



国产20万千瓦机组培训班讲义

热工测量仪表

邱运根 王栓玉

水利电力部生产司

试验所

21.4

5

前 言

我国电力工业发展已进入大机组、高参数、高度自动化的时代和单元集中控制的运行方式。“七五”期间，国产二十万千瓦汽轮发电机组将成为我国电厂中的主力机组之一，为了提高二十万千瓦机组电厂的机、炉运行值班人员素质和技术水平。自一九七九年起委托西安电力学校举办国产二十万千瓦机组运行培训班，并编写了教材，经过多次学习班试用反映良好，在试用教材的基础上经过整理、补充和修订，编写成《国产二十万千瓦机、炉运行培训讲义》。以满足二十万千瓦机组运行人员的培训和广大电力职工自学需要。也可供技校和中专师生参考。这套书包括《热工学基础》、《电厂金属材料》、《汽轮机调节》、《汽轮机运行》、《汽轮机设备》、《汽轮机辅助设备及热力系统》、《汽轮机保护与电调》、《锅炉燃烧原理及设备》、《锅炉蒸发原理、设备、锅炉运行》、《热工测量仪表》、《锅炉自动控制系统》等。

西安电力学校有关同志为编写这套讲义付出了辛勤劳动，在此仅致谢意。

水利电力部生产司

一九八六年三月二十日

内 容 简 介

本书是应水电部生产司要求，对大机组运行人员要进行全面培训的精神编写的，作为热能专业“热工测量仪表”课程的教材。

随着大机组的发展，自动化程度越来越高，迫切要求大机组的机炉运行人员能正确使用好热工检测仪表和自动化装置，以确保大机组安全运行，为此编写了这本配套培训教材。因为培训对象主要是大机组现场运行人员，考虑到讲课的需要，本书在前面安排了一篇电工基础知识。

全书分二篇，共有十一章。第一篇为电工基础（第一章～第四章），讲述电路的基本概念和基本定律、直流电路的分析方法、电磁和电磁感应及正弦交流电；第二篇为热工测量仪表（第五章～第十一章），着重介绍了大机组中广泛采用的一些热工检测仪表。编写时，力求突出重点，理论联系实际，并注意深入浅出，文字通俗易懂。为加深读者对基础内容的理解，第一篇各章末都附有一定数量的练习题。

本书由西安电力学校邱运根和王栓玉同志编写，邱运根同志担任全书通稿和编辑工作。

由于编者水平有限，难免有不妥及错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

一九八六年九月

目 录

前言

第一篇 电 工 基 础

第一章 电路的基本概念和基本定律	1
第一节 电路	1
第二节 电流、电压和电动势	2
第三节 电流、电压的参考方向	6
第四节 理想电路元件、电路、电网络	8
第五节 欧姆定律、电阻和电导	9
第六节 焦耳—楞次定律、功率	11
第七节 基尔霍夫定律	14
第八节 电阻的串联	17
第九节 电阻的并联	18
第十节 电阻的串并联	21
第十一节 电容器及其充放电过程	22
第十二节 电流源	25
第十三节 电源的等值变换	26
第二章 直流电路的分析方法	33
第一节 直流电路的一般分析方法	33
第二节 支路电流法	33
第三节 回路电流法	37
第四节 节点电压法	40
第五节 迭加原理	42
第六节 戴维南定理	43
第三章 电磁和电磁感应	48
第一节 磁的基本知识	48
第二节 电流的磁效应	50
第三节 铁磁性材料的磁化	52
第四节 磁场对通电导体的作用力	53
第五节 电磁感应	55
第四章 正弦交流电路	62
第一节 交流电的基本概念	62
第二节 正弦电势的产生	63

第三节	正弦量的特征	65
第四节	交流电的有效值	70
第五节	正弦量的复数表示法	72
第六节	纯电阻电路	74
第七节	纯电感电路	76
第八节	纯电容电路	80

第二篇 热工测量仪表

第五章	热工测量的基本知识	86
第六章	温度测量仪表	89
第一节	热电偶温度计	89
第二节	热电阻温度计	99
第三节	动圈式显示仪表	103
第四节	电子自动平衡式仪表	106
第七章	压力测量仪表	109
第一节	压力概念	109
第二节	弹性压力表	110
第三节	1151系列电容式变送器	114
第八章	流量测量仪表	127
第一节	差压式流量计的工作原理	127
第二节	差压测量仪表及变送器	130
第三节	靶式流量计	136
第九章	汽包水位测量	139
第十章	氧化锆测氧计	145
第十一章	数字显示仪表	150

