

经济管理院校试用教材

电工电力概论

全国经济管理院校
工业技术学研究会 编
上海科学技术出版社

经济管理院校试用教材

电工电力概论

全国经济管理院校
工业技术学研究会 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 11.25 字数 265,000

1985年6月第1版 1985年6月第1次印刷

印数: 1-18,300

统一书号: 15119·2406 定价: 2.10 元

前 言

经中央有关领导部门批准成立的全国经济管理院校工业技术学研究会,是经济管理院校从事工业技术学教学和科研工作者的全国性学术组织,其任务是统一组织从事工业技术学教学、科研工作者交流,研究该学科在教学和科研方面的经验和成果,推动学科的发展,促进课程的建设与改革。

经济管理院校开设工业技术学课程的专业很多,包括:工业经济,工业企业管理,管理工程,物质管理,基本建设经济,国民经济计划,工业统计,工业会计,财政、金融,物价,劳动经济,政治经济等。根据经济类专业的要求,工业技术学课程在课程设置、内容选择及教学法等各方面与工科专业有明显不同的特点,在总体上它要反映工业生产的一般或典型的规律,具体则要反映各有关工业部门生产技术的基本规律,包括:部门特点,生产过程及其组织,工艺方法、原理及其选择等。选材上特别强调要从组织、管理者的角度突出组织和经济分析的研究和论述,内容上既要有适合经济工作者需要的广度,又要求具有管理工作者的要求的一定深度。

尽管经济类各专业的教学计划在工业技术学课程设置的门数上有所不同,而在开设同一课程的学时分配上仍较接近。但从全国经济管理院校来说,至今尚缺乏一套适合于经济管理专业要求的统一教材,为了适应当前各类经济管理院校以及其他各种形式在职经济管理人员学习本课程的需要,一九八三年一月于江西南昌召开了全国经济管理院校工业技术学教材编写会议,统一研究并组织了四本教材即《机械制造概论》、《钢铁生产概论》、《电工电力概论》、《电子技术概论》的编写工作,并于同年五月至八月分别于南京、大连、成都和长春集中讨论制订了各课统一大纲,并确定各书的编写分工。

参加《电工电力概论》编写的有:吉林工业大学苑学今、贵州财经学院杨世伟、内蒙古财经学院聂茂林、北京经济学院郑嘉信、中国人民大学杨域疆、江西财经学院吴国瑞、傅佑之、南京大学邹一峰、四川财经学院刘承浩、余友、上海财经学院萧士祥。

本书由四川财经学院刘承浩担任主编,上海财经学院萧士祥担任副主编。

郑州航空专科学校贺水净参加了本书初稿的讨论。

由于我们水平有限,经验不足,错误及不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

全国经济管理院校

工业技术学研究会

一九八四年十一月

目 录

前 言

第一章 电路的基本概念和基本定律1

1-1 电荷和电场1

1-2 电路的基本概念2

1-3 电路的基本定律3

1-4 电阻的串并联5

1-5 电功和电功率7

习题7

第二章 直流电路的分析方法9

2-1 支路电流法9

2-2 回路电流法11

2-3 节点电压法12

2-4 迭加原理13

2-5 电压源、电流源及其等效变换15

2-6 戴维南定理20

习题22

第三章 电磁现象和电磁基本定律24

3-1 磁的基本概念24

3-2 电流的磁效应26

3-3 磁场对载流导体的作用力27

3-4 电磁感应28

3-5 磁性材料32

习题35

第四章 交流电路38

4-1 交流电38

4-2 纯电阻电路41

4-3 纯电感电路43

4-4 纯电容电路45

4-5 RLO 串联电路47

4-6 LC 并联电路51

4-7 三相交流电路56

4-8 正弦量的复数表示法62

习题64

第五章 变压器66

5-1 变压器的构造66

5-2	变压器的基本原理	67
5-3	变压器的主要型式	70
5-4	变压器的额定值和变压器的发展方向	73
	习题	74
第六章	三相异步电动机	75
6-1	三相异步电动机的基本结构	75
6-2	三相异步电动机的基本原理	77
6-3	三相异步电动机的转矩特性	81
6-4	三相异步电动机的工作特性	83
6-5	三相异步电动机的效率	89
6-6	三相异步电动机的铭牌及应用	89
	习题	92
第七章	同步电机	94
7-1	同步电机的基本结构	94
7-2	同步发电机的原理和特性	95
7-3	同步发电机的损耗和冷却	96
7-4	同步发电机的并网	97
7-5	同步电动机	98
7-6	国产同步电机简介	100
	习题	101
第八章	直流电机	102
8-1	直流电机的结构和分类	102
8-2	直流发电机原理	104
8-3	直流电机的电枢反应	106
8-4	直流发电机的运行特性	106
8-5	直流电动机原理	108
8-6	直流电动机的机械特性	109
8-7	直流电动机转速的调节	110
8-8	直流电动机的起动和反转	111
8-9	直流电机的铭牌	113
	习题	113
第九章	发电厂	115
9-1	火力发电厂的分类	115
9-2	火力发电厂的组成	116
9-3	火力发电厂的生产部门	118
9-4	火力发电厂的热力设备	119
9-5	火力发电厂的附属设备	123
9-6	火力发电厂的技术经济	126
9-7	水力发电厂	127
9-8	水工建筑	132
9-9	原子能发电厂	135
9-10	发电厂的技术经济	136

