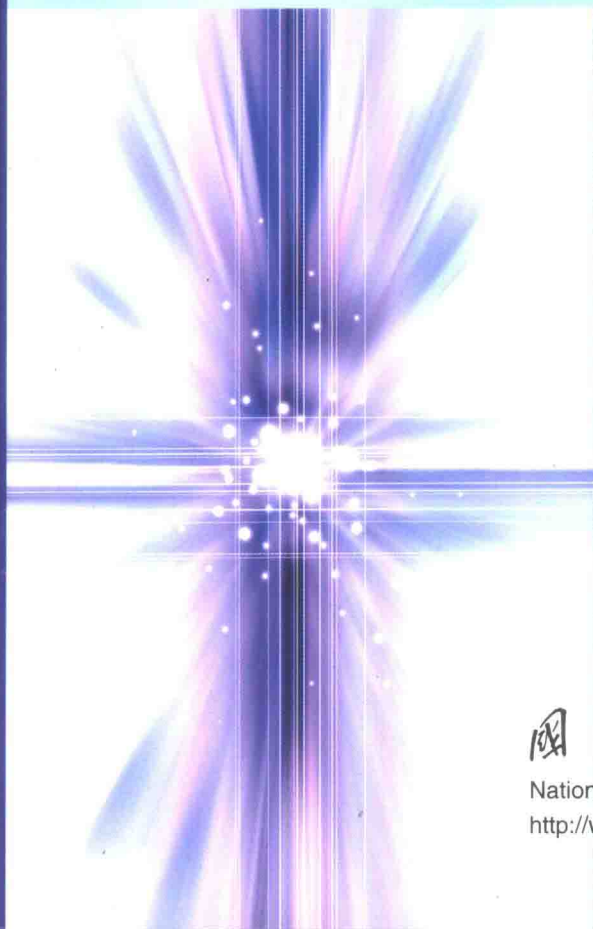


关新平 范正平 陈彩莲 华长春 著

混沌控制 及其在保密通信中的 应用



國防工業出版社

National Defence Industry Press

<http://www.ndip.com.cn>

混沌控制及其在保密 通信中的应用

关新平 范正平 著
陈彩莲 华长春

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

混沌控制及其在保密通信中的应用/关新平等著.

—北京:国防工业出版社,2002.10

ISBN 7-118-02941-6

I.混... II.关... III.①混沌学—基本知识②混沌学—应用—保密通信 IV.TN918

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 065296 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 9 233 千字

2002 年 10 月第 1 版 2002 年 10 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:15.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

本书获得

河北省学术专著出版基金资助

前 言

混沌是非线性科学研究的中心内容之一。长期以来,由于混沌系统的极端复杂性,人们一直认为混沌系统是不可控制的,更不用说关于混沌系统的利用了。但在1990年,Ott、Grebogi和Yorke基于参数扰动的方法,成功地实现了混沌系统的控制,自此,关于混沌系统控制问题的研究引起了人们的重视。这是因为与常规的控制问题相比,混沌控制问题有着许多不同的特点。比如常规控制一般不去考虑系统输出对状态初值的敏感性,不会把一个系统的输出轨道引向不稳定的极限环或不动点,不会考虑通过改变系统状态稳定性的分支点去达到某种控制目的,更不会试图去把一个稳定状态的系统引导到临界稳定和混沌状态(即所谓“反控制”)。与此同时,随着计算机技术、信息技术和通信技术的迅猛发展,特别是有关信息基础结构(信息高速公路)的概念和建设计划的提出,以计算机为核心的庞大信息网正在全世界范围内逐渐形成,传统的保密通信方法已经不能满足人们对通信保密性能的要求。在这种情况下,人们迫切需要寻求新的保密通信方法来确保网络通信的安全性。由于混沌保密通信具有实时性强、保密性能高等优点,显示出它在保密通信领域具有强大的生命力,而混沌系统同步理论的研究和发展,则为混沌在保密通信中应用准备了理论基础并逐步走向成熟。

