



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Principles of Electric Circuits (Second Edition)
Jiang Jiguang Liu Xiucheng

电路原理

(第二版)

江缉光 刘秀成 主编



清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Principles of Electric Circuits

电路原理

(Second Edition)

Jiang Jiguang Liu Xiucheng

(第二版)

江缉光 刘秀成 主编

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书是《电路原理》(江缉光主编,清华大学出版社,1996)的修订版,内容符合教育部高等学校电子信息与电气信息学科教学指导委员会基础课程教学指导分委员会2004年颁布的“电路理论基础”和“电路分析基础”的教学基本要求。

全书共分20章,包括电路元件和电路定律、简单电阻电路的分析方法、线性电阻电路的一般分析方法、电路定理、含运算放大器的电路、储能元件、一阶电路、二阶电路、卷积积分的应用、正弦电流电路的稳态分析、含有互感元件的电路、电路的频率特性、三相电路、周期性激励下电路的稳态响应、傅里叶变换和拉普拉斯变换、二端口(网络)、网络图论基础、状态变量法、非线性电路简介和分布参数电路。另有磁路和含铁芯的线圈、复数复习、PSpice电路仿真简介和电路原理中英文专业词汇对照表四个附录。书末附有大部分习题的参考答案。

本书可作为电子与电气信息类专业电路课程的教材使用,也可供有关科技人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

电路原理 / 江缉光,刘秀成主编. --2版. --北京:清华大学出版社,2007.3

ISBN 978-7-302-14262-1

I. 电… II. ①江… ②刘… III. 电路理论 IV. TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第147788号

责任编辑:王一玲

责任校对:白 蕾

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印 刷 者:北京密云胶印厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:38.5 字 数:837千字

版 次:2007年3月第2版 印 次:2007年7月第2次印刷

印 数:3001~5000

定 价:45.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:017866-01

第二版前言

本书的初版于1996年5月出版,迄今已经10年。从10年来使用此书的教学实践效果以及编写者多年的教学经验来看,这本教科书在论述上的科学性方面,在取材的深度和广度,内容的组织安排等方面,都能适应工科大学对基础电路课程的要求,是一本合用的电路课程教科书。

电路原理作为工科大学生学习电工技术的一门技术基础课程,它的核心内容虽是相对较稳定,但科学技术尤其是当前信息化技术的迅速发展,大学工科电工类专业的教学改革的深入,要求电路课程能更好地适应这一形势,电路原理教科书需要有新的充实与提高。本书的修订就是考虑到这个需求而进行的。以下就修订的具体内容作一简要的说明。

《电路原理》(第二版)(以下简称修订本)是在同名书初版的基础上经过修订、编写而完成的,它继续着重于电路理论的基本现象、概念、定律和定理的论述和应用,在知识点的讲述上做了某些调整,例如将阶跃响应、冲激响应和卷积积分及其应用单设一章,并在内容上加以充实,以适应以后应用的需要。考虑到与后续课程和新技术应用相衔接,在修订本中增添或引入了某些有关的内容:如将运算放大器的电路单设一章,并在教材中多处应用;以滤波器为结合点,讲述电路的频率特性等。采取这样的选择,是希望能使读者从基本电路理论的角度认识、理解这些内容,无意以之替代后续课程中关于这些内容的论述。

在修订此教材时,适当地增加了一些例题,同时还增加了一些有实际意义的习题。例题和习题都着重于基本概念和分析方法的应用。

这一修订本中,包含有电类多个专业需要的电路课内容,不同专业的使用者,对一些章节可以有不同的选择。

在修订本中,引入了用PSpice进行软件计算机辅助电路分析的内容,作为附录置于书末。这里对用PSpice软件进行电路的典型问题的仿

真计算方法作了介绍,给出了应用的例题并附有练习题。配合课程的进行采用这一内容,可以增进、启发读者应用计算机分析电路问题的能力。这一部分内容是书中的一个独立部分,如果不选用它而另作安排,并不致于对使用此书带来任何不便。

