



普通高等教育“十五”国家级规划教材

电路理论基础

(第三版)

哈尔滨工业大学电工基础教研室 编

陈希有 主编



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

电路理论基础

(第三版)

哈尔滨工业大学电工基础教研室编

陈希有 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,是在1996年《电路理论基础》(第2版)的基础上修订而成。除保持第2版教材特色外,在修订过程中主要做了如下考虑:进一步理顺教学内容,突出教学实用性,便于自学;适度增删,突出教学重点和工程实用性;使物理概念、数学方法和计算工具有机结合;针对系列课程教学计划,进一步理顺与前期课及后续课关系。

全书共分15章,具体内容是:基尔霍夫定律及电路元件、线性直流电路、电路定理、非线性直流电路、电容元件和电感元件、正弦电流电路、三相电路、非正弦周期电流电路、频率特性和谐振现象、线性动态电路暂态过程的时域分析、线性动态电路暂态过程的复频域分析、非线性动态电路的暂态过程、网络的图、网络矩阵与网络方程、二端口网络、均匀传输线,另有3个附录,附录A 磁路,附录B OrCAD/Capture, PSpice 概要,附录C MATLAB 概要。

本书可供普通高等学校电气信息类专业师生作为电路课程的教材使用,也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路理论基础/陈希有主编. —3版. —北京:高等教育出版社,2004.1

ISBN 7-04-013013-0

I. 电… II. 陈… 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(2003)第098359号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-82028899		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷	北京市卫顺印刷厂		
开 本	787×960 1/16	版 次	1985年7月第1版
印 张	34.5		2004年1月第3版
字 数	650 000	印 次	2004年1月第1次印刷
		定 价	39.10元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

第三版前言

《电路理论基础》第二版于1996年出版至今已7年有余。这期间为迎接新世纪的来临,各高等学校积极开展教学方法和教学内容的改革,制定面向21世纪的培养计划。与此同时,教材建设也面临许多新课题。教材改革势在必行。

当前,针对学生素质和能力的培养,各高等学校围绕着加强基础、拓宽专业的思路进行教学改革,教学形式呈现多样化。由此确定了《电路理论基础》第三版的修订思想。

本书第二版采用以电路状态为线索,按照直流稳态、正弦交流稳态、非正弦周期稳态和暂态的叙述体系,与国内同类教材相比,在体系上有着鲜明的特点,在多年的教学实践中证明是可行的。本次修订在继续保持这一体系的基础上,着重完成以下几方面的修订工作。

(1) 围绕教材主要体系,进一步理顺内容之间的关系,突出教学实用性

将原第1章中的网络图论、网络矩阵内容后移至第13章“网络的图、网络矩阵和网络方程”,将电阻元件和电源前移至第1章。由此降低了起点难度,使次要内容便于取舍,并为第2章分析线性直流电路奠定基础。

将原第2章的二端口参数矩阵后移至第14章“二端口网络”并加以充实,以满足实际应用的需要。将电容元件和电感元件单独组成第5章安排在正弦电流电路之前。这样在讲授这些元件之后即可得到应用,增强了内容的连贯性。

修改了“均匀传输线”一章的叙述体系。将第二版中直流稳态—交流稳态—暂态的体系结构修改为暂态—直流稳态—交流稳态的体系结构。因为在暂态过程中易于建立起行波及其入射和反射等概念。另外,基于拉普拉斯变换的有关暂态分析表达式,完全可以推广到直流和正弦稳态分析中。

(2) 适度增删,突出教学重点和工程实用性

本次修订删掉了回转器元件、混合分析法、考虑漏磁时的磁路计算等内容。在“线性直流电路”一章增加了改进节点电压法的内容,加强了节点电压法的实用性;在“二端口网络”一章增加了对称二端口网络的特性参数内容,为将来从事滤波器的分析和设计做好准备。在“均匀传输线”一章增加了信号的无畸变传输内容,以适应当前通信和网络工程的需要。上述所增内容虽不属电路理论的最新成果,但在当前或今后一段时间仍具有很强的工程实用性。

