

混沌控制及其应用前景

Chaos Control and Its Prospects for Application

方锦清

(中国原子能科学研究院, 研究员 北京 102413)

从1963年美国气象学家洛伦兹发现混沌现象以来,迄今整整30年了。他首先发现了所谓“混沌奇怪吸引子”,并以“蝴蝶效应”为比喻,科学地揭示了长期天气不可预测性。现在我们知道,混沌是自然界及人类社会中普遍存在的一种复杂现象,其覆盖面之大、跨学科之广、综合性之大、应用发展潜力之大,都是空前的。国际上誉称这是一场继相对论和量子力学问世以来本世纪物理学的第三次大革命。这场革命正在冲击和改变着几乎所有科学和技术领域,向我们提出了巨大的挑战。

混沌,除了开拓人们的视野和加深对客观世界的认识之外,它对改造客观世界起多大的作用,产生何等影响,换言之,混沌究竟有什么应用和发展前景,这是摆在人们面前的一个重大课题及学术热点,也是深入开展混沌研究的巨大推动力。

近年来国际上混沌控制方法的突破性进展及其实验应用的蓬勃开展,为人们展现了十分诱人的应用和发展前景。

一、第一次突破性进展—OGY方法

混沌现象是非线性系统的共同属性,而非线性系统比比皆是,不论是物理的、化学的、生物的、地理的、经济的、工程的、医学的以及社会的系统,概不例外。迄今,从理论和实验都证实,即使是最简单的非线性系统也能产生十分复杂的行为特性。一些典型的数学物理模型可以概括一大类非线性系统的演化特性。例如,对单摆运动规律的深入研究,已经发现它囊括了从激光现象到超导的约瑟夫森结的高科技领域,并拓展到上述众多学科领域,诸如生理学、心脏动力学、精神病学、生态学及经济计量学、社会人口学,等等。

混沌现象包含极其丰富的信息,诸如各种周期态与非周期态,图样丰富多彩,巧夺天工,不是艺术,胜似艺术,引起了人们极其广泛的浓厚兴趣。于是,从应用的角度人们不难设想,只用很简单的非

线性元器件,就能产生复杂而有用的功能。例如,我们可以利用混沌现象在时间上、空间上及功能上的多样性作为特殊的信息源,用于信息存储及通讯等目的,也可作为特殊信号发生器产生有用的周期信号。但是混沌奇怪吸引子内的轨线(或信息)是高度不稳定的,瞬息万变,难以捕捉,因此即使信息存储下来,也很快会改变,往往难以重复识别,如不加以控制,根本无法应用。因此,长期以来在国际电子工业中,尽量回避混沌行为,设法抑制混沌的出现,其它领域中对混沌也取类似的态度。随着研究的深入及应用呼声的高涨,人们不得不考虑,在深入认识混沌现象的同时,能否采用人工方法对它进行有效的控制。最先想到的是,通过适当地从外部控制调节实际系统的某些参数条件,以改善和提高系统工作性能,如各种电子仪器设备、物理装置(包括粒子加速器、原子反应堆、热核聚变装置及激光系统等)。人们力图通过混沌控制,使之成为当今研制新器件、新装置及高新技术的有力手段和途径。这个举世瞩目的重大课题,由于90年代初国际上混沌控制方法的突破,出现了光明的曙光。

1990年,美国马里兰大学的物理学家奥特(ott)、格里博古(Grebogi)及约克(Yorke)三人首先从理论上提出控制混沌的方法,后来简称为OGY方法。同年,该校的迪托(Ditto)、劳西(Rauseo)及斯帕内(Spano)三人从实验上验证了OGY方法的有效性。他们选择了带状磁弹体在磁场作用下的微扰实验,观察其刚性变化。实验表明,当磁场强度较弱时,磁弹体直立着(刚性较强);当磁场强度逐渐增强时,刚性减小,弹性增大,带状磁弹体开始软缩;磁场继续加大时,磁弹体便进入混沌起舞状态。如何使这条磁弹带进行规则的周期振动?他们选择了一条特定的周期轨道,当这条磁弹带的振动接近该轨道时,就给磁场一个小的扰动,并适当地调节这个微扰量,则可看到磁弹带驯服地进入所需的周期态下振动;一旦微扰撤消,混沌再次产生。

