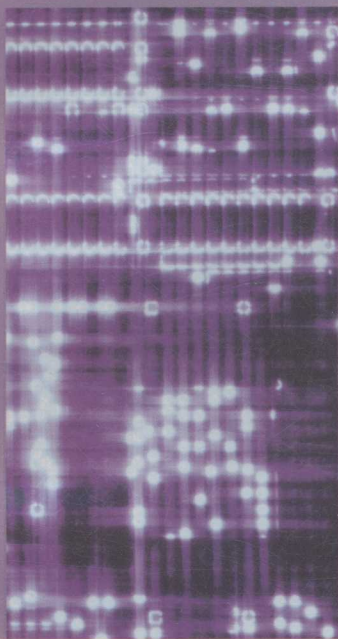


高等学校教材

电路分析基础



刘 岚 叶庆云 编著



高等教育出版社

高等学校教材

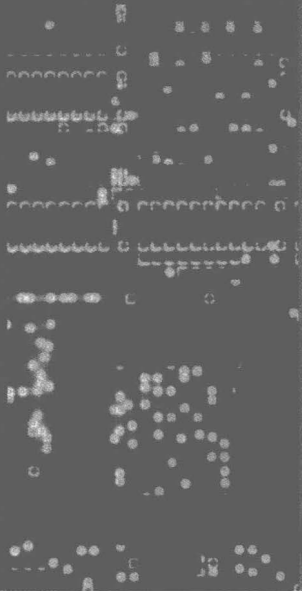
内容简介

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。本书共分五章。第一章介绍电路模型和电路定律；第二章介绍电阻电路的分析和定理；第三章介绍正弦稳态电路的分析和定理；第四章介绍动态电路的分析和定理；第五章介绍非线性电路的分析和定理。本书可作为高等院校电气信息类专业及相关专业的教材，也可供从事电气工程工作的工程技术人员参考。

电路分析基础

Dianlu Fenxi Jichu

刘 岚 叶庆云 编著



本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。本书共分五章。第一章介绍电路模型和电路定律；第二章介绍电阻电路的分析和定理；第三章介绍正弦稳态电路的分析和定理；第四章介绍动态电路的分析和定理；第五章介绍非线性电路的分析和定理。本书可作为高等院校电气信息类专业及相关专业的教材，也可供从事电气工程工作的工程技术人员参考。



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

本书的第1~7章由叶庆云教授主编，并经武汉大学刘树坤教授审阅，他们提出了不少宝贵意见。另外，本书的编写借鉴了国外优秀教材的成功之处以及编著者在教学和科研中的经验。

内容简介

本书按照电气信息类专业“电路分析基础”课程教学基本要求,通过描述不同信号下相应电路的形态和性态,系统地介绍了电路的基本概念、基本理论和基本分析方法。

全书共分15章,内容包括电路的基本概念与定律、电阻电路的等效变换、电阻电路的一般分析方法、电路定理、含有运算放大器的电阻电路、储能元件、动态电路的时域分析、正弦量与相量、正弦稳态电路分析、含有磁耦合元件的正弦稳态电路分析、三相电路分析、非正弦周期信号激励下的稳态电路分析、正弦交流电路的频率特性、电路的复频域分析、二端口网络分析等。每章之后均附有思考题和习题,书末附有大部分习题答案。

本书深入浅出、通俗易学,具有良好的可读性。

本书可作为大学本科电气信息类专业的教材,也可供自学考试和成人教育有关专业选用,还可供研究生及科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础 / 刘岚, 叶庆云编著. —北京: 高等教育出版社, 2010. 1

ISBN 978-7-04-014417-8

I. 电… II. ①刘…②叶… III. 电路分析-高等学校-教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 224978 号

策划编辑 杜 炜 责任编辑 魏 芳 封面设计 李卫青 责任绘图 尹 莉
版式设计 范晓红 责任校对 杨雪莲 责任印制 尤 静

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京凌奇印刷有限责任公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 26.5
字 数 650 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2010 年 1 月第 1 版
印 次 2010 年 1 月第 1 次印刷
定 价 31.10 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
物料号 14417-00

前 言

从理论上讲,对电路的研究包括两个方面,即电路分析与电路综合。所谓电路分析是指已知电路结构和元件参数,求电路的解(如电流、电压、功率等);所谓电路综合是指已知电路的解[或已知(给定)电路要达到的某种性能指标],求确定电路的结构和元件参数。当然,电路综合必须以电路分析为基础。本书只论述电路分析方面的问题,不涉及电路综合内容。

电路分析是一门很重要的技术基础课,它为从事电气信息技术领域的学习、工作和研究奠定基础。

数年来,我们一直希望能对自己多年教授电路分析的心得和体会进行一定的总结,并将其融会贯通,编写成为一本有益于电路理论学习的教材,本书就是在这样的指导思想下编写的。

本书内容的深广度符合现阶段我国普通高等学校电气工程、自动化、通信工程、电子信息工程、计算机、电子科学与技术等专业电路课程的教学要求。本书的取材和编排均立足于我国高等学校的教学实际,书中注重电路的基本概念和基本分析方法,在各章节中处处以基尔霍夫定律作为理论指导,在学生已有的理论基础上由浅入深展开分析。在内容编排方面,既有从特殊到一般的归纳方法,又有从一般到特殊的演绎方法;既能使学生易于接受新内容,又能培养学生的抽象思维能力。书中从各个不同角度反复强调基本理论和计算公式的适用条件,帮助学生建立清晰的物理概念,并培养学生良好的学习习惯,避免盲目套用公式。为了培养学生正确的思维方法和分析问题的能力,本书在每章之后皆配有适量的思考题和习题。认真完成这些练习,将有益于学生掌握所学内容,同时,对于提高学生运用理论解决实际问题的能力也能起到积极的促进作用。

