

迅速发展中的混沌控制与同步*

方锦清 (中国原子能科学研究院)

* 国家留学回国人员重大课题资助项目及中国核工业科学基金资助项目

关键词 混沌控制 同步 超混沌 时空混沌

本文简要地综述了正在发展中的混沌控制与同步的最新进展,它涉及非线性科学中一个富有挑战性及具有巨大应用前景的重大课题.文中对迄今国内外发展的现有的混沌控制的各种方法及混沌同步的类型进行了分类和评述,同时指出了研究发展趋势.

非线性系统中复杂的时空结构(混沌奇怪吸引子)以及混沌的控制与同步,作者已在本刊作过简介^[1].由于该课题具有巨大的应用前景,近年来在国内外对该领域的理论与实验应用的研究蓬勃展开,掀起了研究热潮.本文拟对该课题的最新进展作进一步评述,以期引起广泛的关注.

一、混沌控制的目标

混沌奇怪吸引子中包含极其丰富的信息,诸如在相空间中存在稠密的各种周期轨道及非周期轨道,它们的图样千奇百怪等.混沌控制的目标主要有以下几种:

- (1)抑制或消除某些类型的混沌态;
- (2)稳定控制混沌吸引子中各种期望的不稳定周期态,从低周期到高周期实现稳定控制;
- (3)通过控制后达到人们所需的新的动力学行为,包括各种时空图样结构;
- (4)消除多重的混沌吸引子流域;
- (5)稳定控制系统的某些平衡点;
- (6)稳定控制混沌吸引子中的非周期态等.

根据不同的学科和领域,从不同的应用出发,采取上述不同的控制目标、策略和方法.

二、混沌控制方法的分类

从迄今国内外的研究来看,我们提出了如附图所示的分类法.从图可见几种特点:

(1) 该课题包括混沌(超混沌)的控制及混沌(超混沌)的同步两大部分,两者属于同一研究范畴的不同研究内容和策略,可以分开研究,但又紧密联系在一起,且各有妙用.

(2) 混沌控制的方法主要有反馈控制法与无反馈控制法.控制的策略有几种,从系统内部条件改变考虑,可以从参数、变量、状态及几何方面入手;从系统外部考虑,则可从周期强迫信号、外部噪声、振荡吸收器等不同形式加以区分.其他方法可以吸收和采用现代科技的所有的可能手段,诸如神经网络法、人工智能法、非线性工程控制等.

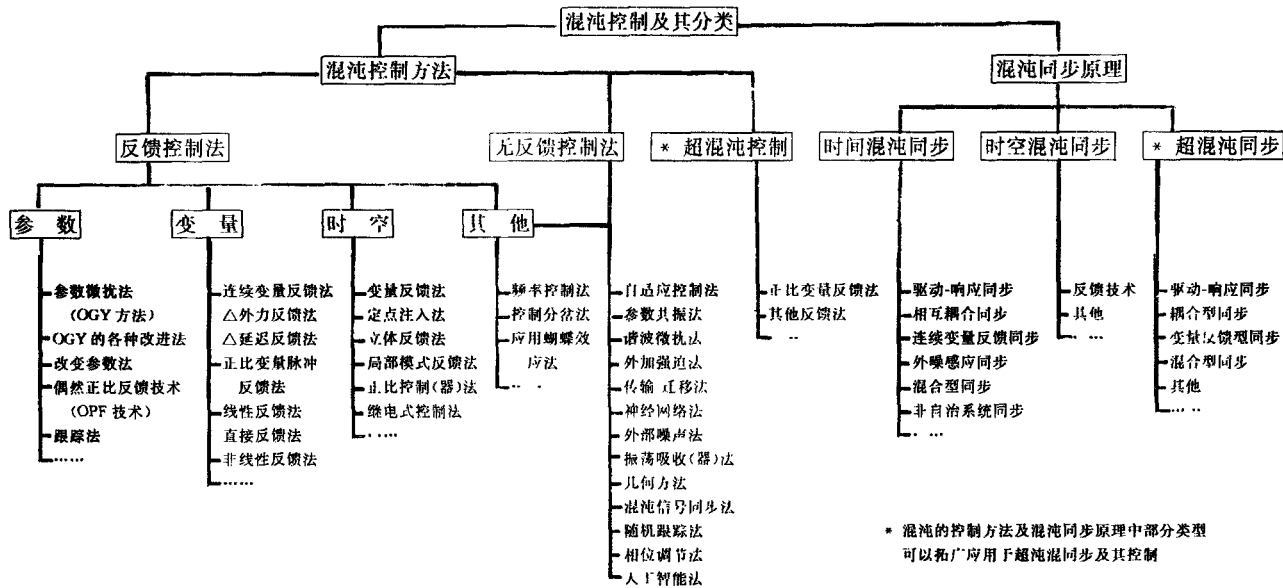
(3) 有对系统变量或参数进行微扰变化和大改变之分,前者由于是小微扰控制,可称为“低能”控制法;后者由于对系统大动“手术”,诸如大幅度改变系统参数、增加系统变量、添加子系统,甚至重新设计系统和采取外部强迫措施等,耗费大“能量”和较大的代价及较复杂的技术,所以此类可称为“高能”控制法.

