

禁止商业用途

# 忽软忽硬

一本~~中西医~~软硬件结合疗效好的说明书

刘延栋

2020 年 1 月 4 日

薛定谔的软与硬

禁止商业用途

### 版权所有

因为有一些数学公式，在 web 上不好看，又恰好我会用  $\text{\LaTeX}$ ，所以我做了 PDF，你可以打印出来自己看，也可以打印出来卖给别人，但是，你要知道，你只要打印了，并且获利了，就是非法出版物，要坐牢的，十年起。我是免费放出来的，跟博客一样。版权应该属于我吧，我不太确定。如果国家需要，版权可以送给国家，送给你不行。

### 发行

写一篇发一篇，不定期写，不定期更，随意非商业传播，感谢互联网。

People who are really serious about software should make  
their own hardware.

– Alan Kay



# 前言

糊里糊涂的就要奔四了，没做过任何值得一提的事情。时常感觉来到这个世界上就是充数的。

回想起来，记忆里好像就是不停的踢球，到处闲逛，找网吧通宵上网，和朋友熬夜看球。

眨眼间儿子已经十几岁了，前两天他来问我一个问题，问我懂不懂一个电子设备的原理，我看了一下，就是一个跑马灯。一个单片机控制十来个发光二极管做单一的左移或右移，从左到右再从右到左，反反复复，每一支发光二极管点亮的时间大概是300ms。他问我难不难做？我告诉他这东西一点也不难。

我又给他讲了如何控制电子表上七段数码管的显示，他听得有点兴趣，虽然我能感觉到他应该没听懂。他问我怎么知道的？我就找出了一大堆当年的，已经落满灰尘的面包板，洞洞板，电烙铁，万用表，还有许多没用过的电阻，电容..... 这些老朋友已经快15年没动过了。

当年我做了很多的东西，只是这些年来，生活所迫，我已经忘记以前我很喜欢焊东西了。我试了一下，电烙铁还可以用，也许我还能再焊一些东西，我花了两个小时就焊了一个跑马灯，还加了个定时器.....

说实在的，我还有点怀念以前在面包板上找bug，在洞洞板上焊元件的时光了，可能只是怀念当年的青春吧。我想围绕硬件和软件写一点文章，录一点视频，做一点东西，希望对看到的人有些许帮助。

我对电子感兴趣的时候是1990年左右，没人指导，只见过收音机，还有一本收音机维修手册，我就是靠这个“入门”的。现在的条件好很多了，希望年青人有开放的心态，广阔的眼界，融入世界，做对人类有贡献的人。

# Contents

<b>Contents</b>	<b>vi</b>
<b>1 电阻</b>	<b>1</b>
1.1 电阻的用途 . . . . .	1
1.2 品牌 . . . . .	1
1.3 阻值 . . . . .	1
1.4 功率 . . . . .	2
1.5 电阻的种类 . . . . .	3
<b>2 电和电路</b>	<b>6</b>
什么是电 . . . . .	6
2.1 电源, 面包板, 导线 . . . . .	8
<b>3 继电器, 晶体管和逻辑门</b>	<b>10</b>
3.1 继电器 . . . . .	10
3.2 半导体 . . . . .	11
3.3 晶体管的工作原理 . . . . .	13
3.4 逻辑门 . . . . .	15
<b>4 二进制</b>	<b>17</b>
4.1 教科书和现实世界的区别与联系 . . . . .	17
4.2 连接电路注意事项 . . . . .	18
电源问题 . . . . .	18
<b>连载中.....</b>	<b>21</b>

# List of Figures

1.1 resistor color codes . . . . .	2
2.1 原子的汤姆逊模型 . . . . .	7
2.2 原子的 . . . . .	7
2.3 9V 的电池 . . . . .	8
3.1 继电器原理示意图 . . . . .	10
3.2 硅和锗的原子结构图 . . . . .	11
3.3 半导体掺杂 . . . . .	12
3.4 PN 结 . . . . .	12
3.5 PN 结平衡示意图 . . . . .	13
3.6 NPN 晶体管 . . . . .	13
3.7 NPN 晶体管电路图 . . . . .	14
3.8 正向偏置和反向偏置 . . . . .	14
3.9 二极管电流电压对应表 . . . . .	15
4.1 数字信号 . . . . .	17

# List of Tables







# 1 电阻

我是栋哥，欢迎收看《忽软忽硬》，今天是硬件，讲在电阻。

## 1.1 电阻的用途

在这个世界上，任何材料都对电流有一定的阻碍作用，只是有的大一些，有的小一些，导体和绝缘体之间并没有绝对的划分界限，取决于其导电能力的相对强弱。比如低温条件下的超导体，低于 10 -25，空气在电压极大下也是导体。

利用材料对电流的阻抗特征，当电流经过电阻的时候，会改变电阻两端的电压。电阻是电路中最常用的电子元件之一。<sup>1</sup>如果大家是电子爱好者要做实验的话，在选购电阻的时候要注意这四个方面，分别是：品牌，电阻阻值，电阻功率以及电阻种类。接下来我分别介绍一下这四个内容。

1.1 电阻的用途 . . . . .	1
1.2 品牌 . . . . .	1
1.3 阻值 . . . . .	1
1.4 功率 . . . . .	2
1.5 电阻的种类 . . . . .	3

1: 另外的有电容和电感也非常常用，以后会讲

## 1.2 品牌

第一个是品牌。做电阻有很多品牌，价格从几分到几十一个都有，以我的经验，一分钱一分货。因为这些品牌也没给我广告费，我也不是做测评的，我个人建议如果经济允许的话，多花个 10% 到 20% 的钱，买日本厂商生产的电阻，会给你带来很多好处。<sup>2</sup>如果只是贪图便宜，两个相同的电阻误差可能会差超过 20%，在电路中就很难调整出自己想要的电压。日本的厂商在误差控制上做的可能是最好的之一。

2: 很多电子爱好者都经历过设计 10 分钟，调试 10 小时的经历，很多就是因为电子器件质量不合格。

## 1.3 阻值

第二个是阻值。电阻的阻值都标在自己身上，有两种标法，一种是直接写上阻值，基本上功率大于 3W 以上的电阻，都会标上阻值。如

图片来自 wikipedia, <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/75/Electronic-Axial-Lead-Resistors-Array.jpg>

