

● 非线性科学丛书 ●

混沌控制

胡 岗 萧井华 郑志刚 编著

上海科技教育出版社

本书出版由上海市新闻出版局
学术著作出版基金资助

非线性科学丛书

混沌控制

胡 岗 萧井华 郑志刚 编著

上海科技教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

混沌控制/胡 岗,萧井华,郑志刚编著. ——上海:上海科技教育出版社, 2000.12

(非线性科学丛书/郝柏林主编)

ISBN 7-5428-2250-0

I. 混… II. ①胡… ②萧… ③郑… III. 混沌学 - 控制论
IV. 0415.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 20420 号

非线性科学丛书

混 沌 控 制

胡 岗 萧井华 郑志刚 编著

上海科技教育出版社出版发行

(上海市冠生园路 393 号 邮政编码 200233)

各地新华书店经销 商务印书馆上海印刷厂印刷

开本 850 × 1168 1/32 印张 7 字数 181000

2000 年 12 月第 1 版 2000 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1 - 2 000

ISBN 7-5428-2250-0/O · 269 定价: (精装本) 16.00 元

内 容 提 要

混沌控制是当前混沌运动研究的一个新领域,是实现混沌应用的关键环节。本书系统地介绍了混沌控制与同步研究的基本思想和主要方法,内容包括反馈及非反馈混沌控制、混沌同步、时空混沌和时空模式的控制、混沌同步在加密通信中的应用以及混沌控制的实验及其他应用等等。本书内容通俗,适于对混沌运动有初步基础的读者,同时涉及当前研究的主要前沿,对该领域的研究人员也有一定启示。本书可供理工科大学高年级学生、研究生阅读,也可供大学教师及有关领域的科研人员参考。

Advanced Series in Nonlinear Science

Chaos Control

Hu Gang¹, Xiao Jinghua², Zheng Zhigang¹

¹Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

²Department of Basic Science, Beijing University of Post and
Telecommunications, Beijing 100876, China

Shanghai Scientific and Technological Education
Publishing House, SHANGHAI, 2000

非线性科学丛书编辑委员会

主 编：郝柏林

副主编：郑伟谋 吴智仁

编 委：(按姓氏笔画为序)

丁 鄂 江	文 志 英	朱 照 宣
刘 式 达	刘 寄 星	孙 义 燧
杨 清 建	李 邦 河	张 洪 钧
张 景 中	陈 式 刚	周 作 领
赵 凯 华	胡 岗	顾 雁
倪 皖 荪	徐 京 华	郭 柏 灵
陶 瑞 宝	谢 惠 民	蒲 富 恪
霍 裕 平	魏 荣 爵	

出版说明

现代自然科学和技术的发展,正在改变着传统的学科划分和科学研究的方法。“数、理、化、天、地、生”这些曾经以纵向发展为主的基础学科,与日新月异的新技术相结合,使用数值、解析和图形并举的计算机方法,推出了横跨多种学科门类的新兴领域。这种发展的一个重要特征,可以概括为“非”字当头,即出现了以“非”字起首而命名的一系列新方向和新领域。其中,非线性科学占有极其重要的位置。这决非人们“想入非非”,而是反映了人类对自然界认识过程的螺旋式上升。

曾几何时,非线性还被人们当作个性极强,无从逾越的难题。每一个具体问题似乎都要求发明特殊的算法,运用新颖的技巧。诚然,力学和数学早就知道一批可以精确求解的非线性方程,物理学也曾经严格地解决过少数非平庸的模型。不过,这些都曾是稀如凤毛麟角的“手工艺”珍品,人们还没有悟出它们的普遍启示,也没有看到它们之间的内在联系。

20世纪60年代中期,事情从非线性现象的两个极端同时发生变化。一方面,描述浅水波运动的一个偏微分方程的数值计算,揭示了方程的解具有出奇的稳定和保守性质。这启发人们找到了求解一大类非线性偏微分方程的普遍途径,即所谓“反散射”方法。反散射方法大为扩展了哈密顿力学中原有的可积性概念,反映了这类方程内秉的对称和保守性质。到了80年代,反散射方法推广到量子问题,发现了可积问题与统计物理中严格可解模型的联系。

