

中等专业学校教材

电工与电气设备

江苏省扬州水利学校 郭永年主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书为水利类中等专业学校通用教材。

全书共分十二章。主要内容有：直流电路的基本概念，电磁，单相正弦交流电路，三相正弦交流电路，变压器，三相异步电动机，同步发电机，电气设备，电工测量，继电器和继电保护装置，配电装置，安全用电等。

本书可供水利工程建筑、农田水利等专业使用，也可供有关工程技术人员参考。

中等专业学校教材

电工与电气设备

江苏省扬州水利学校 郭永年主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 18.75印张 426千字

1986年6月第一版 1986年6月北京第一次印刷

印数00001—20610册 定价2.70元

书号 15143·5951



前 言

本教材是根据水利电力部教材编审出版规划组织编写的。

教材的编写大纲，是按照水利电力部教育司一九八二年八月颁发的《水工建筑》、《农田水利》专业教学计划所规定的《电工与电气设备》教学大纲内容制订的。一九八三年十一月，在山东水利学校召开的《电工与电气设备》课程组会议上，对编写大纲又进行了广泛的讨论。

本教材在编写过程中，力求运用辩证唯物主义的观点来阐明电工与电气设备学科的基本规律，既注意加强本课程的理论基础，突出物理概念和分析问题的基本方法；又密切结合专业的生产实际，使对电气工程有一完整的概念。全书贯彻删繁就简，“少而精”的原则。书中某些章节，可视专业需要、学时多少和学生实际水平参考选用。

本教材文字叙述尽量通俗易懂，每章后面附有思考题与习题，文中还有较多的例题和插图，尽可能方便学生自学。书后选编了部分电气设备的技术数据表格，供查阅。

本教材由扬州水利学校郭永年主编，除第八和第十一章，由扬州水利学校虞善尔编写外，其余各章由郭永年编写。书稿由山东水利学校邱少岳主审。在编写过程中，不少单位和同志给予大力支持和帮助，在此，我们谨向曾经协助本书编写、修改工作的单位和同志，表示衷心的感谢。

由于我们业务水平有限，实际经验不多，书中一定存在不妥或错误，恳切希望各兄弟学校的师生以及广大读者，提出批评和改进意见，以便今后修订提高。

编 者

1984年

目 录

前 言

第一章 直流电路	1
第一节 直流电路的基本概念	1
第二节 欧姆定律	3
第三节 简单电路的计算	5
第四节 电路的工作状态	8
第五节 克希荷夫定律	9
第六节 支路电流法	11
第七节 电容器及其充放电过程	13
思考题与习题	16
第二章 电磁	18
第一节 磁场的基本概念	18
第二节 磁化	20
第三节 磁路的基本概念	22
第四节 电磁感应	24
第五节 自感应和互感应	26
第六节 涡流	28
思考题与习题	28
第三章 单相正弦交流电路	30
第一节 交流电的概念	30
第二节 正弦交变电动势的产生	30
第三节 相位与相位差	33
第四节 正弦交流电的有效值和平均值	34
第五节 正弦交流电的矢量表示法	36
第六节 交流电路概述	38
第七节 纯电阻交流电路	39
第八节 纯电感交流电路	41
第九节 纯电容交流电路	44
第十节 电阻与电感串联的交流电路	46
第十一节 电阻、电感与电容串联的交流电路	51
第十二节 电阻、电感串联后与电容并联的交流电路	55
思考题与习题	57
第四章 三相正弦交流电路	60
第一节 对称三相正弦交流电动势的产生	60

第二节 三相电源的星形连接	62
第三节 三相电源的三角形连接	64
第四节 三相负载的星形连接	65
第五节 三相负载的三角形连接	70
第六节 三相电路的功率	71
思考题与习题	74
第五章 变压器	76
第一节 变压器的用途与结构	76
第二节 变压器的基本工作原理	81
第三节 三相变压器	85
第四节 特种变压器	90
思考题与习题	97
第六章 三相异步电动机	98
第一节 三相异步电动机的基本结构	98
第二节 三相异步电动机的转动原理	102
第三节 三相异步电动机的转矩特性	105
第四节 三相异步电动机的起动	108
第五节 三相异步电动机的选择	113
第六节 三相异步电动机的运行、维护和常见故障处理	115
思考题与习题	117
第七章 同步发电机	119
第一节 同步发电机的基本结构和工作原理	119
第二节 电枢反应	122
第三节 同步发电机的励磁方式	125
第四节 同步发电机的运行特性	131
第五节 同步发电机的并列运行	132
思考题与习题	136
第八章 电气设备	138
第一节 电气设备基本概念	138
第二节 高压电气设备	140
第三节 低压电气设备	149
第四节 电气设备选型配套举例	162
第五节 主令电器	166
第六节 电动机控制电路	169
思考题与习题	172
第九章 电工测量	175
第一节 电工测量仪表的一般知识	175
第二节 电流和电压的测量	179
第三节 电功率和电能的测量	186
第四节 频率和功率因数的测量	196

