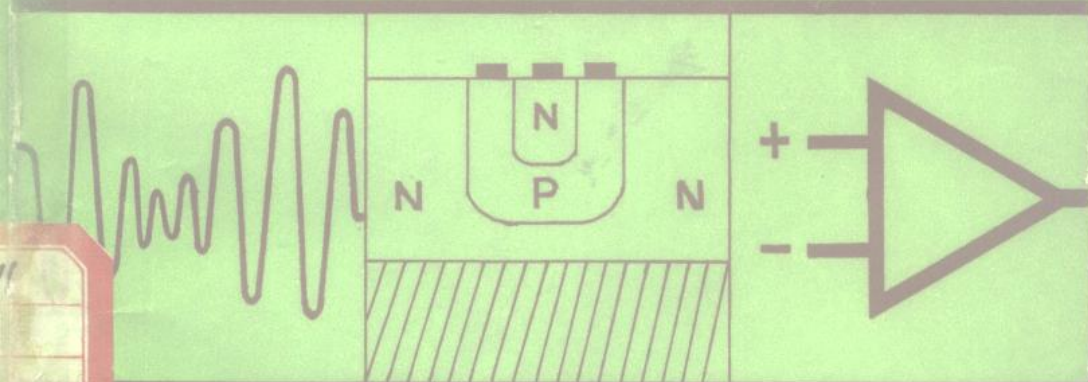


电子技术自学丛书

固态电子学入门

[美]威廉 E.哈福特 尤金 W.麦克沃特 等编著

国防工业出版社



电子技术自学丛书

固态电子学入门

[美]威廉 E. 哈福特 尤金 W. 麦克沃特 等编著
石永富 许德华 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书对固态电子学做了简要而全面的介绍，内容通俗易懂，由浅入深，是电子学方面的入门读物。全书分十三章。首先概述元件在电气系统中的作用，基本电路在系统中的功能，半导体器件与系统的关系；然后介绍二极管工作原理及参数、晶体管工作原理及制造工艺；对数字集成电路、MOS 与大规模集成电路、线性集成电路等也作了简单介绍。每章之前列有词汇表，结尾附测验题供读者自我检查。

本书适于从事有关电子技术工作的工人、管理干部和非电子学专业的科技人员阅读，也可供具有中等文化水平的、希望了解固态电子学的业余爱好者们自学。

UNDERSTANDING SERIES™
UNDERSTANDING SOLID-STATE ELECTRONICS
William E. Hafford Eugene W. McWhorter
Texas Instruments Incorporated, 1978

电子技术自学丛书

固 态 电 子 学 入 门

(美)威廉 E. 哈福特、尤金 W. 麦克沃特 等编著
石永富 许德华 译

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 $1/32$ 印张 $7\frac{1}{2}$ 192 千字

1983年4月第一版 1983年4月第一次印刷 印数：0,001—9,300册

统一书号：15034·2439 定价：0.96元

前 言

本书是为那些希望了解或需要懂得电子学，又不可能花很多时间学习的读者出版的。编写时，基本不采用数学公式解释技术概念，书中所涉及的不超出初小算术范围；另一方面，讲授技术概念时，以非技术人员为对象（他们当中有人连电铃接线也搞不清楚），所以解释每一个新的概念、术语，总是从头讲起，由浅入深。

很多科普读物，至多只能给读者留下极肤浅的印象；而读完本书之后，你会感到胸中有数，甚至能应付自如地与电子工程师们交谈技术。

本教程原为十二小时录象磁带的解说，后改编成十八课，连载于《Electro-Procurement》杂志与得克萨斯仪器公司内部刊物《DallaSite》。于是，从职员到机械工程师，成千上万人跨行跨业学完了本课程，普遍反应受益不浅。本书也采纳了他们的许多建设性意见。

由于电子领域日新月异，书籍必须充实新内容才能跟上飞速发展的形势，所以我们出版了第三版。已经对第十二章的内容进行了扩充，包括了微处理机和微型计算机所采用的 MOS 与大规模集成电路的最新资料。第十三章是新增写的，对线性集成电路技术进行了讨论。