在这一修订本中,对初版的《电路原理》,还在有些章节上作了删改,如用波特图表示电路的频率特性,电路问题中的非线性方程、常微分方程的数值求解方法等,这些内容在有关的专门课程中都有更详细的讲述。

参加本书修订和编写工作的有江缉光、刘秀成、陆文娟和王树民。江缉光、刘秀成担任全书的主编工作。

限于编写者的水平,此次完成的修订本仍恐难免有缺点、错误,欢迎读者提出批评和意见。

编者

2006年9月

第一版前言

本书是为工科大学电类专业本科学生学习《电路原理》而编写的教科书,全书共 19 章,分上下两册出版。

本书的内容覆盖了电类专业电路课程的基本内容,并在某些方面稍有拓展。作为一门技术基础课程的教科书,本书着重于基本的传统内容,也包含近代电路理论的一些基本内容。在编写此书时,作了下面的一些考虑和相应的安排。

(1) 考虑到《电路原理》是一门技术基础课程,它的内容是许多电类专业课程的共同的基础,更考虑到现代电工技术的发展,电力技术和电子技术的相互结合日益密切,习惯上称为强电和弱电的各专业在对电路原理的基础理论的需要上并无太多的差异,所以此教材是作为电类各专业的通用教材而编写的。自然,在课程安排有所不同的情况下使用时,可以对书中的某些章节作稍有不同的取舍。

(2) 着重于基本传统内容的叙述和应用。对于基本概念、方法、定理均以相当的篇幅作了力求准确、易懂的阐述。例如:在第 4 章中用简明的方法导出了特勒根定理,以突出其与基尔霍夫定律的等价普遍性;及早地引入受控电源模型和含运算放大器的电路,以使随后关于含这类器件的电路的分析得以加强。

(3) 在电路的正弦稳态分析之后,即在第 11 章中,引入复频率和复指数形式的激励,由电路在这种激励下的强制响应导出网络函数,随即对其零、极点、频率特性、波特图等内容进行分析。这将有助于读者及早熟悉这些概念和方法。

(4) 有关非线性电路(第 5、第 18 两章)的内容主要是一些基本概念和方法。就几个简单的电路,对非线性电路的工作点的稳定性、非线性自激振荡等重要的概念和分析方法作了简单的初步介绍,以使读者能从最

简单的电路开始建立对它们的认识。

(5) 考虑到学习后续课程或自学的需要,本书将关于磁路的内容作为附录,放在书末。

(6) 本书各章均附有习题。习题的内容着重于使读者理解此课程中的基本概念,掌握电路分析的基本方法及其应用。有少数需要用计算机进行数值求解的习题可以作为计算机辅助电路计算的作业。

本书末附有绝大部分习题的答案。

本书各章的编写者分别是江缉光(第1,2,3,4,5,18,19章),陈允康(第6,7,10,11,16,17章),陆文娟(第8,9,14章),王树民(第12,13,15章)。各章习题的选编者有赵莼善、徐福媛、李志康等。由江缉光担任全书的统稿和校定。

在编写此书的过程中肖达川教授提出了许多宝贵的意见,谨此致谢。

限于编者水平,本书在许多方面都可能存在缺点、错误,衷心欢迎批评指正。

作者

1995年10月于清华园

目 录

第 1 章 电路元件和电路定律	<<<	1
1.1 电路和电路模型	<<<	2
1.2 电流、电压、电动势及其参考方向	<<<	3
1.3 电路元件的功率	<<<	5
1.4 电阻元件	<<<	6
1.5 电源元件	<<<	7
1.6 基尔霍夫定律	<<<	9
1.7 受控电源	<<<	13
习题	<<<	15
第 2 章 简单电阻电路的分析方法	<<<	18
2.1 串联电阻电路	<<<	19
2.2 并联电阻电路	<<<	20
2.3 星形联接与三角形联接的电阻的等效变换(Y- Δ 变换)	<<<	23
2.4 理想电源的串联和并联	<<<	26
2.5 电压电源与电流电源的等效转换	<<<	28
2.6 两个电阻电路的例子	<<<	31
习题	<<<	32
第 3 章 线性电阻电路的一般分析方法	<<<	35
3.1 支路电流法	<<<	36
3.2 回路电流法	<<<	39
3.3 节点电压法	<<<	43

