

电工学与电气设备

单克明主编

浙江大学出版社

电 工 学 及 电 气 设 备

单克明 主编

浙江大學出版社

前 言

本教材由浙江水电学校、黄河水利学校及福建水电学校等单位发起，组织7所兄弟学校共同编写的，作为水利类中专（四年制）水工、农水等专业的交流教材。

本教材是以原水利电力部制定的中专水工专业教学大纲为依据，总结了各校任课老师多年来的教学经验的基础上进行编写的。在内容上，力求体现少而精的原则，着重阐述基本原理，同时也注意联系生产实际，及时反映我国的新技术、新产品、新工艺，以体现教材内容的时代性。教材中也注意到技术术语及计量单位的规范化。

参加教材编写的有浙江水电学校单克明、骆眉寿、陈学德；黄河水利学校袁英灿；福建水电学校李鸣殷、杨庶元；云南水电学校何斯厚；湖南水电学校肖金华；郑州水利学校张裕齐；贵州水电学校钟凌。初稿完成后，在杭州召开了审稿会议，认真地进行了审查和修改。

全书由浙江水利水电专科学校项继谋、应明耕、高次奇、应力刚参加主审。最后由骆眉寿完成全书统稿工作，全书的插图工作由浙江水利水电专科学校张千平承担。安徽水电学校强健也参加过审稿会议。我们对他们的辛勤劳动和支持表示衷心感谢。

由于我们业务水平有限，教材编写会存在一些缺点和错误，恳请兄弟学校师生及广大读者批评指正，以便今后修改时更正提高。

编 者

目 录

前 言

第一章 直流电路

第一节	电路的基本概念	1
第二节	欧姆定律、电阻和电导	5
第三节	电功率、电能和电流的热效应	8
第四节	基尔霍夫定律	9
第五节	电阻的串联、并联及直流简单电路的分析计算	13
第六节	支路电流法	17
习题一		19

第二章 电磁与电磁感应

第一节	磁感应强度、磁通量和电磁力	21
第二节	铁磁性物质的磁化	25
第三节	磁路的初步概念	29
第四节	电磁感应	31
第五节	自感	34
第六节	互感、涡流	37
习题二		41

第三章 单相交流电路

第一节	交流电的概念	44
第二节	交流电的基本物理量	44
第三节	正弦交流电的表示方法及加减运算	50
第四节	交流电路的概述	55
第五节	纯电阻电路	56
第六节	纯电感电路	57
第七节	纯电容电路	59
第八节	电阻、电感、电容串联的电路	61

第九节	感性负载与电容器并联的电路	65
习题三		68

第四章 三相交流电路

第一节	三相交流电动势的产生和连接	71
第二节	三相负载的连接方法	75
第三节	三相功率	80
习题四		82

第五章 变压器

第一节	变压器的基本知识	86
第二节	变压器的工作原理	90
第三节	三相电力变压器	94
第四节	变压器的连接组别和并联运行	94
第五节	变压器的选择和维护检修	97
第六节	几种常用变压器	98
习题五		100

第六章 三相异步电动机

第一节	三相异步电动机的基本类型和主要结构	101
第二节	三相旋转磁场	103
第三节	三相异步电动机的工作原理	107
第四节	三相异步电动机的机械特性	110
第五节	三相异步电动机的铭牌数据	113
第六节	三相异步电动机的起动	114
第七节	三相异步电动机的选择	119
习题六		120

第七章 同步发电机

第一节	同步发电机的结构和工作原理	122
第二节	同步发电机的电枢反应	125
第三节	同步发电机的运行特性	129
第四节	同步发电机的并列运行	130
第五节	同步发电机的励磁方式	135

习题七	138
-----------	-----

第八章 高低压电气设备

第一节 电弧的理论	139
第二节 高压断路器	141
第三节 闸刀开关	145
第四节 熔断器	150
第五节 交流接触器	154
第六节 磁力起动器	156
第七节 自动空气开关	158
第八节 控制电路	162
习题八	165

第九章 常用电工仪表和测量

第一节 电工仪表的基本知识	166
第二节 电压和电流的测量	171
第三节 功率的测量	177
第四节 电能的测量	182
第五节 功率因数和频率的测量	185
第六节 绝缘电阻的测量	187
第七节 万用表	189
习题九	192

