

混沌系统模糊建模、 同步与反控制

杨东升 赵 琰 刘鑫蕊 著



科学出版社

混沌系统模糊建模、 同步与反控制

杨东升 赵 琰 刘鑫蕊 著

科学出版社

北 京

前 言

最近二三十年来,随着混沌理论的日渐成熟,人们不再满足于仅仅能够理解混沌现象,而是更希望对混沌现象加以控制以便更好地利用,因此混沌控制作为一个新的交叉研究方向应运而生,并且在最近的十多年间成为一个研究热点。但产生混沌现象的真实系统的模型往往是难以精确得到的,理论上可行的控制方法应用到真实系统上可能会产生较大的偏差,而模糊理论在处理复杂系统的建模问题上获得了巨大成功,并且模糊模型的万能逼近性从理论上保证了建模的可靠性。因此,如何将模糊集理论应用于混沌系统控制具有重要的理论意义和广泛的应用前景。

本书从模糊控制角度出发,采用模糊方法进行以下混沌系统的分析和综合问题的研究:

提出一大类混沌(超混沌)系统模糊 T-S 模型的精确化建模方法,给出多种混沌(超混沌)系统的精确 T-S 模糊模型,进而根据混沌(超混沌)系统的非线性项的不同表现形式,分别提出相应的混沌(超混沌)系统 T-S 模糊建模的具体方法。这将为把基于 T-S 模糊模型的模糊控制理论应用到混沌(超混沌)系统的抑制和同步中奠定重要的理论基础。

针对参数不确定离散模糊双曲正切模型和连续 T-S 模糊模型的混沌反控制问题,分别提出相应的混沌化方法。在给定控制器任意小增益的前提下,通过设计一个简单的非线性状态反馈控制器并选择合适的控制参数,实现参数不确定离散模糊双曲正切模型的混沌化,并从理论上严格证明所产生的混沌满足 Li-Yorke 混沌定义;通过先将连续 T-S 模糊模型全局离散化,再设计一个线性状态反馈控制器,并对整个闭环系统做一次溢出函数运算,实现连续 T-S 模糊模型的混沌化,并从理论上严格证明所产生的混沌满足 Devaney 混沌定义。以上混沌化方法无须计算受控系统的 Lyapunov 指数,因此大大减小了混沌反控制的计算。针对同结构参数不确定超混沌系统的鲁棒同步问题,提出基于 T-S 模糊模型的鲁棒同步控制器设计的统一方法,实现两个同结构参数不确定超混沌系统的鲁棒完全同步和鲁棒滞后同步。这样设计的模糊同步控制器具有结构简单、反应速度快和适用范围广等优点,适用于绝大多数参数不确定超混沌系统的鲁棒同步控制。

针对驱动系统参数未知的时变时滞混沌系统的同步问题,依据 Lyapunov 稳定性理论和 H_∞ 控制理论,提出基于 T-S 模糊模型的模糊自适应同步控制器设计方法,实现了驱动系统参数未知时变时滞混沌系统的 H_∞ 同步,并以线性矩阵不等

式的形式给出驱动系统参数未知时变时滞混沌系统达到 H_∞ 同步的充分条件。

针对异结构超混沌系统的同步问题,依据 Lyapunov 稳定性理论和 H_∞ 控制理论,提出基于 T-S 模糊模型的异结构超混沌系统的 H_∞ 同步方法,并以线性矩阵不等式的形式给出异结构超混沌系统 H_∞ 同步的充分条件;依据 Lyapunov 稳定性理论和精确线性化技术,提出基于 T-S 模糊模型的异结构超混沌系统的渐近同步方法。由不同结构的超混沌系统组成的保密通信系统具有更强的抗破译能力,所以,本书得出的异结构超混沌系统同步的研究结果具有十分重要的理论意义和实用价值。

本书提到的混沌系统的模糊控制是非线性控制理论的一个有益补充,是作者多年来在模糊控制领域内取得的一些创新性的研究成果,属于当前所属研究领域的前沿问题,具有重要的理论与实际应用价值。

