

文章编号: 1001-0920(2001)01-0001-06

混沌与分形在化工过程控制中的应用

仲蔚, 俞金寿

(华东理工大学 自动化研究所, 上海 200237)

摘要: 针对复杂工业过程控制的研究对象普遍存在非线性、复杂性和不确定性的特点。总结了国内外一些将混沌与分形应用于化工过程控制的情况, 指出认识化工过程中的混沌现象进而进行控制是解决化工过程中某些复杂控制问题的有效途径。最后对非线性科学与控制理论相结合的前景进行了展望。

关键词: 过程控制; 混沌; 分形

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

Applying Chaos and Fractals to Chemical Process Control

ZHONG Wei, YU Jin-shou

(Research Institute of Automation, East China University of Science & Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of nonlinearity, complexity and uncertainty of complex industrial processes, some existing research results of applying chaos and fractals to chemical process control are surveyed. It is pointed out that recognizing the chaos phenomena in chemical process and processing effective chaos control hold the promise for dealing with the complex problems in chemical process control. Finally, the prospect of integrating nonlinear science with control theory is presented.

Key words: process control; chaos; fractals

1 引言

非线性科学是研究非线性现象共性的基础学科, 是在各门以非线性为特征的分支学科的基础上逐步发展起来的综合性学科, 它的发展对整个自然科学的发展有着重大的影响^[1-3]。随着混沌^[4]以及与其相关的分形^[5,6]、孤子等现象的发现, 引发了对复杂性问题的研究, 使人们逐渐认识到非线性因素是复杂性问题的集中表现。非线性科学的研究范围目前尚无定论, 但其研究主体主要包括混沌、分形、神经网络系统、孤子等几方面, 其研究方法主要包括实验数学法、小波分析、元胞自动机和重正化群等。

控制工程技术的发展经历了经典控制、现代控

制两个重要的发展阶段^[7,8]。随着科学技术和生产力的迅速发展, 被控对象的日益复杂化和大型化, 使传统控制理论面临着巨大的挑战。以非线性科学为代表的自然科学以及计算机技术的飞速发展, 为控制理论的发展提供了契机。确定性系统中的混沌使人们看到了普遍存在于自然界而多年来视而不见的一种运动形式, 分形的研究把人们点、面、体的常规几何观念中解放出来, 从而面对更真实的自然界。

在非线性科学的诸多研究成果中, 继人工神经网络^[9,10]与控制理论相结合并得到广泛应用之后, 混沌、分形、小波分析技术、混沌神经网络、元胞自动机等也相继应用于过程建模与控制。本文主要对混沌和分形应用于化工过程控制以及建模的研究情况

收稿日期: 1999-11-15; 修回日期: 2000-02-14

作者简介: 仲蔚 (1971—), 女, 山东青岛人, 博士, 从事复杂工业过程模型化与控制、神经网络的理论与应用的研究; 俞金寿 (1939—), 男, 浙江海宁人, 教授, 博士生导师, 从事复杂工业过程模型化与控制、先进控制系统等研究。

进行综述和分析,并展望了非线性科学与控制理论相结合并应用于实际过程中几个可能的研究方向。

2 混沌、分形理论简介

2.1 混沌、混沌动力学和混沌工程学

20世纪初法国数学家 Poincare 便已认识到:一个系统的状态中任意小的不确定因素可能逐渐增大,使未来状态不可预测,这就是后来称为混沌(Chaos)的特性。现代混沌学的起源首推 Lorenz^[4]发表的《确定性的非周期流》。混沌是一种非周期的动力学过程,它无处不在且蕴含着有序,有序的过程也可能出现混沌^[11]。混沌动力学系统可以产生复杂的行为并且蕴藏着许多规律,混沌绝不是一个无从控制的随机过程。

