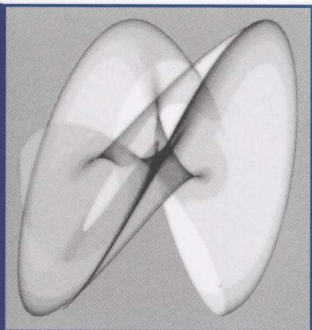


现代电子信息科学技术基础

非线性电路

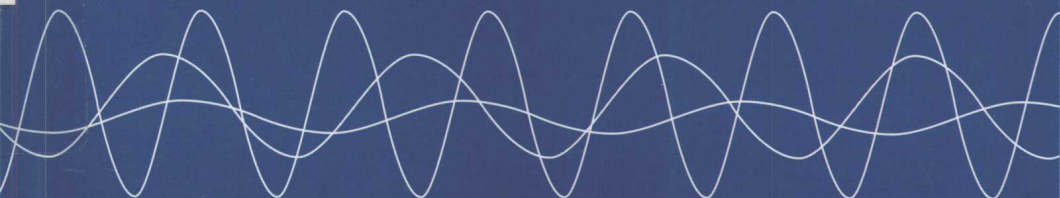


——基础分析与设计

张新国 马义德 李守亮 等 编著



YZLI0890116179



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

现代电子信息科学技术基础

非线性电路

——基础分析与设计

Feixianxing Dianlu

——Jichu Fenxi yu Sheji

张新国 马义德 李守亮 等 编著



YZLI0890116179



高等教育出版社·北京

HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

非线性的电路分析

非线性的电路分析

图书在版编目(CIP)数据

非线性电路:基础分析与设计/张新国等编著. —北京:高等教育出版社,2011.4

ISBN 978-7-04-031586-8

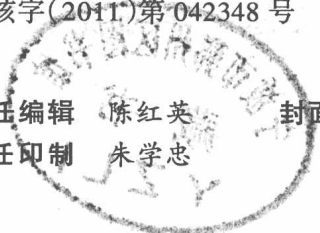
I. ①非… II. ①张… III. ①非线性电路-高等学校-教材 IV. ①TN711.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第042348号

策划编辑 陈红英
责任校对 刘莉

责任编辑 陈红英
责任印制 朱学忠

封面设计 李卫青



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

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 涿州市星河印刷有限公司

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>

开 本 787×1092 1/16
印 张 31
字 数 670 000
插 页 3

版 次 2011年4月第1版
印 次 2011年4月第1次印刷
定 价 62.00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 31586-00

序

人类对自然与社会的认识和改造永远不会停息。其实,人们周围的万事万物总是以非线性的规律在运行着。过去,由于技术和观念的局限,人们很多时候只能将非线性系统在某个区间内简化为线性问题来处理,从而得出物体的运动具有确定性的规律。纵然各种方法解释了许多自然现象,但同时也束缚了人们的思维,人们误认为自然界的规律都是确定的,未来的世界都是可以预测的。自从1903年庞加莱在《科学与方法》一书中提出庞加莱猜想,提出混沌的存在后,1905年、1916年爱因斯坦提出狭义和广义相对论,1926年、1927年海森堡提出矩阵量子力学和在量子力学中的不确定性原理……促使人类在自然观与世界观的认识上有所突破,动摇了作为经典确定论基础的牛顿三大运动定律和万有定律的普适性。人们发现,在物体的运动速度接近光速和进入微观尺度时,牛顿力学在时空方面的局限,这时应该用相对论和量子力学来认识世界。非线性科学的意义则更为广泛:认为即使在通常的宏观尺度和一般的运动速度下,经典的确定论也不适用于非线性系统混沌行为的分析。非线性科学涵盖了各种各样尺度的系统,涉及任意速率运动的分析与综合。难怪福特认为混沌也与相对论和量子力学一样,冲破了牛顿力学的教规:“相对论消除了绝对时间、空间的臆断;量子力学消除了关于可控测量过程的牛顿式虚梦;而混沌则消除了拉普拉斯关于确定论式可预测性的幻想”。施莱辛格作为混沌学的倡导者之一则说:“20世纪科学让人永远铭记的只有三件事,那就是相对论、量子力学和混沌学”,令人寻味无穷。