习题.....	137
第十章 电力系统及其经济特性.....	138
10-1 概述.....	138
10-2 电力系统的特点和要求.....	139
10-3 电力系统的优越性.....	140
10-4 电能的质量指标.....	141
10-5 电力的输送与分配.....	143
10-6 电力系统的负荷.....	149
10-7 电力系统的经济运行.....	150
习题.....	154
第十一章 工厂供电.....	155
11-1 工厂供电概况.....	155
11-2 工厂供电的安全运行.....	156
11-3 工厂用电设备计算负荷的确定.....	162
11-4 电价.....	164
习题.....	167
附录 二部制电价计算方法.....	168

第一章 电路的基本概念和基本定律

1-1 电荷和电场

1. 电荷 实验说明,用丝绸摩擦过的玻璃棒或用毛皮摩擦过的硬橡胶棒具有吸引轻小物体的能力,通常说它们带有了电荷。

在组成物质的各种原子之中,质子带正电荷,电子带负电荷。通常情况下,它们所带异种电荷的数量相等而互相抵消,所以整个物体呈中性。若由于某种原因,使物体失去部分电子,则物体将带正电荷;反之,则带负电荷。

电荷量(简称电量)是一衡量物体带电多少的物理量,其单位是库仑(C)。1C相当于 6.24×10^{18} 个电子所带的电量。

2. 电场和电场强度 带有电荷的物体称为带电体。带电体周围存在电场。电场有两种表现形式:一是处于电场中的带电体要受到力的作用,同种电荷间存在着斥力,而异种电荷间存在着引力,这称为电场力;二是在电场力的作用下,带电体在电场中要移动,这表明电场力在作功,进而说明电场具有能量。因此,电场是物质存在的特殊形式。

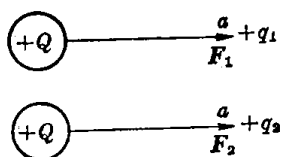


图 1-1

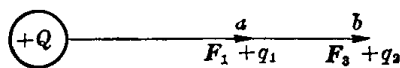


图 1-2

下面我们分别做二次实验。第一次实验如图 1-1 所示,在正电荷 Q 附近取某固定点 a ,先后放置带不同电量的电荷 $+q_1$ 和 $+q_2$,则它们所受到的斥力将分别是 F_1 和 F_2 。尽管 F_1 和 F_2 的大小不相等,但比值 F_1/q_1 和 F_2/q_2 却相等,即等于某固定常数,我们把 F_1/q_1 或 F_2/q_2 叫 a 点的电场强度,用字母 E_a 表示,则 $E_a = F_1/q_1 = F_2/q_2$ 。可见,电场中某点处的电场强度和放在该点的实验电荷无关,只和该点在电场中的位置有关。另一次实验如图 1-2 所示,若将上次实验中的 $+q_1$ 移到电场中的 b 点,并测得其受力是 F_3 ,则 $F_1/q_1 \neq F_3/q_1$,而 b 点处的电场强度记作 $E_b = F_3/q_1$,这说明在同一电场中不同点的电场强度也不相同。应该指出,相距点电荷相同距离的圆周上各点的电场强度数值虽相等,但它们的方向不相同。因此,电场强度是有方向的矢量。

3. 电位、电压和电动势 可以证明,电场对电荷所作的功,与电荷所移动的路径无关,这种力场叫做位场,可以引进位能概念。电位能简称电位(或电势)是一个重要的物理量,它和电场强度一样是为描述电场分布而引入的,电场强度是矢量,而电位是标量,它们之间起到相互补充的作用。

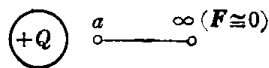


图 1-3

如图 1-3 所示,假定在正电荷 Q 形成的电场中,一正电荷 q 在

斥力作用下由 a 点移到无穷远处(所谓无穷远则在该处所受的斥力趋近于零)电场力所作的功

$$W_{a\infty} = \int_a^{\infty} F dl = \int_a^{\infty} qE dl = q \int_a^{\infty} E dl$$