考虑一个非线性动力学系统的离散时间方程^[12]

$$x_{n+1} = F(x_n), \quad n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中, $x_n \in R$ 为状态变量, $F(\cdot)$ 是 $R \rightarrow R$ 的非线性映射函数,且充分光滑或分段光滑。设 $f(x)$ 和 $g(x)$ 为两个函数,定义 $f[g(x)]$ 为 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 的复合。若有 x_f 满足 $x_f = F(x_f)$, 则称 x_f 为式(1)的不动点;若存在正整数 k 使得 x_p 满足 $x_p = F^k(x_p)$ (这里 k 表示第 k 次复合), 则 x_p 称为式(1)的周期点。不动点其邻域的稳定性的由 $F'(x_f)$ 确定,若 $|F'(x_f)|$ 的值为 $0, < 1, = 1$ 和 > 1 , 则分别对应于超稳定、稳定、临界稳定和不稳定。对于不稳定的情况,有发散、周期振荡及混沌等。

一般说,混沌有3个明显的特征:1)对初始条件敏感的依赖性;2)非周期性;3)存在奇异吸引子。特征1)意味着混沌是不可预测的,且因其是非周期的,所以它不能细分或不能分解为两个互不影响的子系统。然而在混沌的性态中,存在着有规律性的成分,即其具有奇异吸引子。奇异吸引子又称混沌吸引子,是指相空间中吸引子的集合,混沌轨道在该集合中运行。可用 Lyapunov 指数度量相空间中两条相邻轨迹随时间按指数律吸引或分离的程度,正的 Lyapunov 指数即意味着混沌。或(1)的 Lyapunov 指数 σ 定义为

$$\sigma = \lim_n \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \log |F'(x_i)| \quad (2)$$

在混沌工程学的实际应用中,有些混沌现象是有利的,而有些则是有害的。将混沌应用到实际过程中,就要认识到混沌的存在,进而对其扬长避短。

2.2 分形的引出及分形理论简介

Mandelbrot 的专著《分形——形、机遇和维数》的出版,标志着分形理论的诞生;其后他又发现了著名的 Mandelbrot 集。Mandelbrot 将分形定义为:其组成部分与整体以某种方式相似的“形”称为分形。

同混沌一样,分形现象也是与非线性密切相关的,它的出现为复杂的物体组织形态的描述提供了一种极其简洁的方法。分形结构一般都有内在的几何规律性,即比例自相似性。大多数分形在一定的标度范围内不断地显微和放大任何部分,其不规则程度是相同的。按照统计的观点,几乎所有的分形又都是置换不变的,即其每一部分进行移位、旋转、缩放等,在统计意义下与其它任意部分相似。这两个性质揭示了分形的不规则性中存在着一定的规则性,同时也暗示着自然界中的一切形状及现象都能以较小或部分细节反映出整体的不规则性。分形理论中目前研究最多的是二次复多项式迭代中的 Julia 集和 Mandelbrot 集^[5]。

分形一般具有下列性质:无限精细的结构,比例自相似性,一般分数维数大于其拓扑维数,可由非常简单的方法定义并由迭代产生等。分形与混沌之间存在着根本的联系,这就是 Poincare 的动力系统,分形集就是动力系统中那些具有不稳定轨迹的初始点的集合,即混沌集。混沌吸引子就是分形集。

3 混沌和分形在化工过程控制中的应用

3.1 过程中的混沌现象与混沌控制方法

在许多复杂工业过程中,其动态特性经常显示出一些不可预测的扰动。过去认为这些扰动是由随机噪声引起的,通常用统计的方法将其滤掉,但随着混沌和分形理论的产生和发展,使人们开始重新认识过去常被忽略的扰动现象^[13]。现在可知,一个确定性的动态系统,若输入一个确定性的信号也会产生看似随机的混沌输出,初始条件的较小改变将导致系统输出的很大变化。

在复杂工业过程中,混沌运动和混沌现象是普遍存在的。Baillieul 揭示了非线性反馈系统中的混沌运动^[14]; Sparrow 研究了简单反馈系统中的分支和混沌特性^[15],以及带有分段线性函数反馈的三维单闭环反馈系统的混沌现象^[16]。非线性的化工过程随着操作变量及其系统内在特性的不同,可表现出许多特性,非线性系统可工作于稳定状态,或产生简单或复杂的振动,或产生混沌现象^[17]。自适应控制

