



《中国工程物理研究院科技丛书》第 031 号

混沌的控制、同步 与利用

王光瑞 于熙龄 陈式刚 编著

国防工业出版社

《中国工程物理研究院科技丛书》第 031 号

混沌的控制、同步与利用

王光瑞 于熙龄 陈式刚 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

混沌的控制、同步与利用/王光瑞等著. —北京:国防工业出版社, 2001.5

(中国工程物理研究院科技丛书)

ISBN 7-118-02409-0

I. 混... II. 王... III. 混沌学 IV. 0415.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 51518 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 20¼ 531 千字

2001 年 5 月第 1 版 2001 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:29.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

《中国工程物理研究院科技丛书》出版说明

中国工程物理研究院建院 40 多年来,坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务,在许多专业学科领域里,不论在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人材。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 40 多年来在各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科技工作的成果,内容涉及本院过去开设过的 20 几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 40 多年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》编审委员会

1999 年 6 月 4 日修改

《中国工程物理研究院科技丛书》

编审委员会名单

主 任 杜祥琬

副主任 彭先觉 章冠人 华欣生

委 员 (以姓氏笔划为序)

王艳秀	邓门才	水鸿寿	田常津	江金生
沈元如	李 凡	李志民	李泽仁	张方晓
张友寿	张富堂	陈银亮	杨本立	郑志坚
罗顺火	竺家亨	周德惠	俞大光	胡三国
贺云汉	黄清南	蒲仁壁		

本丛书编辑部

负 责 人 吴衍斌

本册编辑 吴衍斌

前 言

1991 年以来,我们课题组在国家基金及中物院基一贯资助下开展了“混沌的控制、同步与利用”的研究。期间曾应南京大学、中国科技大学、浙江大学、辽宁大学、鞍山师范学院、兰州地震局、新疆地震局等单位同行的邀请,做了控制混沌方面的专题讲座,并多次在国内外有关学术会议做各种报告。这样,在我们已有讲稿的基础上,大家充分讨论,提出许多宝贵意见,促成了我们写成本书。

成书过程中,成雁翔帮助收集整理了几百篇文献,许爱国、刘红在定稿过程中做了补充、修正、完善等大量工作。丛书编委水鸿寿给予了有力的督促与支持,中国科学院物理研究所张洪钧研究员、北京航空航天大学陆启韶教授对书稿进行了审阅,终于完成了此稿。

本书的完成与上述所有单位与同志的帮助分不开的。在此谨向他们表示衷心感谢。

书中不妥之处,敬请读者指正。

著 者

内 容 简 介

本书是混沌的控制,同步与利用研究领域的一本专著。是非线性科学的前沿方向之一。混沌控制与同步化的研究为混沌理论提供了广泛的应用前景,也大大丰富了其基本理论。

全书共分十一章,第一章至第七章阐述了控制混沌的基本概念,基本思想与基本方法。第八章至第十章讲述了其在不同领域的具体应用。第十一章讲述了控制保守系统中的混沌。

本书可供物理学专业的大学生及研究生作为参考书。也可供力学、化学、生物、控制论等领域的科研人员参考。

目 录

第一章 概论	1
1.1 控制和利用混沌的意义	1
1.2 经典线性反馈可控性定理	4
参考文献	6
第二章 OGY 微调参数法控制系统混沌	7
2.1 OGY 方法控制混沌	7
2.1.1 基本原理	7
2.1.2 噪声的影响	13
2.1.3 系统误差的影响	13
2.2 OGY 方法控制混沌的数值计算例子	16
2.3 在磁致弹条物理实验系统中用 OGY 方法控制 其混沌	21
2.4 高维系统	24
2.5 控制时间延迟坐标系统混沌	26
2.6 修正不稳定周期轨道的 Lyapunov 指数法	32
2.7 多步法局域控制混沌	36
2.8 控制高耗散系统混沌(RPF 法)	42
参考文献	47
第三章 扰动系统参数方法控制混沌	49
3.1 优化多步法控制混沌	49
3.2 自适应系统动力学	54
3.3 小参数共振扰动法抑制混沌	59
3.4 利用与系统变量成正比的脉冲控制混沌	69