则

$$W_{a\infty}/q = \int_a^{\infty} E dl \quad (1-1)$$

式中, $W_{a\infty}/q$ 是指单位正电荷由 a 点移至无穷远处电场力所作的功, 在量值上与 a 点的电位相等, 用符号 φ_a 表示。如果该正电荷 q 在斥力作用下移动, 则电场力做功, 电势能减少。当 q 从电场中的 a 点移动到 b 点时, 电场力所作的功应该等于该区间电位能的减少量, 即

$$\begin{aligned} W_{ab} &= W_{a\infty} - W_{b\infty} = \int_a^{\infty} qE dl - \int_b^{\infty} qE dl \\ &= q \left(\int_a^{\infty} E dl - \int_b^{\infty} E dl \right) = q(\varphi_a - \varphi_b) \end{aligned}$$

即

$$W_{ab}/q = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-2)$$

在式(1-2)中, 左边 W_{ab}/q 是单位正电荷从 a 点移到 b 点时电场力所作的功, 在量值上等于 ab 两点间的电压, 用字母 U_{ab} 表示, 而式中的右端 $\varphi_a - \varphi_b$ 是 a 和 b 两点间的电位差。因此, 电场中两点间的电压, 用字母 U_{ab} 表示, 而式中的右端 $\varphi_a - \varphi_b$ 是 a 和 b 两点间的电位差。因此, 电场中两点间的电压, 在数值上就等于这两点间的电位差。电压的方向规定为由高电位指向低电位。而在实际电路中, 电压的真实方向很难预先确定。为了解决这一问题, 我们可以任意选定一参考方向, 该参考方向在元件或电路两端用“+”“-”符号表示。“+”号表示高电位, “-”表示低电位, 如图 1-4 所示。当算出的电压为正值时, 表示电压的真实方向和参考方向相同; 当算出的电压为负值时, 表示电压的真实方向和参考方向相反。

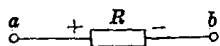


图 1-4

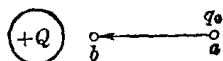


图 1-5

可以说任何带电现象是异种电荷分离的结果, 在分离异种电荷时, 外力要克服它们之间的引力而做功, 在此要消耗外界能量。如图 1-5 所示, 在正电荷 Q 形成的电场中, 若将单位正电荷 q_0 由 a 点移向 b 点, 外界克服同种电荷间的斥力所作的功称为 ab 两点间的电动势, 即 $E_{ab} = W_{ab}/q_0$ 。电动势的方向规定为反抗电场力推动正电荷移动的方向。也就是说, 在电动势方向上, 电位总是升高的。

1-2 电路的基本概念

1. 电路的组成 日常用的手电筒电路就是一个最基本的电路, 它由电池、灯泡和连接导体组成。电池是将化学能转换成电势能的电源; 灯泡由电阻丝制成, 电流流过使其炽热而发光, 这类用电器称为负载; 连接电源与用电器的导体使电流构成通路。总之, 电源、负载、连接导体是组成电路的三个基本要素。

2. 电流 电荷有秩序的移动称为电流。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。为了衡量电流的大小, 把单位时间内通过导体截面的电量定义为电流强度, 即

$$i = dq/dt \quad (1-3)$$

大小和方向不随时间变化的电流叫直流。大小或方向随时间变化的电流称为交流。

前面提到正电荷运动的方向就是电流的方向,但在实际电路中,电流的真实方向在电路图中很难确定。为此,我们也可以任意选定一个参考方向,在电路图中用箭头表示。当依此参考方向算出的电流为正值时,则真实方向和参考方向一致。当算出的电流为负值时,则说明电流的真实方向和参考方向相反。

电流的单位是安培,用符号 A 表示。在 1 秒钟内通过导体截面的电量为 1 库仑的电流强度即为 1 安培,较小的单位有毫安(mA)或微安(μ A), $1\text{ A} = 10^3\text{ mA} = 10^6\text{ }\mu\text{A}$ 。

3. 电阻和导电材料 衡量阻碍电流流动的本领大小的物理量称为电阻,通常用字母 R 表示。电阻的单位为欧姆,用字母 Ω 表示,也可以用千欧(k Ω)或兆欧(M Ω)。

实验得出:导体电阻的大小和长度成正比,和横截面积成反比,并和导电材料的性质有关系,电阻的计算公式是

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-4)$$

式中 ρ 叫电阻系数,是个反映电阻和导电材料之间关系的物理量,通常指 20°C 时,长 1 米而截面积为 1 平方毫米导线的电阻值,单位为欧·毫米²/米。材料的电阻系数越小,说明其导电性能越好。

各种材料根据它们的导电性能不同,可分为导体、绝缘体和半导体三大类。在导体中,原子核对外层电子的束缚力很小,因而含有大量自由电子,在外电场力的作用下,容易移动而形成电流。导体的电阻系数小,约为 $10^{-2} \sim 10^1$ 欧·毫米²/米。在绝缘体中,原子核对外层电子束缚很紧,自由电子较少,因此其导电性能很差,电阻系数很大,约为 $10^{12} \sim 10^{24}$ 欧·毫米²/米。半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间,常见的半导体材料有硅、锗等等,它们的电阻系数约为 $10^1 \sim 10^{12}$ 欧·毫米²/米。

