



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

线性延迟反馈控制系统 分析及应用

任海鹏 著

非
外
借



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

线性延迟反馈控制系统 分析及应用

任海鹏 著

科学出版社

内 容 简 介

本书对线性延迟反馈控制系统进行动力学分析,阐明产生分岔和混沌的机理。用电路实现 Chen 系统,在电路实验中观察到分岔和混沌行为。将系统中产生的超混沌应用于保密通信和 Hash 函数构建中,同时,应用于智能家居系统的信息传递和用户认证。将混沌系统应用于振动压实,设计振动装置,并进行实验研究。

本书可作为信息与通信系统、动力学系统分析与应用、控制理论与控制工程等领域科研人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

线性延迟反馈控制系统分析及应用 / 任海鹏著. —北京: 科学出版社, 2019.3

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-060026-4

I. ①线… II. ①任… III. ①反馈控制系统-研究 IV. ①TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 294311 号

责任编辑: 宋无汗 赵微微 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2019 年 3 月第一次印刷 印张: 16 1/2 插页: 1

字数: 333 000

定价: 108.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委(按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之材，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

动力学系统分析是一个交叉学科领域，涉及物理学、数学和控制等领域。混沌作为动力学系统的一个特例，从 20 世纪 60 年代开始逐渐被人们深入认识。作为确定性系统中表现出的类随机行为，人们一度认为混沌是不可控制的，直到 1990 年混沌的微扰控制 (OGY) 方法被提出，混沌控制和利用的研究才开始迅速发展。混沌控制方法的研究成为交叉学科的一个研究热点，各种相关的混沌控制方法相继提出，包括延迟反馈混沌控制方法、线性反馈混沌控制方法等。由于具有宽频谱、对参数和初值敏感等特性，混沌引起了通信、优化等领域的研究人员的兴趣，他们先后提出：混沌用于保密通信提高保密性；混沌用于寻优避免局部极小；混沌用于开关变换器降低特定频率的电磁干扰峰值；混沌用于振动压实使不同颗粒产生共振提高压实度；混沌用于液体搅拌和能量交换提高效率等。2000 年，在非混沌离散系统中，人为产生混沌的方法被提出，正式开启了混沌反控制，或者混沌化控制研究。对于连续系统的混沌反控制方法，陈关荣教授及其合作者最先提出了状态延迟加正弦变换（本书中称为非线性延迟反馈控制方法）产生混沌，并对其进行详细的理论分析和电路实验。

2000 年 4 月~2003 年 10 月作者读博期间从事了一些混沌控制方法的研究，工科出身和工程背景的原因使得作者对混沌控制和利用产生了浓厚兴趣。受到陈关荣教授等关于非线性延迟反馈控制混沌反控制方法的启发，作者在 2004 年 4~10 月访问日本九州大学期间，产生了利用直接延迟反馈控制（线性延迟反馈控制）进行混沌反控制的最初想法。该方法已经被用来实现混沌控制，如果该方法也能产生混沌，就可以实现利用同样的方法在需要时产生混沌，在不需要时消除混沌，给系统设计和控制利用混沌带来极大的方便。同时，延迟产生的混沌具有理论上的无穷维，使通过简单的方法获得超混沌吸引子成为可能。作者回国后进行了相关仿真，并撰写了第一篇关于利用直接延迟反馈进行混沌反控制的论文并投稿《物理学报》，经过多轮评审和申诉，该论文最终被录用，这也是到目前为止作者唯一一篇申诉的论文。其意义在于给了自己坚持原创思想并努力钻研的动力。接下来的十几年中，作者始终坚持这一研究方向。

混沌控制和反控制与系统的动力学分析密切相关，本书针对线性延迟反馈控制系统的非线性动力学进行分析，针对应用问题的控制系统设计和控制方法改进等方面进行深入研究。尤其是对线性延迟反馈控制系统中的混沌产生机理，包括

局部分岔、全局分岔、拓扑马蹄等一系列问题进行较为深入的研究，同时对系统中产生混沌的应用，如产生混沌的通信应用、加密应用和压实机械中的应用进行研究。到目前为止，相关研究已经取得阶段性成果，并公开发表，其中很多内容，尤其是仿真方法和程序受到了关注，这也是写作本书的初衷：一方面，是对相关研究成果的总结；另一方面，将研究过程中使用的方法、程序和硬件给予详细的介绍，给读者提供信息，供后来者检验。

