

高等学校规划教材  
省精品课程教材



# 电路理论

颜秋容 谭丹 主编

国家电工电子教学基地教材



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

## 内 容 简 介

本书是国家电工电子教学基地和省精品课程的教学成果,内容符合教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会制定的“电路理论基础”和“电路分析基础”课程教学基本要求,涵盖了理论教学的基本内容和可选内容。全书共分 19 章,包括电路的基本概念和基本定律、简单电阻电路分析、电路分析的一般方法、电路定理、含运算放大器的电阻电路、动态元件与动态电路、一阶电路和二阶电路、正弦稳态电路分析、正弦稳态电路的频率响应、含耦合元件的正弦稳态电路、三相正弦稳态电路、周期性非正弦稳态电路、动态电路的复频域分析、二端口网络、非线性电阻电路、网络的矩阵方程、网络的状态方程、均匀传输线的正弦稳态分析、无损耗均匀传输线的暂态分析等内容。附录提供磁路与含铁芯的线圈、PSpice 简介、名词术语索引和部分习题参考答案。本书为教师提供电子课件,并配套出版《电路理论学习与考研指导》一书。

本书适合作为高等学校电子与电气信息类专业本科生“电路”和“电路分析”课程教材和教学参考书,也可供相关工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

电路理论/颜秋容,谭丹主编. —北京:电子工业出版社,2009.1

高等学校规划教材

ISBN 978-7-121-07526-1

I. 电… II. ①颜…②谭… 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(2008)第 156696 号

策划编辑:童占梅

责任编辑:童占梅

印 刷:北京市李史山胶印厂  
装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:33.5 字数:848 千字

印 次:2009 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:46.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

## 前 言

电路理论是高等学校电子与电气信息类专业的重要基础课,电路理论知识是电子与电气信息类人才专业素质的重要组成部分。在广泛信息化、电子化、电气化的工业背景下,电路理论的基础作用更显突出。随着我们对人才素质认识的深入,以能力培养、创新教育、自主学习为教学目标的教育理念已成为共识,教材作为服务于上述目标的载体之一,应尽可能方便于学生自主学习,同时又能引导学生创新能力的发展。

本书继承了已连续使用 10 年的模块式教材《电路理论——电阻性网络》、《电路理论——时域与频域分析》、《电路理论——端口网络与均匀传输线》的优点,并融入作者 4 年使用美国原版教材的教学经验编写而成,力求服务于自主学习、能力培养、创新教育的教学理念。《电路理论——电阻性网络》、《电路理论——时域与频域分析》、《电路理论——端口网络与均匀传输线》于 1998 年初版,2006 年再版,它是国家电工电子教学基地建设的成果之一,也是省精品课程教材。

在本书的编写过程中,作者有以下几方面的考虑。

继续保持内容体系完整、广度和深度兼有的特色。在内容衔接上,充分考虑教学方法的改革趋势,服务于自主式、讨论式教学方法,在内容衔接和论述上力求循序渐进,符合初学者认知规律。论述强调精练、准确,而不刻意减少篇幅。

在内容的深度与广度、传统内容与现代内容的关系上,合理取舍,强调概念内涵的发掘及其应用。适当浓缩传统内容,增加现代内容,扩大知识面,注重知识的工程应用。在仍然明确电路分析的三大类方法(等效变换、电路方程、电路定理)的基本框架下,将等效的概念贯穿始终,而精简等效变换方法及其应用的篇幅;突出电路方程的应用;适当降低电路定理的综合应用难度;大量例题结合工程应用;加强动态电路分析、正弦稳态电路分析与工程实践联系紧密的问题的讨论。仿真软件 PSpice 的应用不仅只在附录中介绍,而且通过例题,有机地融合于相关章节中。计算机是科技人员从事研究的必备工具,也是学生在课程学习时进行创新、实践研究的工具,掌握 PSpice,将有利于提高学生创新研究的兴趣和效率。

加强电路理论与工程实际的结合。含运算放大器电路的分析贯穿于全书;增加了正弦稳态电路的频率响应分析一章,讨论了与工程应用联系紧密的滤波器概念。

编写适量的节后练习题并附答案,加强学生对基本内容的掌握;术语英文对照,引导学生阅读英文参考资料。

本书可以满足 60~110 学时的电路理论课程教学要求。60~80 学时的教学,可在第 1~14 章的基础上组织教学内容;80~90 学时的教学,可在第 1~16 章的基础上组织教学内容;90~110 学时的教学,可在第 1~19 章的基础上组织教学内容。为了方便教师使用和学生自学,我们还编写了《电路理论学习与考研指导》一书,由谭丹、颜秋容主编,电子工业出版社出版。本书为任课老师提供电子课件,请到华信教育资源网 <http://www.huaxin.edu.cn> 免费注册下载。

本书由颜秋容、谭丹主编。第 1~5 章及第 16 章由谭丹执笔;第 6~9 章、第 14~15 章、第 17~19 章及附录 A 和 C 由颜秋容执笔;第 11~13 章由杨泽富执笔;第 10 章由李妍执笔;各章中的 PSpice 应用部分和附录 B 由曹娟执笔。颜秋容负责起草全书编写大纲、统稿、修改和定稿。

本书的出版得到了电子工业出版社、华中科技大学以及电气与工程学院的大力支持，华中科技大学电工教学基地的许多同行提出了宝贵的意见，谨在此一并表示衷心感谢。

本书的出版与模块式教材《电路理论——电阻性网络》、《电路理论——时域与频域分析》、《电路理论——端口网络与均匀传输线》已有的基础密不可分，对该套教材的其他作者表示诚挚的谢意。