如果本书能帮助你工作得更有效，或使你对电子学更感兴味，我们就达到了目的。倘能使你进一步意识到，电子技术比其他任何技术更能展现人类的未来，我们就更为满足了。

目 录

第一章	电在各种电气系统中的作用	2
第二章	系统中的基本功能电路	19
第三章	电路如何进行判断	37
第四章	半导体与系统的关系	53
第五章	二极管的作用及工作原理	73
第六章	二极管的性能与参数	90
第七章	晶体管的工作原理及制作方法	105
第八章	PNP晶体管及晶体管参数	123
第九章	闸流晶体管与光电器件	140
第十章	集成电路概述	166
第十一章	数字集成电路	180
第十二章	MOS与大规模集成电路	201
第十三章	线性集成电路	221
	小测验答案	236

第一章词汇表

电子 形成电的微小粒子。

电压 导线或者电路中的电位差，通常用伏(V)表示。

电流 电子的流量。通常用安(A)、毫安(mA)或微安(μ A)表示。

电阻 外加电压以后，电流通过导体流动所受的阻力。通常用欧(Ω)或千欧(k Ω)表示。

直流 沿单方向流动的电流。简写为 dc。

交流 每隔一定时间反向(或交变)流动的电流。简写为 ac。

频率 每秒钟内交流电经过一个完整周期(向前和向后流动)的次数。以往用周/秒(cps)及其千倍、兆倍来表示，现在用等效单位赫(Hz)、千赫(kHz)、兆赫(MHz)与千兆赫(GHz)表示。

数字 传送信息的一种方式，它是利用电路使电流作通、断的转换来实现的。

模拟 传送信息的另一种方式，它是利用电路调节电流或电压来实现的。

调幅 模拟方式之一，通过电路来改变(调制)电信号的幅度或高度，借以传送信息。

调频 也是模拟方式之一，通过电路来改变(调制)电信号的频率，借以传送信息。

第一章

电在各种电气系统中的作用

在正式研究半导体器件与电气系统之前，首先说明两点，以便于读者理解新的概念。第一，所有电气系统，不是处理信息，就是做功，或二者兼有。不管系统实际多复杂，它所做的一切无非是处理信息或者做功。第二，所有电气系统的组成方式都相同，可称之为“一般系统结构”。任何系统都可分为三个基本部分：感觉、判断和动作。

图 1.1 为“一般系统”方框图。首先，系统必须有输入信息，如输入箭头所示。输入信息一般是非电性的，比如揪一下汽车的起动按钮。其次，组成部分之间必须有信息流，如中间箭头所示。最后，动作部分把信息流转换成所需的动作，如“动作”箭头所示；这一动

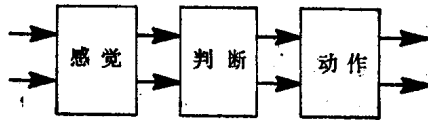


图 1.1

作可以是所需形式的功或信息，比如，用以驱动电钻马达使其钻头迅速旋转的功，或者是显示在台式电子计算机上的数字信息。

一般系统（乃至任何电系统）的任务都是处理信息或者做功。每一系统都以信息作为输入，在内部形成信息流，从而产生动作。人们日常生活中也有类似情况。例如，用手碰碰灼热的炉子，手指有火烫的感觉，就是信息的输入；这信息传到大脑，那是系统的判断部分；判断之后，产生的信息又传到动作部分，也就是你的手臂，这时信息又转换成所需的动作，你会很快把手挪开，手的挪动就是做功。万一手被炉子粘住，无法挪开，你就会呼喊求援，这一喊叫并不是做功，而是发出了求救的信息。由此可见，人

