

高等学校教材

电工电子学教程

第二版

► 畅玉亮 张国光 主编



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

电工电子学教程

第二版

畅玉亮 张国光 主编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

电工电子学教程/畅玉亮, 张国光主编. —2 版. —北京:
化学工业出版社, 2005. 6

高等学校教材

ISBN 7-5025-7194-9

I. 电… II. ①畅…②张… III. ①电工学-高等学校-教材
②电子学-高等学校-教材 IV. ①TM1②TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 060570 号

高等学校教材

电工电子学教程

第二版

畅玉亮 张国光 主编

责任编辑: 杨 菁

文字编辑: 钱 诚

责任校对: 陈 静 战河红

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 19¼ 字数 475 千字

2005 年 8 月第 2 版 2005 年 8 月北京第 5 次印刷

ISBN 7-5025-7194-9

定 价: 34.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

第二版前言

本次修订,吸收了国外同类教材电路分析的理论和方法,充实了电路分析部分的内容。在传统的节点分析法中,增加了关于超节点(super node)的概念,以及运用超节点求解电路的节点分析法。与国内目前流行的教材相比,关于电压源关联节点的处理方法更为简洁,概念性更强,不再使用替代定理设置新的辅助变量,可以少列一个方程,解题过程更为简单。同样地,在传统的网孔分析法中,引入了关于超网孔(super mesh)的概念,可以达到同样的效果。这些内容较为新颖,试图使本教材能够做到与时俱进,具有更强的生命力。涉及到电流、电压参考方向的内容一律改为用有向线段(箭头)表示电流的参考方向,而用“+”、“-”号表示电压的参考极性,进一步增强电压是电位降,电动势是电位升的概念。这样做也与国外教材取得一致,便于学生阅读外文参考书。

在交流电路部分,强调了相量法的数学变换作用,即把三角函数映射成复变函数的过程。突出了相量法把三角函数化为复数运算的功能,以及拓扑约束(KCL、KVL)和元件约束(各类元件的伏安特性)在相量法中的表达方式和运算方法。

对一阶电路的暂态分析,按照动态电路的零输入响应、零状态响应和全响应的顺序,重新编排了内容,在各小节的划分上更注重过渡过程的物理本质和学生的认识规律,并更换了部分习题。

考虑到交流电动机的变频调速已经成为现代电气传动技术的核心内容,本次修订把电动机的变频调速作为电动机部分的重要内容之一,力图在基本原理和实际应用方面帮助非电专业的本科生打下较完整的变频调速的理论基础,以满足生产实践和进一步深入学习的需要。基于这一想法,对三相异步电动机的内容做了较大改动,删去了一些陈旧的内容,增添了变频调速的基础理论。

在安全用电部分增加了三相五线制供电线路的内容,对现代电气控制和工厂供电的安全措施做了更详细的介绍,试图使本书在实用性上更加满足生产实践的需要。

在基本放大电路部分,强调了静态分析和动态分析的方法。在近似计算方法中,重点在于依据 KCL、KVL,通过直流通路和交流通路对不同结构的放大电路进行分析,而不是推导通用公式。

实验部分增加了交流电动机变频调速的内容,试图使学生熟练掌握变频调速器的应用,满足机械类专业本科生对现代电气传动技术的需要。

全书基本上重新编写一遍,各章节内容均有增删。总的期望在于,使本书在知识结构上更加适合工科院校非电专业的本科学生学习电工电子技术课程以及生产实践中的需要。

编者

2005年2月

目 录

第一章 电路的基本概念与基本定律	1
第一节 电路的组成	1
第二节 电路的基本物理量	2
第三节 欧姆定律	6
第四节 电路的状态	7
第五节 基尔霍夫定律	9
第六节 电路中电位的计算	12
本章小结	14
习题一	14
第二章 电路的分析方法	17
第一节 电阻的串联、并联与混联	17
第二节 电压源与电流源	23
第三节 网孔分析法	26
第四节 节点分析法	30
第五节 叠加原理	33
第六节 戴维南定理及诺顿定理	36
本章小结	39
习题二	40
第三章 正弦交流电路	44
第一节 正弦电压与电流	44
第二节 正弦量的相量表示法	47
第三节 电阻元件、电感元件与电容元件	52
第四节 电阻元件的交流电路	55
第五节 电感元件的交流电路	56
第六节 电容元件的交流电路	59
第七节 电阻、电感与电容元件串联的交流电路	61
第八节 复阻抗的串联与并联	65
第九节 复杂正弦交流电路的分析与计算	70
第十节 功率因数的提高	71
第十一节 三相交流电路	73
本章小结	81
习题三	83
第四章 一阶电路的暂态分析	87
第一节 换路定律与电压、电流初始值的确定	87