果功率小于 3W 的电阻，则可以根据电阻上的色环来计算出其阻值。

不同单位之间的换算关系如下：

$$1M\Omega = 10^3K\Omega = 10^6\Omega$$

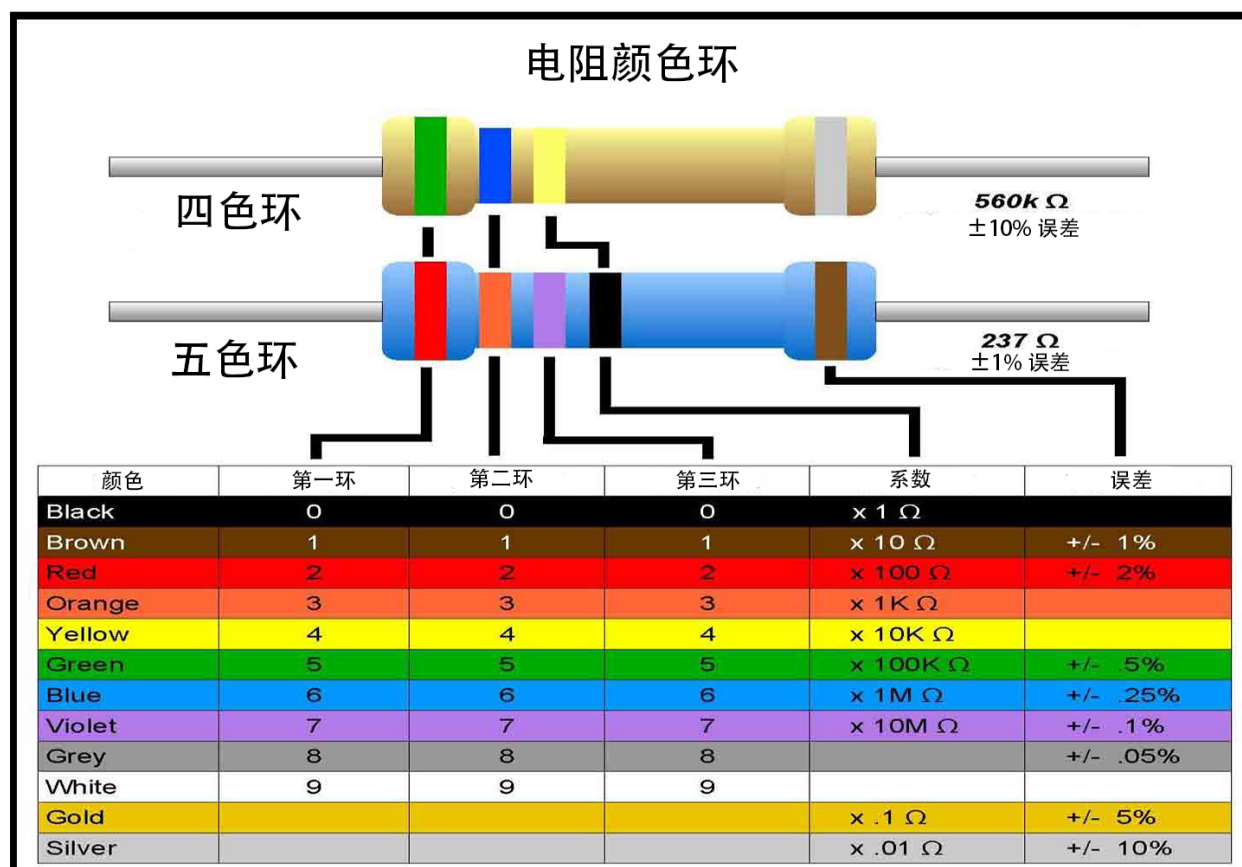


Figure 1.1: 可以根据电阻的色环计算电阻的阻值

在设计电路的时候不能任意选择电阻，比如你想要 2019 欧姆的电阻，这是不存在的。如果你非要，只能说明你太有工匠精神了，在实际的电路中，并不需要特别精确的电阻，只需要在一定的范围内选择即可。EIA（Electronic Industries Alliance）规定了若干系列的阻值取值基准。其中 E12，E24，E48，E96 基准最为常见。E12 允许误差为 10%，<sup>3</sup> E24 允许误差为 5%。

如果需要特别精确的电阻，电阻器的价格可能会从几分钱飙升到几十块美金。对某些特别注重性能的比如滤波器电路，对电阻值的要求会特别高。

3: 科技进步了，现在的电阻已经很少有误差超过 10% 的了。

## 1.4 功率

第三点是功率。一般来说电阻的功率越大，体积也就越大，价格也会越高。在电路图中，只要超过 1/8W 的电阻，就要标注出来，如果不标注，容易发生这样的故障。能量越大，比如电热毯。

电路大于 1/8w 就要在电路图中标出来。一般情况下，功率越大，体积越大，价格越高。如果体积足够大，就不用再用色环标了。

如果电阻用错了功率，会发生烧毁电阻的情况，而电阻一旦被烧毁，一般会城门失火，殃及池鱼。

## 1.5 电阻的种类

最后是电阻的种类，电阻有非常多的种类，不同的划分标准可以将电阻分成不同的种类，我想把电阻分成两个大类，这两个大类分别是可变阻值电阻和不可变阻值电阻。顾名思义，就是阻值固定的和阻值不固定的。

先来讲可变阻值的电阻，主要有两种，一种是分压器，一种叫电位器。实际上，这两种的原理是一样的，也有其它的名字和用途，比如叫变阻器，微调器，比如收音机或者电视机上的音量调整的旋钮就是电位器的具体应用。

在现实中，用的更广泛的是固定阻值的电阻。固定阻值的电阻也分为很多种，我主要讲其中的两种，一种叫碳电阻，一种叫金属膜电阻。这两种电阻样子差不多，在前些年，碳电阻的外表要丑一点，没有金属光泽，是土黄色，最近这两年技术先进了，这两种电阻仅从外表看不出来。

这两种电阻价格都不是很贵，碳电阻的价格更低。如果手头有这两种电阻，并且仅通过外表没法辨别出来，可以用这种方法来验证。用加热后的电烙铁靠近电阻，如果万用表的电阻有剧烈变化，那就是碳电阻。如果阻值不怎么发生变化，就是金属膜电阻。

这两种电阻的构造差不多，先来看一个砸开的电阻，这个电阻最外层是树脂，相对比较好砸，金属膜电阻的最外层是金属，不好砸。外壳里面的这一层黑色的是碳的混合物，可以通过调节碳膜的厚度和碳的浓度就可以控制电阻的大小。如果想控制的更精确，就在这层碳膜上加工出螺旋的沟槽，螺旋越多，那么电阻就越大。最中间的是一根玻璃或者陶瓷。

对金属膜电阻来说也是一样的，只是把其中的碳混合物换成了金属膜，主要是镍铬。相比于碳电阻，金属膜电阻有很多优点，比如稳定性好，精度高，可以做到 E192，也就是说误差可以小到 0.5% 以下。如果经济允许的话，对电子爱好者来说，买金属膜电阻更好。

现实中还有更多的电阻，比如有手机，数码相机里的贴片电阻。还有光敏电阻，通常用在光控的地方，比如楼道里的感应器里，常见的光敏电阻是用硫化镉或者硫化硒来做的。还有热敏电阻，我有一根可以测-50 到 500 度的电阻，误差很小，号称准确度高达 0.001 °C，我也不知道真假，不过测个体温什么的挺准的。这些电阻都非常的有用，只是可玩性不够，像贴片电阻，不可能通过手工来焊，<sup>4</sup>只能通过机器才能操作，在这里就不讲了。我只讲可以用手触摸安装的电阻。

4: 有人能焊 1-2 毫米的电子元件，都是些牛人，反正我是不能，手残。

### 视频的花絮部分

想讲一下欧姆定律和焦耳定律，这种可能没人想看，一看就想到了上学的痛苦，但是真的很有用。

在初中物理电学部分，我们都应该知欧姆这位科学家，也知道欧姆是电阻的单位。欧姆在 1787 年出生在德国，1787 年在中国是乾隆年间，在美国的话是诞生美国宪法的那一年。距离今天已经 230 多年了。我们可以横向的比较一下德国，中国，美国当年的情况。德国是当年科学的核心地带，美国则诞生了世界上第一部成文宪法，中国的乾隆皇帝在这一年写了一首打油诗，“间年外域有人来，宁可求全关不开；人事天时诚极盛，盈虚默念惧增哉。”这首诗的意思是想想自己太强大了，都有点害怕了呢。如果有上帝的话，那一年他肯定要笑到肚子痛。