OGY方法是基于混沌奇怪吸引子有着极其稠

密的不稳定周期轨道。混沌控制的首要任务就是设法把其中任一条所需的周期轨道挑选出来,并加以稳定的控制。为此,他们选择非线性系统中实际上易于测得和可调节的一个参数,并认为所有的周期轨道都是该参数的函数,而与其它参数无关。为了实现对某个特定的周期轨道(也称为不动点)的稳定控制,必须在系统靠近不动点时,对参数值进行微扰,随时间适当调整微扰量,迫使所选的轨道向不动点移动,利用对参数所允许的最大扰动量,经过多次反复调整,最终使所需的周期轨道稳定住。如同上述对磁弹体的振动周期所作的控制那样,此法在实验上是适用和有效的。

需要指出, OGY 方法实际上只适用于离散系统及可以把连续系统转化为离散系统的情况。例如, 从数学上用一种特定的平面, 所谓庞加莱截面法把连续的动力学系统退化为非线性映象。OGY 方法的一个优点就是, 它无需知道系统的整体行为, 系统的动力学映象可以直接地从实验测得的数据构造出来。经过改进和完善的 OGY 法也可用于高周期及高维系统的混沌控制。

社会、经济、生物、人口等许多系统都是离散系统,因此 OGY 方法及其改进法将有广泛的应用。

二、偶然正比反馈技术(OPF 技术)

OGY 方法要求系统的参数变化不能超过一定的允许范围,否则经微扰后系统的局部动力学行为畸变了,所以它原来只能控制混沌系统中周期较低

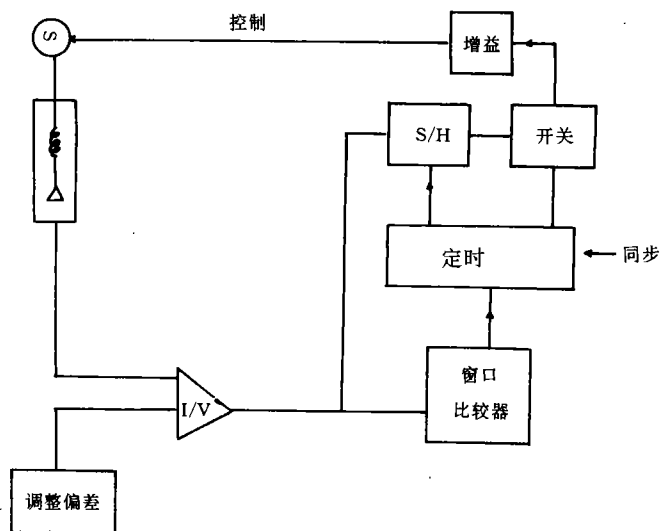


图 1 OPF 技术控制二极管共振器方块图

亨特(Hunt)提出了 OPF 技术,在实验中实现了对高达周期 23 的稳定控制。

OPF 技术是一种分析技术,我们用图 1 来阐明。该混沌系统为一系列 P-n 结及电感器所组成的二极管共振器。当输入正弦电压随时间增加来驱动系统时,则将出现著名的倍周期增加通向混沌的道路。它们可以用二维映象来描述。选取二极管输出的电流峰值 I_0 作为混沌变量,采用一种所谓限制微扰量的开窗口方法。当 I_0 处在所选电流值的窗口之内,则受驱电压由正比于 I_0 及窗口宽度所调制,若 I_0 不在窗口内,则无调制信号,最大修正值正比于窗口的信号大小及系统产生的增益,这两个因素均可改变以达到稳定控制。显然,这也是一种随时间微扰方法,所以对于较低周期的控制本质上与 OGY 方法差不多。对于较高周期的控制,OPF 技术要求有足够大的微扰,它已经做到控制高达 23 周期的轨道,整个控制的循环过程仅在 20 微秒内完成。

OPF 技术的优点是,不仅只需小信号微扰便可控制混沌系统中较低的周期轨道,而且通过调整限制微扰的窗口宽度及反馈信号的增益,达到控制较高的周期轨道。虽然由于需要较大的微扰量,可能后种情形对混沌行为有所影响,但是 OPF 技术的万能性及高效率等突出优点,则使上述缺点得到克服。但是,此法要求较高的技术。