1-3 电路的基本定律

1. 欧姆定律 欧姆定律是

$$U = RI \quad (1-5)$$

式中, R 是电阻; I 是电流; U 为该电阻两端之电压,单位是伏特(V)。该定律反映了电阻元件的特性,电流流过电阻,沿电流的方向就有电压降,该电压降等于电阻和电流的乘积。

2. 基尔霍夫定律 电路中,三条或三条以上导线的汇合点叫节点,连接两个节点的部分电路叫支路,电路中的任一闭合路径叫回路,如在图 1-6 中, b 、 d 是节点, bad 、 bd 、 bcd 是支路, $abcd$ 、 $abdb$ 、 bcd 是回路。

基尔霍夫第一定律指出:任一时刻,流入一个节点的电流之总和应等于从这个节点流出的电流之总和,如图 1-6 所示电路中,对于节点 b 可写出:

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1-6)$$

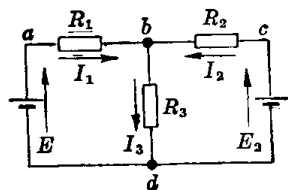


图 1-6

第一定律是电流连续性这一公理的推理。该定律可以换一种说法,即在任意一个节点处,电流的代数和恒等于零。这里规定流入的电流为正,而流出的电流为负,式(1-6)又可以写成:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

第一定律的一般形式是:

$$\sum I = 0 \quad (1-7)$$

基尔霍夫第二定律指出:任一时刻,电路中沿闭合回路各段电压的代数和恒等于零,如图 1-7 所示的闭合回路中,取从 a 点出发按顺时针绕行一周再回到 a 点的回路,则有:

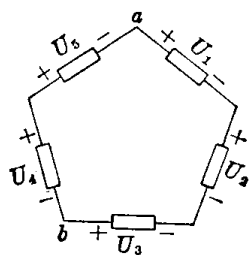


图 1-7

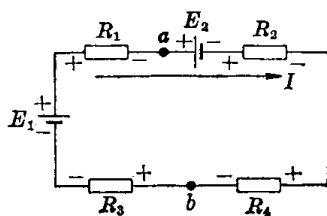


图 1-8

$$U_1 + U_2 + U_3 - U_4 - U_5 = 0$$

式中的负号是指电压的参考方向和绕行方向相反。这个定律的一般形式是:

$$\sum U = 0 \quad (1-8)$$

[例题 1-1] 电路如图 1-8 所示,已知: $E_1 = 12 \text{ V}$, $E_2 = 6 \text{ V}$, $R_1 = 0.2 \Omega$, $R_2 = 0.1 \Omega$, $R_3 = 1.4 \Omega$, $R_4 = 2.3 \Omega$ 。求电流 I 和 U_{ab} 。

[解] 设电流的参考方向如图所示,标出各电阻上电压的参考方向。回路的绕行方向选取从 a 点出发按顺时针方向绕行一周,则电压定律的方程是:

$$-E_1 + R_1 I + E_2 + R_2 I + R_3 I + R_4 I = 0$$

即

$$I(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) = E_1 - E_2$$

有

$$I = (E_1 - E_2) / (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$$

代入数据后可得:

$$I = 12 - 6 / 0.2 + 0.1 + 1.4 + 2.3 = 1.5 \text{ A}$$

计算的结果电流是正值,说明电流的实际方向和参考方向一致。由此可算出端电压

$$U_{ab} = E_2 + R_2 I + R_4 I = 6 + 1.5(0.1 + 2.3) = 9.6 \text{ V}$$

3. 全电路欧姆定律 前面我们讲的欧姆定律是指一段电阻上电流和电压的关系,下面

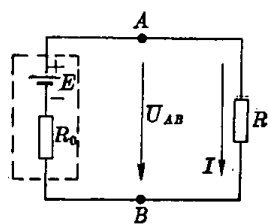


图 1-9

将讨论整个闭合电路中二者的关系。如图 1-9 所示,虚线框内代表电源, R_0 代表电源内阻。电路接通后就有电流流过,该电流在 R 上的压降是 $U_{AB} = RI$,由基尔霍夫第二定律,选取顺时针方向为回路绕行方向,列出方程:

$$U_{AB} + IR_0 - E = 0$$

即

$$IR + IR_0 - E = 0$$

$$I = E / (R + R_0) \quad (1-9)$$

这就是说,在闭合电路中,电流和电源的电动势成正比,和电源的内阻与外电阻之和成反比,这一结论叫全电路的欧姆定律。

当外电路断开时,即 $I = 0$,此时按基尔霍夫第二定律方程有:

$$U_{AB} - E = 0$$

即

$$U_{AB} = E \quad (1-10)$$

由此可以得出一个重要结论:外电路断开时,电源两端的开路电压就等于电源的电动势。

1-4 电阻的串并联

1. 电阻的串联 将几个电阻首尾相接的连接方式叫串联, 如图 1-10 所示, R_1 和 R_2 就是串联的。串联电路的特点是流过各电阻的电流相同。由基尔霍夫第二定律列方程可得:

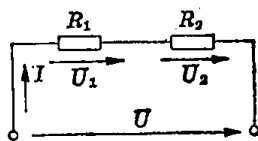


图 1-10

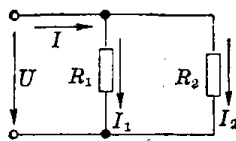


图 1-11

即

$$U_1 + U_2 - U = 0$$

$$U = U_1 + U_2 \quad (1-11)$$

又由欧姆定律可知:

$$U_1 = IR_1 \quad U_2 = IR_2$$

则

$$U = I(R_1 + R_2)$$

电路总电阻

$$R = \frac{U}{I} = R_1 + R_2 \quad (1-12)$$

代入各段电压公式得出:

$$\left. \begin{aligned} \text{第一电阻 } R_1 \text{ 上的电压 } U_1 &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \\ \text{第二电阻 } R_2 \text{ 上的电压 } U_2 &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

式(1-13)称为分压公式, 由该式可得:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

综上所述, 可以总结出电阻串联电路的几个特点:

- ① 总电阻等于各串联电阻之和;
- ② 总电压等于各段电压之和;
- ③ 串联电阻上电压的分配和电阻大小成正比, 电阻越大, 分得的电压也越大。

2. 电阻的并联 几个电阻的两端分别连接在同一点上的连接方式称为并联, 如图 1-11 所示, R_1 和 R_2 即并联的。并联电路的特点是各电阻两端电压相等。根据基尔霍夫第一定律可得:

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

由此可得:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1-14)$$

式(1-14)说明: 并联电路总电阻的倒数等于各并联支路电阻的倒数和。整理式(1-14)得:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

下面再分别求出流经 R_1 和 R_2 的电流:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1} = \frac{I \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}{R_1} = I \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\ I_2 &= \frac{U}{R_2} = I \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

式(1-15)称为分流公式。

3. 电路中各点电位的计算 由图 1-12 不难算出下列各段电压

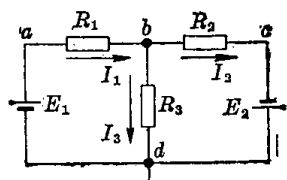


图 1-12

$$U_{ab} = R_1 I_1$$

$$U_{ad} = E_1$$

$$U_{ac} = R_1 I_1 + R_2 I_2$$

$$U_{bd} = R_3 I_3$$

$$U_{cd} = -E_2$$

在电路中可任选一参考点, 则某点到参考点之间的电压降就叫那一点的电位。如在图 1-12 所示的电路中, 选取接地的 d 点为参考点, 故其电位 $U_d = 0$, 于是相对于 d 点,

a 点的电位

$$U_a = U_{ad} = E_1$$

b 点的电位

$$U_b = U_{bd} = R_3 I_3$$

c 点的电位

$$U_c = U_{cd} = -E_2$$

可见, 电位虽然是指电路中一点而言, 本质上还是两点间的电压, 不过第二点是约定的参考点, 而参考点的电位往往假定为零。例如, 在上面几个电位表达式中, 我们选 d 点的电位是零。因此, 参考点又叫“零电位点”。参考点选定后, 其他各点也都具有固定的电位了。比如 a 点的电位是 U_a , 即 a 点的电位比 d 点高 E_1 。 c 点的电位是 $-E_2$, 意思是 c 点的电位比 d 点低 E_2 。最后着重指出: 参考点是可以任意选取的。但一经选定后, 各点电位的计算都必须以该点为基准, 如参考点变了, 则各点电位也随之而变。

在电子电路中, 一般将电源、信号输入和输出端的公共端子接在一起作为参考点, 因此, 电子线路的通常画法是用电位符号表示电源, 而改为标出其电位的数值和极性, 如图 1-13 可改画成图 1-14。

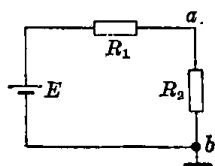


图 1-13

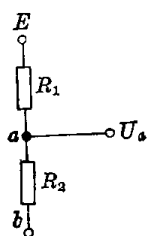


图 1-14

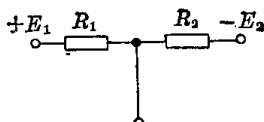


图 1-15

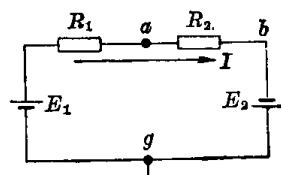


图 1-16

[例题 1-2] 在图 1-15 所示电路中, 已知 $E_1 = 12\text{ V}$, $E_2 = 10\text{ V}$, $R_1 = R_2 = 1\text{ k}\Omega$, 求 U_a 、 U_b 和 U_{ab} 。

