

文章编号: 1001-0920(2004)07-0721-05

## 广义稳态的工业过程及其优化控制

罗旭光, 万百五

(西安交通大学 系统工程研究所, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 阐述了工业过程中出现的拟周期和混沌等动态行为, 并分析了形成的原因和条件. 介绍了与之密切相关的非线性科学中的混沌、微分动力学系统以及遍历论等理论, 综述了工业过程的广义稳态优化控制的研究成果、理论意义和实用价值及其发展方向

**关键词:** 工业过程; 非线性; 混沌; 广义稳态; 稳态优化控制

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Generalized steady-state occurred in industrial process and its optimizing control

LUO Xu-guang, WAN Bai-wu

(Institute of Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China. Correspondent: LUO Xu-guang, E-mail: lxgnet@grg.net.cn)

**Abstract:** Dynamic behaviors such as quasi-periodical, chaotic etc. Occurred in industrial processes are reviewed. And the causes and conditions to take shape are analyzed. Based upon the closely related theories surveyed: such as chaos, differential dynamical systems and ergodic theory in the nonlinearity science, the achievements, theoretical meaning and practical value of the generalized steady-state optimizing control of industrial processes, and the further research directions are provided.

**Key words:** industrial process; nonlinearity; chaos; generalized steady-state; steady-state optimizing control

### 1 引言

稳态优化控制是工业过程控制中最常用的一种自动化技术. 长期处于稳态工况的化工、石油、冶金、电力以及制药等某些轻工业领域, 其工业过程稳态优化与控制有着广泛的实际应用背景. 通常, 总是以一个或两个具体的经济技术指标(如增加产量, 减少原材料消耗, 提高产品质量等), 在线地确定和跟踪过程的最优工作点. 工业过程稳态优化控制已成为自动化学科中的一个专门分支, 国内外许多专家学者和现场工程技术人员为此做了大量工作, 并取得了一系列应用成果和很高的经济效益<sup>[1~3]</sup>.

就稳态形式而言, 以往的研究工作主要局限于

简单的常值稳态, 即使对伴有随机噪声的工业过程稳态<sup>[4,5]</sup>, 也是假定无噪声情况下系统的平衡态是常值稳态, 随机稳态只是常值稳态与随机噪声的一种复合状态, 并且将噪声视为白色高斯型噪声. 然而, 现场的确定性工业过程, 其中有些中间变量出现杂乱无章的起伏或波动, 如高压锅炉汽包的水位、某些塔或釜的液位、加热炉的温度、容器的压力等, 很难用随机噪声来解释.

近20年来对工业过程中出现混沌现象的报道, 使人们认识到有些动态行为是混沌现象, 并且过程可认为此时处于是一种“拟稳态”<sup>[6]</sup>. 随着对混沌现象和分形理论等非线性科学的深入研究, 人们对工

收稿日期: 2003-07-14; 修回日期: 2003-12-05

作者简介: 罗旭光(1958—), 男, 河南温县人, 副总工程师, 博士, 从事稳态优化、模糊神经网络等研究; 万百五(1928—), 男, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 从事大系统优化、产品质量控制等研究

业过程的稳态形式有了更加明确的认识。在研究稳态优化控制时,工业过程的稳态形式应包括人们已观察到的(不考虑噪声的影响)常值稳态、周期稳态、拟周期稳态和混沌稳态,再加上过去已确认的随机稳态。因此应将各种稳态行为有机地统一在一种广义稳态形式的定义之下<sup>[7]</sup>。

对工业过程广义稳态的定义以及数学描述,不仅与非线性科学中的混沌、微分动力学系统以及遍历论等理论密切相关,而且还涉及到过程的稳态优化理论和技术。本文仅对上述问题进行阐述和分析。

