

混沌电子学

柏逢明 著



科学出版社

混沌电子学

柏逢明 著

科学出版社

内 容 简 介

本书结合典型的科研成果和应用实践,深入论述了电子器件和电子系统中混沌现象的存在及其主要行为特征,并全面阐述了混沌电子学理论及其在现实应用中的价值和前景。全书共12章。第1章介绍混沌电子学的发展现状;第2章阐述相关的理论基础;第3、4章从三阶电路系统和光电子系统方面分析混沌信号的产生过程;第5、6章研究电子器件和电子系统中混沌现象的特性和应用可能性;第7~12章分别从不同的领域探讨混沌电子的应用研究现状和前景。

本书可供高等院校电子工程、通信工程、自动化等相关专业高年级本科生、研究生学习,也可以作为相关领域研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

混沌电子学/柏逢明著. —北京:科学出版社, 2014.7

ISBN 978-7-03-039105-6

I. ①混… II. ①柏… III. ①混沌理论—应用—电子学 IV. ①TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 266659 号

策划编辑: 王 哲 / 责任编辑: 唐保军 王 哲 / 责任校对: 刘小梅
责任印制: 阎 磊 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印制

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年7月第 一 版 开本: 720 × 1 000 1/16

2014年7月第一次印刷 印张: 24 3/4

字数: 498 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

混沌电子学是以电子学与混沌理论及其应用为主要研究内容的非线性电子系统理论与技术,隶属于非线性科学范畴。随着电子学领域科学技术的发展变革,非线性科学技术在电学与光电子学中不断被挖掘与利用,产生诸多研究成果。混沌现象作为非线性动力学的物理行为,在电学、光学、天体物理学和生物学等科学技术研究中成为重要的研究课题,得到迅猛发展。

本书主要介绍了混沌电子学及其相关应用技术,内容涵盖了传统非线性系统和现代混沌电子理论与技术,重点阐述了常规的非线性方程、混沌基本概念、李雅普诺夫稳定性及混沌的产生、控制、同步方法和系统仿真。本书结合科技发展新成果,讨论了混沌电子学的基本理论、技术条件和实现过程。结合典型科研成果和学术观点,进一步研究了电子学理论与系统中混沌的特性和行为,以及电子器件的非线性物理特性和混沌规律。对于最新的技术,如超混沌、神经网络混沌、混沌语音、混沌图像和混沌视频水印加密等,本书也给予一定关注。

作者总结多年来从事混沌和超混沌在电子学中发展变化规律方面研究的经验和结果,同时参考国内外最新研究成果,形成了本书关于非线性电子学与混沌研究的基础理论。书中涉及非线性系统理论、电子器件、电子线路和运用混沌解决相关电子信息技术等实际问题的案例(这些案例均在实践应用中得以验证)。书中大部分混沌电子学理论与技术应用数据取自于作者发表的学术论文、所指导研究生的学位论文和科学研究的部分成果。

全书共12章。第1章为绪论,主要回顾了电学和光学中混沌与超混沌的发展概况,评述了近年来该领域的最新成果和进展,归纳了超混沌研究中所使用的方法,概括了电学和光电子学混合系统超混沌发展及其研究的意义,并简要说明了混沌的典型应用。

第2章主要介绍非线性系统与混沌基本理论,讨论了混沌电子学中用到的相关非线性系统方程及其稳定性,微分方程连续性与初始条件和参数变化的关系,状态方程解的可微性和灵敏度方程,奇点(平衡点)、极限环、分岔,吸引子和奇怪吸引子,混沌及其研究方法等概念性问题。

第3章以典型三阶电路系统研究混沌信号的产生与控制过程,包括混沌信号产生的条件和特征、混沌的数值分析方法,并介绍常用的6种非线性系统的混沌控

制方法,如OGY控制等,对典型Lorenz混沌系统进行详尽讨论与分析。

第4章研究如何采用电学调制方法对半导体和双环掺铒光纤激光器进行参数调制以产生超混沌,如何利用数值模拟的方法实现电光混合系统的超混沌控制和同步,如何利用混沌电路的级联方法和建立独立的超混沌电路叠加到光学系统中的方法实现超混沌系统的控制与同步。

第5章提出单元功能电路模块化设计思想,采用单元电路组合法构建超混沌电路。首先,以混沌和超混沌动力学方程作为问题研究的切入点,以集成运算放大器电路的单元模块构造超混沌电路;然后,构造两个五阶超混沌电路,进行实验调整测试,用示波器观察实验超混沌现象;接着,总结出该方式下的动力学方程,进行数值分析和实际结果对比;最后,进行超混沌控制与同步。

