

电 工 学

山东建筑材料工业学院 编



中等专业学校试用教材

中国建筑工业出版社

本书较系统地讲述电工基本理论，内容共分三篇十三章：第一篇为电工基础，包括直流电路、电磁与电磁感应、单相及三相交流电路、电工量计；第二篇为电机及其控制，包括变压器、直流电机和交流电机、电机的选择与控制；第三篇为电子技术，包括低频放大器、直流放大器、直流电源和可控硅电路。前两篇为传统的电工及电机的基本理论，有较详细的分析。第三篇则对现代生产经常遇到的电子电路作有系统的讲述。每章有小结和练习题，书末有习题答案。

本书为建材类中等专业学校电工学教材。但其通用性较大，可用于其他种类的非电专业的中等专业学校，并可供工厂企业中等电工技术人员和具有初中以上文化程度的同志自学参考。

中等专业学校试用教材

电 工 学

山东建筑材料工业学院 编

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：24 1/4 字数：587 千字

1981年7月第一版 1981年7月第一次印刷

印数：1—39,100册 定价：1.95元

统一书号：15040·4097

前 言

本书是根据1978年全国建材类中等专业学校教材座谈会的决定和水泥专业教材大纲会议通过的《电工学》编写大纲编写的。内容分为三大部分：第一部分（一至五章）是电工基础，包括直流电路、电磁与电磁感应、单相交流电路、三相交流电路和电工量计，这部分内容基本保留了传统的电工基础理论，但在电路分析方法上作了适当加强。第二部分（六至九章）为电机及其控制，包括直流电机、变压器、交流电机和电动机的选择与控制。第三部分（十至十三章）为电子技术，是本书为适应现代生产技术要求重点增加的内容，它包括低频放大电路、直流放大电路、直流电源和可控硅电路。

估计本书的讲授和实验时数约190学时。为满足各校实际教学需要，书中还用小号字排印了一部分选学内容。

本书一至五章和第十章由邵洪全执笔，其余各章由邢庆瑞执笔。

书稿由武汉建工学院柏国础主审，并由审稿会议审订通过。参加审稿会议的有四川建材学院吴崇先，上海电力专科学校叶铭劭、范莺，上海建材专科学校陆嘉宝。会上承蒙各位同志提出宝贵修改意见，谨致以衷心感谢。

由于我们的水平所限，加之时间仓促，书中不妥之处在所难免，恳请读者给予批评指正。

编 者

1979.11.

目 录

第一篇 电 工 基 础

第一章 直流电路	1
第一节 直流电路的基本概念	1
第二节 电功率和电能	11
第三节 基尔霍夫定律	14
第四节 电阻的串联	16
第五节 电阻的并联	18
第六节 电阻的复联	20
第七节 电路中电位的计算	21
第八节 二线供电线路	22
第九节 复杂电路的计算方法	23
第十节 RC 电路中的充放电过程	35
小 结	38
练习题	39
第二章 电磁与电磁感应	43
第一节 电流的磁场 磁力线	43
第二节 磁场对载流导体的作用力 磁感应和磁通	44
第三节 磁导率 磁场强度 全电流定律	45
第四节 铁磁材料的磁性能	47
第五节 电磁感应	50
第六节 自感应	52
第七节 互感应	55
第八节 涡流	57
第九节 磁场的能量	58
小 结	58
练习题	59
第三章 单相交流电路	62
第一节 概述	62
第二节 正弦交变电动势的产生	63
第三节 相位和相位差	66
第四节 正弦交流电的有效值	69
第五节 正弦交流电的旋转矢量表示法 几个正弦交流电的相加和相减	71
第六节 交流电路	73
第七节 纯电阻电路	74
第八节 纯电感电路	76

第九节 纯电容电路	79
第十节 具有电阻和电感的串联电路	81
第十一节 电阻、电感和电容相串联的交流电路	85
第十二节 串联谐振	88
第十三节 电感性负载与电容器的并联电路	90
第十四节 功率因数的提高	93
第十五节 并联谐振	95
第十六节 非正弦周期电流电路	97
小 结	99
练习题	101
第四章 三相交流电路	106
第一节 概述	106
第二节 三相对称电动势的产生	106
第三节 三相电源的联接法	107
第四节 三相负载的星形联接	111
第五节 三相负载的三角形联接	115
第六节 三相电功率的计算	117
第七节 安全用电	118
小 结	122
练习题	123
第五章 常用电工仪表和电工测量	125
第一节 概述	125
第二节 电工仪表的分类和等级	125
第三节 直读式仪表的组成及工作原理	128
第四节 直读式仪表的测量机构	128
第五节 电流的测量和扩大量程装置	133
第六节 电压的测量	135
第七节 电阻的测量	137
第八节 直流电位差计	143
第九节 万用表	146
小 结	148
练习题	149

第二篇 电机及其控制

第六章 直流电机	150
第一节 概述	150
第二节 直流电机的工作原理	150
第三节 直流电机的主要结构和基本类型	154
第四节 并励直流发电机	157
第五节 并励直流电动机	159
第六节 直流电动机的起动、调速和反转	161
第七节 发电机-电动机组(F-D组)	164