近年来,关于混沌系统的控制及在保密通信中的应用问题更是引起了人们的广泛关注,并越来越成为研究的热点和难点问题,相关的文献和成果,也正在不断丰富。作者所在的课题组,从20世纪90年代初开始涉入这个领域以来,在不断了解国内外动态的同时,也从事了相关的理论与应用研究,并取得了较丰富的研究成

果,包括时滞混沌系统的控制、混沌大系统的镇定与跟踪、混沌系统的自适应控制、鲁棒控制、混沌系统的抗干扰同步、扰动下混沌系统的保密通信以及混沌通信的软件实现问题等。这些研究工作使作者对混沌控制与应用研究的内涵有了更深入的了解,并促使作者写出此书,希望它的出版能为推动国内这一领域的研究尽一份微薄之力。

本书研究的是混沌控制、同步及混沌保密通信应用问题。全书共 10 章。第 1 章介绍了混沌系统的定义、特征、实现混沌的几种途径以及研究混沌的几种常用的方法。这部分重点突出了混沌系统与线性系统及一般的非线性系统之间的差别。第 2 章至第 8 章主要论述了混沌系统的控制问题。首先我们给出 OGY 控制方法的基本原理,并给出了一种改进的 OGY 控制算法,然后着重研究了混沌系统的时滞反馈控制方法、自适应控制方法、变结构控制方法、模糊控制方法、鲁棒控制方法,并简要地介绍了目前混沌研究的另一个热点——混沌系统的反控制。这部分是本书的重点和核心部分。第 9 章主要讨论了混沌保密通信的关键问题——混沌同步。介绍了传统的 PC 同步方法以及反馈控制同步方法,分别基于状态观测器方法、神经网络控制方法、非线性 H_∞ 控制方法以及 T-S 模糊方法,实现了混沌系统的同步。第 10 章讨论混沌系统在保密通信中的应用问题。首先对混沌保密通信问题进行简要的概述,在此基础上,基于状态观测器方法,研究了细胞超混沌系统的保密通信问题,并基于 T-S 模糊模型也完成了混沌系统的保密通信方案设计。为提高系统的保密性能,我们进一步研究了时滞混沌系统的保密通信问题,讨论了基于参数辨识方法的时滞超混沌系统的保密通信方案,并给出了多级时滞超混沌系统的保密通信方案设计。在本书的最后,我们对混沌控制与应用问题进行了回顾,介绍了目前混沌研究存在的几个主要问题,并对混沌研究的前景进行展望,以期引起更多读者的关注。

作者的研究工作先后得到了国家自然科学基金项目《非线性系统的控制混沌及智能故障诊断的预报的研究》(编号:68972031)

和河北省自然科学基金项目《混沌控制保密通信技术及应用研究》(编号:601225)的资助。本书的出版得到了河北省学术出版基金的资助。在此,衷心感谢国家自然科学基金委员会、河北省自然科学基金委员会和河北省教育厅给予的大力支持和帮助。

由于我们水平有限,以及所做工作的局限性,书中难免有疏漏和不尽人意之处,恳请读者多提宝贵意见。

作 者

内 容 简 介

本书是关于混沌控制、同步及混沌保密通信问题的一部专著。内容包括:介绍混沌系统的定义、特征、实现混沌的几种途径以及研究混沌系统的常用方法;主要论述了混沌系统的控制问题,给出了 OGY 控制方法的基本原理及一种改进的 OGY 控制算法;着重论述混沌系统的时滞反馈控制方法、自适应控制方法、变结构控制方法、模糊控制方法、鲁棒控制方法,并简要地介绍了目前混沌研究的另一个热点——混沌系统的反控制;用较大篇幅论述了混沌保密通信的关键问题——混沌同步,最后介绍混沌系统在保密通信中的应用。