本书特别在绪论中介绍了电路理论的起源、演变过程及发展趋势,从宏观的角度出发让学习者对电路理论的形成和发展有一个较为全面的认识,这不仅对学习者学习本课程以及其他有关的专业技术课程有一定的帮助,同时也会对学习者在未来的工作和研究方面产生非常好的综合启发作用。

本书注重与后续课程“信号与系统”的衔接性,在具体内容中试图以信号为线条,通过描述不同信号下相应电路的形态与性态,来展现面对不同信号时电路的分析理论和分析方法。

本书还注重在内容叙述过程中的比拟性和逻辑性,以求通俗易懂、深入浅出,使本书具有较好的可读性。

本书的编写借鉴了国内、外优秀教材的成功之处以及编著者在教学和研究方面所积累的知识 and 经验。

本书的第1~7章由叶庆云编写,绪论和第8~15章由刘岚编写。本书承武汉理工大学刘泉教授主审,并经武汉大学胡钊教授审阅,他们提出了不少宝贵意见。另外,华中科技大学杨晓非

教授、曹计昌教授也对本书的编写提出了有益的建议,在此一并表示诚挚的感谢。

限于编著者的水平和经验,书中难免存在错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编著者

2009年10月

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》，其行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) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail: dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100120

购书请拨打电话：(010) 58581118

目 录

绪论	1	2.1.1 单口网络的电压电流关系	36
第1章 电路的基本概念与定律	10	2.1.2 等效、等效电路与等效变换	37
1.1 实际电路与电路模型	10	2.2 电阻的串联、并联和混联等效	38
1.1.1 实际电路的组成与功能	10	2.2.1 电阻的串联等效	38
1.1.2 电路模型	11	2.2.2 电阻的并联等效	39
1.1.3 集中参数电路	12	2.2.3 电阻的混联等效	40
1.2 电路变量及其参考方向	13	2.3 电阻的Y形联结与 Δ 形联结的等效变换	42
1.2.1 电流及其参考方向	13	2.3.1 Y形、 Δ 形联结方式	42
1.2.2 电压及其参考方向	14	2.3.2 Y形- Δ 形等效变换	43
1.2.3 关联参考方向	15	2.4 利用电路的对称性求等效电阻	46
1.2.4 功率及其正、负号的物理意义	15	2.4.1 “传递对称”单口网络	47
1.3 电阻元件	17	2.4.2 “平衡对称”单口网络	47
1.3.1 电阻元件的定义	17	2.5 无源单口网络 N_0 的输入电阻	48
1.3.2 开路与短路	18	2.6 电压源、电流源的串联、并联和转移	50
1.3.3 电阻元件的功率与能量	19	2.6.1 电压源的串联	50
1.4 电压源和电流源	19	2.6.2 电压源的并联与转移	50
1.4.1 电压源	20	2.6.3 电流源的并联	51
1.4.2 电流源	21	2.6.4 电流源的串联与转移	52
1.5 受控源	22	2.7 含源支路的等效变换	53
1.6 基尔霍夫定律	24	2.7.1 实际电源的两种电路模型	53
1.6.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	25	2.7.2 含独立源支路的等效变换	54
1.6.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	26	2.7.3 含受控源支路的等效变换	55
1.7 综合示例	28	2.8 含外虚内实元件单口网络的等效变换	56
思考题	31	2.9 综合示例	59
习题	32	思考题	60
习题	32	习题	61
第2章 电阻电路的等效变换	36		
2.1 电路等效的一般概念	36		