第二节	直流激励下的零输入响应	91
第三节	直流激励下的零状态响应	98
第四节	一阶线性电路暂态分析的三要素法	103
本章小结		107
习题四		108
第五章	三相异步电动机及继电接触控制	111
第一节	三相异步电动机的构造	111
第二节	三相异步电动机的转动原理	113
第三节	三相异步电动机的电磁转矩	117
第四节	三相异步电动机的机械特性	119
第五节	三相异步电动机的起动	122
第六节	三相异步电动机的调速	126
第七节	三相异步电动机的铭牌数据和选择	130
第八节	三相笼式异步电动机的继电接触器控制系统	134
本章小结		143
习题五		143
第六章	安全用电	146
第一节	概述	146
第二节	供电线路导线和保护电器的选择	149
第三节	防触电的安全技术	153
第四节	防雷电	155
第五节	电气防火和防爆	157
第七章	半导体二极管及整流电路	158
第一节	PN 结及其单向导电性	158
第二节	半导体二极管	162
第三节	单相整流滤波电路	165
第四节	硅稳压管与稳压电路	172
本章小结		175
习题七		175
第八章	基本放大电路	182
第一节	晶体三极管	182
第二节	基本交流放大电路的组成	189
第三节	放大电路的图解分析法	191
第四节	近似计算法	198
第五节	放大电路静态工作点的稳定	202
第六节	射极输出器	208
第七节	放大电路中的负反馈	210
第八节	多级放大电路	216
第九节	功率放大电路	218
第十节	场效应管及其放大电路	223

本章小结.....	228
习题八.....	229
第九章 集成运算放大器	240
第一节 集成运算放大器的介绍.....	240
第二节 集成运算放大器的应用.....	243
本章小结.....	253
习题九.....	254
参考答案	257
附录一 电工电子学实验	262
实验一 直流电路的研究.....	262
实验二 单相交流电路的研究.....	263
实验三 三相交流电路的研究.....	266
实验四 三相异步电动机的参数及其继电器控制.....	268
实验五 三相异步电动机的变频调速.....	269
实验六 基本放大电路.....	272
附录二 电工图形号	274
参考文献	297

第一章 电路的基本概念与基本定律

在现代人类生产与生活的各个领域，充满着各种各样的电器设备。这些电器设备尽管用途不同，性能各异，但几乎都是由各种基本电路组成的。所以，学习电路的基础知识，掌握分析电路的基本方法，是学习电工电子学课程的重要内容，也是进一步学习电机、电器和电子技术的基础。

本章主要介绍有关电路的基本概念和定律。通过对本章内容的学习，应能正确应用电路的基本定律；深刻理解电流、电压参考方向的意义；了解电路的负载、空载（开路）与短路三种状态；并能对简单的电阻电路进行分析，正确地计算电路中各点的电位。

第一节 电路的组成

把干电池、灯泡和开关用导线连接起来，就构成了一个简单的电路，如图 1-1 所示。电路中的干电池是提供电能的，称为电源；灯泡是取用电能的，称为负载；而把电源和负载连接起来的开关及导线是中间环节。任何一个电路不论其具体用途和功能如何，也不论其复杂程度如何都可以看成是由电源、负载和中间环节这三部分组成的。通常把中间环节和负载称为外电路，把电源内的电流通路称为内电路。

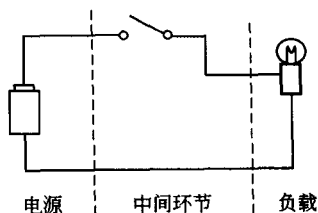


图 1-1 一个简单电路

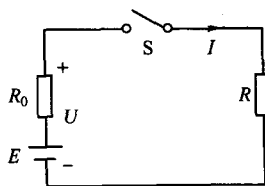


图 1-2 电路

一、电源

电源是把非电能转换成电能的装置。生产和生活实践中有各种不同类型的电源，如：干电池、蓄电池、发电机等。它们在电路中的作用是把其他形式的能（如：化学能或机械能）转换成电能，并提供给电路中的负载。另有一些把某种形式的电能转换成另一种形式电能的装置，例如：应用很广的直流稳压电源，就是把交流电转换成直流电，并在一定条件下保持输出电压稳定的装置。这类装置通常也称为电源。

