

中等专业学校试用教材

电工及工业电子学基础

湖南省机械工业学校 苏弢云 主编

ZHONGDENG

ZHUANYE

XUEXIAO

JIAOCAI



前 言

本书是根据国家机械委中等专业学校工业企业管理类专业《电工及工业电子学基础》课程教学大纲编写而成的。该大纲于1986年12月在长沙召开的《电工及工业电子学基础》课程教学大纲审定会议上审定通过。

为了适应教育面向现代化、面向世界、面向未来的要求，中专教材正以改革精神向多样化发展，编写和出版不同风格的教材。本书按照教学大纲的要求，以培养工业企业中级管理人才为目标，对传统的电工学内容进行了精选，增加了工业企业常用电气设备、电气测量、工业企业供电及用电管理方面的内容，开拓了工业企业管理人员在电工技术领域方面的知识，并有较鲜明的管理专业特色。

本书每章前面有简单的内容提要，章后附有小结和习题。除基本内容外，编有大纲中规定开设的七个实验的实验指导书。书的末尾还编有附录，列出了常用电机、电器和电子元器件的技术参数规范等，有利于培养学生的自学能力和查阅资料的能力。

本书由湖南省机械工业学校编写，苏芻云主编。其中第一、三、四、五章由苏芻云执笔，第二章由谭维瑜执笔，第六章由张国钧执笔。全书由湖南大学沈旦五副教授主审。湖南省机械工业学校电工教研组其他老师为本书的编写做了大量有益的工作。

参加本教材审稿会的有重庆机器制造学校、北京汽车工业学校、杭州机械工业学校、无锡机械制造学校、沈阳机电学校的老师，国家机械委电工学课程组也对本教材提出了宝贵意见，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，恳切期望广大读者批评指正。

编者

1987年8月



目 录

绪论	1	§ 4-1 电气测量的基本知识	122
第一章 直流电路	2	§ 4-2 电流与电压的测量	125
§ 1-1 电路的基本概念	2	§ 4-3 电功率的测量	127
§ 1-2 电阻·欧姆定律	5	§ 4-4 电能的计量	129
§ 1-3 电功与电功率	9	本章小结	133
§ 1-4 电阻的串联与并联	10	思考题和习题	134
§ 1-5 电路的状态和电气设备的额定值	14	第五章 工业企业供电及用电管理	135
§ 1-6 基尔霍夫定律	16	§ 5-1 电力是工业企业的重要能源	135
§ 1-7 叠加原理	19	§ 5-2 发电输电配电概况	136
本章小结	21	§ 5-3 工业企业用电计价	138
思考题和习题	23	§ 5-4 计划用电	140
第二章 交流电路	26	§ 5-5 节约用电	142
§ 2-1 正弦交流电的基本概念	26	§ 5-6 安全用电	150
§ 2-2 正弦交流电的旋转矢量表示法	30	§ 5-7 工业电视及微型电子计算机在 工业企业现代化管理中的应用	155
§ 2-3 单一参数的交流电路	32	本章小结	157
§ 2-4 电阻和电感串联的交流电路	38	思考题和习题	158
§ 2-5 电阻、电感和电容串联的 交流电路	41	第六章 电子技术基础	159
§ 2-6 电感性负载与电容器并联的电路	43	§ 6-1 晶体二极管及整流电路	159
§ 2-7 三相交流电源	45	§ 6-2 晶体三极管及单管交流 电压放大器	168
§ 2-8 三相负载的联接	48	§ 6-3 集成运算放大器	182
本章小结	52	§ 6-4 晶闸管可控整流电路	186
思考题和习题	56	§ 6-5 脉冲数字基本电路	191
第三章 工业企业常用电气设备	59	本章小结	206
§ 3-1 磁路的基本概念	59	思考题和习题	207
§ 3-2 变压器	65	实验指导书	209
§ 3-3 交流电动机	76	实验目的与方法	209
§ 3-4 直流电动机	91	实验一 认识实验·验证基尔霍夫定律	210
§ 3-5 微型电机简介	97	实验二 电感性负载与电容器并联	212
§ 3-6 常用高、低压电器	98	实验三 三相负载的星形和三角形连接	214
§ 3-7 笼型感应电动机的直接启动和 正反转控制电路	111	实验四 三相笼型感应电动机直接起动的 控制	215
§ 3-8 其他常用电气设备	113	实验五 常用电子仪器及单相桥式 整流电路	216
本章小结	116	实验六 单管交流电压放大电路	218
思考题和习题	119		
第四章 电气测量	122		

实验七 门电路实验	220	型号规格	229
附录一 常用电动机的系列型号及 主要用途	222	附录四 几种常用半导体器件的 主要参数	230
附录二 常用高、低压电器技术数据	225	附录五 国产半导体器件型号命名法	233
附录三 常用电工测量仪表的		主要参考文献	234

绪 论

一、本课程的研究对象以及电气化在四化建设中的重要作用

电工及工业电子学基础是研究电能和技术领域中应用的一门技术基础课程。

随着生产和科学技术的发展,电能的应用愈来愈广泛。在现代工业、农业、交通、通讯和日常生活中,电能已成为主要的动力来源。工业上的各种生产机械,如机床、起重机、卷扬机、轧钢机、鼓风机、压缩机、锻压机、水泵等,都是用电能来驱动的。各种工艺加工装置,如电焊、电解、电镀、电火花、热处理、电炉冶炼等,都是电能的应用。在农业生产中,电力排灌机械以及打稻机、碾米机等粮食和饲料加工机械,也愈来愈多地用到电能。在交通运输业中,电车、电气机车等要靠电力拖动。在现代物质和文化生活中,都不能缺少电能。