第3章 电阻电路的一般分析方法	64	6.1.1 电容器与电容元件	135
3.1 电路的图	64	6.1.2 电容元件的电压电流关系	136
3.2 KCL 和 KVL 方程的独立性	65	6.1.3 电容元件的功率与能量	137
3.2.1 KCL 方程的独立性	65	6.2 电感元件	139
3.2.2 KVL 方程的独立性	66	6.2.1 电感线圈与电感元件	139
3.3 支路法	69	6.2.2 电感元件的电压电流关系	140
3.3.1 2b 法	69	6.2.3 电感元件的功率与能量	142
3.3.2 b 法	72	6.3 电容、电感的串、并联等效	143
3.4 网孔分析法和回路分析法	74	6.3.1 电容的串、并联等效	143
3.4.1 网孔分析法	74	6.3.2 电感的串、并联等效	146
3.4.2 回路分析法	77	思考题	149
3.5 节点分析法	83	习题	149
思考题	90	第7章 动态电路的时域分析	152
习题	91	7.1 动态电路的方程及其	
第4章 电路定理	94	初始条件	152
4.1 叠加定理	94	7.1.1 瞬态过程与换路	152
4.2 替代定理	100	7.1.2 动态电路的方程及其解	154
4.3 戴维宁定理和诺顿定理	103	7.1.3 换路定则与电路初始	
4.4 最大功率传输定理	108	条件的求解	156
4.5 特勒根定理	112	7.2 一阶电路的零输入响应	159
4.5.1 特勒根定理 I	112	7.3 一阶电路的零状态响应	166
4.5.2 特勒根定理 II	113	7.4 一阶电路的全响应	173
4.6 互易定理	116	7.5 一阶电路的阶跃响应	180
4.7 对偶原理	119	7.5.1 阶跃函数	181
思考题	121	7.5.2 阶跃响应	183
习题	122	7.6 一阶电路的冲激响应	186
第5章 含有运算放大器的电阻电路	126	7.6.1 冲激函数	186
5.1 运算放大器	126	7.6.2 冲激响应	190
5.2 理想运算放大器	127	7.6.3 冲激响应与阶跃响应	
5.3 含有理想运算放大器的		之间的关系	192
电阻电路分析	128	7.7 正弦激励下一阶电路的	
思考题	133	全响应	194
习题	133	思考题	196
第6章 储能元件	135	习题	197
6.1 电容元件	135	第8章 正弦量与相量	201
		8.1 正弦交流电的基本概念	201

8.1.1 正弦交流电	201	9.2.7 功率的可叠加性与守恒性	232
8.1.2 正弦量的瞬时表达式	201	9.2.8 功率因数	233
8.1.3 正弦量的三要素	202	9.2.9 正弦稳态电路中的 最大功率传输	236
8.1.4 同频率正弦量的相位差及超前 与滞后的概念	202	思考题	238
8.1.5 正弦量的有效值	203	习题	238
8.1.6 正弦量的叠加问题	204	第10章 含有磁耦合元件的正弦稳态 电路分析	243
8.2 正弦量的相量表示	205	10.1 磁耦合	243
8.2.1 复数的表示与运算	205	10.1.1 磁耦合线圈	243
8.2.2 复数与相量	206	10.1.2 磁耦合系数	245
8.2.3 相量的基本运算	208	10.1.3 同名端的概念	245
8.2.4 相量法	209	10.2 含耦合电感电路的分析	246
8.3 电路元件与定律的相量模型	210	10.2.1 两耦合电感线圈的串联	246
8.3.1 基尔霍夫定律的相量形式	210	10.2.2 两耦合电感线圈的并联	247
8.3.2 线性时不变电阻元件的 相量形式	211	10.2.3 两耦合电感线圈的 受控源等效去耦	248
8.3.3 线性时不变电容元件的 相量形式	211	10.2.4 两耦合电感线圈的 T形等效去耦	249
8.3.4 线性时不变电感元件的 相量形式	212	10.2.5 含有耦合电感线圈的 电路分析	251
思考题	213	10.3 空心变压器	253
习题	214	10.3.1 空心变压器的一次等效电路	253
第9章 正弦稳态电路分析	216	10.3.2 空心变压器的二次等效电路	254
9.1 运用相量法分析正弦稳态电路	216	10.4 理想变压器	256
9.1.1 复阻抗与复导纳	216	10.4.1 理想变压器的定义	256
9.1.2 RLC 串联电路的分析	217	10.4.2 理想变压器的特性	257
9.1.3 RLC 并联电路的分析	219	10.4.3 理想变压器的阻抗变换性质	259
9.1.4 复阻抗与复导纳的串联、 并联及混联电路的分析	220	思考题	260
9.1.5 正弦稳态电路的相量分析法	222	习题	261
9.2 正弦稳态电路的功率	227	第11章 三相电路分析	265
9.2.1 瞬时功率	227	11.1 三相电路的基本概念	265
9.2.2 平均(有功)功率	228	11.1.1 对称三相电源	265
9.2.3 无功功率	229	11.1.2 三相负载	267
9.2.4 视在功率	230	11.1.3 三相电路	268
9.2.5 功率三角形	230	11.2 对称三相电路的分析与计算	272
9.2.6 复功率	231		