感谢本书的编辑童占梅；感谢为打印书稿和绘图付出辛勤劳动的曾庆辉、侯晓娜、张名祥、陈本贵、王薇；感谢所有为本书出版而工作的人们。

本书不妥和错误之处，恳请读者批评指正。联系方式：颜秋容，yan\_qiurong@sina.com；谭丹，tandan@mail.hust.edu.cn。

编 者  
于武汉华中科技大学  
国家电工电子教学基地

## 致使用本书的大学生

电路理论课程是高等学校电气与电子信息类专业的重要基础课,是学生由数学、物理等基础课程学习向电子技术、电机学、控制理论等专业或专业基础课程学习过渡的桥梁。学习本课程,要求学生具备必要的电磁学、高等数学、线性代数和积分变换的知识。电路理论的知识直接服务于电子技术、电机学、控制理论、信号分析、电气工程、通信原理等课程。

电路理论课程的学习,不仅要为后续课程的学习准备基础知识,同时还要准备抽象思维的方法和能力。基础层次的电路理论课程,以研究电路的基本规律及电路的分析方法为主要内容,理论严密、逻辑性强,有广阔的工程应用背景。通过本课程的学习,要求学生掌握电路的基本规律及电路的分析方法,培养抽象思维能力、分析计算能力、实验研究能力和科学归纳能力,树立严肃认真的科学作风和理论联系实际的工程观点。

由于电路理论本身的抽象性以及融知识学习和思维方法培养为一体的目标,决定了电路理论是一门要初学者付出较大努力的课程。但电路理论所具有的理论严密、逻辑性强、有广阔工程应用背景的特点,又使其成为一门非常引人入胜的课程,学习者能体会到电路理论解决问题的方法之美和对数学工具的运用之妙。当我们从掌握一门课程的知识到已懂得欣赏一门课程时,我们就真正掌握了这门课程。

电路理论的内容包含电路分析、电路(网络)综合与设计和电路故障诊断三个部分。**电路分析**是在已知电路结构与元件参数的条件下,确定电路中的电压和电流等物理量。**电路综合与设计**是在给定电路的功能与技术指标的条件下,设计出符合要求的电路,包括电路的结构与器件的参数。**电路故障诊断**则是在已知电路的拓扑结构和通过测量得到的某些物理量的基础上,分析得出电路的故障位置和故障类型。电路分析是电路理论的基础内容,电路综合与设计以及电路故障诊断要以电路分析为基础。大学本科的电路理论课程一般只涉及电路分析的内容,因此也称“电路理论基础”或“电路分析”。

电路分析方法可以分为三类:①通过各种等效变换方法分析电路,本书的第2章介绍该方法;②通过列写各种电路分析方程分析电路,本书的第3、16章介绍该方法;③通过应用一些特定条件下成立的结论(即电路定理)分析电路,本书的第4章介绍该方法。用这三类方法去解决三类基本问题:①直流电源作用下的稳态电路;②正弦电源作用下的稳态电路;③动态电路的暂态过程。每一类基本问题都可以在一定程度上采用上述三类方法去分析。因此,三类方法的应用贯穿于本书的始终。本书的第1~5章,结合三类电路分析方法的学习,论述直流电阻电路分析,它是最简单的一类问题;第6,7,13,17章,论述动态电路的暂态过程分析;第8,9,10,11章,论述正弦电源作用下的稳态电路分析。余下的第12,14,16,18,19章,讨论一些特殊的问题和分析方法。

电路理论的学习,要注重对基本概念、基本方法的内涵和外延的理解,注重培养知识的综合运用能力,逐步形成适合于电气、电子、电信、控制等电类专业的思维方式(作者归纳为理解记忆、逻辑推理、综合运用、方法创新),培养与之适应的思维能力。因此,学习过程中切忌死记硬背、生搬硬套。为了培养上述能力,我们建议采取以下思路学习:问题的提出(了解背景)→解决问题的整体思路(掌握宏观)→解决问题的具体方法(发掘内涵、训练逻辑推理能力)→方法的适用条件(寻找问题)→更好的方法(创新思考)。还要强调,认真完成一定量的习题是学

好电路理论不可或缺的一环,只有通过一定量的习题演算,才能加深理解,做到综合运用。

计算机是科技人员从事复杂研究的必备工具,应注重将计算机应用与课程学习相结合。PSpice 作为目前广泛使用的电路分析和设计软件,可以帮助学习者提高电路理论课程的学习效率,更好地研究复杂问题。在初学过程中,通过 PSpice,可以验证学习者解题的正确性。

编者

于武汉华中科技大学  
国家电工电子教学基地



## 本书主要变量符号列表

符 号	物 理 量 名 称	单 位	符 号	物 理 量 名 称	单 位
$i$	电流	A(安)	$p$	瞬时功率	W(瓦特)
$I$	直流电流, 电流有效值		$P$	有功功率	
$I_m$	电流最大值		$Q$	无功功率	var(乏)
$\dot{i}$	电流有效值相量		$S$	视在功率	VA(伏安)
$i_s, I_s, \dot{I}_s$	电流源	$\bar{S}$	复数功率		
$u$	电压	V(伏)	$W$	能量	J(焦耳)
$U$	直流电压, 电压有效值		$w$	能量密度	$J \cdot m^{-3}$ (焦耳/米 <sup>3</sup> )
$U_m$	电压最大值		$q, Q$	电荷	C(库)
$\dot{U}$	电压有效值相量		$\Phi$	磁通	Wb(韦)
$u_s, U_s, \dot{U}_s$	电压源		$\Psi$	磁通链	Wb · t (韦 · 匝)
$e, E$	电动势		$U_m$	磁位差	A(安)
$\varphi$	电位	rad(弧度)	$F_m$	磁通势	
	相位差		$H$	磁感应强度	A/m(安/米)
功率因数角	$B$		磁通密度	T(特)	
$\varphi_z$	阻抗角		$R_m$	磁阻	$H^{-1}$ (亨 <sup>-1</sup> )
$\varphi_y$	导纳角		$\mu$	磁导率	H/m(亨/米)
$\phi$	初相	Ω(欧)	$\gamma$	电导率	S/m(亨/米)
$R$	电阻		$\gamma$	传播系数	$m^{-1}$ (米 <sup>-1</sup> )
$Z$	阻抗			$\alpha$	衰减系数
$X$	电抗	S(西门子)	$\beta$	相移系数	rad/m(弧度/米)
$Y$	导纳		$\lambda$	波长, 功率因数	m(米), 无
$G$	电导		$Z_c$	特性阻抗波阻抗	Ω(欧)
$B$	电纳	$Z_L$	负载阻抗		
$L$	电感	$Z_{eq}$	戴维宁等效阻抗		
$C$	电容	$Z_{in}$	输入阻抗		
$\epsilon(t)$	单位阶跃函数	$Z_o$	输出阻抗		
$\delta(t)$	单位冲激函数	$u_{oc}$	开路电压	s(秒)	
$\cos\varphi$	功率因数	$i_{sc}$	短路电流		
$A$	结点关联矩阵	$\tau$	时间常数	Hz(赫)	
$B_i$	基本回路矩阵	$f$	频率	短 路 导 纳 矩 阵	
$Q_i$	基本割集矩阵	$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$			
$M$	网孔矩阵	$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix}$		逆 混 合 参 数 矩 阵	
$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$	开路阻抗矩阵	$T' = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix}$			反 向 传 输 参 数 矩 阵
$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$	混合参数矩阵				
$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$	传输参数矩阵				