60年代初期还证明了关于弱不可积保守系统普遍性质的KAM定理。于是,非线性问题的可积的极端便清楚勾划出来,成为一个广泛的研究领域。虽然这里的大多数进展还只限于时空维数较低的系统,但它对非线性科学发展的促进作用是不可估量的。

另一方面,在“不可积”的极端,对KAM定理条件的“反面文章”,揭示了保守力学系统中随机性运动的普遍性,而在耗散系统中则发现了一批奇怪吸引子和混沌运动的实例。这些研究迅速地融成一片,一些早年被认为是病态的特例也在新的观点下重新认识。原来不含有任何外来随机因素的完全确定论的数学模型或物理系统,其长时间行为可能对初值的细微变化十分敏感,同投掷骰子一样地随机和不可预测。然而,混沌不是无序,它可能包含着丰富的内部结构。

同时,由于计算科学特别是图形技术的长足进步,人们得以理解和模拟出许多过去无从下手研究的复杂现象。从随机与结构共存的湍流图象,到自然界中各种图样花纹的选择与生长,以及生物形态的发生过程,都开始展现出其内在的规律。如果说,混沌现象主要是非线性系统的时间演化行为,则这些复杂系统要研究的是非线性地耦合到一起的大量单元或子系统的空间组织或时空过程。标度变换下的不变性、分形几何学和重正化群技术在这里起着重要作用。

在由上述种种方面汇成的非线性科学洪流中,许多非线性数学中早已成熟的概念和方法开始向其他学科扩散,同时也提出了新的深刻的数学问题。物理学中关于对称和守恒,对称破缺,相变和重正化群的思想,也在日益增多的新领域中找到应用。“非线性”一词曾经是数学中用以区别于“线性”问题的术语,非线性科学正在成为跨学科的研究前沿。各门传统学科中都有自己的非线性篇章,非线性科学却不是这些篇章的总和。非线性科学揭示各种非线性现象的共性,发展处理它们的普适方法。

这样迅猛发展的跨学科领域,很难设想用少数专著加以概括,

何况学科发展的不少方面还未成熟到足以总结成书的地步。于是,有了动员在前沿工作的教学和研究人員,以集体力量撰写一套“非线性科学丛书”的想法。在上海科技教育出版社的大力支持下,这一计划得以付诸实现。

这套“非线性科学丛书”不是高级科普,也不是大块专著。它将致力于反映非线性科学各个方面的基本内容和最新进展,帮助大学高年级学生、研究生、博士后人員和青年教师迅速进入这一跨学科的新领域,同时为传统自然科学和工程技术领域中的研究和教学人員更新知识提供自学教材。非线性科学的全貌将由整套丛书刻划,每册努力讲清一个主题,一个侧面,而不求面面俱到,以免失之过泛。在写作风格上,作者们将努力深入浅出,图文并茂,文献丰富;力求有实质内容,无空洞议论,以真刀真枪脚踏实地武装读者。从读者方面,自然要求具备理工科大学本科的数学基础,和读书时自己主动思索与推导的习惯。

“非线性科学丛书”的成功,取决于读者和作者的支持。我们衷心欢迎批评和建议。

郝柏林

1992年4月30日于北京中关村

Abstract

Chaos control is a new field in explorations of chaotic motions, and it is crucial in applications of chaos. In this book, fundamental ideas and main methods in exploring chaos control and synchronization are systematically introduced, including feedback and non – feedback chaos control, chaos synchronization, control of spatiotemporal chaos as well as spatiotemporal patterns, applications of chaos synchronization in secure communications, experiments on chaos control, and other applications. Readership includes senior undergraduate students, graduate students, post-doctoral fellows, university teachers, and researchers in related fields.