系统中也存在混沌现象^[18]。Cook^[19]讨论了简单反馈系统中混沌产生的机理。田玉楚等^[20,21]研究了产生混沌的机理及相应的混沌控制问题,证明离散采样、反馈延迟以及在动态系统优化过程中都可能导致混沌现象,指出在复杂系统控制中,理论上追求所谓的“高级”控制算法,往往会引起较大的延迟,可能使系统失稳甚至产生混沌,因此实际应用中应引起注意。洪奕光等^[22]也指出了非线性系统在加入控制后可能具有更复杂的结构而出现混沌。

控制系统中出现混沌现象是非常普遍的。我们的目的是判别出工业过程中的混沌现象,并且加以控制。但由于混沌系统的运动形式极为复杂,致使传统的控制方法难以直接用于混沌系统的控制。为此,不少学者正在致力于研究如何控制系统的混沌运动,并使之转变为周期运动。OGY 方法^[23]利用混沌系统对参数变化的敏感性及混沌吸引子不稳定周期轨道的稠密性质,很好地控制了混沌运动。文献[24]设计出一种基于卡尔曼滤波器的状态估计器,用于控制混沌 Lorenz 方程。[25]用线性状态反馈控制器来控制 Lorenz 方程。[26]提出用参数周期扰动的方法来控制混沌。[27~29]研究了参数自调节控制和模型参考自适应控制两类控制混沌运动的方法。[30]提出了周期振荡法。此外,还有传递和转移控制法^[31~33]以及 OPF 控制法等^[34,35]。

3.2 混沌控制及在化工过程中的应用

由于对象的非线性及其不稳定的动态过程,所以混沌和分形在化工过程中的应用是较多的。文献[17]对 1988 年以前有关混沌在化工方面的应用做了综述,主要阐述了确定性系统中的混沌现象、奇异吸引子和湍流及其在化学工程中的应用。许多化工过程中存在着混沌现象,例如在三变量自动催化器中存在倍周期和混沌现象^[36];在 Belousov - Zhabotinsky 反应和间歇 Belousov - Zhabotinsky 反应中存在混沌现象^[37,38];在酶化反应中存在倍周期分岔及混沌现象^[39]。Mankin^[40]描述了 CSTR 中的一个放热化学反应,当逐渐改变冷却温度时,实验证明压力的增高会产生准周期的行为及导致混沌,并进一步揭示了两个耦合的非等温 CSTR 中的混沌现象^[41]。[42~44]介绍了在自适应控制系统中,由一些误差递减算法(如梯度下降法、最小二乘法等)而引起的控制系统的混沌现象。[45,46]指出常规 PID 控制下的非线性动态系统的分支和混沌现象,以及带有传统反馈控制的时延系统存在奇异吸引子现象。[47]讨论了 PI 控制器下非等温的硫化床

反应器中的分支、混沌以及奇异吸引子等问题。

要进行混沌控制,首先要识别混沌现象,文献[47]提出一种简谐平衡方法用以分析非线性动态系统中混沌的存在;[48]介绍一种控制系统中分支和混沌的简化判定方法。混沌应用于化工过程系统,主要是将混沌理论与控制理论相结合,在过程控制、过程建模、过程变量预测分析等方面的应用。

控制混沌就是对系统施加控制作用,将系统由混沌状态控制到稳定状态。OGY 方法作为一种控制混沌的有效方法,已应用于多个化工过程中的混沌控制,如在非等温的 CSTR 控制中取得了良好的效果^[49];将其应用于控制温度相互转换系统的混沌流^[50],理论和实验结果都证明,用一个低能量的反馈信号可以成功地控制混沌;将其应用到 Belousov - Zhabotinsky 反应的混沌控制也获得成功^[51]。文献[52]采用递归比例反馈 RPF 算法控制电化学系统中的混沌现象,证明它更适用于高阶的耗散系统。[34]将 OPF 方法成功地应用于一个混沌的自动催化器的三变量模型中。[30]提出一种连续反馈控制方法,可使体系沿吸引子上任意不稳定的轨道运动而不同于周期轨道运动,此方法在化工过程的混沌控制中有不少应用。如[53,54]将连续反馈控制方法分别用于 Belousov - Zhabotinsky 反应和酶化反应的混沌控制,通过与 OGY 方法相比显示出一定的优越性。[55]通过计算 Lyapunov 指数分析了各种改进的连续反馈控制方法。此外周期激振法^[56]被用于非等温的硫化床反应器的混沌控制;[57]分析了周期激振法用于控制混沌动力学的一些条件。采用基于神经网络的算法^[58]控制化工过程中的混沌和噪声,是近期出现的一种新方法,它比 OGY 方法和连续反馈方法的收敛速度更快。[59]给出一种混沌 Hamiltonian 动态系统的最优控制方法。