第五节 绝缘电阻的测量	198
第六节 万用表	200
思考题与习题	206
第十章 继电器和继电保护装置	207
第一节 继电保护的基本知识	207
第二节 常用继电器	208
第三节 发电机的继电保护装置	212
第四节 变压器的继电保护装置	216
第五节 电动机的继电保护装置	218
第六节 输配电线路的继电保护装置	220
第七节 操作电源	222
思考题与习题	223
第十一章 配电装置	225
第一节 母线	225
第二节 电气主接线	226
第三节 配电装置	228
第四节 水电站厂房内电气设备的布置	235
第五节 电力抽水站厂房内电气设备的布置	239
第六节 二次接线的基本知识	241
第七节 配电屏(盘)安装	243
思考题与习题	249
第十二章 安全用电	250
第一节 接地和接零的基本知识	250
第二节 简单人工接地装置的设计	252
第三节 接地装置的安装	255
第四节 接地电阻的测量	256
第五节 防雷措施	258
第六节 安全用电	261
思考题与习题	265
附表	266

第一章 直流电路

第一节 直流电路的基本概念

一般电路由电源、负载和中间环节三部分组成。电路对电能进行传输、分配、控制和转换。最简单的电路如图1-1所示。

电源 E 是供应电能的装置。除常用的电池、发电机、整流器等外，还有各种信号源。它们将其他形式的能量转换为电能，也可以将一种形式的电能转换为另一种形式的电能。

负载 R 是取用电能的装置，如电灯、电动机和电炉等。它们将电能转换为其他形式的能量。

中间环节是传输、分配和控制电能的部分。最简单的中间环节是连接导线、开关 K 和熔断器 RD ，也可以是比较复杂的网络或系统。电源接在它的输入端，负载接在它的输出端。

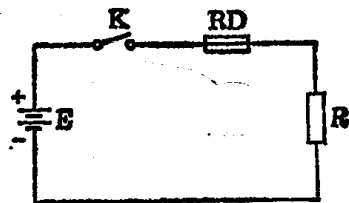


图 1-1 最简单的电路

电路中能量的转换、传输、分配和控制可由电流、电压和电动势反映出来，所以在分析与计算电路之前，首先讨论一下电路中的这几个基本物理量。

一、电流

在正常情况下，金属导体内部的自由电子处于不规则的运动状态，当电场作用于由金属导体组成的闭合电路时，导体中的自由电子就会在电场的作用下产生定向而有规则的运动，在导体的任何一个截面就有一定的电量通过，这就是说导体内部产生了电流。

习惯上，规定正电荷移动的方向为电流的方向，即电流的方向与电子运动的方向相反。

电流的强弱是用电流强度来度量的。电流强度简称电流。电流强度在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电量，即

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

式中 dq ——在时间 dt 内通过导体横截面的电量。

如果电流的量值和方向不随时间而变化，即 $dq/dt = \text{常数}$ ，则这种电流称为直流电流，简称直流。直流的电流强度用符号 I 表示，所以式 (1-1) 可改写为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2)$$

电流的单位是 A，即每秒钟内通过导体横截面的电量等于 1 C 时，导体内的电流就等于 1 A。电流的较小单位是 mA 和 μA ，它们之间的关系是

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

二、电位和电压

电荷在电场内的不同位置上具有不同的位能，这种位能称为电位能。要确定电位能的大小，必须选择一个参考点作为比较标准。通常都选择大地作为参考点，即认为电荷在大地上的电位能为零。因此电荷在电场内某点所具有的电位能，就可以用电荷从该点移到大地上时电场力所做的功来表示。在均匀电场中，电荷在某点 A 所具有的电位能为

$$W_A = F \cdot l_{A0} = \varepsilon Q l_{A0}$$

式中 F —— 电场力，

l_{A0} —— A 点至参考点的距离，

Q —— 电荷量，

ε —— 电场强度。

为了比较电场中各点电位能的大小，我们引用电位的概念，电场内某点的电位就是将单位正电荷自该点移至参考点处电场力所做的功。由此可见，电场内某点的电位在数值上就等于单位正电荷在该点所具有的电位能，电位用符号 φ 表示。所以上述 A 点的电位为

$$\varphi_A = \frac{W_A}{Q} \quad (1-3)$$

电场内两点之间的电位差称为这两点间的电压，用符号 U 表示。例如电场内 A, B 两点之间的电压为

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B \quad (1-4)$$

根据电位的表达式 (1-3) 可得

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = \frac{W_A}{Q} - \frac{W_B}{Q} = \frac{W_{AB}}{Q}$$

