

# 混沌控制、同步的理论与方法及其应用

HUNDUN KONGZHI TONGBU DE LILUN YU  
FANGFA JIQI YINGYONG

■ 罗晓曙 著



GUANGXI NORMAL UNIVERSITY PRESS

广西师范大学出版社

0415. 5/15  
2007

# 混沌控制、 同步的理论与方法及其应用

■ 罗晓曙 著



GUANGXI NORMAL UNIVERSITY PRESS

广西师范大学出版社

· 桂林 ·

### 图书在版编目 (CIP) 数据

混沌控制、同步的理论与方法及其应用 / 罗晓曙著.  
桂林: 广西师范大学出版社, 2007.7  
ISBN 978-7-5633-6632-3

I. 混… II. 罗… III. 混沌学—控制论 IV. O415.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 105619 号

广西师范大学出版社出版发行

( 广西桂林市中华路 22 号 邮政编码: 541001 )  
( 网址: <http://www.bbtpress.com> )

出版人: 肖启明

全国新华书店经销

柳州市柳江商标装潢印刷厂印刷

( 柳江县拉堡镇柳东路 45 号 邮政编码: 545100 )

开本: 787 mm × 1 092 mm 1/16

印张: 21 字数: 534 千字

2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷

印数: 001~500 册 定价: 32.00 元

如发现印装质量问题, 影响阅读, 请与印刷厂联系调换。

## 内容简介

混沌控制与同步是 20 世纪 90 年代以来非线性科学研究领域的前沿课题之一,其研究成果不仅丰富了混沌理论,而且在保密通信、非线性电路、人体生命科学、激光、等离子体和强流离子束等众多的学科领域已经取得初步的成果并展现出了十分诱人的应用前景。本书是关于混沌控制与同步及其应用研究的一部专著,是作者多年在这一研究领域所做工作的总结和深化。书中系统介绍了混沌的定义、混沌理论的发展历史、混沌控制的基本理论与方法、混沌控制的目标与含义及其当前国内外的研究动态与趋势,着重介绍了作者及其合作者提出的一系列混沌控制与同步的理论、方法及控制仿真结果,同时也介绍了作者在复杂网络、混沌经济学建模方面所做的工作。本书可供物理、电子和通信技术类专业的大学本科高年级学生、研究生和相关科研人员阅读和参考。

## 前 言

半个世纪以来,非线性科学得到了蓬勃的发展,混沌现象的理论与实验研究成为半个世纪以来非线性科学研究中的主要方向。随着研究的深入,人们揭示出混沌的特征和规律性也越来越多,至今我们知道的基本属性包括非周期性、不稳定性、长期不可预测性、内随机性、普适性、标度性、非整数维数、奇怪吸引子和无穷嵌套的自相似几何结构等。正是因为混沌具有上述的奇异特性和极端复杂性,长期在人们的头脑中形成了这样一种错误的观念:即混沌是不可控制的,不可靠的,这一观念阻碍了人们对混沌特性进行利用的研究。但是,混沌的利用与控制 在 20 世纪 80 年代末出现了转机。先是胡柏勒(A. Hubler)在 1988 年发表控制混沌的第一篇文章,随后在 1990 年奥特(E. Ott)、格锐柏基(C. Grebogi)和约克(J. A. Yoke)提出参数微扰法混沌控制的思想,他们的开创性工作立刻引起广泛关注,并迅速在全球范围内兴起了混沌控制与同步的研究热潮。

经过国内外科学工作者十余年的努力,非线性系统的混沌控制与同步研究已经有了很大的发展,它不仅在理论上已初步形成了自己的完整体系,而且在保密通信、非线性电路、人体生命科学、激光、等离子体和强流离子束等众多的学科领域已经取得初步的成果并展现出了十分诱人的应用前景。目前已提出的混沌控制方法从控制的原理上可分为微扰反馈控制法(闭环控制)和无反馈控制法(开环控制)两种。前者反馈的对象可以为系统的参数、系统变量等。对不同对象的微扰反馈,则形成不同的控制方法。而无反馈控制方法,大多与所需的轨道无关,因而当系统达到控制目标时,输入的控制信号并不趋于零,受控后的系统可产生新的稳定动力学行为(也可以是原系统内的不稳定周期轨道),它们的特点是通过外界作用抑制混沌,以达到控制目标。