第十章 水电站的电气主接线、配电装置

第一节 母线、电缆及绝缘子	193
第二节 电气主接线	195
第三节 降压变电所主接线	201
第四节 配电装置概述	202
第五节 室内配电装置	202
第六节 室外配电装置	209
习题十	211

第十一章 继电保护

第一节 继电保护的一般概念	212
---------------------	-----

第二节 常用继电器	213
第三节 主要电气设备的继电保护装置	217
习题十一	222

第十二章 安全用电、接地和防雷

第一节 安全用电知识	223
第二节 接地和接零	225
第三节 防雷	233

第十三章 半导体电子技术基础

第一节 电子技术基础	238
第二节 晶体二极管与整流滤波电路	238
第三节 晶体三极管与放大电路	243
第四节 晶体管正弦波振荡电路	251
第五节 可控硅简介	253
习题十三	256

附录

附录表 I 本书所用主要电工名词、计量单位及符号	258
附录表 II-I 二次接线常用的文字符号	258
附录表 II-II 二次接线常用的图形及文字符号	259
附录表 III 常用低压熔断器及熔体规格	260
附录表 IV 常用低压熔丝规格	261
附录表 V 高压熔断器技术数据	262

第一章 直 流 电 路

电路分直流电路和交流电路。电流、电压、电动势的大小和方向不随时间变化的电路称为直流电路，电流、电压、电动势的大小和方向随时间作周期性变化的电路称为交流电路。直流电路比交流电路简单，认识直流电路又是认识交流电路的基础。因此，我们首先学习直流电路。本章的主要内容是：在物理学的基础上讲述电路的基本物理量（电流强度、电压和电位、电动势、电阻、电功率），阐明电路的基本定律（欧姆定律、基尔霍夫第一、第二定律），介绍直流电路的一般分析方法。

第一节 电路的基本概念

一、电路和电路图

电流通过的路径叫做电路。电路的一种作用是进行电能的生产、传输、分配和交换。电路的另一种作用是电信号的产生、传递和变换。任何电工设备（或电子设备）都是依靠电流的作用而工作的，因此，实际电路就是电工设备（或电子设备）组成的总体。

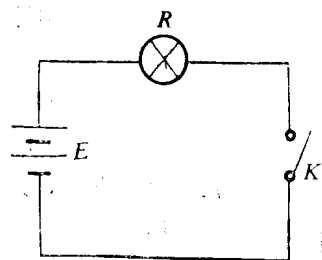
电路由电源（或信号源）、负载、连接导线三个基本部分组成。电源是把其他形式的能转换为电能的装置。如发电机把机械能转换成电能，干电池、蓄电池把化学能转换成电能。负载（又称负荷）是取用电能并将它转换为其他形式的能的装置。如电灯、电炉、电动机，它们分别把电能转换为光能、热能和机械能。导线是用来连接电源和负载以构成电流的通路，它的作用是传输电能（或电信号）。开关是控制电路通断的装置，它闭合时可以看成导线的一部分。图1-1(a)中的手电筒是由二节干电池、一个灯泡和外壳、电键、弹簧组成的最简单电路。为了便于使用电能、了解电路工作情况和保护电气设备，有的电路还附加了各种控制设备、检测装置和保护装置。

由于实际的电路整体往往比较复杂，为了便于分析研究，我们必须把实际电路抽象成一些理想电路元件组合的模型。所谓理想电路元件是指用参数集中的模型突出表示主要电磁特性的元件。例如，把在电路中主要是消耗电能的电阻器

抽象为电阻，用 R 表示；把主要起存储磁场能作用的线圈抽象为电感，用 L 表示；把主要起存储电场能作用的电容器抽象为电容，用 C 表



(a)



(b)

