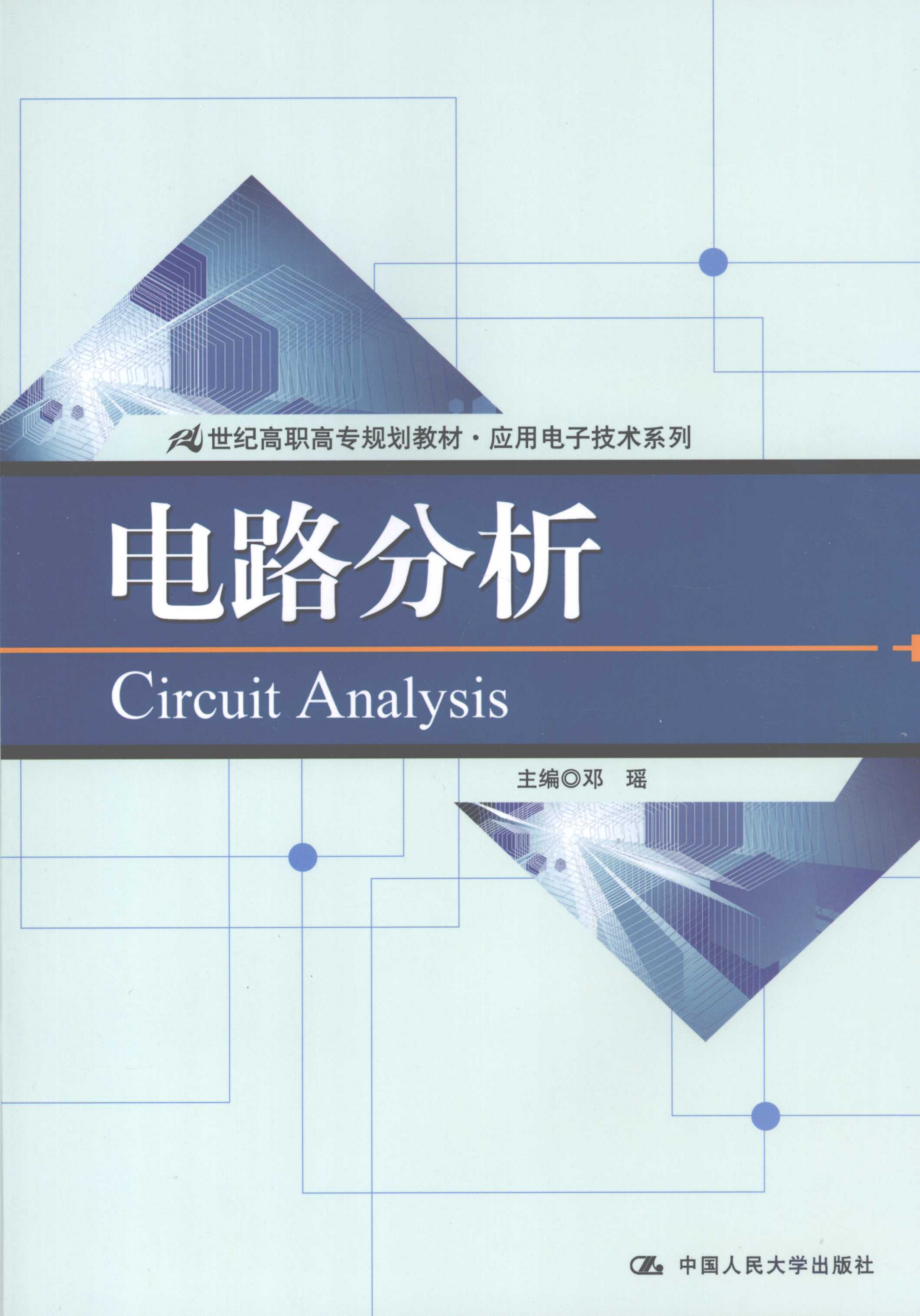




21 世纪高职高专规划教材 · 应用电子技术系列

电路分析

Circuit Analysis

主编◎邓 瑶

 中国人民大学出版社

21 世纪高职高专规划教材·应用电子技术系列

电路分析

主 编 邓 瑶

副主编 郝 杰 徐 毅

中国人民大学出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

电路分析/邓瑶主编

北京:中国人民大学出版社,2009

21 世纪高职高专规划教材·应用电子技术系列

ISBN 978-7-300-10771-4

- I. 电…
- II. 邓…
- III. 电路分析-高等学校:技术学校-教材
- IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 088981 号

21 世纪高职高专规划教材·应用电子技术系列

电路分析

主 编 邓 瑶

副主编 郝 杰 徐 毅

出版发行 中国人民大学出版社

社 址 北京中关村大街 31 号

邮政编码 100080

电 话 010-62511242 (总编室)

010-62511398 (质管部)

010-82501766 (邮购部)

010-62514148 (门市部)

010-62515195 (发行公司)

010-62515275 (盗版举报)

网 址 <http://www.crup.com.cn>
<http://www.ttrnet.com> (人大教研网)

