

DIANZIDIANLUJISHUJICHU

▲ 电子技术培训教材 ·
■ 成都电讯工程学院 ·
叶正华、杨钟英等

四川人民出版社

电子电路技术基础

责任编辑：崔泽海
封面设计：张仁华

电子电路技术基础 叶正华 杨钟英 等

四川人民出版社出版 (成都盐道街三号)
四川省新华书店发行 渡口新华印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 27.75 插页 4 字数 666 千
1982 年 5 月第一版 1982 年 5 月第一次印刷
印数 1—16,700 册

书号：15118·57

定价：2.30 元

181

前 言

电子技术已广泛、深入应用于国民经济及日常生活的各个领域。推广电子技术，对加速“四化”建设有着重要的作用。

本书较系统地介绍了半导体电路的基本知识。第一章为电工基础，简要地介绍了电的基本物理量和直流、交流电路的基本定律，以作为学习半导体电路的必备基础知识。第二章至第七章，讨论了半导体二极管、晶体管的工作原理及低频小信号等效电路和参数、低频小信号放大器、负反馈放大器、直流放大器、功率放大器、振荡器。第八章为电源设备，介绍了常用的各种整流滤波及稳压电路。第九章到第十四章为脉冲与数字电路，介绍晶体管的大信号运用，线性及非线性脉冲波形变换电路，基本脉冲单元电路，布尔代数及数字电路基础知识。

全书以讲述电路的基本工作原理为主，辅以适当的分析、设计计算及典型应用介绍，并尽量不涉及较深的数学知识，而以物理概念的阐述代之。

作为普及电子技术教育的培训教材，在学习完第一、二两章后，第三章至第八章和第九章至第十四章可同时并行学习。为便于复习，每章附有若干练习及思考题。

本书由杨钟英、叶正华、刘令虎、武庆生编写。

全书插图由张世燕、周家俊绘制。在编写过程中，得到四川省科委、四川省电子学会及成都电讯工程学院陈湖教授的关怀和支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，请读者批评指正。

编 者

一九八一年五月

目 录

第一章 电工基础	1
第一节 概述	1
第二节 直流电路	8
第三节 交流电路	31
第二章 半导体二极管和三极管	49
第一节 半导体的导电特性	49
第二节 PN 结和半导体二极管	53
第三节 三极管的工作原理和静态特性曲线	59
第四节 三极管小信号等效电路	66
第五节 晶体管的主要参数和简单测试	68
第三章 低频小信号放大器	73
第一节 放大器的基本概念	73
第二节 晶体管放大器的图解法和偏置问题	76
第三节 阻容耦合放大器	86
第四章 负反馈放大器	100
第一节 反馈的基本概念	100
第二节 负反馈的效果	102
第三节 单级负反馈放大器	105
第四节 交替负反馈和负反馈对放大器	110
第五节 负反馈放大器的稳定性	114
第五章 直流放大器	120
第一节 直流放大器的特点和主要问题	120
第二节 单端式直流放大器	121
第三节 差分放大电路	127
第四节 调制式直流放大器	133
第六章 低频功率放大器	143
第一节 概述	143
第二节 单管甲类功率放大器	148
第三节 乙类推挽变压器耦合功率放大器	152
第四节 无变压器功率放大器	158
第五节 功率放大器的电路技术	164
第七章 晶体管振荡电路	174
第一节 概述	174
第二节 LC 振荡器	181

第三节	RC 振荡器	187
第四节	振荡频率的稳定	192
第五节	石英晶体振荡器	194
第八章	直流稳压电源	200
第一节	整流电路	200
第二节	滤波电路	213
第三节	稳压电路	217
第四节	稳压电源的电路技术	230
第九章	脉冲电路的基本知识	242
第一节	概述	242
第二节	$R-C$ 电路和 $R-L$ 电路的过渡过程	245
第三节	利用线性电路变换脉冲波形	250
第四节	二极管在脉冲电路中的应用	255
第十章	晶体管的开关特性及反相器	262
第一节	半导体二极管的特性曲线及其开关运用	262
第二节	三极管的特性曲线及其分区等效电路	265
第三节	三极管的开关特性	267
第四节	加速电容的作用	270
第五节	反相器	271
第十一章	锯齿电压发生器	275
第一节	概述	275
第二节	简单锯齿电压发生器	279
第三节	晶体管恒流源锯齿电压电路	282
第四节	自举电路	285
第五节	电容负反馈锯齿电压发生器	288
第十二章	张弛振荡器	293
第一节	集-基耦合双稳态触发器	293
第二节	发射极耦合双稳态触发器	304
第三节	集-基耦合单稳态触发器	311
第四节	发射极耦合单稳态触发器	318
第五节	自激多谐振荡器	325
第十三章	门电路	336
第一节	二极管“与”门电路	336
第二节	二极管“或”门电路	342
第三节	“非”门电路	345
第四节	几种导出逻辑门	349
第五节	其它门电路	351
第十四章	数字集成电路	356
第一节	概述	356

第二节	逻辑代数.....	360
第三节	二极管-晶体管逻辑 (DTL) 门.....	375
第四节	晶体管-晶体管逻辑 (TTL) 门.....	377
第五节	射极耦合逻辑 (ECL) 门.....	395
第六节	MOS 逻辑门.....	397
第七节	集成电路触发器.....	406
第八节	逻辑部件.....	418
第九节	用逻辑门构成的脉冲电路.....	432

第一章 电工基础

电现象和电的应用对大家来说都不陌生。我们的祖先很早以前就发现了摩擦起电的现象。夏天暴风雨来临时的闪电雷击，是壮观的大自然的放电现象。现今发现，人们的心脏和大脑也在不断地发出具有某种规律的电信号。