图1-1 手电筒电路图

示。而对于一个电源，则根据它存在电动势和内电阻的特征，把它抽象为 $E-r_0$ 串联的模型表示。图1-2是一些电工书籍上常见的电源模型图。

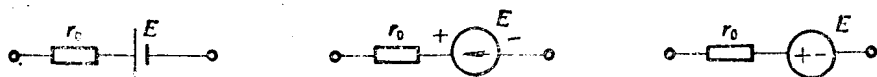


图1-2 电源的常见表示法

在此基础上，我们再用“——”表示无损耗的理想导线，连接各理想电路元件，就构成一个抽象化了的电路模型，这就是我们常说的电路图。图1-1(b)就是手电筒的电路图。

二、电流

自由电荷作定向移动的现象叫做电流。产生电流的内因是物体内部存在着可以自由移动的电荷(自由电子或离子)，外因是有电场作用在物体上，使自由电荷受到电场力的作用。由于导电微粒可能是正电荷，也可能是负电荷，或者两者兼有，习惯上把正电荷定向移动的方向确定为电流的实际方向。金属导体中的电流是自由电子形成的，即电流方向与电子流方向相反。

衡量电流强弱的物理量是电流强度。它在数值上等于单位时间内通过导体某一横截面积 S 的电量代数总和。

对于直流电流，电流强度(用 I 表示)为

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

对于交流电流，我们把时间取得无限短，用 dt 表示，如果在 dt 时间内通过导体截面 S 的电量为 dq ，则电流强度(用 i 表示)为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

在国际单位制中，电流强度的单位是安培，简称安(A)。这时，电量的单位为库仑(C)，时间的单位为秒(s)。实用中，电流强度还用千安(kA)、毫安(mA)、微安(μA)为单位。它们之间的换算关系是

$$1\text{kA} = 1000\text{A}; \quad 1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}; \quad 1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A} = 10^{-3}\text{mA}$$

为了叙述上的方便，人们把电流强度简称为电流。这样，电流一词既指一种物理现象，也表示一个物理量。

三、电位和电压

电场中某点的电位是表示电场在该点具有的能量性质的物理量，它在数值上等于电场力把单位正电荷从该点移动到参考点所做的功。所谓参考点是人为规定的作为比较基准的点，这点的电位被视为零。因此，电位参考点也常称为零电位点。在图1-4所示的电场中，我们

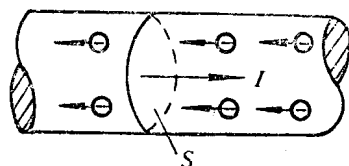


图1-3 电流与电子流

选定 o 点为参考点, 让一个电量为 q 的正电荷在电场力的作用下从 a 点移动到 o 点, 如果做功为 A_{ao} , 则 a 点的电位 (用 V_a 表示) 定义为

$$V_a = \frac{A_{ao}}{q}$$

同理, b 点的电位定义为

$$V_b = \frac{A_{bo}}{q}$$

电路中的电位也引用这样的定义。

电位是相对于参考点说的。参考点可以任意选择。当参考点改变时, 原来被研究的点电位数值也随之改变。这是因为同一个点到不同的参考点电场力移动单位正电荷必须做不同大小的功。但是, 一个电路 (或一个电场) 只能选择一个参考点。一般常选择电路的公共交点、设备的外壳或大地为参考点, 电位参考点一经选定后, 电路 (或电场) 中各点的电位就只有一个数值, 这个结论叫做 “电位的单值性原理”。

电场中任意两点间的电位差称为电压, 用 U 表示。图1-4的电场中, a 点到 b 点的电压为

$$U_{ab} = V_a - V_b$$

这个电压在数值上等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功, 即

$$V_a - V_b = \frac{A_{ao}}{q} - \frac{A_{bo}}{q}$$

$$\because A_{ao} = A_{ab} + A_{bo}$$

$$\therefore U_{ab} = \frac{A_{ab}}{q}$$

在强弱和方向不变的恒定电场中, 任意两点间的电压都有确定的数值, 与参考点的选择无关。图1-4中, 如果电位参考点改选为 c 点, 则因 c 点的电位比原来减少 U_{co} , a 、 b 各点的电位也减少相同的数值, 结果 a 、 b 间的电位差仍保持不变。

由于参考点的电位为零, 电场中某一点的电位就等于该点到参考点的电压。例如 $U_{ao} = V_a - V_o$, 如果 $V_o = 0$, 则 $V_a = U_{ao}$ 。

