

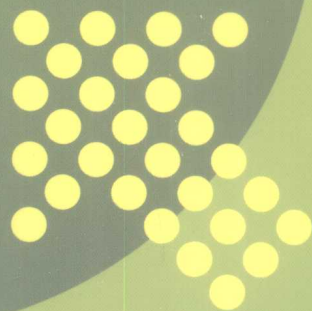
21世纪高等学校规划教材



DIANLU FENXI JICHU

电路分析基础

张玉峰 闫若颖
张惠莉 佟春明 李丽敏 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

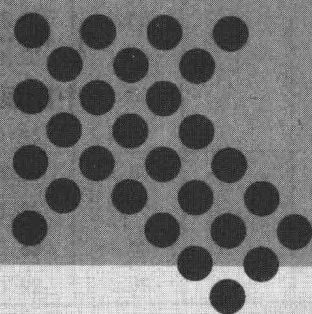
21世纪高等学校规划教材



DIANLU FENXI JICHU

电路分析基础

张玉峰 闫若颖
张惠莉 佟春明 李丽敏 编
段折民 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书是 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分为 15 章, 主要内容包括电路模型和电路定律、电阻电路的等效变换、电阻电路的一般分析、电路定理、动态电路、正弦稳态的相量法、三相电路、含有耦合电感的电路、磁路与铁心线圈电路、非正弦周期电流电路和信号的频谱、拉普拉斯变换、网络函数、电路方程的矩阵形式、二端口网络、非线性电路简介。

本书主要作为高等院校电类各专业的电路分析基础课程教材, 也可作为高职高专和函授教材, 同时可作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路分析基础/张玉峰等编. —北京: 中国电力出版社, 2009

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-9495-4

I. 电… II. 张… III. 电路分析-高等学校-教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 177159 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 8 月第一版 2009 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.75 印张 482 千字

定价 31.60 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

教育部在 2007 年 2 月 17 日提出的“关于进一步深化本科教学改革全面提高教学质量的若干意见”中明确指出要采取有效措施鼓励教师编写国家规划教材和各种创新教材,以加强教学基础建设,培养和提高专业人才的理论水平及工作能力。根据这一精神,佳木斯大学、河北师范大学、青岛农业大学三所高校联合,对电专业的专业基础课教材《电路分析基础》进行了编写,以期全面提高本科教学质量更好地满足对课程教学内容的需求。

电路分析基础是电气工程、电子工程、信息科学与技术和计算机等专业的一门重要的专业基础课程。通过该课程的学习,使学生掌握电路分析中的基本概念、基本定律、基本定理和基本分析方法,从而具有学习其他专业基础课和专业课必备的基础知识,同时提高分析问题、解决问题和自学的能力,为今后的实际工作打好坚实的理论基础。

本书以经典电路理论内容为主,系统论述了电路分析中的基本概念、基本定理和基本分析方法。所讨论的问题除第十五章的非线性电路简介外,本书均以线性电路为对象,包含电阻电路分析、动态电路的暂态分析、正弦稳态分析、非正弦周期电流电路、运算法等部分。对含有运算放大器的电阻电路部分,考虑到学时及后续的模拟电子技术还要做重点介绍,所以舍弃了这部分内容。考虑到学时及应用拉氏变换求解二阶及二阶以上动态电路的便利性,本书砍掉了二阶电路部分,但这并不影响本书的完整性。

本书在选材上立足于加强基础,精选内容,例题典型,重点突出,并注意了与高等数学、大学物理等先修课程及信号与系统、模拟电子电路等后续课程的分工、衔接和配合。在文字叙述上力求简洁明了、通俗易懂。书中例题不仅作为重要结论的例证,也常作为论述的补充说明以及常用的解题方法与步骤的展示,尤对较难掌握的部分指出了易于模糊的概念和忽略的问题。

本书编者都具有多年从事电路分析基础课程教学的经验,具有丰富的教学经验,能够根据课程发展及教学情况的变动及时修改教学内容。编写时力求内容紧凑、条理清楚、篇幅适当和利于教学。

本书的第一、二、三、四、五章由河北师范大学闫若颖编写,第六、七、十章由佳木斯大学李丽敏编写,第八、九章由佳木斯大学张玉峰编写,第十一、十二章由青岛农业大学佟春明编写,第十三、十四、十五章由青岛农业大学张惠莉编写,全书由张玉峰统稿。本书由西北工业大学段哲民教授主审,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏和局限之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2009 年 7 月