电子科学技术,特别是电子计算机的高度发展及其在生产领域中的广泛应用,把人们从大量的、繁重的劳动中解放出来,而且可以逾越人体机能的限制,在检测、计算、控制等方面,完成人类难于承担的任务,为我们提供新的生产手段、有效的科学实验和组织管理方法,把生产自动化提高到一个新的水平,从而获得更高的劳动生产率。

电能之所以得到这样广泛的应用,是由于它具有以下的优越性:

1. 电能可以很方便地由热能、化学能、光能、原子能等转换得到,反之也很容易将电能转换为我们需要的其他各种形式的能,如机械能、化学能、热能、光能等。
2. 电能的传输和分配方便、迅速、经济、可靠。
3. 电能容易控制、测量和调整,利用电能可以达到高度自动化。

二、本课程与专业的关系以及学习的方法和要求

本课程是中等专业学校工业企业管理类专业的一门实践性较强的技术基础课。本课程的任务是使管理类专业学生获得电工及电子技术方面的基础知识,以及在工业企业常用电气设备、器材和用电管理方面的基本知识和初步技能。培养学生具有节约能源、降低电耗、提高经济效益方面的知识,为从事现代化科学管理打下理论基础。

电工及工业电子学基础课程内容十分丰富,具有一定的知识广度和深度。为了学好这门课程,要求学生首先应有正确的学习态度,重视本课程的学习。还要掌握科学的学习方法。在学习中,应紧紧抓住用电为主的特点,着重掌握电能的合理使用,把理论和实践紧密结合起来。同时要重视实践教学环节,认真完成实验,在参观工厂现场的活动,培养自己调查研究和分析的能力。

第一章 直流电路

一切电气设备的运行，都要依靠电流的作用。为要获得电流，都需构成电路。本章从电路的组成出发，着重讨论电路的几个基本物理量；电路的基本联接方式；电路的状态和电气设备的额定值；以及电路的基本定律。

§ 1-1 电路的基本概念

一、电路的组成

电路就是电流通过的路径。它是由许多电气元件或设备按一定方式联接而成，它的作用是实现能量的传输和转换；或者实现信号的传递和处理。

常见的各种照明电路就是用来传输和转换能量的。以图 1-1 所示的最简单的照明电路为例，它是由电池、灯泡、连接导线和开关所构成的。电池把化学能转换成电能供给灯泡，灯泡又把电能转换为光能作照明之用。

一个完整的电路，不论它是简单的还是复杂的，一般都由下述三个部分组成：

1. 电源 凡是将化学能、机械能、热能或原子能等其它形式能量转换为电能的设备，统称为电源。如电池将化学能转换为电能，发电机将机械能转换成电能。它们都是常用的电源，是电路中电能的来源。

2. 负载 凡是将电能转换成热能、光能、机械能等其它形式能量的用电设备，统称为负载。如电炉将电能转换为热能；电灯将电能转换为光能；电动机将电能转换为机械能。它们都是负载，是取用电能的设备。

3. 中间环节 将电源和负载联接成回路的金属导线和用来控制电路的电气设备，如开关、熔断器等，称为中间环节。它们起着传递、分配和控制电能的作用。

我们常把由负载和中间环节构成的电路称为外电路，而把电源内部的一段电路称为内电路。

二、几个基本物理量

1. 电流 电荷有规则的定向运动，形成电流。由物理学中知道，金属导体中的自由电子一般都处于无规则的热运动状态。当在电场力的作用下，自由电子逆着电场方向作有规则运动。因此，金属导体中的电流是由带负电荷的自由电子定向运动形成的，但习惯上人们规定正电荷运动的方向为电流的实际方向。

表征电流大小的物理量称为电流强度，用单位时间内通过导体某一横截面的电量多少来衡量。电流强度常简称为电流。如果在单位时间内通过导体横截面的电荷量越多，电流就越大。

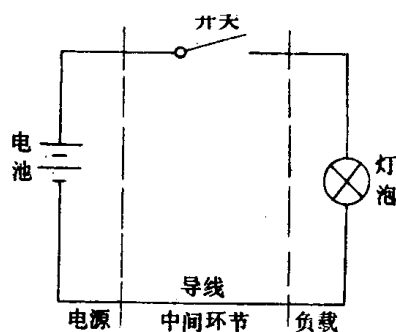


图1-1 简单的照明电路

如果电流的大小和方向都不随时间的变化而变化,则这种电流称为恒定直流电流,简称直流。直流的电流强度用字母 I 表示,对直流来说,如果在时间 t 内通过导体某一截面的总电量为 Q ,则电流的大小为

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

在国际单位制 (SI) 中,电流的单位为 A。若每秒钟通过导体截面的电量为 1C,则电流为 1A。

在电工技术中,还常常用较大的电流单位 kA,及较小的电流单位 mA 或 μA 来计量,它们之间的换算关系如下:

$$\begin{aligned} 1\text{kA} &= 10^3 \text{ A} \\ 1\text{mA} &= 10^{-3} \text{ A} \\ 1\mu\text{A} &= 10^{-6} \text{ A} \end{aligned}$$

前面提到将正电荷运动的方向定为电流的正方向。在简单电路中,电流的实际方向容易由电源的极性来判定,但在比较复杂的电路中,电流的实际方向往往难以直观判断,显然电流在金属导体中流动时的实际方向只有两种可能,为此,在分析与计算电路时,常可任意选定其中一个方向为参考标准,称为参考正方向,简称正方向。所选电流的正方向不一定与电流的实际方向一致。如果电路中某一未知电流的正方向已经选定,并求得此电流为正值,则说明电流的实际方向与选定的正方向一致,如图 1-2 a 所示;