## 2 混沌、微分动力学系统与遍历理论

混沌是出现于确定性系统而难以预测,隐含于复杂系统又不可分解,呈现多种混乱却颇有规则的动态过程。混沌理论是研究自然界非线性系统自身规律性的一门科学。对于混沌的研究,至少可以追溯到20世纪后半期。1963年,美国气象学家Lorenz发表了“决定性的非周期流”的论文<sup>[8]</sup>,指出了非周期性与不可预见性之间的联系,并且描述了“对初值条件的敏感性”这一混沌的基本性态,这就是著名的“蝴蝶效应”。20世纪70年代是混沌科学发展的辉煌年代。1971年,Ruelle和Takens提出了奇异吸引子的概念<sup>[9]</sup>。1975年,华人学者李天岩和美国数学家Yorke发表了“周期三意味着混沌”的著名论文<sup>[10]</sup>,给出闭区间上连续自映射的混沌定义,揭示出从有序到混沌的演变过程。1976年,美国生物学家May发表了“具有极复杂动力学的简单数学模型”的论文<sup>[11]</sup>,向人们表明:简单的确定论数学模型也可产生看似随机的行为,这是混沌理论中的重要信息。1977年,第1次国际混沌控制会议在意大利召开,标志着混沌科学的诞生。1978年,美国物理学家Feigenbaum发表了“一类非线性变换的定量普适性”的论文<sup>[12]</sup>,因发现倍周期分叉通向混沌的两个普适性常数而在学术界引起很大的反响。

动力学系统(控制界称为动态系统)是一种随时间演化的具有规律的体系,它在自然和社会中随处可见,如经济系统、社会系统以及物理、化学、生物和工程(包括工业过程)系统等。

给定一个初始点,系统按已知或假定的规律在所允许的状态范围内运动,这些规律由微分方程或差分方程描述。例如一个随时间演变的系统 $S$ ,如果它的运动可归结为一常微分方程组 $\dot{x} = \Phi(x)$ ,式中 $x \in \mathbb{R}^n$ , $\Phi \in C^1$ (一阶连续可微函数空间),则称系统 $S$ 为古典动力学系统<sup>[13]</sup>。给定初始条件 $x(0) = x_0, x_0 \in \mathbb{R}^n$ ,记方程组满足初始条件的解为 $\mathcal{Q}(t, x_0)$ 。

对于给定的 $x \in \mathbb{R}^n$ ,称点集 $\mathcal{Y}(x) = \{\mathcal{Q}(t, x) : t \in \mathbb{R}\} \subset \mathbb{R}^n$ 为流 $\Phi$ 经过点 $x$ 的轨线。对于 $\forall x \in X$ ,并且 $\Phi$ 满足一定的条件,称 $\Phi$ 为 $X$ 上的一个拓扑动力学系统<sup>[14]</sup>。

Whitney<sup>[15]</sup>注意到,在一个适当的空间 $X$ 中(如拓扑空间、度量空间或测度空间等),人们能够研究轨线族的定性理论,只要假定这些轨线族的可能性态受到某种限制,例如这些轨线是由作用在 $X$ 上的一个一般单参数变换群定义的,即可满足上述假定<sup>[16]</sup>。用Poincare方法研究动力学系统的运动轨线 $\mathcal{Y}(x)$ 的性质,往往归结为研究一个光滑流形上的微分同胚,更一般地,可归结为研究一个度量空间上连续映射的轨线形态或者保测变换的遍历性质。前者通常称为拓扑动力学系统,而后者则称为遍历理论<sup>[13]</sup>。

Birkhoff的名著《动力学系统》<sup>[17]</sup>,对于动力学系统理论的发展起了巨大的推动作用。正是他建立了动力学系统理论的两个主要研究方向,即拓扑动力学理论和遍历理论。20世纪60年代,Peixoto关于二维流形上流的结构稳定性问题的讨论<sup>[18]</sup>,标志着微分动力学系统研究的开始。此后,由于Smale等人的大力提倡,使得离散动力学系统的研究迅速展开。由于利用离散动力学系统研究微分同胚的动力性态简洁而直观,仅仅经过10年时间,Smale学派就奠定了离散微分动力学系统关于结构稳定性的理论框架<sup>[19]</sup>。文献[20]所讨论的工业过程数学模型以及发表的有关广义稳态的论文,均采用离散动力学系统形式进行描述和分析。

