

非线性控制与混沌控制论*

——略谈与现代控制论的结合

方锦清 (中国原子能科学研究院)

* 国家非教育系统留学回国人员重大科研资助项目及中国核工业科学基金资助项目

关键词 混沌动力学 混沌控制与同步 非线性控制 现代控制科学

非线性控制方法已成为混沌控制与同步领域中新兴的一个重要研究方向. 它正在与现代控制论日益紧密地相结合. 通过借鉴、拓广与创新, 必有远大的发展和应用前景.

非线性科学中的混沌控制论是一门跨世纪的极富挑战性的交叉学科, 由于具有诱人的应用和发展前景, 从90年代突破以来正在掀起第二次全球性的混沌研究热潮. 对此, 我曾在《自然杂志》及《物理学进展》等刊物上进行过评述^[1-4]. 多种混沌控制与同步的方法有力地推动应用研究的发展. 但值得注意的是, 其中大多数方法是基于线性反馈概念的. 最新进展表明, 混沌控制论正在与根深叶茂的现代控制论日益紧密地相结合. 特别令人瞩目的是非线性控制法正在混沌控制与同步的领域中兴起, 成为今后一个大有发展前景的研究方向. 非线性控制在现代控制论中显示了很大优越性, 获得了广泛的应用, 成为当今一个重要的研究分支和关键技术, 其研究方兴未艾. 有趣的是, 在相当长的时间内, 从事混沌控制论的研究人员与从事现代控制论的研究人员却在各自领域中进行着大同小异的研究. 现在, 这种并驾齐驱的局面终于被打破了. 两者开始相互沟通和结合的一个标志是1996年夏天在意大利由国际理论物理研究中心举办的“非线性控制与混沌控制”的国际学术会议上, 拉开了两论联姻的序幕. 笔者荣幸地参加了会议, 对这一喜人的开端, 颇有感触. 这里结合自己的工作, 略谈点滴, 以期引起国内“两论”学者的关注.

众所周知, 从60年代以来, 现代控制论在短短的30余年中在诸多领域, 包括国防、生物、医学等许多部门都已取得了广泛的应用和惊人的成就. 1997年我国用“长征三号甲”运载火箭成功地发射了“东方红三号”通信卫星, 并经三次变动轨道后卫星准确地进入地球同步轨道, 这是我国航天事业的一个新的里程碑. 据报道, 卫星发射成功的原因之一是姿控推进系统的技术有了新突破. 这给从事混沌控制论的研究人员以莫大的启迪和鼓

舞, 我们可以从中吸取控制论的营养.

特别值得一提的一件鲜为人知的事是: 早在80年代中叶, 美国宇航局将混沌控制的思想、方法及技术首次成功地应用于发射宇宙飞船. 美国火箭发射专家们, 对于著名的三体问题中存在混沌特性——对初值变化的高度敏感性, 早就有充分认识, 他们把地球、月亮和宇宙飞船构成典型的三体问题, 利用小微扰控制原理, 巧妙地设计了控制系统, 从而仅仅花费了极少量的燃料将一艘称为“国际地球探测3号”(简称ISEE-3)的宇宙飞船发射到距太阳系远至1.6亿千米之外的科学慧星附近, 顺利地执行了探测宇宙奥秘的任务. 这一惊人成就已通过美国《宇航科学》杂志1985年第33卷公布于世. 从混沌控制论上说, 他们是巧妙地利用了混沌的“蝴蝶效应”, 采用类似于所谓“打靶法”取得了巨大的成功. 这充分显示了混沌控制的最突出的优越性和灵活性. 谁能善于应用混沌特性及其控制方法, 谁就能够以最小的代价达到最佳的效果, 从而获得不可估量的经济效益, 为人类造福.

显然, 从事混沌控制论和现代控制论“两论”研究的人员只要能携手协作, 共同努力, 就有可能使我国的混沌控制领域的研究走在国际前列, 为下世纪高新科技发展作出应有的贡献.

一、“两论”的简单对照比较

为了实现“混沌控制论”与“现代控制论”这“两论”的结合, 首先要弄清的问题是混沌控制论与现代控制论有何异同? 弄清这点, 有利于借鉴和创新, 笔者认为, “两论”的异同可以从下面几点比较中了解.