# 目 录

<b>第 1 章 电路的基本概念和基本定律</b> ..... (1)	<b>第 3 章 电路分析的一般方法</b> ..... (53)
1.1 电路与电路模型..... (1)	3.1 结点分析法 ..... (53)
1.1.1 电路..... (1)	3.2 回路分析法 ..... (58)
1.1.2 理想电路元件和电路模型..... (1)	3.3 直流电阻电路的 PSpice 分析 ..... (63)
1.2 电流与电压的参考方向 ..... (2)	习题 3 ..... (66)
1.2.1 电流 ..... (2)	<b>第 4 章 电路定理</b> ..... (69)
1.2.2 电压 ..... (3)	4.1 线性电路的线性特性与叠加定理 ... (69)
1.3 电功率 ..... (5)	4.1.1 线性电路的线性特性 ..... (69)
1.4 电阻元件 ..... (7)	4.1.2 叠加定理 ..... (70)
1.4.1 线性时不变电阻元件 ..... (8)	4.2 替代定理 ..... (74)
1.4.2 非线性时不变电阻元件 ..... (9)	4.3 戴维宁定理与诺顿定理 ..... (77)
1.4.3 时变电阻元件 ..... (10)	4.3.1 戴维宁定理 ..... (77)
1.4.4 电阻元件的无源性 ..... (10)	4.3.2 诺顿定理 ..... (78)
1.5 独立电源 ..... (11)	4.4 特勒根定理与互易定理 ..... (83)
1.5.1 独立电压源 ..... (11)	4.4.1 特勒根功率定理 ..... (83)
1.5.2 独立电流源 ..... (11)	4.4.2 特勒根似功率定理 ..... (84)
1.6 受控电源 ..... (12)	4.4.3 互易定理 ..... (86)
1.7 基尔霍夫定律 ..... (14)	4.5 对偶原理 ..... (89)
1.7.1 电路的图 ..... (14)	4.6 用 PSpice 验证电路定理 ..... (91)
1.7.2 基尔霍夫电流定律 ..... (17)	习题 4 ..... (93)
1.7.3 基尔霍夫电压定律 ..... (19)	<b>第 5 章 含运算放大器的电阻电路</b> ..... (97)
习题 1 ..... (24)	5.1 运算放大器 ..... (97)
<b>第 2 章 简单电阻电路分析</b> ..... (27)	5.2 理想运算放大器 ..... (99)
2.1 支路电流分析法 ..... (27)	5.3 含运算放大器电路的分析 ..... (99)
2.1.1 支路的基本方程 ..... (27)	5.3.1 比例运算电路 ..... (99)
2.1.2 支路电流法 ..... (29)	5.3.2 加/减运算电路 ..... (101)
2.2 等效变换 ..... (32)	5.4 用 PSpice 分析含运算放大器的电路 ..... (103)
2.2.1 等效电路的概念 ..... (32)	习题 5 ..... (105)
2.2.2 电阻的串联和并联 ..... (33)	<b>第 6 章 动态元件与动态电路</b> ..... (109)
2.2.3 星形与三角形电阻网络的等效变换 ..... (35)	6.1 单位阶跃函数与单位冲激函数 ... (109)
2.2.4 实际电源的两种模型及其等效变换 ..... (39)	6.1.1 单位阶跃函数 ..... (109)
2.2.5 无伴电源的等效转移 ..... (43)	6.1.2 单位冲激函数 ..... (111)
2.3 入端电阻 ..... (45)	6.2 电容元件 ..... (114)
习题 2 ..... (48)	6.2.1 电容的特性 ..... (114)
	6.2.2 电容的储能 ..... (116)
	6.2.3 电容的串联与并联 ..... (117)