## 3 工业过程中的混沌及广义稳态

自1951年首次发现第1例化学振荡反应之后<sup>[21]</sup>,大量具有混沌性态的化学反应研究成果被相继报道<sup>[22~25]</sup>。在化工过程中,一些涉及混沌的研究也在相继展开<sup>[26~29]</sup>。Razon等人在一个非均匀催化反应系统中得到了混沌的有力证据,即反应中的一氧化碳与金属铂的氧化过程出现的非周期振荡现象是确定性的,并证明对该非周期振荡(混沌)模型的建模至少需要4个状态变量<sup>[26]</sup>。Diem和Hudson证实电解溶解电化反应系统中存在参数不稳定区域,当设定点位于该区域时系统出现混沌,并用相空间轨线、Poincare截面和计算吸引子维数的方法描述所观察到的混沌现象<sup>[27]</sup>。Lamba和Hudson在一个压力等温连续流搅拌槽反应系统中,将压力的幅值和周期作为调整参数,诱使周期倍增而产生混沌,并用Fourier变换和Poincare截面描述该系统的混沌。

性态<sup>[28]</sup>。特别值得强调的是, 于 1991 年发现的由对二甲苯氧化生成对苯二甲酸的 Du Pont 过程<sup>[29]</sup>, 标志着对工业过程混沌的研究已从实验室的学术领域走向工业生产过程的实际应用。此后, 具有混沌性态的其他一些非线性工业过程的例子也被相继发现<sup>[30-33]</sup>, 包括电化学反应、流化床反应、脉冲燃烧器反应和聚合反应的过程<sup>[34]</sup>。

上述例子中工业过程出现的混沌现象, 其原因是由过程自身的非线性所致。然而, 混沌还可由受控过程的控制器甚至控制算法诱导产生。例如在自适应控制系统中, 诸如梯度法和最小二乘法引起的非线性, 可使系统变量产生混沌轨线<sup>[35-37]</sup>。Ushio 和 Hirai 则证明非线性数字采样系统通过调整采样周期的值, 也可使系统出现混沌动力学性态<sup>[38]</sup>。这说明, 对于任意一个非线性数字采样系统, 其采样周期  $T$  是引起混沌的一个基本要素。Heiden 和 Walter 还证明, 混沌动力学性态可出现在延时反馈控制系统中<sup>[39]</sup>。Chang 和 Chen 的研究表明, 在传统的 PD 控制下, 一类延时系统可出现分叉和混沌<sup>[40]</sup>。此外, 在反馈控制下, 一个延时系统也可能出现奇异吸引子<sup>[41]</sup>。

以往工业过程稳态优化控制问题的研究, 基本上局限于简单的常值稳态, 最多考虑到迭加有白色高斯型噪声的随机稳态<sup>[1,2,4]</sup>。然而, 现已发现在工业过程中通向混沌的 3 条典型路径: 1) 倍周期分叉路径: 一个系统一旦发生倍周期分叉, 必然导致混沌; 2) 阵发性路径: 在时间域中, 系统不规则行为和规则行为将随机交替进行; 3) 拟周期分叉路径: 经过数次这样的分叉便可导致混沌。随着设定点的调整、过程参数的漂移以及触媒的老化等, 同一个工业工程中将会出现常值、周期、拟周期和混沌等几种不同的稳态行为。过程变量在一段时间内表现为一种稳态行为, 而在另一段时间内又表现为另外一种稳态行为<sup>[36]</sup>。

大量事实和举证说明, 过去许多被当作随机现象的不规则性运动, 实质上是由工业过程的内在非线性机制产生的混沌运动。因此在研究稳态优化控制时, 应将各种稳态行为统一在一种广义稳态的定义之下。

除了确定性系统自身非线性机制产生的混沌之外, 实际工业过程中随机噪声在许多场合下是不可避免的。如何区别工业过程中的不规则运动是混沌动力学行为还是系统随机噪声, 也是一个重要问题。混沌具有确定性运动的特征: 无周期而有序、有界,

对初值的敏感性, 以及 Feigenbaum 普适常数等, 这些都是随机运动所没有的。关于区别由过程确定性非线性机制产生的混沌动力学与噪声引起的随机信号的研究已有很多成果<sup>[42,43]</sup>。

#### 4 工业过程的广义稳态优化控制

对于混沌稳态的工业过程进行优化控制, 一直是有重要理论意义并有重大经济价值的问题, 它从一开始就受到化工界和学术界的关注<sup>[44-46]</sup>。文献 [46] 研究混沌发生情况下的稳态优化, 提出聚焦注意力的神经网络 (FANN), 以解决不可测扰动下的过程建模和求导问题, 并在此基础上进行基于常值模型的稳态优化。而在现场实际工作中, 更多的是采用取平均、滤波、外推等工程近似措施来应对随机和混沌信号。因此, 迫切需要在更高层次上深入开展理论研究。