第6章以Logistic映射和人字映射为基础,构造出一个新的复合混沌映射,以用来解决离散系统的控制与同步问题。并在此映射的基础上提出采用系数跳变的方法来产生混沌扩频序列的方案,通过自相关和互相关特性来产生扩频码地址,为混沌通信提供便利条件。

第7章论述超混沌保密通信,提出了基于软件无线电的超混沌语音保密通信系统,设计了一个基于扩频序列的超混沌模块应用电路,用于家庭、个人和机关团体的电话语音加密和信息密码保存。设计了一个基于计算机应用系统的图文图像等多媒体文件的信息加密应用软件,全方位设防,确保信息安全。

第8章论述混沌加密的图像及音频数字水印算法。首先利用图像数字水印技术及多尺度几何分析,通过轮廓波变换和非下采样轮廓波变换,讨论分析混沌加密和非下采样轮廓波变换的图像数字水印处理;其次采用复倒谱理论及水印嵌入方法,研究混沌图像加密混合域中同时嵌入鲁棒水印和脆弱水印的算法。

第9章论述基于混沌加密的网上银行电子身份认证技术,包括网上银行身份认证理论及信息传输,基于动态口令的网上银行身份认证与混沌保密技术,基于混沌同步加密的网上银行动态口令身份认证技术,以及基于超混沌同步加密的网上银行动态口令身份认证技术。

第10章论述掺铒光纤弱信号混沌检测系统,内容包括混沌与信号检测、光纤弱信号检测理论与方法、混沌状态判别方法和构建掺铒光纤弱信号检测系统。

第11章论述无线超短波语音数字化集群混沌加密系统,内容涉及集群加密系统理论、加密算法分析和集群系统混沌密码叠加方法等。为了验证了加密系统的安全性,利用Logistic映射产生混沌序列,利用二值化方法产生混沌伪随机序列,在超短波条件下运用集群系统进行语音信号混沌保密通信的仿真和实验,证明了系统具有较强的抗破译能力。

第12章主要介绍视频编码与混沌动态影像加密,内容涉及视频加密算法与性能分析、H.264的视频压缩编码标准、基于混沌和H.264的视频加密系统设计,以及

基于混沌和提升小波的视频加密算法等。

本书从概念入手,力求深入浅出、系统全面、突出理论性和实用性。考虑到不同读者的需求,对具体技术应用阐述有所侧重,第8~12章内容相互独立,便于读者取舍,提高阅读效率,对全书体系不构成影响。

本书以理工类硕士研究生、博士研究生为主要阅读对象,对于电子信息类、通信、自动化、测控和计算机等相关学科领域的研究人员进一步学习和研究混沌电子学也具有参考价值。

本书的部分内容参考了孙占龙、燕慧英、高敏、陈阳、王俊平、颜飞、陈鸣等的硕士论文,余家斌、赵霞、孙德成、孙鑫彤和赵广朋等研究生对本书的文字录入和图形修改做出了重要贡献,在此一并表示衷心感谢。另外,还要特别感谢长春理工大学对本书出版给予的鼎力支持和基金资助。

由于本人水平有限,加之时间仓促,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

柏逢明

Email: baifm@cust.edu.cn

2013年6月于长春理工大学

目 录

前言	i
第1章 绪论	1
1.1 非线性电子学研究进展	1
1.2 光电子学混沌研究进展	3
1.3 超混沌理论研究进展与电光混合调制系统	5
1.3.1 电路超混沌研究	5
1.3.2 光学超混沌研究	6
1.3.3 电光混合系统超混沌研究进展	7
1.4 混沌及超混沌的控制与同步方法	7
1.4.1 混沌控制	7
1.4.2 混沌同步	8
1.4.3 超混沌控制	8
1.4.4 超混沌同步	9
1.5 电路与光学混沌的应用状况	9
1.5.1 通信与信息安全中的混沌保密系统	9
1.5.2 光电混沌娱乐系统	10
1.5.3 改善和提高激光器的性能	10
1.5.4 自由空间激光混沌信息传输与测试	10
1.5.5 利用非线性电子器件单元研究新的混沌电子学现象	10
1.5.6 光信号的放大与压缩	10
1.6 视频动态影像编码与混沌加密的研究现状	10
1.6.1 视频加密技术的国内外发展过程	11
1.6.2 基于H.264的视频加密算法概述	13
1.6.3 视频加密研究的发展趋势	14

