

超混沌、混沌的控制与同步

Control and Synchronism of Superchaos and Chaos

方锦清

(中国原子能科学研究院, 研究员 北京 102413)

非线性复杂系统中超混沌、混沌的时空结构及其控制与同步,是当前国际上非线性科学及其交叉领域的一个学术热点,由于具有重大的学术意义及巨大的应用潜力,近年来该课题在国内外进展迅速。本文就其最新进展作进一步评述。

控制与同步的主要目标

“混沌”已为人们所熟悉,但“超混沌”一词却鲜为人知。其实它们的区别只在于:超混沌比混沌具有多方向上的不稳定性,而混沌只在一个方向上发生轨迹扩张(发散);前者至少有两个表征这种发散特性(轨迹对初条件的敏感性)的李雅普诺夫指数 $\lambda > 0$,而后者只有一个 $\lambda > 0$ 。超混沌只存在于非线性高维系统中,即至少有四维的非线性复杂系统。这样的系统在自然界及实验室中比比皆是,诸如:受控聚变装置中的等离子体系统、复杂流体系统、多路激光系统及约瑟夫逊结的陈列系统,等等。最困难的要算聚变等离子体中的混沌、超混沌(湍流)的控制与同步问题,例如最有实现前景的托克马克装置中的等离子体,实际存在无穷多的维数,必须用无限维或极其高维的偏微分方程来描述,但是由于数理方法局限,这类偏微分方程的求解是十分困难的。而实际上对等离子体中多种不稳定性的控制在技术上的要求也是非常高的,通常一个不稳定性控制住了,另一个不稳定性又冒出来了,做到同时稳定控制是极其艰巨的。

目前,对混沌、超混沌的控制与同步的研究也刚刚开始,从90年代取得方法与原理的突破以来,一向被认为不稳定性、不可控性及不可靠性的混沌、超混沌,可能变成一种稳定的、可控的、难能可贵的、用途广泛的“聚宝盆”。对混沌、超混沌的控制与同步的含义及主要目标可以概述如下:抑制住或消除掉非线性系统中的混沌态或超混沌态;稳定地、有效地控制混沌、超混沌奇怪吸引子中的不稳定的周期态,尽可能地达到从低周期到高周期都能

按需控制及同步;实现人们所需的新的动力学行为,即可以改变原系统的行为而达到新的时空有序结构;消除多重的混沌、超混沌的吸引子流域;稳定控制系统中的某些平衡点;稳定控制混沌、超混沌吸引子中的所需的非周期轨道;实现至少两个混沌或超混沌系统的同步及其控制。