本书主要介绍作者近十年来研究非线性动力学系统中的混沌、超混沌和时空混沌的控制与同步及其在强流离子束和保密通信中的应用成果。全书共十五章:第一章介绍混沌理论的发展历史,归纳和总结了现有的混沌概念、定义和混沌的定量描述,重点评述了十余年来国内外几种具有代表性的混沌控制与同步方法,指出了该领域的研究动态和国内外的发展趋势。第二章提出了用多级时间延迟反馈、时空延迟反馈控制耦合映象格子中的时空混沌,给出了实现时空不动点稳定控制的条件,讨论了被控时空周期轨道与控制参数之间的关系。第三章介绍了强流离子束的束晕—混沌理论,重点介绍了束晕—混沌的特性及其产生的五种主要的物理机制,分析了实际加速器的周期性聚焦磁场,给出了能更准确地反映周期性聚焦磁场的余弦函数的曲线形式,并得出了混沌程度与磁场的幅度和变化频率的关系。第四章介绍加速器外部磁场开关控制、自适应调整控制等方法控制强流离子加速器中的束晕—混沌。这两种方法能有效实现五种不同初始分布离子

束的束晕—混沌控制,获得了无束晕再生现象的理想结果。第五章介绍数字滤波、相空间压缩、延迟反馈等系统变量的连续反馈实现非线性系统的混沌和超混沌控制的方法。第六章介绍系统变量和参数的脉冲反馈控制混沌和超混沌的方法,脉冲控制的优点是消耗的能量少,从而减少了控制代价,使其易于在工程上实现。第七章研究将经典和现代控制理论中的一些控制方法应用于混沌和超混沌的控制。首先,提出了应用比例微分控制器进行混沌控制的方法;其次,研究了混沌系统的非线性自适应控制法,其优点是不需要等待系统进入不动点轨道的邻域时加入控制,控制时刻可以任意加入;再次,提出了基于最小能量和预测控制的混沌控制方法,不仅获得了很好的控制结果,而且最小能量控制法能解释目前一些主要混沌控制方法的物理机制,因而具有一定普适意义;最后,研究了自适应控制方法控制分段光滑系统中的混沌问题。第八章提出了参数调节和状态反馈的混合控制混沌的方法,有效地实现了离散非线性系统的倍周期分岔控制和混沌控制。它的控制性能优于基于参数微调的 OGY 方法。第九章介绍用正弦信号调制、参数开关调制控制 Chua's 电路中混沌的方法,并且设计出了电路实验仿真控制电路。第十章介绍了实现多涡卷吸引子的方法和电路,并研究了比例微分控制器控制多涡卷 Chua's 电路的混沌问题。第十一章首先介绍激光系统的混沌动力学行为及其控制与同步研究进展,然后研究用变结构控制和自适应控制等方法实现半导体激光器的混沌控制。第十二章首先介绍了混沌保密通信的一些基本方法和目前取得的主要进展,然后重点研究利用混沌数字保密通信和用超混沌同步实现保密通信的问题。第十三章首先介绍激光器的非线性动力学模型、性质,然后重点介绍激光器的混沌控制与同步的研究结果。第十四章介绍复杂网络的基本概念、典型复杂网络的模型和超混沌复杂网络同步的研究成果。第十五章为同类企业的投资竞赛建立了一个离散非线性动力学模型,然后深入研究了该模型不动点的稳定性及各种分岔与混沌行为,并分析了系统的非线性动力学性质所表现出的经济学意义。