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)。在实际应用时, 还以千伏 (kV)、毫伏 (mV) 及微伏 (μV) 为单位。它们之间的换算关系为

$$1 \text{ kV} = 1000 \text{ V}; \quad 1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}; \quad 1 \mu \text{V} = 10^{-3} \text{ mV} = 10^{-6} \text{ V}.$$

电压是只有正、负之分而不存在空间方向的标量。可是, 在习惯上人们把高电位减去低电位得到的电位差 (数值为正) 说成是从高电位点指向低电位点的电压。这样, 电压就被赋予了方向, 这个方向就是电位降落的方向。因此, 电压也叫做电位降, 俗称电压降。按照电位降落方向定义的电压方向, 在电工理论中被认为是电压的实际方向, 用虚线箭头 “ $\overrightarrow{U}$ ” 表示。

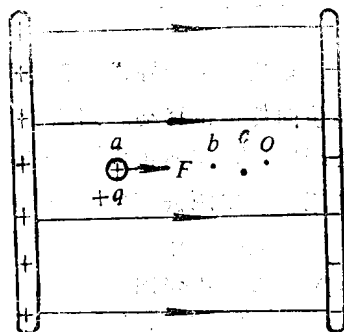


图1-4

四、电动势

从物理学中知道，正电荷在电场力作用下，总是从高电位向低电位移动。如图 1-5 的电路中，正电荷从电源正极 a 经灯泡 c 移向负极 b （实际上是负电荷在反方向移动）。如果没有电源去维持，即使 a 极和 b 极原来聚集着很多正电荷或负电荷，电场力使电荷移动的结果， a 、 b 两极的电荷越来越少，电路内的电场也越来越弱，最终电场消失， a 、 b 两极的电位差为零，电流也就不存在了。

要维持电路内的电流，就必须有一种外力（非电场力）把正电荷不断从负极移到正极。电源的内部就存在这种外力，我们称之为电源力。在电池中，电源力是由电极与电解液的化学反应产生的，而在发电机中，电源力是由电磁的相互作用产生的。在电源力的作用下，电源内部的正电荷从低电位移向高电位，两极又聚集电荷，极板间的电位差和电路中的电流又得以维持。在正电荷从负极向正极移动的过程中，电源力对电荷做了功，并且把其他形式的能转换成电能。为此，我们把电源力移送单位正电荷从负极到正极的过程中所做的功定义为电源的电动势，用 E 表示。

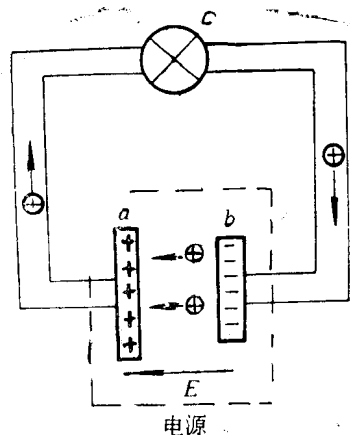


图1-5

$$E = \frac{A_{b \rightarrow a}}{q}$$

式中 $A_{b \rightarrow a}$ 表示电源力移动正电量 q 从 b 到 a 所做的功。

在国际单位制中，电动势的单位也是伏特。

由于电动势在电路中具有电位升高的含义，我们把电动势的实际方向定义为电位升高的方向，即从电源负极指向正极的方向。

五、电流、电压、电动势的参考方向

上面谈到电流、电压及电动势的实际方向。可是，在一个电路中我们常常事先并不知道它们的实际方向，对于交流电，它们的方向还在不断变化。但不管怎样，一条电路中的电流只有两个可能的方向，两点间的电压或未知极性的电源的电动势也只有两个可能的方向。因此，我们引用正、负数表示它们，既表示它们的大小又表示它们的方向。具体的做法是在电路中任意假定电流、电压为正的方向，这样的方向称为参考方向（也称正方向），用实线箭头“ $\rightarrow$ ”表示。相应地，电流、电压的实际方向用虚线箭头“ $\dashrightarrow$ ”表示。规定了参考方向的电流、电压是一个代数量，不是算术量。当电流或电压的参考方向与实际方向相同时，该量为正；当参考方向与实际方向相反时，该量为负。如图1-6所示。