本书的出版得到国家自然科学基金(60904046,60804006,60774048)、中国博士后科学基金(20070421063)、东北大学优秀博士后基金(20080416)以及中央高校基本科研业务费专项资金(N100404018,N110304004)的资助,在此表示感谢。

由于作者的水平和研究范围有限,书中疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

杨东升

2012 年 1 月于东北大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 混沌学的基本理论	1
1.1.1 混沌学的发展历史	2
1.1.2 混沌的定义	4
1.1.3 混沌的特征及分类	5
1.1.4 超混沌系统	7
1.2 混沌控制的目标、任务及意义	7
1.3 混沌控制的研究现状	8
1.3.1 混沌镇定(抑制)	8
1.3.2 混沌同步	10
1.3.3 混沌反控制	13
1.3.4 混沌化研究现状	14
1.4 模糊控制的基本原理	14
1.4.1 模糊控制的产生与发展	14
1.4.2 模糊控制的理论基础	15
1.4.3 模糊控制的特点	17
1.4.4 模糊控制的分类	18
1.5 混沌的应用举例	19
参考文献	21
第 2 章 基于模糊模型的混沌(超混沌)系统建模方法	25
2.1 引言	25
2.2 基于 T-S 模糊模型混沌(超混沌)系统精确建模	25
2.2.1 T-S 模糊模型与混沌系统建模	25
2.2.2 几类超混沌系统的精确 T-S 模糊模型	27
2.2.3 混沌(超混沌)系统 T-S 模糊精确建模统一方法	37
2.2.4 混沌(超混沌)系统模糊建模的仿真研究	41
2.3 本章小结	46

参考文献	46
第 3 章 基于 T-S 模糊模型的同结构超混沌(混沌)系统同步	49
3.1 引言	49
3.2 基于精确线性化技术的参数不确定超混沌系统鲁棒同步	49
3.2.1 精确线性化参数不确定超混沌系统鲁棒同步的问题描述	49
3.2.2 精确线性化参数不确定超混沌系统鲁棒同步控制器设计	52
3.2.3 精确线性化参数不确定超混沌系统鲁棒同步的仿真研究	55
3.3 基于 T-S 模糊模型的部分参数未知时变时滞混沌系统 H_∞ 同步	62
3.3.1 部分参数未知模糊时变时滞混沌系统 H_∞ 同步的问题描述	62
3.3.2 模糊部分参数未知时变时滞混沌系统 H_∞ 同步控制器设计	64
3.3.3 部分参数未知模糊时变时滞混沌系统 H_∞ 同步的仿真研究	67
3.4 本章小结	70
参考文献	70
第 4 章 基于 T-S 模糊模型的异结构超混沌系统同步	72
4.1 引言	72
4.2 基于 H_∞ 控制理论的异结构超混沌系统同步	72
4.2.1 基于 H_∞ 的异结构超混沌系统同步的问题描述	72
4.2.2 基于 H_∞ 的异结构超混沌系统的同步控制器设计	73
4.2.3 基于 H_∞ 的异结构超混沌系统同步的仿真研究	76
4.3 基于精确线性化技术的异结构超混沌系统渐近同步	82
4.3.1 精确线性化异结构超混沌系统渐近同步的问题描述	82
4.3.2 精确线性化异结构超混沌系统渐近同步的同步控制器设计	83
4.3.3 精确线性化异结构超混沌系统渐近同步的仿真研究	84
4.4 本章小结	93
参考文献	93
第 5 章 模糊时滞混沌(超混沌)系统同步与自适应同步控制	95
5.1 引言	95
5.2 基于模糊模型的时滞混沌系统的同步	95
5.2.1 模糊时滞混沌系统同步的问题描述	95
5.2.2 模糊时滞混沌系统同步控制器设计	97
5.2.3 模糊时滞混沌系统的仿真研究	99
5.3 基于模糊模型的时滞混沌系统自适应同步	101
5.3.1 模糊时滞混沌系统自适应同步的问题描述	101

