



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



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 张红岩 编

第4版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

免费
电子课件

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电 路 原 理

第 4 版

范承志 孙 盾 童 梅 张红岩 编
孙雨耕 倪光正 主审



机 械 工 业 出 版 社

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,内容符合教育部高等学校电工电子基础课程教学指导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,力求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的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实现良好衔接,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;滤波器设计简介;磁路分析基础等。

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,也可供相关工科专业高年级学生、研究生和教师参考。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登陆 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 xufan666@163.com 索取。

图书在版编目(CIP)数据

电路原理/范承志等编. —4版. —北京:机械工业出版社, 2014. 8
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
ISBN 978-7-111-47158-5

I. ①电… II. ①范… III. ①电路理论-高等学校-教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第136943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:徐凡 责任编辑:徐凡

封面设计:张静 责任校对:程俊巧 张莉娟

责任印制:刘岚

北京京丰印刷厂印刷

2014年8月第4版第1次印刷

184mm×260mm·26.75印张·655千字

标准书号:ISBN 978-7-111-47158-5

定价:48.00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

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

第4版前言

本书的初版于2001年出版后连续入选“十五”、“十一五”、“十二五”国家级规划教材，从教材使用和教学实践来看，能较好满足电路课程的教学需要，是适合课程教学的教材。

随着科学技术的发展，电气应用领域日新月异，已渗透到当今社会生活的各个方面。“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。电路理论主要分析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、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“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材，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。本书在原教材《电路原理第3版》的基础上进行了部分修订。教材内容符合教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会制定的教学要求，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。

本书综合体现了浙江大学在电路课程中进行教学改革成果。作者所在的电工电子基础教学中心近年来开展了一系列教学研究和教学改革工作，编写了多套各具特色的电路教材（见参考文献）。在此次教材的修订编写过程中，作者秉承使用上述教材所积累的教学经验，并结合近年来教材整体优化的教学改革成果，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。在直流电路教学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；承接直流和交流稳态的学习基础，在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

IV 电路原理

性；非线性电路和分布参数电路依次在后面章节讲述；介绍了有关电路滤波器设计的初步知识，这一部分内容属于电路综合问题；附录部分介绍了磁路的基本知识概念。全书各章节均精心编写相应例题，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；网络的基本计算方法和定理；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；滤波器设计简介；磁路及基本分析方法等。

本书另配置有《电路原理学习指导与习题解析第2版》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、七章和附录由范承志执笔，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。本书的编写过程还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，在此谨致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，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 xufan666@163.com 索取。