1.7	语音电子信息加密的研究现状	15
1.7.1	语音电子信息加密的国外进展	15
1.7.2	语音加密国内研究现状进展	16
1.7.3	语音信息加密具体应用研究	17
1.8	混沌电子学的其他应用	18
1.8.1	电子身份认证与超混沌序列安全	18
1.8.2	图像信息的混沌电子信息处理	19
1.8.3	掺铒光纤弱信号混沌检测系统	19
1.8.4	混沌细胞神经网络基础研究	20
1.8.5	基于混沌理论的视频加密系统研究	20
第2章	非线性系统与混沌基本理论	21
2.1	非线性系统方程及其解的稳定性	21
2.1.1	非线性系统和范德波尔方程	21
2.1.2	微分方程的解及其稳定性	24
2.2	微分方程连续性与初始条件、参数变化的关系	29
2.3	状态方程解的可微性和灵敏度方程	30
2.4	奇点(平衡点)、极限环和分岔	31
2.4.1	奇点(平衡点)	32
2.4.2	极限环	36
2.4.3	分岔	38
2.5	吸引子和奇怪吸引子	43
2.5.1	吸引子	43
2.5.2	奇怪吸引子	43
2.6	混沌及其研究方法	44
2.6.1	从倍周期到混沌的过程	44
2.6.2	混沌的常规研究方法	45
第3章	三阶电路系统混沌信号产生与控制	48
3.1	混沌信号产生的条件和特征	48
3.1.1	混沌的特征	48
3.1.2	混沌信号产生的条件	49

3.2	混沌的数值分析方法	50
3.2.1	李指数	50
3.2.2	功率谱	54
3.3	非线性系统的混沌控制	58
3.3.1	混沌控制的目标	58
3.3.2	混沌控制的方法	58
3.3.3	三阶非线性自治系统及控制	61
3.4	典型混沌电路与系统分析	66
3.4.1	洛伦茨混沌系统	66
3.4.2	洛伦茨混沌系统的电路实现	72
3.4.3	新混沌系统的构造	75
第4章	光电子系统的电调谐超混沌研究	77
4.1	半导体激光器电调谐超混沌研究	77
4.1.1	半导体激光器产生混沌的条件	77
4.1.2	半导体激光器混沌与超混沌电调谐系统模型	78
4.1.3	两运算放大器构成简单电调制光学超混沌系统	79
4.1.4	多运算放大器组合电调制注入半导体激光器超混沌系统	84
4.1.5	混沌级联方式构成超混沌系统	86
4.1.6	混沌自适应电调制系统	86
4.2	半导体激光器电调制系统超混沌控制与同步	91
4.2.1	半导体激光器电调制系统超混沌控制	91
4.2.2	半导体激光器电调制系统超混沌同步	92
4.3	掺铒光纤激光器电调谐系统超混沌研究	94
4.4	掺铒光纤激光器电调谐系统超混沌控制	97
第5章	电路混沌特性与超混沌理论研究	99
5.1	非线性系统超混沌电路结构与特性研究	99
5.1.1	非线性动力学系统与电路结构	99
5.1.2	非线性系统单元功能电路的参数调整与器件选择	101
5.1.3	利用非线性系统单元功能电路构造三阶混沌电路的 勒斯勒尔自治系统	103

5.2	电光混合系统中超混沌电路构造方法与实验研究	107
5.2.1	根据复数洛伦茨 - 哈肯方程和单模激光理论构造超混沌电路	108
5.2.2	根据非线性动力学特性构造超混沌电路	110
5.2.3	非线性动力学电路组合功能模型研究	110
5.2.4	电路系统超混沌调试观测与数值模拟分析	113
5.3	利用分段线性电路和系统单元功能电路构建超混沌系统	119
5.4	电路超混沌控制研究	121
5.4.1	电路参数自调制实现超混沌系统控制	121
5.4.2	外部施加小参数共振扰动实现超混沌系统控制	125
5.5	电路超混沌同步研究	126
5.5.1	驱动 - 响应方法实现超混沌电路系统同步	126
5.5.2	主动 - 被动方法实现超混沌电路系统同步	128
第6章	复合混沌映射的控制与超混沌扩频序列研究	131
6.1	混沌映射	131
6.1.1	满映射	131
6.1.2	轨道点的密度分布	132
6.1.3	轨道点的均值	133
6.1.4	混沌吸引子的激变	133
6.1.5	离散系统的李指数	134
6.2	混沌映射的复合	136
6.2.1	人字映射	136
6.2.2	Logistic映射	137
6.2.3	混沌映射的复合	138
6.3	复合超混沌映射的控制	139
6.3.1	复合混沌映射的控制	139
6.3.2	复合超混沌映射的控制	144
6.4	超混沌扩频序列的产生方案	146
6.5	混沌扩频序列的性能分析	147
6.5.1	自相关特性	147
6.5.2	互相关特性	149
6.5.3	多址能力与复杂度分析	151