电动势的参考方向也可以任意选择。但是，在习惯上把电源的电动势的参考方向选择得与两极间的电压参考方向相反，以反映电动势是电位升高、电压是电位降落 的含义。如图 1-7。

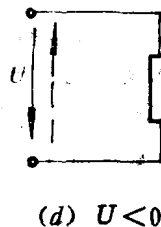
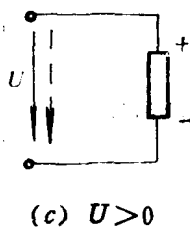
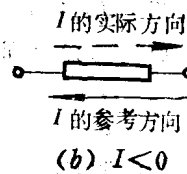
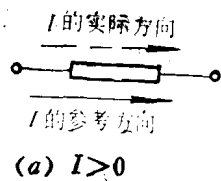


图1-6 电流和电压的参考方向

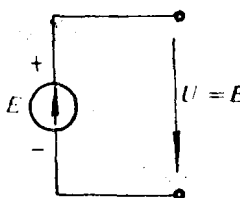
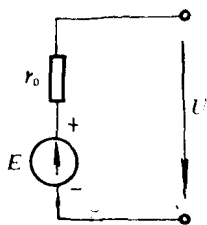


图1-7 电源电动势的参考方向

第二节 欧姆定律、电阻和电导

欧姆定律反映了电路中电流、电压及电阻间的依存关系，是电路的基本定律之一。如图1-8为一段不含电源电动势的电阻电路。在温度不变的条件下，通过电阻电路的电流与这段

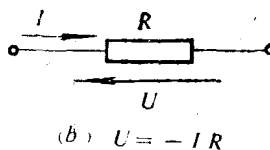
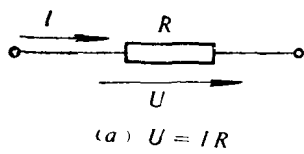


图1-8 欧姆定律的正负号

电路两端的电压成正比，而与这段电路的电阻成反比，这一结论称为部分电路的欧姆定律。

由于电阻上的电流和电压的实际方向一定相同，如果我们把电流和电压的参考方向规定成一致（如图1-8a），则 I 和 U 总是同为正值或同为负值，欧姆定律可以表示为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-3)$$

如果把电流和电压的参考方向规定成相反，则因 I 、 U 的值总是正、负相异，欧姆定律应表示为

$$I = -\frac{U}{R} \quad (1-4)$$

在这里，我们看到了参考方向的规定对于列写电路定律和公式的影响，今后务必注意。习惯上，较常采用 I 、 U 参考方向一致的选择方法。

式(1-3)中，电阻 R 是表示电路对电流阻碍大小的电气参数。它在数值上等于电压和电流的比值。电阻的单位是欧姆（V/A），简称欧（ Ω ）。较大的电阻用千欧（ $k\Omega$ ）或兆欧（ $M\Omega$ ）为单位。

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

电阻的倒数称为电导，用 G 表示。

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

电导的单位为西门子（1/欧姆），简称西（S）。

导体的电阻和它的几何尺寸、材料性质有关。实验证明，在一定的温度下，一段材料和截面都均匀的导体的电阻

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-6)$$

L 是导体的长度（m）， S 是导体的截面积（ mm^2 ）， ρ 是导体材料的电阻率（ $\Omega \cdot mm^2/m$ ）。导体的电阻率是长为1m，截面积为1 mm^2 导体的电阻值。表1-1列举了几种常用材料在20℃时的电阻率。

导体的电阻还与温度有关。实验证明，各种金属的电阻都随温度的升高而增大，石墨、碳及电解液等物质的电阻随温度升高而减小。

表 1-1 几种常见材料的电阻率和电阻温度系数

用 途	材料名称	电阻率 ρ [20℃] ($\Omega \cdot mm^2/m$)	平均电阻温度系数 α [0~100℃](1/℃)
导电材料	碳	10.0	-0.0005
	银	0.0165	0.0036
	铜	0.0175	0.004
	铝	0.0283	0.004
	低碳钢	0.13	0.006
电阻材料	锰 铜	0.42	0.000005
	康 铜	0.44	0.000005
	镍铬铁	1.0	0.00013
	铝铬铁	1.2	0.00008
	铂	0.106	0.00389