第一篇 电工基础

第一章 电路的基本概念和基本定律

随着科学技术的发展，电工技术已广泛应用生产领域的各个部门。尽管目前使用的电气设备日趋繁多，但绝大部分的设备仍是由各式各样的基本电路所组成的。不论电路的结构如何复杂，它们和最简单的电路之间还是具有许多最基本的共性，并且遵循着相同的运动规律。因此，掌握电路的基本概念和基本定律是十分必要的，它是我们进一步学习仪表和调节设备共同基础。

第一节 电 路

电路是由电工设备组成的总体，它提供了电流通过的途径。随着电流的通过，进行着从其它形式的能量转换成电能、电能的传输和分配、以及把电能转换成所需要的其它形式能量的过程。典型的例子是电力系统，发电厂的发电机把热能或原子能或水能等转换成电能，通过变压器、输电线等输送给各用电单位，那里又把电能转换成机械能、光能、热能等。这样构成了一个极为复杂的电路或系统。我们把供给电能的设备称为电源，而把用电设备称为负载。

电路是由电源，负载和联接导线所组成。

用导线将一个小电珠的两端与一节干电池的正、负两极分别联接起来，如图1—1所示，这时小电珠就亮了。从图中可以看到，干电池、小电珠以及联接这两者的导线，就构成了一个最简单的电路。其中干电池是电能的供出者，所以被称为电路的电源，而小电珠则是消耗电能的，叫做电路的负载。电能通过联接导线，从电源送往负载。

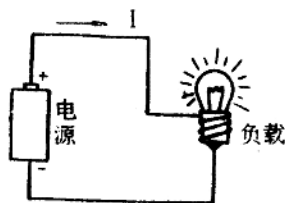


图 1—1

在自动控制设备、仪器仪表、计算机和通讯设备等方面，有种类繁多，形形色色的各种电路，这里电路的作用主要是信号的处理和信息的传输。

至于电路中能量传送的物理过程以及有关各量之间的关系，将在本章以下各节中依次介绍。

第二节 电流、电压和电动势

一、物质的电结构

1、构成物质的分子与原子

世界上尽管有千万种物质，例如铜、铁、玻璃、塑料、空气和水等，它们的性质都各有不同，但这些物质都是由该物质的分子构成的。分子是最细小但不失原物质化学性质的颗粒。

分子是由更小的物质微粒——原子所组成。有些物质的分子比较简单，只有一种原子组成，例如常见的铜或铁等金属就是这样。水的分子是由两个氢原子和一个氧原子化合而成的。塑料和其它有机化合物的分子结构都比较复杂。

原子是由原子核以及核外的电子所构成的。不同的原子，其原子核外面的电子数目也不相同。例如氢原子在它的核外只有一个电子，而铜的原子则具有29个电子。

原子核一般由质子和中子所组成。质子的数目总是等于核外的电子数。中子不带电，质子和电子都是带电的粒子。质子带正电荷，电子带负电荷。在同一原子中质子与电子所带的正、负电荷必定相等，因此就整个原子而言，正、负电荷的作用恰好完全抵消，所以物体平时对外界不显示出带电的现象。

2、物体的带电、电荷量

如果由于两种不同的物质相互摩擦或其他原因，使一块物体上的电子转移到了另一块物体上，这样就使失去电子的这块物体带了正电荷，而使获得了电子的那块物体带了相同数量的负电荷。物体失去或获得的电子越多，那么这块物体所带电正电荷量或负电荷量也就越多。

电荷量是以库仑（简称库）为单位计量的。据实验测定，一个电子所具有的负电荷量约等于 1.6×10^{-19} 库*，也就是在1库的负电荷中约包含有625亿亿个电子。

带电的物体在其周围存在着电场，电场也是物质存在的一种形式。实践证明，带异号电荷的两物体之间有互相吸引的力，反之，带同号电荷的两物体之间有互相排斥的力，这种相互的吸力或斥力就是电场的作用力。

二、什么叫电流

电荷有规则的运动，称为电流。

导体内的电流是由于导体内部的自由电子在电场的作用下规则地运动而形成的。此外，在有些液体或气体中由于存在带正、负电荷的离子*，它们在电场作用下分别朝着一

*以后我们都是用指数来表示很大的量和很小的量，以避免在数字前面或后面写很多的“0”，例如可以把6,000,000写成 6×10^6 ，把0.000,002,8写成 2.8×10^{-6} 。电子的电荷量 1.6×10^{-19} 库就是0.000,000,000,000,000,000,16库。

*离子就是带电荷的原子或原子团。

定的方向运动，因此也能形成电流。象电镀设备就是利用液体中的电流进行工作的，而日光灯则是利用管内气体的电流使之发光的。不论是固态导体或是液体、气体中的电流，均是带电质点（电子或正、负离子）的有规则的运动。