因此,OPF 技术可以广泛应用于许多实验系统,诸如,约瑟夫森结的网络系统、化学湍流系统,生物系统以及激光系统等。

举个实例,OPF 技术应用于自治混沌的多模激光系统,用激光总输出强度作为系统的混沌变量来研究,作法与上述实验类似,其控制效果与采样频率、反馈信号大小以及表征混沌行为特征量(李雅普诺夫指数)有关。在微扰偏差约 10% 的情形下,该激光系统能实现对周期 9 的有效控制,稳定信号维持了几分钟之久,且仅在微秒量级上就成功地达到了。

三、混沌的连续控制方法

上述两法的共同缺点是,只限于离散系统的混沌控制,而且还要求预先用计算机对系统的动力学行为进行必要的分析以获得有关知识,如不动点的位置及相应参数值,只有这样才能有的放矢地进行控制。因此以上方法在实际应用中有一定限制,只能稳定满足要求的某些特定周期轨道,而且,由于系统受涨落和环境噪声的影响,不可避免地导致系统中偶然地出现突变行为,使得所期望的周期信号消失,对于大噪声情形,这类突变行为实际上经常发生。

为了克服上述缺点,1993年德国物理学家K. Pyragas提出了两种连续控制混沌的方法:外力—反馈控制法及延迟自反馈控制法。其基本思想都是考虑混沌系统的输出信号与输入信号之间的自反馈耦合。前者从外部注入周期信号,后者把系统本身输出的信号取出一部分并延迟一段时间后再反馈到系统中去,两法均可实现对混沌系统中的周期信号的连续控制。它们的原理见图2。

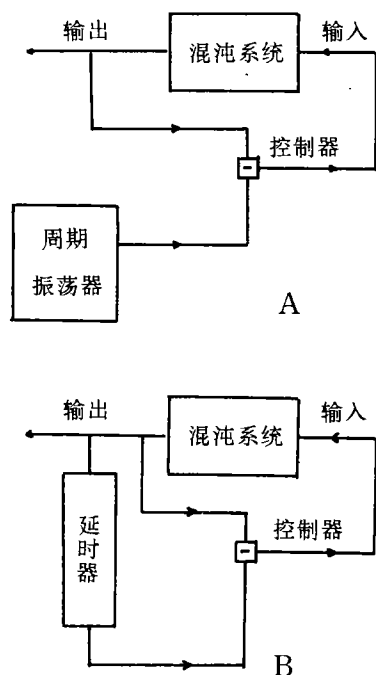


图2 (a)外力控制法示意图
(b)延迟反馈控制法示意图

1. 外力—反馈控制法

当无扰动的系统存在混沌时,从外部给系统输入一个强迫信号,用以扰动系统的输出量。已经证明:利用所谓延迟坐标的标准方法,可以从混沌奇怪吸引子中获得一个标量信号,于是可以从实验测到的输出信号中确定出不同的周期信号,它们相应于不同的不稳定周期轨道。据此,我们再调节外力微扰量,就可以提取所需的周期信号。这个方法的最关键的技术是,必须设计一个特殊的外部周期信号发生器以产生所需的各种正弦信号。这项技术要求很高,原则上要能产生无穷多的周期信号,因为混沌中包含无穷多的周期轨道,从中提取所有的周期信号,就不那么简单了。

通常,我们调节外部信号源中某个信号 y_i 输入系统中,让它与系统的输出信号 y 比较之后,以一定权重因子 k ,再反馈到系统中。通过调节 k 及信号差 Δy ,即反馈信号 $F = k\Delta y$,即可达到对混沌中所需周期信号的稳定控制。这里 $k > 0$ 为负反馈, $\Delta y = y_i - y$ 。当 $y_i = y$ 时,这种控制并不改变原来的混沌

特性,当获得稳定控制时, $y_i = y$, $F(t)$ 变得非常小。这表明只要利用一个小小的外力微扰即可达到稳定混沌中不稳定周期的目的。从这个意义上说,外力控制法与 OGY 方法类似。前者靠外力信号扰动,而后者靠对系统的某个参数扰动,都达到了同样的效果。

OGY 方法与外力控制法明显的不同在于,在 OGY 方法中只能在系统状态接近所需的周期态(或称不动点)时,才能对参数进行微扰。这是因为 OGY 方法的关键是在不动点附近的偏差采用了线性近似处理,外力控制法则完全不受此限制,可以在任何时候加入微扰,甚至初始条件远离周期轨道时亦然。不过,我们并不期望对所有的动力学系统都这样,因为这会产生多重稳定周期态,因此从实验上尽量不要有大的初始扰动。为了有效消除因外部输入产生不期望的多重解,可以采用上述限制微扰的办法来解决,只要在反馈线路中引进一些非线性元件亦可达到。