经 销 新华书店

印 刷 北京鑫丰华彩印有限公司

规 格 185 mm × 260 mm 16 开本

版 次 2009 年 8 月第 1 版

印 张 9.25

印 次 2009 年 8 月第 1 次印刷

字 数 225 000

定 价 18.00 元

版权所有 侵权必究 印装差错 负责调换

前 言

“电路分析”课程是高职高专院校应用电子技术、电气自动化、电子信息等专业一门十分重要的专业基础课，是后续的专业基础课和专业课的基础，也是各相关专业学生的一门必修课程。根据高职高专教学改革的具体要求，结合多年的教学经验，我们编写了本教材。本书在内容编排及知识结构等方面，力求全面体现高等职业教育的特点，以满足当前教学的需要。

本书的指导思想是强调基本概念、基本理论和基本方法。本书以线性电路最基本的三部分内容——电阻电路分析、电路的正弦稳态分析、动态电路分析为主体，介绍了基本电路理论及电路的基本分析方法，力求做到内容精练、概念准确、重点和难点突出、理论联系实际，使抽象问题实际化。在内容选取上，重视基本概念、基本定律、基本分析方法的介绍，淡化复杂的理论分析。注重介绍电子和电气技术领域的新知识和新技术，结合高职高专特点，更新教材内容，充分体现出时代特征。注重理论、方法的应用和分析问题、解决问题能力的培养，旨在让学生建立工程分析的思维模式，为今后的学习打下良好的基础。

本书共分7章，具体编写分工如下：第1章、第2章由郝杰编写；第3章、第4章由邓瑶编写；第5章、第6章、第7章由徐毅编写。全书由邓瑶负责统稿、修改和定稿。

本书受编者水平和教学经验所限，难免有疏漏和错误之处，恳请广大读者批评指正，以待进一步完善。

编 者

2009年3月

目 录

第1章 电路的基本概念与基本定律	1
1.1 电路与电路模型	1
1.2 电路的基本物理量	2
1.3 线性电阻和欧姆定律	6
1.4 独立电源	7
1.5 电路的工作状态	10
1.6 基尔霍夫定律	13
本章基本要求与小结	15
复习思考题	16
第2章 直流电阻电路的等效变换和一般分析方法	20
2.1 电阻的串联和并联	20
2.2 电阻的星形连接和三角形连接的等效变换	23
2.3 电源的等效变换	26
2.4 支路电流法	27
2.5 节点分析法	29
2.6 网孔分析法	31
2.7 叠加定理与齐次定理	34
2.8 戴维南定理与诺顿定理	36
本章基本要求与小结	38
复习思考题	39
第3章 正弦交流电路	43
3.1 正弦交流电的基本概念	43
3.2 正弦交流电的相量表示法	47
3.3 正弦交流电路中的电阻、电感、电容	51
3.4 RLC 串联电路	57
3.5 RLC 并联电路	62
3.6 功率因数的提高	63
3.7 串联谐振和并联谐振	66
本章基本要求与小结	68
复习思考题	69
第4章 三相交流电路	72
4.1 三相交流电源	72
4.2 负载星形连接的三相电路	75

4.3 负载三角形连接的三相电路	78
4.4 三相电路的功率	80
本章基本要求与小结	81
复习思考题	82
第5章 互感电路	83
5.1 互感和互感电压电流关系	83
5.2 互感线圈的串联与并联	88
5.3 去耦等效法	91
5.4 理想变压器与空芯变压器	92
本章基本要求与小结	95
复习思考题	96
第6章 动态电路的时域分析	99
6.1 动态过程、换路定律与初始值的计算	99
6.2 一阶电路的三要素法	103
6.3 一阶电路的零输入响应	109
6.4 一阶电路的零状态响应	112
6.5 一阶电路的全响应	114
本章基本要求与小结	117
复习思考题	118
第7章 非正弦周期电流电路	121
7.1 非正弦周期信号及其分解	121
7.2 非正弦周期电流电路的有效值、平均值和平均功率	126
7.3 非正弦周期电流电路的计算	128
本章基本要求与小结	130
复习思考题	131
参考答案	133
参考文献	138

第1章 电路的基本概念与基本定律

学习“电路分析”课程的主要目的是掌握电路的基本规律和分析计算方法。本章将从电路模型、电路物理量等最基本的问题出发,介绍电路与电路模型、基本物理量、线性电阻与欧姆定律、独立电源、电路的工作状态及基尔霍夫定律。

【本章重点知识】

1. 基本物理量的分析计算
2. 欧姆定律的应用
3. 独立电源的特性与应用
4. 电路工作状态的分析计算
5. 基尔霍夫定律的运用

1.1 电路与电路模型

电路是各种电器设备按一定方式连接起来的整体,它提供了电流流通的路径。电源、负载和中间环节是电路的基本组成部分。图1—1所示的电路是一个最简单的直流电路,在电路中随着电流的流动,进行着不同形式能量之间的转换。