1. 规定目标和最优控制

任何控制都针对规定目标或所期望的目标,“两论”概不例外。但现代控制论讲究最优控制,即通过控制,使系统的状态按照人们期望选择一条达到某一性能目标的最好途径。但是对于不同系统,所期望达到规定目标所要求的性能指标是不同的,如导弹飞行控制中可以要求燃料消耗最少,也可以要求时间-燃耗最少;在截击问题中要求达到的时间最短为最优等等。在混沌控制中如上所述,规定目标一般是对混沌吸引子中所期望的某个不稳定的轨道进行稳定控制,每次控制一个周期态,根据需求依次转换控制其他周期态,这是因为在混沌系统中包含无穷多的不稳定周期轨道(简称周期态)和非周期态(混沌态)。当规定目标为混沌态时,这种控制则称为混沌同步。目前混沌控制和混沌同步的规定目标或具体性能指标(对象)随不同系统而不尽相同。例如,在磁弹体系统中通过磁场大小控制它的振荡周期,在激光系统中通过两束光强的耦合强度或反馈实现最大功率输出和所期望的光频,在化学反应器中则是通过控制扩散达到所期望的浓度等等。显然这当中包含了相空间混沌吸引子中最优控制问题,但是还没有成为专门课题加以系统研究,多数是考虑达到目标的转变时间最短问题。混沌控制与同步的进一步发展,对不同领域和不同系统的混沌控制必然会提出以何种策略和方法实现性能指标的最优控制问题。因此,深入研究混沌最优控制已经提上日程,例如最短时间控制是常见的目标之一,必须考虑混沌自身的特点,特别是对初值的敏感性,才能借鉴现代控制论中的最优控制的理论概念和方法,以获得深入发展。

值得指出:近年,与现代控制论不同的是,混沌反控制引起人们的关注^[5],其目标是对原来弱混沌系统设法增强混沌效应,而对原来非混沌系统,则设法引发和诱出混沌行为,这种反控制具有很大潜在的应用价值,特别是在生物医学等领域中的应用。

2. 能控性与能观性

这两个概念是现代控制论发展中的三大标志之一,它们是表征动力学系统内在属性的特征之一。能控性描述了输入信号对系统状态的控制能力,而能观性则是输出信号对系统状态的反映(响应)能力。因此,能控性和能观性可以依据系统的状态空间表达式作出判断,现代控制论已经建立了各种判别准则。目前,在混沌控制和混沌同步中,人们还没有系统地研究一般的能控性准则和能观性准则,尽管已有对个别系统的研究结果^[6]。这是

因为混沌系统的能控性及能观性的准则的推导十分困难。当然现代控制论的能控性和能观性的判据也可能推广应用于混沌控制论中去。但是,已有的判据准则多数适用于线性系统,很难推广到非线性混沌系统,并且计算极其麻烦,这就有必要进行一番深入的研究、改进或创新,以适于混沌控制与同步。

3. 控制器和观测器

在现代控制论中一旦判别了系统是能控性和能观性的之后,进而需要具体设计控制器和观测器,控制器相应于混沌控制输入装置,所谓控制器都是为达到规定控制目标而设计的一个输入控制装置,从数学上表示就是在受控方程右边加入一个输入控制函数。观测器在混沌同步中相应于响应系统。严格地说,状态观测器是一个物理上可实现的动力学系统,但是并非系统的每个状态变量都可直接测量,需要借助在待测系统的输入和输出的驱动下产生一组逼近待观测状态变量的输出,该动力学系统装置所输出的一组状态便可作为待观测系统的状态的估计值,所以有时也称为状态估计器或称状态重构器。“状态重构器”名称更接近混沌同步,因为混沌同步实质上就是实现对规定目标为某个混沌系统的混沌行为在允许控制精度下的重构。由于混沌对初态的高度敏感性和实际中两次实验测量的不可避免的误差,倘若不采取巧妙而有效的控制措施,是根本无法重构两个相同的混沌行为的。初步研究表明,现代控制论中的状态观测器的设计思想和方法可以推广于混沌同步的研究中去,不过要从线性观测器进一步推广到非线性观测器。

表1总结了“两论”的简单对照比较。可以预期,混沌控制论完全可以得益于现代控制论的一些概念、理论和方法而获得深入发展,从而使混沌控制与同步应用在不久的将来出现绚丽多彩的应用局面。