2. 延迟反馈控制法

为了克服外力—反馈控制法中的技术困难,提出了延迟反馈控制法。其主要思想是,利用系统输出信号的一部分经过延迟时间反馈到系统中去,以此替代外部输入。它的做法与上法类似,但是主要技术关键在于延迟线(器)的性能。它应该有很宽的时间调节范围,这样才能稳定控制较高周期的信号。当延迟时间选为所需的周期时,通过调节反馈因子 k 以及延迟信号与输出信号的差值,就可实现上法的相同效果。

德国科学家 Pyragas 已经应用上述两法从理论上研究了一些典型非线性系统,如罗斯勒系统、洛伦兹系统及杜芳系统的混沌控制,实现了从周期 2 到周期 5 的控制。最近他们利用延迟反馈法从实验上对其设计的二极管共振器中的混沌实现了稳定控制,方法简单可靠,周期控制到 4。只要延迟线的性能好、范围广,原则上完全可以控制到较高周期的信号。

我国原子能科学研究院非线性研究组近年来也成功地应用延迟反馈法对非线性环形腔激光系统的混沌控制进行了比较系统的理论研究,并在半导体线路的实验中看到了对低周期的控制效果,初步摸索了实验的条件及技术关键,为实现较高周期的控制打下了基础。

我们已经研制了一种有效求解非线性常微分方程组的方法,即改进的分解法及其数学机械化软件包,简称 NDSDM—9302。它不仅能提供处理十四种典型非线性系统的逼近解析解,而且还提供一批混沌控制系统的相应解析解。更重要的是,它提供了适于不同条件和范围的 8 个通用软件,可以处理含 10 个变量的所有的常微分方程组,包括自治与

非自治系统、齐次与非齐次系统、延迟与无延迟系统,线性与非线性。它具有高效率、高通用性及高精度等优点,不仅对混沌控制的研究大有用处,而且对于众多领域有很大的应用前景。

四、混沌的自适应控制法

最近,美国亚克隆大学的科学家 H. K. Gammur, F. Mossayebi 及 L. Murphy, 根据自适应控制原理,提出了对混沌的简接自适应控制法。该法如图 3 所示。

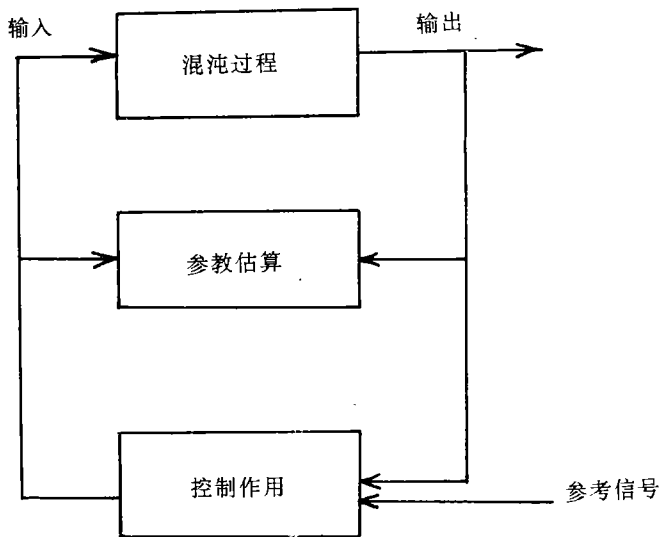


图 3 混沌的简接自适应控制示意图

首先,假设所研究的非线性系统产生混沌过程的动力学模型可以被构造出来,例如系统可以用逻辑映象来描述。其次,用数学上的所谓定量最小二乘法,设计一种参数预估器,使预估器的参数改变与系统的混沌过程无关,但是却能通过改变预估器的参数来实现回归估算动力学模型(如逻辑映象)的参数。然后,利用所预估参数的模型算出对系统的适当输入量,逐次调整,使系统的混沌过程到达所期望的周期信号。只有当它达到所期望的参考信号时,控制器才起作用,从而实现了所需周期信号的有效稳定控制。