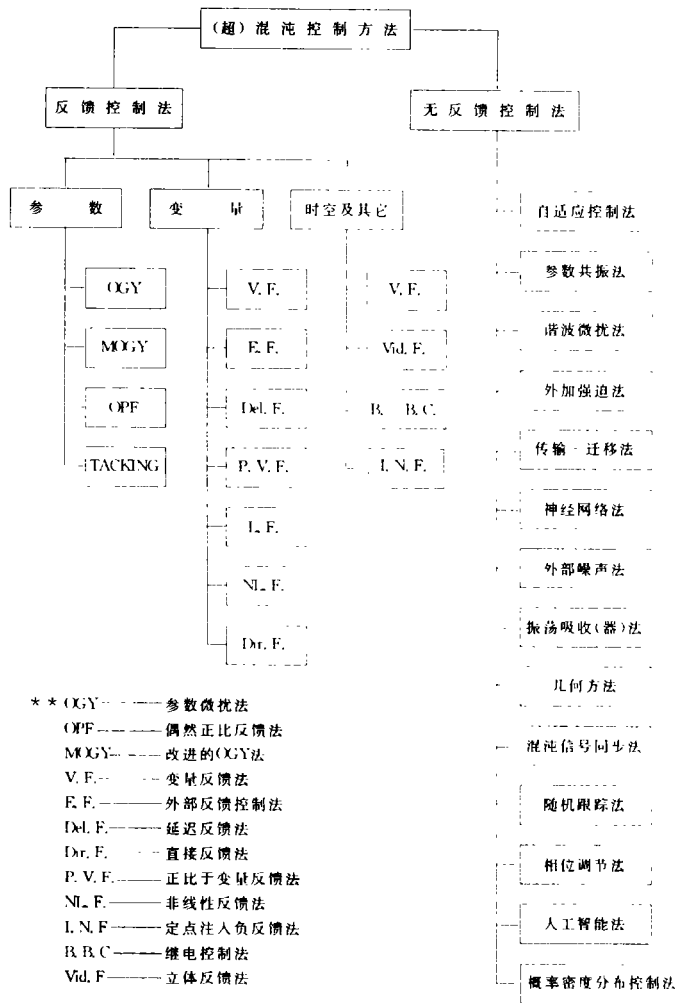


图1 (超)混沌控制方法的分类

各种学科及不同领域,都可以根据各自的既定目标,采取恰当的控制与同步的策略及方法达到最终实际应用的目的。

控制方法与同步原理的分类

迄今,国内外已提出各种各样的混沌、超混沌的控制方法与同步方案,我们将在《物理学进展》杂志上详细评述。这里,仅用图1示出其主要分类表。我们的分类有以下特点:

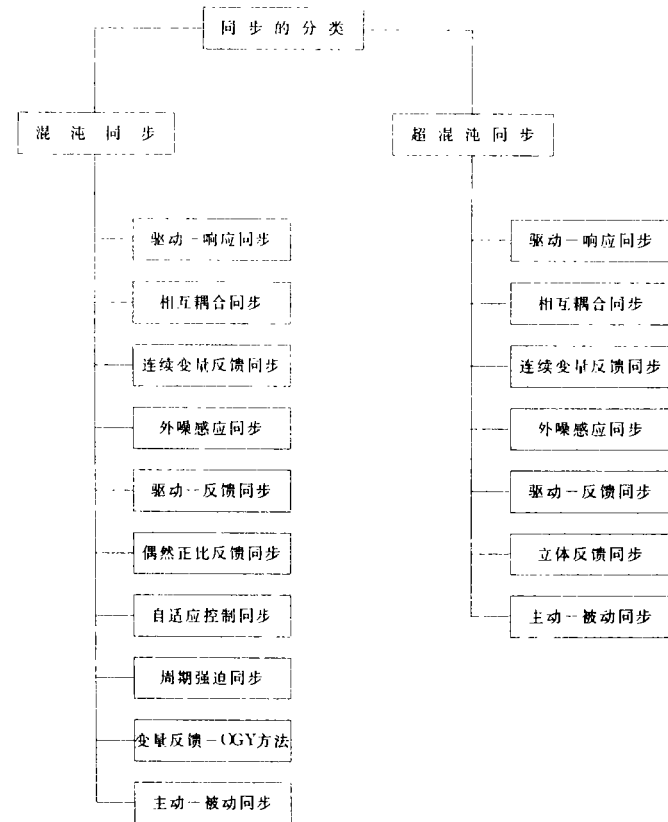


图2 (超)混沌同步的分类

1. 混沌、超混沌的控制与同步是既有紧密联系又有一定区别的两大部分,但同属于一个课题的研究范畴,从方法、策略及技术都可以相互借鉴和促进,它们有相似性,又各有妙用。

2. 控制的方法(原理)主要有反馈控制法与无反馈控制法两大类。控制的对象和措施尽管多样,但可以分门别类。从系统内部条件改变考虑,控制对象可以针对参数、变量、状态及几何等诸方面;从系统外部考虑,采取的措施可以是外部周期强迫信号、外部噪声、振荡吸收器等。事实上,运用现代科技所发展的各种可能技术与手段,诸如神经网络方法、人工智能方法及非线性工程控制论方法等等,均可达到异曲同工之妙。