5.3.2 模糊时滞混沌系统的自适应控制器设计	102
5.3.3 模糊时滞混沌系统的自适应同步仿真研究	106
5.4 本章小结	109
参考文献	109
第 6 章 基于模糊模型的混沌系统采样同步控制	111
6.1 引言	111
6.2 基于 T-S 模型的混沌系统采样同步控制	112
6.2.1 采样同步控制的问题描述	112
6.2.2 不同结构混沌系统的采样同步控制器设计	113
6.2.3 混沌采样控制的仿真研究	119
6.3 混沌系统模糊的自适应采样同步控制	124
6.3.1 自适应采样同步控制的问题描述	124
6.3.2 自适应采样同步控制器设计	125
6.3.3 自适应采样同步控制仿真研究	131
6.4 本章小结	137
参考文献	137
第 7 章 混沌系统的脉冲同步控制	139
7.1 引言	139
7.2 脉冲滞后同步控制	139
7.2.1 脉冲滞后同步控制的问题描述	139
7.2.2 脉冲滞后同步控制器设计	141
7.2.3 脉冲滞后同步控制仿真研究	143
7.3 时滞混沌系统的脉冲同步控制	147
7.3.1 时滞混沌系统脉冲同步控制的问题描述	147
7.3.2 时滞混沌系统脉冲同步控制器设计	148
7.3.3 脉冲同步控制仿真研究	152
7.4 本章小结	155
参考文献	156
第 8 章 基于模糊模型的混沌反控制	158
8.1 引言	158
8.2 参数不确定离散模糊双曲正切模型的混沌反控制	159
8.2.1 参数不确定离散模糊双曲正切模型混沌反控制的问题描述	159
8.2.2 参数不确定离散模糊双曲正切模型的混沌反控制器设计	160

8.2.3 参数不确定离散模糊双曲正切模型混沌反控制的仿真研究	165
8.3 基于 Delta 算子离散化方法的连续 T-S 模糊模型混沌反控制	172
8.3.1 Delta 算子离散化连续 T-S 模糊模型混沌反控制的问题描述	172
8.3.2 Delta 算子离散化连续 T-S 模糊模型的混沌反控制器设计	172
8.3.3 Delta 算子离散化连续 T-S 模糊模型混沌反控制的仿真研究	175
8.4 本章小结	178
参考文献	178

第 1 章 绪 论

混沌是确定性动力学系统中出现的一种貌似随机的运动,其本质是系统的长期行为对初始条件的极端敏感性。混沌理论隶属于非线性科学,只有非线性系统才能产生混沌运动。最近二三十年来,随着混沌理论的日渐成熟,人们已经不再满足于仅仅理解混沌现象,更希望能够对混沌系统加以控制以便更好地利用混沌,因此混沌控制作为一个新的交叉研究方向应运而生,并且成为非线性科学领域的一个研究热点。这里所讲的混沌控制是个广义的概念,包括混沌抑制、混沌同步和混沌反控制三个方面的内容。

另外,自从 1965 年美国加州大学的 Zadeh 教授创立模糊集理论和 1974 年英国的 Mamdani 教授成功地将模糊控制应用到蒸汽机控制以来,模糊系统和模糊控制理论的研究取得了迅速发展并在实际中得到了广泛应用。目前,模糊控制理论业已成为智能控制理论的一个不可或缺的重要分支。模糊控制器具有结构简单、鲁棒性强、对参数变化不敏感和抗干扰能力强等优点,在处理复杂系统的建模问题上获得巨大成功,并且模糊模型的万能逼近性从理论上保证了建模的可靠性,因而在诸多领域得以成功应用。所以,如何将模糊控制理论应用到混沌控制当中成为当前的一个热点研究方向。

本章首先回顾了混沌理论的发展历程、混沌的几个数学定义以及混沌的分类等相关知识,然后系统介绍混沌控制理论中的一些基本知识和研究方法,包括混沌抑制的目标分类和常用方法、混沌同步的不同分类和同步判据以及混沌反控制的定义和混沌化的主要途径等内容。此外,简要介绍模糊控制的相关理论。最后,指出本章所做的主要工作。