目 录

前言

第一章 电路模型和电路定律	1
第一节 电路和电路模型	1
第二节 电流的参考方向和电压的参考极性	1
第三节 电功率和能量	3
第四节 电阻元件	4
第五节 电压源和电流源	5
第六节 受控电源	7
第七节 基尔霍夫定律	8
本章小结	11
习题	12
第二章 电阻电路的等效变换	15
第一节 电路的等效变换	15
第二节 电阻的串联和并联	15
第三节 电阻的星形连接和三角形连接的等效变换	18
第四节 电压源、电流源的串联和并联	20
第五节 实际电源的两种模型及其等效变换	21
第六节 输入电阻	23
本章小结	25
习题	26
第三章 电阻电路的一般分析	30
第一节 电路的图	30
第二节 KCL 和 KVL 的独立方程数	31
第三节 支路电流法	32
第四节 网孔电流法	33
第五节 回路电流法	37
第六节 结点电压法	39
本章小结	44
习题	45
第四章 电路定理	51
第一节 叠加定理	51
第二节 替代定理	54
第三节 戴维宁定理和诺顿定理	55
第四节 特勒根定理	62

第五节 互易定理	65
第六节 对偶原理	67
本章小结	68
习题	69
第五章 动态电路	74
第一节 电容元件	74
第二节 电感元件	76
第三节 动态电路的方程及其初始条件	77
第四节 一阶 RC 电路的响应	80
第五节 一阶 RL 电路的响应	84
第六节 一阶电路的全响应	86
第七节 一阶电路的阶跃响应	90
第八节 一阶电路的冲激响应	93
本章小结	97
习题	98
第六章 正弦稳态的相量法	103
第一节 正弦量、相量法的基本概念	103
第二节 电路定律的相量形式	109
第三节 阻抗和导纳、阻抗（导纳）的串联和并联、相量图	112
第四节 正弦稳态电路的分析	116
第五节 正弦稳态电路的功率	120
第六节 串、并联谐振	126
第七节 最大功率传输	133
本章小结	134
习题	134
第七章 三相电路	140
第一节 三相电路基本构成	140
第二节 线电压（电流）与相电压（电流）的关系	143
第三节 对称三相电路的计算	146
第四节 不对称三相电路的概念	151
第五节 三相电路的功率	153
本章小结	157
习题	157
第八章 含有耦合电感的电路	160
第一节 互感	160
第二节 含有耦合电感电路的计算	163
第三节 空心变压器	166
第四节 理想变压器	167
本章小结	170

习题	171
第九章 磁路与铁心线圈电路	173
第一节 磁场的基本物理量	173
第二节 磁性材料的磁性能	176
第三节 磁路及其基本定律	177
第四节 恒定磁通磁路的计算	178
第五节 交变磁通磁路的分析	186
第六节 铁心线圈	189
本章小结	192
习题	192
第十章 非正弦周期电流电路和信号的频谱	198
第一节 非正弦周期信号	198
第二节 周期函数分解为傅里叶级数	199
第三节 有效值、平均值和平均功率	201
第四节 非正弦周期电流电路的计算	204
本章小结	207
习题	208
第十一章 拉普拉斯变换	210
第一节 拉普拉斯变换的定义	210
第二节 拉普拉斯变换的基本性质	211
第三节 拉普拉斯反变换的部分分式展开	212
第四节 运算电路	215
第五节 应用拉普拉斯变换法分析线性电路	217
本章小结	221
习题	221
第十二章 网络函数	224
第一节 网络函数的定义	224
第二节 网络函数的极点和零点	226
第三节 零点、极点与冲激响应	226
第四节 零点、极点与频率响应	228
第五节 卷积	229
本章小结	230
习题	231
第十三章 电路方程的矩阵形式	233
第一节 割集	233
第二节 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵	235
第三节 回路电流方程的矩阵形式	240
第四节 结点电压方程的矩阵形式	243
第五节 割集电压方程的矩阵形式	247

第六节 状态方程·····	248
本章小结·····	252
习题·····	252
第十四章 二端口网络·····	256
第一节 二端口网络的概念·····	256
第二节 二端口的方程和参数·····	257
第三节 二端口的等效电路·····	264
第四节 二端口的转移函数·····	266
第五节 二端口的连接·····	269
第六节 回转器和负阻抗变换器·····	272
本章小结·····	274
习题·····	274
第十五章 非线性电路简介·····	277
第一节 非线性电阻·····	277
第二节 非线性电容和非线性电感·····	280
第三节 非线性电路的方程·····	281
第四节 小信号分析法·····	282
第五节 分段线性化方法·····	285
本章小结·····	287
习题·····	288
部分习题答案·····	291
附录·····	304
参考文献·····	308