6.3 电感元件	(121)	8.2.3 基尔霍夫定律的相量形式	(182)
6.3.1 电感的特性	(121)	8.2.4 电路的相量模型	(182)
6.3.2 电感的储能	(123)	8.3 阻抗与导纳	(186)
6.3.3 电感的串联与并联	(124)	8.4 正弦稳态电路分析	(191)
6.4 动态电路	(128)	8.5 位形相量图及其应用	(195)
6.4.1 动态电路的微分方程	(128)	8.6 正弦稳态电路的功率	(198)
6.4.2 动态电路的初始条件	(129)	8.6.1 有功功率与无功功率	(199)
6.4.3 动态电路的时域分析	(132)	8.6.2 视在功率及功率因数	(202)
习题 6	(135)	8.6.3 复功率及功率守恒	(203)
<b>第 7 章 一阶电路和二阶电路</b>	(138)	8.7 最大功率传输	(207)
7.1 一阶电路的零输入响应	(138)	8.8 有功功率的测量	(211)
7.1.1 RC 电路的零输入响应	(138)	8.9 正弦稳态电路的 PSpice 分析	(212)
7.1.2 RL 电路的零输入响应	(140)	习题 8	(215)
7.2 一阶电路的零状态响应	(143)	<b>第 9 章 正弦稳态电路的频率响应</b>	(220)
7.2.1 直流电源激励下的零状态响应	(143)	9.1 网络函数	(220)
7.2.2 阶跃响应	(144)	9.2 谐振电路的频率响应	(221)
7.2.3 正弦电源激励下的零状态响应	(145)	9.2.1 RLC 串联谐振电路	(222)
7.2.4 零状态响应的线性特性与时不变特性	(149)	9.2.2 RLC 串联谐振电路的频率响应	(223)
7.3 一阶电路的全响应	(150)	9.2.3 RLC 并联谐振电路	(228)
7.3.1 RC 电路的全响应	(150)	9.3 滤波器	(231)
7.3.2 全响应的分解	(151)	9.3.1 无源滤波器	(231)
7.3.3 一阶电路的三要素法	(151)	9.3.2 有源滤波器	(233)
7.4 二阶电路	(155)	习题 9	(236)
7.4.1 RLC 串联电路的零输入响应	(155)	<b>第 10 章 含耦合元件的正弦稳态电路</b>	(239)
7.4.2 二阶电路的零状态响应与全响应	(160)	10.1 耦合电感元件及其特性	(239)
7.5 冲激响应	(162)	10.1.1 耦合电感元件的互感	(239)
7.6 零状态响应的卷积计算	(164)	10.1.2 同名端	(240)
7.7 动态电路的 PSpice 分析	(167)	10.1.3 耦合电感元件的电压-电流关系	(241)
习题 7	(170)	10.1.4 耦合电感元件的储能及耦合系数	(242)
<b>第 8 章 正弦稳态电路分析</b>	(175)	10.2 含有耦合电感的电路分析	(243)
8.1 正弦量	(175)	10.2.1 耦合电感的 VCR 应用	(243)
8.1.1 正弦量的三要素	(175)	10.2.2 用受控源表示互感电压	(244)
8.1.2 同频率正弦量的相位关系	(176)	10.2.3 去耦等效电路	(245)
8.1.3 正弦电量的有效值	(177)	10.3 线性变压器	(248)
8.2 相量法	(178)	10.3.1 空心变压器	(248)
8.2.1 正弦量与相量的对应关系	(178)	10.3.2 全耦合变压器	(251)
8.2.2 正弦量运算的相量方法	(180)	10.4 理想变压器	(253)

10.4.1 变压器的理想化条件	(253)	习题 12	(299)
10.4.2 理想变压器的特性 方程	(253)	<b>第 13 章 动态电路的复频域分析</b>	(302)
10.4.3 理想变压器的阻抗变换 特性	(254)	13.1 拉普拉斯变换及逆变换	(302)
10.5 变压器的工程应用	(255)	13.1.1 拉普拉斯变换的定义	(302)
10.5.1 隔离直流	(256)	13.1.2 拉普拉斯变换的基本 性质	(304)
10.5.2 阻抗匹配	(256)	13.1.3 拉普拉斯逆变换	(306)
10.5.3 电力传输	(257)	13.2 动态电路的复频域分析法	(309)
10.6 用 PSpice 分析含耦合元件的正弦稳 态电路	(257)	13.2.1 基尔霍夫定律的复频域 模型	(309)
习题 10	(260)	13.2.2 电路元件的复频域模型	(310)
<b>第 11 章 三相正弦稳态电路</b>	(263)	13.2.3 动态电路的复频域分 析法	(313)
11.1 三相电路	(263)	13.3 网络函数	(318)
11.2 对称三相电路的分析	(265)	13.3.1 网络函数的定义	(319)
11.2.1 线电压(电流)与相电压(电流) 的关系	(265)	13.3.2 网络函数与单位冲激 响应	(321)
11.2.2 Y-Y 连接的对称三相电路 分析	(267)	13.3.3 网络函数的极点与网络的 稳定性	(323)
11.2.3 其他连接的对称三相电路 分析	(269)	13.3.4 网络函数与频率响应	(325)
11.3 不对称三相电路分析	(271)	习题 13	(326)
11.4 三相电路的功率	(276)	<b>第 14 章 二端口网络</b>	(330)
11.4.1 三相电路的功率计算	(276)	14.1 概述	(330)
11.4.2 三相电路的功率测量	(279)	14.1.1 二端口网络的定义	(330)
11.5 用 PSpice 分析三相正弦稳态 电路	(280)	14.1.2 二端口网络的端口特性 方程	(331)
习题 11	(281)	14.2 二端口网络的参数	(333)
<b>第 12 章 周期性非正弦稳态电路</b>	(285)	14.2.1 阻抗参数	(333)
12.1 周期性非正弦函数的傅里叶 级数	(285)	14.2.2 导纳参数	(336)
12.1.1 傅里叶级数	(285)	14.2.3 混合参数	(338)
12.1.2 对称周期函数的谐波 分析	(288)	14.2.4 传输参数	(341)
12.2 有效值和平均功率	(289)	14.3 二端口网络各参数之间的关系	(346)
12.2.1 有效值	(289)	14.3.1 参数之间的互换关系	(346)
12.2.2 平均功率	(290)	14.3.2 互易及对称二端口网络的参 数特点	(347)
12.3 线性电路在周期性非正弦电源激励 下的稳态响应	(291)	14.4 二端口网络的等效电路	(349)
12.4 周期性非正弦电源激励下的对称三相 电路	(294)	14.5 二端口网络的相互连接	(351)
12.4.1 周期性非正弦对称三相 电源	(294)	14.5.1 级联	(351)
12.4.2 对称三相电路中的谐波	(295)	14.5.2 串联	(352)
		14.5.3 并联	(353)
		14.6 有载二端口网络	(354)
		14.6.1 输入阻抗和输出阻抗	(354)
		14.6.2 转移函数	(355)
		14.7 回转器和负阻抗变换器	(356)