二、非线性控制的发展概况

30多年来在现代控制理论的发展中,已经建立了一套比较成熟和完整的线性系统的控制理论体系,用于实际工程的分析和设计工作,诸如反馈控制(镇定)、观测器设计、最优控制、系统识别、Kalman滤波、自适应控制等。虽然线性控制方法已取得了很大的成就,但是它远远战胜不了一般实际系统中存在的非线性和种种不确定性诸多复杂因素的影响,特别是对非线性系统中出现的复杂性(包括混沌行为等)更是难以驾驭。这是因为线性控制法比起非线性控制法来存在很大的局限性,诸如

表1 “两论”的对照比较

| | 自动控制论 | 混沌控制论(同步) |
|-------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 规定目标 | 不同系统,千差万别. 不考虑反控制问题 | 目标一致,周期态和混沌态 既有混沌控制,又有混沌反控制 |
| 最优控制 | 不同系统,性能指标各异,发展了许多方法,不用考虑初值条件的影响 | 已提出最优控制问题,必须考虑对初值的敏感性 在一定条件下拓广应用 |
| 能控性 | 各种准则大多只适用线性系统 | 一般混沌系统具备能控性,目前拓广只限于个别系统, 缺乏一般准则 |
| 能观性 | 同上 | 一般具备能观性,同上 |
| 控制器 | 已有一套系统设计方法,但大多为线性控制器 | 已发展许多方法设计线性控制器,有一些创新方法 |
| 观测器 | 同上 | 响应系统,混沌状态重构器,同上 |
| 线性控制 | 理论成熟,方法很多 | 拓广应用,方法较多 |
| 非线性控制 | 研究方向,已发展了一些理论与方法,方兴未艾 | 重要方向,可以借鉴、拓广已有方法,进一步发展和创新 |
| 应用与发展 | 应用十分广泛,前景远大 | 应用潜力巨大,发展前景美好 |

在转变过程达到后还可能产生突发的不稳定性和陡然上升等现象,以及难以达到最优控制的性能指标等等.因而非线性控制理论和方法的研究早就成为现代控制论中的一大热点和最重要的研究分支之一,并已取得了显著的进展.主要表现在:已经和正在不断地将线性系统理论中的一些思想、策略和方法拓广到非线性控制系统的研究中,例如对自适应控制、鲁棒控制、系统控制识别和滤波理论等,经过改进、创新,已成功应用于许多实际工程中,包括航天、机器人、飞机及汽车等的控制,特别是近年来已拓广到非线性系统中混沌控制与同步化等.

为此,我们有必要对非线性控制法作一个简要的介绍.

鉴于非线性系统远比线性系统复杂,迄今既缺乏有效地预测非线性系统特性(如混沌系统的蝴蝶效应等特性)的有力方法和系统工具,又缺乏像线性系统那么完整的控制设计方法,尤其是,即使也有些好的非线性分析方法和设计工具,但每一种都不是普遍适用的,而只适用于某些特殊类型的非线性控制问题.毕竟非线性系统控制理论比线性系统理论落后近20年.因此,非线性控制法仍然需要充分利用线性理论中积累的大量成果.那么有哪些已发展的非线性控制理论或方法可以借鉴呢?

第一,非线性系统的反馈控制.它一直占据着非线性控制理论和方法的重要地位,因为反馈控制(或称镇定)问题本身就是一个重要课题,而且更重要的是它作为基本的一步来实现其他的控制.渐近跟踪、干扰抑制等,已经发展了一套输入、输出系统的理论,关于线性和非线性系统的各种连接方式的整体稳定性,已成为这些

理论的重要内容.非线性反馈控制法拓广于混沌控制与同步,是一种相当有效的方法,将有很大的发展前景.

第二,非线性控制系统的几何理论.它利用微分几何和李代数的工具,将线性系统的几何理论拓广到仿射非线性系统.从80年代起,非线性控制的几何理论迅猛发展,形成了一套类似于线性理论的理论体系,包括非线性系统的能控性、能观性、Kalman结构分析、解偶理论、实现理论及反馈线性化理论等,虽然其中仍有大量尚未解决的问题(如结构分析和综合分析等),但微分几何理论已被证明是分析和设计非线性系统的有力工具.

需要指出,利用非线性控制几何理论的概念和方法以及无源系统等综合分析设计方法,也已成为设计非线性反馈系统的有力工具.