工业过程稳态优化的控制算法, 实质上是依据反映过程设定点与输入输出之间稳态关系 (过程机理) 的数学模型 (稳态模型), 如代数方程或神经网络等, 按照优化指标找到过程的下一步搜索方向 (求导), 进而找到过程稳态工况的最优设定点<sup>[1-3]</sup>。作者创建了自适应模糊推理神经网络, 用于解决在广义稳态发生时, 根据过程变量的动态数据或记录曲线建立稳态模型的问题。

过程的广义稳态优化控制可以作者的研究结果为例加以说明<sup>[7,47-54]</sup>。首先严格定义工业过程广义稳态的平均度量, 给出广义稳态存在的充分条件; 根据遍历理论的不变测度概念, 定义广义稳态集合的中心名义值; 在工业过程相应的动力学系统是惟一遍历的条件下, 证明过程各变量在平均度量的意义下将一致收敛于它们各自的中心名义值, 粗略地说, 就是各个变量平均值的存在和不变。从而为工业过程广义稳态优化控制问题的描述和求解做好了必要准备<sup>[49]</sup>。在此基础上, 对工业过程广义稳态的优化控制问题进行恰当的数学描述<sup>[3,20,50]</sup>。

进而证明工业过程在其相应动力学系统满足同胚的条件下, 其优化控制问题存在; 并且证明若优化控制问题的目标函数满足连续可微的充分性条件, 则可将优化控制问题转化为基于模型求解的中心名义值的稳态优化控制修正问题<sup>[3,20]</sup>。对此, 作者提出工业过程广义稳态优化控制 AMOP 算法, 它实质上是一种建立在稳态模型基础上, 并利用过程动态信息进行修正的优化方法, 最终结果使得工业过程达到稳态最优。同时给出了 AMOP 算法的具体步骤及其仿真算例<sup>[50,52]</sup>。

根据Zangwill收敛性理论<sup>[55]</sup>,定义该算法赖以依托的点-集映射关系;证明广义稳态优化控制算法具有全局收敛性,并且证明该算法产生的解序列满足修正问题的Luenberger一阶最优性必要条件<sup>[3]</sup>.当目标函数为凸函数时,该解序列就是原优化控制问题的最优解.最后,根据Kuhn-Tucker定理<sup>[3]</sup>,分析研究修正问题的最优解与原优化控制问题的最优解之间的相互关系<sup>[54]</sup>.

## 5 未来发展趋势

近10年工业大系统和过程优化控制技术的发展表明:广义稳态优化控制概括了随机稳态优化控制,已成为研究稳态优化控制的有效工具.随机稳态优化是广义稳态优化的一种特殊情况,过程变量在随机意义下的平均值是过程变量中心名义值的一种特殊情况.

自适应模糊推理神经网络可推广到许多实际场合的稳态建模.工况的近似稳态在一定范围内摆动,它既不是常值稳态,又不是混沌稳态,而是混合作用下的产物.按照广义稳态优化控制理论进行工业过程稳态优化,从而其迭代进程不会因发散而导致严重的生产事故,因此可将广义稳态应用到优化控制工业现场.

广义稳态是一个全新的概念,它所涉及的混沌动力学也是正在发展中的一个学科.工业过程广义稳态及其优化控制问题本身还有许多需要进一步深化和完善之处,目前的研究仅是一个开端.对于大工业过程仅研究了它的随机稳态及其优化控制,还需要深入研究大工业过程的广义稳态优化控制.

工业过程中各变量的运动轨线偏离其中心名义值的分散程度是工业过程广义稳态的又一定量描述,它可弥补广义稳态平均度量的不足,如何利用这个分散程度来改进工程过程广义稳态控制是需要进一步研究的问题.

此外,大工业过程的广义稳态优化控制问题——分解-协调问题,及同时出现混沌现象和随机噪声的情况也是进一步研究的重要方向.

## 参考文献(References):

[1] 万百五, 林杰. 大规模工业过程的稳态递阶控制综述[J]. 自动化学报, 1990, 16(2): 186-192.  
(Wan B W, Lin J. Steady-state hierarchical control of large-scale industrial processes: A survey[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1990, 16(2): 186-192.)

