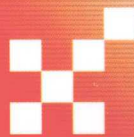




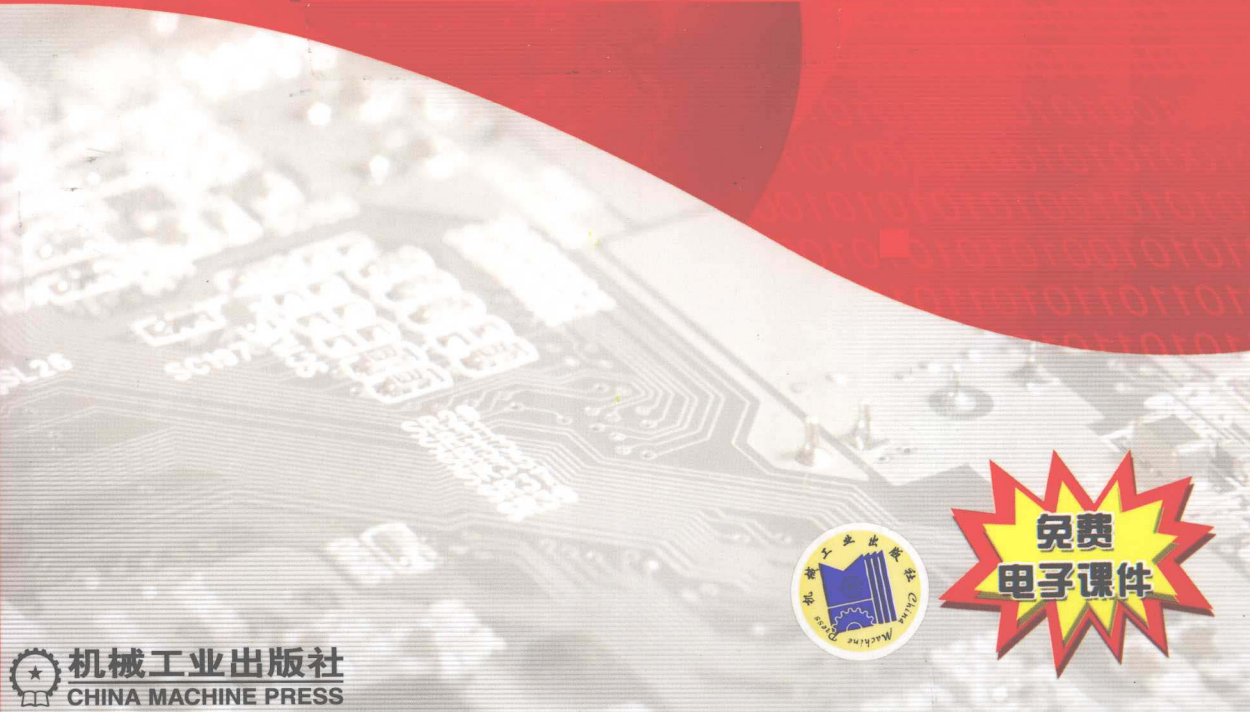
普通高等教育“十一五”国家级规划教材



电路原理

● 范承志 孙盾 童梅 等编

第3版



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



免费
电子课件

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电 路 原 理

第 3 版

范承志 孙 盾 童 梅 等编
孙雨耕 倪光正 主审



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，内容符合教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会制定的教学基本要求，以电气信息类学生拓宽专业口径为立足点，兼顾强电和弱电类专业的共同需求。本书较全面地介绍了经典电路原理知识和现代电路理论的相关内容，注重与后续课程之间的衔接，同时展示了部分电路的实际应用背景。

本书主要内容包括：电路概述；电路分析的基本方法及定理；正弦交流电路；谐振、互感及三相交流电路；双口网络；非正弦周期电路分析；网络矩阵方程；过渡过程的经典解法；拉普拉斯变换法、积分法和状态变量法；分布参数电路；非线性电路等。

本书适合普通高等学校电气信息类（强、弱电）各专业师生使用，也可作为非电类高年级学生、研究生和教师的参考书。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 wbj@cmpbook.com 索取。

图书在版编目（CIP）数据

电路原理/范承志等编. —3版. —北京：机械工业出版社，2009.11
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-28632-5

I. 电... II. 范... III. 电路理论—高等学校—教材 IV. TM13
中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 194963 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：王保家 责任编辑：李 宁 封面设计：张 静
责任校对：申春香 责任印制：杨 曦
保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2010 年 1 月第 3 版第 1 次印刷
184mm×260mm·25.25 印张·621 千字
标准书号：ISBN 978-7-111-28632-5
定价：39.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社服务中心：(010)88361066	门户网： http://www.cmpbook.com
销售一部：(010)68326294	教材网： http://www.cmpedu.com
销售二部：(010)88379649	
读者服务部：(010)68993821	封面无防伪标均为盗版

前 言

“电路原理”作为一门重要的基础学科，其主要应用领域包括电气工程、电力电子工程、信息工程、控制系统、计算机、微电子系统等，是电气信息类专业本科生必须具备的知识结构。“电路原理”主要分析和研究电路中各类电磁现象的变化规律，具有较强的逻辑性、系统性和理论性，主要培养学生严谨的思维能力和灵活的分析问题和解决问题的能力，从而进一步培养学生的创新、创造能力，为在相应学科的进一步学习和提高打好必要的基础。