电流的大小取决于在一定时间以内通过导体某一截面的电荷量的多少。拿导线中电流来说，在同一时间以内，通过导线截面的电荷量越多，就表示导线中的电流越大。

为了较准确地说明某时刻电流的大小，我们在该时刻前后取一段极短的时间 Δt ，看在这段时间内，通过导体横截面的电荷量是多少，这个电荷量以 Δq 表示。这样，代表这一时刻的电流的大小（以字母*i*表示）就是

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

式(1-1)就是电流的定义式。它指出：电流的大小等于单位时间内通过导体横截面的电荷量。

为简单起见，我们把电流的大小就简称为电流。这样，电流这一名词不但表示一种物理现象，而且也代表一个物理量。

习惯上人们都把正电荷流动的方向作为电流的方向。在导线中，电流实际上是带负电的电子的流动所形成的，但其效果与等量正电荷反方向流动完全相同，因此其电流方向是与电子流的方向相反。如图1-2表示有电流的一段导线，其中自由电子从A端流向B端，而电流*i*的方向则是从B到A。

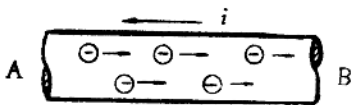


图 1-2

三、直流电流与交流电流

如果电流的大小和方向都不随着时间变化，即在任何不同时刻，单位时间内通过导体横截面的电荷量均相同，其方向也始终不改变，则这种电流称为直流电流。直流电流常用大写字母*I*表示。

电流和时间的关系可用图形表示出来。我们规定沿水平方向的横座标表示时间*t*，沿垂直方向的纵座标表示电流*i*。由于直流电流是不随时间变化的，所以它的图形是一条与横轴平行的直线，如图1-3(a)所示。在任何不同的时刻*t*，电流*i*的数值均等于恒定的*I*。

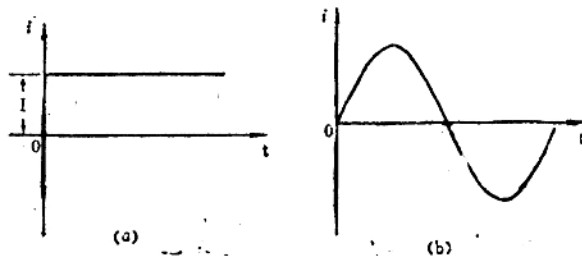


图 1-3

电流的大小和方向如果随时间按一定的规律反复交替地变化，一会儿从小变到大，一会儿又从大变到小，一会儿电流是正的，一会儿却变成负的（电流正负的变化即代表其方向的变化），则这种电流称为交流电流。图1—3（b）所画的图形就是最常见的叫做正弦交变电流的变化规律。我们平时用的，由电力电网供出的交流电，就是这样的电流。

电流的大小以安培为单位计量，简称安，用字母A表示。1安的电流即等于在1秒钟内有1库的电荷量通过导线的截面。在电力系统中往往要遇到几安、几十安甚至更大的电流。但在仪器仪表中，还经常遇到千分之几安、甚至更小的电流。这时可用较小的单位毫安(mA)或微安(μ A)来计量电流。它们之间的关系是

$$1 \text{ 毫安(mA)} = \frac{1}{1000} \text{ 安(A)} = 10^{-3} \text{ 安(A)}$$

$$1 \text{ 微安}(\mu\text{A}) = \frac{1}{1000} \text{ 毫安(mA)} = 10^{-3} \text{ 毫安(mA)} = \frac{1}{1000000} \text{ 安(A)} = 10^{-6}$$

安(A)

四、电压和电动势

如图1—4所示，a和b是电池的两个电极，a是正极带有正电荷，b是负极带有负电荷。这些电荷在空间产生了电场。在这个电场的作用下，正电荷便从电极a通过导体1移到电极b（实际上是负电荷在电场作用下，由电极b移到电极a，两者是等效的）。我们知道，在电场中，电荷在电场力作用下移动了一段距离，电场力就做了功，做功的能量来源就是电场中的能量。反过来，如果电荷逆着它所受电场力的方向移动，就需要外力克服电场力做功，而把外界能量转换成电场能储存在电场之中。这样在图1—4中，由于电场作用，正电荷通过导体1从电极a移到电极b，电场对正电荷做了功。设电场把正电荷q从a点移到b点所做的功为 A_{ab} ，则电场中a点到b点间的电压

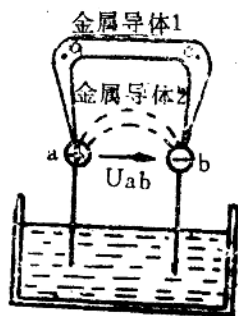


图 1—4 电压

$$U_{ab} = \frac{A_{ab}}{q} \quad (1-2)$$

也就是说，a点到b点间的电压在量值上等于电场把单位正电荷从a点移到b点所做的功。电压的极性是a点为正，b点为负，有时，也讲到电压的方向，在图1—4中，电压的方向则由a点指向b点。