目 录

非线性科学丛书出版说明

第 1 章 引论	1
第 2 章 反馈方法控制混沌	8
§1 OGY 控制及其推广	8
§ 1.1 OGY 控制	8
§ 1.2 线性控制的可控性条件	16
§2 连续变量反馈控制混沌	20
§ 2.1 连续反馈控制的稳定性分析	21
§ 2.2 利用连续变量反馈控制混沌的实例	25
§3 时间延迟反馈控制	31
§ 3.1 时间延迟反馈控制	31
§ 3.2 延迟反馈控制的局限性	37
§4 混沌打靶	42
§ 4.1 一维映射中的混沌打靶	43
§ 4.2 可用一维迭代近似的混沌系统的打靶问题	46
§ 4.3 二维映射中的混沌打靶	49
第 3 章 非反馈信号控制混沌	54
§5 用周期信号控制混沌	55
§ 5.1 周期信号控制混沌	55
§ 5.2 对非自治系统混沌的位相控制	58
§ 5.3 用周期信号控制自治系统混沌	63
§6 混沌系统中态的输运和迁移	65
§ 6.1 混沌态的输运控制	66
§ 6.2 输运控制实例	69

§ 6.3 用迁移控制选择吸引子	72
第 4 章 混沌同步	78
§ 7 混沌运动的精确同步	79
§ 7.1 替代信号驱动混沌同步	79
§ 7.2 反馈驱动混沌同步	82
§ 8 广义混沌同步	86
§ 8.1 广义混沌同步	86
§ 8.2 同步混沌的连续性和可微性	90
§ 9 驱动信号与混沌响应系统的相同步	98
§ 10 混沌系统的互同步现象	104
§ 10.1 相同混沌振子的互同步	104
§ 10.2 互相耦合的不同混沌系统的混沌互同步	110
第 5 章 时空混沌的控制与同步	115
§ 11 用局域信号控制耦合映射系统的时空混沌	116
§ 12 复金兹柏格-朗道方程中时空混沌的控制	124
§ 12.1 模型	124
§ 12.2 稳定性分析	127
§ 13 时空混沌的控制效率	134
§ 14 时空混沌的同步	144
§ 15 时空混沌控制的一些其他方法	148
第 6 章 混沌控制实验与应用	151
§ 16 力学系统的混沌控制	151
§ 16.1 混沌控制	151
§ 16.2 混沌打靶	154
§ 17 激光系统的混沌控制	156
§ 17.1 激光输出的稳定性控制	156
§ 17.2 非反馈方法控制空间结构	159
§ 18 等离子体系统中的混沌控制	163
第 7 章 同步混沌在通信中的应用	167

§ 19 通信系统的基本结构和混沌通信	167
§ 19.1 加密通信的基本结构	167
§ 19.2 混沌序列和同步混沌在通信中的应用	169
§ 20 利用加性掩盖方法的低维混沌通信系统	171
§ 21 利用函数调制解调的混沌通信	177
§ 22 同步时空混沌的多路扩频通信系统	181
§ 23 同步混沌的光通信系统	189
科学家中外译名对照表	194
参考文献	195