• 表1-1给出的是近似值。这些数值随着材料纯度和成分的不同面有所变化。

表中碳的电阻温度系数需有负号，表示碳的电阻值随着温度的升高而降低。

为了计算导电材料在不同温度下的电阻值，我们把温度每升高 1°C 时，导体电阻的增加值与原来电阻值的比值，称为电阻的温度系数，用 α 表示。如果导体温度为 t_1 时的电阻为 R_1 ，温度升高到 t_2 时的电阻为 R_2 ，则导体在 $t_1 \sim t_2$ 之间的平均温度系数为

$$\alpha = \frac{(R_2 - R_1) / (t_2 - t_1)}{R_1} \quad (1-7)$$

电阻温度系数的单位为 $1/^{\circ}\text{C}$ 。

电阻温度系数的意义是每升温 1°C 时导体电阻增大的百分数。例如，铜的 $\alpha = 0.004 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ 表示铜导体在温度升高 1°C 时电阻的增加值是原来电阻的 0.4% 。表1-1中列出几种常见材料在 $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 范围内的平均电阻温度系数。

由式 (1-7) 可以推得

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1-8)$$

应用这个式子可以计算出导体在温度变化后的电阻。

例1-1 在环境温度为 20°C 时测得某台电机运行前绕组（漆包铜线）的电阻为 0.38Ω ，运行一段时间后，绕组的电阻为 0.48Ω 。试求这时电机绕组的温度。

解 由式 (1-8) 得

$$t_2 = \frac{R_2 - R_1}{\alpha R_1} + t_1$$

已知 $R_1 = 0.38 \Omega$ ， $R_2 = 0.48 \Omega$ ， $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$ 。查表1-1得铜的 $\alpha = 0.004 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ ，代入上式得

$$t_2 = \frac{0.48 - 0.38}{0.004 \times 0.38} + 20 = 85.8^{\circ}\text{C}$$

多数金属导体在温度不变时，电阻值 R 是一个常数，它的电压和电流之间的关系（即伏安特性）是直线关系。这类电阻称为线性电阻。还有一类电阻的阻值会随电流或电压的变化而变化，其电压和电流的关系不是直线关系。这类电阻称为非线性电阻。例如晶体管就是非线性电阻元件。非线性电阻的阻值不是固定不变的数值，不能应用欧姆定律求解电压或电流，一般采用图解法分析。今后不加说明时，电阻均指线性电阻而言。

前面我们介绍过直流电源的 $E - r_0$ 串联模型。现在我们用 U_1 表示内电阻压降，用 U_2 表示电动势两端的电位降落，用 U 表示电源两端（即 a 、 b 之间）的电压，则按图 1-9 中标出的电压参考方向有

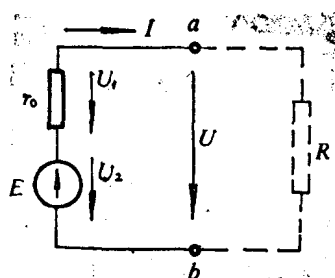


图1-9 一段有源电路

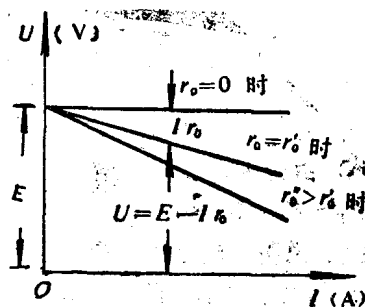


图1-10 电源的外特性曲线

$$U = U_1 + U_2$$

其中 $U_1 = -Ir_0$

$$U_2 = E$$

$$\therefore U = E - Ir_0$$

(1-9)

上式表明，电源的端电压 U 等于电动势 E 减去内阻压降 Ir_0 。这就是一段有源电路的欧姆定律。它反映当 U 的参考方向与 E 、 I 的参考方向相反时，三个量之间的关系是：电源的端电压随着输出电流的增大而降低。这就是直流电源的外特性或伏安特性。这种特性在 $U-I$ 坐标图中表现为一条向 I 轴倾斜的直线。如图1-10所示。