如果在电场中，把单位正电荷从a点移到b点电场力做了功，电场能量有所减少，那么在外力作用下，逆着电场的方向，把单位正电荷从b点移到a的过程中，外力做了功，电场能量将有所增加。或者说，电场对单位正电荷作了负功。这两部分功的大小应该相等但符号相反。所以b点到a点的电压（其方向由b点指向a点）

$$U_{ba} = -U_{ab}$$

这样看来，对两点间的电压，必须讲明哪点是终点。在采用双下标记法时（例如 U_{ab} ），前一个下标（例如 a）代表起点，后一个下标（例如 b）代表终点。电压的方向则由起点指向终点。初学时对此常易忽视，应加以注意并养成习惯。

同样，按电压随时间变动的情况，我们把电压分成“变动电压”和“恒定电压”。如果电压的大小和方向都不随时间而变动，这样的电压就叫做恒定电压或直流电压，用大写字母 U 来表示。

在恒定电场（例如图1—4电池两个电极上电荷所产生的电场）中，电场强度的大小和方向都不随时间而变。在这种电场中，任意两点间的电压都是直流电压。可以证明，在恒定电场中，任意两点间的电压只和这两点（始点和终点）的位置有关，而和电荷移动的路径无关。如图1—4中，在电场作用下，不论正电荷沿导体1，还是沿导体2，从 a 点移到 b 点，它们的电压都是 U_{ab} 。

为了便于分析，在恒定电场中，常选一点 0 为参考点，而把任意点 a 与参考点 0 之间的电压 U_{a0} 称为 a 点的电位 φ_a 。在这样规定下，参考点 0 的电位 $\varphi_0 = 0$ 。参考点 0 常称为电位参考点。参考点的选择是任意的，选取不同的点作为电位参考点，场中各点的电位数值也就不同了。但是，电位参考点一经选定后，那么各点的电位就只能有一个数值，这就是所谓的“电位单值性”。

现在讨论电场中 a、b 两点的电位 φ_a 、 φ_b 和两点间电压 U_{ab} 的关系。因为

$$\varphi_a = U_{a0} \qquad \varphi_b = U_{b0}$$

而
$$\varphi_a - \varphi_b = U_{a0} - U_{b0} = U_{a0} + U_{0b}$$

这个 $U_{a0} + U_{0b}$ 就是电场将单位正电荷从 a 点经过电位参考点 0 移到 b 点所做的功。前面已经指出，电场两点间的电压是和移动电荷的路径无关的，所以 $U_{a0} + U_{0b}$ 便是 U_{ab} 。这样一来，我们可以写出

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \qquad (1-3)$$

亦即电场中 a 点到 b 点间的电压等于 a、b 两点电位的差。所以，电压又有“电位差”之称。

在国际单位制中，电压和电位的单位都是伏特（焦耳/库仑），简称伏（V）。计量高电压（如高压输电线电压）时，常取千伏（KV）为单位；计量微小电压（如晶体管电路中某些电压）时，则取毫伏（mV）或微伏（ μV ）为单位。它们之间的换算关系是：

$$\begin{aligned} 1 \text{ 千伏} &= 10^3 \text{ 伏} & 1 \text{ 毫伏} &= 10^{-3} \text{ 伏} \\ 1 \text{ 微伏} &= 10^{-6} \text{ 伏} \end{aligned}$$

例1—1 图1—4中，设 $U_{ab} = 3$ 伏， $U_{ac} = 2$ 伏。如分别取 b 点和 a 点作电位参考点，求 a、b、c 三点的电位。

解（1）取 b 点为电位参考点，则 $\varphi_b = 0$ ，

而
$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$$

所以
$$\varphi_a = U_{ab} + \varphi_b = 3 + 0 = 3V$$

又
$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c$$

所以 $\varphi_c = \varphi_a - U_{ac} = 3 - 2 = 1V$

(2) 如取a点为电位参考点, 则 $\varphi_a = 0$, 而

$$U_b = \varphi_a - \varphi_b$$

所以 $\varphi_{ab} = \varphi_a - U_{ab} = 0 - 3 = -3V$

又 $U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c$

所以 $\varphi_c = \varphi_a - U_{ac} = 0 - 2 = -2V$

可见, 电位参考点变了, 各点电位亦随之而变。但电位参考点一经选定后, 各点的电位就只有一个数值。至于电位差当然不随电位参考点而变。从上面例中还可以看出, 不论选哪一点作为电位参考点, c点的电位总是低于a点的电位 ($\varphi_c < \varphi_a$), 这是因为 $U_{ac} > 0$ 的关系。所以电压为正时, 沿着电压的方向电位在降落, 因而有的书上又把电压叫做电位降 (或习惯上常称为“电压降”)。