由此可见，电场中 A, B 两点之间的电压等于将单位正电荷从 A 点沿任一路径移到 B 点，电场力所做的功。电压与电位的参考点的选择无关。

电压的单位的 V 。即电场力将 $1C$ 电量的电荷从电场内的一点移动到另一点所做的功为 $1J$ 时，则两点间的电压为 $1V$ 。电压的其他单位有 kV 、 mV 和 μV ，它们之间的关系是

$$1kV = 10^3V$$

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

电压的方向规定为由高电位点指向低电位点，即指向电位降的方向。在电路图上，电压的方向常用箭头来表示。

三、电流和电压的正方向

在分析电路时，有时电流的实际方向不能立即判断出来。这时，我们可以先假定一个方向，作为这一电路的电流方向，这一假定的方向，称为电流的正方向（又称为参考方向）。

如图1-2所示，假定了电流的正方向，由 A 点流向 B 点。当我们说电路中的电流 i 在时间 t 时为正，即 $i(t) > 0$ ，就是指在时间 t 时，电流由 A 点流向 B 点，电流的实际方向和假定的正方向一致；反之，如果电路中的电流 i 在时间 t 时为负，即 $i(t) < 0$ ，则电流的实际

方向由B点流向A点，与假定的正方向相反。所以，在假定的电流正方向情况下，电流值的正负，可以反映出电流的实际方向。

同样，在分析电路中某一支路两端电压的实际方向时，也可以先假定一个电压的正方向（如图1-2箭头所示），当我们说支路电压 u 在时间 t 时为正，即 $u(t) > 0$ ，就是指在时间 t 时A点的电位高于B点的电位，电压的实际方向与假定的正方向一致；反之，如果支路电压 u 在时间 t 时为负，即 $u(t) < 0$ ，这时B点的电位高于A点的电位，支路电压的实际方向与假定的电压正方向相反。

电流和电压的正方向都是任意假定的，它们之间原则上不存在依赖关系。但是习惯上要求选定一致的正方向，如图1-2所示，电流的正方向是与电压的正方向一致的。电流和电压的正方向，一般用箭头表示，也可以用双下标表示。例如 i_{AB} ，表示电流的正方向由A流向B。



图 1-2 电流与电压的正方向

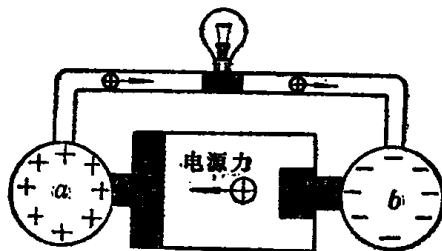


图 1-3 电源的作用

四、电动势

如图1-3所示， a 和 b 是两个电极， a 带正电， b 带负电，因此在电极 a 、 b 间产生电场。如果用导体将 a 和 b 连接起来，那末正电荷在电场力的作用下，就要从电极 a 经连接导体流向电极 b 。这样电极 a 因正电荷的减少而使电位逐渐降低，电极 b 因正电荷的增多而使电位逐渐升高，其结果是 a 和 b 两电极的电位差逐渐减小到等于零。与此同时，连接导体中的电流也相应地减小到等于零。

为了保持在连接导体中有不断的恒定电流流通，则必须使 a 、 b 两极间的电压 U_{ab} 保持恒定，也就是说，要使电极 b 上所增加的正电荷经过另一路径流向电极 a 。但是，由于电场力的作用，电极 b 上的正电荷不能逆电场方向而上，因此必须要有另一种力能克服电场力而使电极 b 上的正电荷流向电极 a 。电源就能产生这种力，我们称它为电源力。电源力将单位正电荷从电源的低电位端 b 经电源内部移到高电位端 a 所做的功，称为电源的电动势，用符号 E 表示。