线性延迟反馈混沌产生机理和应用的研究先后得到了陕西省教育厅自然科学基金基础研究项目、陕西省自然科学基金、中国博士后科学基金、首批中国博士后科学基金特别资助项目、霍英东基金会高等院校青年教师基金和国家自然科学基金青年科学基金的资助。作者的学生李文超、庄元、安婷婷、黄占占、许洁、张建华、王龙、王红武、田坤、南子元和白超先后参与了相关研究工作。本书成稿的过程中，田坤、白超、赵朝峰和贾航辉参与了部分整理工作，尤其是田坤付出了大量劳动，在这里感谢他们的付出。

本书的出版得到了中国博士后科学基金的资助，在这里特别致谢。

感谢英国阿伯丁大学 Grebogi Celso 教授，他是作者在阿伯丁访问期间的合作者之一，对作者发表的与本书相关的多篇论文进行了审读和指导。感谢作者的博士生导师刘丁教授和博士后合作导师韩崇昭教授的长期帮助和支持。感谢家人的理解和支持。

由于作者学术水平和能力有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评、指正。

目 录

《博士后文库》序言	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 延迟与混沌	1
1.2 混沌控制和混沌反控制	1
1.3 混沌产生方法	2
1.4 利用线性延迟和非线性延迟产生混沌	3
1.5 本书内容	4
参考文献	5
第 2 章 利用线性延迟反馈产生混沌	10
2.1 基于线性延迟反馈的混沌反控制	10
2.2 线性延迟反馈 Chen 系统的数学模型	11
2.3 线性延迟反馈 Chen 系统的特性分析	17
2.3.1 平衡点的稳定性	17
2.3.2 线性延迟反馈系统混沌分岔图	21
2.3.3 Lyapunov 指数	23
2.3.4 功率谱和时间序列	29
2.3.5 耗散性分析	31
2.4 线性延迟反馈 Lorenz 系统的动力学特性分析	32
2.5 线性延迟反馈 Sprott 系统的动力学特性分析	36
参考文献	40
第 3 章 线性延迟反馈控制的电路实现	42
3.1 Chen 电路设计	42
3.2 延迟电路设计	45
3.2.1 信号采样存储延迟回放方法	45
3.2.2 滞后网络级联方法	47
3.2.3 惯性环节级联方法	47

3.3 电路实验结果	49
参考文献	55
第 4 章 线性延迟反馈系统中的局部分岔分析	56
4.1 Hopf 分岔分析	59
4.2 Hopf 分岔的方向和稳定性	62
4.3 仿真和电路实验验证	68
4.4 线性延迟反馈 Chen 系统的参数分岔图	70
参考文献	72
第 5 章 线性延迟反馈系统中全局分岔分析	73
5.1 双涡卷混沌吸引子中的异宿轨道	73
5.2 线性延迟反馈 Chen 系统单涡卷混沌吸引子中的同宿轨道	77
5.2.1 复数特征根对应的同宿轨道	78
5.2.2 实数特征根对应的同宿轨道	80
5.2.3 线性延迟 Chen 系统中存在混沌的理论证明	82
参考文献	82
第 6 章 线性延迟反馈系统中的拓扑马蹄	84
6.1 拓扑马蹄基础理论	84
6.1.1 符号动力学	84
6.1.2 拓扑马蹄引理	86
6.2 单涡卷混沌吸引子的拓扑马蹄	88
参考文献	97
第 7 章 线性延迟反馈系统产生混沌的通信应用	99
7.1 线性延迟反馈产生超混沌的同步	100
7.1.1 线性延迟反馈 Chen 系统中的超混沌	100
7.1.2 主动-被动同步法原理	102
7.1.3 基于主动-被动的超混沌 Chen 系统同步	103
7.2 基于无穷维超混沌 Chen 系统和密钥流迭代的保密通信方法	106
7.3 数值仿真	108
7.4 抗攻击性能分析	114
7.4.1 密钥空间分析	115
7.4.2 参数敏感性分析	115
7.4.3 抗破解性能分析	118