(3) 力求使物理概念、数学方法和计算工具有机结合

在各种电路的计算机辅助分析(仿真)产品功能日益完善、应用日益广泛的今天,电路教学应该做到物理概念、数学方法和计算工具有机结合。因此,在教材中适当介绍这方面的知识是十分必要的,既可调动学生的学习兴趣,又可提高他们解决工程问题的能力。为此,本次修订的又一个明显变化是通过增加两个附录,分别概要介绍了 OrCAD/Capture, PSpice 和 MATLAB 两种计算机辅助分析工具。此外,结合书中例题,介绍了用这两种工具解决不同问题的方法。只要按照所列步骤进行操作,便可顺利完成仿真分析任务,进而模仿这些步骤解决其它问题。通过完成习题中标有计算机符号的题目,读者可以练习使用上述工具。条件不具备时,跳过这些内容也不妨碍对其它内容的理解。

(4) 增删例题和习题,突出练习目的

保留了第二版中的大部分例题和习题,删掉一些步骤繁琐或技巧性很强的习题,从近年考题和学生练习册中精选出部分题目作为补充,旨在练习基本分析方法,巩固基本概念。

(5) 理顺与前序课程及后续课程关系,根据整个教学计划修订教材内容

教材建设是一项系统性很强的工程。在本次修订中认真研究了前序课程和后续课程大纲及其改革动向。考虑到现在的大学物理和高中物理课中的电磁学内容,在本次修订中强化了电阻串联、并联、分压、分流等简单实用内容;根据学生的数学基础,将电路方程表述成矩阵形式,利用线性代数进一步阐明线性电路的性质。这些内容学生是可以接受的,也是对前序数学课内容的很好应用。此外,修订“三相电路”时,参考了电力系统分析课程教材;修订“线性动态电路暂态过程的复频域分析”时,参考了复变函数与积分变换课程教材;修订“磁路”时,参考了电机学课程教材。

参加修订工作的还有孙立山、柴凤同志。孙立山修订第 11、12、13 章,柴凤修订第 7、8、9 章及附录 A。此外他们还完成了全部习题工作。

本次修订工作的完成是多方合作的结果。修订大纲经哈尔滨工业大学电工基础教研室反复讨论修改。第二版作者周长源教授和许承斌教授在确定修订方案上多次与作者交换意见。他们仔细阅读了大部分书稿,并根据自己多年的教学经验进行了认真修改。俞大光院士始终关心教材的修订情况,在百忙中阅读了大部分书稿,并与作者就许多专门问题进行反复讨论。修订中还征求了许多优秀学生的意见,体现教材以学为本的指导思想。此外,本书第二版读者也提出许多有益建议。全书成稿后承天津大学孙雨耕教授和杨山教授仔细审阅并提出许多具体修改意见。

上述同志所提建议大部分已被采纳。他们的工作是使教材质量得以提高的重要保证。对上述同志的热情支持和帮助,在此一并致以衷心感谢!

感谢本教材所引参考文献的作者们。

本教材是立体化教材建设内容的一部分,其它工作仍在继续。请关注立体化教材建设的读者将意见和要求寄至下列地址:

Trg601@hit.edu.cn 或 Chenxy@hit.edu.cn

编 者

2003 年 8 月于哈尔滨

郑 重 声 明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581698/58581879/58581877

传 真：(010) 82086060

E - mail: dd@hep.com.cn 或 chenrong@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街 4 号