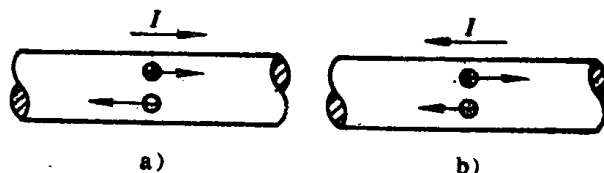


图1-2 电流的正方向
a) $I = \text{正值}$ b) $I = \text{负值}$

若求得电流为负值,则说明电流的实际方向与选定的正方向相反,如图 1-2 b 所示。

由此可见,电流的实际方向是客观存在的,但若选定的参考正方向不同,则同一电流的大小相等,而符号相反。电流的正方向用箭头标在电路图上。若某一电流的实际方向已知时,一般选其实际方向为参考正方向。

在选用导线截面时,常常用到所谓电流密度这一物理量。我们把导体单位横截面积上通过的电流称为电流密度,用字母 J 表示,即

$$J = \frac{I}{A} \quad (1-2)$$

可见,同一电流 I 通过导体时,当导体的横截面积 A 越小,电流密度 J 越大。电流密度的单位为 A/m^2 或 A/mm^2 。

2. 电压与电位 电路中的电荷能够从某一点(或某一端)有规则地移动到另一点(或另一端)而形成电流,是由于电场力对它们做功的结果。在图 1-3 中,极板 A 带正电,极板 B 带负电, A 、 B 间存在电场。当用导线把极板 A 、 B 与负载(灯泡)相连时,在电场力的作用下,正电荷就要从极板 A 经灯泡流向极板 B ,从而形成电流使灯泡发光。

电场力把正电荷从电路中的 A 端移到 B 端所作的功 W_{AB} 与被移动的电量 Q 的比值,称为 A 、 B 两端间的电压,用 U_{AB} 来表示,即

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q} \quad (1-3)$$

A 、 B 两端间的电压，在数值上等于电场力把单位正电荷从 A 端移到 B 端所作的功。

在国际单位制 (SI) 中，电压的单位为 V 。当电场力把 $1C$ 的电量从一点移到另一点所作的功为 $1J$ 时，则该两点间的电压为 $1V$ 。常用较大的电压单位为 kV ，较小的电压单位为 mV 或 μV 。它们之间的换算关系如下

$$1kV = 10^3 V$$

$$1mV = 10^{-3} V$$

$$1\mu V = 10^{-6} V$$

在电子线路及一些复杂的电路分析中，往往也

采用电位与电位差的概念。由于电场力作功的特性与重力做功相似，因此，与引入重力位能（势能）一样，我们也可以认为电荷在电场里任何一个位置时，都具有一定的电位能，而电场力所作的功就是电位能改变的量度。我们任选一点作为参考点，并令它的电位为零，则电场力把单位正电荷从电场中的某一点 A 移到参考点所作的功在数值上就等于该点的电位，记为 U_A ，即

$$U_A = \frac{W_A}{Q} \quad (1-4)$$

在电场中某两点间的电压，就是这两点间的电位差，即

$$U_{AB} = U_A - U_B = \frac{W_A}{Q} - \frac{W_B}{Q} = \frac{W_A - W_B}{Q} = \frac{W_{AB}}{Q} \quad (1-5)$$

电位的单位与电压相同，也是 V 。

电压的方向（实际方向）通常规定为：电场力移动正电荷由高电位端到低电位端的方向，即电位降落的方向。同电流一样，电压的参考正方向也可以预先标定。当实际方向与所标正方向一致时，电压为正值；反之，为负值。为了方便起见，在外电路常常使电压和电流两者的参考方向一致，这样在电路图上有时就只需标明一个参考方向（电流或电压）。

应当指出，在电路中不指定参考点而谈论电位是没有意义的，也就是说，参考点选得不同，电路中各点的电位值随着改变，但任意两点间的电压值是不变的。电位参考点（零电位点）原则上是可以任意选择的。在理论研究上选择离电场“无限远”处为零电位点，在工程上常选大地为电位参考点。因为地球也是导体，且电荷容量非常之大，不受局部电荷量变化的影响。参考点在电路图中称为“接地”。在电子电路中，则常选一条特定的公共线或机壳作为参考点，这条公共线常是许多元件的汇集处。

