：“脉冲顶端越来越平？”

师：“是啊，因为前一个高电平给电容充了一些电，后一个高电平再给电容充电时，电容上的电压上升的就不是那么多了。”

我：“中间那根线是电容C两端的电压变化吧？”

师：“是啊，振荡上涨，最后达到2.5V就稳定下来了。”

我：“你也炒股？还振荡上涨？”

师：“没钱，不炒股。”

我：“不炒也好，省得像我妈那样套死。”

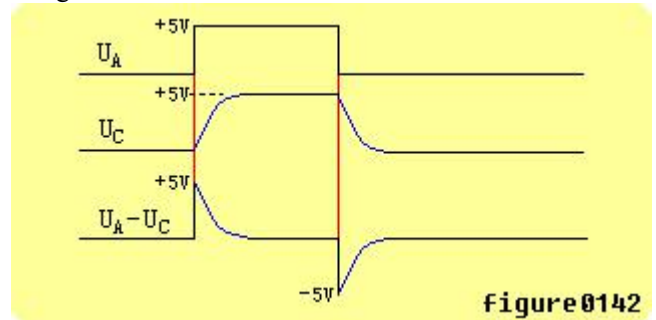
我：“我可以认为信号中的直流成分给电容器充电吗？”

师：“就是这样啊，直流成分给电容充电，电容充满了直流成分也就彻底隔住了。”

我：“那图（figure0166-b）中绿色波形的中点连

成的一条曲线就是电容C充电的结果？”

师：“我们观察的是电阻R两端电压，其实这不就是一个脉冲的上升沿输入到微分电路的波形吗（figure0142）？只是这个直流成分没有下降沿而已。”



我：“我感觉脉冲宽度和  $R \times C$  的积应该有一些什么关系的？”

师：“脉冲宽度‘远大于’RC电路的时间常数（figure0142），我们就会看见微分电路输出正负两个尖刺。一组脉冲形成‘方波’，其‘周期’如果‘远小于’RC电路的时间常数（figure0166-b），那我们就会看见微分电路的‘隔直’效果了。”

我：“原来是不可以孤立地去看方波之中的一个脉冲。”

师：“前一个脉冲对电路的输出有了影响，后一个脉冲对电路输出的影响，肯定是‘叠加’在前一个脉冲的影响之上的。”

我：“我每考虑一个脉冲的输出，都要先把它前面那一串脉冲都考虑一遍？”

师：“也不一定要考虑那么久远的历史，这跟你想获得的‘精度’有关系。”

师：“我们以后会接触一点‘数字信号处理’相关的内容，你会对今天讨论的问题有进一步的理解。”

我：“那现在，我还是得在不理解之中加深理解了。”

师：“慢慢来吧。呵呵。”

我觉得，我把图（figure0147-c）连续复制一长串，也不是不可以，问题的关键，在于两脉冲之间的低电平到底持续了多长时间。如果这个低电平的时间足够长，那么输出端就可以回到0V，下一个脉冲来到时就是从0V起跳了。所以如果给微分电路输入一个“方波”，因为有“占空比”的问题，我们就不能只看脉冲宽度，必须要考虑这个方波的“周期”和RC时间常数之间的关系了。

不过能通过电容器的不应该只是方波吧？其它一些波形只要是交流的，应该总可以通过电容器的，只不过因为损失了谐波成份，输出端得到的信号可能都会有些变形。我觉得，若要高低频成份都能很好的通过电容器，应该用一个大容量的电容，因为容量越大对高低频信号的容抗都低。那考虑电阻R的取值是否也可以呢？我觉得这不是很方便，因为这个微分电路后边到底连接了什么样的电路还不知道，它后边的电路肯定是有“输入电阻”的，这个“输入电阻”肯定和这个R是并联的，肯定对这个R是有影响的，我们又该怎样确定R的合适取值呢？

至于“占空比”不断变化的方波信号输入到RC积分电路中，我们可以从电容C上取得每个周期的“有效值”，这还真是一种“D/A”变换。只不过C#似乎忘记强调了一个前提：那就是这个方波信号的“周期”也应该“远小于”RC电路时间常数的。这是我的一种直觉，总不能把电容彻底充满（或放光）电吧？那不就成了只能得到高低两种电平了吗？

## 小花絮 实践出真知

购买电子零件，对我来说算是个“艰巨”的任务，因为尽管学了这许多天的高科技，可是心里仍然觉得“不是很懂”啊。这不是关键，关键是怕让人看出来咱不是很懂，他肯定坑你没商量。本想给叔叔打个电话，让他照着单子把东西买了快递过来，不过想想还是应该自己去试试水，摸摸河底的那几块石头。反正花不了几块钱，能亏到哪儿去呢？

### 2005-06-18：小游中关村

中关村，北京乃至全中国高新科技的中心。很早就有“中关村电子一条街”的说法，但我老爸对此颇不以为然，在他看来那儿是“骗子一条街”，也不知道他在那儿受过什么委屈，以至有如此的偏见。老爸只对那个地面儿上的一个“景点”特崇拜，那就是我叔的母校——清华大学。

我对中关村这一亩三分地儿也是早有印像，那要追溯到我刚上小学的时候了。那年老爸买断了工龄回了家，叔叔也刚刚从研究所里辞了职，和他一个同时辞职的同事在中关村“创业”。他们租了“电子世界”的一个柜台，卖一些叫“软盘”和“软驱”的东西，还有其它一些便宜的小物件。

没想到吧？我头一次去中关村就是进“电子世界”，正如我头一次进工厂就是去“车间”一样。那个“电子世界”是个专营电脑配件的卖场，在一家副食商店的二楼。俺叔那巴掌大的柜台在一个不大起眼的角落里，我在那儿呆了大半天时间，生意好像还行。不过那时的我只对一楼的副食有兴趣。

没俩月叔叔就被拉去了深圳，自此一去不回头。他那位同事后来开始经营“光驱”，时隔不久就发达了。看来围绕着“翻版”产业造就了相当一批成功人士。我这么说有点不好听哈，应该说“多媒体”技术的发展造就了相当一批成功人士，做盗版生意的也是这批人士之一。

这之后我再去中关村已经是上六年级的时候了，一个同学的奶奶住在人民大学附近，我和同学去造访过老人家，奶奶炖的红烧肉相当的好吃。至于“中发电子大厦”这个村儿里的“地标”性建筑，我只是记忆中有这么个地方。因为它楼下有家“肯德基”餐厅，我和同学在那儿吃过汉堡。

这便是我对“中关村”的早期印像，一如我对我们家边儿上那小吃城的印像是一样的——我在那儿吃过。还不只一顿呢。

这天一清早赶路，行至海淀黄庄下车才发现“中发”市场离车站还有相当的距离，早知道就在“知春里”下车了，起码离“知春电子城”近一点。“中发”在黄庄路口东南角，它楼下的“肯德基”餐厅已经变成了地铁车站的施工工地。临行前我特意把 C# 给的几个小块电路板揣在兜里，琢磨着也许会用得着。

即使是星期六，中关村的各大商厦也是照常营业的，这个中发电子大厦也不例外。进了一层大门，里面人来人往甚是热闹，我于是随着人流逛了起来。相比于那些卖电脑配件的卖场，这里出售的物件更为有趣，一个小柜台上摆着一大盒子小螺丝钉和螺丝帽，柜台里面则堆了大大小小的“外壳”，看来人家和我老爸是同行，都是做模具的。

行至二楼，转到一个摆满 PCB 板的柜台，看到柜台里面摆了台电脑，黑乎乎的屏幕上满是红的蓝的线条，掌柜的端坐在电脑前面，专注着这些红蓝线，不时推高眼镜用手揉揉眼睛，想必是比较累眼。我顺手拿起柜台上的那张纸看了下，好像是个价格表，因为写了钱数。除了这个钱数外我看不懂其它的内容。

“你做板吗？”掌柜的不再专注电脑显示器上的线条了，边揉着眼睛边和我搭话。

“我不做，我看看。”我笑了笑回答。

掌柜的也看出了我不像个总工：“你在哪儿上学？清华？”

“我刚上高一，争取考上清华吧。”

“呵呵，后生可畏啊！喜欢玩电子？”

“啊？正学着呢。您那画的是什么？”我指了指那个显示器。

“帮人抄块板子。你没画过这个吧？”

“我只是知道一点电路板的事儿。”我从兜里掏出一块小板，“您看这个做一块多少钱？”

“哦？”他的脸色郑重了起来，接过板子看了看，“百十块钱吧，打样儿。”

我心中一惊，没想到这玩意儿要这么贵，C# 这家伙还挺瞧得起我，真能下本儿啊？

“你这板子是新手画的。”掌柜的脸上显出一点笑意。

“啊？不是吧？”这回轮到我郑重了，“怎么看出来的？”

“你看这些线路的拐角，都是直角。”他指着一段线路说，“应该画成斜角，你看看这个。”他从柜台中拿出

一块板，指了指上面一段线路。

“这个必须没有尖儿吗？我这块板好像是没尖儿的。”我从兜里把另外两块板拿出来。

掌柜的把眼镜戴好，拿起这两块板翻来覆去地看：“这是同一个人画的吗？不一样啊？”

“这做的拼板吧？”他把三块板并排在柜台上，拼成一块大方板。

“应该是同一个人画的吧？我不知道。”

“这两块没拐直角，但是这铺铜不一样。这块是实心的，这是网格。”他用手指着板上的大面积铜箔说。

“这叫铺铜啊？不知道。”我故意装个糊涂，想来这位掌柜的应该愿意给人当师傅吧。

“实心 and 网格有什么不一样吗？”问完这问题我自己觉得有点可笑，“效果上不一样吗？”

“这个实心的影响焊接，过波峰焊容易鼓包。”

“还真是透气用。播风焊是什么？”

“你没见过。你看这个焊盘，没有做成‘热焊盘’，手焊也不好焊。”

“这都是我师傅给我的，我师傅应该算高手了，不会弄这么多问题吧？”

“是啊？”他微皱了下眉，“那他可能是故意画成这样的，想教你一些东西。”

他重新摘下眼镜：“好好学吧。我孩子比你高一年级，整天上网聊天打游戏。”

我不知说什么好，只是笑了下：“您这实验板多少钱？”我从柜台边上拿了一块“洞洞板”。

“算你十二吧，别人我都要十五的。”

我心里又是一惊：“那我这小块的怎么会百十来块钱呢？”

“这还有好多其它费用呢。”他用右手食指敲了敲柜台上的价格表，“你瞧。”

“是啊？没注意。这小块的实验板多少钱？”

“十二块钱，这俩都给你。”

就这样吧，我付了十二块钱，拿起两块洞洞板和价格表，道谢离去。

聊了这一会儿天让我心情好了很多，这里的人看来都挺热情的。又转了一圈，在一个摆满了大大小小无数种开关和插座的柜台买了些小按钮，又找到了单节的7号电池盒，最后来到一个不怎么起眼的小柜台前。

“这电解有100 $\mu$ F/6.3V的吗？”我指着插在泡沫塑料板上的一排电解电容问。这话我反复掂量过，应该不会显出我是外行来。

“有啊。要多少？”掌柜有点漫不经心。

“一个就行。”我只做一个实验，确实只要一个电容的。

“那起码得1块钱。”她眼里有点无奈的笑意，“这我还不够累的呢！十个可以3块钱给你。”

“那我要20个吧。”我挠了挠头，有点不好意思。

“5块钱。”她边说边蹲下身，从柜台底下拉出一个袋子翻了起来。

“100 $\mu$ F/50V的行吗？”她抓了一把电容上来，似乎料定我一定会同意的。

“我用不到那么高耐压。”我有点疑虑。

“高了肯定也没问题啊？就是体积大一点，你看看你用的外壳放得下吗？”她拿出了一些电容放在柜台上。

“没外壳，这应该也行吧。这是江海的电容吗？”

她眼光一亮，像是不大相信我会知道“江海”俩字：“不是。我们的是这个。”她拿起一个电容给我看了下，黑色的外皮上印着“Rubycon”。

不会吧？我心中有些疑虑，这个牌子难道臭了街了？随便哪儿都能买着？不过我并没说什么，直接掏了5块钱给她。她拿了个小塑料袋，写了“100 $\mu$ F/50V”，把二十个电容装进去。看来50V耐压的并不比6.3V的贵。现在我终于知道高手买东西为什么要批发了，你不批发都不好意思麻烦人家。

从中发出来的时候，已经是中午了。本想去一趟东边的知春电子城，仔细掂量了一下，还是径直向西边走去，路口西边有家“麦当劳”餐厅。技术上咱追求超凡，生活上咱不追求脱俗，来口儿油炸食品垫垫底。吃罢午饭去知春电子城逛了下，还是那样小小的柜台和那密密麻麻的元器件，没啥新意，于是急匆匆坐车回家。从叔叔给的小箱子中翻出俩1K欧的电阻，插上烙铁准备试试身手，却被老爸通知“去4S店看车”。权衡一下，还是先去看看保时捷吧，焊这电路有的是时间。不成想看车归来又被同学拉出去打球，晚上又被老妈盯着折腾那些习题册，这电路终于是没有弄，郁闷死了。



## 2005-06-19：失败是成功之母

今天睡了个较大的懒觉，又和网上的 MM 们东拉西扯了半天，稍带手练了会儿网游，又急赤白脸且极不情愿地写完了剩余的作业。重新摆出烙铁时已经开晚饭了。规规矩矩地把该准备的物料摊在桌面上：两个  $1K\Omega$  的电阻，一个  $100\mu F$  的电解电容，一颗 LED，一只按钮开关，还有一个单节 7 号电池盒。然后呢？当然是去吃饭喽。

饭毕，插好烙铁，略微整理了一下思路，觉得应该先看看这些材料有没有毛病，上回那个电池盒的事还历历在目呢，这种错误不能重犯。把一个 7 号电池放进电池盒，然后用万用表直流电压 2V 档测了下两根引出线，1.5V 没有问题。再换二极管档测了下 LED，能正常发光，稍长一点的引脚是阳极。电阻已经用表量过了， $1K\Omega$  欧姆肯定不会有错。电解电容新买的应该没啥事，何况也不会用表测这电容。万用表上的 F 区域最高测到  $20\mu F$ ，也测不了  $100\mu F$  的电容吧？这个按钮开关是那种 4 个脚  $6\times 6$  的，4 个引出脚中相对的两个引脚应该是“短路”的，这个用万用表的蜂鸣器档测量证实了。相临的两个脚不通，我想按下按钮后这相临的两脚就该通了吧。

而下一步，则是规划一下这些元件在试验板上的位置和怎样接线了。这个原理图（figure0146）实在简单，各个元件在试验板上按原理图上对应位置摆放就可以，只有这个按钮特殊一点，在接线时电阻 R1 接按钮左上引脚，GND 线接按钮右下引脚，右下脚和右上脚在按钮内部是接在一起的。

电池盒有点不大好用，我买了那种带引脚可以直接焊到电路板上的，那引脚是个“焊片”，比较宽，所以我需要把电路板上的孔扩大。叔叔给的电池盒是带红黑两根引出线的，我觉得那线头不怎么牢靠，经常弯折容易断，我的 CD 机换过耳机，就是因为插头里边断了线。这种直接焊到板上的电池盒就不会有断线的问题，至于扩大电路板上的孔，俺老爸工具箱里有手持的“电磨”，装上钻头就能干这活儿，这我都想到了。

当我找老爸要工具箱的时候，这老头对我即将开始的工作十分好奇。

爸：“你要折腾什么啊？”

我：“我用那个电磨把这个孔扩大了。”

爸：“你会焊这玩意儿么？”

我：“这得我问您，您会焊这玩意儿么？”

爸：“嘿，行啊，你还看不起我？”

我：“这不是看不起您，您那两只虎爪开机床行，这小细活儿您玩不了。”

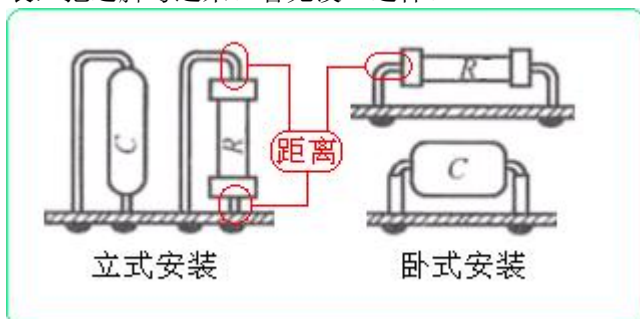
爸：“你叔以前竟捣鼓这种东西，我看也看明白了。我跟你一起折腾一回。”

我：“求之不得啊！我这回要做这个东西，元件都在这儿。”

爸：“就这么点东西？这够干嘛的？”

我：“这都高科技，跟您说您也不懂。”

爸：“这个小东西叫‘电阻’对吧？这个得这么安装，把这脚弯过来。看见没？这样。”



我：“这怎么是站着的？（立式安装）”

爸：“你叔以前做收音机都是这么焊，这长的脚上还套个细塑料管绝缘用。”

我：“这一碰就倒了，俩元件都倒了，那引线可能会挨上短路的。”

爸：“所以我说长的脚上套塑料管啊？”

我：“上哪找塑料管啊？这为什么不能贴着电路板

安装呢？”

爸：“那我来，我看着。”

我：“您看这样装多稳当？（卧式安装）”

爸：“有问题，你这引线折弯的位置太靠近根部了，这是不好的。”

我：“那就放长点，多占一个孔就行了。”

爸：“也行，这小红灯直接插俩孔里就行。”

我：“反了，长的那脚在上面。”

爸：“这俩腿不一样的吗？”

我：“长的那脚是阳极，对应原理图上这个脚。”

爸：“那图我不懂，不过这些元件应该离开电路板表面，留一个间隙。”

我：“没必要吧？为什么要留空？”

爸：“不知道，你叔以前是这么说的。”

我：“会不会是为了散热需要？”

爸：“你这电路是用来发热的？”

我：“有小红灯，是发光的。”

爸：“行吧，我再告诉你怎么焊。那烙铁热了？”

我：“您怎么用鼻子闻烙铁啊？什么味？”

爸：“嘴唇上边这位置对温度敏感一点，容易感知温度够不够。”

我：“您也不怕烫着。”

爸：“找块湿抹布拧干一点，这烙铁头有点脏。”

爸：“在湿布上抹两下，你看干净了吧？烫一下焊锡丝，还行，挺能挂锡的。”

我：“总要这么抹两下吗？”

爸：“必要的时候要这样清洁一下，有时候烙铁温度太高，把烙铁头都烧死了，根本挂不上锡。”

爸：“这烙铁要这么拿着，跟握笔一样。”

我：“这还用您教啊？”

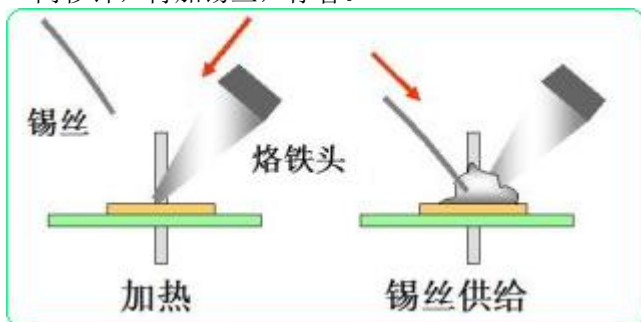
爸：“你叔经常这么反着拿，跟拿刀一样。还有这

么拿着的。”

我：“就不要那么多花样了吧？当笔就挺好。”



爸：“这焊接分这么几步，第一先加热这个脚，一两秒钟，再加锡丝，你看。”



我：“干嘛先加热这个引脚？”

爸：“焊接温度很重要，这脚和这孔都得热乎起来才好焊。”

我：“板上那孔叫焊盘。”

爸：“甭管它叫什么，它热这锡的润湿性才好。”

我：“您这焊得不太好吧？”

爸：“这个电阻引线有点脏，应该用小刀先刮几下再焊。”

我：“这烙铁可调温，把温度调高？”

爸：“调高温度有好处，但也不能太高，会把烙铁头烧死的。”

我：“什么叫烧死呢？”

爸：“就是氧化得太严重，不沾锡了。”

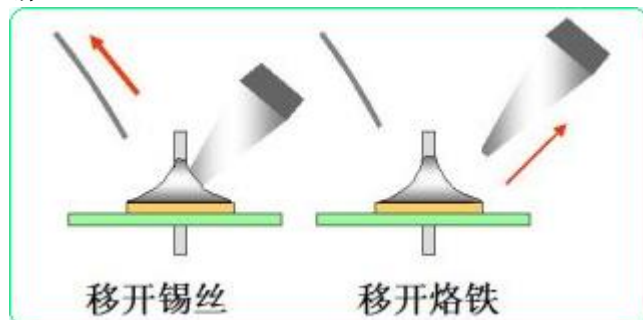
我：“它能把锡化了不就行了？”

爸：“氧化太严重它融化锡丝也费劲，这烙铁头要干净，并且挂一层锡，它融化锡丝就很快。”

爸：“这锡丝如果迟迟化不开，烙铁头在这儿蹭啊蹭的，这个什么？这个就掉了。”

我：“那个叫焊盘。”

爸：“就甭它叫什么了。这烙铁撤离之前要先撤锡丝。”



我：“为什么先撤锡丝？”

爸：“这也问？先撤烙铁那焊锡凝固了，那锡丝不连到焊盘上了吗？还撤得走吗？”

我：“我糊涂了，嘿嘿。”

爸：“后撤烙铁也是为让这锡堆定形，它非得像这种小坟头样才好。”

我：“这还要求好看？”

爸：“不是为好看，但好看的往往也不虚焊。锡堆没凝固之前这脚不能动，一动就容易虚了。”

我：“那您可以先把引脚剪了，留出一小截。”

爸：“你这种板还得自己连线呢，不用都剪，把引脚弯倒了不就是导线吗？”

我：“那这电阻焊一个点就行，另一个脚直接弯倒，需要连在哪儿就焊在哪儿？”

爸：“当然可以。你试试焊这小红灯。”

我：“OK了，您看看。”

爸：“这锡有点少了，小坟头没起来，都填在孔里了。”

我：“就固定一下嘛，这脚将来弯倒焊电池盒。”

爸：“这锡也不能太多，这不是锡越多越结实，一大团锡更容易虚。”

我：“我焊这点不怎么光亮，有点发白？”

爸：“这烙铁可能还是太热了点。”

我：“您那电磨呢？我得扩这个孔。”

爸：“你把孔扩了那个什么焊盘就没了？”

我：“我想把电池盒的焊片弯倒，用导线横跨在焊片上，把它勒住。”

爸：“行，你自己玩吧。”

我：“爸，真没想到您还有这手艺，我看好您哟！”

爸：“拉倒吧你！”

按照老爸的指点，我把所有的元件都焊好，又用各元件长出的引脚把电路连通。除了LED之外，各元件都紧贴在电路板表面焊的，这比较方便一点。LED离开电路板表面大约3到4个毫米吧。我最后焊的电解电容，因为它最高嘛。我又仔细查了下各焊点，确认没有虚焊的。然后我把一节新的7号电池装入电池盒里，有一点点奇怪的感觉。

那个LED灯似乎亮了，当然是很弱很弱的微亮，好像就在管子中心位置，一个很小很小的“光点”，有点像万用表测量时发出的光。我盯着LED灯同时取下电池，那个小光点消失了，重新装上电池，小光点果然又出现了。我用的红色LED灯，这个LED正向压降好像低一些哎？用万用表测了电池两端电压，有1.54V，这电池还没用过，电压偏高一些。我觉得我应该换个绿色的LED





看看，也许绿色的就不会亮了。先不管那么多，按下按钮看看效果吧。

坦白说，这么简单的小玩意儿都做不好确实很打击人。那个 LED 并没有闪一下光，它傻了吧叽地站在 PCB 上完全不知道我在干什么。我拿了万用表在电路板上沿着这负电源两条线路测试了所有焊点，确实都是有 1.54V 电压啊？这 LED 怎么会不亮呢？

这事凭我的能力恐怕是解决不了，我火速打开电脑登上 MSN，没想到这个 C# 竟然已经呆在网上了。

我：“这么早啊？你是不是知道我肯定会遇到麻烦？”

师：“我还在办公室呢。你那个 LED 没弄亮？”

我：“是啊老大，这么简单的东东都搞不掂啊！太失败了！”

师：“这最麻烦了。我能怎么帮你呢？根本不知道你是怎么干的。”

我：“别啊！可别撒手不管啊！”

师：“你东西都买对了吗？焊接没问题吧？没虚焊？”

我：“应该没问题吧？焊接由我老爸亲自指导，肯定没虚的。”

师：“电池有电吗？从板子上的焊点上量。”

我：“这个我自己想到了，板子上有电，没问题的。”

师：“这就怪了？那么 LED 的极性呢？没焊反了？”

我：“LED 的极性我也想到了，肯定是没错的。”

师：“那还能有什么问题呢？这电路如此简单，没道理啊？”

我：“这个电解电容会不会有问题？我买的红宝石的，不会有假吧？”

师：“卖家的跟你说了是红宝石电容？”

我：“对啊，她给我看了电容外皮的商标，Rubycon，难道有假？”

师：“你找个放大镜看看吧，是 Rubycon 还是 Rukycon？”

我：“我的上帝啊！这也行？！你等等。”

我火速奔客厅，从正在看报的老妈手里夺了放大镜，又拿出一个电解电容，对着灯光仔细地看了看那个商标。这一看简直肺都要气炸了，那个小写字母 k 印刷的糙一点，跟小写字母 b 几乎一模一样。



因所购电容商标印刷较差拍不出效果，所以从互联网上取一图片代替实拍照片。

我：“我受不了了！奸商啊！！果然是骗子一条街！！”

师：“稍安勿躁，先别急。人家跟你明说了这是日本进口的红宝石电容？”

我：“我问她是不是‘江海’电容，她说‘我们的就是这个牌子’，然后给我看了下。”

师：“这还不能说人家是奸商，人家并没有欺骗你。呵呵。”

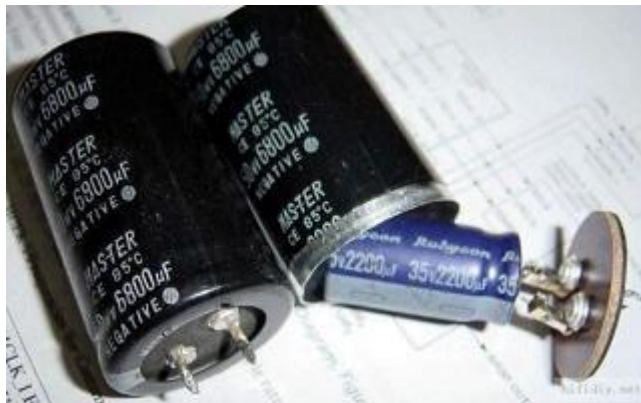
我：“你歇了吧你！这还不是欺骗？我算是惨到家了，谁敢比我惨呀？！”



师：“想不想见识一下真正狠的角色？”

我：“行啊，还有什么更新鲜的？”

师：“看看人家这造假的手法吧，我都怀疑这么费功夫能赚到钱不能？”



图片来自“<http://www.amobbs.com/thread-4122335-1-1.html>”，由“lyzeq2004”网友发布，为排版方便做了编辑。

我：“这是把 2200μF 的小电容塞到 6800μF 的壳子里当大容量的卖？”

师：“很容易看出来对吧？居然有人看不出来，把这当成一种新型电容元件。”

我：“难道叫‘子母电容’？不会吧？”

师：“非但看不出来是造假，而且还写入了国家规划教材中向学生介绍这种新产品呢。”

大家可参考“<http://www.amobbs.com/thread-3692435-1-1.html>”这张帖子。截止到 2013 年 12 月 19 日这张帖子仍可阅读。

我：“神啊！我生在一个多么多么神奇的国度啊！”

师：“好啦，说正经的，这个 Rukycon 电容虽然不是红宝石，但肯定是能正常使用的。它不会造成你这个电路不能工作。”

我：“那我应该叫它‘蓝宝石’对吗？不是它的问题会是什么问题呢？”

这个“Rukycon”还真的被称作“蓝宝石”，据说质量还不错。商标都是印在塑料外皮上套在电容外边的，

据小道消息说一些电容作坊小厂有各种各样牌子的外皮，你想要什么牌就给你套什么牌。由此来看你即使买到了“Rubycon”，也可能是在支持国货。

忽然间我脑子中有个念头闪了下：我为何不测量一下这个电容两端的电压是多少？如果一切正常的话这个电容两端应该充了 1.5V 的电，因为这时 LED 不能导通，不会对电容的阴极有影响，而按钮又是断开的，所以它只可能通过 R1 和 R2 接在电池两端。如果我能测到 1.5V 的电压，那就能说明 R1 和 R2 焊接正常，且电容自己没有短路啊？我于是马上将万用表接在电容两个引脚上。

师：“你分别测一下电容两端对 GND 的电压各是多少。这个电容应该充了 1.5V 电才对。”

我：“我刚测了下电容两个脚之间的电压，似乎是 0V，这不对啊？”

师：“你测一下电容正极对 GND 的电压，再测电容负极对电池正极的电压。”

我：“干嘛这样测？”

我并没有闲着，不等 C# 回答就将万用表两表笔接在按钮左上脚和电阻 R2 接 GND 的那个引脚上，表头上显示出 0V，这显然有问题。而 R2 接 LED 的引脚对电池正极确实测出了 1.5V。

师：“如果电容正极对 GND 有 1.5V，那么 R1 肯定焊接良好，同样如果电容负极对电池正极也有 1.5V 电压，那么 R2 焊得没问题。”

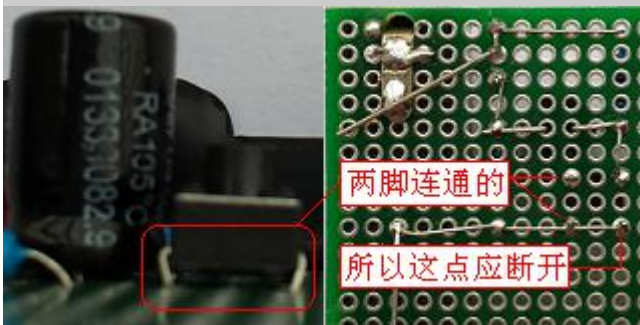
我：“你怎么总怀疑我焊得有问题？现在电容正极对 GND 是 0V，这不对！”

师：“我可能猜到了，哈哈。你那个按钮有 4 个引脚，分成两对儿的。”

我：“我难道用了内部短路的那两个引脚吗？这事儿我注意到了啊？”

我又用万用表的蜂鸣器档搭了下电容正极与 GND，“嘀——”的一声脆响，我心里一凉：“这下可糗大了！怎么能犯这小儿科的错呢？”

注意用蜂鸣器档直接测量焊在板上的元件并不一定能得到准确的结果，特别是板上的电源通着电的时候。



我：“还真是焊错了，按钮装的方向不对。怎么这也能错呢？”

师：“有时候我们得开动立体思维才能把板子焊对。”

我顾不得再聊，用烙铁把 GND 线焊开，重新接

在另一个引脚上，然后装好电池。叭嗒一声按钮按下，那 LED 果然唰的闪亮了一下。

我：“终于亮了。就是这个按钮的事。有意思啊。”

师：“要不出这错你可能并不觉得有意思。从这点看你运气又挺好的，出了一次小错误。”

我：“是啊。找错误是要灵机一动的啊？这比搞清楚那些电路原理有趣。”

师：“所以天才是 99% 的汗水加 1% 的灵感，这 1% 的灵感有时更重要。”

师：“在电子城还有什么其它感触吗？”

我：“有啊。我和一个做电路板的老板聊了会儿，还把你给我的板子给他看了下。”

师：“老板开价多少？”

我：“你做的板子毛病多多。人家说你是菜鸟。”

师：“呵呵，因为板子上的线拐了直角是吗？”

我：“你是怎么猜到的？人家掌柜说你是故意的。”

师：“网上经常有人讨论这个直角的事。板子上的线路不能拐锐角，这是大家公认的。直角的话可以商榷。”

我：“为什么不能拐直角？不能有尖儿？尖端放电？”

师：“你这个联想非常好啊？很有道理啊？”

我：“我一定是瞎猫中的极品，死耗子全掉我嘴里了。”

师：“还都不是被药死的耗子。你有点自信好吧？你说的尖端放电确实是有道理的。”

我：“那锐角不也是尖端放电问题吗？”

师：“对锐角的解释不是这样的。电路板都是化学药水泡出来的还记得吧？”

我：“这我记得。要保留的铜线上方盖上抗腐蚀涂料。”

师：“板子捞出来后，那些铜膜线上拐了‘胳膊肘弯’的角落里会积存药水。你有这生活经验吗？”

我：“没这经验。那铜皮线比板面要高起来一点哈？”

师：“对。而线条只有上表面有抗腐蚀层，侧面是没有的。”

我：“这线条还有侧面？这也太薄了？”

师：“积存在角落里的药水会从侧面把线条烧细，这叫‘侧蚀’，会影响质量。”

我：“那么直角呢？怎么解释？”

师：“线条拐直角的弯对电学性能有影响。”

我：“难道又是分布参数？这个弯上分布了什么参数？”

师：“简单地理解就是高速前进的电子冷不丁拐那么剧烈的弯很不好。”

我：“就跟开车一样，可以这么理解吧？”

师：“可以这么类比。不过这直角对电学性能的影响并不是特别的严重，只有一些很高级的电路需要注意一点。”

我：“那人家掌柜的还说你是菜鸟？”

师：“大家都习惯不画直角了，哪怕是随手画板也都是斜角，看见直角就觉得别扭。”

我：“就是嘛。不画成直角又不复杂，你干嘛非画



成人见人不爱的样子？”

师：“我不画成这样你能从人家掌柜的那儿长见识吗？我先走一步了。”

我：“别啊？还有问题呢？‘播风焊’是怎么回事？”

师：“是‘波峰焊’，一种工业生产时用的焊接技术。”

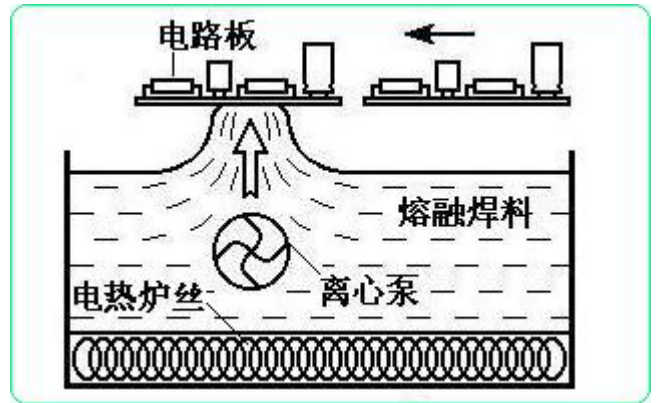
我：“到底怎么个焊法？‘热焊盘’呢？”

师：“这说来话长了，我先走了，以后说这个。”

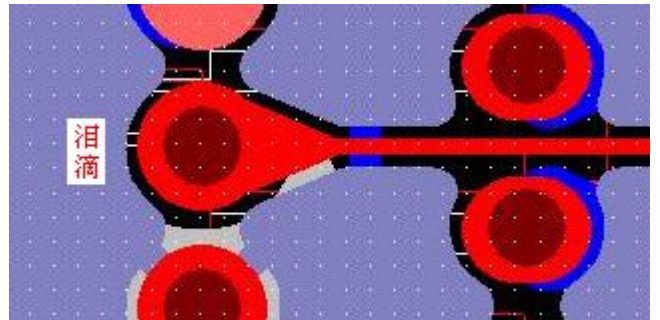
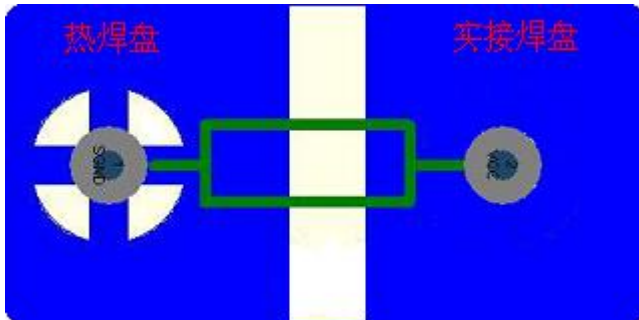
指望 C# 把什么事都说清楚是很麻烦的，他总是“说来话长”，然后就不说了，还是自己上网搜吧。我上了 GOOGLE，首先搜了一下“侧蚀”，这居然是个地理学术语，指得是流动河水把弯曲的河道外侧逐渐冲刷破坏掉。不过也有不少网页提到了电路板的侧蚀，只是没看到跟钢膜线拐锐角有何关联。

再搜索“波峰焊”，找到的解释是：“波峰焊是让插件板的焊接面直接与高温液态锡接触达到焊接目的，其高温液态锡保持一个斜面，并由特殊装置使液态锡形成一道道类似波浪的现象，所以叫“波峰焊”，其主要材料是焊锡条。”文字总是让人费解，我觉得还是直接搜图片会好一些，结果呢，搜出来的全是大型的设备照片。重新搜“波峰焊示意图”，这回找到一个比较简捷易懂的图片，再结合一些文字说明，我认为“波峰焊”是这样的：

把焊锡加热熔化在一个槽中，用泵在锡槽中制造一个鼓起来的“包”，这就是所谓的“波峰”。电路板上把所有元件都插好，用传送装置推着这些电路板从锡槽上方移过去，让有元件管脚的“焊接面”从“波峰”上“蹭”过去，这样焊锡就自动附着在焊盘上了。显然这比用烙铁一个个地点那些焊盘就快得多，而且，我更深一步地理解了 PCB 板上为何要有“阻焊”了，如果没有阻焊，整块 PCB 板全都会被焊锡糊满的，肯定到处都是短路。不过我还是不很理解为何让焊锡鼓出一个包来，直接把 PCB 板的底面在锡中浸一下是不是也可以呢？好像还更快呢吧？



继续搜了“热焊盘”，这可是从人家中发的掌柜那里学来的名词。搜出的结果倒是不难理解，板上的那些元件需要接 GND 时，如果 GND 是大面积的铺铜，那么这些接在铺铜上的焊盘应该通过“十字花”与铺铜连接，焊盘与大面积铜箔之间隔着缝隙，然后再用十字交叉的细线把焊盘和铜箔连接起来。相对“实接焊盘”而言这可以避免大面积铜箔散热太快使得烙铁头温度跌落造成虚焊。可这样一来元件的引脚对 GND 之间的连线可就不是“最宽”了，这会造成 GND 线电阻增大啊？看来这需要根据实际需要来决定究竟采取什么连接方式了。



搜“热焊盘”的时候我还找到了这样一个图，这个焊盘有些像水滴哎？继续搜“水滴焊盘”，才知道原来这叫做“泪滴”，目的是增加焊盘和基板之间的“附着力”，防止焊盘在焊接时因过热而脱落掉。这多少让我有点疑惑，双面的板子上焊盘都是沉铜孔，两面的焊盘通过孔中的铜连接在一起，难道这还不够坚固吗？还需要再加个泪滴？是不是说单面的板子才需要这样搞呢？

## 第6章 电感器

我对电感器其实比电容器要熟，因为我见识过“电磁铁”。小时候俺叔儿拿一个“大线包”给我变过戏法儿，声称他这磁铁比我那块从喇叭上拆下来的要好很多。后来我用我那块磁铁跟他换了，但弄过一阵就觉得这东西很不方便，总要带着电池。

而 C# 的课程，也是从“电磁铁”开始的，这激起了我儿时的一些记忆，我想我那块从喇叭上拆下的磁铁，应该还在叔叔身边吧？

### 2005-06-22：电与磁

我这人相当低调的，但不知怎的，我在研究尖端电子技术这一消息，竟然在我们班不胫而走，我同桌的这位女生（可惜是隔着一列坐的）还就知道了。昨天她给了我一个随身听，说这东西长期不用，现在想用就不响了，让我帮忙给修理一下。

这只是个收音机而已，比打火机略大点。我打开它的后盖儿，PCB 板看起来并不复杂，但是我对这东西的原理一无所知，我才刚刚研究到“电容”。不过十几分钟之后这个小收音机再次唱起了欢快的歌声，修好它真是简单之极。以致于 C# 来到网上时，我迫不急待地跟他聊起我这伟大成就来。

我：“报告你一个天大的喜讯，我帮我们同学修好了一个收音机。”

师：“是男同学还是女同学？”

我：“你真行！怎么先想起来问这个了？”

师：“呵呵，你不是说有喜讯吗？还天大的？”

我：“I 服了 U。知道我是怎么弄好的吗？”

师：“打开外壳，把断了的线头焊好。OK 了。”

我：“没有断线的地方。我看见电池座子两头有一红一黑两根线引到电路板上，就用万用表量了下两根线间的电压。”

师：“电压为 0，你没装上电池对吧？”

我：“我就这水准啊？你也太能贬我了。”

师：“开个玩笑啦。那电池接触不良吧？”

我：“是的。这收音机长期不用，但电池没拿出来，流汤了。电池座子负极那个铜片已经变黑色了，把它刮干净就可以了。”

师：“我第一次给人修理收音机没这么幸运，我那年上初中二年级。”

我：“厉害啊！比我叔不差，我叔玩收音机时是上小学。”

师：“好啦，不说收音机啦。我们今天要说线圈儿的事。记得发电机吗？”

我：“洛仑兹力，磁能生电。”

师：“今天我们要多说一点，磁可以生电，电也可以生磁。收图。（figure0167）”

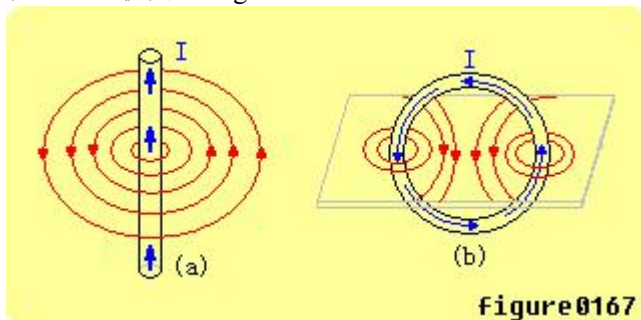


figure0167

蓝色箭头为电流流动，红色箭头为磁场，这里我们不去考虑磁场的南北极问题。

我：“电生磁的事儿我早就知道了，以前玩过电磁铁。”

师：“这个图（figure0167）中的（b）其实就是个电磁铁，只是没有铁芯儿只有一圈线圈。不论是一根直导线还是一个线圈，它流过电流时都能制造出磁场来。”

我：“有铁芯儿和没铁芯儿有区别吗？”

师：“有啊，我们先不管这个。我想说这个电磁铁产生的磁也可以再生电。看这个图。（figure0168）”

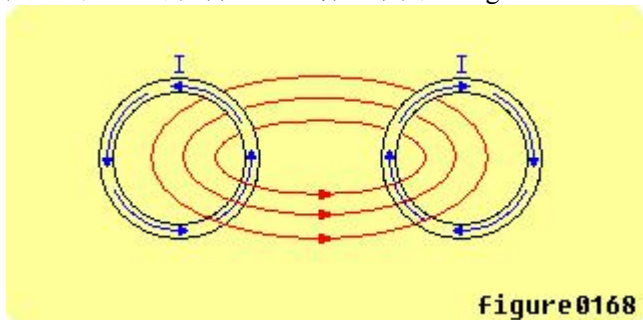


figure0168

师：“红色的磁场由左边线圈中的电流产生，右边线圈中的电流是这个磁场激发的。”

我：“想要右边这个线圈中有电流，那这个线圈要在磁场中运动起来，这样才有洛仑兹力。”

师：“这个线圈未必需要动起来。如果左边这个线圈流过稳定的电流，那它产生的磁也是稳定的。这时想让右侧的线圈中有电，右侧的这个线圈就只能动起来才行。”

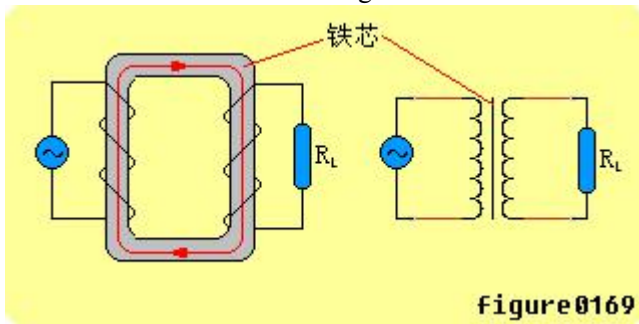
我：“左边这个线圈可以流过不稳定的电流对吗？这时右边线圈也就不用动了？”

师：“对，左边的线圈可以流过‘交流’电，这时它制造出来的磁是随电流而变化的，右边的线框固定不动时也能产生电。”



我：“而且也是产生交流电吧？会是直流电吗？”

师：“当然也是交流电啊。其实这就是变压器的原理，叫做‘互感’，看图。（figure0169）”



师：“灰色方框是铁芯，左边的线圈激起红色的变化的磁场，右边线圈就会生出电给  $R_L$ 。而且右边线圈输出的电压和左边线圈输入的电压还有关系。”

师：“假设左边的线圈绕了 10 圈，右边线圈只绕了 1 圈，那么如果左边的线圈通了 220V 交流电，那么右边线圈可以产生 22V 的交流电。”

我：“是 220V 的十分之一？因为它的圈数就是左边线圈的十分之一？”

师：“就是这样的规律。‘变压器’很简单吧？”

我：“有点意思。假如右边的线圈换成 100 圈呢？那就有 2200V 的电压输出喽？”

师：“理论上来说是这样的。”

我：“这样来看制造一个‘电警棍’好像很容易啊？弄个变压器就行？”

师：“理论上来说是很容易，不过电池是不能直接用变压器来变压的，那是直流电。”

我：“从你的话茬儿我又猜出一个推论，就是电池出来的直流电是能够转换成交流电的。”

师：“有点小聪明。交流可以‘整流’成直流，直流也能‘逆变’成交流。”

我：“也没什么啦，我同学的电脑带一个 UPS 后备电源的。”

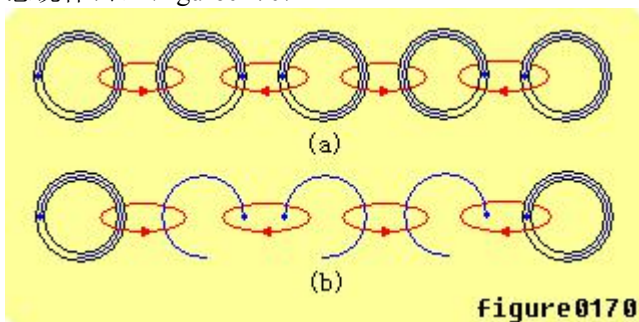
师：“你早知道 UPS 能用一块蓄电池产生 220V 的交流电？根本就不是‘猜’出这个结论的？”

我：“我觉得我同学让卖电脑的忽悠了，那 UPS 从来没发挥过作用，他家就没跳过闸。”

师：“呵呵，按你的说法只要他家跳过一次闸那就不算被人忽悠，是否被忽悠的评判标准就是跳闸与不跳闸？”

我：“反正我觉得那东西没什么用，压根儿就不应该买。”

师：“不提跳闸的事了。你看看这图，猜下图（a）想说什么。（figure0170）”



我：“最左边一个线圈因电而生磁，右边相邻的第

2 个线圈因这个磁而生电。”

师：“第 2 个线圈因磁而生电后，生出的电又会产生新的磁。”

我：“那与它相邻的第 3 个线圈也会因磁生电了，生出的电又会生出新的磁，继续让相邻的下一个线圈生电？”

师：“正是，所以电的传播不一定要依靠导体之间互相接触才行。”

我：“还不如拉根电线简单明了呢。这框框圈圈的不更费劲吗？”

师：“那再看看图（figure0170-b）。框框圈圈可以不存在，并不妨碍电向远方传播。”

我：“你留了最左最右的两个线圈？”

师：“那两个线圈叫做‘天线’。”

我：“那这个没有框框圈圈的就叫‘无线电’对吗？收音机就是靠这东西工作的？”

对“无线电”的另一种解释是“无限”地往里“垫”。“垫”什么？“金钱”和“生命”是也。

师：“这就是所谓‘电磁波’。麦克斯韦因为预言了这世界上存在‘电磁波’而成为伟大的科学家。”

我：“预言？麦克斯韦是个‘半仙儿’对吗？就像我们同学做梦预言亲人去世那样？”

师：“麦克斯韦从理论上论述了电和磁相互产生可以使能量在空间传播，但他没有通过实验证实过。真正通过实验观察到这个现象的人是‘赫兹’。”

我：“所以交流电的频率单位被命名为‘赫兹’了？”

师：“应该就是这样吧。我没研究过历史。”

我：“我还有个问题：我总认为有电流才有磁的，现在能承载电流的这些导体线圈都没了，怎么还会有磁呢？”

师：“变化的‘电场’就可以产生‘磁场’，有没有电流是无所谓的。”

我：“怎么又出来‘电场’了？这个‘场’你从来就没说清楚过？”

师：“这么说吧：有一个失了电子的正电荷，离它 1 米外有一个电子，这个正电荷对这个电子有吸引力。”

我：“这个吸引力就叫‘电场’？”

师：“你可以先这么认为。如果电子一动不动，那么正电荷对它的引力也不会变。这时候是不会有磁出来的。”

我：“如果这个电子冲向正电荷就会有磁出来？”

师：“是啊，因为正电荷对电子的引力有变化了，或者说它们之间的电场变了，这时就生了磁。”

我：“当初说原子结构的时候提过这种引力的。”

师：“那你还记得‘安培’的定义吧？”

我：“1 库仑/秒啊。这个没错吧？”

师：“其实只要电子朝着正电荷冲过去，这时就有了‘安培’对吧？不一定非要有个导体的。”

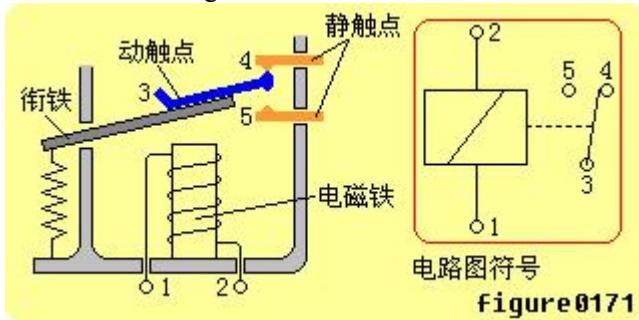
我：“貌似明白了一点，电流也只是个‘场’发生变化的结果而已，不是产生磁的原因？”

师：“好了，我们以后的学习中暂且碰不上‘无线

电’的，但是电磁铁需要多做些讨论。”

我：“计算机中要使用电磁铁吗？”

师：“早期的计算机中要使用电磁铁的。你收一个图片看一下。（figure0171）”



我：“还以为是早期的计算机呢。这是一种电子零件吧？”

师：“这个元件叫做‘继电器’，早期的计算机就是用这个东西做的。”

我：“我听说早期的计算机是用那种什么‘真空管’造的吗？几间房子那么大？”

师：“早期的‘电子’计算机是用真空管造的。在没有进入电气时代的更早期的时候计算机是用齿轮和杠杆之类的东西造的。”

我：“齿轮和杠杆，我老爸对这东西很熟，可他是电脑盲。”

师：“你家还有上发条的那种钟吗？它可以实现‘加1’计算，逢60还能进位呢，纯机械的。”

我：“这个我倒是明白，其实‘算盘’也是纯机械的计算机，人力驱动的。”

师：“就这个图（figure0171），你认为如果1端和2端通了电的话，这个继电器会有何动作？”

我：“衔铁会被电磁铁吸下来，这样动触点3就和静触点5接通了。”

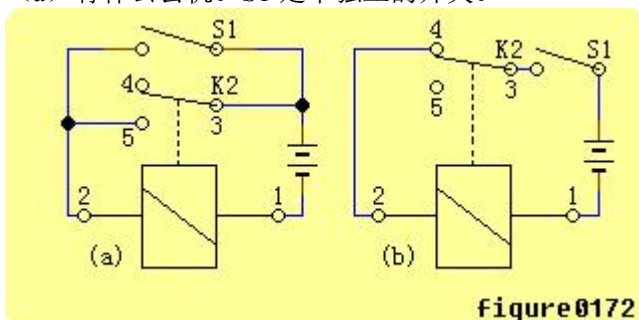
师：“是的。如果1端和2端又没电了呢？”

我：“那衔铁被弹簧拉上去，动触点3又和静触点4接通了。”

师：“静触点4叫‘常闭触点’，静触点5叫‘常开触点’。”

我：“这就是个‘单刀双掷’的开关，由电来控制的。”

师：“你看一下这个图（figure0172）吧，看看图（a）有什么玄机。S1是个独立的开关。”



我：“S1接通电磁铁有电，则K2的常开触点(3-5)也接通了。K2的常开触点实际上会代替S1接通电磁铁和电池，那么S1就没有作用了。”

师：“说得不错。这个装置具有一个极重要的特性，它具有‘记忆’力。”

我：“电容器不是也有记忆力吗？这个继电器有点不一样啊？”

师：“是不一样。我们如果把S1看做是‘输入’，K2看做是‘输出’，那么这个装置相当于将输出返回给输入。”

我：“这有点绕，K2其实取代了S1啊？”

师：“这是一个小技巧，叫做‘反馈’，电子线路的设计中经常使用这种小技巧。”

“馈”的标准读音是四声“kui”，但圈内人经常读作二声“kui”。

我：“把输出返回到输入？还要对输入产生影响吧？”

师：“没错，对输入没有影响那返回去干什么呢？你再看看图（figure0172-b）。”

我：“看不懂，这个K2是怎么回事？电磁铁没电时它接通(3-4)是吗？”

师：“对，S1没接通时电磁铁没电，这时K2的常闭触点(3-4)是接通的。现在接通S1，电磁铁通了电后K2的常开触点(3-5)就接通了，常闭触点(3-4)反而断开了。”

我：“这样电磁铁就又没电了？”

师：“对啊，电磁铁没了电那K2的常闭触点(3-4)是不是又能接通了？”

我：“有意思啊，K2常闭触点一通磁铁就有电，磁铁有电K2常闭触点就断，这一断磁铁又没电，然后K2常闭触点又通，这不是瞎折腾吗？”

师：“这不是瞎折腾，这叫做‘震荡’，也是利用‘反馈’这个小技巧实现的。”

我：“要是震的话也会有个‘频率’的问题吧？”

师：“有，频率和衔铁摆动的速度有关系，或者说和拉动衔铁的弹簧弹力有关系，如果弹簧弹力大，那么磁铁就不能把它拉开很大的缝隙，它弹回去也快，这时频率就高。”

以上对振动频率的叙述不很准确，以后还有补充。

我：“学了这么多电子元器件，还就这个继电器有点独特，会震。”

师：“不过我还没见过有人把继电器弄成震荡的，震不了多久它就散架了。”

我：“是啊，靠弹簧的弹力通断，听着就不牢靠。”

师：“还不止弹簧不牢靠，触点可能打出火花，氧化长锈从而接触不良，甚至可能粘上小虫子。”

我：“还有这事儿呢？这虫子也够倒霉的，怎么死不好非让电磁铁夹死。”

师：“这是真事儿，曾有一台利用继电器制造的计算机突然失灵，最后检查发现一个继电器的触点上粘了一只蛾子造成接触不良。负责检查的工程师在他的笔记本记下了一句话：‘第一次发现真正的BUG’，从此以后计算机出现毛病都被称为‘有BUG’。”

我：“BUG这个词我听说过。据说某公司的操作系统中有好几百个BUG？”

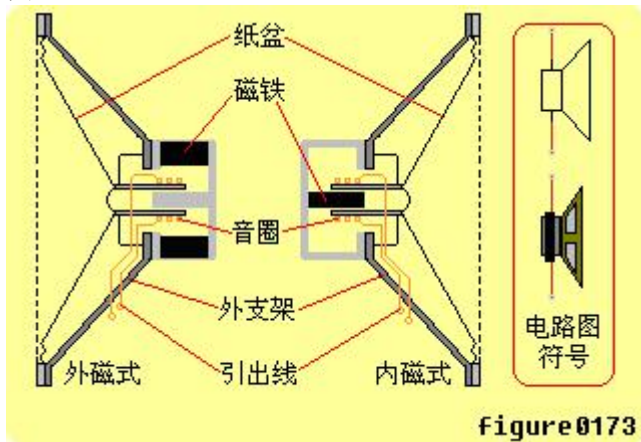
师：“我不知道。这都是些小道消息罢了，不足采信。”



师：“好了，不说 BUG 的事了。还有一种利用电和磁来工作的元件，就是喇叭。”

我：“这个我熟，我拆过喇叭上的磁铁。”

师：“那就长话短说吧。你收个喇叭的结构示意图。”



我：“那层黑纸叫‘纸盆’啊？”

师：“纸盆后面连着一个‘音圈’，也就是个线圈了，这个线圈处在一块磁铁的磁场中。当这个线圈通上交流电后，它自己产生的磁场和磁铁相互作用，这

个线圈就会震动，它一动就会带着纸盆一起震动，这样就出声音了。”

我：“CD 机上带的耳机也是这个道理？”

师：“耳机也是一样的道理。”

师：“当然，这只是最常见的一种喇叭，叫‘动圈’式，或者叫‘电磁’式，还有别的类型。”

对于耳机，有一种说法是“分为‘磁电（动圈）式’和‘电磁（动铁）式’两种”，我对此没有深入了解。

我：“内磁和外磁有何区别？”

师：“外磁就是磁铁露在外面，它的磁场会辐射到外面，对外面的电路造成干扰。”

我：“内磁是把磁铁放到壳子里面了？”