这种简接自适应控制混沌的优点是,可以使所期望的结果与实际结果之间的误差减到最小程度,他们已用此法实现了对逻辑映象(一种最简单非线性代数方程迭代)的混沌控制。

这种自适应控制有两种方式。一种所谓提前一步控制法。它是按照所要求的驱动输入,一步控制到位,这样做导致输入太大,无法实现稳定控制。第二种方式是所谓权重提前一步法。它把受控的动力学与所预估参数的模型方程联立起来,构成一个封

闭回路系统,而该封闭系统并不依赖于混沌过程的参数,即模型方程中的参数不必对应于混沌过程的实际参数。这种简接自适应控制能达到较佳效果。不过,此法应用中也发现,在混沌系统的自适应控制中也产生了新的动力学行为的复杂性。它不同于系统本身的动力学行为,应当从理论和实验上进一步探讨。对于上述其它方法,当超过其应用范围(如微扰过大)时,也有类似的问题需要深入研究。

显然,自适应控制方法并不限于离散系统,它对连续系统同样适用,不过更复杂些。

五、混沌中非周期轨道的控制方法

以前一直认为预测混沌中非周期轨道是办不到的事情,其长时间行为高度不稳定,难以驾驭。过去所能做的各种努力,都是停留在短期预报上,人们总处于被动状态,无法对混沌系统的行为施加主动的作用而变成我们所期望的行为。近年,美国佩科拉(Pecora)及卡罗尔(Carroll)提出了混沌同步方法,最近,皮拉加斯(K. Pyragas)又提出一种对混沌奇怪吸引子中的非周期轨道的稳定方法,这些方法使不可预测的混沌变成一种可以跟踪控制的混沌。他们的新方法一改旧貌,变被动为主动,是混沌控制方法的最新进展。

后法的基本思想是,把上述自反馈控制法与下面将提到的混沌同步原理结合起来,从而达到控制非周期轨道的目的。图 4 给出了该法的物理原理示意图。

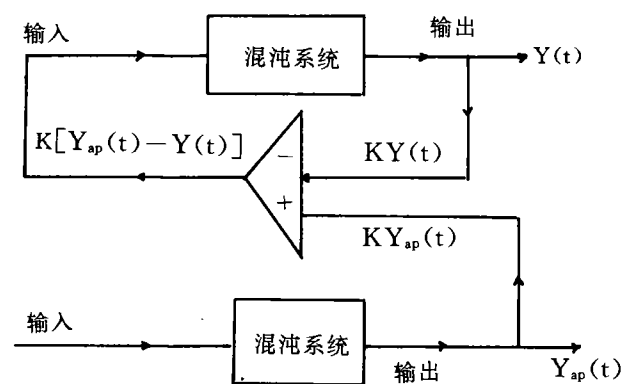


图 4 控制混沌中非周期轨道的方块示意图

该法要求实验采取两步。第一步是预备阶段,必须先把未被扰动的系统的输出信号 $y_{op}(t)$ 的所需部分划分出来并记录在记忆元件中,即把欲跟踪控制的混沌中的非周期轨道真实地记录下来;第二步,利用小反馈扰动 $F(t) = K[y_{op}(t) - y(t)]$,迫使系统精确地重复所记录的过去信号。该扰动的重要

特点是,当新输出信号与过去记录的信号吻合时,即当 $y(t)=y_{\infty}(t)$ 时,则 $F(t)\rightarrow 0$ 。因此,该法并不改变所记录的非周期信号 Y_{∞} ,这种扰动起到了自控作用。因为它总是趋向把现今信号 $y(t)$ 吸引到所期望的非周期轨道 Y_{∞} 上去,在适当调节权重 k 下,它可以实现对 Y_{∞} 的稳定控制,当达到稳定化时, $y(t)=y_{\infty}(t)$,于是微扰变得非常之小。他们已经成功地应用此法从理论上数值化地研究了几种典型非线性系统(如 Rossler, Lorenz 及 Duffing 系统)混沌中的非周期信号的稳定控制,但未进行实验研究。

该法表明,只要利用一种特殊形式的外部的小扰动,便可把混沌系统中的当今非周期行为与它被记录在记忆中的过去非周期行为实现同步。这样,在任何长时间下,在任何时刻都可以对系统的混沌行为进行跟踪控制。

不过,笔者认为,该法中所谓“利用上述小微扰可以将不可预测的混沌变成可预测的混沌”的提法值得商榷。因为他所记录下来的非周期信号并不是“预测出来”的,后来的控制只达到跟踪再现及稳定作用。