7.5 DSP 实验验证	123
参考文献	133
第 8 章 线性延迟反馈系统产生混沌的 Hash 函数应用	135
8.1 Hash 函数的基础知识	135
8.1.1 单向函数与单向 Hash 函数	135
8.1.2 Hash 函数的种类	136
8.1.3 混沌 Hash 函数	137
8.2 基于线性延迟反馈超混沌 Chen 系统构建 Hash 函数	137
8.2.1 线性延迟反馈超混沌 Chen 系统的数学描述	137
8.2.2 密钥流迭代函数	139
8.2.3 基于线性延迟反馈超混沌 Chen 系统的 Hash 函数构造方法	139
8.3 所提算法的安全性能分析	140
8.3.1 文章 Hash 结果	140
8.3.2 单向性分析	147
8.3.3 混淆与扩散性质的统计分析	148
8.3.4 抗生日攻击和碰撞攻击分析	158
8.3.5 与现有方法的对比	162
8.4 相关程序代码	163
参考文献	186
第 9 章 线性延迟反馈产生混沌应用于智能家居信息加密	188
9.1 智能家居系统	188
9.2 基于超混沌的 Hash 函数的智能家居用户认证	190
9.2.1 Hash 函数构建步骤	190
9.2.2 用户认证代码	192
9.3 基于超混沌的保密通信方法在智能家居信息传输中的应用	197
9.3.1 混沌通信方法	197
9.3.2 混沌通信方法程序代码	197
9.3.3 通信结果测试	202
参考文献	203
第 10 章 线性延迟反馈产生超混沌的压实应用	205
10.1 振动压实基础	205
10.2 混沌运动产生方法研究	206
10.2.1 利用线性延迟反馈控制永磁同步电动机产生混沌	206

10.2.2	永磁同步电动机转速跟踪混沌给定信号	209
10.2.3	基于非线性延迟反馈的单向混沌反控制	210
10.2.4	基于线性延迟反馈的单向混沌反控制实验研究	213
10.3	振动压实机构设计	215
10.3.1	基于单电动机的混沌压实机构设计	215
10.3.2	基于双电动机的混沌压实机构设计及受力分析	221
10.4	双电动机同步实现方法	225
10.4.1	基于反步控制算法的双电动机混沌同步控制	225
10.4.2	基于滑模控制方法的双电动机混沌同步控制	239
10.4.3	同步实验研究	245
10.5	压实实验结果研究	246
10.5.1	振动压实实验设计	246
10.5.2	单电动机振动压实实验结果研究	248
10.5.3	双电动机振动压实实验结果研究	249
	参考文献	250
	编后记	251

彩图

第 1 章 绪 论

1.1 延迟与混沌

延迟是指事物相对原状态时间上的滞后,存在于诸多实际系统中,如控制系统中反馈信号的传输延迟、网络传输数据包的延迟、管道传输流体的延迟等。动态系统中,状态延迟反馈会对系统的动态行为产生复杂的影响。混沌是指确定性系统表现出的对初值极度敏感的有界非周期运动状态。混沌普遍存在于自然界,如天体力学中的三体混沌现象^[1,2],天气预报^[3]、化学反应^[4]等系统中出现的混沌现象。混沌现象是传统线性系统认识论中无法解释的现象,因此,普遍存在的混沌现象的研究对人们认识和理解自然界的很多现象具有重要意义^[5]。延迟与混沌相联系的典型系统是 M-G 系统^[6]。已经证明,在常微分方程描述的动态系统中产生混沌的条件是系统阶次大于 2^[7],而对于具有延迟的系统,一阶延迟微分方程中也能产生混沌^[6,8]。值得关注的是,在常微分方程描述的混沌系统中引入状态的线性延迟反馈可以消除混沌^[9]。因此,延迟与混沌的相互作用成为一个有趣的研究课题。本书侧重于研究线性延迟反馈系统中混沌产生机理的分析和产生混沌的应用,其基础是线性延迟反馈控制系统的动力学分析,其中部分研究结果,尤其是对于参数分岔的研究,对利用线性延迟反馈抑制混沌(即混沌控制)具有指导意义。