欧姆的爸爸的家族是锁匠，他的妈妈是裁缝的女儿。父母都没上过学，但是他父亲有极强的自学能力，自己学会了物理的数学，然后教自己的孩子。欧姆有 7 个兄弟姐妹，当年的医疗条件不好，夭折了 4 个，只有三个兄弟姐妹长大成人。其中西蒙·欧姆是著名的物理学家，他弟弟马丁·欧姆是著名的数学家，他还有个妹妹叫伊丽莎白·芭芭拉。<sup>5</sup>欧姆的妈妈在他十岁就去世了，所以他的爸爸要照顾好几个孩子，是个伟大的父亲。

欧姆很小就表现的很聪明，在 16 岁的时候就考入了埃尔朗根大学，在大学里他彻底放飞自我，不再从事学习的任务，转而对跳舞、滑冰和台球有非常大的兴趣，他的台球水平极高，可惜当年没有世界职业斯诺克锦标赛，否则他将是和亨德利、奥沙利文一样传奇的人物。他的父亲得知儿子不再学习，家里的经济也不宽裕，就把他打了一顿，让他退学去瑞士的中学当老师。被老爸教育了一顿的欧姆方才对自己的前途有所担忧，在当老师的期间，继续用简陋的仪器做电学实验。也正是因为这种不专业，他长期被科学家忽视。并且在 1825 年的时候，他写的一篇论文中引用了不严谨的数据，于是很长时间内他被人认为是假内行，冒牌货。

虽然被父亲退学，但是他却爱上了学习，在当中学老师的时候，他没忘记学习，最后竟然花了 7 年时间自学，拿到了埃尔朗根大学的博士学位，然后，继续辗转多个学校当中学老师。后来他提出的欧姆定律，也不被人所重视。直到 1841 年英国皇家学会授予他最高荣誉的科普利金牌，才引起德国科学界的重视。1854 年欧姆与世长辞。十年之后的 1864 年，英国为了纪念他，决定用欧姆的名字作为电阻单位的名称。希望大家每次使用这个电阻单位的时候，能想起这位非常聪明，台球打的很好，又被老爸修理，最后勤奋顽强的学习，最后成为一代科学家的中学教师。

**Theorem 1.5.1 (欧姆定律)**  $V = IR = I \left( \frac{L}{\sigma A} \right) = I \left( \frac{\rho L}{A} \right)^a$

<sup>a</sup> 后面两个等号如果看不懂没关系，上大学后就能看懂了。

欧姆定律是一个非常重要的公式，在我们设计电路的时候，尤其是有电阻的电路，要格外关注电阻的阻值。比如我可能会在将来的视频中用到 12V, 9V, 5V 和 3V 的电压，可以通过电阻来改变两端的电压。这时候，就要用欧姆定律来稍微的算一下。在现实中和考试不同，如果我们要 1.5V 的电源，考试的时候会告诉我们干电池的电压是 1.5V，实际上并不是准确的 1.5V，如果是块新的干电池，可能是 1.6V 多，如果用了一段时间，可能是 1.4V 多。像我在做一些东西的时候，经常要用到 5V 和 3V 的电压，我会从树莓派这引脚上取电，也并不是正好 5V，可能是 5V 多一点，也可能少一点。现实生活总是不那么完美。

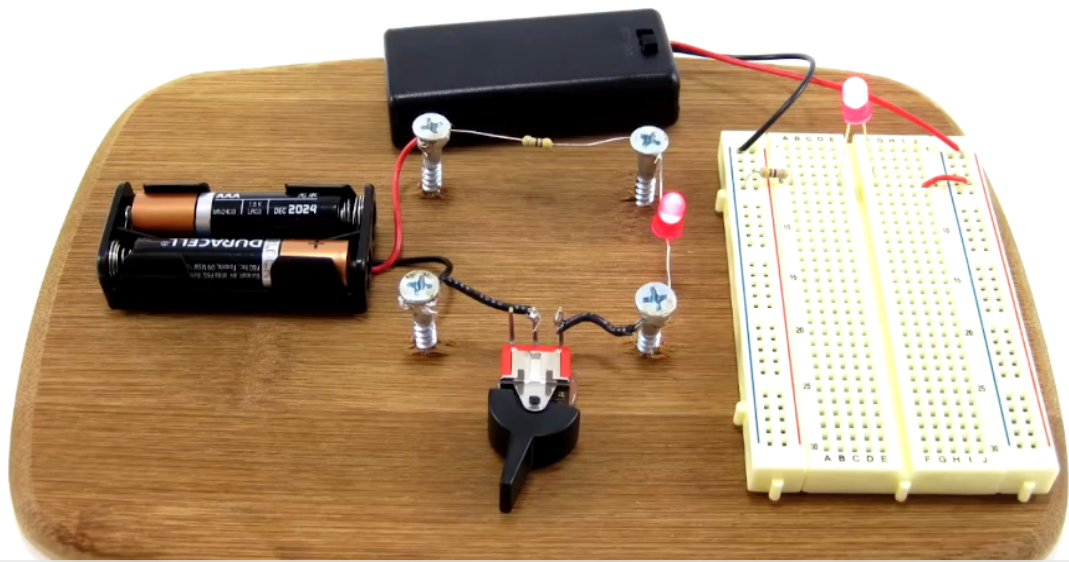
5: Elizabeth Barbara, 我仔细去查了资料，就叫伊丽莎白·芭芭拉，我总觉得应该叫伊丽莎白·欧姆或者芭芭拉·欧姆，至少有个姓吧，但是实际上就是这个名字

**Theorem 1.5.2 (焦耳定律)  $Q = I^2 R t$** 

但是在把一个电子元件接入之后，还是要根据欧姆定律算一下电流，然后用焦耳定律算一下产生的功率。焦耳也是个科学家，在这里我就不做介绍了，焦耳是一个很低调的人，他一生写了接近 100 篇论文，但是晚年是靠救济金度日。他说他一生只做了两三件事，没有什么值得炫耀的。实际上，我们普通人，一生别说两三件事，连零零零零两件事情都做不到。焦耳定律可以计算电流通过电阻时产生的热量，与电流的平方，电阻的大小以及时间的长短有关系。一定要计算一下，再选择合适的电阻，否则会烧坏电阻和芯片的。

第一期的内容就到这里，我这个视频的名字叫《忽软忽硬》，我有一个电台叫《软件那些事儿》，音频节目对硬件的支持并不友好，我曾经在电台里讲了如何用最基本的电路做一台可以计算的机器出来，但是总归是讲不清楚。农民都可以做出能上天的飞机，恰好我又是一个农民，也许我能做一些与计算机相关的东西出来。这就是《忽软忽硬》视频的目的，也是我新的尝试。





## 2 电和电路

在讲电和电路之前，先来做一个实验。这是一个，树莓派上有一些针脚，学名叫引脚，英文单词是 `pinout`。这些引脚的作用是通过这些金属针上是不是有电，来读取或者传输数据。这是树莓派区别于手机，电脑的一个特点，这些接口的名字叫 GPIO，所谓 GPIO (General Purpose I/O Ports，意思是通用输入/输出端口。通俗地说，就是一些引脚，可以通过它们输出高电平低电平或者通过它们读入引脚的状态，也是读高电平或是低电平，这里的高电平和低电平有点太学术了，用大白话来说就是有电和没电，高电平可能是 3.3V 或者 5.0V，低电平是没电，0V。