3.5 移动控制参数改变非线性动力系统行为	75
3.5.1 奇异非混沌轨道的生成	75
3.5.2 动力吸振器控制混沌	77
3.5.3 控制 Chua 电路	80
参考文献	84
第四章 控制混沌的反馈技术	87
4.1 附加外部振子反馈法控制混沌	87
4.2 延迟反馈法控制混沌	92
4.3 延迟反馈控制混沌的实验	97
4.4 热对流系统的控制	102
4.5 模反馈控制法	109
4.5.1 区域 Lyapunov 指数	110
4.5.2 局域解耦	111
4.5.3 模反馈控制	115
4.6 条件比例反馈(OPF)方法控制真空二极管 中的混沌现象	123
参考文献	127
第五章 引导轨道至期望目标	128
5.1 利用混沌引导轨道至期望目标	128
5.2 把一维映象的混沌轨道引向期望目标	135
5.3 把高维系统的混沌轨道引向目标	141
5.3.1 预备知识	141
5.3.2 基本的打靶方法	144
5.3.3 方法的改进	148
5.3.4 基本结果	149
5.4 引导混沌态至稳定定态流	151
5.5 一个引导混沌轨道瞄准目标的实验	159
5.6 在非线性系统中打靶	165
参考文献	170
第六章 外加驱动控制混沌	172
6.1 周期脉冲信号控制一维映象的混沌	172

6.1.1 周期脉冲控制混沌的基本原理	172
6.1.2 周期拍方法的一些性质	177
6.1.3 数值例子	179
6.1.4 高维离散系统	190
6.2 弱周期性驱动信号控制方程系统中的混沌	197
6.2.1 弱周期信号控制混沌	197
6.2.2 一条弱周期信号控制混沌的道路	203
6.3 复杂系统的控制——拽带与迁移	209
6.3.1 Hübler-Jackson 方法的基本思想	209
6.3.2 收敛域目标动力学和拽带域	213
6.3.3 一维映象的拽带定理	219
6.3.4 Logistic 拽带——拓扑自由度	228
6.3.5 高斯映象——全拽带域	232
6.3.6 迁移目标动力学	236
6.3.7 结论	242
6.4 在 Logistic 映象中选定的周期轨道对混沌的拽带	244
6.4.1 有界动力学	246
6.4.2 常数情况(1 周期控制)	247
6.4.3 2 周期控制	252
6.5 随机驱动下由混沌向非混沌行为的转变	257
6.6 广义共振谱法确定无反馈实验系统的目标动力学	263
6.6.1 共振的广义定义	263
6.6.2 广义共振谱	267
6.6.3 噪声系统的控制和模拟	273
6.6.4 连续系统	275
参考文献	279
第七章 非线性动力系统运动轨道的同步化	281
7.1 Pecora-Carroll(P-C)同步化方法——驱动和响应	281
7.1.1 基本理论	282
7.1.2 同类驱动	286
7.2 有限时间步长对混沌轨道同步化的影响	300
7.2.1 有限时间步长的演化	301

7.2.2 有限时间步长的同步化判据	302
7.2.3 例	308
7.3 串联同步化混沌系统	313
7.3.1 基本概念与数值例子	314
7.3.2 串联同步化电路	318
7.3.3 通信与控制	325
7.4 不稳定周期轨道对同步化过渡时间的影响	332
7.5 响应系统的 Lyapunov 函数	337
7.6 利用 OGY 控制方法实现混沌轨道的同步化	342
7.7 调节外部驱动强度同步化混沌系统	348
7.7.1 $\vec{f} = \vec{g}$	349
7.7.2 $\vec{f} \neq \vec{g}$	350
7.8 线性反馈同步化	354
7.9 非线性反馈同步化	359
7.10 在正比反馈控制下二极管振荡器中混沌 的同步化实验	364
7.11 混沌的阈同步化	369
7.12 噪声作用下混沌系统的同步化	374
7.13 混沌系统同步化的强化	379
7.14 可激元系统中混沌的同步化	387
7.15 膺周期驱动保持非线性系统多倍周期 行为同相(相位同步化)	391
7.15.1 膺周期驱动的建立	394
7.15.2 电路演示	396
7.15.3 膺周期驱动系统的分析	403
7.16 广义同步化	412
7.17 混沌系统的控制与同步化的等价性	439
7.18 用与时间序列自动同步化方法估计系统模型的 参数	448
参考文献	455

第八章 控制光学系统中的混沌	459
8.1 多模光学系统中稳定区域的扩展	459
8.2 激光系统中不稳定周期轨道的全域控制	465
8.3 控制 NMP 激光中的混沌	470
8.3.1 周期轨道的识别	470
8.3.2 回归映象的拟合及其稳定性的估计	472
8.3.3 最小期望偏差法	473
8.3.4 若干结果	474
8.4 偶发正比反馈控制多模自治固体激光器中的混沌	478
8.5 控制光学双稳实验系统中的混沌	482
参考文献	490
第九章 受控混沌在信息通信中的应用	492
9.1 混沌通信概述	492
9.2 混沌的抗扰通信	498
9.3 自同步化混沌系统的合成	505
9.3.1 基本理论模型	505
9.3.2 整体自同步化的条件	507
9.3.3 整体稳定性条件	509
9.3.4 线性稳定性分析	511
9.3.5 合成 Lorenz 系统	512
9.3.6 合成四维混沌系统	514
9.3.7 任意五维混沌系统的合成	517
9.4 同步化混沌在通信电路中的应用	523
9.5 用蔡氏电路同步化于数字通信	528
9.6 用同步混沌伪装与解密信号	536
9.7 混沌通信的破译	541
参考文献	547
第十章 控制和利用混沌在其他领域的应用	548
10.1 控制不稳定自旋波的混沌	548
10.2 控制 Josephson 结中的混沌	552
10.3 弱耦合二极管中混沌的控制	555