1.2 混沌控制和混沌反控制

人们对混沌的研究已有近 60 年的历史,混沌的研究重点已从解释其产生机理向控制混沌和利用混沌现象转变。过去的 20 多年中,混沌控制得到了广泛的研究^[10-12]。混沌控制,即消除混沌对动力学系统的消极影响。相反地,混沌反控制是指在需要利用混沌的场合,加强混沌或产生混沌。混沌特性能够反映系统的重要动力学特点,如分岔、宽频谱等,因此混沌反控制使系统更具灵活性。传统的方法以丧失灵活性为代价消除混沌,事实上,在有些情况下这样做是没有必要的。例如,在空间探测器导航中,利用混沌对初值的高度敏感性,可以用较小的控制量达到期望的控制目标;通过推迟混沌系统的分岔点,可以提高机床和喷气发动机的安全运行能力^[13];混沌能够提高人工神经网络的性能^[14,15],提高信号和图像传输中的编码效率^[16];在液体混合过程中,利用混沌水平对流能够获得更

高效的热交换^[17]；混沌压路机和混沌研磨机可以提高工程效率^[18,19]；混沌弱信号检测可用于故障信息诊断^[20]；混沌可降低开关变换器的电磁干扰^[21]，掩盖潜艇的噪声^[22]，构造 Hash 函数进行信息完整性检测和数字签名^[23]，提高雷达图像的分辨率^[24]等；混沌同步可以提高压实效率^[25,26]；混沌广泛应用于生物医学^[27]和保密通信^[28-34]中等。混沌现象的广泛应用激发了学者对混沌反控制研究的兴趣，人们深信，对混沌控制和混沌反控制的深入研究将对未来的科学技术产生深远影响。

1.3 混沌产生方法

状态反馈控制是混沌产生领域中使用最普遍的方法之一。状态反馈，即给定一个非线性系统，增加状态反馈控制项来控制其运动轨迹进入混沌状态，这种混沌反控制方法具有简单性、普适性等特点，已成为最普遍的控制手段。

1998年，Chen等^[35]在国际混沌工程研究著名杂志 *International Journal of Bifurcation and Chaos* 上发表题为 *Feedback anticontrol of discrete chaos* 的文章，利用混沌反控制使离散系统产生 Li-Yorke 意义的混沌。1999年，Wang等^[36]给出该方法的理论证明。这种方法被应用在 T-S 型模糊神经网络中产生混沌现象^[37]。Lu^[38]给出这种控制方法中折叠函数的一般形式。一些不同形式的非线性反馈也被用在离散系统中产生混沌现象^[38-41]。在离散系统中，设计状态反馈控制器使其产生混沌现象理论上已经相对完善；而在连续系统中，情况则相对复杂，但也有不少学者对其深入研究并取得了一些进展。Wang 和 Chen 在 *Chaos*、*IEEE Transactions on Circuits and Systems* 等杂志发表文章，提出了间接延迟反馈控制，即小幅正弦函数形式的延迟反馈控制项，可在连续系统中产生混沌，并将其应用于线性最小相位系统、分数阶系统、蔡氏电路、Lorenz 系统和混沌搅拌系统中，在这些系统中观察到了混沌现象^[39,42-50]。

在系统状态中加入时间延迟反馈项也被广泛应用于稳定非线性系统中产生混沌。采用延迟反馈方法实现混沌控制已经有一些研究成果^[9,51-57]。Pyragas^[9]提出的延迟反馈控制方法不需要精确的系统模型，并且控制器简单、适应性好、计算方便、易于工程实现。延时反馈控制方法已经成为控制混沌的一种重要理论方法，在控制电子电路^[58]、激光器^[59]、铁磁弹性梁^[60]中得到了广泛应用。文献^[61]利用延迟控制器，消除直流-直流变换器中不稳定轨道等因素对系统的不良影响。文献^[62]针对电力系统中的非线性现象，加入延迟反馈控制项，从而消除混沌。本书作者采用延迟反馈的方法控制永磁同步电动机中的混沌现象^[52]，然而基于延迟反馈的混沌控制机理的理论研究仍然不充分^[53]。

2000~2006年，Tang 和 Chen 等提出状态绝对值反馈混沌反控制方法，并成功地应用于线性系统、Duffing 振子和直流电动机中^[63-67]。人们也提出采用分段