本书可供理工科大学教师及研究生阅读,也可供自然科学和工程技术领域中的研究人员参考。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 混沌概述	1
1.1.1 混沌的定义	3
1.1.2 混沌运动的基本特征	5
1.1.3 通向混沌的道路	7
1.1.4 常见的几种研究混沌的方法	10
1.2 混沌控制与应用研究的目的和意义	16
第 2 章 混沌系统的 OGY 控制	22
2.1 OGY 方法的基本原理	22
2.2 OGY 控制方法的数值算例	32
2.3 OGY 方法的改进	34
2.4 本章小结	37
第 3 章 混沌系统的时滞反馈控制	39
3.1 时滞混沌控制系统及其线性化模型	40
3.2 时滞混沌系统的镇定问题和跟踪控制问题	44
3.2.1 时滞混沌系统的镇定问题	44
3.2.2 时滞混沌系统的跟踪控制问题	47
3.2.3 控制实例	49
3.3 时滞混沌大系统的时滞反馈控制	61
3.3.1 时滞混沌大系统的描述	62
3.3.2 时滞混沌大系统的镇定问题	63
3.3.3 时滞混沌大系统的跟踪控制问题	68
3.3.4 控制实例	71
3.4 本章小结	76

第 4 章 混沌系统的自适应控制	77
4.1 参数未知混沌系统的自适应控制	77
4.2 基于 Backstepping 方法的混沌系统自适应控制	84
4.3 混沌系统基于 Backstepping 方法的自适应模糊控制	92
4.4 本章小结	103
第 5 章 混沌系统的滑模变结构控制	104
5.1 三角型结构的混沌系统的滑模变结构控制	105
5.2 三角型结构混沌系统的自适应滑模变结构控制	109
5.3 一般结构的混沌系统的滑模变结构控制	112
5.4 本章小结	116
第 6 章 混沌系统的模糊控制	118
6.1 模糊控制基本原理	119
6.2 基于 T-S 模糊模型的混沌控制	121
6.2.1 T-S 模糊模型和混沌系统模糊建模	122
6.2.2 基于 T-S 模糊模型的 PDC 方法和混沌控制	129
6.3 基于 T-S 模糊时滞模型的反馈控制	136
6.4 本章小结	145
第 7 章 非线性时滞混沌系统的鲁棒控制	146
7.1 时滞混沌系统的鲁棒自适应控制	147
7.2 时滞混沌系统的非线性反馈控制	152
7.3 本章小结	157
第 8 章 混沌系统的反控制	158
8.1 不确定混沌系统的反控制	159
8.2 仿真研究	162
8.3 本章小结	167
第 9 章 混沌系统的同步	168
9.1 基于 PC 方法的混沌同步	170
9.2 基于反馈方法的混沌同步	175
9.2.1 线性状态反馈同步	176
9.2.2 非线性状态反馈同步	179

9.3 基于观测器方法的混沌同步	183
9.3.1 同步状态观测器设计	184
9.3.2 混沌系统的观测器同步试验	186
9.4 基于神经网络控制方法的混沌同步	193
9.4.1 神经网络同步控制器设计	196
9.4.2 Lorenz 系统的同步试验	199
9.5 基于神经网络控制方法的 H_∞ 控制器设计	206
9.5.1 非线性 H_∞ 同步控制器设计	206
9.5.2 混沌系统的非线性 H_∞ 同步仿真试验	210
9.6 基于 T-S 模糊模型的混沌同步	213
9.6.1 混沌系统的自相似结构同步	213
9.6.2 混沌系统的广义同步	217
9.6.3 同步实例	220
9.7 本章小结	225
第 10 章 混沌同步在保密通信中的应用	226
10.1 混沌保密通信概述	229
10.2 基于观测器方法的混沌保密通信	233
10.2.1 同步状态观测器设计	233
10.2.2 细胞神经网络超混沌系统的保密通信	241
10.3 基于模糊模型的混沌保密通信	250
10.3.1 信息的模糊混沌调制	251
10.3.2 信息的恢复	252
10.3.3 Lorenz 系统在保密通信中的应用	256
10.4 时滞混沌系统的保密通信	261
10.4.1 基于参数辨识的混沌保密通信	261
10.4.2 多级时滞混沌系统的保密通信方案	266
10.5 本章小结	271
参考文献	272