咱们可以通过 GPIO 口和硬件进行数据交互，控制硬件工作 (如 LED、蜂鸣器等)，还有读取硬件的工作状态信号 (如中断信号) 等。GPIO 口的使用非常广泛。掌握了 GPIO，差不多相当于掌握了操作硬件的能力。在这里我要展示一下如何控制 LED 灯的工作。

第一个实验是控制 LED 一明一灭，第二个实验是控制 LED 让它有呼吸灯的效果。代码很简单，我就不做解释，如果看不懂这些代码，一点关系也没有。因为做这个实验的目的并不是如何用 Python 编程或者如何操作树莓派，我要解释的比这个底层的多，等到我录完了整个系列的视频，这种东西不用解释也会了。如果不了解底层，就算会跑程序了，对树莓派也不理解，在某种程度上，玩树莓派也好，玩 Arduino 也好，本质上和玩手机玩电脑也差不多，总归是不理解。我觉得只有从底层自己构建逻辑门，才能真正的了解计算机。

### 什么是电

对人类来说，电已经是和食物，水，空气差不多重要的东西了，可能还是要低一个档次。如果没有电，我们这个社会马上会瘫痪。所以，每个人好像都很了解电，但是实际情况却不是这样，关于电，仍然有大量的未解之谜。幸好，虽然对电学的知识了解的越多越好，但是在计算机中，我们不需要成为电科学家也可以稍微的了解一下其中的原理。

人类发现电非常的早，早在公元前 2800 年，古埃及的哲学家已经发现了电鳗，并且把这种能放电的鱼称之为“尼罗河的雷神”。通过这种描述，我们可以隐约的感觉到古埃及人已经意识到电鳗可能和天上

什么是电 . . . . .	6
2.1 电源，面包板，导线 . . . . .	8

的闪电有某种程度的联系，否则不会称之为“尼罗河的雷公”。当然没有证据证明古埃及人对电有更深入的研究。

电的英文单词是 *electricity*，其来源是古希腊文 *elekton*，这个单词在古希腊的意思是琥珀。我们上学时候都知道的故事之一就是琥珀和毛皮摩擦会产生静电。随着时代的发展，有很多人试图解释电的原理。但是都没有给出令人信服的解释。直到最近 200 年的科学大发展时代。

出生在英国的约瑟夫·约翰·汤姆逊 (Thomson, Joseph John, 1856 年—1940 年) 提出了一个模型叫作原子的汤姆逊模型，在他的模型之中，他认为正电荷均匀的分布在一个球体之中，负电荷则集中于球体的中心。如下图 Figure 2.1 所示：

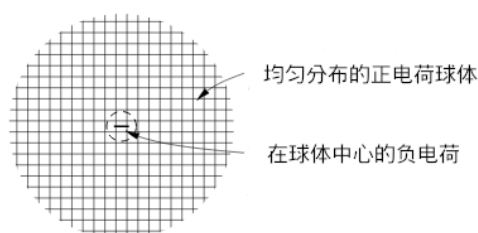


Figure 2.1: 原子的汤姆逊模型

后来在 1909 年，汉斯·盖革和欧内斯特·马斯登在欧内斯特·卢瑟福指导下于英国曼彻斯特大学做的一个著名散射实验，这个实验被称之为盖革—马斯登实验，一个更为人所知的名字叫卢瑟福散射实验。

在这个实验里，用粒子轰击各种金属箔纸，发现绝大多数粒子的偏向很小，但少数的偏向角很大甚至大于 90 度。由此可以证明，一个原子大部分的体积是空的空间，这由没有被弹回的粒子充分说明。

这个实验推翻了约瑟夫·汤姆孙创建的汤姆森模型，随后卢瑟福和波尔建立了自己的原子模型，为建立现代原子核理论打下了坚实基础。卢瑟福—波尔模型认为正电荷位于中心，电子位于行星式的轨道上。像下图 Figure 2.2 所示。

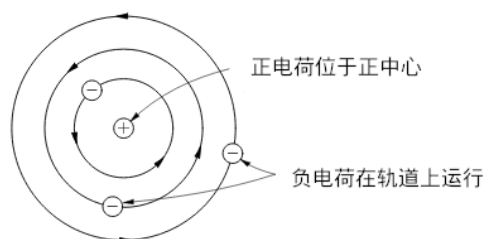



Figure 2.2: 原子的卢瑟福—波尔模型

这个模型也有自己不能解释的东西，量子力学又对原子的稳定性给予解释，但是对我们要研究电脑的电路来说，这些知识已经足够了。

在秋冬季节，我们脱毛衣或者拉门把手的时候，经常会看到电火花或者被电一下，这是因为只有当电子和质子处于相同数目的时候，是最平衡的。当我们被电了一下时候，电子是从地球跑到了我们的身体中。我为什么要讲这些呢，是因为有一根非常重要的线叫接地线。地球是一个巨大的导体，我们可以把地球当作是一个无穷的电子存储仓，电子在地球中是取之不尽，用之不竭的。

要记住这个符号： 这是接地的符号。接地在电路中的用处非常大，像树莓派的针脚里，标有 Ground 的针脚就是接地的。以后这系列视频中要用到的芯片，也都有 GND 这个引脚是接地的，还有一个叫 VCC 的引脚则是给芯片供电的。

在说完了电以后，我们再来看看电流为什么会流动起来，如果只有电线的话，灯不会亮，树莓派也不会运行，这一切都要归功于电源。

## 2.1 电源，面包板，导线

要把这个实验做下去，最重要的部件还有这三个，分别是电源，面包板和导线。这一期我分别介绍一下这三个部件。

先来说电源，我们需要的是 5V 的电源，我个人觉得最好的方法是自己制作一个电源。现在手机充电器都是 5V 的电压，只需要剪开一根手机充电线，就能改装一根可用的电源。一般来说，USB 线里有四根线，两根负责充电，两根负责传数据。<sup>7</sup>

7: 有一些只能充电，不能传输数据。大家如果剪开 USB 线，就能直观的感受一下不同厂家的良心了。

### 重要！重要！重要！

自己制作的这根 USB 线，能且只能接到 USB 充电器上，不要接到电脑上。因为接到电脑上以后，在插拔 USB 的时候，可能会产生一个很大的电压，直接把电脑主板烧坏。我的一台东芝电脑就这样，所有 USB 口都坏了，喇叭也不响了，就是因为我的从电脑里取电。大家不要犯这个错误了。

还有一种方法是购买 9V 的电池，然后连接一个电阻，让电路中的电压保持 5V。这种方法的优点是不用剪一根 USB 线，电池也不贵，缺点就是如果玩的特别多，没多久就要换一节电池。