由兰州大学信息科学与工程学院张新国、马义德、李守亮编著的这本《非线性电路——基础分析与设计》^①,内容清新、深入浅出,凝聚了他们多年科研、教学的精粹,是一本很有特色的新作,也是获得甘肃省自然科学基金资助的课题,很适合于作为研究生及大学生教材或自学参考用书。这本书首先以较大的篇幅介绍非线性电路的处理方法,通过数学分析方法、图解法、利用电路仿真和软件仿真以及物理电路实验等方法来探究非线性电路及系统的规律,建立非线性的思想体系与观念,更深刻、更全面地从微观、宏观、宇观来认识和改造我们的环境。其次通过大量典型混沌电路的分析和设计引出混沌电路同步与混沌遮掩、混沌调制、混沌开关等混沌在保密通信工程中的运用。再次是介绍非线性电

^①本书得到2004年甘肃省自然科学基金(资助编号3ZS041-A25-017)、2003年兰州大学985特色项目、2007年兰州大学实验技术创新基金以及2010年兰州大学研究生教材建设基金资助。

路的分形基础研究,神经网络图像处理技术,尤其是鉴于脉冲耦合神经网络 PCNN 图像处理方法。最后是用 MATLAB、VB 等计算机软件对非线性电路的仿真。这本书虽然以非线性电子电路为切入点,但是所采用的方法与结论都不失其普遍性,是非线性电子学与神经网络和计算机软件技术的交叉与汇接,别具一格。

当我接到这本书的初稿时,已是岁末年首。街头巷尾处处是“福”到与春联;耳边不时传来零星的鞭声与炮响。正当人类冲破经典确定论探索混沌非线性自然观的幸福年代来临之际,不由想起宋代大诗人王安石的“元日”佳句:“爆竹声中一岁除,春风送暖入屠苏。千门万户瞳瞳日,总把新桃换旧符”。愿我们千家万户用崭新的自然观与方法论来更换昨日的“旧符”。

张问骅
2011年1月26日

前言

1873年以麦克斯韦的名字命名的方程组的提出,标志着经典电磁学的发展已经成熟并系统化,也为无线电电子学从经典电磁学中独立出来奠定了基础。1888年前后的赫兹、波波夫、马可尼等人的电磁波实验宣告了无线电电子学的开始。1905年电子真空管的出现标志着电子科学技术与信息科学技术的到来,在此基础上经过几乎整整一个世纪,电子信息科学与技术蓬勃发展起来。其间,它的各个分支如通信、雷达、测量、工业应用、仪器仪表、自动控制、家用电器、军事电子等迅速发展,特别是电子计算机的出现,完全改变了人类社会生活的习惯与模式,使人类进入了一个陌生的信息化社会。与传统科学技术学科相比,电子科学技术的发展与更新速度是无与伦比的。在电子科学技术迅猛发展的20世纪后半叶,非线性理论特别是混沌理论在数学、物理学、气象学、生态学、经济学等领域异军突起,对现代科学技术冲击巨大,传统电子科学技术与非线性电子学得到了同步发展,使得它在现代科学技术中占有重要的一席之地。本书就是在这样的背景下写作出来的。

本书并不局限于单纯电子线路的阐述,一方面讲述具体的非线性电路及其相关的前沿研究方向,另一方面介绍与此有关的数学、物理学、生物学、哲学、美学、历史学、气象学,还有经济、军事、人口学等领域的与电子电路有密切关系的研究与进展。本书以电子学为切入点,深入到相关学科交叉处,借鉴其他学科的现有知识促进电子学的发展,并把本学科的知识应用于其他学科。

本书主要介绍静态非线性电路分析方法、动态非线性电路分析方法、非线性电路应用系统等内容。由于计算机技术、电子线路仿真软件、虚拟仪器软件的发展,使本书讲述的内容可以在计算机上进行几乎与电子线路实验室环境完全相同的电子线路实验,这就为读者提供了逼真的甚至是身临其境的仿真本书大部分知识内容的虚拟环境。学习的目的不仅仅是为了谋生,也不仅是为了满足自己的好奇心与兴趣,更重要的是为了寻找真理,学习与了解电子学科知识的真谛,更深刻地理解我们所在的大自然,建立非线性(主要是混沌)的思想体系和观念意识。读者的求知欲是强烈的,作者愿意为读者真正尽快地掌握现代非线性电路基础理论与技术而尽自己绵薄之力。