在电路的分析和计算中，总是使用特定的符号和图形把实际电路画成电路图。例如，图 1-1 的简单电路可以画成图 1-2 的电路。在电路图中，电源部分用电压升（电动势） E 和内电阻 R_0 来表示，而作为负载的灯泡则用一个电阻 R 来表示，开关用 S 来表示。符号“+”和符号“-”，分别表示电源部分输出电压 U 的高电位点和低电位点。电路中的电流 I 在外电路是从高电位点通过负载流向低电位点，在内电路是从低电位点流向高电位点。

二、负载

负载是取用电能的装置，其作用是把电能转换成其他形式的能（如：机械能、热能、光能等）。负载的大小用单位时间内耗用电能的多少来衡量。电路中的负载可以表示成一个电阻，但绝不能简单地认为电阻越大负载也越大。事实上，当电源电压一定时，电阻大的负载取用的电流小，消耗的电能也少；反之，负载电阻越小，取用的电流越大，消耗的电能也越多。

三、中间环节

中间环节在电路中起着传送电能，分配电能和控制整个电路的作用。最简单的中间环节即开关和连接导线（图 1-1）。一个实用电路的中间环节通常还有一些保护和检测装置，复杂的中间环节可以是由许多电路元件组成的网络系统。

可以把电路的作用归纳为以下两个方面。

（1）实现电能的传输和变换

这是电力工程系统要解决的主要问题。它包括发电、输电、配电、电力拖动、电热、电气照明以及交流电和直流电的整流和逆变等。由于电力工程中传输和变换电能的规模很大，因此要尽可能地减少电能传输和变换过程中的损耗，以提高电能的利用率。

（2）实现信号的传递和处理

在现代科学技术领域中，许多信号的传递和处理也是通过各种电路实现的。例如：在生产过程的自动调节及科学实验的自动检测装置中，需要对各种输入信号进行计算、存储和发送；在电信事业中对语言、文字、图像、音乐的播发与接受等，这些重要的任务都是由相应的电路来完成的。电路在实现信号的传递和处理时，虽然也有能量的消耗，但和电力系统相比，能量消耗的规模和数量都很小，人们更关心的是准确地传递和处理信号，保证信号不失真。

思考练习题 1-1

1. 高压线把发电厂、变电所和用电企业连接起来，说明这一电力系统中相对应的电源、中间环节和负载。

2. 以下电气设备中，其主要作用是实现信号的传递和处理的有哪些？

（1）电动机；（2）发电机；（3）数码相机；（4）电冰箱；（5）电视机；（6）计算机

第二节 电路的基本物理量

电路的分析与计算与下面几个物理量密切相关。在介绍这些物理量时，分别引入了电流的参考方向和电压的参考极性，这在电路分析的过程中具有十分重要的意义。

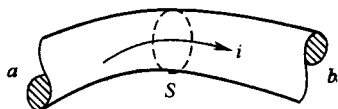


图 1-3 导体中的电流

一、电流强度

电流强度是计量电流强弱程度的物理量。一般地，电荷在导体中的运动速率是随时间变化的，所以，电流的强弱也随时间变化。设在很短的时间 dt 内，通过导体截面 S 的微小电量是 dq ，如图 1-3 所示，则电流为

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

如果通过导体截面的电量不随时间变化，即

$$\frac{dq}{dt} = \text{常数}$$

则称这种电流为恒定电流，简称直流。直流电的电流强度用大写字母 I 表示

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

Q 是在时间 t 内通过导体截面 S 的电量。

电流强度的单位是安培 (A)。在实际应用中，大电流用千安 (kA)，小电流用毫安 (mA) 或微安 (μ A) 表示。它们之间的换算关系是

$$1\text{kA} = 1000\text{A}$$

$$1\text{A} = 1000\text{mA}$$

$$1\text{mA} = 1000\mu\text{A}$$

在工程上，电流强度简称为电流。

流经外电路的电流，其方向总是从高电位点指向低电位点，在直流电路中，电流总是从电源的正极流出，然后，经过负载流入电源的负极。不过，在电路的分析与计算中，当电路比较复杂时，很难预先知道电流在每一段电路中的实际方向。为了方便起见，必须在计算和分析电路之前，对每一段电路任意选定一个方向，作为参考方向或正方向，在电路图中用箭头来表示。当然，选定的参考方向并不一定和实际方向一致，根据计算结果可以验证：如果电流为正值，则说明电流的实际方向与事先选定的参考方向一致；否则，说明电流的实际方向与事先选定的参考方向相反。