本书作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，适合普通高等学校电气信息类（强、弱电）各专业师生使用，也可作为非电类高年级学生、研究生和教师的参考书。本书第1版于2001年出版，第2版入选“十五”国家级规划教材。根据“十一五”国家级规划教材的要求，本书第3版进行了部分修订。教材内容符合教育部高等学校电子电气基础课程教学指导委员会制定的教学基本要求，在取材的深度和广度、教材体系的组织安排等方面均能适应工科学生对电路基础课程的教学要求。

本书综合了浙江大学在电路课程中进行教学改革成果。作者所在的教研室近年来开展了一系列教学研究，编写了多套各具特色的电路教材（见参考文献），并开展了多方面的教学改革探索。在本教材编写过程中，作者秉承使用上述教材所积累的教学经验，并结合教学改革成果，兼收并蓄，博采众长。全书注重对电路理论基本概念、基本原理及应用的分析，力求做到内容精炼、论证严密、重点突出、适用面广，使教材兼顾强电和弱电类专业的共同教学需求。教材内容遵循由简到繁、循序渐进的教学原则，采用先静态（直流电路分析）、后稳态（正弦周期和非周期信号的分析）、再动态（过渡过程分析）的教学体系，力求使难点分散，便于施教，以完善和提高教学效果。在直流电路中讲述电路的基本计算方法和网络定理；在正弦稳态分析中集中讲述相量（复数）概念；其后讲授电路过渡过程的经典法和运算法；在拉普拉斯变换中讲述网络的频率特性；分布参数电路和非线性电路依次在后面章节讲述。全书各章节均精心编写了相应例题，有利于教师在授课中灵活选材，根据不同侧重点和学时数进行取舍。

全书内容包括：直流电路的基本概念和基本定律；电路分析的基本方法及

IV 电路原理

定理；正弦交流电路；谐振、互感及三相交流电路；双口网络；非正弦周期电路分析；网络矩阵方程；过渡过程的经典解法；拉普拉斯变换法、积分法和状态变量法；分布参数电路；非线性电路等。

本书另配置有《电路原理学习指导与习题解析 第2版》、《电路的计算机辅助分析——PSPICE和MATLAB 第2版》两本配套教材。在进行教学时，可根据不同学时和教学内容的需要，对相关章节内容进行取舍，并选用各章所附的多层次的习题。

本书的第三、四、五、六、七章由范承志执笔，第一、二、八、九章由孙盾执笔，第十、十一章由童梅执笔，第十二章由张红岩执笔，范承志负责全书的统稿和协调。在本书的编写过程中得到了浙江大学电工电子基础教学中心电工基础小组全体老师的大力支持，姚缨英、李玉玲等老师为本书的编写提出了许多建议和意见，过静娴老师为本书提供了大量素材，谨在此一并致以感谢。

全书承天津大学孙雨耕教授和浙江大学倪光正教授仔细审阅，并提出了许多宝贵意见，谨致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中不妥和错误之处在所难免，恳切希望读者给予批评指正。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 wbj@cmpbook.com 索取。

编 者

目 录

前言			
第一章 电路概述	1	第六节 正弦交流电路中的电容元件	75
第一节 实际电路与电路模型	1	第七节 基尔霍夫定律的相量形式	77
第二节 电路元件	1	第八节 正弦交流电路的阻抗、 导纳及等效转换	79
第三节 电流、电压的参考方向	7	第九节 正弦交流电路的功率计算	83
第四节 基尔霍夫定律	9	第十节 复杂正弦交流电路的计算	90
第五节 无源网络的等效变换	11	习题三	94
第六节 电压源与电流源的等效转换	15	第四章 谐振、互感及三相交流电路	99
习题一	18	第一节 电路的谐振现象分析	99
第二章 电路分析的基本方法及定理	22	第二节 互感耦合电路	104
第一节 网络图论的基本概念	22	第三节 对称三相正弦交流电路	115
第二节 支路电流法	25	第四节 不对称三相电路的概念	121
第三节 回路电流法	27	第五节 三相电路的功率及测量方法	122
第四节 网孔电流法	29	习题四	125
第五节 节点电压法	32	第五章 双口网络	129
第六节 改进节点法	36	第一节 概述	129
第七节 割集电压法	37	第二节 双口网络的开路参数	130
第八节 叠加定理	40	第三节 双口网络的短路参数	132
第九节 替代定理	43	第四节 双口网络的传输参数	136
第十节 戴维南定理和诺顿定理	44	第五节 双口网络的混合参数	139
第十一节 特勒根定理	50	第六节 双口网络矩阵参数的换算	141
第十二节 互易定理	52	第七节 双口网络的等效电路	142
第十三节 补偿定理	54	第八节 双口网络的连接	144
*第十四节 灵敏度计算	56	第九节 运算放大器	146
习题二	60	第十节 回转器	150
第三章 正弦交流电路	67	第十一节 负阻抗变换器	152
第一节 正弦交流电量的基本概念	67	习题五	153
第二节 周期交流电量的有效值	69	第六章 非正弦周期电路分析	157
第三节 正弦交流电量的相量表示	71	第一节 非正弦周期信号的傅里叶 级数分解	157
第四节 正弦交流电路中的电阻元件	73	第二节 非正弦周期信号电路的	
第五节 正弦交流电路中的电感元件	73		