第三,鲁棒非线性控制.这是针对实际系统存在的各种不确定性因素而提出来的具有实际意义的重大问题.如参数不确定性和非参数不确定性(包括参数扰动、建模误差、量测误差、外部干扰等),这些问题导致实际的控制系统设计起来变得更加复杂和艰难.对此,不论线性系统和非线性系统,已经提出两大类控制方法:一是鲁棒控制法,二是自适应控制法.迄今正在研究多种鲁棒控制法,如变结构控制方法(其中有滑动模控制法等)、智能学习控制方法及非线性 H^∞ 控制方法等,后者是最新进展,它更符合工程实际问题,但尚处于理论实验阶段.

第四,非线性自适应控制.由于80年代非线性控制系统的几何理论的发展和成熟,为非线性自适应控制理论的发展奠定了坚实的基础.90年代以来,非线性自适应控制方面取得一些重要进展,从而进入崭新的发展时期.现在的热点课题有各种非线性自适应控制方案,诸

表2 自动控制理论拓广到混沌控制论的可能性

| | 特 点 | 效 果 |
|------------------------------|---|--|
| 经典控制论 | 频域特性分析 基于传递函数 | 控制器参数初步设计后,由现场调试确定 很难拓广 |
| 现代控制论 | 状态空间描述 严谨的数学结构 不考虑模型的误差 发展了一些非线性方法 | 解析设计方法 控制器与观测器 与工程有误差 可以借鉴、改进、拓广与创新 |
| 鲁棒控制论 (包括 H^∞ 控制论) | 考虑数学模型的不确定性误差 参数误差、外部噪声影响 | 解析设计方法在允许误差范围内达到期望要求 可望拓广与创新 |

如自适应 Backstepping 控制方法、状态反馈自适应控制法、输出反馈非线性自适应控制法、离散时间和随机非线性自适应控制法、模型参考控制法、自适应滑动模控制法及利用无源性理论的设计方法等。这些方法大多处在探索研究之中,如随机非线性自适应控制方法中的观测器的设计,即最优滤波问题就是一大难题,尚无一般的结果。

表2列出了自动控制理论拓广到混沌控制论的可能性。

由上可见,为了解决线性控制理论达不到的控制目的,现代控制理论已经发展了许多非线性控制理论和方法,无疑这为混沌控制论提供了丰厚的理论基础、方法和思想,人们完全可以借鉴,进一步拓广、改进、创新,使非线性控制法成为混沌、超混沌和时空混沌控制与混沌反控制的有力工具,这正是当前国际上混沌控制发展的一个新动向。

三、混沌控制与同步的一种统一描述和实现方法

迄今尽管混沌控制论的研究内容十分丰富,但是就基本问题而言,主要包括两大方面:一是混沌控制,二是混沌同步。前者的控制目标是稳定混沌系统中存在的无穷多的不稳定周期轨道和其他运动形态,如不稳定平衡点等,以达到实现对各种周期态的转换和应用之目的;后者是实现两个(包括多个)初始条件不同的混沌系统达到同步及应用之目的。简单地说,混沌控制和混沌同步的差异只在于它们的控制目标不同而已。因此,混沌控制与同步,包括高维系统中的超混沌及空间广延系统中的时空混沌在内,它们可以用下面一种统一的描述形式,让我们考虑两个非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(X, t), & (1A) \\ \dot{Y} = g(Y, t) + G(X, Y, t), & (1B) \end{cases}$$

其中 X, Y 都是 n 维矢量; $G(X, Y, t)$ 为 m 维控制函数, $m \leq n$, 在通常混沌同步中 $g(Y, t) = f(X, t)$, 但在广义混沌同步中 $g(Y, t)$ 可以与 $f(X, t)$ 不同。不论何种情形,我们应使两个系统在 G 控制作用下,它们相应的变量差经过适当控制时间(理论上 $t \rightarrow \infty$)后趋于零,即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|X(t) - Y(t)\| = 0. \quad (2)$$