习题	<<<	47	
第4章 电路的若干定理	<<<	51	
4.1 叠加定理	<<<	52	
4.2 替代定理	<<<	57	
4.3 戴维南定理和诺顿定理	<<<	59	
4.4 特勒根定理	<<<	64	
4.5 互易定理	<<<	67	
4.6 对偶电路与对偶原理	<<<	70	
习题	<<<	74	
第5章 含运算放大器的电阻电路	<<<	79	
5.1 运算放大器和它的静态特性	<<<	80	
5.2 含运算放大器的电阻电路分析	<<<	82	
习题	<<<	85	
第6章 电容元件和电感元件	<<<	88	
6.1 电容元件	<<<	89	
6.2 电容的串联与并联电路	<<<	92	
6.3 电感元件	<<<	93	
6.4 电感的串联与并联电路	<<<	96	
习题	<<<	98	
第7章 一阶电路	<<<	100	
7.1 动态电路概述	<<<	101	
7.2 电路中起始条件的确定	<<<	102	
7.3 一阶电路的零输入响应	<<<	104	
7.4 一阶电路的零状态响应	<<<	108	
7.5 一阶电路的全响应	<<<	114	
7.6 求解一阶电路的三要素法	<<<	118	
7.7 脉冲序列作用下的RC电路	<<<	121	
习题	<<<	123	
第8章 二阶电路	<<<	128	
8.1 线性二阶电路的微分方程及其标准形式	<<<	129	

8.2	二阶电路的零输入响应	<<<	130
8.3	二阶电路的零状态响应和全响应	<<<	137
8.4	一个线性含受控源电路的分析	<<<	141
	习题	<<<	143
第9章	阶跃响应、冲激响应和卷积积分的应用	<<<	147
9.1	阶跃函数和冲激函数	<<<	148
9.2	阶跃响应	<<<	151
9.3	冲激响应	<<<	157
9.4	电路在任意激励作用下的零状态响应——卷积积分	<<<	163
9.5	电容电压和电感电流的跃变	<<<	166
	习题	<<<	169
第10章	正弦电流电路的稳态分析	<<<	172
10.1	正弦量的基本概念	<<<	173
10.2	周期性电流、电压的有效值	<<<	175
10.3	正弦电压(流)激励下电路的稳态响应	<<<	176
10.4	正弦量的相量表示	<<<	176
10.5	电阻、电感和电容元件上电压与电流的相量关系	<<<	180
10.6	基尔霍夫定律的相量形式和电路的相量模型	<<<	185
10.7	阻抗、导纳及其等效转换	<<<	187
10.8	用相量法分析电路的正弦稳态响应	<<<	193
10.9	正弦电流电路中的功率	<<<	198
10.10	复功率	<<<	201
10.11	最大功率传输定理	<<<	206
	习题	<<<	207
第11章	含有互感元件的电路	<<<	212
11.1	互感和互感电压	<<<	213
11.2	互感线圈的串联和并联	<<<	218
11.3	有互感的电路的计算	<<<	220
11.4	全耦合变压器和理想变压器	<<<	223
11.5	变压器的电路模型	<<<	226
	习题	<<<	227