体组织跟电气系统一样，也能划分为感觉、判断、动作三大部分。

现在，我们换一个与电子学关系更加密切的例子来看一看。图1.2表示一个简单、典型系统的功能或方框图，它是一套暖气设备的恒温控制系统。这一系统必须有温度敏感元件，为了调节所需的温度，还必须有控制装置。这两种元件都能将外部信息加以转换，变为能够内部处理的形式。温度敏感元件(温度计的一种)向系统报告室温已降到所需温度以下，或者升至所需温度以上；控制装置则通知系统需要什么样的温度。这些元件就是这样把外部信息进行了转换，变为系统能处理的内部信息。然后，系统就得利用这两个信息流进行判断，实际上就是做一个决定，究竟让燃料阀门打开，还是关闭。

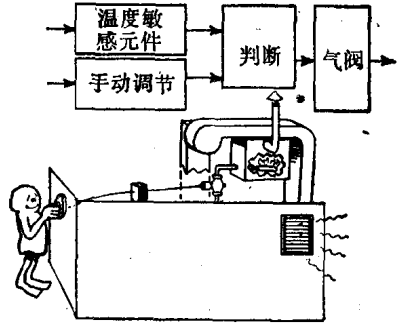


图 1.2

如果决定“开”，那么，燃料阀执行机构就把这个信息转变为动作，将沉重的阀门打开。通过这个例子，我们又看到了组成系统的普遍方式：感觉、判断、动作；而对信息、功的安排是：

信息在输入端，功在输出端。

让我们另举一例。图1.3示出留声机或高保真系统的方框图。我们首先从唱针与唱头获得输入，当唱片槽纹在唱针下通过时，就完成了感觉的功能，然后再

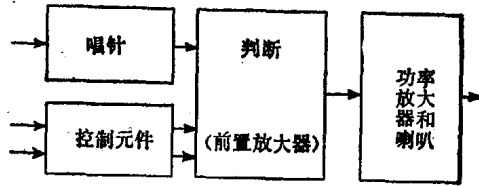


图 1.3

经过音量与音调的手动控制。从这些输入器件获得的内部电信号通常进入前置放大器，由它决定了喇叭的动作，只是功率太小，所以，信号最后还需传到功率放大器，经功率放大后的信号再送至喇叭，喇叭便在空气中发声。这样，我们又把整个系统分成了三部分：感觉、判断和动作部分。

系统的这三个部分还有其他名称，我们之所以采用“感觉、判断、动作”，是因为它们较为形象而具体。“输入、处理、输出”的叫法是前者的同义词。有时为了方便，还将感觉、动作部分称为“输入接口”、“输出接口”，因为这两部分确实起着接口或“中间人”的作用，在外界与电气系统之间，它们负责转换信息和做功。

炉温控制和留声机是比较简单的系统。让我们考察一下计算机，看看所谓一般结构在比较复杂的系统里是什么样子。图 1.4 表明，计算机也分为三个典型部分。

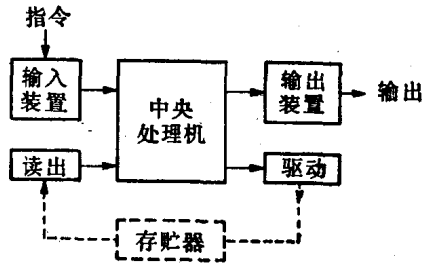


图 1.4

不过，这里要指出的是，由于计算机结构复杂，所以它的“感觉”或“输入”方框分为两部分，提供两个信息流；“动作”或“输出”方框同样也分为两部分。“一般结构”中的判断部分，在这里就是计算机的中央处理机。

系统如何用电来处理信息和做功？

现在，你已初步掌握了组成电气与电子系统的基本方法。下一个问题就是“系统怎样处理信息和做功”。电气与电子系统以电为媒介，它们通过电路（一般采用半导体电路）完成这些功能。关于电路与半导体，我们放在后面讨论。现在先弄清楚，电是如何处理信息与做功的。电究竟是什么呢？在做这些工作的过程中，