稳态计算	161	第四节 复频域中的电路定律、电路 元件及其模型	253
第三节 对称三相电路中的高次谐波	166	第五节 应用拉普拉斯变换分析 线性动态电路	255
第四节 非周期信号的傅里叶变换	169	第六节 网络函数	259
第五节 电路的频率特性分析	170	第七节 网络函数的零极点分析	263
习题六	173	第八节 网络函数与稳态响应的关系	272
第七章 网络矩阵方程	176	第九节 积分法	275
第一节 概述	176	第十节 状态变量法	280
第二节 关联矩阵与节点电流定律	176	习题九	287
第三节 回路矩阵与回路电压定律	178	第十章 分布参数电路	293
第四节 割集矩阵与节点电流定律	180	第一节 概述	293
第五节 关联矩阵、回路矩阵和 割集矩阵的关系	182	第二节 均匀传输线方程	293
第六节 矩阵形式的节点电压方程	184	第三节 均匀传输线正弦稳态分析	295
第七节 矩阵形式的回路电流方程	190	第四节 均匀传输线中的行波	299
第八节 矩阵形式的割集电压方程	191	第五节 传播系数与特性阻抗	302
第九节 列表法 (2b 法)	192	第六节 不同负载条件下的传输线	303
习题七	194	第七节 无反射长线	305
第八章 过渡过程的经典解法	197	第八节 无畸变长线	307
第一节 概述	197	第九节 无损长线	308
第二节 阶跃函数和冲激函数	198	第十节 无损长线的某些应用	311
第三节 换路定则和初始条件	200	第十一节 长线作为双口网络	315
第四节 一阶电路的零输入响应	205	第十二节 无损线的暂态分析	316
第五节 一阶电路的零状态响应	208	习题十	318
第六节 一阶电路的全响应和 三要素法	212	第十一章 非线性电路	320
第七节 一阶电路的阶跃响应和 冲激响应	218	第一节 非线性电路与非线性元件	320
第八节 二阶电路的零输入响应	222	第二节 直流非线性电阻电路的图解法	324
第九节 二阶电路的零状态响应和 全响应	228	第三节 小信号分析方法	328
第十节 二阶电路的冲激响应	234	第四节 分段线性化模型	332
第十一节 用经典法求解高阶电路的 过渡过程	236	第五节 非线性正弦稳态电路	336
习题八	239	第六节 一阶非线性动态电路的 过渡过程	339
第九章 拉普拉斯变换法、积分法和 状态变量法	244	第七节 非线性动态电路的状态方程、平衡 状态和稳定性	343
第一节 拉普拉斯变换	244	第八节 非线性电路的数值求解方法	350
第二节 拉普拉斯变换的基本定理	246	第九节 相平面法	354
第三节 拉普拉斯反变换	250	习题十一	357
		*第十二章 滤波器设计简介	361
		第一节 概述	361

第二节	归一化和去归一化	362	第六节	模拟滤波器的 RC 有源实现	375
第三节	逼近问题	363	习题十二	378	
第四节	无源一端口网络的策动点 函数实现	368	习题参考答案	379	
第五节	模拟滤波器的无源实现	372	参考文献	393	

第一章 电路概述

第一节 实际电路与电路模型

电路是由若干电气设备或器件按一定方式组合起来的整体，通常为电流提供流通的途径。电路的作用是传输、存储电能或变换、处理电信号。在各行各业以及人们的日常生活中都存在着举不胜举的实际电路，如电力系统、电子及通信系统、自动控制系统和计算机信息系统等。有些电路很复杂，如超高压电力网络、大规模集成电路以及生物的神经网络等；有些电路很简单，如手电筒就是一个最简单的电路，仅由电池、灯泡和导电的电筒构成。尽管实际电路的繁简程度不同、形态各异、功能各异，但是电路都遵循同样的电路定律，这些正是“电路原理”课程所要研究的内容。

电路原理的研究对象不是实际电路，而是由实际电路抽象而成的理想化的电路模型。为了便于分析、设计电路，在电路理论中，需要根据实际电路中的各个部件的主要物理性质，建立它们的物理模型，这些抽象化的基本的物理模型就称为理想电路元件，简称电路元件。实际电路器件是理想电路元件的组合。由电路元件构成的电路，即是实际电路的电路模型，是在一定精确度范围内对实际电路的一种近似。电路元件能够表征实际电路中的电磁性质：电阻元件表征实际电路中消耗电能的性质；电感元件表征实际电路中产生磁场、储存磁能的性质；电容元件表征实际电路中产生电场、储存电能的性质；电源元件表征实际电路中将其其他形式的能量（如化学能、机械能、热能和光能等）转化为电能的性质。对于一个实际电路，如何根据它的电路特性，构建其电路模型，需要丰富的电路知识，还需运用相关的专业知识。在不同的运行条件下，一个实际电路可简化为不同的电路模型。例如，一个电感线圈在直流稳定状态下，可抽象成为一个电阻；在交流低频情况下，可抽象成为电阻和电感的串联；在高频情况下，还需考虑线圈的匝间分布电容和层间分布电容，此时可抽象成为电阻和电感串联后再与电容并联。

当实际电路的几何尺寸远远小于电路工作频率对应的电磁波的波长时，其理想化电路模型所表示的电路器件可不计其空间尺度，而仅反映器件端部电压和流入端部的电流关系，即可用一个集总参数来描述，此时采用集总参数电路模型进行分析；而当电路工作频率对应的电磁波的波长与实际电路的几何尺寸可相互比拟时，则必须采用分布参数电路模型进行分析。