14.7.1 回转器 .....	(357)	17.3 状态方程的复频域解法 .....	(412)
14.7.2 负阻抗变换器 .....	(357)	17.3.1 状态方程的复频域解 .....	(412)
习题 14 .....	(358)	17.3.2 转移函数矩阵 .....	(414)
<b>第 15 章 非线性电阻电路</b> .....	(361)	17.4 状态空间与状态轨迹 .....	(417)
15.1 非线性电阻 .....	(361)	习题 17 .....	(420)
15.1.1 非线性电阻的分类 .....	(361)	<b>第 18 章 均匀传输线的正弦稳态</b>	
15.1.2 二极管的折线模型 .....	(362)	<b>分析</b> .....	(423)
15.2 非线性电阻电路分析概述 .....	(364)	18.1 分布参数电路与均匀传输线 .....	(423)
15.3 非线性电阻电路的方程 .....	(365)	18.1.1 分布参数电路 .....	(423)
15.4 非线性电阻电路的图解法 .....	(367)	18.1.2 均匀传输线的原始参数 .....	(423)
15.4.1 非线性电阻的串联和		18.1.3 均匀传输线的偏微分	
并联 .....	(367)	方程 .....	(424)
15.4.2 图解法确定静态工作点 .....	(372)	18.2 均匀传输线方程的正弦稳态解 .....	(425)
15.5 非线性电阻电路的小信号分		18.2.1 一般形式的相量解 .....	(425)
析法 .....	(373)	18.2.2 两种典型边界条件下的	
15.6 非线性电阻电路的分段线性化		相量解 .....	(426)
方法 .....	(376)	18.3 行波 .....	(428)
习题 15 .....	(379)	18.4 均匀传输线的传播特性 .....	(430)
<b>第 16 章 网络的矩阵方程</b> .....	(381)	18.4.1 传播系数 .....	(430)
16.1 割集 .....	(381)	18.4.2 特性阻抗 .....	(432)
16.2 网络结构的矩阵描述 .....	(382)	18.4.3 反射系数 .....	(432)
16.2.1 结点关联矩阵 .....	(382)	18.4.4 输入阻抗 .....	(433)
16.2.2 基本回路矩阵 .....	(383)	18.5 均匀传输线上电压和电流有	
16.2.3 基本割集与基本割集		效值 .....	(436)
矩阵 .....	(384)	18.5.1 终端开路时的电压和电流	
16.2.4 矩阵间的关系 .....	(385)	有效值 .....	(436)
16.3 基尔霍夫定律的矩阵形式 .....	(386)	18.5.2 终端短路时的电压和电流	
16.3.1 基尔霍夫电流定律的矩阵		有效值 .....	(437)
形式 .....	(386)	18.5.3 终端接匹配负载时的电压和	
16.3.2 基尔霍夫电压定律的矩阵		电流有效值 .....	(437)
形式 .....	(388)	18.5.4 终端接任意负载时的电压和	
16.4 典型支路及其支路方程的矩阵		电流有效值 .....	(438)
形式 .....	(390)	18.6 无损耗均匀传输线 .....	(438)
16.5 结点分析方程的矩阵形式 .....	(391)	18.6.1 无损耗线上的驻波 .....	(439)
16.6 回路分析方程的矩阵形式 .....	(395)	18.6.2 无损耗线的工程应用 .....	(442)
16.7 基本割集分析法的矩阵方程 .....	(397)	18.7 均匀传输线的等效电路 .....	(445)
16.8 列表法 .....	(398)	18.7.1 均匀传输线与对称二端口	
习题 16 .....	(401)	网络 .....	(445)
<b>第 17 章 网络的状态方程</b> .....	(405)	18.7.2 均匀传输线的等效电路 .....	(447)
17.1 概述 .....	(405)	18.7.3 对称二端口网络的特性阻抗	
17.1.1 网络的状态与状态变量 .....	(405)	与传播系数 .....	(448)
17.1.2 常态网络与非常态网络 .....	(405)	习题 18 .....	(450)
17.1.3 状态方程与输出方程 .....	(406)	<b>第 19 章 无损耗均匀传输线的暂态</b>	
17.2 状态方程的建立 .....	(408)	<b>分析</b> .....	(451)

19.1 无损耗均匀传输线方程的通解 ... (451)	的影响 ..... (480)
19.1.1 通解的复频域形式 ..... (451)	A. 5.2 磁滞对电压、电流及磁通波形 的影响 ..... (481)
19.1.2 通解的时域形式 ..... (452)	A. 6 铁芯中的功率损耗 ..... (482)
19.1.3 行波 ..... (452)	A. 6.1 涡流和涡流损耗 ..... (482)
19.2 无损耗均匀传输线上的发出波 ... (453)	A. 6.2 磁滞损耗 ..... (483)
19.3 波的反射与透射 ..... (456)	A. 6.3 铁磁损耗 ..... (484)
19.3.1 反射 ..... (456)	A. 7 交流电路中的铁芯线圈 ..... (484)
19.3.2 透射 ..... (460)	习题 A ..... (486)
19.4 波的多次反射 ..... (463)	<b>附录 B PSpice 简介</b> ..... (489)
习题 19 ..... (466)	B. 1 电路图绘制 ..... (489)
<b>附录 A 磁路与含铁芯的线圈</b> ..... (468)	B. 2 电路仿真分析 ..... (490)
A. 1 磁路与铁磁材料 ..... (468)	B. 2.1 直流工作点分析(Bias Point) ..... (491)
A. 1.1 磁路的概念 ..... (468)	B. 2.2 直流特性扫描分析(DC Sweep) ..... (492)
A. 1.2 铁磁材料的磁化特性 ..... (468)	B. 2.3 交流分析(AC Sweep) ..... (492)
A. 2 磁路基本定律 ..... (471)	B. 2.4 暂态分析(Transient Analysis) ..... (493)
A. 2.1 磁路欧姆定律 ..... (471)	B. 3 结果输出 ..... (494)
A. 2.2 磁路基尔霍夫磁通 定律 ..... (471)	B. 3.1 输出文件(.out)的查阅 ..... (494)
A. 2.3 磁路基尔霍夫磁位差 定律 ..... (472)	B. 3.2 输出标识符(Printpoints) ..... (494)
A. 2.4 磁路与电路对比 ..... (472)	B. 4 波形显示 ..... (495)
A. 3 恒定磁路的计算 ..... (473)	<b>附录 C 名词术语索引</b> ..... (497)
A. 3.1 无分支磁路的计算 ..... (473)	<b>附录 D 部分习题参考答案</b> ..... (504)
A. 3.2 有分支磁路的计算 ..... (476)	<b>参考文献</b> ..... (520)
A. 4 磁场能量与磁场力 ..... (479)	
A. 5 磁饱和与磁滞对电压、电流及磁通波形 的影响 ..... (480)	
A. 5.1 磁饱和对电压、电流及磁通波形	