混沌虽不利于过程控制的一面,但在自然界中,有些混沌现象还是有利的。文献[60]对此进行介绍,并给出一种维持混沌的方法及其在几种系统中的应用。由于混沌运动具有遍历性、随机性、“规律性”等特点,所以文献[61]用类似于载波的方法将混沌状态引入到优化变量中,利用混沌变量进行搜索寻优,提出一种混沌优化方法。该方法的效率比目前广泛应用的随机方法要高得多,而且使用方便,是解决连续对象优化问题方便而有效的途径。

近几年,国内一些关于混沌理论与应用文献^[62~66]表明,混沌这一新的理论与方法正在被我国广大的工程技术人员理解并使用。混沌现象的发现,

给过程预测及建模工作提出了新问题。一方面,由混沌的基本性质之一可知,当初始条件有微小的变化时,就有可能扩展到整个吸引子,这样便丧失了其预测能力,这也正是认为混沌“有害”并对它加以控制的原因。另一方面,混沌现象所固有的确定性又表明,许多看似混乱的随机现象实际上比过去想象的更容易预测,许多过分复杂、看似随机的过程信息,有可能用简单的法则便可加以解释,这为我们面对复杂的过程对象的建模与控制增添了信心。

3.3 分形在化工过程中的应用

目前,分形在数学、物理、化学、材料科学、地质以及计算机科学等学科领域有着广泛的应用^[67],但在过程控制的应用却较少。文献[68]将基于规则的时间序列模型进行分形分析,并将该模型应用于非线性模型预测控制,认为采用分形分析的方法可以减少所需的数据量,并且如果过程的扰动满足分形等价的条件,则建立的非线性模型不必在线辨识。仿真表明将这种方法用于预测控制,其效果优于基于线性模型的预测控制。[69]将分形分析应用于硫化床反应器中的硫化颗粒特性分析。[70]对三相泡罩塔反应器中的压力波动数据进行分形分析,分析结果用于反应器的在线控制和故障诊断。

确定的非线性系统可以产生混沌行为;反之,实际过程中所遇到的通常是已知的一大类复杂、混沌的数据,然后去挖掘其内在的作用机制。基于这种思想,由分形的迭代函数系统,可用很少的数据便可产生极其复杂的图象,这意味着表象上巨大的数据量在某种映射下只要少数数据便可表达出来。分形的这种性质已应用到许多图象压缩和数据压缩系统,这对于过程控制中的信号处理和复杂数据的处理具有重要的意义。

4 非线性科学与控制理论相结合的前景展望

以上介绍了非线性科学研究成果中混沌和分形的基本原理及在复杂工业过程中的应用。尽管这方面的研究工作还没有充分展开,但从已有的一些研究成果不难推断出,上述方法是解决控制对象非线性、复杂性和不确定性的一种工具。非线性科学的发展方向是面向复杂的研究对象,如何将其研究成果与控制理论相结合,解决大型复杂系统的控制问题,或使已有的控制系统具有更多的智能性,这是一项艰巨而复杂的工作。由于神经网络在过程控制中的

应用,推动了混沌、分形、小波分析等在自控领域的应用。但也应看到,非线性科学的许多研究成果还没有得到开发应用,如混沌神经网络、元胞自动机、散射反演、重正化群等。

目前,探索复杂性已成为科学与时代发展的一个显著特点^[71],非线性科学正是由这种形势促进形成的。控制理论也正向着认识复杂性、模拟复杂性、控制复杂性的方向发展,所以非线性科学与控制理论的进一步结合是发展的必然趋势。然而理论研究与实际应用之间总有一定的差距,如何将理论上的成果应用到具体的生产实践中去,是许多科学工作者和工程技术人员一直在探索的问题。在非线性科学与控制理论相结合并具体应用的过程中,还有许多工作有待于完成,作者认为大体有以下几方面:

1) 复杂工业过程的建模一直是令人困扰的问题。由于机理建模的局限性,现在逐步采用一些其它方法对过程的建模。例如神经网络、模糊技术、混沌、小波分析、混沌神经网络、元胞自动机等非线性科学的研究成果,它们比传统方法具有优越的模拟复杂性的能力,是解决复杂工业过程建模的有效途径。

2) 对于大型工业过程,由于长期运转操作往往存有大量的数据,对这些数据进行处理,从中提取出需要的过程特性,是一项重要的工作。以往主要是采用统计回归的方法,虽有成效但仍有诸多不足。将分形分析、混沌分析、小波分析等技术应用于数据处理,可得到令人满意的过程特性,又省去了过程辨识等繁琐的实验步骤。这将是今后的研究方向之一。

3) 软测量技术是目前复杂工业过程中应用较多的方法。软测量的方法所面临的难点是非线性的拟合以及有效信息的特征抽取问题。已有成果表明,小波分析、分形分析等对于产品质量估计具有较好的效果。将这些技术用于软测量,能更好地利用过程数据,得到满意的软测量模型;将其应用于先进控制,可解决不可测过程指标的估计与控制的难题。

4) 过程控制正经历由简单控制到复杂控制再到智能控制的发展中。原有的PID控制、串级、前馈控制等控制策略,显然远远不能满足越来越复杂的控制要求;神经网络、模糊控制以及模糊神经网络等智能控制方法也正在发展和完善中。已有研究成果表明,原先在控制中令人棘手的随机干扰问题,其中有不少其实是一种混沌现象。所以,在充分了解其混沌特性的基础上,采用混沌控制的各种方法,通过加入小的控制信号,便可达到良好的控制效果。这也是解决过程控制难点问题的有效途径。

5) 过程监测与故障诊断是近年来过程控制中的热点问题。神经网络方法和小波分析技术等已在在这方面取得了广泛的研究成果,证明非线性科学的成果应用于此项工作是大有潜力的。

参考文献:

- [1] 冯长根. 非线性科学的理论、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [2] 赵松年. 非线性科学——它的内容、方法和意义[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [3] 郝柏林. 分岔、混沌、奇怪吸引子、湍流及其它——关于确定论系统中的内在随机性[J]. 物理学进展, 1983, 3(3): 329-416.
- [4] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. J Atmospheric Sci, 1963, 20(2): 130-141.
- [5] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. New York: W H Freeman, 1977.
- [6] Feder J. Fractals[M]. New York: Plenum Press, 1988.
- [7] 陈翰馥. 控制理论的现状及对它的期望[J]. 信息与控制, 1994, 23(1): 34-37.
- [8] 金以慧, 王诗宓, 王桂增. 过程控制的发展与展望[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(2): 145-151.
- [9] Hunt K J, Sbarbaro D, Zbikowski R *et al.* Neural networks for control systems_ A survey[J]. Automatica, 1992, 28(6): 1083-1112.
- [10] Willis M J, Montague G A, Massimo C D *et al.* Artificial neural networks in process estimation and control [J]. Automatica, 1992, 28(6): 1181-1187.
- [11] 王东生, 曹磊. 混沌、分形及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995.
- [12] Cambel A B. Applied chaos theory, A paradigm for complexity[M]. Boston: Academic Press, 1993.
- [13] Lee J S, Chang K S. Applications of chaos and fractals in process systems engineering [J]. J Proc Contr, 1996, 6(2/3): 71-87.
- [14] Baillieul J. Chaotic motion in nonlinear feedback systems[J]. IEEE Trans on CAS, 1980, 27(11): 990-997.
- [15] Sparrow C T. Bifurcation and chaotic behaviour in simple feedback systems[J]. J Theor Biol, 1980, 83(1): 93-105.
- [16] Sparrow C T. Chaos in a three-dimensional single loop feedback system with a piecewise Linear feedback functions[J]. J Math Anal and Applies, 1981, 83(1): 275-291.
- [17] Doherty M F, Ottino J M. Chaos in deterministic systems: Strange attractors, turbulence and applications in chemical engineering[J]. Chem Eng Sci, 1988, 43(2): 139-183.
- [18] Franciso R R, Javiex Arach, Eduardo F Camacmo. Chaotic motion in an adaptive control system[J]. Int J Control, 1985, 42(2): 353-360.
- [19] Cook P A. Simple feedback systems with chaotic behaviour[J]. Syst and Contr Lett, 1985, 6: 223-227.
- [20] 田玉楚, 符雪桐, 吕勇哉, 等. 非线性控制和优化系统中的混沌运动[J]. 控制与决策, 1995, 10(1): 1-7.
- [21] 田玉楚, 符雪桐, 吕勇哉, 等. 一类混沌系统的变换、估计和控制[J]. 控制与决策, 1993, 8(5): 345-350.
- [22] 洪奕光, 秦化淑, 梅生伟. 控制器引起的混沌现象[A]. 中国控制会议论文集[C]. 青岛, 1996, 370-374.
- [23] Ott E, Grebgi C, York J A. Controlling chaos[J]. Phys Rev Lett, 1990, 64(11): 1196-1199.
- [24] Fowler T B. Application of stochastic control techniques to chaotic nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1989, 34(2): 201-205.
- [25] Vincent T L, Yu J. Control of a chaotic system[J]. Dynamics and Control, 1991, 1: 35-52.
- [26] Lima R, Pettini M. Suppression of chaos by resonant parametric perturbations[J]. Phys Rev A, 1990, 41(2): 726-733.
- [27] 童培庆. 混沌的自适应控制[J]. 物理学报, 1995, 44(2): 169-176.
- [28] Huberman B A, Lumer E. Dynamics of adaptive systems[J]. IEEE Trans on Circ and Syst, 1990, 37(4): 547-550.
- [29] Boccaletti S, Arecchi F T. Adaptive control of chaos [J]. Europhys Lett, 1995, 31(3): 127-132.
- [30] Pyragas K. Continuous control of chaos by self-controlling feedback[J]. Phys Lett A, 1992, 170(6): 421-428.
- [31] Jackson E A, Huebler A. Periodic entrainment of chaotic logistic map dynamics[J]. Physica D, 1990, 44(3): 407-420.
- [32] Jackson E A. The entrainment and migration controls of multiple-attractor systems[J]. Phys Lett A, 1990, 151(9): 478-484.
- [33] Jackson E A. On the control of complex dynamic systems[J]. Physica D, 1991, 50(3): 341-366.
- [34] Peng B, Petrov V, Showalter K. Controlling chemical chaos[J]. J Phys Chem, 1991, 95(13): 4957-4959.
- [35] Petrov V, Peng B, Showalter K. A map-based algorithm for controlling low-dimensional chaos [J]. J Phys Chem, 1992, 96(19): 7506-7513.
- [36] Peng B, Schott S K, Showalter K. Period doubling and chaos in a three-variable autocatalator[J]. J Phys

Chem, 1990, 94(13): 5243-5246.