由于本人学识水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,热忱欢迎读者批评指正。

作者愿借此机会向方锦清教授、汪秉宏教授、陈关荣教授和孔令江教授表示衷心的感谢,感谢他们长期以来给予本人研究工作的指导和帮助。同时作者要十分感谢课题组的翁甲强教授、唐国宁教授,感谢他们多年来的密切合作和提供的丰富资料。在本书的撰写过程中,我历届的研究生蒋品群、邹艳丽、贤燕华、黄国现、姜德平、黄良玉、赵益波及协作指导的研究生高远、张平伟等结合学位论文课题完成的混沌控制与同步及其应用研究的工作,也丰富了本书的内容,在此向他们表示深深的感谢。

最后,感谢国家自然科学基金、广西自然科学基金、广西新世纪“十百千人才专项资金”和广西师范大学出版基金的资助。

本书献给我的妻子蒋月红女士,儿子罗源和女儿罗文雁。

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
§ 1.1 引 言 .....	1
§ 1.2 混沌动力学 .....	2
1.2.1 混沌动力学的发展历史与趋势 .....	2
1.2.2 通向混沌的道路 .....	5
1.2.3 混沌的定义 .....	6
1.2.4 混沌的度量 .....	7
1.2.5 混沌理论的科学意义 .....	12
§ 1.3 混沌控制 .....	13
1.3.1 混沌控制概述 .....	13
1.3.2 OGY 方法 .....	15
1.3.3 变量连续反馈控制方法 .....	17
1.3.4 自适应控制法 .....	20
§ 1.4 混沌同步 .....	21
1.4.1 概述 .....	21
1.4.2 混沌同步的定义 .....	22
1.4.3 驱动—响应同步方法 .....	22
1.4.4 主动—被动同步方法 .....	23
1.4.5 变量反馈微扰同步方法 .....	24
1.4.6 基于相互耦合的同步方法 .....	25
1.4.7 自适应同步方法 .....	26
1.4.8 混沌的广义同步 .....	27
§ 1.5 混沌控制与同步的应用领域与前景 .....	28
§ 1.6 当前国内外的研究动态和值得研究的方向 .....	29
参考文献 .....	32
<b>第二章 时空混沌的控制</b> .....	39
§ 2.1 引 言 .....	39

§ 2.2	描述时空系统的模型 .....	39
§ 2.3	两种时空混沌的控制方法介绍 .....	41
2.3.1	非线性反馈控制 CML 模型中的时空混沌 .....	41
2.3.2	定点注入法控制 CML 中的时空混沌 .....	42
§ 2.4	延迟反馈控制耦合映射格子中的时空混沌 .....	42
2.4.1	多级时间延迟反馈法 .....	42
2.4.2	时空延迟反馈控制法 .....	45
§ 2.5	级联控制法控制耦合映射格子中的时空混沌 .....	46
§ 2.6	本章小结 .....	47
	参考文献 .....	48
<b>第三章</b>	<b>强流离子束的束晕—混沌理论 .....</b>	<b>50</b>
§ 3.1	引言 .....	50
§ 3.2	束晕—混沌形成的物理机制 .....	51
3.2.1	空间电荷的非线性效应 .....	51
3.2.2	丝化效应 .....	52
3.2.3	粒子—束核相互作用 .....	52
3.2.4	共振覆盖导致混沌 .....	53
3.2.5	量子混沌 .....	54
3.2.6	束晕—混沌复杂性的主要特点 .....	54
§ 3.3	K-V 束运动的包络方程推导 .....	55
3.3.1	实验坐标系下的单离子运动方程 .....	55
3.3.2	Larmor 坐标系下的离子运动方程 .....	57
3.3.3	K-V 分布离子束的离子运动方程和包络方程的推导及相关概念的定 义 .....	59
§ 3.4	周期性聚焦磁场强度表达式的确定及其束晕—混沌分析 .....	64
3.4.1	周期性聚焦磁场强度表达式的确定 .....	64
3.4.2	数值结果 .....	65
§ 3.5	本章小结 .....	66
	参考文献 .....	66
<b>第四章</b>	<b>束晕—混沌的控制 .....</b>	<b>68</b>
§ 4.1	束晕—混沌的外部磁场开关控制 .....	68
4.1.1	离子束包络方程的数值求解和动力学性质 .....	69
4.1.2	控制方法 .....	70
4.1.3	受控方程的数值模拟结果 .....	71
4.1.4	控制机理分析 .....	71