[2] 万百五, 黄正良. 大工业过程计算机在线稳态优化控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[3] 万百五. 工业大系统优化与产品质量控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[4] Lin J, Han C, Roberts P D, et al. New approach to stochastic optimizing control of steady-state systems using dynamics information[J]. *Int J Control*, 1989, 50(6): 2205-2235.

[5] 王武义, 韩崇昭, 万百五. 工业过程稳态随机优化理论研究及算法[J]. 控制理论与应用, 1993, 10(6): 657-662.  
(Wang W Y, Han C Z, Wan B W. Theoretical study and algorithm for stochastic steady-state optimizing control of industrial processes[J]. *Control Theory & Appl*, 1993, 10(6): 657-662.)

[6] Postnikov N S. Chaotic oscillations in reactor with linear feedback[J]. *Atnnaya Energiya*, 1992, 72(3): 232-237.

[7] 罗旭光, 万百五. 工业过程广义稳态研究[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(5): 1-5.  
(Luo X G, Wan B W. Study on generalized steady-state of industrial process[J]. *J of Xi'an Jiaotong Univ*, 1998, 32(5): 1-5.)

[8] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. *J Atmos Sci*, 1963, 20: 130-141.

[9] Ruelle D, Takens F. On the nature of turbulence[J]. *Commun Math Phys*, 1971, 20(1): 167-192.

[10] Li T Y, Yorke J A. Period three implies chaos[J]. *Amer Math Monthly*, 1975, 82: 985-992.

[11] May R M. Simple mathematical models with very complicated dynamics[J]. *Nature*, 1976, 261: 459-467.

[12] Feigenbaum M J. Quantitative universality for a class of non-linear transformations[J]. *J Stat Phys*, 1978, 19: 25-52.

[13] 朱德明, 韩茂安. 光滑动力系统[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1993.

[14] 张筑生. 微分动力系统原理[M]. 北京: 科学出版社, 1987.

[15] Whitney H. Regular families of curves[J]. *Ann of Math*, 1933, 34: 244-270.

[16] Bhatia N P, Szego G P. *Stability Theory of Dynamical Systems*[M]. New York: Springer-Verlag, 1970.

[17] Birkhoff G D. *Dynamical Systems*[M]. New York: A M S Publications Providence, 1927.

[18] Peixoto M. Structural stability on two-dimensional manifolds[J]. *Topology*, 1962, 1: 101-120.

[19] Smale S. *The Mathematics of Time*[M]. New York: Springer-Verlag, 1980.

[20] 罗旭光. 工业过程广义稳态及其优化控制研究[D].