11.2.1 对称三相四线制(Y_0/Y_0)系统的分析	272	13.3 基本滤波器电路及其频率特性	313
11.2.2 复杂对称三相电路的分析	273	13.3.1 低通滤波器	313
11.3 不对称三相电路概述	275	13.3.2 高通滤波器	315
11.4 三相电路的功率及其测量	276	13.3.3 带通滤波器	316
11.4.1 对称三相电路的功率	276	13.3.4 其他形式的滤波器简介	318
11.4.2 三相电路的功率测量	279	思考题	318
思考题	282	习题	319
习题	282	第14章 电路的复频域分析	322
第12章 非正弦周期信号激励下的稳态电路分析	285	14.1 拉普拉斯变换	322
12.1 非正弦周期信号的简谐分量分解	285	14.1.1 傅里叶变换简介	322
12.1.1 周期信号的分解	285	14.1.2 拉普拉斯变换	323
12.1.2 周期信号的频谱	288	14.1.3 拉普拉斯变换的基本性质	324
12.2 非正弦周期信号的有效值、平均值和平均功率	291	14.1.4 常用函数的拉普拉斯变换	330
12.2.1 非正弦周期信号的有效值	291	14.2 拉普拉斯反变换	331
12.2.2 非正弦周期信号的平均值	292	14.2.1 拉普拉斯反变换的基本方法	331
12.2.3 非正弦周期信号的平均功率	293	14.2.2 部分分式分解法	331
12.3 非正弦周期信号激励下的稳态电路分析	294	14.3 运用拉普拉斯变换分析线性电路	335
思考题	297	14.3.1 KCL和KVL的运算形式	336
习题	298	14.3.2 电路元件的 s 域模型	336
第13章 正弦交流电路的频率特性	300	14.3.3 运用拉普拉斯变换法求解线性电路——运算法	338
13.1 网络函数	300	14.4 复频域中的网络函数	341
13.1.1 网络函数的定义	300	14.4.1 复频域网络函数的定义和性质	341
13.1.2 网络函数的分类	301	14.4.2 复频率平面上网络函数的零、极点	343
13.1.3 网络函数的频率特性表示方法	302	14.4.3 极点与网络的特性	343
13.2 谐振电路的频率特性	305	14.5 $H(j\omega)$ 与 $H(s)$ 的关系	346
13.2.1 RLC 串联谐振电路的频率特性	306	14.6 零、极点与频率特性	348
13.2.2 RLC 并联谐振电路的频率特性	311	思考题	349
		习题	349
		第15章 二端口网络分析	354
		15.1 二端口网络及其分类	354
		15.1.1 二端口网络的定义	354

15.1.2. 二端口网络的分类	354	等效电路	367
15.2 二端口网络的端口特性		15.4.3 用 T 参数表征的二端口	
方程及其参数	355	等效电路	368
15.2.1 开路阻抗参数—— Z 参数	355	15.4.4 用 H 参数表征的二端口	
15.2.2 短路导纳参数—— Y 参数	357	等效电路	369
15.2.3 传输参数—— T 参数	359	15.5 二端口网络的连接	369
15.2.4 混合参数—— H 参数	361	15.5.1 二端口网络的级联	370
15.2.5 四种参数之间的互换	362	15.5.2 二端口网络的并联	372
15.3 二端口网络的特性阻抗	363	15.5.3 二端口网络的串联	373
15.3.1 输入端阻抗与输出端阻抗	363	15.6 二端口网络的网络函数	374
15.3.2 二端口网络的输入端特性阻抗		15.6.1 无端接二端口网络的	
Z_{C1} 与输出端特性阻抗 Z_{C2}	364	转移函数	374
15.3.3 对称二端口网络的		15.6.2 有端接二端口网络的	
特性阻抗 Z_C	364	转移函数	376
15.3.4 二端口网络特性		思考题	379
阻抗的重要性质	365	习题	379
15.4 二端口网络的等效电路	366	参考书目	385
15.4.1 用 Z 参数表征的二端口		《电路分析基础》中英文词汇对照	386
等效电路	366	部分习题答案	398
15.4.2 用 Y 参数表征的二端口			

绪 论

电路理论作为一门独立的学科出现于人类历史中大约已有二百多年了,在这纷纭变化的二百多年里,电路理论从那种用莱顿瓶和变阻器描述问题的原始概念和分析方法逐渐演变成为一门抽象化的基础理论科学,其间的发展和变化贯穿于整个电气科学的发展之中。如今它不仅成为整个电气科学技术中不可缺少的理论基础,同时也在开拓和发展新的电气理论和技术方面起着重要的作用。

电路理论是一个极其美妙的领域,在这一领域内,数学、物理学、信息工程、电气工程与自动控制工程等学科找到了一个和谐的结合点,其深厚的理论基础和广泛的实际应用使其具有旺盛持久的生命力。因而,对于许多有关的学科来说,电路理论是一门非常重要的基础理论课。

一般来说,电路理论的教学是从微观出发,对各种电气技术及其理论进行深入细致的分析和探讨,其教学目的是让学习者从微观上对电路理论融会贯通,以求能够解决实际电路问题。然而,在这种微观教学中进行一定的宏观引导却是非常重要的。因为当今的电路理论已从一门较单纯的学科演变成了许多学科所共有的基础理论,这一演变过程充满了人类智慧的结晶,充满了科学思想甚至哲学概念上的进化。因此若能将电路理论的起源、演变过程及发展趋势充实于教学内容中,从宏观上让学习者对电路理论有一个较全面的认识,则不仅对学习者学习本课程以及其他有关的专业技术课程有一定的帮助,同时也会对学习者未来的工作和研究产生非常好的综合启发作用。