(4) 从总体上看,混沌控制尚缺乏统一的理论框架,这是与经典控制的不同之处;但是,混沌控制至少有一个共同的机制,即要实现从不稳定态到稳定态的有效控制,就须变原来系统中正的李雅普诺夫指数为负值,这是一个基本的物理实质.不过,尚其他的机理,还有待进一步从理论上探讨.

(5) 混沌同步已有几种类型,不过它们还处在发展之中(同步概念及具体同步类型在下面介绍).

(6) 混沌控制方法及混沌同步类型,在一定条件下,可以适当拓广到超混沌同步及其控制.

附图展示了该领域当前发展的迅猛势头.



附图 混沌控制及其分类

三、同步概念及混沌同步的类型

1665年,荷兰物理学家、摆钟的发明者惠更斯首先发现同步现象。他因小病在家时,偶然观察到了两个钟摆的振荡达到了完全同步,他的偶然发现开辟了整整一个数理分支:耦合振子的理论,从而阐明了在自然界及实验室中的许多同步现象。耦合振子的同步现象已最为人们所熟悉。例如,在马来西亚的潮汐河畔,有一次成千上万的雄性萤火虫夜间聚集在棵棵树上,并且步调一致地同步发光(闪亮)又同步熄灭,以吸引它们头顶上游荡着的雌性萤火虫,构成一幅持续数小时之久的蔚然壮观的奇景。类似的同步现象不胜枚举,诸如大象的漫步、剧烈振荡的等离子体、安静平和的生物振子等,它们与混沌同步之间存在着一种深刻的联系,贯穿着一条共同的数学线索。

混沌为何能同步?混沌同步的发现既令人吃惊又引人入胜。因为混沌行为的最大特征就是它们的轨迹对初始条件的高度敏感性,即差之毫厘,失之千里,所以人们以往认为在实验室里重构两个相同的即同步的混沌系统,简直是不可能的事情。可是,就像非线性系统具有令人预料不到的特性一样,这一禁锢被冲破了,1990年,美国的佩科拉(Pecora)和卡罗尔(Carroll)两人^[2,3]首先用电子学电路从实验上发现在一定条件下混沌可以同步。他们的实验并不复杂,研制了一个能产生混沌吸引子的电子线路,该电路可以分成不稳定的子电路及稳定的子电路两大部分。然后复制一个与稳定的子电路相同的电