编 者

目 录

第4版前言

第一章 电路概述..... 1

第一节 实际电路与电路模型 1

第二节 电路元件 2

第三节 电流、电压的参考方向 7

第四节 基尔霍夫定律 9

第五节 无源网络的等效变换 12

第六节 电压源与电流源的等效转换 17

习题一 20

第二章 电路分析的基本方法及 定理 24

第一节 网络图论的基本概念 24

第二节 支路电流法 28

第三节 回路电流法 30

第四节 网孔电流法 32

第五节 节点电压法 34

第六节 改进节点法 39

*第七节 割集电压法 40

第八节 叠加定理 43

第九节 替代定理 46

第十节 戴维南定理和诺顿定理 47

第十一节 特勒根定理 53

第十二节 互易定理 55

第十三节 补偿定理 58

*第十四节 灵敏度计算 60

习题二 64

第三章 正弦交流电路 71

第一节 正弦交流电量的基本概念 71

第二节 周期交流电量的有效值 74

第三节 正弦交流电量的相量表示 75

第四节 正弦交流电路中的电阻元件 77

第五节 正弦交流电路中的电感元件 78

第六节 正弦交流电路中的电容元件 80

第七节 基尔霍夫定律的相量形式 82

第八节 正弦交流电路的阻抗、
导纳及等效转换 83

第九节 正弦交流电路的功率计算 88

第十节 复杂正弦交流电路的计算 95

习题三 99

第四章 谐振、互感及三相交流 电路 104

第一节 电路的谐振现象分析 104

第二节 互感耦合电路 110

第三节 对称三相正弦交流电路 122

第四节 不对称三相电路的概念 127

第五节 三相电路的功率及测量方法 129

习题四 132

第五章 双口网络 136

第一节 概述 136

第二节 双口网络的开路参数 137

第三节 双口网络的短路参数 139

第四节 双口网络的传输参数 143

第五节 双口网络的混合参数 146

第六节 双口网络矩阵参数的换算 148

第七节 双口网络的等效电路 149

第八节 双口网络的连接 151

第九节 运算放大器 153

第十节 回转器 157

第十一节 负阻抗变换器 159

习题五 160

第六章 非正弦周期电路分析 164

第一节 非正弦周期信号的傅里叶

级数分解	164	第一节 拉普拉斯变换	257
第二节 非正弦周期信号电路的 稳态计算	169	第二节 拉普拉斯变换的基本定理	259
第三节 对称三相电路中的高次谐波	174	第三节 拉普拉斯反变换	263
第四节 非周期信号的傅里叶变换	176	第四节 复频域中的电路定律、电路 元件及其模型	266
第五节 电路的频率特性分析	177	第五节 应用拉普拉斯变换分析 线性动态电路	268
第六节 滤波器	180	第六节 网络函数	273
习题六	184	第七节 网络函数的零极点分析	277
第七章 网络矩阵方程	187	第八节 网络函数与稳态响应的关系	282
第一节 概述	187	第九节 积分法	284
第二节 关联矩阵与节点电流定律	187	第十节 状态变量法	290
第三节 回路矩阵与回路电压定律	189	习题九	298
第四节 割集矩阵与节点电流定律	191	第十章 分布参数电路	303
第五节 关联矩阵、回路矩阵和 割集矩阵的关系	193	第一节 概述	303
第六节 矩阵形式的节点电压方程	195	第二节 均匀传输线方程	303
第七节 矩阵形式的回路电流方程	201	第三节 均匀传输线正弦稳态分析	305
第八节 矩阵形式的割集电压方程	202	第四节 均匀传输线中的行波	309
第九节 列表法 (2b 法)	203	第五节 传播系数与特性阻抗	312
习题七	205	第六节 不同负载条件下的传输线	313
第八章 过渡过程的经典解法	208	第七节 无反射长线	315
第一节 概述	208	第八节 无畸变长线	317
第二节 阶跃函数和冲激函数	209	第九节 无损长线	318
第三节 换路定则和初始条件	211	第十节 无损长线的某些应用	322
第四节 一阶电路的零输入响应	216	第十一节 长线作为双口网络	325
第五节 一阶电路的零状态响应	219	第十二节 无损线的暂态分析	326
第六节 一阶电路的全响应和 三要素法	223	习题十	328
第七节 一阶电路的阶跃响应和 冲激响应	230	第十一章 非线性电路	331
第八节 二阶电路的零输入响应	234	第一节 非线性电路与非线性元件	331
第九节 二阶电路的零状态响应和 全响应	240	第二节 直流非线性电阻电路的图解法	335
第十节 二阶电路的冲激响应	246	第三节 小信号分析方法	339
第十一节 用经典法求解高阶电路的 过渡过程	249	第四节 分段线性化模型	343
习题八	251	第五节 非线性正弦稳态电路	347
第九章 拉普拉斯变换法、积分法和 状态变量法	257	第六节 一阶非线性动态电路的 过渡过程	350
		第七节 非线性动态电路的状态方程、平衡 状态和稳定性	354
		第八节 非线性电路的数值求解方法	361
		第九节 相平面法	365