10.4	延迟反馈控制电子双卷振子实验中的混沌	560
10.5	控制心脏混沌	563
10.5.1	心律失常及控制的实验模型	563
10.5.2	控制心律失常的理论和方法	564
10.5.3	控制结果	568
10.6	控制大脑中的混沌	570
10.6.1	基本情况简介	570
10.6.2	混沌的确认和控制	571
10.6.3	实验结果	571
10.7	外噪声控制神经网络中的混沌	572
10.8	维持混沌	577
	参考文献	582
第十一章	控制和利用保守系统中的混沌	584
11.1	利用稳定与不稳定方向控制哈密顿系统的混沌	584
11.2	外部驱动控制混沌散射	590
11.2.1	系统的动力学	590
11.2.2	外场对相空间结构的影响	595
11.2.3	偶极函数的影响	600
11.2.4	混沌散射	602
11.2.5	控制混沌散射	605
11.3	改进 OGY 方法控制混沌散射	606
11.4	混沌 Hamilton 系统的优化控制	610
	参考文献	630

第一章 概 论

1.1 控制和利用混沌的意义

控制和利用混沌是当前自然科学基础研究的热门课题之一。在详细阐述有关内容之前,我们首先简略地说明一下这一课题的意义。

在自然界中,诸如物理、化学、生物学、地学……以及技术科学、社会科学等各种科学领域中已发现了混沌现象的存在,有人认为这是继相对论、量子论之后的又一重大科学发现。

混沌运动的基本特征是运动轨道的不稳定性,表现为对初值的敏感依赖性,或对小扰动的极端敏感性。精确地放在一个小山顶上的球是不稳定状态的一个例子,任何方向的随机偏离都会使它永远脱离这个状态。对于不稳定周期轨道,如果系统严格地处于其上,则它会永远地留在这条轨道上。但由于相对这条轨道的极小偏差是随时间指数地增长的,系统将会很快离开此轨道。在一个具有无穷多不稳定周期轨道的集合上,这种不稳定性使得这些周期轨道不可能被观察到,人们所看到的是一种奇怪的似乎随机的跳动,称之为混沌轨道。这种轨道有较小的机会靠近某一特定的不稳定周期轨道,并且近似地在这个周期轨道附近保持几个周期,然后很快离开。关于混沌的一般理论可参阅文献[1~3]。

对初值的极端敏感性又称为蝴蝶效应。它曾被认为是一种“麻烦”的性质,在过去的许多年中,人们一般相信混沌运动既是不可预报的,又是不可控制的。因此,在实践中总是希望避免混沌这个“有害”的现象,亦即在几乎所有的工程设计中都把目标放在消除系统中的任何混沌行为。

第一个持不同观点的是 John Von Neumann,他在 1950 年左右曾指出:很小的,仔细选择的,有计划的大气扰动,经过一段时间后,可以在一个大尺度范围内引发预期的变化。这样,利用混沌敏感性的基本思想已由 John Von Neumann 清楚地提出了。

1987 年,Hubler 和 Lüscher 也曾引入一种控制混沌的思想。在系统的驱动力上加一个合适项,使系统行为变成稳定的周期轨道。但所得到的运动不一定是系统原运动方程的解。这种方法需要知道系统的动力学模型,但无需反馈且有抗噪声的能力。通过控制一个力学摆的运动成功地演示了这种方法。

进一步的研究表明,系统所具有的混沌状态,其中存在着微妙的结构。蝴蝶效应允许使用很小的反馈扰动来控制系统的轨道,这种能力是非混沌系统所不具有的。因此,它可以使人们不是避开混沌,而是有可能对混沌加以控制和利用。对给定的一个混沌吸引子,只对系统作小的扰动就可以得到某个预期的周期行为,这就是控制混沌的基本含意。

生活中一个常见的现象可作为控制不稳定不动点的简单例子。作为一个杂技表演项目,让一个标杆在掌心上保持铅垂平衡(这个系统不是混沌的)。只要标杆偏离铅垂线不远,就可以通过让手心作适当的小移动把它保持在本质上是不稳定的铅垂状态。