一般说来,年轻人易重技术而轻科学,老年人容易看重科学而忽视技术。希望读者要面对现实,注重自然界与人类社会及现代电路理论中的重要问题,要有彻底的唯物史观,认真看待非线性问题。对于非线性问题的理解不是一朝一夕就能完成的。21世纪科学技

术的很大比重是非线性问题,它的研究有着极为光明的前途,每个民族乃至每个人都要把握好这一方向,都要认真考虑和思索。为此,作者精心策划、耗费 10 余年时间编写本书。

作者深感当前在我国教育界加强非线性科学技术宣传教育与科学普及的重要性和紧迫性,目前发达国家对于非线性科学技术的提高放在大学本科阶段进行,普及教育始于中学阶段。因此,作者把本书读者定位为高等院校电子信息类高年级本科生和研究生及相关专业科技工作者。作者认为,在比较广泛的非线性科学技术中,非线性电路最为具体并且易于仿真,只要有一台计算机就能进行本书几乎全部的电路仿真,作者提供本书的电路仿真程序,这样使读者能够比较快且比较容易全面掌握本书所有内容。

本书主要由张新国、马义德、李守亮编写,其中,张新国编写第 1~5、7~9、11~12 章,马义德编写第 6 章和第 10 章,李守亮对全书进行了理论论述与公式推导的审查。此外,兰州大学信息科学与工程学院的本科生李卫华、王邵伟、刘彬彬、钱文涛、张志强,籍政学者邓玉华、赖奎元(台湾清华大学),博士与硕士研究生王兆滨、夏春水、袁敏、严春满、徐冬亮、朱雪丰、舒秀发、陈昱莅、张同锋,航天部 510 研究所的研究生李毅、王晓霞、李永刚,西北师范大学教授杨志民、马胜前以及研究生张媛、闫少辉、张洁、熊丽、任文娟、裴东、吕恩胜等为本书提供了许多素材,成书后期,作者在山东外国语职业学院得到学校领导和同事的支持与帮助,在此,对他(她)们的帮助致以诚挚的谢意。

科学研究是站在巨人肩膀上的不懈努力,是前仆后继、相互继承的不断延续。为此,作者感谢本书所有参考文献的作者,是他们的前期探索、积累和研究,才会有本书的后续出版。作者为了本书的知识全面性,多处引用了参考文献作者的研究成果,其中较多地引用了方锦清、罗晓曙、赵耿等人关于混沌保密通信的综述论文结果(用于第 8 章),童勤业等人关于混沌测量的独创性论文结果(用于第 7 章),靳蕃关于神经网络方面的研究成果(用于第 6 章),杨晓松、李清都关于混沌系统电路设计方面的研究成果,禹思敏、陈关荣、吕金虎、刘明华等人关于多涡卷与多翅膀混沌系统、高阶 Jerk 电路及混沌通信等方面的独创性论文结果,周明的电源限幅混沌论文结果,陶诏灵、陈国华等人 C-C 计算方法的论文,徐慧芬、范敏华等人关于电模拟测量超导约瑟夫逊结混沌研究结果,何振亚、张毅峰等人关于细胞神经网络的研究结果,王树禾关于混沌数学语言与方法的结果,卢侃、孙建华关于混沌大事记等,我希望能够得到这些同仁的谅解并对这些同仁的支持深表谢意。

作者在这里要特别感谢高等教育出版社陈红英女士的大力支持和具体帮助,她对本书倾注的心血超出了她的职责范围,是她的精心策划和细致操作,使得本书得以面世,她对本书的支持和帮助以及热情和行动,作者无法用语言来表达。