小 结	166
练习题	167
第七章 变压器	169
第一节 变压器的用途与分类	169
第二节 变压器的工作原理	170
第三节 变压器的主要结构和铭牌数据	174
第四节 三相变压器组和三相变压器	176
第五节 自耦变压器	177
第六节 互感器	178
第七节 多绕组变压器	180
第八节 小型变压器的设计	180
小 结	184
练习题	185
第八章 交流电机	187
第一节 概述	187
第二节 三相异步电动机的基本类型和主要结构	187
第三节 旋转磁场	190
第四节 异步电动机的工作原理	193
第五节 异步电动机的机械特性	195
第六节 异步电动机的起动	198
第七节 异步电动机的调速和反转	201
第八节 异步电动机的铭牌数据和维护常识	203
第九节 滑差电动机	205
第十节 两相和单相异步电动机	206
第十一节 同步电动机	208
第十二节 三相并励整流子电动机	210
小 结	212
练习题	213
第九章 电动机的选择与控制	215
第一节 概述	215
第二节 电动机的选择	215
第三节 低压控制和保护电器	218
第四节 鼠笼式异步电动机的起动和正、反转控制	224
第五节 绕线式异步电动机的起动控制	227
第六节 直流电动机的起动控制	228
小 结	229
练习题	229

第三篇 电 子 技 术

第十章 低频放大器	231
第一节 晶体二极管	231
第二节 晶体管	235

第三节	放大器的基本概念	247
第四节	简单的交流放大电路和静态工作点的设置	248
第五节	放大电路的基本分析方法	252
第六节	工作点的稳定	260
第七节	放大器的等效电路及多级放大器	269
第八节	阻容耦合放大器中的通频带	274
第九节	放大器中的负反馈	274
第十节	功率放大器	283
小 结		288
练习题		290
第十一章	直流放大器	296
第一节	直流放大器的特点和分析方法	296
第二节	单边式直流放大器	299
第三节	带有公共射极电阻的差动放大电路	301
第四节	单端式差动放大电路	305
第五节	带恒流管的差动放大电路	307
第六节	实用的直流放大器举例	308
小 结		311
练习题		312
第十二章	直流电源	314
第一节	概述	314
第二节	单相整流电路	314
第三节	三相整流电路	318
第四节	滤波电路	321
第五节	硅稳压管稳压电路	325
第六节	晶体管串联型稳压电路	329
小 结		335
练习题		336
第十三章	可控硅电路	338
第一节	概述	338
第二节	可控硅元件	338
第三节	单相可控整流电路	345
第四节	三相可控整流电路	354
第五节	可控硅的触发电路	359
第六节	可控硅电路应用举例	367
小 结		374
练习题		375
部分习题答案		376

第一篇 电 工 基 础

第一章 直 流 电 路

直流电在工农业生产中应用非常广泛，例如电解、电镀、电气机车，具有宽调速范围的电力拖动，电子仪器，自动控制设备等都要用到直流电。因此，我们要分析和研究它，掌握它的规律，应用它为社会主义的四个现代化服务。

第一节 直流电路的基本概念

一、电路的组成

电路是电工设备组成的总体，它提供了电流的通路。其中的电磁过程用电动势、电流和电压的概念来描述。简单地说，电路就是电流所经之路。

电路的作用是多种多样的，可能是为了分配电能及实现电能与其它形式能量间的转换，也可能是为了传输或转换各种信号以达到控制、保护等目的。图 1-1 表示一个最简单的电路，其中的干电池作为电能的源泉即电源，经开关及导线将电能供给灯泡，灯泡在电流流过时发出热和光，消耗了电能，是一个用电器或称负载。由此可见构成电路的主要部分有三：（1）电源，其作用在于把其他形式的能量转换成电能。（2）负载，其作用在于把电能转换成其他形式的能量。（3）联接导线（包括开关等），把电源和负载联接成一个闭合环路，其作用在于输送和分配电能。

在一般的电路中还装有开关、控制设备、指示器、保护装置和测量元件等附属设备。

电路分外电路和内电路，对电源来讲，负载和联接导线以及开关等附属设备叫外电路。电源内部的通路叫内电路，如电池内二极之间的通路。

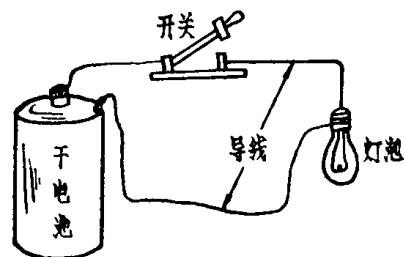


图 1-1 电路示意图

二、电流、电压、电动势

（一）电流

电荷有秩序的运动便形成电流。在金属和电解液等导电媒质中，由于电场的作用，金属中的自由电子和电解液中的正、负离子作有秩序的运动形成电流，这种电流称为传导电流。

习惯上，以正电荷运动的方向作为电流的实际方向。因此，电子的运动方向与电流方向相反。电流的大小用电流强度 i 来表示，它的定义是，在一极短时间 dt 内，通过导体截面 S 的电量的代数和为 dq ，则电流强度