Figure 2.3: 9V 的电池

这种方法我也是很推荐的，因为比较安全。



再来讲一个特别重要的东西，面包板，这个设备关系到我们要做的实验能不能成功。面包板的原理是非常简单的，只要大家看一眼就能理解其原理。我来拆解一个面包板。

讲完了面包板，还有一个很重要的器件是导线。

# Logic Gate Symbols



OR



NOR



AND



NAND



XOR



XNOR



Buffer



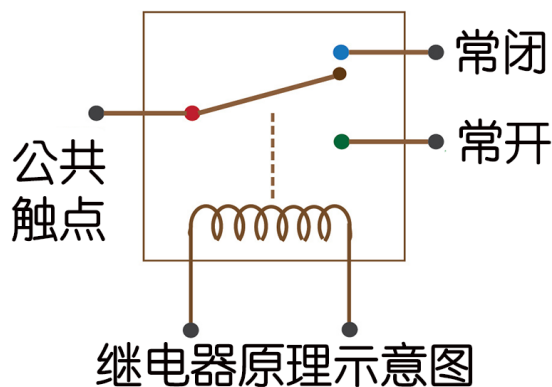
NOT

## 3 继电器，晶体管和逻辑门

### 3.1 继电器

在正式讲之前，我想请大家先来看一段视频，这段视频是日本在战后造的一台计算机，使用的主要电器元件是继电器。

继电器是我们初中物理就学过的知识，下图是继电器的原理示意图，大家一看也就明白了。



3.1 继电器	10
3.2 半导体	11
3.3 晶体管的工作原理	13
3.4 逻辑门	15

通常，我们把继电器线圈未通电时处于断开状态的静触点，称为“常开触点”，处于接通状态的静触点称为“常闭触点”，以上两者共用的动触点称为“公共触点”。严格的来说，这种继电器的名字叫“双掷继电器”，常开触点和常闭触点只有一个有电。在现实中，继电器最常见的用法之一是用低电压小电流来控制高电压大电流的电路，比如可以用 12 伏 1 安的电路来控制高达数千伏数十安的电路，这就是我们常说的“四两拨千斤”，来保证操作人员的安全。

但是在继电器做的电脑中，并不是用的这个原理，电脑里并没有高电压和大电流，我们感兴趣的仅仅是用了继电器开关的功能，这个开关更神奇的是不用人工控制，而是用电流控制。还有一点要稍微强调一下，这里的开关与现实中开灯关灯开关有一点区别：在计算机中，每当提到开关的时候，不管是开还是关，都是输入信息。

Figure 3.1: 继电器原理示意图

继电器在 19 世纪就发明出来了，布尔代数也是在 19 世纪被发明出来了，但是直到 20 世纪 30 年代，出生于 1916 年，22 岁的香农在麻省理工读硕士的时候，才发现两者之间的关系。他写了一篇可能是有史以来最著名的硕士论文，名字叫《继电器和开关电路的符号分析》，<sup>9</sup>在这篇论文里，香农清晰的阐述了这样一个道理：**电子工程师可以用布尔代数并且采用继电器来设计开关电路**。继电器就像开关一样，可以通过串联或者并联在电路中，从而执行逻辑任务，这种组合也被称之为逻辑门 (logic gates)。

9: 英文名为 *A symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits*.

**因为继电器可以控制继电器，所以用继电器构成的逻辑门从原理上可以无限扩大，从而实现更复杂的功能。**这就是继电器计算机的原理。接下来我在视频里展示一下我用继电器做的一个电路。这个电路是一个与非门，我用两种方法实现的，一种是用的继电器，一种是用的晶体管。

我实现的这个逻辑门叫与非门，也叫 NAND，这是两个单词的缩写， $NAND = NOT + AND$ 。这个逻辑门非常重要，从理论上讲，其它所有的逻辑门，都可以通过这个逻辑门来完成。至于怎么证明，下面几期视频中我会给出详细的证明过程。

现在我想讲一个我认为更重要的东西，我展示的第二个电路是用晶体管做的，晶体管的原理是什么呢，为什么用晶体管来构建计算机？

## 3.2 半导体

虽然了解半导体实际上对编程的用处不大，不过我觉得很有趣。本着打破沙锅问到底的考据癖的性格，我要讲一下半导体的原理。现在半导体如此的重要，如果连半导体都不知道，我觉得有点太没有好奇心了。

今天最常用的半导体是硅和锗。我们看一下元素周期表就可以看到，碳，硅，锗是同一列的元素，学名我们把它称之为同一族元素。同一族元素有什么样的性质呢，最外层的电子数是一样的。我们从上往下看，六号元素 C 是非金属，14 元素 Si 是半导体，32 号元素 Ge 是金属。也就是说，是从非金属到金属在递变。在金属和非金属过渡线上的元素，被称之为半导体，顾名思义，就是导电不如金属好，在室温下多少有点导电，不像非金属一样完全不导电，只有接近绝对零度，才完全不导电。

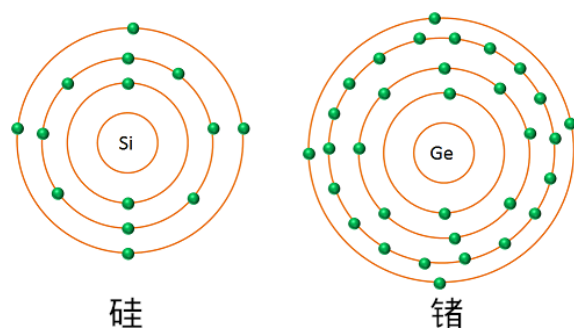


Figure 3.2: 硅和锗的原子结构图

按照《费曼物理学讲义》第 3 卷第 13 和第 14 这两章的内容，费曼解释了一个奇怪而不可思议的事情——在完美的晶体中的电子为什

么可以穿过晶格运动，即使它与所有的原子碰撞也能完全自由的流动，这是固体导电的原因。

如果我们人为的往硅晶体里放入一个别的原子，比如硼原子或者磷原子，会发现硼原子或者磷原子能占据硅晶格中的一个位置，这样一来它就必须表现得与 4 价硅原子一样，用它的最外层价电子与硅形成晶体键，但是硼原子最外层只有 3 个价电子，就会有一个空穴，磷原子的最外层有五个价电子，就会多一个电子。

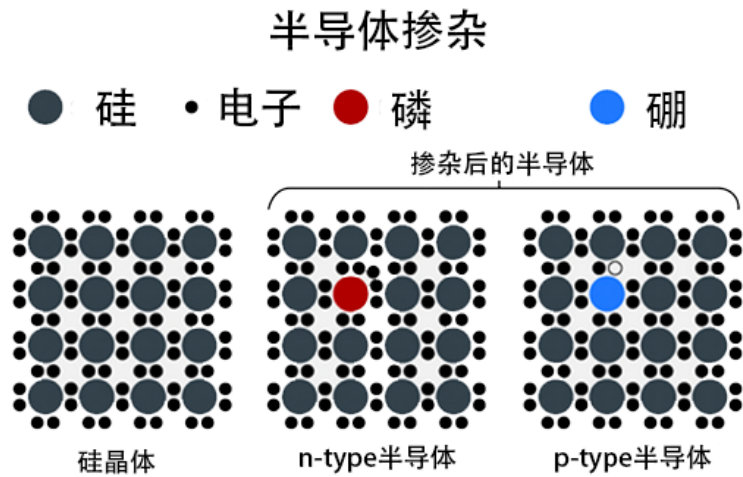


Figure 3.3: 半导体掺杂

我直接引用《费曼物理学讲义》第 14 章的结论，如果大家对实际的推算过程有兴趣，可以自己去找书来看看。当晶体中产生“空穴”的时候，“空穴”的行为像具有一定有效质量的经典粒子一样，所以“空穴”像一个在晶体中运动的带正电的粒子。“空穴”粒子的电荷是正的。像这种掺杂硼元素的晶体中空穴数目较多的材料称之为“p 型”半导体。<sup>10</sup>

10: 其中的 p 代表英文单词 positive.

同理，加入磷元素，从而使晶体内电子数较多的材料被称之为“n 型”半导体。<sup>11</sup>

11: 其中的 n 代表英文单词 negative.