高等教育出版社法律事务部

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)64014089 64054601 64054588

策划编辑	刘淑扬
责任编辑	许海平
封面设计	于文燕
责任绘图	朱 静
版式设计	陆瑞红
责任校对	朱惠芳
责任印制	孔 源

目 录

绪论	1
第 1 章 基尔霍夫定律及电路元件	5
1.1 电压 电流及其参考方向	5
1.2 电功率与电能	9
1.3 基尔霍夫电流定律	10
1.4 基尔霍夫电压定律	13
1.5 电阻元件	15
1.6 独立电源	18
1.7 受控电源	22
小结	24
习题 1	25
第 2 章 线性直流电路	28
2.1 电阻的串联与并联	29
2.2 电源和电阻的串联与并联	32
2.3 电阻的星形和三角形联结	35
2.4 支路电流法	38
2.5 回路电流法	42
2.6 节点电压法	47
2.7 运算放大器	53
2.8 含运算放大器电路的分析	55
小结	60
习题 2	61
第 3 章 电路定理	67
3.1 置换定理	67
3.2 齐性定理与叠加定理	70
3.3 等效电源定理	74
3.4 特勒根定理	78

3.5 互易定理	80
3.6 对偶原理	82
小结	84
习题3	84
第4章 非线性直流电路	89
4.1 非线性电阻元件特性	89
4.2 非线性直流电路方程	91
4.3 数值分析法	96
4.4 分段线性分析法	99
4.5 图解法	102
小结	103
习题4	104
第5章 电容元件和电感元件	107
5.1 电容元件	107
5.2 电感元件	112
5.3 耦合电感	116
5.4 理想变压器	121
小结	124
习题5	125
第6章 正弦电流电路	129
6.1 正弦电流	129
6.2 正弦量的相量表示法	133
6.3 基尔霍夫定律的相量形式	137
6.4 RLC 元件上电压与电流的相量关系	139
6.5 RLC 串联电路的阻抗	143
6.6 GCL 并联电路的导纳	146
6.7 正弦电流电路的相量分析法	150
6.8 含互感元件的正弦电流电路	155
6.9 正弦电流电路的功率	163
6.10 复功率	169
6.11 最大功率传输定理	171
小结	173

习题 6	175
第 7 章 三相电路	181
7.1 三相制和多相制	181
7.2 星形联结和三角形联结	184
7.3 对称三相电路的计算	189
7.4 不对称三相电路示例	191
7.5 三相电路的功率	193
*7.6 三相电路功率的测量	198
小结	200
习题 7	200
第 8 章 非正弦周期电流电路	203
8.1 非正弦周期电流和电压	203
8.2 周期函数分解为傅里叶级数	204
8.3 非正弦周期量的有效值、平均功率	210
8.4 非正弦周期电流电路的计算	213
*8.5 对称三相电路中的谐波	216
*8.6 傅里叶级数的指数形式	219
*8.7 傅里叶积分和傅里叶变换	222
小结	225
习题 8	226
第 9 章 频率特性和谐振现象	229
9.1 网络函数和频率特性	229
9.2 RLC 串联电路的频率特性	232
9.3 串联谐振电路	237
9.4 并联谐振电路	241
小结	244
习题 9	245
第 10 章 线性动态电路暂态过程的时域分析	248
10.1 动态电路的暂态过程	248
10.2 电路量的初始值	250
10.3 一阶电路的零输入响应	252

10.4	阶跃函数和冲激函数	257
10.5	一阶电路的零状态响应	260
10.6	一阶电路的全响应	270
10.7	求一阶电路暂态过程解的三要素公式	272
10.8	卷积积分	280
10.9	二阶电路的暂态过程	282
10.10	状态变量分析法	290
小结		295
习题 10		296
 第 11 章 线性动态电路暂态过程的复频域分析		304
11.1	拉普拉斯变换	304
11.2	拉普拉斯变换的基本性质	307
11.3	拉普拉斯逆变换	310
11.4	复频域中的电路定律与电路模型	315
11.5	用拉普拉斯变换分析线性动态电路的暂态过程	319
11.6	网络函数	326
小结		332
习题 11		333
 第 12 章 非线性动态电路的暂态过程		338
12.1	非线性电容与非线性电感	338
12.2	非线性动态电路的状态方程	340
12.3	数值分析法	343
12.4	分段线性分析法	347
12.5	小信号分析法	350
12.6	状态平面分析法	354
12.7	平衡状态的稳定性	357
小结		363
习题 12		363
 第 13 章 网络的图 网络矩阵与网络方程		367
13.1	网络的图 树	367
13.2	基本回路和基本割集	370
13.3	关联矩阵及基尔霍夫定律方程的关联矩阵形式	373