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

所以在—根导线中的电流强度（如图 1-2），数值上即等于单位时间内穿过导线任意截面 S 的电荷量的代数和。在计算电量代数和时，首先规定一个正方向，例如规定正电荷从 A 到 B 为正，也就是说，正电荷从 S 面的左方穿过到 S 面的右方作为正。如此，电流的正方向即从 A 到 B ，在图中用箭头表示，此正方向谓之标定方向。当电流的正方向已经规定，凡正电荷沿标定方向穿过截面或负电荷沿反方向穿过截面都计为正，而正电荷沿反方向或负电荷沿正方向穿过截面则都计为负。因此，虽然电流本身没有一定的空间方向（它不是矢量）而总是沿着导线流动，但还是有两个可能的方向，即可能由 A 流到 B （见图 1-2），

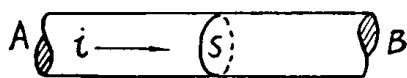


图 1-2 电流的正方向

也可能由 B 流到 A 。为了计算上的方便，可任意选两个方向中的一个作为电流的正方向，并标明于图中，而电流的实际方向与规定的正方向一致时，则电流的数值即计为正；反之，则电流的数值即计为负。由于电流可能有正值或负值，所以它是一个代数量。应当注意：在未

规定正方向的情况下，电流的正负是没有意义的。

电流的正方向既可用箭头表示，也可用双下标法表示。如 i_{AB} 即表示由 A 到 B 的电流（如图 1-2）。电流的实际方向乃反映客观事实，是一定的。因此，若选定的正方向不相同，那末，同一电流的大小仍相同，但符号则相反，即

$$i_{AB} = -i_{BA} \quad (1-2)$$

为了不使电流的实际方向与正方向在图中混淆起见，实际方向不必标明在图内。如有必要应另加说明。

按电流强度 i 是否随时间而变动，它可分为恒定电流和变动电流。恒定电流简称直流，它的大小和方向均不随时间而变动，它的电流强度用大写 I 表示，并可写为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-3)$$

式中 q 即为时间 t 内穿过 S 面积的电荷量。

电流强度常简称电流，这样电流一词一方面代表一种物理现象，另一方面又代表一种物理量。在国际单位制中，电流的单位是安培，简称安（A）。在计量微量电流时常用毫安（mA）或微安（ μA ）为单位，计量大电流时常以千安（kA）为单位。

在工作中还经常用到电流密度这个概念。流过导线单位截面积的电流叫电流密度。所取的截面积应与电流方向相垂直。也就是要和导线相垂直。

假定电流在导线截面积上的分布是均匀的，则

$$j = \frac{I}{S}$$

式中 j ——电流密度，安培/毫米²；

I ——导体内电流强度，安培；

S ——与导体内电流相垂直的横截面积，平方毫米。

例如在 1000VA 以下的小型电源变压器中圆铜漆包线常用的电流密度是 $(2.5 \sim 3.0) A/mm^2$ ，BVR 型铜芯软线的参考电流密度为：单芯 $20 A/mm^2$ ，双芯 $17 A/mm^2$ 。

(二) 电压与电动势

前节所述电荷在电场力的作用下运动的物理过程，也就是电场对电荷做功的物理过程。

首先看在无限大的平行带电平板中均匀电场的情况。在均匀电场中各处的电场强度 $\bar{\epsilon}$ 都是相等的，在均匀电场中的 A 点置有一荷正电的试验点电荷 q_0 ，则 q_0 就受到电场力 $\bar{f}$ 的作用 ($\bar{f} = \bar{\epsilon} q_0$)，并沿 $\bar{f}$ 的作用方向而移动至 B 点，此时电场力作的功为：

$$A_{AB} = \bar{f} \cdot \bar{l}_{AB} = f \cdot l_{AB} \quad (1-4)$$

我们称电场力移动单位正电荷从 A 点到 B 点所做的功为 A、B 两点间的电压，用 U_{AB} 表示，即

$$U_{AB} = \frac{A_{AB}}{q_0} = \frac{\bar{f} \cdot \bar{l}_{AB}}{q_0} = \bar{\epsilon}_c \cdot \bar{l}_{AB} \quad (1-5)$$

式中 $\bar{\epsilon}_c$ 为库仑场的电场强度，伏/米。

电压的单位为伏特（简称伏或 V），较高的电压常以千伏为单位，较小的电压常以毫伏或微伏为单位。

从电压的定义可以看出，电压是从电场力移动电场中的电荷做功的角度来描述电场特性的。如果某两点间的电压 U_{ab} 很高，就说明此二点间电场做功的本领很强，具有很大的能量。

电压和电流一样是一个代数量，有预先规定的正方向，例如上面所提到的 U_{AB} ，其正方向即为 A 到 B，若预先规定的电压正方向是由 B 到 A，则二者所得的结果大小相等、符号相反，即

$$U_{AB} = -U_{BA} \quad (1-6)$$

电压的正方向除用双下标法表示外，也常用一实心箭头来表示电压的方向。

在库仑电场中，电压与电荷在电场中移动的路径无关，在此前提下^②，电压的值决定于起点和终点的位置，故为便于比较起见，我们取任意一点 O 作为参考点，而把由某点 A 到此参考点的电压 U_{AO} 称为该点 A 的电位，并用 φ_A 表示。我们用二个无限大带电平行板间的均匀电场来分析电位的概念及其与电压的关系。