由于作者才疏学浅,缺点错误在所难免,希望读者批评指正,作者深表谢意。同时作者深感本书仍欠成熟,还有许多工作要做,作者有志再接再厉,使本书成为精品图书。

作 者

2010 年 5 月 26 日

于兰州大学

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 线性与非线性科学的历史	1
1.1.1 人类早期对于混沌的认识	1
1.1.2 线性科学统治的现代自然科学体系	2
1.1.3 20 世纪混沌学研究	3
1.2 非线性与混沌	5
1.2.1 非线性问题与混沌	5
1.2.2 可预测性与不可预测性、信息丢失、同步问题	6
1.2.3 如何描述现实世界	7
1.3 非线性电路的研究内容与范畴	7
1.3.1 现代非线性电路的研究内容	7
1.3.2 非线性电路研究的目的和意义	8
1.3.3 现代电子科学与其他学科的关系	11
1.3.4 现代电子科学与其他学科的比较	11
1.4 如何掌握非线性电路知识体系	12
1.4.1 非线性电路课程知识结构的特点	12
1.4.2 非线性电路的多维知识结构和多维学习方法	12
习题一	13
第 2 章 静态非线性函数电路原理	16
2.1 静态非线性函数电路综述	16
2.1.1 电路的线性与非线性及函数电路与积分电路	16
2.1.2 构成非线性电路的基本单元	17
2.1.3 图解法与分段线性化法	19
2.1.4 电路归一化	20
2.2 大动态范围三极管放大器非线性电路	21
2.2.1 大动态范围的放大器非线性电路研究历史	21
2.2.2 大动态范围三极管放大器非线性电路	22

2.2.3	大动态范围三极管放大器非线性电路应用	24
2.3	电压电流型两端口电路	24
2.3.1	单运算放大器分段线性电阻电路	25
2.3.2	双运算放大器分段线性电阻电路	26
2.3.3	二极管钳位单运算放大器非线性负电阻电路	29
2.3.4	由分段线性正电阻转换为分段线性负电阻	31
2.4	三次型非线性电路公式转换与电路原理	33
2.4.1	三次方非线性电路	33
2.4.2	归一化三次型限幅非线性	34
2.4.3	阶跃非线性的公式与电路	35
2.4.4	AD633CN 三次方非线性转换	36
2.4.5	Sigmoid 函数及其电路模拟	37
2.5	非线性电压传输电路	39
2.5.1	三折线非线性电压传输电路	39
2.5.2	多折线非线性电压传输电路	39
2.6	电压滞回非线性电路	42
	习题二	44
第3章	动态非线性电路分析方法	46
3.1	非线性电路研究方法引例	46
3.1.1	电路方程的建立	46
3.1.2	电路方框图及其仿真	49
3.1.3	电路物理设计及其实验结果	50
3.1.4	电路的初步分析	50
3.2	积分器电路	52
3.2.1	积分器单元电路分析	52
3.2.2	积分器电路实例	54
3.3	电子学电路常用微分方程	55
3.3.1	几个著名的电路微分方程与迭代方程	56
3.3.2	微分方程、差分方程和迭代方程	58
3.3.3	非线性微分方程和迭代方程的确定性与不确定性问题	59
3.3.4	非线性微分方程与电子学的关系	60
3.3.5	非线性微分方程与电子电路的归一化	60
3.3.6	模拟电子计算机的应用	60
3.4	电路状态方程矢量场分析方法	61
3.4.1	电路状态方程矢量场	61

3.4.2	矢量代数相关公式	63
3.4.3	二维相空间矢量场	64
3.4.4	三维相空间矢量场	65
3.5	非线性电路系统动态特性图形分析方法	68
3.5.1	相平面与相图	68
3.5.2	相平面中的平衡态	69
3.5.3	三维相空间中的平衡态	71
3.5.4	吸引子	72
3.5.5	庞加莱截面图	73
3.5.6	应用实例	74
3.6	李雅普诺夫指数	75
3.6.1	预备知识	75
3.6.2	李雅普诺夫指数定义	77
3.6.3	李雅普诺夫指数计算方法	79
3.6.4	李雅普诺夫指数计算结果讨论	83
3.6.5	李雅普诺夫维数	84
3.7	相空间重构技术	85
3.7.1	相空间重构技术研究目的与应用背景	85
3.7.2	一元二次型迭代函数式的相空间重构	86
3.7.3	三元微分方程的相空间重构	89
3.7.4	混沌保密通信攻守双方的破密方	90
3.8	非线性电路微分方程的数值解法	91
3.8.1	欧拉法	91
3.8.2	四阶龙格-库塔法	94
3.8.3	多变量四阶龙格-库塔法	96
3.8.4	高阶微分方程龙格-库塔法	97
3.9	混沌方程与电路对称性原理	98
3.9.1	动态非线性系统中的广义镜像对称性原理	98
3.9.2	利用动态非线性系统中的广义对称性原理设计电路	99
3.9.3	对称性三次方非线性蔡氏电路左倾双涡漩输出	101
3.9.4	变形蔡氏电路的对称性变换及其结果	103
3.9.5	洛伦兹方程电路的对称变换	104
3.9.6	级联反相积分器电路的对称变换	105
3.10	混沌电路标度化	106
3.10.1	混沌电路方程归一化问题	106