13.4	基本回路矩阵及基尔霍夫定律方程的基本回路矩阵形式	375
13.5	基本割集矩阵及基尔霍夫定律方程的基本割集矩阵形式	377
13.6	广义支路及其方程的矩阵形式	381
13.7	用矩阵运算建立节点电压方程	383
13.8	用矩阵运算建立回路电流方程和割集电压方程	386
13.9	状态方程的专用树列写法	387
	小结	389
	习题 13	390
第 14 章 二端口网络		393
14.1	二端口网络	393
14.2	短路导纳参数和开路阻抗参数	395
14.3	传输参数和混合参数	402
14.4	二端口网络的等效电路	407
14.5	二端口网络与电源及负载的连接	411
14.6	二端口网络的级联	416
	小结	418
	习题 14	420
第 15 章 均匀传输线		426
15.1	均匀传输线	427
15.2	均匀线方程及其通解	428
15.3	无损均匀线上波的发出	430
15.4	无损均匀线上波的反射	434
15.5	无损均匀线上波的多次反射	438
15.6	直流工作下的均匀线	442
15.7	正弦交流工作下的均匀线	448
15.8	正弦交流工作下的无损均匀线	455
15.9	均匀线的集中参数等效电路	459
15.10	信号的无畸变传输	463
	小结	465
	习题 15	467
附录 A 磁路		471
A.1	磁路及其基本定律	471

A.2 铁磁物质的磁化特性	476
A.3 磁阻与磁导	479
A.4 恒定磁通磁路的计算	483
A.5 正弦电压作用下铁心磁路的磁通	488
A.6 电流波形的畸变	490
A.7 铁内损耗	492
A.8 正弦磁通磁路的计算	496
A.9 铁心线圈及其电路模型	499
A.10 铁心变压器的电路模型	500
小结	503
习题 A	505
附录 B OrCAD/Capture, PSpice 概要	508
B.1 编辑原理图	508
B.2 设置分析类型	513
B.3 查看仿真结果	514
附录 C MATLAB 概要	516
C.1 MATLAB 使用要点	516
C.2 MATLAB 语言要点	518
C.3 MATLAB 应用举例	520
C.4 获得帮助	522
习题参考答案	523
参考文献	539

绪 论

1 电

从工程技术观点看,电(electricity)是一种优越的能量形式和重要的信息载体,因为它具有易于变换、易于传输和易于控制的特点。例如,将电暖气、电动机和日光灯通电后,电能即分别被转换为热能、机械能和光能,起到取暖、拖动和照明的作用;通过海底电缆或远距离输电线,可以将电能从发电厂传送至数百乃至上千公里的遥远用户。通过电话网、有线电视网以及计算机网络,人们在办公室或家中即可获得丰富的外界信息。借助开关和控制单元可以方便地实现对电能或电信号在转换或传输过程中的控制。电的理论基础是电磁学(electromagnetism)和电子学(electronics)。

1820 年安培(A. M. Ampere)发现电磁效应和 1831 年法拉第(M. Faraday)揭示电磁感应原理是电磁学的奠基工作。到 19 世纪 60 年代,麦克斯韦(J. C. Maxwell)建立了统一的电磁理论。电磁在发输配电和传送信息方面的应用几乎是同时并进的:电动机出现于 19 世纪 30 年代后期,发电站与输电线则于 19 世纪 80 年代初开始建造;电报发明于 1837 年,电话发明于 1876 年,而无线电通信则肇始于 1895 年。