请注意，在电路分析中，只有在选定参考方向之后，电流值才有正负之分。

二、电位

电荷在电场中的不同位置所具有的能量（位能）是不同的。单位正电荷在电路中某一点所具有的电位能称为该点的电位。电位的数学表达式是

$$V_a = \frac{W_a}{Q} \quad (1-3)$$

式中 W_a ——电路中 a 点的电位能，J（焦耳）；

V_a ——电路中 a 点的电位，V（伏特）；

Q ——电量，C（库仑）。

电路中各点的电位是相对的，如图 1-4 所示的电路中， a 点的电位高于 b 点，而 b 点的电位又比 c 点的电位高。所以，如果没有一个共同的参照点做标准，就无法确定各点的电位，也无从比较各点电位的高低。

通常，在分析电路时，先选定一个参考点，认为参考点的电位为零，电路中其他各点的电位均与参考点相比较而定。在生产实践中，把大地作为零电位点，凡是机壳接地的设备，机壳的电位也是零。有的电子设备或装置机壳并不接地，而是把许多元件的公共点作为参考点。电路图中参考点的符号是“ $\perp$ ”。电路中，凡是比参考点电位高的各点电位是正电位，比参考点电位低的各点电位是负电位。

图 1-5(a) 中，以 c 点为参考点，则 a 、 b 、 c 三点的电位分别是

$$V_a = 9\text{V}$$

$$V_b = 6\text{V}$$

$$V_c = 0\text{V}$$

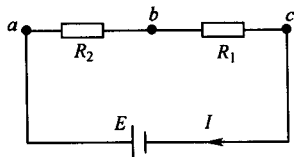


图 1-4 电路中的电位

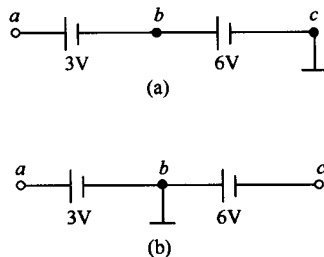


图 1-5 不同参考点下的电位

图 1-5(b) 中, 以 b 点为参考点, 则 a 、 b 、 c 三点的电位分别是

$$V_a = 3\text{V}$$

$$V_b = 0$$

$$V_c = -6\text{V}$$

三、电压

设电路中 a 、 b 两点的电位分别是 V_a 、 V_b , 则 a 、 b 两点的电位差是

$$V_a - V_b = \frac{W_a}{Q} - \frac{W_b}{Q} = \frac{W_a - W_b}{Q} = \frac{W_{ab}}{Q} \quad (1-4)$$

即单位正电荷从 a 点沿任意路径移到 b 点时, 电场力所做的功。 a 、 b 两点的电位差定义为 a 、 b 两点的电压, 记为 U_{ab} , 由式 (1-4) 可知

$$U_{ab} = V_a - V_b = \frac{W_{ab}}{Q} \quad (1-5)$$

电压的单位是伏特 (V), 高电压可用千伏 (kV) 表示, 低电压可用毫伏 (mV) 或微伏 (μV) 表示。它们的换算关系是

$$1\text{kV} = 1000\text{V}$$

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

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

电压的方向规定为从高电位点指向低电位点, 在电路图中分别用符号 “+”、“-” 表示高电位和低电位。在比较复杂的电路中, 往往不能事先知道电路中任意两点间的电压。为了对电路进行分析和计算, 采用任意选定电压参考极性的办法, 先按照电压的参考极性进行计算、分析; 然后, 根据计算结果中电压值的正负, 来判断电压的实际极性和参考极性是否一致, 电压值为正, 则电压的实际极性和参考极性一致, 否则, 电压的实际极性和参考极性相反。