3. 从控制的深度与层次观察,对系统的变量或

参数有微扰变化和大改变之分,前者为小微扰控制,可谓“低能”控制法;后者属于对受控系统大动手术,诸如大幅度改变系统参数、增加系统变量、添加子系统,甚至重新设计系统及采取外部特殊措施等,这意味着耗费“能量”较大、要求技术较高及代价较大,所以称为“高能”控制法。

4. 与经典控制问题不同之处是,混沌、超混沌的控制迄今缺乏统一的理论框架。但是,从物理上,混沌、超混沌的控制有一个共同的机制,即欲实现从不稳定周期轨道到稳定的周期轨道的有效控制。需要变原来系统中的李雅普诺夫指数 λ 的符号从正到负。当然还有其它的机制在探索之中。

5. 已经发展了几种类型的混沌同步及超混沌同步的方案,它们有一定的类似性,可以相互拓广。同样,许多混沌的控制方法也能拓广到超混沌的控制中去。

总之,我们从图1看到该领域目前发展的整个动向及迅猛的势头,把握住发展方向和抓住机遇,对于开拓这一领域的高科技是极为重要的。

从钟摆同步到混沌、超混沌同步

科学史上,发现同步现象可以追溯到1665年,荷兰物理学家、钟摆的发明者惠更斯首先发现两个并排的摆钟的振荡达到完全同步,这是他在家小病赋闲时的偶然发现,由此开辟了数理领域的一大分支:耦合振子理论,从而阐明了自然界及实验室中的一大类同步现象。耦合振子的同步现象已是最为人们所熟悉的组织形式。例如马来西亚、泰国及新几内亚的潮汐河畔,成千上万的雄性萤火虫在夜间聚集在一棵棵树上,步调一致地发光闪亮,而后又同步地熄灭,用以吸引它们头顶上游荡的雌性萤火虫,构成了一幅蔚然壮观的奇景。类似的自然界中的同步现象不胜枚举:瞪羚的跳跃、大象的漫步、激烈振荡的等离子体、安静的生物振子等等。

但是,发现混沌同步及其原理,却是90年代初的事情。混沌、超混沌的最重要的共同特性就是,它们的轨迹都对初始条件具有高度敏感性,所谓“差之毫厘,失之千里”,所以人们以往认为在实验室内重构两个相同的即达到同步的混沌系统简直是天方夜谭。但是,正如非线性系统具有不可预测的行为一样,这一禁锢被冲破了。1990年美国学者佩科拉(Pecora)和卡罗尔(Carrol)设计了一套电子学线路系统,其中一个叫驱动系统,可以产生混沌,它又可分成两部分:混沌的子系统及稳定的子系统。复制其中稳定部分的线路作为响应系统。然后把驱动系统与响应系统用混沌信号连结起来,于是在混沌信号的驱动下,两个系统的输出信号达到了完全同步,此亦称混沌同步。自然,超混沌同步亦有类似的

含义,即两个超混沌系统在适当耦合下,它们的输出信号达到了完全同步。

目前,对混沌同步及超混沌同步的实验与应用的可能性研究正在蓬勃展开,开始出现激烈竞争之势。主要的应用研究在于试图实现秘密通讯及提高激光功率。这些方面的应用前景极为诱人。

混沌、超混沌同步的类型

上述佩科拉和卡罗尔提出的混沌同步方案称为驱动—响应同步类型。该类型的缺点是必须把混沌、超混沌系统分解成至少两个部分,而许多实验系统是无法这么分解的,因为这是由物理过程或生化过程的本质所决定的。例如,激光系统内部的场强诸量就不能单独分解后再复制成响应系统。于是,一些新的同步类型就随之产生。

最近,科卡尔弗(Kocarev)及帕利茨(Parlitz)对上述方法进行了改进,提出了更一般的混沌同步理论,即所谓主动—被动分解法,不仅可以把驱动—响应同步包括在内,而且还把高维超混沌同步系统包括在内,并强调指出:超混沌同步可以更有效地进行编码及扩大通讯信息量。由此发展的超混沌同步方法,我们称它为主动—被动同步类型。