1.1 混沌学的基本理论

混沌作为一个哲学上的理念古而有之。公元前 580 年左右的《乾凿度》中就有“太易者,未见气也;太初者,气之始也;太始者,形之始也;太素者,质之始也。气、形、质具而未相离,故曰浑沦”。这是中国古代对混沌的最初认识,这里混沌概念被认为是宇宙之初物质某种原始的没有分化的状态,但从侧面说明混沌的天然特性——“混乱不堪”。从现代科学的观点出发,混沌现象是隶属于确定性系统的而难以预测(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

则图像”(如具有稠密的周期点)的非线性动力学系统所特有的一种运动形式。它广泛存在于自然界,如物理学、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。我们周围也存在大量的混沌现象,并在大气运动、电子电路、心脏节律等研究中得到证实^[1],这些都说明客观世界并不是如拉普拉斯想象的那样简单。遗憾的是,20世纪60年代之前的多数学者往往把这些现象归结为随机扰动的影响。19世纪末的法国数学物理学家 Poincaré 最早意识到确定性系统中可以存在复杂运动形式。他在研究三体问题时发现,即使在非常简单的三个物体相互作用的动力学方程中,也可能存在不确定性。他发现某些系统具有初值敏感依赖性和行为不可预见性。他在《科学的价值》一书中写道^[2]:“我们觉察不到的极其轻微的原因决定着我们不能不看到的显著结果,于是我们说这个结果是由于偶然性。……可以发生这样的情况:初始条件的微小差别在最后的现象中产生了极大差别;前者的微小误差促成了后者的巨大误差,于是预言变得不可能”。这些描述实际上已经蕴涵了“确定性系统具有内在的随机性”这一混沌现象的重要特征,但这个观点并没有得到应有的重视。1963年,美国大气学家 Lorenz 发表了著名论文《确定性非周期流》^[3]。他通过对一组由简化对流模型得到的完全确定的三阶常微分方程组的计算机数值模拟发现,该系统对于初值极其敏感。即使是初值的微小差别,也会导致系统长期演化的不可预测性。他用“蝴蝶效应”来形容他的发现:得克萨斯州的一只蝴蝶扇动一下翅膀,就可能在巴西里约热内卢引起一场风暴。Lorenz 是第一个发现了奇怪吸引子——Lorenz 吸引子,并且在计算机上采用数值方法研究混沌的人,因此 Lorenz 被誉为“混沌之父”。同年,在以保守系统为研究对象的天体力学领域中,KAM 定理的建立被公认为是混沌理论创建的历史性标志,郝柏林院士称其为“牛顿力学发展史上最重大的突破”^[4]。

1.1.1 混沌学的发展历史

到目前为止,人们对混沌研究主要经历以下四个阶段。

1) 哲学概念的认识阶段

在这个阶段,人们从宇宙观的角度来认识混沌,这可从《三五历》中“未有天地之时,混沌如鸡子,盘古生其中,万八千岁,天地开辟,阳清为天,阴浊为地”看出,它反映了中国古代认为在盘古开辟天地之前,世界处于混沌状态这一哲学思想。古希腊对混沌的认识与中国古代相近。如在古希腊早期的自然哲学和宇宙论中,混沌被看成是原始的混乱和不成形的物质,例如把无定形的水或气等看做世界的始基,有序世界就是从这样的始基发展起来的。在这个阶段虽然没有指出混沌的基本特性,但它给人们一个关于混沌的朴素思想认识。

2) 物理领域研究阶段

这个阶段比较短,是从19世纪中期开始,自然科学家首先讨论混沌问题的是

热力学方面。发现热力学当中的很多现象是与混沌有关的,都是混沌无序的状态,例如,当达到热力学平衡时,系统内部每一点的温度、压强、浓度、化学势等均无差别,处处相同,熵极大,即分子的混乱度极高。