第 12 章 电路的频率响应	<<<	231
12.1 串联电路的谐振	<<<	232
12.2 并联电路的谐振	<<<	238
12.3 串并联电路的谐振	<<<	243
12.4 复频率和相量法的拓广	<<<	245
12.5 网络函数	<<<	249
12.6 网络函数的频率响应	<<<	251
12.7 阻抗和频率的归一化	<<<	253
12.8 滤波器的概念	<<<	257
12.9 无源滤波器	<<<	258
12.10 有源滤波器	<<<	264
习题	<<<	270
第 13 章 三相电路	<<<	274
13.1 三相电源	<<<	275
13.2 对称三相电路	<<<	278
13.3 不对称三相电路示例	<<<	286
13.4 三相电路的功率	<<<	289
习题	<<<	292
第 14 章 周期性激励下电路的稳态响应	<<<	296
14.1 周期性非正弦激励	<<<	297
14.2 周期性时间函数的谐波分析——傅里叶级数	<<<	297
14.3 周期性激励下电路的稳态响应——谐波分析法	<<<	301
14.4 周期电压、电流的有效值和平均值	<<<	305
14.5 周期电流电路中的功率	<<<	307
14.6 周期性激励下的三相电路	<<<	310
习题	<<<	315
第 15 章 傅里叶变换和拉普拉斯变换	<<<	318
15.1 傅里叶级数的指数形式	<<<	319
15.2 非周期性时间函数的谐波分析——傅里叶积分变换	<<<	322
15.3 傅里叶变换在电路分析中的应用	<<<	325
15.4 拉普拉斯变换	<<<	327

15.5	一些常用函数的拉普拉斯变换	<<<	328
15.6	拉普拉斯变换的基本性质	<<<	330
15.7	拉普拉斯反变换	<<<	336
15.8	复频域中的电路定律、电路元件与模型	<<<	340
15.9	用拉普拉斯变换法分析电路	<<<	342
15.10	网络函数	<<<	346
15.11	网络函数的极点分布与电路冲激响应的关系	<<<	348
15.12	卷积定理	<<<	349
	习题	<<<	351
第 16 章	二端口(网络)	<<<	355
16.1	二端口概述	<<<	356
16.2	二端口的参数和方程	<<<	357
16.3	二端口的等效电路	<<<	367
16.4	二端口的联接	<<<	371
16.5	二端口的特性阻抗和传播常数	<<<	377
16.6	二端口的转移函数	<<<	380
16.7	回转器与负阻抗变换器	<<<	382
	习题	<<<	386
第 17 章	网络图论基础	<<<	389
17.1	网络的图	<<<	390
17.2	图的矩阵表示和 KCL, KVL 方程的矩阵形式	<<<	392
17.3	典型支路和支路约束的矩阵形式	<<<	400
17.4	节点法	<<<	405
17.5	含受控源电路的节点分析	<<<	409
17.6	割集法	<<<	412
17.7	回路法	<<<	415
17.8	改进节点法	<<<	417
17.9	表格法	<<<	419
	习题	<<<	421
第 18 章	状态变量法	<<<	424
18.1	状态变量和状态方程	<<<	425
18.2	状态方程的列写方法	<<<	427

18.3	状态方程的时域解析解法	<<<	435
18.4	状态方程的拉普拉斯变换法求解	<<<	443
	习题	<<<	445
第 19 章	非线性电路简介	<<<	447
19.1	非线性电阻的特性	<<<	448
19.2	非线性电容元件	<<<	449
19.3	非线性电感元件	<<<	450
19.4	非线性电阻电路的方程	<<<	452
19.5	仅含一个非线性电阻的电路	<<<	453
19.6	非线性电阻电路方程解答的存在性与唯一性	<<<	454
19.7	非线性电阻电路方程的数值求解方法——牛顿法	<<<	456
19.8	小信号分析法	<<<	458
19.9	二阶非线性电路的状态方程	<<<	460
19.10	非线性动态电路方程的数值求解方法	<<<	462
19.11	相平面	<<<	463
19.12	非线性电路方程的线性化	<<<	469
19.13	平衡点的稳定性的概念	<<<	470
19.14	一个非线性振荡电路	<<<	475
19.15	范德坡方程的近似解	<<<	477
	习题	<<<	480
第 20 章	分布参数电路	<<<	484
20.1	问题的提出	<<<	485
20.2	均匀传输线方程	<<<	485
20.3	无损传输线方程的通解	<<<	487
20.4	终端开路的无损传输线接至恒定电压源	<<<	490
20.5	无损传输线上波的反射和透射	<<<	492
20.6	接入电阻负载时传输线上的波过程	<<<	494
20.7	终端接电阻的无损传输线上波的多次反射过程	<<<	496
20.8	终端接电容的无损传输线上的波过程	<<<	498
20.9	均匀传输线方程的正弦稳态解	<<<	500
20.10	均匀传输线上的行波	<<<	501
20.11	均匀传输线方程的双曲函数解	<<<	503
20.12	传播常数与特性阻抗	<<<	506