线性控制函数产生混沌现象,并研究了其电路实现方法^[68-75]。直接在受控系统中加入状态控制量也可实现状态反馈混沌反控制,该方法广泛应用于电机控制、Logistic 映射系统、Lü 系统中^[22,76-78]。2002年,关新平等^[79]采用反馈线性化方法,实现了混沌反控制;张波等^[80]通过线性反馈进行了永磁同步电动机的混沌反控制的仿真研究;2004年,朱海磊等^[81]利用 Wang 等提出的具有小幅正弦函数形式的延迟反馈进行了感应电动机混沌反控制的仿真研究;陶建武等^[82]利用分段线性输出反馈实现了端口受控哈密顿系统的混沌反控制。

通过配置 Lyapunov 指数的大小亦可实现混沌反控制方法。该方法通过改变受控系统的 Lyapunov 指数达到产生混沌的目的。通过改变给受控系统加反馈控制项,进而改变系统的 Jacobi 矩阵,从而影响系统的 Lyapunov 指数,达到混沌系统反控制目的。1997年,Chen 等^[83]在离散系统中提出通过改变 Lyapunov 指数的混沌反控制方法,证明这种方法产生的混沌不仅具有 Devaney 意义下的混沌,而且具有 Li-Yorke 意义下的混沌^[36]。目前该方法也被广泛应用于连续混沌系统产生 3 个及以上的正 Lyapunov 指数^[84-86]。2003年,文献[87]提出基于模糊神经网络的方法实现了一类模型未知系统的混沌反控制。2005年,文献[88]采用跟踪控制产生混沌。

上述的混沌控制研究方法仅证明了混沌反控制的可实现性。对于具有广泛应用前景的混沌反控制问题,采用这些方法是远远不够的。混沌是由非线性系统产生的,非线性机制的多样性决定了混沌产生机制的多样性。针对不同的应用对象,设计不同的控制方法达到控制目的还需要进一步深入研究。从控制的观点看,研究混沌反控制和控制的理想状态是找到适当的控制方法,结合实际的应用背景,使用相同的控制器,通过设置不同的控制参数,即可在产生混沌和消除混沌之间任意切换,这样可以给设计者提供极大的灵活性。

1.4 利用线性延迟和非线性延迟产生混沌

通过线性延迟反馈方法可以实现混沌控制^[9],一般通过试凑参数将混沌控制到能够稳定若干周期轨道。这种方法可以实现混沌控制的机理,仍然是需要研究的问题。对于利用线性延迟反馈方法,实现混沌反控制的研究,以作者所知,文献[89]发表之前未见报道。线性延迟反馈控制的非线性系统中能够产生混沌现象,这使得人们关注线性延迟反馈系统动力学特性的研究。在什么情况下线性延迟反馈控制系统能够产生混沌现象?产生混沌现象的内在机理是什么?产生的混沌现象复杂程度如何?应用前景如何?从理论上解决这些问题对于混沌研究及其应用具有十分重要的意义。本书研究的线性延迟反馈控制不同于非线性延迟反馈控制^[43,46],第一,线性延迟反馈控制无须进行正弦函数变换,控制形式实现更为

简单。第二，非线性延迟反馈控制必须进行反馈线性化^[44]，需要找到合适的输出函数来满足反馈线性化条件，如果这个条件无法满足，则控制无法实现，其计算过程和控制形式变得复杂。具有正弦形式的非线性延迟反馈控制方法，理论上控制器的输出是具有很小幅值的正弦信号，控制能量小。但是这个结论也是基于反馈线性化基础上的，实际的控制器中需要将实际系统中的所有非线性项产生的影响，通过在控制器中设计同样的机制将其作用抵消，这个过程中，控制器内部的能量可能已经超出允许范围。如果对实际系统设计的控制器比系统自身还要复杂，显然这种设计是不理想的。而本书中的线性延迟反馈控制只需将系统的当前状态和延迟后的状态之差进行放大就可以实现控制，前期的研究结果已经表明，这种控制的能量与吸引子内部的能量相近，控制的能量取决于吸引子本身的能量。当设置反馈增益很小时，适当调节延迟时间，在保持系统运动高度复杂性的同时，控制的能量也很小。第三，经过线性化后的系统，在理论分析过程中，可近似成等价的离散系统，采用正弦形式的延迟反馈控制，此时非线性仅由正弦和延迟决定，等效的离散系统具有周期有界函数的形式，才可以证明能产生 Li-Yorke 意义下的混沌。这样似乎可以得到一个具有普适性的结论和方法，巧妙之处在于利用反馈线性化回避了实际系统中纷繁芜杂的非线性，对于线性系统得到了结论。而线性延迟反馈由于不具有正弦反馈形式，不能采用相同的理论方法，必须利用延迟微分方程的理论和方法来进行稳定性和分岔分析。由于实际系统中非线性的多样性，很难对任意非线性系统得到通用的结论。第四，一旦采用线性延迟反馈方法实现混沌的反控制，就可以达到上述所提到的理想状态，即产生混沌或消除混沌均可通过改变控制参数随意调节，而上述的正弦反馈形式的延迟反馈不具有这种功能。