对于规定目标为稳定混沌系统中某个所期望的不稳定周期态(轨道),则(1B)描述了混沌控制,即 B 系统为受控系统,对于规定目标为混沌系统中的混沌,则(1A)、(1B)、(2)描述了混沌同步, A 称为驱动系统或主系统, B 称为响应系统或使役系统,混沌同步就是实现 B 系统与 A 系统的混沌态的完全重构(同步)。显然,混沌控制和混沌同步只不过是实现不同的规定目标,两者是同一课题的两个方面,既有共同基础,又有不同目标。因而可以按上述方程统一地进行描述,并且可以用一种统一的反馈控制法来分别实现控制目标。为此,可以进一步把上述问题转换为研究 A, B 两个系统相应变量的误差动力学方程即

$$\dot{e}(t) = g(Y, t) - f(X, t) + G, \quad (3)$$

这里 $e=0$ 是系统的一个稳定不动点,当混沌控制或混沌同步达到后,反馈函数 G 将趋向于零,误差动力学系统(3)达到渐近稳定,即 $t \rightarrow \infty, e \rightarrow 0$ 。

显然,反馈控制函数有两种形式,一种是线性反馈函数(LFF),另一种为非线性反馈函数(NFF),迄今混沌控制和混沌同步的大多数方法建立在系统变量的线性反馈法的基础之上,它主要应用正比于系统变量(响应系统变量)与目标变量(驱动系统变量)之误差乘上反馈增益系数(矩阵),即 $G=K(Y-X)$ 直接反馈输入到被控系统中,亦即用线性反馈信号加到响应系统中;而非线性反馈函数法是一种非线性控制,它可以是在实验中易于实现的一些初等函数,诸如正弦函数、双曲函数和正切函数等,还可以是它们的各种组合函数(叠加函数),不论 LFF 还是 NFF,它们的共同点都是一旦混沌控制和混沌同步实

现后,它们都趋于零,满足这一重要性质的 LFF 和 NFF 可能有一大类函数.可见,实现控制目标后,控制函数趋于零,这表明混沌控制和同步,所达到的目标并不改变原来混沌系统中的运动特性,而是稳定住我们所期望的运动形态.近年来,我们已提出实现混沌、超混沌及时空混沌控制与同步的这类非线性函数^[7~11].对于不同的具体系统则有不同的 NFF,当然如何构造 NFF 是关键技术之一.

四、非线性控制函数构造法

非线性控制应用于混沌控制与混沌同步(包括超混沌与时空混沌在内),关键问题之一就是如何构造或产生非线性控制函数 G ,这是一个尚未解决的令人关注的问题.我们这里提供一些构造(寻找) G 的可能途径和基本思路,以某些典型的混沌系统为例加以阐明.

首先,我们可以借鉴现代控制论的最优控制的思想方法,拓广到混沌控制.我们期望混沌控制达到最优控制.于是可以应用现代控制论中的能控最小值原理(或最大值原理).该原理的精髓在于:利用性能泛函求极值,它把泛函 J 的最小化问题,转化为哈密顿函数 H 的最小化问题.因此,关键一步是构造哈密顿函数 H ,从而获得性能泛函 J 达到最小值的最优控制所满足的必要条件,常称之为哈密顿-庞特里亚金方程,其中包括系统状态方程、协态(伴随)方程及耦合方程(控制方程),通过对这些与 H 函数有关的方程联立求解后,最终可以得到非线性控制函数.

我们以著名的洛伦兹方程为例简要阐明上述方法的一种用法.考虑受控的洛伦兹方程为

$$\dot{X}_1 = -\sigma(X_1 - X_2) = f_1, \quad (1)$$

$$\dot{X}_2 = \rho X_1 - X_2 - X_1 X_3 = f_2 + G_2, \quad (2)$$

$$\dot{X}_3 = X_1 X_2 - \beta X_3 = f_3, \quad (3)$$

其中未控制时, $G_2 = 0$, 这时洛伦兹混沌吸引子的特点是:它像一只翩翩起舞的蝴蝶的两只翅膀,围绕两只翅膀各自的不稳定平衡点随机地来回跳跃,所以洛伦兹形象地冠以“蝴蝶效应”的美名.当方程参数 $\sigma = 10, \beta = 8/3, \rho = 28$ 时,它的两个不稳定平衡点分别在 $P = (\sqrt{72}, \sqrt{72}, 27.000)$ 及 $Q = (-\sqrt{72}, -\sqrt{72}, 27.000)$ 两点.现在倘若我们加以控制,比如,混沌控制的目标是稳定住原来不稳定的平衡点 P , 简言之,控制的规定目标为 P , 为此,我们应用能控性最小值原理来寻求具体的非线性控制函数 G . 这时, G_2 加在方程(2)中,于是,由方程(1)~(3),根据拉格朗日乘子法,可以写出 H 函数,然后求解耦合方程以及协态方程.我们不难求得非线性控制函数 $G_2 =$