师：“就是这个意思，由于壳子可以避免磁场外泄，所以内磁的喇叭对外部影响较小。”

早期使用“显像管”的电视机都会用内磁的喇叭，因为“显像管”对磁场干扰是非常敏感的。

我：“我以前拆过的喇叭应该是外磁的，那磁铁是个环形。”

师：“你就拆吧你。我先走了。”

上网搜了下“继电器”，发现了一些新名词，比如“时间继电器”，还有“固态继电器”等。随手点开一个“固态继电器”相关的页面，原来此类继电器并非使用电磁铁弹簧和触点的，它内部是一些电子线路，利用电子元件实现那些常开常闭开关。此种继电器可靠性应该比较高，我总觉得那些弹簧触点之类的东东不够牢靠。

继续搜索“继电器 计算机”，在“矿石收音机”论坛上发现一篇帖子，一个老外用了数千个继电器自制了一台计算机，有 4 个大衣柜那么大。我不得不佩服这哥们儿的毅力，他怎么能静下心来一根一根的接那么多电线呢？这些外国人真是钱烧的，他难道不用上班么？



请参考 <http://www.crystalradio.cn/thread-228584-1-1.html>，由 YSU2007 网友发布，截止到 2014 年 10 月 24 日此帖仍可阅读。以上图片为排版方便做了编辑。

我不知道我们以后会不会用到继电器，即使用大概也不会像这个老外那么疯狂吧。不过我想那个喇叭应该要用的，至少我这台电脑中有个喇叭，每次开机时会“滴”一声。未来我要做的那台电脑，会有声卡么？应该有的吧？没准儿我还能给它开发电子游戏呢。

## 2005-06-25：认识电感器（一）

今天闲来无事，一时兴起想在家里寻找一下叔叔遗留下来的东西，于是翻箱倒柜大动了一顿干戈。真是“破家值万贯”啊，这一翻才发现，敢情家里还留着那么多破烂儿呢。我当初给俺叔的那块磁铁居然呆在我老爸的工具箱底，我的名字还写在上头呢。

不过好东西也发现了一些，那架传说中的“矿石收音机”被我翻出来了，那上面还真有“可变电容器”。我还想拿它听听广播，但是耳机没有了，向老爸询问耳机的去向，他老人家也不清楚弄哪儿去了。不过老爸非常郑重地说：“这个收音机肯定能响！”我想也许我的 CD 机用的耳机可以用这收音机上，但老爸说这东西要接“高阻”耳机，好像还得是军用的什么东东，听着很唬人。

另一个大纸箱子里翻出了一堆电子零件，乱糟糟的什么玩意儿都有，不过看样子年代都相当久远了。听老爸介绍，这些东西都是当初那位老电工送我叔的，就是那个带着我叔一起玩收音机的老电工。自从我们家从那大杂院儿搬走后就断了联系，现在连那大杂院儿也早就拆了盖楼了。

“好人啊！要没有这老师傅咱家没今天！”

就因为我翻出这一箱子古董，老爸在饭桌上一个劲儿地忆苦思甜，连老妈都听的入神：“你们家早先穷成那样呢？我当初嫁你的时候都不知道谁？”

“你嫁过来的时候已经好很多了。呵呵，呵呵呵。”

我相信老爸当初肯定是骗了我妈，到今天还在骗她，骗了她一辈子。

折腾到晚上 10 点多，总算执行完“以课内学习为主”的训令了，我来到网上时，恰好 C# 已经呆在 MSN 上了。

我：“什么是‘高阻耳机’？”

师：“你从哪儿听说了这种古董？”

我：“我叔小时候做的矿石收音机被我找出来了，我爸说要接‘高阻耳机’，还是军用的据说。”

师：“这东西还得从‘内阻’谈起。矿石收音机声音很小，你接上耳机，肯定希望耳机能从矿石上取到最多的能量，否则它声音太小。”

我：“矿石的内阻比较高？所以耳机的电阻也得高？”

“矿石的内阻”，这种说法可是不怎么严谨的。耳机之前的电路内阻并不能简单的由一个矿石确定。

师：“阻抗要匹配，这样才能不浪费天线收集到的电台信号的能量。”

我：“怎么又‘阻抗’了呢？这里面还有‘抗’？”

师：“声音变成电信号当然是‘交流’的，碰到电容有‘容抗’，碰到线圈有‘感抗’啊。”

师：“碰上电阻那还是电阻。不过一个复杂点的电路终究不会只有电阻的，所以电阻和电抗经常放在一起统称‘阻抗’。”

我：“就是说一个线圈如果加上交流电，它对交流电也是有阻力的？”

师：“这跟电容是类似的。耳机和喇叭原理一样的，它内部也有线圈。”

我：“这种耳机怎么会是古董呢？现在的收音机内阻都比较低的是吗？”

师：“现在常见的喇叭阻抗是  $8\Omega$  或者  $4\Omega$ ，耳机是  $32\Omega$ 。而‘高阻’耳机我记得是  $600\Omega$ 。”

注意这里并没有强调通过耳机线圈的信号频率，线圈的电抗也与信号频率有关。

师：“交流信号源的内阻是有办法降低的，比如用

‘变压器’就行。给你个图。（figure0174）”

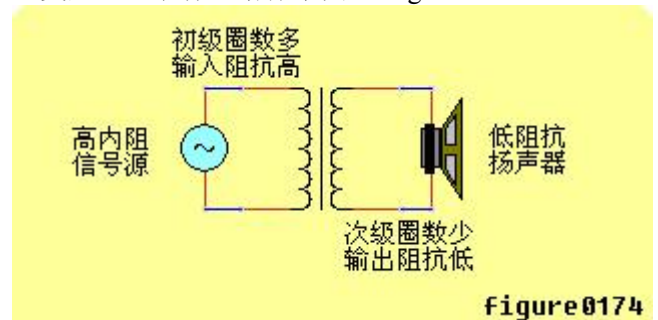


figure0174

我：“变压器不只变电压，还能变阻抗？”

师：“当然能变阻抗了，它还能‘隔直’呢。”

我：“是啊，直流过不了变压器啊。”

师：“不过对于矿石收音机这么简陋的装置，实在没办法再加一个变压器，所以只好直接用‘高阻耳机’了。”

我：“左边 10 圈右边 1 圈，就可以把左边的 10 欧姆变成右边的 1 欧姆吗？”

师：“好像不是圈数之比，是圈数之比的平方，我不记得了。”

我：“怎么又不记得了呢？”

师：“你自己上网查一下吧。”

我：“我给我同学修理的那个收音机中好像没有变压器吧？线圈倒是看见了，起码俩线圈并排才是变压器吧？”

师：“变阻抗又不是只能用变压器，方法有很多，用变压器是最普通的技术了。”

师：“好了，我们还是开始今天要讨论的内容吧。我们今天具体讨论‘线圈’的一些事。”

我：“线圈就应该叫做‘电感’吧？你刚提到了‘感抗’。”



师：“你还挺会引申的。电感器和电容器还有电阻器是三种最基本的电子元件。电感器是最复杂的一种。”

我：“不就是把电线绕成圈儿吗？它会比电容复杂？”

师：“第一，你要考虑用什么样的导线，多粗的线，什么材料的线，什么样的绝缘皮，表面要不要镀上银或金。”

师：“第二，你要考虑绕多大直径的圈，绕多少圈，圈与圈之间是紧挨着还是留出间隔，是绕成一层线圈还是圈上加圈。”

师：“第三，你要考虑要不要加上芯儿，加什么材料的芯儿，什么形状的芯儿，这个芯儿在线圈内部能不能伸缩调节。”

师：“第四，你要考虑如果一个芯儿上绕两个线圈儿的话，这两组线圈儿是顺时针绕还是逆时针绕，或者一顺一逆。”

师：“最后，你要考虑线圈儿绕好后，要不要加个外壳，加一个什么材料的外壳。”

我：“好吧，败给你了，电感器最复杂。”

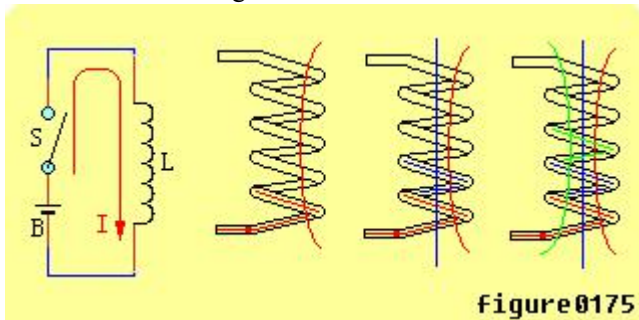
师：“电感器有一些做好的成品直接出售的，但很多时候我们必须找芯儿找线自己来绕，这才能满足要求。”

我：“不是吧？这可有点难了，就算找得着材料，要是需要绕一千圈呢？还不得累死？”

师：“我们以后的所有实践中极少用电感，用也不需自己绕电感，买现成的就行。”

我：“这还差不多，吓到我了。”

师：“我们下面来研究一下给一个线圈通电的情景。收个图先。（figure0175）”



我：“绕这线圈儿用多长的线？多粗？”

师：“你怎么想起问这个来了？你想知道这个线圈有多大电阻？”

我：“对啊，如果线又粗又短的话，岂不是相当于一短路？电源受不了啊？”

师：“确实如你所说。我们现在假设这个线圈有一定的电阻，不会让电源短路。我们来看看线圈与电阻的不同之处。”

师：“现在开关接通，电子从电源负极出来，进入线圈且刚转过第一圈儿。”

我：“慢镜头？蒙太奇的表现手法？”

师：“这一圈儿有了电流就必然要生磁，这些电子每转过一个圈，这磁呢就要加强一点，这是一种变化的磁。”

我：“图有点看不懂。”

师：“红色的一圈电流产生红线表示的磁，蓝色的一圈电流产生蓝线表示的磁，绿色的一圈电流产生绿线表示的磁。”

我：“随着电流涌入线圈，线圈产生了逐渐变强的磁？”

师：“就是这个意思吧。”

我：“变化的磁还要生电啊？”

师：“没错啊，那些电子还没到达的线圈在这些磁的刺激下自己就会生电，而且最关键的是，它们自己生的电总是跟电源出来的电‘对着干’的。”

我：“会顶着电子不让走吗？这可就限制了电流的强度了。”

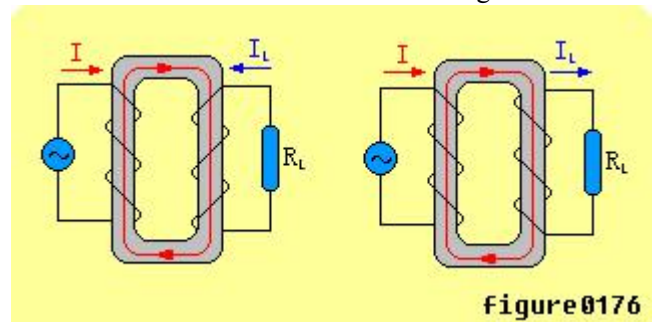
师：“是的。如果线圈的电阻是  $R$ ，接上  $E$  后本来应该有  $E/R$  那么大的电流，但是在开关闭合后的一个短暂时间内，电流达不到  $E/R$  那么大。”

我：“长时间后就能达到  $E/R$  了？它自己生的电还是抗不住电源的吧？”

师：“是啊，一个线圈通电后短时间内它自己能生出一些电，这被称为‘自感’，这和变压器不一样。”

我：“变压器是有两个线圈的，那个叫‘互感’的。”

师：“一个线圈通电生磁，这个磁又让另一个线圈生电，这个叫‘互感’。收这个图。（figure0176）”



我：“这上回说过了。”

师：“补充一点内容，看右侧线圈电流方向。”

我：“蓝色箭头方向不一样？”

师：“我刚说过的，一个芯儿上绕俩线圈儿，你得考虑这俩圈儿都顺时针绕还是逆时针绕或者一顺一逆的绕。”

我：“这要用什么定律来判断感应出来的电压极性吧？左右手定则？”

师：“是啊，当然可以用一些定律来判断。我不记得了。”

我：“您到底记得些什么啊？”

对于“互感”而言，多组线圈有个“同名端”的概念，这里不做赘述。

师：“行了，我们还说电感。开关接通后我们等线圈内的电流稳定下来，然后突然把开关断开。”

我：“线圈中的电流要变没了，这又会产生变化的磁对吧？”

师：“是的，这个变化的磁又会让线圈‘自感’出电来，这时生出的电，是阻碍电流消失的，或者说会继续推动线圈中的电子运动，尽管电源已经断了。”

我：“电流要增强电感会顶着不让强？电流要减弱电感又拉着不让弱？”



师：“所以说电感线圈中的电流‘不能突变’。”

我：“这和电容有一拼啊？电容是两端电压不能突变。”

师：“是啊，把电感和电容对比着研究会很有意思的。还记得一个电容接在二百二插座上的事吗？”

我：“呵呵，当然记得，电容不消耗能量，但我得掏电费。”

我：“电容接交流电时还有‘容抗’。”

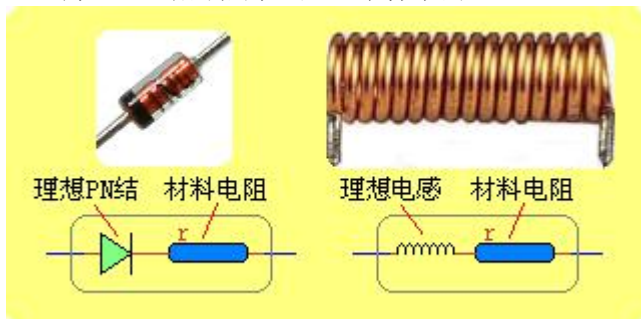
师：“电感也有‘感抗’。而且电感接交流电你也得掏电费。但这与电容的情形有区别。”

我：“电容中间是绝缘介质，电感却是一根导线绕成的。”

师：“所以电感器存在一个实实在在的电阻，这个电阻可是耗电的。”

我：“这样来看一个电感器实际上可看成是一个电阻串联一个理想电感，就像一个二极管看成一个电阻串联一个理想PN结那样。”

师：“总结的很好，是这个样子的。”



我：“哈哈，我应该用超导材料做成电线，然后绕成电感，这样就和电容一样了，对吧？”

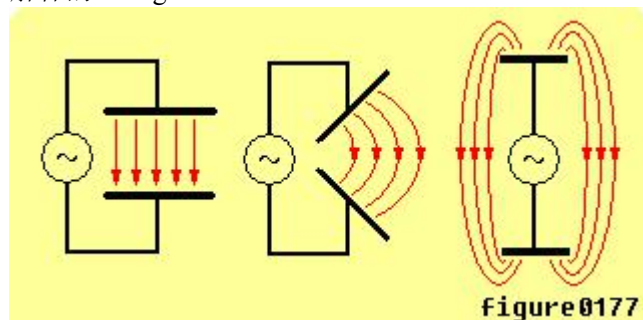
师：“电能生磁，磁又生电，电又生磁，连绵不断。远方在召唤。”

我：“好湿啊！电感能辐射电磁波？这也是消耗能量？”

师：“对啊，能量传播到远方了。你是不是想问一个电容怎么不辐射电磁波？”

我：“对啊，电容两个极板接交流，也会有变化的电场，应该生磁辐射出去啊？”

师：“收个图看一下，看看我们对‘天线’是如何解释的。（figure0177）”



我：“难道天线就是个电容？这玩意儿神了简直！”

师：“天线可不是一个电容就能概括的，这里边道儿深了。”

师：“这些内容不是我的专长，我也只能这么粗浅的说说，以后你慢慢学去吧。”

我：“俺叔应该专长，他学通信技术的。”

师：“最后我们再来点‘定量’的内容，来谈谈电感量。”

我：“又要‘定量’，做计算太枯燥了。”

师：“我也嫌麻烦啊。长话短说吧：一个电感，如果流过线圈的电流在1秒钟这么长的时间内变化了1安培，比如从0增加到1A，或从1.5A减到0.5A，这时候在电感两端自感出1V的电压来，那么我们说这个电感具有1‘亨利（H）’的电感量。”

我：“您这叫长话短说啊？”

师：“这还嫌长？要不你这么理解：一个线圈，两头加上1V的电压，然后观察到电流从0增到1A时刚好用1秒钟，这个线圈的电感量就是1‘亨利’。”

我：“这个说法还形像一点。亨利是谁？”

师：“约瑟夫·亨利，美国人，他发现的自感现象。你可以GOOGLE一下，有一些趣闻轶事。”

师：“好了，最后提一句：亨利用大写的H表示，这是一个比较大的单位，我们常见的很多电感器都是‘毫亨（mH）’和‘微亨（μH）’的。再见了。”

我：“再见，晚安。”

我知道这家伙不会在乎我最后的道别语的，但还是说上一句的好。打开GOOGLE的主页，输入了“约瑟夫·亨利”，搜出一大把页面。找了一个有“趣闻轶事”的读了下，这个亨利还真是个不简单的人物：他制成了强力电磁铁，继电器竟然是他发明的，他比法拉第早1年发现电磁感应，比赫兹早40年发现无线电波，只不过他的很多发现和发明都没有正式出版，所以自己取得的荣誉不多。

至于他的趣闻轶事，据说他是因为追一只兔子追进了教堂里，然后被教堂中的诸多藏书所吸引，最终走进科学殿堂的。跟着小白兔？这一幕似曾相识啊？我突然想起了电影《黑客帝国》，趁着还有时间，把这片儿复习一下吧，印象中这片儿里好像是有“跟着小白兔”这么一出的。

当然，咱也不能只搜趣闻轶事，我还搜了一下“阻抗匹配”，发现人家对“阻抗”的解释是“电阻、电容抗及电感抗在向量上的和”，这里的“向量”我不明白是怎么回事，而且“阻抗匹配”也不仅仅是为了获得“最大功率传输”，对于“高频”信号而言，“阻抗匹配”可以确保信号在“传输线”上“没有反射”，这个“反射”又是什么意思呢？

继续搜索“铁芯”，这东西其实不是“铁”，而是“硅钢”片，也叫做“矽钢”片，其实就是钢材中含有硅了。用这种材料做芯绕成变压器体积会比较小。不过有了“铁芯”之后似乎增加了能量损耗，也就是“铁损”自己会发热，这就不只是绕线圈的铜线有电阻会发热那样简单了，这是好还是不好呢？通过搜到的信息看这应该是不好的，但“铁损”是有办法控制的，钢材中加入硅就是为减小“铁损”，把硅钢做成“片状”也是为减小“铁损”。我想铁芯的损耗如果能控制得很小那就是划算的，因为变压器体积小了，肯定用的铜线也少了，这还

会减少“铜损”吧？因为铜线的电阻小了啊？如果多了的“铁损”等于少了的“铜损”，那就是实际损耗并没变，这时变压器体积变小不就是白捡的便宜吗？

## 2005-06-27：认识电感器（二）

电感器与电阻器和电容器相比，确实有不少相似之处。比如电阻的定义是  $R=U/I$ ，而制造出的一个电阻器究竟阻值多大，则取决于材料长度横截面积这些条件。电容也是如此， $C=Q/U$  是它的定义，而实际制造出一个电容，容量由介质材料极板面积和板间距离等等因素决定。那么电感呢？电流的变化率和自感出来的电压定义了电感，但真正绕出一个线圈的话，其电感量恐怕要由圈大圈小圈多圈少来决定的吧？

电感的定义公式该怎么写呢？难道是  $L=I/U$ ？这应该不对， $I$  表示电流，但并不表示电流的“变化”啊。我倒是知道希腊字母“ $\Delta$ ”用来表示变化量，那就应该是  $L=\Delta I/U$ ，这似乎也不对。

我：“电感的计算公式是什么？”

师：“这种公式很麻烦的。绕几圈？多大的圈？等诸多条件。”

我：“我是说定义电感的公式，就像定义电阻的  $R=U/I$  那样。”

师：“这个和‘磁’有关系，干嘛琢磨这个？”

我：“电阻和电容都有个公式，这个电感也应该有啊，要不多不和谐。”

师：“把‘磁’扯进来太麻烦了，得解释一堆东西。”

我：“我刚想了用电流的变化和自感出的电压来表达， $L=I/U$ 。”

师：“这个不对。提到‘变化’二字，你起码也应该想到  $\Delta I$  才行啊。或者是专业一点的  $dI/dt$ 。”

我：“我知道不对，太麻烦的就不去整它了，呵呵。”

师：“ $U=L \times (dI/dt)$ ，微积分又扯进来了。不过  $I/U$  也是有点说道的。”

我：“有这个公式？这是个什么东东？”

师：“ $U/I$  是电阻  $R$ ，所以  $I/U$  是  $R$  的倒数，叫‘电导’。”

我：“还以为是个新东西，原来还是和电阻有关联。”

师：“其实和电阻是一回事。电阻反映物体‘阻碍’电流的能力，这个电导反映物体‘通过’电流的能力。”

我：“这个电导也以什么为单位？”

师：“它的单位以前用‘姆欧’。现在改成‘西门子’了。”

我：“真够逗的，这也能倒过来用啊？”

师：“昨天讨论电感时落了点内容，我们先来补上。”

我：“你昨天跑那么快急得是什么呢？”

师：“电感也有个串联并联的问题，它和电阻一样，串上总电感增加，并上总电感减小。”

我：“ $L=L_1+L_2$ ？ $L=(L_1 \times L_2)/(L_1+L_2)$ ？”

师：“计算公式是这样的，但是很少在实际电路中搞电感的串并联。”

注意电感元件中经常有“带抽头”的形式，类似于电感器“串联”，但很少见到有人把多个电感器串或并起来使用的。另外，变压器也有“带抽头”的形式。

我：“那就不管了，呵呵。”

师：“另外就是电感接交流时的感抗，它和电容性质相反，信号频率一定，那么电感量大感抗就高，电感量小感抗就低。”

我：“电感量一定，那信号频率高感抗就高，信号频率低感抗就低。这个很简单啊。”

师：“这个很重要，你得牢记电感和电容的性质不一样。”

师：“现在你收个图，看看我们在电子市场中很容易买到的电感器。”



我：“左边这个有色环的和电阻器不是一样吗？怎么区分呢？”

师：“这个是‘色环电感’，从外形上看和电阻器相似，但你用万用表测一下就很容易分辨出来。”

我：“线圈的电阻一般都很小？用蜂鸣器那一档测量应该会叫吧？”

师：“蜂鸣器档是个简单的办法，但是小于 70 欧的电阻用蜂鸣器档测量也会滴滴叫的。”

注意不同的万用表这个参数可能有区别，不一定是 70 欧姆。

我：“那这玩意儿和电阻是没法区分喽？看外形好像比较‘粗大’？”

师：“配合外观可以啊，你也可以根据环的颜色看，如果环的颜色显示出标称值肯定大于 70，但表的蜂鸣器会叫，那就只能是电感了。”

我：“这色环和电阻那个是一样的吧？”

师：“一样的。电感一般是 4 个环的，表示精度的第 4 环通常是金和银色。”

我：“看来没有高精度的电感了？”

师：“这东西和电容类似，想做成高精度的不大容易。”

我：“最右边那个像电解电容的是什么电感？”

师：“那是‘工字电感’，它有一个‘工’字型的磁芯儿。”

我：“看着很粗大啊？用的线很粗吧？”

师：“也可能是细线绕的圈数多呢。不过用粗线的允许通过大电流的。”



我们常见的工字电感通常使用粗铜线绕制，用在电源电路中，要求通过较大的电流，也称“功率电感”。

我：“这个磁芯是怎么回事？有芯儿和没芯儿有什么区别呢？”

师：“说到这个芯儿就比较麻烦，但还是有些粗浅的内容可以谈的。这得从‘铁磁’物质谈起。”

我：“怎么又‘铁磁’了？是硅钢片？”

师：“硅钢片一般用在变压器上，电感器上很少用这东东。”

师：“不是只有铁才能具有磁性，像钴和镍都可以具有磁性。它们的一些化合物也可以具有磁性。”

我：“那是我孤陋寡闻了，铁锈也能具有磁性？”

师：“据我所知‘四氧化三铁’是可以有磁性的，就是‘磁铁矿’啦。”

我：“这个能做收音机吗？和那个什么方铅矿一样吗？”

师：“怎么又扯到收音机了？这个‘磁铁矿’会干扰指北针，你要去野外旅行得留神这个。”

我：“那叫指南针好吗老大？”

似乎专业人士总是把罗盘称作“指北针”，有一种说法是只有中国看风水用的罗盘才称为“指南针”。

师：“所以做电感的磁芯儿往往用铁、钴和镍的一些化合物，有时再掺点别的调料比如锰和锌。”

师：“这种芯儿如果塞到一个线圈中间，会让线圈的磁场加强，或者说电感量会加大。”

我：“也可以说‘如果有磁芯儿，就可以少绕几圈获得较大的电感量’？”

师：“就是这个意思。少绕几圈是有意义的，导线的长度短了它的电阻就小了。”

我：“体积也可以缩小啊。”

师：“铁磁物质还有个特性，把它放到磁场中它就有磁性，去掉磁场它自己的磁性还保持着。”

我：“这个我玩过，以前我叔把一根缝衣针在磁铁上抹一下，然后穿个纸团漂水里，就成了指南针。”

师：“这个叫做‘剩磁’，直到今天这个‘剩磁’还在计算机中广泛使用。”

我：“磁盘吧？哈哈，我叔最早在中关村就是卖这个的。”

师：“他不是去了深圳吗？”

我：“去深圳之前在中关村卖过磁盘，在一个副食商店的二楼。”

师：“你竟然还知道中关村以前有个著名的副食店？”

我：“吃过，一般般啦，算不上著名。”

师：“其实‘磁’在这些物质的原子中本来就存在，只是由于原子排列的乱七八糟，所以显不出来。”

我：“外加上一个磁场这些原子就顺溜了对吗？”

师：“对。去掉磁场后这些原子仍然顺溜着，所以磁会仍然存在。”

我：“那就是说把这些原子重新搞成乱七八糟的磁就没了？”

师：“你很有想法啊！所以我们可以用火来烧这些剩了磁的金属，烧到某个温度这些原子就又乱套了，

磁也就消失了。”

我：“这事儿以前没听说。原子得到的热能太多就活跃了？”

师：“应该是这么解释吧？这个温度点称为此种物质的‘居里温度’。”

我：“又在纪念科学前辈。这帮科学家就爱搞个人崇拜。”

师：“啥个人崇拜，这个‘居里温度’确实是法国科学家皮埃尔·居里的研究成果。”

我：“那么我们必须在线圈中加入这种磁芯儿吗？”

师：“不是啊，有空心儿的电感啊。”

我：“不，我是说必须是这种铁磁物质做的芯儿吗？铜芯儿可以吗？”

师：“铝芯儿也行啊，你想加什么芯儿都行，只要你弄清楚了加芯儿后的变化情况就行。”

师：“关键是你加那个芯儿的目的是什么？想得到什么效果？线圈加铜芯儿可以使电感量减小。”

我是从哪儿得知线圈加铜芯儿电感量会减小的？不好意思我不记得了。

我：“这个芯儿的门道还真不少？”

师：“你再看看这个芯儿的外形结构，道儿深了去了，不服都不行。”



我：“那个像戒指的环儿我见过，我电脑主板上有个这个东西。”

师：“说句实在话，我们以后的研究过程中很少会用到电感器，所以我不想跟你讨论太多的内容。”

我：“内容已经够多的了，还是少点好。”

师：“再深我也讲不下去了，我在这个方向上也不是很门儿清，只是知道一点皮毛而已。”

我：“那以后如果我在这个方向上门儿清了，你是不是又要拜我为师？”

师：“你要胡了牌我当然让你上庄了，哈哈。”

师：“你以后如果研究‘开关电源’，或者无线电信号的发射接收之类的领域，就会对电感器和磁芯儿有更进一步的了解。”

我：“开关电源？电源不都带开关吗？”

师：“这个‘开关’不是指电线上装的那个开关，

是指这种电源的‘工作方式’，以后我会给你说一点。”

师：“再见，晚安。”

我：“那看来今天又到此为止喽？”

上次搜过了“铁芯”，这次又出了“磁芯”，还是用某些合金材料制成的，看起来有必要搜一下这个。于是我在 GOOGLE 上搜索了下，你猜我找到了什么？“**磁芯大战**”，这又是啥东东？

“磁芯大战”其实是一种计算机程序，多个程序共存于计算机中，每个程序执行的时候都试图“杀掉”其它程序，占据尽可能多的存储器。这给人感觉有些眼熟，这不就是“杀毒”么？

这种程序确实就是计算机病毒的祖先，由“贝尔电话实验室”的一群“黑客”最先设计的，他们把这个当成一种电子游戏来玩。我不明白这为什么叫“磁芯”大战，“磁芯”跟计算机有什么关系呢？

继续搜索“磁芯 锰 镍”，这回找到些真正和电子有关的内容。磁芯是指由各种氧化铁混合物组成的一种烧结磁性金属氧化物。例如，**锰-锌铁氧体**和**镍-锌铁氧体**是典型的磁芯体材料。锰-锌铁氧体具有高磁导率和高磁通密度的特点，且在低于 1MHz 的频率时，具有较低损耗的特性。镍-锌铁氧体具有极高的阻抗率、不到几百的低磁导率等特性，及在高于 1MHz 的频率亦产生较低损耗。

这高“导磁率”和“磁通密度”我搞不懂，但“锰锌铁氧体”在低于 1MHz 频率时有“低损耗”特性，“镍锌铁氧体”在高于 1MHz 频率时也有“低损耗”特性，这还是能感觉出一些意义的，这不就知道不同的材料应该使用在什么场合了嘛，至于“磁导率”之类的咱现在可以“不求甚解”哦。将来有机会我求到了甚解，还可以给 C# 这家伙当老师呢。

最后搜了一下“开关电源”，搜出来的“定义”是：“**开关电源是利用现代电力电子技术，控制开关管开通和关断的时间比率，维持稳定输出电压的一种电源，开关电源一般由脉冲宽度调制(PWM)控制 IC 和 MOSFET 构成。**”我觉得我还是别费劲琢磨这玩意了，反正它就是一种电源嘛。

## 本节补充说明

电感器的原理图符号比较复杂，我们已经知道用一圈一圈的曲线表达线圈，如图（figure0178-a）所示，此符号表示的线圈是空心的。那个“磁芯”有些特殊的表达方式，图（figure0178-b）中给出了一种，这种粗实线常表示“硅钢片”，也就是所谓“铁芯”，而图（figure0178-c）中给出的那种粗虚线则表示“铁氧体”芯。事实上我们在画原理图时经常不那么讲究，往往是一个粗实线表达一切芯。

图（figure0178-d）中给出了一种“微调”电感，它的磁芯做得像“螺丝钉”，线圈绕在一个空心的“骨架”上，骨架的中心也有螺纹，这个磁芯可以旋进或旋出，从而微调线圈的电感量。获得了所需的电感量之后，磁芯还要用融化的蜡固定住避免以后错位。

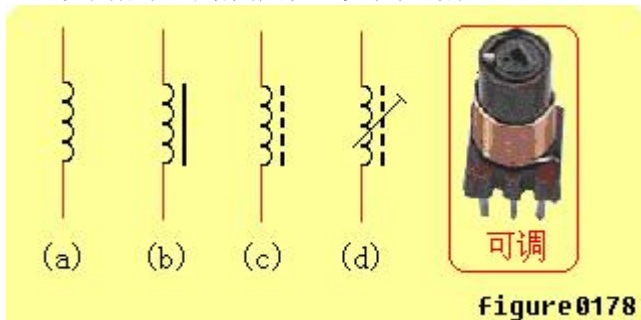


figure0178

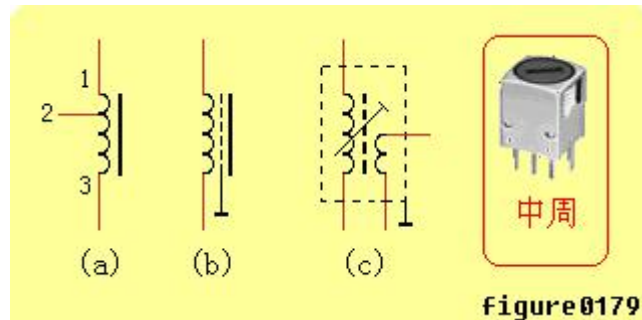


figure0179

图（figure0179-a）中给出了一种“带抽头”的电感，1到2端和2到3端可独立使用，分别当做两个电感器，1到3端也可以当做一个电感器，抽头也可能有多个，再加上线圈的不同绕法，这个东东很是麻烦。图（figure0179-b）中所示的电感磁芯外包一个“屏蔽”层，由一根细的虚线表达。图（figure0179-c）中所示整个线圈外罩一个“屏蔽”罩，也是细虚线表达的。这些屏蔽层常用铁制，为了避免干扰，在电路中这些屏蔽层还经常要“接地”，虚线上带一个“GND”的符号。如果你是一个制作过收音机的无线电爱好者，你一定晓得图（figure0179-c）是收音机中常用的“中频变压器”，简称“中周”，它的磁芯常做成一个可调的“磁帽”。

总之电感器是个非常麻烦的元件，单是那个磁芯就足以写一本专著来深入研究了。好在本教程中不会使用非常复杂的电感器，至多使用一些成品电感，这让问题简单了许多。成品电感的电感量除了色环电感外其它的都采用“字标”，单位一般是“微亨（ $\mu\text{H}$ ）”。比如  $22\mu\text{H}$  的电感会标上“220”，仍然是“两位有效数字加10的方次”，这种字标法相信大家已经很熟了。



## 2005-06-30：电感与电阻

根据以往的经验，把电感器这个元件介绍完，下面就必然是把它和前面已经讲过的元件结合在一起应用，比如接个开关或者电阻什么的。在讨论电容器时，首先是将电容器和电阻结合成“微分”与“积分”电路，那么这个电感是否也要先与电阻结合呢？

我在 GOOGLE 上查了下“阻感电路”，我觉得这与“阻容电路”应该是对应着的，无奈搜出来的却是“阻感负载”，这个东西跟“整流”关联在一起。索性查了下“阻容电路”，这一回搜出来的多是“阻容降压电路”。打开一个页面看了下，“阻容降压电路”就是利用电容接交流电时的“容抗”把高压的交流电降成低压的。怎么没人说“微分”和“积分”电路呢？那不也是“阻容”吗？

师：“今天要把电感和开关及电阻放一起说了。”

我：“那是叫做‘阻感电路’吗？和‘阻容电路’相对的？”

师：“呵呵，没人提到‘阻感电路’这个词的。”

我：“可我搜到了‘阻感负载’啊？和‘整流电路’相关的。”

师：“我不知道‘阻感负载’。你都搜什么了？”

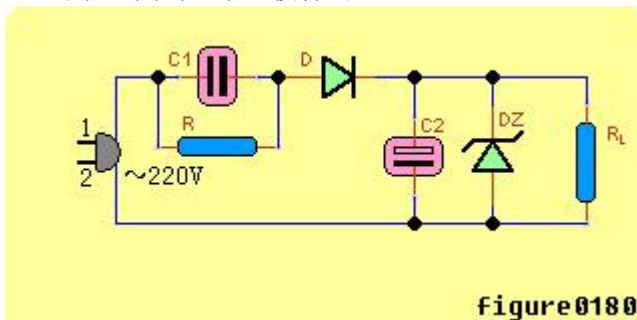
我：“我先搜‘阻感电路’，出来的是‘阻感负载’。又搜了下‘阻容电路’，出来的是‘阻容降压电路’。”

师：“你没搜一下‘阻容负载’吗？”

我：“这组合我倒没想起来。”

师：“阻容降压你找到图没有？”

我：“找到一个这模样的。”



师：“这图有点毛病，但还是可以说一说的，前面说电容的时候没有讨论。”

我：“怎么有点毛病的东西全让我找着了？难道真是我的 RP 问题？”

师：“二极管 D 和 C2 你应该明白吧？”

我：“我认为 D 是半波整流 C2 是滤波。”

师：“稳压管 DZ 呢？”

我：“稳压管 DZ 就是为了获得一个稳定的直流电压给负载  $R_L$  用。”

师：“没错。220V 交流电靠 C1 的‘容抗’降压，形成一个低压电源。注意和 C1 并联的电阻 R 很重要。”

我：“搜到的资料说这是给 C1 放电用。”

师：“是啊，插头插到 220V 插座上 C1 就会充上高压电的，插头拔下后如果 C1 的高压电无路可放，这有可能造成事故。”

我：“稳压管为什么没有有限流电阻呢？”

师：“通过 C1 的电流不会很大的。此类电源只能是小电流的。”

交流电源的频率只有 50Hz（或 60Hz），若要获得大电流，C1 的容抗就要小，其容量就要大，而对其耐压要

求又高，大容量高耐压的电容成本高体积大，不便于使用的，所以此种电源都用于小电流场合。注意和 C1 并联的 R 阻值都较大。

师：“这图（figure0180）还有个很要命的问题，关于 220V 交流输入端 1 和 2 究竟谁是火线？”

我：“我直观感觉 1 端应该是火线。”

师：“对，1 端是火线。如果 2 端是火线这个电路也能工作，但有触电的危险。”

我：“火线直接连到  $R_L$  下面去了？”

师：“是的，火线直接深入到线路内部，线路如果有暴露在外的地方那是很危险的。”

我：“这没法保证 1 端必然接火线啊？”

师：“所以使用这种电路必须注意绝缘处理，绝不允许线路可被人触摸到。”

我：“为何不用个变压器呢？”

师：“变压器得多少钱啊？”

我：“又是这种理由！”

师：“变压器体积还大呢。”

我：“那这个图的毛病就是这个触电问题了？”

师：“不，我指得是另一个问题。当 220V 插头 1 端为正 2 端为负时，电容 C1 要通过 D 和  $R_L$  充电，所以我们可以看到电流通过 D 和  $R_L$ 。”

我：“知道，所谓电容通交流其实是电容在不断充放电。”

师：“现在交流电源极性反过来了，1 端为负 2 端为正，电容 C1 呢？”

我：“它没法放电？被二极管 D 挡住了？”

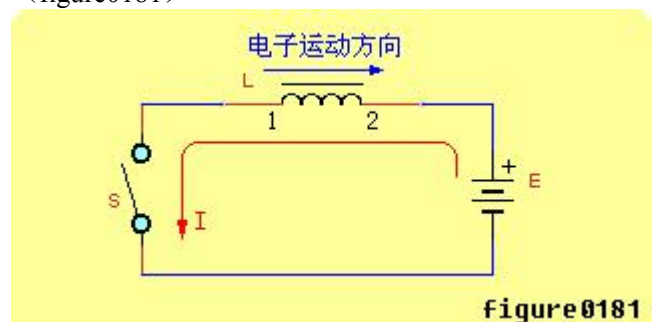
师：“对啊，只充电不放电的电容怎么通交流？”

我：“它可以通过电阻 R 放电吧？”

师：“R 一般取  $1M\Omega$ ，它是断电后供 C1 放电的。”

我：“这好象是有点不爽。”

师：“先不管那么多了，我们继续。你收图。（figure0181）”



我：“还是那句话：简单的令人发指！”

师：“你已经知道开关接通的瞬间电感中的电流是 0 对吧？”

我：“对，这个电流只能慢慢升高，像电容两端的电压那样。”

我：“我还能知道开关断开的瞬间电感内的电流不会立刻降为 0，只能慢慢地降为 0。”

师：“就等你这句话了。我们的问题是：开关断开后，电源已经不可能推动电感内部的电子运动了，而电感内的电子却仍然运动着，是什么力量推着它们继续运动？”

我：“是变化的磁啊？这不是已经讨论过了吗？”

师：“是啊，说过了，那么现在从何说起呢？”

我：“我哪儿知道从何说起？您老人家不‘备课’吗？”

师：“那么你来说一下，开关断开之后，电感中的电子是从电感的哪一端向哪一端运动的？”

我至少知道开关接通时线路中的电子必然是从电源的负端出来，跑到电源的正端。也就是说在电感器中，电子是“自左向右”运动的，从 1 点运动到 2 点。开关断开后，电感器要试图维持住电流，这不应该是产生并维持一个反方向的电流吧？若电流方向不反过来的话，那么此时电感中的电子应该仍然从 1 点向 2 点运动才对。

我：“应该是从 1 点向 2 点运动吧？和开关接通的时候一样的。”

师：“是的，就是从 1 向 2 运动。那么对电感器来说，1 端失去电子，2 端得到了电子，所以它相当于 1 端为正 2 端为负的一节电池。这可以理解吧？”

我：“这个‘电池’的电压就是它‘自感’出来的电压？”

师：“没错。你来看这个‘自感’出来的电池和电源 E 是不是‘串联’的？”

我：“是串联的。总电压就高上去了吧？”

师：“所以‘开关’S 两端承受了一个比电源还要高的高电压。这样一来在开关‘似断开又没断开’的瞬间，”

我：“这个电感能为开关‘消抖’对吗？哈哈哈。”

师：“你就气我吧你！气死人不偿命哈！”

我：“开关会打火花的，这个俺想到了。开个玩笑而已。”

师：“好啦，我们该把电感和电阻放一起了。”

我：“怎么把开关打火现象消除呢？”

师：“我们以后再说。电感之中有电阻你已经知道了吧？”

我：“知道，是导线自身的电阻。”

师：“很多时候我们不愿意这个电阻很大，也就是说我们不想绕线圈的导线太长。”

我：“不是加磁芯儿吗？能少绕几圈。”

师：“好吧，那来看一下这个图。（figure0021）”

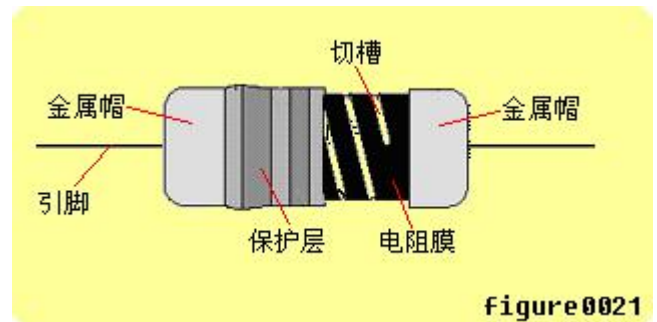


figure0021

我：“你不会想说膜式电阻的这个螺旋结构其实是一个电感吧？”

师：“确切地说是‘寄生’了一个电感。阻中有感。”

我：“这也算电感？”

师：“有一种电阻叫‘线绕电阻’，这个我们以前说过了吧？”

我：“线绕电阻确实像个电感的，难道这个膜式电阻也是？有点不确定。”

师：“不用犹豫了，当然也是。”

我：“好像电阻膜绕的圈儿少了一点是吧？”

师：“你再看看这个图（figure9005），你看看 PCB 上如果有虚线框内这样一根灰色铜膜线它是不是电感？”

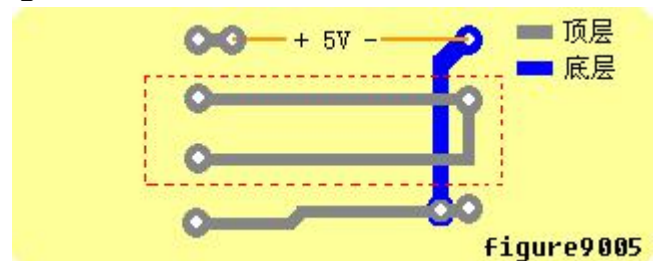


figure9005

我：“这算只有 1 圈线圈的电感是吗？”

师：“是的。所以说 PCB 上有‘分布参数’，不单分布着电容，还分布着电感。”

我：“这个没法再学下去了，太难了。”

师：“我都说过了，分布参数对那些特高级的线路会有影响，不是所有的线路都因为这个不能正常工作啊？”

我：“那我只能弄这些小儿科的线路了？我以后遇到高级的东东怎么办啊？”

师：“你慢慢长本事啊！”

师：“好了，关于这个膜式电阻的螺旋纹还是有一些门道的。比如一个高阻值电阻两端接上高压电，这个螺旋纹就可能引发问题。”

我：“它会烧吗？高压/高阻不一定有很大电流啊？”

师：“这些电子如果沿着螺旋形的电阻膜走，那就是高阻。如果它们直接从切槽上边跳过去呢？”

我：“这也会击穿？两圈螺旋形电阻膜之间的缝隙太窄了？”

师：“就是因为缝隙太窄。我们一般管这叫‘爬电’。PCB 上两根铜膜线之间如果有高压，这两根线之间的距离就必须足够大。”

我：“看来不只是‘尖端放电’啊？”

师：“尖端‘容易’放电，不是只有尖端才会放电。”

师：“有时候两根线间隔够大还是不很可靠，因为

PCB 上会积尘土，尘土又吸水汽，时间长了还是造成两根线间绝缘性能下降。”

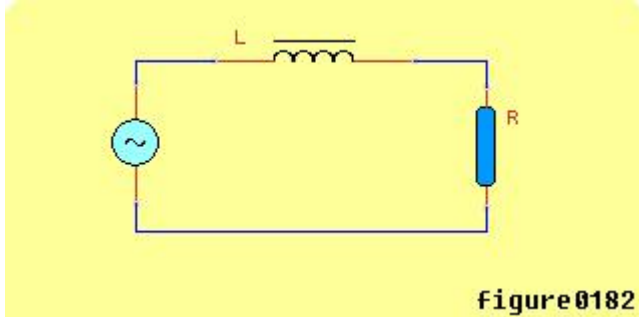
我：“把 PCB 切开就行了，两路高压分在两块板上，想离多远就多远。”

师：“心有多远线就有多远？你还真机灵。”

师：“倒不一定非切开，可以把两根线间的 PCB 基板挖穿，开出一条缝来，不必把整板都切开。”

我：“挖沟也可以，我没意见。呵呵。”

师：“我们扯得有点远了吧？还得回到电感上来。收图。（figure0182）”



我：“毫无疑问，感抗的‘抗’和这个‘阻’又要串联分压了。”

师：“学机灵了。你来说说怎么个分压法？”

如果电感量一定，那么随着信号频率的升高，感抗是增大的。对应着图（figure0182），如果信号频率升高，那么电感器上分到的信号电压就增大，相应的电阻上分到的信号电压就小了。当信号频率高到一定程度时，信号电压会完全降落在电感上，电阻上分到的信号电压几乎为 0 了。

我：“这是个‘低通滤波器’对吗？电感器会阻住高频的信号？”

师：“正解，这是一个低通滤波器。有时候我们经常使用一个电感器分流不同频率的信号：‘低频信号从我身上穿过去，高频的对不起，您得另找出路。’这样的电感器一般称为‘高频扼流圈’，简称‘高扼圈’。”

我：“这也没什么很高深的嘛。”

师：“你又牛起来了哈？那你来研究一下‘分布电感’怎么样？”

我：“打住吧！我还小呢。呵呵呵。”

师：“呵呵，好了孩子，今天就这些吧。下回我们来看怎么样消除开关打火。”

我：“好吧，您撤吧，我再耗一会儿。”

我真的如 C# 所说，搜了一下“阻容负载”，只发现了两篇貌似有用的文章，一是《热声发动机驱动阻容负载的实验研究》，看到“热声发动机”这个词，我觉得这大概不是为我准备的文章了。另有一篇论文，题为《阻容负载整流电路的谐波分析》，这好像我可以看看的。点开读了个摘要，人家要建立“数学模型”，还要“通过傅立叶级数展开”，看到了这么几句之后我便默默的关掉了网页。

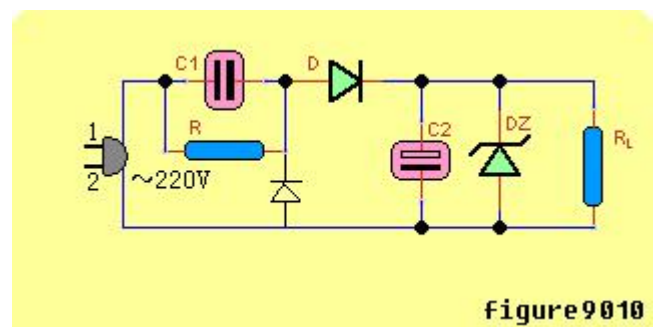
看来不是随便把几个关键字结合到一起就能搜出有意思的内容，这还得看人品。

搜一下“高频扼流圈”吧，没什么有意思的内容，大体上就是刚刚讨论的，阻住高频信号，放过低频信号。不过我倒是发现了另一个词“低频扼流圈”，这又是啥意思？难道是“阻住低频信号，放过高频信号”？这不可能吧？频率越高感抗应该越大，能阻住低频信号应该更可以阻住高频吧？我搜了一下“低频扼流圈”，网上对这个东东的解释就是“具有很大的电感”，这我也能想到啊，它和“高扼圈”有何区别呢？难道就只是个头儿大吗？

使用电感做“低通滤波”，我感觉应该比阻容积分电路要少见。因为电感器相比电容器而言要麻烦很多，用铜线绕圈恐怕体积就不小，要再加芯的话，这价钱大概也不会低的。电容器应该会便宜吧，而且电容器中毕竟还有一些精度较高的，这电感器能有高精度的么？起码那色环电感就不像高精度的。

最后剩下的，就是解决俺找的那个图（figure0180）的毛病了。当 220V 插头 1 端为负 2 端为正时，整流二极管 D 阻止了电容 C1 放电，那咱就专门给 C1 安排个放电通路吧，比如，在 C1 右极到 220V 插头的 2 端加个电阻行不？那个电阻取多大阻值合适呢？太大了电容放电困难，小了呢？当交流电源恢复 1 正 2 负时这个电阻岂不是要分走  $R_L$  的电流？看来加上的这个通路只能在电源 1 负 2 正时通，1 正 2 负时就应该断开，难不成，加一个二极管？（figure9010）

没啥把握，还是继续放狗搜一下“电容降压”吧。翻过若干页面后我不由得一声叹息：你说我上回咋就想着多看几个页面呢？可不就是加上一个二极管嘛。唉——！！

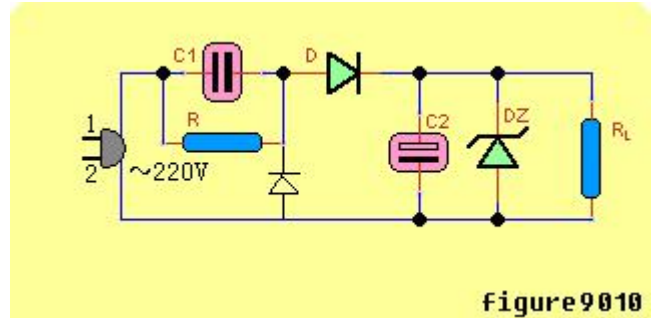
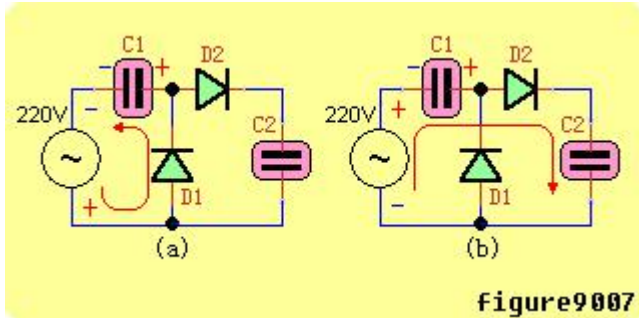




## 本节补充说明

本来没准备写“电容降压”这个环节，后来偶然发现了一些有意思的现象，而且是我以前从没想过的，所以就增加了这个小知识点。我们以前补充说明过“倍压整流”电路，还记得吗？在 2005-06-14 那一小节。

图 figure9007 是“二倍压”整流电路，而 figure9010 是“电容降压”整流电路，若不看电阻  $R/DZ/R_L$  的话，它与 figure9007 的区别是什么？电容  $C1$  是导致“倍压”还是“降压”？这是个值得思考的问题。我觉得这首先可以真正焊接个电路来观察一些现象，把 figure9010 中的  $DZ$  和  $R_L$  去掉，然后我们观察电阻  $R$  对电路有何影响：他接在  $C1$  两端时我们在  $C2$  上得到多高的电压？它断开之后我们在  $C2$  上得到了“二倍压”吗？然后我们可以接上  $R_L$ ，再观察  $R_L$  对电路有何影响，比如  $R_L$  取  $1M\Omega$  时  $C2$  两端的电压如何？ $R_L$  取  $50\Omega$  又怎样？等等吧。至于  $DZ$  就不要加了，加上了它  $C2$  两端的电压也就不会有什么悬念了。



显然，220V 交流电实在有点危险，我们需要先用个小变压器把电压降下来，比如 9V。电容  $C1$  的耐压要比交流电源高，对于 220V 的交流电源，其峰值是 310V，则  $C1$  的耐压要 400V， $C1$  是不能用电解电容的，这好理解，它两端的电压正负在不断变化，怎么能用有极性的电容呢？

那又该如何“从理论上”说明倍压和降压的区别呢？我们不妨先上网去搜一下别人的想法，关键字就选择“电容降压和倍压整流”。我搜到的结果挺让人无奈的，感觉大多数人都和我一样压根儿没想过这个问题。不过还是有人提出了见解：这电路是倍压还是降压，取决于  $R_L$  的阻值大小。当  $R_L$  很大时它就倍压， $R_L$  较小时它就降压。我觉得这有点道理，这电路其实就是  $R_L$  和  $C1$  的容抗串联分压嘛。

就说这么多吧，这些内容我们以后用不到，大家有兴趣可以自己研究一下。

## 2005-07-04：电感与二极管

电感和电阻已经结合起来了，下一步应该是电感和二极管或者电容结合起来，比较靠谱的应该是电感加二极管了。我想至少“低通滤波器”是可以和二极管整流电路组合在一起的，就像图（figure0183）这个样子。电感器会阻住脉动直流中包含的交流成份，而只让其中稳定不变的直流成份通过去。

这个电感器的电感量应该比较大的，因为交流电只有 50Hz，想对这个频率的交流有较大的感抗，必然要用比较大电感量的。负载电阻  $R_L$  又不确定多大，如果比较小呢？负载很重，那么绕电感线圈所用的铜线还得粗，这电感个头儿会不会太大了？

师：“我来了。今天我们要把电感和二极管结合起来说。”

我：“早就想到了。收我这个图看看吧。（figure0183）”

师：“不错啊？！你自己琢磨出来的？没去 GOOGLE？”

我：“画图费死劲了！有什么好办法能画电路图的？”

我：“当然是我自己琢磨出来的！用电感也可以做整流后的滤波吧？”

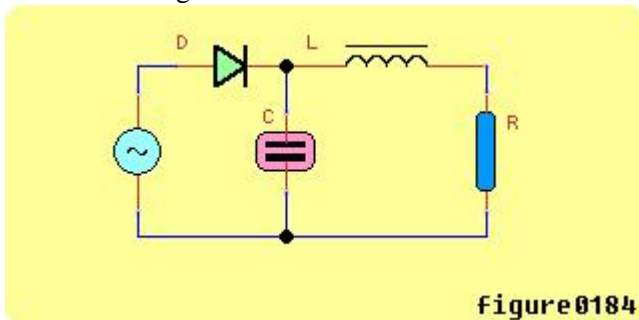
师：“当然可以了，但是不常用。电感的体积起码是大了点。”

我：“是啊，我正困惑呢。这个电感要挡住只有 50Hz 的交流，还要允许通过大电流，那必然要用粗线多绕圈才行。”

师：“你忘了磁芯了吗？”

我：“加上磁芯是可以缩小体积，可是能小很多吗？我没见过说不好。”

师：“其实你还可以结合一个电容进去，这会好很多。收图。（figure0184）”



我：“这个办法不错啊，先用个电容滤掉一部分交流成份，再用电感解决剩下的。”

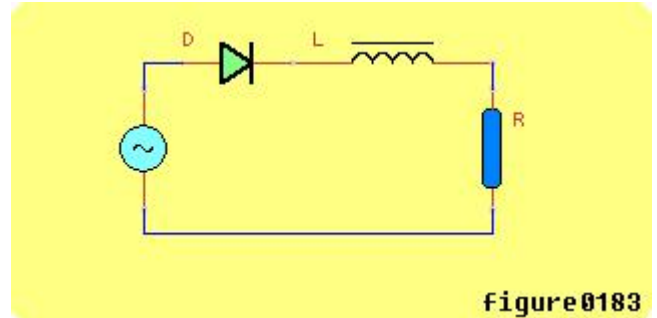
师：“这样电容和电感都可以用小点的，合作的效果和单独用一个大电容或大电感是一样的。”

我：“电感右边再加一个电容可以吗？”

师：“没问题，再加一个电容可以形成  $\pi$  形 LC 滤波器，效果更好。”

我：“那如果只有左边一个电容，就叫 L 型滤波器？”

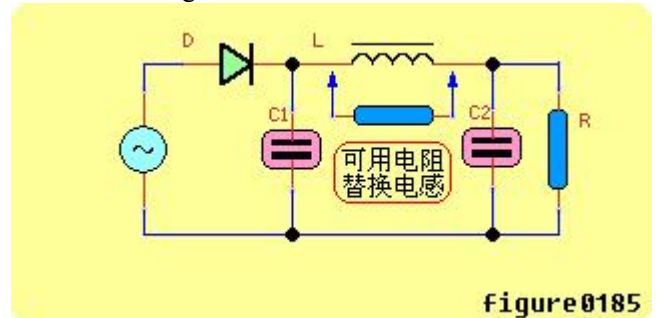
师：“起码也得是‘倒 L 型’啊。这个用希腊字



母‘Γ’来表示。”

我：“我知道要倒过来的。呵呵。”

师：“很多时候我们都不用电感器，而是用一个电阻代替  $\pi$  形滤波器中的电感。这样可以便宜一点，效果也不错。（figure0185）”



我：“又是偷工减料啊！”