如图 1-4 所示有两个电源，一个 $5V$ ，另一个 $2V$ ，把它们顺向联接起来。如将 C 点接地，则

$$U_A = 7V, U_B = 2V, U_C = 0V$$

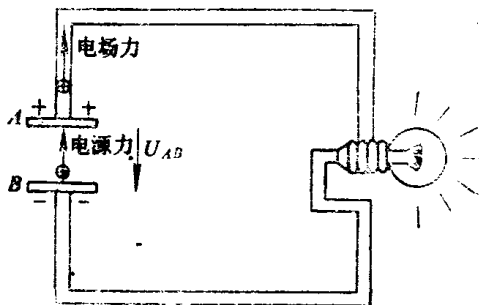


图1-3 电荷的回路

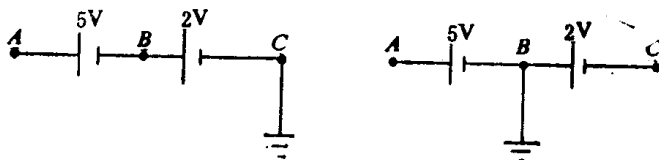


图1-4 电路中各点的电位与参考点有关

$$U_{AC} = U_A - U_C = 7\text{V} - 0\text{V} = 7\text{V}$$

如将 B 点接地, 则

$$U_A = 5\text{V}, U_B = 0\text{V}, U_C = -2\text{V}$$

$$U_{AC} = U_A - U_C = 5\text{V} - (-2\text{V}) = 7\text{V}$$

即参考点不同, 电路中各点电位值不同。但电路中任意两点间的电压值是不变的。

3. 电动势 如前所述, 电场的存在是产生电流的条件。然而, 仅有电场的存在, 不可能在电路中产生持续的电流。如图 1-3 所示, 随着正电荷从极板 A 流向极板 B 与负电荷中和, 使两极板 A 、 B 间的电位差逐渐减小到零, 电流就终止了。为了维持电流不断地在电路中流通, 应使 A 、 B 间的电位差保持一定, 也就是要使 B 极板上所增加的正电荷经过另一途径 (如两极板间) 送回到极板 A 上, 为此必须克服 A 极板上正电荷的排斥力和 B 极板上负电荷的吸引力。能够提供这种非电场力, 即电源力的装置就是电源。

对于同一电源, 电源力把一定量的正电荷从负极 (低电位端) 移送到正极 (高电位端) 所作的功是一定的。但对不同的电源来说, 把等量的正电荷从负极移送到正极所作的功一般是不同的。在移送相等电量的情况下, 电源力作的功越多, 电源把其它形式的能量转换为电能的本领就越大。电源的这种本领叫电源的电动势, 简称电动势, 用字母 E 表示。

电源的电动势 E_{BA} , 在数值上等于电源力把单位正电荷从电源的低电位端经由电源内部移送到高电位端所作的功, 即

$$E_{BA} = \frac{W_{BA}}{Q} \quad (1-6)$$

电动势的单位也是 V 。

应当指出, 电动势与电压的单位相同, 但两者的概念是有差别的。电压是电场中两点之间的电位差, 表示电场力移动电荷作功的能力。而电动势是指电源内部的非电场力即电源力移送电荷作功的能力。

综上所述, 在闭合回路中, 只要有电源存在, 就能产生一持续电流。在电源内部, 正电荷由低电位端被推向高电位端, 把其它形式的能量转变为电场的能量。在外电路中, 正电荷由高电位端移向低电位端, 把电能转换为其它形式的能量。在电流通过电路的同时, 进行着能量的传输和转换。

电动势的方向 (实际方向) 规定为: 电源力推动正电荷在电源内由负极到正极的方向, 即电位升高的方向。

由此可知, 电源电动势的实际方向与其两端电压的实际方向是相反的。

§ 1-2 电阻·欧姆定律

一、电阻

电流在导体内流动时要受到阻力。例如在金属导体中, 自由电子作有规则的定向运动时, 由于带电粒子之间及带电粒子与原子之间相互碰撞而受到阻碍。表征导体对电流呈现阻碍作用的物理量称为电阻, 用字母 R 表示。

如果在导体两端加上 1V 电压, 流过导体的电流为 1A , 那么, 这段导体的电阻就是 1Ω 。

较大的电阻单位有kΩ或MΩ，其换算关系如下：

$$1\text{k}\Omega = 10^3 \Omega$$

$$1\text{M}\Omega = 10^6 \Omega$$

通过实验知道，在一定温度下，导体电阻的大小与导体的长度 l 成正比，与导体的横截面积 S 成反比，并与导体材料的性质有关，即

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1-7)$$

式中 l ——导体长度，单位为 m；

A ——导体截面积，单位为 m^2 ；

ρ ——比例常数，称为电阻率，与导体的材料有关，单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

表 1-1 中列出了一些常用导体材料在 20°C 时的电阻率。

表 1-1 几种常用金属材料的电阻率和电阻温度系数 (20°C 时)

材 料 名 称	电阻率 $\rho / (\Omega \cdot \text{m})$	电阻温度系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$
银	0.0165×10^{-6}	0.0038
铜	0.0175×10^{-6}	0.0040
铝	0.0283×10^{-6}	0.0042
钨	0.0551×10^{-6}	0.0045
铂	0.105×10^{-6}	0.00389
低碳钢	0.12×10^{-6}	0.0042
锰铜	0.42×10^{-6}	0.000005
康铜	0.49×10^{-6}	0.000005
铸铁	0.5×10^{-6}	0.001
镍铬铁合金	1.12×10^{-6}	0.00013
铝铬铁合金	1.35×10^{-6}	0.00005
碳	10×10^{-6}	-0.0005

从表 1-1 可以看出，银的电阻率最小，导电性能最好。但它价格昂贵，不适于作一般的导电材料，只在必需的地方，如接触器、继电器等的触头才用银来制造。铜和铝的电阻率也很小，通常用来制造导线。铝的价格低廉，且我国铝的储量丰富，应尽量以铝代铜。我国的架空导线常用铝绞线和机械强度较高的钢心铝绞线。工厂中使用的电线有铜心的，也有铝心的。

电阻的倒数称为电导，用字母 G 表示，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-8)$$

电导的单位是 S。

导体的电阻不但与导体的性质、几何尺寸有关，还与温度有关。实验证明，大多数金属在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 内，电阻随温度变化的关系可由下式决定。

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)] \quad (1-9)$$

式中 α ——电阻温度系数，它等于温度每变化 1°C 时，每欧电阻的变化量，单位为 $1/^\circ\text{C}$ ；

R_2 ——温度为 t_2 时的电阻；

R_1 ——温度为 t_1 时的电阻。

表1-1同时列出了常用材料的电阻温度系数。由表中可以看出,大多数金属材料的电阻温度系数是正的,它们的阻值随着温度的上升而增加,如银、铜、铝等。锰铜、康铜的电阻温度系数很小,常用来制作标准电阻和电工测量仪表中的附加电阻。铂的电阻温度系数很大,且熔点很高,可制成铂电阻温度计,用来测量电机运转时内部的温度。