4.1.5	控制方法在多粒子模型中的数值模拟与分析 .....	72
§ 4.2	<b>束晕—混沌的外部磁场自适应调整控制</b> .....	74
4.2.1	控制方法 .....	75
4.2.2	束包络方程控制的模拟结果 .....	75
4.2.3	控制方法在多粒子模型中的数值模拟与分析 .....	76
§ 4.3	<b>束晕—混沌的神经网络自适应控制</b> .....	79
4.3.1	多粒子情况的束晕—混沌神经网络控制 .....	79
4.3.2	单粒子情况束晕—混沌的神经网络控制 .....	82
§ 4.4	<b>本章小结</b> .....	84
	<b>参考文献</b> .....	84
<b>第五章</b>	<b>系统变量的连续反馈控制混沌和超混沌</b> .....	85
§ 5.1	<b>数字滤波法控制混沌</b> .....	85
5.1.1	控制方法 .....	85
5.1.2	数值研究例子及控制结果 .....	86
5.1.3	结论与讨论 .....	89
§ 5.2	<b>相空间压缩法控制混沌与超混沌</b> .....	90
5.2.1	控制方法 .....	90
5.2.2	控制的数值计算结果 .....	90
5.2.3	控制机理分析 .....	92
5.2.4	结论 .....	94
§ 5.3	<b>系统变量的延迟反馈法控制混沌</b> .....	94
5.3.1	控制方法 .....	94
5.3.2	仿真模型及控制结果 .....	95
5.3.3	控制机理分析 .....	97
5.3.4	结论与讨论 .....	97
§ 5.4	<b>系统变量的前馈神经网络变换法控制混沌</b> .....	98
5.4.1	控制方法 .....	98
5.4.2	数值模拟 .....	99
5.4.3	控制机理讨论 .....	102
5.4.4	结论 .....	103
§ 5.5	<b>本章小结</b> .....	103
	<b>参考文献</b> .....	103
<b>第六章</b>	<b>系统变量和参数的脉冲反馈控制混沌和超混沌</b> .....	104
§ 6.1	<b>引言</b> .....	104
§ 6.2	<b>正比于系统变量的脉冲控制混沌法</b> .....	104

§ 6.3	系统变量的随机比例脉冲控制混沌方法	106
6.3.1	控制方法	106
6.3.2	控制模型和控制结果	106
6.3.3	噪声对控制结果的影响讨论	108
6.3.4	控制机理分析	108
6.3.5	结论	109
§ 6.4	正比于系统参数的脉冲控制混沌法	109
6.4.1	控制方法	109
6.4.2	控制模型与控制结果	110
6.4.3	PP-SP 法与 PP-SV 法的等效性分析	112
6.4.4	结论	112
§ 6.5	脉冲非线性状态反馈法控制混沌	113
6.5.1	研究模型	113
6.5.2	系统稳定控制的理论分析	114
6.5.3	脉冲控制策略	115
6.5.4	数值控制结果	116
6.5.5	结论与讨论	117
§ 6.6	本章小结	117
	参考文献	118
<b>第七章</b>	<b>经典和现代控制理论与方法应用于混沌控制</b>	<b>120</b>
§ 7.1	引言	120
§ 7.2	混沌系统的比例微分控制	121
7.2.1	控制方法	121
7.2.2	自治混沌系统的控制仿真	121
7.2.3	非自治系统的混沌控制	123
7.2.4	控制结果分析	125
§ 7.3	离散混沌系统的自适应控制	125
7.3.1	线性自适控制方法	126
7.3.2	非线性自适控制方法	126
7.3.3	控制实例	127
§ 7.4	混沌系统的最小能量控制	128
7.4.1	最小能量控制法的基本思想	129
7.4.2	广义能量函数的构造方法	129
7.4.3	控制算法的步骤	130
7.4.4	控制实例	130
7.4.5	控制混沌的一种统一的物理机制	132