电源的电动势是衡量电源力做功能力的一个物理量，在电源力的作用下，电源不断地将其他形式的能量转换为电能。在图1-3中， a 和 b 就是电源的正负两电极。

电动势的正方向规定为在电源内部由低电位端指向高电位端，即为电位升高的方向。电动势的单位也是V。

第二节 欧 姆 定 律

欧姆定律是电路的基本定律之一，用来确定电路各部分的电压与电流的关系。

一、一段无源电路的欧姆定律

如图1-4所示,这段电路中是没有电源的,由实验证明,电路中通过的电流 I 的大小与电路两端所加的电压 U 成正比,与电路中的电阻 R 成反比,即

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

上式也可改写成

$$IR = U = \varphi_A - \varphi_B$$

即电流通过电阻时,要引起电位的降低。电流流进的一端的电位高于流出的一端的电位,它的差值等于电流与电阻的乘积,通常称为电阻上的电压降。

式(1-5)是一段无源电路的欧姆定律的表达式。



图 1-4 一段无源电路

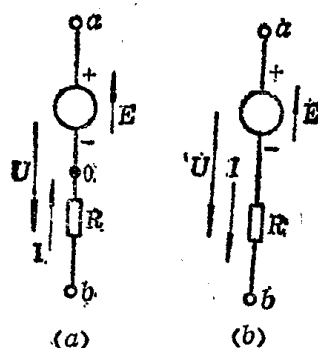


图 1-5 一段有源电路

二、一段有源电路的欧姆定律

当一段电路中含有电源时,确定这段电路中的电流,电压和电动势之间关系的欧姆定律就称为一段有源电路的欧姆定律。

图1-5为一段有源电路。电动势 E , 电压 U 和电流 I 的正方向如图中所示,根据电位的概念,由图1-5(a)可得

$$E = \varphi_a - \varphi_b$$

$$IR = \varphi_b - \varphi_a$$

将上列两式相减,可得

$$E - IR = \varphi_a$$

或

$$I = \frac{E - U}{R}$$

同理,由图1-5(b)可得

$$I = \frac{-E + U}{R}$$

根据这两种情况,可将一段有源电路的欧姆定律写成下列一般公式

$$I = \frac{\pm E \pm U}{R}$$

(1-6)

式中 U ——一段有源电路的端电压;
 E ——电路内的电动势;

R ——电路内的电阻（包括电源内电阻）。

电动势 E 和电压 U 前面的正负号是这样确定的：当电动势（电压）的正方向与电流正方向一致时取正号，相反则取负号。

三、全电路欧姆定律

图 1-6 是最简单的闭合回路， R 是负载电阻， r_0 是电源内电阻，根据一段电路欧姆定律可得出

$$U = E - Ir_0 \text{ 和 } U = IR$$

由此可得

$$I = \frac{E}{R + r_0} \quad (1-7)$$

式 (1-7) 就是全电路的欧姆定律，它表示在单回路中，电流的大小与电动势成正比，而与回路的全部电阻值成反比。

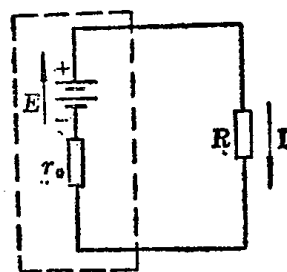


图 1-6 最简单的闭合电路

第三节 简单电路的计算

电路按其结构可分为简单电路和复杂电路两类。凡是能够利用电阻串并联规律简化为无分支电路的电路，称为简单电路。

一、电阻的串联

如果电路中有两个或更多个电阻顺序一个接一个地相联，并且在这些电阻中通过同一电流，则这样的联接方法就称为电阻的串联，如图 1-7 (a) 所示，是两个电阻串联的电路。

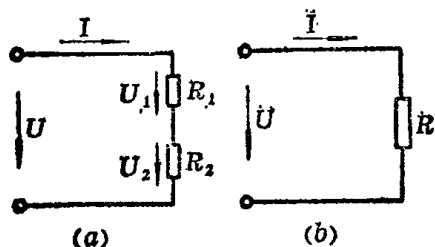


图 1-7 电阻的串联

两个串联电阻可用一个等效电阻 R 来代替，如图 1-7 (b) 所示，等效电阻的阻值等于各个串联电阻阻值之和，即

$$R = R_1 + R_2 \quad (1-8)$$

此时通过电路的电流为

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

两个串联电阻上的电压分别为

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= IR_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U \\ U_2 &= IR_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