另一类材料的导电性能很差,其电阻率很大,通常大于 $10^9 \Omega \cdot \text{m}$,它们对电流有绝缘的作用,称为绝缘体,又称电介质。常用绝缘材料有橡胶、玻璃、云母、陶瓷、胶木、塑料等。

导电能力介于导体和绝缘体之间的材料称为半导体。关于半导体的特性及其应用,将在第六章介绍。

二、一段电阻电路的欧姆定律

一段电阻电路的欧姆定律又称无源支路欧姆定律。它讨论的是在一段不含电源仅含电阻的支路上电压与电流之间的相互关系。

实验指出,流过电阻的电流与加在电阻两端的电压成正比,而与电阻值成反比,这个关系就是欧姆定律。它是电路的基本定律之一。

对图1-5所示的电路,其电压和电流的正方向下,上述关系可用公式表示为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-10)$$

在上述关系式中,电压的单位为V,电阻单位为 Ω 时,电流的单位为A。

如果加在电阻两端的电压上升,电阻中流过的电流也成正比地上升,即符合欧姆定律,这种电阻称为线性电阻。

我们可测量电阻两端的电压值和流过电阻的电流值,绘制出一条反映电压与电流之间关系的曲线,称为这个电阻的伏安特性曲线,简称伏安特性。线性电阻的伏安特性如图1-6所示,是一根通过原点的直线。

如果电阻两端的电压与电阻中的电流不是正比关系,即不符合欧姆定律,这样的电阻称为非线性电阻。非线性电阻的伏安特性不是直线而是一条曲线,图1-7所示为晶体二极管的正向伏安特性。白炽灯丝、半导体二极管及避雷器中的砂砾陶,都是非线性电阻元件。

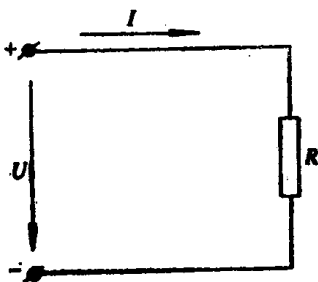


图1-5 一段电阻电路

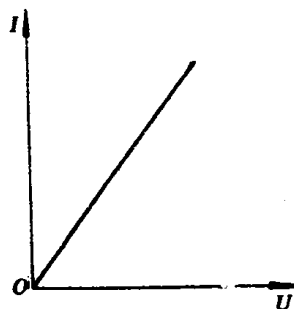


图1-6 线性电阻的伏安特性

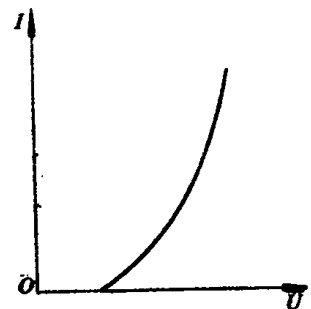


图1-7 晶体二极管的正向伏安特性

三、全电路的欧姆定律

图1-8所示为一最简单的全电路,它由电源、负载和联接导线组成。电源的电动势为 E ,一般电源内部也有电阻,称为内电阻,用 R_i 表示,如忽略联接导线的电阻不计,负载电阻

R 就是外电路的电阻。

当电路闭合时，电路中有电流流过，同时将发生能量的转换。在电源内，电源力不断地克服电场力对正电荷做功，使正电荷的电位能升高，将非电能转换为电能。在外电路中，正电荷在电场力作用下，不断地通过负载，使正电荷的电位能降低，将电能转换为其它形式的能。由于电源存在内阻，当电荷在内电路中移动时，将一部分电能转换为无用的热能消耗掉。根据能量守恒原理，在电路中，非电能转换成的电能应等于电能转换成的非电能，即有

$$A = A_1 + A_i$$

其中，非电能转换成的电能为 $A = EQ$ ；外电路取用的电能为 $A_1 = UQ$ ， U 为外电路上的总电压降，又称电源的端电压；电源内阻上所消耗的电能为 $A_i = U_i Q$ ， U_i 表示电源内部的电压降。由此可得电路的能量平衡方程式为

$$EQ = UQ + U_i Q$$

两边同除以 Q ，即可得出

$$E = U + U_i \quad (1-11)$$

根据式 (1-11) 及一般电阻电路的欧姆定律可得

$$E = IR + IR_i$$

或

$$I = \frac{E}{R + R_i} \quad (1-12)$$

式 (1-12) 就是全电路的欧姆定律。它表明：在闭合电路中，电流的大小与电源的电动势成正比，而与整个电路的电阻成反比。

式 (1-12) 还可写成

$$IR = E - IR_i$$

或

$$U = E - IR_i \quad (1-13)$$

上式表明，由于电源内阻的存在，电源两端的电压 U 要随电流 I 的增大而下降，且内阻越大，电源输出电压随电流的变化也越大。

在一般情况下，电源的电动势和内阻可认为是常量。因此，电源供给的电流越大（即所谓负载越大），则电源的端电压 U 越低；反之，电流 I 越小（即负载越小），则端电压 U 越高。当 $I = 0$ ，即电路断开时，电源的端电压 U 等于电动势 E 。

电源的端电压 U 与电源输出的电流 I 之间的关系，即 $U = f(I)$ ，称为电源的外特性。在式 (1-13) 中，如果 E 和 R_i 不变，则可绘出电源的外特性曲线为一条向下倾斜的直线，如图 1-9 所示。