3.10.2	混沌电路系统的方程标度化	107
3.10.3	动态非线性电路的描述空间	110
3.10.4	洛伦兹方程电路的标度化设计	112
3.10.5	蔡氏电路的标度化设计	115
3.10.6	一种级联反相积分器的标度化	117
3.11	混沌电路综述	119
3.11.1	电路中混沌现象发现与研究的历史	119
3.11.2	电路系统动态特性分类	120
3.11.3	混沌电路的定义	121
习题三	122
第4章	典型动态非线性电路	124
4.1	经典蔡氏电路	124
4.1.1	经典蔡氏电路的结构与状态方程	124
4.1.2	蔡氏电路的电压、电流图形分析	126
4.1.3	蔡氏电路元件参数对运动形态的影响	127
4.1.4	蔡氏电路的频谱分析	129
4.1.5	蔡氏电路的仿真方法	131
4.1.6	蔡氏电路的研究现状	131
4.2	归一化蔡氏混沌电路方程	137
4.2.1	蔡氏电路方程归一化方法	137
4.2.2	对于归一化蔡氏电路参数的讨论	139
4.2.3	蔡氏电路的平衡点与相轨线	140
4.2.4	归一化蔡氏电路方程的混沌演变	141
4.2.5	归一化蔡氏电路方程的混沌振荡幅度	141
4.2.6	归一化蔡氏电路方程的李雅普诺夫指数演变	141
4.3	范德波尔方程与李纳德方程及其电路	143
4.3.1	范德波尔微分方程与二阶 LC 振荡电路	143
4.3.2	范德波尔方程的定性讨论	146
4.3.3	范德波尔方程的动态特性	147
4.3.4	范德波尔方程的数值分析	147
4.3.5	电子管电路的范德波尔方程	149
4.3.6	李纳德方程	150
4.3.7	范德波尔方程与李纳德方程研究的历史意义	151
4.4	杜芬方程及其电路	151
4.4.1	杜芬方程的建立与基本动态特性	151

4.4.2	杜芬方程分岔图	154
4.4.3	杜芬方程的庞加莱截面	155
4.4.4	杜芬方程电路	156
4.5	三元自治混沌电路	157
4.5.1	研究普通混沌电路的背景与意义	157
4.5.2	一种由运算放大器为主要元件构成的混沌电路	158
4.6	多元一阶混沌电路	161
4.6.1	反相加法双向限幅非线性四元一阶混沌电路	161
4.6.2	五元运算放大器超混沌电路	168
4.7	一元多阶混沌电路	170
4.7.1	一元多阶混沌电路概述	170
4.7.2	一元多阶混沌方程分析	171
4.7.3	Jerk 电路	171
4.7.4	可产生混沌的级联反相积分器电路	173
4.7.5	几种级联反相积分器电路实验结果	183
4.7.6	高阶 Jerk 电路	186
4.8	非自治超混沌电路	189
4.9	多涡漩混沌电路	190
4.9.1	多涡漩混沌电路概述	190
4.9.2	多涡漩混沌电路演变实例	191
4.9.3	1000 涡漩混沌电路	211
4.9.4	多涡漩混沌电路在其他混沌系统中的应用	212
4.10	滞回非线性混沌电路	218
	习题四	219
第 5 章	自然界非线性动力学系统与电路模拟	223
5.1	自然界与自然科学的非线性系统	223
5.2	洛伦兹方程及其电路模拟	224
5.2.1	洛伦兹方程组的建立	224
5.2.2	洛伦兹方程组的数学分析	225
5.2.3	洛伦兹方程电路	226
5.3	洛伦兹方程系统	228
5.3.1	广义洛伦兹方程系统族	228
5.3.2	输出上飞蝴蝶形相图的类洛伦兹方程电路	229
5.3.3	超混沌的类洛伦兹方程电路	233
5.3.4	多翅膀混沌吸引子	234