虽然, 对直流电压, 它有许多别的名称, 如电位差, 电压降, 电位降等, 但这些名称统统代表的是电压, 只要我们对电压的物理概念弄清楚, 这些名词也就不难记住了。

从上面的讨论中, 我们知道正电荷在电场作用下, 总是从高电位处 (如正极a) 向低电位处 (如负极b) 移动的。如果只有电场力对电荷作用, 那么正电荷移动的结果, 势必改变电荷的分布。随着时间的推移, 正、负极上的电荷只会越来越少, 它所产生的电场也就越来越弱, 最后等于零, 于是导体中的电流也只能是短暂的, 不能持续地流动。

为了要维持导体中的电流, 必须有一种外力源源不断地把正电荷从低电位处 (如负极b) 移到高电位处 (如正极a)。在电源内部, 就存在着这种外力。如在电池中, 由于电极和电解液的化学反应, 在它们的接触处就有这种外力存在。在电源内部, 同样也有电场, 但是外力超过了电场力, 因此形成正电荷从低电位到高电位的连续运动。在正电荷运动过程中, 外力对正电荷做了功。把单位正电荷在电源内部从负极b移到正极a, 外力所做的功在数值上等于电动势, 用字母e表示。电动势e的方向由负极b指向正极a, 也就是从电源的低电位处指向电源的高电位处。换句话说, 电动势e是正时, 电动势的方向是电位升高的方向。

在国际单位制中, 电动势的单位也是伏特。

直流电源的电动势的大小和方向, 都是不随时间改变的 (直流电动势用大写字母E来表示)。如蓄电池电动势约为2伏。干电池的电动势约为1.5伏。

当电源的正负极外部没有接通导体时, 电源处于“开路”状态。电源开路时, 电源中没有电荷在移动, 这时电场力刚好和外力相平衡。换句话说, 电场力和外力对正电荷做功的本领是相同的。这样, 电源开路时, 电源正负极间的电压数值上与电动势相等。

第三节 电流、电压的参考方向

上一节提到电流的方向是指它的实际方向, 它是正电荷运动的方向; 电流在导线中流动方向只有两种可能, 如图1—2中, 它或是从左向右, 或是从右向左。在分析电路时, 有时对某一段电路中的电流实际流动方向很难立刻判断出来, 有时电流的方向还在

不断地改变。由于这些原因，引入了电流参考方向的概念。电流的参考方向是一个任意选定的方向。如果电流的实际方向与参考方向一致时，就把电流定为正值，反之，当电流的实际方向与参考方向相反时，电流就定为负值（见图1—5a, b）。所以电流的参考

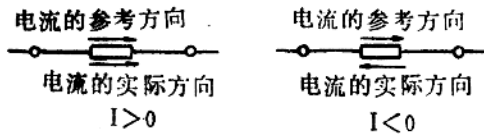


图 1—5 电流的参考方向

方向有时又称为电流的正方向。这样一来，电流就变为一个代数量了，它有正有负。电流的参考方向不一定是电流实际流动的方向，这两个方向是区别的；但是有了电流的参考方向，并且知道了电流的正负，便完全确定了电

流的实际方向。

电流的参考方向可以通过一只安培表端钮的标记来具体地加以说明。一只直流安培表的端钮往往带有一定的标记，例如“+”，“-”端（见图1—6a）。当电流的实际方向是从安培表的“+”端流入，“-”端流出时，安培表的指针作正偏转（如图1—6b所示顺时针方向），这时电流的读数为正值。反之，如果电流的实际方向是从安培表的“-”端流入，“+”端流出时，则安培表的指针作反偏转（如图1—6c所示逆时针方向*），电流的读数为负值。从这个实例可见安培表的正负端提供了电流的参考方向，即参考方向是从“+”端指向“-”端。

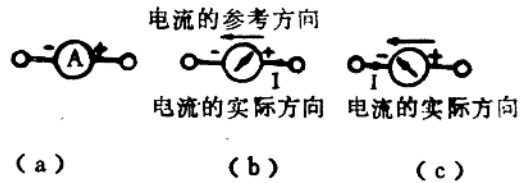


图 1—6 安培表的标记与电流参考方向

同理，对于电压来说，同样有必要指定参考方向。在图1—4中，电场把单位正电荷从a点移到b点所做的功在数值上就是a点到b点间的电压，这时就说电压的实际极性是a点为

正，b点为负，或者说a点电位高于b点电位，即电压的实际方向是从高电位指向低电位。当两点间电压的实际极性或方向不易判断或随时间改变时，那么我们任选一点的极性为正，另一点为负，称为电压参考极性，而正极指向负极的方向称为电压的参考方向。当电压的实际极性或实际方向和参考极性或参考方向一致时，则把电压定为正值，反之则为负值；如图1—7a、b实线所示为参考极性和参考方向，虚线所示为实际极性或实际方向。