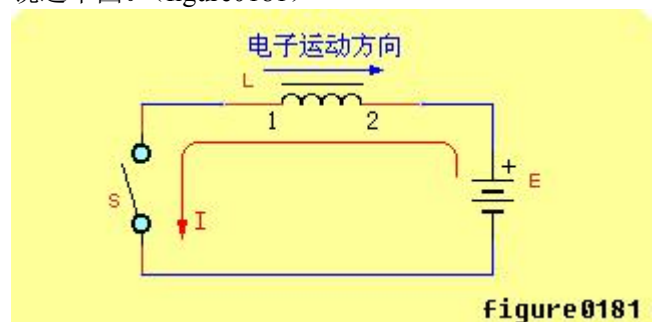
师：“我都说了效果也不错，你怎么总往坏事上想啊？”

我：“我活在这个神奇的国度里不由得不往坏处想啊。”

师：“你怎么总是这么愤青呢？我们继续说电感加二极管。”

我：“这不都说完了吗？连电容都组合进去了。”

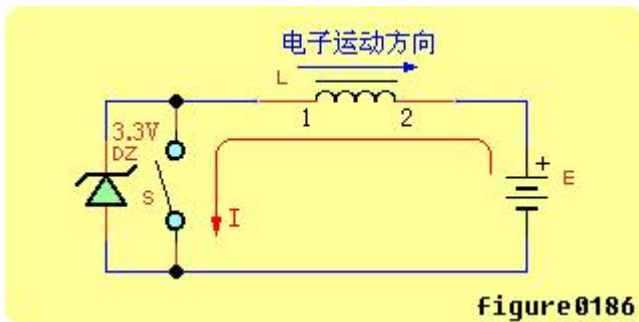
师：“还有呢！哪儿那么简单就完事了？我们还要说这个图。（figure0181）”



我：“消除开关打火。这要用二极管吗？”

师：“打火是因为开关两端加了一个高压，我们现在要消除这个高压。”

我：“开关两端并联一个 3.3V 的稳压管。无论如何电压也高不过 3.3V 了。（figure0186）”



师：“我说你脑子可是真活啊？基础知识抓起来就能用上？”

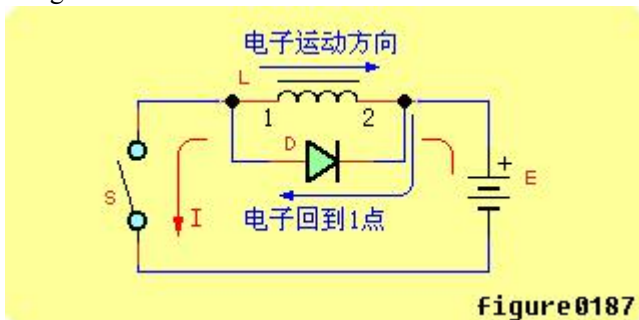
我：“您肯定又要贬我了吧？先把我捧起来，然后再摔？”

师：“我当然要贬你！这个电源 E，是+5V 耶。你这个开关还有用吗？”

开关接通时稳压管被短路，这时稳压管肯定是完全没有作用的。开关断开瞬间稳压管必然被高压击穿，将开关两端的电压限制在 3.3V。当电感上的自感电压消失之后，5V 的电源电压同样可以把稳压管击穿啊？这开关断开了可电路还通着呢。

我：“我应该选一个 5.1V 的稳压管就好了。我只想着把开关两端的电压限制到最低了。”

师：“你还是看我怎么用二极管吧。收图。（figure0187）”



我：“就是个二极管箝位吧？”

师：“既然电感自感出的电压是 1 端正 2 端负，我就这样接个二极管，把这个电压限制在 0.7V。”

师：“这个叫‘续流’二极管，不是箝位。”

我：“又叫续流了？这不都一回事吗？”

师：“电子不是从 1 点跑到 2 点了吗，我用这个二极管让这些电子沿着二极管‘继续流回’到 1 点，自感出来的电压就消除了。”

我：“这也‘咬文嚼字’啊？‘继续流回’简称‘续流’？真够累的。”

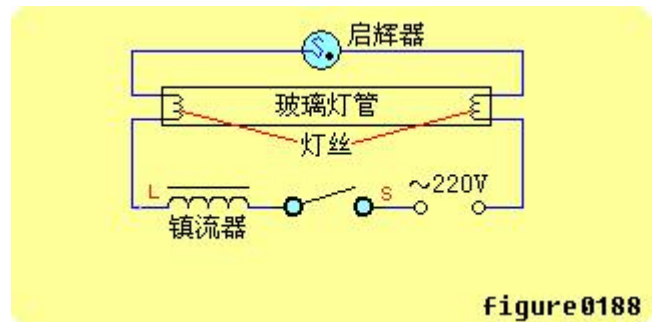
师：“大家都这么叫你也跟着吧。你知道是怎么回事就行了。”

师：“我们下面要讨论一下如何利用自感产生的高压。”

我：“又利用啦？不是要消除吗？”

师：“我首先给你说下日光灯和震流器。（figure0188）”

我：“好像很简单哦？管儿灯就是这么个东西？”



师：“这图（figure0188）上的电感线圈 L 就是‘震流器’，那个‘启辉器’俗称‘憋火儿’。”

我：“‘憋火儿’我知道。”

师：“灯管儿中充了一些水银蒸汽，如果这个蒸汽被高压电‘击穿’，它就会发出紫外线来，由紫外线轰击玻璃管壁上的荧光粉而发出白光。”

我：“那就要靠震流器线圈自感出电压来击穿水银蒸汽了吧？”

师：“当然了。那个‘憋火儿’，是一个单刀单掷的开关，只不过它的‘刀’是个双金属片。”

我：“知道，双金属片一受热就弯了。”

师：“对啊。它凉的时候刀和掷是接通的，流过电流后这个刀就热了，然后就弯了，那么开关也就断开了。”

我：“这让我想起了那个继电器，做成振荡的那个。”

师：“道理都大同小异。开关凉就接通，接通了开关就热，开关热就断开，断开了开关就凉。启辉器每次断开时震流器的线圈两端就有自感电压出来。”

我：“这个自感电压和 220V 电源串联加在了灯管儿两端，水银蒸汽就击穿了？”

师：“而水银蒸汽一旦击穿，玻璃灯管就相当于一个导体了，憋火儿就被短路了。”

我：“倒是不难理解，就是够简陋的。”

师：“还是那句话：不要把‘有用’和‘复杂’混为一谈，‘有用’的东西不一定很‘复杂’。”

我：“你这个管儿灯没有二极管啊？”

师：“那好吧，说个有二极管的。你还记得用一节电池点亮一个 LED 吗？”

我：“记得，用一个电容。这可以用电感代替电容？”

师：“那个图（figure0146）里的电容怎么用电感代替啊？你给分析分析那个图改用电感后的情况？”

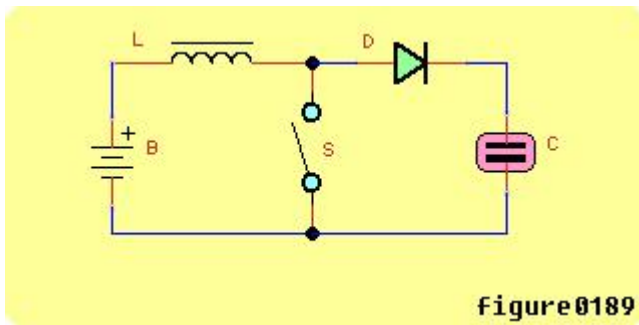
我：“我不是说那个图里的电容直接换成电感啦。”

师：“想一下你刚才把稳压管并联在开关上的错误吧，你就知道点亮 LED 该怎么办了。”

我：“哈哈，把一个 LED 并联在开关上就 OK 了。开关从接通到断开的瞬间，LED 两端的电压就会超过 1.5V 的。”

师：“有些时候我们需要获得一个超出电源电压的高压，而且还要比较稳定的，这时我们就用这样一个电路。（figure0189）”





我：“这个我应该能理解，等我想。”

师：“开关接通时电感中有电流，开关断开后电感会自感出一个电压，然后和电源电压串联，通过二极管充到电容里。”

师：“是这个意思。想想看开关再次接通后电容中的电会不会放掉？”

我：“这还用想？二极管单向导电啊？电容中的电怎么能通过二极管往回流呢？”

我：“不过有了负载电阻并在电容上就麻烦了，电容要通过负载放电的。”

师：“那就连续地动开关，反复给电容充电。”

我：“那不得累死啊？”

师：“也可能在你死之前开关先坏了呢。”

我：“我不想死，我还没女朋友呢。”

师：“好啦，假设开关是自动反复通断的。”

我：“你这一说自动的开关我就想起那个‘继电器’了。能‘振荡’的那个东东。”

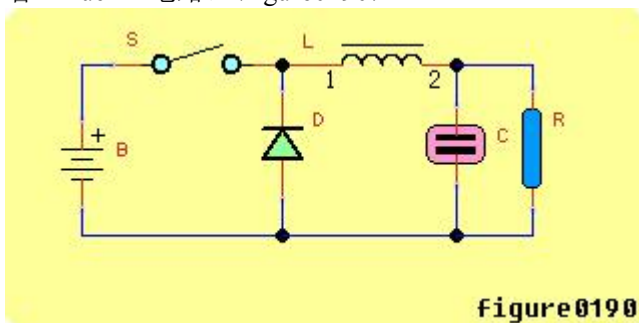
师：“你可真是脑子快啊！我佩服死你了！”

我：“佩服‘死’？是你死还是我死啊？我还小不想死呢！”

师：“哈哈，你行了吧你。这个升压电路我们称之为‘Boost’电路。”

我：“我查查这个词啥意思。”

师：“电感不仅能升高电压，也能降低电压，对应着‘Buck’电路。(figure0190)”



我：“这个能降低电压？什么原理？”

开关接通的时候很好分析，二极管 D 反向不通，电源电压直接通过电感加到电容 C 和负载 R 上了。开关断开呢？电感器 1 端为负 2 端为正，这个二极管 D 应该可以导通，那就是电感器变成了电源，由它给电容和负载供电。它自感出来的电压会有多高呢？这要是高过电源电压的话怎么能成“降压”电路呢？

师：“首先你能知道负载上最高的电压顶多是开关接通时的电源电压，不会更高了。”

我：“不一定吧？开关断开后可是电感器为负载供

电，谁知道它会自感出多高的电压啊？”

师：“你怎么会不知道？这个电感器是你制作的啊？它多大电感量你当然是心中有数，你不会让它自感出很高的电压吧？”

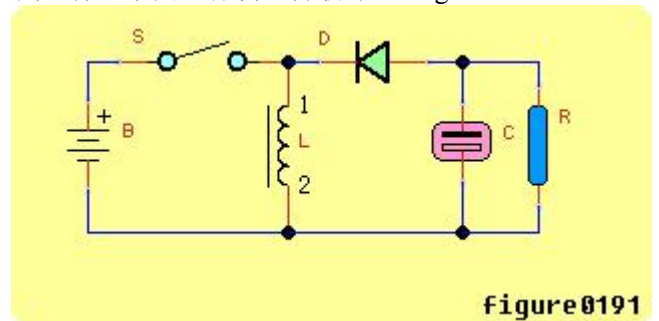
我对此电路研究的不深入，电感量是否影响 R 上的电压？我不是很确定。其实我更倾向于认为开关 S 的通断快慢决定了（占空比）决定了 R 上的电压高低。

我：“也对啊？我干嘛非弄一个产生出高压的电感呢？”

师：“所以如果电感器出不来很高的自感电压，那么以电感器为主向负载供电，就只能给负载一个低电压了。”

我：“开关的作用就是按时给电感器‘补电’？也得连续地开关啊？”

师：“是的。而二极管 D，其实是‘续流’二极管。我还有一个图，你自己分析下。(figure0191)”



我：“这个电容换电解了？可怎么是大头朝下啊？”

师：“我特意换了个有极性的电容，你说正极接电池负端有什么问题吗？”

其实电容没什么问题，因为开关接通时二极管是不会通的，它“反向接电”，电阻和电容都没接上电。此时会有电流流过电感器，这个电感器如果电阻很小，那么电源指定是报销了。所以我得假设电感所具有的电阻不小，或者开关只接通极短的时间，此时电感中电流还在上升过程中，或者说它会“抗”住电源而不是“阻”住。

那么开关断开的一刻呢？电感器肯定还是变成电源的，它的 1 端为负 2 端为正，这时候二极管就能通了，自感出的电压给电容充电，那么电容正极接法也就没问题了，因为它负极充入的是负电压。

我：“电容没问题了。可这个电路和刚才那个 (figure0190) 没有区别啊？”

师：“有区别，负载 R 上的电压，与电源 B 的极性是相反的。此电路能产生‘负电压’，这叫做‘Buck Converter’。”

我：“这我要查多少个词啊？Boost 是‘提升’的意思。”

师：“你慢慢查去吧，我是要走了。”

我：“那好吧，晚安。”

师：“走之前我再补充一点：用开关/电感/二极管产生一个新的电源，其重点都是在‘开关’上。”

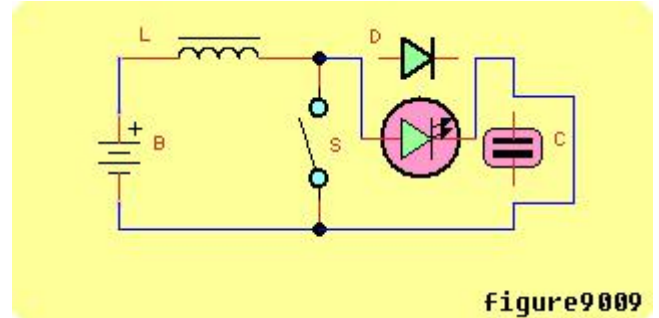
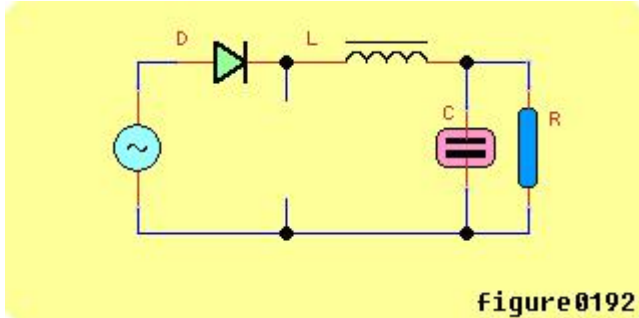
我：“电感器的自感电压不是核心吗？”

师：“自感电压是我们需要的，但你能控制的是那个开关。你通过控制开关的通和断来间接影响电感产生的电压，我们把这个叫做‘开关电源’。”

我：“原来‘开关电源’的开关是指这个。”

师：“你和我用的电脑都使用开关电源。这是一项很重要的技术，这种电源想做得很好是需要相当功力的。再见。”

对于“电感+电容”组成滤波器，我觉得除了“ $\Gamma$ ”型和“ $\pi$ ”型之外，还可以有一种“反 $\Gamma$ ”型的。其实就是把图（figure0184）中所示的电容从电感左边改放到电感右边去（figure0192），这应该也可以的，只是我不知道如何判断这种结构和“ $\Gamma$ ”型滤波电路孰优孰劣。我搜索了“ $\Gamma$ 型滤波”，然而却没找到什么有看头的内容。可能是字母“ $\Gamma$ ”没啥人用吧，搜“ $\pi$ 型滤波”就能找到不少可看的页面。最后试了搜“LC滤波”，这回还真找到了有意思的内容，电容C就是放在电感L右边的，从左向右念，当然是“LC滤波”了。至于“ $\pi$ ”型滤波，人家是从左到右读作“CLC滤波”的。这样看“ $\Gamma$ ”型滤波应该读作“CL滤波”了，可我试着搜索“CL滤波”，好像没有人这么说诶？

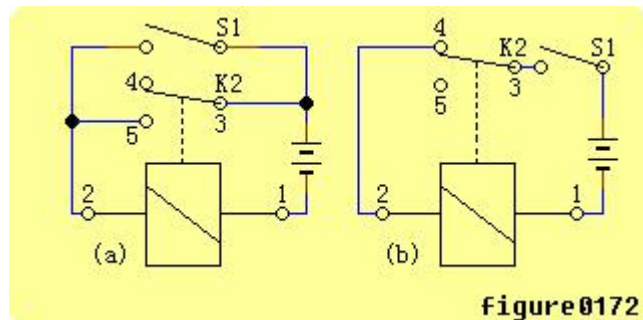
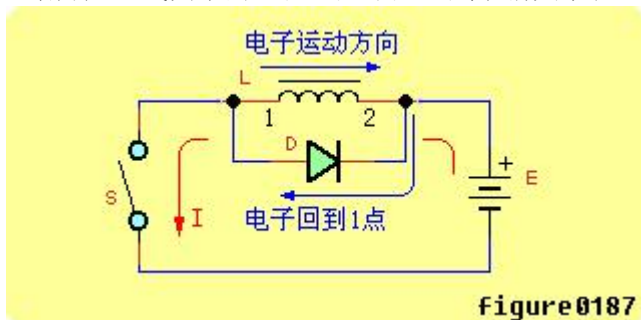


$\pi$ 型滤波电路（figure0185）中的电感如果用一个电阻来代替的话，我还是觉得似乎有些不妥。你说这个电阻，会不会成为这个电源的内阻呢？应该会的，所有流向负载电阻R的电流都要从它上面流过啊，它应该算是电源的内阻啊。那这个电阻不应该用太大阻值的吧？而且它右边这个电容C2我觉得就比较重要了，因为一旦负载短时需要一个电流，完全可以由这个C2供给，相比较而言C1因为隔着电阻就帮不上大忙。这样来看，“ $\Gamma$ ”型滤波电路是否不很理想呢？“ $\pi$ ”型滤波电路中的C2应该比C1取值还要更大一些吧？

对于使用一节电池点亮LED，我想的是把图（figure0186）中的稳压管换成LED，其实也就是等同于把图（figure0189）改造一下，电容C短路，二极管D换成LED就行了（figure9009）。当然，电感L的自感电压加上电源电压可能会比较高，这使得LED上流过较大的电流。不过这个电流也只是瞬时的，不会对LED有损害。想让LED连续发光，这个开关也要反复快速通断才可以。

## 本节补充说明

图（figure0187）中所示出的在电感器上并联续流二极管，现实中是很常用的。我们可以想到那个电感器完全可以是一个继电器的电磁铁，当我们控制继电器的电磁铁通电断电时，必须考虑到电磁铁的线圈可以自感出高电压来。但在这个补充说明中，我不想讨论这个高压，我想讨论一下流过电磁铁线圈的电流。当我们把开关 S 断开后，线圈中的电流，是不是立刻就消失了呢？



显然不是。在接了续流二极管 D 之后，开关 S 断开时，线圈中会有电流“继续流动”。而线圈只要有电流流过，它就会产生磁，这意味着，开关 S 断开后，继电器的磁铁仍然吸着衔铁，并没有立刻释放它。只有这股电流不能够产生足够的磁力了，继电器才会释放衔铁，常开触点才会真正断开。这在时间上有一点点延迟。

由此我们再看那个可“振荡”的继电器（figure0172-b），它的“振荡频率”是否完全取决于弹簧弹力这类“机械特性”呢？应该说并不完全是这样，还需要考虑那个磁铁线圈的电学特性。



## 2005-07-07：电感与电容

现在还剩下“电容器”没有和电感相结合了，我本想网上搜一下“感容电路”的，不过自己想一下都感觉这个自造的名词很是别扭。不过我还是在 GOOGLE 上搜了下“电感加电容”，但除了“ $\pi$ 型滤波电路”之外没有找到什么感人的内容。其实“ $\pi$ 型滤波电路”应该已经算是电感与电容相结合了，只不过这两个元件组合在一起，还有一些更深的门道，上回没说这个。

师：“我来了。今天我们来把电感和电容结合到一起。”

我：“就等你说这个了，我在网上搜不到什么东西，除了滤波。”

师：“不用搜了，我们也不会谈很多这个方面的东西。”

我：“为什么？又是难点？”

师：“单是一个电容或一个电感，在数学上就要用‘微积分’了。这俩要放一起当然更麻烦了。”

我：“那就‘定性’呗。‘直观’二字你肯定是牢记在心的。嘿嘿。”

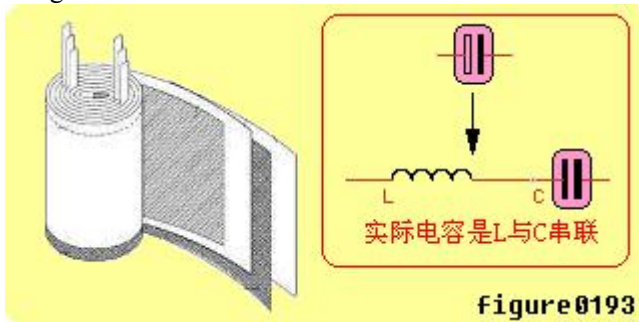
师：“那我们就从电容开始谈。还记得‘电解电容’的内部结构吗？”

我：“一层铝箔条加一层湿纸巾，层层叠叠之后卷成卷，再引出线来。”

师：“这个‘卷成卷’非常的重要。”

我：“懂了，你是说这个‘卷’相当于在绕‘线圈’？”

师：“还就是这个意思。这铝箔条一‘卷’之后，电容中就寄生的一个电感，这就是‘容中有感’。（figure0193）”



我：“你等我总结一下。”

我：“阻中有感，二极管中有阻，二极管中有容，感中有阻，容中有感。”

师：“二极管中有电容你也知道？”

我：“自己放狗搜的。这个寄生的电感有办法减小吗？”

师：“少卷几圈，这个寄生电感就小了。”

我：“那电容量是不是也小了？这不等同于做极板的铝箔短了吗？”

师：“没错，那怎么让电容量不减小？”

我：“我怎么知道？”

师：“电容器的极板‘面积’决定了电容量。”

我：“可以把铝箔条加宽对吗？”

师：“你这个主意非常好啊，还减小了极板的电阻呢。”

我：“还有寄生电阻啊？那样的话这个电容不就是

细高个儿了吗？”

师：“就是细高挑儿啊。看这个图。”



师：“看见那三个细高的电解电容了吗？每一个前面都有俩矮的。”

我：“一柱朝天诶。”

师：“这种细高的电解电容在你的 PC 主板上可能会见到，你以后开机箱找找看。”

注意早期的电脑主板上常见这种细高的电解电容，新型的主板上较少见。现在广泛使用“固态”铝电解电容，寄生电感也低。

我：“现在还差一个‘感中有容’。电感中会寄生电容吗？”

师：“你很幸运，电感中还真的寄生了电容。”

我：“我很不幸，怎么想起学这个电子技术了呢？”

师：“电容中有电感也不是什么特要命的事，只不过使用这种卷绕结构的电容要有些注意事项。”

我：“有什么东西寄生着二极管吗？”

师：“这事以后再说好吧？我们先说电容。”

我：“还真有寄生二极管的啊？”

师：“电解电容常用于整流后滤波，我们利用容抗随信号频率升高而减小的特性，让交流成份从电容跑掉。”

师：“现在这电容上串了电感，感抗随信号频率升高可是增大的。”

我：“就是说频率比较高的成份本来更容易通过电容的，但是有这个寄生电感插一腿它反而过不去了。”

师：“对，当频率高到一定程度时，电容中寄生的电感成了主角，电容本身成了配角。所以凡是这种‘卷绕’结构的电容，都不能用于通过高频信号。”

我：“难道整流后要用一个陶瓷电容滤波？瓷片的容量太小了吧？”

师：“你用小容量的电容怎么滤低频呢？”

我：“对啊？可陶瓷电容也没大容量的啊？这岂不

是高不成低不就？”

师：“你用俩电容就行了。（figure0194）”

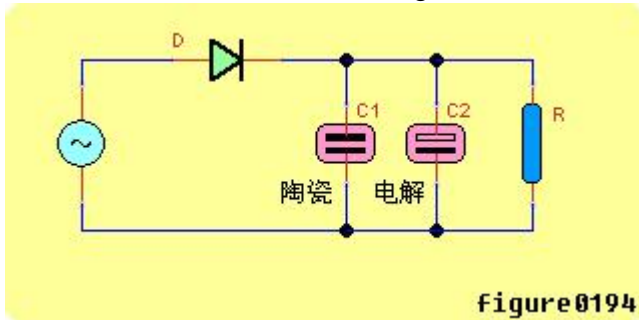


Figure 0194

我：“这还真成，大电解负责低频，有高频的过来了，对不起，您去陶瓷电容那儿，我这儿不方便过。”

注意 C1 不一定必须是陶瓷电容，凡适用于通过高频信号的电容都可以，一般常用陶瓷电容。

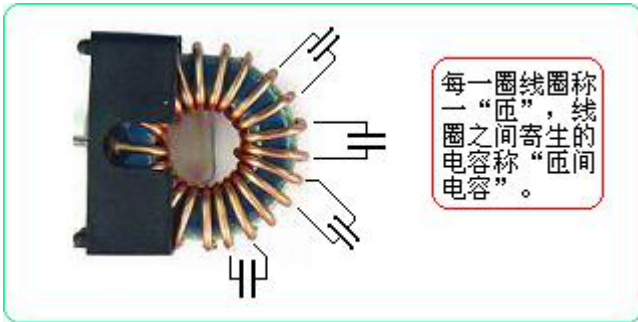
师：“还挺形像，就是这个样子。”

我：“成本高了，多了一个陶瓷电容。”

师：“行，你就快学会‘偷工减料’了你。”

我：“没想减料，我这就是发点小感慨。”

师：“容中有感说完了，我们来说‘感中有容’的事。收图。”



我：“这个有点费解，电容两个极板不应该连一起吧？”

师：“这个‘匝间电容’的两根引线就是绕线圈的铜线，看上去是接在一起的。”

我：“干嘛‘看上去’接一起？它本来就是一根线嘛？”

师：“如果这线上走的是高频的交流信号呢？你认为它是沿着铜线绕圈走呢还是直接从这个‘匝间电容’走？”

我：“这难道也要‘爬电’吗？”

师：“这不叫爬电。电流总是找阻力小的路线走，如果绕圈比较费劲那它就会从‘匝间电容’过去。”

我：“绕圈走确实费劲，有‘感抗’啊。”

师：“说得没错。”

我：“要这样看信号频率高到一定程度电感就完全失效了？它成不了‘扼流圈’了？”

师：“是啊，这个还不好解决，这个‘匝间电容’和电感器是‘并联’的关系。”

我：“就是说我难以附加些别的元件把它消除掉？”

师：“你得从线圈的结构上做些文章才好。我说过的，绕线圈时你要考虑圈与圈之间是紧挨着还是留有一定的间隔。”

我：“图上这个线圈是有间隔的？”

师：“这相当于寄生电容两极板间距离拉大了，电容量就小。”

我：“那如果线圈不只一层，是圈上加圈的，寄生的电容是不是更大？”

师：“对啊，你现在收这个照片看看牛人是怎么做的。（见本页下方大图）”

我：“这是什么东东？下面一排暖瓶胆干嘛的？”

师：“你还见过暖瓶胆呢？够淘的！那一排就是真空电子管。”

我：“好炫啊！那一根棍子挑俩花圈是什么意思？”

师：“什么俩花圈？这是‘广播爱好者论坛’上一位网友做的电子管收音机，那根‘棍子’是‘磁棒’天线，那铜线绕成的‘花篮儿’是天线线圈。”

bbs.leowood.net，当初保存此图片时未记录原作者，后期考证应该是 rzq 网友。为排版方便图片做了编辑。

师：“看到了吧，相邻两圈铜线是‘交叉’着的，你的明白？”





我：“懂，只有相交的那一点有电容。这和 PCB 板上正反两面铜线交叉是一个道理啊？”

师：“你还记得 PCB 上的分布电容呢？”

我：“你和这位大虾交流过吗？”

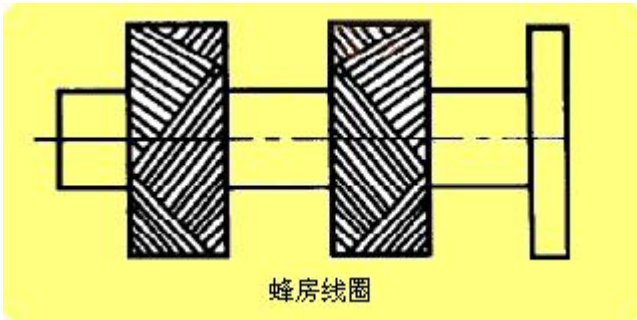
师：“没有，我只是收集到这一组靓照，没和原作者联系过。”

我：“你怎知人家是为减小匝间电容才这么绕线？也许只是为了好看呢？”

师：“嘿，人家只为好看，我还在技术上给人家找个由头，我也够糗的哈？”

我：“对啊，你这也就是跟我说过，我帮你兜着这事不让别人知道，嘿嘿。”

师：“行了吧你！再收这个图看看吧，这叫‘蜂房线圈’。当线圈必须绕成多层时，用这个结构能减小匝间电容。”



我：“没看出这像‘蜂房’啊？”

师：“你见过蜂房什么样儿吗？”

我：“我当然见过，我还让马蜂蛰过呢。”

师：“你可真行！和尿泥，摔暖瓶，还捅马蜂窝，你能生存到今天可真是不容易啊。”

我：“是我爸妈不容易，我倒没觉得怎么困难。”

师：“这种蜂房线圈有特殊的绕法，看图。”



图片来自“红色时代”论坛(<http://rfm.haotui.com/thread-2054-1-1.html>)，由“龙虾”网友贴出。为排版方便做了编辑。

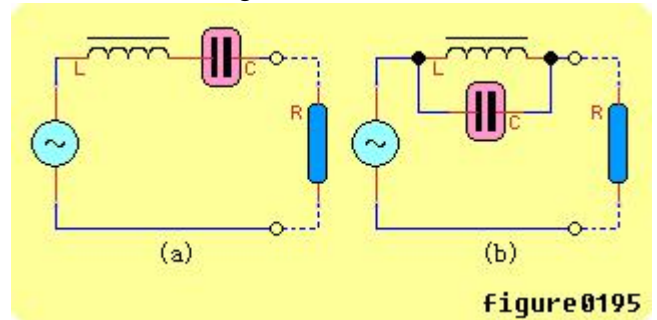
我：“这也是让线交叉起来啊。”

我：“有没有蜘蛛网样的线圈？”

师：“你还别说，好像还真有蛛网式的绕法，似乎都与矿石收音机有关。不过我没见到过。”

我：“但是我叔那个矿石收音机只有一个圆筒样的线圈，没这么麻烦的。”

师：“好了，感中有容容中有感都说完了，我们下面讨论这个图。(figure0195)”



我：“这个就是两个‘抗’串联分压嘛。”

师：“好啊，那你给说说这是怎么个分压法？”

感抗和容抗都随信号频率不同的变化，但变化规律是相反的。感抗随频率升高而增大，容抗随频率升高而减小。当感抗和容抗串联时，如果信号频率逐渐升高，那么感抗加而容抗减，电容上分到的信号电压会减小。

我：“这个电感电容串联的是‘低通’滤波器。”

师：“你这说的是什么啊？”

我：“随信号频率的升高，感抗加而容抗减，电容上分到的信号电压就减啊？”

师：“你从哪儿看出来我们在利用电容分压啊？”

我：“这要说电阻 R 两端的电压？”

师：“我们早就说过  $\pi$  型滤波器和  $\Gamma$  型滤波器了，你还在说这个？”

我：“还有别的可说么？”

师：“我来吧。容抗随频率升高而降低，感抗随频率升高而升高。”

我：“你还在说这个？”

师：“这事儿有点不好说了，我一直都回避比较麻烦的数学。”

我：“完了，这坑绕不过去了吧？”

师：“一般来说大家都用数学公式说这个串联，这要用‘复数’，还得说交流信号的‘相位’。”

我：“复数我知道一点儿，有个什么‘根号下-1’的，还分‘实部’和‘虚部’之类的。”

师：“那我就用这些公式给你说这个吧。先说下‘相位’的概念。”

我：“别啊老大！你再想想吧，怎么简单怎么来吧。”

师：“对这个电感电容串联的电路，我如果给它加上频率很低很低的信号，或者频率很高很高的信号，这些信号都是过不去的。”

我：“这样说比较好。我能理解这个。”

师：“你要能理解，那就说说这些信号为什么过不去？”

我：“对低频来说感抗小但容抗很大，而对高频来说容抗小而感抗很大。总有一个抗会挡住这些信号的。”

师：“很好。我如果在中间找个高不成低不就的信号呢？”

我：“频率不高不低的信号加到这个电路上，感抗不很大容抗也不很大。”



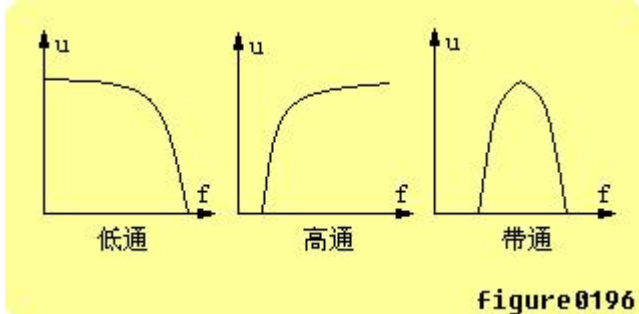
师：“或者说对某个特殊频率而言，感抗和容抗在数值上刚好相等。这个频率的信号相对其它频率的是最容易通过这个电路的。”

我：“这也算是个滤波电路吧？”

师：“没错，这是一个滤波电路。”

我：“可它高也不通低也不通啊？”

师：“它只放行那个特定频率及其左右很小一部分频率的信号，这是‘带通’滤波器。（figure0196）”



Ranimator：“带通的图形像个倒扣的杯子。”

师：“而且杯子口很窄，我们说它‘带宽’很窄，简称‘窄带’。”

师：“你来说说电感电容并联的那个电路。”

我：“有没有‘带不通’滤波器？”

师：“那叫‘带阻’好吗？说这个并联的。”

我：“对这个电感电容并联的电路，我如果给它加上频率很低很低的信号，或者频率很高很高的信号，这些信号都是过得去的。”

师：“你真行，连打字都省了。”

我：“对低频来说容抗很大但感抗小，对高频来说感抗很大而容抗小。总有一个抗会放过它。”

师：“这句改起来费劲哈。”

我：“该你说了。”

师：“我说啥？”

我：“你说那‘高不成低不就’那句。”

师：“很好。我如果在中间找个高不成低不就的信号呢？”

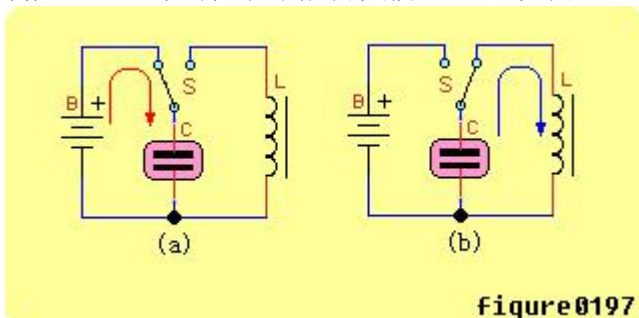
我：“对，我们可以找一个频率不高不低的信号，这个信号加到这个电路上，感抗不很小容抗也不很小。或者说对某个特殊频率而言，感抗和容抗在数值上刚好相等。这个频率的信号相对其它频率的是最难通过这个电路的。”

师：“这就是那个‘带阻’滤波器对吗？”

我：“你怎么把结论给说了？没意思。”

师：“我们把这个电感电容并联的电路再做点其它的说明，收个图。（figure0197）”

师：“这个图（a）中我要把开关拨左边，电容就会充上电，它充满之后我把开关拨右边去，如图（b）。 ”

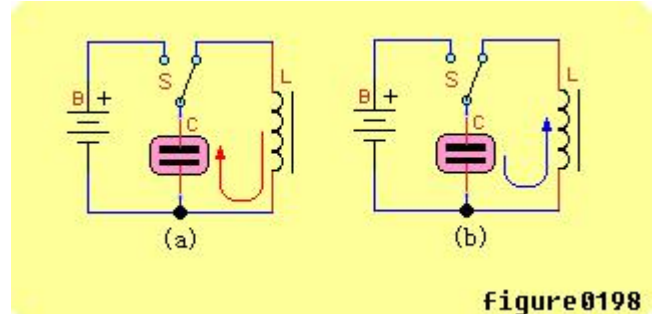


我：“那它就会放电，但是电感会顶住它的电流不让他突然增大？”

师：“是这样，但是电容终究会把电放完的，这时候电感线圈中就形成了一个磁场。”

我：“电容放光了电，磁场也要消失了。”

师：“这时线圈就要试图维持这个电流，这将导致电容器反向充上了电。（figure0198-a）”



我：“自感出的电压是上负下正吧？”

师：“对，电感是‘掉过头来’给电容充电。”

师：“自感电压消失了，电容也就重新充上了电，这时电容又开始放电。（figure0198-b）”

我：“也是‘掉过头来’放电啊。”

师：“对，这一次放电的电流方向和上一次不同了。这个过程如果一直重复的话你在线路上就会看到一个‘交流’电流。”

我：“这哥儿俩‘吞吞吐吐’地把直流电变成了交流？”

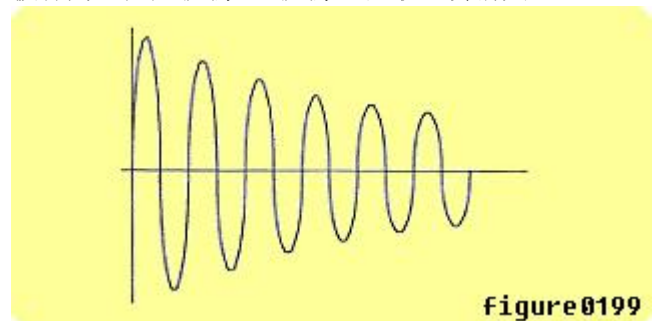
师：“这个‘吞吞吐吐’是一个‘振荡’过程。”

我：“这也是振荡啊？”

师：“实际上这个过程没法持续，因为线圈肯定有电阻，电流在这个电阻上会变成热消耗掉。”

我：“那就是说电流的值是越来越小的，最后消失了？”

师：“对，所以波形是这个样子（figure0199）。这被称为‘阻尼振荡’，振荡电流最终会消失。”



师：“如果你想让‘振荡’一直持续下去，那就必须找机会把开关拨回左边，让电容从电源那儿补一点电。”

我：“把变成热的那些损失找回来？”

师：“对啊。这个电路产生的交流信号的频率是和电感量和电容量都相关的，确切地说是与  $L \times C$  的积相关。”

师：“有不同的 LC，就可以产生不同频率的信号，这个频率称为这个 LC 回路的‘谐振频率’。”

我：“它能阻住的那个频率不会就是这个‘谐振频率’吧？”

师：“还就是这个‘谐振频率’。你可以理解为如

果外加信号的频率恰好等于谐振频率，那就发生‘共振’了，这个信号被电感电容抓住，然后被‘吞吞吐吐’出不去了。”

我：“你要这么说那电感电容串联又怎么解释呢？”

师：“串联也有一个谐振频率，如果外加信号的频率等于谐振频率，那么电感一吞电容一吐，这个信号就被运过去了。”

我：“你这也太牵强了，电感把信号抛给电容，电容应该抛回给电感啊？怎么扭头给吐到外面去了？”

师：“如果是并联那电容就把信号抛回给电感，现在是串联了，不一样。”

我：“我看你是说不清楚这个事了。”

师：“那我就用数学公式给你说说清楚。先谈谈‘相位’。”

我：“打住吧老大！服了你还不行么？”

师：“有了这个‘谐振回路’，我们就能解决以前一个遗留问题：我有一个方波，怎么变成同频率的正弦波呢？”

我：“想起来了，用一个 R 和一个 C 做‘低通’

滤波不容易把谐波弄干净。”

师：“用这个‘谐振回路’来滤谐波就好的多。”

我：“比如 1MHz 方波，我只要选好 L 和 C 的值，让谐振频率也是 1MHz 就能取出基波来？”

师：“是的，归根结底是由于这个‘谐振回路’带宽很‘窄’，能大幅抑制谐振频率之外的信号。”

我：“混在一起的谐波越少，信号看上去就越像一个正弦？”

实际上“低通滤波”也不是不可以，只要能大幅抑制高次谐波，就能得到良好的正弦信号。这里使用 LC 谐振回路意在强调其“窄带”特性。

师：“是啊。好了我们今天就说到这儿，这部分内容以后基本用不到。”

我：“那还费这么半天劲干嘛？”

师：“这部分内容在‘无线电通信’中用得很多。计算机中有一个元件和这个‘谐振’有些关联。”

我：“啥元件？下回要说吗？先透点口风中不？”

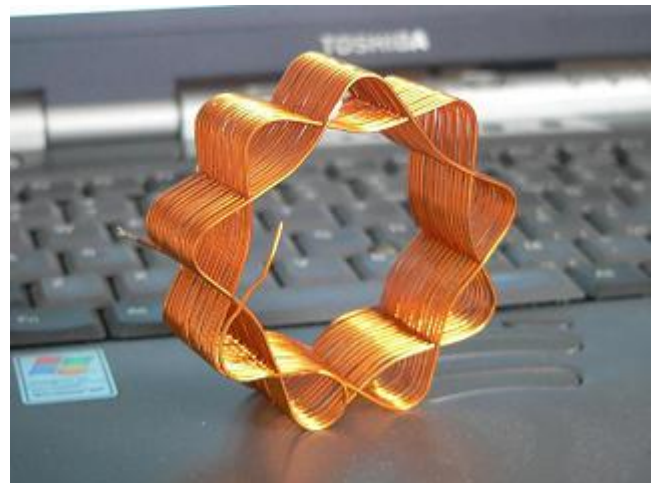
师：“是水晶。下回我们说这个东西。”

我：“计算机里还有宝石啊？我怎么没看见我电脑里有啊？”

我搜了一下“电容 寄生电感”这两个关键字，果不其然，很多页面指出这是因电容的“卷绕”结构引入的。也有一些页面指出各种结构的电容都会有寄生电感，这叫“ESL”，还有寄生电阻，叫“ESR”，这样看一个真实的电容其实是一个电容串一个 ESL 再串一个 ESR 组成的。

电容串联寄生电感？这难道不是个串联谐振电路吗？（figure0193）如果是的话，那么当电容上所加的信号其频率刚好等于这个谐振频率，这个“电容串电感”仍然是低阻的，还不能说因为寄生了电感就一定呈现高阻。那么电感器寄生了“匝间电容”我又该如何考虑呢？是否能看做是“并联谐振”电路呢？

我搜了下“花篮线圈”，在“矿石收音机”论坛上找到了此种线圈的绕制方法，看上去挺有创意的。而且在论坛上还有人发帖询问“花篮线圈”到底有什么好处，答案正如 C# 所说，匝间电容比较小。不过有大虾指出了此种线圈的缺点：用的导线长，Q 值低。我不知道“Q 值”是什么东东，但我知道用的导线长意味着直流电阻大，大概电阻大就导致 Q 值低吧？

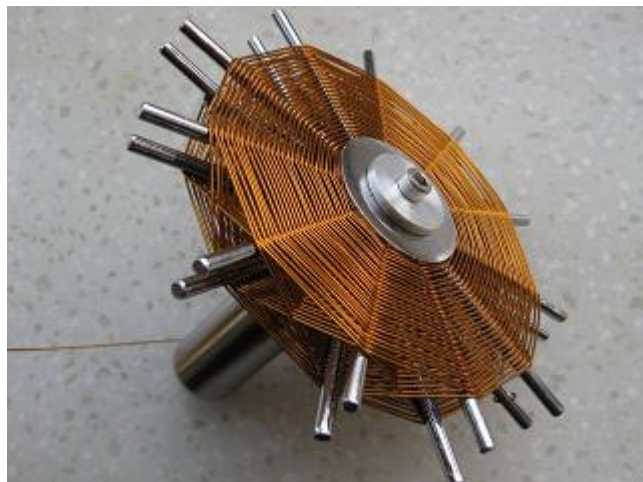


图片来自“矿石收音机”论坛，由“tnlby”网友发布，为排版方便做了编辑。

原图请参考 <http://www.crystalradio.cn/thread-13286-1-1.html>，截止到 2014 年 10 月 29 日此帖仍可阅读。

再次搜索“蛛网线圈”，我的天还真的有趣！同样是在矿石收音机论坛上，有大虾制作了绕制此种线圈所用的“胎具”，我不得不佩服，这手艺实在太出彩了。看那导线的穿来绕去的，也是为了让线与线之间“交叉”起来啊。想来人家把这矿石收音机都玩到极致了。





图片来自“矿石收音机”论坛，由“汽车兵”网友发布，为排版方便做了编辑。

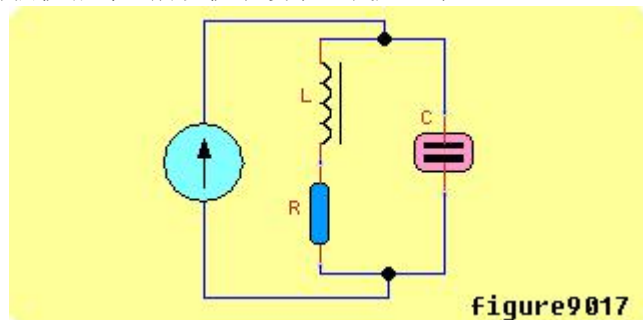
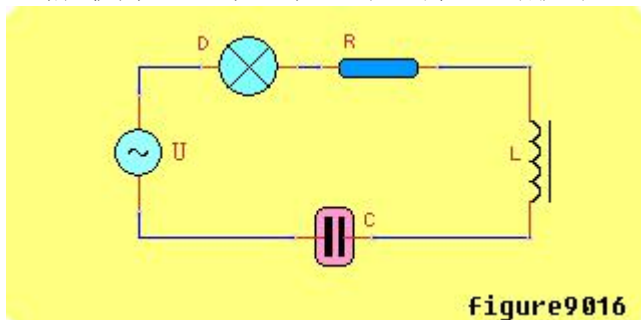
原图请参考 <http://www.crystalradio.cn/thread-193029-1-1.html>, 截止到 2014 年 10 月 29 日此帖仍可阅读。

至于电感和电容串并联，我感觉 C#就是一大忽悠，还又吞又吐的，这么羞羞的不可描述的情景都说得出来？简直是谁了。还是问问谷哥吧，感觉在这个问题上互联网还是会比较纯洁一点的。我于是搜索了“电感 电容 串联”这三个关键字，第一个条目就是“RLC 电路 - 维基百科，自由的百科全书”。

打开这个页面，映入眼帘的第一行就是：“RLC 电路是一种由电阻 (R)、电感 (L)、电容 (C) 组成的电路结构。LC 电路是其简单的例子。”开宗明义，多么的简单明了，这才是专业。再看下一句：“RLC 电路也被称为二阶电路，电路中的电压或者电流是一个二阶微分方程的解，而其系数是由电路结构决定。”好吧，“二阶微分方程”是个啥？不能否认人家专业，可是我业余啊！这不是写给我看的。

当然，也不能说完全没有收获，至少我知道了这种电路里不单有电感 L 和电容 C，还有个电阻 R 呢。这咱刚才已经搜到过了，绕线圈的铜线肯定有电阻啊？不过这个 RLC 电路中的 R，是指导线的电阻吗？会不会是人为加进去的电阻呢？

继续搜了一个“串联谐振”，这回收获了一张图，figure9016，人家是做了实验的，通过改变交流电源 U 的频率从小到大，可以看见灯 D 由暗变亮，当达到某一频率时灯最亮，之后随着频率的升高，灯又渐渐变暗了。我是没办法做这样的实验了，没地儿去找那个电源，不过人家这个说法到是和老大给的说法差不多，估且认为老大说的是对的吧。至于人家后面给出的理论，我也只能是一声叹息，人家说串联谐振时， $X_L = X_C$ ，故谐振时电路阻抗为 R，呈现一个纯电阻。好吧，谐振时电感电容俩抗相等，所以抗就没了，我知道了。



再搜一个“并联谐振”吧，不管能不能理解，看看总可以吧？这回继续收获了电路图，figure9017。那些方程式我就不复述了，反正是不明白。我现在就一个问题：这图上为啥是个“电流源”呢？这是不是应该在列方程式之前先跟我说一下呢？难不成解释这里为啥是电流源比列那些方程式更难？

一番挣扎之后，我觉得，还是接受老大的那一套说法吧，这玩意儿实在是令人困惑，脑袋都大了。现在还有点时间，网上先找个小片儿看看人家那两位吞吞吐吐吧。



## 2005-07-09：压电元件

在 C# 给我解释电脑中为何会有宝石之前，我觉得可以先向 GOOGLE 讨教一下，尽管 GOOGLE 经常给出一些乱糟糟的内容。打开 GOOGLE 的主页，我输入了“水晶 电脑”两个关键词，GOOGLE 果然给出了一堆乱糟糟的页面，基本是用使用水晶做电脑外壳的内容。

这不能怪 GOOGLE 恶俗，还是我给的关键词太没技术含量了。我于是重新输入了“水晶 电路”两个词，没有搜到有用的内容。再次搜索“水晶 电子元件”，这回搜出来一些有用的内容，很多页面上出现了“水晶振荡器”这个词。

继续搜索“水晶振荡器 原理”这两个词，总算找到了“压电效应”这个极富技术含量的新名词。接着搜索“压电效应”，这个东西是指一些晶体受到外部的压力后，内部会产生“电极化”现象，大约就是晶体内有正负电荷分别聚集在晶体两个表面上。这不就是“发电”吗？

这个“压电效应”居然又是法国那位“居理”先生发现的，也难怪人家拿诺贝尔奖，我们现在使用如此先进的计算机，居然要利用 N 多年前发现的科学原理来制造。这样看来今年发现的某种原理恐怕也要 100 多年后才能变成实用的技术了。我还真以为科技的进步是一日千里呢。

我：“咱今天要讨论‘压电效应’了吧？”

师：“你又搜到了？要不这个你自学一下？”

我：“通过 GOOGLE 自学有点乱，我还是听你说这个吧。”

师：“那我们就说说电容。两层电极加一层绝缘介质。”

我：“你用‘水晶’做这个绝缘介质？”

师：“应该说是‘特殊加工’过的水晶。这个电容有个特色，你若给它充电的话，那个水晶介质会在电的刺激下出现小小的‘变形’。”

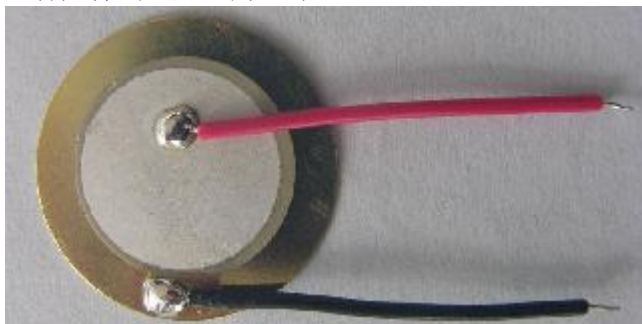
我：“你说的这个是‘逆压电效应’吧？我刚搜到了，还有‘正压电效应’的。”

师：“这样一个小小的变形其实就是把电能变成机械能的过程。如果你把一个交流电通到这个电容上，那么这个‘介质’就会按照交流电的频率‘振动’。”

师：“你会听到‘交流电的声音’。呵呵。”

我：“据我所知不是所有的频率耳朵都听得到的。”

师：“不单是水晶有这个效应，一些陶瓷材料也有这个效应，陶瓷相对水晶要便宜，因此在电子学中有一种元件叫‘压电陶瓷片’。”



我：“这个我可以搜一下。稍等。”

在 GOOGLE 上分别搜了下“压电陶瓷片”和“压电陶瓷片 原理”，结果不很理想，不过还是找到了一个页面，上面有“压电陶瓷片”的示意图，是用一个硬币样的圆金属片，中间贴个直径较小的陶瓷片，陶瓷片上涂个“镀银层”。金属片和这个镀银层分别引出两根导线做电极。

按这个页面的说法这种压电陶瓷片是个“发声元

件”，网页上还给出了两个电路，大概是通上电之后会“吱吱”叫的，但是电路看不懂，因为用了“三极管”，这个还没学到。这个页面上还出现了一个新词——蜂鸣器，我觉得这个词可以用来搜一下。

在 GOOGLE 上查了下“压电陶瓷片 蜂鸣器”，这回出来的内容中有 N 多的广告，看来这个“蜂鸣器”也是一种经常使用的电子元件。顺手打开一个广告页面看了下，还不错有图有真相，这个蜂鸣器其实就是一个压电陶瓷片配上“谐振腔”形成的。再看下其它广告页面，这个“蜂鸣器”还分成“有源”和“无源”的，怎么这么麻烦？



师：“你还没搞掂吗？”

我：“麻烦啊！这个陶瓷片的结构没问题了，蜂鸣器是个什么东东？”

师：“就是陶瓷片外边加个壳，这个壳是个共振腔，能让声音响亮一点。”

我：“那‘有源’和‘无源’是什么意思？”

师：“这个陶瓷片要加一个电路才能嘀嘀响的，那个电路就是所谓‘振荡’电路。”

我：“我找到两个电路，看不明白。”

师：“所谓无源，就是指蜂鸣器壳里面只有一个陶瓷片，振荡电路你要自己做。而有源的，是指壳里面不仅有一个陶瓷片，而且已经做好了振荡电路。”

我：“有源的通上电就能响？很方便啊。”

师：“但有源的就只能发出一个音，你想发音乐出来是不行的。”

我：“无源的就能唱歌？怎么做？”

师：“因为振荡电路是你自己制作的，它能振出什么频率来你必然有办法控制，所以你能让蜂鸣器发出你想要的音调来。”

我：“那就是能做个电子琴出来？”

师：“以后我教你做电子琴，带电脑的电子琴。”

我：“电脑声卡那样的声音？还是只能嘀嘀叫？”

师：“第一步只是嘀嘀叫的。这得慢慢来。”

我：“我家亲戚刚生了小孩，我妈给买的玩具都带和弦效果的。”

师：“蜂鸣器这东西也不只是用压电陶瓷片，还有电磁的，里边有线圈。”

我：“那不就跟喇叭和耳机一样了吗？”

师：“是的。不过电磁的和压电陶瓷的区别很大。电磁蜂鸣器两个电极之间是个线圈，它能导电。”

我：“对啊，压电陶瓷片两个电极之间是个绝缘的陶瓷片。它算是个电容？”

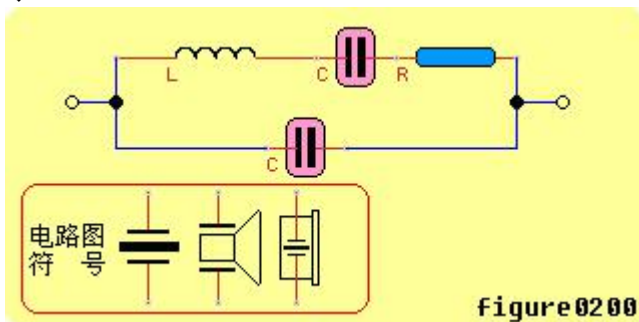
师：“它可不简单地等效成一个电容，有点复杂。不过电磁的算是一个电感。”

我：“电磁的蜂鸣器算是个电感？”

师：“对，电磁蜂鸣器算是电感。压电陶瓷片两个电极间加上电，中间的陶瓷片会发生变形，就这个变形使得它不是一个简单的电容。”

我：“那它算是个什么东东？”

师：“你收个图吧（figure0200），它算是这么个东东。”



我：“有点像一个‘谐振’回路？”

师：“是的，就是这个小小的变形，使得这东西成了谐振回路。”

以上说法仅是笔者自己的一种理解，是否可以这样说有待商榷。

我：“它还能做滤波器吗？”

师：“有滤波元件是用压电陶瓷做的，倒不是说压电陶瓷蜂鸣器也用做滤波。”

师：“我现在给你透露一个小秘密。你若做一个振荡电路去推动一个压电陶瓷片发声，电路的振荡频率最好选在陶瓷片的谐振频率上。”

我：“会共振吗？这时候发出的声音最响对吧？”

师：“对，这个频率最响，其它频率要差一点。”

另一种说法是电路的振荡频率应该匹配共振腔的谐振频率，因此以上讨论有待进一步确证。

我：“哆咪咪都是嘀嘀叫还不一样响？咱要做的电子琴可是够烂的。”

师：“将就了吧。蜂鸣器不是电脑中很重要的元件，顶顶重要的是‘石英谐振器’。”

我：“顶顶重要啊？没想到。”

师：“你知道你的电脑主频多高吗？”

我：“2.4G 的，比较低。”

我：“你不会想说这个主频是由水晶振出来的？”

师：“这个主频源自于一颗水晶。”

师：“不是直接由水晶谐振器供出 2.4G 那么高的主频。”

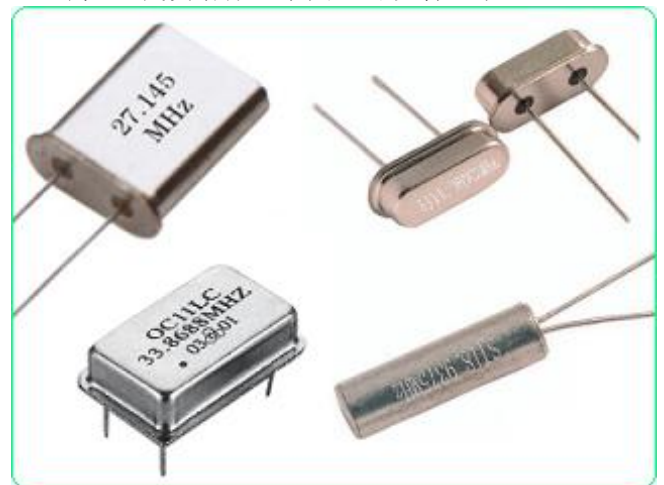
我：“振到 2.4G？不会碎了吗？”