- 西安: 西安交通大学, 1997.
- [21] Field R J, Burger M. *Oscillations and Traveling Waves in Chemical Systems*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1985
- [22] Peng B, Scott S K, Showalter K. Period doubling and chaos in a three-variable autocatalator [J]. *J Phys Chem*, 1990, 94(13): 5243-5246
- [23] Gorgyi L, Field R J. Simple models of deterministic chaos in the Belousov-Zhabotinsky reaction [J]. *J Phys Chem*, 1991, 95(17): 6594-6602
- [24] Geest T, Steinmetz C G, Larter R, et al. Period-doubling and chaos in an Enzyme reaction [J]. *J Phys Chem*, 1992, 96(14): 5678-5680
- [25] Doumbouya S I, Munster A F, Doona C J, et al. Deterministic chaos in serially coupled chemical oscillators[J]. *J Phys Chem*, 1993, 97(5): 1025-1031.
- [26] Razon L F, Chang S M, Schmitz R A. Chaos during the oxidation of carbon monoxide on platinum-experiments and analysis[J]. *Chem Eng Sci*, 1986, 41(6): 1561-1576
- [27] Diem C B, Hudson J L. Chaos during the electrodis-solution of iron[J]. *AICHE J*, 1987, 33(2): 218-224
- [28] Lamba P, Hudson J L. Experiments on bifurcations to chaos in a forced chemical reactor[J]. *Chem Eng Sci*, 1987, 42(1): 1-8
- [29] Boman S. Researchers find order, beauty in chaotic chemical systems[J]. *Chemical & Engineering News*, 1991, 69(3): 18-29
- [30] Caneba G T, Densh B. Intermittency in nonisothermal CSTR [J]. *AICHE J*, 1988, 34(2): 333-334
- [31] Jorgensen D V, Aris R. On the dynamics of a stirred tank with consecutive reactions [J]. *Chem Eng Sci*, 1983, 38(1): 45-53
- [32] Nandapurkar P J, Hlavacek V, Van Rompay P. Chaotic behavior of a diffusion-reaction system [J]. *Chem Eng Sci*, 1986, 41(11): 2747-2760
- [33] Smith C B, Kusza B, Lyberatos G, et al. Period doubling and complex dynamics in our isothermal chemical reaction system [J]. *Chem Eng Sci*, 1983, 38(3): 425-430
- [34] Qammer H, Seshadhri K R, Gomatam R, et al. Control of a chaotic polymerization reaction using linear and nonlinear controllers[J]. *Chem Eng J*, 1996, 64(1): 141-148
- [35] Rubio F R, A racil J, Camacho E F. Chaotic motion in an adaptive control system [J]. *Int J Control*, 1985, 42(2): 353-360
- [36] Golden M P, Ydstie B E. Small amplitude chaos and ergodicity in adaptive control[J]. *Automatica*, 1992, 28(1): 11-25
- [37] Mareels IM Y, Beatmead R R. Non-linear dynamics in adaptive control: chaotic and periodic stabilization- II [J]. *Automatica*, 1988, 24(4): 485-487.
- [38] Ushio T, Hirai K. Chaos in non-linear sampled-data control systems [J]. *Int J Control*, 1983, 38(5): 1023-1033
- [39] An der Heiden U, Walter H O. Existence of chaos in control systems with delayed feedback [J]. *J Diff Eqs*, 1983, 47: 273-295
- [40] Chang H C, Chen L H. Bifurcation characteristics of nonlinear systems under conventional PD control[J]. *Chem Eng Sci*, 1984, 39(7/8): 1127-1142
- [41] Boe E, Chang H C. Dynamics of delayed systems under feedback control[J]. *Chem Eng Sci*, 1989, 44(6): 1281-1294
- [42] Grassberger P, Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors [J]. *Physica D*, 1983, 9: 189-208
- [43] Wolf A, Swift J B, Swinney H L, et al. Determining Lyapunov exponents from a time series [J]. *Physica D*, 1985, 16: 285-317.
- [44] Yang T S, Hunt B R, Ott E. Optimal periodic orbits of continuous time chaotic systems [J]. *Phys Rev E*, 2000, 62(2A): 1950-1959
- [45] Ahmed E, Hegazi A S. On dynamic oligopoly motivated by fuzzy concepts[J]. *Chaos Solit & Frac*, 2002, 13(1): 155-160
- [46] Keeler J D, Hartman E, Pich S. Process modeling and optimization using focused attention neural network [J]. *ISA Trans*, 1998, 37(1): 41-52
- [47] 罗旭光, 刘丁, 万百五. 一种基于神经元的自适应模糊推理网络[J]. *模糊系统与数学*, 1998, 4: 26-33 (Luo X G, Liu D, Wan B W. An adaptive fuzzy neural inferring network [J]. *Fuzzy Syst & Math*, 1998, 4: 26-33)
- [48] 罗旭光, 韩崇昭, 万百五. 工业过程混沌稳态研究[J]. *自动化学报*, 1999, 25(3): 393-396 (Luo X G, Han C Z, Wan B W. Study on chaotic steady-state of industrial processes [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(3), 393-396)

(下转第731页)

的即期表现满意度为:  $\tilde{\omega} = (0.071, 0.21, 0.27, 0.33, 0.119)$ .

### 3) 元组模型预测表现的综合评定

根据算法 4 中的 Step 3 ~ Step 5, 从元组模型中剔除滑动平均方法, 得到新的元组模型为: {指数平滑模型, ARMA( $p, q$ ) 模型, Hoter-Winter 模型, 3 层神经网络模型}.