第二节 电路元件

一、电阻元件

电阻元件是体现电能转化为其他形式能量的二端元件，简称电阻，用字母 R 表示。电

2 电路原理

阻的倒数称为电导，用字母 G 表示。在国际单位制中，电阻的单位是欧姆，符号为“ Ω ”，电导的单位是西门子，符号为“ S ”。

凡是端电压与端电流成正比的电阻元件称为线性电阻，线性电阻的表示符号如图 1-2-1a 所示，线性电阻的伏安特性是一条过原点的直线，其斜率即为电阻值，如图 1-2-1b 所示。

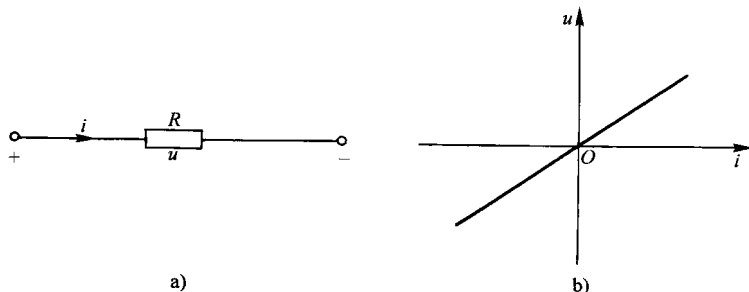


图 1-2-1

线性电阻两端电压 u 和通过它的电流 i 满足欧姆定律。对于图 1-2-1 所示电路，有数学表达式

$$u = Ri \text{ 或 } i = Gu \quad (1-2-1)$$

线性电阻中消耗的功率为

$$P = ui = Ri^2 = Gu^2 \quad (1-2-2)$$

对应于时间 t 内消耗的能量为

$$W = \int p dt \quad (1-2-3)$$

在国际单位制中，功率的单位是瓦特，符号为“ W ”，能量的单位是焦耳，符号为“ J ”。电能表（又称电度表）的计量单位是千瓦时（ $kW \cdot h$ ），也称为度。

$$1 \text{ 度} = 1kW \cdot h = 1000 \times 3600J = 3.6 \times 10^6 J$$

凡是端电压和端电流不成比例关系的电阻元件称为非线性电阻。非线性电阻的阻值随所通过的电流大小或方向变化而变化，不能用一个确定的电阻值来表示，要用伏安特性表示。（有关非线性电阻的讨论安排在第十章进行。）

此外，电阻元件还有时变和非时变之分。时变电阻的伏安特性（无论是线性的还是非线性的）随时间的变化而变化，非时变电阻的伏安特性不随时间变化。

二、电容元件

电容元件是体现电场储能的二端元件，简称电容，用字母 C 表示，符号如图 1-2-2 所示。在国际单位制中，电容的单位是法拉，符号为“ F ”。

在实际电路中，只要具有电场储能的物理现象，就可以抽象出对应的电容元件。根据普通物理学知识可知，电容的端电压与电荷有着确定关系。如果电容上的电荷与端电压成比例关系，则该电容称为线性电容，有表达式

$$q = Cu_c \quad (1-2-4)$$

在国际单位制中，电荷 q 的单位是库仑，符号为“ C ”；电压 u_c 的单位是伏特，符号为“ V ”。如果电容上的电荷与端电压不成比例关系，电容的大小与电荷或电压有关，则该电容

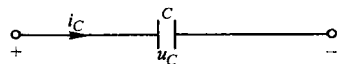


图 1-2-2

称为非线性电容。非线性电容用库伏特性表示。如果电容的库伏特性（无论是线性的还是非线性的）随时间变化，那么称为时变电容，否则，称为非时变电容。

电容中的电流等于电荷的变化率。对于图 1-2-2 所示电路，有数学表达式

$$i_C(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (1-2-5)$$

对于线性非时变电容，式 (1-2-5) 可写为

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} \quad (1-2-6)$$

在直流电路中，电压 u_C 对时间 t 的变化率为零，所以电流 i_C 为零，因此直流电流不能通过电容，电容具有隔直流电流的作用。

对式 (1-2-6) 作由 t_0 至 t 的积分，则得到

$$u_C(t) = u_C(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_C(\xi) d\xi \quad (1-2-7)$$

式 (1-2-7) 表明电容电压除与充电电流有关外，还与 t_0 时刻的电压有关，即具有记忆性，因此电容被称为记忆元件。而前述电阻元件任意时刻的电压只与此刻的即时电流相关，与以前的通电状况无关，因此电阻被称为非记忆元件。

电容元件是储能元件，它将外界输入的电能储存在它的电场中，外界输入的功率为

$$p(t) = u_C(t) i_C(t) = u_C(t) C \frac{du_C(t)}{dt}$$

在充电过程中，电容吸收的能量为

$$\begin{aligned} W_C &= \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t C u_C(\xi) \frac{du_C(\xi)}{d\xi} \cdot d\xi = \int_{t_0}^t C u_C(\xi) du_C(\xi) \\ &= \frac{1}{2} C [u_C^2(t) - u_C^2(t_0)] \end{aligned} \quad (1-2-8)$$

当 t_0 时刻电容电压为零时，电容吸收的全部电能储存于其电场中，因此电容的储能为

$$W_C = \frac{1}{2} C u_C^2 = \frac{1}{2} q u_C = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} \quad (1-2-9)$$