20.13	传输线上波的反射系数	<<<	508
20.14	终端接特性阻抗的传输线	<<<	509
20.15	不同负载条件下的传输线	<<<	510
20.16	无损传输线上的驻波现象	<<<	514
20.17	均匀传输线的等效网络	<<<	518
	习题	<<<	519

附录 A 磁路和含铁芯的线圈 <<< 522

A.1	磁路概述	<<<	522
A.2	磁场与磁场定律	<<<	523
A.3	铁磁物质的磁化特性	<<<	525
A.4	磁路定理	<<<	528
A.5	恒定磁通的磁路计算	<<<	531
A.6	铁芯中的功率损失	<<<	536
A.7	铁芯线圈中电流、磁通与电压的波形	<<<	537
A.8	交流电路中铁芯线圈的电路模型	<<<	539
	习题	<<<	541

附录 B 复数复习 <<< 543

附录 C PSpice 电路仿真简介 <<< 546

C.1	OrCAD/PSpice 9.1 基本功能简介	<<<	547
C.2	OrCAD/PSpice 9.1 电路仿真的步骤	<<<	548
C.3	直流分析	<<<	557
C.4	交流稳态分析	<<<	561
C.5	瞬态分析	<<<	567
	习题	<<<	572

附录 D 电路原理中英文专业词汇对照表 <<< 575

习题参考答案 <<< 581

参考文献 <<< 601

第

1

章

电路元件和电路定律

提 要

本章的主要内容是介绍电路模型的概念，电路中用到的一些主要物理量，电压、电流的参考方向，一些理想的电路元件以及基尔霍夫定律。要引入的理想电路元件包括线性电阻元件，理想电压源和理想电流源元件，以及四种线性受控源元件。这些电路元件的特性一般用电压、电流关系方程来描述，其中线性电阻元件的电压、电流关系由欧姆定律确定。基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律，它们是对集总参数电路中各电压、电流的约束关系。电路的元件特性和基尔霍夫两个定律构成了电路分析的基础。

1.1 电路和电路模型

电路是电工设备构成的整体,它为电流的流通提供途径。电路的基本功能是传输、变换、存储电能或电的信号。有时也称电路为电网络。

在电工技术中有着数不胜数的电工器件、设备和由它们组成的系统,例如由发电机、变压器、输电线、各种用电负载组成的电力系统;各种通信系统;含有许多电子计算机的信息系统。这些器件、设备的作用、功能虽有许多不同,但它们作为电路都遵循同样的电路定律,可以置于共同的理论中进行研究。

电路的工作是以其中的电压、电流、电荷、磁链等物理量来描述的。在电路理论中,引入一些抽象化的理想元件构成实际电路的模型。这些理想电路元件能够反映实际电路中的电磁现象,表征其电磁性质:电阻元件表示消耗电能的作用;电感元件表示各种电感线圈产生磁场、储存磁能的作用;电容元件表示各种电容器产生电场、储存电能的作用;电源元件表示诸如发电机、电池等器件将其他形式的能量转换成电能的作用。将这些元件适当地联接起来,便可构成实际电路的模型。分析和设计电路,都使用这样的模型。

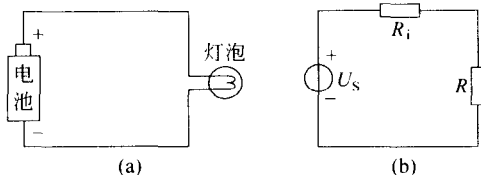


图 1-1-1 一个实际的电路和它的电路模型

(a) 实际电路; (b) 电路模型

例如如图 1-1-1(a)的一个由蓄电池通过联接导线向一白炽灯供电的装置,是一个实际的电路,可以用图 1-1-1(b)的电路作为它的电路模型。在这模型中蓄电池由一电压为 U_s 的电源和一个与它串联的电阻 R_i 表示,白炽灯由一个电阻 R 表示。又例如一个用导线绕制的线圈,在低频情况下可以用一个电感与一电阻