路,原来的整个电路称为驱动系统,复制的电路称为响应系统,最后把这两个系统用混沌驱动信号耦合起来,即用驱动系统中的混沌信号驱动响应系统,由此从实验上实现了输出信号的混沌同步。这种同步方案属于附图中的驱动-响应同步,是混沌同步的第一种类型。它们必须满足同步原理:只有当响应系统的所有李雅普诺夫指数为负值(即稳定)时,响应系统才能与驱动系统达到完全同步。近年来,该类型同步已推广到非混沌同步(即周期同步、准周期同步等)及高阶级联混沌同步^[3]。上述混沌同步很快被应用于秘密通讯、密码学等研究中,已成为一个应用研究的热点,有希望较快达到开发应用阶段。

第二种是相互耦合同步类型,即通过适当方式由两个或更多系统相互耦合起来达到混沌同步。该类型加波诺夫(Gaponov)、格雷克霍夫(Grekhov)等人在研究湍流时早已提出,后来温弗尔(Winful)及拉曼(Rahman)^[4]从理论上研究了半导体激光阵列系统同步问题。1994年美国的罗伊(Roy)及索恩伯里(Thornbury)^[5],后来日本Sugawara等人^[6]分别从实验上独立地观察到了两个混沌的激光系统达到了完全同步,他们都是利用激光光强适当耦合的结果。前者用两个Nd:YAG混沌激光系统,后者用两个PQS混沌激光系统,达到了异曲同工之妙。

第三种类型是连续变量反馈同步。它是通过与时间有关的小微扰连续反馈技术实现的。该法首先由德国的皮拉加斯(Pyragas)^[7]提出,后由尤(Yu)、克瓦克(Kuak)和利姆(Lim)^[8]从实验上给予验证。

第四种类型是由外部噪声作用导致混沌同步。马里坦(Maritan)及巴纳瓦(Banavar)^[9]证明了两个混沌系统在相同的噪声作用下,只要噪声强度足够大,则可达到两个系统的混沌同步。

混沌同步是具有巨大应用潜力的课题,正处在不断进展之中,诸如已发展了非自治系统的混沌同步,以及可能的混合类型等。

四、超混沌同步及其控制

我们知道,表征非线性系统混沌行为的主要特征量是李雅普诺夫指数 λ ,它刻画了一个系统对初始条件的敏感程度。通常,低维的混沌系统只有一个 λ 大于零,上述混沌控制与同步一般也指这种情形。但是,实际上在自然界及社会经济等众多领域中广泛存在着高维的非线性系统,诸如受控制核聚变托克马克中等离子体的不稳定性——混沌及湍流、多路激光系统、国家经济领域等复杂系统,等等,它们存在一个以上 $\lambda > 0$ 的混沌行为,人们称为超混沌。于是,自然地提出两个问题:是否可以实现超混沌同步?如何实现超混沌的控制?这是两个令人感兴趣和受人关注的新课题。

最近,我们的研究表明^[10],对于某些高维非线性系统,在特定的条件下也可以实现超混沌同步及其控制。我们已经分别以著名的罗斯勒(Rössler)系统及复数洛伦兹-哈肯系统作为典型系统,实现它们及其高阶级联系统的超混沌同步与控制。目前,我们已把混沌同步的前三种类型拓广到超混沌同步之中,应用第一、第二两种类型的混合型也达到同步的效果,并对不同的系统采用不同的同步类型。其他类型的超混沌同步正在研究之中。

研究表明,两个或更多系统的同步结果可以有几种情形:一是完全同步,即两个系统的相应的诸变量均分别达到同步;二是部分同步,即两个系统的相应变量只有某个或某些达到同步,其他并不达到同步。后者也有不同的情况。不论是完全同步,还是部分同步,都各有妙用,两者巧妙结合,将会结出丰富多采的应用硕果。因此,以上各种情形都值得进一步研究,并开发应用。