由此可见，本书研究的方法从形式、易实现性、理论证明方法和控制效果等方面都和具有正弦反馈形式的间接延迟反馈方法有很大差别。通过线性延迟反馈控制，可以产生具有真正意义的无穷维超混沌^[62]，与采用复杂的时空耦合关系得到的复杂网络和时空混沌相比，应用简单的方法，在相对简单的系统中产生具有无穷维的超混沌研究，具有理论意义和更好的应用前景。将这样的混沌应用于保密通信等场合，被加密信号将更加难以破译；在具有混沌运动的振动应用压实工程中，能得到更好的研磨和压实效果。

1.5 本书内容

本书围绕线性延迟反馈控制系统，系统地研究混沌产生机制，系统电路实现，在实验中观察到混沌现象，最后介绍该系统的实际应用。本书的主要内容如下。

第 2 章，首先给出一个线性延迟反馈 Chen 系统，在该系统中观察到四种奇

异吸引子：单涡卷混沌吸引子、双涡卷混沌吸引子、复合多涡卷混沌吸引子和 D 型混沌吸引子。然后分析这四种混沌吸引子的平衡点、Lyapunov 指数、功率谱和耗散性，得到对这些吸引子的初步认知。

第 3 章，通过设计电路实验，在示波器中观察上述四种吸引子。

第 4 章，通过分析线性延迟反馈 Chen 系统的 Hopf 分岔和参数分岔图，得到系统的倍周期分岔和混沌区域，清晰地看到随着参数变化，系统从非混沌走向混沌的变化过程，并用实验电路进行相关验证。

为了进一步研究混沌的产生机理，在第 5 章和第 6 章中，利用异宿轨道、同宿轨道和拓扑马蹄证明混沌的产生机理。通过以上分析，对线性延迟反馈控制系统中产生的奇异吸引子是混沌吸引子进行理论证明。本书所提到的分析方法亦适用于证明其他带有延迟的混沌系统。

在第 7~10 章中，介绍线性延迟反馈控制产生的超混沌在保密通信、智能家居和混沌振动压实方面的应用，展示线性延迟反馈控制系统的应用前景。

参 考 文 献

- [1] POINCARÉ J H. Sur le probleme des trois corps et les equations de la dynamique. Divergence des series de M. Lindstedt[J]. Acta Mathematica, 1890, 13:1-270.
- [2] LIAO S J. Physical limit of prediction for chaotic motion of three-body problem[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2014, 19(3):601-616.
- [3] LORENZ E N. Deterministic non-periodic flow[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 2004, 20(2):130-141.
- [4] RÖSSLER O E. An equation for continuous chaos[J]. Physics Letters, 1976, 57(5):397-398.
- [5] 郝柏林. 从抛物线谈起——混沌动力学引论[M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2013.
- [6] MACKEY M C, GLASS L. Oscillation and chaos in physiological control system[J]. Science, 1977, 197(4300): 287-289.
- [7] HIRSCH M W, SMALE S. Differential Equations, Dynamical Systems and Linear Algebra[M]. New York: Academic Press, 1974.
- [8] SPROTT J C. A simple chaotic delay differential equation[J]. Physics Letters A, 2007, 366(4-5): 397-402.
- [9] PYRAGAS K. Continuous control of chaos by self-controlling feedback[J]. Physics Letters A, 1992, 170(6): 421-428.
- [10] CHEN G R, DONG X N. From chaos to order—Methodologies, Perspectives and Applications[M]. Singapore: World Scientific Series on Nonlinear Science Series A, 1998.
- [11] REN H P, LIU D. Nonlinear feedback control of permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II, 2006, 53(1):45-50.
- [12] XIA Y Q, JIA Y M. Robust sliding-mode control for uncertain time-delay system: An LMI approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(6):1086-1091.
- [13] GU G X, SPARKS A, BANDA S S. An overview of rotating stall and surge control for axial flow compressors[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 1999, 7(6):639-647.
- [14] AIHARA K. Chaos engineering and its application to parallel distributed processing with chaotic neural network[C]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(5):919-930.