三、电感元件

电感元件是体现磁场储能的二端元件，简称电感，用字母 L 表示，符号如图 1-2-3 所示。在国际单位制中，电感的单位是亨利，符号为“H”。

在实际电路中，只要具有磁场储能的物理现象，就可以抽象出对应的电感元件。根据普通物理学知识可知，电感交

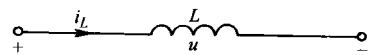


图 1-2-3

链的磁链与其端电流有着确定关系。如果电感上交链的磁链与其端电流成比例关系，则该电感称为线性电感，有表达式

$$\Psi = Li_L \quad (1-2-10)$$

在国际单位制中，磁链 Ψ 的单位是韦伯，符号为“Wb”，电流 i 的单位是安培，符号为“A”。如果电感上交链的磁链与其端电流不成比例关系，电感的大小与磁链或电流有关，则该电感称为非线性电感。非线性电感用韦安特性表示。如果电感的韦安特性（无论是线性的还是非线性的）随时间变化，那么称为时变电感，否则，称为非时变电感。

4 电路原理

电感上的感应电压等于磁链的变化率。对于图 1-2-3 所示电路，有数学表达式

$$u_L(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} \quad (1-2-11)$$

对于线性非时变电感，式 (1-2-11) 可写为

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (1-2-12)$$

在直流电路中，电流 i_L 对时间 t 的变化率为零，所以电压 u_L 为零，因此对于直流电来说，电感元件相当于一条短接导线。

对式 (1-2-12) 作由 t_0 至 t 的积分，则得到

$$i_L(t) = i_L(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u_L(\xi) d\xi \quad (1-2-13)$$

与电容元件一样，电感元件也是记忆元件。同理，可推得电感元件的磁场储能为

$$W_L = \frac{1}{2} Li_L^2 = \frac{1}{2} \Psi i_L = \frac{1}{2} \frac{\Psi^2}{L} \quad (1-2-14)$$

电阻 R 、电容 C 、电感 L 是电路中三个最基本的无源元件。下面介绍有源元件。

四、独立电源元件

实际电路中一般均有电源，电源可以是各种电池、发电机、电子电源，也可以是微小的电信号。在电路分析中，根据电源的不同特性，可建立两种不同的表征电源元件的电路模型：一种是理想电压源，另一种是理想电流源。

1. 理想电压源

图 1-2-4a、b、c 表示出了理想电压源的三种符号，图 a 为我国教材中的常用符号，图 b 为英美教材中的常用符号，图 c 为电池组符号。本书采用图 a 符号。 U_S 代表电压源从正极到负极的电压降落为 U_S ， E_S 代表电压源从负极到正极的电位升高为 E_S 。

理想电压源为外界提供确定的电压，其电压的大小不随流过电压源的电流的大小变化而变化。理想电压源的伏安特性如图 1-2-5b 中实线所示，是一条平行于 I 轴、截距为 U_S 的直线。其伏安特性表明：无论流过理想电压源的电流 I 大小、方向如何，理想电压源两端的电压始终是 U_S ，而流过理想电压源的电流 I 的大小，取决于与理想电压源连接的外界电路的情况。

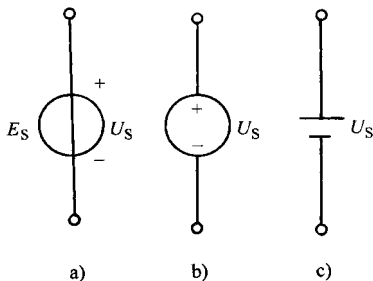


图 1-2-4

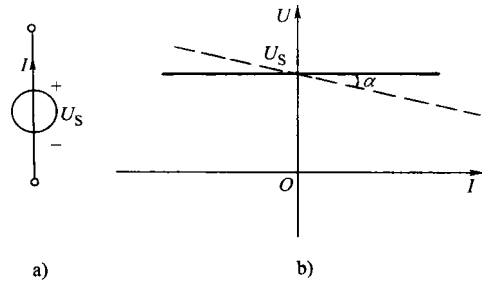


图 1-2-5

值得一提的是：非零值的理想电压源不可以短路。如果短路，短接导线要求理想电压源两端电压为零，而理想电压源两端电压又不为零，因此出现了矛盾的情形。究其原因在于理想电压源模型的适用范围是有限的。事实上，任何物理或数学模型的适用范围都不是无限的。此时，应采用实际电压源模型。一个实际电压源的伏安特性如图 1-2-5b 中虚线所示。

描述虚线的方程为

$$U = U_S - rI \quad (1-2-15)$$

式中, $r = \tan\alpha$ 。

由式 (1-2-15) 可以画出实际电压源模型, 如图 1-2-6 所示。它由一个理想电压源和一个内电阻串联而成。

当一个理想电压源的端电压 U_S 等于零时, 其伏安特性与 $U-I$ 平面上的横轴 (I 轴) 重合, 此时, 理想电压源相当于一根短接导线。当一个实际电源的内阻 r 很小、可忽略时, 可将其看做理想电压源。

2. 理想电流源

图 1-2-7a、b 表示出了理想电流源的两种符号, 图 a 为我国教材中的常用符号, 图 b 为英美教材中的常用符号。

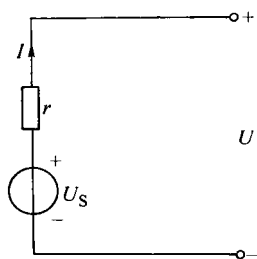


图 1-2-6

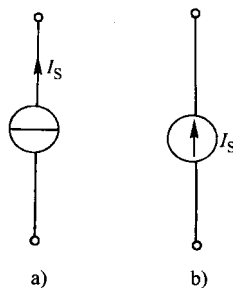


图 1-2-7

理想电流源为外界提供确定的电流, 其电流的大小不随电流源两端的电压的大小变化而变化。理想电流源的伏安特性如图 1-2-8b 中实线所示, 是一条平行于 U 轴、与 I 轴垂直交于 I_S 的直线。从图中可看出: 无论理想电流源两端的电压是正是负、是大是小, 理想电流源输出的电流 I_S 始终不变, 而理想电流源两端的电压 U 的大小, 则取决于与理想电流源连接的外界电路的情况。