6.6 混沌序列下的跳频通信仿真	151
6.6.1 切比雪夫混沌映射	151
6.6.2 跳频通信系统的模块设计	153
6.6.3 仿真结果分析	155
第7章 超混沌保密通信系统应用研究	156
7.1 扩频序列混沌保密通信数字电路模块设计研究	156
7.1.1 扩频通信技术原理	156
7.1.2 混沌通信硬件可实现算法	157
7.1.3 混沌扩频序列发生器的设计	159
7.1.4 扩频序列混沌保密通信应用研究	166
7.2 软件无线电通信系统超混沌语音保密系统应用研究	168
7.2.1 软件无线电安全保密通信系统	169
7.2.2 莱斯勒尔超混沌语音保密通信系统	171
7.2.3 软件无线电模式下的语音超混沌保密通信系统仿真	173
7.2.4 莱斯勒尔超混沌语音保密通信系统的可靠性问题	175
7.2.5 有关软件无线电超混沌系统通信应用的讨论	175
7.3 超混沌同步图文图像保密通信与软件应用研究	176
7.3.1 超混沌信息掩盖技术应用	176
7.3.2 软件实现	176
7.3.3 实验结果与讨论	177
7.4 利用超混沌信息掩盖技术实现信息保密传输	178
7.4.1 混沌掩盖算法原理	178
7.4.2 超混沌掩盖-混沌加密方法	179
7.4.3 仿真实验结果	181
第8章 基于混沌加密的图像和音频数字水印算法	183
8.1 图像数字水印技术及多尺度几何分析	183
8.1.1 数字水印原理	183
8.1.2 图像多尺度几何分析	183
8.2 基于混沌加密和NSCT的图像数字水印处理	187
8.2.1 Logistic映射与混沌序列的产生	187
8.2.2 水印信号置乱算法	189

8.2.3	水印信号加密算法	190
8.3	轮廓波变换和非下采样轮廓波变换	190
8.3.1	轮廓波变换	190
8.3.2	非下采样轮廓波变换	191
8.3.3	水印嵌入和提取算法	191
8.3.4	实验结果和分析	192
8.4	复倒谱理论与水印嵌入方法	195
8.4.1	倒谱与复倒谱	195
8.4.2	水印嵌入方法	197
8.4.3	图像置乱技术	199
8.4.4	水印嵌入算法	201
8.4.5	水印提取算法	204
8.4.6	仿真实验	204
8.5	混合域中同时嵌入鲁棒水印和脆弱水印的算法研究	211
8.5.1	图像混沌加密	211
8.5.2	水印嵌入算法	211
8.5.3	水印提取算法	213
8.5.4	仿真实验	214
第9章	基于混沌加密的网上银行电子身份认证技术	220
9.1	网上银行身份认证理论与信息传输	220
9.1.1	身份认证与网上银行身份认证基本原理	220
9.1.2	网络环境下信息传输所面临的威胁与对策	221
9.1.3	网上银行常用的身份认证技术	222
9.2	基于动态口令的网上银行身份认证与混沌保密技术	223
9.2.1	网上银行身份认证技术原理	223
9.2.2	网上银行身份认证技术实现机制	224
9.2.3	信息安全与混沌保密技术	225
9.3	基于混沌同步加密的网上银行动态口令身份认证技术研究	228
9.3.1	Logistic映射的性质研究	228
9.3.2	网上银行动态口令混沌同步加密算法的设计原则	232
9.3.3	基于Logistic映射的网上银行动态口令身份认证技术设计	232
9.3.4	实验结果与分析	238