电压、电流以及其他电特性起着怎样的作用呢？

实际上，电非常简单，它的举止跟液体相似，能象水一样流动，并充满所有可能到达的空间。电，由称做“电子”的微小粒子组成，一切物质中都存在电子。在金属导线里，电子可由发电机或电池抽吸，就象抽水一样。电子之间相互排斥，因而在电路中密度趋于均匀，如同水在引力作用下趋于同一水平面似的。因为水和电的行为有许多相似之处，所以，我们可用水流作比喻来说明电的特性。

图 1.5 为顶端开口的水箱。水泵那里有个小人，从低水位的水槽抽水，往水箱里灌，灌到一定高度，水又流入水槽。这里有另一个小人测量水箱的水深，箱中水越深，槽里水压越大。这个压力使水以每分钟好几加仑的一定流速流过水槽。随着箱中水面的升高，水槽入口处的水压也在增加，因而每分钟流过水槽的水量也就增多。

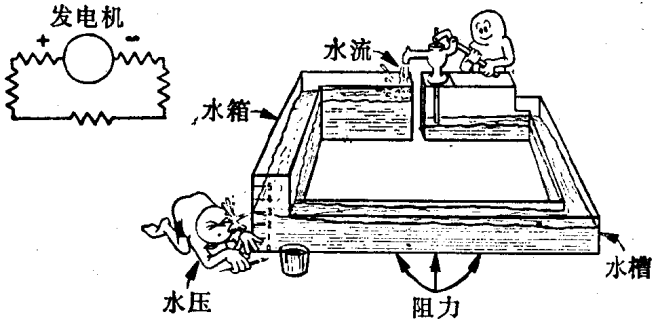


图 1.5

电的行为也类似。我们有一个电压源，叫做发电机。电压用伏特度量，可以从电池、电源设备以及发电厂等处取得。它们跟水泵、水箱处的小人起同样的作用。电子流动跟水流类似，不过电子流速用安培度量，而水速用加仑/分表示。这种电子流叫做电流。如同水的系统一样，电压(电子压力)增大时，电流(电子流)也随之增大。

改变水槽的尺寸，可以改变水的流速。流过大大水槽时，每分钟流通的加仑数，比流过汽水吸管的水要多，所以我们说，小小水槽阻碍水流的本领比大大水槽强，或者说，大大水槽比小小水槽导通的水多。同样，电子流也受到它所流通的尺寸与材料特性的影响。这种影响称做电阻，用欧姆度量。电阻定义为电压伏特数与电流安培数之比，如图 1.6 所示。该图也示出了电流随电压增加的关系。电压常用的符号为 V (用伏度量)。电流常用的符号为 I (用安度量)。 R 是电阻所用的符号(用欧度量)。

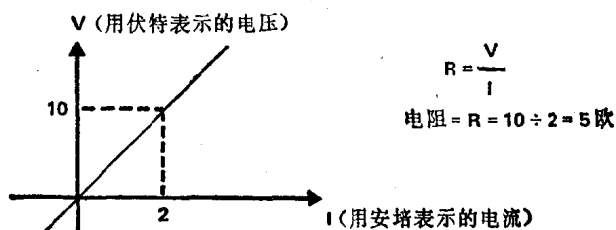


图 1.6

电阻可由通电材料的尺寸大小来控制。图 1.7 示出，水槽的缩颈处限制了水流的通过，因而增加了阻力。同样，我们可以用可变电阻来改变电流。水槽缩小后将会发生什么情况呢？如果水泵那里的人使水箱中的水维持原先那样的高度(压力)，那么每分钟流进水槽的加仑数就减少了，因为每分钟流进狭窄通道的水量减少了。对电来说也是一样，电压、电流、电阻相互都有关。如果改变其中一项，另一项或两项就随之改变。



图 1.7

电也与水一样，必须流动才能传送信息或做功。要流动，就需有来源和去处。解决问题的方法，一般是让它循环，由此产生“电路”这个术语。

讲到这里，让我们回到图 1.5，看一下用水流比喻表示的电流示意图。示意图中的圆圈代表发电机，与它相连的直线代表导体(或导线)。曲折符号表示导体的电阻，也可以代表电阻器。