显然, 只有在选定电压参考极性的前提下, 电压值的正负才有意义。

应当指出, 电路中任意两点之间的电压, 与参考点 (零电位点) 的选择无关。例如: 在图 1-5(a) 中, c 为参考点, a 、 c 两点之间的电压为

$$U_{ac} = V_a - V_c = 9 - 0 = 9(\text{V})$$

同样, 在图 1-5(b) 中, b 为参考点, a 、 c 两点之间的电压为

$$U_{ac} = V_a - V_c = 3 - (-6) = 9(\text{V})$$

可见, 对于不同的参考点, 虽然各点的电位发生了变化, 但任意两点之间的电压却没有改变。

四、电功与电功率

电源所做的功称为电功。设在 t 时间内, 正电荷 Q 在内电路沿电压升的方向通过电源 E , 电源力所做的功 W_S 为

$$W_S = EQ = EIt \quad (1-6)$$

电源所做的功, 一部分消耗在内电路, 一部分消耗在外电路。当电流通过内电路时, 在电源内阻 R_0 上消耗了一部分电能 W_0

$$W_0 = U_0 It = I^2 R_0 t \quad (1-7)$$

U_0 是电流经过内阻 R_0 时产生的电压降

$$U_0 = IR_0$$

当电流通过外电路的负载电阻 R 时, 在电阻 R 上消耗的一部分电能为 W_L

$$W_L = UQ = UI t = I^2 R t \quad (1-8)$$

根据能量守恒定律, 电源提供的总能量为

$$W_S = W_0 + W_L = I^2 (R + R_0) t \quad (1-9)$$

电源把非电能转换成电能的速率, 亦即电源在单位时间内产生的电能, 称为电源产生的电功率 P_S

$$P_S = \frac{W_S}{t} = \frac{W_0}{t} + \frac{W_L}{t} = P_0 + P_L \quad (1-10)$$

或

$$P_S = EI = I^2 (R_0 + R)$$

电功率的单位是瓦特, 简称瓦 (W)。

$$1W = \frac{1J}{1s} = \frac{1V \times 1C}{1s} = \frac{1V \times 1A \times 1s}{1s} = 1V \times 1A$$

较大的电功率是千瓦 (kW)

$$1kW = 1000W$$

度量电能的单位是焦耳 (J) 和千瓦·时 (kW·h)

$$1J = 1W \cdot s$$

$$1kW \cdot h = 3.6 \times 10^6 W \cdot s$$

1kW·h 的电能, 通常称为 1 度电。

由于在电路分析中, 采用了参考方向, 所以电流和电压的数值会有正负号, 计算的电功率也会有正负。当电流的参考方向和电压降的方向一致时 (习惯上叫做关联参考方向), 计算出的电功率为正值, 则是消耗掉的电功率; 如果计算出的电功率为负值, 则代表产生的电功率。

【例 1-1】 已知如图 1-6 所示电路中, $R_1 = 50\Omega$, $R_2 = 100\Omega$, $R_3 = 200\Omega$, $E = 350V$ 。求: R_1 、 R_2 、 R_3 各自消耗的电功率及电源产生的电功率。

解: 由欧姆定律可知电路中的电流 I

$$I = \frac{350}{50 + 100 + 200} = 1(A)$$

R_1 消耗的功率

$$P_1 = I^2 \times 50 = 50(W)$$

R_2 消耗的功率

$$P_2 = I^2 \times 100 = 100(W)$$

R_3 消耗的功率

$$P_3 = I^2 \times 200 = 200(W)$$

电源产生的电功率

$$P_S = -EI = -350(W)$$

注意: 本例中, 由于电流的参考方向与电源电压升的方向一致, 亦即与电源电压降的方

向相反,因此在计算电源的功率时必须在公式前使用负号“-”。由计算结果可知,电路中正负功率数值相等,符合能量守恒的规律。

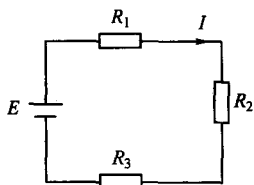


图 1-6

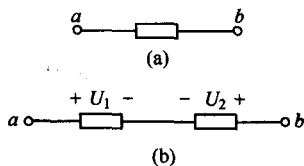


图 1-7

思考练习题 1-2

1. 在图 1-7(a) 中, $U_{ab} = -5\text{V}$, $I = 1\text{A}$, 试标出电流的参考方向和电压的参考极性。
2. 在图 1-7(b) 中, $U_1 = 3\text{V}$, $U_2 = -5\text{V}$, 求: $U_{ab} = ?$

第三节 欧姆定律

通过一个电阻元件的电流 I , 与电阻两端的电压 U 成正比, 而与电阻 R 成反比, 这就是欧姆定律。可以写成如下的形式:

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = IR, \quad R = \frac{U}{I} \quad (1-11)$$

注意, 电阻两端的电压 U , 是指在电流流过的方向上产生的电压降。当电流通过电阻时, 总是从高电位点流向低电位点, 所以, 应用式 (1-11), 必须使电流的参考方向与电压降的方向保持一致, 即采用关联的参考方向。如果采用非关联参考方向, 则式 (1-11) 的前面应该有负号“-”。

对于图 1-8(a) 中的电阻, 有 $I = \frac{U}{R}$ (U 、 I 取关联参考方向)

对于图 1-8(b) 中的电阻, 有 $I = -\frac{U}{R}$ (U 、 I 取非关联参考方向)

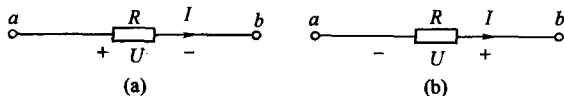


图 1-8 欧姆定律的应用

【例 1-2】 计算图 1-9 中各电阻两端的电压 U 或流过电阻的电流 I 。

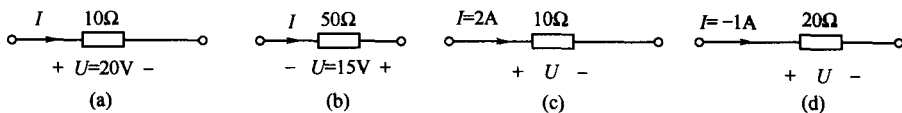


图 1-9

解: 对于图 1-9(a) 有 $I = \frac{U}{R} = \frac{20}{10} = 2(\text{A})$

对于图 1-9(b) 有 $I = -\frac{U}{R} = -\frac{15}{50} = -0.3(\text{A})$

对于图 1-9(c)有 $U=IR=2\times 10=20(\text{V})$

对于图 1-9(d)有 $U=IR=(-1)\times 20=-20(\text{V})$

欧姆定律说明了电阻元件的电流与电压之间的关系, 是对电路进行分析和计算的基本定律之一。由欧姆定律可知: 电阻的符号 R , 不仅代表一种消耗电能的电路元件, 也代表一种电路参数, 具有双重身份。

思考练习题 1-3

1. 图 1-10 所示电路中:
 - (1) 开关 S 闭合时电压 $U_{ab}=?$ $U_{cd}=?$
 - (2) 开关 S 断开时 $U_{ab}=?$ $U_{cd}=?$
2. 计算图 1-11(a) 中的 I 。
3. 计算图 1-11(b) 中的 U_{ab} 。

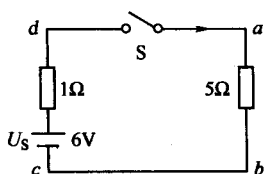


图 1-10

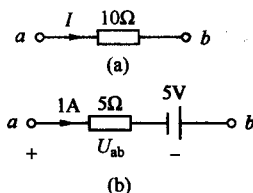


图 1-11

第四节 电路的状态

电路在运行中, 有负载、空载和短路三种状态, 本节将分析这三种电路的运行状态, 并对电路中负载获得最大功率的条件进行讨论。

一、负载状态

当电路被接通, 负载上有电流通过时, 就工作在负载状态 (图 1-12)。通常, 电源的电压升 E 和内阻 R_0 是一定的, 所以, 在负载状态下, 电流的大小将由负载电阻 R_L 决定。

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} \quad (1-12)$$

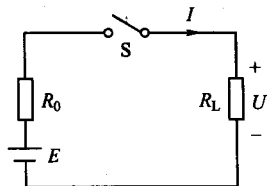


图 1-12 负载和空载状态

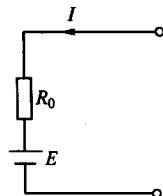


图 1-13 电源作为负载运行

负载上消耗的功率为

$$P = IU = IE - I^2 R_0 = P_E - P_0 \quad (1-13)$$

即负载消耗的功率等于电源产生的功率减去内阻 R_0 上消耗的功率。

电路中的电流不能无限增大, 否则将会损坏电源或用电设备。所以各种电气设备都规定了电流、电压和功率的使用数据, 也就是设备和元器件的额定值。例如: 日光灯的额定电压是 220V, 额定功率是 40W。电器设备在额定值下运行, 称为额定运行状态。