若电源的内阻较小，则随着输出电流的逐渐增大，而电源的端电压下降很少，这说明电源的外特性较好（即电源保持端电压恒定的能力较强）；反之，若电源的内阻较大，则电源的外特性较差。

若电源的内阻 $R_i \approx 0$ ，可以忽略不计，此时输出电流大小发生变化，而电源的端电压

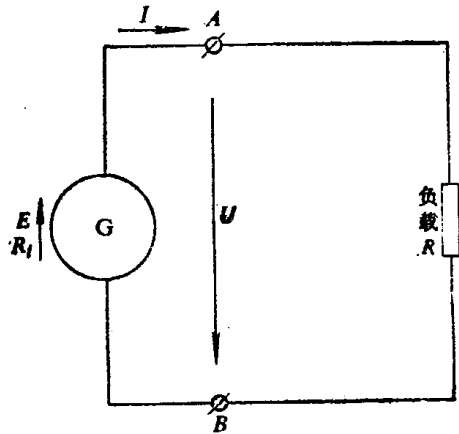


图1-8 具有一个电源的全电路

总保持基本不变, 即 $U = E$ 。我们把具有不变电动势且内阻为零的电源称为理想电压源, 或简称为恒压源。

一个实际的电源总具有一定的内阻, 因此理想电压源实际上是不存在的。但当电源的内阻 R_i 远远小于负载电阻 R_L 时, 则可近似地把它看成恒压源。例如, 接在电力网内的任何一个用电设备, 都可从电源插口获得 220 V 标准电压, 因此, 除该用电设备以外的整个电力网, 可以近似地被看成是一个理想电压源。

对于一个如图 1-10 a 所示的实际电源 (直流发电机), 可以用恒压源 E 与一个内阻 R_i 相串联的电路来等效, 这一等效电路简称为电压源, 如图 1-10 b 所示。

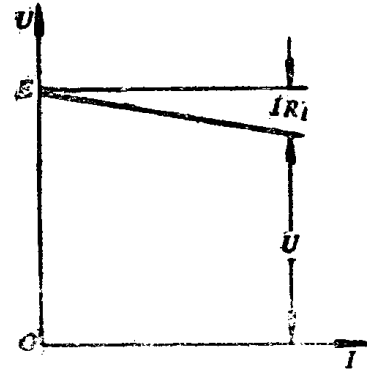


图 1-9 电源的外特性曲线

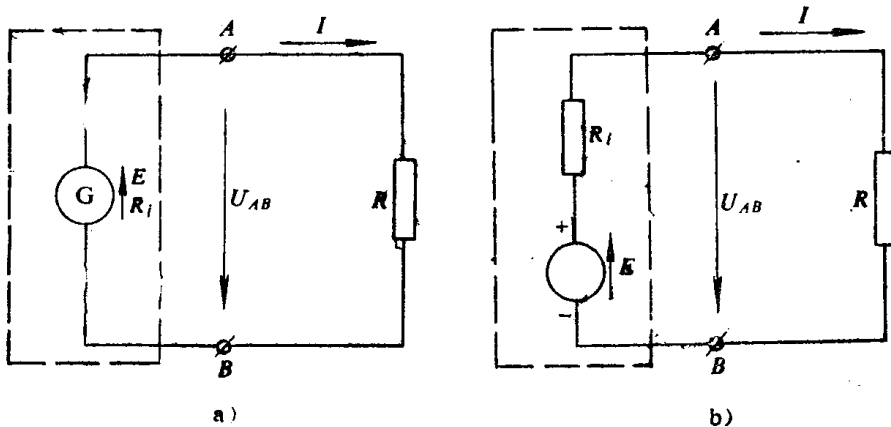


图 1-10 一个实际电源等效为电压源

a) 实际电源 b) 等效电压源

§ 1-3 电功与电功率

在一个闭合电路中, 存在着能量的转换。电源是产生电能的。当电流通过用电设备时, 电能就要发生转换, 也就是说电流要做功。电源供给的电能与负载所取用的电能都是用电流所作电功的多少来度量的。

电动势和电压是推动电流的原动力。在电源内, 电源力所作的电功为 W_E , 由式 (1-6) 可知

$$W_E = EQ = EIt \quad (1-14)$$

负载将电能转换为其它形式的能, 此时, 电场力所作的电功为 W , 由式 (1-3) 可知

$$W = UQ = UIt \quad (1-15)$$

在电源内部还有一部分电能变为无用的热能损耗掉, 其电功记为 W_i

$$W_i = U_i Q = U_i It \quad (1-16)$$

且

$$W_E = W + W_i \quad (1-17)$$

在工程上往往需要了解电流做功的快慢即能量转换的速率，我们把电流所作的功和完成这些功所需时间的比值称为电功率，用字母 P 表示。

单位时间内电源将非电能转换成电能的速率为

$$P_E = \frac{W_E}{t} = \frac{EIt}{t} = EI \quad (1-18)$$

负载中电能转换成非电能的速率为

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UIt}{t} = UI \quad (1-19)$$

内电路中损耗的电功率为

$$P_i = \frac{W_i}{t} = \frac{U_i It}{t} = U_i I \quad (1-20)$$

用 t 除式 (1-17) 的两边，得到电路中的功率平衡方程式为

$$P_E = P + P_i \quad (1-21)$$

当电功的单位为 J ，时间的单位为 s 时，电功率的单位就是 W 。

电功率的较大单位是 kW ，较小单位是 mW ，其换算关系如下：

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

$$1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$$

在实际计算电能时，时间以 h 为单位，而功率以 kW 作单位，这样实用的电能单位就是 $kW \cdot h$ 。 $1 \text{ kW} \cdot h$ 俗称 1 度电。 $1 \text{ kW} \cdot h = 3.6 \text{ MJ}$ 。