3) 现代科学意义上的混沌定义和数学分析阶段

这个阶段从 19 世纪末 20 世纪初开始,庞加莱在研究三体问题时遇到了混沌问题。从发现三体问题无法求出精确解开始,他把动力学系统和拓扑学有机地结合起来,并指出三体问题中,在一定范围内,其解是随机的。实际上这是一种保守系统中的混沌。庞加莱成为世界上了解混沌存在的可能性的第一人。1954 年,苏联概率论大师 Kolmogorov 指出近可积的 Hamilton 系统解的性质的一些重要结论^[5]。1962 年和 1963 年分别经 Arnold 和 Moser 证明,得出著名的 KAM 定理。1963 年, Lorenz 讨论天气预报的困难和大气湍流现象,给出三个变量的自治系统^[3]

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = \sigma(x_2 - x_1) \\ \dot{x}_2(t) = \gamma x_1 - x_1 x_3 - x_2 \\ \dot{x}_3(t) = x_1 x_2 - b x_3 \end{cases}$$

Lorenz 发现,当 $\sigma=10, b=8/3$ 时,只要 $\gamma>24.74$,该系统的解就变得混乱不规则,并且解很不稳定,敏感地依赖于初始条件。Lorenz 的论文现在被公认为研究耗散系统混沌现象的经典文献。几乎同一时期,美国的数学家 Smale 构造出著名的马蹄模型,给出二维离散映射产生混沌的几何解释^[6]。1964 年,法国天文学家 Hénon 给出如下 Hénon 映射^[7]:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = 1.4 - x_1^2(k) - 0.3x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) \end{cases}$$

其动力学行为表现出混沌态。

1971 年,法国的数学物理学家 Ruelle 和荷兰的 Takens 发表论文《论湍流的本质》^[8],首次发现动力系统存在一类特别复杂的新型吸引子,与这类吸引子相关的运动即为混沌,从而揭示了一条通往混沌的道路。他们将这类新型吸引子命名为奇怪吸引子。此后,判别是否存在奇怪吸引子以及刻画这种吸引子的特征,成了耗散系统混沌研究的基本课题。

1975 年,华人李天岩及其导师 Yorke 发表著名论文《周期 3 蕴涵混沌》^[9]。在该文中,混沌作为一个概念正式成为现代科学术语。而这篇文章似乎巧合地证明了中国古代老子的“道生一,一生二,二生三,三生万物”的哲学理念。

1973 年,美国生态学家 May 用计算机数值模拟方法研究了描述种群演化的 Logistic 方程^[10]:

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n)$$

即虫口映射。随着参数 μ 的变化,它显现出极为复杂的动力学行为。很多经济学理论都遵从这个模型。1978 年,Feigenbaum 在 May 的基础上独立地发现了倍周期分岔现象中分岔的参数间距收敛速率为 4.6692^[11],这个结果将混沌理论的研究从定性分析推进到定量计算阶段,从而使混沌在现代科学中具有坚实的理论基础。

1987 年,Grassber 等提出通过时间序列提取分数维和 Lyapunov 指数等来重构动力系统理论方法,从而使混沌理论进入实际应用阶段。

4) 混沌控制与工程应用阶段

20 世纪 90 年代初,科学家 Ott、Grebogi、Yorke、Pecorra 和 Canon 分别在混沌控制和混沌同步方面取得突破性进展,从而在全世界掀起了“混沌控制”的热潮,使其应用范围扩展到工程技术领域以及其他领域,例如,其在保密通信中就起到重要作用。

1.1.2 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混沌运动的性质。

Li-Yorke^[9]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。

定义 1.1 (Li-Yorke 混沌定义) 区间 I 上的连续自映射 $f(x)$,如果满足如下条件,便可证明它具有混沌现象:

- (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
- ① 对任意 $x, y \in S$

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

- ② 对任意 $x, y \in S, x \neq y$

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

- ③ 对任意 $x \in S$ 和 f 的任意周期点 y ,有

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

由上面的定义得到了下面的著名定理。

定理 1.1 (Li-Yorke 定理) 设 $f(x)$ 是 $[a, b]$ 上的连续自映射,若 $f(x)$ 有 3 个周期点,则对任何正整数 n , $f(x)$ 有 n 个周期点。