由此可见，串联电阻上电压的分配与电阻成正比，电阻大的分得的电压大，电阻小的分得的电压小。式 (1-9) 称为分压公式。

另外，由于各电阻中通过的电流相同，所以各串联电阻消耗的功率与电阻成正比，电阻大的消耗的功率大，电阻小的消耗的功率小。即

$$P_1:P_2=I^2R_1:I^2R_2=R_1:R_2$$

根据能量守恒定律, 这个电路输入的总功率, 等于各个电阻消耗功率 P_1 、 P_2 之和, 即

$$P=P_1+P_2$$

电阻串联的应用很多, 例如将两个功率 (W 数) 一样的 110V 灯泡串联起来, 就可以接到 220V 电源上; 当负载的额定电压低于电源电压的情况下, 可以采用一个适当的电阻与负载串联, 以降落一部分电压; 有时为了限制负载中通过过大的电流, 也可以与负载串联一个限流电阻; 有时为了调节电路中的电流, 可以在电路中串联一个变阻器; 另外, 改变串联电阻的大小, 可以得到不同的输出电压。

二、电阻的并联

如果电路中有两个或更多个电阻的两端联接在共同的两点上, 各个电阻上受到的是同一电压, 则这样的联接方法就称为电阻的并联。如图 1-8 (a) 所示, 是两个电阻并联的电路。

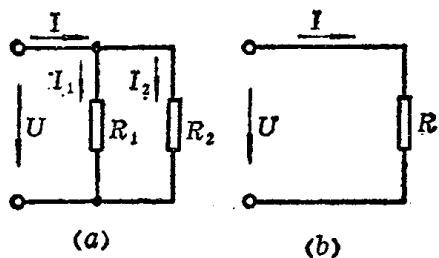


图 1-8 电阻的并联

两个并联电阻也可用一个等效电阻 R 来代替, 如图 1-8 (b) 所示, 等效电阻的倒数等于各个并联电阻的倒数之和, 即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-10)$$

或

两个并联电阻上的电流分别为

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1} = \frac{IR}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I \\ I_2 &= \frac{U}{R_2} = \frac{IR}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

由此可见, 并联电阻上电流的分配与电阻成反比, 电阻大的分得的电流小, 电阻小的分得的电流大。式 (1-11) 称为分流公式。

如果有两个阻值相差悬殊的电阻并联时, 可以认为等效电阻近似等于小电阻值。因为电阻大的支路电流很小, 可以近似地认为是断路。

有时为了某种需要, 将电路中的某一段与电阻或变阻器并联, 以起分流或调节电流的作用。

一般负载都有一定的额定电压。为了保证负载的正常工作, 加在负载上的电压必须等于其额定电压, 所以负载通常都是并联地接在供电线上的。任何一个负载工作情况的变化 (接通或断开) 都不会影响其它负载的正常工作。

通常所说的负载增加, 是指并联的负载数目增多, 电路负载的总电阻变小, 电路中的总电流和总功率增大。

三、电阻的复联

在实际电路中, 既有电阻的串联, 又有电阻的并联, 这种联接方式称为复联 (俗称串

并联)，如图 1-9 所示。对于这样的电路，可按下列步骤进行计算：①应用电阻串联和并联的等效化简规则，首先将复联电路简化为一个无分支电路，从而求出电路总的等效电阻；②根据电路的总电压和总等效电阻，用欧姆定律求出电路总电流；③根据串联电路和并联电路中电流和电压的分配规律，分别计算出电路中各部分的电压和电流。

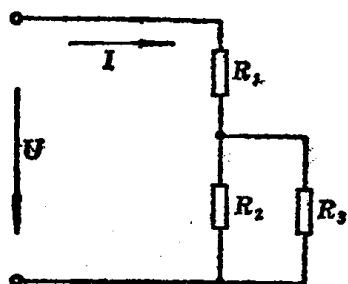


图 1-9 电阻的复联

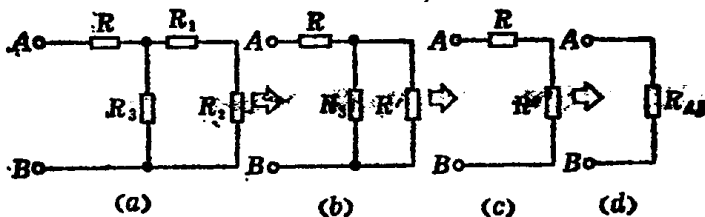


图 1-10 例1-1图

例 1-1 如图 1-10 (a) 所示电路中，已知电阻 $R=R_1=200\Omega$ ， $R_2=800\Omega$ ， $R_3=600\Omega$ ，试求 AB 两端的等效电阻。