9.4 基于超混沌同步加密的网上银行动态口令身份认证技术研究	240
9.4.1 超混沌加密系统研究	240
9.4.2 典型的超混沌系统模型	241
9.4.3 二维超混沌系统研究	243
9.4.4 基于超混沌同步加密的网上银行动态口令身份认证技术设计	246
第10章 掺铒光纤弱信号混沌检测系统	249
10.1 混沌与信号检测	249
10.1.1 混沌与弱信号检测	249
10.1.2 基于混沌振子的弱信号检测原理	250
10.1.3 达芬振子构成的弱信号检测系统	252
10.2 光纤弱信号检测理论与方法	253
10.2.1 互相关检测法	253
10.2.2 基于小波变换的弱信号检测法	254
10.2.3 随机共振弱信号检测	256
10.2.4 光纤弱信号检测	257
10.3 混沌状态判别方法研究	258
10.3.1 基于相图的直观法	258
10.3.2 数值法	259
10.3.3 基于过零周期的混沌周期状态阈值判据	263
10.4 掺铒光纤弱信号检测系统	272
10.4.1 光纤传感器	272
10.4.2 掺铒光纤	273
10.4.3 弱信号检测部分设计	273
第11章 无线超短波语音数字化集群混沌加密系统	288
11.1 集群加密系统理论	288
11.1.1 集群通信系统讨论	288
11.1.2 集群通信特点分析	289
11.1.3 加密算法分析	290
11.2 集群系统混沌密码叠加方法研究	297
11.2.1 混沌加密系统分析	297
11.2.2 利用Logistic映射产生混沌序列	299

11.2.3	二值化方法产生混沌伪随机序列	303
11.2.4	语音混沌密码叠加方法研究	308
11.3	超短波条件下集群系统研究	315
11.3.1	超短波通信	315
11.3.2	基于超短波集群通信系统研究	318
11.4	语音信号的仿真和实验分析	321
11.4.1	数字语音信号的特征分析	321
11.4.2	加密算法与分析	322
11.4.3	语音信号仿真实验与分析	326
11.4.4	实验结果讨论	328
第12章	视频编码与混沌动态影像加密	330
12.1	视频加密算法与性能分析	330
12.1.1	完全加密算法	330
12.1.2	空域选择加密算法	330
12.1.3	变换域选择加密算法	331
12.1.4	压缩编码和加密结合算法	331
12.1.5	视频加密算法性能分析	331
12.2	H.264的视频压缩编码标准	332
12.2.1	H.264编解码的基本框架和特性	333
12.2.2	H.264整数变换与量化	335
12.2.3	H.264帧内预测编码	340
12.2.4	4×4亮度预测模式	340
12.2.5	16×16亮度预测模式	341
12.2.6	色度块的预测模式	342
12.2.7	H.264帧间预测编码	342
12.3	基于混沌和H.264的视频加密系统设计	343
12.3.1	国内外H.264常用视频加密算法验证	343
12.3.2	视频加密系统设计基本思想	347
12.3.3	一种改进型分段线性混沌复合映射	347
12.3.4	混沌序列密钥分配	351
12.3.5	一种基于H.264的安全等级可调的加密算法	354
12.3.6	试验结果分析	359

12.3.7 视频加密系统设计	361
12.4 基于混沌和提升小波的视频加密研究	364
12.4.1 基于混沌和提升小波的视频加密流程	365
12.4.2 提升小波变换过程	366
12.4.3 基于混沌和提升小波的视频加密算法	367
12.4.4 试验结果分析	368
参考文献	372

第1章 绪 论

1.1 非线性电子学研究进展

丹麦工程师范德波尔(van der Pol)于1927年在电学中发现混沌。他在进行一项以正弦电压源来驱动氖灯RLC(resistor, lenz and capacitor)张弛振荡器的实验过程中,采用了一个与该振荡实验系统相互耦合的电话机作为检测工具。从电话耳机中传来“一种不规则的噪声”。这种奇特的噪声现象是电路系统的周期依次叠加、噪声的交替变化和布朗运动的过程。Gollub等在后来实验中使用多个耦合非线性振子,也观察到了较复杂的频率组合现象。范德波尔和Gollub等虽然当时没有发现后人所揭示的混沌规律,但是已经监测到了混沌的振动状态。这是最早的有关混沌的电路实验。