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,就一定存在任何正整数的周期点,即一定出现混沌现象。

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。

定义 1.2 (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^[6]。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, Hénon 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, 就意味着系统是混沌的。

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哈密顿系统。

Devaney^[12] 的混沌定义在拓扑意义下为:

定义 1.3 (Devaney 混沌定义) 设 V 是一度量空间, 映射 $f: V \rightarrow V$, 如果满足下面三个条件, 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 I 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 $X \neq Y$, 存在 $k > 0$, $f^k(X) \cap Y \neq \emptyset$ (若一映射具有稠轨道, 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 的作用下最终分叉点 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。周期点集稠密性表明, 系统具有很强的确定性和规律性。

1.1.3 混沌的特征及分类

混沌是确定性非线性动力学系统中对初始条件具有敏感性的非周期有界动态行为, 它具有下述主要特征^[13]:

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

(2) 遍历性。混沌运动在其吸引域内是各态经历的, 即在有限时间内混沌轨

道经过混沌区内每一个状态点。

(3) 随机性。混沌是由确定性系统产生的不确定性行为,具有内在随机性,与外部因素无关。尽管系统的规律是确定性的,但它的动态行为难以确定,在它的吸引子中任意区域概率分布密度函数不为零,这就是确定性系统产生的随机性。实际上,混沌的不可预测性和对初值的敏感性导致混沌的内在随机性性质,同时也说明混沌是局部不稳定的。

(4) 分维性。分维性是指混沌的运动轨道在相空间中的行为特征,维数是对吸引子几何结构复杂程度的一种定量描述。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。标度性是指混沌运动是无序中的有序态。其有序可理解为只要数值或实验设备精度足够高,总可以在小尺度混沌区内看到其中有序的运动花样。

(6) 普适性。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,它不依赖具体的系统方程或参数而变。具体表现为几个混沌普适常数,如著名的 Feigenbaum 常数。普适性是混沌内在规律性的一种体现。

(7) 混沌敏感地依赖于初始条件。拉伸和折叠特性是形成敏感依赖初始条件的内在机制。拉伸是指系统内部的局部不稳定所引起的点之间距离的扩大;折叠是指系统在整体稳定因素作用下形成的对点与点之间距离的限制,经过多次拉伸与折叠,轨道被搅乱,从而形成混沌。混沌具有局部不稳定而整体稳定的特性,所以混沌区域是有界的,但是任意小的初始值的差别会导致其以后状态完全不同。

(8) 正的 Lyapunov 指数。它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定量刻画。它表明轨道在每个局部都是不稳定的,相邻轨道按指数分离。同时,正的 Lyapunov 指数也表示相邻点信息量的丢失,其值越大,信息量丢失越严重,混沌程度越高。

目前,人们已经逐渐接受混沌普遍存在于自然界及人类社会中这一事实,将混沌现象分为四类^[14]:时间混沌、空间混沌、时空混沌和功能混沌,如图 1.1 所示。时间混沌是指经过长时间演化后,仅在时间上表现为混沌行为;空间混沌指在空间广延上表现为混沌行为;时空混沌不仅在时间上表现为混沌行为,而且在系统长时间发展以后,空间广延上也表现为混沌行为;功能混沌则是更高层次的混沌现象,如人的大脑中神经网络表现出的混沌行为等。



图 1.1 混沌现象的分类

从刻画混沌系统的相空间或状态空间来看,混沌系统可分为低维、有限维的系统和高维、无限维的系统。

1.1.4 超混沌系统

通常把具有两个或两个以上正的 Lyapunov 指数的系统称为超混沌系统。超混沌系统的相轨在更多方向上分离,因而其混沌行为更为复杂。超混沌在混沌保密通信等领域的潜在应用,近来引起人们的高度关注。一个连续自治系统产生超混沌现象,有两个必要条件^[15]:第一,相空间至少为四维,即一阶耦合非线性常微分方程组至少包含四个方程;第二,在耦合方程中引起系统不稳定的项的数量至少有两个并含有一个非线性项。