1. 历史的回顾

电,这个词来源于古希腊语“琥珀(elektron)”,琥珀是一种树脂化石。大约在公元前600年,古希腊人第一次产生了电场,其方法是用一块丝绸或毛皮与琥珀棒摩擦。后来,科学家们指出,其他一些材料例如玻璃、橡胶等也具有类似琥珀的特性。人们注意到有一些带电的材料被带电的玻璃片所吸引,而另一些却被排斥,这说明存在两种不同的电。本杰明·富兰克林称这两种电(或电荷)为正电和负电(正电荷或负电荷)。法国科学家库仑(C. A. Coulomb)和英国科学家卡文迪什(Cavendish)在18世纪研究了这种靠摩擦产生的静电,发现了这种电所遵循的规律,这一规律被称为库仑定律(1785年)。然而对这种静电所进行的研究及其成果并未能使人类在电科学领域中取得任何重大的进展,原因是这种静电场极难维持连续不断的电流。真正的突破是从1800年伏打(Alessandro Voltar)发明化学电池后开始的。意大利物理学家伏打发现:当把两个不同的电极(例如锌和铜)浸入电解液中,就会产生电位差,这就是电池的原理。后人采用伏特作为电压的单位,以纪念科学家伏打。由于伏打电池使电流连续成为可能,因而使很多电的实验变得简单可行,于是在短期内就有了一系列重要的发现。比如,1820年奥斯特(H. C. Oersted)发现,罗盘指针在载导体旁会发生偏转,于是他断定:电荷的流动产生了磁。这一发现揭开了电学理论的新的一页。1825年安培(A. M. Ampere)提出了描述电流与磁之间关系的安培定律,同

时,毕奥和沙伐尔也用实验表明了电流与磁场强度的关系。后人为纪念安培,取其名作为电流的单位。1827年德国物理学家欧姆(G. S. Ohm)在他的论文《用数学研究电路》中创立了欧姆定律。这个定律现在看来很简单,但在当时,欧姆将电在导体中运动的现象进行简化分析的观点却受到同时代科学家的嘲笑和非难,周折近30年后才被肯定,这时欧姆也才获得教授职位。英国科学家法拉第(M. Faraday)在认识到电流能产生磁之后,花了10年工夫,企图证明磁场能产生电流。他致力于互感的研究,1831年他终于成功地证明了:如果贯穿线圈的磁链随时间发生变化,则在线圈中将感应出电流。这个结论被称为法拉第电磁感应定律。同时他还发现,电路中感应电动势的特性取决于与电路交链的磁通的大小和与电路交链的磁通的变化率。在电磁现象的理论与实用问题的研究上,德国物理学家海因里希·楞次(Heinrich Friedrich Lenz)作出了巨大的贡献。1833年他建立了确定感应电流方向的定则(楞次定则),其后,他致力于电机理论的研究,并提出了电机可逆性原理。1844年,楞次与英国物理学家焦耳(J. P. Joule)分别独立地确定了电流热效应定律(焦耳-楞次定律)。1834年,与楞次一道从事电磁现象研究工作的雅可比制造出世界上第一台电动机。然而,真正使电机工程得以飞跃发展的是三相系统的创始者——俄罗斯工程师多里沃·多勃罗沃尔斯基,他不仅发明和制造了三相异步电动机和三相变压器,还首先采用了三相输电线。当法拉第发现电磁感应现象后,就提出了“场”的一些初步但极为重要的概念来解释他的发现,但令人遗憾的是,由于法拉第不精通数学,因而未能从他的发现中再前进一步去建立电磁场理论,但自此开始,电与磁的研究就分别在“路”与“场”这两大密切相关的阵地上展开了。

电磁场科学理论体系的创立要归功于伟大的物理学家同时也是数学教授的麦克斯韦(J. C. Maxwell)。1864年,他集前人之大成创立了不朽的麦克斯韦方程组,以严格的数学形式描述了电与磁的内在联系,同时他还发表了存在电磁波的伟大预言。他的理论和预言后来在1887年被赫兹(H. R. Hertz)用实验所证明,从而又开创了无线电及电子科学的新纪元。

为电路理论奠定基础的是伟大的德国物理学家基尔霍夫(G. R. Kirchhoff)。1847年,刚满23岁的大学生基尔霍夫发表了划时代论文《关于研究电流线性分布所得到的方程的解》,文中提出了分析电路的第一定律(电流定律KCL)和第二定律(电压定律KVL),同时还确定了网孔回路分析法的原理。

后人曾从电磁场理论体系的核心麦克斯韦方程组推导出电路理论体系的核心KCL和KVL,这充分表明了电磁场问题与电路问题之间存在着必然的内在联系和辩证的统一。从电路理论发展进程及其所包含的内容来看,人们常把欧姆(1827年)和基尔霍夫(1847年)的贡献作为这门学科的起点,从这个起点到20世纪50年代的这一段时期被称为“经典电路理论发展阶段”,而把20世纪60年代到70年代这一段时期称为“近代电路理论发展阶段”,20世纪70年代以后的时期被称为“电路与系统理论发展阶段”。

(1) 经典电路理论发展阶段。这一阶段历经约100年,在这100年中,除了前面提到过的欧姆和基尔霍夫的贡献之外,重要的成果还有:1832年亨利(J. Henry)发现自感现象;1843年发明了惠斯通(Wheatstone)电桥;1853年亥姆霍兹(H. Von Helmholtz)首先使用等效电源定理分析电路,但这个定理直到1883年才由戴维宁(L. C. Thevenin)正式提出发表,因此后人称其为戴维宁定理;1873年麦克斯韦在他的巨著《Treatise on Electricity and Magnetism》(这是电气科学技术史上的第一部专著)中确立了