由于电子技术的条件限制,在20世纪五六十年代,混沌研究基本上是混沌动力学研究,即对非线性动力学电路的研究。

1978年,日本京都大学Ueda使用非线性电感、电容加上正弦电压构成非线性电路,做了较详细的仿真实验,发现方程 $\ddot{x}+k\dot{x}+x^3 = E \cos \omega t$ 所描述的非线性电路中有7/3阶的高次谐波振荡和随机转变过程。经过电路改进和参数调整,用示波器显示电压的李萨如图形,同时用频谱仪观察恒压源的限流电阻变化时的频谱变化,开拓出一条从准周期进入混沌的道路。

1980年,日本的Ueda和Akamatsu两人将负阻元件与电容并联后,通过电阻、电感加正弦电压的方法做仿真实验,发现了范德波尔方程 $\mu(1-x^2)\dot{x} + x^3 = E \cos \omega t$ 所描述的非线性电路中的奇怪吸引子和准周期振荡。1981年,美国麻省理工学院的Linsay做了强迫二阶非线性电容电路的混沌实验,采用具有非线性特性的变容二极管通过电阻、电感加上正弦电压的电路,证实了费根鲍姆(Feigenbaum)关于周期倍增导致混沌的预言,并验证了费根鲍姆数,这是分岔与混沌现象的第一个电路实验。为了验证费根鲍姆关于一维非线性映射分岔规律的理论,Linsay提出了一个含有变容二极管的二阶电路,并在实验中得到了倍周期分岔和混沌谱。后来又有人用频率控制得到分岔图,用测得的频率锁定效应,发现周期区内的混沌“岛”。

1982年,蔡少棠设计了一个能够产生复杂混沌现象的最简单的三阶非线性自

治电路(即蔡氏电路)。它只含有一个非线性元件(由运算放大器构成的一个三阶分段线性电阻器)、两个电容和一个电感。由这个非线性电阻的分段线性函数导出电路的状态方程,通过调整参数,得到双涡卷的奇怪吸引子。

1983~1993年,Chua电路的研究非常活跃。大量的研究论文和成果以专刊、专利和专著的形式被报道,出现了Chua电路的集成芯片。同时,非线性混沌电路的研究也蓬勃展开,至今仍是最为活跃的实验研究领域。非线性混沌电路的构成大致有三个方面:①利用电子元件本身的非线性特点,构成产生混沌的非线性电路,这样的电路几乎遍及所有的非线性器件,包括非线性电阻、电容、电感,以及各种二极管、单结晶体管、工作在饱和截止区的三极管等。其中,对于著名的Chua电路,人们经过多年的潜心研究,在理论分析、实验测试、模拟计算等方面都取得了重要成果。②利用集成运算放大器、模拟乘法器等组件构成乘积电路、负阻电路、回转电路、分段线性电路、积分电路和微分电路等单元模块,进行优化组合构成非线性动力学系统。这样,利用所构建的非线性单元模块,既可以创造出更新颖的非线性电子电路,又能为某种特殊需要,实现一些只能用数学模型表达的新的动力学系统供研究。③对于上述电路或模块的分解和重组,构成多维超混沌系统,或者实施耦合、反馈、同步等研究方案,以开展对各种混沌、超混沌的控制方法、同步方法和通信方法的研究等。

20世纪90年代以后,特别是进入21世纪的近些年来。随着电子技术和电子器件的不断进步,计算机仿真给电路混沌技术研究带来了便利,加快了混沌电路的研究步伐。神经网络混沌、时间序列构造的状态空间重构、混沌信号的子值域特性分析、数字混沌系统等新型混沌电路和混沌模拟仿真分析方法不断涌现。1998~2000年,混沌电路研究领域出现了计算机参与的混沌芯片、混沌加密软件和计算机混沌系统的新热点。在军事研究上,又出现跳频(frequency hopping, FH)通信的混沌扩频序列产生器件。利用MCS-51单片机实现FH序列产生器,进行 $x_{n+1}=1-2x_n^2$ 的混沌迭代运算,利用计算机编程的优化高效算法,使混沌扩频序列的产生变得轻而易举。一些关于神经网络电路混沌和安全保密通信的混沌密码学也在世纪之交有所突破。

进入21世纪,混沌电子学的理论与应用逐步细分,并相继在各个不同领域内得到发展,如网络电子身份信息安全认证、扩频/跳频保密通信系统、数字水印加密和神经网络信息图像加密算法等。

总之,电路混沌研究目前已经发展到日趋成熟的阶段,模拟技术与数字技术、硬件设计与软件技术的相互融合,产生出大量的研究课题,使混沌在电子学研究领域不断得到扩大和深入,成果不断涌现。