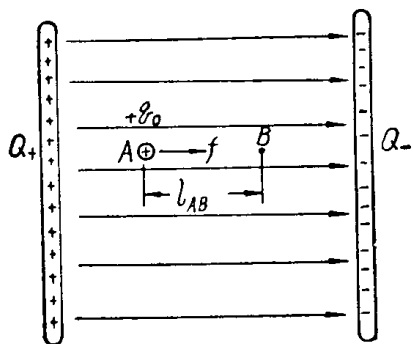


图 1-3 在均匀电场中，电场力移动点电荷做功的情况

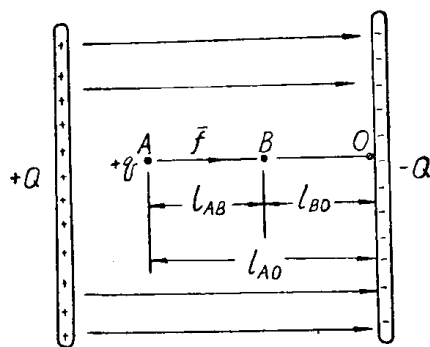


图 1-4 均匀电场中的电位与电位差

① $\bar{f}$ 字母上带横划的均代表矢量。

② 读者可根据库仑场移动试验点电荷做功的情况来考虑。

若取负极板上一点O作为参考点, A点与O点间距离为 l_{AO} , B点与O点间的距离为 l_{BO} , 则电场力 f 将试验点电荷 $+q_0$ 从A点移至O点所作的功为

$$A_{AO} = \bar{f} \bar{l}_{AO} \quad (1-7)$$

A点的电位:
$$\varphi_A = U_{AO} = \frac{A_{AO}}{q_0} = \bar{\varepsilon}_c \bar{l}_{AO} \quad (1-8)$$

同理B点的电位:
$$\varphi_B = U_{BO} = \frac{A_{BO}}{q_0} = \bar{\varepsilon}_c \bar{l}_{BO} \quad (1-9)$$

A、B两点间的电压:
$$U_{AB} = \bar{\varepsilon}_c \bar{l}_{AB} = \bar{\varepsilon}_c (\bar{l}_{AO} - \bar{l}_{BO}) = \varphi_A - \varphi_B \quad (1-10)$$

即
$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B \quad (1-11)$$

上式说明在库仑场中A、B两点间的电压可以此两点间的电位差表示。

从图1-4可以很明显地看出带正电量的试验点电荷 $+q_0$ 受电场力 $\bar{f}$ 的作用和位移 $\bar{l}_{AB}$ 的方向是一致的。因为 $l_{AO} > l_{BO}$, 即 $\varphi_A > \varphi_B$, 因此, 说明 U_{AB} 的正方向是从高电位点A指向低电位点B的, 即电位降低的方向。

参考点的选择是任意的, 一般选地面为参考点, 也即零电位点。在实际工作中, 如计算电路问题时, 常选择电路中某点作为参考点, 如在电子线路中常选公共点作为参考点。

应当注意: 若选定的参考点不同, 各点的电位也不同, 但任何两点间的电位差(或电压)却仍保持不变, 这从式(1-10)即可看出。电位与电位差的单位均为伏特(V)。

电荷在库仑电场的作用下运动, 库仑电场做功。因此, 若只有库仑电场存在, 则正电荷总是从高电位处向电位较低之处运动, 而负电荷则作相反的运动, 这些运动就会改变产生库仑电场的电荷的分布情况, 因此, 也就改变了各处的电场强度及电位, 并使某二点间的电位差减小, 而不可能维持恒定电流。

要维持恒定电流, 就必须还有非库仑场的电场存在, 即感应电场或局外电场, 借这些电场的力(非静电场力)把正电荷由低电位处搬回到高电位处(或负电荷的相反方向运动), 这样电荷便可以在闭合的路径上周而复始的流动着, 这就需要有“电源”。目前使用的电源种类很多, 如发电机、蓄电池、干电池等。它们以不同的形式将其它形式的能量转变为电能, 因此电源就是把其他形式的能量转变为电能的装置。不管其形式如何不同, 但它们都具有一个共同点, 即能使电源内部导体中的正负电荷分离, 并分别推向两极, 使得一极具有一定量的正电荷, 另一极具有一定量的负电荷, 即形成电源的正、负两极, 并具有一定的电位差, 及其产生的电场, 这种电场有阻碍正负电荷分离并向两极移动的作用。

我们把电源内部这种使正、负电荷分别推向两极的作用力统称为电源力(电源力非静电场力)。

电源力既然能使电荷移动, 就说明它具有做功的本领, 我们把电源力移动单位正电荷从电源的负极到正极所做的功, 叫做电源的电动势, 并用符号 E 表示(图1-5), 即

$$E = E_{BA} = \frac{A_{BA}}{q_0} \quad (1-12)$$

式中 A_{BA} 是电源力, 将正电荷 q_0 从负极B沿路径 l 移至正极A所做的功。电动势的单位和电压的一样为伏特。而且电动势也是一个代数量, 有预先规定的方向。电源内部(内电路)由于电动势的作用, 正电荷是从低电位移向高电位的, 因此用箭头表示 E_{BA} 时, 箭头应从