一个超混沌系统及高阶级联超混沌系统的控制,与混沌系统的控制有点类似之处,可以在适当条件下,把混沌控制的方法加以拓广应用。例如,在反馈控制法中,我们把偶然正比反馈技术及正比于系统(主)变量的脉冲反馈控制法进行开拓后(采用间歇正比变量反馈法),已成功地应用于超混沌的控制。我们不仅可以取得稳定的各种周期态,而且也得到稳定的稳恒态、双稳态、多稳

态等丰富的动力学行为,从而可为各种可能的应用提供基础知识。但是,超混沌控制与同步的机制,以及有关新方法、新技术还有待进一步深入研究。

五、时空混沌的控制与同步

上述的混沌控制与同步是针对非线性系统的时间混沌行为的,它与空间无关,或者只与简单的空间结构有关。但是,在自然界和实验室中普遍存在时间-空间混沌结构,时空混沌的控制比时间混沌的控制要麻烦些,技术上也困难得多。最突出的例子是受控核聚变等离子体的时空不稳定的控制问题,在托克马克装置中就很难达到完全有效控制各类不稳定性,其主要原因:一是这类系统实际上是分布系统,而不是集总系统。实际上系统是无穷维的,不能只用有限维的偏微分方程来描述,而必须用无限维的或相当高维的偏微分方程来描述。但是,要真正实现这样高维系统的控制是极艰难的。二是即使对有限维的集总系统进行控制,也很难以某种方法同时达到对多种不稳定性的控制,往往是:一个不稳定性控制住了,另一个不稳定性又出现了,实在难以驾驭它们。因此,研究高维时空混沌及超混沌的控制与同步是特别艰难的。

目前对时空混沌控制的研究刚刚开始,附图已列出一些控制方法。北京师范大学的胡岗及贺凯芬^[11]运用变量反馈法及定点注入法,实现了由正弦波驱动的1维非线性漂移波方程中的时空混沌控制,他们的基本做法是对波数空间的某些点输入单色波负反馈,或在空间的局部区域加进反馈项。换句话说,前者是在 k 波数空间定点注入,后者是在 x 空间内局域注入,不过,前者的探测比后者困难,但数值模拟结果表明这个方法是可行的。

最近奥尔巴克(Auerbach)^[12]应用参数小微扰反馈控制法,对由许多低维混沌单元构成的耦合系统产生的对流不稳定性的空间混沌实现了稳定控制。此外也有人对上述有关分布系统中的时空混沌的控制进行过有益的探索,例如:麦克德莫特(McDermott)及Chang^[13]曾利用正比控制器去稳定自动热反应器中的不动点,为此需要精心设计非线性模型,以便识别时空动力学,然后才能预先确定分布系统中的点集的不稳定谱。Qin等人^[14]利用立体反馈控制法从实验上成功地消除了在一个催化晶片上热图样的时间混沌,然后利用所谓Karhunen-Loeve方案从立体像中把占主导的空间结构识别出来,从而抑制了分布热点系统中低维的时空动力学行为。辛格(Singer)等人^[15]则应用过继电器式控制器去稳定一个混沌热对流的回路,等等。

由于非线性系统中时空结构的复杂多样性,时空混沌的完全控制确是极其困难的. 需要从理论和实验技术上进一步突破才行. 何时能够有效稳定控制托克马克受控核聚变装置中等离子体的时空混沌、湍流,将是这个领域中最重要,任重而道远啊!

混沌控制与同步研究的迅猛发展,已为应用开辟了广阔的前景. 我们对此,包括附图所示的控制混沌的各种方法以及混沌同步类型,已经进行了详尽而系统的综述,有兴趣的读者可参阅文献[16].