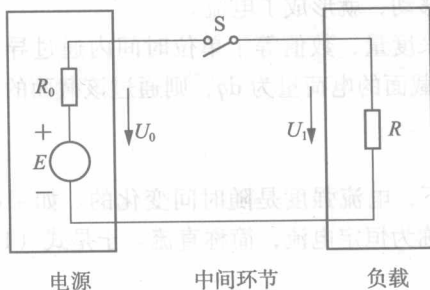


图1—1 最简单的直流电路

电源是将非电能转换成电能的装置。例如,干电池和蓄电池将化学能转换成电能,而发电机将热能、水能、风能、原子能等转换成电能。电源是电路中能量的来源,在它的内部进行着由非电能到电能的转换。

负载是将电能转换成非电能的装置。例如,电炉将电能转换成热能,电灯将电能转换成光能,电动机将电能转换成机械能等。负载是取用电能的装置,在它的内部进行着由电能到

非电能的转换。

中间环节是把电源与负载连接起来的部分。例如，导线和开关等，起传递和控制电能的作用。

另外还有一类在电子技术、电子计算机和非电量电测中广泛应用的信号电路，其主要目的是传递和处理信号（例如音乐、文字、图像、温度、压力等）。例如，收音机和电视机中的电路，其功能就是使电信号经过调谐、滤波、放大等环节的处理，成为人们所需要的其他信号。

由此可见，电路按其功能可以分为两类：一类是为了实现能量的传输和转换，这类电路称为电力电路；另一类是为了实现信号的传递和处理，这类电路称为信号电路。

实际的电路器件在工作时的电磁性质是比较复杂的，不是单一的。例如白炽灯、电炉等，它们在通电工作时把电能转换成热能，消耗电能，具有电阻的性质，但其电压和电流还会产生电场和磁场，故也具有储存电场能量和磁场能量即电容和电感的性质。

在电路的分析和计算中，如果要考虑一个器件所有的电磁性质，将是十分困难的。因此，对于组成实际电路的各种器件，我们将忽略其次要因素，只抓住其主要的电磁特性，使之理想化。例如，白炽灯可用只具有消耗电能的性质、而没有电场和磁场特性的理想电阻元件来近似表征；一个电感线圈可用只具有储存磁场能量性能、没有电阻及电容特性的理想电感元件来表征。这种由一个或几个具有单一电磁特性的理想电路元件所组成的电路就是实际电路的电路模型。理想电路元件简称电路元件，通常包括电阻元件、电感元件、电容元件、理想电压源和理想电流源等，本书在进行理论分析时所指的电路就是这种电路模型。

1.2 电路的基本物理量

1.2.1 电流

电流是由电荷的定向移动形成的。当金属导体处于电场内时，自由电子受到电场力的作用，逆着电场的方向做定向移动，就形成了电流。

电流的强弱用电流强度来度量，数值等于单位时间内通过导体某一横截面的电荷量。设在 dt 时间内通过导体某一横截面的电荷量为 dq ，则通过该截面的电流强度为：

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

上式表明，在一般情况下，电流强度是随时间变化的。如果电流强度不随时间变化，即 $dq/dt = \text{常数}$ ，则这种电流就称为恒定电流，简称直流。于是式 (1-1) 可写为：

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

电流强度在工程上常简称为电流。这样“电流”一词便具有双重含义，它既表示电荷定向运动的物理现象，又表示电流强度这样一个物理量。在我国法定计量单位中，电流（电流强度）的单位是安培，简称安（A）。当 1 秒内通过导体横截面的电荷为 1C（库仑）时，其电流为 1A。计算微小电流时，电流的单位用 mA（毫安）、 μA （微安）或 nA（纳安），其换算关系为：

$$1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}, 1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}, 1\text{nA} = 10^{-9}\text{A}$$

在分析电路时，不仅要计算电流的大小，还要了解电流的方向。我们习惯上规定以正电

荷移动的方向为电流的正方向(实际方向)。对于比较复杂的直流电路,往往事先不能确定电流的实际方向;对于交流电,其电流的方向是随时间而交变的。为方便分析,需引入电流的参考方向这一概念。

参考方向是人们任意选定的一个方向,在电路图中用箭头表示。当然,所选的电流参考方向不一定就是电流的实际方向。当电流的参考方向与实际方向一致时,电流为正值($i>0$);当电流的参考方向与实际方向相反时,电流为负值($i<0$)。这样,在选定的电流参考方向下,根据电流的正负就可以确定电流的实际方向,如图1—2所示。

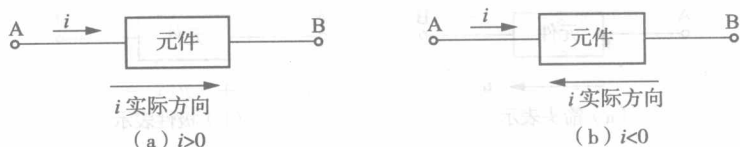


图1—2 电流参考方向与实际方向的关系

在分析电路时,首先要假定电流的参考方向,并以此为标准去分析计算,最后根据答案的正负值来确定电流的实际方向。本书电路图上所标出的电流方向都是参考方向。

1.2.2 电压、电位和电动势

1. 电压

在图1—3中,两个极板A、B上分别带有正、负电荷,因而在A、B两极板间形成电场,其方向由A指向B。电荷在电路中运动,必然受到电场力的作用,也就是说,电场力对电荷做了功。为了衡量其做功的能力,引入“电压”这一物理量,并定义为:电场力把单位正电荷从A点移动到B点所做的功称为A点到B点间的电压,用 u_{AB} 表示,即