电的应用，在人类的生产和社会活动中起着十分重要而广泛的作用。家用电器中的电灯、电扇、电视机、收音机等等，离开了电就不能使用。工业生产中的大部分动力设备，不少农业机械，交通运输中的电力机车和信号系统，都是依靠电力来驱动或控制的。国防设施中使用着无线电定位（雷达）及导航设备，电子侦察及电子对抗技术。电通信仍然是当今进行远距离传递和交换信息的主要手段。现今，电子计算机更以其强大的生命力渗透到国民经济以至日常生活的几乎所有的领域之中。人们称今天为电子时代，是毫不夸张的。

第一节 概 述

一、物质的基本结构和电性能

人类很早就认识自然界中存在着两种性质不同的电荷，即正电荷和负电荷。

按照近代物质结构的理论，并为大量的实验所证明，无论是以固态、液态或气态出现的物体，都是由称为分子的微小粒子所构成。分子又由更小的微粒——原子组成。每个原子又由一个带正电荷的微粒——原子核，和若干个带负电荷的粒子——电子所组成，每个电子都带等量的电荷。电子按照一定的规律分层地分布在原子核周围，一方面不停地以自己的轴心作自旋运动，一方面又围绕着原子核不停地运动着。一般情况下，原子核所带正电荷量与其周围的电子负电荷量的总和相等，因而原子不显示电性。整个物体内部也由于正电荷量和负电荷量相等，因而不呈现电性，称为电中性。图 1-1 是 1 个氢原子 (H)、1 个铝原子 (Al) 和 1 个硅原子 (Si) 的原子结构示意图。其中氢原子的原子核带有 1 个单位的

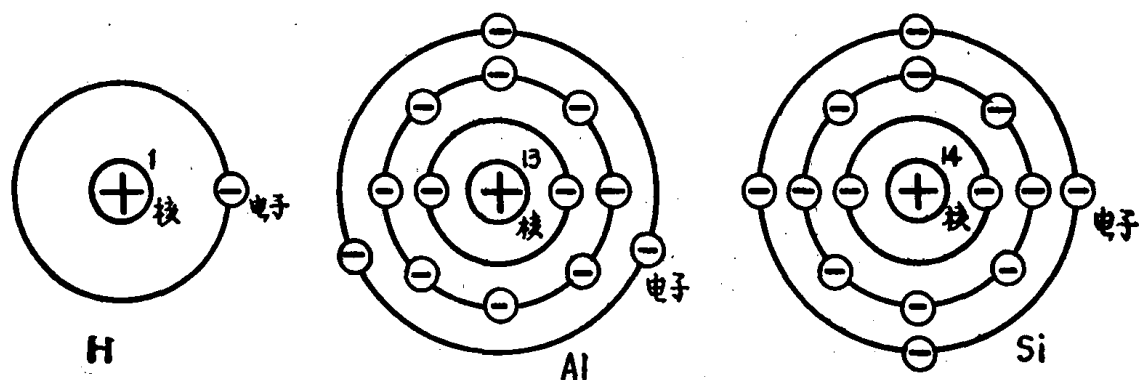


图1-1 原子结构示意图

(a) 氢原子 (b) 铝原子 (c) 硅原子

正电荷，外围只有1个带1个单位负电荷的电子。铝原子和硅原子中，最内层的电子都是2个，外一层的电子都是8个，最外层中，铝原子中有3个电子，硅原子则有4个电子。应当注意，图1-1中，将各层的电子都画在一个平面上，这仅只是一个示意结构。实际上，电子是在以原子核为中心的周围空间里运动的。

目前，自然界中所发现的最小的电荷量，就是1个电子所带的电荷量。称为1个电子电荷。

当物体因为某种原因（如摩擦等），使原子失去1个或几个电子时，物体就显示出带正电性；反之，若原子获得额外的电子，就使物体显示带负电性。原子失去电子后形成的带正电的粒子称为正离子，原子获得额外电子后形成的带负电的粒子称为负离子。可见，正、负电荷本来就存在于组成物体的原子内部，只是在一般情况下因它们之间在量上相等，不表现出带电性能来。当在一定条件下使物体内部原子中的正负电荷分离开来，甚至将它们转移到另外的物体上，使之成为带电体，就显示出带电性来。所以，正负电荷是物体内部所固有的，它们既不能被创造出来，也不能被消灭掉。所谓产生电的过程，实质上是使物体内部原子中的正、负电荷分离的过程。如发电机是利用电磁感应作用，干电池是利用化学反应作用，将正、负电荷分离后，分别聚集到两个电极上作电源。用毛皮摩擦电木棒时，毛皮内部原子中的一些电子就转移到电木棒上，毛皮就显示带正电，电木棒就显示带负电性，这就是一般所说的摩擦起电。

实验表明，电荷之间存在相互作用的力。同性电荷之间存在相互排斥的力，异性电荷之间存在相互吸引的力。物体所带电荷越多，两个物体之间的这种作用力就越强。物体所带电荷的多少叫做电量。实用的电量单位叫库仑，1库仑的电量相当于 6.25×10^{18} 个电子的电荷量。所以，一个电子的电荷量就等于 1.6×10^{-19} 库仑。电量一般用符号 Q 或 q 来表示。当电荷聚集不动时，称为静电。当电荷处于定向运动时，形成电荷的流动，称为电流。