第一章 电路模型和电路定律

内 容 提 要

本章将阐明集总电路中电压、电流的参考方向及电流、电压间关联参考方向的概念；介绍电阻、理想电流源和理想电压源的伏安特性，以及实际电压源和电流源的等效模型；并介绍基尔霍夫定律。

第一节 电路和电路模型

电在日常生活中和工农业生产、科研以及国防等各个方面都有广泛的应用。在通信、自动控制、计算机、电力等各个技术领域中，都要使用许多实际电路来完成各种各样的任务。实际电路是为完成某种预期目的而设计、安装、运行的，由电路元器件相互连接而成，具有传输电能、处理信号、测量、控制、计算等功能。各种电路都是由电阻、电感、电容、晶体管、变压器等部件组成，有些实际电路十分复杂，为了对电路进行计算、分析，必须把实际部件加以近似化、理想化，用一个足以代表其主要特性的“模型”来表示电路元器件，电路理论分析的对象是电路模型而不是实际电路。

电路模型是由理想电路元器件取代每一个实际电路器件而构成的电路。理想电路元件是组成电路模型的最小单元，是具有某种确定的电磁性质的假想元件。

所谓理想化，在这里指的是假定在器件中发生的电、磁现象可以分别研究，从而可以用所谓的“集总参数元件（集总元件）”来构成模型，每一种集总元件都只表示一种基本现象，且可用数学方法精确定义。由集总元件组成的电路模型称为集总电路模型——集总电路，简称电路。各理想元件也可用图形符号表示，绘成电路图，电路图并不反映实际电路的大小，在分析集总电路的问题时，器件与电路的尺寸是无关紧要的。图 1-1 所示为手电筒的实际电路。图 1-2 所示为手电筒的电路模型。注意：本书所说的电路均指电路模型，并将理想电路元件简称为电路元件。

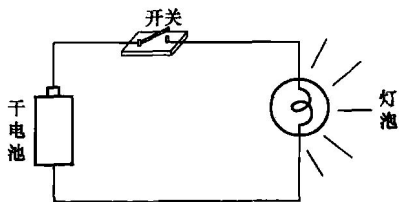


图 1-1 实际电路图

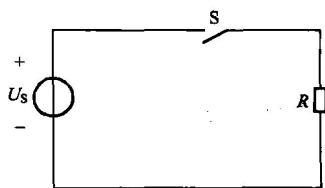


图 1-2 电路模型

第二节 电流的参考方向和电压的参考极性

电荷在电场力的作用下运动形成电流。电流的大小用电流强度来衡量，电流强度等于单

位时间内通过导体某横截面的电量。电流强度通常简称为电流，用符号 i 表示，即

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

电流方向为正电荷的运动方向。

在国际单位制中，电流的基本单位为 A（安培，简称安）。电流常用的单位还有 kA（千安）、mA（毫安）、 μA （微安）及 nA（纳安）等，且有

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

如果电流的大小和方向不随时间而变化，则这种电流叫做直流电流（Direct Current, DC），用大写字母 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间变化，则叫做交流电流（Alternating Current, AC），用小写字母 i 表示。

实际电路中电流的真实方向往往难以在电路图中标出。对于简单的电路来说，电流的实际流向就是正电荷运动的方向，但对于复杂电路或方向不断变化（如日常用的 50Hz 交流电）的交变电路来说，事先辨别出它们的方向是相当困难的。为解决这样的困难，引入参考方向（reference direction）这一概念。

参考方向可以任意选定，在电路图中用箭头表示。规定：如果电流真实方向与参考方向一致，电流为正值；反之，为负值。图 1-3（a）中选定的参考方向与实际电流方向一致， $i>0$ 。图 1-3（b）中选定的参考方向与实际电流方向不一致， $i<0$ 。利用电流的正负值结合参考方向来表明电流的实际方向。在未标注参考方向的情况下，电流的正负毫无意义。

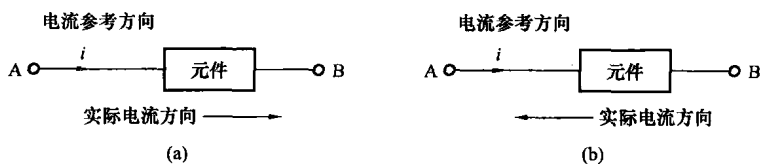


图 1-3 电流的参考方向

(a) 参考方向与实际电流方向一致， $i>0$ ；(b) 参考方向与实际电流方向不一致， $i<0$

在电路中两点的电压表明了单位正电荷由一点转移到另一点时所获得的或者失去的能量，用 u 来表示，即

$$u(t) = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

电压也常被称为电位差或电压降。在国际单位制中，电压的单位是 V（伏特，简称伏）。常用的单位有 kV（千伏）、mV（毫伏）、 μV （微伏）等。同样分直流电压和交流电压。要确定一个复杂电路中任意两点间电压的实际方向也很困难，因而电压也需要规定参考方向（参考极性）。我们可以任意选定一点为“+”，另一点的极性为“-”。电路中某元件上或任意两点间人为假定的电压降方向称为电压的参考方向。如果选定的参考方向与实际电压方向一致，那么电压为正值；反之，电压为负值。在图 1-4（a）中选定的参考方向与实际电压方向一致， $u>0$ ；图 1-4（b）中选定的参考方向与实际电压方向不一致， $u<0$ 。