1.2 混沌控制的目标、任务及意义

1990年,Ott等提出著名的参数微扰控制(OGY)方法^[16],这是混沌控制的开端,使人们认识到混沌并非不可控制,而且在有些时候混沌控制有它自身的优点。OGY方法为混沌电路控制、保密通信、光学系统控制、流体湍流^[17]等问题的研究开辟了道路。在一个动态系统之中,当混沌具有正面效应时,该机制能够强化已存在的混沌或产生新的混沌;反之,当混沌具有负面效应时,就应该消除它。混沌控制理论并不与常规控制理论相排斥,相反,研究混沌控制的目的是在更广泛的范围内更好地操纵非线性系统的动态,以期得到更多的便利。混沌控制研究就是寻求控制理论和控制方法的发展,尤其适合于混沌系统新控制理论和控制方法,在这种意义下,混沌控制是对常规控制理论的有益扩充。

广义地说,现今混沌控制主要有以下四个内容:

(1) 利用混沌。就是对混沌现象本身不施加控制作用,只是利用它的行为形态达到人们所需要的目的,如医学上的心脏研究等。

(2) 产生混沌。通过建立相应的非线性动力学模型和实验条件,产生人们需要的、全新的混沌系统,也称为混沌反控制或者混沌化。

(3) 混沌镇定。控制目标是镇定所需的混沌态,是指稠密嵌入混沌吸引子的一系列不稳定周期轨道的镇定,例如,稳定激光以提高其能量。

(4) 混沌同步。使一个混沌系统在施加外部控制力下收敛于另一个系统轨道的同一值,他们之间始终保持系统的动力学状态一致,并且这种同步是结构稳定的。

目前混沌控制及其应用研究已获得重大的突破性进展,人们开始逐步认识混沌的重要作用,并开始利用混沌、应用混沌。这些问题的研究,将不仅具有重大的理论价值,而且具有重大的实际应用价值。从实现混沌控制目标的这个角度分析,混沌控制的分类如图1.2所示。

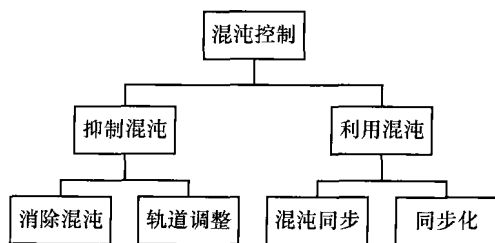


图 1.2 混沌控制的分类

1.3 混沌控制的研究现状

1.3.1 混沌镇定(抑制)

从 20 世纪 90 年代初开始,混沌控制得到世界性的广泛关注。目前,已经提出多种方法和技术。

混沌控制是从 1989 年 Hübner 发表研究混沌控制论文^[18]开始的,但当时这篇文章并没有引起人们太大的注意。真正引起人们重视的是 1990 年美国马里兰州立大学的 Ott 等提出的 OGY 方法,控制奇怪吸引子中的 UPO 获得成功。他们的工作使人们看到,原本对初始条件极为敏感、长时间无法预测的“随机性”行为,可以通过有效的控制策略加以控制,这一突破性进展使得混沌应用的研究迅速展开,混沌系统的诸多优良特性展示了广阔的应用前景^[19],对混沌的研究遂成为举世瞩目的学术热点和前沿课题。目前已提出的混沌的控制方法有很多,难以一一列举。从不同角度出發,混沌控制的目标、策略、途径各异,方法类型多样。

从抑制混沌角度和调整轨道角度来看混沌镇定主要有以下方法:OGY 法^[20]、参数周期扰动法^[21]、OPF 方法^[22]、正比于系统变量的脉冲反馈法^[23]等。此外,传统的状态反馈控制方法^[24]、自适应方法^[25]等实现混沌镇定的报道也时常出现。