- [15] ÇAKIR Y. Modeling of time delay-induced multiple synchronization behavior of interneuronal networks with the Izhikevich neuron model[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2017, 25(4): 2595-2605.
- [16] IANO Y, DA SILVA F S, CRUZ A L M. A fast and efficient hybrid fractal-wavelet image coder[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(1): 98-105.
- [17] ABEL A, SCHWARZ W. Chaos communication—principles, schemes and system analysis [C]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(5):691-710.
- [18] 龙运佳, 杨勇, 王聪玲. 基于混沌振动力学的压路机工程[J]. 中国工程科学, 2000, 2(9):76-79.
- [19] ITO S, NARIKIYO T. Abrasive machine under wet condition and constant pressure using chaotic rotation[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 1998, 64(5):748-752.
- [20] HU J F, ZHANG Y X, YANG M, et al. Weak harmonic signal detection method from strong chaotic interference based on convex optimization[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 84(3):1469-1477.
- [21] MOREL C, BOURCERIE M, CHAPEAU-BLONDEAU F. Extension of chaos anticontrol applied to the improvement of switch-mode power supply electromagnetic compatibility[C]. 2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Ajaccio, 2006:447-452.
- [22] LIU S Y, YU X, ZHU S J. Study on the chaos anti-control technology in nonlinear vibration isolation system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 310(4-5):855-864.
- [23] 任海鹏, 王龙. 单向非周期振动装置及非周期振动控制方法: 201310506589.8[P].
- [24] VENKATASUBRAMANIAN V, LEUNG H. A novel chaos-based high-resolution imaging technique and its application to through-the-wall imaging[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(7):528-531.
- [25] JEMAÂ-BOUJELBEN S B, FEKI M. Synchronization of chaotically behaving two permanent magnet synchronous motors using adaptive controller[C]. 2015 IEEE 12th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices, Mahdia, 2015:1-6.
- [26] 任海鹏, 庄元. 基于超混沌 Chen 系统和密钥流构造单向 Hash 函数的方法[J]. 通信学报, 2009, 30(10): 100-106.
- [27] 赵占山, 张静, 丁刚, 等. 冠状动脉系统高阶滑模自适应混沌同步设计[J]. 物理学报, 2015, 64(21): 210508.
- [28] REN H P, BAI C, LIU J, et al. Experimental validation of wireless communication with chaos[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2016, 26(8):083117.
- [29] LI A, WANG C. Efficient data transmission based on a scalar chaotic drive-response system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 11(2017):1-9.
- [30] CORRON N J, BLAKELY J N. Chaos in optimal communication waveforms[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2015, 471(2180):20150222.
- [31] HASSAN M F. Synchronization of uncertain constrained hyperchaotic systems and chaos-based secure communications via a novel decomposed nonlinear stochastic estimator[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 83(4): 2183-2211.
- [32] REN H P, BAI C. Secure communication based on spatiotemporal chaos[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(8): 080503.
- [33] HUA Z Y, ZHOU B H, ZHOU Y C. Sine-transform-based chaotic system with FPGA implementation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(3): 2557-2566.
- [34] YANG T, CHUA L O. Impulsive stabilization for control and synchronization of chaotic system: Theory and application to secure communication[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 1997, 44(10): 976-988.
- [35] CHEN G R, LAI D J. Feedback anticontrol of discrete chaos[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 1998, 8(7):1585-1590.