解： 首先求电阻 R_1 和 R_2 串联的等效电阻 R'

$$R' = R_1 + R_2 = 200 + 600 = 800\Omega$$

然后按图 1-10 (b) 所示简化后的电路，计算电阻 R' 和 R_3 并联的等效电阻 R''

$$R'' = \frac{R_3 R'}{R_3 + R'} = \frac{800 \times 800}{800 + 800} = 400\Omega$$

最后再按图 1-10 (c) 所示简化后的电路，计算电阻 R'' 和 R 串联的等效电阻，即可得到 AB 两端的等效电阻，如图 1-10 (d) 所示

$$R_{AB} = R'' + R = 400 + 200 = 600\Omega$$

例 1-2 图 1-11 所示，为一利用滑线变阻器接成的分压器电路图，移动变阻器的滑动触头，即可向负载电阻 R 输出不同电压。如已知输入电压 $U_{in}=12V$ ，变阻器额定电阻 $R_0=1200\Omega$ ，负载电阻 $R=200\Omega$ ，变阻器滑动触头位于中间不动，试求：1) 负载电阻 R 未接入时，分压器的输出电压 U_{so} ；2) 当负载电阻 R 接入后，分压器的输出电压 U_{sc} 和负载电流 I 。

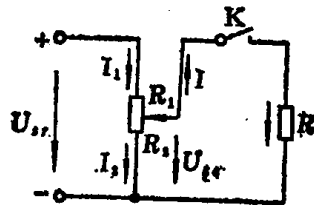


图 1-11 例1-2图

解： 1) 当负载电阻 R 未接入时，电阻 R_1 和 R_2 是串联的，所以通过分压器的电流

$$I_1 = I_2 = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{12}{600 + 600} = 0.01A$$

根据欧姆定律，可得分压器输出电压

$$U_{so} = I_2 R_2 = 0.01 \times 600 = 6V$$

2) 当负载电阻 R 接入后，分压器电阻 R_2 和负载电阻 R 并联后，再与 R_1 串联，所以是一个复联电路，整个电路的等效电阻是

$$R = R_1 + \frac{R_2 R}{R_2 + R} = 600 + \frac{600 \times 200}{600 + 200} = 750\Omega$$

通过分压器的电流为

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{12}{750} = 0.016 \text{ A}$$

根据分流公式(1-11), 可计算出通过负载电阻 R 的电流

$$I = \frac{R_2}{R_2 + R} \cdot I_1 = \frac{600}{600 + 200} \times 0.016 = 0.012 \text{ A}$$

根据欧姆定律, 此时分压器输出电压为

$$U_{sc} = IR = 0.012 \times 200 = 2.4 \text{ V}$$

或

$$U_{sc} = I_2 R_2 = 0.004 \times 600 = 2.4 \text{ V}$$

第四节 电路的工作状态

一、额定工作状态

当导体中有电流通过时, 导体就会发热, 从而使电气设备的温度升高。为了防止温升过高, 而影响设备的寿命, 对温度的升高就要加以限制, 例如橡皮绝缘铜线的最高工作温度不得超过 65°C , 一般电动机不得超过 105°C 。

为了使电气设备在正常工作温度下运行, 使用经济合理, 安全可靠和保证一定的使用寿命, 必须对电气设备的电压, 电流和功率等电气参数规定正常使用数值, 这个数值称为额定值。各种电气设备的额定值都标在铭牌上, 也可从产品目录中查得。

在额定电压的作用下, 如果通过电气设备的电流达到额定值, 这种工作状态就称为满载; 如果电流超过额定值, 就称为过载。当电流超过额定值过多时, 就会因发热过高而使绝缘材料损坏; 当外加电压超过额定电压过多时, 绝缘材料有可能击穿。如果电流和电压远低于额定值, 那末电气设备就不能得到正常、合理和充分的利用。

二、空载状态

当电源与外电路断开时, 电源不向外输出电能, 称为电源的空载状态, 在电源空载状态下, 外电路电流 I 等于零, 这时电源的端电压 (称为空载电压 U_0) 等于电源电动势, 电源输出功率也为零。因此电源空载时的特征为

$$\left. \begin{aligned} I &= 0 \\ U_0 &= E \\ P &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