应当注意，电路中的电源元件并不是在任何时候都能产生功率。只有在电源电压升的方向与电流的方向一致时，才能产生功率，这时，乘积 EI 为负值；如果流经电源元件的电流与电源电压降的方向一致，如图 1-13 所示，则电源将吸收功率，说明电源元件实际上是作为负载而运行，这时，乘积 EI 为正值。蓄电池充电的过程就是如此。

二、空载状态

如果把图 1-12 所示电路的开关 S 打开，电路就将处于空载状态。这时外电路相当于一个无穷大的电阻，电路中没有电流。电路断开处两端的电压等于电源的电压升 E ，称为开路电压 U_{OC} ，由于电流为零，所以，电路中既不产生、也不消耗功率。电路的空载状态可表示为

$$\begin{aligned} I &= 0 \\ U_{OC} &= E \\ P &= 0 \end{aligned} \quad (1-14)$$

三、短路状态

当电源的两个端点由于某种原因（人为或事故）被连在一起时，电源就被短路，电流将不再通过负载，这种状态称为电路的短路状态（图 1-14）。在短路状态下，电路所通过的回路中，只剩下很小的内阻 R_0 ，所以，电流将会达到很大的数值，该电流称为短路电流 I_{SC} 。而电源的电压升 E ，全部降落在内阻 R_0 上，对外电路不再输出电压，电源产生的功率全部消耗在内阻 R_0 上，对外电路也不再输出功率。

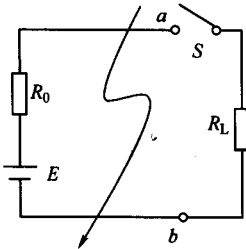


图 1-14 短路状态

短路状态的特征可表示为

$$\begin{aligned} I &= I_{SC} = \frac{E}{R_0} \\ U &= E - I_{SC}R_0 = 0 \\ P &= I_{SC}^2 R_0 \end{aligned} \quad (1-15)$$

因为短路电流很大，并且将在内阻 R_0 上全部转换成热能，所以电源温度会迅速上升以致烧坏电源。因此短路是一种严重事故，应采取措施加以避免和防护。通常在电路中接入熔断器或自动断路器，可以在发生短路事故时，迅速切断故障电路，起到保护电源的作用。

生产实践中，有时为了达到某种目的，可以人为地利用短路的特性。例如：电动机的起动电流很大，为了保护串联在电路中的电流表，可以用一个旁路开关在电动机起动前将电流表两端短路，使起动电流从旁路通过（图 1-15），待电动机起动后，再断开旁路线，恢复电流表的工作。

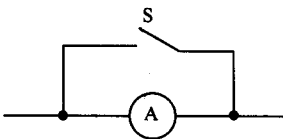


图 1-15 电流表的旁路

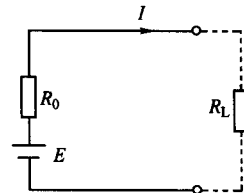


图 1-16 负载电路

四、负载获得最大功率的条件

如果电路的负载电阻无穷大（空载状态）或等于零（短路状态），电源都不能输出功率；

除了这两种情况外, 电源将有功率输出。可见, 对于一个具有一定的电压升 E 和内阻 R_0 的电源, 其输出功率的大小是由负载电阻 R_L 决定的。那么负载电阻在什么条件下才能获得最大功率呢?

如图 1-16 所示电路中, 电压升 E 和内阻 R_0 已确定, 我们讨论负载电阻 R_L 获得最大功率的条件。负载电阻 R_L 获得功率为

$$P_L = I^2 R_L$$

其中

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L}$$

所以

$$P_L = \left(\frac{E}{R_0 + R_L} \right)^2 R_L = \frac{E^2 R_L}{(R_0 + R_L)^2}$$

两边求一阶导数

$$\frac{dP}{dR_L} = \frac{E^2 (R_0 - R_L)}{(R_0 + R_L)^3}$$

令 $\frac{dP}{dR_L} = 0$, 则有

$$R_0 - R_L = 0, R_0 = R_L$$

所以只有当 $R_0 = R_L$ 时, 负载电阻 R_L , 才能获得最大功率 $P_{L\max}$

$$P_{L\max} = \frac{E^2 R_L}{(R_0 + R_L)^2} = \frac{E^2}{4R_0} \quad (1-16)$$

由式 (1-16) 可知: 电路中电源的电压升越大、内阻越小, 输出的功率就越大。但是, 由于负载电阻 R_L 与内电阻 R_0 相等, 所以电源产生的功率只有一半输出到负载上, 另一半消耗在内阻 R_0 上, 效率只有 50%。

在电子技术中, 经常遇到使负载获得最大功率的问题。例如: 要使收音机的扬声器获得最大功率, 就必须使扬声器的电阻与收音机最后一级的电阻接近相等, 这种情况称为阻抗匹配。

思考练习题 1-4

1. 图 1-17 中, 各方框代表电源或负载, 已知: $U=220V$, $I=-1A$, 判断哪些是电源? 哪些是负载?