例1-1 某住户有三盏电灯，两盏 $60W$ ，平均每天用电 4 h ；另一盏为 $15W$ ，平均每天用电 5 h ，计算每月耗电多少度（每月按 30 天计）？

解：

$$P_1 = 2 \times 60W = 120W = 0.12 \text{ kW}$$

$$P_2 = 15W = 0.015 \text{ kW}$$

$$t_1 = 4 \times 30 \text{ h} = 120 \text{ h}$$

$$t_2 = 5 \times 30 \text{ h} = 150 \text{ h}$$

$$W = P_1 t_1 + P_2 t_2 = (0.12 \times 120 + 0.015 \times 150) \text{ kW} \cdot \text{h} = 16.65 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

该住户每月耗电 16.65 度。

§ 1-4 电阻的串联与并联

在实际的线路中，往往电源和负载都不止一个，它们根据不同的需要按一定的联接方式联接起来。其中最基本的联接方式是串联和并联。本节介绍电阻的串并联及其应用。

一、电阻的串联及其分压

电路中各电阻一个接一个不分支地顺序相联，就叫做电阻的串联。如图 1-11 所示电路是由三个电阻串联组成的。

串联电路的基本特点是

(1) 流过串联电路中各电阻上的电流相同。

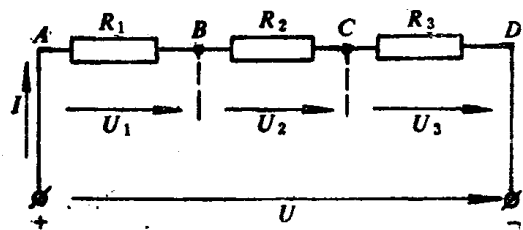


图1-11 电阻的串联

(2) 串联电路两端总电压等于各电阻上的电压之和, 即

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (1-22)$$

(3) 几个电阻相串联, 可用一个等效的总电阻来代替。“等效”的意思就是, 当用这个电阻替换几个串联电阻时, 若加在电路两端的电压不变, 则电路中的电流也应保持不变。

将式 (1-22) 两边同除以 I , 并令 $U/I = R$, 则可得

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (1-23)$$

即串联电路中总电阻等于各电阻之和。

根据串联电路的特点可知, 流过各串联电阻的电流 $I = U/(R_1 + R_2 + R_3)$ 相同, 但各电阻上的电压并不相等, 由欧姆定律可得各电阻上的电压和总电压之间的关系如下:

$$U_1 = \frac{R_1}{R} U, \quad U_2 = \frac{R_2}{R} U, \quad U_3 = \frac{R_3}{R} U$$

即

$$U_n = \frac{R_n}{R} U \quad (1-24)$$

上式就是串联电路的分压公式。电阻大的分压大, 电阻小的分压小。

电阻串联在电工技术中应用很多。当负载的额定电压低于电源电压时, 可串联一个电阻以降低一部分电压。有时为了限制负载中流过太大的电流, 可在电路中串联一个限流电阻, 或串联变阻器达到调节电流的目的。另外在电工测量中还广泛使用串联电阻的方法来扩大电压表的量程。

例1-2 有一台直流电动机, 电机绕组的额定电流为 50 A , 电阻 $R_s = 0.4 \Omega$, 接在 $U = 220 \text{ V}$ 的电源上, 试计算启动电流。

解: 如果直接启动, 则起动电流为

$$I_0 = \frac{U}{R_s} = \frac{220}{0.4} \text{ A} = 550 \text{ A}$$

此电流大大超过了电动机的额定电流, 这是不允许的。因此, 启动时, 必须在电路中串联启动变阻器来减小启动电流。通常把启动电流限制为电动机额定电流的 $1.5 \sim 2.5$ 倍。

我们在电路中串联 $R_0 = 1.8 \Omega$ 的启动电阻后, 启动电流减小为

$$I_0 = \frac{U}{R_s + R_0} = \frac{220}{0.4 + 1.8} \text{ A} = 100 \text{ A}$$

方可满足启动要求。

例1-3 在许多电子设备中, 由于输入电压太高, 常常采用串联电阻组成的分压器, 来分取部分电压。在图1-12所示的分压器电路中, 已知输入电压 $U = 12 \text{ V}$, $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 8 \text{ k}\Omega$, 试计算 R_1 、 R_2 上分得的电压各为多少?

解: 由图1-12的串联电路可求得

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U = \frac{2}{2 + 8} \times 12 \text{ V} = 2.4 \text{ V}$$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U = \frac{8}{2 + 8} \times 12 \text{ V} = 9.6 \text{ V}$$

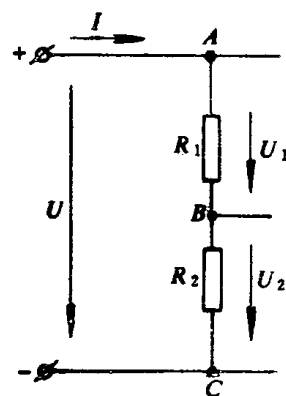


图1-12 例1-3的电路

二、电阻的并联及其分流

电路中各个电阻联接在共同的两个端点之间，使每个电阻承受同一电压，这种联接方式叫做电阻的并联。图1-13是由三个电阻组成的并联电路。

并联电路的基本特点是：

(1) 各并联电阻两端的电压为同一电压 U 。

(2) 并联电路中的总电流等于各支路电流之和。即

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (1-25)$$

(3) 多个电阻并联时，可用一个等效的总电阻来代替。令 $I = U/R$ ，并由式 (1-25) 可得

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

将上式两边同除以 U ，则有

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (1-26)$$

即并联电路中总电阻的倒数等于各并联电阻的倒数之和。

根据并联电路的特点可知，各并联支路两端承受的电压 $U = IR$ 相同，但流过各并联支路上的电流不相等，由欧姆定律可得各并联支路的电流和总电流之间的关系如下：

$$I_1 = \frac{R}{R_1} I, \quad I_2 = \frac{R}{R_2} I, \quad I_3 = \frac{R}{R_3} I$$