师：“CPU 是带‘倍频’的，水晶只供出一个很低的频率，由 CPU 自己翻倍。”

我：“我们同学玩超频的，他那个 2.4G 的 CPU 能超过 3G，爽翻了。”

我：“这水晶谐振器长什么样？我想打开机箱找找。”

师：“我发给你一个图，可以看一下。”



我：“印象中我见过这东西，我拆过电脑，好像是右上角那个长圆形扁了叭叭的东东。”



师：“扁了吧叭？应该说‘半高的封装’。”

我：“对，‘封装’这个词你用的很专业。左上角那个是‘全高’的？”

师：“是啊，我给的图中左下角那个长方块是‘有源’的，右下角是圆柱形封装，你主板上也应该有。”

我：“两个引脚的都是‘无源’的吧？”

师：“是的，也有 3 个引脚的无源的。”

师：“这个元件也可以用陶瓷做，比较便宜，但性能上有所欠缺。”

我：“这铁壳里面是什么结构？”

师：“不知道，我没拆开过。大概是个支架托一粒水晶吧？”

我：“这掉地上一摔岂不散架了里边？”

师：“也没那么脆弱啦。不过严格来说这种元件对振动冲击是有些敏感。”

我：“那么陶瓷的呢？是‘偷工减料’用的么？”

师：“你小子一见‘便宜’就想起偷偷减减？”

师：“陶瓷谐振器的谐振频率不是很准，也容易受温度影响。”

我：“精度低温漂大吧？”

师：“还记得‘温漂’啊？你总算有点‘专业’的味道了。呵呵。”

师：“不过相对于用一个电感和一个电容组成的谐振回路来说，即使是陶瓷的谐振器精度也是高的，温漂也是小的。”

我：“这种谐振器和 LC 回路比较有什么优势啊？”

师：“首先是精度高啊？而且体积也小啊。”

我：“电感线圈个头都有点大哈？”

师：“这个东西用作滤波器的话，带宽是很窄的，比 LC 回路还要窄得多。”

我：“总之是个好东西哈。”

师：“我们以后用这个东西配上振荡电路为 CPU 产生主频，用起来也很简单的。”

我：“和压电陶瓷片用的振荡电路一样？那还得学三极管。”

师：“要说原理的话有些麻烦，不过只看线路的话会很简单，我们不用三极管的。”

我：“用‘有源’的最省心了，能给它通上电就行。”

师：“有源的终究是贵一点，其实用无源的水晶也是‘简单的令人发指’。再见啦。”

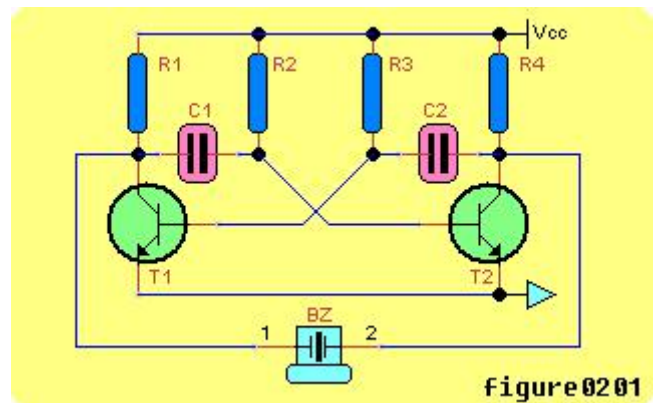
我：“这我就放心了。拜拜。”

我很好奇，做一个电路推动蜂鸣器发声，这个电路会是啥样子？放狗搜一下应该能找到电路图吧？于是我打开 GOOGLE，输入“有源蜂鸣器”，广告太多了，唉！

继续搜“蜂鸣器电路”，这回有图有真相了，只是真相让我看不懂，因为这些图几乎都用了“晶体三极管”这样一种器件，咱还没学到这个呢。不过有一个图我觉得十分有趣（figure0201），它完全对称的，看上去非常的和谐，我猜像这样的电路，C# 这家伙八成将来是要说到的，他就爱整这些有意思的东东。

而对于石英晶体，我也有一些感到不解的地方，那就是它的频率。刚才的图片里那一堆晶体之中左上角那个全高的，居然是“27.145MHz”，这怎么还有零有整的呢？

我搜了下“石英晶体 频率”，在维基百科上找到了有关“32.768KHz”这个频率的解释，32768 是 2 的 15 次方，这个数值不断地除以 2，最终的结果是 1，频率是 1Hz 的脉冲刚好用于电子表计时，每个脉冲就是 1 秒。另外还有 3.58MHz 的晶体，是 NTSC 制式彩电的“彩色副载波”。14.318MHz 是它的“4 倍频”，我用 3.58 乘 4，结果是 14.32，而 14.318 除以 4 是 3.5795，倒也差不多。11.0592MHz 也是个怪异的数字，它是 1.8432MHz 的 6 倍，页面上介绍这用于“精确产生 UART 的工作频率”，不是很理解。而 22.1184MHz 刚好是 11.0592MHz 的 2 倍，也应该和什么“UART”有关吧？





## 本节补充说明

“石英谐振器”一般被称为“晶体”或者“晶振”，有些人很纠结这两个名字，他们认为那种两个引脚“无源”的叫“晶体”，四个引脚“有源”的叫“晶振”。理由是在英文中“晶体”是“Crystal”，“晶振”是“Oscillator”，看见“Oscillator”说明那里面带了“振荡电路”的。我本人倒不是很在意这种细小的区别，“Oscillator”也不是特指石英晶体振荡器，它泛指振荡电路。我觉得大家不妨统一用“晶振”，但要明确说出来“有源晶振”和“无源晶振”，这样“陶瓷谐振器”就可以说成“陶振”了，当然，也要明确说“有源”和“无源”的。

图（figure0200）中给出的那个“RLC”组成的电路也适用于无源石英晶振，不论陶瓷还是石英，其电路图符号都是两极板中间加一条粗实线。无源晶振用到电路中是否就可以看做是一个谐振电路？这里边还有点复杂。实际上它根据外部电路连接和参数不同可以是一个电容，也可以是一个电感，还可以是一个 LC 串联谐振回路，或者是一个 LC 并联谐振回路。举一个很典型的例子：当你把一节电池连接到无源晶振两个引脚上时，此时的晶振就是一个电容而已。电池为晶振两端提供的电压是稳稳当当的没有丝毫的变化，那些“压电效应”之类的特性也就发挥不了什么作用了，它就是两片极板夹一层绝缘介质，没有其它的。

## 小花絮 偷工减料

国货嘛，首先就是便宜。以前的说法是咱们这儿劳动力廉价，所以东西做出来便宜。说实在的，一听这话我心里就有个回音：“我们的劳动怎么都这么贱呢？”其实这些年劳动力也不是一直都廉价，俺老爸厂子里的那些工人也一直在涨工资的，似乎，只有我老爸的收入没见涨多少，这老总是怎么当的呢？

“做生意得讲良心，赚的少就少点，总归比我以前穷的时候强，犯不着为多赚一壶醋钱让人家戳脊梁骨。”

这就是俺老爸的原则，这么多年一直恪守着。这老爷子年轻的时候确实是穷，但他从来没怕过穷。半辈子的坎坷，啥都看开了。

我很佩服老爸，我妈也是。

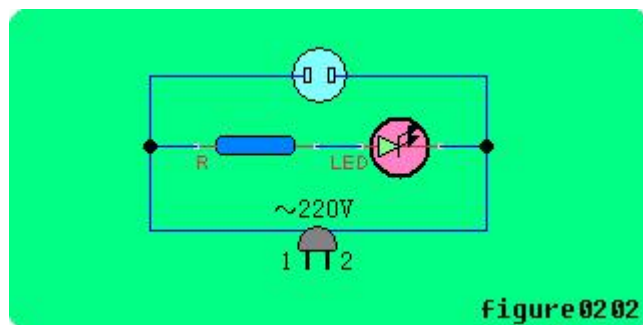
现在的国货嘛，依旧是便宜，不过咱不太强调劳动力廉价这种说法了。为什么便宜大家也都知道，无所谓啦，大家都不容易，你做生意也有你的难处。其实要真是东西做的次你就直说它很次好了，毕竟我图的是便宜嘛，我要拎着大把的票子想买好东西，你也肯定能抓到像样的货卖给我是不是？不过有一点我得强调：“明明这玩意儿很垃圾，你还硬说它是好东西，这可就太没人性啦！”

## 2005-07-10：插线板中的小学问

俺的插线板完蛋了。严格来说也不能算是完蛋，一共 5 组插孔有一组孔没电了，其它 4 组还能用。只不过咱插的电器实在有点多，为将来的发展考虑，我决定找老爸要个新的插线板，插孔比较多的。结果是烧鸡大窝脖儿，被撅回来了。

“自己修修！你不正学这个呢吗？”还让人找着不给钱的合理说法了，这事儿闹的。

把插板从墙壁插座上拔下来，拆开后盖研究了一下，偶的个神啊！这活儿也忒糙了一点吧？整个儿就是个地摊儿货嘛！这必是老爸买的，老妈肯定不省这个钱。估且不说懂不懂技术，单以老妈的品味也不会要这破玩意儿啊。



那个坏了的插口只是导线开焊了，并不难处理。另外这插板有个指示灯的，现在早已不亮了，我看这个灯就是一个发光二极管，一个引脚上接了一个电阻，电阻的另一脚直接焊到电线上，发光管的另一引脚也是一样，直接焊到另一条电线上，感觉这电路就是如图（figure0202）那么简单。

这么靠谱儿吗？显然交流电的正半周（1 端正 2 端负）会让 LED 导通发光的，电阻 R 会限制住电流。那么负半周呢？220V 的反向电压肯定把 LED 击穿了，但是有电阻限流，这 LED 倒不会坏，可就这么一次又一次的击穿，终究不太好吧？记得这插板没使用多久这灯就不亮了，会不会跟这种反复击穿有关系呢？

先不管那么多了，把开焊的地方焊好再说。我把烙铁插好先热着，然后又找了一个 LED 管。看那个电阻的小身条儿也够细的，要不然也换了吧，看色环像是 10K，也可能是 100K，红跟橙分不太清，我觉得电压那么高，应该是 100K 的。

这开裂的焊点有点难焊，焊点上剩余的锡好像不太容易融化，勉强把线焊上，看着有点像豆腐渣。我把烙铁的温度调到最高，重新弄了弄那个焊点，似乎好一点了。看来这粗铜线散热比较快，以至于焊接温度上不去。发光管和电阻焊在一起之后，我忽然发现没注意 LED 的极性。转念一想这似乎没关系，交流电嘛，不论 LED 正着焊还是反着焊，总有半个周期要导通发光的。

修插板不比修收音机，实在不能做为资本跟 C# 吹一下的。不过当 C# 跑到 MSN 上时，我还是没忍住跟他说了这事。

我：“我修了一个插板。”  
 师：“指示灯不亮了吧？”  
 我：“不只是灯不亮，线也开焊了。”  
 师：“如果只是那小灯不亮，建议直接拆了那个灯。”

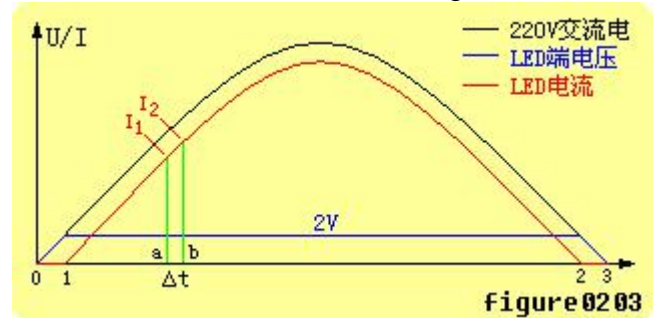
我：“灯早不亮了。看图。(figure0202)”  
 师：“市面上几乎所有插板都是这么接的。”  
 我：“这不靠谱吧？”  
 师：“为何？”  
 我：“LED 总是被击穿？”  
 师：“但是有限流电阻啊？”  
 我：“我知道 LED 不会坏，但这是不是容易坏？”  
 师：“LED 的失效和温度关系大一些。它发热大的话就容易坏。”  
 我：“是热坏的？”  
 师：“所以有一种 4 个引脚的方形 LED，它的封装散热条件要好点，也就允许流过更大些的电流。”  
 我：“更亮？”  
 师：“对。这种封装的 LED 叫‘食人鱼’。”



我：“好帅气的名字！”  
 师：“那个 LED 指示灯你也换了？”  
 我：“换了。我应该算下发热？”  
 师：“长心眼儿了你。算一下吧。”  
 我：“红色 LED 正向压降算 2V 可以吧？”  
 师：“没问题。”  
 我：“通过 LED 的正向电流，是  $(220V-2V)/100K=2.18mA$ 。”  
 师：“电阻 100K？”  
 我：“是的，不小吧？”  
 师：“你倒没嫌大？继续。”  
 我：“LED 上的功率是  $2V \times 2.18mA = 4.36mW$ 。”  
 我：“4 毫瓦多不算大吧？”  
 师：“以你掌握的知识，也就算到这一步了。”  
 我：“又不对，嘿嘿。”  
 师：“这怨不得你，交流电咱没研究那么深。”  
 我：“我错在哪儿？”  
 师：“这个 220V 是什么值？”  
 我：“交流电的有效值。”  
 师：“LED 上那 2V 呢？”  
 我：“不知道。”  
 师：“交流电的电压是高低低低的，所以有一个‘有

效值’的说法。那 2V 是稳定的啊？”

我：“那 2V 是直流吗？”  
 师：“你用 220V 减 2V 说不通，这俩电压就不是同一个概念。”  
 师：“你要非这么减也行，你得提出一个新概念，说这 218V 叫‘活死人压差’。”  
 师：“进一步展开形成一套新的电学理论。”  
 我：“没那本事。我换个说法。”  
 我：“这 2V ‘远小于’ 220V，所以忽略了，电流是  $220V/100K=2.2mA$ 。”  
 师：“脑瓜子还挺机灵，还知道忽略。”  
 我：“4.4 毫瓦也没多少。”  
 师：“那个交流电实际是从 0V 上升到 310V 对不对？它 310V 时你说 2V ‘远小于’ 它我没意见，它还有 0V 的时刻呢？”  
 我：“那叫‘过零点’对吧？”  
 师：“你用 2V 乘 2.2mA 也说不通，LED 上的电流也是一个正弦波形啊？”  
 我：“那您给算一下吧。”  
 师：“收图，看看现实世界。(figure0203)”



我：“从 0 点到 1 点比较简单。”  
 师：“是啊，虽说这半周期的电流是一个正弦，但在交流电压没到 2V 时，这电流是 0。”  
 我：“LED 正向导通之后才有电流？”  
 师：“是啊。这电流最大是  $(310V-2V)/100K$ 。”  
 我：“怎么要用峰值啊？”  
 师：“我是在说明现实世界是个什么样子，电流不是简单的 2.2mA，而是从 0mA 按照类似正弦的规律变化到 3.08mA。”  
 我：“所以 2V 和 2.2mA 不能直接相乘？”  
 师：“对啊。现在我在这个正弦中切出一个窄条，从 a 点到 b 点。这个窄条的宽度是个时间对吧？”  
 我：“这时间很短？”  
 师：“是很短，这时间咱叫它  $\Delta t$  吧。”  
 师：“窄条顶端有俩电流， $I_1$  和  $I_2$ ，一个低一个高。”  
 我：“可以当成一个电流？”  
 师：“如果  $\Delta t$  非常的短，那我可以近似认为电流在这么短的时间内没变化，就是  $I_1=I_2$ 。”  
 师：“然后我把 2V 跟这个假设没变的电流相乘，再乘上  $\Delta t$ 。”  
 我：“这就是功率？”  
 师：“我乘了  $\Delta t$  啊？”  
 我：“乘了时间就是能量了。”  
 师：“这种窄条我切得很多很密，每一条都算一下能量，然后把所有结果都加在一起。”



师：“这个总的能量，再除以半周期的总时间 T，就得出一个功率来。”

我：“你这是积分？”

师：“说对了，是积分。”

我：“我不会积分啊？！”

师：“那你再想想有什么别的说法。”

师：“总而言之搭眼一看我这个切瓜算法比你那个像回事。”

我：“我那个叫做‘估算’，哈哈。”

师：“哦耶！！败给你小子了！”

我：“估算，差不多就行。”

师：“你给做个误差分析吧，你所谓的‘估算’和真实情况到底差多少？”

我：“这怎么分析啊？”

师：“现在是接 1 个 LED，如果 10 个 LED 串起来还能那样‘估算’吗？”

师：“什么条件下可以‘估算’？给说清楚了好吧？”

我：“说不清楚可以吗？”

师：“你说不清楚我知道你这算法到底能用不能用啊？”

我：“你是老大，又不是我教你？”

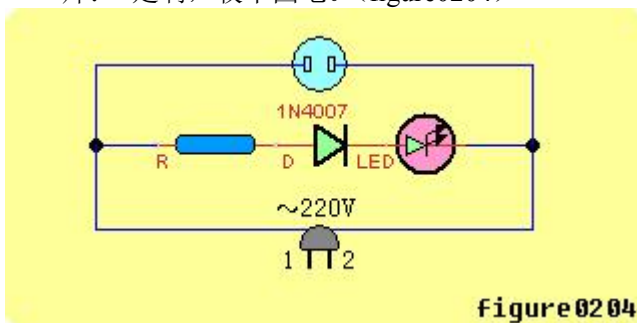
师：“我真受不了你了。我不想再说这个了。”

我：“俺凭直觉认为，LED 正向导通没费多少电。”

师：“是的，LED 正向导通确实没耗多少电。何况这时候它是发光的，为了借到这点光咱也需要费点电。”

我：“反向击穿时是纯发热白费电的？”

师：“是啊，收个图吧。（figure0204）”



我：“多个二极管防止 LED 击穿？”

师：“这个 1N4007，反向击穿电压高达 1000V。有这个二极管，那个 LED 就不会击穿，反向接电的半个周期也就没电能损耗了。”

我：“这个要多少钱？1N4007？”

师：“批量，3 分钱？可能吧。我不是采购。”

我：“3 分钱都要省？”

师：“多个 1N4007 还要多焊 1 个点呢，人工钱也得算。”

我：“一共算 1 毛钱行吗？”

师：“那做 10 万个插板就是 1 万块。”

我：“他妈的什么世道？！”

师：“我做一个插板，多赚 1 毛钱。你买我一个插板，每年多掏 1 度电钱。”

我：“为什么多掏电钱？”

师：“刚说了，LED 反向击穿那半周期不发光只发热啊。”

师：“这 LED 和这电阻，还容易坏。”

我：“我还骂早了？应该现在骂！他妈的什么世道！”

我：“咱不加这个指示灯好不？”

师：“那制造 LED 的工人奖金就少了。”

我：“要这么算加个 1N4007 那些造二极管的工人奖金还多了呢？”

师：“这奖金都从你兜里出，你愿意？”

我：“如果不超过 1 度电钱，那我出。”

师：“你小子是真机灵啊？很多人都绕不过这样的弯儿来，就知道图眼前的小便宜。”

我：“现在的人都怎么了？蝇头小利也咬住不放。”

师：“这几千年都这样，全世界都差不多的。”

我：“不可能！”

师：“据传这个 LED 加电阻是日本人最先这样用的。”

我：“不可能！以日本人的敬业精神绝不会干这么糙的活儿。”

不好意思最近刚曝的料，日本人也造了假了，还几十年如一日的。

师：“而且据说他们的交流电是 110V，所以那电阻用 100K。”

我：“我应该用 200K 难道？”

师：“你不一直都反日吗？又变了？”

我：“这跟反不反日没关系。”

我：“我再改一下那个插板，换电阻再加 1N4007。”

师：“我早就说了，如果只是灯不亮，把灯拆了也罢。”

我：“那就这样吧，它以后再憋了我也不管了。”

师：“就是嘛，弄这个还得搭进去人工钱。”

我：“唉——”

无语中……

你有什么想说的吗？写在这里吧。

## 本节补充说明

本来是没想写这一则小花絮的，因为在 bbs.21ic.com 上读到一个很精彩的贴子，于是就加写了这一段。大家可以到以下网址读贴。

请参考 <http://bbs.21ic.com/icview-323808-1-1.html>，截止到 2014 年 5 月 13 日此贴仍可阅读。

这个贴涉及某大学教授所写的一本教材的勘误，实际上 21ic 论坛上有多位网友都针对这本教材中的各种问题进行了深入的研究，相关的贴子还有很多，我只是选了一个与本教程的程度最接近的贴子提炼成文，确保大家基本能够看懂。但我觉得还可再补充些许内容，以呼应我们前文中打下的伏笔。

在前文中我们讨论膜式电阻的结构时，曾提到“电阻膜的螺旋结构很重要，一个高阻值的电阻器，其电阻膜肯定是‘窄且长’的，这意味着切槽很细很密，这在某些应用场合会出问题。”如果图 figure0021 是一个低阻值的膜式电阻，那么 figure9018 显示的就是一个高阻值的膜式电阻了。

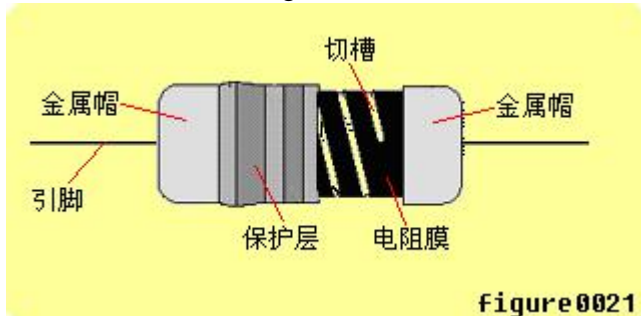
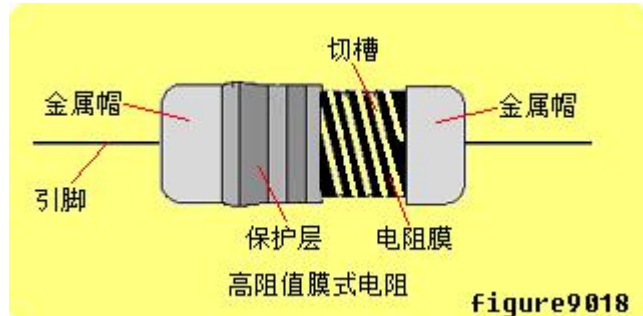


figure0021



高阻值膜式电阻

figure9018

现在就有一个“某些应用场合”出现了。本节中 LED 的限流电阻有 100K，算是高阻值，用在 220V（峰值 310V，算是高电压）的交流电路中做限流，此时“细而密”的电阻膜切槽会怎么样呢？我们不久前刚讨论过的：“有可能出现‘爬电’现象。”，就是电流并不老老实实沿着电阻膜绕圈走，而是直接越过切槽。或者换个说法：“电阻器也有个‘耐压’参数。”它两端所加的电压最高是多少也是有限制的。所以，当你对可靠性有较高要求时，你不应该使用一个 100K 的电阻，而应该使用两个 51K 电阻串联，或 3 个 33K 电阻串联，或 5 个 20K 电阻串联，这就可以避免发生这种“爬电”现象了。当然 100K 阻值到底算不算大？310V 电压到底算不算高？这还可商榷，我只是告诉大家一种解决问题的方法：在高压应用环境下，不要单独使用一个高阻值电阻，而使用多个低阻值电阻串联形成所需的高阻值。

## 第 7 章 晶体三极管

即使是“三极管”这种听起来神秘莫测的东东，C# 这家伙也能把它和“电阻”关联到一起，颇有创意。自打跟着 C# 学过三极管后，我也自己在网上找了很多资料教程，还去书店看了一些书，未发现有谁把三极管和电阻扯到一起讨论的。

有一点我想不大通，如果 C# 也是靠网上这些资料和书店中这些教材来学习的话，他怎么会想到把三极管和电阻扯到一起来说呢？难道这就是传说中的“融会贯通”？好像不是，凭我的感觉起码这家伙对数学就不大感冒，当初应该不是个三好生。他必是掌握一些我找不到的资料才对，难道他是用外文的教材学习？

### 2005-07-12：从“话筒”开始

我把“日光灯”电路发给了空姐 MM，果不其然，她一眼就看出这是日光灯了。差距啊！我爸爸咋就不是物业公司的电工呢？

说句实话我对空姐 MM 多少有点嫉妒，她有个好脑子，至少有个好记性，多年前看过的图画还能记得是什么。我要有这好记性可省心省大了。如果空姐 MM 也能拜 C# 为师学习电子技术多好，我也混成个大师兄当当。可惜啊，在人家心中，帅哥才是第一位的。自己学那么多本事干嘛？嫁个有本事的男人不就行了？

师：“好了，我们今天来讨论‘话筒’。”

我：“卡拉永远 OK 了？说这个干嘛？”

师：“为以后说三极管打点基础。”

我：“三极管啊？这个强！可怎么会是以‘话筒’为基础？”

师：“确切地说是以‘电阻’为基础。你听不听啊？”

我：“听啊。等我撒泡尿洗洗脸。”

我火速冲进卫生间，把憋足了的水放进马桶，又洗了下脸醒了醒脑子，然后坐回到电脑前。

师：“你不是吧？”

我：“我是先撒尿，然后用水洗洗脸啦。”

师：“你首先要了解，动圈喇叭和压电陶瓷片都可以做话筒用。”

我：“压电陶瓷片我能理解，那片一振就压出电来。”

师：“喇叭也一样。你冲着纸盆说话，纸盆会带着后边的线圈在磁铁里振动。”

我：“又是‘洛仑兹力’吧？这跟三极管有什么关系？”

师：“先别急，我再给你介绍一种新的话筒，与电容有关的。”

我：“不是以电阻为基础吗？又整出电容了？”

师：“慢慢来不要急。一根针在磁铁上蹭一下，它就带了磁性。”

我：“怎么又出来磁了？”

师：“你别老打岔行不行？你听不听啊？”

我：“难道三极管是集阻容感之大成？七种武器于一身？”

师：“算了，不说了，你自己搞掂吧。”

我：“别啊老大，我这急着弄明白嘛。”

师：“一根针在磁铁上蹭一下，针带上磁性，也分了南北两极，我们不妨称之为‘磁极化’。”

我：“我搜到过‘电极化’的。”

师：“什么是‘电极化’？”

我：“没记得，那次是搜‘压电效应’，看到这么个词。”

师：“一个物体如果正负电荷分布在相对的两面，这可以称为‘电极化’，如你所说‘压电效应’。”

师：“其实电容器充电，也会让极板间的绝缘介质发生‘电极化’现象，但不能保持。”

我：“放了电就完了？”

师：“所以我们要思考一下有没有能保持住的‘电极化’现象。如同在磁铁上擦过的钢针能保留磁性那样。”

我：“我猜一定有能够长期保持住的‘电极化’现象。”

师：“你就猜吧你！猜对了。”

师：“有些物质你把它加热，然后通电使它出现‘电极化’，接着一边通着电一边冷却它，完全凉了之后它的‘电极化’现象会保持住。”

我：“还得搭配烧烤啊？”

师：“也不一定非要烧烤，卤煮也行。”

我：“我们家边上有小吃城，哈哈。”

师：“你还闹馋虫了你！这种现象被称为‘驻极化’，跟‘剩磁’有一拼。”

我：“这可以叫做‘剩电’，哈哈。”

以上对“电极化”和“驻极化”的叙述是不精确的。仅供形象化的理解。

师：“如果用这种‘驻极体’做电容器介质，那这个电容一做出来就是充着电的，它两极板间有个电压‘U’，还不会放掉电。”

师：“如果这个电容的极板间距离还能改变，比如极板能振动，这个距离的改变会导致电容容量 C 的变化。而  $C=Q/U$ 。”

师：“C 在改变，但电荷量 Q 是不变的，‘驻’极



嘛。”

我：“那极板间电压‘U’就得变了？”

师：“对，所以这个东东能发电，它能把极板的振动变成变化的电压。”

我：“其实话筒就是个发电机对吧？”

师：“这种话筒叫做‘驻极体电容话筒’，十分常用。”

师：“可以理解为发电机，但是发出来的电太微弱，没办法直接经过电线向远处传送。”

我：“接功放就 OK 了。”

师：“你知道什么是功放吗？”

我：“功率放大器啊？这谁不知道？”

师：“那你知道能量守恒定律吗？”

我：“能量不会凭空产生，也不会凭空消失，只能从一种形式转化成另一种形式。”

我：“死记硬背是我强项，呵呵。”

师：“还真是你强项。那你说‘功率’怎么会被‘放大’呢？”

师：“1 瓦变成 10 瓦，怎么凭空多出 9 瓦呢？不是要‘守恒’的吗？”

我：“功率放大就是 1 瓦变 10 瓦？”

师：“那你说它是什么意思？”

我：“我不知道啊？只知道这个名词。”

师：“你啥都不知道，你就知道猜我的话里话外暗示什么？”

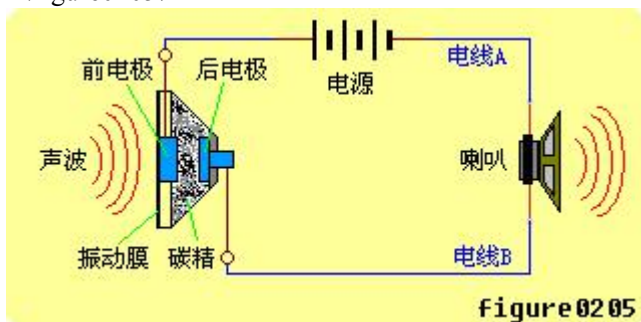
我：“当学生的必须要知道老师出题的意图是想考什么，要不指定考糊了。”

师：“你行了吧你！我不是老师，我是在跟你共同学习和讨论。”

师：“我们现在来思考一下有没有办法让话筒出来的信号能通过电线传到很远的地方。”

我：“还得不接功放对吧？”

师：“你收个图看看，这个叫‘碳精受话器’。（figure0205）”



我：“碳精不是画素描用的吧？我同学有学画的。”

师：“碳精就是一些粉末状的电阻材料，把它装进壳子里再盖上容易振动的膜片，它就成了一个‘可变电阻’。”

师：“因为膜片如果向内凹，会把碳精压紧一些，前后电极间的电阻就小点；如果膜片变平了，那么碳精就松散一些，电阻就大一点。”

我：“这是个‘声控可变电阻’？”

师：“就是这个意思。所以图（figure0205）上的这个线路，A/B 两根电线就可以很长。”

图（figure0205）并不难理解，如果碳精的电阻随着话音发生了改变，那么线路中的电流就会随之变化，这就是简单的欧姆定律。喇叭的线圈中流过变化的电流，它必然会带动纸盆振动的，纸盆的振动和碳精上膜片的振动应该是一致的，所以纸盆也就会振出话音来了。

而 A 和 B 两根线能拉多长？那就要看电源有多强了。如果电源能供出很充沛的电力，那么两根线确实可以很长的。

我：“这个‘碳精受话器’让线路中的电流不断发生变化？”

师：“对啊，我且问你喇叭上的能量到底是谁给出来的？是碳精受话器给出的吗？”

我：“应该是电源给出的。”

师：“你明白‘功率放大’是怎么回事了吧？”

我：“这多出来的 9 瓦是从电源来的？”

师：“所以你买个功放听音乐得交电费啊。”

师：“你送进功放 1 瓦的功率是会被放大的，但功放会从电源取出 9 瓦功率再加上你送进去的 1 瓦供给喇叭，功放有个魔力。”

我：“什么魔力？化腐朽为神奇？还是化悲痛为力量？”

师：“它会复制你送给它的信号，从电源取来的能量也是有时多取点有时少取点，高低起伏抑扬顿挫和你送进去的信号完全一样。”

我：“能把蚊子变成战斗机？”

师：“那不是好功放！那叫‘失真’。”

师：“好的功放送进去的声音是蚊子叫，喇叭出来的声音仍然会被公认为是蚊子在叫。”

我：“叫得更响而已哈。”

师：“现在我们设想一下：如果有一种物质，就比如一根火腿肠吧，我在它中间扎一根钢针，针上通上电，然后在两头测它的电阻。”

我：“你也饿啦？”

师：“中间这根针上加的电压高一点，两头测的电阻就小一点，中间加的电压低一点两头测的电阻就大一点。”

我：“什么牌子的火腿肠？这么牛×？”

师：“特别是中间加的电压还是 mV 甚至  $\mu\text{V}$  级的微小电压，而电阻值的变化范围还比较大。”

我：“那么，在哪里才能买得到呢？”

师：“是居家旅行、杀人灭口之必备良肠。应该一肠子敲死你！”

我：“你也看周星星的片子啊？哈哈。”

师：“像这样的火腿肠两端接上电源的话，它就可以把钢针上的弱信号‘放大’了。”

师：“其实质就是复制弱信号的波形，产生一个模样一致但幅度更大的波形，而之所以幅度能更大，因为它可以从电源取到更多的能量。”

我：“你说的火腿肠就是三极管吧？原理上就是这样？”

师：“在二次世界大战结束后，美国贝尔电话实验室有一个关于半导体材料的研究项目，其中涉及了

‘transferring current across a resistor’这样的内容。”

我：“输送电流穿过电阻？这有什么可研究的？”

师：“这一句可以简化成一个词，把前面的 tran 和最后的 sistor 组合在一起。”

我：“transistor？我查一下吧。”

我：“是‘晶体管’的意思，三极管就是这样一种由电控制的电阻？”

在詹姆斯·格雷克所著的《信息简史》一书中，提及“transistor”一词是由“varistor（压敏电阻）”和“transconductance（跨导）”两个词合成的。大家以后学到更深的层次，会感觉出格雷克的这一说法更确切。

师：“不是，晶体三极管不是这样的电阻，它‘貌似’这样一种电阻。”

我：“怎么个‘貌似’法？”

师：“原理我们以后讨论。不过研究小组确实是想从‘电压控制电阻’这块开始着手，但没有成功。”

我：“那怎么会有晶体三极管呢？”

师：“有意栽花花不发，无心插柳柳成荫。晶体三极管算是个副产品。”

师：“用电压控制电阻很早就有人开始研究了，贝尔实验室是想站在巨人的肩膀上前进，不过最终还是另辟了蹊径。”

我：“巨人们以前都研究什么了？”

师：“矿石收音机啊。呵呵呵。”

我：“别逗了，那么简单的东东还用巨人们费心？我都能画出电路图来。”

师：“忘记历史就等于背叛，我得带着你想一下当初了。”

我：“我爱听奇闻轶事。”

师：“从我掌握的资料看，研究半导体材料最早追溯到 1874 年。德国的 Braun 发现了金属和一些硫化物相接触后，有‘单向易导电’的性质。”

师：“这后来就有了做收音机的那个‘矿石’，把金属针扎在方铅矿的某个点上，就能单向导电。你可以说这就是一个‘肖特基’二极管。”

做收音机的“矿石”是这个样子吗？

我：“你一说这些名词那这块矿石的技术含量可

就高多了，呵呵。”

师：“先别逗，关于‘肖特基’二极管你就没多琢磨一下？”

我：“我现在这水平能琢磨啥啊？”

师：“你认为一个普通二极管究竟是一个二极管还是三个二极管串联？”

我：“听不明白你在说啥？”

师：“一个 PN 结是一个二极管，而 P 区和 N 区还要各用一根导线引出来。”

我：“你是说 1N4148 的引出脚在管壳内部连到半导体上，这又形成了一个‘肖特基’二极管？”

师：“没有，引出脚和半导体间没有形成肖特基二极管，我们没让它形成这东西。”

我：“这也太夸张了！二极管寄生了电阻电容，还有俩肖特基？”

师：“也不是只要有金属和半导体接触就形成肖特基二极管。金属加半导体也要分‘欧姆接触’和‘肖特基接触’两种情况的。”

师：“引出脚和被引出的半导体之间做成了‘欧姆接触’，就如同电线之间的连接一样。”

我：“吓到我了。这要再多俩肖特基可怎么学啊？”

师：“所以我认为对半导体的研究是从肖特基二极管开始的，之后就开始研究‘电压控制电导’了，这被称为‘场效应’。”

我：“不是用电压控制电阻吗？”

师：“电阻和电导就是个倒数关系，一样的。”

师：“对‘场效应’的研究进展十分缓慢，所以贝尔实验室琢磨出一套新的原理，最终发明了晶体三极管。”

师：“而直到 1960 年代，基于‘场效应’制成的晶体管才成熟化。之后‘场效应晶体管’技术发展很快，因为它更多地用于制造集成电路。”

我：“普通的三极管不会淘汰了吧？全是场效应的？”

师：“没有，和场效应管共存的。我们下次就来讨论这个晶体三极管的原理。”

我：“又要走了？好的，再见了。”

师：“你自己玩吧，我先撤了。”

忘记历史就等于背叛，这罪过可大了，我想还是先搜下晶体管的历史吧。打开 GOOGLE 的主页，输入了“晶体管的历史”，搜出来的内容还真不少。很多技术性的内容咱是看不大明白了，比如什么“异质结”和什么“双极型”之类的名词，但涉及历史的内容大约如 C# 所说，由贝尔实验室的萧克利、巴丁和布拉坦于 1947 年发明了晶体管。

第一个晶体管是“点接触”的，我仔细琢磨下网页上的说明，似乎是一片半导体两边接两个金属，形成两个“肖特基结”。试验成功后才由萧克利提出用两个“PN 结”代替“肖特基结”的方案。看来“金属加半导体”在那个时代是个很重要的技术，那一时期的实验总要使用金属和半导体材料一起来做。不过“transistor”这个名字的却不是由一个短句缩写来的，而是专人专门给起的名字。

顺手搜了下“半导体 历史”，结果发现 C# 掌握的资料不够全面，实际上法拉弟在 1833 年就发现了一种“半导体”，是硫化银。它的电阻会随温度升高而降低，也就是所谓“负温度系数的热敏电阻”，这与当时普遍认为的“电阻应随温度升高而增大”的规律相违背。但法拉弟没有深入研究这个问题。这样看来对半导体的研究应该从热敏电阻开始的。

## 2005-07-15: 晶体三极管原理

跟 C# 一起折腾了这些日子，我对如何自学尖端技术多少也有点心得，至少一个诀窍是容易掌握的，那就是“不求甚解”。比如“二极管”，只要知道“单向导电”、“管压降 0.7V”之类的内容就够用，至于什么“齐纳击穿”和“肖特基势垒”之类似乎有些深了，何况很多内容 C# 也没有把它说“透”，就比如这个“肖特基势垒”，我如果对你说：“肖特基势垒就是金属与杂质半导体相接触而形成的”，你认为我是懂了还是没懂这个呢？

这几天我也在网上搜了下“晶体管的原理”，要说搜出来的内容看不懂吧，心中是略有不甘，怎么会看不懂呢？没看之前是不懂，看过之后就应该懂了，至少“算是”懂了吧。假如我把这网页全背下来，图片也记在脑子里，你若问我“晶体管的原理是什么？”，我就一边画小图画一边背诵网页，我想十有八九你会认为我很懂这个。

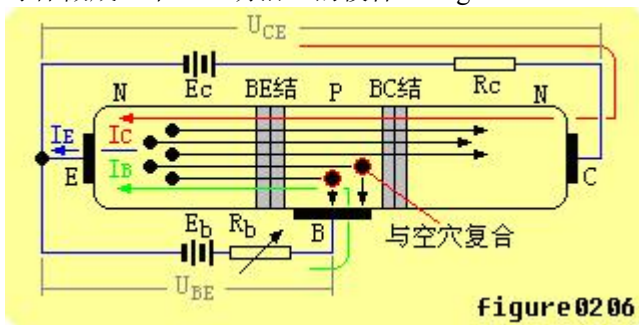
我不知道 C# 这家伙是不是真的很懂电子学，我觉得很多内容他也是“照本宣科”而已，那一个“萝卜”和一个“坑”究竟是怎么回事他也没弄清楚。

师：“我们要开始讨论晶体三极管了，今天你 GOOGLE 了没？”

我：“一直都在 GOOGLE，我给你讲这个三极管的原理怎么样？”

师：“求之不得！说来听听？”

我：“呵呵。首先我知道一个三极管就是一块半导体做成一个‘三明治’的模样。(figure0206)”



师：“你还有图？看来是备过课了。”

我：“这个图 (figure0206) 上可以看出来一块半导体，把两头做成 N 型半导体，而中间做成 P 型半导体，形成两个 PN 结，这就是 NPN 型三极管的基本结构。”

师：“也可以两头做成 P 型半导体，中间夹个 N 型半导体，这叫 PNP 型三极管。”

我：“你很机灵嘛！给你的天份加上 0.1%！”

师：“我这才有 0.1% 的天份，比你可差远了，你都不好几个 0.1% 了。”

我：“我是在你已有的 1% 的天份上又加了 0.1%，呵呵。”

师：“你别拽了你，继续吧。”

我：“最左面的 N 型半导体掺杂浓度很高，叫发射区 (E)；中间的 P 型半导体掺杂浓度低，而且做的薄，这是基区 (B)；最右面的 N 型半导体也是掺杂浓度低的，叫集电区 (C)。”

师：“好，发射区高掺杂，这是个重要的特征。”

我：“你怎么就知道这是个重要的特征呢？我觉得很普通啊？”

师：“我在实践中遇到过一些事情啊，所以才认为这个重要。我最初学这个原理时也觉得这个没什么特别的。”

我：“你都遭遇什么打击了？先透露点内幕行

不？”

师：“不必了，你以后也会遭遇这个。但肯定不是考场上没猜对出题人的意图。”

我：“这我就放心了，我们继续。”

我：“给三个区接电，要做到基区比发射区电压高，集电区比基区电压高 ( $E_C > E_B$ )。即 BE 结正向偏置，BC 结反向偏置。”

师：“你知道什么叫‘偏置’吗？”

我：“不知道，人家这么说我也这么说。可能就是接电方向吧？”

师：“继续往下说吧。”

我：“此时 BE 结导通，E 区会向 B 区发射电子，这形成了‘发射级电流  $I_E$ ’。”

我：“这些电子中一部分与 B 区的空穴复合形成‘基极电流  $I_B$ ’，但 B 区低掺杂空穴很少，所以  $I_B$  很小。”

师：“多数电子都跑到 C 区了，形成了‘集电极电流  $I_C$ ’。”

我：“所以有  $I_E = I_B + I_C$ ，而  $I_C$  与  $I_B$  之间的比值记做  $\beta = I_C / I_B$ ，这就是晶体三极管的‘电流放大倍数’，也记做  $h_{FE}$ 。 $\beta$  的数值在几十到一百多之间。”

师：“你对这个‘放大’二字如何理解？”

我：“公式可以转换成  $I_C = \beta \times I_B$ ，就是基极电流  $I_B$  有个小的变化，而集电极电流  $I_C$  有一个大了  $\beta$  倍的大变化。”

我：“举例来说假设  $\beta$  是 10， $I_B$  是 1mA 时  $I_C$  就是 10mA，当  $I_B$  增到 1.5mA 时  $I_C$  就增到 15mA。”

师：“不错，举例很好。”

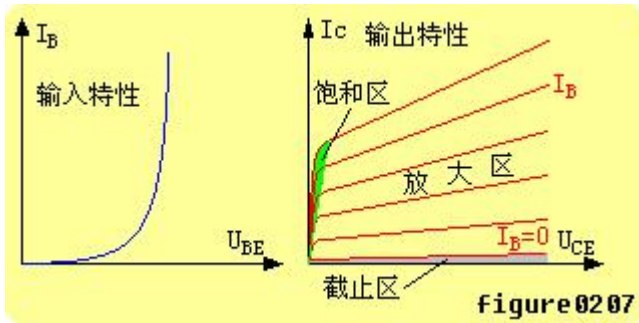
我：“不过最重要的一点是集电极电流  $I_C$  是由电源  $E_C$  供给的，呵呵。”

师：“从电源取到能量。欧耶！没问题！”

我：“哈哈爽！！下面就是三极管的‘特性曲线图’了。收一下。(figure0207)”

师：“你对这个‘输入特性’曲线怎么看？我瞧着眼熟。”





我：“就是个二极管正向导电的图啦。”

师：“就是基极对发射极的电压低于 0.7V 就没  $I_B$ ，达到 0.7V 就有  $I_B$ ，高于 0.7V 一点点  $I_B$  会迅速升高？”

这个说法是比较粗略的，并没有结合具体的测试电路来讨论。

我：“不一定 0.7V 的，与制造材料有关，锗材料做的管子就只有 0.3V 啦。”

师：“我们只说硅管。那现在说‘输出特性曲线’吧。”

我：“这个输出特性有些不大明白。”

师：“首先这个输出特性曲线反映三个量之间的关系对吗？”

我：“这个没问题，这里有  $I_B$ 、 $I_C$  和  $U_{CE}$ 。”

我：“ $I_C$  随  $I_B$  的增大而增大，这就有了  $\beta$  的定义。”

师：“那么  $U_{CE}$  呢？难道没有  $U_{CE}$  的事吗？”

我：“ $I_C$  随  $U_{CE}$  增大略有上升，随  $U_{CE}$  减小略有下降。如果  $U_{CE}$  实在太小那管子就‘饱和’了。”

师：“这个输出特性说得不是很好，你就是背下来一些网页而已。”

师：“有一点说得不错，输出特性曲线的‘水平’部分并不真平，而是斜的。”

我：“可这样一斜有什么意义呢？”

师：“你还有别的可讲的吗？”

我：“输出特性分三个区：如果基极电流  $I_B$  为 0，就是截止区。 $U_{CE}$  非常小的时候是饱和区。中间是放大区。”

我：“再往下就是三极管的应用啦，有‘共发射极放大电路’，还有‘共基极’的和‘共集电极’的，其中‘共集电极’放大电路也叫‘射极跟随器’。”

我：“往后就不会说了，弄不太明白。”

师：“好吧，总的来讲你说的挺不错的。”

我：“你说我算是把三极管弄懂了吗？”

师：“我给你出个题：请写出三极管电流放大倍数  $\beta$  的定义，并说出它的另外一个名称（10 分）。”

我：“呵呵。 $\beta = I_C / I_B$ ，它也叫  $h_{FE}$ 。”

师：“答对了，加 10 分。我认为你弄懂三极管了，考试成绩很不错啊？”

当我们提及半导体器件的参数时，真的很有必要把“直流”、“交流小信号”、“交流大信号”等不同的应用场景分开来看。直眉瞪眼地认为  $\beta = I_C / I_B$ ， $\beta$  就是  $h_{FE}$ ，都不是很严谨。本教程中不抠这些细节，请读者以后自己将这些概念严格化。

我：“您别挤兑我了！这是送分的题，我觉得我什么也没懂。”

师：“上课做题考试算分数，这就是一个学生的学习过程。我像你这么大的时候也是这样学习的。”

我：“你是否觉得我们曾经接受或正在接受的教育其实很垃圾？”

师：“我以前认为我受的教育是很垃圾。”

我：“你现在不这么认为啦？你怎么倒向那边去了？”

师：“我现在认为这教育是否垃圾跟本就无所谓。我有脑子，我自己会思考。”

师：“这教育也没有阻止你思考啊？”

我：“不解！请指教！”

师：“我上回提到了用‘电压控制电阻’的，你没想一下三极管如何体现了‘电压控制电阻’？”

我：“我想了，可我心里没底，搜了好多网页大家说的全是一套话，没人提什么‘电压控制电阻’啊？”

师：“想了就可以了，就怕你不想。现在想不明白也没有关系。”

我：“我是想当基极电流增大后，集电极电流会增大很多，相当于从集电极到发射级之间的电阻因为基极电流的作用变小了。”

师：“你这个看法完全可以啊，是一种理解。”

我：“这是‘电流控制电阻’啊？”

我：“你也说过贝尔实验室的研究人员开始想用电压控制电导，可失败了啊？”

师：“所以说这个三极管是‘貌似’用‘电压控制电导’啊。”

我：“怎么叫‘貌似’呢？费死劲了！”

师：“我来给你说一下三极管的原理吧，给你换换脑子。”

我：“好啊，听听你有啥特别的说道。”

师：“关于三极管那个‘三明治’结构，什么 NPN/PNP，发射区高掺杂基区很薄之类，这些都是‘事实’，谁说都是这个样子，所以我不重复这个了。”

我：“你这不还是重复了一遍吗？”

师：“我来给你说一下怎么给三极管通上电，以 NPN 硅管为例子。”

我：“我已经知道怎么接电了，我那图上都有。（figure0206）”

师：“由于我们以前只了解一点二极管，所以我要先说取三个极中的两个来加电会是什么情况。”

我：“这有点新意。三极管其实也能当二极管用？”

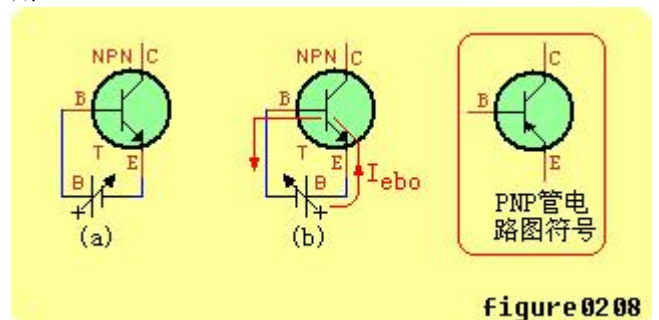


figure0208

师：“当然可以。你先收个图，看看我们在基极 B 和发射级 E 之间接上电的情况。（figure0208）”

我：“(a) 图正向接电导通，(b) 图反向接电不通。”

师：“(a) 图是正向接电，你调节电压高低可以得到所谓‘输入特性曲线’，这与一个二极管相当。”

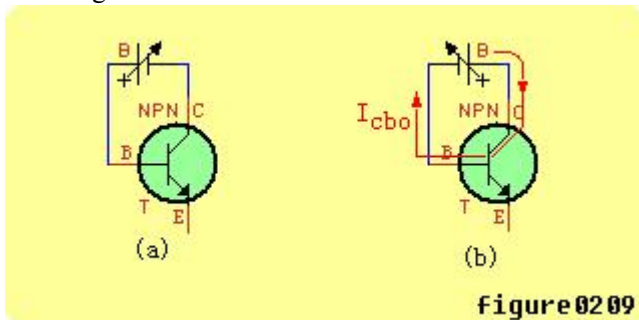
‘输入特性曲线’是否就是用这样一个电路测试的？这不一定。实际上集电极接电与否对这个曲线是有影响的。

师：“(b) 图是反向接电，这有个微弱的反向电流，叫  $I_{cbo}$ 。”

师：“最重要的是反向电压如果高过 5V，这个 BE 结就可能击穿。”

我：“击穿电压这么低啊？这个有点悬。”

师：“一般来说 BE 结反向击穿电压约在 5V 到 7V 之间，就是这么低。BE 结加电就是这样，现在说 BC 结。(figure0209)”



我：“这个 BC 结和 BE 结应该是一样的特性啊？”

师：“正向接电类似，就是个二极管。反向接电不一样。BC 结反向击穿电压就很高，能到几十伏。”

我：“怎么会这样子呢？”

师：“你开始思考了吧？这得回想我们以前讨论过的内容。有没有反向击穿电压很低的二极管？”

我：“LED 反向击电压低，能低到 5V。”

我：“还有稳压二极管吧，齐纳击穿。”

师：“发生齐纳击穿的条件是什么呢？”

我：“难道是发射区掺杂浓度很高，所以 BE 结容易击穿？”

师：“对了，组成 PN 结的半导体材料如果掺杂浓度很高，反向接电就容易形成介纳击穿。这就是一个初步的解释了嘛。”

我：“但是基区是低掺杂啊？这与齐纳二极管不一样吧？”

师：“所以我说是‘初步’解释啊。我们的知识体系并不完善，对齐纳击穿的认识并不十分深入。”

我：“你也不能肯定这倒底算什么击穿？你这样也可以啊？”

师：“当然可以。发光二极管反向击穿电压也低，又如何解释？把这些放一起就会发现反向‘击穿’这个问题很值得细致研究的。”

我：“太不靠谱了你。”

师：“我只要知道‘BE 结反向击穿电压很低’这个结论就可以指导我工作了。”

我：“那 BC 结反向接电也有漏电流了？”

师：“当然，这个电流叫  $I_{cbo}$ 。PN 结反向接电必然要有漏电流。还记得那个‘少子’吗？”

我：“B 区的‘少子’是电子，反向接电会促使 B 区‘少子’进入 C 区。”

师：“是的，这个很重要，我们后面会用到。”

我：“我搜到的资料没说这个重要啊？”

师：“我们现在来看 CE 间接电的情况。”

我：“这个肯定不能导通，隔着一片火腿肉（基区）呢。”

师：“如果仅在 CE 极间接电，理论上这就对应了那个输出特性曲线图上的‘截止区’了，基极电流  $I_B$  是 0。”

师：“CE 间相当于‘背靠背’的两个二极管，怎样接电都不能通的，但漏电流 ( $I_{ceo}$ ) 是不可避免，电压太高也会击穿。(figure0210)”

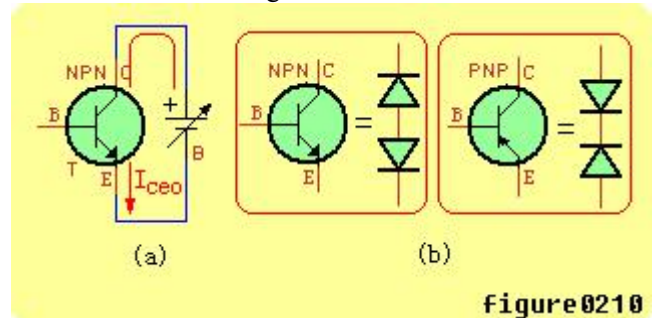


图 (figure0210-a) 中只画了一种电源连接，C 极电压高过 E 极，那么把电源反过来接 (E 极高过 C 极) 该怎样看待？

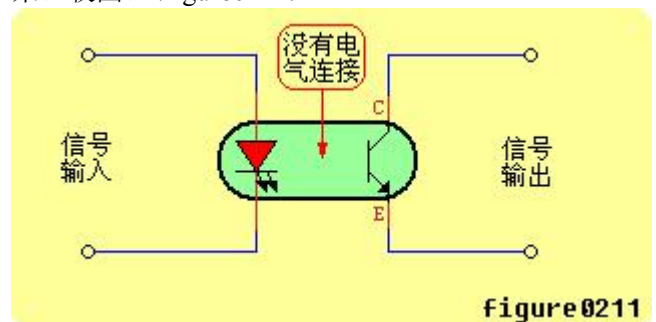
我：“这个漏电流就叫‘穿透电流’吧？我搜到过这个。”

师：“是的。输出特性曲线图 (figure0207) 上最低的那根红线就是这个  $I_{ceo}$ 。”

师：“现在我们这样想，如果这个三极管是玻璃外壳，而且掉了保护漆，这会怎么样？”

我：“有光照进去，我猜穿透电流  $I_{ceo}$  将显著增大对不对？”

师：“是的，所以我们可以做出这样一个东东来。收图。(figure0211)”



我：“用光来传输信号？有点意思。”

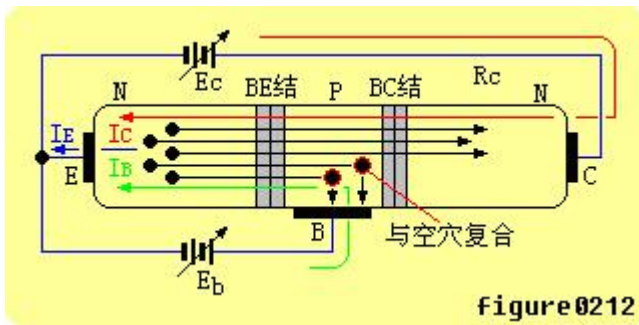
师：“这种器件叫‘光电耦合器’，简称‘光耦’，输入和输出端是‘电隔离’的。”

师：“好了，两个极之间接电就是这样了，下面给三个极同时接电。”

我：“到处都是漏电，这东西竟然能使？”

师：“这些漏电流都不大的，通常硅三极管都在 nA 级，与温度有很大关联。”

师：“三个极都接电是这个图。(figure0212)”



我：“这是我那张图啊？”

师：“有所不同，我做了点修改。”

我：“俩电源都可以调啊？”

师：“我先把  $E_c$  调到 +5V，并且固定住。然后我调  $E_b$ ，从 0V 往高调。”

我：“ $E_b$  要高过 0.7V 才可以的。”

师：“是的， $E_b$  要高过 0.7V，BE 结才导通，黑色的电子开始向基区发射。”

注意这里我们仍然忽略  $E_c$  对 BE 结的影响。

我：“这就出现了‘基极电流’  $I_B$ ，同时也出现了‘集电极电流’  $I_C$ 。”

师：“别那么急着出电流，假如  $E_c$  没接上，这些电子只能与基区的空穴复合，从 B 极回去。”

我：“接了  $E_c$  之后就有电流分配了？”

师：“别那么急着出电流嘛！接了  $E_c$  之后就不同了，当  $E_c$  比  $E_b$  高时，或者说 BC 结反向接电时，这些发射进 B 区的电子，会一门心思向着 C 区狂奔，拼了命地想冲到 C 区去。”

我：“这是为什么呢？”

师：“因为电子是 B 区的‘少子’啊。BC 结反向接电会促使 B 区的‘少子’进入 C 区。”

我：“不是吧？这些电子数量不少吧？”

师：“我的天啊！B 区是 P 型半导体，其‘多子’是空穴，‘少子’当然是电子啊？”

师：“基区的电子数量多了但地位没变啊？”

我：“怎么感觉这么乱啊？”