# 第 1 章 电路的基本概念和基本定律

本章首先介绍电路的基本概念,包括电路及其组成、电路模型及其电路元件等;然后介绍电流、电压、功率等基本的电路变量及其关系,给出电压、电流关联参考方向的约定。

本章还要介绍电路分析的理论基础,即电压、电流在电路中必须遵守的规律;重点阐述电阻元件、独立电源和受控电源等电路元件的特性;以及由元件之间连接方式决定的电压、电流的几何约束,又称拓扑约束,这种约束用基尔霍夫定律描述。为方便描述电路的拓扑结构,还引入了图论的相关概念。

## 1.1 电路与电路模型

### 1.1.1 电路

实际电路(electric circuit)是由若干电气设备或电器件按一定方式连接起来构成的电流通路。人们构建电路的主要目的是借助于电路完成电能及电信号的产生、传输、变换等功能。

实际电路有的很简单,如手电筒就属于简单电路。有的很复杂,如电力系统,它由发电机产生电能,用变压器及传输线等将电能从电厂传输给用户;又如无线电广播电路,它将声音信号转变为低频电信号,再通过调制电路将低频电信号加载到高频信号上,由发射天线将其变成高频电磁波并在空中传播,再由广播接收系统将空中传播的高频电磁波通过接收天线变成电信号,由解调电路将其还原成包含声音信息的低频电信号,经放大等处理由喇叭将低频电信号还原成声音信号。

总之,实际电路的形式多种多样,但从电路各部分所起的作用来看,一个完整电路都应包含电源(或信号源)、负载以及连接电源与负载的中间环节这三个基本部分。

电源(electric source)(或信号源)向电路提供能量或有用信号,如发电机、信号发生器和电池等。

负载(load)实现能量的转换或信号之间的转换,如电灯、扬声器、电视显示屏、电阻器和电容器等。

中间环节是将电源和负载连接起来的电路部分,它包括连接导线、开关及信号处理设备,其作用是输送、分配电能和对电信号进行处理。

### 1.1.2 理想电路元件和电路模型

实际电路中的电器件统称为实际器件。当实际器件有电流通过时,一般会在其两端产生电压,根据物理学知识,有电流就有磁场存在,有电压就有电场存在,而电压、电流作用下几乎都包含有能量损耗,电场效应、磁场效应和能量损耗是实际器件的三个基本效应。我们用电阻元件反映能量损耗,用电感和电容元件分别反映磁场和电场效应。一般地,只具备单一电磁性质的电路元件称为理想电路元件(idea electric element),简称电路元件(electric element)。电路元件通过其端钮与其他电路元件连接,因此电路元件的特性是通过与端钮相关的电压和电流这两种物理量来反映。电路元件是电路最基本的组成单元。用理想电路元件或它们的组合来模

拟实际器件的过程就是建立电路模型的过程。

建立电路模型时,首先要考虑电路的工作条件,其次要在工程误差允许的条件下忽略次要的电磁现象,用反映主要特性的电路元件构建符合工程实际的电路模型。例如,线绕线圈的电路模型,在直流情况下,它在电路中主要反映为绕线中电流引起的能量损耗,其电路模型相当于电阻元件;当通过的电流变化时,变化的线圈电流产生的变化磁场引起感应电压,故电路模型除电阻元件外还应串联一个电感元件;当电流变化很快(包含高频交流)时,则线圈间的电场效应也不能忽略,此时必须考虑电容效应,电路模型为电阻元件与电感元件串联后再与电容元件并联。可见,同一实际器件在不同的工作条件下,其电路模型也是不同的。电路模型选取是否合适,对电路的分析和计算结果的准确度均会有影响。如何构建合适的电路模型在本书中不介绍。本书所涉及的电路均指由理想电路元件构成的电路模型。

在对实际电路分析时,当电路的电磁量,如电流和电压等,只是时间的函数而与空间位置无关时,可以用集中参数电路模型(lumped parameter circuit model)处理,其描述方程是常微分方程(对电阻性电路,描述电路的方程是代数方程);当电路的电磁量既是时间又是空间坐标的函数时,则需用分布参数电路模型(distributed parameter circuit model)处理,其描述方程是偏微分方程。对一个实际电路,是用集中参数电路理论还是用分布参数电路理论加以研究,主要视电路的最大几何尺寸 $d$ 与电路运行时电流或电压的最高频率所对应的波长 $\lambda$ 相比较而定,工程上的处理原则如下:

当 $d < 0.01\lambda$ 时,用集中参数电路加以研究。

当 $d \geq 0.01\lambda$ 时,按分布参数电路加以研究。

在集中参数电路中,电路元件在空间分布的位置对电路性能的影响并不明显,可以忽略。电路中能量损耗、电场与磁场效应都可认为分别“集中”作用在电阻、电容与电感等元件的内部,可用这些集中参数电路模型来表示。

当电路尺寸很大,如长距离交流输电线路(像葛洲坝至上海的输电线路有几千千米),电路工作频率为 $f = 50\text{Hz}$ ,波长 $\lambda = 6000\text{km}$ ,因此需按分布参数电路加以分析,电路参数的分布与电路的空间坐标的关系是不能忽略的。

本书第1~17章仅讨论集中参数电路模型,电力系统中远距离长线传输问题将在第18~19章介绍,而高频信号引起的分布参数电路将在高频电路课程中讨论。

## 1.2 电流与电压的参考方向

在电路分析中,常用电流、电压、电荷、磁通链、功率和能量等物理量来描述电路特性,这些物理量统称为电路变量或网络变量。电流和电压是描述电路特性的两个基本变量。已知电流和电压,求功率或能量是很容易的。

本节先回顾物理学中已定义的电流和电压等物理量,然后重点介绍电压、电流的参考方向。

### 1.2.1 电流

物理学中定义带电粒子的定向移动形成电流。电路中的电流一般在导线及元件中流动,用电流强度(简称电流)来描述。电路中的电流(current)是单位时间内流过导线横截面的电荷量。

设在时间 $dt$ 内通过导线横截面的电荷量为 $dq$ ,则通过该导线截面的电流

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

电流的国际单位(SI<sup>①</sup>单位)为安[培]<sup>②</sup>,单位符号是A。实际中还常用千安(kA),毫安(mA)和微安( $\mu$ A)<sup>③</sup>等单位计量电流。

在电路分析中,习惯用大写英文字母表示不随时间变化的量,如常用*I*表示不随时间变化的量电流(直流电流);用小写英文字母表示随时间变化的量,也称瞬时值,如用*i*或*i(t)*表示电流的瞬时值或随时间变化的交变电流。对电路的其他变量也都遵从此规定。

习惯上,规定电流的实际方向为正电荷运动的方向。物理学中的电路通常是恒定电压源作用下的简单电路,电路中电流方向很容易判断并标出。但当电路较复杂,电流方向很难通过观察得知时,在交流电源作用下,电流的方向还会随时间的变化而改变。因此在分析电流量之前必须先假定电流的方向,称为电流的参考方向(reference direction)。图1-2-1所示为电路中的一个二端元件,假设电流的参考方向由a流向b,如箭头所示。电流*i*是一个代数量,如果根据电路分析知*i* > 0,说明电流实际方向同参考方向一致,是由a流向b;若*i* < 0,说明实际方向与参考方向相反,是由b流向a。因此电流的实际方向是用电流的参考方向和该电流数值的正、负号一起加以判定的。

## 1.2.2 电压

库仑电场力由电场中的a点到b点移动单位正电荷所做的功称为a,b两点间的电压(voltage)。如图1-2-2所示,设电场力作用下,将移动电量为dq的电荷由a点移动到b点,电场力所做的功为dW,则a,b两点间的电压

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1-2-2)$$

电压的SI单位为伏[特],单位符号是V。实际中还常用千伏(kV),毫伏(mV)等单位计量电压。

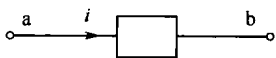


图 1-2-1 电流参考方向的表示

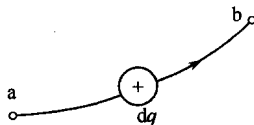


图 1-2-2 电压的定义

电压是与做功相联系的,正电荷从a点移动到b点时,库仑电场可能做正功。由物理学知识易知

$$u_{ab} = -u_{ba} \quad (1-2-3)$$

由于库仑电场是无旋场,电荷从a点移动到b点电场力所做的功与电荷移动的路径无关,即两点的电压值仅取决于a,b两点的位置而与路径无关,所以我们通过任何路径求取的电压值都一样。

若在电场中任意选择o为参考点,如图1-2-3所示,则电场中各点与参考点o之间都有确

① SI表示国际单位制的英文“System International”缩写。

② 表示单位名称的方括号内的字可以省略,下同。

③ 表示十进制倍数和分数的单位词头为p( $10^{-12}$ ,皮),n( $10^{-9}$ ,纳), $\mu$ ( $10^{-6}$ ,微),m( $10^{-3}$ ,毫),k( $10^3$ ,千),M( $10^6$ ,兆)。



定的电压,各点到参考点的电压就是各点的电位(potential),表示为

$$\varphi_a = u_a, \quad \varphi_b = u_b, \quad \varphi_o = 0$$

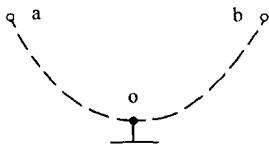


图 1-2-3 电位的概念

两点间电压即为两点间的电位差(potential difference),因此有

$$u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-2-4)$$

在电路图中参考点常用符号“⊥”表示。显然,各点的电位会因参考点的不同而不同,所以电位是相对量。但两点之间的电位差(即电压)是一定的,它与参考点的选择无关。电位参考点的选择原则上是任意的,但在同一个问题中,电位的参考点一经选定,就不能再改变。同一电路中不可同时选取多个电位参考点。在电磁场理论中,通常以无限远处作为电位参考点;在电力系统中,往往以大地作为电位参考点;在电子线路中,多把设备的金属外壳或公共接线端作为电位参考点;在电路分析中,有时也要选择电位参考点,后面章节将会具体介绍。