(1996年1月26日收到)

方锦清 研究员,中国原子能科学研究院,北京 102413

- 1 方锦清. 自然杂志, 1993; 16(6): 9
- 2 Pecora, L. M., Carroll, T. L. *Phys. Rev. Lett.*, 1990; 64: 821
- 3 Carroll, T. L., Pecora, L. M. *Physica D*, 1993; 67: 126
- 4 Winful, H. G., Rahman, L. *Phys. Rev. Lett.*, 1990; 67: 1575
- 5 Roy, R., Thornbure, K. S., Jr. *Phys. Rev. Lett.*, 1994; 74: 2009
- 6 Sugwara, T., et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1994; 74: 3505
- 7 Pyragas, K. *Phys. Lett. A*, 1992; 170: 421. 1993; 181: 201

- 8 Yu, Y. H., Kuak, K., Lim, T. K. *Phys. Lett. A*, 1994; 191: 233
- 9 Maritan, A., Banavar, J. R. *Phys. Rev. Lett.*, 1994; 72: 1451
- 10 方锦清. 科学通报, 1995; 4: 306
- 11 Hu Gang, He Kaifen. *Phys. Rev. Lett.*, 1993; 71: 3794
- 12 Auerbach, D. *Phys. Rev. Lett.*, 1994; 72: 184
- 13 McDermott, P. E., Chang H.-C. *Chem. Eng. Sci.*, 1991; 66: 1123
- 14 Qin, F., Wulf, E. F., Chang, H.-C. *Phys. Rev. Lett.*, 1994; 72: 1459
- 15 Singer, J., Wang, Y.-Z., Ban, H. H. *Phys. Rev. Lett.*, 1991; 66: 1123
- 16 方锦清. 物理学进展, 1996; 2: 137

Rapid Advances in Chaos Control and Synchronization

Fang Jin-qing

China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413

Key words chaos control, synchronization, hyperchaos, spatial-temporal chaos

酒精成瘾

张 镛 秦 震 (上海医科大学神经病学研究所)

关键词 酒精 生物膜 遗传差异

酒精, 化学术语称为乙醇, 是酒类饮料中的重要成分, 具有脂溶性和水溶性的双向特性, 因而易于透过生物膜结构被吸收, 进入血流, 并易于透过血液与脑神经细胞(神经元)之间的结构(BBB)而影响神经功能. 对神经系统的影响因不同剂量和不同个体差异甚大, 具有镇静、兴奋、麻痹、致谵妄和昏迷等多重性作用.

人体细胞生物膜(包括中枢神经系统)若频繁暴露于酒精, 亦即人体组织液经常处于一定浓度的酒精环境中, 神经系统就会对其产生生理性依赖, 而使个体对酒精产生耐受性. 表现为饮酒量逐渐加大, 较长时间不饮酒(或戒酒之初)时就会产生渴望畅饮酒料的焦躁心理, 并出现躁动、抽风(脱瘾性癫痫)、震颤等神经精神症状. 这些情况称为酒精成瘾. 饮酒可使酒精血浓度升高而迅速改善以上症状, 上述戒断症状的出现是酒精成瘾的临床标志.

酒精是酒精成瘾和酗酒泛滥的物质基础. 酒精成瘾者对酒精的依赖是生理性的, 而不只是心理或习惯的作用.

酒精成瘾在动物界可能有普遍性意义, 生物体细胞

膜的分子学异常是成瘾的实质. 酒精通过影响穿膜信号蛋白功能、细胞代谢和基因表达而表现为个体依赖. 尽管生理学因素影响饮酒习惯, 但遗传学因素对酗酒的发展有重要作用. 近亲间的酗酒习性有很高的一致性^[1]. 不同种族间的酒精适应能力可有很大差异. 黄种人肝脏内乙醛脱氢酶常缺乏, 导致饮酒后血中乙醇代谢中间产物——乙醛浓度过高而出现面色潮红等血管扩张表现.

急性酒精耐受或适应可很快形成. 饮酒数小时后, 饮酒者可在原中毒性乙醇浓度下转为清醒, 这可能是神经系统的乙醇适应性膜机制的作用.

所有酗酒者均有慢性酒精耐受性, 即可以在异常高的血乙醇浓度下保持清醒^[2].

乙醇介入细胞膜可使后者延伸性增加, 更能耐受急