低电位的 B 指向高电位的 A ，而电源的端电压 U_{AB} 是从高电位指向低电位的，如图1-6所示。

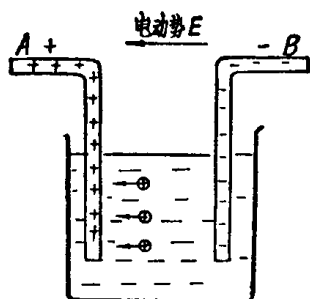


图 1-5 电源的电动势

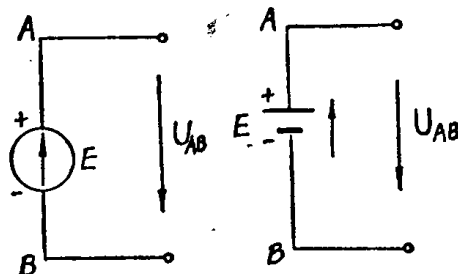


图 1-6 电动势的图形及符号

三、电路图

在电气工程中，要根据电路图来了解电路的连接方法和电路中各元件的作用，以便进行安装、检修和调整。工程上用的图纸可分为原理接线图和装配图两种。原理接线图只表示线路的接法，并不反映电路的几何尺寸和各元件的实际形状。装配图除了表示电路的实际接法外，还要画出有关部分的装置与结构。图1-7(a)就是图1-1所画实际电路的原理接线图。

有时为了突出电路的本质和进一步简化，可把图1-7(a)画成(b)或(c)。

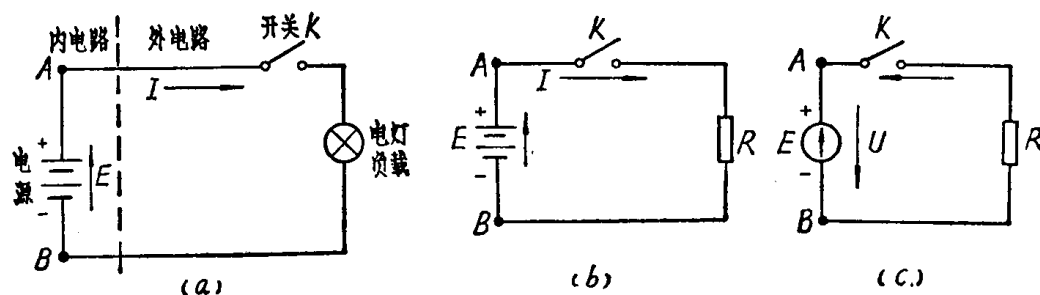


图 1-7 图1-1的原理电路

注意，在电路图中导线相连接的点必须用圈或黑点画出。

四、电阻和电阻率

不同的物质接到同样的电源上，各种物质中流过的电流大小都不相同，说明各种不同的物质有不同的阻力。我们把加在导体两端的电压和通过导体的电流的比值叫做电阻，用 R （或 r ）表示。电阻是物质的一种物理特性。

衡量电阻大小的单位是欧姆（简称欧）用符号 Ω 表示。

$$1 \text{ 欧姆}(\Omega) = \frac{1 \text{ 伏特}}{1 \text{ 安培}} \frac{(\text{V})}{(\text{A})} \quad (1-13)$$

实用上往往嫌欧姆这个单位太小，可以用千欧($\text{k}\Omega$)和兆欧($\text{M}\Omega$)做单位。

导体的电阻不仅和导体的材料种类有关，而且还和导体的尺寸有关。实验证明，同一材料导体的电阻和导体的截面积成反比，而和导体的长度成正比。这和液体在管道中流动时遇到的阻力相似。用公式表示是

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-14)$$

式中 l ——导线长度，米；

S ——导线截面积，平方毫米；

ρ ——比例常数，叫做导体的电阻率，欧·毫米²/米。

电阻率 ρ 是长 1 米，截面为 1 平方毫米导体的电阻值。例如，铜的电阻率 $\rho = 0.0175$ 欧·毫米²/米就是一根 1 米长、截面为 1 平方毫米的铜导线的电阻值为 0.0175Ω 。几种常用材料在 20°C 时的电阻率，列于表 1-1 中。

常用导电材料的电阻率和温度系数

表 1-1

材 料 名 称	20°C 时的 电 阻 率 (欧·毫米 ² /米)	电阻温度系数 (1/°C)	材 料 名 称	20°C 时的 电 阻 率 (欧·毫米 ² /米)	电阻温度系数 (1/°C)
银	0.016	0.00361	铁	0.0978	0.00625
铜	0.0172	0.0041	铂	0.105	0.00398
金	0.022	0.00365	锡	0.114	0.00438
铝	0.029	0.00423	铅	0.206	0.0041
钨	0.0477	0.00479	汞	0.958	0.0009
钨	0.049	0.0044	康铜(54%铜、46%镍)	0.50	0.00004
锌	0.059	0.0039	锰铜(86%铜12%锰2%镍)	0.43	0.00002
镍	0.073	0.00621			