三、短路状态

当电源的两端由于某种原因而连在一起时, 电路中的电流不再流过负载, 这种状态称做电源被短路。电源短路时电源两端的电压为零, 回路中仅有很小的电源内电阻 r_0 , 电源的电动势全部降在内电阻上。所以这时的电流很大, 此电流称为短路电流 I_s , 短路电流可能使电源过热和产生机械的损伤或毁坏, 短路时电源所产生的电能全部被内电阻消耗。

综上所述, 电源短路时的特征为

$$\left. \begin{aligned} I &= I_d = \frac{E}{r_0} \\ U &= 0 \\ P &= I^2 r_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

短路也可能发生在负载端或线路的任何处。产生短路的原因往往是由于绝缘损坏或线路接错。为了防止短路事故所引起的后果，通常在电路中接入熔断器或自动断路器，以便发生短路时，能迅速切除故障电路。

例 1-3 如图1-6所示电路，已知电源电动势 $E=100\text{V}$ ，电源内电阻 $r_0=0.2\Omega$ ，负载电阻 $R=9\Omega$ ，试计算：1) 电路在正常情况下的电流 I ；2) 负载两端发生短路时，电源中通过的短路电流 I_d 。

解：1) 正常工作时的电流为

$$I = \frac{E}{R+r_0} = \frac{100}{9+0.2} = 10.87\text{A}$$

2) 短路时的电流为

$$I_d = \frac{E}{r_0} = \frac{100}{0.2} = 500\text{A}$$

由上例可看出当负载短路时，电路中流过的电流约为电路正常工作时电流的46倍。

第五节 克希荷夫定律

分析与计算电路的基本定律，除了欧姆定律外，还有克希荷夫第一定律（节点电流定律）和克希荷夫第二定律（回路电压定律）。

一、克希荷夫第一定律

在电路中如果有三条或三条以上的支路相连接的点称为节点。如图1-12所示的电路中共有两个节点 b 和 e 。

克希荷夫第一定律是用来确定连接在同一节点上的各支路中电流间的关系的。根据电流的连续性，从一个地方流进多少电量的电荷，必定同时从这个地方流出相等电量的电荷。因此对于电路中任何一个节点，流进它的所有电流的和必定等于从它流出的所有电流的和。如图1-12所示电路中，流入节点 b 的电流之和是 I_1+I_2 ，流出节点 b 的电流是 I_3 ，所以，

$$I_1 + I_2 = I_3$$

或

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

如果我们规定流进节点的电流为正，流出为负，则可写成一般式

$$\sum I = 0 \quad (1-14)$$

即流过电路中任何一节点各电流的代数和等于零，这就是克希荷夫第一定律。

克希荷夫第一定律一般应用于节点，但也可以将它推广到任意封闭面，即对于电路中任意一个封闭面来说，流入封闭面的电流之和应等于流出封闭面的电流之和。图1-13是一个晶体三极管电路，其发射极电流为 i_e ，基极电流为 i_b ，集电极电流为 i_c ，对于封闭曲面 S

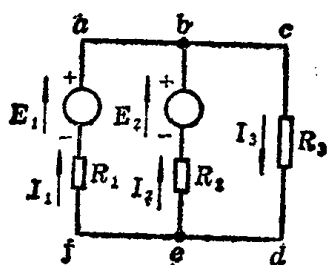


图 1-12 电路举例



图 1-13 电路封闭面举例

来说, 流入的电流 i_1 必然等于流出的电流 i_2 和 i_3 之和, 即 $i_1 = i_2 + i_3$ 。

二、克希荷夫第二定律

在电路中, 任何一个闭合路径称为回路。

克希荷夫第二定律是用来确定回路中各部分电压间的关系的。根据电位的单值性原理, 从电路中的某一点出发, 经任意回路绕行一周, 再回到这一点, 所经回路中的所有电位升高的总和必定等于所有电位降低的总和。如图1-12所示电路中有三个回路, 即 $abefa$, $bcdeb$ 和 $acdfa$ 。图中电动势和电流的正方向均已定出, 现以 $abefa$ 回路为例, 按顺时针绕行方向, 电位升之和必定等于电位降之和, 即

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

或写成

$$E_1 + I_2 R_2 - E_2 - I_1 R_1 = 0$$

即

$$\sum U = 0$$

这是克希荷夫第二定律的一种表达式, 就是在任何一个回路绕行方向上, 回路中各部分电压的代数和恒等于零。我们规定, 凡是电位升的取正号, 电位降的取负号。绕行方向是任意选定的。

回路 $abefa$ 的电压方程式, 我们还可以写成

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

即

$$\sum E = \sum (IR)$$

(1-15)