§ 7.5 混沌系统的预测反馈控制 .....	133
7.5.1 控制原理和稳定性分析 .....	134
7.5.2 混沌 Lorenz 系统的控制及稳定性分析 .....	134
7.5.3 Chua's 混沌电路系统的控制及稳定性分析 .....	135
7.5.4 数值研究结果 .....	136
7.5.5 结论 .....	138
§ 7.6 DC-DC 开关功率变换器的自适应控制 .....	138
7.6.1 引言 .....	138
7.6.2 连续系统的自适应控制方法 .....	139
7.6.3 buck 变换器的动力学特性及其混沌的自适应控制 .....	140
7.6.4 结论 .....	142
§ 7.7 本章小节 .....	142
参考文献 .....	143
<b>第八章 混合策略控制离散非线性系统的倍周期分岔和混沌</b> .....	<b>145</b>
§ 8.1 引言 .....	145
§ 8.2 动力学状态反馈控制法 .....	145
§ 8.3 参数调节和动力学状态反馈法 .....	146
8.3.1 控制方法 .....	146
8.3.2 控制 Logistic 映象的倍周期分岔和混沌 .....	147
8.3.3 Henon 映射的混沌控制 .....	150
§ 8.4 本章小结 .....	151
参考文献 .....	152
<b>第九章 参数调制和变量微分反馈控制 Chua's 电路的混沌</b> .....	<b>154</b>
§ 9.1 引言 .....	154
§ 9.2 参数共振微扰控制混沌法 .....	154
§ 9.3 正弦信号调制参数控制变型 Chua's 电路中的混沌 .....	156
9.3.1 变型 Chua's 电路的模型 .....	156
9.3.2 控制方法和控制结果 .....	157
9.3.3 控制结果的特点分析 .....	157
§ 9.4 开关信号调制参数控制 Chua's 电路中的混沌 .....	158
9.4.1 Chua's 自治电路的状态方程与动力学性质 .....	158
9.4.2 参数开关调制控制方法及控制结果 .....	160
9.4.3 电路仿真控制结果 .....	161
9.4.4 控制机理分析 .....	162

§ 9.5	开关信号调制参数控制超混沌电路 .....	163
9.5.1	控制模型 .....	163
9.5.2	控制方法和数值模拟结果 .....	164
9.5.3	电路仿真控制结果 .....	165
§ 9.6	状态变量的微分反馈控制 Chua's 电路的混沌 .....	167
9.6.1	控制方法及其理论分析 .....	168
9.6.2	控制结果 .....	169
9.6.3	控制电路的设计与仿真 .....	170
9.6.4	脉冲控制电路的设计与控制仿真 .....	172
§ 9.7	状态变量的比例微分反馈控制超混沌 Chua's 电路 .....	173
9.7.1	控制方法 .....	173
9.7.2	控制超混沌 Chua's 电路的数值模拟 .....	175
9.7.3	控制结果讨论 .....	176
§ 9.8	本章小结 .....	176
	参考文献 .....	177
<b>第十章</b>	<b>多涡卷 Chua's 的动力学行为与混沌控制 .....</b>	<b>180</b>
§ 10.1	引言 .....	180
§ 10.2	网格多涡卷吸引子家族 .....	180
10.2.1	1D 网格吸引子 .....	180
10.2.2	2D 网格吸引子 .....	182
10.2.3	3D 网格吸引子 .....	183
§ 10.3	比例微分法控制 $n$ 涡卷 Chua's 电路的混沌 .....	184
10.3.1	$n$ 涡卷 Chua's 电路的状态方程及其平衡点分类 .....	184
10.3.2	控制方法及理论分析 .....	185
10.3.3	控制仿真结果 .....	187
§ 10.4	一阶低通滤波器法控制 $n$ 涡卷 Chua's 电路的混沌 .....	188
10.4.1	控制方法和控制结果 .....	188
10.4.2	结论 .....	192
§ 10.5	本章小结 .....	193
	参考文献 .....	193
<b>第十一章</b>	<b>混沌、超混沌系统的同步与广义同步 .....</b>	<b>195</b>
§ 11.1	超混沌 LC 振荡电路的单向线性耦合同步 .....	195
11.1.1	四阶 Chua's 超混沌电路的线性单向耦合同步 .....	196
11.1.2	超混沌振荡器的单变量单向线性耦合同步的电路实验仿真 .....	200
11.1.3	结论 .....	201