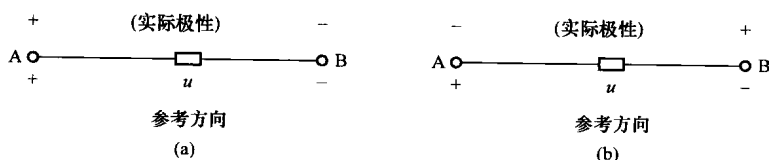


图 1-4 电压的参考极性

(a) 参考方向与实际电压方向一致, $u > 0$; (b) 参考方向与实际电压方向不一致, $u < 0$

电压的参考方向也可以用双下标表示, 如 u_{AB} 表示 A 点为高电位, B 点为低电位, 其参考方向是由 A 指向 B。

对任何电路进行分析时, 应先标出各处的电流的参考方向、电压的参考极性。一个元件的电流或者电压的参考方向可以任意指定, 对于一个元件来说, 如果电流的参考方向是从电压的“+”极性流入、从电压的“-”极性流出, 则称它们的电压和电流的参考方向为关联参考方向, 如图 1-5 (a) 所示; 否则称为非关联参考方向, 如图 1-5 (b) 所示。

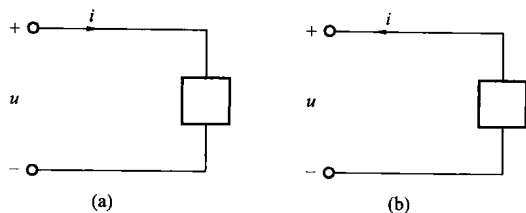


图 1-5 元件的关联参考方向和非关联参考方向

(a) 关联参考方向; (b) 非关联参考方向

第三节 电 功 率 和 能 量

在电路分析和计算中, 能量和功率的计算是十分重要的。一方面电路工作时总会有电能与其他形式的能量进行交换; 另一方面, 电气设备和电路部件本身都要有功率的限制, 在使用中需要注意其电流或者电压是否超过额定值。

单位时间内电场力所做的功, 叫做电功率, 用字母 p 表示, 即

$$p(t) = \frac{dw}{dt}$$

由于

$$u(t) = \frac{dw}{dq}, \quad i(t) = \frac{dq}{dt}$$

则

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-3)$$

在国际单位制中, 电功率的单位是 W (瓦特, 简称瓦)。

根据式 (1-3), 在 $t_0 \sim t$ 的时间内, 元件吸收的能量为

$$w(t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-4)$$

在国际单位制中, 能量的单位为 J (焦耳, 简称焦)。

电路吸收的能量也常用千瓦小时表示, $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 相当于电功率为 1 千瓦的用电设备工作 1 小时所吸收的电能。平时我们说用了多少度电, 指的就是消耗了多少千瓦小时的电能。利用式 (1-3) 计算电功率时, 当电流和电压的参考方向为关联参考方向时, 乘积 “ ui ” 表示

元件吸收的功率，即 p 为正值时，表示这部分电路吸收（消耗）功率，而 p 为负值时，表示这部分电路发出（供给）功率；当电流和电压的参考方向为非关联参考方向时，乘积“ ui ”表示元件发出的功率，即 p 为正值时，表示这部分电路发出（供给）功率，而 p 为负值时，表示这部分电路吸收（消耗）功率。

第四节 电 阻 元 件

电路是由元件连接组成的，而各个元件都有精确的定义，由此可以确定每一元件电压与电流之间的关系，即伏安关系，简称为 VAR (Volt Ampere Relation)。