二、物体按导电性能的分类

电荷作定向运动时，一般情况下要借助某种物体来传导。如照明用的电灯，就是通过金属导线来传导电荷而使电灯发光的。

自然界中的物体，依据导电性能的不同大致分为导体、绝缘体和半导体三大类。导体又分为两类，第一类导体如金、银、铜、铝、铁等金属以及人体、大地等，第二类导体如各种酸、碱、盐的水溶液，即电解液等。橡胶、塑料、云母、石蜡、陶瓷、油类、绝缘漆、玻璃以及干燥的木材和空气等，它们在一般情况下是不能传导电荷的，称为绝缘体或电介质。一般用的导线，心线是由导电性能良好的铜、铝等金属导体制成，外层的塑料或漆皮，用来使在金属导体中传导的电荷与外界隔离开来，起绝缘的作用。

导电性能介于导体与绝缘体之间的一类物体，如锗、硅、硒以及氧化铜等材料，称为半导体。其导电性能会随外界条件的变化或随内部掺杂的不同而有显著的改变。它们被用来制造各种半导体元件器件。其详细性能将在第二章中介绍。

不同物体呈现不同的导电性能，是由组成物体的原子结构不同所确定的。各种金属材料，其原子内的最外层电子受原子核的约束力很弱，常常容易挣脱原子核的束缚而在金属内各原子中间自由运动，称这种电子为自由电子。金属传导电荷，就是靠自由电子来进行的。例如用一根金属导线来联接两个分别带正电荷和负电荷的物体时，金属中的自由电子

就移动到带正电荷的物体上，以补充其不足的电子，而带负电荷的物体上多余的电子就移动到金属导体内。这样，从外部宏观看来，就好象带正电荷的物体上的正电荷，传导到了带负电荷的物体上；或者反过来说，好象带负电荷的物体上的负电荷，传导到了带正电荷的物体上。

对于第二类导体，其内部存在着正、负离子，它们在导电时能够自由移动，而可成为导体。

绝缘体的原子结构与金属材料不同，原子内的电子都被原子核牢牢的束缚着，几乎不可能挣脱原子核的束缚而以自由电子的形式出现，所以一般情况下是不能传导电荷的。

但要指出，导体和绝缘体之间并没有严格的界限，绝对不导电的物体是没有的，绝缘体只不过是导电能力非常微弱罢了。外界条件变化时，如在高温和潮湿的情况下，绝缘体的导电性能也会增强，而高温下的金属材料，其导电性能也会减弱。

一般的气体在通常情况下是不能导电的。因为其中没有可以传导电荷的自由电子或正、负离子，但可以用其它方法使气体分子分离为正、负离子，称为气体的电离。电离了的气体就成为导体，如日光灯、霓虹灯等，就是利用这个道理制成的。

三、电的基本物理量

(一) 电源的电动势

任何用电设备要正常工作，必须要靠电源供电。常用的电源有发电机、蓄电池、干电池和其它电源设备。其共同的特点是能使内部的正、负电荷分离并分别聚集到两极上。发电机是将机械能通过电磁感应作用，使正、负电荷分离，蓄电池和干电池是通过化学反应释放出来的能使正、负电荷分离。电源这种能使正、负电荷分离的能力称为电源力。电源聚集正电荷的一端叫正极，聚集负电荷的一端叫负极。

我们熟悉，当把一个重物从低处升运到高处时，需要做功，做功的大小与重物的质量和升高的高度有关。类似地，当把正电荷从负极通过电源内部移送到正极时，就是靠电源力来做功的。显然，移送的电荷越多，电源力做的功就越大，也即付出的能越多。对于某一电源，若将电荷量为 q 的正电荷从负极移送到正极时，电源力做功所付出的能量为 W ，则 W 必然正比于 q ，即 $W \propto q$ 。它的比例常数叫做该电源的电动势 E ，即 $W = Eq$ ，或

$$E = \frac{W}{q} \quad (1-1)$$

从式 (1-1) 看出，某一电源的电动势 E ，就表示将单位正电荷从负极运送到正极所做的功。对于不同的电源，把单位正电荷从其负极移送到正极时，若做的功不同，则电源的电动势 E 也就不同。式 (1-1) 中，若 W 的单位用焦耳(J)、电荷量的单位用库仑时，电动势 E 的单位则称为伏特，简称伏，用符号 V 表示。

在电源力使正、负电荷分离并分别聚集到两极的过程中，两个极上的正、负电荷间即出现了相互吸引的作用力，并企图使正、负电荷重新聚集在一起。当分离正、负电荷的电源力与两极上的异性电荷间的吸引力平衡时，两极上聚集的正、负电荷也就不再继续增加。显然，电源力做功能力越大时，若分离的正、负电荷量 q 一定，则电源具有越高的电动势 E ；若电动势 E 一定，则可分离越多的正、负电荷。

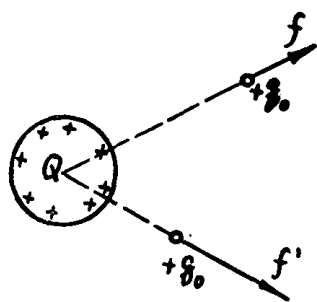
(二) 电场和电场强度

按照辩证唯物论的观点，物体之间的相互作用不能脱离物质而发生。它要么通过物体

直接接触而发生，要么通过其它物质做媒介而发生。电荷之间的相互作用力，就是通过称为电场的一种特殊物质为媒介而发生的。电场是物质的一种特殊形式，它不是由分子、原子组成的，但却始终存在于电荷周围。