$$u_{AB} = \frac{dw_{AB}}{dq} \quad (1-3)$$

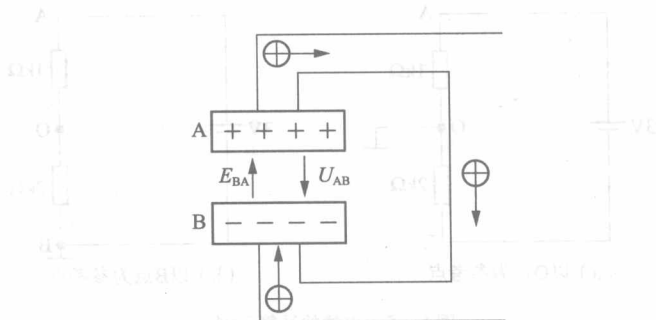


图1—3 电压和电动势

式中, dw_{AB} 为电场力将 dq 的正电荷从A点移动到B点所做的功,单位为焦耳(J);电压单位为伏特,简称伏(V),还有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV)等单位。

直流电路中,式(1—3)应写为:

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q} \quad (1-4)$$

电路中两点之间的电压也称为两点之间的电位差,即

式中, V_A 为 A 点的电位, V_B 为 B 点的电位。

电压的实际方向规定为从高电位点指向低电位点, 是电压降的方向。和电流一样, 电路中两点间的电压也可任意选定一个参考方向, 并由参考方向和电压的正负值来判断该电压的实际方向。当电压的参考方向与实际方向一致时, 电压为正 ($U > 0$); 当电压的参考方向与实际方向相反时, 电压为负 ($U < 0$)。电压的参考方向可用箭头表示, 也可用正 (+)、负 (-) 极性表示, 如图 1—4 所示。

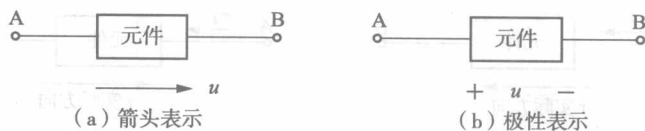


图 1—4 电压参考方向

对于同一个元件或同一段电路上电压和电流参考方向的设定, 原则上是任意的。但为了方便起见, 习惯上常将电压和电流的参考方向设定为一致, 称为关联参考方向。

2. 电位

为了分析电路方便, 常指定电路中任意一点为参考点。电场力把单位正电荷从电路中某点移到参考点所做的功称为该点的电位, 用大写字母 V 表示。电路中某点的电位即该点与参考点之间的电压。

为了确定电路中各点的电位, 就必须在电路中选择取一个参考点。它们之间的关系如下:

(1) 参考点的电位为零, 即 $V_0 = 0$, 比该点高的电位为正, 比该点低电位为负。在图 1—5 (a) 所示的电路中, 选取 O 点为参考电位点, 则 A 点的电位为正, B 点的电位为负。

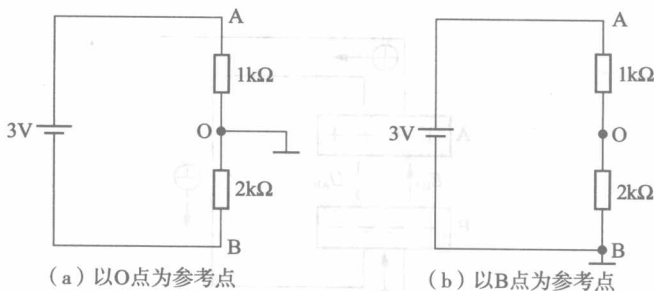


图 1—5 电位的计算示例

(2) 其他各点的电位为该点与参考点之间的电位差。如图 1—5 (a) 中 A、B 两点的电位分别为:

$$V_A = V_A - V_0 = U_{AO} = 1V$$

$$V_B = V_B - V_0 = U_{BO} = -2V$$

(3) 参考点选取不同, 电路中各点的电位也不同, 但任意两点间的电位差 (电压) 不变。若选取 B 点为参考点, 如图 1—5 (b) 所示, 则

$$V_B = 0V$$

$$V_A = V_A - V_B = U_{AB} = 3V$$

但 A、B 两点间的电压不变，仍然为 $U_{AB} = 3V$ 。由此可得出结论：电位是相对的，而电压是绝对的。

(4) 在研究同一电路系统时，只能选取一个电位参考点。在电子线路中往往不再画出电源，而改用电位标出。图 1—6 是电路的一般画法与电子线路的习惯画法。

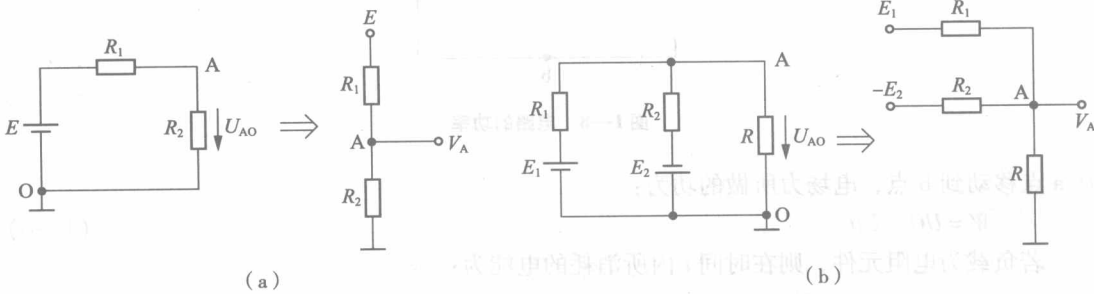


图 1—6 电路的一般画法与电子线路的习惯画法

3. 电动势

在图 1—3 所示的电路中，在电场力的作用下，正电荷不断地从 A 移动到 B，A、B 两极板间的电场逐渐减弱，最后消失，导线中的电流也逐渐减小为零。为了维持持续不断的电流，就必须保持 A、B 间有一定的电位差，即保持一定的电场。这必然要借助于外力来克服电场力把正电荷不断地从 B 极板移到 A 极板去。这种外力是非电场力，我们称之为电源力，电源就是能产生这种力的装置。例如，在发电机中，当导体在磁场中运动时，磁场能转换为电源力；在电池中，化学能转换为电源力。

电动势是用来衡量电源力大小的物理量。电动势在数值上等于电源力把单位正电荷从电源的负极板移到正极板所做的功，用 E 表示。电动势的方向是电源力克服电场力移动正电荷的方向，从低电位到高电位。对于一个电源设备，若其电动势 E 与其端电压 U 的参考方向相反，如图 1—7(a) 所示，当电源内部没有其他能量转换（如不计内阻）时，根据能量守恒定律，应有 $U = E$ ；若参考方向相同，如图 1—7(b) 所示，则 $U = -E$ 。本书一般用其端电压 U 来表示。

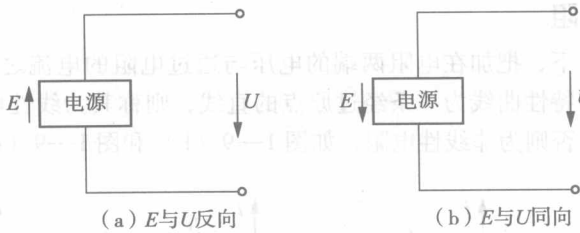


图 1—7 电源的电动势 E 与端电压 U

1.2.3 电能和电功率

1. 电能

在图 1—8 所示的直流电路中，a、b 两点间的电压为 U ，在时间 t 内电荷 Q 受电场力作用，

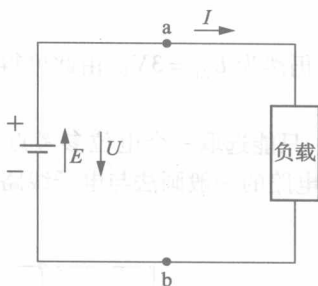


图 1—8 电路的功率

从 a 点移动到 b 点，电场力所做的功为：

$$W = UQ = UIt \quad (1-6)$$

若负载为电阻元件，则在时间 t 内所消耗的电能为：

$$W = UIt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t \quad (1-7)$$

2. 电功率

单位时间内消耗的电能称为电功率（简称功率），即

$$P = \frac{W}{t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-8)$$

在我国法定计量单位中，能量的单位是焦耳，简称焦(J)；功率的单位是瓦特，简称瓦(W)。当已知设备的功率为 P 时，在 t 秒内消耗的电能为 $W = Pt$ ，电能就等于电场力所做的功，单位是 J(焦)。在电工技术中，往往直接用 $W \cdot s$ （瓦特秒）作单位。实际生活中常用 $kW \cdot h$ （千瓦时）作单位， $1kW \cdot h$ 俗称 1 度电， $1kW \cdot h = 3.6 \times 10^6 W \cdot s$ 。在一段电路中，当 u 和 i 取关联参考方向时，若 $P > 0$ ，说明这段电路上电压和电流的实际方向是一致的，电路吸收了功率，是负载性质；若 $P < 0$ ，则这段电路上电压和电流的实际方向不一致，电路发出功率，是电源性质。

1.3 线性电阻和欧姆定律

1.3.1 线性电阻

在温度一定的条件下，把加在电阻两端的电压与通过电阻的电流之间的关系称为伏安特性。若电阻元件的伏安特性曲线为一条经过原点的直线，则称其为线性电阻，如图 1—9 (a) 和图 1—9 (c) 所示；否则为非线性电阻，如图 1—9 (b) 和图 1—9 (d) 所示。

