

文章编号: 1001-2486 (2000) 01-0077-04

混沌控制: 回顾与展望*

胡德文, 董国华

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 回顾了混沌控制产生的背景, 重点介绍了 OGY 方法的思想、原理和特点, 简要概括了十年来的一些重要进展, 并对今后的发展方向和可能存在的困难提出了一些见解。

关键词: 混沌; 混沌控制; OGY 方法

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Chaos Control: an Review and Prospect

HU De-wen, DONG Guo-hua

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The background of the emergence of chaos control is reviewed. The OGY's method is introduced and some important developments in the last decade are briefed. Moreover, the direction of its development and possible difficulties are predicted.

Key words: chaos; chaos control; OGY's method

混沌控制的产生既是历史发展的必然, 又非常出人意料。自从 60 年代以来, 国际上对混沌现象的研究一直长盛不衰, 大量的具体混沌系统被发现, 混沌的众多奇异特性被相继发现和理解, 产生了许多实用的理论、工具和算法, 出现了以混沌为主要对象的会议、杂志、专著、论文、研究项目和成熟的软件。一旦消除了排斥和回避混沌的不自觉心理障碍之后, 一个容易想到的问题是: 混沌现象有什么用? 特别是, 是否有什么特殊的妙用?

“有什么用”取决于有什么特性。混沌系统具有对初始条件的极端敏感依赖性, 可利用这一特性, 通过精心选择的小的控制量产生显著的控制效果, 比如, NASA 的科学家们曾使用非常少量的残余液氢燃料把一个 ISEE-3/ICE 飞行器送到太阳系之外, 从而首次实现了科学彗星对接, 它利用的是三体问题对微小扰动的极端敏感性^[1]; 混沌系统的运动最终落在奇怪吸引子中, 而奇怪吸引子中又包含有稠密的周期轨道, 因而混沌吸引子可作为潜在的信息源, 并且通过控制, 可使系统处在不同的状态, 从而使该系统能使用于多种目的; 混沌吸引子中的运动具有遍历性, 因而可用作全局搜索、寻优及实验设计等等。这一系列新奇应用的可能性, 都已有具体的应用实例, 都取决于能否施加有效的控制, 即混沌控制是混沌研究的自然延续, 是混沌应用可能性的前提和基础。从控制论的角度, 这是一种历史必然性。

然而, 对混沌的研究, 长期停留在这样的水平: 新的奇异特性不断揭露出, 它们中有些加深或统一了对以前发现的理解, 还有一些则使得对以前有些发现和理解更加困惑, 更加疑虑。对于混沌应用可能性的探讨中, 基本困难之一就是上面提到的混沌系统对初始条件的极端敏感依赖性, 这也意味着最终不可预测性。能否实施有效的控制, 确实值得怀疑和探讨。从这个方面说, 混沌控制的出现的确实事出意外。事实上, 从 60 年代混沌研究的正式兴起到 80 年代末, 仅有 Hbler, Pettini 和 Fowler^[2-4] 极少的几个人对混沌控制的可能性进行了探讨, 大多数研究者则都下意识地排除了这种可能性。

* 收稿日期: 1999-08-30

基金项目: 总装备部试验技术项目基金资助 (KD-98-G-028)

作者简介: 胡德文 (1963), 男, 教授, 博士。

1 混沌控制的兴起

事实总是最具说服力的。尽管对混沌系统和混沌现象的了解远未充分,对混沌控制的可能性存在着理由充足的怀疑,在1990年,美国Maryland大学的Ott, Grebogi和Yorke^[5]提出一种比较系统和严密的参数微扰方法,由于其巧妙、新颖,人们称之为OGY方法;同年,该校的Ditto等人^[6]利用OGY方法首次对磁弹体上实现了对不动点的稳定控制;也是在同一年,美军海军实验室的Pecora和Carroll^[7]提出混沌同步原理并首次在电子线路上实现。他们的工作消除了人们的疑虑,揭开了混沌控制的序幕,此后,混沌控制的研究从理论和应用两方面得到迅速发展。尽管在10年后的今天,混沌控制研究的水平和规模已非昔日可比,但是历史地看,OGY方法的意义和作用是怎么评价也不为过的。下面就来介绍一下OGY的方法的思想和特点。