节点分析法原理;1894年斯坦梅茨(C. P. Steinmetz)将复数理论应用于电路计算;1899年肯内利(Kennelly)解决了Y- Δ 形变换;1904年拉塞尔(R. Russell)提出对偶原理;1911年海维赛德(O. Heaviside)提出阻抗概念,从而建立起正弦稳态交流电路的分析方法;1918年福特斯库(Fortescue)提出三相对称分量法,同年巴尔的摩(Baltimore)提出了电气滤波器概念;1920年瓦格纳(Wagner)发明了实际的滤波器,同年坎贝尔(Campbell)提出了理想变压器概念;1921年布里辛格(Breisig)提出了四端网络及黑箱概念;1924年福斯特(Foster)提出电抗定理;1926年卡夫穆勒(Kupfmuller)提出了瞬态响应概念;1933年诺顿(L. Norton)提出了戴维宁定理的对偶形式——诺顿定理;1948年特勒根(B. D. H. Tellegen)提出了回转器理论,这一器件后于1964年由施诺依(B. A. Shenoi)用晶体管首先实现;特勒根还于1952年确立了电路理论中除了KCL和KVL之外的另一个基本定理——特勒根定理。以上这些重要成果基本上组成了经典电路理论的实体。

在电路理论与电磁场理论不断丰富和发展的同时,又孕育了一门新的科学技术——无线电通信与无线电广播。引出这门新技术的是实际利用电磁波为人类服务的一些重要成果:1837年莫尔斯(F. B. Morse)发明了有线电报;1876年贝尔(A. G. Bell)发明了有线电话;1887年赫兹用实验证明了电磁波的存在;1895年马可尼(G. Marconi)和波波夫(A. C. Попов)几乎同时发明了无线电;而无线电通信技术中的一个最重要的进展是真空三极管的发明,1883年美国发明家爱迪生(Thomas. Alva. Edison)发现了热电子效应,在这一发现的启示下,1904年弗莱明(J. A. Fleming)发明了真空二极管,继之于1906年福里斯特(L. De. Forest)成功地发明了真空三极管,从而使得无线电通信与广播事业加速发展起来。随着这些发展相继又引出了许多新的概念和装置,比如,真空管的发明首先导致了振荡器的制造,而局部负反馈的应用使得多路载波通信所需的宽频带放大器的设计成为可能;另一方面长途通信中作为增音机用的放大器的设计理论也被提出了。

在滤波器理论方面,传统的影像参数设计理论已显现出不足,于是一种根据规定的插入衰减来设计滤波器的新方法在达林顿(S. Darlington)等人的理论工作基础上建立了起来。第二次世界大战时期,滤波器技术向更高频率的方向发展,于是又导致了微波网络理论的建立。1945年贝尔实验室着手实施一个加强的研究计划,以便更好地了解半导体物理基础,实施这一计划的结果是1948年肖克利(W. Shockley)、布拉顿(W. H. Brattain)、和巴登(J. Barden)三人宣布发明了锗点接触式晶体管,从而开始了固体电子学的时代。随之又引入了一系列新的概念和装置,这些新概念的引入,使人们开始将电路称为电网络,而对这一系列新装置的分析、设计和综合又给电路理论增添了大量新的课题和研究方向。

从发展动力来看,电路理论的早期发展是与长途电话通信密切相关的。到20世纪30年代,由于电力和电信工程的发展,电路理论已开始面向多学科领域,这时,不仅要以电路理论为基础去研究复杂的电力网络,同时还要对距离日益增加的越来越复杂的电信网络进行分析、设计与综合。进入20世纪40年代后,由于生产的发展和二次大战的需要,除了电力和电信之外,自动控制技术急剧兴起,于是在电气科学技术领域内就形成了三足鼎立的体系:即电力系统、通信系统和控制系统。这三大系统皆以电路理论为基础,同时三大系统又成为推动电路理论向更广泛、更深入的水平发展的动力。

从演变过程看,电路理论最初是属于物理学中电磁学的一个分支,那时仅局限于对实体进行研究,其科学抽象过程是从欧姆定律和基尔霍夫定律出现之后逐渐开始的。科学家们将以欧姆

定律为约束的元件示性关系和以基尔霍夫定律为约束的元件互连关系视为电路学科的基本“公理”，并将电路看成是以理想化的集中参数元件组成的系统，进而对各种抽象的（理想化的）基本元件集合组成的结构（系统）进行研究，这一过程使得电路问题中各种复杂的实际器件或设备被简单抽象的基本元件及其组合模拟或等值替代了，这些基本元件就是逐步归纳出来的电阻、电容、电感和电源等。