第 1 章 绪 论

1.1 混沌概述

混沌是非线性动力学系统所特有的一种运动形式,它广泛地存在于自然界,诸如物理、化学、生物学、地质学,以及技术科学、社会科学等各种科学领域。一般而言,混沌现象隶属于确定性系统而难以预测(基于其动力学性态对于初始条件的高度敏感性),隐含于复杂系统但又不可分解(基于其具有稠密轨道的拓扑特征),以及呈现多种“混乱无序却又颇有规则”的图像(如具有稠密的周期点)。

从数学上讲,对于确定的初始值,由动力系统就可以推知该系统长期行为甚至追溯其过去性态。但在 20 世纪 60 年代,美国气象学家 Lorenz 在研究大气时发现,当选取一定参数的时候,一个由确定的三阶常微分方程组描述的大气对流模型,变得不可预测了,这就是有趣的“蝴蝶效应”。在研究的过程中,Lorenz 观察到了这个确定性系统的规则行为,同时也发现了同一系统出现的非周期无规则行为。通过长期反复地数值试验和理论思考,Lorenz 揭示了该结果的真实意义,在耗散系统中首先发现了混沌运动。这为以后的混沌研究开辟了道路。

20 世纪 70 年代,特别是 1975 年以后,是混沌科学发展史上光辉灿烂的年代。在这一时期,作为一门新兴的学科——混沌学正式诞生了。1971 年,法国数学物理学家 Ruelle 和荷兰学者 Takens 一起发表了《论湍流的本质》,在学术界首次提出用混沌来描述湍流形成机理的新观点。通过严密的数学分析,独立地发现了

动力系统存在“奇怪吸引子”，他们形容为“一簇曲线，一团斑点，有时展现为光彩夺目的星云或烟火，有时展现为非常可怕和令人生厌的花丛，数不清的形式有待探讨，有待发现。”1973年，日本京都大学的 Y. Ueda 在用计算机研究非线性振动时，发现了一种杂乱振动形态，称为 Ueda 吸引子。1975年，李天岩(T. Y. Li)和 J. A. Yorke 在他们著名的论文“周期 3 意味着混沌”中，给出了闭区间上连续自映射的混沌定义，在文中首先提出 Chaos(混沌)这个名词，并为后来的学者所接受。1977年夏天，物理学家 J. Ford 和 G. Casati 在意大利组织了关于混沌研究的第 1 次国际性科学会议，进一步营造了混沌研究的氛围。1978年，M. J. Feigenbaum 用手摇计算机彻夜工作，发现一类周期倍化通向混沌的道路中的普适常数。1979年，P. J. Holmes 作了磁场中曲片受简谐激励时的振动试验，发现激励频率和振幅超过某个特定值之后，就出现混沌振动。1980年，意大利的 V. Franceschini 用计算机研究流体从平流过渡到湍流时，发现周期倍化现象，验证了费肯包姆(Feigenbaum)常数。1981年，美国麻省理工学院的 P. S. Linsay 第 1 次用实验证明了 Feigenbaum 常数。1989年，召开了美苏混沌讨论会。1990年，在德国专门召开了分岔与混沌研讨会。1991年 4 月，在日本由联合大学与东京大学共同召开“混沌对科学与社会的影响”的国际会议。1991年 10 月，在美国召开了首届混沌试验讨论会。这些会议的召开促进了混沌学研究世界性热潮的到来。近 10 年来，混沌科学更是与其他科学互相渗透，无论是在生物学、生理学、心理学、数学、物理学、电子学、信息科学，还是天文学、气象学、经济学，甚至在音乐、艺术等领域，混沌都得到了广泛的应用。如今，混沌的发现被认为是 20 世纪物理学三大成就之一，可以说“相对论消除了关于绝对空间与时间的幻想；量子力学则消除了关于可控测量过程的牛顿式的梦；而混沌则消除了拉普拉斯关于决定论式可预测性的幻想”。正如混沌科学的倡导者之一，美国海军部官员 M. Shlesinger 所说的那样“20 世纪科学将永远铭记的只有三件事，那就是相对论、量子力学与混沌”，它在整个科学中所起作用相