即

$$I_n = \frac{R}{R_n} I \quad (1-27)$$

上式就是并联电路的分流公式。电阻小的支路分到的电流大，电阻大的支路分到的电流小。

当只有两个电阻并联时，其等效电阻为

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-28)$$

两个电阻 R_1 和 R_2 相并联，通常可记为 $R_1 // R_2$ 。

两个电阻并联时，各支路的电流分别为：

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I, \quad I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \quad (1-29)$$

在电工测量中，广泛应用并联分流的作用用来扩大电流表的量程。在电工技术中，各负载通常都采取并联运行方式。因为负载在串联时，若某一负载发生变化，也将引起串联电路上的其它负载的电压、电流发生变化。如将多盏电灯相串联，则当一盏灯断开，其它的灯都将同时熄灭，所以对照明负载实际上都是并联供电。其它负载，如电炉、电烙铁、电动机及家用电器等都是并联在线路上的。由于加在各并联支路两端的电压相等，所以当我们从并联电路中接通或断开某负载时，不会对其它正在工作着的用电设备发生影响。

例1-4 有一台直流电动机、一只电炉和一组电灯（11盏），并联在电压为 220V 的线路上，如图1-14所示。电动机取用的功率为 1760W，电炉的功率为 660W，每盏电灯的功率为

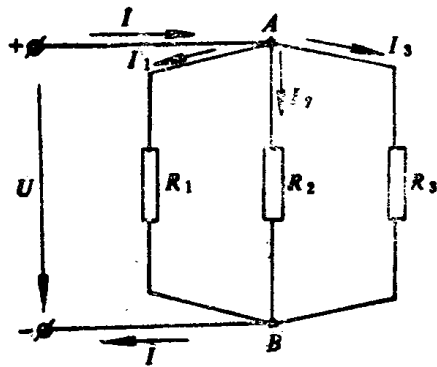


图1-13 电阻的并联

10W, 求线路总电流。

解: 电动机取用的电流为

$$I_1 = \frac{P_1}{U} = \frac{1760}{220} \text{ A} = 8 \text{ A}$$

电炉取用的电流为

$$I_2 = \frac{P_2}{U} = \frac{660}{220} \text{ A} = 3 \text{ A}$$

电灯组取用的电流为

$$I_3 = \frac{40 \times 11}{220} \text{ A} = 2 \text{ A}$$

线路中取用的总电流为

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = (8 + 3 + 2) \text{ A} = 13 \text{ A}$$

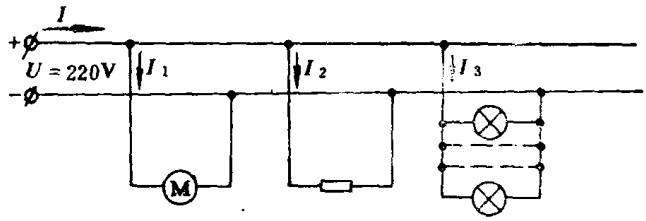


图1-14 例1-4的电路

三、混联

如果在一个电路中, 既有电阻的串联, 又有电阻的并联, 这种电路就称为混联电路。混联电路在实际应用中经常遇到, 只要运用前述的电阻串联和并联的原理, 即可对混联电路进行分析与计算。

一个电路, 无论有多少电阻, 结构有多么复杂, 只要能用串并联方法简化为无分支的电路, 就叫简单电路, 否则叫做复杂电路。

例1-5 如图1-15所示有两盏电灯并联在220V的电源上, 其中一只的额定值为220V、100W, 另一只为220V、40W, 两根输电线的电阻各为2Ω。求总电流, 通过各灯泡的电流、负载端电压, 各部分功率及总功率。

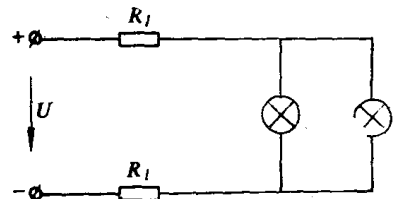


图1-15 例1-5的电路

解: 此电路是一个混联电路。要计算线路的总电流, 应将原电路逐步化简。

先求两灯泡的并联等效电阻:

因为

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

所以

$$R_1 = \frac{U^2}{P_1} = \frac{220^2}{100} \Omega = 484 \Omega$$

$$R_2 = \frac{U^2}{P_2} = \frac{220^2}{40} \Omega = 1210 \Omega$$

$$R_D = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{484 \times 1210}{484 + 1210} \Omega = 346 \Omega$$

电路的总等效电阻为

$$R = R_D + 2R_1 = (346 + 4) \Omega = 350 \Omega$$

总电流

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{350} \text{ A} = 0.63 \text{ A}$$

负载端电压

$$U_D = IR_D = 0.63 \times 346 \text{ V} = 218 \text{ V}$$

输电线压降

$$U_1 = 2IR_1 = 0.63 \times 4 \text{ V} = 2.52 \text{ V}$$

各灯泡电流