六、混沌控制的物理机理

混沌控制的物理机理正处于研究之中,对此的深入探索将会进一步推动混沌控制方法的发展,并将其应用推向更高层次及更加广阔的领域。

笔者认为,混沌控制的主要任务是,根据不同领域的实际需要,设法从多种多样的非线性系统所产生的混沌行为中,挑选出任意所需的各种周期信号(即各种信息等),甚至于非周期信号,并实现其稳定控制,从而为众多领域提供各种各样的应用。为此,应同时深入研究各种混沌控制方法及其原理机制,从理论上为各种应用奠定牢靠的基础。与这个任务相比,目前国际上这方面的研究还处于起始阶段。

前面讨论的许多方法中,其共同点是,利用与时间有关的连续小微扰来实现对混沌的稳定控制。当微扰趋于零或无限小时,则达到了所需周期或非周期信号的稳定化。在 OGY 方法中,由于在不动点附近微扰,把所需信号稳定控制住。在外力或延迟自反馈控制法中,引入微扰后把系统的微数增加,以增加原系统的维数来获得稳定性所必须的条件,即使表征混沌特性的李雅普诺夫指数从正数变为负数,从不稳定变为稳定,这就是物理实质所在。

应当看到,扰动或噪声所起的重要作用,乃是值得注意的一种普适效应,它在自然界中的积极意义越来越被人们认识。小微扰或小噪声在混沌控制中的妙用及建设性的作用,在上述方法中已经充分

显示了出来,小微扰(小噪声)在其中引起了抗混沌效应。事实上几乎所有实际系统无不受到外部环境或内部噪声的影响,这种情形是经常发生的。它在合适的条件下,环境噪声及内部参数扰动(涨落)同样可以引起抗混沌效应,即起到对混沌自控作用。这实质上揭示了自然界乃至人类社会一条基本原理,宇宙万物之所以能够维持其稳定和平衡是与周围环境的微扰密切相联系的。难怪生物学家考夫曼把抗混沌效应视为生命现象中“万种”进化及发育定型的重要依据,并由此可以阐明更深层次的机制,如基因组、免疫及人类行为等。因此,似乎可以说,小微扰或噪声所引起的抗混沌效应是对混沌的一种持久控制因素。

混沌同步的机制与混沌中非周期轨道的控制方法有关,研究指出,混沌同步与协同学中的使役原理具有类似性,按混沌本身特性似乎是抗同步的,但是,近年的实验证实可以实现同步的混沌电路。由一个系统去驱动另一个系统,即两个系统耦合起来,前者称驱动系统,后者称响应系统。同步定理告诉我们,当响应系统的条件李雅普诺夫指数为负值时,则它将与驱动系统实现混沌同步。这样,混沌同步法及新近拓广的串级混沌同步法都可应用于混沌中的非周期轨道的稳定控制,此同步定理已从理论与实验上证明了,预期它有重要的应用价值,并可能在电子工业等领域产生一些奇迹。

哈肯在协同学中提出的使役原理告诉我们,一个系统的行为由长寿命的子系统使役(决定了)短寿命的子系统,即长寿者为命运主宰。这样同步定理中的条件李雅普诺夫指数类似于使役概念的一种推广。据此,不难理解,把延迟反馈法与同步原理结合起来,便产生了对混沌中非周期轨道的控制方法。究竟什么类型的混沌系统可以通过一个变量控制与它们的过去行为实现同步呢?只有当微扰具有足够大的自由度,以至于可抑制住轨迹在所有扩张方向上发散时,才能达到响应系统所期望行为的稳定化,这是许多动力学模型所研究的结果。

混沌控制的方法及原理是国际上十分活跃的研究课题,1991 及 1993 年分别召开过两次国际混沌实验会议,大大促进了混沌控制的研究进展。最近提出了一些新方法,如跟踪法、串级混沌同步法、神经网络控制法、规则正比反馈序列控制法,等等。国内也已有一些单位正在开展方法的研究,诸如北京计算数学与应用物理所对 OGY 作了改进,北京师范大学对外力反馈法作了补充完善及提出单色波注入法,我们把改进的分解法与延迟反馈法相结合,从理论和实验两头并进,探索新方法及关键技术等问题。总之,国内外对混沌控制正在进一步深入探索与发展之中。