师：“这名字起得不太好。我们给‘多子’改个名，叫‘疯子’，‘少子’改名叫‘傻子’。”

我：“那就是 E 区的‘疯子’发射进 B 区，其地位就堕落成 B 区的‘傻子’了？”

师：“由于反向接电的 BC 结会促进 B 区的‘傻子’进入 C 区，所以这群‘傻子’开始向 C 区狂奔。”

我：“这么说我都要傻了。”

师：“这么说我都要疯了。要不你就死记硬背那些网页吧？”

我：“别，您继续调教我这个傻子吧。”

师：“电子试图冲过 B 区涌入 C 区，但实际上 B 区这条路并不好走，坑洼不平，到处都是陷阱。”

我：“这是因为基区有空穴？”

师：“当然，所以必有一部分电子掉坑里，和空穴复合，然后从 B 极出去了。”

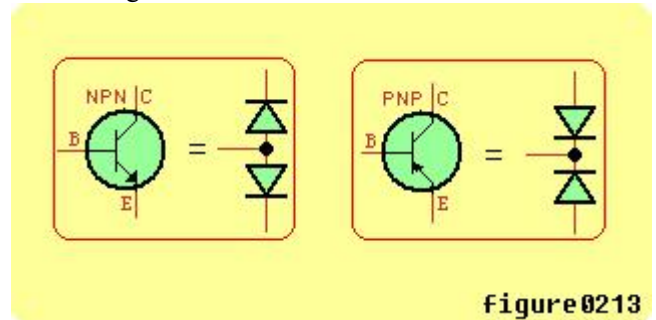
我：“我好像明白为什么 B 区低掺杂了，不能有太多空穴，对否？”

师：“对，如果所有电子都跟空穴复合了，那还

要 C 区干嘛呢？”

我：“B 区做得很薄也是这个原因吧？”

师：“没错，如果 B 区太厚，电子跑不到 C 区就被全被空穴逮住，那三极管就不再是三极管了，它成了这个。(figure0213)”



我：“你刚说三极管本就是相当于两个背靠背的二极管啊？”

师：“这个时候可不是‘相当于’了，这时候是真正的两个背靠背的二极管。”

我：“那是不是我如果找两个 1N4148 二极管这样背靠背的接起来，肯定不能当三极管用？”

师：“当然，要能这么干还要三极管干嘛？”

我：“你这讲法还真是有新意，至少我明白了基区为什么是那个样子。”

师：“正是由于基区是这个样子，所以大多数电子是可以透过基区到达集电区的。”

我：“这就有了电流分配关系， $I_E = I_B + I_C$ 。”

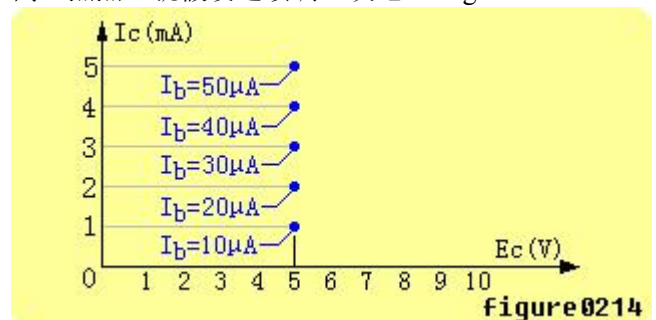
师：“这样一来‘输出特性曲线’就容易说了。”

我：“调高  $E_b$ ，会有更多的电子发射到基区，但基区的空穴总是逮捕电子的能力有限，这致使进入 C 区的电子大量增加。”

师：“这时就有那个  $\beta = I_C / I_B$  的公式了。”

我：“我现在想听你说那个‘输出特性曲线’，有啥新说法没有？”

师：“说这个曲线我首先强调一个前提，那就是我保持  $E_c$  不变。在这个前提下我去调高  $E_b$ ，每次调高一点点，就假设连续调 5 次吧。(figure0214)”



我：“ $E_b$  调高对应着  $I_B$  升高， $I_C$  随之也在升高。这个图是假设  $\beta = 100$  吗？”

师：“这图是个示意，数值都是假定的。”

师：“我现在有一个要点要提醒你：电压  $E_c$  是接在三极管的 CE 极之间，电流  $I_C$  是从 C 极流向 E 极的，所以这里有个东东要算一下。”

我：“猜到了，算个电阻值是吗？”

师：“呵呵，我这个出题人的意图，是想让你算个发热。”

我：“又考砸了，乘法啊？”



师：“对任何一种三极管来说， $I_C$ 都不是想要多大就可以有多大的，它有个极限值，叫  $I_{CM}$ 。”

我：“字母 M 一定是 Max 了。”

师：“CE 极间电压  $U_{CE}$  乘上  $I_C$  还能算出一个功率  $P_C$ ，这个功率也不是多大都可以的，也有个极限值叫做  $P_{CM}$ 。”

我：“怎么不是  $P_{EM}$ ？或者  $P_{ECM}$ ？”

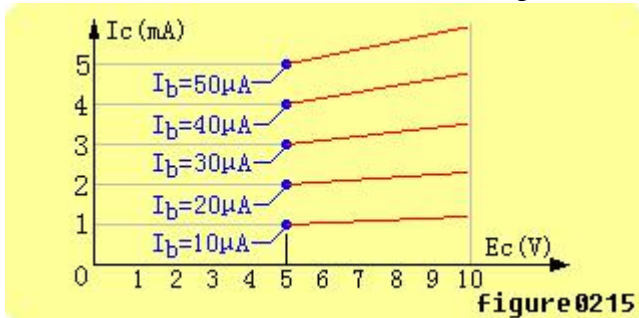
师：“这里没有发射极的事，由这个功率引发的热量主要由集电极承受，这与三极管的结构有关。”

我：“好像是因为集电区面积大吧？”

师：“我们使用三极管时，首先要保证集电极电流  $I_C$  不超  $I_{CM}$ ，同时要保证  $P_C$  不超  $P_{CM}$ 。”

我：“还挺麻烦的。”

师：“现在不动  $E_b$  了，改调  $E_c$ ，从 +5V 向 +10V 调，这样每个点都能向右拉出一条线来。(figure0215)”



我：“这线不是平的哈？”

师：“不是平的，右高左低，就是说当  $E_b$  不动 ( $I_B$  一定) 时， $I_C$  随  $E_c$  的升高有微小的上升。”

我：“微小的上升可以忽略吧？”

师：“忽略的话，那就是  $I_C$  具有‘恒流’特性，不随  $E_c$  变化，只取决于  $\beta \times I_B$ 。”

师：“这样如果我把 C 到 E 之间的这块半导体看成电阻，那它就是个会自己调节的电阻， $E_c$  高了它阻值就变大， $E_c$  低了它就变小，保持‘恒流’嘛。”

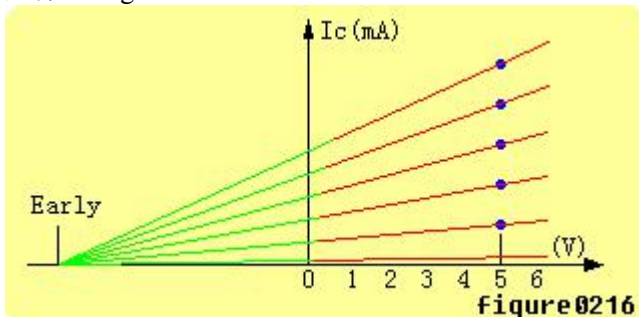
我：“哇塞，电阻真的出现了耶！”

师：“其实它不是个电阻，但你可以用一个‘会自己调节的电阻’来类比它。”

我：“这就是‘貌似’电阻？”

师：“而且，你看到‘恒流’二字，还应该意识到这里恐怕有个‘高内阻’。”

师：“当然  $E_c$  也可以往低调了，红色线可以向左延伸。(figure0216)”



我：“有新意！这组绿线没见识过。难道  $E_c$  可以是负的？”

师：“怎么能是负的？ $E_c$  最低调到 0，不能再低

了。所以我画成绿色线，这只是为体现出 X 轴上那个交点来。”

注意绿色线与 X 轴是“近似的”相交于一点，实际不会严格地交在一个点上。

师：“这个交点反应了晶体三极管的一个特性，叫‘厄利效应’。”

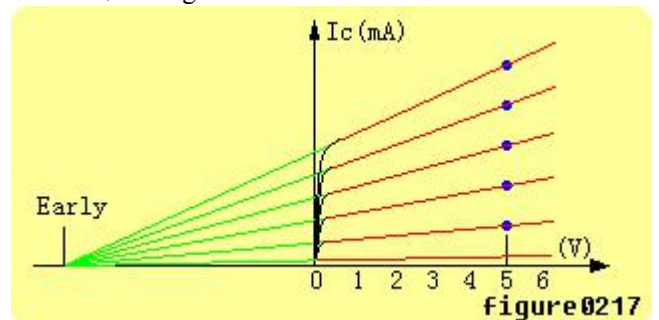
我：“这个我还真没搜到过，你的确与众不同啊。”

师：“这个‘厄利效应’我们以后碰不到，大家也很少说这个。我是顺便给你说一下。”

我：“碰不到就放心了，又少一考点。”

师：“最后考察  $E_c$  特别低的时候会怎么样。至少  $E_c$  为 0V 时  $I_C$  肯定也是 0，电源都没电了嘛。”

师：“而  $E_c$  特别小时，三极管的  $\beta$  值就会急剧降低， $I_C$  也就迅速跌落。这就对应输出特性曲线上的‘饱和区’了。(figure0217)”



我：“这个  $\beta$  会变啊？”

师：“对啊，‘ $\beta = I_C / I_B$ ’，你看 (figure0217) 黑色曲线， $I_B$  没有变，但  $I_C$  是向着 0 点急转直下的。”

我：“这要会变的话可怎么运用啊？”

师：“它也不是总变啊？集电极电压  $E_c$  不是非常低的时候它基本上是不变的。”

我：“就是说在‘放大区’的时候它的  $\beta$  近似不变？”

师：“可以这么认为。”

我：“如果  $E_c$  比  $E_b$  都低，那 BC 结岂不是正向接电了？”

师：“是啊， $E_c$  比  $E_b$  低的话，B 区的电子没有动力进入 C 区，C 区的电子却有动力进入 B 区。”

我：“ $E_c$  等于  $E_b$  的时候算怎么回事呢？”

师：“行，你小子思路很细密。 $E_c$  等于  $E_b$  的时候叫‘临界’饱和。”

我：“截止、放大、饱和这三个区各有什么作用呢？”

师：“在计算机电路中，我们主要运用‘截止’和‘饱和’两个区，我下回给你讲。”

我：“我正在兴头上，你却要走啦？”

师：“其实三极管运用在放大区才是最有意思的，也是最麻烦的。”

我：“功率放大器之类的应该是让三极管运用在放大区了吧？”

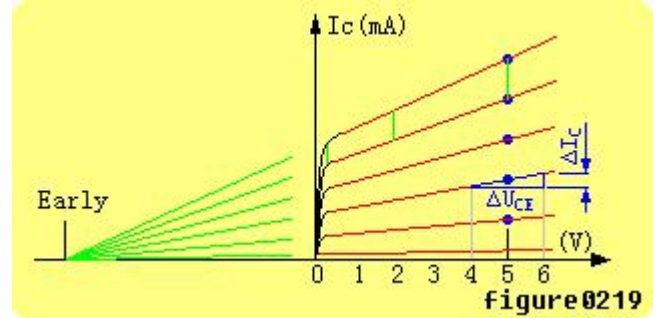
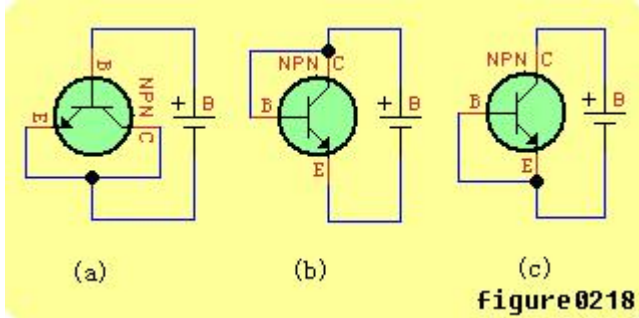
师：“是的。不能再继续了，再讲下去我真要疯了，再见啦。”

我：“我倒是不那么傻了，哈哈。”

我觉得今天的讨论漏掉了一点内容，仍然是三极管集电极电压的取值。以 NPN 管为例，它的集电极电压

可以高过基极电压使集电结反向接电，这是“放大”；也可以等于基极电压，为“临界饱和”；还可以低于基极电压，为“饱和”；那么它要等于发射极电压会怎么样呢？或者说如果我把 NPN 管按图（figure0218）中所示来接电，这会怎么样？

对于图（figure0218-a），我感觉这就是两个二极管并联。那么图（figure0218-b）呢？似乎这是我们刚说到的“临界饱和”，因为很显然集电极电压等于基极电压啊。那你说它为什么不能看做是一个二极管呢？一个仅由 BE 结形成的二极管，而 BC 结那个二极管被短路了嘛。我的问题是如果我断开集电极，只把电源接到基极和发射极上，这也是个二极管，但这样做与图（figure0218-b）是完全等同呢还是有所区别呢？至于图（figure0218-c），从三极管的角度看基极电压等于发射极电压，BE 结不导通，从而令三极管“截止”。但是一样的，它也可以看做是一个二极管啊？由 BC 结形成的，现在它是反向接电，处在不导通的状态嘛。



而且，我还是想不太明白三极管 CE 之间的那个“电阻”是如何受 B 极电流控制的，我也尝试了在“输出特性曲线”图上画一个“三角形”，如图（figure0219），但是从这样一个三角形上我只能看到  $\Delta U_{CE}$  和  $\Delta I_C$  之间可计算出一个“动态电阻”，这跟  $I_B$  有何关系？

对于三极管的  $\beta$ ，我也有一些疑惑，它为什么是变的呢？起码我知道真正的电阻是不会变的，一段电阻丝，材料 ( $\rho$ ) 定了，长度 ( $l$ ) 定了，横截面积 ( $s$ ) 定了，用它制成电阻，其阻值不也就定了吗？就是公式 “ $R = \rho \times l / s$ ” 啊？我想三极管也是这样子吧，材料定了，EBC 三个区的尺寸也定了，它的  $\beta$  值也就应该定了吧？这是否也有一个计算公式能够根据材料特性和结构尺寸直接算出一个三极管的  $\beta$  值呢？

我还搜到了有关三极管的  $\beta$  值的另一个定义： $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$ 。显然出现了 “ $\Delta$ ” 之后又要扯到“交流小信号”上去了，这时的  $\beta$  被称为“交流电流放大倍数”。而 “ $I_C / I_B$ ” 则称为“直流电流放大倍数”，还特别在  $\beta$  上加一短横加以区别 ( $\beta = I_C / I_B$ )。这个“交流电流放大倍数”也可以在输出特性曲线图（figure0219）上画出来，就是那三根竖直的绿色线。我们知道两根特性曲线所代表的  $I_B$  是确定的，所以位于同样两根特性曲线间的这些绿线对应的  $\Delta I_B$  都一样，而绿线的长度对应着左侧纵轴上的  $\Delta I_C$ ，这还真的是不一样长，这样看来  $\beta$  值确实是变化的，而且是随  $U_{CE}$  的不同而变化。

这似乎，太麻烦了吧？这三极管恐怕是个闹心的东东，C# 说我们只用到“饱和”和“截止”，这是否能让三极管用起来容易一些呢？

## 2005-07-19：三极管开关电路（一）

我在 GOOGLE 上搜了下“三极管 电路”这两个关键词，三极管通常有两个用途，一是“放大”，就是把弱信号变成强信号，这分成“共发射极”放大电路、“共基极”和“共集电极”的三种。关于那些什么“工作点”啊“图解法”啊和一堆计算公式我是没啥心情细看了。

三极管的第二种用途就是“开关”，电路的形式似乎与“共发射极”放大电路类似，不过三极管工作在“截止”和“饱和”两种状态下，这是 C# 准备讨论的内容。我想计算机所用的三极管电路大概都是这种“开关”电路，难怪 C# 这家伙总拿什么“开关加上拉电阻”说事儿。

我：“老大，你说一个三极管制造出来之后，它的 $\beta$ 值是不是就确定了？”

师：“我刚说过 $\beta$ 值是变的。”

我：“我是通过制造线绕电阻来想的，电阻丝的材料长度横截面积决定电阻值，它一造出来电阻值就是确定的。”

师：“谁说电阻器的阻值是确定的？”

我：“您可别又颠覆我的世界观啊！”

师：“电阻有‘温度系数’，温度不同它的阻值要变的。”

我：“我又没把事情想完全！没法学了！”

师：“但变化之中蕴含着不变：‘ $R=U/I$ ’总是不变的。”

我：“这么一说我就有点明白了， $\beta$ 也受一些‘系数’的影响而改变，但 $\beta=I_C/I_B$ 是不变的。”

师：“当我们说一个三极管的 $\beta$ 是 100 时，通常是说它在‘放大区’工作时， $\beta$ 近似保持是常数不变。也就是说这有限定条件。”

我：“好像也不能这么说吧？”

实际上三极管资料上给出的 $\beta$ 是在特定条件下测试出来的，说它在放大区时近似不变，有助于简化问题。

师：“影响晶体三极管参数的因素有很多，为了消除这些乱糟糟的不利因素，我们可以采取一些措施，比如让它工作在‘饱和’和‘截止’两种状态。”

我：“这样我就不必关心那么多事了？”

师：“是的。不过让三极管只工作在这两种状态下，它能完成的任务有限。但刚好适合计算机领域。”

我：“那如何让它‘饱和’和‘截止’呢？”

师：“三极管的基极是输入信号用的，因为从‘电压控制电阻’这个角度看三极管，这个基极就是那个‘控制端’。”

以后我们会了解到，信号不一定只从基极输入。

我：“这个电压控制电阻的事还得再说说？还是有点不明白。”

师：“你不是有自己的想法吗？”

我：“我那想法行吗？再加上你那个什么‘恒流’就够了吗？”

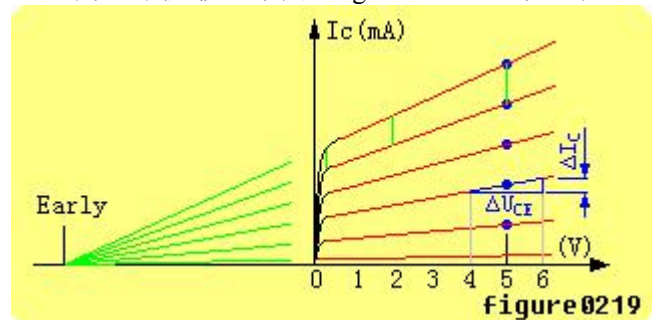
师：“等我想想怎么说这个事。”

师：“以前我们曾经把 PN 结这东西当成一个电阻来看，还记得吧？”

我：“是‘动态电阻’吧？”

师：“你终于想起来了。这个‘ $V$ ’除以这个‘ $I$ ’能得出直流电阻，‘ $\Delta V$ ’除以‘ $\Delta I$ ’能得出动态电阻。”

我：“我是按这个图（figure0219）想了一下。”



师：“你这样想是可以的，但这能说明的问题有限。”

我：“这说明了三极管的 CE 极之间呈现一个很高的动态电阻， $\Delta U_{CE}/\Delta I_C$ 是比较大的。”

师：“你这说法不全面，你至少要限定在特性曲线的这一段上才呈现高阻。”

我：“对了， $U_{CE}$ 很低的时候曲线就变了。”

师：“所以应该说三极管工作在‘放大区’时 CE 极之间呈现一个高阻。”

我：“还有‘截止区’呢，也是高阻吧？”

师：“截止时 CE 间都相当于‘断路’了，当然也是高阻。但‘饱和区’CE 间是低阻。”

师：“对三极管来说，利用‘ $\beta=I_C/I_B$ ’这个公式就可以解决很多问题了，但有时我们会从另一种视角审视三极管： $I_B$ 与 BE 结上的电压  $U_{BE}$  有关。”

我：“ $U_{BE}$ 的微小变化使  $I_B$  产生小变化，而间接使  $I_C$  产生一个大变化？”

师：“对，所以有时我们会考虑  $I_C$  与  $U_{BE}$  之间的关系。”

我：“ $U_{BE}$  是电压， $I_C$  是电流，来个除法就可以算出‘阻’对吗？”

师：“也可以是‘导’，‘阻’的倒数。”

我：“我以为三极管是‘电流控制电阻’的，这样看也不妨修改成 BE 结上的‘电压’控制 CE 间的‘电阻’。”

师：“这也可以吧。我们接着给三极管通电。”

我：“你这些说法是不是从国外的教材中来的？”

师：“《The Art of Electronics》是一本比较适合你的教材，它提了一个个‘晶体管人’的说法，满形象的。”

我：“连电子学都可以很 Art 啊？”



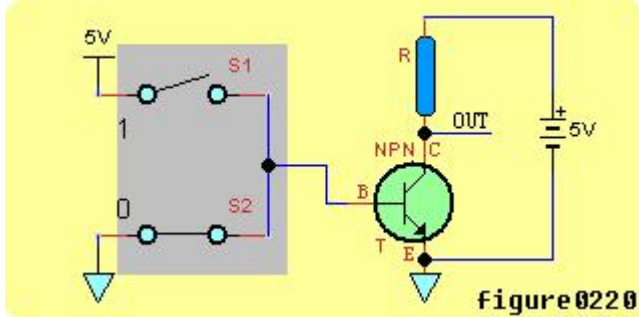
师：“在这些专家眼里科学和艺术经常是一体的，达芬奇还设计过飞机呢。”

我：“我只知道他画过鸡蛋。”

师：“在计算机相关的电路中我们用不到这么麻烦的说法，我们只用到‘饱和’和‘截止’。”

我：“难道对应了 0 和 1 吗？”

师：“你收个图 (figure0220)。我用俩开关产生‘高电平’和‘低电平’信号，把这个信号接在一个三极管的基极上。我们考虑一下俩开关输出低电平 0 的情况。”



我：“下面的开关 S2 把三极管的基极接到 GND 了。”

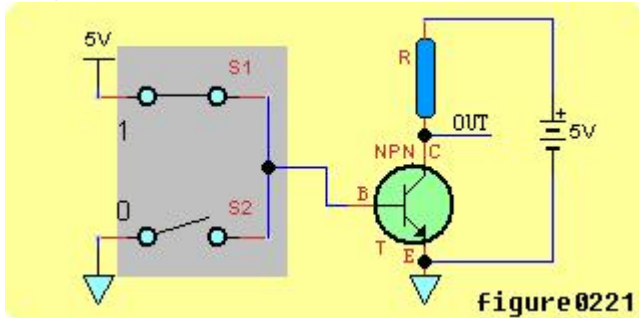
师：“对啊，现在 NPN 三极管的发射级也接 GND，那么基极电流  $I_B$  是多少？”

我：“ $I_B$  是 0 啊。基极不比发射级电位高。”

师：“所以无论如何三极管 C 极到 E 极都不应该通的，这就是所谓‘截止’。OUT 端输出是什么？”

我：“OUT 端被电阻 R 上拉到电池的 +5V 上了，这算输出 1。”

师：“现在我们考虑那俩开关输出高电平 1。(figure0221)”



我：“不对吧，三极管 BE 结直接导通，把左边的 5V 和 GND 短路了。”

师：“看出问题了。你有何办法解决？”

我：“基极接上一个限流电阻吧？”

师：“没错。上面的开关把晶体管基极接到了 +5V 上，而它发射极接地，BE 结的压降只有 0.7V，多出来的 4.3V 就必须用一个电阻扛住。(figure0222)”

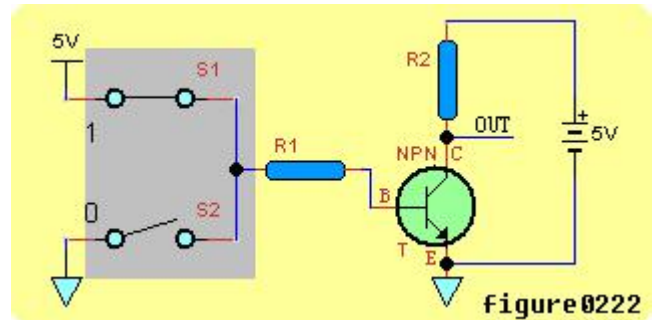
我：“这和以前讨论二极管时一样。”

我：“如果计算这个电阻的取值，需要知道  $I_B$  才行。”

师：“那你说说 R1 计算公式是什么？”

我：“简单， $R1 = 4.3V / I_B$ 。”

师：“没问题。我现在取  $R1 = 1K$ ，你算下  $I_B$  是多大？”



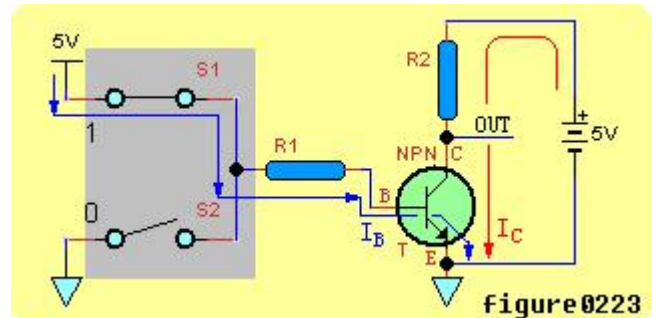
注意加上电阻 R1 之后我们应该重新考虑 S1 断开 S2 接通的情况，此时三极管 T 的基极经 R1 接 GND，当 R1 上有电流时会导致三极管基极电位升高。

我：“又转小儿科了，是 4.3mA。”

师：“现在 R2 也是 1K，我想计算 OUT 端的电压是多高？”

我：“那要知道三极管集电极电流  $I_C$ ，这个电流流过 R2，在 R2 上产生电压降落。”

师：“很好，这个图 (figure0223) 反映了电流流动情况。”



师：“我们假设三极管  $\beta$  是 10，你能算吗？”

我：“ $I_C = \beta \times I_B = 43mA$ ， $U_{R2} = I_C \times 1000 = 43V$ ， $U_{OUT} = 5 - 43 = -38V$ 。”

师：“你觉得这结果对吗？”

我：“好像不应该有负电压吧？”

师：“俩电源都是 0V 到 +5V，哪来负电压？还 38V 的？”

我：“可我用的计算公式都是对的。”

师：“那么你再想一下，当  $I_C$  出现之后，三极管的 CE 极之间的电压会有何变化呢？”

$I_C$  是从 5V 电源的正极流出，自上而下流过电阻 R2，然后穿过三极管 T 的 CE 极，入 GND。它在电阻 R2 上产生电压降，随着电流增大，三极管 C 极的电压是逐步降低的。

我：“ $U_{CE}$  会减小是吗？”

师：“是的， $U_{CE} = 5V - I_C \times R2$ ，当  $I_C$  是 5mA 时  $U_{CE}$  就已经是 0 了。”

我：“随着  $I_C$  增大，三极管最后饱和了？”

师：“确切地说，三极管‘被’饱和了。”

我：“被电阻 R2 逼的饱和了？”

师：“要没有 R2，三极管是不会饱和的。”

此时没有考虑电源的内阻。很多人总想着三极管饱和是因为基极电流太大了，一定要注意是集电极到发射极之间的电压太低了导致三极管饱和。

我：“所以根本就不会出现 43mA 的  $I_C$ ，因为三极管饱和后  $\beta$  是减小的？”

师：“假设  $\beta$  不变的前提下， $I_B$  最多只要 0.5mA 就可以让三极管饱和。”

我：“考虑  $\beta$  会变小的情况， $I_B$  还是要大一些好？”

师：“那也用不了很大，因为真正的三极管  $\beta$  不会只有 10 的。”

我：“几十到一百多？”

师：“现在的晶体三极管很容易做出 100 以上的  $\beta$  值来，早期的三极管没这么好。”

$\beta$  是否容易做大还是和三极管的结构及制造工艺相关的。即使是现在也不能认为所有类型的三极管都很容易把  $\beta$  做大。

我：“那我可以把  $R_1$  增加到 10K？”

师：“还可以更大一些，不过我们以后在电路中用的多是 5.1K/10K 的。”

我：“它大点小点有何区别？”

师：“在确实能保证三极管饱和的前提下， $R_1$  越大越省电啊。”

我：“ $R_2$  的取值也是越大越好了？”

师：“仅从‘省电’的角度来说，是这样的。”

我：“ $R_2$  取值增加大还容易让三极管饱和吧？”

师：“这个  $R_2$  我们以后在电路中用的多是 5.1K 或者 10K 的。你不用费心考虑这个。”

我：“拍拍脑袋就定了，连计算都不用？”

师：“当三极管只需工作在‘截止’和‘饱和’两种状态时，就是这样，简单吧？”

我：“也不简单。我感觉如果把三极管看成一个单刀单掷的开关， $R_2$  是它搭配的上拉电阻。”

师：“这怎么不简单呢？我们以前都折腾过无数次了。”

我：“我想起了 OUT 端对地有电容会怎么样？”

师：“很高兴你能想起来这个。还有没有想起来其它什么？”

我：“晶体三极管工作在‘开关’状态，它截止相当于开关断开，它饱和相当于开关接通。”

师：“非常好。这就是一个工作在‘开关’状态的三极管。在计算机电路中应用三极管，基本上是让它在‘开关’状态的。”

我：“我说你怎么老拿开关加电阻说事呢，原来是为了这个。”

师：“我们现在逐步深入下去。首先这个三极管开关是‘电控’的，可以用‘高低电平’来控制它的通和断。”

我：“继电器也是电控的开关啊？”

师：“没错，继电器和开关状态的三极管是一回事，这就意味着如果用三极管能制造计算机，用继电器也一定能造。”

我：“继电器的刀和掷可以做的很多啊？还有什么常开常闭的。”

师：“是啊，继电器上的开关比三极管复杂，但继电器速度很慢，三极管的速度可是极快的。”

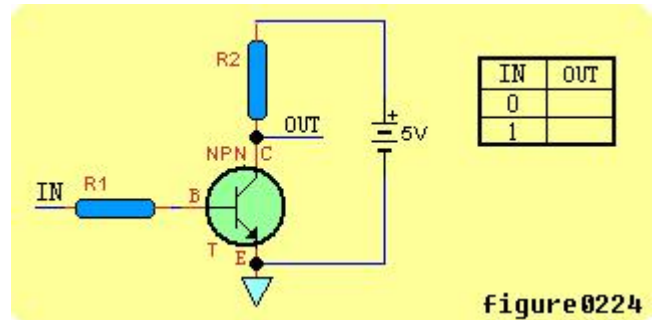
师：“至于做出更复杂的开关，我大不了多用一

些三极管就可以了。”

我：“就是集成电路吧？成千上万的三极管做在一起。”

师：“所以我们不怕一个三极管开关很简单。”

师：“再看这个图（figure0224），深入一步，你来填那个表格。”



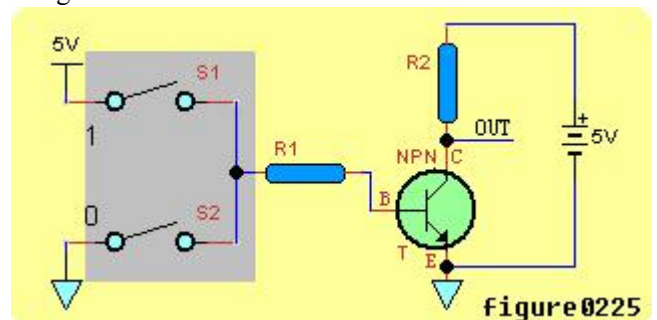
对图上这个 NPN 三极管来说，如果它的基极输入了高电平，也就是 1，那么三极管将进入饱和，这时它集电极输出一个低电平，也就是 0 了。而它的基极输入了 0 的话，三极管是截止的，它的集电极被  $R_c$  拉成高电平，也就是输出 1 了。

我：“这个电路实现了‘非’逻辑啊？”

师：“对了，这是二极管做不到的。二极管只能实现‘与’和‘或’，用三极管可以做出‘反向器’。”

我：“这样的话就差一个‘异或’了，‘与或非’电路我们都齐了。”

师：“异或要麻烦一些，以后讨论到集成电路时再谈。现在看一下这个三极管开关电路的小缺陷。（figure0225）”



我：“S1 和 S2 都断开？这时信号源输出是高阻态，我认为三极管应该截止的。”

师：“是的，但是它是否‘可靠’的截止就很难说了。”

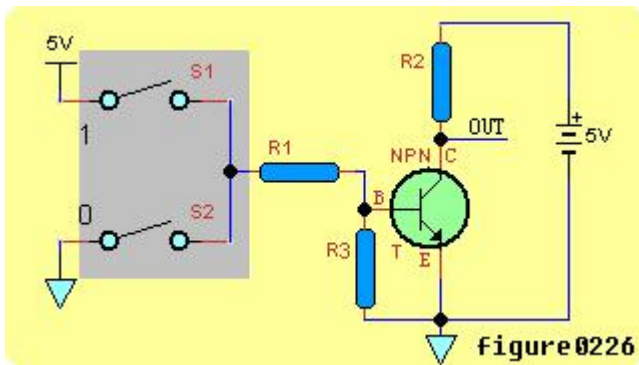
我：“它基极没电啊。”

师：“我们只能确定当基极电位低于或等于发射极电位时三极管是一定截止的。”

我：“基极这么悬着的话会比发射极电位高吗？”

师：“现实世界中干扰实在太多了，空中充满了无线电波，还有静电，还有来自外太空的辐射。”

师：“这导致我说不清楚基极电位究竟会是怎样的。所以我要避开这个说不清楚的事，所以电路就改成了这样。（figure0226）”



我：“你加的这个电阻 R3 算是一个‘下拉’电阻吗？”

师：“当然是了，如果前级信号源输出是‘高阻’态，那么这个 R3 确保了三极管基极与射极电位一致。”

我：“不是吧？这电阻上如果没有电流，才能认为基极与射极电位一致。如果电阻上有自上而下的电流呢？”

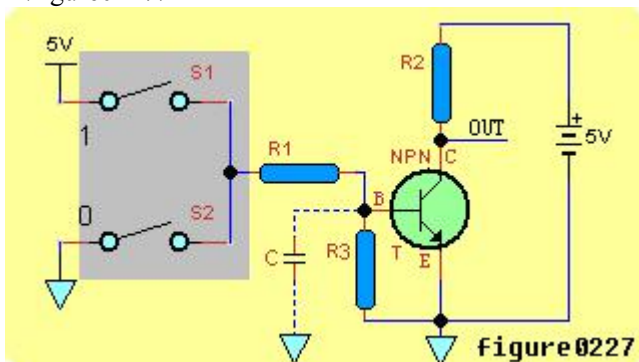
师：“这个电流从何而来？”

我：“从集电极到基级应该有个漏电流  $I_{cbo}$  啊？这个漏电流会从这个电阻上过吧？”

师：“那可是 nA 级的电流啊？”

我：“那就当这电流没有吧。”

师：“我们来换个角度说这个电阻。收个图。（figure0227）”



我：“电容 C 从何而来？是 PCB 上分布的吗？”

师：“可以看作分布电容，实际上三极管的 BE 结也存在一个结电容的。”

我：“这个分布电容和结电容并联起来会容量很大么？”

师：“当基极输入 1 时这些电容会充上电，基极悬空后接到 GND 的这个电阻可让这些电容放电。”

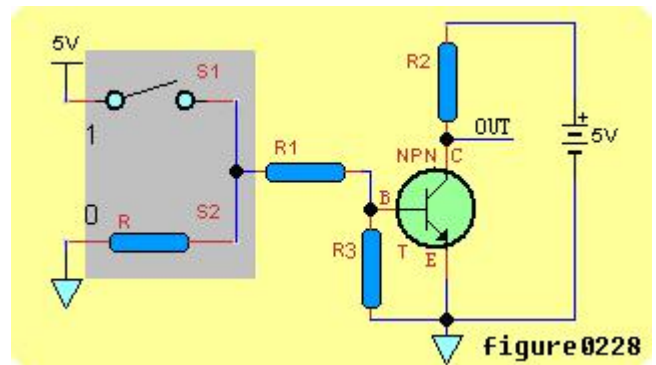
我：“这个说法太牵强了，我不觉得这些电容会有很大容量啊？”

我：“而且 BE 结是正向接电导通啊？可以通过 BE 结放电吧？”

师：“I 服了 U！你可真行！！等我再给你找个说法！！！”

我：“别急嘛，慢慢想，我等着。”

师：“你收这个图看看吧。（figure0228）”



我：“这个图里信号源输出 0 时是靠下拉电阻的。”

师：“如果这个下拉电阻 R 是个‘弱下拉’呢？阻值很大？”

我：“三极管不能截止吗？”

师：“按你刚才的说法，三极管从 C 极到 B 极有个反向漏电流  $I_{cbo}$  对不？在没有 R3 时这个漏电流是不是要经 R1 和这个弱下拉电阻 R 入 GND。”

我：“那不是 nA 级的电流么？”

师：“天啊，这让我怎么说呢这事？”

我：“不用多说了，你的意思是这个接 GND 的 R3 把前级电路的弱下拉变成强的了？”

师：“姑且不说 C 到 B 的漏电流究竟有没有很大影响，我能搞成强下拉总比弱下拉要靠得住吧？”

“强下拉”要好于“弱下拉”，这个说法是很粗糙的。“弱下拉”也不是就一定不能满足“实际需要”啊。

我：“好吧，这个说法比较凑合。你都要急了？”

师：“都是让你给折磨的。最后再给你一个终极的说法。”

我：“还有说法呢？深呼吸一下老大。”

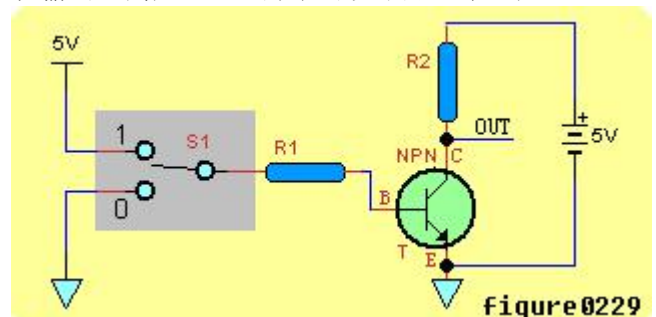
师：“算了，不再说了。总而言之一句话，有这个 R3，有利于三极管可靠的截止。”

我：“好吧，以后我记得加上这个电阻。”

师：“也不是所有的情况下都加这个电阻。”

我：“现在开始轮到您折磨我是了吗？到底加不加电阻啊？”

师：“看图（figure0229），如果信号源根本不会出现输出‘高阻’态，那就可以不加这个电阻。”



我：“也对啊，它也不是必须要有输出高阻态啊。”

师：“具体问题要具体分析，不能把这些当成条条框框来死记。”

我：“现在我有一个问题，加上这个 R3 假设和 R1 一样阻值一样，那 S1 接通后三极管 B 极就只有 2.5V 了，这行么？”

师：“你能不能问点像样的问题？B 极怎么会是 2.5V 呢？”



我：“难道我又绕进去了？”

师：“你自己把这事想清楚好吧？我不再多说了，

下回我们说新的内容。”

我：“别啊老大！全靠我自己啦？”

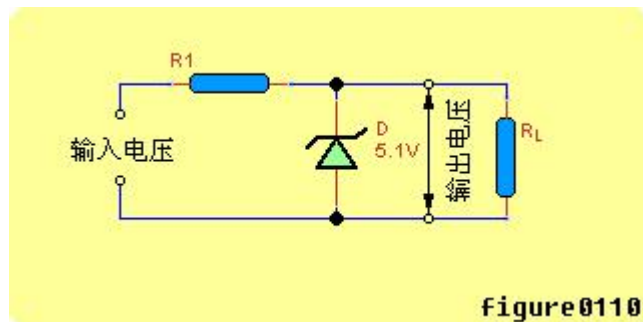
这次送走 C# 的心情多少有点沮丧，怎么会糊涂了呢？R1 和 R3 串联分压，R3 上不是 2.5V 电压吗？突然间，我意识到我犯了一个十分低级的错误。+5V 被两个电阻 R1 和 R3 分压，让三极管基极有+2.5V 的电压，这完全没有任何问题的。但是 BE 结导通只需要+0.7V 电压，这 2.5V 是否足够让 BE 结正向导通呢？显然是足够的。事实上三极管一旦导通，它的基极只会有 0.7V 电压，或者说这个时候电阻 R3 已经被 BE 结短路了，根本没起分压的作用。这让我感到十分的懊恼，怎么不多想想再提问呢？

不过仔细考虑了一下，我觉得我这个问题还是有一些意义的。显然 R3 不能随意取值，它不可以很小的，如果它的阻值过小，分到的电压太低恐怕就不会让三极管导通了。

其实在讨论“稳压二极管”的时候说过这个事，图（figure0110）用稳压管做一个电源，它的负载电阻  $R_L$  不能太小的，如果  $R_L$  太小，那这个电源究竟是由 R1 和 D 组成稳压电源给  $R_L$  供电呢？还是 R1 与  $R_L$  串联分压后给 D 供电呢？ $R_L$  太小的话它分走了过多的电流，这使得流过 D 的电流太少了，这时 D 的“动态电阻”会变大的，这导致了由 R1 和 D 组成的这个电源因内阻太大，它供不出所需的电压来。

现在看来我觉得这个  $R_L$  虽然叫“负载电阻”，但它不是干等着稳压管来给它供电的，相反它与限流电阻组成的分压器对稳压管 D 是有牵制的。那么这个两电阻串联加三极管 BE 结呢？其实也是这么回事。如果 R3 的值较大，那么三极管基极电压当然取决于 BE 结了，而如果 R3 太小，它也会牵制 BE 结让它无法正常导通。或者换个角度理解，R1 与 BE 结组成一个 0.7V 的稳压电源，R3 是这个电源的负载，如果 R3 太小，相当于这个电源的负载太重，这个电源也就无法输出 0.7V 了。由此看来我不妨给这个 R3 的取值定个原则：它应该“大于等于”R1。但也不能无限的大，这要大到 100M 不跟没加一样吗？要不就说成“大于等于 R1 且小于 10 倍的 R1 吧。”

整理了一下思路，我给 C# 写了个 MAIL，把我的想法详细地写了下来，然后怀着赧赧的心情爬上床去。



## 2005-07-20：三极管开关电路（二）

前次的讨论，应该算是把三极管与电阻相结合，组成了“开关”电路，实现了一个“非”逻辑。而二极管与电阻结合，可以实现“与”和“或”逻辑。那么如果考虑把三极管与二极管相结合的话，我所能想到的就只有把“与”和“非”相结合，或者把“或”和“非”相结合了。我想可以先从“与”加“非”开始。

我自己画了个电路图（figure0230），就是把两个二极管的“与”和一个三极管的“非”简单的用一根线连在一起，当然，它们共用一个 5V 电源。图虽不复杂，但是在这个图中，我觉得有两个问题值得思考。第一，如果两个二极管都输入 1，这时两个二极管都不导通，它们的阳极靠上拉电阻  $R_u$  拉高到 1，这个上拉是强是弱是值得注意的。除此外  $R_1$  的存在显得有点尴尬，有  $R_u$  了难道还需要  $R_1$  吗？

第二，如果某个二极管输入了 0，即使是这个二极管的阴极确实是接到了 GND 上，它的阳极仍然有 0.7V 的电压，当然这个 0.7V 电压被  $R_1$  和  $R_3$  分了一下，真正接在三极管基极的电压应该是小于 0.7V 的，截止没问题。问题是输入到二极管阴极的这个 0 如果不是 0V 呢？如果这个 0 已经是 0.7V 了呢？那么二极管阳极电压可就 1.4V 了，这时候三极管能不能截止呢？

师：“我看了你的 MAIL，很不错啊。”

我：“我那些想法靠谱么？”

师：“重要的是这是你自己的想法，是否靠谱以后自有分晓。”

我：“我总算是绕过来一点点了，呵呵。”

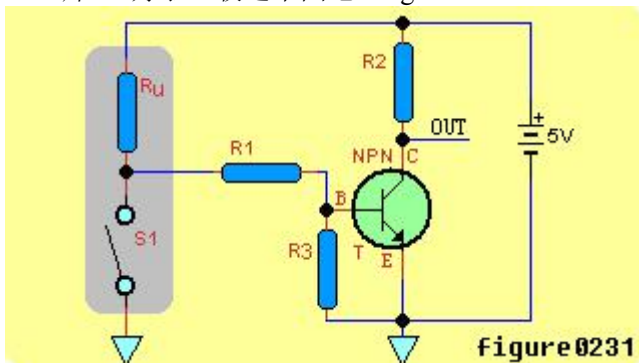
师：“其实一时懵了都是难免的，我有时也会绕到里头出不来。”

我：“那你还甩手就走？我都没睡好觉。”

师：“我很抱歉，呵呵。”

我：“这次就算了，下不为例哦。哈哈。”

师：“好啦，收这个图吧（figure0231）。”



我：“我正琢磨这个图呢。（figure0230）”

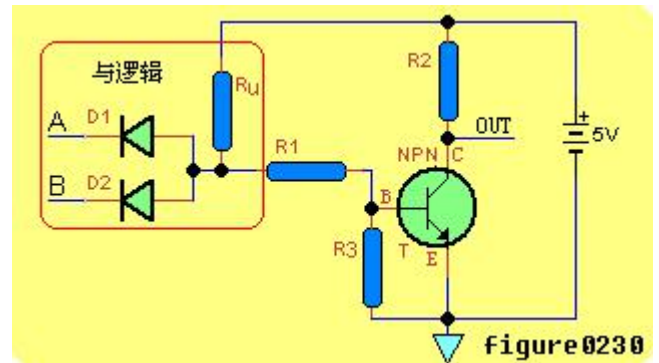
师：“你自己研究了什么呢？说说吧。”

我：“我想把三极管和电阻结合之后，就该和二极管结合了。所以我把二极管的‘与’和三极管的‘非’连在了一起。”

师：“你超前了。我们先从这个图（figure0231）开始。”

我：“我第一个疑问就是三极管基极上的电阻  $R_1$  有必要吗？”

师：“你觉得信号源的上拉电阻  $R_u$  和  $R_1$  有重复的嫌疑？”



我：“是啊，开关断开的时候  $R_u$  可以控制三极管基极注入的电流。没必要有  $R_1$ 。”

师：“这个  $R_u$  如果是由你给取的阻值，那你当然会找一个合适的值，以便于去掉  $R_1$ ，让三极管的基极直接接到信号源的输出端。”

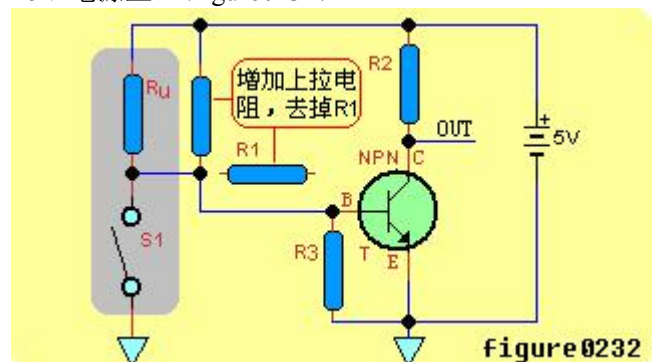
我：“这个  $R_u$  不一定由我说了算吧？搞不清它是强是弱。”

师：“不会搞不清的。问题是当你搞清楚它是个很弱的上拉电阻时你怎么办呢？”

我：“如果这个上拉很弱，那即使  $R_1$  取消了也不能保证有足够的电流注入三极管的基极。”

师：“是啊，你怎么搞才能让三极管饱和呢？”

我：“在三极管的基极上再接一个电阻，上拉到 +5V 电源上。（figure0232）”



师：“非常好！外接一个上拉电阻和信号源内部的上拉电阻并联，把弱上拉变成强上拉。”

师：“还有其它想法吗？”

我：“还要其它的想法啊？我再想想。”

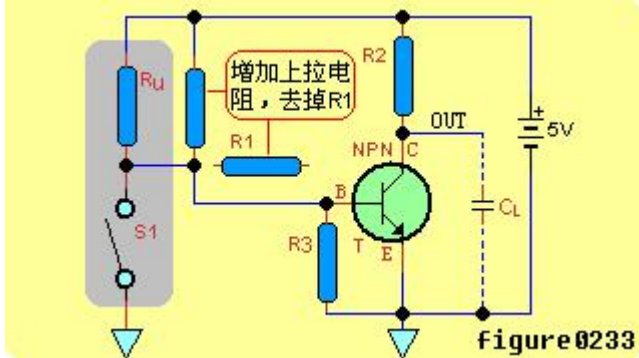
三极管的饱和实质是集电极电流  $I_C$  在集电极电阻  $R_2$  上产生电压降，从而压低了  $U_{CE}$  而令三极管饱和的。现在是基极电流  $I_B$  过小，导致了  $I_C$  也小，那要怎样在  $R_2$  上获得一个大的电压降以便压低  $U_{CE}$  呢？

我：“是不是可以加大  $R_2$  的值？”

师：“这是个办法。我认为也可以挑选出  $\beta$  值很大的三极管来用。”

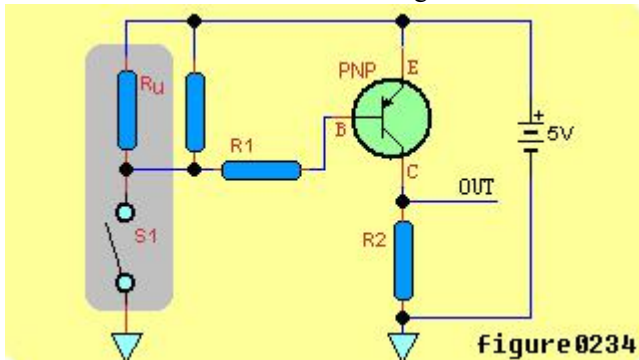
我：“又要买 100 个三极管逐个挑啊？太费劲了吧？”

师：“你加大  $R_2$  解决了一个问题，又引发了一个新问题啊？看图（figure0233），你上回可提过这个电容的。”



我：“容性负载是个问题。加大  $R_2$  相当于又在三极管的 C 极搞成弱上拉输出了。”

师：“所以我这样来解决。（figure0234）”



我：“PNP 管？这个我们一直都没提过。”

师：“PNP 和 NPN 大同小异，你只要理解成 PNP 管发射区向基区发射‘空穴’而不是电子，集电区收集的也是‘空穴’就可以了。”

我：“我不觉得简单，我觉得这个 P 型半导体有点费解。‘空穴’和‘电子’并不是一回事。”

师：“不是一回事又怎样？很多时候你把‘空穴’当成‘电子’那样来看待，至少在现阶段是不会影响你理解半导体器件的原理的。”

我：“就是‘不求甚解’了？可我想求甚解怎么办？”

师：“那恐怕要深入研究一些基础物理学了，比如什么‘量子物理学’之类的。”

我：“我认为可以把‘空穴’当成‘电子’来看，这就容易理解 PNP 管的原理了。嘿嘿。”

师：“你小子变得比悟空都快。”

我：“量子物理啊老大？咱知难而退吧。”

师：“其实我也不懂什么量子物理，给你说半天三极管也就是照本宣科。”

我：“是‘貌似’照本宣科，我觉得和我搜到的内容相比还是有所不同的。”

师：“好了。PNP 管的掺杂结构和 NPN 不同，接电的方式也不一样。”

我：“就是电源正负颠倒一下吧？发射极接+5V，集电极经电阻接 GND。”

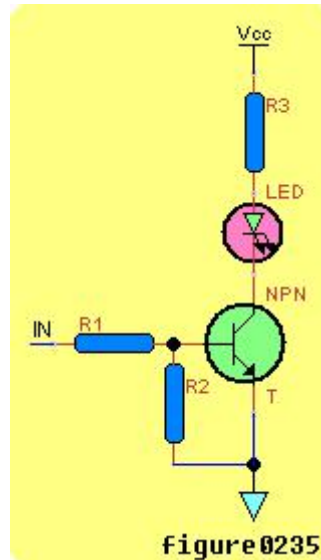
师：“或者说发射极接 GND，集电极经电阻接-5V 电源。”

我：“你这是把参考点挪电源正极去了。”

师：“它的基极电压比发射级高-0.7V 时会有基极电流。”

我：“怎么这么别扭啊？‘负增长’吗？”

师：“你得习惯一下这种说法，正负号表示一个方向。现在我们看三极管和二极相结合的事。收个图。（figure0235）”



我：“是结合发光二极管啊？啥时候才轮到‘与’加‘非’呢？”

师：“难道这个图（figure0235）你已经瞬间弄清楚了？”

我：“我认为 IN 端如果是‘高电平’，就有电流注入基极，也就有电流经电阻  $R_3$  和 LED 注入集电极，所以 LED 就亮了。”

师：“说得不错。如果 IN 是‘低电平’，那么三极管 T 会截止，LED 就不会亮。我们来看一下这个电路有什么用处。”

我：“还有一点，如果 IN 悬空，电阻  $R_2$  确保三极管 T 截止，LED 也不会亮。”

师：“行，你还记着这个事呢。”

我：“当 IN 端输入高电平时，这个三极管会饱和吗？”

师：“它集电极不是有电阻  $R_3$  吗？会饱和啊？我们还要求它饱和呢。”

我：“它只有饱和之后 LED 才会亮？”

师：“只要三极管导通，就一定有电流流过 LED，它就会亮，这和三极管是不是饱和没关系。”

我：“那干嘛要求三极管要饱和呢？”

师：“你又想把我气走是不是？你这两天怎么这么木呢？”

我：“别生气啊老大。我有这么个想法。”

我：“我如果控制住三极管的基极电流  $I_B$ ，就能得到一个固定的  $I_C$ ，我让这个  $I_C$  够点亮 LED 就好，不很大，那么不就省一个电阻  $R_3$  了么？”

师：“你就是要力求‘偷工减料’是吗？”

我：“我这样做能满足点亮 LED 的要求啊？这算合理的减料吧？”

师：“说你‘偷工减料’还真抬举你了，你只是减了料，可偷不了工。”

师：“你还费了工了。三极管的  $\beta$  值在什么范围里？”

我：“几十到一百多？我这样做每一个管子都要调它的  $I_B$  对吗？”

师：“当然要调。焊出一万个电路每一个都要人工



调一次电流，你说你累不累？”

我：“咱这儿劳动力廉价嘛，嘿嘿。”

师：“你这叫‘浪费’！‘浪费’这个词要我给你解释吗？”

我：“不要抠字眼儿搞名词解释，哈哈。”

师：“嘻皮笑脸你还？严肃点！！”

师：“给三极管足够的基极电流，让它饱和，对 LED 的限流交给电阻 R3，这才是正解。这还有另一个好处。”

我：“还有‘一石二鸟’呢？”

师：“如果三极管不饱和，它的集电极到发射极间就有一个较高的  $U_{CE}$ ，这个  $U_{CE}$  乘上  $I_C$  就是功率，试问这个发热烤着三极管你是不是很难受？”

我：“烤着它我难受什么啊？”

师：“我真受不了你了，我下去了！”

我：“别啊老大，不烤三极管就烤电阻，一样啊？”

师：“让电阻去扛热比让三极管扛热要好得多，三极管是‘半导体’好吗？‘半导体’啊老大！！”

我：“我怎么会老大了？‘半导体’对温度敏感？”

师：“你总算说出一句有点技术含量的话了。”

我：“LED 流过的电流一点点而已， $U_{CE}$  又不高，会很热吗？”

师：“那你收这个图吧。（figure0236）”

我：“看见‘续流二极管’了。”

师：“这个继电器线圈流过的电流也是一点点？”

我：“我不知道啊？没读过继电器的 PDF 文件啊？”

师：“你得清楚三极管 CE 极未必只流过小电流，它没饱和你就必须重视  $P_{CM}$  这个指标。”

我：“这个‘续流二极管’也是防止高压的吗？”

师：“怎么又歪楼到‘续流二极管’了？三极管你清楚了没有？”

我：“我清楚了，三极管如果不饱和，就得重视  $P_{CM}$ 。”

注意三极管饱和之后 C 极到 E 极还是有微小的电压，也不一定就允许忽略，具体问题要具体分析。

师：“这个‘续流二极管’也是限制继电器线圈自感出高压来。这个高压与  $V_{CC}$  串在一起后加在三极管 CE 极之间的，若不限制可能击穿三极管的。”

我：“和开关打火都是一回事啊。”

师：“我们该说那个‘与’加‘非’的事情了。”

我：“还没说那个带 LED 的图有什么实用之处呢？”

师：“都让你折腾晕了，收图。（figure0237）”

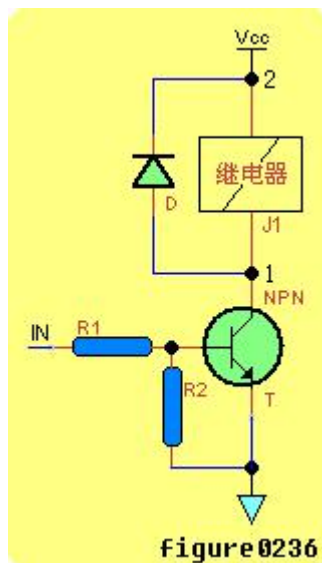
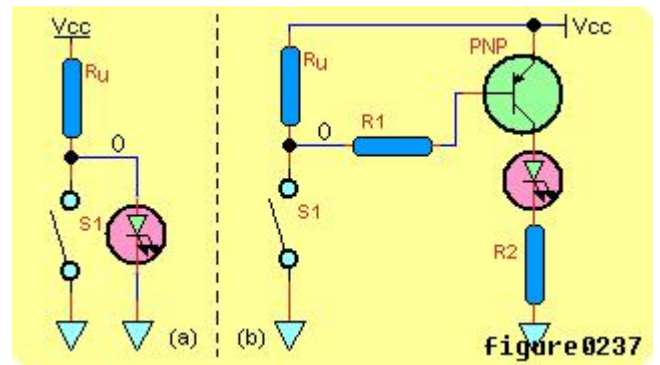


figure0236



图（figure0237-a）直接把 LED 的阳极接 O 点，而阴极接 GND，当开关 S1 断开时，只有上拉电阻  $R_u$  比较小的情况下 LED 才会亮，如果是弱上拉（ $R_u$  比较大），那么 LED 可能亮的很微弱，甚至发不出光来。图（figure0237-b）加上一个三极管，那么 LED 和上拉电阻  $R_u$  之间就没关系了，我们可以轻松地控制 LED 发出合适的光亮来，只要让晶体三极管饱和并给电阻  $R_2$  一个合适的取值即可。