由式 (1-9) 知道，当电源不接负载（称为电源开路状态或空载状态）时，电流 $I=0$ ， $U=E$ ，即电源的开路电压等于电动势。这个结论常被用来测量电源的电动势。

当负载电阻 $R=0$ ，电源处于短路状态，电源的端电压 $U=0$ ，而 $I=\frac{E}{r_0}$ 称为短路电流。电源的内阻一般很小，短路电流很大，会损坏电源或线路。因此，线路要串联熔丝。一旦发生短路，电流上升到熔丝的熔断电流时，熔丝熔断，电源就从短路状态变为开路状态，从而得到了保护。

第三节 电功率、电能和电流的热效应

电路中，电源在生产电能，负载在接受电能并转换为其他形式的能。它们在单位时间内产生或接受的电能叫做电功率，简称功率，用符号 P 表示。

一个负载两端加上电压 U 以后，电场力把正电荷从高电位移向低电位，如果移动电量为 q 时电场力做功 $A=qU$ ，则负载接受的功率 P 为 $\frac{A}{t} = \frac{qU}{t} = UI$ ，即

$$P = UI$$

(1-10)

如果负载只具有电阻，其功率计算式可以写为

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

(1-11)

一个电源，当它与负载连成闭合电路后，电源力把电量为 q 的正电荷从负极移向正极时做功为 qE 。那么，电源产生的功 P_E 为 $\frac{qE}{t} = IE$ 。即

$$P_E = EI$$

(1-12)

在图1-11中，电源的端电压 $U = E - Ir_0$ ，那么， $E = U + Ir_0$ ，由些可得

$$P_E = EI = UI + I^2 r_0$$

这个式子说明，电源产生的功率等于电源输出的功率 (UI) 与内阻上消耗的功率 ($I^2 r_0$) 之和。把这个结论推广到具有多个电源作用的电路，应叙述为：一个电路中所有电源产生的功率总和等于所有负载

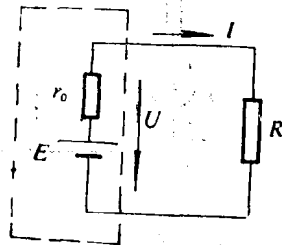


图1-11

(包括内阻)接受的功率总和。这叫做电路的功率平衡。

在国际单位制中,功率的单位为瓦特(J/s),简称瓦(W)。较大的功率常用千瓦(kW)或兆瓦(MW)为单位。

$$1 \text{ MW} = 10^3 \text{ kW} = 10^6 \text{ W}$$

在直流电路中,电动势、电流、电压是恒定不变的,功率也是恒定的。因此,负载接受的电能或电源产生的电能分别等于负载功率或电动势功率与时间 t 的乘积。即

$$W = Pt = UIt \quad (1-13)$$

$$W_E = P_E t = EIt \quad (1-14)$$

在国际单位制中,电能的单位为焦耳(J)。实用中,功率的单位用千瓦(kW),时间单位用小时(h),所得到的电能单位为千瓦·时(俗称度),用符号kWh表示。

$$1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

从用电实践中我们知道,电流通过导体会逐渐发热,这种现象叫做电流的热效应。

产生电流热效应的原因是,电流通过导体时,定向移动的自由电子不断地与无规则运动的正离子碰撞,把它们在电场力作用下获得的动能传递给这些离子,加速了的热运动,使导体的温度升高。所以,电阻在电路中总是接受电能并转换为热能。

在国际单位制中,如果电流 I 通过电阻 R ,在 t 时间内电阻接受的电能全部转换为热能,则所产生的热量为

$$Q = I^2 R t \text{ J} \quad (1-15)$$

式中 I 、 R 、 t 的单位分别为A、 Ω 、S, Q 的单位为J。

如果用卡做热量单位, $1 \text{ J} = 0.24 \text{ 卡}$, 则上式改写为

$$Q = 0.24 I^2 R t \text{ 卡}$$

这个关系式叫做焦耳—楞次定律。

任何电工设备都是由导体和绝缘体组成的,它们的功率都不可能无限的。这是因为:电流要受到绝缘材料允许的温升限制,而电压要受绝缘材料的耐压限制。电流过大将使绝缘材料老化,甚至因过热而烧毁。电压太高可能击穿绝缘材料。因此,为了使电工设备能经济合理、安全可靠地工作,并保证一定的使用寿命,制造厂对各种电工设备规定了电压限额、电流限额和功率限额。使用时必须首先了解这些额定值。设备在额定值工作时,称为满载。超过额定值工作,称为过载。一般短时间少量过载还是允许的,但严重过载,将损坏设备。低于额定值很多的情况下工作,称为轻载,此时虽然安全,但不能充分发挥设备的作用。