当于微积分学在 18 世纪对数理科学的影响。混沌学的创立,将在确定论和概率论这两大科学体系之间架起桥梁,它将揭开物理学、数学乃至整个现代科学发展的新篇章。

1.1.1 混沌的定义

由于混沌系统的奇异性和复杂性至今尚未被人们彻底了解,因此至今混沌还没有一个统一的定义。目前,已有的定义是从不同的侧面反映了混沌运动的性质。

1. Li-Yorke 的混沌定义

Li-Yorke 定义是影响较大的混沌的数学定义,它是从区间映射出发进行定义的,该定义可描述如下。

Li-Yorke 定理:设 $f(x)$ 是 $[a, b]$ 上的连续自映射,若 $f(x)$ 有 3 周期点,则对任何正整数 n , $f(x)$ 有 n 周期点。

混沌定义(Li-Yorke):区间 I 上的连续自映射 $f(x)$,如果满足下面条件,便可确定它有混沌现象:

- (1) f 的周期点的周期无上界;
- (2) 闭区间 I 上存在不可数子集 S ,满足

(i) 对任意 $x, y \in S, x \neq y$ 时,

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} |f^n(x) - f^n(y)| > 0$$

(ii) 对任意 $x, y \in S$,

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} |f^n(x) - f^n(y)| = 0$$

(iii) 对任意 $x \in S$ 和 f 的任意周期点 y ,有

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} |f^n(x) - f^n(y)| > 0$$

根据上述定理和定义,对闭区间 I 上的连续函数 $f(x)$,如果存在一个周期为 3 的周期点时,就一定存在任何正整数的周期点,即一定出现混沌现象。用李天岩的话来说,只要有周期 -3 就“乱七八糟”的,什么周期都有。

该定义准确地刻画了混沌运动的几个重要特征:

- (1) 存在可数无穷多个稳定的周期轨道;

(2) 存在不可数无穷多个稳定的非周期轨道;

(3) 至少存在一个不稳定的非周期轨道。

2. Melnikov 的混沌定义

在二维系统中,最具开创性的研究是 Smale 马蹄理论。马蹄映射 F 定义于平面区域 D 上, $F(D) \subset D$, 其中 D 由一单位正方形 S 和两边各一个半圆构成。映射规则是不断把 S 纵向压缩(压缩比小于 $1/2$), 同时横向拉伸(拉伸比大于 2), 再弯曲成马蹄形后放回 D 中。Henon 映射就是马蹄映射的一个实例。已经证明, 马蹄映射的不变集是两个 Cantor 集之交, 映射在这个不变集上呈混沌态。因此, 如果在系统吸引子中发现了马蹄, 就意味着系统具有混沌。

由 Holmes 转引的 Melnikov 方法是对混沌的另一种严格描述。概括起来可表述为: 如果存在稳定流形和不稳定流形且这两种流形横截相交, 则必存在混沌。Melnikov 给出了判定稳定流形和不稳定流形横截相交的方法, 但这种方法只适合于近可积 Hamilton 系统。

3. Devaney 的混沌定义

在拓扑意义下, 混沌定义 (Devaney) 为: 设 V 是一度量空间, 映射 $f: V \rightarrow V$, 如果满足下面 3 个条件, 便称 f 在 V 上是混沌的。

(1) 对初始敏感依赖。存在 $\delta > 0$, 对任意的 $\epsilon > 0$ 和任意的 $x \in V$, 在 x 的 ϵ 邻域内存在 y 和自然数 n , 使得 $d(f^n(x), f^n(y)) > \delta$ 。

(2) 拓扑传递性。对 V 上的任意对开集 X, Y , 存在 $k > 0$, $f^k(X) \cap Y \neq \emptyset$ (如一映射具有稠轨道, 则它显然是拓扑传递的)。

(3) f 的周期点集在 V 中稠密。

对初值的敏感依赖性, 意味着无论 x 和 y 离得多近, 在 f 的作用下两者的距离都可能分开较大的距离, 并且在每个点 x 附近, 都可以找到离它很近而在 f 的作用下终于分道扬镳的点 y , 对这样的 f , 如果用计算机计算它的轨道, 任意微小的初值误差, 经过多次迭代后将导致计算结果的失败。