下面仅对一些代表性的成果和进展做简要介绍和评述。

1) OGY 控制方法及其改进方法^[26]

这种方法通过运用现行控制规律调整可控参量使系统下一时刻逼近目标轨道。这种方法的优点是不必事先知道系统的动力学模型,对离散系统和可离散化的连续系统均适用。缺点是在要求施加控制时,系统状态既要接近目标轨道,又要跟踪计算,计算量较大,并且只对低周期轨道效果较好。这些限制了该方法的使用范围。后来有人对该方法进行改进,基本思想不变,在控制规律上充分利用控制时前后两步的计算信息进行参数调整。Ott 等利用延时坐标下的极点配置技术,成功控制了高周期态和高维系统的非周期轨道,但计算量大的问题仍没有解决,实际控制效果并不理想。

OGY方法的贡献不在控制方法上,而在观念上,它使人们重新审视混沌系统产生的影响,这比方法本身的有效性更有意义,正是OGY方法的提出,带来了混沌的研究热潮。

2) 连续反馈控制方法^[27]

需要指出的是,前两种方法都是离散控制,要求事先分析吸引子的位置和参数,而且数值模拟不直观。为此,Pyrogas提出两种适用于连续混沌系统的方法:外力-反馈控制法和延迟自反馈控制法。其基本思想都是考虑混沌系统输出与输入信号之间的自反馈耦合。前者从外部注入周期信号,与OGY方法的区别在于,该法不受必须靠近轨道的限制,可以在任何时候加入微扰来控制;后者把系统本身输出信号取一部分并延迟一段时间后再反馈到系统中,此法引人注意的是时间延迟的实现,应用十分简单方便,但可变延时器在技术上是难点。该法已被用于控制外腔激光二极管中的混沌^[28]、电磁-弹性杆中的混沌^[29]和CO₂激光器中的混沌^[30]。本法可拓展应用到混沌同步中。

3) 传输与迁移控制方法^[31]

复杂非线性系统的传输迁移控制是一种无反馈控制方法,它通过开拓产生稳定不动点、极限环和混沌吸引子。状态空间中自然产生的收敛域,先把系统状态控制到一个吸引子中,然后再转移控制到所希望的吸引子中,达到控制目标。这种控制方法仅要求知道系统的初始状态,在控制实施中不需要知道系统的状态,是一种开环控制方法。它对连续动力学系统,离散系统都有应用价值。但是,该法需要预先知道系统的特性,特别是关于吸引子空间的收敛区域。目标动力学的收敛取决于初始条件或传输流域,所以不能任意选择控制目标。

4) 控制理论在混沌控制中的应用

前面的OGY法、OPF技术和连续反馈控制方法等微扰方法,都不是经典的控制论方法。但在物理机制上有一个共同点,就是把原来正的Lyapunov指数改变为负值,从而实现从不稳定到稳定的转变。由于统一的混沌镇定理论还没有形成,因此混沌镇定研究还是在具体问题上探索使用合适的方法或寻找新方法。近年来,人们开始研究如何将传统控制理论运用于混沌镇定,因为传统控制方法有很长的研究历史,并建立了许多有效的理论和方法。

常规线性反馈控制方法对蔡氏电路^[32]、Duffing振子^[33]、Bonhoeffer-van Der Pol振子^[34]、Lorenz系统^[35]和激光模型^[36]等混沌系统能进行有效控制;Piccardi等^[37]、王忠勇等^[38]、余建祖等^[39]、El-Gohary等^[40]应用最优控制进行混沌控制;Fowler^[41]提出了用随机控制方法控制Hénon-Heiles振子和Lorenz系统;非线性方法也被用于混沌控制,如Wan等^[42]提出的反馈全局镇定法;Yu^[43]、薛月菊等^[44]用输入-输出线性化的方法控制混沌。以上传统控制方法往往建立在混沌模型已知的基础上,当模型结构或参数未知时,这些方法就显得无能为力。自适应控制适