1990 年,Ott、Grebogi 和 Yorke 基于有无穷多的不稳定周期轨道嵌入在混沌吸引子中这一事实,提出了一种控制混沌运动的具体办法。几乎与 OGY 控制混沌的开创性工作的同时,美国海军试验室学者 T. L. Carroll 和 L. M. Pecora 等发表了运动轨道同步化的论文,提出了混沌自同步方案;Ditto 作出非晶磁致弹条系统及电路系统混沌现象控制的实验;Hunt 等人做出控制激光系统混沌的实验以及 Carroll 等人实现了利用混沌同步化进行保密通信的实验。控制与同步化混沌现象的理论和实验得到同步地巨大发展。

OGY 等人通过对系统参数作小扰动并反馈给系统,实现了把系统的轨道稳定在无穷多不稳定轨道中预期的一条特定轨道上。从 OGY 方法控制混沌的基本步骤可获得控制混沌轨道的初步概

念。首先检查嵌入在混沌运动中的不稳定周期轨道,特别是低周期轨道。然后选一条作为控制目标的不稳定轨道。由于混沌轨道的运动是遍历的,最终系统将会被带到这个选定的不稳定轨道附近,这时我们重复地施加小扰动可把轨道保持在这条期望的轨道上。这表明仔细地选择小扰动可对系统的长时间行为产生大的有益的变化。

进一步^[5~7],当我们想让系统在不同的时间服务于不同的目的时,如果该系统是混沌的,则不用改变系统的整体构形,通过对系统的参数作小改变就可以使其稳定化于不同的周期轨道。这众多的不稳定周期轨道都是原系统运动方程的解。实现控制只需很小的控制信号,表示只以很低的能量消耗就能在同一混沌系统的不同周期轨道之间实现转换,产生各种各样的稳定化的周期运动。

混沌系统的这种敏感性还有利于迅速地引导轨道进入期望的状态。一个成功的例子是 NASA 的科学家们只用了少量的剩余肼燃料,在实现其主要任务后把太空船 ISEE - 3I/C 送到了距太阳 8 千万英里的地方,首次实现了与彗星的碰撞。这是由于天体力学的三体问题对扰动敏感性的结果,在非混沌的系统中这是不可能的。

这一切说明混沌这个“麻烦”的现象其实具有优越性。与之相反,在非混沌系统中,即只有稳定的周期运动的系统中,小扰动控制只能轻微地改变系统的动力学,如果不用大的控制或改变系统,我们无法摆脱业已存在的系统行为。由于稳定的周期运动可塑性差,缺乏任意选择状态的灵活性,因此在设计系统时,存在混沌状态对取得易变性是有益的。

目前虽然控制混沌的理论主要应用于由少数几个变量定义的混沌动力学,高自由度的系统(例如大气和高雷诺数的运动流体)不易于控制,然而在高维(或无穷维)系统情况下其吸引子(因而系统的动力学)可能是低维的。所以低维混沌系统的控制问题仍具有一定的普遍意义。

严格地说,非线性系统才是最一般的系统,线性系统只是其中的特殊例子。因此,控制和利用混沌的工程意义也是十分重大的,它引起了很多工程研究领域中的 Erkeley、L. O. Chua 等著名学者的密切关注。

与理论和实验研究不断取得进展的同时,人们也在不断地开拓新的应用领域^[8,9],众多的控制和利用混沌的例子见本书以后的各章节。例如,人们已对混沌激光器,混沌二极管电路实现了控制;在通信、生理学、化学反应工程等方面不断地产生新的技术构想,并有希望很快地成为现实。更深入地说,人的思维与活动实际上是有控制的混沌活动,其意义与规律远没有被人们自己所认识与利用。面对这些,我们有理由相信控制和利用混沌的前景必定是十分广阔和无比美好的。

1.2 经典线性反馈可控性定理

控制混沌的进展是人们把控制线性系统的思想引向非线性系统的结果。因此控制线性系统的基本理论成为我们这里必须的预备知识。下面我们仅摘录线性系统可控性的理论结果,更详尽的理论可参阅有关文献[10,11]。

连续线性系统完全可控性就是对任意初始状态,存在一个控制作用,它使系统在有限的时间内从初始态达到零状态。其定义如下:

如果对任意初始时刻 t_0 和任意初始态 $\vec{x}(t_0) = \vec{x}_0$, 都存在一个有限的 $t_f > t_0$ 和一个控制变量 $\vec{u}(t)$, ($t_0 \leq t \leq t_f$), 使得 $\vec{x}(t_f) = 0$, 那末这一系统称为是完全可控的, 简称为可控的。

上述可控性定义等价于存在 $\vec{u}(t)$ 使系统可在有限的时间 $t_f > t_0$ 达到预期的终止状态 $\vec{x}_f$, 即 $\vec{x}(t_f) = \vec{x}_f$ 。

如何判别一个系统是否可控呢? 我们有如下定理:

对 n 维连续线性系统