5.4	强电电路系统中的混沌现象	235
5.4.1	DC-DC 开关功率变换器的非线性	235
5.4.2	应用背景实例——开关电源集成电路 MC34063	236
5.4.3	BUCK 电路模型与 DC-DC 转换器的稳定性	236
5.4.4	BUCK 电路非线性动力学行为仿真	240
5.4.5	实验结果	244
5.4.6	边界碰撞混沌	247
5.5	约瑟夫逊结混沌模拟电路	251
5.5.1	约瑟夫逊结的物理特性	251
5.5.2	由压控振荡器构成的约瑟夫逊结模拟电路	252
5.5.3	压控振荡器约瑟夫逊结模拟电路混沌输出	253
5.6	振动桌面上弹性小球运动的电路模拟	255
5.6.1	振动桌面上弹性小球运动的数学模型	255
5.6.2	振动桌面上弹性小球运动的动力学特性	256
5.6.3	振动桌面上弹性小球运动的电路模拟原理	257
5.6.4	振动桌面上弹性小球运动的电路模拟实验结果	258
5.6.5	振动桌面上小球完全弹性运动的电路模拟	258
5.7	人口模型理论、逻辑斯蒂映射及其电路模拟	259
5.7.1	人口模型与逻辑斯蒂映射	259
5.7.2	逻辑斯蒂映射的普遍性及其在电子电路中的存在形式	262
5.7.3	逻辑斯蒂映射电路设计	262
5.8	频率吸引电路与圆周映射理论	263
5.8.1	LC 振荡器的频率吸引电路	264
5.8.2	其他频率吸引振荡器电路	269
5.8.3	非线性谐振电路与标准圆周映射数学模型	274
5.8.4	标准圆周映射数字实验	276
5.8.5	阿诺尔德舌头与魔鬼楼梯	277
5.8.6	圆周映射动力学特性及其分岔图	279
5.8.7	圆周映射的李雅普诺夫指数	283
5.8.8	标准圆周映射符号动力学	284
5.9	其他映射及电路模拟与应用	285
5.9.1	曼德波罗映射、朱丽叶映射、佛土映射及其电路模拟	285
5.9.2	兰州拉面(Δ)映射与软件仿真混沌	288
	习题五	291

第 6 章 神经网络混沌电路	293
6.1 神经元	293
6.2 人工神经网络技术	294
6.3 基本细胞神经网络电路及其仿真	298
6.3.1 细胞神经网络 CNN	298
6.3.2 三阶细胞神经网络模型的标度变换	300
6.3.3 三阶细胞神经网络模型的电路设计及实验结果	302
6.3.4 四阶细胞神经网络 CNN 中的混沌输出	306
6.4 脉冲耦合神经网络 PCNN 模型	307
6.5 PCNN 中的圆周映射动力学行为	309
习题六	323
第 7 章 符号电路与混沌测量技术	325
7.1 混沌测量技术的产生	325
7.1.1 电子测量技术发展历程	325
7.1.2 测量映射的根源与映射迭代	328
7.1.3 混沌测量迭代	332
7.1.4 测量迭代的混沌性	334
7.1.5 几个空间及其关系	336
7.2 混沌测量迭代电路	337
7.2.1 电流型混沌测量迭代电路的工作原理	337
7.2.2 混沌测量迭代电路的非线性动力学分析	338
7.2.3 混沌测量迭代举例及其计算机仿真混沌	338
7.2.4 电压型混沌测量迭代电路	339
7.3 电子元件与其他物理量的混沌测量方法	340
习题七	341
第 8 章 混沌电路同步与混沌保密通信	343
8.1 混沌电路同步与保密通信原理	343
8.1.1 混沌保密通信的特点与发展历程	343
8.1.2 混沌遮掩保密通信电路的理论分析	345
8.1.3 混沌调制保密通信电路	347
8.1.4 混沌开关蔡氏电路混沌保密通信电路方法	358
8.2 混沌保密通信电路概述	360
8.3 混沌保密通信工程	361
8.3.1 混沌遮掩保密通信电路	361
8.3.2 混沌调制保密通信电路	363