我：“用个三极管的话，LED 的亮度和开关上的上拉电阻  $R_u$  就没关系了。”

师：“对于图（figure0237-a）你首先应该提出质疑：为什么要求 O 端输出 1 时 LED 亮，而输出 0 时 LED 灭？反过来不行吗？”

我：“对啊，图（figure0237-b）是反的，O 端是 0 时三极管导通 LED 亮。”

师：“如果图（figure0237-a）变成 O 端输出 0 时 LED 亮，输出 1 时 LED 灭，那么问题轻松解决。”

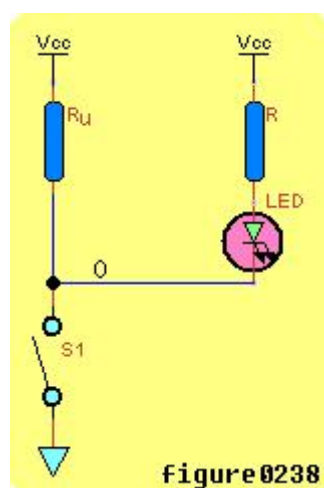


figure0238

（figure0238）”

我：“根本用不到三极管的是吗？”

师：“那个开关 S1 如果不允许流过很大的电流，那还是要用三极管的。”

我：“这开关够弱的，难道 10 个毫安都不允许流过吗？”

师：“现在该‘与’加‘非’了（figure0239）。”

‘与’加上‘非’就叫‘与非’，‘或’加上‘非’就叫‘或非’。”

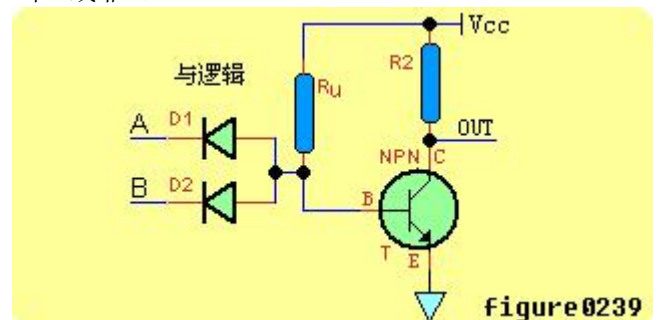


figure0239

我：“跟我想的不太一样。（figure0230）”

师：“我去掉了电阻  $R_1$ 。”

我：“那也有问题，NPN 管即使去掉基极电阻也还是有问题。”

师：“还有什么问题？”

我：“如果二极管阴极输入了 0，假设真是输入 0V，它的阳极也会有 0.7V 的电压啊？”

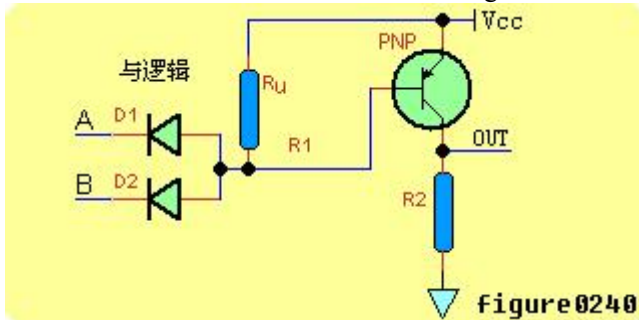
师：“你觉得三极管未必能截止对吗？”

我：“是啊，而且  $R_u$  如果是弱上拉可能也不行。”

师：“那你觉得有什么好办法解决三极管不能截止这个问题？”

我：“当然是换 PNP 管啦。”

师：“现学现用哈。是这个图？（figure0240）”

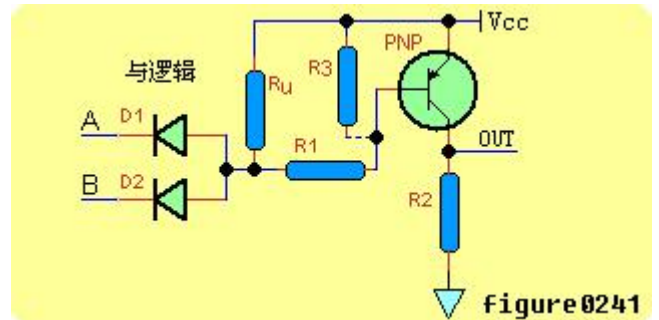


我：“不太对。如果 A 端输入了 0，那么 D1 导通，三极管 BE 结导通，从 Vcc 到 A 端就是两个 PN 结而已。”

师：“就是三极管基极电流有点太大了哈。如何解决？”

我：“用电阻限流啊，把三极管基极电阻再加上。”

师：“很好，就是这个图。（figure0241）”



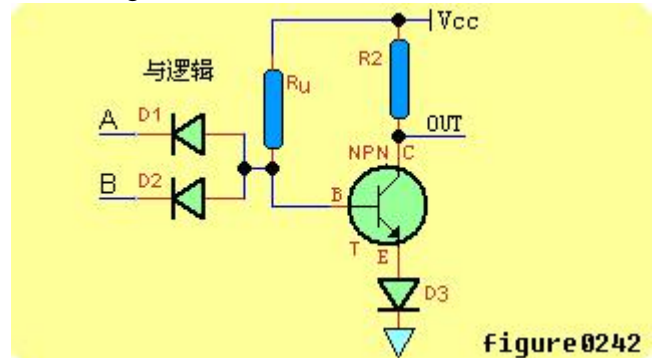
我：“有了电阻 R3，把  $R_u$  弱上拉的问题也克服了？”

师：“是，但 R3 也未必就一定要用，还要看  $R_u$  是否能满足要求。”

师：“还有一个办法，我们可以重新约定逻辑 0 的电压范围是 -2V 到 -0.7V。”

我：“你怎么竟改约定呢？没你这样不靠谱的！”

师：“好吧，那我给你另一个思路，你自己分析一下吧。（figure0242）”



我：“只解决三极管不能截止的问题？”

师：“是， $R_u$  的强弱我先不理睬。我先撤了。”

我：“我试着想想吧。”

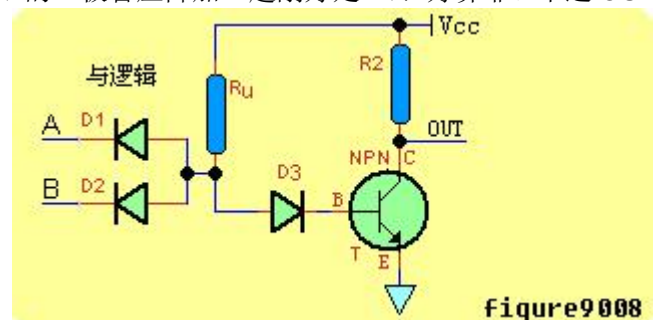
在这个图（figure0242）中，三极管的发射极不再直接连 GND 了，而是多了一个二极管 D3，那就不妨看一下有了这个二极管后，三极管还能不能“饱和”和“截止”了。如果“与逻辑”电路输入两个 1，那么三极管的基极被上拉电阻  $R_u$  拉到 +5V。这时候三极管基极电压应该是 1.4V，因为 BE 结的压降 0.7V 还要再加一个二极管 D3 的压降 0.7V。那么上拉电阻上就有了 3.6V 的压降，我们给  $R_u$  选择合适的阻值仍可以保证三极管注入足够的基极电流，它进入饱和状态应该是可以的。

那么现在电路输入了一个 0，假设就是 0V，那么三极管基极就有了 0.7V 的电压，这时三极管是无法导通的，因为 0.7V 电压不足以让 BE 结和发射极的二极管 D3 都导通，因而也就没有基极电流。显然发射级这个二极管抬高三极管导通的“门槛”，这个管子变得“容易”截止了。

然而增加了 D3 之后，又带来了一个新问题：即使三极管进入了饱和，它集电极对 GND 的电压也不会低于 0.7V 的， $U_{CE}$  是很低，可射极接的这个二极管 D3 上的 0.7V 压降和  $U_{CE}$  是串在一起的，加起来当然要高于 0.7V 了。还好  $U_{CE}$  的值相当的低，否则逻辑 0 的电压范围又需要扩大了。

那么三极管饱和之后， $U_{CE}$  究竟会有多高呢？这是不是需要查 Datasheet 才知道啊？可我没有这些资料啊？那我干脆假设三极管饱和之后， $U_{CE}$  是 0.3V 吧，这和 0.7V 的二极管压降加一起刚好是 1V，好算耶。不过 OUT 端输出 0 时电压达到 1V，这让人感到很不可靠，这个 0 对应的电压范围要怎么定才满足要求呢？我觉得 D3 这个 0.7V 不应该让它出现在输出端，当然 D3 不能去掉，那么，我把它挪到哪个位置行吗？比如，挪到三极管的基极上，这样 D3 仍然是和三极管的 BE 结串联啊？（figure9008）

现在用三极管控制 LED 的那张图（figure0235）也可以做一些计算了，至少我可以计算电阻 R3 的值。假设 Vcc 是 +5V，当三极管饱和之后，从 C 极到 E 极有 0.3V 的电压，而 LED 上有 1.8V 电压，这样电阻 R3 上就只有 2.9V 电压了。若流过 LED 的电流取 10mA，则电阻



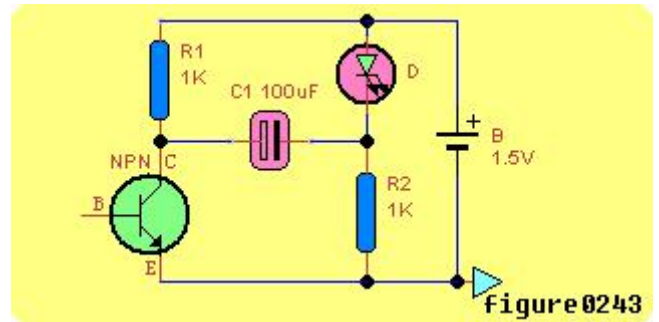
R3 的值是  $2.9\text{V}/10\text{mA} = 290\Omega$ ，取  $300\Omega$  完美解决。其实，如果三极管饱和后的  $U_{\text{CE}}$  是  $0.2\text{V}$  就更好算了，和 LED 上的  $1.8\text{V}$  加上正好是个整数嘛，呵呵。



## 2005-07-24：三极管开关电路（三）

我觉得利用三极管可以重复一下以前的那次实践，也就是用一节电池点亮一个 LED 那个。那一次是用一个按钮开关控制 LED 闪一下，现在应该可以用一个三极管代替开关了（figure0243）。不过有一点我拿不准，那就是三极管饱和之后是不是真和开关接通一样，能允许电容 C1 通过它的 C 和 E 极放电，不能放电可就惨了。

当然，还有一个问题没弄清楚，那就是买一个什么型号的三极管。我只能确定这里要用一个 NPN 管，它饱和时流过它的  $I_c$  包括两部分：一是由 1.5V 电源给出的，经 R1 注入集电极的电流，另一就是电容放电的电流了。这两部分电流应该都不大的，流经 R1 的电流最大也就  $1.5V/1000=1.5mA$ ，电容的放电回路中也有一个 R2，放电电流顶天了也就 1.5mA 吧，3mA 总电流算大吗？应该算微不足道吧？



我：“你有没有一些三极管的 PDF？”

师：“那叫 Datasheet。想干嘛啊？”

我：“我想用三极管代替按钮，做那个 1.5V 点亮 LED 的实验。（figure0243）”

师：“好想法。不过现在做这实验为时尚早，我还有些内容要跟你讲。”

我：“那先给我一个 Datasheet 看看吧。”

师：“这种东西往往给你带来一堆疑问，以后再看吧。”

我：“我总应该知道三极管饱和之后  $U_{CE}$  是多高吧？”

师：“大约 0.1V 到 0.3V 之间。”

我：“这我都能蒙对？”

师：“你又折腾什么了？”

我：“没啥。今天该把三极管和电感电容之类的结合了吧？”

师：“不是啊？你又想出什么花样了？”

我：“我想三极管如果和谐振回路结合一下会怎么样？”

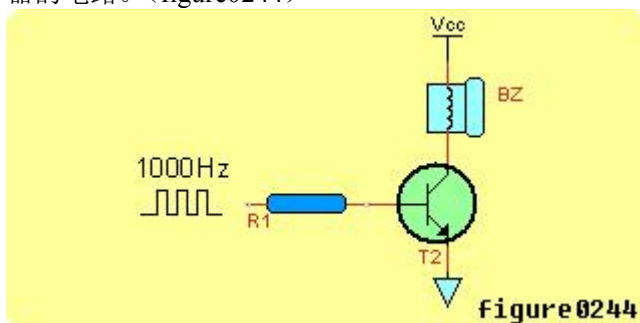
师：“这太难了点。你这么急切的要求进步？”

我：“不是，上回搜‘压电陶瓷片’时找到俩‘振荡电路’，想琢磨一下这个。”

师：“你还是先说说我上次留给你的那个图（figure0242）吧，这得慢慢来。”

我：“发射极经一个二极管接 GND，就要求三极管基极引入更高的电压才能导通。”

师：“就是把门槛垫高了。现在我给你一个蜂鸣器的电路。（figure0244）”



我：“这不是振荡电路吧？就是简单地开关电路吧？”

师：“你从何而看出这只是个开关？”

我：“我以前找到过振荡电路，用两个三极管的。”

师：“先不要急着振荡。如果有 1000Hz 方波信号加到三极管的基极，那么你是能够从蜂鸣器中听到这个声音的。”

我：“不用三极管也应该听得到啊？直接把 1000Hz 信号通到蜂鸣器上？”

师：“你又失去了‘发热’的意识，老注意不到‘能量’二字。”

我：“蜂鸣器也要发热啊？”

师：“蜂鸣器要‘发声’啊？你想让它叫得响亮就得给它充足的电压还有充足的电流啊？”

这个说法不是很严格，我们仅针对图（figure0244）所示的“电磁”蜂鸣器。

我：“那个方波其实是很弱的吗？”

师：“对，它不足以让蜂鸣器响起来，但它足以控制三极管饱和及截止。”

我：“是电源  $V_{cc}$  让蜂鸣器响起来的。”

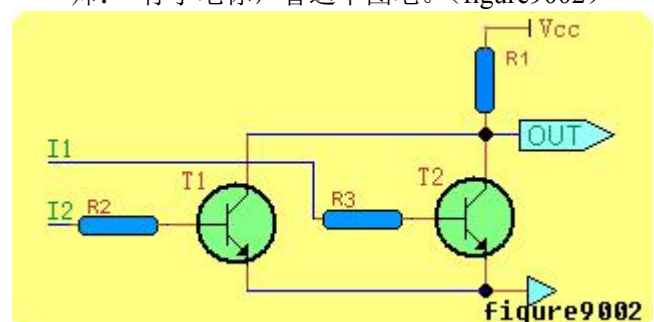
师：“我们要讨论用两个三极管组成电路。”

我：“我又想起了‘串联’和‘并联’。”

师：“你刚才不是想起来振荡了吗？”

我：“那你给我说说振荡电路，我把图发给你。”

师：“行了吧你，看这个图吧。（figure9002）”



我：“等我给你找个图。（figure0038）”

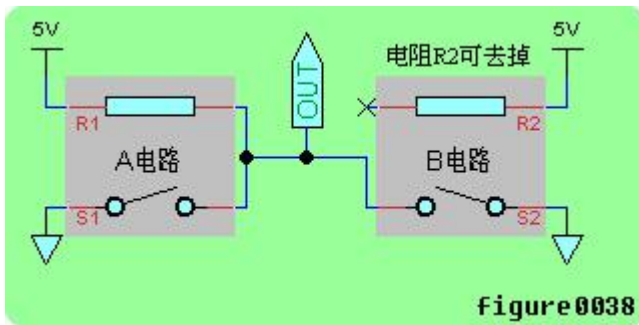


figure 0038

师：“行，看见这个图我就放心了。”

我：“三极管 T1 相当于 A 电路中的开关 S1，T2 相当于 B 电路中的 S2，它们共用一个上拉电阻 R1。”

师：“此接法叫‘线或’输出，算是两个三极管‘并联’吧。”

我：“这个不是‘与’逻辑吗？”

师：“再看下面这个图吧。（figure 0245）”

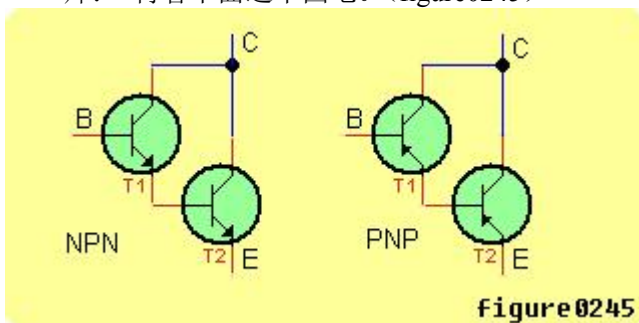


figure 0245

我：“这算是两个三极管‘串联’吗？”

师：“这个叫‘达林顿’接法，就当是三极管‘串联’吧。”

师：“两个 NPN 管这样接，等效于一个 NPN 管，这个管子的 $\beta$ 值是两个管子 $\beta$ 值的乘积。”

两个 PNP 管这样接也等效为一个 PNP， $\beta$ 值也是两个管子 $\beta$ 值的乘积。

我：“这么强啊？如果两个管子的 $\beta$ 都是 100，那么‘达林顿’了之后总 $\beta$ 就是 10000 了？”

师：“对啊。不过我们现在不常使用两个三极管做成达林顿接法，有专门制造的‘达林顿管’，两个管子已经在一个壳里面接好了。”

我：“这种管子很牛啊？干嘛不把普通三极管都淘汰会做成达林顿的。”

师：“ $\beta$ 很大的就牛啊？它还有其它问题呢。”

师：“这个达林顿管我们以后用不到，我也不想多说。我想给你说一下这个。”

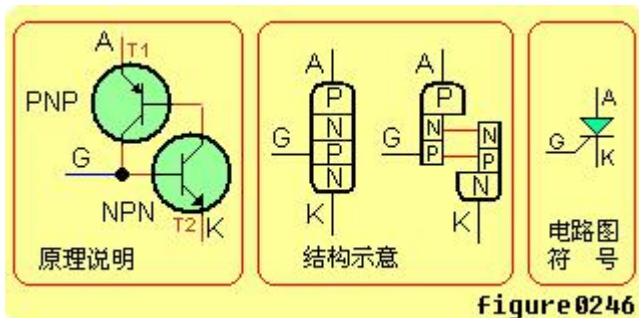


figure 0246

我：“这算是‘串联’还是‘并联’呢？”

师：“就别提串并联了。假设 A 极接电源正极，K 极接电源负极，你来说说如果我从 G 极注入一个微小

电流给 T2，这个电路会出现什么情况？”

很显然，注入的这个微小电流是应该被放大的，但是这要看 T2 的接电情况。T2 的集电极接在 T1 的基极上，当 A 极接电源正时 T1 的 BE 结是正向接电，因为它是 PNP 管嘛。这样 T2 的集电极是正常接电的，所以它的集电极将有一个电流流过。

对于 T1 来说，T2 的集电极电流恰好是它的基极电流，它也应该把这个电流放大。而它的集电极恰好接在 T2 的基极上，T2 是个 NPN 管，BE 结也是正向导通的，所以 T1 也具有放大电流的条件，它的集电极也会有一个电流流过。

而 T1 的集电极电流，恰好又成了 T2 的基极电流，这个基极电流比我们最初注入给 T2 的基极电流可要大很多，它是经历了两次放大的。这个大的基极电流会被 T2 再次放大吗？T2 不饱和吗？

T2 不太容易饱和。它的集电极对+5V 电源间不是接一个电阻，而是接了 T1 的 BE 结，这个结压降只有 0.7V。除非流过这个结的电流实在太太大，否则这个结压降不会显著升高的，所以 T2 的  $U_{CE}$  也就压不低，它到底能不能饱和呢？

我：“难道注入的这一股小电流会被两个三极管轮流地放大吗？看上去很悬啊？”

师：“两个管子这样接起来，A 和 K 两端加上电源，然后你给其中一个注入一点基极电流，就会看到电源立刻被‘短路’了。”

我：“两个管子都饱和吗？”

师：“原则上会的，因为集电极电流实在太太大，一点点基极电流会被两个管子反复地放大。”

我：“可能等不到饱和管子就烧了吧？”

师：“你在看下中间的结构示意图吧，其实不是两个管子，而是一种新的半导体零件。”

我：“还有‘双层汉堡’啊？”

师：“这个 PNP 结构的零件叫做‘硅可控整流元件’，简称‘可控硅’。也叫‘晶闸管’。”

我：“它跟二极管一个用途？整流？”

师：“它的用途有很多，我不想说很多可控硅的问题。”

我：“又是一个我们用不到的东东？”

师：“我想说的是，当我们把一股小电流注入进去后，我们是否要‘维持’住这股小电流，不能把它停了？”

我：“不用吧？T2 的基极电流可以由 T1 的集电极供给的，用不着我们持续供给基极电流。”

师：“好，我们把‘注入小电流’叫做‘触发’，把两个管子自己维持导通状态称为‘锁定’。”

师：“造成‘锁定’状态的原因可以用一个词来概括，就是‘反馈’。”

我：“这个‘反馈’还真是很神奇啊。”

师：“电流从 T2 的基极输入，从集电极输出一个大电流，而 T1 把 T2 的输出又返回到 T2 的输入。”

我：“返回去后还加强了原来的输入？”

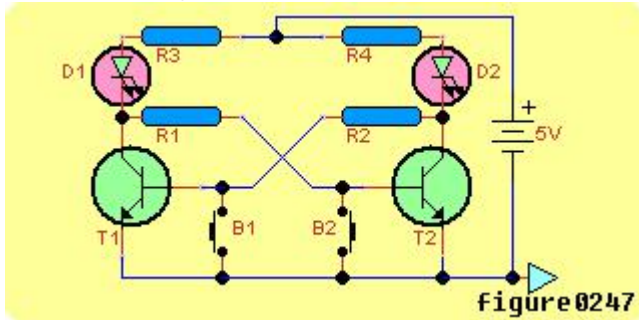
师：“所以两个管子因集电极电流太大全饱和了，并且‘锁定’在饱和导通状态，变不了了。”

我：“那有没有锁不定的电路？”

师：“呵呵，锁不定就可能‘振荡’起来。”

我：“我就惦记着振起来。想振荡也必须搞成‘反馈’对不对？”

师：“有了这些基本的概念，我们可以来看一下这个图了。（figure0247）”



我：“这个图和‘桥式整流’有一拼。”

师：“怎么扯到桥式整流上去了？”

我：“这图很和谐啊？看着非常顺眼。”

师：“你以为是看画儿呢？还是看看原理吧。”

我：“这个图能振吗？”

师：“就这个图，如果我把按钮 B1 按下去，T1 会怎么样？”

我：“T1 会截止，它基极被接到 GND 了。”

师：“但是 T2 的基极会有电流，这个电流是从 5V 电源出来，经 R3 和 D1 和 R1 进入 T2 基极的。当然我们不会让 R3 和 R1 阻值特别大啦。”

我：“那 D1 就会亮起来了？”

师：“也不是，R1 是以‘KΩ’为单位的，它限制了电流不是特别大。”

注意 D1 会亮起来，受 R1 限流亮度弱一些而已。

我：“那就是只让 T2 饱和了？”

师：“对。T2 饱和之后，它集电极相当于接了 GND。你首先可以看出 D2 应该是亮的。”

我：“R4 是 D2 的限流电阻吧？电流从 +5V 电源出来，经 R4/D2 和 T2 的 CE 极到 GND？”

师：“没错，R4 阻值不到‘1KΩ’，D2 要更亮一些。更为重要的，T2 饱和造成了 T1 的基极经电阻 R2 和 T2 的 CE 极接了 GND 了。”

我：“你是不是想说这时把按钮 B1 放开了，T1 仍然截止，饱和的 T2 相当于代替了开关 B1？”

师：“这正是我想说的。所以这个电路只要我按一下 B1，那么 T1 就截止而 T2 饱和，这俩管子会锁死，放开 B1 没有关系的。”

我：“T1 的基极是输入，集电极是输出，按下 B1 相当于给它基极输入 0，它集电极就输出 1。”

师：“然后呢？怎么来看 T2？”

我：“T1 集电极的输出 1 其实是由 R3 和 D1 上拉到 5V 形成的，考虑 D1 的正向压降，那么逻辑 1 的电平需要重新定义了。”

师：“你扯到 D1 上干嘛？我想听 T2 的说法。”

我：“D1 和 D2 都可以没有吧？”

师：“当然可以没有，加上它们只为了看发光效果。”

我：“T2 因为有基极电流而饱和，代替了开关 B1。”

师：“还是我来说吧。是 T1 集电极输出的 1 经 R1 给 T2 基极注入了电流对吧？”

我：“这样理解也行吧。”

师：“T2 基极输入了 1 而集电极输出了 0，这个 0 又怎么样呢？想那个词？”

我：“T2 输出的 0 经 R2 ‘反馈’到 T1 的基极，是这个意思吧？”

师：“终于听见‘反馈’了，真够费劲的。”

我：“我哪知道你出题的意图就是想听‘反馈’俩字啊？”

师：“现在我们在 T1 截止和 T2 饱和的情况下，按下开关 B2，那又会怎么样？”

我：“T2 基极被强行接 GND，它会截止了？”

师：“对了。T2 截止后这个 T1 可就来情绪了。”

我：“是啊，它的基极不是经 R2 和 T2 接 GND 了，而是经 R2 和 D2 和 R4 接在 5V 电源上了。”

师：“所以 T1 饱和了。而 T2 的基极就成了经电阻 R1 和 T1 的 CE 极接 GND 了。这样按钮 B2 也不用继续按着了。”

我：“妙啊，两个 LED 会交替亮起来？”

师：“这个电路有两个状态，T1 截止 T2 饱和，或者 T2 截止 T1 饱和，用俩按钮可以选择一种状态。至于 LED，只是为了看到究竟哪个管子饱和而已。”

我：“我有个问题，呵呵。”

师：“我猜一下，你想问如果俩按钮同时都按下去会怎么样对吧？”

我：“当然不是这个问题啦！等会儿。”

其实我确实想问俩按钮都按下去会怎么样的，不过既然 C# 猜到了这个，我自然是不能问这个啦，怎么能让他这么容易就猜着呢？仔细想一下这问题也不难，两个按钮都按下，那么两个三极管的基极都接了 GND，它们都截止了，这算是问题吗？

我：“我想问两个按钮都不按会怎么样。或者说我刚把 5V 电源接通，别的事情都还没干呢，这时候两个三极管谁饱和谁截止呢？”

师：“这是一个很好的问题。我们首先考虑一下这个情况。”

师：“R1 是否等于 R2？R3 是否等于 R4？D1 和 D2 完全一致吗？T1 和 T2 是不是完全一模一样？”

我：“若不考虑误差的话，电阻可以相等吧？T1 和 T2 很难做到一样吧？半导体的东东。”

师：“怎么能不考虑误差呢？我们可不是研究纯粹的理论。这些元器件都是不一样的，所以刚一通电时两个管子都想饱和，但必然有一个管子先饱和。”

我：“一个饱和，另一个就只能截止了？”

师：“就是这样子。我们只能知道两个管子一个通一个断，但确定不了哪个通哪个断。”

我：“确定不了不太好吧？我想每次通电都是 T1 饱和 T2 截止，可以吗？”

师：“那你就把 R2 加 R4 的总阻值弄小点，让它比 R1 加 R3 小，这样一通电 T1 的基极电流大，它就

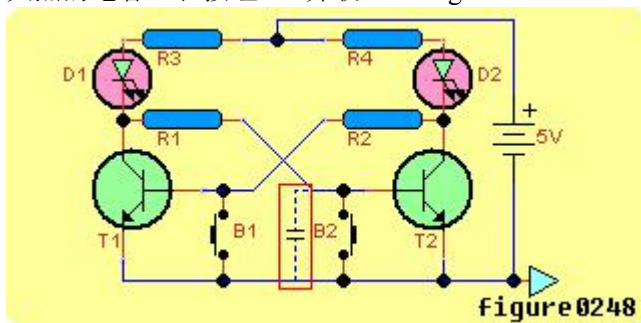


有可能抢先饱和。”

我：“还只是‘有可能’啊？”

师：“这个说不好。也许 T2 的  $\beta$  值比 T1 大很多呢？”

师：“或者这样，在 T2 的基极到 GND 间接一个大点的电容，和按钮 B2 并联上。（figure0248）”



我：“上电的时候这个电容要充电吗？”

师：“它当然要充电了。怎么这么不自信呢？”

师：“它只有充上一些电，T2 基极电压才能高过 0.7V 的，这需要时间，而 T1 没问题。”

我：“电容两端电压不能突变是吧？刚通电的瞬间电容相当于短路？”

师：“非常好，刚通电时电容器‘相当于短路’，这不等同于 B2 这一瞬间接通了吗？干嘛有疑问呢？”

我：“你说的，没自信嘛。”

师：“不过要注意，如果 T2 导通需要时间的话，那么我按下 B1 让 T1 截止后，T2 也要延迟一点时间才能导通的。”

我：“对，T1 饱和时 T2 基极电容是放电状态，T1 截止后 T2 的基极电容才开始充电。”

请观察 R1 和 T1 的 C 到 E 极和电容的连接，可见 T1 饱和后电容是放电状态。

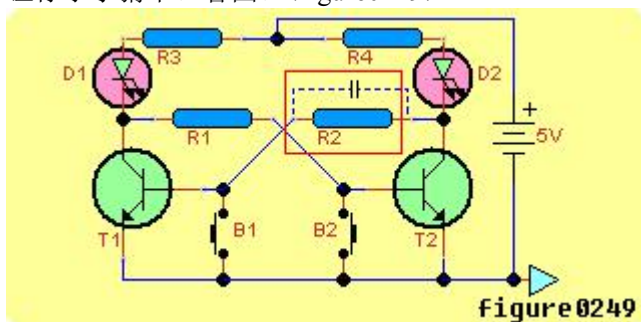
师：“所以电路状态‘翻转’的速度慢了。这是个代价。”

我：“这电容还挺有意思的。”

师：“是的，电容确实比较好玩。你看一下从 T2 的集电极到 T1 的基极靠什么元件完成反馈？”

我：“电阻 R2。你想把它换成电容？”

师：“哈哈，你是真能猜啊！我这回一定不能让你小子猜中。看图。（figure0249）”



我：“并联一个电容啊？”

师：“你再猜，我并上个电容什么意思？”

我：“我非常严肃地回答你：不知道。”

师：“这是‘加速电容’啊！！全还给我了！！！”

我：“想起来了老大，这个电容在 T2 截止瞬间相当于短路，等于绕过 R2 给 T1 基极瞬间注入大的电流

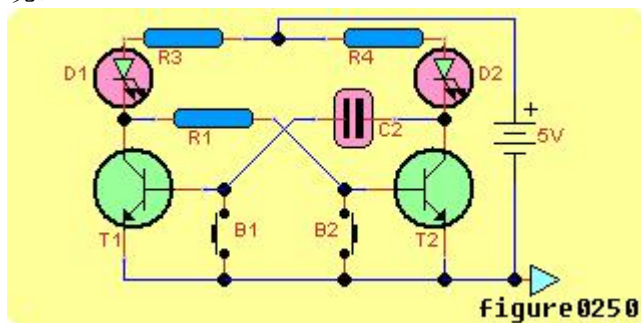
了。”

观察当 T2 饱和时这个电容是处在放电状态吗？注意 T1 的 BE 结。

师：“还不错，你还记着这回事。说明你以前没有翘课去打网游。”

我：“哪敢翘您的课啊。呵呵。”

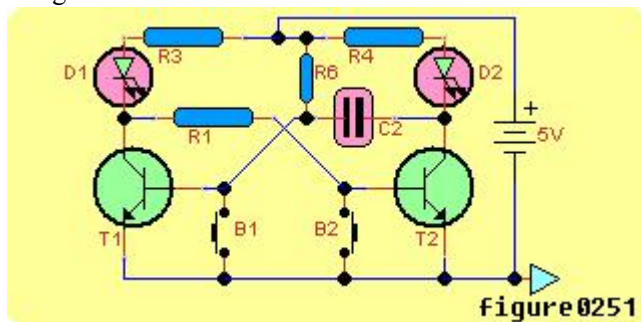
师：“好了，我们把 R2 去掉，只留下并联的电容（figure0250）。你先考虑下通电的瞬间是怎样的情况。”



通电的瞬间，电容 C2 相当于短路，这时 T1 的基极电流必然比 T2 大很多，所以 T1 提前饱和而 T2 截止。但是随着电容 C2 充电，它就变成断路了，这时 T1 的基极哪里都接不到是浮空状态，这有问题吧？

我：“通电后 T1 先饱和后截止，因为 T1 的基极会进入浮空的状态，这有问题吗？”

师：“没错。所以我们继续在 T1 的基极接一个上拉电阻 R6，避开这个浮空的状态。你再分析。（figure0251）”



由于具体的电阻值没有给出，我也只能做一些假设。在上电的瞬间，电容 C2 仍是相当于短路的，这样 R6 和 R4+D2 可看做并联为 T1 提供基极电流，而 T2 的基极电流是 R3+D1+R1 串联供给，我觉得 R6 和 R4+D2 并联的总阻值应该是小的，这样 T1 先饱和而 T2 只能截止了。而电容 C2 充完电呢？这时 C2 相当于断路，只有 R6 保证了 T1 的基极拉高到 Vcc，当然 R6 取值合适的话 T1 还是饱和的。而 T1 饱和就一定会导致 T2 截止，这个状态会锁定住。

我：“我认为通电之后 T1 首先饱和的，这时 T2 截止。”

师：“好，我们现在按下 B1，T1 截止了吧？”

我：“那么 T2 饱和，它集电极电压降到了大约 0V。”

师：“那么电容 C2 呢？”

我：“C2 两端电压不能突变，所以电容左极板的电压也随之跌下去了。”

师：“什么啊？C2 左极板已经被 B1 接 GND 了，早就是 0V 了。”

我：“那我就不会说了。”

师：“刚通电时电容 C2 通过 R4+D2 和 T1 的 BE 结充电对吧？”

我：“那现在 C2 是通过按钮 B1 和 T2 的 CE 极放电？”

师：“对，电容 C2 此时是要放电的。它两端电压约为 0V。现在我们要把 B1 放开了。”

我：“B1 放开瞬间 C2 两端电压仍然是 0V 吧？它得充电才行。”

师：“由于 T2 此时正饱和着，所以 C2 要通过 R6 和 T2 的 CE 极来充电，它左极板的电压要延迟一段时间才能高过 0.7V。”

我：“所以这一阶断即使按钮放开了，T1 仍然是截止的？”

师：“没错。随着 C2 的充电，电路会自己恢复 T1 饱和 T2 截止的状态。”

师：“所以这个电路只有一个稳定的状态，就是 T1 饱和 T2 截止，你可以通过 B1 控制它进入 T1 截止 T2 饱和的状态，但它‘锁定’不住。”

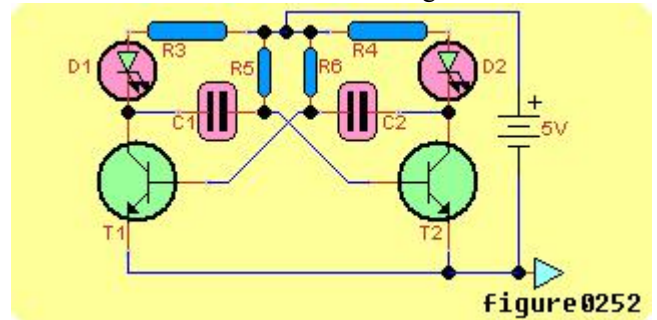
我：“如果锁不住就可能振荡了？”

师：“你也知道是‘可能’振荡。它只锁不住一

个状态，但 T1 饱和 T2 截止这个状态是锁得住的，所以振不起来。”

我：“那能让它俩状态都锁不住吗？”

师：“当然能！收这个图。（figure0252）”



我：“这图我好像见过，可以让压电蜂鸣器发声的。”

师：“右边加上电容 C2 就有一个状态锁不住了，左边也加一个电容 C1 那肯定另一个状态也锁不住了。”

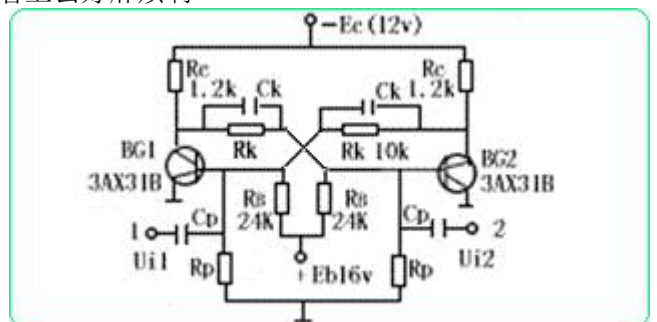
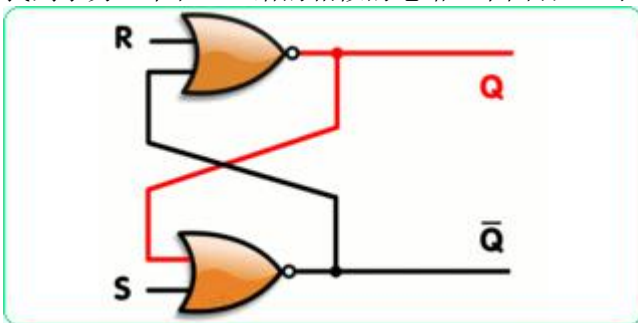
我：“这个电路我自己应该能分析清楚。”

师：“我也这么认为。所以你在这儿分析，我要下去了。”

我：“就这么走啦？那我怎么确认自己分析得对不对？”

师：“最后给你几个关键词，双稳态电路，单稳态电路，无稳态电路，自己 GOOGLE 吧。再见。”

既然有了这么多关键字，不关门放狗肯定是不合适的。上 GOOGLE 搜了“双稳态电路”，结果居然找到了这样一张图（下图左），一个怪模样的三角形还顶个圈，这是一个‘或’加一个‘非’吧？看不懂的先放一边，找到了另一个和 C# 给的相似的电路（下图右），可这图看上去好麻烦啊？



倒也不是什么都看不懂，至少电容 Ck 还是理解的，加速电容嘛。这个三极管的型号有点特别，搜索了一下，这竟然是国产的三极管诶！哎呀妈太少见了。那么电容 Cp 和电阻 Rp 呢？这里有 Ui1 和 Ui2，这是输入端么？如果是输入端这里肯定不能输入稳定的高低电平，直流过不去电容的。这只能输入脉冲信号，那么 Cp 和 Rp 不就是个“微分”电路么？脉冲的下降沿会形成一个电压尖刺啊？看电源有 Ec 是负的 12V，那输入负电压应该可以吧？怎么还有 Eb 是+16V 呢？真是一头雾水啊。

就凭我现在这点能耐，有很多看不懂的东西是正常的，不过我仍然可以就我懂了一点内容提出一些见解的：双稳态电路，有“记忆”的能力，这种能力没准儿可以用来制作电脑的“内存”。我这见解实在有些粗浅，可这总比啥想法都没有强一些吧？

那么“单稳”和“无稳”又能做什么呢？这我就说不出个啥了，慢慢来吧，日子还长。现在三极管和电阻、二极管、电容都结合上了，下回应该是三极管加电感了吧？可我怎么总觉得三极管已经结合过电感了呢？用三极管控制继电器的线圈不就是了么？这似乎就只有“续流二极管”是个要点啊？那么三极管控制蜂鸣器算不算？这蜂鸣器如果是“电磁”式的，那么它两端是否也要并联“续流二极管”呢？如果蜂鸣器是压电陶瓷的，那又该如何控制呢？

## 2005-07-26：三极管开关电路（四）

我想这次无论如何是要讨论一下真实的晶体三极管是什么样子的了，我迫切地想把这些“单稳”和“无稳”之类的电路实践一下，这总要去买几个三极管吧。在 GOOGLE 上搜了下“常用三极管”，额的神品种好丰富啊？！有的页面上居然给出上千种三极管的资料，这都是“常用”的？随便选个啥型号到市场上就能买到？这家伙咱提前进入共产主义了都？物质极大丰富啊？

不过我还是下载了一份资料，打开这个 PDF 看了一眼，马上泄气了，看不懂是些什么东东。仔细琢磨了一下，倒也不是所有的内容都不明白，至少“晶体管型号”还是不需要什么“理解”的吧，只是一个名字而已。那个“管子类型”也不应该看不懂的。

### 常用场效应管及晶体管参数（3）

晶体管型号	反压 $V_{be0}$	电流 $I_{CM}$	功率 $P_{CM}$	放大系数	特征频率	管子类型
2SC1494	36V	6A	40W	*	175MHZ	NPN
2SC1222	60V	0.1A	0.25W	*	100MHZ	NPN
2SC1162	35V	1.5A	10W	*	*	NPN
2SC1008	80V	0.7A	0.8W	*	50MHZ	NPN

表格中的  $I_{CM}$  和  $P_{CM}$  其实已经知道是怎么回事了， $I_{CM}$  是集电极最大允许流过的电流，而  $P_{CM}$  是管子最大能承受的功率，这样看这个“2SC1494”是个很牛的管子啊？这表格中居然还列出了“放大系数”，不过只有很少的型号给出了一些数值，多数管子都只有一个“\*”。

“特征频率”是个没说过的概念。这个“反压  $V_{be0}$ ”看上去有点怪怪的，这是不是说三极管基极到射极之间反向击穿电压呢？有字母 b 和 e 嘛。但数值似乎有问题，因为 C# 说 BE 结反向击穿电压只有 5 到 7V，怎么会有几十伏的？我 GOOGLE 了下“ $V_{be0}$ ”，没有什么结果，搜出来的页面中到处充斥着找到的这个表格。

师：“有个 PDF 发给你，收下。”

我：“我也有个 PDF 发给你，收下。”

师：“那我就有两个 PDF 发给你，再收。”

我：“搞什么啊？帮我看看那个‘反压  $V_{be0}$ ’是什么？”

师：“写错了，是‘ $V_{ceo}$ ’才对。不是 be，也不是数字 0，是小写字母 o。”

我：“这都能错？怎么会这样啊？”

师：“你还是看我给你的 PDF 吧，两个十分常见的三极管。自己先大概扫一遍。”

我打开了那个“2N3904.PDF”，居然又是“FAIRCHILD”的标志，这个“仙童”很受 C# 的推崇啊？扫了眼第一页，马上在第一个表格里找到了“ $V_{CEO}$ ”，数值为 40V，和我找到的表格中那个“反压  $V_{be0}$ ”有点接近。这个表格里也列出了“ $V_{EBO}$ ”，数值为 6.0V，这才是 BE 结反向击穿电压嘛。

我：“我找见‘ $V_{CEO}$ ’了，还是这种资料可信啊？”

师：“当然，这是生产厂商提供的技术文件，这要再不准就没准的了。”

我：“也不一定，我想起那个 1N4148.PDF 就有电压的单位用错了。”

师：“那是偶然的，或者我找到的这个版本有错误，新版本已经改了。”

我：“三极管都是 2N 开头吗？两个 PN 结的？”

师：“对啊，美国型号中都是 2N。数字 2 表示‘2 个 PN 结’，N 表示这个器件已在美国电子工业协会（EIA）注册登记。”

我：“那日本的型号就是 2S 开头了，后面再加一个字母表示用途对吧。”

师：“日本人特没创意是吧？2S 后面的字母还表示管子的极性，NPN 还是 PNP。”

师：“具体说 2SA 和 2SB 是 PNP 管，A 适用于高频信号，B 适用于低频信号。2SC 和 2SD 是 NPN 管，C 适用于高频信号，D 适用于低频。”

我：“这个高低频是指‘特征频率’吗？”

师：“还有 2SJ 和 2SK 型的，是‘场效应管’。”

师：“特征频率可是有点难理解。要不你先 GOOGLE 一下？”

我打开 GOOGLE 的主页，搜了一下“特征频率”这个词，一些页面上给出“特征频率是指三极管在共发射极组态时电流放大倍数  $\beta$  下降到 1 时的频率，又称‘增益带宽积’。”之后便是一些“电子渡越时间”之类的详细说明，对我而言当然是不知道人家在说什么了。

我：“三极管的  $\beta$  值怎么总是变的呢？”

师：“当然是变的，它进入饱和时  $\beta$  就是急剧降低的。”

我：“输入到基极的信号，如果频率高了  $\beta$  也会降



低吗？难道频率一高就饱和了？”

师：“三极管饱和后 BC 结变成了正向接电，因为 C 极电压被压得很低，低于 B 极的 0.7V。”

师：“所以会有一小部分基极电流从 B 极流向 C 极，这部分电流本来是要从 B 极流到 E 极的。”

我：“还有这种事？从 B 到 C？然后呢？”

师：“反正最终要流进 GND 的。”

师：“当然只有从 B 到 E 的电流对从 C 到 E 的电流有控制，从 B 到 C 的电流根本是浪费。”

我：“可是从 B 到 E 的电流变少了？”

师：“所以从 C 到 E 的电流  $I_c$  就变得更小啦？但我们计算  $\beta$  仍然用  $I_c$  除以没被分流的那个  $I_B$  啊？”

我：“天啊！三极管饱和后的  $\beta$  是‘貌似’变小了吗？”

以上对晶体三极管饱和后  $\beta$  下降的解释是作者个人见解，仅供参考。

师：“哈哈。现在我们来看给基极注入高频信号的情况。只要信号不强，那管子是不会饱和的。”

师：“但是注入的高频信号仍然会被‘分流’，因为 BC 结上寄生着一个‘结电容’。”

我：“注入的高频有一部分会通过这个电容到 C 区？”

师：“频率越高容抗就越小，所以越高频的信号电流就越容易直接进入 C 区，导致真正参与‘放大’的信号少了。对外表现就是三极管的  $\beta$  好像是小了。”

我：“你的这个解释清楚很多，我找到的解释有什么‘电子渡越时间’之类的，完全看不明白。”

师：“呵呵，根据你掌握的基础知识，我也只能给你说到‘BC 结电容’这一步。‘特征频率’是个比较麻烦的概念。”

我：“单凭一个‘BC 结电容’还不足以说明问题吗？”

师：“其实标准的解释根本就不是在说‘BC 结电容’。”

我：“标准的解释就是那个‘电子渡越时间’吧？”

师：“你还记得三极管‘基区很薄’这个特征吗？可以在此基础上做些联想。”

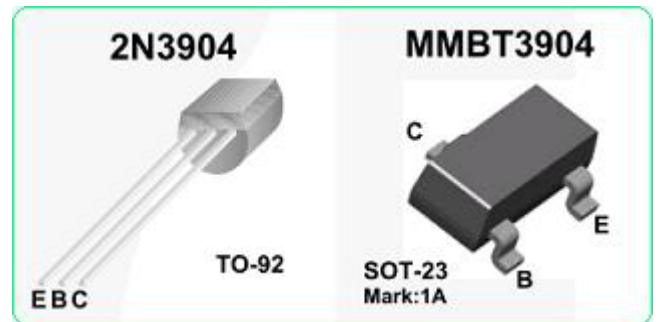
我：“电子是在‘渡越’基区吗？”

师：“有兴趣就自己慢慢琢磨吧，我们以后用不到这么深入的了解。”

我：“反正知道了‘基极输入信号频率一高  $\beta$  就降低’，也可以了。”

我们忽略了“共发射级组态”这个要点，这需要注意。

继续阅读这个 PDF，在第一个表格中我没有找到  $P_{CM}$ ，但是有个  $I_c$  参数，是 200mA，这应该就是  $I_{CM}$  了，因为这个表的标题是“Absolute Maximum Ratings”。接下来的表格中第一项就是  $P_D$ ，看说明这应该是管子总共能承受的一个功率值，可能是一个与  $P_{CM}$  相当的参数吧。这一项有 3 个指标，2N3904 是 625mW，MMBT3904 只有 350mW。我看了页面最上方的图，2N 与 MMBT 的差别是“封装”不一样，不知道这个 MMBT 是哪个国家的型号。



注意 SOT-23 封装是很小的，外壳表面上没有足够的面积，只能印上“1A”这样一个简单的标识。所以上图中有个“Mark: 1A”。

我：“MMBT 是哪个国家的型号？还有 PZT？”

师：“不是哪个国家的型号吧？我认为这只是表示封装的，不是型号命名标准。”

我：“就是 2N 对应的这种封装叫 TO-92？MMBT 对应的叫 SOT-23？PZT 对应 SOT-223？”

师：“是啊。TO-92 这种外形的管子是‘插装’的，就是板上要打三个孔，它三个极要插到孔里，从另一面焊上。SOT-Xxx 的是‘贴装’的。”

我：“怎么能用‘外形’这样的俗词呢？你得专业一点了。呵呵。”

我：“好像 1N4148 也有两种封装的，我看看吧。”

师：“1N4148 是‘插装’的，那种‘贴装’的应该叫 FDLL4148。”

注意由于 1N4148 的生产商不只是 FAIRCHILD 一家，其它厂商还可能提供更多的封装形式。至于市场上卖货的销售人员，有的人知道“贴片的 2N3904”就是“MMBT3904”，有的人却不知道。

我：“好像是 FDLL。封装会影响功率？”

师：“个头儿大小和散热能力有关系啊？可以肯定 SOT-23 比 TO-92 个头儿要小对不对？”

我：“看来 PZT 的封装最大只啦。能扛 1000mW 的功率。”

师：“表格下面还有两个注解，告诉你测量这些数据时用了什么样的 PCB 板。”

我：“还真是在板上焊一个电路来测试的啊？”

师：“FR-4 就是一种常用的‘环氧玻璃布’板的型号，板子材料和上面的铜膜线对散热都是有影响的。”

师：“研制阶段可以焊出测试电路来测量参数，批量生产可不这么搞了。会累死的。”

这个 PDF 最下面有两项和温度有关的参数，从数值上看这温度不低啊？可最后面的单位却是  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，不明白是什么，Thermal 是“热量”的意思，可 Junction to Case 是什么？结到包装？

再看下一页， $V_{CEO}$  变成了  $V_{(BR)CEO}$ ，加个 (BR) 想说什么呢？下面的  $I_{BL}$  和  $I_{CEX}$  只有 50nA，相当的小，这应该是一些“漏电流”吧？ $I_{CEX}$  应该是从 C 极漏到 E 极，那么  $I_{BL}$  呢？从哪儿漏到哪儿呢？

再下面一个表格是“ON CHARACTERISTICS”，刚看过的表格是“OFF CHARACTERISTICS”，这个

“OFF”应该是“截止”吧？那么“ON”就是“导通”了？这个表中有  $h_{FE}$ ，依测试条件不同最小从 30 起，最大值居然是 300，不是应该从几十到一百多吗？下面的  $V_{CE(sat)}$  也应该是一个从 C 到 E 的电压，只有 0.3V，还是个最大值，C 到 E 的电压这么低，那就只有“饱和”时才这样的了？

之后的表格中第一项  $f_T$  是个频率值，这恐怕是“特征频率”了。这一项的说明是“Current Gain-Bandwidth Product”，这英文只能上 dict.cn 上去查，果然这是“电流增益-带宽积”的意思。之下有两个电容，分别是“输出电容”和“输入电容”，这不是指“结电容”吧？最后有一个和“噪声”有关的参数，单位是“dB”，我知道这是“分贝”的意思，怎么三极管还会发出噪音呢？

师：“看得怎么样了？”

我：“参数表看完了，问题又是一大堆。”

师：“挑你认为最简单的问题问一个吧。”

我：“三极管工作时会发出噪音吗？”

师：“你啥时候听见电器都嗞儿哇乱叫啊？”

我：“那怎么还有个‘Noise Figure’呢？”

师：“你这可不是一个简单的问题，这个噪音不是指那种刺激耳朵的噪音。”

我：“好吧，先不说这个 Noise 了。那么  $\beta$  值怎么会到 300 呢？不是一百多吗？”

师：“几十年前的三极管能把  $\beta$  做到一百多就不错啦，现在晶体管很轻松就做到一百多，上千的都有。”

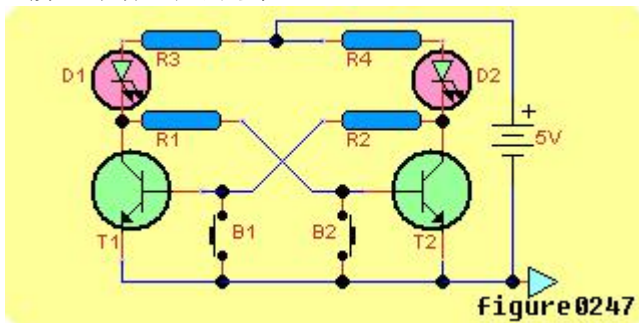
我：“敢情我学到的都是几十年前传下来的啊？”

师：“你就别管网（书）上怎么说了，要以这个 PDF 为准，其它的都当是随便说说。”

师：“这 PDF 中的其它内容我们也先不管了，咱先实际弄个电路出来。”

我：“好啊。看这东西头都大了。”

师：“上回的‘双稳’电路（figure0247），我们要试算一下各电阻的取值。”



我：“我来算一下试试吧。”

师：“好啊，你打算先算出哪个电阻？”

当一个晶体管饱和后，它集电极电压会很低，按 2N3904.PDF 上给出的参数，应该低于 0.3V 的，不对，好像有两个参数值的。我打开这个 PDF 查了下，果然有另一个  $V_{CE(sat)}$  的值，是 0.2V，条件是  $I_C=10mA$ ， $I_B=1.0mA$ 。可这个数到底是不是管子饱和后 CE 间电

压呢？

我：“ $V_{CE(sat)}$  是管子饱和之后 CE 间的电压吗？”

师：“我记得跟你说过的吧？”

我：“只是说过饱和后 CE 间电压在 0.1V 到 0.3V 之间，难道就是这个？”

师：“到 dict.cn 查一下‘饱和’就知道了。‘饱和’的英文是 saturation，注意前三个字母。”

我：“还有这样的办法呢？你可真机灵。”

看来管子饱和后 CE 间压降可以取 0.2V 了，这时  $I_C$  是 10mA，刚好满足 LED 发光的需要。若取 LED 的管压降为 1.8V，加上 CE 间的 0.2V，就是 2V 了，那么就有 3V 的电压落在电阻 R3（或者 R4）上。流过 10mA 电流的话，这个电阻应该是 300 欧。

我：“我计算电阻 R3 和 R4 应该取 300 欧，流过 LED 和三极管 CE 极的电流是 10mA。”

师：“很好，这个计算我们当初讲 LED 的时候就已经讨论了。”

我：“那时是一个开关，现在鸟枪换炮，开关变三极管了。”

师：“现在该看 R1 和 R2 了。”

从 2N3904.PDF 上看  $V_{CE(sat)}$  的测试条件， $I_C=10mA$  而  $I_B=1.0mA$ ，要这样看  $\beta$  值只有 10 啊？它最大不是能到 300 吗？我本想问一下 C# 这是怎么回事，但仔细考虑了一下，发现这  $\beta$  就应该是 10 的，因为这时三极管是“饱和”的嘛， $\beta$  肯定很低的了。

而如果  $I_B$  取为 1.0mA，由于三极管 BE 结压降为 0.7V，R2 和 R4（R1 和 R3）及 LED 又是串联的，那么总电阻是  $R2+R4$ ，电压呢？应该是 5V 减去一个 1.8V 的 LED 管压降，再减去一个 0.7V 的 BE 结压降，是 2.5V。电流是 1.0mA 的话，那么 R2 和 R4 的总电阻是 2.5K。而 R4 已经是 300 欧了，R2 应该取为 2.2K。

我：“如果基极电流取 1mA，基极电阻 R2 和 R3 我算出是 2.2K。”

师：“这 1mA 要流过 LED 对吗？你觉得它是亮还是不亮呢？”

我：“有一点点亮光吧？你是觉得两个 LED 同时都会亮吗？只是一强一弱？”

师：“应该是，得焊出电路来看看效果。我倒觉得 R1 和 R2 可以取大点，5.1K，甚至 10K。”

我：“那两个管子基极电流太小了吧？能饱和吗？”

师：“再把 R3 和 R4 加大到 510 欧试试。”

我：“试试？不先算清楚了吗？”

师：“试试吧，也许行。管子的  $\beta$  值都不小的，怎么也得一百五六十吧。”

我：“你太不严谨了吧？”