如果只有这两种半导体也没什么用，顶多接在电路里能导电，虽然两种导电有些不同，p 型半导体导电是因为因为空穴，n 型半导体导电是因为有多余的电子。真正有意思的事情是当两种类型的半导体结合在一起的时候，神奇的事情就发生了。

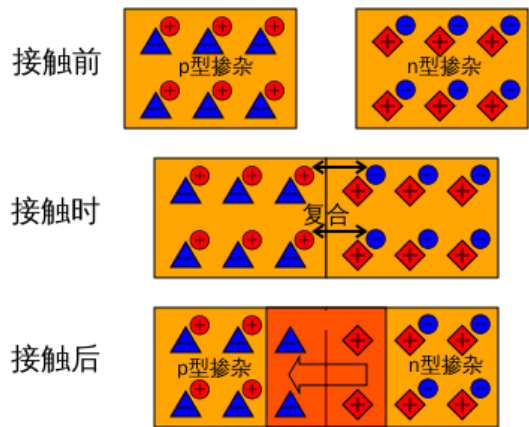


Figure 3.4: PN 结

当 p 型半导体和 n 型半导体结合的时候, “金风玉露一相逢, 便胜却人间无数。” p 型半导体有多余的空穴, n 型半导体有多余的电子, 那么电子会跑过去去填补空穴。可能大家会想, 如果能造出一种有无穷多空穴的物质, 然后再造一种有无穷多电子的物质, 然后用导线连接起来, 不就成了永动机了么? 实际上是不可能的, 费曼在书里已经解释了为什么不可能, 接触的地方又会形成一个类似 PN 结的东西。

两种半导体材料接触的时候, 会形成一层不到 1 微米的边界, 按照 wikipedia 上讲是只有十分之几微米那么薄的一层膜。在这一层薄膜里, 会因为电子与空穴的互相渗透, 形成一个电势差。对硅来说, 这个电压大概是 0.5V-0.7V, 对锗来说, 这个电压大概是 0.2V 到 0.3V。

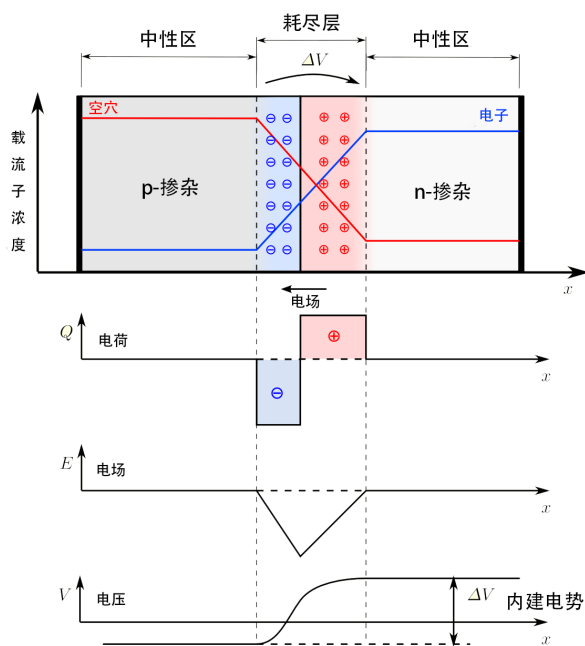


Figure 3.5: PN 结平衡示意图

### 3.3 晶体管的工作原理

我主要是想做一台电脑出来, 所以对晶体管其它方面的应该不过多涉及, 只专注于 NPN 晶体管。先来做实验来看看晶体管的工作的情况。

通过实验可以看到, 当中间这个针脚通电的时候, 灯泡就亮了。在计算机中, 我们用的就是晶体管的开关功能。晶体管也叫三级管, 因为它有三个针脚, 这三个针脚的名字分别是中间的基极 (Base), 左边的发射极 (Emitter) 和右边的集电极 (Collector)。

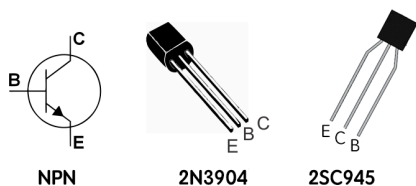


Figure 3.6: NPN 晶体管

如果只考虑晶体管的部分, 其电路图如下:

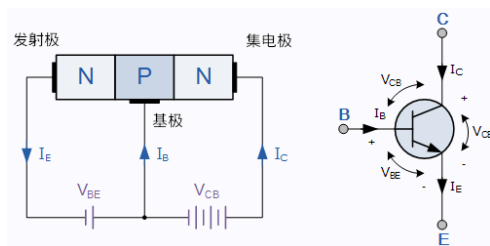
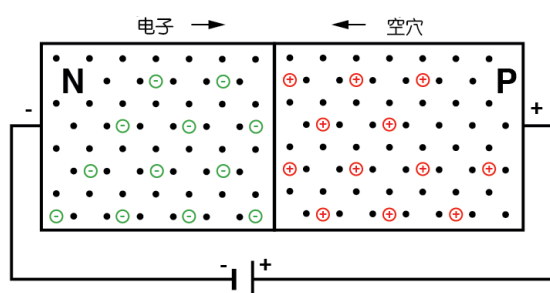
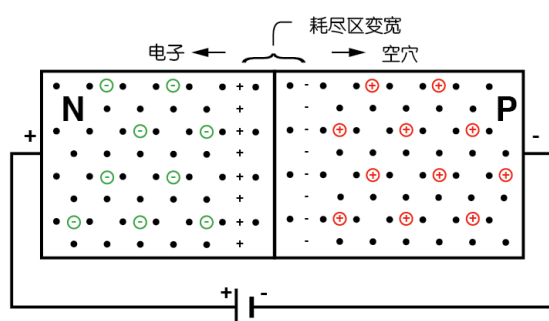


Figure 3.7: NPN 晶体管电路图

NPN 晶体管的示意图如上, 总共有三个部分, 两端是 n 型半导体, 中间是 p 型半导体。前面讲半导体的时候, 我们已经分析了 pn 结, 在这里可以用 pn 结来分析, 假设我们有一把刀, 在 p 型半导体的中间把晶体管分开, 会形成两个 pn 结。



(a) 正向偏置



(b) 反向偏置

Figure 3.8: 正向偏置和反向偏置

先来看一下正向偏置, 假设我们的电压是慢慢升高的, 对硅管来说, 当电压升到 0.7V (0.6V-0.8V) 的时候, 电流会突然增高。这个电压有个学名叫门槛电压或者正向压降。如果是锗管, 这个电压是 0.2V (0.2V-0.3V)。还有几个术语讲一下, p 型半导体这一端叫做高电位端, n 型半导体这一端叫低电位端, 这样显得比较专业一点。所谓正向偏置就是正极接在高电位端, 负极接在低电位端。

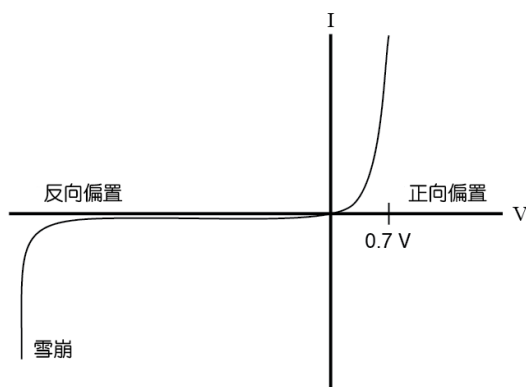


Figure 3.9: 二极管电流电压对应表

与之相反的是反向偏置, 正极接在低电位端, 负极接在高电位端。在反向偏置的时候, 几乎没有电流通过, 如果接上一个高灵敏度的电流表, 仍会看到有电流通过, 这个电流也有个学名叫漏电流。当反向电流足够大以后, 反向电流会急剧增大, 也被称之为击穿。被击穿以后, 晶体管会升温, 如果击穿时间很短的话, 可能晶体管只是有些损伤, 如果时间长的话, 晶体管会被烧毁。