电压的参考方向可以通过一只直流伏特端钮的标记来具体地说明。图1—8所示就是以说明这种情况：当伏特表的“+”端钮与电压的实际“+”极性为一致时，伏特表的指针作正偏转，这时读数为正，如图1—8a；反之指针作反偏转，读数为负，如图1—8b。所以伏特表的“+”、“-”端钮提供了电压的对应参考极性。

*如果安培表只能在一个方向偏转，则此时将无法读数。这里用的是指针在两个方向都能偏转的安培表。

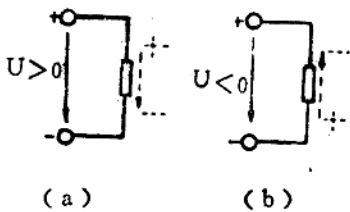


图 1—7 电压的参考极性或方向

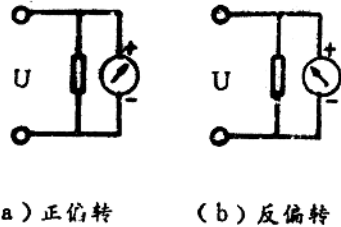


图 1—8 伏特表的标记与电压参考方向

对于电动势来说，同样可以任意选定它的参考方向。不过应当注意电动势的实际方向是从低电位指向高电位，恰好与电压的实际方向相反。

第四节 理想电路元件、电路、电网络

前面已经提到、在电路理论中，经过科学的抽象后，将实际电路用足以反映其电磁性质的一些理想电路元件的组合来代替。我们今后所说的电路通常就是指由这样的理想电路元件所组合成的。图1—9所示的是一个最简单的实际电路，其中有一个电源（干电池），一个负载（灯泡）和两根联接导线。我们怎样把这个简单的实际电路转化为一个抽象电路呢？

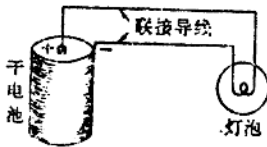


图 1—9 一个简单的电路

我们先来介绍什么是理想的电路元件。理想电路元件是具有某种确定的电或磁性质的假想元件，它们以及它们的组合可以反映出实际电路元件的电磁性质和电路的电磁现象。实际电路元件虽然种类繁多，但在电磁现象方面却有共同的地方。有的元

件主要是消耗电能的，如各种电阻器、电灯、电炉等；有的元件主要是供给电能的，如电池和发电机；有的元件主要是存储磁场能量的，如各式各样的电感线圈；有的元件则主要是存储电场能量的，如各种类型的电容器。我们用“电阻”这样的一个理想电路元件来反映消耗电能的特征，所以“电阻”是一个具有两个端钮的理想元件，当电流通过它时，在它内部进行着把电能转换成热能或其他形式的能量的不可逆过程。这样一来，所有的电阻器，电灯，电炉等实际电路元件，都可以用“电阻”来近似地代替它们，电阻在电路中的图形符号是一个长方块。

象干电池、蓄电池等直流电源可以近似地用一个直流理想电压源来表征。直流理想电压源是一个具有两个端钮的理想电路元件，其两端电压与通过它的电流无关，而总是一个恒定值。根据这个定义，直流理想电压源具有下列两个特点，一是它的电压固定不变，二是通过的电流可以是任意的，且取决于与它联接的外电路状态。这个定义可以推广到更一般的情况，就是说凡两端电压可以按照某给定规律变化而与其电流无关的电源，就称为理想电压源。今后我们把理想电压源简称为电压源。

直流电压源的符号如图1—10所示。图1—10a为常用的实际电池的符号，这里把它作为直流电压源符号；图1—10b为更普遍的符号。有时可以把电压源看作是一个内部具

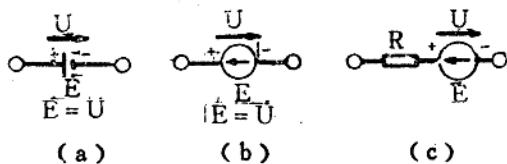


图 1—10 表示理想电压源的符号

代表其负极；在图1—10b的圆圈中还画出了表示电动势的方向的箭头，应特别注意E的方向与U的方向恰好相反，

实际的电源，其端电压往往随通过它的电流而发生变化。例如当电池接上负载后，其端电压就会降低，这是由于电池内部有电能的消耗，也即有电阻存在。所以可以采用如图1—10c所示的方法来表示这种实际的直流电源，即用一个电阻与理想电压源的组合来表示。这个电阻常称为电源的内电阻。

这样一来，图1—9所示的实际电路可改给成如图1—11a、b那样的抽象电路。连接导线消耗电能很少，一般可忽略不计，认为它们的电阻为零。 R_0 为干电池的内电阻，而R则表示灯泡。今后我们所说的电路一般均指这种抽象电路。