线性时不变电阻元件是一个二端元件，在电压 $u(t)$ 与电流 $i(t)$ 取关联参考方向时，任何时刻其端电压与电流满足欧姆定律。它可以写成

$$u(t) = Ri(t), i(t) = Gu(t) \quad (1-5)$$

式中： R 为线性电阻元件的电阻； G 为线性电阻元件的电导。二者均为常量，都是电阻元件的参数，其数值由元件本身决定，与其端电压和端电流无关。且

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-6)$$

电阻的单位是 Ω (欧姆)；电导的单位是 S (西门子)。

如果电压与电流参考方向取非关联参考方向，则

$$u(t) = -Ri(t), i(t) = -Gu(t) \quad (1-7)$$

线性电阻元件的符号如图 1-6 所示。如果把电阻元件的电压取为横坐标，电流取为纵坐标，可以绘出 $i-u$ 平面上的曲线，称为电阻元件的伏安特性曲线。伏安特性曲线为一条过原点的直线，如图 1-7 所示。

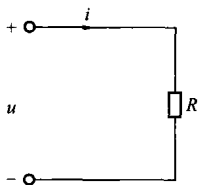


图 1-6 线性电阻的符号

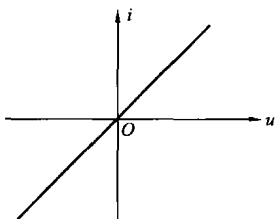


图 1-7 线性电阻元件的伏安特性曲线

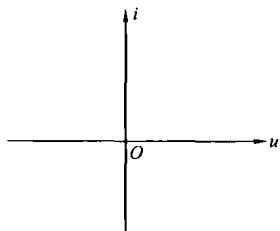
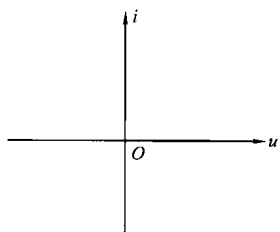
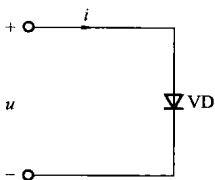
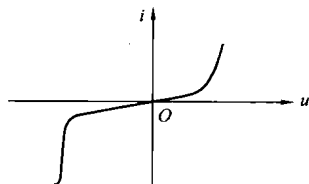


图 1-8 电阻 $R=0$ 时的伏安特性曲线

线性电阻的电阻值由它的伏安特性曲线的斜率来确定，是一个常数。当电阻值 $R=0$ 时，伏安特性曲线与 i 轴重合，如图 1-8 所示。此时不论电流 i 为何值，端电压 u 总为零，称其为“短路”。当电阻值 $R=\infty$ 时，其伏安特性曲线与 u 轴重合，如图 1-9 所示。此时不论端电压 u 为何值，电流 i 总为零，称其为“开路”或“断路”。

欧姆定律是不适合非线性电阻的。图 1-10 所示为半导体二极管的符号，其伏安特性曲线如图 1-11 所示，因而它是一个非线性电阻。非线性电阻元件的伏安关系不是一条通过原点的直线，其电阻值的大小随着电压或者电流的大小甚至方向而改变，不是常数。

图 1-9 电阻 $R=\infty$ 时的
伏安特性曲线图 1-10 半导体二极管
的符号图 1-11 半导体二极管的
伏安特性曲线

严格来讲, 线性电阻是不存在的, 也就是实际的电阻器的伏安特性曲线或多或少都是非线性的。但对于像碳膜电阻、线绕电阻等许多电阻元件, 在一定的电流 (或者电压) 运用范围内, 它们的电阻值基本不变, 因此, 可以用线性电阻作为它们的模型。

线性电阻元件取关联参考方向的情况下, 电阻吸收的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) = Ri^2(t) = \frac{u^2(t)}{R} = Gu^2(t) \quad (1-8)$$

如果电阻元件取非关联参考方向, 电阻吸收的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) = Ri^2(t) = \frac{u^2(t)}{R} = Gu^2(t) \quad (1-9)$$

由式 (1-8) 和式 (1-9) 可知, 无论电阻元件采用何种参考方向, 任何时刻电阻吸收的功率都不可能为负值, 这说明线性电阻任何时刻都不可能发出能量, 也就是说, 它吸收的电能全部转换成热能等而被消耗掉。因此说线性电阻元件为耗能元件。

在 $t_0 \sim t$ 时间内电阻吸收的电能为

$$w(t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi) d\xi \quad (1-10)$$

第五节 电压源和电流源

独立电源是二端电路元件。它可以将非电磁能量 (如热能、机械能、化学能、光能等) 转化为电磁能量, 并作为电路的激励信号 (又称激励源) 向电路提供能量。由此产生的支路电压、电流等称为响应。独立电源分为独立电压源和独立电流源两种类型, 简称电压源和电流源。下面分别予以介绍。

理想电压源的两端电压总能保持定值或一定的时间函数, 其值与流过它的电流 i 无关的元件叫理想电压源。其电路符号和伏安特性曲线如图 1-12 所示。

理想电压源的电压、电流关系可以表述为如下两点:

- (1) 电源两端电压由电源本身决定, 与外电路无关; 与流经它的电流方向、大小无关。
- (2) 通过电压源的电流由电源及外电路共同决定。

当电压源的数值恒定不变时 (直流情况), 还可以采用图 1-13 所示的符号。

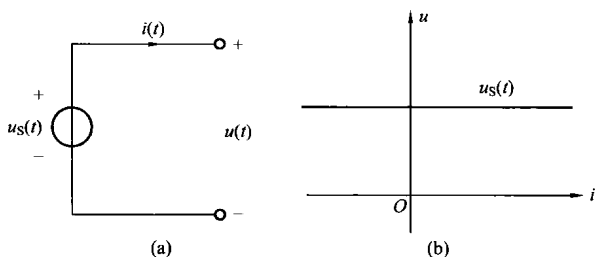


图 1-12 理想电压源符号和伏安特性曲线

(a) 电路符号; (b) 伏安特性

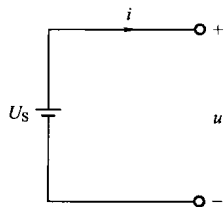


图 1-13 直流电压源符号

当电压源 $u_S(t)=0$ 时, 电压源相当于“短路”。对于一个实际电压源来说, 其内部存在损耗, 输出电压会随电流的大小而改变, 如图 1-14 所示。端口的伏安特性不再是平行于 i 轴的直线, 而是随着输出电流 i 的增大而下降。此时实际电压源可以用一个电压源串电阻的模型来等效, 如图 1-15 虚线框内电路所示。

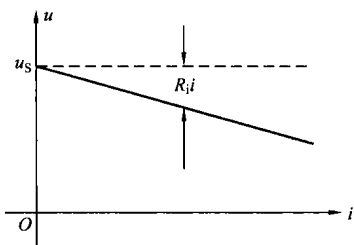


图 1-14 实际电压源伏安特性曲线

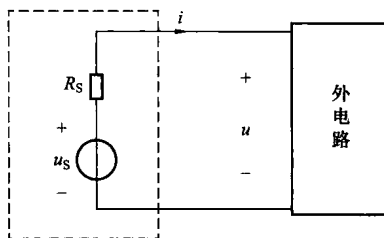


图 1-15 实际电压源电路模型

图 1-5 中, R_S 为电源的内部损耗的等效电阻。

其电路端口处电压、电流的关系为

$$u = u_S - R_S i \quad (1-11)$$

电流源也是一个二端元件, 其电流与加在它两端的电压无关, 电流源两端电压的数值则取决于外接电路。电流源的电路符号及伏安特性曲线如图 1-16 所示。

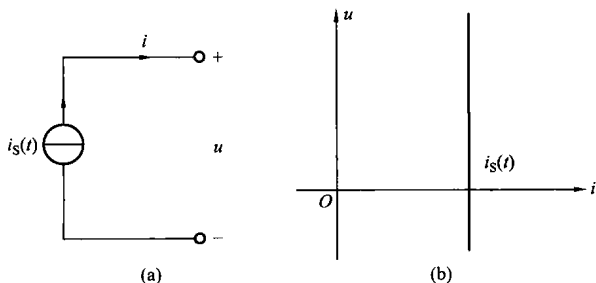


图 1-16 理想电流源符号和伏安特性曲线

(a) 电路符号; (b) 伏安特性

理想电流源的电压、电流关系可以表述为如下两点:

(1) 电流源的输出电流由电源本身决定, 与外电路无关; 与它两端电压方向、大小无关。

(2) 电流源两端的电压由电源及外电路共同决定。

当电流源的数值等于零, 即 $i_S(t)=0$ 时, 其伏安特性曲线与 u 轴平行, 与电阻 $R=\infty$ 的伏安特性曲线相同, 此时相当于“开路”。

对于一个实际电流源来说, 其内部存在损耗, 输出电流 i 不再是平行于 u 轴的直线, 而

是随着输出电压 u 的增大而减小, 如图 1-17 所示。

此时实际电流源可以用一个电流源并电阻的模型来等效, 如图 1-18 所示。

图中, R_s 为电流源内部损耗等效电阻。

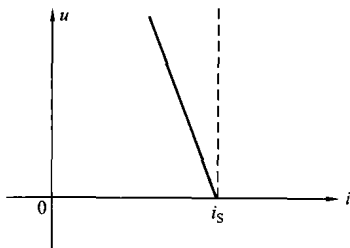


图 1-17 实际电流源伏安特性曲线

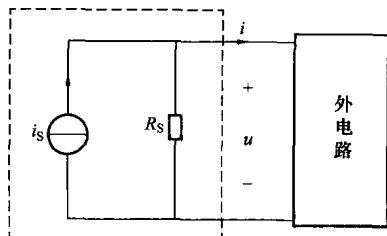


图 1-18 实际电流源电路模型

端口处电压、电流的数学表达式为

$$i = i_s - \frac{u}{R_s} \quad (1-12)$$

说明: 一个实际的电源既可以用一个电压源串联电阻的形式来等效, 也可以用一个电流源并联电阻的形式来等效, 采取何种方式, 并无严格规定。其实, 这两种等效形式在电路分析当中是可以互相置换的, 具体内容将在第二章中介绍。