第三种同步类型是相互耦合同步。该类型通过适当的耦合方式把两个或更多个系统相互耦合起来达到混沌或超混沌同步。该类型的提出可追溯到加波诺夫(Gaponov)及格雷克霍夫(Grekhov)等人在研究湍流时的方案,尔后温富尔(Winful)和拉曼(Rahman)从理论上论证了半导体激光阵列系统的同步问题。1994年美国学者罗伊(Roy)及索恩伯格(Thornburg),稍后日本学者休格沃纳(Sugawara)等人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同步,他们都是利用激光光强进行适当耦合而实现的同步。前者应用两个Nd:YAG混沌激光系统,后者应用两个PQS混沌系统。现在正在研究多路激光系统的超混沌同步。

第四种类型是连续变量反馈同步,它是利用系统的某些或全部变量适当反馈到原系统中去,以实现两(多)个系统的混沌、超混沌的同步。该法由德国学者派拉加斯(Pyragas)提出后,经过不断完善及实验证明是有效的。该法有一定的普适性。

第五种类型是把变量反馈法与参数微扰法(即OGY法)结合起来。该法由美国莱(Lai)及格雷博吉(Grebogi)很好地实现了十个耦合的逻辑映象的超混沌同步及其控制。我们也应用类似方法对两个超混沌的Rossler系统实现了同步控制。

第六种类型是外部噪声导致混沌、超混沌同

步。马里坦(Maritan)及巴纳瓦尔(Banavar)等人的数值研究表明:两个混沌系统在相同分布的白噪声作用下,只要噪声强度足够地大,可以达到两个混沌系统的同步。我们也把此法推广到两个Van der PoL超混沌系统的同步上去,取得了成功。在白噪声强度 $D > 0.5$ 下,可以实现超混沌同步。

第七种类型是外部噪声导致同步。马里坦及巴纳瓦尔等人已经数值研究证明了,两个混沌系统在相同分布的白噪声作用下,只要噪声强度足够大,则可以达到两个混沌系统的同步。我们也把此法拓展到两个超混沌系统的同步中去,典型例子是两个耦合的广义Van der PoL系统构成的超混沌同步系统。结果表明:白噪声强度大于0.5则可达到超混沌同步。

目前,混沌同步与超混沌同步的研究正在迅猛发展,后者比前者更为艰难,许多机理及方法尚待进一步深入探索,应用中涉及的许多技术问题急待解决,这是一个大有作为的重大研究课题,应当引起国内更广泛的关注。

超混沌的控制方法

混沌的控制方法繁多(如图1所示),在前文中我们已对主要控制方法作过介绍。现在的问题是:是否可以把混沌的控制方法推广到超混沌的控制中?回答是肯定的,原则上只要经过适当的拓广亦可应用于超混沌的控制。文献及我们的研究证实了这点。诸如:偶然正比反馈技术、正比于系统变量的反馈法,我们经拓广后,采用间歇正比于主变量的反馈法,已有效地应用于复数Lorenz—Haken超混沌系统、耦合广义Van der PoL超混沌系统以及Rossler超混沌系统的稳定控制,不仅获得各种稳定的周期态(如 $P-3$, $P-5$ 及高周期态),而且得到了丰富的新动力学行为(如平衡态、双稳态、三稳态等高稳态)。奎因(Qin)等人利用立体反馈控制法从实验上消除了催化晶片上的热图样的时空混沌,再应用Karhunen—Loeve方法从立体图样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的时空混沌。奥尔巴克(Auerbach)则应用参数小微扰反馈法,对由许多低维混沌单元构成的复合系统的超混沌实现了稳定控制。

由于非线性高维系统的多样性与复杂性,迄今混沌、超混沌的控制与同步的研究还刚刚拉开序幕,这是一个跨世纪的交叉科学及潜力巨大的高科技领域,既十分艰难、极富挑战性,又大有应用发展的前景,必将在今后取得更加迅猛的发展和产生难以估量的影响。

(责任编辑 蔡德诚)