电怎样传送功率？

电流之所以有用，在于它可把能量或功率从一处传送到另一处。能量由一端输入，在另一端得到利用。图 1.8 中，用水作比拟就说明了这一点。能量在电压升高的过程中被存放到电中；然后，当电压降低时，又被释放出来。在用水作比拟的例子中，要想通过水轮把能量转换成锯木头这一有用功，可以采用增加位差（瀑布高度），或增大流量（水的流动）的方法，这样，水轮就能做更多的功。

从电的角度来讲，我们在图中看到的水泵就相当于把能量存放到电中去的装置。这里姑且还把它叫做发电机，认为它把机械能变成了电能。当然，水泵还可看作是把声能转换成电能的话筒。水轮则可看作是把电能变成对外做功的其他装置——比如，形成机械能的马达，形成声能的喇叭。为简便起见，就把水轮看作为马达。图 1.8 还画出与这个简单电路等效的电气示意图。

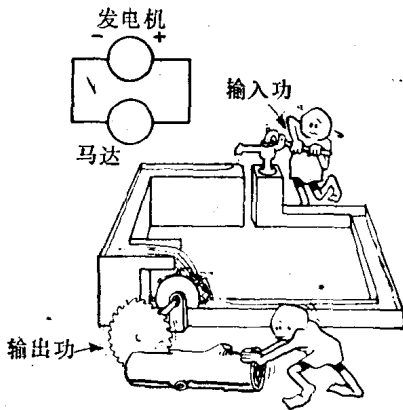


图 1.8

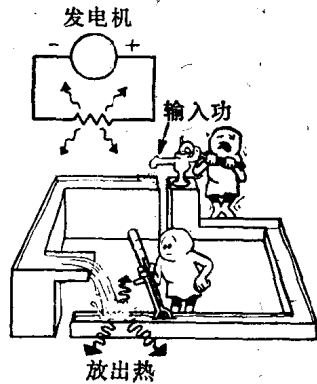


图 1.9

现在看一看，如果我们把水轮从瀑布处搬走将会怎么样（见图 1.9）。搬走水轮之后，电路的其余部分并无变化，水仍然由于瀑布的位差而流动，唯一的变化是不做功了。这时，瀑布相当于电阻

器，能量（或功）仍然由水泵存放到水中，结果怎样呢？能量纯粹被瀑布处的摩擦或阻力浪费掉了。同任何摩擦一样，浪费的能量变为热量，使水和水槽升温。电路的情况也类似。任何做功的装置，如马达，在电路中都可用电阻器来代替，这对电路没有任何影响，只是能量不用来做功，而是变为热量，从而使电阻器发热。这正是电热元件和灯丝的工作原理。

需要强调一下，任何时候，电总是从高电位流向低电位，从而放出能量，不管它是由导线的一端流向另一端，或者是通过电阻器，通过马达，以及其他任何装置，能量必然源出于此。假如你不通过做功将能量加以利用，它就会使导线或装置发热。图 1.9 旁边的示意图中，我们用箭头表现电阻器正在把热量辐射出来。

交流与直流有什么差别？

到目前为止，我们所见的电路，电流都朝一个方向流动，称为“直流”或dc。交流电路的工作跟直流电路基本一样，不同的是，交流电路要有一个专门的发电机。这个发电机激励的电流，先是朝一个方向，然后朝相反方向，通过电路与马达流动。产生出来的交流电又可供专用马达做功。

图 1.10 示出了用水力比拟的交流电路。这个电路跟图 1.8 中的直流马达、发电机电路是一致的。一个专用的水泵代表交流发电机。水泵的操作杆连着一个阀门或活塞，它先向一个方向压水，然后再换一个方向。这样，阀门的一侧先产生高压，然