19 世纪末,洛伦兹(H. A. Lorentz)建立了古典电子理论。随之而来的是电子技术的迅速发展,特别是在信息技术上的广泛应用。这方面的历史里程碑,从器件上说是 1906 年出现电子三极管,1948 年发明晶体三极管;从系统上看,第一家无线电广播电台于 1920 年在匹茨堡开播,第一家电视台于 1935 年由英国广播公司(BBC)建成,第一台电子计算机 1946 年诞生于美国宾州大学。

20 世纪是电气化的世纪。特别是 20 世纪的后半叶,电技术在各个领域取得了惊人的进展,各种新型电子器件的出现和电子计算机的冲击,推动了一场技术革命。预计 21 世纪,在改善人们的生活方式,促进社会文明的进程中,电技术依然是一个重要的技术基础。

2 电 路

电的应用,无论是能量转换或信息处理,都要由**电器件**(electric device)来实现。其中除了电磁和电子的过程外,还涉及声、光、热、化等物理现象,但它们都与电相联系。实际应用的电器件种类繁多,功能各异。从其基本功能出发,把能够输出电能或电信号的器件,例如电池、发电机和各种信号源等统称为**电源**(source);把要求输入电能或电信号的器件,例如电灯、电动机和各种收信设备等统称为**负载**(load)。此外,还有用来传输、变换、控制和量测电能和电信号的电器件,分别如电缆、变压器、开关和电表等。

电源和负载通过一些传输、变换、控制、量测等器件连接起来,构成**电路**(electric circuit),用以实现电能和电信号的技术应用。简言之,电路是由电器件互联而成的电流的通路。电的技术应用愈来愈发展,电路也愈来愈复杂。例如横亘数省、包括若干发电厂、供许多城乡用电的电力网就是一个大电路。在一个几平方毫米的芯片上制成的**集成电路**(integrated circuit)也是一个非常复杂的电路。

其实器件和电路的概念是相对的。譬如电力网中的一个发电厂,可以看成是一个电源器件。但是为了分析该器件的特性,又需要全面分析发电厂内部的电路,而一个发电厂内部的电路又是相当复杂的。上面提到的集成电路,从其外部端子的特性来看,它又是一个器件,需要与电源、负载连接起来才能应用。

电路又常常称为**电网络**(electric network)或简称网络。现在又广泛使用**系统**(system)这一概念。系统是由相互联系、相互制约、相互作用的各个部分组成的具有一定整体功能和综合行为的统一体。可见电路也是一个系统。电力网又称为**电力系统**(power system)。不过系统的概念比电路要更加广泛,常涉及更多方面的物理过程,甚至社会现象。

3 电路理论

电技术的发展,使电路越来越复杂。为了深入研究和促进应用,便需要并已形成**电路理论**(circuit theory)这门独立学科。从历史上看,1847年建立的**基尔霍夫定律**(kirchhoff's laws)是电路理论的基石。

电路理论是研究电路普遍规律的一门学科。既然要研究普遍规律,就需要建立**电路模型**(circuit model),即把实际电路的本质特征抽象出来所形成的理想化了的电路。为此,要把每一个电器件的本质特征用一个或若干个理想化的**电路元件**(circuit element)来表征,其中每一种元件只表示一种电磁特性(譬如电

压与电流的关系,电压与电荷的关系等)。例如用电阻元件表示电阻器能够将电能转变为热能的电磁特性;用电容元件表示电容器能够储存电荷的电磁特性;用与电容元件并联的电阻元件表示电容器的漏电特性。虽然实际的电器件种类繁多,但用以表征这些器件主要电磁特性的理想化电路元件的种类却为数很少。

元件的电磁特性可以用**参数**(parameter)、**特性方程**(characteristic equation)或**特性曲线**(characteristic curve)来表示。参数是表示元件电磁特性的某种量值。根据元件电磁特性的差异,元件可以分成线性元件与非线性元件、时变参数元件与非时变参数元件、集中参数元件与分布参数元件等。