OGY方法^[5]的初衷是,能否通过容许参数一系列小的摄动,改善混沌系统的运动或得到需要的吸引周期运动。他们观察到,混沌吸引子中有着无穷多不稳定的周期轨道,不用产生新的轨道,在这些轨道中可选择一条满足要求的,通过小的连续参数摄动将系统运动最终限制在所在的周期轨道上即可。另一个关键性措施是,在混沌吸引子内部运动是遍历的,实际轨道早晚要接近目标,因而只需在接近目标到一定范围内才开始控制,否则不做任何处理。这颇似“守株待兔”,只不过由于遍历性,事先就知道“兔子”早晚会进入目标而已。第三个措施是,在双曲不动点附近,存在着局部稳定和局部不稳定流形,把状态与目标的偏差及参数的摄动看成微小量,将下一步状态与目标的偏差按这两个微小量作线性化展开,并要求下一步状态和目标的偏差矢量与不稳定流形方向垂直,即得到当前参数调节值。OGY方法还用到了另外两个工具:在连续时间动力学方程情况下,用Poincare映像将它化为相应的离散动力学方程;在没有动力学方程,只有状态向量的一个标量量测函数的情况下,他们运用延迟坐标技术(嵌入方法)得到状态变量过程在某维数欧氏空间中的嵌入像。就控制方面而言,他们的方法可归纳为:一旦系统运动到所需状态附近就向稳定方法拉一下。OGY等人^[5]还研究了在随机选择初始条件情况下实现控制所需时间的分布,以及平均时间和参数调节强度的关系。

OGY方法运用了混沌的几个特殊性质,它有几个突出优点:无需知道严格的系统演化的动力学方程;可通过微小的控制信号获得明显的控制效果;当前参数调节量与当前状态偏差在不稳定方向上的值成比例,因而具有传统反馈调节的特色(虽然实际上二者是不同的),因而有抗噪声的能力;具有一定通用性。相比之下,可知为什么比他们更早的几位先驱者的工作^[2~4]为何没有那么大的影响:他们的工作要么针对的是一个特殊系统(如Duffing系统),缺乏一定的通用性;要么调节方法是开环的,无法确保过程的稳定性;要么使用大的控制量;而且都必需有系统精确的动力学方程。

2 混沌控制研究的现有方法

在OGY方法提出之后,混沌控制出现了多个成功的研究方面:

(1) 对OGY方法本身的研究,如对它的合理性的证明^[8]、改进^[9],与极点配置法想结合^[10],控制高周期轨道^[11]等等。

(2) 各种传统控制手段^[12](PID控制、自适应控制、最优控制、非线性控制等)在混沌控制有效性问题中的系统尝试与发展,这方面工作卓有成效,具有已知的众多优点,但依赖于精确的数学模型,而且对混沌特性利用不足,因而更多的是把混沌系统当作检验控制方法有效性的场所,较少将控制的重点放在混沌系统的个性的发掘和利用上。关于有效性,目前还没有多少定性或定量的定论。希望这项工作重要的意义,以及研究成果与其研究规模不相称的现状,能唤起理论工作者更多的注意。

(3) 控制目标的悄然变化:有些情况下要求保持或产生具有特定性能的混沌状态(“反控制”^[13],已经用于提高机械振动筛子效率、产生具有特定需要的随机数等情况);直接控制分岔点或控制Lyapunov指数^[14,15]达到控制混沌现象的目的;混沌同步;超混沌(具有多个正的Lyapunov指数)控制与同步,等等。以产生正Lyapunov指数为目的的反馈控制为例^[14],若满足一定的有界性假设,则可以递归地找到一个一致有界的增益矩阵列,使得该线性反馈系统的所有Lyapunov指数都大于一个预先指

定的正数。混沌控制不再单纯地意味着消除混沌了。

(4) 工具方面新的尝试, 如神经网络^[16,17]、遗传算法^[18]等的运用。比如后者, 问题提法是: 对离散动力系统, 用遗传算法寻找控制序列, 使系统在规定的时间内(迭代次数)内到达目标的规定的误差范围内。它主要在于利用遗传算法的全局优化性和隐含并行性, 但同样存在着对系统的混沌特性重视不足的问题。

(5) Antonion 等^[19], Gora 等^[20]的概率控制方法, 主要工具是 Frobenius-Perron 算子(简称 F-P 算子), 通过 F-P 算子, 由原动力系统派生出一个描述系统长期演化性态的新的动力系统, 新动力系统的状态变量是概率密度函数, 其极限常常是原动力系统的支集在奇怪吸引子上的不变概率密度, 相比而言, 新的动力系统恰好忽略了在混沌系统中并不重要的瞬态行为, 而且不论原动力系统是否线性、是否连续, 系统的 F-P 算子总是有界线性算子, 其不动点正好是原动力系统的不变概率密度, 这样就可以应用泛函分析中强有力的工具, 如 F-P 算子的谱分解理论。F-P 算子是研究原动力系统渐近行为的恰当工具, 通过它得到的是一种全局的、解析的控制方法, 其目标是使最终不希望到达的点集的概率尽量小, 可惜这个方法还没有被广泛理解和应用。