根据算法 4 的 Step 6 ~ Step 8, 得到  $\tilde{\omega} = (0.166, 0.223, 0.315, 0.296)$ ,  $\tilde{\omega} = (0.398, 0.373, 0.027, 0.202)$ . 并设  $\delta = 0.3$ , 得到当前的组合模型为:  $\bar{\omega} \cdot S^T = 0.3284 \times y_1 + 0.328 \times y_2 + 0.1134 \times y_3 + 0.2302 \times y_4$ .

利用该模型对文献[9]中例 2 的数据进行预测, 得到预测值为 279.9, 而原文给出的实际值为 261, 采用文献[9]中方法给出的预测值为 219, 说明本文模型对该算例的预测效果好于文献[9]模型

## 5 结 论

从算法和实例运算过程可以看出, 本文给出的模型库遴选方法较以往的模型有很大改进. 首先, 在赋权方式上, 根据模型的客观精度建立其预测综合能力的考察指标, 并用满意度方式给出其权值, 避免了人工打分的强主观性; 其次, 将参与模型集合定义为问题合适的模型集合, 用满意度来确定元模型的参与度, 因而避免了模型的组合膨胀问题

## 参考文献(References):

- [1] Bates J M, Granger C W J. Combination of forecasts[J]. *Operations Research Quarterly*, 1969, 20(4): 451-468
- [2] Menezes L M d, Bunn D W. Review of guidelines for the use of combined forecasts[J]. *European J of Operational Research*, 2000, 120(1): 190-204
- [3] Al-Saba T, El-Amri I. Artificial neural networks applied to long term demand forecasting[J]. *Artificial Intelligence in Engineering*, 1999 13(2): 189-197.
- [4] Shan M S, Li D X, Liu B. Improving the accuracy of nonlinear combined forecasting using neural networks[J]. *Expert System with Applications*, 1999, 16(1): 49-54
- [5] Smith B T. *Focus Forecasting and DRP* [M]. New York: Vantage Press Inc, 1991. 72-89
- [6] Stephen P R. *Management* [M]. The fourth edition. New Jersey: Prentice Hall, 1994. 287-293
- [7] 张尧庭. 指标量化、序化的理论和方法[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 122-124
- [8] Peter J B, Richard A D. *Time Series: Theory and Methods* [M]. The second edition. Peking: The Publishing House of Advanced Education, 2001. 430-432
- [9] Dong J R. Research on the method of nonlinear combining forecasts based on fuzzy-neural systems[A]. *Proc of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation* [C]. Hefei, 2000. 899-903

(上接第 725 页)

- [49] 罗旭光, 万百五. 工业过程广义稳态及其平均度量[J]. 西北大学学报, 1998, 28(3): 196-202  
(Luo X G, Wan B W. Research on the mean metric of generalized steady state for industrial processes[J]. *J of Northwest Univ*, 1998, 28(3): 196-202.)
- [50] 罗旭光, 万百五. 工业过程广义稳态优化控制研究[J]. 自动化学报, 1999, 25(1): 38-44  
(Luo X G, Wan B W. Study on optimizing control of generalized steady-state for industrial processes[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(1): 38-44.)
- [51] 罗旭光, 刘丁, 万百五. 自适应模糊辨识及其在大系统中的应用[J]. 控制理论与应用, 1998, 15(3): 352-357.  
(Luo X G, Liu D, Wan B W. Adaptive fuzzy identification and its application to large-scale systems[J]. *Control Theory & Appl*, 1998, 15(3): 352-357.)
- [52] 罗旭光, 韩崇昭, 万百五. 工业过程混沌稳态优化控制研究[J]. 非线性动力学学报, 1997, 4(4): 359-367.

(Luo X G, Han C Z, Wan B W. Research on chaotic steady-state optimizing control problem of industrial processes[J]. *J of Nonl Dyn in Sci & Tech*, 1997, 4(4): 359-367.)

- [53] Luo Xuguang, Wan Baiwu. A study on the optimizing control of generalized steady state for industrial processes[J]. *Chinese J of Automation*, 1999, 11(3): 213-220
- [54] 罗旭光, 万百五. 工业过程广义稳态优化控制算法的收敛性研究[J]. 自动化学报, 2000, 26(3): 382-386  
(Luo X G, Wan B W. Convergence analysis of the algorithm for generalized steady-state optimizing control of industrial processes[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(3): 382-386.)
- [55] Zangwill W I. *Nonlinear Programming: A Unified Approach* [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1969