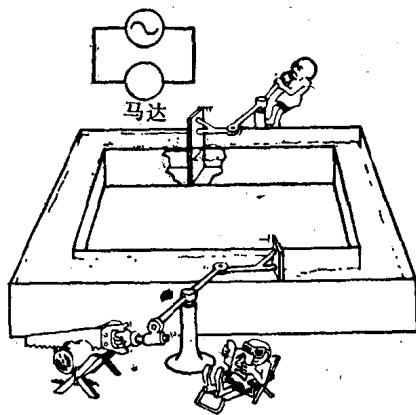


图 1.10

后另一侧产生高压。结果，水就沿着环路流动，同时也就通过了马达；流动的方向是交替变化着的，同直流一样，这只泵也把能量存放到电中去了。

交流马达用操作杆上另一个活塞样的阀代表。跟发电机一样，如果阀门左边的水压比右边高，阀门就向右移动，水向右流；然后，发电机使右边产生高压，阀门和水就向左移动。水在每个来回当中做功，所做的功在此例中用于锯木。

什么是交流电的频率？

交流频率是电流方向变化快慢的度量，也就是每秒钟内电流往返流动通过完整周期的次数，见图1.11。每秒钟经过一个周期称为一“赫兹”。当然，实际电路中的频率，比水力模型所能达到的频率要高得多。我们常听说千赫，就是每秒钟一千周；兆赫，即每秒百万周；千兆赫，即每秒十亿周。

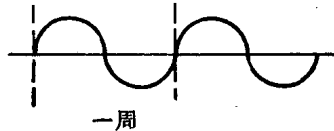


图 1.11

怎样控制功率？

现在，你已经基本掌握了电的流动方式和输送功率的方式。下面将进一步说明，功率是可以控制的，这样就可使系统按照人们的要求来工作。

有两种控制功率的方法。第一种是控制电路的输入功率，比如用水泵与水轮作比拟时，加给水泵的功率就控制着锯子的功率。如果小人使劲地抽水，水轮的功率就大；如果慢慢地抽，水轮的功率就小。不过，在电气系统中，电源的功率一般总是确定不变的。

第二种方法，是通过某一部分电路，而不是电源来控制功率，这种方法更为常见，如图1.12所示。图中，小人推着滑动的闸或坝。假如水泵那儿的小人以固定不变的速度抽水，那么，锯

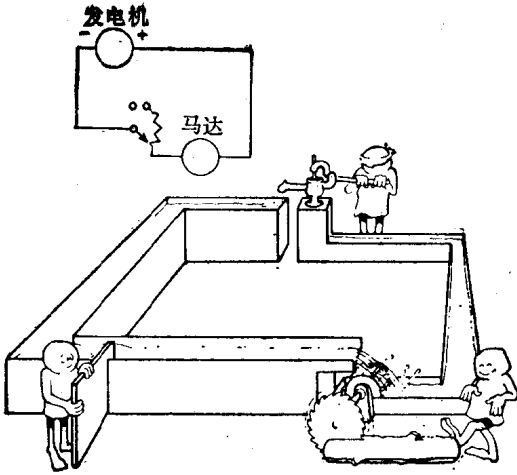


图 1.12

子的功率如何能变呢？管闸人把滑动闸插进去或者拉出来，就会使管道里的水流受阻或者畅通，这样，管闸人就控制了推锯的功率。他可以使锯速或快或慢，也可以让锯子开动或者停下来。

管闸人的作用使我们联想到，在电路中，电源与负载之间，电流可能出现的种种情况：它可以被接通和关断，也可以被调大和调小。记住了这个简单的概念，我们才会使用电。为此，现在把它更加明确地叙述一下：在电源与负载之间，我们只能做两件事，那就是进行“开”、“关”之类的电路转换，或者利用电阻之类的元件进行电路调节。

图1.12的示意图中，画出了我们就上面电路所谈的问题。图中有发电机(水泵)和马达(水轮)。电路中，发电机和马达之间是可变电阻器(闸门)。可变电阻器也可以起到开关的作用。