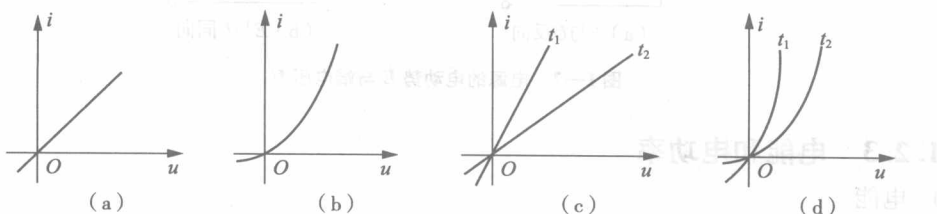


图 1—9 电阻的伏安特性曲线

线性电阻在实际电路中应用非常广泛,本书将集中讨论线性电阻。在不加特殊说明时,所说的电阻均指线性电阻。

线性电阻作为一种理想电路元件,在电路图中的图形符号如图1—10所示。它在电路中对电流有一定的阻碍作用,这种阻碍作用的大小叫电阻。电阻用 R 表示,它的大小与自然材料有关,而与通过的电流、电压无关。若给电阻通以电流 i ,这时电阻两端会产生一定的电压 u 。由线性电阻的伏安特性曲线可知,电压 u 与电流 i 的比值为一个常数,这个常数就是电阻 R 。

电阻的单位为欧姆,简称欧,其符号为 Ω 。一般情况下,“电阻”一词及其符号 R 既表示电阻元件也表示元件的参数。电阻的倒数称为电导,用 G 表示,即

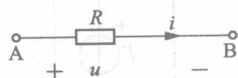


图1—10 线性电阻元件

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-9)$$

电导的单位为西门子,简称西,其符号为 S 。电导是反映材料导电能力强弱的参数。电阻、电导是从相反的两个方面来表征同一材料特性的两个电路参数,所以定义电导为电阻的倒数。

1.3.2 欧姆定律

欧姆定律是电路分析中重要的基本定律之一,它说明了流过线性电阻的电流与该电阻两端电压之间的关系,反映了电阻元件的特性。图1—10是理想电阻模型,假设电压、电流参考方向相关联,图1—9(a)是它的伏安特性曲线,该直线的数学解析式为:

$$u(t) = Ri(t) \quad (1-10)$$

式(1—10)就是欧姆定律公式。应用电导参数来表示电流和电压之间关系时,欧姆定律公式可写为:

$$i(t) = Gu(t) \quad (1-11)$$

在使用欧姆定律时应注意:

(1) 欧姆定律只适用于线性电阻;

(2) 如果电阻 R 上的电流、电压参考方向非关联,则欧姆定律公式中应冠以负号,即

$$\begin{aligned} u(t) &= -Ri(t) \\ i(t) &= -Gu(t) \end{aligned} \quad (1-12)$$

1.4 独立电源

1.4.1 电压源

任何一个实际的电源都可以用一个电动势 E 和内阻 R_0 相串联的理想电路元件的组合来表示,这种电路模型称为电压源模型,简称电压源。图1—11所示的电路是电压源与外电路的连接。在使用电源时,人们最关心的是当负载变化时,电路中的电流 I 与电源的端电压 U 将如何变化。因而我们有必要来研究电源的端电压 U 与输出电流 I 之间的关系,这种关系称为电源的伏安特性。直流电压源的伏安特性方程式为:

$$U = E - R_0 I \quad (1-13)$$

式中 E 和 R_0 都是常数,故 U 和 I 之间呈线性关系。当电源开路时, $I=0$, $U=U_0=E$;当电源

短路时, $U=0$, $I=I_s=E/R_0$, 其中 I_s 是电源的短路电流。用两点法可以作出电压源的伏安特性曲线, 如图 1—12 所示, 它表明了电压源的端电压 U 与输出电流 I 之间的关系。

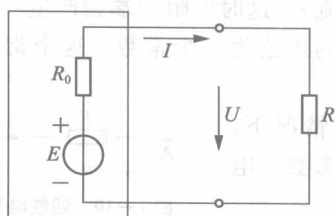


图 1—11 电压源与外电路的连接

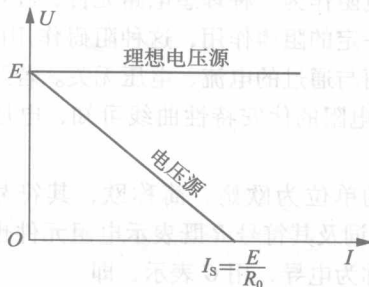


图 1—12 电压源和理想电压源的伏安特性曲线

图 1—12 表明, 当输出电流 I 增大时, 端电压 U 随之下降。这说明电压源外接负载的电阻越小, 在电源内电阻 R_0 上的压降就越高, 电源的端电压越低。 R_0 越小, 则直线越平。在理想情况下, $R_0=0$, 它的伏安特性是一条平行于横轴的直线。这表明负载变化时, 电源的端电压恒等于电源的电动势, 即 $U=E$ 。这种端电压恒定, 不受输出电流影响的电压源称为理想电压源, 也称恒压源。其符号如图 1—13 所示。

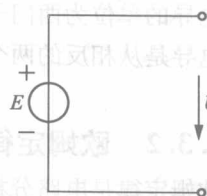


图 1—13 理想电压源模型

理想电压源实际上是不存在的, 但如果电源的内电阻远小于负载电阻 ($R_0 \ll R$), 则端电压基本恒定, 就可以忽略 R_0 的影响, 认为这是一个理想电压源。