拓扑传递意味着任一点的邻域在 f 的作用之下将“遍撒”整个度量空间 V , 这说明 f 不可能细分或不可能分解为两个在 f 下不相互影响的子系统。

周期点集的稠密性, 表明系统具有很强的确定性和规律性, 决非混乱一片, 形似混乱而实则有序, 这正是混沌的耐人寻味之处。

1.1.2 混沌运动的基本特征

混沌运动是一种不稳定有限定常运动, 即为全局压缩和局部不稳定的运动, 或除了平衡、周期和准周期以外的有限定常运动。这里所谓有限定常运动, 指的是运动状态在某种意义上(以相空间的有限域为整体)不随时间而变化。这个定义指出了混沌运动的两个主要特征: 不稳定性(该性质可用平均 Lyapunov 指数精确刻画)和有限性。

混沌运动是确定性非线性系统所特有的复杂运动形态, 出现在某些耗散系统、不可积 Hamilton 保守系统和非线性离散映射系统中。如前所述, 至今科学上仍没有给混沌下一个完全统一的定义, 它的定常状态不是通常概念下确定性运动的三者状态: 静止(平衡)、周期运动和准周期运动, 而是局限于有限区域且轨道永不重复、性态复杂的运动。它有时被描述为具有无穷大周期的周期运动或貌似随机的运动等。与其他复杂现象相区别, 混沌运动有着自己独有的特征, 主要有:

(1) 有界性。混沌是有界的, 它的运动轨线始终局限于一个确定的区域, 这个区域称为混沌吸引域。无论混沌系统内部多么不稳定, 它的轨线都不会走出混沌吸引域。所以从整体上来说混沌系统是稳定的。

(2) 遍历性。混沌运动在其混沌吸引域内是各态历经的, 即在有限时间内混沌轨道经过混沌区内每一个状态点。

(3) 内随机性。一定条件下, 如果系统的某个状态可能出现, 也可能不出现, 该系统被认为具有随机性。一般来说当系统受到外界干扰时才产生这种随机性, 一个完全确定的系统(能用确定的微

分方程表示),在不受外界干扰的情况下,其运动状态也应当是确定的,即是可以预测的。不受外界干扰的混沌系统虽能用确定微分方程表示,但其运动状态却具有某些“随机”性,那么产生这些随机性的根源只能在系统自身,即混沌系统内部自发的产生这种随机性。当然,混沌的随机性与一般随机性是有很大区别的,天体力学中的平面三体问题很好地说明了这种内随机性。当用计算机计算 1 个小质量天体 m 在 2 个等量大天体 M_1 、 M_2 所在平面的垂线上运动时,来回摆动若干次以后, m 的行为变得随机起来,人们再也无法预测它的位置、速度及回归时间。混沌的内随机性实际就是它的不可预测性,对初值的敏感性造就了它的这一性质。同时也说明混沌是局部不稳定的。

(4) 分维性。是指混沌的运动轨线在相空间中的行为特征。混沌系统在相空间中的运动轨线,在某个有限区域内经过无限次折叠,不同于一般确定性运动,不能用一般的几何术语来表示,而分数维正好可以表示这种无限次的折叠。分维性表示混沌运动状态具有多叶、多层结构,且叶层越分越细,表现为无限层次的自相似结构。

(5) 标度性。是指混沌运动是无序中的有序态。其有序可以理解为:只要数值或实验设备精度足够高,总可以在小尺度的混沌区内看到其中有序的运动花样。

(6) 普适性。所谓普适性是指不同系统在趋向混沌态时所表现出来的某些共同特征,它不依具体的系统方程或参数而变。具体体现为几个混沌普通常数,如著名的 Feigenbaum 常数等。普适性是混沌内在规律性的一种体现。

(7) 统计特征,正的 Lyapunov 指数以及连续功率谱等。Lyapunov 指数是对非线性映射产生的运动轨道相互间趋近或分离的整体效果进行的定量刻画。对于非线性映射而言, Lyapunov 指数表示 n 维相空间中运动轨道沿各基向量的平均指数发散率,当 Lyapunov 指数小于零时,轨道间的距离按指数消失,系统运动状态对应于周期运动或不动点;当 Lyapunov 指数大于零时,则在