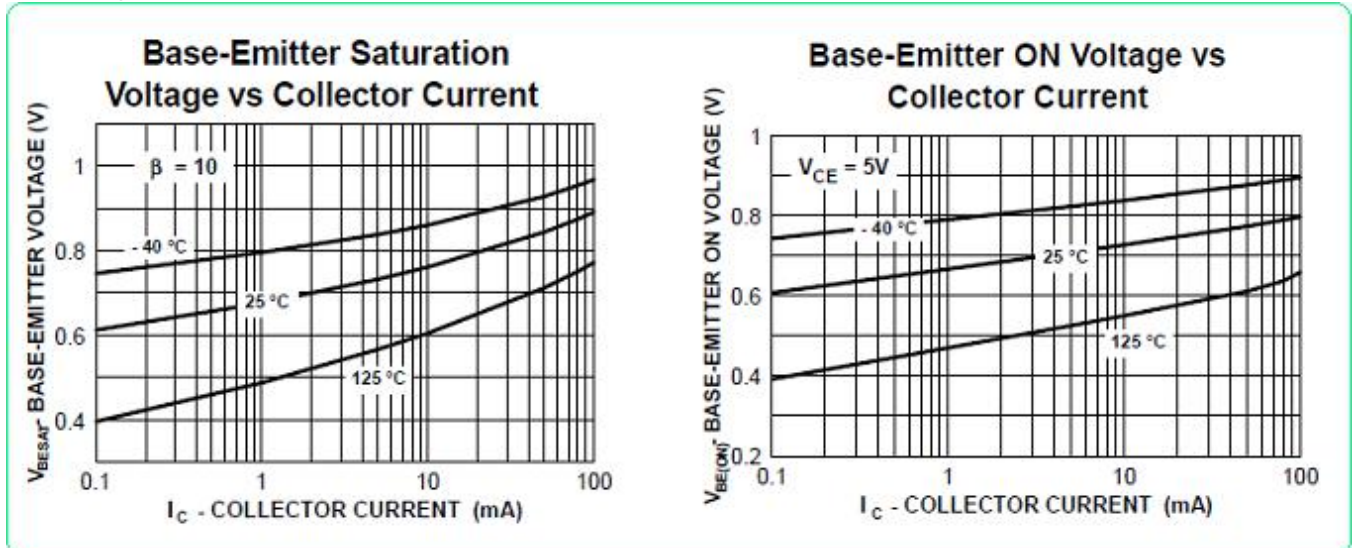
师：“你就试吧，把结果告诉我。我先走了。”

我：“我要告诉你什么啊？就是灯亮还是不亮吗？”

我承认那些 Datasheet 文件于我而言太过艰涩难懂，不过细细发掘的话，其中有些内容未必就不能理解，至

少可以激发起一些联想。文字看不懂，那 PDF 中不是还有图表呢吗？我曾经看过 1N4148.PDF 中的图表，还是有所收获的。因此对于这个 2N3904.PDF，我决定把文后附加的图表看一下，没准儿能看出点什么。

事实证明我的决策是英明的，有两个图表还真的给了我一些启发。下面图中这两个图表反映了“基极-射级”间的电压和“集电极电流”之间的关系，左图纵坐标是  $V_{BE(SAT)}$ ，肯定是在晶体管饱和状态下测出的，图表上写了“ $\beta = 10$ ”，3 根曲线上带了一个“温度”，我想中间那条 25°C 下测出的曲线应该是常用的。可见“基极-射极”间电压  $V_{BE}$  为 0.6V 时，集电极电流  $I_C$  是 0.1mA。 $V_{BE}$  升至 0.9V 时， $I_C$  达到 100mA。右图也反映  $V_{BE}$  和  $I_C$  的关系，只是条件有区别，纵坐标是  $V_{BE(ON)}$ ，显然不再是饱和状态下测出的，而且还有“ $V_{CE}=5V$ ”的条件，但这时候  $\beta$  是多少没有给出，当  $V_{BE}$  是 0.6V 时  $I_C$  仍是 0.1mA，而  $V_{BE}$  达到 0.8V 时  $I_C$  就已经是 100mA 了。



那么我为什么会对这两个图表发生兴趣呢？因为 C# 以前说了，晶体三极管可以看作是“基极-射极”之间的电压  $V_{BE}$  控制“集极-射级”之间的“电阻（电导）”。这两个图表没有给出“集极-射极”间的电阻，只给出了集电极电流  $I_C$ 。我想至少对于右图而言用  $V_{CE}$  的 5V 除以  $I_C$ ，应该就是“集极-射级”间的“电阻”吧？再看那些“曲线”，它们很“曲”吗？似乎不是，这里是不是存在着“线性”啊？右图中还没有给出  $\beta$  值，这是否意味着“与  $\beta$  值无关”呢？要真与  $\beta$  无关那可太爽了，这个  $\beta$  实在是太难受了，它根本就没了个准谱嘛。



## 本节补充说明

既然提到了晶体三极管的特征频率，我们不妨多说一点关于那个“电子渡越时间”的问题。这个“渡越时间”，简单地理解就是“少子越过基区”的时间。对 NPN 型晶体管来说，基区的“少子”就是电子了，这些电子从发射区出来，越过基区进入集电区，这个时间越短，晶体管的“特征频率”就越高，也就意味着这个晶体管能够更好的处理高频信号。于是我们就知道了“基区做得很薄”的另一个重要的原因了。

那么基区做不了很薄会怎么样呢？晶体管发展初期受制造工艺的限制，基区确实是做不了很薄的，所以早期的晶体管只能用于处理低频信号。但我们要注意到“少子”越过基区的“时间”才是重要的，这个时间要尽量短。因此如果基区不能做到很薄的话，那么让“少子”在基区跑得更快一点行不行呢？这当然可以。

凭我们目前所掌握的知识，我们会想到可以提高集电极的电压，集电极和基极之间的反向电压高应该有利于基区的“少子”进入集电区。而且这个反向电压高的话，集电结的“耗尽层”会加宽，这会进一步把基区“挤薄”一些。

当然这只是我们凭借现有知识所形成的一种感觉，提高集电极的电压是否真的能让晶体管处理更高频率的信号还有待确认。但有一点我们应该注意到，集电结反向电压高导致“耗尽层”加宽，这对基区是有影响的。在讨论晶体管输出特性时我们提到过晶体管有“厄利效应”，就与集电结的这个“耗尽层”有关联。

实际上早期的晶体管为缩短少子渡越时间采用了特殊结构的基区，在基区中利用不同的杂质密度制造“附加电场”，利用此“附加电场”给“少子”加速，使其更快速的越过基区，这就有了“漂移型晶体管”，并且进一步发展出“合金扩散型晶体管”，这些新结构有效地提高了晶体管的特征频率。这方面的相关知识可以参考《晶体管原理与工艺》一书，这书写得比较浅显易懂，只可惜太过古老了一点。

## 2005-07-29：场效应晶体管

我仔细规划了一下准备做的实验，至少“双稳”、“单稳”和“无稳”这三个电路要做出来的，这需要用六颗三极管。另外我设想了用三极管代替开关去做一节电池点亮 LED 的实验，我构思的具体电路是这个样子的（figure0253），其操作方法是：B1 按下，三极管经电阻 R3 获得基极电流而饱和，这时 C1 应该经三极管的 CE 极和电阻 R2 放电，LED 亮一下。B1 放开，三极管基极经 R4 下拉截止，C1 重新充电。这样一来我就得弄到七颗 NPN 型的三极管了。至于电阻 R3 和 R4 的取值，还没想清楚该如何算。

有点不太想跑中关村了，因为上回那个“Rukycon”电容给我的小心灵中留下了一丝小阴影，至今挥之不去。俺叔给递来的那一包东东也没仔细清理过，或许里面混着三极管也未可知吧？不妨先在家里找一找。

云上漫舞：“我有个故事你要不要听？”

我：“求之不得啊！！是你亲身经历？”

云上漫舞：“是小白兔和大灰狼的故事。”

我：“祝你生日快乐。呵呵。”

云上漫舞：“太没劲了。我还没讲呢。”

我：“‘猪’你生日快乐。这个怎么样？”

云上漫舞：“别老土啦。我生日是后天。”

我：“那你还要提前当猪？”

云上漫舞：“要在飞机上过了。”

我：“你头一回飞着过生日？难道一整天都落不下来吗？”

云上漫舞：“不是的！是小白兔不能陪着我啦！！”

我：“你给他买张机票不就行了？”

云上漫舞：“你给报销？我们哪有钱这么造？”

师：“忙什么呢？不理我？”

我：“给空姐 MM 做点心理辅导。她 BF 不能陪她过生日。”

师：“她哪天生的不行，非赶今天生？”

我：“人家后天生的啦。”

我：“也对啊？干嘛非赶那天庆祝呢？”

我：“要不你们下月 1 号再聚不行吗？连建军节一块儿都庆祝了。”

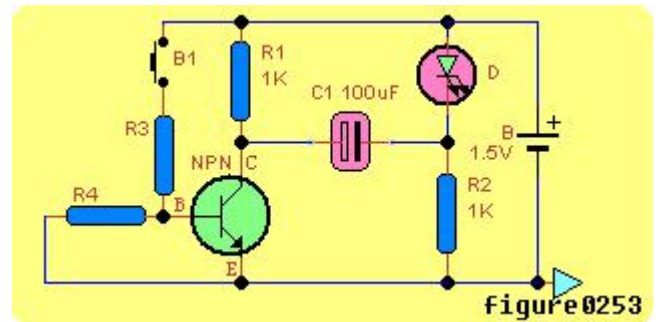
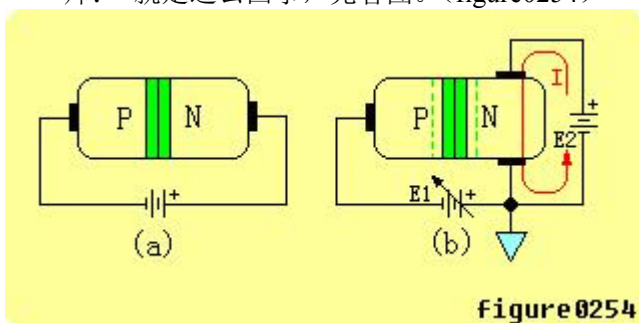
云上漫舞：“只好这样了。他的休假要结束了。”

师：“我们今天要说一说‘场效应’了。”

我：“这小白兔也够惨的，干什么苦力活也比当兵强。”

我：“不就是用电压改变电导吗？”

师：“就是这么回事，先看图。（figure0254）”



我：“这不是一个 PN 结吗？”

师：“是啊。它要按图（a）这样接电那就是一个反向接电的 PN 结了。但我们可以按图（b）这样给它通电。”

我：“E2 不是被短路吗？单一的 N 型半导体几乎就是个导体了。”

师：“关键是那块 P 型半导体我们也没让它闲着，给它加了负电（E1）。”

我：“没用啊老大？只是 P 区到 N 区不能导电，N 区自己还是可以导电的。”

师：“是的，N 区自己还可以导电，但是导电能力变弱了。因为有那个‘耗尽层’。”

这个“耗尽层”我还有印象，当一块半导体一半做成 P 型一半做成 N 型时，N 区的电子会自动跑到 P 区去和那边的空穴复合，这样一来在交界面处就会出现一个薄区域，此区域内的原子都具有稳定的“共价键”结构，变得不容易导电了。与此同时 N 区因失去一些电子带了正电，而 P 区因得到一些电子而带了负电。而且我自己还搜到过，反向接电时耗尽层会随电压升高而变宽。

我：“这个‘耗尽层’只是阻止 N 区的电子往 P 区跑而已？”

师：“现在 P 区加的负电压可以调到更负，显然这样‘耗尽层’是要加宽的。”

我：“这事我曾经了解过，和 PN 结的电容有关联。”

师：“你都想到 PN 结上寄生着电容了？”

我：“对啊，‘耗尽层’是介质，两边的半导体是极板啊。不是一个电容么？”

师：“那么你可曾想过‘点接触’和‘面接触’二极管会有何区别么？”

我：“想过了，‘点接触’二极管的结电容比较小。”

师：“能说出这个就行了。”

我：“那你说说为何反压高了‘耗尽层’就会加宽？”

师：“负电源接 P 区，会使 P 区内的电子向 PN 结

的方向靠拢，N 区接的正电源也会拉动 N 区的电子远离 PN 结。”

我：“这样结的附近就有更多的原子形成稳定的共价键结构了？”

这只是作者自己的一些理解。

师：“就是这个意思吧。总之‘耗尽层’宽了，N 区内部能导电的部分就被挤窄了。”

我：“所以 N 区的电阻就变大了是吗？”

师：“对啊，就是这个意思。”

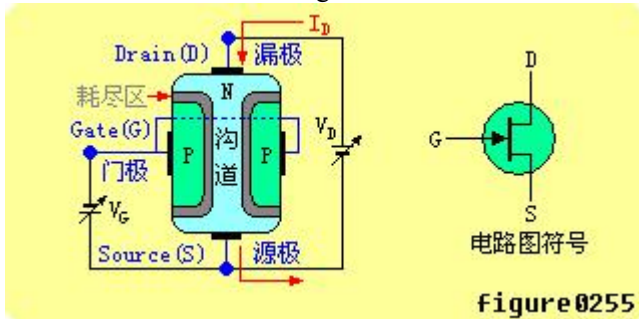
我：“有创意！一个 PN 结还能这么玩？”

师：“原则上 P 区加的负压越高，‘耗尽层’就越宽，最终可以把 N 区的导电部分彻底挤没了。”

我：“这就是‘截止’？这不会‘击穿’吗？”

师：“负压实在太高 PN 结就会击穿了。”

师：“收个图吧，一个实际的‘结型场效应管’的模型是这个样子的。（figure0255）”



我：“N 区能导电的部分叫‘沟道’啊？”

师：“很形像吧？其实叫‘管道’更形像一点。P 区像根腰带环绕在 N 型半导体上。”

注意“沟道”一词的英文为“Channel”，所以翻译时不应译为“管道”。

我：“P 区负压的高低会调节耗尽层的宽度，相当于调节这个管道的粗细？”

师：“导体的电阻当然是和横截面积有关系了，所以这沟道的电阻会变，从而导致流过沟道的电流  $I_D$  也随着变。”

我：“这倒是一个完美的‘电压控制电阻’的模型了。”

师：“只能说‘部分完美’，不是特别的理想。”

师：“完美之处就在于，它真是一个用‘电压’控制的电阻。它不用电流。”

我：“因为 P 区接的负电，P 区到 N 区是反向接电的。”

师：“没错，所以说从 P 区到 N 区只有很小的漏电流，基本可以认为没有电流。”

我：“这就算‘完美’？好像没什么啊？”

师：“电压乘以电流就是功率，就意味着能量对吗？”

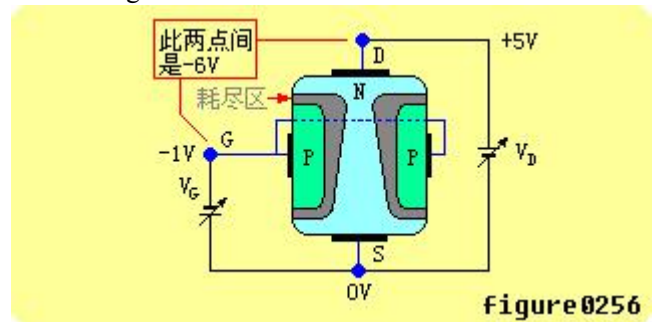
我：“控制这个沟道不用消耗能量？因为只用电压而电流是 0？”

师：“你改变沟道的电阻很省力，只要能供出电压就行。根据以前讨论的‘内阻’，可以看出接 P 区的这个负电源  $V_G$  内阻大点也没什么关系。”

我：“因为 P 区到 N 区是反偏的 PN 结，‘电阻’

更大。”

师：“还就是这样。现在我们看一下它不完美的地方。（figure0256）”



师：“就这个图（figure0256）来说，N 区的 D 极接了 +5V，S 极接了 0V。而 G 极接的 -1V 是相对 S 极为 -1V，它相对 D 极其实是 -6V。”

我：“这个反向电压还不是均匀的？”

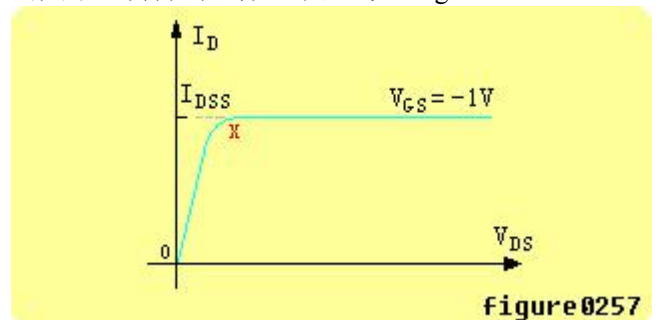
师：“所以耗尽层的宽度也不是均匀的，靠近 D 极由于反压高，耗尽层就宽，靠近 S 极耗尽层窄。”

我：“原来是个喇叭口形状的沟道。”

师：“如果我保持 G 极电压 -1V 不动，我把 D 极的电压调高到 +10V，那么靠近 D 极的耗尽层就会更宽。喇叭筒就被收紧了。”

我：“这沟道的电阻并不只和 G 极的电压有关系？”

师：“实际上我们若保持 G 极电压 ( $V_{GS}$ ) 为 -1V 不动，然后看 D 极电压 ( $V_{DS}$ ) 与 D 到 S 间电流 ( $I_{DS}$ ) 的关系，会得到这样一个曲线。（figure0257）”



我：“又是‘伏-安’，电压与电流之间的关系怎么总是曲线？烦死了。”

师：“它要是个直线当然很舒服了，直线就是个完美的电阻了。”

师：“不过这完美之中也包含着完美，你看一下那个 X 点左边到 0 点之间的一段线，有点电阻的意思吧？”

我：“对，近似于一条斜直线。”

师：“所以当  $U_{DS}$  很小时，这个沟道还真是一个很实在的电阻。但  $U_{DS}$  高过 X 点之后，从 D 到 S 的电流就几乎恒定不变了。”

我：“又是恒流啊？”

师：“对，这说明随  $U_{DS}$  增大，沟道的电阻也增大，电压除以电阻就是恒定值了。”

我：“和普通的三极管有一拼啊？”

师：“所以 X 点是个关键，当  $U_{DS}$  刚好在这点时，靠近 D 极的耗尽层刚好把喇叭筒收到最紧。”

我：“这要收到最紧不应该断路吗？那电流就应该没有了，不是恒定在某个值上吧？”



师：“喇叭筒在  $U_{DS}$  的作用下收到最紧，这叫‘预夹断’，此时从 S 到 D 运动的电子不是完全挡住过不去，而是从一个缝隙中玩儿命挤过去。”

我：“‘貌似’切断，藕断丝连。哈哈。”

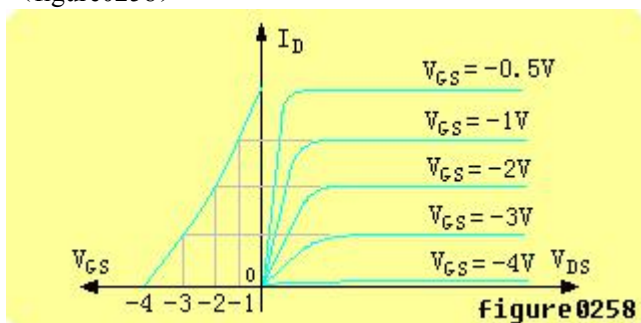
师：“所以  $U_{DS}$  高过  $\times$  点后，这个缝隙会随  $U_{DS}$  升高而逐渐拉长，电子想过去就越费劲。”

我：“所以它‘恒流’了？”

师：“你想让耗尽层把沟道挤断，就要让 G 极电压更负一些才行。”

我：“这沟道真正挤断就是‘截止’了？”

师：“对。传个图给你，看看 G 对 S 的电压，D 对 S 的电压和 D 到 S 的电流这三者之间的关系吧。（figure0258）”



我：“和普通三极管类似啊？总是三者之间的关系啊？”

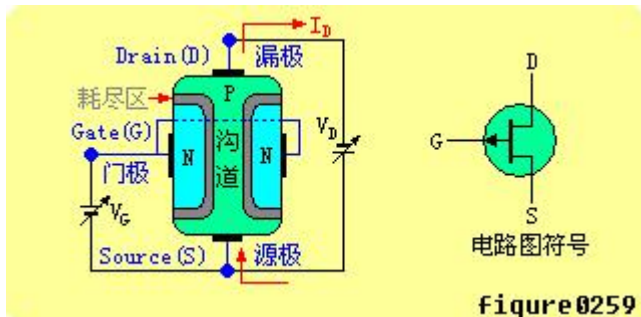
师：“没办法，如果沟道的电阻只与 G 对 S 的电压有关就好了。这种器件还没诞生，恐怕要等着你把它们研究出来了。”

我：“等我来，我不入地狱谁入地狱？”

师：“好，现在我们看一下这个‘结型场效应管’能不能像三极管那样当开关使。”

我：“这东西要想截止，需要在门极 G 加负电压啊？”

师：“N 沟道嘛，我们也可以用 P 沟道的管子。”



我：“这 P 沟道的也别扭。它的门极 G 输入 1 时截止，输入 0 它导通，反了。”

师：“没反，PNP 的三极管不也是这样子吗？”

我：“它的 DS 两极之间是负电压。”

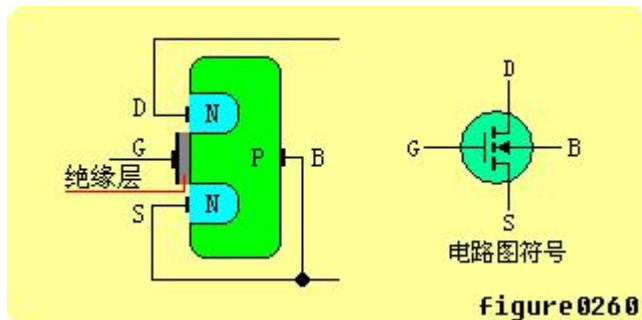
师：“这不也跟 PNP 的三极管一样吗？”

我：“我总是觉得别扭。”

师：“这种管子门极 G 接 0V 时它是导通的，想截止需要在门极加电，加电极性要看沟道是 P 还是 N，这叫‘耗尽型’场效应管。”

我：“还有别的型吗？控制起来和 NPN 三极管类似的？”

师：“那我再说一下这个图。（figure0260）”



师：“我先拿一块 P 型半导体，上面做出俩 N 型的坑。我想看一下怎样能在两个坑之间导电。”

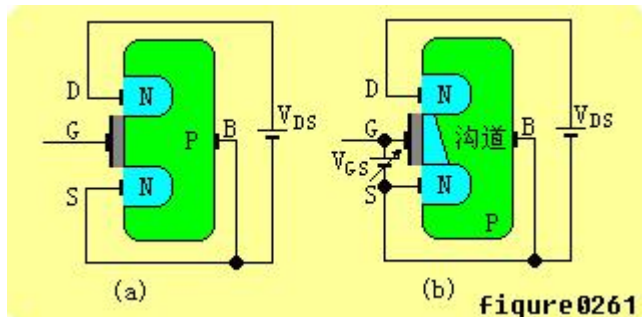
这块 P 型半导体称“衬底”。

我：“你这个图不就是一个 NPN 型的三极管吗？”

师：“这还真是个 NPN 的结构。有点意思。”

我：“有啥意思？两个 N 型坑一个相当发射极，一个相当集电极，那个 P 型区要不通电这俩坑之间没法导电啊？”

师：“看图（figure0261），那个 S 坑接电源（ $V_{DS}$ ）负端，D 坑接电源（ $V_{DS}$ ）正端，P 型区我也把它接电源（ $V_{DS}$ ）负端，相当于 P 型区和 S 接一起。”



毫无疑问从 D 坑到 P 区是不能导电的，因为 N 接正 P 接负，这是个反向接电的 PN 结。S 坑到 P 区呢？如果 S 坑比 P 区低 0.7V 的话那可以导电，现在它也不低啊？也不能导电的。就算 S 坑到 P 区能导电，S 坑到 D 坑之间还是不能导电，这根本就是两个“背靠背”的 PN 结嘛。

我：“这样也没戏，俩 PN 结没有一个是正向接电的。”

师：“我在俩坑之间的 P 区上做一个绝缘层（灰色部分），如果是硅的话那做一层二氧化硅最方便了。二氧化硅之上我再做一层铝箔（黑色部分）。”

我：“做镜子么？玻璃上边加一层铝？”

师：“我把这层铝当一个电极（G 极），通上正电（ $V_{GS}$ ），还要逐渐加压，加够了电压那么玻璃下边的 P 型硅表层就会变成 N 型硅。”

我：“你这是做了一个电容吗？铝和 P 型硅是电极，玻璃是介质？”

师：“对啊，是个电容。铝电极上通了正电，那么 P 型硅中的电子就会被吸到绝缘层下边聚起来。”

我：“P 型硅中不是空穴吗？”

师：“那我说铝电极上的正电场把空穴推到下面去行吗？要注意‘少子’！”

我：“想起来了还有少子。P 型半导体中的少子就是电子了。”

师：“玻璃下边这个 N 型层成了连接两个 N 型坑的‘沟道’，这时两个 N 型坑之间就能导电了。”

我：“这东西和那个‘结型场效应管’也就一样了？”

师：“对，有了沟道这东西就可以像‘结型场效应管’一样来看待，但还是有所不同的。”

我：“这家伙的沟道不是本来就有的，而是在 G 极加了正电压之后才有的。”

师：“而且随着 G 极电压升高而加宽，所以这东西是‘增强型’的场效应管，不是‘耗尽型’的。”

此种器件也可以做成“耗尽型”的。

我：“它的沟道也是从窄到宽？”

师：“对，这也是与 D 对 S 的电压有关系。”

我：“这东西也不是完美的压控电阻。搞出这个东东干嘛呢？有‘结型’的就很好了？”

师：“它的铝电极和 P 型硅之间隔着一层玻璃，所以从 G 极到 S 极理论上应该是一丁点电流都没有的。就算有漏电也是微乎其微的。”

我：“对啊，结型管 G 到 S 之间是个反偏的 PN 结，漏电要比这层玻璃大的。”

师：“所以这个结构叫‘金属-氧化物-半导体’，记做‘MOS’，也就是‘Metal - Oxide - Semiconductor’。”

我：“金属就是一层铝，氧化物就是二氧化硅，半导体就是 P 型硅。”

师：“对，这东西也叫‘绝缘栅’型场效应管。”

我：“‘栅’是个啥？”

师：“这个‘栅’其实就是‘门极’，我们常称其为‘栅极’。”

我：“我听说过‘CMOS’摄像头。”

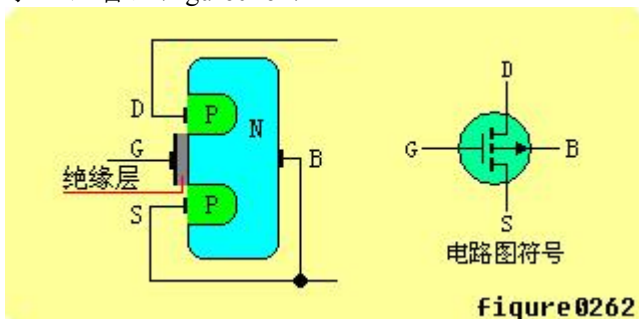
师：“CMOS 与‘集成电路’有关，这种 MOS 管很适合制造‘集成电路’用。”

我：“我电脑中的 CPU 就是用这种东西做成的？”

师：“对啊。我刚给你的图是 P 型硅上做两个 N 坑，沟道是 N 型，这是 N 沟道的 MOS 管，简称 NMOS。”

我：“还有 N 型硅上做两个 P 坑的吧？叫 PMOS？”

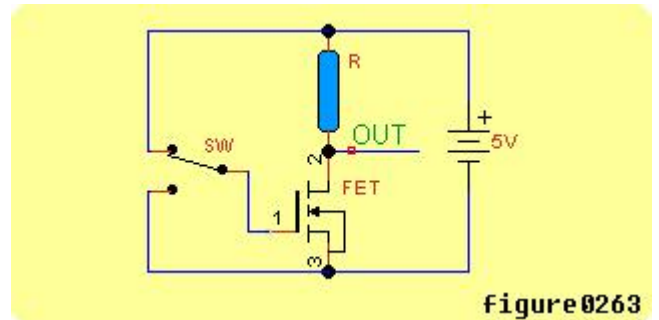
师：“有啊。NMOS 相当于 NPN 管，PMOS 相当于 PNP 管。（figure0262）”



师：“如果一个 NMOS 和一个 PMOS 组成一对，这就叫 CMOS。就是‘互补（Complementary）’金属氧化物半导体。”

我：“还得俩一块儿用？够麻烦的。”

师：“一点都不麻烦，你先看看这个图，用 MOS 做开关。（figure0263）”



我：“这 MOS 管的门极不用串电阻吗？”

师：“这是‘绝缘’栅啊？没有电流要电阻有啥用？”

我：“它不会击穿吗？”

师：“会，那层绝缘用的玻璃很薄，抗不住过高的电压。”

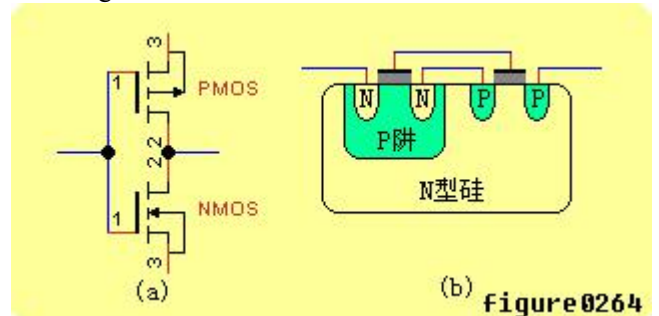
我：“还是应该有电阻限一下电流吧？”

师：“这绝缘层可不像 PN 结那样还能恢复。”

我：“限流也没用是吗？”

师：“你得确保门极加上正确的电压，它不用电阻限流。”

师：“我若把一个 PMOS 和一个 NMOS 这样连接，就能得到一个的‘非’逻辑电路。这就是所谓的 CMOS 了。（figure0264）”



更常见的工艺是以 P 型硅为衬底制作“N 阱”。

我：“就是说如果输入是高电平，那么底下的 NMOS 导通，上面的 PMOS 截止。输入是低电平，则上面的 PMOS 导通，下面的 NMOS 截止？”

师：“就是这样，根本不用考虑怎么接电怎么上拉之类的东西。它就等同于一上一下两个单刀单掷开关。”

我：“这个电路不论输出是 0 还是 1，它输出电阻都是一样的？”

师：“一样，而且输出电阻还不小，性能很好。”

我：“它输入电阻还特高，绝缘的栅嘛。”

师：“是啊，G 极到 S 极之间是绝缘的。普通三极管 B 极到 E 极是个 PN 结，还正向接电的。”

师：“MOS 管的 G 极加上充足的电压后，它沟道电阻能小到只有几个欧姆，最多也就几百欧，有些特殊的 MOS 管能小到 1 欧姆以下。”

我：“用普通三极管不行吗？上面一个 PNP 下面一个 NPN？”

师：“未必不行，但肯定没有 MOS 管方便。（b）图是这两个 MOS 管的制造方法。”

我：“俩管在同一块硅片上造啊？”

师：“这是关键，同一硅片上制成多个晶体管并

连成电路，就叫‘集成电路’了。我们以后大量使用‘集成电路’，暂时不用独立的场效应管。”

我：“又是一个用不到的。我们就是一个 NPN 管通杀一切吗？”

师：“一个 NPN 能解决的问题，我们不会去用一个 NMOS 的，少些麻烦。”

我：“怎么又麻烦了呢？刚说过这东西简单啊？”

师：“MOS 管的 G 极相对 S 极或 D 极都是绝缘的，就像一个电容，所以 G 极如果落上一些电荷的话，这些电荷无处可去。积聚起来的电荷可能把那层绝缘层击穿的。”

我：“这么脆弱啊？”

师：“刚说过了，那个绝缘层太薄了，扛不起太高电压，实际使用 MOS 管时也不能给 G 极加上太高

的电压。”

我：“可也不能太低吧？沟道电阻和这个电压有关系啊？”

师：“电压够了就行了，这不能多多益善。MOS 管平时储存时 3 个电极必须是短路在一起，或者要用特殊的包装材料防静电。”

我：“我买电脑主板和硬盘都有个灰色的包装袋，听说那个是防静电的？”

师：“焊这管子时也得注意，电烙铁的头也可能带着电荷的。”

我：“真够累的，咋就没有个完美的晶体管呢？”

师：“就等着你发明出来了，人类的未来全靠你了。再见了英雄。”

应该说场效应管确实有一项独特的优势，那就是省电，结型场效应管门极和沟道之间就是反向接电的 PN 结，MOS 型场效应管的门极与沟道间干脆就是绝缘的，控制门极只需付出电压而几乎无需电流，自然功率也就微乎其微了。进一步讲，场效应管对前级电路的“内阻”没有什么要求，大小都无所谓。

然而此优势并不完美，无论是反偏的 PN 结还是绝缘的栅，门极都寄生的一个“电容”，这是比较难受的。首先电容影响管子的工作速度，因为门极上的控制电压想高上去，必须给这个寄生电容充足了电才行，这个电压想低下来，也要等电容放电，这都是需要时间的。而且这个电容导致了场效应管实际上也不那么省电，它充电时还是需要电流的嘛，只有当它充满了电使 G 极达到的稳定的电平状态时才不需要电流了。看来场效应管想做得好，减小这个寄生电容是很重要的。

放狗搜了下“场效应管 电容”，很多页面都提到“MOS 管”的电容，看来对 MOS 管来说，寄生电容产生的影响比较大吧。点开一篇文档看了下，门极对 D 极和 S 极都有电容，D 极和 S 极之间也有电容存在。其它的内容看不大明白。继续搜“场效应管 速度”，找到一篇题为《MOSFET 的开关速度》的文章，此文章中的一些说法让我困惑，比如“**MOSFET 只靠多子导电，不存在少子储存效应，因而关断过程非常迅速**”，这个“少子储存效应”是个啥？还有“**MOSFET 结构中所附带的本征二极管具有一定的雪崩能力**”，MOS 管里居然还有个“本征二极管”？它怎么还“雪崩”呢？真是搞不懂啊。



## 本节补充说明

在学习了场效应管之后，我们需要了解几个简单的问题。第一，我们以前讨论的“三极管”和今天讨论的“场效应管”其实统称为“三极管”，因为它们都是引出三个电极的。当然这个说法不很严格，对于 NPN/PNP 型三极管和“结型”场效应管来说确实引出三个电极，而一些 MOS 管有时会引出四个电极，其中有一个电极连接的是“衬底”，也就是图 (a) 中的 B 极。这种情况比较少见，通常衬底在管壳内部就与源极相连了，见图 (b)，因而绝大多数 MOS 管仍是引出三个电极。

那么大家都叫三极管，具体又如何区分呢？那些 NPN/PNP 型三极管，我们称其为“双极结型 (BJT: Bipolar Junction Transistor)”三极管，场效应管又分为“结型”和“MOS 型”，“结型”场效应管都是“耗尽型”的，“MOS 型”之中再细分成“耗尽型”和“增强型”两类。原则上 MOS 管的“耗尽”和“增强”在其电路图符号中也应有所表达，这使得电路图符号有点乱。很多图纸都不是特别严格的使用电路图符号，我也就不做那么细致的考证了。

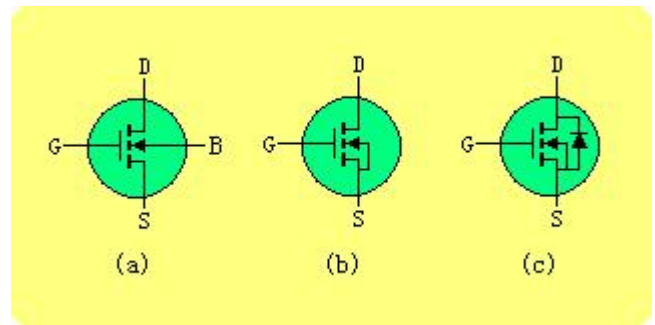
我们经常看到如图 (c) 所示的 MOS 管电路图符号，在源极和漏极之间有一个二极管，这个二极管是寄生的，因为“衬底”和源极漏极之间本来就是 PN 结嘛。当“衬底”和源极相连时，它和漏极间的 PN 结就表现为一个二极管。很多时候我们不在电路图符号中画出这个二极管，但它是客观存在的。我个人认为只要是 MOS 管都会寄生这个二极管的，但也有一种说法是只有那类可通过大电流的“功率 MOS 管”才有这个寄生二极管，我不是研究微电子制造工艺的，对此我无法给出确切的结论。

这些三极管的电路图符号中，总是用一个箭头的指向来区分不同的类型，有时我们不得不死记硬背，如“内 P 外 N”表示“箭头指向内部的是 PNP，指向外部的是 NPN。”但场效应管是反着来的，“内 N 外 P”。2lic 论坛上的 tyw 网友（我们尊称他“T 叔”）曾给出过一个很滑稽的方法来区分 NMOS 和 PMOS：“箭头当做一个屁 (P)，放屁肯定是从内向外放，所以箭头指向外的是‘屁 MOS (PMOS)’。”

这种“放屁记忆法”倒也不错，如果你非要一个有技术含量的解释，我可以告诉你箭头总是指向 N 型半导体，或者指向 N 沟道，而箭尾的指向相反。即使是二极管的符号也是这样的。

以后当你开始大量阅读电路原理图时，可能会对电源的表示法感到困惑，较常见的表示法是把电源的两端分别称为 Vcc 和 GND，但我们也常见到“Vdd/GND”这样的表示法，还有时是“Vcc/Vee”或者“Vdd/Vss”，更有甚者是“Vcc/Vee/GND”。现在我可以告诉你这些表达方式是含义了：“电源标有 Vcc 的一端，是给三极管的集电极 (C 极) 供电的，所以带字母 cc。其它的还要说吗？Vee 是给三极管发射极供电的，Vdd/Vss 对应着场效应管的漏极和源极，至于 GND，它代表着电路中的‘参考点’，原则上跟电源没关系，只是我们总选择电源的某一端做 GND 而已。如果你看到电路图中同时有‘Vcc/Vee/GND’，那这几乎可以肯定是正负双电源供电，GND 在电源中间某个点。”

最后我们还要谈一些语文方面的内容，首先是“栅”这个字的读音是什么？你可能马上想到了“zhà”，以及单词“栅栏 (zhà lán)”。注意在我们谈及电子技术时，这个字往往读作“shān”。实际上“栅栏”本来应该读作“shān lán”的，就如同“垃圾”本来是读作“lè sè”一样。北京前门外有条商业街叫“大栅栏”，正音是读作“dà shān lán”的，转化为北京的方言带上“儿话音”，就成了“dà shǐ lǎn’er”了。另外“MOS”这个词又是什么读音呢？这算是英国语文了，按国际音标好像应该读作“冒司”，而我当年的老师却读做“摩司 (sī 轻声)”，“CMOS”读作“西摩司”。这音译有些方言的味道，其实不是音译来的词也有特定的读音，比如前面讨论的“反馈 (kuǐ)”，机械制造行业有个词“切削 (xuē)”，这些都已经约定俗成了，大家就跟着这么读吧。



## 小花絮 神奇的三极管

我觉得应该盘点一下俺叔寄回来的那一箱子究竟都有些什么元器件了，也许就有什么 2N3904 之类的东东，这就可以不上中关村受刺激去了。于是我在床上摊开几张报纸，把那一箱东东都翻出来摆了半张床。很幸运，2.2K 和 300 欧的电阻都找到了，C# 所选的 510 欧和 5.1K 的电阻也有，还有其它各种阻值的，乱乱的一大堆。6x6 的按钮开关也找到了，和一些拨动开关装一个袋子里，也有几十个吧。早就应该彻底整理一下这个宝箱，哪至于自己跑去中关村买那什么“Rukycon”啊。

还不错，箱子底上还真找见了一大包三极管，里边分了很多小包，收集了一下也有十来个吧。小袋子上写了型号，大体看了一下，有 C9014、C9012、S8050、S8550、2N3906，还有 C945 等等吧。除了 2N3906 之外其它的都是哪国的型号呢？搞不清楚。另外在一个装有 1N4001 二极管的塑料袋里找到了几个 78L05，这又是什么东西？

居然没有 2N3904，不过至少是有几个 2N3906 的，C# 给我发了这个管子的 PDF 文件，我大略看了一下，它与 2N3904 差不了多少，某些指标要逊色一些，这是个 PNP 管，PNP 的比 NPN 的要差吗？在 GOOGLE 上搜了下 C9014 和 C9012，这两个果然是三极管，完整的型号应该是 KTC9012 和 KTC9014，是一家名为 KEC 的韩国公司生产的。这个 KTC9014 是 NPN 管， $\beta$  值最大竟然是 1000！就用这个代替 2N3904 吧。

又搜了下其它几个型号，很幸运，各个管子的 PDF 文件都找齐了。KTC9012 和 S8550 也是 PNP 型管，S8050 和 C945 是 NPN 的，也不知道干嘛要买这么多个型号，一颗 2N3904 不能通杀所有的 NPN 管吗？

那个 78L05 居然是个“三端稳压器”，像是一个集成电路而不是三极管，给它通上超过 5V 的直流电，它就能输出一个 +5V 的稳定电压，输入电压高到 10 几伏也没关系。难怪 C# 总爱拿 +5V 当电源，原来有专门的集成电路能提供这个电压。

## 2005-07-30：有趣的三稳电路

所谓“三稳”电路，是对“双稳态”、“单稳态”和“无稳态”这三种电路放一起之后再来个简称，这可不是我发明了啥新鲜玩意儿拿出来唬人哦。

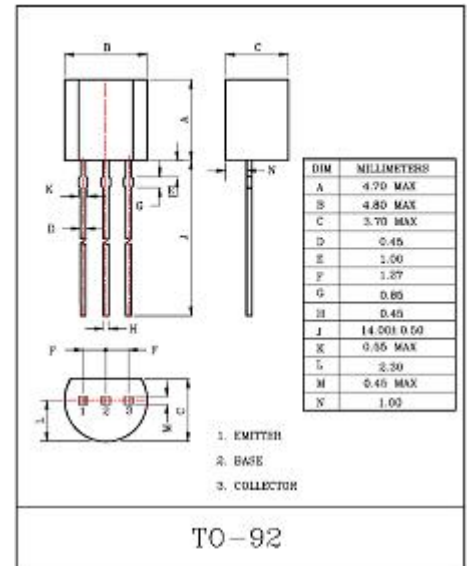
等我真的要焊出一个“双稳态”试验电路时，我才发觉以前做的计算全白搭了，因为 300 欧和 2.2K 的电阻都是按“+5V”电源电压计算的，我所有的料都备齐了，唯独没有这个电源。7 号的电池盒我上回在中发只买了两个，只能凑出 3V 来。上回叔叔递回来那个电池盒是 4 节 5 号的，用于干电池的话那是 6V 输出，用 4 个镍氢充电电池则输出 4.8V。你说怎么偏偏就是 5V 的电源呢？

或者那个 78L05 可以用一下吧？我想把 4 节干电池的 6V 电压接到 78L05 上，然后它就能输出稳定的 5V 了。不过这东西毕竟没用过，不太敢下手。要不就用 4 个充电电池吧，4.8V 离 5V 也不远了，何况我要用的 KTC9014 的  $\beta$  值可是不小，电源电压低那么一点应该是可以吧？其实也无所谓了，反正 C# 让用 510 欧和 5.1K 的电阻，电源也就那么凑合一下吧。

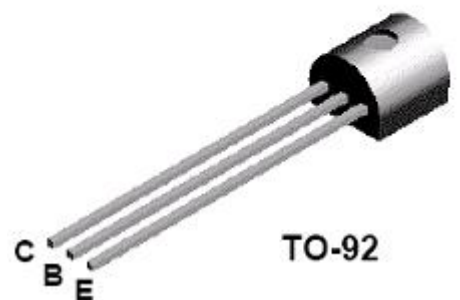
实际上镍氢电池刚充足电时电压要高出 1.2V 的。做三稳电路的实验对电源电压要求并不非常严格。

定下了电源，剩下的事就是弄清 KTC9014 这个管子的三个引脚分别对应哪个极，这在 Datasheet 中应该可以查到。打开 C9014.PDF，果然有这个管子的“封装”图，端详了一下，这与 2N3904 的管脚排布应该是相同的。就是将管子印着型号的那个平面朝向我，最左侧的管脚是发射极，最右侧的是集电极，而中间的是基极。

坦白说这图看着有点别扭，或者说太“专业”了点，很像我老爸以前经常画的机械零件图。我觉得还是 2N3904.PDF 中的图很清楚，一目了然。当然了，这个图也有它好的一面，图上带着外形尺寸，可以看到相邻两个管脚之间的距离标示了大写字母“F”，表格中则给出了“F”为



# 2N3904





1.27 个 millimeters，就是 1.27 毫米啦。这个 1.27 取的很怪异，为什么不用个整齐一点的数呢？

不过这两张图倒是提醒我了，TO-92 封装的三极管，其管脚排列大概都是一样的吧？从左到右依次为 EBC，这会有例外吗？我已经下载了好几种管子的 Datasheet，或许应该把它们都看一下，应该能得出结论了。于是我依次打开了 2N3906.PDF 和 S8050.PDF 等各个管子的 Datasheet，果然这些管子的引脚都按从左到右依次为 EBC 的方式排列。不过打开 KTC945 的 Datasheet 之后情况出现了变化，这个管子的引脚从左到右依次为 ECB，集电极在中间而基极在最右侧，感觉怪怪的。

我突然想起了万用表上有个 hFE 档，这应该是用来测三极管的  $\beta$  值的，表的面板上有个 8 孔的小圆插座，左右都标了 EBCE 四个字母，NPN 管用左边 4 个孔，PNP 管用右边的。这 EBCE 中有两个孔都是 E，从上往下数有 EBC，从下向上数则是 ECB，恰好对应着 TO-92 封装的两种不同的引脚排序。我把万用表的电源打开，旋钮转到 hFE 那一档，然后把一个 C9014 插进 EBC 三个孔内，屏上显示了 476，这管子的  $\beta$  值有这么大？

接下来的焊接就没什么悬念了，这回我用了点小手段，先画了个 PCB 图 (figure0265)，元器件的排列与原理图相对应。我特别注意了两个按钮开关的方向，在 B1 和 B2 内部用红线画出相连的两个引脚，好利用其内部连通的特点。两根交叉的连线之间需要隔离，我想可以把上边的线挑起来搞成“拱桥”形，和下边的线分离开。最后我接上 4 节电池盒，打开电池盒上的开关，好神奇，怎么两个 LED 都亮了呢？

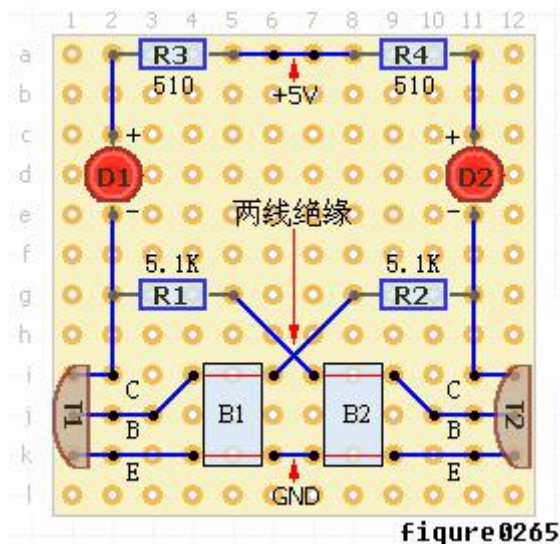


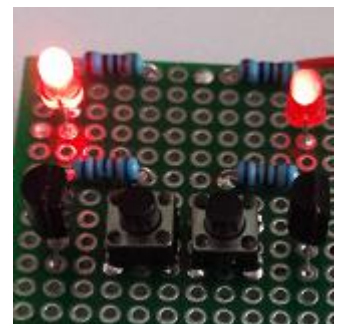
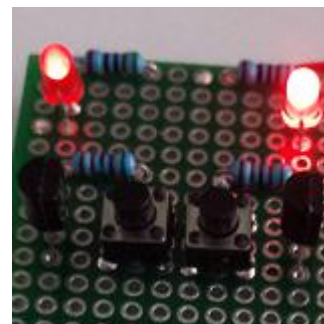
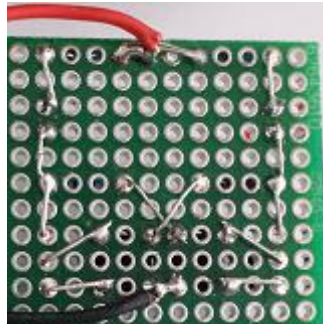
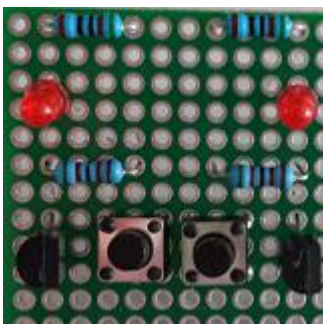
figure0265

其实没什么神奇的，焊在右边的 D2 比焊在左边的亮度高一点，显然三极管 T2 是饱和的。而左边的 D1 之所以也亮，因为它流过了 T2 的基极电流嘛。这个电流受 5.1K 的 R1 限制比较小，所以它要暗一点的。我感觉电阻 R1 和 R2 可以换成更大一点的，比如 10K，甚至再大一些也可能行，这样两个 LED 的亮度差异会更大。而且因为我用的 KTC9014 的  $\beta$  值有 476，小点的基极电流也可以让它饱和吧？但转念一想，这事也不是那么简单，饱和后三极管的  $\beta$  值会变小，小的基极电流即使让三极管进入饱和，是不是也不能使它维持在饱和状态呢？

反复拨动电池盒上的开关，每次都是右边的 D2 更亮，看来右边这个三极管 T2 总是首先饱和。我忽然有点后悔，应该把两个三极管的  $\beta$  值都测一下，那个  $\beta$  值大的管子应该是先饱和吧？现在只能推测可能右边这只三极管 T2 的  $\beta$  值大于左边那个。

按下右边的按钮开关 B2，两个 LED 的亮度交替发生了变化，再按下 B1，两个 LED 再次“交换”了亮度。我用万用表

的直流 20V 档测量了 T1 的集电极对 GND 的电压，显示为 2.831V，再测 T2 的集电极，只有 0.1V 多，T2 饱和是没问题的。至于 T1 的集电极，应该是 R1 上的电压加上 T2 的 BE 结压降 0.7V。现在看来 R1 两端是有约 2.1V 的电压，那么 T2 的基极电流就是  $2.1V/5.1K=0.41mA$  了。按下 B1 按钮让两个 LED 交替一下，重新测量两个三极管的集电极电压，果然交换了过来。看来通过 LED 观察两管的状态不是很理想，还是万用表能揭出真相来。



线路焊接

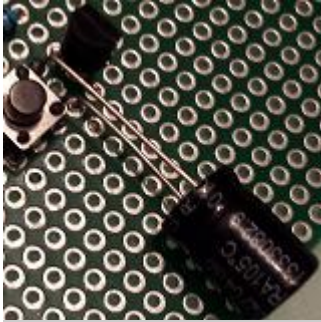
实验观察

接下来的事就是看看能不能在上电时让左边的 LED 先亮，我先按下右边的按钮不放，然后再接通电池盒上的开关，果然这回是左边的 LED 先亮了。之后我找出前些日子购买的“Rukycon”电解电容，在右边的这个按钮上并接了一个，电容的负极当然是接 GND 的。然后重新开关电池盒，这回也是左边的 LED 先亮，看来这个电容在一上电的瞬间确实是把右边三极管 T2 的基极“短路”到 GND 了。仔细地观察两个灯交替亮起的过程，

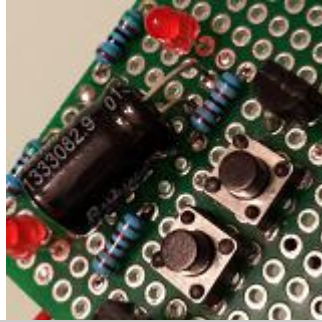


我还发现右边这个 LED 出现了“渐亮”的情况，就是从暗到亮有一个逐步变化的过程。这不是很显著，但通过两个 LED 的对比还是能感觉到的。我想这应该就是并联电容的作用，它在充电过程中逐渐抬高三极管 T2 基极的电压，这造成了流过 D2 的电流从弱至强。

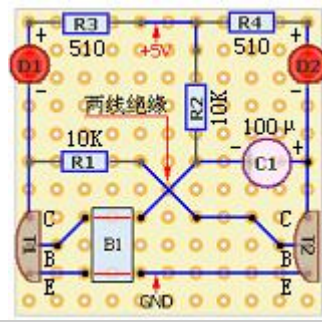
那么“加速电容”有没有作用呢？如果在电阻 R2 上并联一个电容，在上电瞬间这个电容会把 R2 短路，这相当于为左边晶体管 T1 的基极注入了一个瞬间的大电流，这也应该让左边的三极管抢先导通。我于是断开了右侧按钮 B1 并接的电容，而把它并联在 R2 上，这个电容的正极在 R2 右侧而负极在左，因为我觉得左侧三极管基极至多只有 0.7V 电压，不会比 R2 右侧电压高。再次开关电池盒，一切皆在意料之中，左边的 LED 先点亮了。



B2 并联电容



R2 并联电容



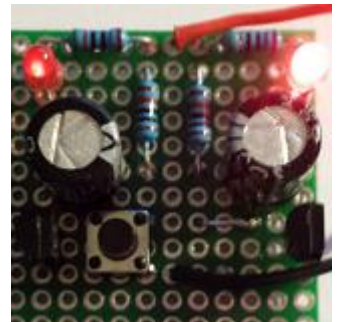
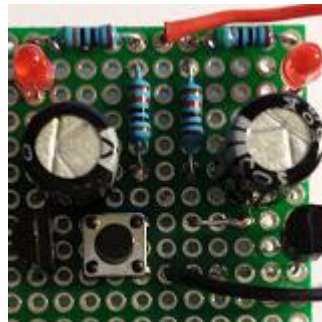
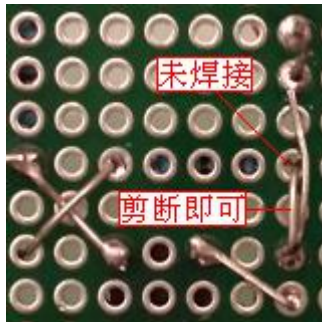
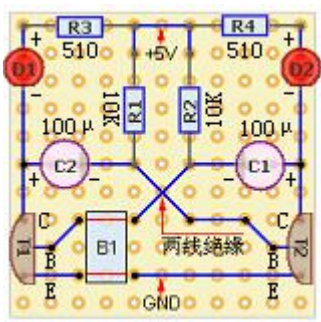
单稳电路

真没想到会这么顺利，那就把“单稳”和“无稳”也都试试吧。现在已经有 100μF 的电容并联在 R2 上，那我就把 R2 右端焊下来，把它扭上面去接+5V 电源好了。尝试了一下拆焊 R2，感觉有点心虚，我总怕烫坏了东西。我想还是新焊一个电路吧，反正这些元器件都是俺叔批发的，不用它留着干嘛？这次索性把 R1 和 R2 换成 10K 的看看效果也好。于是我再度画了一个单稳电路的洞洞板走线图，重新找了元器件焊了一个新电路。

当我接通电源之后，左边的 LED 亮了，同时我发现右边的 LED 也亮了起来进而逐渐熄灭了。把电池盒上的开关断开再接通，这次只有 D1 亮而 D2 没有反应了。我反复通断开关好几次，都是只有 D1 亮起而 D2 没有反应。D2 亮了又灭我可以解释原因，那就是 C1 在上电瞬间相当于短路，此时会有电流通过 R4 和 D2 注入 T1 的基极，当 C1 充满电之后就不会再有电流流过 D2 了，所以 D2 会亮一下又熄掉，C1 充满电后 T1 靠 R2 提供基极电流，可问题是为什么重新通断电源 D2 就没反应了呢？

按钮 B1 按下后 D1 的亮度就暗下去了，仍然没有完全熄灭，看来 R1 用 10K 的也是不够大，D1 仍然会被 T2 的基极电流点亮。D2 的亮度要比 D1 高，因为此时 T2 饱和了。松开按钮之后，D1 再次亮起来，而 D2 不是立刻就熄灭了，而是“渐暗”而后灭，这倒很像首次通电时的情景。

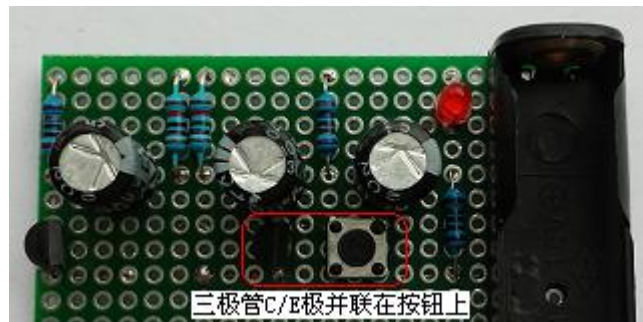
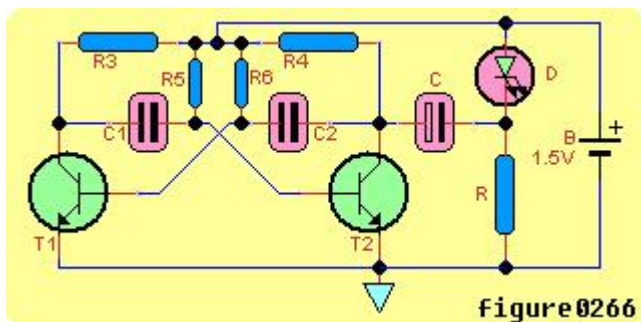
继续把这个电路改成“无稳”的吧，这次倒不用新焊一个电路了，因为我在焊接 R1 的时候留了个心眼儿。如下图左二所示，R1 引脚穿过焊盘孔后没有直接焊死在焊盘上，而是拐个弯焊到三极管 T1 的 C 极那个焊盘上，这样 R1 的这个引脚就不必拆焊，只要剪断它就可以从焊盘孔里抽出来，再把它转焊到+5V 线上，再补焊电容 C2，这就可以了。