§ 11.2	超混沌振荡器的单变量单向随机耦合同步	201
11.2.1	四阶超混沌振荡器	201
11.2.2	单变量单向连续耦合同步的严格数学证明	203
11.2.3	单变量单向随机耦合同步	204
11.2.4	同步方法的电路仿真	206
11.2.5	结论和讨论	208
§ 11.3	超混沌振荡电路的广义同步	208
11.3.1	四维超混沌振荡电路的状态方程及广义同步条件	209
11.3.2	超混沌广义同步的数值模拟	209
11.3.3	结论	213
§ 11.4	双向耦合混沌系统的广义同步	213
11.4.1	符号动力学分析与条件熵	213
11.4.2	数值模拟结果及分析	214
11.4.3	结论	217
§ 11.5	六维超混沌 Chua's 电路的比例同步	218
11.5.1	超混沌 Chua's 电路的状态方程与比例同步条件	218
11.5.2	数值模拟结果	219
11.5.3	状态反馈方法加速比例同步	220
§ 11.6	基于自适应同步的超混沌系统参数辨识	222
11.6.1	自适应同步的参数辨识原理	222
11.6.2	数值模拟结果	223
11.6.4	结论	226
§ 11.7	本章小结	226
	参考文献	226
<b>第十二章 基于混沌和超混沌同步的保密通信</b>		229
§ 12.1	混沌同步用于保密通信的理论依据和分类	229
12.1.1	混沌同步用于保密通信的理论依据	229
12.1.2	混沌保密通信的分类	230
§ 12.2	混沌移位键控(CSK)	231
§ 12.3	基于混沌渐进同步的数字保密通信方案	233
12.3.1	驱动—响应混沌同步方法	233
12.3.2	二进制幅度键控的混沌数字保密通信方法	234
12.3.3	研究例子与结果	235
12.3.4	发射信号的相空间重构	237
12.3.5	结论	237

§ 12.4	基于超混沌 Chua's 电路的广义同步的保密通信	237
12.4.1	保密通信方案	237
12.4.2	结论	238
§ 12.5	超混沌电路注入式保密通信	239
12.5.1	保密通信方案	239
12.5.2	数值模拟结果	240
12.5.3	发射信号的相空间重构	242
12.5.4	结论	243
§ 12.6	基于状态观测器的超混沌保密通信系统的设计方法	244
12.6.1	设计方法	244
12.6.2	数值模拟结果	245
12.6.3	结论	246
§ 12.7	混沌保密通信与传统通信的比较	248
§ 12.8	当前混沌保密通信存在的问题	249
§ 12.9	本章小结	250
	参考文献	250