静止电荷周围存在的电场称为静电场，它对处于其中的其它电荷的作用力叫做电场力。

为了说明电场和电场力，设有一个带正电荷量为 Q 的球体，现将一个体积很小、带极微小正电量 q_0 的试验电荷，放进 Q 周围的电场中。理论和实验表明，试验电荷 q_0 要受 Q 的电场力的作用， q_0 受力 f 的大小与 q_0 所在电场中的位置有关，且与 q_0 的电荷量大小成正比；力的方向是在 Q 的球心与 q_0 的连线上，且是向外的排斥力，如图 1-2 所示。



这样，用试验正电荷 q_0 在电场中某点所受电场力 f 与 q_0 的比值，来衡量该点电场的强弱情况，叫做该点的电场强度 e ，即：

$$e = \frac{f}{q_0} \tag{1-2}$$

图1-2 带正电荷的球体的电场

上式表明，电场中任一点的电场强度 e ，数值上等于单位正电荷在该点所受力的大小。因为力是有方向的，因而电场强度也是有方向的，且电场强度的方向与正电荷受力的方向一致。

这样，电场强度就反映了电场的强弱情况。在实用单位制中，力的单位用牛顿，电量的单位用库仑，则电场强度的单位为牛顿/库仑。

实际工作中遇到的电场是非常复杂的，不能用简单的数学式子来描述。为了给电场一个直观的描述，人们采用画电力线的方法。电力线是一组带箭头的曲线，每根曲线在任何点处的切线方向就是该点处电场强度 e 的方向；电力线画得密的地方，表示电场强度的数值大，电力线画得疏的地方，表示电场强度的数值小。因为电场强度在电场中任一点处只会一个方向，所以所有电力线都不会相交，且每根电力线都起始于正电荷，终止于负电荷。

图 1-3 (a) 是一个带正电球体的电力线。它是一组辐射状的直线，从图中看出，越远离球体，电力线分布越稀疏，表示远离球体处电场强度较靠近球体附近要弱。图 1-3 (b) 表示带有等量正、负电荷的两个球体之间的电力线分布情况。图 1-3 (c) 表示带有等量正、负电荷的两块平板之间的电力线分布情况。可以看出，在平板中间部分，电力线是均匀分

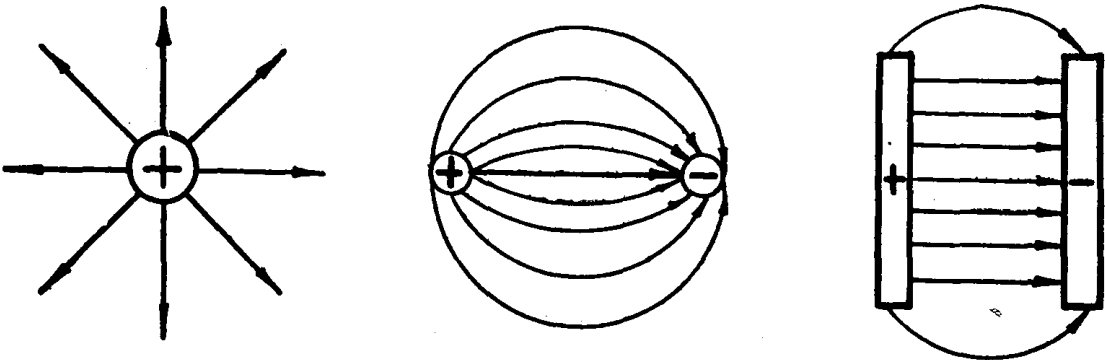


图1-3 用电力线描述电场

(a)带正电荷的球体 (b)带等量正、负电荷的两个球体 (c)带等量正、负电荷的两个平板

布的，称平板中间部分的电场为均匀电场。

但要指出，电力线是为了直观形象地描述电场情况而采用的一种方法，并不是真的有什么线条存在于电场中。

(三) 电位和电位差

由上述分析可知，电荷周围存在电场，处于某一电荷所建立的电场中的另一电荷要受到电场力的作用，则电场力会使电荷运动而对电荷做功。电场具有的能量，称为电场能量。为了说明电场力做功的情况，现选均匀电场的简单情况为例来讨论。

在图1-4中，把一个带有正电荷 q_0 的试验电荷放在电场中的 a 点， q_0 就会在电场力 f 的作用下沿着电场强度 ϵ 的方向运动。如果将 q_0 放在 b 点， q_0 同样会从 b 点开始沿着电场强度的方向运动。为了比较电场对从不同点 a 和 b 开始运动的电荷所做的功，我们选取 O 点作为电荷运动的终点作参考点。由于均匀电场内各点电场强度 ϵ 的大小是一样的，所以电荷 q_0 在电场中任何点处受力的大小也是一样的。当电荷 q_0 由 a 点开始移动，经过距离 l_{ao} 到达参考点 O 时，电场力 f 所做的功是：

$$W_{ao} = fl_{ao} \quad (1-3)$$

而当电荷 q_0 由 b 点开始移动，经过距离 l_{bo} 到达 O 点时，电场力 f 所做的功是：

$$W_{bo} = fl_{bo} \quad (1-4)$$

因为电场力 f 的大小为 $f = \epsilon q_0$ ，所以，若将电荷 q_0 的电荷量增加一倍，则电荷所受电场力也增大一倍，电场力所做的功也就增加一倍。就是说，在一个确定的电场内，电场力对电荷所做的功与电荷量成正比。因此，在这个电场内，只要确定电荷运动的起点和终止参考点，则电场力所做的功与电荷量的比值是不变的一个常量，它反映了电场本身的性质，人们称它为电场内这一点的电位，用符号 ϕ 表示，则 a 点的电位

$$\phi_a = \frac{W_{ao}}{q_0} = \frac{fl_{ao}}{q_0} \quad (1-5)$$

b 点的电位

$$\phi_b = \frac{W_{bo}}{q_0} = \frac{fl_{bo}}{q_0} \quad (1-6)$$

以上两式说明，电场中某点的电位，在数值上等于将单位正电荷从该点移到参考点时电场力所做的功。

实用单位制中，电位的单位和电动势的单位一样，也是伏特。如果把1库仑的正电荷从电场中某点移到参考点时，若电场力所做的功为1焦耳，则该点的电位对参考点来说就是1伏特。