无稳电路

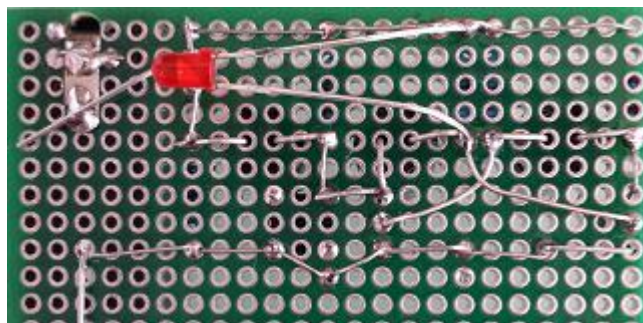
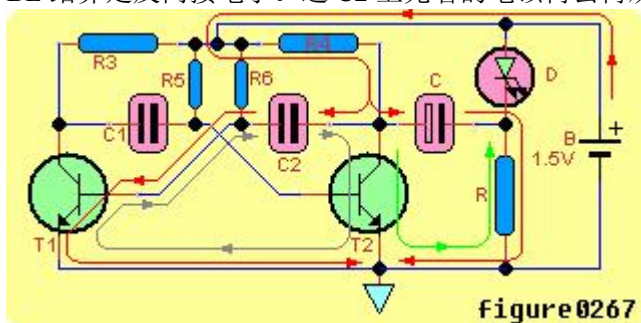
焊好电容 C2 之后，我打开了电池合上的开关，两颗 LED 像一双眨巴眨巴的眼睛一样交替地亮了起来，还真挺好玩的。而且我马上又想起了以前做的那个用一节电池点亮 LED 的实验，这电路有可能用一节电池吗？现在看应该是没这可能，但我觉得可以把今天的电路和以前的做一个结合，如图 (figure0266) 所示，显而易见晶体管 T2 和电阻 R4 是具有双重作用的。一方面它和左边的 T1 构成无稳电路，另一方面它又和右边的 RC 微分电路配合在电容 C 的右端制造负电压。即当 T2 截止时经过 R4 充电的电容不仅是 C2，还有右边的 C，而 T2 饱和时右边的电容 C 也会通过它的集射级放电，这样 LED 就可以亮了。

说做就做吧，把以前焊好的“1.5V 点亮 LED”的板拿出来，附上一个“双稳”电路改造一下。由于 R4 借用了以前电路中的 1K 欧电阻，所以 R3 这回也使用了 1K 欧的，R5/R6 还是 10K，C1/C2 还是 100μF。焊好电路之后我装上了电池，这个小红灯，真的闪动了起来，只是闪的有点慢，大概要 1 秒多钟才会亮一下。



这点小小的成功让我很是兴奋，这回答了我以前提出的问题，三极管果然可以和按钮开关一样，T2 饱和之后电容 C 就会沿着它的集极到射级之间放电，从而在 LED 的阴极制造出负电压来。而仔细观察我拼凑出的电路图，我又发现了一个新的问题：T2 截止时经 R4 充电的电容还有 C2 呢，它左端经 T1 的 BE 结接 GND，右端充上 1.5V 电压。那么 T2 饱和之后，C2 的右端降为 0V，它左端是不是也会形成负电压呢？

电容两端电压不能突变，C2 的左端必然也跌到负电压。但我搞不明白的是，C2 又是如何放电的呢？从图（figure0267）中可以看出，当 T2 截止时，电容 C2 和 C 是沿着红色箭头充电的。那么 T2 饱和呢？C 沿着绿色箭头放电这没问题，但 C2 会沿着灰色箭头放电吗？不会的，因为 T1 的射级到基极是不会沿着这个方向导通的，BE 结算是反向接电了。这 C2 上充着的电该何去何从呢？



1.5V 点亮 LED

我想不明白这个问题了，给 C# 写邮件吧，把今天的问题总结下全扔给他。至于 C2 左端是否会降到负电压，我倒是想出个办法检验一下：在电阻 R6（或者 R5）上并联一个 LED（上图右），如果 LED 可以闪亮，说明 C2 左端（或 C1 右端）出现了负电压，道理和电容 C 一样的。实验的结果在预想之中，并上的 LED 果然亮了。

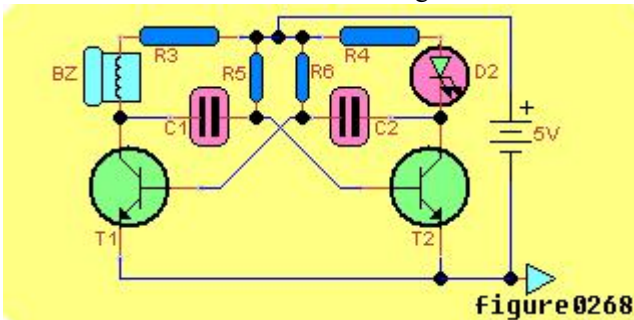
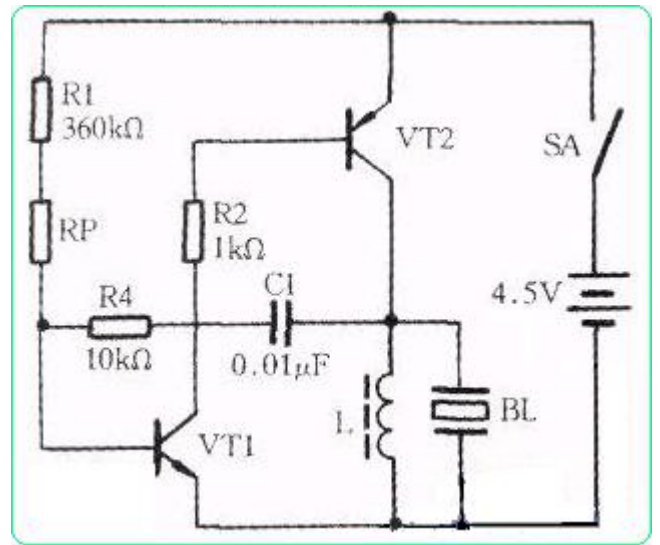


## 2005-07-31：要命的发射极

做了三个稳态电路的实验，心里本来是很满足的，但一觉醒来，又感觉心中空荡荡的，因为不知道接着该做些什么了。用三极管还可以控制蜂鸣器和继电器的，这个蜂鸣器应该有点意思，因为它会嘀嘀叫嘛。说句实在话，你说这要没点声光效果，学习这电子技术能有多意思呢？

翻出不久前搜到的那张控制蜂鸣器发声的电路图，认真端详了一遍，心中感到非常的泄气，完全弄不明白这个线路怎么会发出声来。按说三极管的原理咱已经学了，怎么会看不懂这个图呢？这才俩三极管啊？

不过我想这个蜂鸣器必然是因为有个不断变化的电压加到它两个脚上所以才会叫的，而这个电路也无非就是产生这种不断变化的电压而已。现在我至少可以用“无稳态”电路制造出这种变化的电压来，那么我若使用这样一个线路产生连续的脉冲信号供给蜂鸣器，蜂鸣器也应该会叫的吧？我曾经找到过一个无稳态电路接蜂鸣器的图（figure0201），那个蜂鸣器是接在无稳态电路的两个三极管的集电极之间。我不知道那样接有什么原因，但我觉得我这样接也应该可以（figure0268），起码值得实践一下。



首先我搞不懂大家为什么爱用 PNP 管？刚刚搜过的好几个网页，几乎清一色是 PNP 管。有个网友在一个论坛上贴的图是 NPN 管的，结果沙发位的大侠上来就说要换 PNP 管才行，我就觉得这 PNP 管非常别扭，怎么大家还都这么喜欢用呢？

第二，蜂鸣器为什么要接集电极而不能接发射极？毫无道理嘛！三极管 C 到 E 就相当于一个开关，饱和相当于开关接通，截止就相当于开关断开，蜂鸣器接在那个极都是被这个开关控制的，哪里会有区别呢？

我想做这个蜂鸣器的实验还是谨慎一点的好，这块儿有点争议，何况手头也没有蜂鸣器，不如先和 C# 讨论一下为上。晚上苦等到接近 10 点，C# 这家伙才慢悠悠地爬上网来。

我：“你还真来了，正等着你呢。”

师：“5.1K 和 510 欧电阻没问题吧？”

我：“算是可以吧。给你发邮件了。”

师：“我还没有收呢。”

我：“我有个想法。看图。（figure0268）”

师：“这个图没问题啊？电阻电容取值合适的话是可以响的。”

我：“怎么算‘取值合适’呢？”

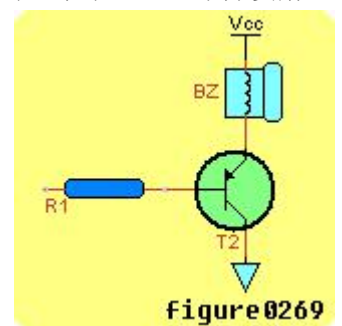
师：“电阻 R5 和电容 C1，电阻 R6 和电容 C2，它们 4 个决定了振荡频率。”

我：“与阻和容的乘积有关吧？”

师：“是啊，这说来话就长了。简单地设若  $R5=R6=R$ ， $C1=C2=C$ ，则振荡周期约为  $1.4 \times R \times C$ 。”

实践之前不妨看看其它人有没有用三极管和蜂鸣器做过一些东西，我于是上了 GOOGLE，搜了下“三极管 蜂鸣器”，竟然有不少人在问“用三极管怎样驱动蜂鸣器”的问题。这最简单不过了，怎么会有很多人不知道呢？

不过最后在一个论坛上找到了一个很有趣的帖子，楼主贴了个图（figure0269），说他设计了这样一个无源蜂鸣器的驱动电路，但被师兄批判了，说这电路不能用，必须把蜂鸣器挪到三极管的集电极去。我把这个图和以前 C# 给的图（figure0244）对比了下，心里十分费解。



我：“我还找到了这样一个图，你认为这有什么问题吗？（figure0269）”

师：“哈哈，又是这个东西。这也可以响。”

我：“为什么说‘又’呢？你见过这样的电路？”

师：“网上好多争论这个电路的。这个可以使，但是稍有不不太好之处。”

我：“有个家伙发贴求助，说他师兄把这个电路否了，不能用。”

师：“那么你的困惑是什么呢？先不管别人。”

我：“我首先不明白为什么非要用 PNP 管。好多人都用 PNP 管。”

师：“这跟他们选择的 MCU 有关系。那个 MCU 的端口电路特性要求他用 PNP 管。”



我：“MCU 是什么东东？”

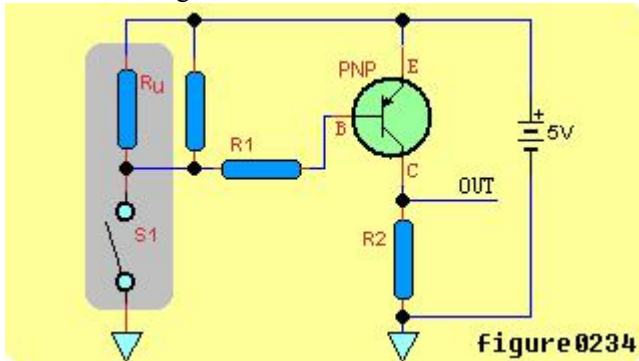
师：“先不管 MCU 了。你能猜出这个三极管前一级电路会是什么样子吗？”

我：“它前一级就是那个 MCU 吧？我不知道那是什么东西？”

师：“它前一级电路是在一个 MCU 内部，但这级电路必然等同于一个开关加一个上拉电阻。”

我：“这个上拉电阻还是个弱上拉吧？”

师：“对啊，所以它要用 PNP 管。这事儿我们早说过了嘛。(figure0234)”

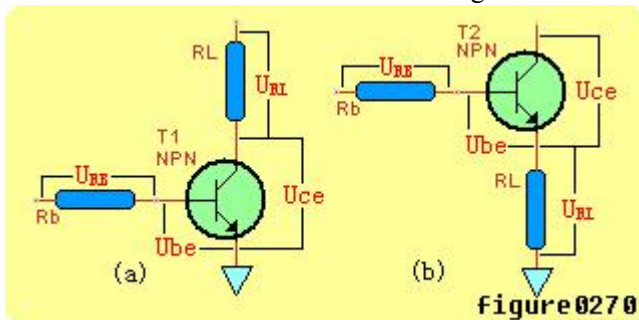


我：“这就用上啦？就这么简单？”

师：“你第二个问题是蜂鸣器为什么必须接集电极不能接发射极对吧？”

我：“我觉得把三极管看成一个开关，蜂鸣器接哪里都是一样的。”

师：“我们不妨把这个电磁的蜂鸣器简化成一个电阻  $R_L$ ，所以我们要分析这个图。(figure0270)”



我：“又换成 NPN 管啦？”

师：“NPN 和 PNP 道理都是一样的。”

师：“我先问你三极管 (a) 图中 T1 因为什么饱和的？”

我：“基极电流太大了呗。”

师：“基极电流大导致集电极电流大，所以集电极电阻  $R_L$  上的压降  $U_{RL}$  也大，这就把  $U_{ce}$  压低了，所以管子就饱和了。”

我：“对 (b) 图中的 T2 来说，电阻  $R_L$  接在发射极，那发射极电流大  $U_{RL}$  也大，E 极电位就升高了，同样把  $U_{ce}$  挤小了，管子也饱和啊？”

师：“E 极电位升高，这是一个关键点。请问发射极电位升高仅仅是挤压了  $U_{ce}$  吗？有没有同时挤压基极到射极的电压  $U_{be}$ ？”

我：“ $U_{be}$  也被挤了啊？ $U_{be}$  要是被挤到 0.7V 以下就没基极电流了，这管子就不能导通了？”

师：“假设  $U_{be}$  维持 0.7V 不动，E 极的电压升高，被挤的是  $R_b$  两端的电压  $U_{RB}$ 。”

我：“你是说基极电流是会降低的吗？ $I_B$  就是  $U_{RB}/R_b$  啊？”

师：“这就是矛盾所在啊。基极电流本来挺大的，但集电极电流一出现，管子发射极电压就抬高， $U_{ce}$  是变小了，然而基极对 GND 的电压也得高上去才能保持  $U_{be}$  大于 0.7V。如果  $R_b$  左端的电压固定的话，那么  $R_b$  两端电压受压缩，基极电流也就变小了，集电极电流再想进一步提高可就难了。”

师：“最后这三极管会锁定在一个‘基极电流不大不小，集电极电流不大不小， $U_{ce}$  不大不小’的尴尬状态，它不能饱和。”

真的是三个“不大不小”吗？此结论值得商榷。注意在 (b) 图中的三极管未画出集电极的电路连接，估且认为它直接连到电源 VCC 上。

我：“电阻换个位置有这么大差别啊？”

师：“因为发射极地位特殊。从输入角度看，基极电流从 B 极进入从 E 极流出，从输出角度看集电极电流从 C 极入也从 E 极出，这个发射极是输入输出‘共用’的。”

我：“这就叫‘共发射极’吗？”

师：“就是这个意思。所以发射极接了一个电阻，这个电阻会把输出和输入联系起来。或者说把一部分输出返回给输入。”

我：“这是‘反馈’啊？这俩字儿真是无处不在啊？”

师：“这个‘反馈’削弱了输入信号，所以叫‘负反馈’。”

师：“反馈那是相当重要的技术，像晶体三极管这么烂的东西，四处漏电还对温度敏感，你想用它做出像点样的电路，不用反馈技术简直不可能。”

我：“我们把它当开关就不用反馈吧？”

师：“当开关意味着我们用了它‘截止’和‘饱和’两种极端状态，这样用它很多影响它工作的因素都可以忽略不计了。”

师：“你用一个三极管把话筒出来的弱信号放大试试？你怎么保证放大了的信号是和话筒出来的弱信号一模一样呢？”

我：“用作放大电路就需要加反馈了？”

师：“还必须是‘负反馈’，要是‘正反馈’还麻烦了。喇叭里出来的全是‘呜——呜——’的火车笛声。”

我：“‘正反馈’就是返回来的东西加强了输入吧？话筒对着音箱也会出火车笛声。”

师：“那就是因为喇叭发出一点杂音从话筒回到放大器里，再从喇叭出来又进话筒中，再回到放大器里，就这样反复不断地加强，最后就‘振荡’了。”

上述说法不够严谨，首先不是说‘放大’电路中就一定不允许有正反馈，其次，也不是只要有正反馈就必然振荡的，尚需具备其它条件。这超出了本教程的讨论范围。

我：“要这样来看那位楼猪的师兄说得就奇怪了，他说这种把蜂鸣器接发射极的电路不能用。”

师：“他的意思是不好用吧？你想如果管子不饱和，那就必须重视  $P_{CM}$  这个指标的。”

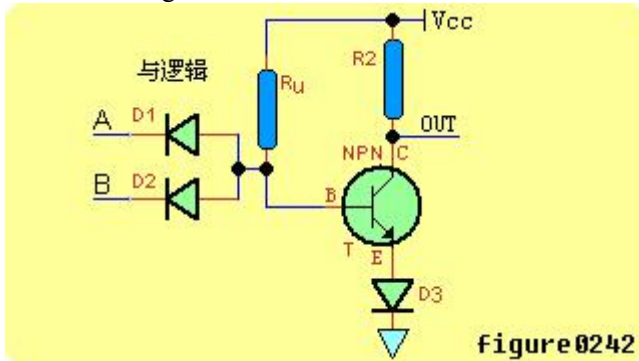
我：“ $U_{ce}$  不是非常的低，所以就有  $P_c = I_c \times U_{ce}$ 。管子上耗了一个功率。”

我：“这功率很大吗？管子会受不了？”

师：“它受得了这也是浪费啊？所以说这电路未必不能工作，但这样搞确实不太好。不要想当然地认为负载接哪个极都一样，其实不一样。”

我：“好吧，这个问题算是搞清楚了。”

师：“其实这个问题我们早就接触到了。记得这个图吗？（figure0242）”

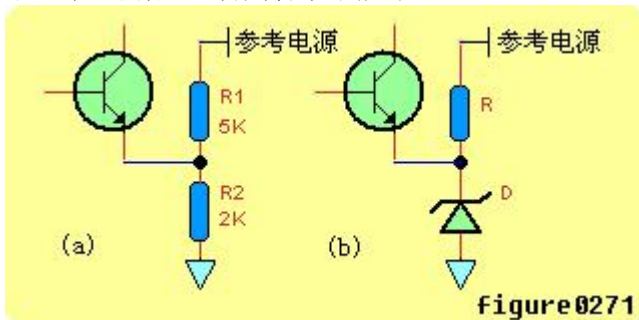


我：“发射极串个二极管 D3，这三极管就容易截止。”

师：“道理都相似，二极管垫高了发射极电压，所以三极管要想导通，那基极对 GND 的电压也就水涨船高了。”

我：“发射极是个门槛儿啊？”

师：“所以有时我们会利用发射极设立一个‘门限’（figure0271），要求三极管基极输入的电压必须高于这个‘门限’，否则管子不能导通。”



我：“（a）图是用 5K 和 2K 电阻串联分压后供给发射级吗？”

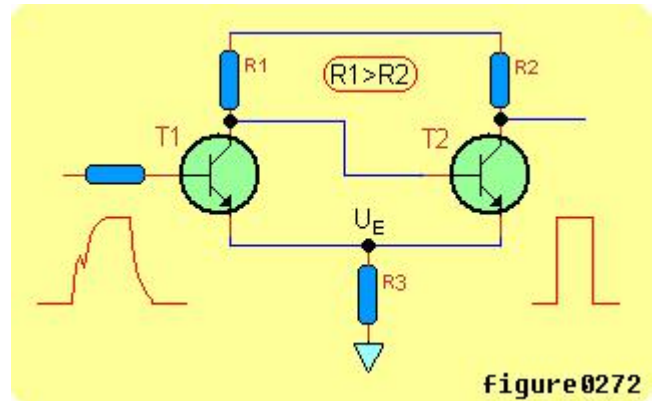
师：“是的，不过这不是很理想，因为如果管子导通了，那么会有电流通过晶体管的 C 到 E 极再到 GND，这个电流刚好也通过 R2，会影响分压的。”

我：“图（b）那个用稳压管的比较稳当。”

师：“对，稳压管 D 给三极管的发射极提供了一个‘基准电压’，而三极管相当一个‘电压比较器’。”

我：“三极管集电极电流反应了基极输入电压和基准电压之间的大小关系？”

师：“是的。我再给你一个很有意思的电路，两个三极管的。（figure0272）”



我：“两个管子的发射极共用一个电阻啊？”

师：“这是特色之一，特色之二是两个三极管的集电极电阻还一大一小， $R1 > R2$ 。”

师：“所以如果 T1 通而 T2 断，那 R3 上的电压  $U_E$  低；换成 T1 断而 T2 通的话，R3 上的  $U_E$  就高。”

我：“就是因为 R1 比 R2 阻值大？”

师：“ $U_E$  可以是 R1 和 R3 分压形成，也可以是 R2 和 R3 分压形成。全看两个管子谁通谁断。”

我：“那这电路有两个‘门限’啊？”

师：“当然是两个门限。现在看我给输入端加的那个脉冲。”

我：“眼熟，这脉冲是 RC 积分过的吗？”

师：“当然是由 RC 积分电路处理过的，还有个毛刺呢。”

我：“我想起了按钮开关的抖动。”

师：“当脉冲处在低电平时 T1 截止 T2 导通，这时 R3 上的电压是高的那个‘门限’。”

我：“所以脉冲的上升坡要升到较高时 T1 才能通。”

师：“没错，那个毛刺比较矮对不对？”

我：“这个毛刺对电路没有作用啊？”

师：“经过毛刺之后脉冲电平够高了，T1 一通 T2 就截止，这时 R3 上的电压就是低的那个门限了，因此脉冲的下降坡必须降对较低 T1 才能重新截止。”

我：“输出脉冲怎么就是个方的了？”

师：“当 T1 截止而 T2 导通时，R3 上的  $U_E$  有较高的电压，输入比  $U_E$  高 0.7V 时，T1 开始通而 T2 开始断，注意从这一时刻开始  $U_E$  就可开始向着那个低门限下跌了。而  $U_E$  跌下去一点的话，那么输入比  $U_E$  还高 0.7V 吗？”

我：“T1 的基极电压和发射极电压在同时变化？”

师：“对，基极电压在升高而发射极电压同时在下降。”

我：“ $U_E$  一跌下去就相当于 B 极的输入电压变得更高了？”

师：“所以三极管 T1 的 E 极和 B 极组成一个翘翘板，B 极电压上升而  $U_E$  同时在降，一出一入这个 T1 发射结上的电压可就大了。”

师：“这个 R3 对 T1 来说可不是‘负反馈’，它是正的，它加强了输入。”

我：“天啊，这又成正的了。”

师：“现在是两个三极管，有 T2 就不一样啦。”

师：“总之，T1 一旦开始通，R3 和 T2 就会帮助



它更快的导通；而 T1 一旦开始截止，R3 和 T2 就会帮助它更快的截止，所以我们能得到方的脉冲。”

我：“这个有意思，就是说我不论输入什么奇形怪状的波形，它出来的波形都是方的？”

师：“你输入的波形幅度要达不到高门限那还什么都出不来呢，所以那个毛刺被彻底滤掉了。”

我：“这个电路还是滤波器吗？”

师：“此‘滤波’非彼‘滤波’，它滤的是‘幅度’，不是‘频率’。”

师：“这个电路叫‘施密特触发器’，是由 Otto H.Schmitt 博士发明的。那年头还是使用真空管呢。”

我：“太有创意了。人家这脑子是怎么想的呢？”

师：“你看一下这个图，这个‘施密特’电路我们以后还会用到。（figure0273）”

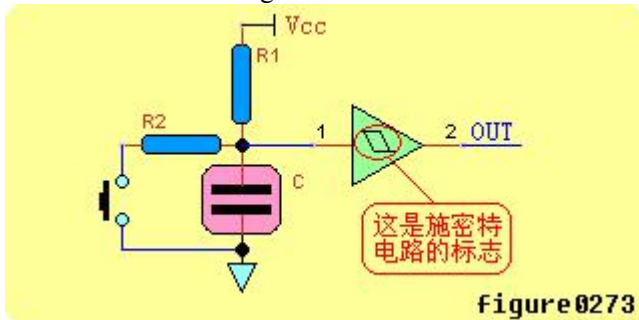


figure0273

我：“还真是按钮开关啊？RC 积分电路去掉开关的抖动，再用施密特电路给脉冲整个容？”

师：“这是给脉冲‘整形’，还‘整容’呢？”

我：“这就是你老土了，现在的美女一说整容都是连形带容一起整的，肋条都要打断一根的。”

师：“不跟你耍贫嘴了，最后透露给你一个小秘密：晶体管即使用做‘开关’电路，也不一定必须要‘饱和’和‘截止’的。”

我：“又变了？就受不了这种没准谱的。”

师：“我们的目的，是为了获得 0 和 1 两种电平，如果我定义 1 是 3.5V 而 0 是 2.5V，那就没必要让管子工作在‘饱和’和‘截止’状态。”

我：“那我认它就不是‘开关’电路。这有什么意思吗？搞来搞去的？”

师：“三极管如果不工作在‘饱和’和‘截止’状态，就能够获得更快的‘翻转’速度，就是从 1 变 0 或者从 0 变 1 的速度更快。”

我：“这就能做出更快速的计算机了？”

师：“没错，速度更快的计算同时也是更费电的计算机。呵呵。”

师：“以后说到集成电路时再跟你详细说吧。再见了。”

我隐约觉得这个“施密特触发器”应该是很重要的，因为它可用来处理按键开关的抖动，而按键开关将来肯定要用到，试问哪一台计算机没有“键盘”呢？所以我直接放狗搜了一下“施密特触发器”这个关键字。说句实在话，我已经习惯了看不懂搜出来的内容，比如“维基百科”上的这一句：“在电子学中，施密特触发器（英语：Schmitt trigger）是包含正回授的比较器电路。”“正回授”是个啥？难道就是所谓“正反馈”吗？

看不懂的就不看了吧，捡能看懂的看。这里出现了“比较器”电路，难道就是一个三极管在发射极加一个基准电压吗？应该不是这么简单，这一页上给出了一个用“比较器”实现施密特触发器的电路（figure0274），按我的经验，这个带着加号减号的三角框肯定代表了一大片我看不懂的电路，这就是所谓的“比较器”吧？

不过这页面中倒是对这个“比较器”做了点解释：

“当非反相（+）输入的电压高于反相（-）输入的电压时，比较器输出翻转到高工作电压+VS；当非反相（+）输入的电压低于反相（-）输入的电压时，比较器输出翻转到低工作电压-VS。这里的反相（-）输入是接地的，因此这里的比较器实现了符号函数，具有二态输出的特性，只有高和低两种状态，当非反相（+）端连续输入时总有相同的符号。”

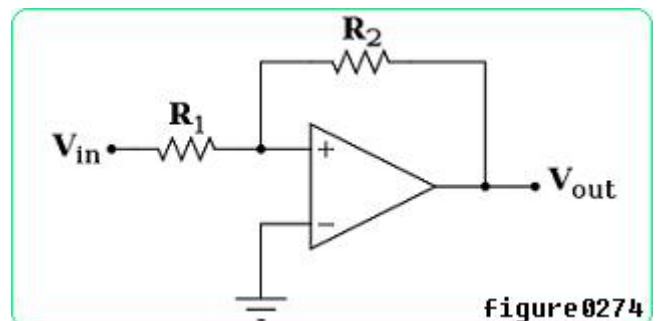


figure0274

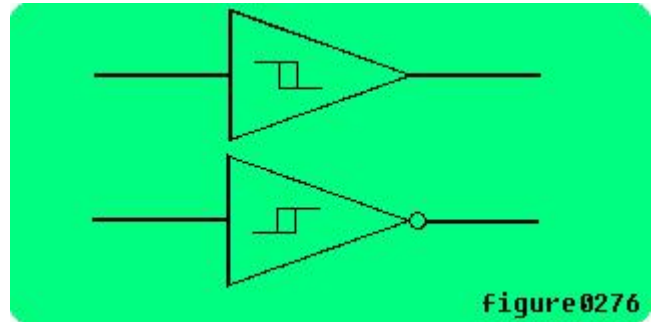
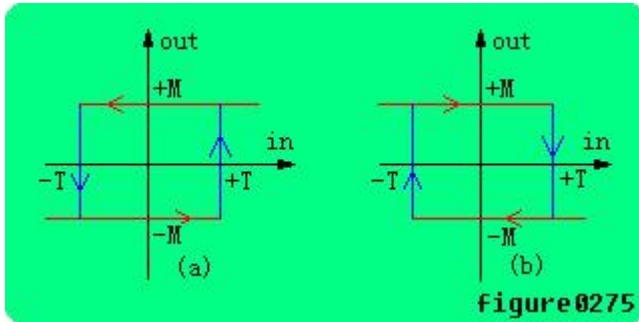
我总是觉得写这些文字的师傅们都是自说自话，他们写这些东西似乎不是给我看的，而是给他们自己看的。显然人家是知道“高工作电压+VS”是什么东东，可我不知道啊？这图上明明只有“Vin”和“Vout”嘛？我只能基于这段文字做一些猜测：“三角框中画了减号的那一端应该接了‘基准’电压的，画了加号的那一端接了‘输入’电压，V 的下标是‘in’嘛。Vout 肯定是输出了，它反应 Vin 和‘基准’之间的关系，我推测当 Vin 高过‘基准’时，Vout 处就能测到‘高工作电压+VS’了，而 Vin 低于‘基准’时，Vout 处就输出‘低工作电压-VS’。现在‘基准’是 GND，这应该是 0V 吧？难道说这还要输入负电压才能在 Vout 处测到‘低工作电压-VS’吗？”

至于高低两个门限，想必是由电阻 R1 和 R2 来确定的吧。R2 的作用应该是“反馈”，因为它连接着输出和输入嘛。那怎么看出是“正”反馈呢？难道是因为它连接到画着“加号”的那一端，所以就是“正”反馈吗？想不明白啊。

不过我倒是明白那个“施密特”的标志符号是怎么回事了，其实就是图（figure0275）的简化。在这个图中，水平方向是输入电压，从左到右代表从低到高。垂直方向是输出，从下到上代表从低到高。从图（figure0275-a）看，下面一根红线表示输入电压从低到高一路上升，升到+T 之前时输出一直保持在-M，输入高到+T 时输出才翻转到+M。如果输入信号电压变成从高到低下降的了，这就要看上面的红线了，它下降到-T 时输出才翻转到-M，可见-T 和+T 就是两个门限了，这两个门限的差值，被称为“回差”。输出与输入的关系还可以是反着的，如图



（figure0275-b），也就是输入高到+T 时输出是从+M 翻转到-M 的，这似乎就是在图（figure0275-a）的输出端加一个“反向器”吧？这个页面中“反向”施密特触发器的符号有两个（figure0276），我想下面那个符号中有一个小圆圈画在三角形的顶端，这不就是代表了“反向”的意思吗？



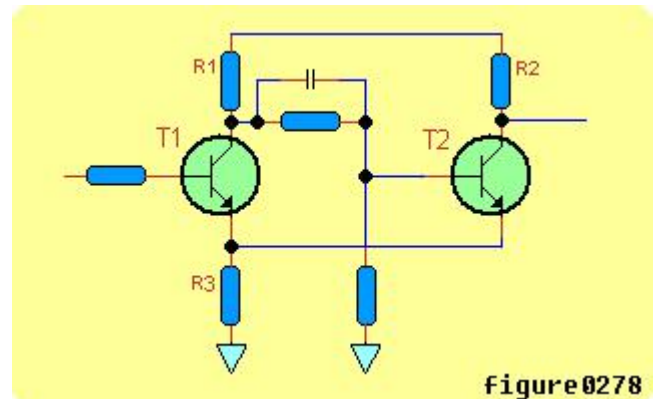
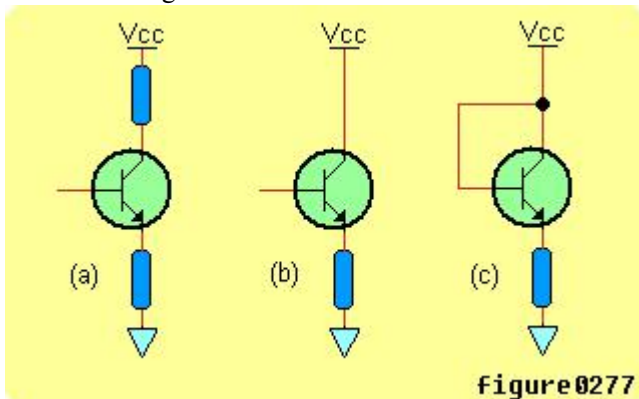
这页面中也给出了由两个三极管组成的施密特触发器电路，和 C# 给的略有不同，它多了两个电阻，还用了正负双电源。反正我是看不明白这究竟有什么作用了，真的让人郁闷啊，这个零件的原理学了，那个零件的原理了解，这些零件放在一起，怎么就全不明白了呢？急死我了。

## 本节补充说明

本节所讨论的内容，你是否觉得有一些前后矛盾之处？比如我们前面提到一个三极管的发射级对地有电阻，那么此三极管就不饱和，而后面讨论施密特电路的时候，那两个三极管是否不能进入饱和呢？如果三极管不饱和的话，我们直接考虑集电极电阻和发射极电阻串联分压是否合适呢？

在下图（figure0277）中，（a）和（b）是不一样的，其中（b）图三极管基极如果输入了  $V_{cc}$  那么高的电压，相当于图（c）那样连接，这三极管仍然不是充分的饱和，它的发射级有  $V_{cc}-0.7V$  的电压，也就是  $V_{cc}$  减去 BE 结上  $0.7V$  的压降。三极管集电极和发射级之间有  $0.7V$  的电压，这充其量算“临界”饱和。若要让这个三极管充分饱和，基极需输入比  $V_{cc}$  更高的电压才行。那么（a）图呢？这个三极管尽管发射极有电阻，但它可以饱和，因为集电极也有电阻，在两个电阻共同挤压下，三极管的 C 极到 E 极的电压可以降到很低。

实际上本小节中对施密特电路的讨论是比较简化的，为了突出施密特电路的主要特性：其一，输入电压有两个“门限”；其二，输出是非常快速地翻转。我特意把两个三极管的集电极电阻选的不一样，以便说明两个“门限”之所以不同的原因。那这两个电阻如果选一样的阻值，两个门限就变成一样的吗？也不尽然。要知道三极管从开始导通到它完全饱和这是一个过程，其基极输入的电压要求是“步步高升”的，它天然地就具有两个门限。把集电极电阻选的不一样比较好理解。而且我们用的电路（figure0272）也是简化了的，实际使用的施密特电路如图（figure0278）所示，又看见加速电容了哈。



总之大家不能机械化的死记硬背，“发射极有电阻晶体管就不能饱和”，这不是严谨的结论，只是说明了一种特定的情况而已。大家以后还要通过不断地学习把各种情况都研究全面才可以。

## 2005-07-31：最后的答疑

时间过得真快，跟着 C# 折腾了 3 个月，我已经把制造计算机所需的基础知识都学完了。今天对晶体三极管的发射极有了进一步的认识，晚上又收了 C# 回复的邮件，对我昨天提出的问题给出了答复。读过这封邮件，我不由得感叹：“其实我不懂电路的心啊！”

活死人同学：你好

你的邮件已阅，我没有想到你居然会想起改进以前那个用 1 节电池点亮 LED 的实验，你“拼凑”出来的那个电路，真的非常不错，特别是在电阻 R6 上并联一个 LED，观察电容 C2 左端电压的变化，妙法，very 聪明。

我们以前对问题的讨论，经常是粗略的，跳过很多的细节。这有好处，可以突出最重要的内容，缺点就是不够深入，易于定性而难以定量，以致于你难以理解电路更细微的行为。在这封邮件中我就“三稳电路”做一些更细化的说明，回答你的疑问。但我仍然回避数学方程式，以免你感到乏味。

对于基础知识的学习到此就告一段落了，以后的学习，我们将进入到“集成电路”这个阶段，围绕着我们将要制作的小电脑进行讨论。

### 拾遗补缺

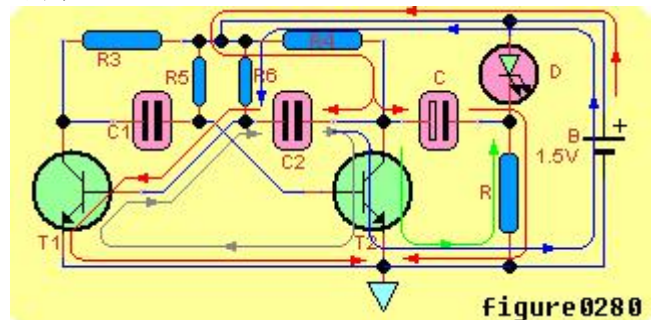
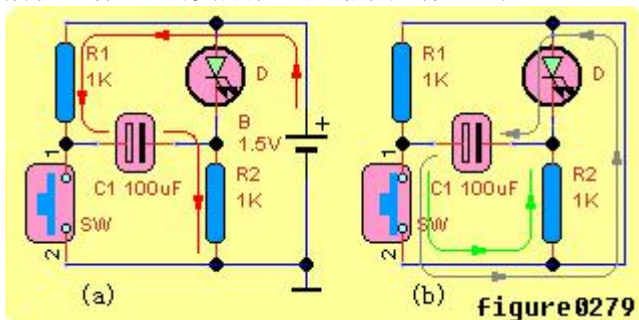
C++++: 2005-7-31

第一，为何三极管两脚间的距离是 1.27mm？这个我们以前略有提及，电子技术是西方世界先发展起来的，人家使用“英制”单位，一英寸约为公制的 25.4mm，半英寸约 12.7mm，显然你已经明白为何有 1.27 这种看来怪怪的数字了。

其实你买的“洞洞板”，每两个焊盘孔之间的距离，是 2.54mm。在设计印刷电路板的时候，我们经常使用的尺寸单位是“千分之一英寸”，或者说“1 毫英寸”，也就是 0.0254mm，这被称为“1 密耳 (mil)”。1.27mm 是 50mil，2.54mm 是 100mil。宽度长度使用英制单位，而孔的直径往往要使用公制单位，因为我们国家打孔用的钻头直径通常是公制的，当然这种细节问题加工厂会帮你处理，无需自己关心。

第二，单稳态电路首次通电时，右边的 LED 会先亮然后渐暗，你的解释是由于电容的充电造成的，这没问题。至于断电并再次通电后为什么这个 LED 就没反应了，我想提示你一点：那个刚才充满电的电容，它在你切断电源之后放掉电了吗？它若没有放掉电，那么再次通电之后当然就没有了充电过程，那个与之相连的 LED 也就没有反应了。这种情况是易于检验的，只需在电池断开后，用镊子短路电容两个引脚，再次通电后就可以重新看到 LED 亮而渐暗的情况了。你还可以在断电之后用万用表直流 20V 档测量电容两端电压，看看那电压是不是总保持着。我觉得你甚至于可以等到明天早上再次测量电容两端的电压，应该还有残留。

第三，关于无稳态电路中的电容是如何放电的，我希望你先不要受第二个问题的影响，觉得它真的是放不了电的。它若放不掉电，你就看不到两个 LED 交替亮起的现象了。我们还是用这个图 (figure0279) 来解释下，先看 (a) 图，当按钮断开的时候，电容 C1 经 R1 和 R2 充满了电，它具有 1.5V 的电压。而 (b) 图中按钮按下了，电容 C1 开始放电，我们曾提及充满电的电容放电时不妨将其当成一节电池，那么显然，现在这个电路中“同时”有两个“电源”，这我们以前讨论“叠加”的时候说过了，当我们要研究电容 C1 这个“电源”时，另一个电源（真正的电池 B）应该怎么处理呢？它应该看做是“短路”对吧？于是图 (b) 中电容 C1 可能的放电回路就有两条，其中经 LED 的那一条灰色回路是不通的，因为单凭电容 C1 上充着的电压不足以让 LED 导通，所以电容 C1 的实际放电回路就只有经电阻 R2 这一条绿色的了。



有了这样的认识之后，无稳态电路 (figure0280) 中的电容 C2，在 T2 饱和时它的放电回路就清楚了，它实际是沿着蓝色路径放电，经过三极管 T2 的 C/E 极，再经过电池 B 和电阻 R6，直到它两端电压为 0。它两端电压为 0 时就不能视为电源了，这时候它会继续沿着蓝色路径充电。我知道你用了电解电容，此时电解电容极性



是反接的，但是没关系，它左端充了 0.7V 的电压后，三极管 T1 就要导通而 T2 就要断开了，它并非长时间处于反向接电状态，这是没问题的。一旦 T1 通而 T2 断之后，电容就会重新按红色路径充电，这个电容的充放电情况是有些复杂的。

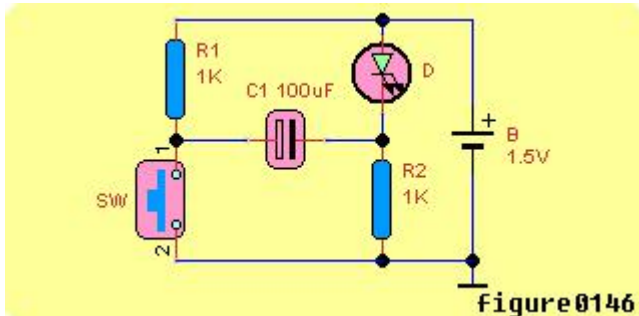
可以看出这个电容反向充电到 0.7V 后两个晶体管的状态会互换一次，这个时间决定的电路的“振荡周期”，而这个时间又是由 R6 和 C2 的乘积决定的，所以我今天给你说过，若  $R5=R6=R$ ， $C1=C2=C$ ，振荡周期约为  $1.4 \times R \times C$ 。当电阻的单位是“欧姆”电容的单位是“法拉”时，方程式计算出来的周期单位是“秒”。这个方程式到底是如何得来的，我不做详细地说明了，你有兴趣以后自己深入研究吧。

## 第一季终

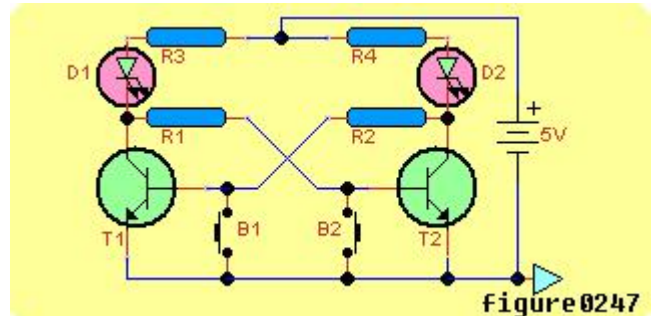
追了整整一季，你觉得这个剧有意思吗？还想继续追第二季是吧？那好，在继续追下去之前，你需要对你自己的动手实践能力做一个初步的评估了。当然，我是假设你真的是一个电子小白，除了初中物理之外再无其它的电学知识。如果你已经是一个无线电爱好者了，那么以下内容你可以略过不看。

你还没有置办下整套的装备吧？现在有很多的冲动消费，我估计有人已经早早地买下了一堆工具和仪表了。你不想想万一你不太适合进入这个领域的话，你这些钱不就白花了吗？唉，反正你也不清楚自己究竟适合学习什么，不如孤注一掷，硬着头皮在这个方向上打拼一下。好吧，买就买了吧，毕竟花的钱不算很多。

在这一季中有几个很简单的小电路，我们现在需要把它们真正做到电路板上，下面把这些电路图重新罗列一下，并将电路参数具体化。



RC 微分电路



双稳态电路

RC 微分电路中对电阻  $R1/R2$  和电容  $C1$  的取值并不严格要求，大体上电阻可取  $1K$  到  $10K$  之间，电容就从  $47\mu F$  起步吧，我们对  $R \times C$  之积没啥特别的要求。在双稳态电路中， $R3/R4$  取  $510$  欧或者  $1K$  都行，不妨和 RC 微分电路相一致，都用  $1K$  的，省得买太多的元件。 $R1/R2$  取  $5.1K$  或者  $10K$  也都问题不大，两个三极管用  $2N3904$  或其它 NPN 型管都可以，别用那种大功率的管子就行。 $5V$  电源是个比较麻烦的事，用 4 节电池是可以的，最简单的是用手机充电器（figure0399），把充电线（figure0400）换一下，电路板上焊一个方口 USB 座即可。手机充电宝也可以用，你的电脑上那个 USB 口也能供给  $5V$  电源，但不建议使用。

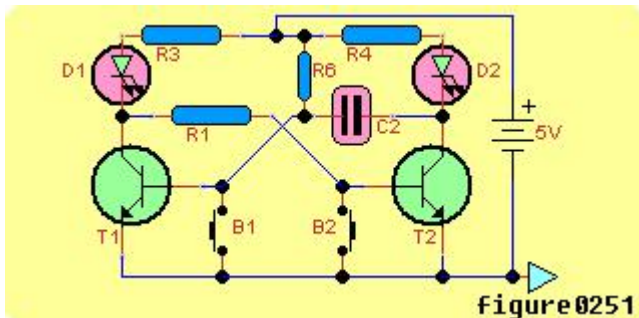


figure0399

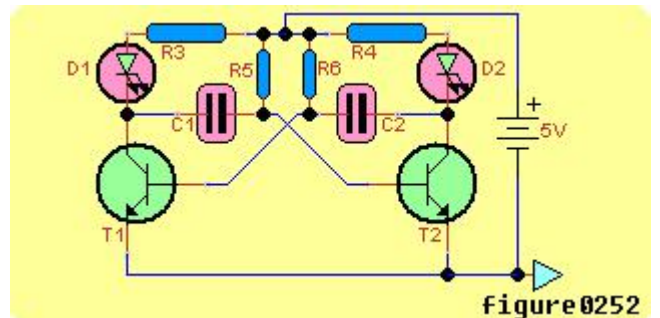


figure0400

双稳态电路制作完成后，注意观察一下通电后  $D1/D2$  哪一个更亮？假设  $D1$  更亮，说明三极管  $T1$  导通，那么我们有什么办法改造这个电路，使通电后三极管  $T2$  先导通呢？前文中给出了两种利用电容器的办法，还有其它方法吗？



单稳态电路

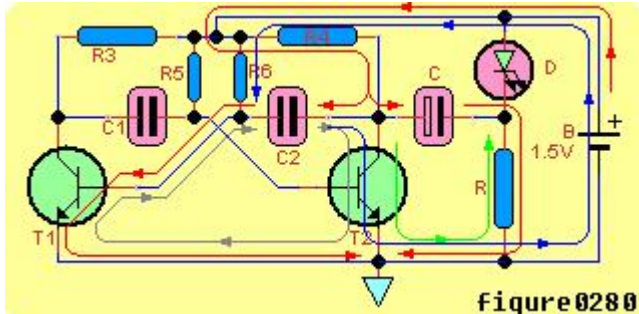


无稳态电路

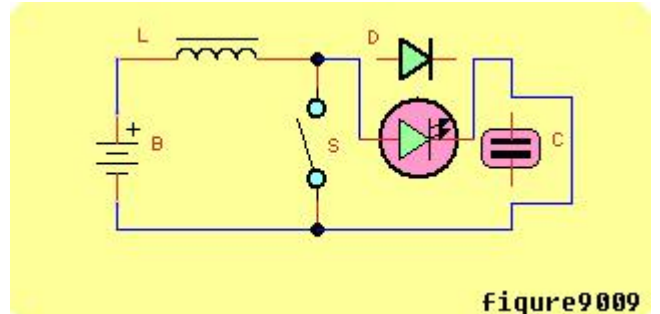
单稳态电路中的电阻  $R6$  可以取与  $R1$  相同的值，与 figure0247 相一致即可。电容  $C2$  可以用与 figure0146 中的  $C1$  相同的容值，这个电解电容的正负极如何连接？首次通电能看到  $D2$  先亮而逐渐变暗吗？断电之后立即通电， $D2$  有何变化？断电后将电容  $C2$  两端用镊子短路一下再通电， $D2$  有何变化？无稳态电路中电阻  $R5$  可以

取与 R6 相同的阻值，电容 C1 可以取与 C2 相同的容值，能看到两个发光二极管交替闪烁吗？如果电阻 R5 与 R6 不相等，电容 C1 与 C2 也不相等会怎么样呢？是否有办法在不断电的前提下使无稳态电路“停止振荡”，固定在某一个状态上？能否使用一个共阳极双色 LED 制作这个电路呢？

完成以上基础实验之后，我们还可以继续进行一些扩展实验，figure0280 是一个很好的例子，它等同于将 figure0252 和 figure0146 相结合，做成一个使用 1.5V 电源的“频闪灯”。图中 R3/R4 可以和 R 取相同的阻值，比如都取 1K 欧姆。我的问题是除了利用电容器提升发光二极管两端电压外，还有其它办法可以采用吗？如图 figure9009 所示出的电路（其中的电源 B 是 1.5V）能够应用起来吗？在 figure0280 中的 R6 两端并联一个 LED 也可以亮吗？这个 LED 的阴阳两极怎么接？



1.5V 频闪灯

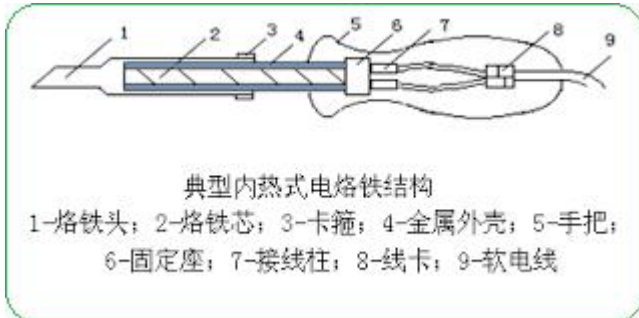


BOOST 电路

下面我们就要看为做这些实验，应该准备什么样的工具和材料了，第一重要的当然就是电烙铁了。我们需要一支“内热式电烙铁”，功率 20W 到 35W 都可以，figure0401 给出了“内热式”的示意图，图中可见烙铁有一个管状的“金属外壳”，发热芯装在外壳内，烙铁头套在外壳外，此为“内热式”。如果是烙铁头放在外壳外而发热芯套在外壳外，那就是“外热式”了。一般我们认为“内热式”烙铁的效率要高一些。当然我们并不要求必须是内热式烙铁，外热的一样用。

下方右图给出了一种最普通的内热式烙铁，在某宝上这种烙铁最低价能到 5 块钱左右。对于我们上面所介绍的简单实验，你也不用特意将烙铁头换成长寿的。愿意购买更好的烙铁也可以，从十数元到数十元的都有，但过百元的恒温焊台就大可不必了。

或许你还需要一个烙铁架，高温烙铁放到架子上比较安全。如果你能保证烙铁不会烫坏东西或者烫到你自己，那烙铁架不用也罢。当然你也可以自己做一个烙铁架，比如买一盒豆豉鲮鱼罐头，吃了鱼拿罐头盒当烙铁架用。不过这盒罐头可能比一个简易烙铁架更贵一些。



典型内热式电烙铁结构

1-烙铁头；2-烙铁芯；3-卡箍；4-金属外壳；5-手把；  
6-固定座；7-接线柱；8-线卡；9-软电线



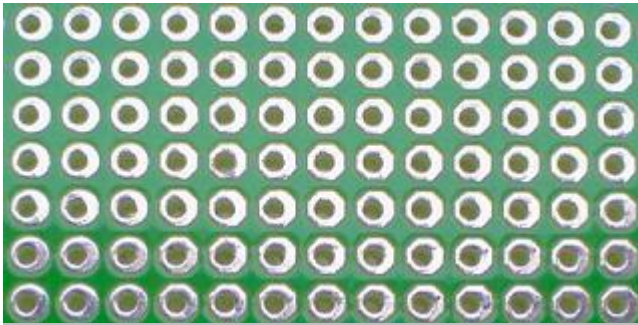
我是不是有点太贫了？为了三五块钱瞎算计个啥？好吧，咱就先不管钱的事了，下面这两种工具还是必需的：左边图上的的是镊子，右边图上的叫“偏口钳”。因为我们经常会在电路实验板上穿线焊接，所以你至少要有一把加厚加硬的尖头直镊子，镊子尖端不要带齿，再加一把轻巧的尖头镊子更好，直头弯头均可。“偏口钳”用于剪断导线和元件引脚，用得很多。



做这点试验有这些工具就够了，万用表也用不着。当然我们还需要一些材料：导线，实验电路板和焊锡。导线很容易找到，弄一根网线，扒去外面的塑料绝缘皮，里面有 8 根单股铜线，应该是铜的吧？无所谓。如果你嫌这线太粗硬不好使，也可以购买一种叫“OK 线”的单股细导线。实验电路板我们常称其为“万用板”或



者“洞洞板”，整块板上都是孤立的焊盘，孔间距为 2.54mm，有单面和双面之分。我们用单面的就行，至于尺寸，7cm×10cm 的应该够用了。要不你买大一点的？做这些实验焊锡用量不大，所以买一个筒装的焊锡丝就可以，也没必要搞什么“无铅”锡丝。



实验电路板



筒装焊锡丝

最后就是全部的电子元件了，我们从电源部分开始。首先是一节 7 号电池盒，这个电池盒最好带两个引出脚，能焊到电路板上。而引脚有两类，针状脚和片状脚，只有针状脚才好插到万用板上焊接，我给的图是片状脚。引出两根导线的电池盒也可以，不太好固定住而已。5 号的电池盒也没问题，没啥必要。1 号电池盒就不必了吧？太大只了。钮扣电池不可以用，不是 1.5V 的。其次我们需要一个方形的 USB 座，我在图中标出了 +5V/GND 两个引脚，而红圈套住的是外壳上的焊片，把这个焊片向两侧掰直了，贴在万用板上焊接，它可以接到 GND 上。用一个直流电源座也可以，你需要为你的手机充电器配一根“USB 转 DC”的线。



带引脚电池盒



USB 方口座



发光二极管



电阻电容

然后是发光二极管，圆形 3mm 直径即可，颜色选红/黄/绿三者之一即可，不要用蓝色和白色，这二位的正向导通电压更高。其它形状的也没问题，别太大个的就行。电阻器用碳膜或金属膜都行，四环或五环也都无所谓，额定功率不要大于 1/4W。阻值可要 510 欧/1K/5.1K/10K 四种，以利于你在实验中尝试更换不同的电阻。电容器就可以用那个“Rukycon”的，选 100µF，耐压 10V 即可，完全没有问题。

最后是按钮开关和晶体三极管，如果你要尝试 figure9009 的话，你还需一个电感线圈。这个电感线圈可以用一个色环电感，但我们没有电感量和额定功率这两个参数，你有什么想法吗？按钮开关可以用两脚的或者四脚的，四脚的按钮以前说过，两个引脚一对，在内部连通的，尺寸就用那种 6×6 的小按钮。至于两脚的按钮开关，无非是把四脚的切开而已。而晶体三极管，原则上如图所示这个形状的所有 NPN 型管都可以用，只要弄清楚 EBC 三个引脚是如何排列的即可。我用一个小表格把用到的元器件总结了一下，这类表格称为“配料表”，简称为“BOM (Bill of Material)”。我给这个小表是非常简陋的，就是个示意而已。



按钮开关

三极管

元件	参数	数量	元件	参数	数量
电阻	1K	11	电阻	5.1K	8
电容	100µ	7	三极管	NPN	9
LED	Φ3,红	9	按钮	4 脚	5
USB 座	方口	1	电池盒	7 号	1

Bill of Material

好了，关于这组实验的全部内容就是这些了，你的第一个问题是什么？到底怎么去买这些东东？很简单，打开某宝的主页，搜索“2N3904 红色 LED”等等关键字，找一些门类比较全的大商铺，基本上一家店内就能买到全部的东西。那个电池盒或许不在一家店中，多找找吧。

最后我要说一下，实验做完了，该如何评判自己是否可以继续追下去呢？我估摸着有以下三种情况：

**第一、实验顺利完成，各种结果都与预期一致，心里有小小的成就感，觉得这些手工制作非常有意思。**

没说的，你继续学下去好了，以后只会越来越有意思。

**第二、实验顺利完成，各种结果都与预期一致，但你的内心毫无触动，甚至还有点想放弃。**

你当然可以放弃，或者暂时放弃，努力尝试寻找其它一些让你觉得更有意思的方向，实在找不出更好的事做了，那就再回来。但我觉得你也可以继续学下去，一边学习一边找其它的兴趣点，这样效率高一点。

**第三、实验非常不顺利，电路板弄的一团糟，各种结果都没看到，还把自己烫了个泡，情绪低落中。**

那你就放弃吧，不开心的事做它干嘛？当然，你也可以选择继续学习，不擅长动手还可以动脑嘛，而且以后我们更多的要学习软件的开发，跟这些电路关系就不那么紧密了。再一者，计算机这个行当终究是个朝阳行业，有比较好的就业前景，脑子里多装点这方面的知识，将来当上个经理，凭咱头脑中这些理论也好管理那些动手能力强的下属嘛。

怎么样？你属于哪种情况？你自己的打算是什么？你直接就放弃了哈？动手能力强原来就是给人家当下属，这特么谁愿意啊？不要急嘛，我并没有否认你的领袖风范和领导艺术啊？你也不能认为他动手能力不强也就不可能有非凡的领导力啊？我这叽叽歪歪的太唐僧了哈，总之一句话，要不要继续全凭你自己的心情，你想继续就继续，你想放弃，那就放弃。