与理想电压源对偶的情况是: 非零值的理想电流源不可以开路。开路意味着电流为零, 而理想电流源的电流不为零, 出现了矛盾, 其原因是理想电流源模型此时不适用了, 而需要用实际电流源模型。一个实际电流源的伏安特性如图 1-2-8b 中虚线所示。描述虚线的方程为

$$I = I_S - \frac{u}{r} \quad (1-2-16)$$

式中, $r = \tan\beta$ 。

由式 (1-2-16) 可以画出实际电流源模型, 如图 1-2-9 所示, 它由一个理想电流源与一个电阻并联而成。

当一个理想电流源的电流 I_S 等于零时, 其伏安特性与 $U-I$ 平面上的纵轴 (U 轴) 重合, 此时, 理想电流源相当于一根开路

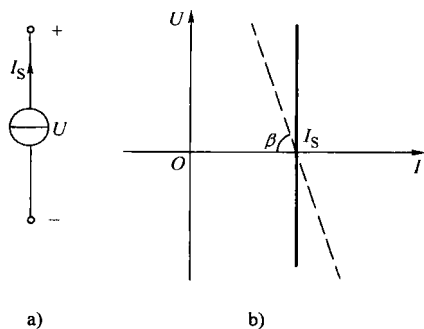


图 1-2-8

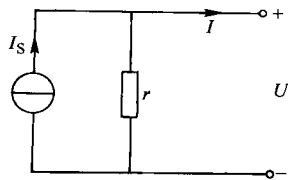


图 1-2-9

导线。

五、受控电源元件

除了上述独立电压源和独立电流源外，一些实际电子元件常用含受控源的电路模型来表征。受控源又称为非独立源。受控电源模型一般有输入和输出两个端口，其输出端的电压或电流大小受输入端支路电压或电流变量的控制，受控源输出端外特性为一个受控的电压源或电流源。

根据控制变量和输出特性的不同，受控源分为四种类型，即电压控制电流源（VCCS）、电压控制电压源（VCVS）、电流控制电压源（CCVS）和电流控制电流源（CCCS），如图 1-2-10 所示，其中 g 、 μ 、 r 、 α 为控制系数。在图 1-2-10a 中，受控电流源与控制电压成正比， g 是一个比例常数，具有电导的量纲，称为转移电导。在图 1-2-10b 中，受控电压源与控制电压成正比， μ 是一个比例常数，无量纲，称为转移电压比。在图 1-2-10c 中，受控电压源与控制电流成正比， r 是一个比例常数，具有电阻的量纲，称为转移电阻。在图 1-2-10d 中，受控电流源与控制电流成正比， α 是一个比例常数，无量纲，称为转移电流比。

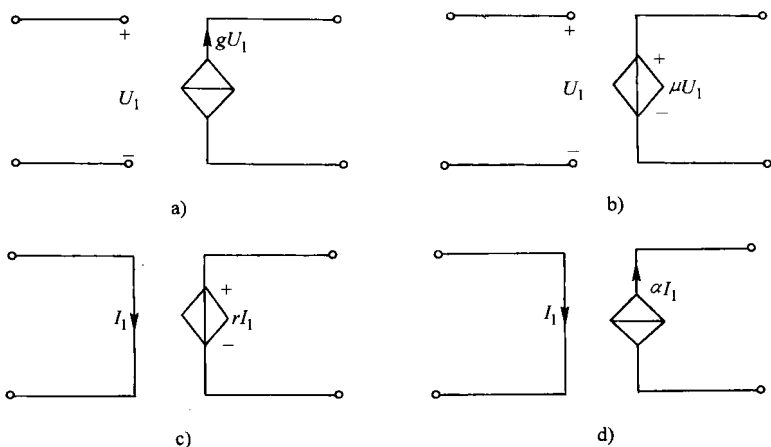


图 1-2-10

受控量与控制量成比例关系的受控源称为线性受控源，否则，称为非线性受控源。

晶体管、运算放大器、变压器等实际元器件可用含受控源的电路模型表征。

图 1-2-11a 是普通晶体管的一个基本放大电路，晶体管在放大区域工作时，其集电极电流 i_C 的大小受流入基极的电流 i_B 的控制。在分析此类电路时，晶体管单元（图中电路的点画线框内部分）可以用图 1-2-11b 所示的电流控制电流源单元来表示。

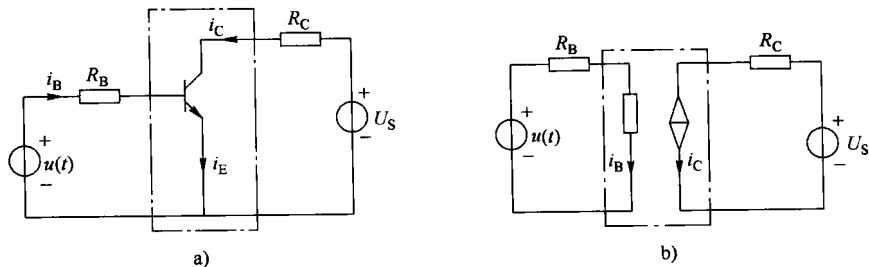


图 1-2-11

例 1-2-1 图1-2-12所示的电路中, 已知独立电压源 $U_S = 10\text{V}$, $R_1 = 100\Omega$, $R_2 = 50\Omega$, $\alpha = 0.9$, 试求 U_2 为多少?