通常，电场中不同的点处具有不同的电位。例如，电场中 a 点的电位为 ϕ_a ， b 点的电位为 ϕ_b 。那么，它们之间电位的差值叫做 a 、 b 两点的电位差，记为 V_{ab} ，即：

$$V_{ab} = \phi_a - \phi_b \quad (1-7)$$

就图1-4中的 a 、 b 两点来说：

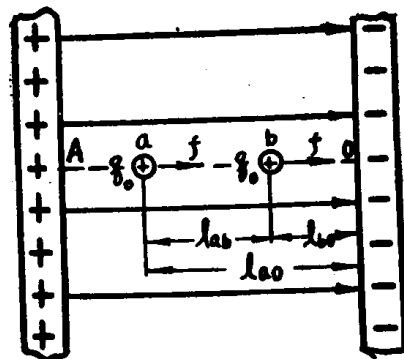


图1-4 均匀电场内电场力对电荷做功

$$V_{ab} = \phi_a - \phi_b = \frac{fl_{a0}}{q_0} - \frac{fl_{b0}}{q_0} = \frac{f(l_{a0} - l_{b0})}{q_0} = \frac{fl_{ab}}{q_0} = \frac{W_{ab}}{q_0} \quad (1-8)$$

其中 W_{ab} 是电荷 q_0 从 a 点移动到 b 点时电场力 f 所做的功。可见，电场内 a 、 b 两点之间的电位差，在数值上等于单位正电荷从 a 点移到 b 点时电场力所做的功。

变换式 (1-8) 为：

$$W_{ab} = q_0 V_{ab} = q_0 (\phi_a - \phi_b) \quad (1-9)$$

式 (1-9) 说明，电荷 q_0 从电场中 a 点移到 b 点时，电场力所做的功等于电荷的电量 q_0 与两点 a 、 b 间的电位差之乘积。

这里要注意，我们说电场中某点的电位，实质上是指该点相对于预先选定好了的公共参考点的电位差。这个公共参考点可以是任意选定的，并规定参考点的电位为零。在电工学中，常以大地或和大地相联接的导体做为参考点，或者是以电气设备的外壳以及与外壳相联接的导体作为参考点，选用何种，视实际情况而定。

但要指出，电场中两点的电位差只和两点的位置有关，而与决定两点电位大小的参考点的选择无关。参考点的选择不同，只会改变两点电位的数值，但这两点的电位差却不会改变。例如在图 1-4 中，若参考点选为图中 O 点时， a 点电位 ϕ_a 为 +10 伏， b 点电位 ϕ_b 为 +5 伏，则电位差 $V_{ab} = \phi_a - \phi_b = 10 - 5 = 5$ 伏。若参考点选为图中带正电荷的平板上的 A 点，此时 a 点的电位 $\phi_{aA} = -5$ 伏， b 点电位 $\phi_{bA} = -10$ 伏，则电位差 $V_{ab} = \phi_{aA} - \phi_{bA} = -5 - (-10) = 5$ 伏。说明无论参考点选在何处， a 点电位始终比 b 点电位高 5 伏。这样，从 a 点向 b 点看去，电位是逐渐降低的，所以又把从 a 点到 b 点的电位差叫做电位降。相反，从 b 点向 a 点看去，电位是逐渐升高的，因而把从 b 点到 a 点的电位差叫做电位升。由此可知，正电荷在电场力作用下运动时，是顺着电位降的方向运动的，即从高电位点向低电位点运动；而负电荷在电场力作用下运动时，则是顺着电位升的方向运动的，即从低电位点向高电位点运动。在这种运动过程中，电场力都对电荷做了功。反过来，若要使正电荷顺着电位升的方向运动，或者要使负电荷顺着电位降的方向运动，必须对电荷施加另外的力来克服电场力。

通常也把电位差叫做电压，电压的单位也是伏特。根据应用场合的不同，也用千伏 (KV)，毫伏 (mV) 和微伏 (μV) 作单位。它们之间的换算关系为：

$$1KV = 10^3V$$

$$1V = 10^3mV = 10^6\mu V$$

常用的干电池，其正、负极之间的电压是 1.5 伏，蓄电池正、负极之间的电压有 6、12、24 及 36 伏等。

从前面讲述电源的电动势时，可以知道，电源力将电源内部的正、负电荷分离而分别聚集到正、负极上时，电源内部的正、负极之间就建立了电场，且两极之间产生了电位差。电场的出现，就存在了电场力。电源力要使正电荷顺着电位升的方向运动，要使负电荷顺着电位降的方向运动；而电场力恰与其相反，是要使正电荷顺着电位降的方向运动，要使负电荷顺着电位升的方向运动。当电场力与电源力相互平衡时，电源的两极才不再聚集更多的电荷，这时两极间就维持一定的电位差。这个电位差的数值就等于电源的电动势。

(四) 电流

观察如图 1-5 所示一段金属导线，在平常情况下，导线内部已经存在很多自由电子，

但自由电子总数与正离子总数相等，因而导线并不显现电性，而呈电中性。自由电子在原子间是做无规则的热运动，因而，在一个微小的时间内自左向右通过某个横截面的自由电子数，与自右向左通过这个横截面的自由电子数是相等的。宏观看来，就没有电荷的定向流动。