从表 1-1 可以看出，在这些常用的导电材料中，除去银之外，铜的电阻率最小，导电性能最好，铝的导电性能次之。由于我国铝储量丰富，价格又比铜低得多，所以目前大量采用铝线，但铝的拉力、韧性都较铜为差。

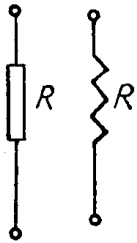


图 1-8 电阻元件
的图形和符号

电阻率比较高的材料主要用来制造各种电阻元件。

电阻元件也常常被称为电阻，这时电阻既是代表材料物理特性的物理量，也代表电阻元件。在原理图中电阻元件常用一长方形空框代表，见图(1-8)，也有用一曲折线来代表的。

为了计算的方便，电阻值有时用它的倒数表示，叫做电导。电导用符号 G 或 g 代表，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-15)$$

电导的单位是西门子或简称西(S)。它相当于 $1 \text{ 西门子} = \frac{1 \text{ A}}{1 \text{ V}}$

五、电阻的温度系数①

导电材料的电阻值不仅和材料本身的性质及材料的尺寸有关而且和温度有关。银、铜、铝等金属导体的电阻随温度的升高而增大，但碳的电阻值却随温度的上升而减小。

为了计算导电材料在不同温度下的电阻值，我们把导体的温度每增高 1°C 时，每欧的电阻值增大的百分数叫做电阻的温度系数。用符号 α 表示。并举一例说明电阻温度系数的意义。

【例 1-1】一段铜导线，当温度 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ 时，它的电阻是 $R_1 = 5\Omega$ ，当温度上升到 $t_2 = 30^\circ\text{C}$ 时，它的

① 供选用。

电阻增大到 $R_2=5.2\Omega$ ，那么它的温度系数是多少呢？

【解】 温度的变化量 $\Delta t=t_2-t_1=30^\circ\text{C}-20^\circ\text{C}=10^\circ\text{C}$ ，电阻的变化

$$\Delta R=R_2-R_1=5.2-5=0.2\Omega$$

温度每变化 1°C 时所引起的电阻变化

$$\frac{\Delta R}{\Delta t}=\frac{0.2}{10}=0.02\Omega/^\circ\text{C}$$

电阻变化的百分比（即电阻温度系数）

$$\alpha=\frac{\Delta R/\Delta t}{R_1}=\frac{0.02}{5}=0.004\text{ }1/^\circ\text{C}$$

即温度变化 1°C ， 1Ω 的电阻增加了 0.004Ω 。

但常用材料的电阻温度系数也随温度略有变化，在 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 的平均电阻温度系数列在表 1-1 中。从表中可看出锰铜、康铜的电阻温度系数很小，常用在要求精确度和稳定性较高的场合，如标准电阻。铂的电阻温度系数较大，常用来制造铂电阻温度计。

知道了导体材料的电阻温度系数 α ，就可以算出材料在温度变化时的电阻。例如 R_1 是温度为 t_1 时的阻值，要求温度为 t_2 时的阻值 R_2 ，可按下式计算，即

$$R_2=R_1+\alpha R_1 \Delta t=R_1[1+\alpha(t_2-t_1)] \quad (1-16)$$

【例 1-2】 在发电机内部，常常装有铂丝制成的电阻温度计，在 20°C 时测得它的电阻是 49.5Ω ，在发电机运行后，测得电阻是 60.9Ω 。问这时发电机的温度是多少？

【解】 从手册中（或见表1-1）查得铂的平均电阻温度系数 $\alpha=0.00389\text{ }1/^\circ\text{C}$ 。将 $R_1=49.5\Omega$ ， $t=20^\circ\text{C}$ ， $R_2=60.9\Omega$ 代入（1-16）式得

$$60.9=49.5[1+0.00389(t_2-20)]$$

$$\frac{60.9}{49.5}-1=0.00389(t_2-20)$$

$$1.23-1=0.00389(t_2-20)$$

$$\frac{0.23}{0.00389}=t_2-20$$

$$\therefore t_2=59.2+20=79.2^\circ\text{C}$$

即此时发电机的温度为 79.2°C 。由于发电机的允许温度为 105°C ，所以发电机可以安全运行。

六、欧姆定律

设在一段无电源的电路加上电压 U （图 1-9），则在多数情况下这段电路中通过的电流 I 与所加的电压 U 成正比，而与电阻 R 的大小成反比，这就是欧姆定律。

在图示电压和电流正方向一致的条件下：

$$I=\frac{U}{R} \quad (1-17)$$

这个公式表达了电路中电压、电流及电阻三者间的关系。式（1-17）可以表示为

$$U=IR=\varphi_A-\varphi_B \quad (1-18)$$

$$\text{或} \quad R=\frac{U}{I} \quad (1-19)$$

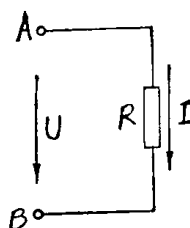


图 1-9 一段无源电路的欧姆定律

【例 1-3】 已知一个万用表头的全偏转电流为 $40\mu\text{A}$ ，表头本身电阻为 $R_c=2800\Omega$ ，而该表的直流电压最大量程为 2500V ，问串联多大的附加电阻，此时表头本身承受多大的电压 U_c 。