$k \operatorname{sgn}[X_2(\frac{8}{3}X_2X_3 - X_2^2)]$. 类似地,当 G_1 加到方程(1)右边时,可导出 $G_1 = k \operatorname{sgn}[X_1(X_1^2 - \frac{8}{3}X_3)]$, 这是一种开关式控制类型(称嘟嘟控制),且是时间最快控制.理论分析和数值研究表明,这种非线性控制可以使洛伦兹系统从状态空间任一点出发,最后轨线都被稳定控制到平衡点 P 或 Q 点上.其他规定目标诸如周期轨道的控制也可以同法获得非线性控制函数.

我们最近还研究了一种构造非线性反馈函数的方法,该方法根据混沌系统的李亚谱诺夫函数的一般稳定性理论,首先构造一个李亚谱诺夫函数.倘若两个系统要达到混沌同步,则这两个系统相应的系统变量之误差动力学系统(3)在非线形反馈函数控制下必须在原点是渐近稳定的,这时相应于李亚谱诺夫函数的导数必须是负定的.另一个重要特性是,一旦两个系统达到混沌同步或混沌控制后,非线性反馈函数必趋向于零.基于上述两点,我们可以通过解析方法找到或构造出多种形式的非线性反馈函数(包括线性反馈函数在内).因为适应于混沌系统同步的非线性反馈函数并非唯一的,满足上述性质及要求的非线性反馈函数可能是一大类.例如,用这种方法找到了一批具有初等函数形式的非线性反馈函数,诸如正切、正弦、双曲正切函数等及它们的线性组合的复合函数形式,这些函数简单,易于在实验及工程应用中实现.预计今后应该可以通过机器推导,自动寻找非线性反馈函数.显然,非线性反馈函数法为混沌同步的应用研究提供了一种有效的新方法和新途径.

非线性控制法在现代控制论中是一个非常重要的研究方向,因为它能达到线性控制难以达到的或根本做不到的较佳的效果.迄今非线性控制应用于混沌控制和同步,国内外研究还刚刚开始,不论从方法或者技巧上都尚待深入研究,而且还需要与现代控制论密切结合才能进一步发展.

五、实现超混沌、时空混沌的控制与同步

超混沌和时空混沌具有高维非线性系统及空间广延系统的动力学属性,它们反映更为复杂的非线性动力学现象.其特点是:它们的轨线在不止一个方向上随时间不断扩张,即可能在一个平面或一个球面上,甚至在一个超球面上产生多方向的指数扩张,即反映系统这种指数发散的李亚谱诺夫指数可能有两个或多个都是正值.这种轨线在多方向上成指数形式发散、折叠、扭曲的情形,显然比单方向上发散的混沌情形复杂得多,也更重要得多.

这本来就是自然界、社会领域(包括经济领域等)的复杂性现象,它在实验室内也广泛存在着.因此,如何实现超混沌和时空混沌的同步与控制,越来越引起国内外学者的极大关注,它们已成为混沌控制中更加重要和更富挑战性的两个前沿课题.

我们近年应用非线性反馈函数法实现了一些混沌、超混沌和时空混沌系统的控制与同步,例如典型的超混沌系统有四维的 Rossler 系统、六维的单向耦合的蔡(Chua)电子线路、六维的洛伦兹、范德坡-杜芳(LVPD)系统以及再耦合上 Rossler 超混沌系统构成十维的 RLVPD 系统等.研究发现,应用一些初等函数及其组合函数作为非线性反馈函数都能实现超混沌同步,对于非常高维数的超混沌系统不论其维数有多高,也不论有多少正的李亚谱诺夫指数,应用非线性反馈函数法原则上都能达到超混沌同步,尚未发现任何困难.