串联的电路作为它的电路模型。

电路理论中的一些理想元件,如上面所述的电阻、电感、电容等,都分别集总地表现实际电路中的电场或磁场的作用。每一种具有两个端钮的元件中有确定的电流,端钮间有确定的电压。这样的元件称为集总参数元件,由集总参数元件构成的电路称为集总参数电路。

对于实际的电路,由它的电路特性,构成它的电路模型,称为电路的建模。有的电路的建模较简单,例如上面所举的两个例子;有的器件或系统的建模则需要深入分析其中的物理现象才能作出它们的电路模型,例如对交流发电机、半导体晶体管,便需要分别运用有关的知识去建模,这是相应的专门课程的课题。

实际电路要能用集总参数电路去近似,需要满足以下的条件:实际电路的尺寸必须远小于电路工作频率下的电磁波的波长。

电路原理课程的主要内容是分析电路中的电磁现象和过程,研究电路定律、定理和电路的分析方法,这些知识是认识和分析实际电路的理论基础,更是分析和设计电路的重要工具。

1.2 电流、电压、电动势及其参考方向

在这一节里简要地复习电流、电压、电动势的概念,着重说明它们的参考方向。

电流

带电质点的运动形成电流。电流的大小用电流强度表示,它的定义是:在时刻 t , 穿过一个面 S 的电流强度 i 等于在从 t 到 $t + \Delta t$ 的时间内,从此面的一方穿到另一方的电荷量的代数和 Δq 与此时间间隔 Δt 之比,当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的极限,即

$$i(t) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

所以某一时刻 t 穿过 S 面的电流强度的值,就等于在该时刻单位时间内穿过 S 面的电荷量的代数和。通常将电流强度简称为电流。

在电路中一导线或一元件中的电流有两个可能的流动方向。为了表明电流的方向,我们必须先从两个可能的方向中选取一个方向作为参考方向,例如图 1-2-1 中的由元件的一端 A 经元件至另一端 B 的方向,并约定:沿此方向的正电荷运动所形成的电流为正值,即 $i > 0$;逆着此方向的正电荷运动所形成的电流为负值。在电路图中用顺着参考方向的箭头表示参考方向。在图 1-2-1 中,实线箭头表示参考方向,当电流的实际方向(图中虚线箭头所示)与参考方向一致时(图 1-2-1(a)),此电流为正值;当电流的实际方向与参考方向相反时(图 1-2-1(b)),此电流为负值。可见,电流的参考方向并不一定是电流的实际方向。但当有了在所选定的参考方向下的电流的表达式,我们就可以确定每一时刻电流的实际方向。电流的参考方向也称为电流的正方向。

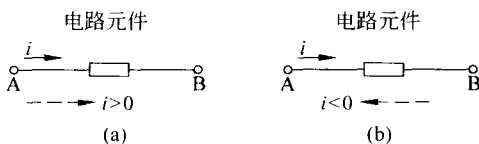


图 1-2-1 电流的参考方向说明图示

(a) i 为正; (b) i 为负

表示电流的参考方向还可以用双下标,例如表示图 1-2-1 中的由 A 流向 B 的电流使用 i_{AB} 。同一电流在不同的正方向选择下,所得电流的表达式符号相反,例如在图 1-2-1 中,便有

$$i_{AB} = -i_{BA}$$

在电工技术中普遍采用的国际单位制(SI)中,电荷的单位名称是库[仑],符号是 C;时间的单位名称是秒,符号是 s;电流的单位名称是安[培],符号是 A。每秒流过 1 库[仑]的电流即为 1 安。度量大的电流用千安(kA),度量小的电流用毫安(mA)或微安(μA)等单位。

电压

在物理学的电磁学中已经知道:电荷在电场中受到电场力的作用,当将电荷由电场中