Contents

Preface

Chapter 1 Introduction 1

Chapter 2 Feedback control of chaos 8

§ 1 OGY control and its extensions 8

§ 1.1 OGY control 8

§ 1.2 Linear analysis for controllability condition 16

§ 2 Chaos control by using continuous feedback 20

§ 2.1 Stability analysis of continuous feedback control .. 21

§ 2.2 Examples 25

§ 3 Time-delay feedback control 31

§ 3.1 Time-delay feedback control 31

§ 3.2 Limitation of time-delay control 37

§ 4 Targeting in chaotic systems 42

§ 4.1 Targeting in 1D chaotic maps 43

§ 4.2 Targeting in chaotic systems reducible to 1D maps 46

§ 4.3 Targeting in 2D chaotic maps 49

Chapter 3 Non-feedback control of chaos 54

§ 5 Chaos control by applying periodic signals 55

§ 5.1 Chaos control by using periodic signals 55

§ 5.2 Phase control of non-autonomous chaotic systems 58

§ 5.3 Chaos control in autonomous systems by using periodic signals 63

§ 6	Entrainment and migration control of chaos.....	65
§ 6.1	Entrainment control of chaos	66
§ 6.2	Examples	69
§ 6.3	Attractor selection by applying migration control	72
Chapter 4	Chaos synchronization.....	78
§ 7	Exact synchronization of chaotic motions	79
§ 7.1	Chaos synchronization by replacing variables by signals.....	79
§ 7.2	Chaos synchronization by feedback drivings.....	82
§ 8	Generalized synchronization of chaos.....	86
§ 8.1	Generalized chaos synchronization	86
§ 8.2	Continuity and differentiability of chaos synchronization.....	90
§ 9	Phase synchronization between driving signals and response systems.....	98
§ 10	Mutual synchronization of chaotic oscillators.....	104
§ 10.1	Mutual synchronization of identical chaotic oscillators	104
§ 10.2	Mutual synchronization of different chaotic systems	110
Chapter 5	Control and synchronization of spatiotem- poral chaos	115
§ 11	Spatiotemporal chaos control in coupled map lattices by applying local injections.....	116
§ 12	Spatiotemporal chaos control in complex Ginzburg- Landau equations	124
§ 12.1	Model.....	124
§ 12.2	Stability analysis	127

§ 13	Efficiency of spatiotemporal chaos control.....	134
§ 14	Synchronization of spatiotemporal chaos.....	144
§ 15	Some other methods for spatiotemporal chaos control.....	148
Chapter 6	Experiments and applications of chaos control.....	151
§ 16	Chaos control in mechanical systems.....	151
§ 16.1	Chaos control	151
§ 16.2	Targeting in chaotic systems.....	154
§ 17	Chaos control in optical systems.....	156
§ 17.1	Stability control of laser output.....	156
§ 17.2	Non-feedback control of patterns	159
§ 18	Chaos control in plasma systems.....	163
Chapter 7	Applications of chaos synchronization in secure communications.....	167
§ 19	Basic structure of communication systems and chaos communications	167
§ 19.1	Basic structure of secure communications.....	167
§ 19.2	Applications of chaotic sequences and chaos synchronization in communications.....	169
§ 20	Low-dimensional chaotic communication systems of additive masking	171
§ 21	Chaos communications by using functional encoding and decoding	177
§ 22	Multi-channel spread-spectrum communications of spatiotemporal chaos synchronization.....	181
§ 23	Optical communication system of chaos synchro- nization	189
Reference		195

第 1 章

引 论

20 世纪下半叶,非线性科学得到了蓬勃的发展. 其中,对混沌的研究占了极大份额. 半个世纪以来,人们对混沌运动的规律及其在自然科学各个领域的表现已经有了十分丰富的认识^{[1]~[8]}. 在自然界和人类社会中广泛存在混沌这一事实已被普遍接受,而如何应用混沌研究成果为人类服务已成为非线性科学发展提出的重要课题之一. 一方面,混沌的应用将直接激励新的研究热情,另一方面,混沌的应用提出的新问题将会有力地促进混沌研究的深入. 最重要的是作为自然科学研究的重大成果其最终目的,总是离不开成功的应用.

由于混沌运动具有初值敏感性和长时间发展趋势的不可预见性,混沌控制就成为混沌应用的关键环节. 1989 年胡柏勒(A. Hubler)发表了控制混沌的第一篇文章^[9]. 1990 年奥特(E. Ott)、格锐柏基(C. Grebogi)和约克(J.A. Yorke)提出的控制混沌的思想(OGY 控制)产生广泛响应^[10]. 同年,佩考拉(L.M. Pecora)和卡罗尔(T.L. Carroll)提出混沌同步的思想^[11],接着迪托(W.L. Ditto)和罗意(R. Roy)等完成了控制混沌的实验^{[12], [13]}. 以后十年,混沌控制与混沌同步的研究得到了蓬勃的发展,这一方向迅速成了混沌研究领域的重要热点. 其间,人们提出了各种控制混沌的方法^{[14]~[44]},并在光学、等离子体、化学反应、流体、电子回路、人工神经网络、生物系统等大量实验和应用中得到验证^{[45]~[60]}. 目前,人们对混沌控制的广义的认识是:人为并有效地影响混沌系统,使之发展到实践需要的状态. 这包括:(1)混沌运动有害时,成功地抑制混沌;