1.4.2 电流源

直流电压源的伏安特性方程可改写为:

$$I = \frac{E}{R_0} - \frac{U}{R_0} = I_s - \frac{U}{R_0} \quad (1-14)$$

式中, $I_s = E/R_0$ 为电源的短路电流; I 为电源的输出电流; U 为电源的端电压; R_0 为电源内电阻。

式 (1—14) 表明, 一个实际的电源也可用电流源模型来表示, 即用一个电流 I_s 和内电阻 R_0 相并联的理想元件的组合来表示。电流源模型简称电流源。电流源与外电路的连接方式如图 1—14 所示。

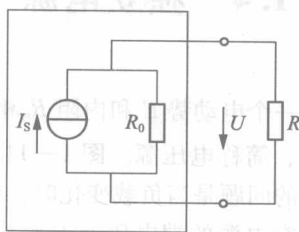


图 1—14 电流源与外电路的连接

式(1—14)又称为直流电流源的伏安特性方程式,式中 I_s 和 R_0 是常数, U 和 I 之间是线性关系。当电流源开路时, $I=0$, $U=U_0=I_sR_0$;当电流源短路时, $U=0$, $I=I_s$ 。用两点法可以作出电流源的伏安特性曲线,如图1—15所示,它表明了电流源的端电压 U 与输出电流 I 之间的关系。

图1—15表明, R_0 越大,伏安特性曲线就越陡。在理想情况下, $R_0=\infty$,伏安特性曲线是一条平行于纵轴的直线。这表明负载变化时,电流源的输出电流恒等于电流源的短路电流,即 $I=I_s$ 。这种输出电流恒定,不受端电压影响的电流源称为理想电流源,也称恒流源。其符号如图1—16所示。

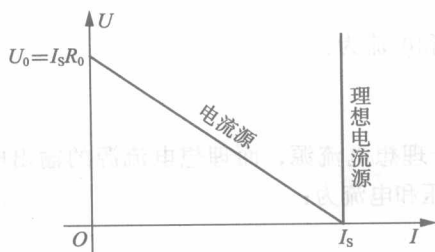


图1—15 电流源和理想电流源的伏安特性曲线



图1—16 理想电流源模型

理想电流源实际上是不存在的,但如果电源的内电阻远大于负载电阻($R_0 \gg R$),则电流基本恒定,也可将其视为理想电流源。

【例1—1】图1—17所示电路为蓄电池供电或充电的电路模型,其中 R 为限流电阻。

(1) 试求端电压 U ;

(2) 判断此支路是供电支路还是用电支路,求供电或用电的功率;

(3) 求蓄电池发出或吸收的功率;

(4) 求电阻所消耗的功率。

解:电路中电压和电流的参考方向如图1—17所示。设该支路供电或用电的功率为 P ,蓄电池发出或吸收的功率为 P_E ,电阻所消耗的功率为 P_R 。

(1) 根据电路中电压和电流的参考方向可知,端电压 U 的值为:

$$U = E + RI = 30\text{V} + 35\Omega \times 2\text{A} = 100\text{V}$$

(2) U 、 I 为关联方向,其电功率为:

$$P = UI = 100\text{V} \times 2\text{A} = 200\text{W}$$

P 为正值,可见该支路为用电支路,用电功率为200W。

(3) 蓄电池正在充电,其吸收的功率为:

$$P_E = EI = 30\text{V} \times 2\text{A} = 60\text{W}$$

(4) 电阻所消耗的功率为:

$$P_R = I^2 R = 2^2 \times 35\text{W} = 140\text{W}$$

根据以上分析可知,供电支路所提供的电能一部分提供给蓄电池,另一部分被电阻所消耗,整个电路遵守能量守恒定律。

【例1—2】求图1—18所示电路中的电流 I 和电压 U 。

解:在图1—18(a)所示电路中, E_1 为一个理想电压源,而理想电压源的端电压是恒定

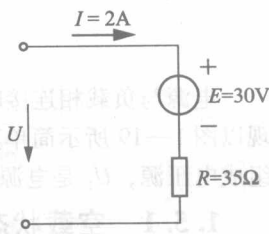


图1—17

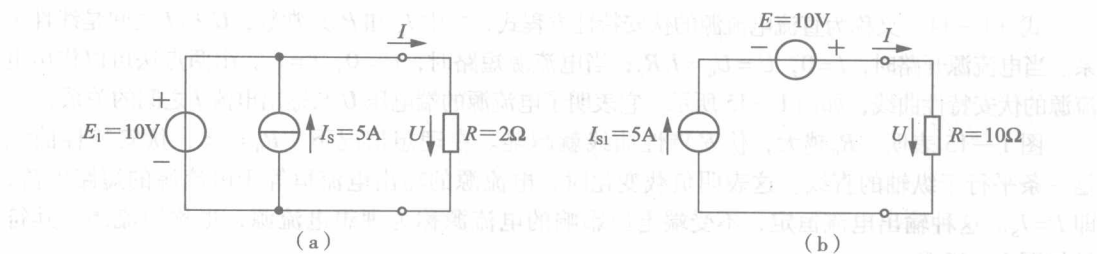


图 1—18

的，不受电流源 I_s 影响，故电阻 R 上的电压和电流为：

$$U = 10V, I = \frac{U}{R} = \frac{10V}{2\Omega} = 5A$$

在图 1—18 (b) 所示电路中， I_{s1} 为一个理想电流源，而理想电流源的输出电流是恒定的，不受电压源 E 的影响，故电阻 R 上的电压和电流为：

$$I = 5A, U = IR = 5A \times 10\Omega = 50V$$

1.5 电路的工作状态

电源与负载相连接时，根据所接负载的情况，电路有三种工作状态：空载、短路、有载。现以图 1—19 所示简单直流电路为例来分析电路的各种状态。图中电动势 E 和内阻 R_0 串联，组成电压源， U_1 是电源端电压， U_2 是负载端电压， R_L 是负载等效电阻。

1.5.1 空载状态

空载状态又称断路或开路状态。如图 1—19 所示，当开关 S 断开或连接导线断开时，电路就处于空载状态，此时电源和负载未构成通路。电路具有下列特征：

- (1) 电路中的电流为零，即 $I = 0$ 。
- (2) 电源的端电压等于电源的电动势，即

$$U_1 = E - R_0 I = E$$

此电压称为空载电压或开路电压，用 U_{oc} 表示。因此，要想测量电源电动势，只要用电压表测量电路的开路电压即可。

- (3) 电源的输出功率 P_1 和负载所吸收的功率 P_2 均为零，即

$$P_1 = U_1 I = 0, P_2 = U_2 I = 0$$

1.5.2 短路状态

在图 1—19 所示电路中，当电源两端的导线由于某种缘故而直接相连时，电源输出的电流不经过负载，只经连接导线直接流回电源，这种状态称为短路状态，简称短路。电路具有下列特征：

- (1) 电路中的电流为：

$$I_s = \frac{E}{R_0} \quad (1-15)$$

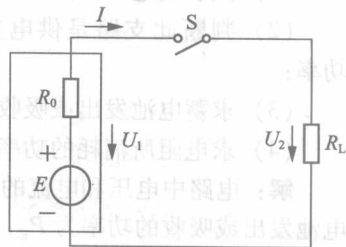


图 1—19 简单直流电路

此电流称为短路电流。在一般供电系统中,电源的内电阻很小,故短路电流很大。但对外电路无输出电流,即 $I=0$ 。

(2) 电源和负载的端电压均为零,即

$$U_1 = E - R_0 I_s = 0$$

$$U_2 = 0$$

$$E = R_0 I_s$$

上式表明,短路时电源的电动势全部落在电源的内阻上,因此无输出电压。

(3) 电源的输出功率 P_1 和负载所吸收的功率 P_2 均为零,这时电源电动势发出的功率全部消耗在内电阻上,即

$$P_1 = U_1 I, P_2 = U_2 I$$

$$P_E = EI_s = \frac{E^2}{R_0} = I_s^2 R_0 \quad (1-16)$$

由于电源电动势发出的功率全部消耗在内电阻上,因而会使电源发热以至损坏。所以在实际工作中,应经常检查电气设备和线路的绝缘情况,防止电压源短路事故的发生。此外,通常还在电路中接入熔断器等保护装置,以便在发生短路时能迅速隔离故障电路,达到保护电源及电路器件的目的。

1.5.3 有载工作状态

当开关S闭合时,电路中有电流流过,电源输出功率,负载取用功率,这种状态称为有载工作状态。此时电路有下列特征:

(1) 电路中的电流为:

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} \quad (1-17)$$

当 E 和 R_0 一定时,电流由负载电阻 R_L 的大小决定。

(2) 电源的端电压为:

$$U_1 = E - R_0 I \quad (1-18)$$

可见,电源的端电压总是小于电源的电动势,这是因为电源的电动势 E 减去内阻压降 $R_0 I$ 后才是电源的输出电压 U_1 。

若忽略线路上的压降,则负载的端电压等于电源的端电压,即

$$U_1 = U_2$$

(3) 电源的输出功率为:

$$P_1 = U_1 I = (E - R_0 I) I = EI - R_0 I^2 \quad (1-19)$$

上式表明,电源电动势发出的功率 EI 减去内阻上消耗的功率 $R_0 I^2$ 才是供给外电路的功率。若忽略连接导线上的电阻所消耗的功率,则负载所吸收的功率为:

$$P_2 = U_2 I = U_1 I = P_1$$

电源内阻及负载电阻上所消耗的电能转换成热能散发出来,使电源和各种用电设备的温度升高。电流越大,温度越高。当电流过大时,设备的绝缘材料会因过热而迅速老化,缩短使用寿命,甚至损坏。另外,当电压过高时,也可能使设备的绝缘层被击穿而损坏。而如果电压过低,将使设备不能正常工作,如电动机不能启动、电灯亮度低等。

为了保证电气设备和器件能安全、可靠、经济地工作,规定了每种设备和器件在工作时所允许的最大电流、最高电压和最大功率,称为电气设备和器件的额定值,常用下标符号