从方法上看，目前分析电路的方法有三大类，即：时域分析、频域分析和拓扑分析。时域分析方法是人们在电路理论的最初阶段就开始使用的方法，当时对电路的分析也只有这一种方法。时域分析法的先驱是英国工程师海维西特（Oliver Heaviside），海维西特是一个实际工作者，他的兴趣在于电路问题的实际求解，他发现使用符号“ p ”作为微分算子同时又当作一个代数变量运算的方法在对某些电路问题分析时既方便又有效。然而他并未去探求这种方法的严密论证，因而受到同时代一些主要数学家的不断指责，周折近30年后，当人们在数学家拉普拉斯（Pierre Simon de Laplace）1780年的遗著中找到运算微积与复平面上的积分之间的关系时，这场争执才告结束，而后海维西特的运算微积就被拉普拉斯变换导出的新形式所取代，因此后人将用于电路分析的运算微积方法称为拉普拉斯变换。其实，早在1822年，法国数学家傅里叶（J. Fourier）在研究热流问题时就解决了傅里叶分析的数学基础，后来虽有许多学者将傅里叶级数、积分和波谱的概念引入到电路分析中，但真正标志着频域法起点的里程碑是20世纪40年代伯德（H. W. Bode）的著作《Network Synthesis and Feedback Amplifier Design》（1945年）的发表。伯德不仅成功地阐明了有源电路的网孔和节点分析，而且把复变函数的理论严谨地应用于电路分析中，从而将电路的物理行为确切地展示在复平面上；同时他还论证了实部与虚部的关系，对策动点阻抗函数和转移（传递）函数进行了讨论，并且创立了用对数坐标表达这类函数的幅值、相位与频率变量的关系图——伯德图。傅里叶分析后来又发展到非周期函数，又跟拉普拉斯变换联系在一起，从而形成了现代分析科学中的主要工具之一——频域分析法。拓扑分析法其实早已由基尔霍夫（1847年）和麦克斯韦（1873年）所开创，1847年基尔霍夫就首先使用了“树”来研究电路，只是由于他们当时的论点太深奥或者说超越了时代，致使这种方法在电路分析中的实际应用停滞了近百年。直到20世纪50年代以后，拓扑分析法才广泛应用于电路学科，1961年塞舒（S. Seshu）和列德（M. B. Reed）写出了第一本图论在电网络中应用的专著。

20世纪30年代以后，在电路学科的发展过程中还有不少人作出过重大贡献，其中特别是吉耶曼（E. Guillemin）和考尔（W. Cauer）等人。他们在20世纪30年代的著作对于建立电路理论这门独立的学科起着奠基的作用，而他们在20世纪40年代和50年代的著作却被认为是这门学科发展史上的重要里程碑。1953年，麻省理工学院的吉耶曼教授发表了他的重要著作《Introductory Circuit Theory》，书中引入网络图论的基本原理来系统列写电路分析方程，对电路进行时域和频域分析，着重强调时间响应、自然频率、阻抗函数特性和零点、极点的概念，以及网络综合理论等。全书虽然主要限于对线性、时不变、双向和无源元件及其所构成的集中参数电路进行论述，但这正反映了经典电路理论阶段的主体内容，因此可以说吉耶曼的著作是对20世纪50年代以前电路理论发展中较为成熟的主流方面所做的一个很好的总结和概括。

（2）近代电路理论发展阶段。

二次大战后，电力系统、通信系统和控制系统的研究及应用都取得了巨大的进展，尤其是后两者的进展更为迅速。控制技术和通信技术从实际应用逐步上升为新的理论体系——“控制

论”和“信息论”。与此同时,半导体电子学和微电子学、数字计算机、激光技术以及核科学和航天技术等新兴尖端技术也以惊人的速度突飞猛进,使得整个电气工程领域从20世纪50年代末期就开始了所谓的“电子革命”和“计算机革命”。所有这些都促使电路理论从20世纪60年代起不得不在内容和概念上进行不断地调整和革新,以适应科学技术“爆炸”的新时代,于是就形成了近代电路理论。这一阶段的内容大致具有如下特征:

① 在时域分析中,引用了施瓦兹(L. Schwartz)的《分布理论》著作中的成果,严格给出了电路的冲激响应的概念。同时,继过去将全响应分解成稳态分量和瞬态分量之后,又把全响应分解为零状态响应和零输入响应。在此基础上导出了卷积积分,阐明了电路在任意波形输入下的响应。在频域分析方面,引入了信号分析的相应研究,并且进一步运用和扩展了傅里叶分析,通过现代科学分析中非常重要的工具——卷积定理,将电路的时域和频域关系紧密结合在一起。这样一来,整个网络分析的面目为之一新。

② 在电路理论研究中系统地应用拓扑学特别是一维拓扑学的成果,这不仅极大地丰富了电路理论的内容和提高了它的理论水平,而且还为电路的计算机辅助分析和设计提供了坚实的理论基础。

③ 将动力学体系与电路理论相结合,引出了电路的状态、状态变量和状态空间的概念。状态方程的建立可以说与昔日输入-输出方程的建立具有同等重要的意义,而状态概念的应用为解决非线性电路和时变电路问题又给出了新的途径。

④ 在电路的激励和信号研究方面,除了考虑连续时间信号外,还必须考虑离散和干扰下的随机信号。于是,在数学工具上就由拉普拉斯变换而及 z 变换,由微分方程而及差分方程。

⑤ 近代电路理论站在集合论的高度,把电路看成是特定拓扑结构的支路集和节点集。从而应用空间的概念,借助于矩阵和张量的工具来对基尔霍夫定律进行描述,这给古典的基尔霍夫定律注入了新的活力。

⑥ 在计算方法上采用了“系统的步骤”,以此与计算机的辅助分析方法相适应,使得昔日难以入手的多端网络问题、时变网络以及非线性网络问题变得易于解决。

近代电路理论从20世纪60年代开始,到70年代就已形成,这十几年的进展相当于过去的几十年,这种发展的高速度是在社会生产力急剧发展的推动之下产生的,其发展的结果使得社会生产中的电气化、自动化和智能化水平迅速提高。