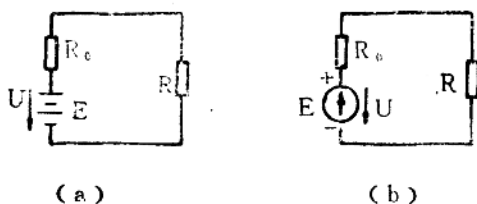


图 1—11 图1—9的抽象电路

电路的又一名称是电网络或网络，通常它们相互通用的。但网络具有“复杂”的意思。

第五节 欧姆定律、电阻和电导

在物理学中曾讲过，欧姆定律表明流过电阻的电流I与电阻两端的电压成正比，如图1—12中，当电压和电流的参考方向选得一致时，（如图1—13a），这个正比关系可写成如下形式：

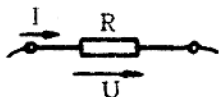


图 1—12 欧姆定律

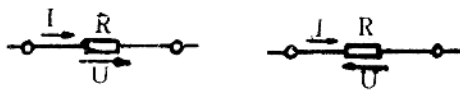


图 1—13 电流、电压参考方向

$$U = RI \quad (1-4)$$

如果电流和电压的参考方向选得相反，如图1—13b所示，则欧姆定律表示式应为

$U = -RI$ 。式(1-4)中比例常数 $R \left(= \frac{U}{I} \right)$ 是连系电阻中电流和电阻两端电压的一个电气参数。“电阻”这个术语以及它相应的符号R，一方面表示消耗电能理想电路元件，另一方面，它亦表示这个元件的参数。

电阻的单位是欧姆(伏/安)，简称欧(Ω)。对大电阻则常用千欧(K Ω)或兆欧(M Ω)为单位。

对于长直金属导体，其电阻 $R = \rho \frac{L}{S}$ ，其中L是导体的长度，S是导体的横截面积， ρ 是导体的电阻率。

电阻的倒数称为电导，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-5)$$

电导的单位是西门子(S)。在实用单位制中有时也用“姆欧”，或写成1/欧姆。

引用于电导后，欧姆定律可以写成

$$I = GU \quad (1-6)$$

如果电阻是一个常数，与通过的电流无关，这样的电阻称为线性电阻。线性电阻上的电压和电流关系是遵守欧姆定律的。如果电阻与通过电流和施于其两端的电压有关，即当电流和电压改变时，电阻的数值也随之而变，这样的电阻称为非线性电阻。很明显，非线性电阻上的电压和电流关系是不遵守欧姆定律的。严格说来，所有电阻器，电灯，电炉等实际电路元件的电阻或多或少都是非线性的，但是，对于金属膜电阻、炭膜电阻、线绕电阻等实际元件，在一定范围内，它们的电阻基本不变，如作为线性电阻来处理，可以得出满足实际需要的结果。

把一系列不同的电压加到电阻两端，就获得流过这个电阻的一系列不同的电流值。如果把电压取为横坐标(或纵坐标)，电流取为纵坐标(或横坐标)，画出电压和电流的关系曲线，这条曲线就称为该电阻的伏安特性。线性电阻两端电压与电阻中的电流成正比，所以它的伏安特性必定是通过原点的一条直线(见图1-14)。而非线性电阻上的电压与电阻中的电流不成正比，它的伏安特性是一条曲线。图1-15给出某二极管的伏安特性。二极管是一个非线性电阻，因而它的伏安特性就不是一条直线。

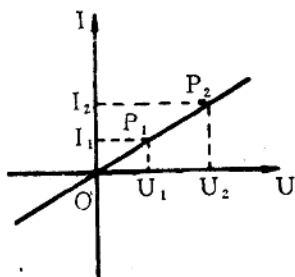


图 1-14 线性电阻的伏安特性

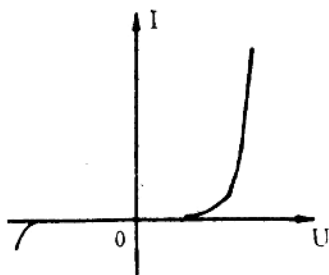


图 1-15 二极管的伏安特性

前面我们介绍了直流电源的表示方法。图1—16的实线部分表示了一个直流电源，图中示出了电压和电流的参考方向。根据电压和路径无关的特性，有

$$U = U_1 + U_2$$

但是

$$U_1 = -R_0 I$$

$$U_2 = E = U_s$$

所以

$$U = -R_0 I + E = -R_0 I + U_s$$

从上式可知，当外部接有电阻R后，电源两端之间（即a、b两点之间）电压U等于电源的电动势E或 U_s 减去内阻 R_0 上的电压。

当不接负载电阻时，电源处于开路状态（图1—17a），电流 $I = 0$ ，所以电源的端电压等于电动势。

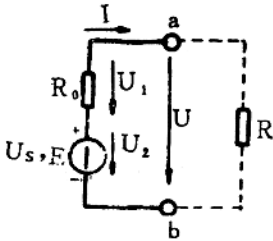
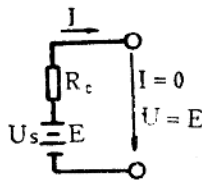
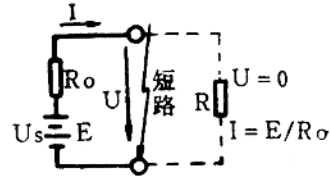