8.3.3	混沌开关保密通信电路	364
	习题八	364
第9章	非线性单元电路设计方法	368
9.1	混沌电路设计综述	368
9.1.1	混沌电路设计的层次、类型与目标	368
9.1.2	单元混沌电路设计	368
9.1.3	混沌电路系统设计	369
9.2	分段线性负电阻电路设计	369
9.2.1	双运放分段线性负电阻电路设计	369
9.2.2	分段线性正电阻电路与负电阻电路转换的设计方法	372
9.2.3	其他方法及方法比较	374
9.3	经典蔡氏电路设计方法	374
9.3.1	经典蔡氏电路设计指标和步骤	374
9.3.2	归一化经典蔡氏电路设计步骤	375
9.3.3	电路参数化经典蔡氏电路设计步骤	377
9.4	任意非线性系统通用电路设计方法	377
9.4.1	多变量一阶微分形式的非线性系统电路设计	377
9.4.2	单变量高阶微分形式的非线性系统电路设计	379
9.4.3	时间变量归一化设计	381
9.5	自然界混沌现象模拟电路设计	382
9.5.1	洛伦兹方程组	382
9.5.2	洛伦兹方程电路设计	387
	习题九	391
第10章	非线性电路中的分形	392
10.1	自然界的分形现象	392
10.1.1	分形的概念	392
10.1.2	分形的定义	392
10.2	非线性电路中的分形	393
10.2.1	逻辑斯蒂映射分形结构	393
10.2.2	李雅普诺夫指数结构中的分形	394
10.2.3	非线性混沌电路中的李雅普诺夫指数变化中的分形结构	396
10.2.4	其他分形结构	397
	习题十	397
第11章	非线性电路仿真	400
11.1	仿真方法概述	400

11.1.1	使用计算机软件仿真非线性电路的意义	400
11.1.2	常见的非线性电路仿真软件	401
11.2	Visual Basic 编程电路仿真方法	402
11.2.1	显示非线性电路方程的相图	402
11.2.2	计算非线性电路方程的李雅普诺夫指数	405
11.2.3	显示非线性电路李雅普诺夫指数的分岔图	415
11.2.4	显示非线性电路方程的分岔图	417
11.2.5	显示非线性电路方程的庞加莱截面	419
11.3	MATLAB 电路仿真方法	420
11.3.1	蔡氏二极管特性曲线拟合	420
11.3.2	标准蔡氏电路平衡点的矩阵特征指数	421
11.3.3	三次多项式蔡氏电路三维相图	423
11.3.4	三次多项式蔡氏电路的李雅普诺夫指数	426
11.4	EWB 电路仿真方法	431
11.4.1	EWB 仿真非线性负电阻电路	431
11.4.2	EWB 仿真单元蔡氏电路设计的保密通信电路	433
11.5	非线性微分方程计算机仿真误差与轨线计算不确定性原理	434
11.5.1	非线性微分方程计算机仿真误差	434
11.5.2	计算机混沌——非线性微分方程轨线计算不确定性原理	434
	习题十一	436
第 12 章	非线性电路与其他学科的交叉	438
12.1	非线性电路的历史演变、现状与发展	438
12.1.1	线性电子学的发展历史	438
12.1.2	非线性电子学的发展历史	440
12.1.3	非线性电子学的现状与将来	440
12.2	非线性电子科学中的哲学问题	441
12.2.1	圆周映射中的哲学	441
12.2.2	数学产生的矛盾现象	446
12.2.3	电子计算机产生的矛盾现象	447
12.2.4	Λ 映射中的混沌	448
12.3	非线性电路动态特性中的潜藏美态	451
12.4	关于非线性电路的对话	453
12.4.1	与数学家的对话	453
12.4.2	与物理学家的对话	454
12.4.3	与生物学家的对话	457

100	12.4.4 与科普学家的对话	459
101	12.4.5 与哲学家的对话	461
102	12.4.6 与美学家的对话	462
103	12.4.7 电路与系统专业研究生提出的问题与回答	462
104	习题十二	464
	参考文献	466
	附录 1 混沌电路实验箱简介	474
	附录 2 非线性电路研究大事记	476