现在，若在导线的两端 A、B 间有电位差存在，设 A 端为高电位端，B 端为低电位端。这时，导线内部就出现了电场，电场方向是自高电位 A 端指向低电位 B 端。金属导线中带有负电荷的自由电子在电场力的作用下，就会从低电位的 B 端向高电位的 A 端运动。这样，电荷的定向运动就形成了电流。可见，导体中出现电流的必要条件是导体两端有电位差存在。

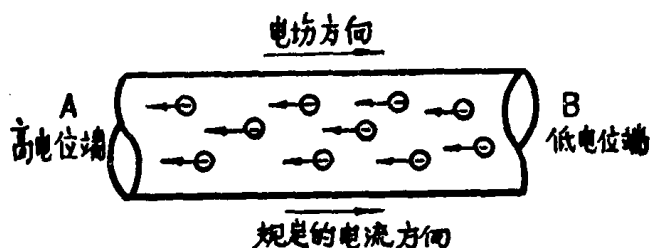


图1-5 金属导线中的电流

这里顺便指出，自由电子在电场力作用下自低电位端向高电位端的运动过程，并不是沿直线运动的。自由电子运动过程中，还会相互碰撞，或与原子碰撞而改变运动方向，但因电场力的作用，其总的大方向是趋向高电位端。这就象在一个倾斜的槽里，钉有不少凸出的钉子，自槽的上端滚下大批小球，小球总的运动方向是自上而下，但中途难免被钉子碰撞而改变一下方向。

电流是由电荷作宏观的定向运动而形成的，因而电流是有一定的方向的。由于历史上的原因，人们最初规定正电荷运动的方向为电流的方向。而在金属导体里，形成电流的是带负电荷的自由电子的定向运动，因而所规定的电流方向与实际的电子流动方向是刚好相反的。电流方向的规定已沿用至今，成为惯例。

与河道里的水流一样，要确定电流的方向，还要确定其大小。显然，在相同的时间内，通过导体某横截面的电荷越多，导体中的电流就越强；通过导体某横截面的电荷越少，电流就越弱。象确定河道里的水流用每秒钟通过河道某横截面的水量（立方数）一样，用单位时间内通过导体横截面的电荷量来表示电流的大小，并叫电流强度，用符号 i 或 I 来代表。

对于电流的方向和大小都不随时间变化的情况，称为恒定电流，这时，电流强度 I 为：

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-10)$$

式中， Q 为在时间 t 内通过导体横截面的电荷量。

当电流的大小和方向都可能随时间变化时，这时所指的电流强度，就是针对某一时刻而言的。设在这一时刻处取一极微小的时间间隔 Δt ，认为在 Δt 内电流的大小和方向都不变化，那么，在 Δt 内流过导体横截面的电荷量为 ΔQ ，则此时刻的电流强度记为 i ，即：

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1-11)$$

如生产和日常生活中用到的交流电，其电流强度*i*就随时都在改变着大小和方向，而且是随时间按正弦规律周期性地变化着。

在式(1-10)和(1-11)中，若电荷量的单位用库仑，时间的单位用秒，则电流强度的单位就是库仑/秒，也称安培，或简称安，用符号A代表。即若1秒钟内通过导体横截面的电荷量为1库仑时，称流过此导体的电流强度为1安培。

实际工作中还用毫安(mA)、微安(μA)作单位。它们之间的换算关系是：

$$1\text{A}=10^3\text{mA}=10^6\mu\text{A}$$

$$1\text{mA}=10^3\mu\text{A}$$

电流强度是电工学和半导体电路中最常用的一个物理量，简称为电流。这样，电流一词就既指一种物理现象——电荷的定向运动；也指一种物理量——单位时间内通过某横截面的电荷量的大小和方向。

在半导体电路中，经常遇到的电流是几百微安到几十毫安，电压从毫伏到几十伏。比起工业生产的动力设备中所遇到的几百伏电压，几十乃至上百安培的电流，无论电压或电流，半导体电路中的都是弱小的，故属于弱电工程的范畴。

第二节 直流电路

一、电路的组成

所谓电路，就是电流通过的路径。它是由若干电路元件组合起来，在其中得到电流的装置的总称。如果电路中流过的是直流电流，这种电路就称直流电路。如手电筒里电流的路径，就是一个直流电路。

图1-6中，由一个小灯泡、导线、开关和电池连接起来。当开关闭合时，灯泡就会发光，这是由于在以电池、灯泡、开关和连接导线所形成的闭合回路中有电流流通的缘故。这个闭合回路就是一个电路，而且是一个简单的直流电路。

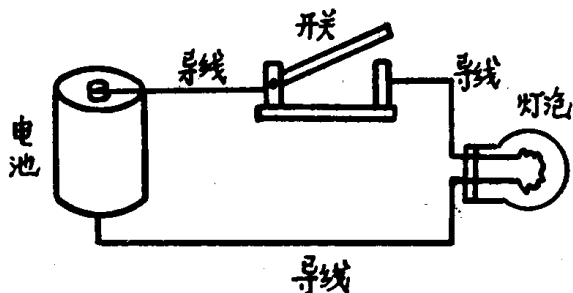


图1-6 电路的组成

在图1-6中，干电池是一种电源，在电源内部，化学反应释放出来的能量产生电源力，电源力将正、负电荷分离并分别聚集到两极上，使干电池的正、负极间存在电位差。在开关没有闭合时，干电池内部的电源力与两极上正、负电荷建立起来的内部电场的电场力相平衡，所以这时干电池内部没有电流。当开关闭合时，干电池的正、负极之