- [37] Gyorgyi L, Field R J. Simple models of deterministic chaos in the Belousov-Zhabotinsky reaction[J]. J Phys Chem, 1991, 95(17): 6594-6602.
- [38] Ruoff P. Chaos in batch Belousov-Zhabotinsky systems[J]. J Phys Chem, 1992, 96(23): 9104-9106.
- [39] Geest T, Steinmeyr C G, Larter R *et al.* Period-doubling bifurcations and chaos in an enzyme reaction[J]. J Phys Chem, 1992, 96(14): 5678-5680.
- [40] Mankin J C, Hudson J L. Oscillatory and chaotic behaviour of a forced exothermic chemical reaction[J]. Chem Eng Sci, 1984, 39(12): 1807-1814.
- [41] Mankin J C, Hudson J L. The dynamics of coupled nonisothermal continuous stirred tank reactors [J]. Chem Eng Sci, 1986, 41(10): 2651-2661.
- [42] Mareels I M Y, Bitmead R R. Non-linear dynamics in adaptive control: Chaotic and periodic stabilization[J]. Automatica, 1986, 22(6): 641-655.
- [43] Mareels I M Y, Bitmead R R. Non-linear dynamics in adaptive control: Chaotic and periodic stabilization - Analysis[J]. Automatica, 1988, 24(4): 485-497.
- [44] Golden M P, Ydstie B E. Small amplitude chaos and ergodicity in adaptive control[J]. Automatica, 1992, 28(1): 11-25.
- [45] Chang H C, Chen L H. Bifurcation characteristics of nonlinear systems under conventional PID control[J]. Chem Eng Sci, 1984, 39(7/8): 1127-1142.
- [46] Boe E, Chang H C. Dynamics delayed systems under feedback control[J]. Chem Eng Sci, 1989, 44(6): 1281-1294.
- [47] Genesio R, Testi A. Harmonic balance methods for the analysis of chaotic dynamics in nonlinear systems. [J]. Automatica, 1992, 28(3): 531-548.
- [48] 叶心宇, 徐功仁. 非线性延迟系统中分岔和混沌之简化判定[J]. 华东化工学院学报, 1988, 14(S): 1-7.
- [49] Bandyopadhyay J K, Kumar V R, Kulkarni B D. Regulatory control of a chaotic nonisothermal CSTR[J]. AIChE J, 1993, 39(5): 908-912.
- [50] Singer J, Wang Y Z, Bau H H. Controlling a chaotic system[J]. Phys Rev Lett, 1991, 66(9): 1123-1125.
- [51] Petrov V, Gaspar V, Masere J *et al.* Controlling chaos in the Belousov-Zhabotinsky reaction[J]. Nature, 1993, 361(6): 240-243.
- [52] Parmananda P. Control of chaos in an electrochemical cell[J]. Phys Rev E, 1993, 47(5): 3003-3006.
- [53] Schneider F W, Blittersdorf R, Forster A *et al.* Continuous control of chemical chaos by time delayed feedback[J]. J Phys Chem, 1993, 97(47): 12244-12248.
- [54] Lekebusch A. Chaos control in an enzymatic reaction [J]. J Phys Chem, 1995, 99(2): 681-686.
- [55] Pyragas K. Application of extended delay feedback to control chaos[J]. J Tech Phys, 1996, 37(3/4): 409-412.
- [56] Ajbar A, Elnashaie S S E H. Controlling chaos by periodic perturbations in nonisothermal fluidized-bed reactor[J]. Aiche J, 1996, 42(11): 3008-3019.
- [57] Hsu R R. Conditions to control chaotic dynamics by weak periodic perturbation[J]. Phys Rev Lett, 1997, 78(15): 2936-2939.
- [58] Lebender D, Muller J, Schneider F W. Control of chemical chaos and noise: A nonlinear neural net based algorithm[J]. J Phys Chem, 1995, 99(14): 4992-5000.
- [59] Jair B. Optimal control of chaotic hamiltonian dynamics[J]. Phys Rev A, 1995, 51(2): 923-933.
- [60] Spano M L. Maintaining chaos materials for smart systems [J]. Mater Res Soc Sym Proc, 1997, 459: 545-555.
- [61] 李兵, 蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(4): 613-615.
- [62] 胡海岩. 力学系统混沌的主动控制[J]. 力学进展, 1996, 26(4): 453-463.
- [63] 张辉, 吴淇泰. 混沌运动的控制[J]. 力学进展, 1995, 25(3): 392-399.
- [64] 陈关荣. 控制非线性动力系统的混沌现象[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(1): 1-6.
- [65] 王忠勇. 一类非线性反馈控制系统的混沌运动及其控制[J]. 控制与决策, 1997, 12(S): 420-424.
- [66] 梁志珊, 王丽敏, 付大鹏. 应用混沌理论的电力系统短期负荷预测[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 87-90.
- [67] 辛厚文. 分形理论及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993.
- [68] Peng C Y, Jang S S. Fractal analysis of time-series rule-based models and nonlinear model predictive control[J]. Ind Eng Chem Res, 1996, 35(7): 2261-2268.
- [69] Fan L T, Kang Y, Neogi D *et al.* Fractal analysis of fluidized particle behavior in liquid-solid fluidized beds [J]. AIChE J, 1993, 39: 513-517.
- [70] Kang Y. Fractal analysis of pressure fluctuations in a three phase bubble column reactor operating at low pressure[J]. Korean J Chem Eng, 1996, 13(3): 317-323.
- [71] Russell R. 非线性动力学的发展趋势: 适应复杂性[J]. 科学, 1993, 45(5): 50-56.