七、广阔的应用前景

混沌的奇异特性及混沌控制方法的突破性进展,正在为混沌的广阔应用打开十分美妙而诱人的发展前景。

在自然界及实验室里,由于学科、领域和部门不同,实际的非线性系统是多种多样的,由它们产生的混沌及混沌控制的应用,也是多姿多彩,有声有色。不过从混沌的类型来说,大体可以分为四类:第一类只产生时间混沌,第二类只产生空间混沌,第三类同时产生时间与空间混沌,第四类产生功能混沌。不同类型的混沌及混沌控制无疑都有巨大的应用潜力,上述讨论的控制混沌的方法主要针对时间混沌。因此,第一类混沌可以应用上述方法实现对混沌中所包含的不稳定周期轨道甚至非周期轨道的稳定控制,由此可以研制特殊周期(或非周期)信号发生器,或特殊频率发生器,或信息存储器;利用时间—空间混沌,加大应用的广度与力度,无疑可以研制超高容量的动态信息存储器,用于信息识别与记忆,因为空间混沌一旦确定,其周期窗口及其分布即有规则,可应用空间分布赋以信息,并可以进行混沌编码与解码,从而大大地扩展通信信息量和加强保密性,这在军事上亦有重要价值。据悉,日本某公司已经开发出新功能元件,作为大容量动态信息存储器及高速数据处理系统。混沌编码技术与解码技术已经进入了美国国防部门。混沌信号控制处理技术已经应用于原子反应堆的热传递系统中的时间序列数据分析,并可运用于许多领域中的无损检测。应用混沌同步原理还可能为开发混沌计算机提供依据和可能性。有人预计,这可能是继模糊计算机之后开创新一代计算机的很好途径。

混沌控制及其应用在当今高新科技领域中将可能起重要作用,在不同的领域都可能出现新的推动和发展。例如,对于激光技术,利用混沌控制技术可能实现新的突破,产生单色性好、品质优异、超大功率的各类特殊用途的激光器,美国已应用跟踪法,不仅拓宽了激光中混沌控制的稳定时间,而且把激光输出功率提高了15倍,这些都对开发激光领域带来了新的前景,诸如用于受控热核聚变中的加热、原“星球大战”计划中的战略战术武器、秘密通信、导航等高精尖科技领域,都将产生连锁效应。在生物工程及生命科学领域中预计也会有独特的应用,因为功能混沌的控制与开发已引起重视。

本世纪前两次科学革命给人类带来了无比辉煌的成果,诸如核能、航天、计算机、激光及超导等等令人震惊而层出不穷的成就。我们相信,正在全面展开的第三次科学革命中,混沌控制及其应用也,必将日益显示出巨大的应用潜力。

八、建 议

从大量的国际会议及各种学术渠道获悉,一些国家已投入巨额的研究经费和大量人员,在很多部门(如军事、能源、工业、工程、电子等)中加紧混沌控制及其应用的各种实验研究和关键技术探索。面对国外这一重要趋势和研究热潮,应当引起我国有关部门的足够重视,采取必要的措施。积极支持国内这方面的研究工作,并与高科技研究紧密结合起来,这是摆在我们面前的当务之急。它也关系到我国能否把握住在第三次科学革命中的主动权,从而为我国在21世纪腾飞作出贡献。

(责任编辑 蔡德诚)

彩图说明

大亚湾核电站

广东大亚湾核电站于80年代初开始筹建,目的是解决中国南部和香港地区电力短缺的难题。中国南部石油和天然气资源不足,煤炭则需要从遥远的内地运输,很难满足经济迅速发展对能源的需求。这样,建立核电站就成了解决该地区电力不足的最佳方案。

大亚湾核电站有两套压水反应堆装置,每套装置的容量为985兆瓦,反应堆的工作压力为155巴,反应堆容器的进口温度为292℃,蒸汽压力为67巴,反应堆的安全壳为钢衬套预应力混凝土结构。

第一号机组于1993年7月28日开始试运行,并逐步增加发电量,至1993年底达到满负荷运行。1994年2

月6日,大亚湾核电站正式落成。1994年2月7日,第二号机组开始试运行。

大亚湾核电站是一个合资项目,70%的投资属广东核电合营公司,25%属香港核电投资公司。按照广东核电合营公司的创办协定,大亚湾核电站初期生产的电力70%将供应给香港。

大亚湾核电站建设过程中和法国进行了技术合作,两套主装置是从法国引进的,从而加速了建造进程。从1986年4月开始设计到1993年7月第一号机组进行试运行,历时约7年多。

(本刊记者 刘先曙)