### 第十三章 激光系统的混沌动力学行为及其控制与同步 253

§ 13.1	激光的产生及其发展	253
§ 13.2	激光器的分类	254
§ 13.3	激光系统的混沌动力学行为	255
13.3.1	洛伦兹—哈肯激光模型的混沌动力学行为	256
13.3.2	半导体激光器的混沌动力学行为	257
13.3.3	CO <sub>2</sub> 激光器的混沌动力学行为	260
§ 13.4	激光混沌的控制	261
13.4.1	引言	261
13.4.2	延时反馈控制法	262
13.4.3	激光系统的单色性控制	263
13.4.4	滑模变结构控制法	264
13.4.5	滑模变结构控制外腔反馈式半导体激光器的混沌	265
13.4.6	电流调制半导体激光系统的混沌的自适应控制	267
§ 13.5	激光混沌同步及其在保密通信中的应用	270
13.5.1	光注入反馈同步法	270
13.5.2	变量耦合同步法	271
§ 13.6	用耦合强度周期变化的双向耦合法实现储存环型自由电子激光器的混沌同步	272
13.6.1	储存环型自由电子激光器的混沌动力学特性	273

13.6.2	耦合强度周期变化的双向耦合法实现 SRFEL 的混沌同步	274
13.6.3	结论与讨论	276
§ 13.7	激光混沌控制与同步的应用前景	277
参考文献		278
<b>第十四章</b>	<b>复杂动力网络的模型及其同步</b>	<b>282</b>
§ 14.1	引言	282
§ 14.2	复杂网络的基本概念及典型网络介绍	283
14.2.1	复杂网络的定义、研究方法	283
14.2.2	网络的基本概念、统计参数及结构参数	283
14.2.3	几种复杂网络的数学模型及拓扑特征	285
§ 14.3	几种真实网络的拓扑结构和反映网络的一般特性的参数	294
§ 14.4	复杂动力网络的耦合与同步	298
14.4.1	复杂动力网络的耦合	298
14.4.2	复杂动力网络的同步准则	299
§ 14.5	小世界网络的自适应同步	301
14.5.1	网络同步概述	301
14.5.2	NW 型小世界网络的自适应同步方法	301
14.5.3	自适应同步的实例研究	303
§ 14.6	本章小结	306
参考文献		306
<b>第十五章</b>	<b>经济系统的非线性动力学建模与分析</b>	<b>309</b>
§ 15.1	引言	309
§ 15.2	基于投资竞赛的离散模型的动力学行为分析	310
15.2.1	理论模型的提出	311
15.2.2	模型方程求解与动力学行为分析	311
15.2.3	数值仿真结果与讨论	314
15.2.4	结论	316
§ 15.3	本章小节	316
参考文献		316

# 第一章 绪 论

本书主要研究非线性系统中的混沌、超混沌和时空混沌的控制与同步及其在保密通信和激光系统中的应用,也包括了一部分混沌基本理论及其在经济学建模与分析中的应用。作为全书的绪论,本章首先比较全面地阐述了混沌理论及其发展的历史与趋势,然后介绍混沌控制与同步的理论和方法及其应用领域,重点评述了十余年来国内外几种具有代表性的混沌控制与同步方法。最后指出该领域国内外的研究动态和值得研究的方向。

## § 1.1 引 言

20 世纪下半叶以来,非线性科学得到了蓬勃的发展。自然现象和社会现象是很复杂的,它的动力学规律一般不能用线性动力学方程来描述,而必须用非线性动力学方程来描述,这些非线性方程除极少数外,一般都不存在解析解。人们发现一个由确定性的非线性演化方程描述的系统,在远离平衡的情况下,当系统参数变化时,可能经过分岔而进入时空有序且对称性更低的耗散结构状态或更为无序的混沌状态。但混沌又不像噪声那样是一种完全无序的状态,而是混乱中有规律,且又不具备明显对称特性的一种“序”。混沌的发现是 20 世纪继相对论和量子力学之后物理学中最伟大的发现之一,它开创了科学模型化的一个新范例,为我们认识物质世界和人类社会的运动发展规律提供了新的思想和方法。因此,混沌现象的理论与实验研究成为半个世纪以来非线性科学研究中的主要方向。随着研究的深入,人们揭示出混沌的特征和规律性也越来越多,至今我们知道的基本属性包括非周期性、不稳定性、长期不可预测性、内随机性、普适性、标度性、非整数维数、奇怪吸引子和无穷嵌套的自相似几何结构等。