解: 根据欧姆定律得

$$I_1 = \frac{U_S}{R_1} = \frac{10}{100}\text{A} = 0.1\text{A}$$

$$I_2 = \alpha I_1 = 0.9 \times 0.1\text{A} = 0.09\text{A}$$

$$U_2 = R_2 I_2 = 50 \times 0.09\text{V} = 4.5\text{V}$$

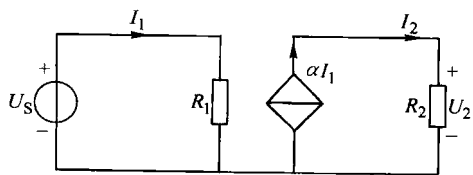


图 1-2-12

第三节 电流、电压的参考方向

在电路理论中, 电流的正方向规定为正电荷运动的方向。在任意一个电路中, 在任一确定的瞬时, 每一个元件中流过的电流都有一个确定的大小和方向, 但是在未作分析计算之前, 各元件上电流的大小和方向并不知道, 所以在电路分析和计算中, 首先要对每个元件假设一个电流的正方向, 这就是电流的参考方向。在电路图中, 电流的参考方向用箭头表示, 如图 1-3-1a、b 所示。当完成电路的分析计算后, 如果求得电流 I 为正时, 说明电流的参考方向即是实际电流的正方向, 实际电流由 A 流向 B; 当电流 I 为负时, 说明电流的参考方向与实际电流正方向相反, 实际电流由 B 流向 A。

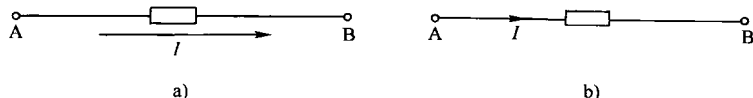


图 1-3-1

电流的参考方向是任意假定的电流正方向, 可以自由选择, 但是一旦选定之后, 在分析过程中就不再改变。对照参考方向, 各元件电流均是代数量, 即可正可负。正值表示实际电流的正方向与参考方向一致, 负值表示两者方向相反。离开参考方向只讲电流的大小是不完整的, 离开参考方向只讲电流的正负也是没有意义的。

在电路理论中, 电压的正方向规定为电压降落的方向。在对电路未作分析计算之前, 同样不知道每个元件上电压的实际正方向。所以在电路分析计算中, 也要对每个元件假设一个电压的正方向, 即电压的参考方向。在电路图中, 电压参考方向的表示方法如图 1-3-2a、b 所示。当电压 U 为正值时, 说明电压的参考方向即是电压的实际正方向, A 点的电位比 B 点电位高 U ; 当电压 U 为负值时, 说明电压的参考方向与电压的实际正方向相反, A 点的电位比 B 点低 $|U|$ 。

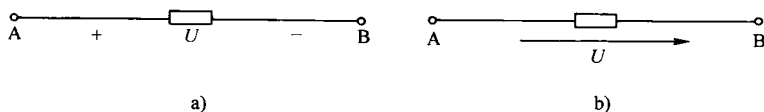


图 1-3-2

对于一个电路元件, 当它的电压和电流的参考方向选为一致时, 通常称为关联参考方向, 如图 1-3-3a 所示。在关联参考方向情况下, 若元件功率 $P = UI$ 为正值, 表明该元件消

8 电路原理

耗功率，此时电流从高电位点流向低电位点；相反，若元件功率 $P = UI$ 为负值，表明该元件发出功率，此时电流从低电位点流向高电位点。当一个电路元件的电压和电流的参考方向选为相反时，通常称为非关联参考方向，如图 1-3-3b 所示。在非关联参考方向情况下，上述结论恰好都相反，即当元件功率 $P = UI$ 为正值时，表明该元件发出功率；当元件功率 $P = UI$ 为负值时，表明该元件消耗功率。

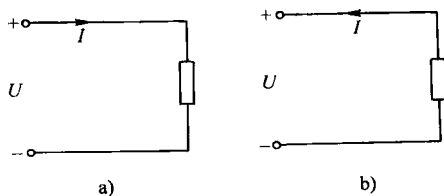


图 1-3-3

对于一段由若干个元件串联而成的支路，只有在支路端电压和电流的参考方向选定后，才能写出端电压和电流的关系式。例如，一个电阻 R 和一个电压源 U_S 串联的支路，当选择各种不同的端电压和电流的参考方向（如图 1-3-4a、b、c、d 所示）时，其端电压和电流的关系式分别为