这是克希荷夫第二定律的另一种表达式, 就是在任何一个回路绕行方向上, 回路中电动势的代数和等于电阻上电压降的代数和。我们规定, 凡是电动势的正方向与所选回路绕行方向一致, 则取正号, 反之则取负号; 凡是电流的正方向与回路绕行方向一致, 则此电流在电阻上所产生的电位降取正号, 相反则取负号。

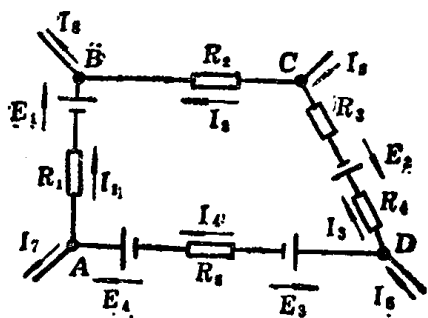


图 1-14 回路举例

图1-14为某复杂电路中的一个回路, 电动势和电流的正方向已在图中标出, 我们取 $ABCD A$ 为回路绕行方向, 应用克希荷夫第二定律, 可例出电压方程式即

$$E_1 + E_2 - E_3 + E_4 = I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_3 (R_3 + R_4) + I_4 R_5$$

必须注意, 在列方程时, 首先要在电路图上标出电流、电压或电动势的正方向, 然后

根据所标的正方向来确定所列方程中的正负号。如果正方向选定得不同，将会相差一个负号。

第六节 支路电流法

最简单的电路只有一个回路，即所谓单回路电路。有的电路虽然有好多个回路，但是应用电阻串联和并联的方法仍可简化为单回路电路。然而有的多回路电路却不能用电阻串联和并联的方法简化为单回路电路，这种多回路电路称为复杂电路，例如图1-12所示的电路中，有二个支路有电动势，三个电阻中既没有通过同一电流的串联电阻，也没有承受同一电压的并联电阻，这个电路就是复杂电路。

分析与计算复杂电路，必须应用欧姆定律和克希荷夫定律。计算复杂电路的方法有多种，支路电流法是最基本的方法。这一方法以电路各支路的电流为未知数，应用克希荷夫第一定律和第二定律，列出足够的方程式联立求解。

以图1-15所示电路为例，来说明支路电流法的应用。这个电路有五个支路，已知各电动势和电阻，为了求出五个支路电流，先任意选定这些电流的正方向，标在图中，并设它们的数值各为 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 、 I_5 。有五个未知数，就需列出五个独立的方程式，所谓独立，就是其中的任何一个方程式都不能从其余的方程式推出来。

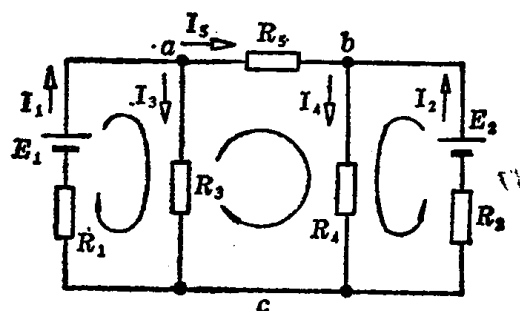


图 1-15 支路电流法求解电路

这个电路有 a 、 b 、 c 三个节点，根据克希荷夫第一定律，可以列出三个节点电流方程式：

$$\text{对节点 } a \quad I_1 - I_3 - I_5 = 0$$

$$\text{对节点 } b \quad I_2 + I_5 - I_4 = 0$$

$$\text{对节点 } c \quad I_3 + I_4 - I_1 - I_2 = 0$$

将这三个方程式相加，得

$$I_1 - I_3 - I_5 + I_2 + I_5 - I_4 + I_3 + I_4 - I_1 - I_2 = 0$$

即

$$0 = 0$$

由此可见，这三个方程式中，任何一个都可以从其他两个推出，即这三个方程式中只有两个是独立的。这个情况可以推广到各种电路，在节点数为 n 的电路中，应用克希荷夫第一定律列出的节点电流方程式只有 $(n - 1)$ 是独立的。

还缺三个独立方程式。应用克希荷夫第二定律，对电路的每一个回路都能列出回路电压方程式，这些方程式也不都独立，但是能够列出的独立的回路电压方程式正好是三个。而且可以证明，在支路数为 b 的电路中，独立的回路电压方程式数 $l = b - (n - 1)$ 。例如图1-15电路中，