对于时空混沌的同步和控制,应用非线性反馈控制法,我们研究了耦合映象阵列系统并实现了它们的同步与控制,所用的非线性反馈函数与上述有类似形式,但更加复杂.目前尚缺乏有效构造方法,以产生适于时空混沌同步和控制的非线性反馈函数.基于前述两个重要性质采用能控性最小值原理、开关流形、李亚谱诺夫函数法和尝试法等可以获得一些非线性反馈函数,控制效果通常优于线性反馈法.但并不是普适方法.国际上有人对偏微分方程所描述的时空混沌系统采用非线性控制,其主要精神是利用系统的时间序列构造不变的超球面,同时在一个系统的能观和控制参数的延迟状态空间内,实现多维的、非线性单输入和单输出的反馈控制.该法可以拓广到多输入观测和控制通道.由于这种控制是直接由时间序列来构造,有鲁棒性,所以它可能在实验中得到应用.

近年来,国内有一些高等院校及研究所从事“两论”研究的学者及他们的博士生越来越多地加入混沌控制与混沌同步的研究行列,取得了新的进展.例如,对于连续时间非线性混沌系统应用反馈加前馈控制律、滑动模控制律和自适应滑动模控制律,以及带 σ 修正的自适应滑动模控制律,从理论上严格证明和数值模拟验证两方面都一致地实现了混沌完全同步.应用特征主元分析法把分布参数系统中的混沌时空模式分解成两部分:不随时间变化的空间模式和随时间变化的时序系数,然后分别应用负反馈等方法达到控制模拟反应器中的时空混沌.另有用神经网络方法控制某些典型混沌系统,其基本思想是,利用神经网络的学习能力,有选择地对若干子系统进行辨识与控制,从而达到整个耦合系统所期望的规则行为,如在杜芳系统等系统中实现了对混沌控制,并拓广到耦合系统中的时空混沌的控制.国内越来越多的年轻

人从“两论”结合上研究混沌控制和同步,给这个领域带来勃勃生机.只要方向正确,坚持下去,加上有关方面的积极支持,必有创新!

表3 混沌控制技术中的应用与开发前景

| 主要技术 | 应用与开发的项目 |
|------------------|------------------------------|
| 混沌同步技术 | 保密通信,语言加工处理,信息图像处理 |
| 混沌打靶技术 | 实现宇宙飞船两次发射(1985 美国获得成功) |
| 小扰动方法 | 研究心脏除颤器(心律器) |
| 混沌跟踪技术 | 改善和提高激光功率和性能 |
| 混沌控制技术,如连续变量反馈法等 | 提取各种化学物质,估计产值约亿元/年 |
| 混沌控制技术 | 改善和提高火焰燃烧效率 改善和提高材料组织和性能 |
| 混沌反控制技术 | 治疗癫痫病等“动态病” |
| 混沌编码与解码 | 通信、信息处理 神经网络及大脑组织中的编码与解码等 |
| 混沌理论与控制 | 电力峰值功率预测、预测麻疹、水痘等 |
| 利用混沌时序 | 预测太阳黑子活动 预测股票证券价格、商业交易等 |

目前混沌、超混沌及时空混沌的控制和反控制的应用研究正在蓬勃展开.从表3可见:混沌控制论已经在激光、电子学、化学、生物、医学及工程等领域显示了巨大的应用潜力,国内外正处在激烈的竞争状态,谁抢先达到实用阶段,谁就能在一个崭新的高科技领域处于领先地位,在国际上占有一席之地,为人类造福做出贡献.

(1997年12月18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, 1996;18:291
- 2 方锦清. 科技导报, 1996;4:8
- 3 方锦清. 物理学进展, 1996;16:1-74
- 4 方锦清. 物理学进展, 1996;16:137-202
- 5 Guanrong Chen. *Proceedings of the First International Conference on Control of Oscillations and Chaos*, St. Petersburg, Russia, Aug. 1997:181-186
- 6 Guanrong Chen. *Chaos, Solutions & Fractals*, 1997;8:1461-1470
- 7 Ali M. K., Jin-Qing Fang. *Phys. Rev.*, 1997;E55:528
- 8 Ali M. K., Jin-Qing Fang. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 1997;7:179
- 9 Fang Jing-Qing, Ali M. K. *Nucl. Sci. Tech.*, 1997;8:129
- 10 Fang Jing-Qing, Ali M. K. *Nucl. Sci. Tech.*, 1997;8:194
- 11 Fang Jing-Qing, Ali M. K. *Chin. Phys. Lett.*, 1997;14:823

Nonlinear Control and Chaos Control

Fang Jin-qing

China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413

Key words chaotic dynamics, control and synchronization of chaos, nonlinear control methods, modern control science