到目前为止，我们尚未正式讲到半导体。你也许会问，所讲的这些与半导体有什么关系呢？我们说，理解了基本概念，就能使你掌握基本的思维方法，从而大大有助于对半导体的理解。比方说，你已经明白每一系统都可分为感觉、判断、动作三个部分，那么，你就容易理解并记住，各种类型的半导体可能用在什

么地方，容易理解为什么光敏元件主要用于系统的感觉部分；也能看得出判断部分为什么主要包括小信号二极管、晶体管与集成电路；也就容易明白，为什么功率半导体器件，除了给整个系统提供电源之外，主要还用于动作部分。有了这些基本概念，你就能明白，为什么总是由小信号器件来处理系统中的信息，为什么在绝大多数情况下，总是由功率半导体器件来控制做功，等等。不过，目前我们还是需要多学一点基础知识。

电气系统中的信息和功

关于功，我们只简单地谈一下，因为在讨论基础电学时，已经列举过一些有关功的例子。从水力比拟转到电学角度来看，电气系统做功就是完成一项可以察觉的工作，如电气马达提升物体，电热器产生热量，灯泡照明房间。有时功和信息的定义未必能分得那么清楚，例如灯泡也可用于仪表的数字显示，做处理信息的工作。通常可以这样把两者加以区分，就是考虑一下“动作的最终目的是什么，做功还是处理信息？”

电气系统做功时，消耗的功率比较大，例如普通的室内灯泡，一般需要一百瓦以上；反之，系统信息部分一般只需几毫瓦，即千分之几瓦。和做功相比，尽管处理信息所需的功率小得多，但所用的方式无非还是上面谈到的两种：转换或者调制。下面看看如何应用这两种方法来传送信息。

如何用数字方法传送信息？

利用电流的通、断转换来传送信息称为“数字法”，所有现代计算机都采用这种方法；相反，用调制电流的大小来传送信息就叫“模拟法”，收音机、留声机和模拟计算机都是采用模拟法传送信息的例子。

数字法比较容易理解，我们先对它进行讨论。数字计算机所用的基本传输方式，跟简单的电报电路一样。

观察一下电报电码的逻辑基础，就容易明白计算机是如何运用这种技术的。图1.13为简单的老式电报电路示意图。将电池用作电源，它使电源一边的电位高于另一边。发报机电键用一个简单的开关来代替，再用一个普通的蜂鸣器作为接收机。此时，开关处于截止（即断开）状态，由于蜂鸣器两边的电位相同，所以接收机无声。我们按下键以后，开关接通，接收机开关一侧的电位升高，电流加大，蜂鸣器开始工作。当开关断开后，电流停止流动，蜂鸣器又寂静无声了。

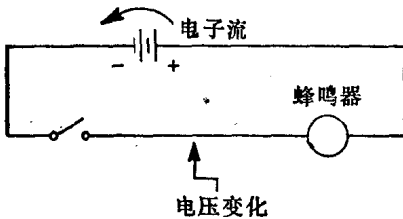


图 1.13



图 1.14

可以说，信息的传输是通过导线中电位的变化来实现的。我们若把它设想成图1.14所示的那样，则图中下水平线代表的电平为零，意味着截止；开关接通之后，电位就上升到上水平线所示的高电平。如果开关接通的时间很短，我们就得到莫尔斯（Morse）电码的一个“点”；如果接通时间较长，我们就得到一个“划”。图中所画曲线给出的点-划，在莫尔斯电码中代表了字母“A”。其实原理很简单——无非是开开关关。

现在我们来看一看，计算机是怎样利用数字法工作的。设计数字计算机的目的是处理数，而不是文字。不过莫尔斯电码的数比较麻烦，每一位数有五个字符（国际电码），所以计算机采用更为有效的代码，叫做“二进制数码”。

下面谈谈这种计算机的工作情况。我们通常设低电平代表0，高电平代表1。图1.15示出了电压曲线。由于二进制数码只能传输0与1，我们怎样从这一代码中提取各种信息呢？每个0或1