图 1—16 一段有源电路



(a) 开路状态



(b) 短路状态

图 1—17 电源的两种极端工作状态

如果负载短接，电源端电压 $U = 0$ ，而电流 $I = \frac{E}{R_0}$ 是电源的短路电流，电源处于短路状态（见图1—17b）。由于电源内阻一般很小，所以电源的短路电流很大，以致会损坏电源。但是应该指出，“短路”一词，在电路理论中，并非都指电源短路而言，有时为了某种需要，可以将电路中某一段短路。

总结以上所述，对于一段有源电路，当U的参考方向和E、I的方向相反时，三者的关系是：

$$U = E - R_0 I = U_s - R_0 I \quad (1-7)$$

这就是一段有源电路欧姆定律的表示式。

不难看出，在这种情况下，如果E的实际方向与参考方向一致，则U和I的实际方向也将与参考方向一致。当然象这样简单的电路，用参考方向的意义并不太大，我们强调这一点，主要是为了加深这个概念，希望今后逐步养成习惯，用参考方向来写电路的关系式。

如果把图1—16中内阻 R_0 换成其他的电阻R，式(1—7)仍然成立。

第六节 焦耳—楞次定律、功率

工程上常用电功率这一术语。在电工中，电功率简称为功率。电功率是用来衡量每单位时间内电能的大小的。发电站和输电线的主要任务在于发出和输送大量的电功率。

一般的电工设备如电机、电器和电灯等都用电功率来表示它们的容量。因此，电功率和电能的计算也是电路中的一个重要问题。

在图1—18中a点到b点间的电压U，流过的电流为I，根据电压的定义可知，当正电能 $q (= It)$ 在电场作用下，通过R由a点移到b点时，电场所作的功为

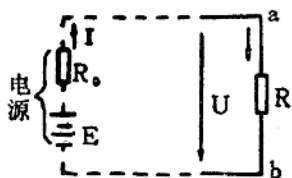


图 1—18 电阻吸收功率

$$A = Uq = UIt \quad (1-8)$$

这个功也就是电阻R在时间t内所吸收的电能。对于电阻来说，吸收的电能将全部转换成热能 W_R ，而以热能的形式表现出来。又因为 $U = RI$ ，所以电阻R中的热能为

$$W_R = UIt = I^2 Rt$$

在国际单位制中，电能、热能这些能量的单位都是焦耳(J)。

应用焦耳和卡之间的换算关系时，则在时间t内电阻R中产生的热量等于

$$Q_R = 0.239 I^2 Rt (\text{卡}) \quad (1-9)$$

这就是焦耳—楞次定律的表达式。

电阻吸收的功率就是在单位时间内电阻吸收的电能。由式(1—8)可知，电阻R吸收的功率为

$$P = UI \quad (1-10)$$

还可以表示为

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-11)$$

可见当电流一定时，电阻所吸收的功率与电阻成正比，当电压一定时，电阻吸收的功率则与电阻成反比。

这里必须注意，式(1—10)中电压U的实际方向和电流I的实际方向是相同的，也就是说，电压U和电流I的实际方向是相同的，U、I的乘积才是电阻所吸收的功率，这是从电压和电流的定义直接获得的结果。

式(1—10)不涉及电阻R，因此可以把它用来计算电源或其他一段有源电路的功率。不过，要注意的是，U和I实际方向相同时， $P = UI$ 是电源或其他一段有源电路吸收的功率；反之，U和I实际方向相反时， $P = UI$ 则是它们发出的功率。如图1—18中，对电源部分来说，U的方向和I的实际方向相反，故电源发出的功率为

$$P = UI = (E - IR_1)I = EI - I^2 R_1 \quad (1-12)$$

注意电动势的方向是指电位升高的方向，电压的方向则指电位降落的方向；式(1—12)中电流I的方向与电动势E的方向相同，因此EI表示电动势发出的功率，而 $I^2 R_1$ 是电源内阻吸收的功率。

以上都是针对电流、电压的实际方向来讨论的；如果采用电流、电压的参考方向，那么将是怎样的情况呢？下面来分析这个问题。