### 3.4 逻辑门

上两个视频我们讨论了晶体管的工作原理, 对我们来说, 只需要用到晶体管的开关功能。对计算机来说, 当电流通过晶体管的时候, 表示一种状态, 当电流不能通过晶体管的时候, 又可以表示一种状态。这两种状态也有个学名可以称之为“二进制”, 英文叫 binary。

我们暂且不说二进制的优点, 先来说说不用二进制的缺点。在历史上, 曾经出现过三进制的计算机, 有个专门的名字叫 ternary, 还出现了五进制, 英文名叫 quinary, 当然, 还出现了十进制计算机, 这就是大名鼎鼎的 ENIAC。这些计算机之所以都没有流传下来, 一个重要的原因是虽然现在的晶体管可以把电流分成不同的电压, 而不仅仅是通电和不通电两种状态, 但是要精确的区分这些状态非常困难, 尤其是当如今的电脑速度越来越快的情况下。有可能在电脑附近开个微波炉都有可能影响其正常功能的使用。只用通电和不通电这两种状态得到的好处要远比用其它进制得到的好处多。

还有一个很重要的因素是数学上有一个分支叫布尔代数, 乔治·布尔是一名 19 世纪自学成才的英国数学家, 布尔代数就是以他的名字命名的。我们上学时候都学过数学, 数学是以运算数字的, 但是乔治·布尔的数学试图运算的是真理, 这一理念可以承接到 2000 多年前的亚里士多德。乔治·布尔后来写了一本书叫《思维规律的研究--逻辑与概率数学理论的基础》。从书名中我们可以推测, 他也许是想找到一种数学方法来描述人类的大脑是如何运行的。

我们小学时候学的数学是用诸如加减乘除的方法对数字进行运算, 布尔代数是用与或非的方法对二进制进行运算。与或非是如此的重要, 所以一定要单独分别讲一下它们, 更神奇的是, 与或非门可以用电路来实现, 从而我们可以用电路来进行计算。

### 非门 NOT Gate

在视频里边做实验边讲

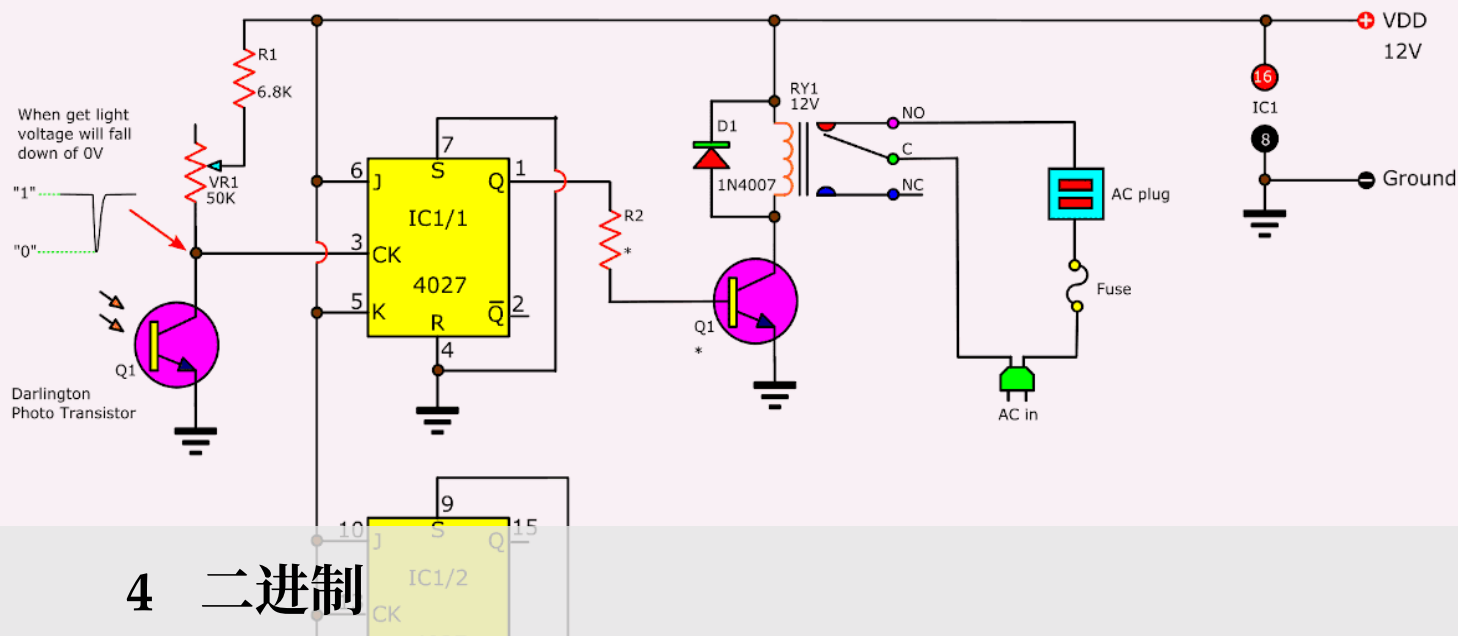
### 或门 OR Gate

在视频里边做实验边讲

### 与门 AND Gate

在视频里边做实验边讲



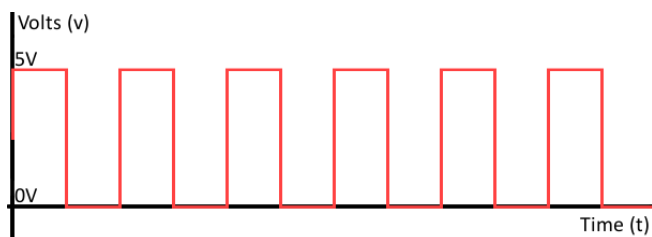


## 4 二进制

### 4.1 教科书和现实世界的区别与联系

在前面的视频里讲布尔代数的时候，我讲到了二进制，除了布尔代数之外，还有个很重要的原因是用二进制在工程上是最简单可靠的。

我们在上学的时候，学数字电路或者计算机组成原理这门课的时候，教材上都是讲要么输入 1，要么输入 0，画的都是非常漂亮的波形图，像下面这样。



4.1 教科书和现实世界的区别与联系	17
4.2 连接电路注意事项	18
电源问题	18

Figure 4.1: 数字信号

但是现实总是不完美的，不管我们用双极晶体管还是场效应晶体管，都不可能产生像教科书上画的那样完美的波形。且不说受温度等外部条件的制约，仅仅是两个相同型号相同批次的晶体管，在同样的条件下产生的波形都可能有一定的差距。

当晶体管用于模拟开关作用时，其工作区是晶体管的工作点从截止区到饱和区轮换进行。无论哪种开关，都会有延迟出现。在规格书上，往往会提供  $t_{on}$ 、 $t_{off}$  的规范。