间通过连接导线、开关、灯泡这些外部电路上建立起来的电场，就驱使正电荷自正极经外部电路流向负极(实际上是电子自负极经外部电路流向正极)，使两极上的正、负电荷减少。这样，在干电池内部，电源力就要超过电场力，因此又将负电荷自正极经电源内部移向负极，补充两极电荷之不足。这样，在整个闭合回路里就形成了持续不断的电流。

在干电池的电源力将负电荷自正极经电源内部移向负极(也即正电荷自负极移向正极)的过程中，电源力反抗电场力而对电荷做了功，也就是干电池内部化学能转化成了电

能。若电源是发电机，则是将机械能转化为电能。所以，从能量转化的观点看，“电源”只不过是一种将化学能、机械能或其它形式的能量转化为电能的一种元件或设备。

当电流流过灯泡时，灯泡受热发光。这是电场力对电荷做功，将电能转化为热能和光能的过程。凡是能够将电能转化为热能、光能、机械能或其它能量形式的元件或设备，例如电灯、电炉、电动机等，统称这些元件或设备为负载。

可见，一个完整的电路，至少要由四部分组成：电源、负载、控制电路通断的开关以及连接它们的导线。对电源来说，负载、开关以及连接导线构成的电流通路叫外电路，电源内部的电流通路叫内电路。

为了研究电路的方便，图 1-6 的电路可以画成图 1-7 的形式。图 1-7(a) 中，表示电池正极的用细长线，表示负极的用粗短线。电池的电动势为 E 。图 1-7(b) 中，标明了电源电动势 E 、电流 I 与电压 V 的方向。在电源内部，电流是从低电位的负极流向高电位的正极，所以规定表示电源电动势 E 的方向的箭头由低电位指向高电位。在外电路中，电流是由高电位端流向低电位端，规定表示电压 V 的方向的箭头是由高电位端指向低电位端。图 1-7(b) 中电压 V 表示负载两端的电压降，上端为高电位端，下端为低电位端。对于电流的方向，也在图中用箭头指出，规定从高电位端流向低电位端。图 1-7(c) 为简化电路，图中

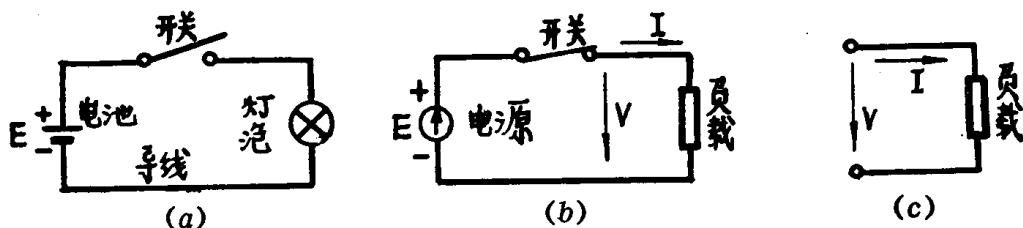


图1-7 电路图的画法

标明负载两端的电压是 V ，流过负载的电流是 I 。

二、欧姆定律

(一) 无源电路的欧姆定律

从上面关于电路组成的分析中知道，当一个负载和电源接通后，在负载两端就加有电压 V ，如图 1-7(c) 所示，负载里便会有持续不断的电流通过。

实验表明，当增加负载两端的电压 V 时，流过负载的电流 I 也成正比例地增加。如在一不不包含电动势的电路里，流过这段电路里的电流 I ，与电路两端的电压 V 成正比，即：

$$\frac{V}{I} = R \quad (1-12)$$

式中的比例常数 R 称为这段电路的电阻。电阻是一个表现一段电路对电流所呈现阻力的物理量，当它与外加在它两端的电压和流过它的电流的大小和方向均无关时，称为线性电阻。如用铜线或铝线绕制的电气设备，电阻都是线性的。而另外一些元件，其电阻随加于其两端的电压大小和方向而改变，则所呈现的电阻称为非线性电阻。完全由线性元件（流过元件的电流与加在元件两端的电压成正比的元件）组成的电路，叫线性电路。包括非线性元件的电路叫非线性电路。生产中遇到的大多是线性电路。

电阻的单位是欧姆，简称欧，用符号 Ω 表示。当一段没有电动势的电路两端加上 1 伏特的电压时，若流过电路的电流为 1 安培，则这段电路的电阻就是 1 欧姆。在电路中，还

常用千欧 (KΩ) 和兆欧 (MΩ) 作单位, 它们的换算关系是:

$$1\text{K}\Omega = 1000\Omega$$

$$1\text{M}\Omega = 10^3\text{K}\Omega = 10^6\Omega$$

式 (1-12) 可以写成下面的形式:

$$I = \frac{V}{R} \quad (1-13)$$

上式说明, 在一段没有电动势的电路里, 流过电路的电流 I , 与加在这段电路两端的电压 V 成正比, 而与这段电路的电阻 R 成反比。这个关系通常称为无源电路的欧姆定律。