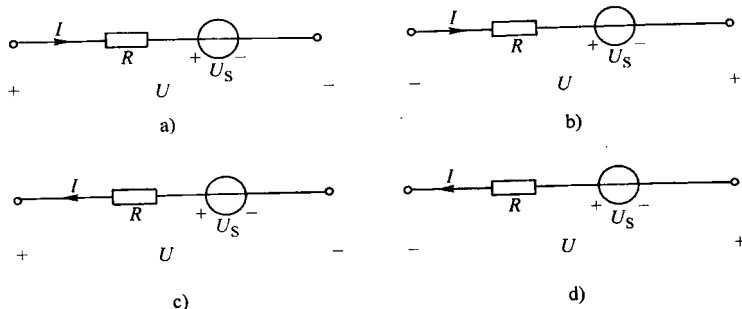


图 1-3-4

对于图 a 有： $U = RI + U_S$

对于图 b 有： $U = -RI - U_S$

对于图 c 有： $U = -RI + U_S$

对于图 d 有： $U = RI - U_S$

例 1-3-1 图 1-3-5 所示电路中，已知电流源电流 $I_S = 1A$ ，电压源电压 $U_S = 6V$ ，电阻 $R = 10\Omega$ ，试求电流源的端电压 U 、电压源和电流源发出的功率分别为多少？

解：由图 1-3-5 可知，流过电阻 R 的电流就等于 I_S ，故电流源的端电压为

$$U = RI_S + U_S = 10 \times 1V + 6V = 16V$$

对于电压源，流过电压源的电流即是 I_S ，它与电压源的端电压的方向一致， $P = U_S I_S > 0$ ，说明电压源消耗功率，而例题要求电压源发出功率，于是

$$P_{U_S} = -U_S I_S = -6W$$

对于电流源，其电流 I_S 与端电压方向相反， $P = UI_S > 0$ ，说明电流源发出功率，于是

$$P_{I_S} = UI_S = 16W$$

对于电阻 R ，它消耗的功率为

$$P_R = I_S^2 R = 10W$$

整个电路发出功率和消耗功率相等，能量守恒。

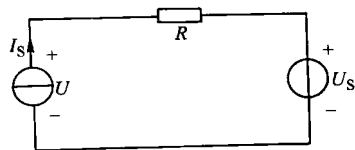


图 1-3-5

第四节 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是描述电路中电压、电流遵循的最基本的规律。在介绍基尔霍夫定律之前，首先介绍若干表述电路结构的名词。

一、支路、节点、回路

支路：单个或若干个元件串联成的分支称为支路。例如，图 1-4-1 所示电路中含有六条支路： R_1 和电压源 U_{S1} 串联成一条支路； R_5 和电压源 U_{S5} 串联成一条支路； R_2 、 R_3 、 R_4 和 R_6 分别单独成为一条支路。

节点：三条或三条以上的支路的连接点称为节点。图 1-4-1 中含有①、②、③、④四个节点。

回路：由若干支路组成的闭合路径。在图 1-4-1 所示电路中， U_{S1} 和 R_1 、 R_3 、 R_2 所在的三条支路组成一个回路； U_{S1} 和 R_1 、 U_{S5} 和 R_5 、 R_4 所在的三条支路组成一个回路； R_2 、 R_3 、 U_{S5} 和 R_5 、 R_4 所在的四条支路也组成回路。

网孔：回路内部不含有支路的回路称为网孔。上述的 U_{S1} 和 R_1 、 R_3 、 R_2 所在的三条支路组成的回路就是网孔，而 R_2 、 R_3 、 U_{S5} 和 R_5 、 R_4 所在的四条支路组成的回路就不是网孔，因为它中间含有一条由 U_{S1} 和 R_1 串联而成的支路。在图 1-4-1 所示的电路中含有三个网孔，即 U_{S1} 和 R_1 、 R_3 、 R_2 所在的三条支路组成的网孔； U_{S1} 和 R_1 、 U_{S5} 和 R_5 、 R_4 所在的三条支路组成的网孔； R_3 、 R_6 、 U_{S5} 和 R_5 所在的三条支路组成的网孔。

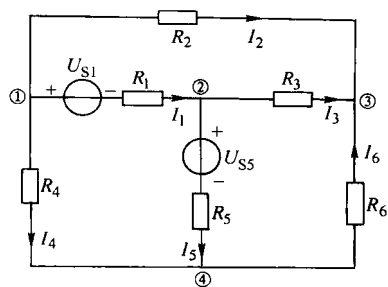


图 1-4-1

二、基尔霍夫电流定律 (KCL[⊖])

基尔霍夫电流定律反映了连接于任一节点上各支路电流的约束关系，其内容为：流出（或流入）任一节点的各支路电流的代数和为零，其数学表达式为

$$\sum I = 0 \quad (1-4-1)$$

其中规定：流出节点的电流取正号，流入节点的电流取负号。

基尔霍夫电流定律的本质是电流连续性原理，是电磁场中电荷守恒原理在电路中的表现形式。因为在任何节点上不可能积聚电荷，所以在任何时刻流入节点的电荷必然等于流出该节点的电荷。

在图 1-4-1 所示电路中，可写出各节点的 KCL 方程

$$\text{节点①: } I_1 + I_2 + I_4 = 0$$

$$\text{节点②: } -I_1 + I_3 + I_5 = 0$$

$$\text{节点③: } -I_2 - I_3 - I_6 = 0$$

$$\text{节点④: } -I_4 - I_5 + I_6 = 0$$

基尔霍夫电流定律还可以扩展到任一闭合面，即流出（或流入）任一闭合面的所有支路电流的代数和为零。如图 1-4-2 所示，虚线为任一闭合面，有三条支路穿过此闭合面，则有

[⊖] KCL 和 KVL 分别是 Kirchhoff's Current Law 和 Kirchhoff's Voltage Law 的缩写。