当元件的电磁特性为线性关系时称为**线性元件**(linear element),否则称为**非线性元件**(nonlinear element)。线性元件的参数与电磁量无关。由电源和线性元件组成的电路称为**线性电路**(linear circuit)。描述线性电路的方程是线性代数方程或线性微分(积分)方程。不能用线性方程来描述的电路称为**非线性电路**(nonlinear circuit)。例如大部分含半导体电子元件的电路就属于非线性电路。线性电路已有比较成熟的理论。非线性电路理论近年来有很大进展,成为非常活跃的研究领域。

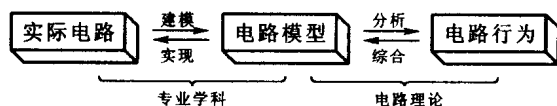
参数随时间而变化的元件称为**时变**(time-varying)参数元件,否则称为**非时变**(time-invariant)参数元件。含有时变参数元件的电路称为时变电路,否则称为非时变电路。时变电路是一个专门的研究领域,本书不欲涉及。

当元件各向尺寸远小于电磁量工作频率所对应的电磁波波长而无须考虑电磁量的空间分布时,这种元件称为**集中**(lumped)参数元件,仅含集中参数元件的电路称为**集中参数电路**(lumped circuit)。集中参数元件只涉及端子(terminal)上的电磁量,这些电磁量不是空间坐标的函数。例如我国电力网的工作频率是 $f = 50 \text{ Hz}$,电压、电流的传播速度近似为光速,即 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$,对应的波长为 $\lambda = c/f = 6000 \text{ km}$,对以此为工作频率的电气设备来说,其尺寸很少接近这一长度,因此可按集中参数电路来处理,认为电能在这些设备中的传输是瞬间完成的。但也有些情况须考虑电磁量的空间分布性,这种电路称为**分布参数电路**(distributed circuit)。例如对无线电接收机的天线来说,若所接收到的信号频率为 100 MHz ,则对应的波长为 $\lambda = 3 \text{ m}$,因此不能把天线视为集中参数电路元件。再如远距离直流输电线路,其电压、电流随位置而变化,因此要用分布参数电路理论进行分析。

元件通过端子的互联,构成电路模型。本书以后提到电路如无特别说明均指电路模型。

电路模型与实际电路的关系是前者在一定程度上反映后者的本质性状。要求反映得愈精确,建立的模型将愈复杂。从另一角度看,一个电路模型也只在一定条件下反映某一实际电路,不满足此条件时,需要更换不同的模型。

电路理论的研究对象不是实际电路,而是电路模型。具体地说:从给定的电路模型研究其行为就是**电路分析**(circuit analysis);从要求的电路行为探讨如何构成一个符合要求的电路模型则是**电路综合**(circuit synthesis)。至于怎样从一个具体电路出发建立它的模型以及从电路模型设计并实现一个实际电路,乃是专业学科的任务,可以直观地用下图表述:



4 电路理论基础

本书名为《电路理论基础》,作为大学本科的一本电路课程的入门教材。电路课程是电气、电子等专业的一门重要的技术基础课程。通过本课程的学习,使学生掌握电路的基本理论、分析电路的基本方法和进行实验、仿真的初步技能,并为后续课程准备必要的电路知识。

这里所谓“基础”,不仅指数理基础,还指本门学科中最基本的内容,即基本定理、基本概念和基本分析方法。从电路理论的大方面来说,本书只涉及“分析”而没有涉及“综合”,因为分析是综合的基础。本书大部分篇幅介绍线性、非时变、集中参数电路的分析,对非线性电路和分布参数电路只介绍最基本的概念和常用的分析方法。

对于电类各专业,电路是极为重要的技术基础课。其中许多概念和方法要求透彻理解和牢固掌握。这些概念和方法将使读者受益终生。