[解] 将图 1-15 改画成图 1-16, 其中 g 点是参考点。显然, 这是个单回路。设电流的参考方向如箭头所示, 且以后方向为回路的绕行方向。根据基尔霍夫第二定律可得:

$$R_1 I + R_2 I - E_2 - E_1 = 0$$

$$I = \frac{E_1 + E_2}{R_1 + R_2} = 11\text{ mA}$$

$$U_a = U_{ag} = I R_2 - E_2 = 11 - 10 = 1\text{ V}$$

$$U_b = U_{b0} = -E_2 = -10 \text{ V}$$

$$U_{ab} = U_a - U_b = 1 - (-10) = 11 \text{ V}$$

1-5 电功和电功率

1. 电功和电功率 如图 1-17 所示的电路中, 设电流 I 的方向即正电荷运动的方向。在电场一节中讲过, 正电荷在电场力的作用下, 从高电位移向低电位时, 这种功叫电功。在时间 t 内从 a 点流向 b 点的电量 $Q = It$, 故电场所作之功为 $W = UQ$, 则

$$W = UIt \quad (1-16)$$

用字母 P 表示单位时间内所做的电功叫电功率,

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UIt}{t} = UI \quad (1-17)$$

式(1-17)说明: 电功率等于电压和电流的乘积。特别是在一段电阻负载上, 因 $U = RI$ 或 $I = \frac{U}{R}$, 故电功率还有另外两种表达式:

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-18)$$

在这些公式中, 若电压用伏特、电流用安培、时间用秒作单位, 则功的单位用焦耳(J)表示。而功率的单位为瓦特(W), 较大的功率以千瓦为单位。实用上功的较大单位常采用千瓦小时。1 千瓦小时俗称一度电。

2. 电流的热效应——楞次-焦耳定律 在纯电阻性负载中, 消耗的电能全部转换成热能。根据欧姆定律 $U = RI$ 可得:

$$W = UIt = I^2 Rt \quad (1-19)$$

这个公式称为楞次-焦耳定律。它定量地表示了电流的热效应。电流的热效应在生产中得到了广泛的应用, 最常见的是电炉和白炽灯等。另一方面, 电流的热效应也有其危害性, 因为任何电气装置(发电机、电动机等)都有电阻, 因此当它们工作时, 一部分电能要变成热能浪费掉, 不仅降低了用电效率, 同时这部分热量还将使用电装置的温度升高, 当超过一定限度时, 将使其受到损伤或破坏。由式(1-19)可见, 电流越大, 时间越长, 产生的热量就越多, 温度也越高。因此, 为了限制温度就必须把电流限制在某一许可值内。对电气装置来说, 这一电流叫额定电流。当流过电源或负载的电流等于其额定值时, 称为满载; 当电流超出额定值时, 则称为过载。长时间过载是不允许的。

习 题

1-1 一段含源电路如图 1-18 所示, 已知 $E_1 = 6 \text{ V}$, $E_2 = 4 \text{ V}$, $I = 2.6 \text{ A}$, $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 3 \Omega$, 求 $U_{ab} = ?$

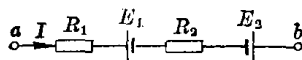


图 1-18

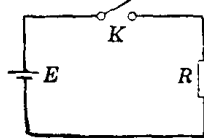


图 1-19

1-2 电路如图 1-19 所示, 已知 $E = 10 \text{ V}$, $R = 10 \Omega$, 求: (1) 开关打开时 R 两端电压 $U_{R\text{开}}$ 和开关两

端电压 $U_{\text{开}}$; (2) 开关闭合后, 电阻 R 两端电压 $U_{R\text{闭}}$ 和开关两端电压 $U_{\text{开闭}}$, 以及电路中的电流 I 。

1-3 某电源的电动势为 24 V , 和外电阻 R 接通后, 用电压表测 R 两端电压 $U=22.5\text{ V}$, 流过 R 的电流 $I=5\text{ A}$, 求外电阻 R 和电源内阻 R_0 。

1-4 一电压表最大量程是 250 V , 内阻是 $250\text{ k}\Omega$, 若想用其测 450 V 电压, 应串多大电阻?

1-5 如图 1-20 所示, 已知 $E=12\text{ V}$, $R=2\text{ k}\Omega$, 求: (1) 开关闭合时, U_a 、 U_b 和 U_R ; (2) 开关打开时, U_a 、 U_b 和 U_R 。

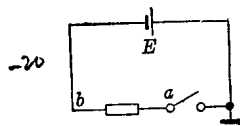


图 1-20

1-6 电路中有一个 $300\text{ }\Omega$ 电阻, 流过其电流是 600 mA , 求: 电阻两端电压? 消耗之功率?