第六节 受控电源

电源可分为独立电源和非独立电源两种, 前面讨论的电压源和电流源都是独立电源, 在直流电路中, 独立电源的电压或电流是个恒定不变的数值。而非独立电源也称受控电源, 其电压或电流要随电路中其他部分的电压或电流的改变而变化, 或者说, 它的电压或电流受其他部分的电压或电流的控制。受控电源具有两对端钮, 一个端口为控制端口, 另一个端口则为输出端口。加在控制端口的是控制量, 它可以是电压也可以是电流, 在输出端口得到的是被控制的电压或者电流。根据受控电源的控制量与被控制量的不同分为四种类型, 有两种受控电压源: 当控制量是电压时, 受控电源是电压控制电压源 (Voltage-Controlled Voltage Source, VCVS); 当控制量是电流时, 受控电源是电流控制电压源 (Current-Controlled Voltage Source, CCVS)。同样, 有两种受控电流源, 即电压控制电流源 (Voltage-Controlled Current Source, VCCS) 和电流控制电流源 (Current-Controlled Current Source, CCCS), 如图 1-19 所示。

为在表示上区别于独立电源, 受控电源采用菱形符号, 图中的 μ 、 r 、 g 、 α 为控制系数, 其中 r 具有电阻的量纲, g 具有电导的量纲, μ 和 α 没有量纲。当受控电源的电压或者电流与控制它的电压或者电流成正比变化时, 这种受控电源是线性的, 线性受控电源的系数为常数。本书只讨论线性受控电源, 故一般将“线性”二字略去。

受控电源与独立电源的区别是: 独立电源的电压源的电压值和电流源的电流值与电路中其他支路的电压或电流无关; 而受控电源却不同, 它是一种非独立电源, 电源数值的大小受电路中的某一个支路的电流或电压控制。独立电源在电路中起“激励”作用, 在电路中产生电压、电流; 而受控电源是反映电路中某处的电压或电流对另一处的电压或电流的控制关

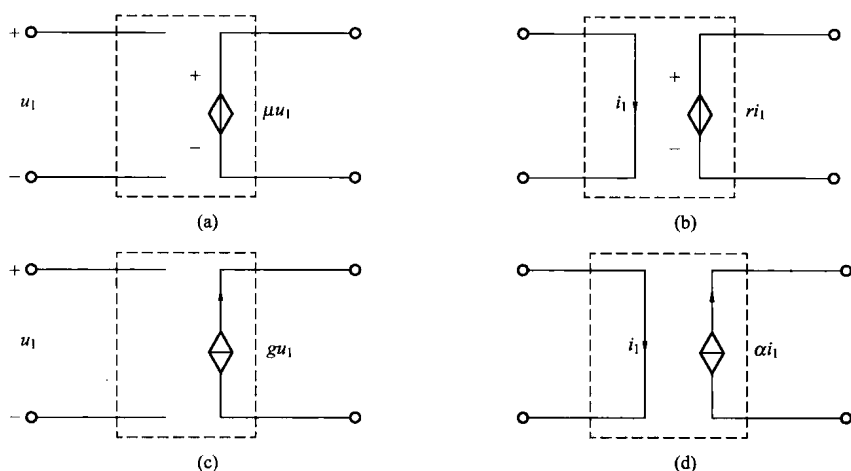


图 1-19 受控电源

(a) 电压控制电压源 (VCVS) ; (b) 电流控制电压源 (CCVS) ;
(c) 电压控制电流源 (VCCS) ; (d) 电流控制电流源 (CCCS)

系，在电路中不能作为“激励”。在求解具有受控电源的电路时，可以把受控电源作为独立电源来处理，但必须注意其激励电压或者电流是取决于控制量的。当控制量为零时，受控电源输出也为零。