习题十一	369	习题十二	390
第十二章 滤波器设计简介	373	附录 磁路及基本分析方法	391
第一节 概述	373	A. 1 磁路基本概念与物理量	391
第二节 归一化和去归一化	374	A. 2 铁磁物质的磁化特性	392
第三节 逼近问题	375	A. 3 磁路的基本定律	395
第四节 无源一端口网络的策动点 函数实现	380	A. 4 恒定磁通磁路计算	396
第五节 模拟滤波器的无源实现	384	A. 5 交变磁通磁路介绍	401
第六节 模拟滤波器的 RC 有源实现	387	习题参考答案	404
		参考文献	419

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。

实际电路的繁简程度各不相同，组成电路的元件种类繁多、功能各异。即使是同一个元件，在不同应用环境和条件下，器件所反映的物理特性也不尽相同。但是电路变化都遵循共同的电路定律，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主要的物理性质，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；电源元件反映实际电路中将其他形式的能量（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，此时可抽象成电阻和电感串联后再与电容并联。可见，对实际电路的抽象建模是一个复杂的任务。

实际电路元件的抽象建模，是把一个具有实际尺寸的器件用一个抽象参数来描述，例如照明灯泡可用一个电阻来表示，同样一定长度的实际连接导线也可用一个集总电阻来表示。一个包括灯泡、连接导线和电池的实际电路抽象成由理想导线连接两个电阻（分别代表灯泡和导线）和电源的集总参数电路。在上面对实际元件抽象建模时，电路器件的空间尺度忽略不计，例如一定长度的实际连接导线是用一个无尺寸的电阻描述，导线两端任何时刻流入和流出的电流是相等的。但实际上电路中电流是以电磁波的速度流动，电流从元件输入端流到输出端是需要时间的。当输入电流变化时，某一时刻输入、输出端的电流值可能不相

等, 这样该元件就无法描述成一个集总参数元件。

当实际元件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, 实际元件两端的电流变化可以忽略不计, 其理想化电路模型所表示的电路器件可不计其空间尺度, 即可用一个集总参数元件来描述该器件端部电压和流入端部的电流的关系。由集总参数元件建模组成的电路称为集总参数电路。如果电路工作频率对应的电磁波的波长与实际元件的几何尺寸相互比拟时, 器件中各处的电压电流值可能不相等, 则必须采用分布参数电路模型进行分析。有关分布参数电路的概念将在第十章专题讨论, 其余各章讨论的均是集总参数电路。

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。

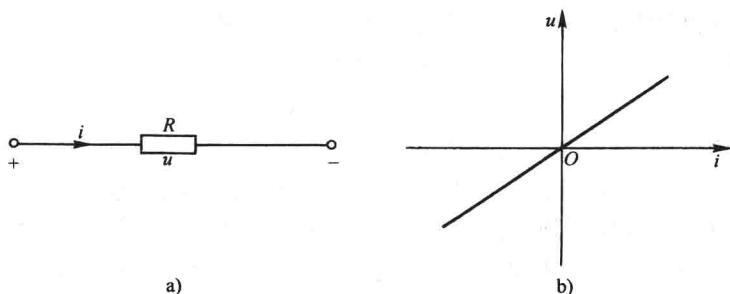


图 1-2-1

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

$$W = \int_0^t p dt \quad (1-2-3)$$

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量储存在它的电场中,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

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

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

$$W_c = \frac{1}{2} Cu_c^2 = \frac{1}{2} qu_c = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} \quad (1-2-9)$$