2. 电路与系统(CAS)学科的诞生及未来之展望

在近代电路理论向前发展的同时,20世纪60年代至70年代首先在自然科学和技术的领域内形成了严谨而完整的“系统”概念,接着“系统理论”成为受到普遍重视的研究领域。其实,系统理论是起源于电路理论的。最初人们在对电力系统和通信系统进行分析设计时,不仅要从微观上仔细地研究、发展和更新构成系统的每个部件和元件,而且还需要从宏观出发,在整体上研究系统结构的合理性、可靠性和稳定性等,这就自然而然地使某些系统理论的原始概念和方法伴随着电路理论的发展和深化而诞生。到今天,系统理论已成为独立于其他学科的一门高度抽象概括而又广泛应用的基础理论,是各技术科学领域所共有的理论财富。然而,对电路理论及其工作者来说,是无法撇开系统概念去单独研究电路的,因为电路本身就是一个系统。但是系统又不能与电路完全等同,系统较之电路更具有一般性,而电路较之系统则更具有其典型性。电路所考虑的是元件的拓扑、参数、电路的物理量以及电路的内在电气结构,而系统所考虑的则是从输入

到输出的整体性能及其外在的物理行为。电路理论与系统理论相结合,可以把系统理论的概括性和抽象方法用于电路,使电路理论的研究站得更高些;也可以把电路理论的精确性和计算方法用于各种非电系统,使系统问题的研究更加切实。正是由于电路理论与系统理论在研究问题的科学思想上相互渗透、相互馈递,在研究问题的方法上又相互协调和相互统一这一事实,在20世纪70年代,科学界正式提出了建立概念体系更扩展的“电路与系统”(CAS)学科。这一举动是由学科的内在发展规律所决定的。事实证明,这一结合不仅保持了系统理论与电路理论的根源关系,使电路理论焕发出青春活力,使系统理论进一步得到促进,同时它们互相结合而发挥出来的无比创造力也十分引人注目。

综上所述,电路理论的发展分为经典电路理论、近代电路理论和电路与系统理论这三个主要历史阶段。其中近代电路理论不仅是经典电路理论的继续、扩展和更新,同时它也是电路与系统学科中的一部分非常重要的基础理论。目前正处于电路与系统理论不断向前发展的时期,电路与系统学科的主攻方向,可分为与“电”直接有关的电路理论及其工程应用和概括的系统科学及其应用两个方面。其所研究的内容极其广泛,不过就目前来看,电路与系统学科更多则是偏重于有关基础理论的研究和探索这些理论在工程应用中的新问题,因此,它是属于电气科学技术基础理论范畴内的一门学科。展望其未来,令人目不暇接,下面试举几点以窥其貌。

① 自从梅森(S. J. Mason)于1953年采用信号流图分析复杂反馈系统以来,图论一直是网络理论研究中的一个重要方面。如今,电路的拓扑(或图论)分析和综合法已成为电路理论中的一个专门课题。其次,图论还是设计印制电路、集成电路布线、布局及版图设计等不可缺少的理论基础,特别是针对超大规模集成电路(VLSI)的设计问题而言,图论的应用研究更是日趋广泛。

② 有源网络的分析和综合是电路理论的一个热门领域。自从1948年发明了晶体管以后,各种半导体器件纷纷问世。1952年达默(Dummer)首先提出了集成电路的设想,20世纪50年代末制成了第一批集成电路(IC),由此对含源器件的电路分析和综合就成为电路理论中的一个重要内容。另一方面,1964年施诺依用晶体管实现了回转器后,有源装置可以很方便地用包含回转器与电阻器的等效电路来表示,而任何电气元件包括各种特性的负阻器目前又都可用有源器件综合出来,这使得有源网络的分析和综合具有非常重要的实际意义。

③ 多端器件和集成电路器件的出现为电路提供了许多新“元件”,为这些新元件建模及仿真成为一个急需解决的突出问题。要得到有源器件的精确而又通用的模型是不容易的事,这要考虑电与非电的许多因素,要涉及多方面知识。比如双极型晶体管(BJT)的一套EM模型,就是在1954年由埃伯斯(J. J. Ebers)和摩尔(J. L. Moll)提出,而后历时十多年时间经很多人研究才得出的。20世纪70年代中期对运算放大器等器件提出的宏模型(Macro Model)建模方法,为这类器件建模提供了一种好方法。器件建模理论自70年代起逐步走向完善,这方面蔡少棠(L. O. Chua)作出了很多非常重要的贡献。如今,各种多端和集成化器件仍在不断地涌现,这必将不断地对器件建模问题提出更新更高的要求。

④ 为了进一步使模拟电路大规模集成化,开关电容网络和开关电容滤波器已经进入了电路理论的研究领域。在大规模模拟集成电路器件中,困难最大的是对大RC时间常数电路的控制,而这一问题使用开关电容网络就比较容易解决。但由于集成电路的规模在不断扩大,所以这方面的研究也随之需要不断地深入。

⑤ 被称为电路理论中第三类问题(第一类是分析,第二类是综合设计)的模拟电路故障诊