需要指出的是，在实际电路中，控制量和受控电源并不一定放在一起。

【例 1-1】 电路如图 1-20 所示，试求 u_2 。

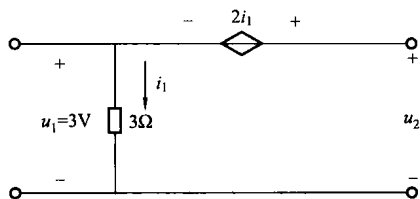


图 1-20 [例 1-1] 图

$$\text{解 } i_1 = \frac{u_1}{3} = 1\text{A}$$

$$u_2 = 2i_1 + 3i_1 = 5\text{V}$$

第七节 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律 (KCL) 和基尔霍夫电压定律 (KVL)。它反映了电路中所有支路电压和电流所遵循的基本规律，是分析和计算集总参数电路的基本定律。基尔霍夫定律与元件特性构成了电路分析的基础。

在叙述该定律之前首先介绍几个有关电路的名词。在集总电路中，电路由元件构成，我们把每一个二端元件叫做一条支路 (branch)。支路与支路的连接点叫做结点。在图 1-21 中，为了方便起见，在分析和计算电路时，经常把电路中通过同一电流的分支叫做支路，如 aec 叫做一条支路，e 点就不再叫做结点。这样，电路中的总结点数和支路数就减少了。于是，我们规定：电路中的每个分支叫做支路，而三个或者三个以上支路的连接点叫做结点。

在电路中的任一闭合路径叫做回路 (loop)，图 1-21 中 aecd、abd、bcd、abcd 等都是回路。在回路内部不含支路的回路叫做网孔 (mesh)，图 1-21 中 abce、abd、bcd 都是网孔。

基尔霍夫电流定律 (KCL—Kirchoff's Current Law): 在集总电路中, 任何时刻, 对任一结点, 所有流出结点的支路电流的代数和恒等于零。

对任一结点, 有

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0 \quad (1-13)$$

该定律是电荷守恒的体现。

假设流出该结点的电流为正, 那么流入的即为负, 对图 1-22 中结点 p, KCL 方程为

$$i_1 - i_2 + i_3 + i_4 - i_5 = 0$$

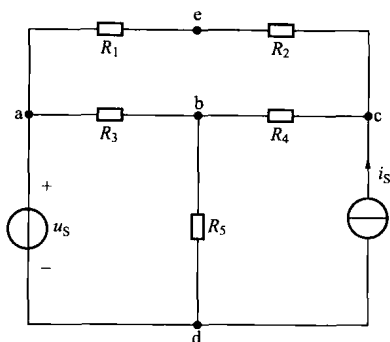


图 1-21 支路与结点

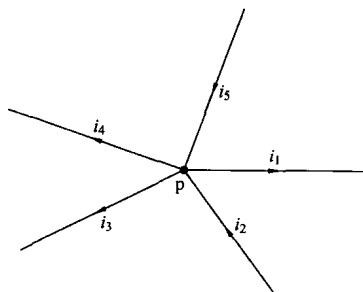


图 1-22 基尔霍夫电流定律

或改写为

$$i_1 + i_3 + i_4 = i_2 + i_5$$

所以 KCL 也可描述为: 在集总参数电路中, 对于任意一个结点来说, 任何时刻流入该结点的电流之和等于流出该结点的电流之和。KCL 与元件的性质无关, 可推广为任一假设的闭合面 (又称高斯面、广义结点) 上, 即在任何瞬间流入闭合面的电流等于流出闭合面的电流。对图 1-23 所示电路, 用虚线表示的闭合面内有 3 个结点, 即结点 a、b、c。把封闭面看成一个结点, KCL 方程为

$$-i_1 - i_2 + i_3 = 0$$

【例 1-2】 电路如图 1-24 所示, 已知 $i_1=3\text{A}$, $i_2=5\text{A}$, 试求 i_3 。

解 根据基尔霍夫电流定律, 得

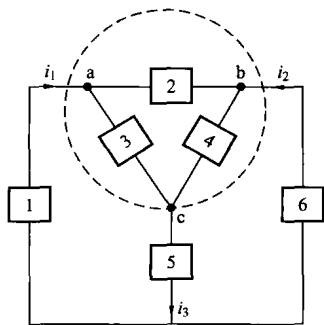


图 1-23 基尔霍夫电流定律的推广

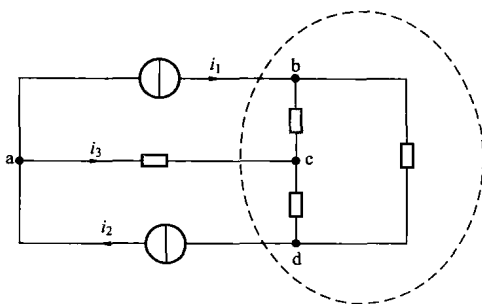


图 1-24 [例 1-2] 图