式 (1-12) 还可以写成下面的形式:

$$V = IR \quad (1-14)$$

上式表明, 流过电阻 R 的电流 I , 与电阻 R 的乘积, 就等于电阻两端的电压降。

依据式 (1-12)、(1-13) 和 (1-14), 在电阻、电压和电流这三个量中, 只要知道其中任何两个, 就可求出第三个来。

〔例 1-1〕: 已知电路中电阻 R 两端的压降为 12V, 流过电阻的电流 $I = 2\text{mA}$, 试求电阻 R 的数值。

解: 这是已知电压 V 和电流 I 求电阻 R 的问题, 据式 (1-12):

$$R = \frac{V}{I} = \frac{12}{2 \times 10^{-3}} = 6000\Omega = 6\text{K}$$

〔例 1-2〕: 已知电阻 $R = 5.1\text{K}$, 电阻 R 两端的电压降为 24V, 求流过电阻的电流 $I = ?$

解: 据 (1-13) 式

$$I = \frac{V}{R} = \frac{24}{5.1 \times 10^3} \approx 4.706 \times 10^{-3} \approx 4.7 \times 10^{-3}\text{A} = 4.7\text{mA}$$

注意, 在工程计算上, 视实际情况不同, 一般取计算精度到有效数字 2~3 位即可。

(二) 有源电路的欧姆定律

图 1-8 所示的电路, 有两个端点 a 和 b 。对于这样具有两个端点的电路, 有时也称为一个支路。在这个支路中, 包含一个电动势 E , 一个电阻 R 。假设电动势 E 和电流 I 的方向如图所示, 设 a 点的电位为 ϕ_a , b 点的电位为 ϕ_b , c 点的电位为 ϕ_c , 则:

$$V_{ab} = \phi_a - \phi_b = (\phi_a - \phi_c) + (\phi_c - \phi_b) = V_{ac} - V_{cb}$$

而其中 $V_{ac} = E$, $V_{cb} = IR$, 所以

$$V_{ab} = E + IR$$

图 1-8 有源电路的欧姆定律

$$\text{得} \quad I = \frac{V_{ab} - E}{R}$$

若将有源支路两端的电压降记为 V , 则上式可写成一般形式:

$$I = \frac{V - E}{R} \quad (1-15)$$

式 (1-15) 称为有源支路的欧姆定律。但要注意, 式中的电流 I 是规定为从这个支路中规定的高电位端流向低电位端, 式中的电动势 E 的电位降是顺着电流方向的。将式 (1-15) 改写成:

$$V = IR + E \quad (1-16)$$

上式表明，一个有源支路两端的电压降 V ，等于流过这个支路的电流 I 在电阻 R 上的压降 IR ，加上这个支路中顺着电流方向为电位降的电动势 E 。若图 1-8 中电动势 E 的方向倒过来，则式 (1-15) 和 (1-16) 分别写成 $I = (V + E)/R$ 和 $V = IR - E$ 。

〔例 1-3〕：在图 1-8 中，若 $E = 3V$ ，流过电路中的电流方向如图中所示，大小为 $5mA$ ，电阻 $R = 3K$ ，求 a 、 b 两端的电压降？

解：据式 (1-16)

$$V_{ab} = IR + E = 5 \times 10^{-3} \times 3 \times 10^3 + 3 = 18 \text{ 伏}$$

〔例 1-4〕：在上例中，其它条件都不变，仅只将 E 的方向倒过来，试求 V_{ab} ？

解：与上例不同的是，上例中电动势 E 的方向是逆着电流 I 的方向的，故 a 、 b 两端的电压降等于电阻 R 上的压降加上电动势 E 。现在 E 的方向是顺着电流 I 的方向的，即 C 点的电位比 a 点要高 E ，因而 a 、 b 两端的电压降：

$$V_{ab} = IR - E = 5 \times 10^{-3} \times 3 \times 10^3 - 3 = 12 \text{ 伏}$$

三、导体的电阻

(一) 电阻和电阻率

导体一方面能传导电流，但当电流通过导体时，导体对电流的流通也会呈现一定的抵抗作用，这就是上面讲的电阻。产生电阻作用的微观过程，对金属导体来说，就是自由电子在作定向运动的同时还作热运动，并在合成运动过程中，自由电子间的相互碰撞，自由电子与组成金属的原子的碰撞，阻障着自由电子的定向运动，就宏观地体现为对电流流通的抵抗作用，这就是导体的电阻。

假若取一根长度为 l ，横截面积为 S 的圆柱形导体来研究，在一定的温度下，它的电阻 R 与长度 l 成正比，与横截面积 S 成反比。对不同材料的导体来说，比例常数不同，即：

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-17)$$

比例常数 ρ 表示该导体材料抵抗电流流通能力的大小，叫做电阻率。由式 (1-17) 可知，某种导体材料的电阻率 ρ ，在数值上等于用该材料做成具有单位长度、单位截面积时的导体的电阻。电阻率的单位是欧·米。由于实际上所用的导体的横截面积都比较小，为了方便计算，电阻率的单位用欧·毫米²/米。

不同的材料，电阻率不同，同一材料在不同温度下电阻率也不相同。表 1-1 给出了一些常用的金属材料在 20℃ 时的电阻率和电阻温度系数。表中所列数据是近似值，这些数据随着材料纯度和成分不同会有所变化。

表 1-1 常用金属材料的电阻率和电阻温度系数

材料名称	电阻率(20℃) 〔欧姆·毫米 ² /米〕	电阻温度系数 (20℃)〔1/℃〕	材料名称	电阻率(20℃) 〔欧姆·毫米 ² /米〕	电阻温度系数 (20℃)〔1/℃〕
银	0.0165	0.0038	铸 铁	0.5	0.001
铜	0.0175	0.0040	镍 锌 铜	0.34	0.00031
铝	0.0283	0.0042	锰 铜	0.42	0.000015
钨	0.0551	0.0045	康 铜	0.49	0.000005
低碳钢	0.12	0.0042	镍铬合金	1.08	0.00013