【解】 表头内流过的电流不能大于 $40\mu\text{A}$ ，最大量程为 2500V 时，

$$R = \frac{U}{I} = \frac{2500}{40 \times 10^{-6}} = 62.5\text{M}\Omega = 62500\text{k}\Omega$$

因此应串联附加电阻 $R_b = R - R_c = (62500 - 2.8) = 62497.2\text{k}\Omega$ ，此时表头本身承受的电压为 $U_c = 2.8 \times 10^3 \times 40 \times 10^{-6} = 112 \times 10^{-3}$ 伏，即表头本身仅承受 112mV 的电压。

七、线性电阻和非线性电阻

多数金属电阻的阻值是不随所加电压和流过的电流而改变的（或者说在一定温度下电阻是常数）。这种电阻的伏安特性是一条直线，所以这种电阻叫线性电阻。欧姆定律只适用于线性电阻。

例如 $t = 20^\circ\text{C}$ 时 $R = 10\text{k}\Omega$ ，则加不同电压值时，得不同的电流如下表：

线性电阻电压、电流实验数据

表 1-2

$U(\text{V})$	2	4	6	8	10
$I(\text{mA})$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0

还有另一类电阻，当通过不同的电流或加上不同的电压时，就会有不同的阻值（或者说，电阻值不等于常数）。这种电阻叫做非线性电阻。

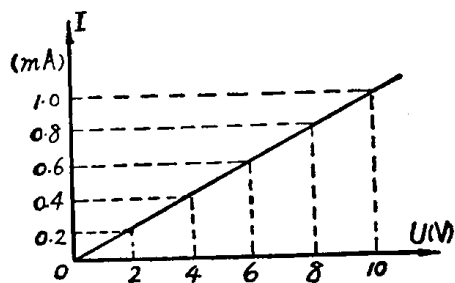


图 1-10 线性电阻的伏安特性 $I=f(U)$

对于具有非线性电阻的电路，一般是根据电阻的伏安特性用作图的方法进行分析和计算。或则在小范围内可以将非线性电路近似为线性电路处理。在晶体管电路中，经常遇到非线性电阻的问题。例如晶体二极管就是一个非线性电阻（测量电路见图 1-11），三极管的输入电阻和输出电阻都是非线性的。

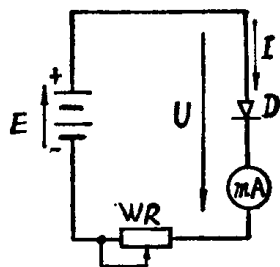


图 1-11 测量晶体二极管的伏安特性的原理电路

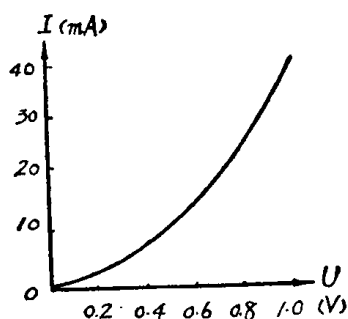


图 1-12 晶体二极管的正向伏安特性

晶体二极管正向伏安特性实验数据

表 1-3

$U(\text{V})$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$I(\text{mA})$	0	1	5	12	24	45
$R(\Omega)$		200	80	50	33	22

从图1-12晶体二极管的伏安特性 $I=f(U)$ 及表1-3清楚地表明晶体二极管的正向等值电阻不是一个常数，即是非线性电阻，对此，欧姆定律不适用，因此往往用作图法求解。今后除非特别指出，电阻均指线性电阻而言。

八、全电路的欧姆定律，电源的外特性

在前面讨论了一段电路的欧姆定律，其数学表示形式为

$$U=IR$$

在实际使用中电路都是构成闭合回路的，即由电源、导线、负载电阻构成，如图1-13，为了分析方便且表达清楚，常将具有内阻为 r_0 ，电动势为 E 的实际电源表示为一个内阻为零、电动势为 E 的理想电源与一个电阻 r_0 的串联电路，如图1-14所示，在一个闭合电路内电位的升高始终等于电位的降低，因此，在如图所标正方向的情况下，可写出