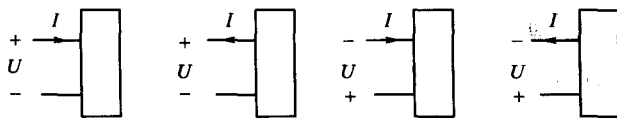


图 1-17

2. 1000W 的电热水器, 额定电压 220V, 如果接在 110V 的电源上, 能取用多少功率?
3. 40W 的白炽灯泡, 电阻为 1200Ω , 求它的额定电压和额定电流。
4. 铭牌标有 220V、100A 的直流发电机, 其额定功率是多少? 如果把它接在 80A 的照明用户上, 发电机是轻载运行还是满载运行? 负载的大小一般指何而言?

第五节 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是电路的基本定律, 是分析和计算电路的理论基础。在研究之前, 先介绍几个与电路结构有关的名词。

- (1) 节点 电路中, 三条或三条以上导线的汇交点。如图 1-18 中所示的 b 、 e 两点。

- (2) 支路 任意两节点之间无分支的一段电路。如图 1-18 中所示的 be 、 $bafe$ 。
 (3) 回路 电路中的闭合路径称为回路。如图 1-18 中所示的 $abcdefa$ 、 $abefa$ 、 $bcdeb$ 。
 (4) 网孔 不包围任何支路的单孔回路称网孔，如图 1-18 中所示的 $abefa$ 、 $bcdeb$ 。

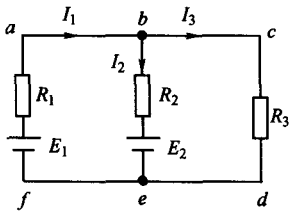


图 1-18 节点、支路与回路

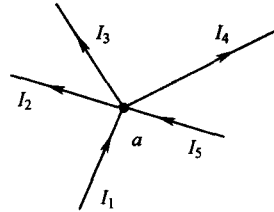


图 1-19 节点电流

一、基尔霍夫电流定律 (KCL)

电路中，在任意瞬间流入任一节点的电流之和，等于流出这个节点的电流之和。对于图 1-19 的节点 a ，有

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

如果规定流出节点的电流取正号“+”，流入节点的电流取负号“-”，则有

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

于是，可以把基尔霍夫电流定律写做一般形式

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

所以，基尔霍夫电流定律还可以表述成：在任一瞬间，一个节点上的电流的代数和恒等于零。

基尔霍夫电流定律是电流连续性在电路中的体现。电流的连续性本质上是物质（电荷）守恒的反映。因为在电路的任意一个节点上，电荷不会自行产生或消灭，也不能出现电荷的积累或减少。

基尔霍夫电流定律是电路中连接到同一个节点的各支路电流必须遵守的约束，这一约束仅与电路的结构有关，而与各支路上的元件性质无关。

二、基尔霍夫电压定律 (KVL)

在任一瞬间，电路的任一闭合回路中，电压升之和等于电压降之和。如图 1-20 所示的闭合回路中，沿回路 $abcdea$ 绕行一周，有

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

如果规定电压降为正，电压升为负，则有

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

所以，基尔霍夫电压定律的一般形式为

$$\sum U = 0 \quad (1-18)$$

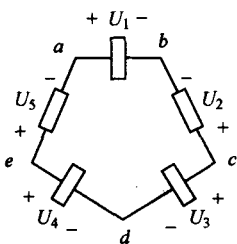


图 1-20 回路电压

也可以表述成：在任一瞬间，电路中任一闭合回路的各部分电压降之代数和恒等于零。

基尔霍夫电压定律，本质上反映了能量守恒的规律，说明电路中任意两点的电压（电位能），仅与这两点的相对位置有关，而与两点间的不同路径无关。图 1-20 中，电压 U_{ad} ，按路径 $abcd$ 计算