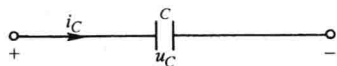


图 1-2-2

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

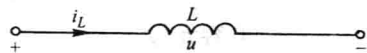


图 1-2-3

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

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。

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，电感元件相当于一根短接导线。

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。

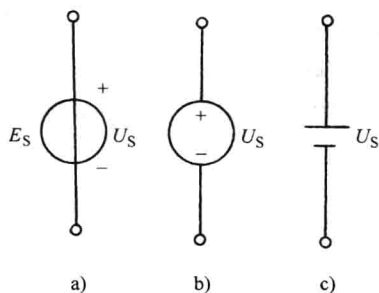


图 1-2-4

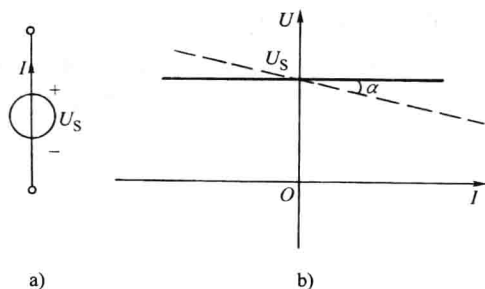


图 1-2-5

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段短接导线。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。

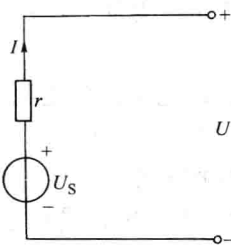


图 1-2-6

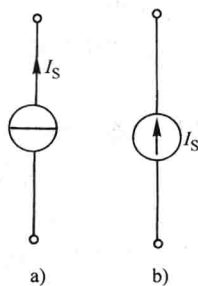


图 1-2-7

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。

6 电路原理

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导线。

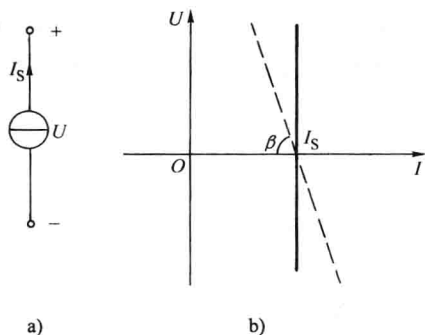


图 1-2-8

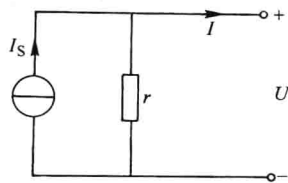


图 1-2-9

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。

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。

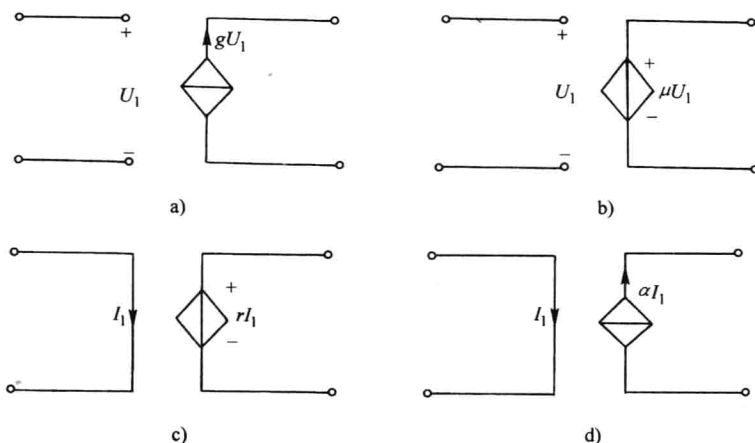


图 1-2-10

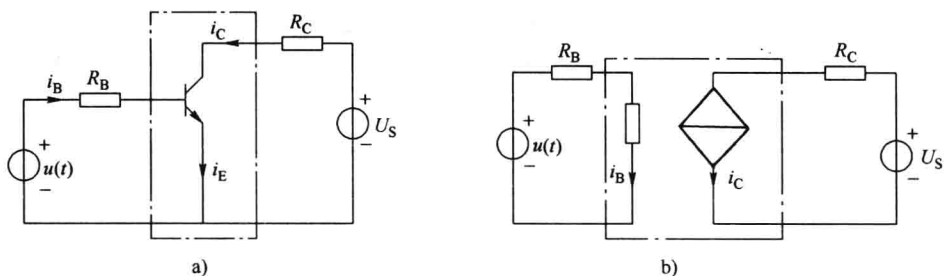


图 1-2-11

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

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

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

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