第四节 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律包括第一、第二定律。它们反映了电路中各有关电流之间或各有关电压之间的客观存在的关系,是我们分析计算电路的基本定律。

在学习基尔霍夫定律之前,我们先了解电路中几个常用名词。

支路 电路按结构可以分为无分支电路(单一的闭合电路)和有分支电路。图1-12所示

的电路就是一个有分支电路。在这个电路中的每一个分支叫做支路。如图中 af 、 be 、 cd 都是支路。它们中的每一支路，除了两个端点之外，再没有其它的点与别的支路相连接。换句话说，一条支路只有一个电流。

节点 凡是由三条或三条以上的支路汇交成的点称为节点。如图1-12中的 b 、 e 两点就是节点。

回路 电路中任何一个由支路构成的闭合路径叫做回路。如图1-12中有 $abcdefa$ 、 $bcdeb$ 及 $abefa$ 三个回路。

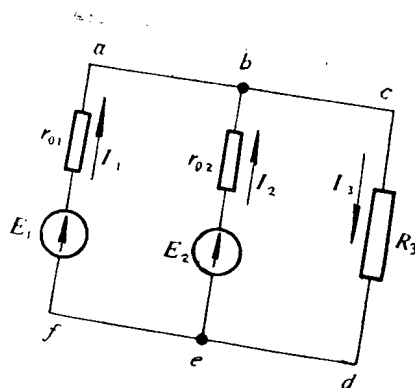


图1-12

一、基尔霍夫第一定律

经过大量的实验观察，人们发现：在电路中，流入任意一个节点的电流必定等于流出该节点的电流。这个结论称为基尔霍夫第一定律。例如，按图1-12中标出的各支路电流方向，对于节点 b 来说， I_1 、 I_2 是流入节点的电流，而 I_3 是流出节点的电流，那么必定存在

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1-16)$$

基尔霍夫第一定律成立的根据是，电路中任何一个节点的电荷不会产生或消灭，也不可能积累。即流入一个节点的电荷量一定等于同时间流出节点的电荷量。这样才能保持电流的连续。否则，电路中一些地方发生电荷堆积，另一些地方又发生电荷的缺乏使电流中断，这是违背客观事实的。

式 (1-16) 可以改写为

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

这个式子说明，如果在流入节点的电流前面取正号，在流出节点的电流前面取负号，基尔霍夫第一定律可以叙述为：流过电路中任意一个节点的电流的代数和恒等于零。用公式表示为

$$\sum I = 0 \quad (1-17)$$

式中 $\sum$ 是“和”的意思，而 $\sum I$ 表示各电流代数值的代数和。当支路电流都按实际方向给定时，各电流 I 本身都是正值，其前面的正负号由电流是指向或是背离节点来决定。当各支路电流是按参考方向给定时，各电流 I 本身是代数量，其值的正负由电流的实际方向与参考方向是否一致决定，而每个电流 I 前面的正负号由电流的参考方向是指向或背离节点来确定。

基尔霍夫第一定律是关于一个节点的有关支路的电流关系的定律，因此常被称为节点电流定律。 $\sum I = 0$ 称为节点电流方程。

例1-2 如图1-13(a)中 O 点是由五条支路汇交的节点，各电流的参考方向如图所示，已知 $I_1 = 3\text{ A}$ ， $I_2 = -5\text{ A}$ ， $I_3 = 4\text{ A}$ ， $I_4 = -8\text{ A}$ ，求 $I_5 = ?$

解 根据基尔霍夫第一定律，对于节点 O

$$\sum I = 0$$

$$\text{得} \quad I_1 + I_2 - I_3 + I_4 - I_5 = 0$$

10