第二章 直流电路的分析方法

在第一章中,我们应用电学原理对简单电路的分析方法作了介绍,本章将要讨论较复杂电路的最基本分析方法。这些方法大体上从两个不同的途径着手:一种是以基尔霍夫两个定律为依据,列出相应的电路方程,然后联立求解,如支路电流法、回路电流法和节点电压法等;另一种是以线性电路原理和定理为依据,如迭加原理和戴维南定理等,利用它们往往可以简化电路的分析和计算,因而得到广泛的应用。

2-1 支路电流法

在计算复杂电路的各种方法中,支路电流法是最基本的。该法以支路电流为求解量,直接应用基尔霍夫两个定律,列出相应的方程,而后联立解出各未知的支路电流。下面就以图 2-1 所示的两电源并联的电路为例来说明。图中,电路的支路数 $m=3$ (E_1 、 R_1 和 E_2 、 R_2 以及 R_3 三条支路),节点数 $n=2$ (节点 a 和 b)。

首先标出 3 个待求的支路电流 I_1 、 I_2 、 I_3 的参考方向。因为未知量是三个,所以需要列出三个独立方程,联立求解。应用基尔霍夫第一定律分别对节点 a 和 b 列出节点电流方程:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (2-1)$$

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0 \quad (2-2)$$

实际上,这两个式子是等价的,所以其中一个是非独立的方程。所谓非独立的方程,可理解为方程中变量之间不含有新的函数关系。由此看出,对具有两个节点的电路,运用基尔霍夫第一定律只能列出 $2-1=1$ 个独立方程。

可以证明, n 个节点的电路应用基尔霍夫第一定律只能得到 $(n-1)$ 个独立方程,而具有 m 条支路的电路就有 m 个待求的支路电流,须列出 m 个独立的方程联立求解。在得到 $(n-1)$ 个节点电流方程之后,还需应用基尔霍夫第二定律找到其余 $m-(n-1)$ 个独立的回路电压方程。对于回路 I 和 II ,应用基尔霍夫第二定律可分别列出回路电压方程:

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 = E_1 - E_2 \quad (2-3)$$

$$R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_2 \quad (2-4)$$

将式(2-1)、(2-3)和(2-4)联立,即可解出 I_1 、 I_2 和 I_3 。

如图 2-1,还可以由回路 III 列出回路电压方程:

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 = E_1 \quad (2-5)$$

不难看出,式(2-3)和式(2-4)相加即可得到式(2-5),所以这三个方程中只有二个是独立的。一般来说,应用基尔霍夫第二定律列回路电压方程所选取的回路是任意的,只要每一回路都包含一条其他回路所没有的新支路即可,这种回路称为独立回路。按独立回路列出的电压

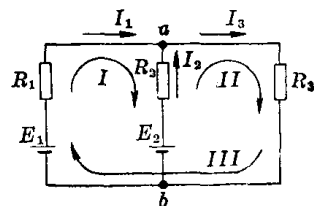


图 2-1 支路电流法

方程一定是独立的。

应用基尔霍夫定律可以且只能列出 $(n-1) + [m - (n-1)] = m$ 个独立方程, 所以 m 个待求的支路电流可以求出, 且解是唯一的。

综上所述, 归纳支路电流法的求解步骤如下:

- ① 选定各支路电流参考方向, 若电路有 m 条支路, 则待求的支路电流数就是 m 个;
- ② 如果有 n 个节点, 则任选 $(n-1)$ 个节点列出 $(n-1)$ 个节点电流方程;
- ③ 选取 $m - (n-1)$ 个独立回路, 并任意指定这些回路的绕行方向。然后, 对所选定的独立回路, 应用基尔霍夫第二定律, 列出回路方程;
- ④ 联立求解上述 m 个独立方程, 就得出待求的 m 个支路电流。

[例题 2-1] 在图 2-2 电路中, 两台发电机并联运行, 共同向负载供电, 负载电阻 $R_3 = 24 \Omega$ 。由于某种原因, 两台发电机的电动势产生了差异, $E_1 = 130 \text{ V}$, $E_2 = 117 \text{ V}$, 它们的内阻 $R_1 = 1 \Omega$, $R_2 = 0.6 \Omega$ 。求每台发电机中的电流以及它们各自发出的功率。

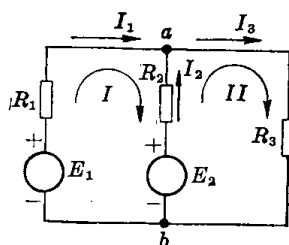


图 2-2

[解] ① 选定各支路电流参考方向如图 2-2。

② 对节点 a 列节点电流方程:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

③ 对回路 I 和 II 分别列出回路电压方程

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 = E_1 - E_2$$

$$R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_2$$

联立上面三个方程并代入已知数据得

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ I_1 - 0.6 I_2 = 13 \\ 0.6 I_2 + 24 I_3 = 117 \end{cases}$$