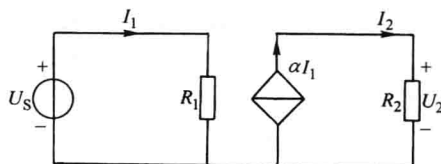


图 1-2-12

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。

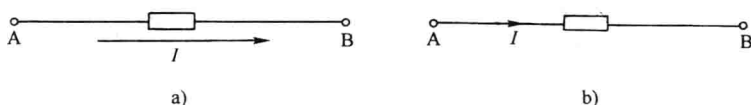


图 1-3-1

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 $|U|$ 。

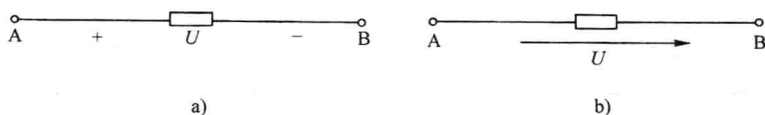


图 1-3-2

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。

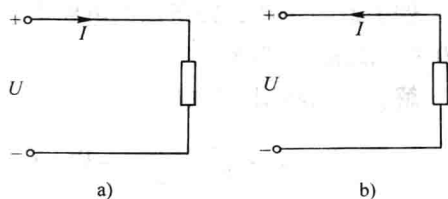


图 1-3-3

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

对于图 a 有: $U = RI + U_s$

对于图 b 有: $U = -RI - U_s$

对于图 c 有: $U = -RI + U_s$

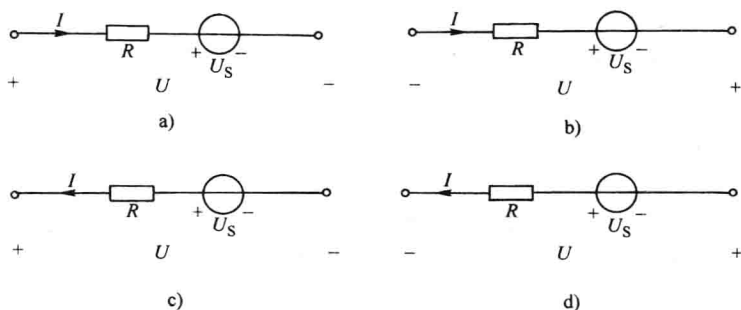


图 1-3-4

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 $I_s = 1\text{A}$, 电压源电压 $U_s = 6\text{V}$, 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

$$U = RI_s + U_s = 10 \times 1\text{V} + 6\text{V} = 16\text{V}$$

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

$$P_{U_s} = -U_s I_s = -6\text{W}$$

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

$$P_{I_s} = UI_s = 16\text{W}$$

对于电阻 R , 它消耗的功率为

$$P_R = I_s^2 R = 10\text{W}$$

整个电路发出功率和消耗功率相等, 能量守恒。

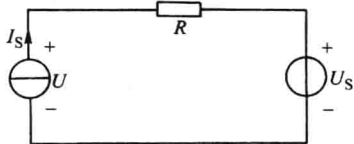


图 1-3-5

第四节 基尔霍夫定律

电路分析的基本任务是计算电路中各支路的电压和电流。为计算各支路的电压和电流, 必须研究电网络中电压电流所遵循的规则。对于单个集总参数元件, 例如对于电阻元件, 欧姆定律描述了元件端部电压与电流所遵循的关系。那么对于电网络而言, 各支路电压与电流按什么规律变化呢?

基尔霍夫定律是描述集总参数电路中电压、电流遵循的最基本的规律。当元件互相连接组成网络以后, 元件上的电压和电流除了要遵循元件约束定律以外, 还必须遵循网络连接关系的约束。这些网络连接关系所形成的约束组成了基尔霍夫定律。

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