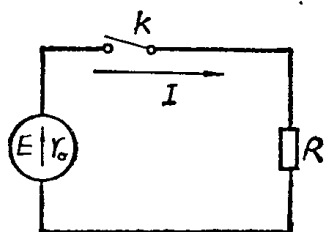


图 1-13 全电路的欧姆定律

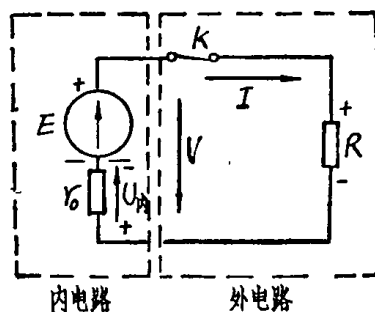


图 1-14 图1-13的等效电路

$$E=U+U_{r_0}=IR+Ir_0 \quad (1-20)$$

由导线（包括开关等）及负载电阻 R 构成的电路称为外电路，由理想电源电动势 E 与内阻 r_0 构成的电路称为内电路， $U_{r_0}=Ir_0$ 称为内阻压降， $U=IR$ 则称外电路压降， U 也称为电源的端电压。所以在一个闭合电路内的电流等于电路内的电动势被电路内电阻的和除，即

$$I=\frac{E}{r_0+R} \quad (1-21)$$

这是闭合电路欧姆定律的数学表达式，亦称全电路的欧姆定律。根据一个闭合回路内电位升的代数和应等于电位降的代数和这个原则，那末当一个闭合回路内具有不止一个电动势时，式（1-21）还可以推广而写为

$$I=\frac{\sum E}{\sum R} \quad (1-22)$$

这是全电路欧姆定律的广义的表达形式，式中电动势的正、负号一般是这样规定的：在闭合回路内任取一回路电流方向，则电动势的正方向符合所选电流流向的，电动势前冠以“正”号，反之则冠以“负”号。如算出的电流是“正”的，则表示所取的回路电流方向符合实际电流方向，如算出的电流是“负”的，则表示所取的回路电流方向与实际电流相反。与实际电流方向同向的电动势为电源电动势，与实际电流方向相反的则称为反电动势。

根据式（1-20）可以得

$$U=E-Ir_0 \quad (1-23)$$

式（1-23）说明一个含电源电动势电路的端电压在数量上等于电动势减去内阻压降。

式(1-23)说明 E 、 U 、 I 及 r_0 四者之间的关系。电源的电动势 E 和内阻 r_0 称为电源的参数。如果它们都是与通过电源中的电流无关的量,则该电源称为线性定电势源。大多数实际电源如干电池、蓄电池和并激或直流复激发电机都接近这种情况。以后如无特殊声明,电路中的电源均指这种电源而言。

对线性定电势直流电源来讲,电动势 E 是常量。根据式(1-23)可知,这种电源供出的电流越大,则其端电压越低;如果外电路断开时则其端电压也就等于它的电动势,即往常说的开路电压数量上等于其电动势。

如以电源的电流 I 作为横座标,电源的端电压 U 作为纵座标,绘出 $U=f(I)$ 曲线,此曲线称为电源的外部特性曲线,或简称电源的外特性。

对线性定电势直流电源来说,外特性为一根直线,此直线可根据式(1-23)作出,如图1-15。

外特性曲线在纵轴上的截距就等于电源的电动势 E 。实际电源的外特性可能只在一定范围内才是直线的。

如果电源内阻很小,则在一定的条件下,电源的内阻可以忽略,因而电源供给的电压也就等于它的电动势。这种理想化了的电源称为恒压源,其外特性为一水平直线。例如平复激直流发电机因具有适度的补偿,在一定的电流范围内具有接近水平的外特性。

对于将电源电压加到一段含源支路的情况如图1-16(a),可以根据全电路欧姆定律的广义形式写出:

$$E=IR-U \quad \text{或} \quad I=\frac{E+U}{R} \quad (1-24)$$

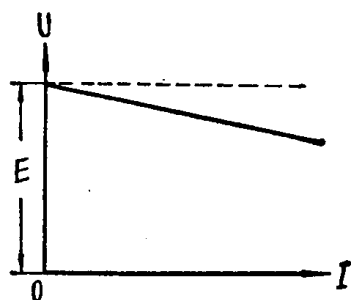


图 1-15 电源的外特性曲线
 $U=f(I)$ 曲线

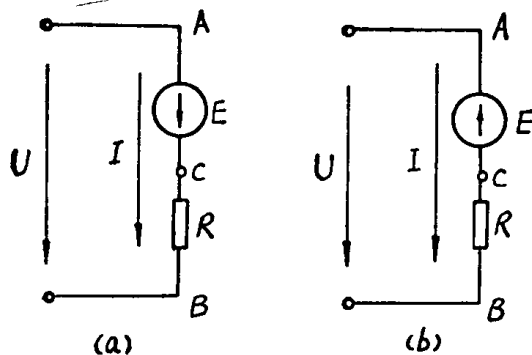


图 1-16 作用到一段含源支路的欧姆定律

此式可作如下理解:在支路 AB 中,同时有电压 U 和电动势 E 的作用,它们的正方向一致,且与所选的电流正方向一致,因 E 和 U 都有产生电流一致通过电阻的作用,所以此 E 是个电源电动势。再看图1-16(b)的情况,任选电流方向如图,同理可写出

$$-E=IR-U$$

即

$$I=\frac{U-E}{R} \quad (1-25)$$

如果算出的电流是正值,电动势 E 与实际电流方向相反,起到削弱电源电压、阻碍电流的作用,是反电动势。

九、电路的几种工作状态

图1-17是一个含源的闭合回路,图中 A 、 B 两端是电源的引出端, AB 支路是一个电