④ 应用行列式法求解联立方程组

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -0.6 & 0 \\ 0 & 0.6 & 24 \end{vmatrix} = -14.4 - 0.6 - 24 = -39 \neq 0$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 13 & -0.6 & 0 \\ 117 & 0.6 & 24 \end{vmatrix} = -7.8 - 70.2 - 312 = -390$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 13 & 0 \\ 0 & 117 & 24 \end{vmatrix} = 312 - 117 = 195$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -0.6 & 13 \\ 0 & 0.6 & 117 \end{vmatrix} = -70.2 - 7.8 - 117 = -195$$

解得:

$$I_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{-390}{-39} = 10 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{195}{-39} = -5 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{A_3}{A} = \frac{-195}{-39} = 5 \text{ A}$$

⑤ 选取由 E_1 、 R_1 和 R_3 组成的非独立回路, 列回路电压方程进行验算, 将

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 = E_1$$

代入已知数据得

$$\text{方程左边} = 1 \times 10 + 24 \times 5 = 10 + 120 = 130 \text{ V}$$

$$\text{方程右边} = 130 \text{ V}$$

方程左边等于方程右边, 说明本题计算正确。

⑥ 求两台发电机的输出功率, 两台发电机的端电压, 即负载电阻 R_3 两端的电压为:

$$U = R_3 I_3 = 24 \times 5 = 120 \text{ V}$$

发电机 E_1 和 E_2 所贡献的功率 P_1 和 P_2 为其端电压 U 与其输出电流 I_1 、 I_2 的乘积, 即

$$P_1 = UI_1 = 120 \times 10 = 1200 \text{ W}$$

$$P_2 = UI_2 = 120 \times (-5) = -600 \text{ W}$$

$P_2 < 0$, 表示发电机 E_2 从外部取用功率(该发电机实际上作为电动机运行而消耗功率)。 $P_1 = 1200 \text{ W} > 0$, 表示发电机 E_1 向外输出功率, 一部分功率供给发电机 E_2 , 另一部分功率供给负载 R_3 。 R_3 得到的功率为 $P_3 = P_1 + P_2 = 1200 + (-600) = 600 \text{ W}$ 。

从本例看出, 电动势不相等的发电机不宜并联运行。

2-2 回路电流法

一般情况下, 电路的支路数都较多, 这样的方程组求解是相当繁琐的, 能否使未知数减少, 从而使求解的方程数目减少, 以便于计算, 这就是回路电流法的思路。现以图 2-3 所示电路为例来说明这个方法。

根据图 2-3 所选定的各支路电流参考方向, 对节点 A 可以列出方程

$$I_b = -I_a + I_c$$

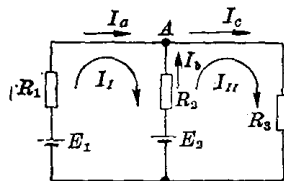


图 2-3

上式可以这样来理解, 支路电流 I_b 是由 $-I_a$ 和 I_c 两个分量所组成。可以假想 I_c 不仅流过支路 c , 还流过支路 b 而形成一个顺时针方向的环绕电流。同样, I_a 也可设想为从支路 a 流到支路 b 而形成一个顺时针方向的环绕电流。支路 b 则是这二个环绕电流的公共通道。这种假想的在一个回路里环绕流动的电流称之为回路电流, 在图 2-2 中用 I_I 、 I_{II} 分别表示左、右两个回路电流, 其参考方向皆取顺时针方向, 且令 $I_I = I_a$, $I_{II} = I_c$, 因为流过支路 a 的电流只有回路电流 I_I , 所以该支路的电流仍为 I_a ; 同理, 支路 c 上的电流仍为 I_c ; 而支路 b 上的电流为流过该支路的二个回路电流 I_I 和 I_{II} 的迭加, 根据所设的参考方向有 $I_b = -I_I + I_{II} = -I_a + I_c$ 。可见, 回路电流的设想并不改变原来的各支路电流及其相互关系。这里, 支路 a 、 c 只有一个回路电流流过, 称为独立支路; 支路 b 上有二个回路电流流过, 称为公共支路。

回路电流是沿回路流动的电流, 对任一节点来说, 回路电流既流进节点, 又流出节点。所以, 回路电流在所有节点处都自动满足基尔霍夫第一定律。这样, 若把回路电流作为未知量, 只须根据基尔霍夫第二定律列出足够的回路方程联立求解即可。

对图 2-3 所示电路, 以回路电流的参考方向作为回路的绕行方向, 可列出回路电压方程