(6) Lee 等^[21]的混合策略全局次优反馈方法, 它基于这样的考虑: 混沌控制中的对象或目标一般具有精细结构, 但同时限制在某种小区域之内, 因而先快后精, 先用最优控制器将轨道快速引入目标区域, 再用局部反馈控制器进行局部校正, 在边界上进行切换。这种方法的优越性是明显的, 它既不在瞬态上无谓纠缠, 也不在关键时刻马虎大意。这是将混沌特性和传统通用控制技术结合的较好的一种方法。

从原理上讲, 混沌同步也属于混沌控制的范畴, 但由于混沌同步具有其自身的特色, 而且内容广泛, 本文基本上没有涉及。

混沌控制的研究, 在中国物理和力学工作者中的反响也是非常热烈的, 已经产生了大量的理论和应用成果^[22-27]。

3 展望

目前, 混沌控制在理论和实践两方面的成功发展, 给混沌应用和控制论本身带来了光明美好的前景, 同时也对控制理论和实践提出了挑战。下一步的发展将面临着一些更加困难的问题, 摆在眼前的就有:

混沌控制能成为确定性控制和随机控制的桥梁, 在两者之间能产生实质性的联系吗? 在混沌和噪声并存的情况下, 需要什么新的观念、理论和工具? 具有现实意义的时空混沌^[26]和超混沌现象^[27]的控制问题; 对普适性理论中的工具(标度律, 重整化群)等的引入, 将改善目前混沌控制中对混沌特性利用不足、不深入的现状, 这种想法必将导致对混沌的不同层次的知识混合利用, OGY 方法就是一个先例; 稳定(不稳定)流形算法的应用^[28]; 混沌及混沌控制中计算机辅助分析的可信性理论, 目前虽已有一些关于计算机结果不可信的漂亮的例子和分析^[29], 但系统的处理尚未开始, 在混沌系统中何种情况下可用、怎么用数字计算机都是该认真探讨的课题; 混沌控制(包括同步)的更广泛的应用; 当然, 还有一个重要的问题是, 如何澄清或正确使用混沌研究中众多似是而非的结论: 测度论意义下、集论意义下和拓扑意义下结论间的似是而非, 数学意义下和物理意义下结论间的似是而非, 数学结果与计算机结果间的似是而非。比如, 在 Li-Yorke 定理中, 不规则集(导致复杂轨道行为的初始点集)不可数, 看起来很大, 但有些情况下它可能是零测集, 因而实际中不太可能出现那些复杂行为; 又如, 结构稳定系统的容许扰动范围可能极小; 再如, 具有三个不可通约频率准周期运动已证明不是通有的, 但在数值仿真和实际系统中发现它出现的可能性并不小^[30]。关于维数、熵和 Lyapunov 指数的一些等式, 理论上仅对流形等规则几何对象成立, 但在实际中, 发现对许多不规则几何对象成立, 即使不成立时误差也很小; 至今仍存在多种互不包含、互不等价的混沌定义等等。

混沌现象是普遍的, 混沌现象的控制(产生、湮灭、引导、同步等)依赖于混沌控制技术, 混沌控制本质地依赖于混沌研究的进展, 混沌本身又是多学科领域交叉的结果。混沌现象的普遍性、混沌

研究所揭示的现象和规律的反常性、深入性和重要性,值得关心和应用混沌的人员(特别是工程人员)的足够重视。混沌、混沌控制和混沌的多种应用将在相互依赖的发展中共同前进。