目前,混沌动力学在理论深度和应用广度两个方面都在不断取得重要突破。一个重要的进展是 20 世纪 90 年代提出混沌控制与同步概念,它在国内外引发了对混沌控制与同步的理论和方法进行研究的热潮。这一研究课题不仅引起了物理学家,而且也引起了数学、控制论、电路与信息处理等有关领域的科学工作者的广泛关注,成为当前非线性科学的前沿研究课题和学术热点。混沌控制的研究引起广泛的重视不是偶然的,它是混沌



动力学理论与应用发展的必然结果。从非线性动力学自身研究发展的历史来看,对确定性系统的混沌研究经历了三个主要阶段:首先是从有序到混沌,研究混沌产生的条件、机制和途径;其次是研究混沌中的有序,即混沌中的普适性、统计特征及吸引子的分形结构等。近十年来则研究如何控制混沌达到有序状态。控制混沌为混沌理论走向成功的应用开辟了广阔的前景。控制混沌不仅能在混沌运动有害时可以消除混沌,而且在混沌有益时通过控制来产生混沌,即反混沌控制。

人们几乎是在开始研究混沌控制与同步理论与方法的同时,就开始了其应用研究。目前,混沌控制与同步的研究成果在保密通信、非线性电路、人体生命科学、激光、等离子体、强流离子束等众多的学科领域已经取得初步的成果并展现出了十分诱人的应用前景。正是基于这一发展动向,全书主要研究非线性系统中混沌、超混沌和时空混沌的控制与同步及其在保密通信、非线性电路中的应用。为了更好地理解混沌控制与同步研究的目的和意义,下面首先介绍混沌理论的发展历史、混沌的定义、混沌的度量方法及混沌理论的科学意义。

## § 1.2 混沌动力学

混沌的发现及混沌动力学的建立是由许多科学家包括数学家、物理学家、生态学家、电路与系统专家共同完成的。它是由三个相互独立学科的进展所产生的。第一个是科学注重点的变化,从简单模式(如重复的循环)趋向更复杂的模式;第二个是计算机的出现,它使得人们能够容易和迅速地完成数值分析,来验证理论结果;第三个是关于动力学的数学新观点——几何观点而非数值的观点,如相空间、拓扑空间等。第一个进展提供了发展动力,第二个进展提供了分析技术,第三个进展提供了对混沌本质的认知方法。本节我们将对混沌动力学的研究历史、发展现状、混沌的定义、度量及其科学意义做系统的介绍。

### 1.2.1 混沌动力学的发展历史与趋势

早在18世纪中叶,Maxwell已经认识到物理系统可能对初值敏感<sup>[1]</sup>。法拉第在观察以频率为 $f_0$ 垂直振荡的容器中的浅水波时,发现了 $f_0/2$ 的频率成分<sup>[2]</sup>,即二分频。20世纪30年代,Vander这位非线性系统理论的先驱者,在强驱动的扩大器中发现了二分频和四分频<sup>[3]</sup>,但他将非线性电路中出现的混沌现象误认为是噪声,把它当做“次要现象”而忽略了,失去了在非线性电路中发现混沌的一次难得的历史机遇。事实上,从18世纪中叶到19世纪60年代一百多年的时间里,物理学家都与混沌的发现失之交臂。科学史上出现这一延迟的根本原因是自牛顿以来机械决定论占据着统治地位,许多现象因归咎于外随机因素而被忽略。

法国著名数学家朱雷·昂利·庞卡莱(J. H. Poincaré)是混沌动力学这一领域的开拓者。1881~1886年间,Poincaré在四篇关于微分方程的解在四种类型的奇点(焦点、鞍点、结点、中心)所确定的积分曲线的论文中,创立了微分方程的定性理论<sup>[4]</sup>。在对天体