当晶体管工作在开关状态时，假设晶体管是处于截止状态（即关闭状态）。当在晶体管的基极注入一足够大的正向电流开始，到完成一次翻转，要经过 4 个阶段，分别是：集电极电流从“0”开始增大，升至  $I_{cm}$  (最大集电极电流) 的 10% 所需的时间，称为延迟时间，记作  $t_d$ ；集电极电流从  $I_{cm}$  的 10% 开始，升至  $I_{cm}$  的 90% 时所需的时间，称为上升时间，记作  $t_r$ 。

此时，晶体管被认为呈开启状态。此时因输入信号仍维持高电平，所以晶体管的  $I_c$  将继续增大，只要此注入信号维持足够长的时间，晶体管就会进入深饱和状态。当晶体管进入深饱和后，基极电流的增加，

对集电极电流将失去控制，仅仅能起维持作用。这两段时间之和相当于规格书中的开启时间  $t_{on}$ ，也就是说： $t_{on}=t_d+t_r$ 。

当注入信号由上升转为下降，集电极电流将从饱和区退出。集电极电流在基极注入反向电流后，从  $I_{cm}$  开始下降，到下降至 90% 时，所需的时间，称为储存时间，记作  $t_s$ 。

集电极电流从  $I_{cm}$  的 90% 降到 10% 的  $I_{cm}$  所需的时间，称为下降时间，记作  $t_f$ 。显然，这两段时间之和，就相当于规格书中的关断时间  $t_{off}$ ，也就是说： $t_{off}=t_s+t_f$ 。

在这四个时间段里， $t_s$  所占用的时间最长。对电路的影响也最大。

## 4.2 连接电路注意事项

我要录的视频主要是做个实验，完成一台可以运算的电脑。类似于把国内计算机系上的一个叫《计算机组成原理》的课用面包板和逻辑门做出来。理论和实验总是有那么一点点出入，比如在理论上，我们可以输入 0 和 1，但是在现实中，并没有一个信号是 0 和 1 的，只能是高电平和低电平。

如果用的芯片不同的话，这个高电平与低电平的高与低也是不一样的，主要是 TTL 和 CMOS，搞计算机的人喜欢缩写，TTL 的意思是 Transistor-Transistor Logic，可以翻译为双晶体管逻辑电路。

### 电源问题

我用 74 逻辑芯片为例，如果 74LS 开始的，就是 TTL，工作电压是 5V 左右，这个要看手册，手册里详细的标注了工作电压，可能是 4.5V-5.5V，也可能是 4.75V-5.25V。对输入针脚来说，低电平是 0.8V 以下，高电平是 2.0V 以上。对输出针脚来说，低电平是 0.4V 以下，高电平是 2.4V 以上。

我用的是 TTL，唯一的原因是我在大学时代就像女生收集鞋子或者包一样，我收集了大量的逻辑芯片，碰到我没有的，我就买 1-2 管，一管大概是 25 个，收集了好多年以后，现在至少有 100 来管吧，如果卖的话，可能能买一部苹果手机了吧。这东西就像乐高积木一样，不会坏。

我做实验的这些芯片都是比较古老的 TTL 晶体管，现在市面上有很多种逻辑芯片。如果大家万一有人和我一样，比较变态，喜欢自己搞这种电路，买到的是 CMOS 电路的，比如 HC 系列的，采用的是 CMOS 工作电平，供电电压是 3V。

如果使用 CMOS 的芯片，连接的方式和 TTL 有一些不同。

对芯片来说，有三种状态，一种是连接高电平，比如 5V。一种是连接低电平，比如 0V。还有一种是什么都不接，术语叫悬空。比如我用的针脚不多，有几个多余的，用不到，索性我不管了。对 TTL 来说，这没问题，如果大家买的是 CMOS 电路的，就有问题了。

CMOS 电路的输入端是不允许悬空的，因为悬空会使电位不定，破坏正常的逻辑关系。另外，悬空时输入阻抗高，易受外界噪声干扰，使电路产生误动作，而且也极易造成栅极感应静电而击穿。所以“与”

门,“与非”门的多余输入端要接高电平,“或”门和“或非”门的多余输入端要接低电平。若电路的工作速度不高,功耗也不需特别考虑时,则可以将多余输入端与使用端并联。

## 封装问题

如果大家有兴趣购买的话,要买 DIP 封装的, DIP (dual inline-pin package) 也叫双列直插式封装技术。这种技术已经退出历史舞台了,由于其 DIP 封装封装面积和厚度都比较大,而且引脚在插拔过程中很容易被损坏,可靠性较差。DIP 封装的芯片在从芯片插座上插拔时应特别小心,以免损坏管脚。

这样一个芯片大概是 5 到 15 块,以我的经验,如果买的面包板比较差,我在前几期视频里讲过了面包板,如果面包板用的是铁,硬度非常大,这种 DIP 的针脚用的是铜,铜和铁硬碰硬的时候,铜会比较崩溃。而且,我们初中化学也学了,两种不同的金属接触,会加速生锈的速度。可能过了一个潮湿的夏天,芯片的面包板就都生锈了。因此,一定要选购镀锡铜材质的面包板。

目前最流行的技术是 SMT (Surface Mounted Technology), 也叫表面组装技术 (表面贴装技术), 是目前电子组装行业里最流行的一种技术和工艺。虽然很流行,芯片也容易购买,但是这种要焊接,现在工厂里一般都是用全自动贴片机来做,对咱们不太合适。

## 买什么芯片

简单来说,买相同类型的芯片能让自己麻烦少很多。我做实验的时候会全部使用 TTL 电平的 74LS 系列的芯片。如果大家有一部分 TTL 电平的 LS, 有一部分 COMS 电平的芯片, 比如 74HC 的, 还有输入是 TTL 电平, 输出是 CMOS 电平的 74HCT 芯片。

这些芯片混用是可以的,但是你要知道怎么接上拉电阻和下拉电阻。我在实验中只会讲 TTL 电平的 74LS 系列。

# 公式中用到的字母以及发音

字母	英文名和发音	字母	英文名和发音
$\alpha$	alpha <i>AL-fuh</i>	$\nu$	nu <i>NEW</i>
$\beta$	beta <i>BAY-tuh</i>	$\xi, \Xi$	xi <i>KSIGH</i>
$\gamma, \Gamma$	gamma <i>GAM-muh</i>	$\omicron$	omicron <i>OM-uh-CRON</i>
$\delta, \Delta$	delta <i>DEL-tuh</i>	$\pi, \Pi$	pi <i>PIE</i>
$\epsilon$	epsilon <i>EP-suh-lon</i>	$\rho$	rho <i>ROW</i>
$\zeta$	zeta <i>ZAY-tuh</i>	$\sigma, \Sigma$	sigma <i>SIG-muh</i>
$\eta$	eta <i>AY-tuh</i>	$\tau$	tau <i>TOW (as in cow)</i>
$\theta, \Theta$	theta <i>THAY-tuh</i>	$\upsilon, \Upsilon$	upsilon <i>OOP-suh-LON</i>
$\iota$	iota <i>eye-OH-tuh</i>	$\phi, \Phi$	phi <i>FEE, or FI (as in hi)</i>
$\kappa$	kappa <i>KAP-uh</i>	$\chi$	chi <i>KI (as in hi)</i>
$\lambda, \Lambda$	lambda <i>LAM-duh</i>	$\psi, \Psi$	psi <i>SIGH, or PSIGH</i>
$\mu$	mu <i>MEW</i>	$\omega, \Omega$	omega <i>oh-MAY-guh</i>

以上有罗马与希腊字母的不同，以防大家看到有不同的公式，只是字母的写法不同。

连载中.....