以下的参考文献仅列举了有代表性的一小部分。

致谢:作者曾就文中的一些看法请教于朱照宣教授、秦化淑教授,得到了他们热情的支持和指导,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Shinbrot T, Grebogi C, Ott E, Yorke J A. Using small perturbations to control chaos [J]. *Nature*, 1993, 363: 414-417.
- [2] Hbler A. PHD Dissertation [D], Department of Physics, Technical Univ. of Munich, Germany, November, 1987.
- [3] Pettini M. Controlling chaos through parametric excitations [A]. In *Dynamics and Stochastic Processes* (Lima R et al eds.) [C]. Springer-Verlag, 1990, 242-250.
- [4] Fowler T B. Application of stochastic control techniques to nonlinear systems [J]. *IEEE Trans. on AC*, 1989, 34: 204-205.
- [5] Ott E, Grebogi C, Yorke J A. Controlling chaos [J]. *Phys. Rev. Lett. A*, 1990, 64: 1196-1199.
- [6] Ditto W L, Rauseo S N, Sparo M L. Experimental control of chaos [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, 65: 321-324.
- [7] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in chaotic systems [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, 64: 821-824.
- [8] 杨凌, 刘曾荣. OGY方法的改进及证明 [J]. *应用数学和力学*, 1998, 19(1): 4-7.
- [9] Nitsche G, Dressler U. Controlling chaotic dynamical systems using delay coordinates [J]. *Phys. D*, 1992, 58: 153-164.
- [10] Romeiras F J, Grebogi C, Ott E, Dayawansa W P. Controlling chaotic dynamical systems [J]. *Phys. D*, 1992, 58: 165.
- [11] Hunt E R. Stabilization high-period orbits in chaotic system: the diode resonator [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 67: 1953.
- [12] Chen G, Dong X. From chaos to order: perspectives and methodologies in controlling chaotic nonlinear dynamical systems [J]. *Int. J. Bifur. Chaos*, 1993, 3: 1363-1409.
- [13] Yang W, Ding M, Mandell A J, Ott E. Preserving chaos: control strategies to preserve complex dynamics with potential relevance to biological disorders [J]. *Phys. Rev. E*, 1995, 51: 102-110.
- [14] Chen G, Lai D. Feedback control of Lyapunov exponents for discrete-time dynamical systems [J]. *Int. J. Bifur. Chaos*, 1996, 6: 1341-1349.
- [15] 刘向军, 黄文虎. Hopf分岔方向控制的频域方法 [J]. *非线性动力学报*, 1998, 5(1): 69-74.
- [16] 温香彩等. 混沌系统的RBF神经网络控制设计 [J]. *控制与决策*, 1998, 13(5): 272-276.
- [17] 沈辉, 胡德文. 混沌系统辨识的一种新的生长型神经网络方法 [J]. *自动化学报*, (已录取, 待发表).
- [18] 钟晓敏. 用遗传算法引导混沌轨道 [J]. *控制与决策*, 1998, 11(2): 165-168.
- [19] Antonion I, Basios V, Bosco. Probabilistic control of chaos: the β -adic Renyi map under control [J]. *Int. J. Bifur. Chaos*, 1996, 6: 1563-1573.
- [20] Gora P, Boyarsky A. A new approach to controlling chaotic systems [J]. *Phys. D*, 1998, 111: 1-15.
- [21] Lee H W J, Paskota M, Teo K L. Mixed strategy global sub-optimal feedback control for chaotic systems [J]. *Int. J. Bifur. Chaos*, 1997, 7: 603-623.
- [22] 武志华, 张承福, 朱照宣. 耗散系统混沌控制方法初探 [J]. *自动化学报*, 1998, 24(6): 806-810.
- [23] 陈立群, 刘延柱. 混沌系统的输送控制及其发展 [J]. *非线性动力学报*, 1998, 5(3): 195-199.
- [24] 唐芳, 邱琦. 混沌系统的辅助参考反馈控制 [J]. *物理学报*, 1999, 8(5): 802-807.
- [25] 李伟, 陈光旨, 刘中华. 用改进周期脉冲方法控制保守系统的混沌 [J]. *物理学报*, 1999, 48(4): 581-587.
- [26] Hu G, Qu Z, He K. Feedback control of chaos in spatiotemporal systems [J]. *Int. J. Bifur. Chaos*, 1995, 5: 910-936.
- [27] 方锦清. 非线性系统中混沌控制方法、同步原理及其应用前景(二) [J]. *物理学进展*, 1996, 16(2): 137-202.
- [28] Kostelich E J, Yorke J A, You Z. Plotting stable manifolds: error estimates and noninvertible maps [J]. *Phys. D*, 1996, 93: 210-222.
- [29] Tropicovsky M I. Computers and chaos: an example [J]. *Int. J. Bifur. Chaos*, 1992, 2: 997-999.
- [30] Grebogi C, Ott E, Yorke J A. Are three-frequency quasiperiod orbits to be expected in typical nonlinear dynamical systems? [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1983, 53: 339-342.