库仑电场对电荷施力的特点总是使正电荷从电位较高处向电位较低处运动,这时库仑电场做正功。因此习惯上规定,两点之间电压的实际方向是从高电位点指向低电位点。

在电路分析时,对电压分析之前也类似于电流的分析,先人为地为各部分电压规定一个电压的参考方向(或参考极性),它既可以在所论及的两点标以“+”、“-”极性,也可用箭头表示方向,即由“+”极性指向“-”极性。为了与电流参考方向有所区别,本书中电压的参考方向采用“+”、“-”极性标注法,如图 1-2-4 所示,并在“+”与“-”标注之间标出表示电压的符号  $u$ 。当所论及的两点有字母或数字作为标记时,如 a 和 b,也可以用以 ab 为下标的文字符号  $u_{ab}$  表示电压及其参考方向,其含义是电压的参考方向由 a 指向 b,而省去“+”和“-”号。当应用电位概念时,都隐含着参考点就是公共的“-”极,其他各点相对于参考点均为“+”极,从而无需另外标示电位的参考方向。

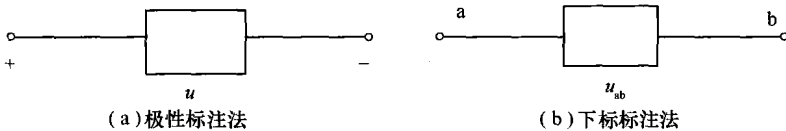


图 1-2-4 电压参考方向的表示

按照预先指定的电压参考方向,如图 1-2-4(a) 中的  $u$ ,若计算结果  $u > 0$ ,则意味着该电压的实际方向与参考方向相同;若计算结果  $u < 0$ ,则意味着该电压的实际方向与参考方向相反。因此,在指定电压的参考方向以后,结合电压数值的正负,电压的实际方向是十分明确的。

电压参考方向的选择完全是任意的,它并不影响电压的实际方向。例如在图 1-2-4(b) 中,若按 a 到 b 的电压参考方向计算时,有  $u_{ab} > 0$ ,则当按由 b 到 a 的电压参考方向计算时,必有  $u_{ba} < 0$ 。电压的实际方向并不会因为参考方向的不同而改变。同时也必须指出,当开始分析一个问题时,虽然参考方向的选取是任意的,但一经选定,以后的分析乃至对分析结果的解释,都必须以开始选取的参考方向为依据。

在电路分析中,电压、电流的参考方向是简单而重要的。必须首先在电路图中标注电路各部分的电流和电压的参考方向。对一段二端电路而言,电流和电压的参考方向可以任意选定,但电流和电压这两个参考方向的关系只有两种,分别称为关联参考方向和非关联参考方向。

所谓关联参考方向(associated reference direction)是指所选电流参考方向的箭头由表示

电压参考方向的“+”极性端指向“-”极性端,如图 1-2-5(a) 所示;而非关联参考方向(non-associated reference direction)则表示所选电流参考方向的箭头由电压参考方向的“-”极性端指向“+”极性端,如图 1-2-5(b) 所示。

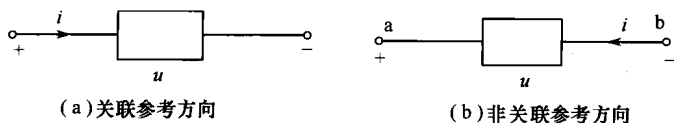


图 1-2-5 电流和电压的参考方向

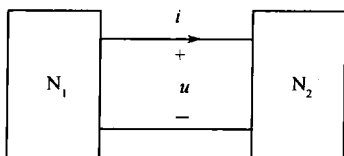


图 1-2-6 电流和电压的关联参考方向说明

应当说明,关联参考方向或非关联参考方向都是针对某一个二端电路而言的。例如,在图 1-2-6 所示电路中,对假设的参考方向而言,二端电路  $N_1$  的电流和电压是非关联的参考方向,二端电路  $N_2$  的电流和电压则是关联的参考方向。

### 练习题

1-2-1 练习题 1-2-1 图所示为一个电路的一部分,说明以下表达式的意义。

- (1)  $i_1(t_0) = -1\text{A}$
- (2)  $i_2(t_0) = 3\text{A}$
- (3)  $u_3(t_0) = -5\text{V}$

## 1.3 电功率

电路分析中,功率的计算十分重要。这是因为电气设备、器件均有功率标识,我们知道 100W 的灯泡比 40W 的灯泡亮。当我们给供电公司付电费时,也知道使用功率大的设备在同样时间下要用掉更多的电能。当设计或使用电气设备、器件时,设备及器件的额定功率、极限功率都是很重要的参数,若不注意会导致设备的不正常工作甚至损坏。

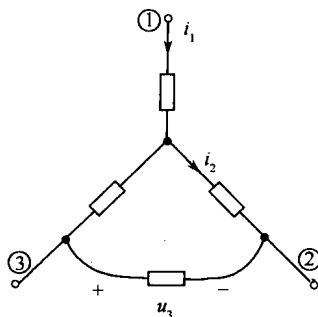
二端电路在任意时刻吸收的瞬时功率(instantaneous power)是指二端电路在单位时间内吸收的电能。在图 1-2-5(a) 所示的电压、电流为关联参考方向时,可得

$$p(t) = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \times \frac{dq}{dt} = u(t) \times i(t) \quad (1-3-1)$$

根据电压和电流的概念,正电荷沿电压正方向(由“+”到“-”)流动时,电场力做正功,即将电能转化成其他形式的能量,因此,式(1-3-1)表示二端电路吸收的(电)功率。诚然,由于电压和电流均为代数量,二者的乘积  $p(t)$  可正可负,只有当计算结果  $p(t) > 0$  时,才表明所论二端电路实际是吸收(电)功率的;相反,若计算结果  $p(t) < 0$ ,则表明所论二端电路实际是提供(电)功率的(即将其他形式的能量转化为电能)。

功率的 SI 单位为瓦[特](W),实用中还可能用到兆瓦(MW)、千瓦(kW)和毫瓦(mW)等单位。

由式(1-3-1),二端电路在任一时间  $t$  吸收的电能为



练习题 1-2-1 图