

文章编号: 1001-0920(2003)06-0641-04

## 满意度原理研究与应用的现状与展望

黄洪钟<sup>1</sup>, 姚新胜<sup>2</sup>, 周仲荣<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023; 2. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 从令人满意准则到满意优化、满意决策和满意控制, 满意度原理经历了几个发展阶段, 并在许多领域产生了一定的影响。然而这方面的介绍在国内却未见报道, 因此对满意度原理的产生、发展和研究现状进行综述, 并展望了满意度原理的发展趋势。

**关键词:** 满意度; 满意解; 满意优化; 满意控制

**中图分类号:** TH122

**文献标识码:** A

## Review of the satisfactory degree theory and its applications

HUANG Hong-zhong<sup>1</sup>, YAO Xin-sheng<sup>2</sup>, ZHOU Zhong-rong<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** From the satisficing criterion to the satisfactory optimization, satisfactory decision-making and satisfactory control, the satisfactory degree theory has past several development stages, and had a influence on many other fields. In view of lack of its introduction, the generation and the state-of-the-art of the satisfactory degree are reviewed, and its prospects are given.

**Key words:** Satisfactory degree; Satisfactory solution; Satisfactory optimization; Satisfactory control

### 1 引言

“令人满意准则”是诺贝尔奖获得者 Simon 在经济组织决策的研究中提出的, 他认为在某些情况下, 应当用“令人满意解”来代替传统意义的最优解<sup>[1,2]</sup>。满意准则的提出把人们从纯理性思维的研究方式带到了一个有限理性的状态, 为人们解决问题提供了崭新的途径。

目前, 满意度原理的研究已引起国内外众多领域专家学者的极大关注, 但有关满意度原理的研究还不够系统, 让刚接触的研究人员难于抓住其要点。为此, 本文对满意度原理进行较全面的分析介绍。

### 2 满意度原理的发展历程

从 1947 年令人满意准则的提出, 到今天满意度

研究的快速发展, 满意度研究大致可分为 3 个阶段:

#### (1) 萌芽阶段

从 1947 年令人满意准则这一概念出现起, 满意度原理便受到了人们的普遍关注, 有限理性、满意度、满意解等概念开始对决策、优化等领域产生影响。然而, 人们主要停留在满意度原理的价值、意义和对满意度概念的理解和接受上, 在学术研究和工程应用领域并未引起很大的重视。

#### (2) 理论研究阶段

最早对满意理论进行较系统研究的是日本学者 Mesarovic 等, 他们在 20 世纪七八十年代对满意决策理论进行研究, 定性地分析了满意度、满意准则的代数特性和分析方法, 讨论了协同原则、满意控制和

收稿日期: 2002-06-19; 修回日期: 2002-10-08。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59685003); 教育部优秀青年教师基金资助计划(1766)。

作者简介: 黄洪钟(1963—), 男, 重庆人, 教授, 博士生导师, 从事可靠性设计、智能优化与控制等研究; 姚新胜(1969—), 男, 山西晋城人, 博士后, 从事计算智能、满意优化等研究。

协同操作的选择。在他们的工作中,性能函数和容忍函数被映射为一个实数的值域集合,在某不确定范围内,如果性能函数小于或等于给定的容忍函数,则该控制被认为是满意的<sup>[3~6]</sup>。任平教授借助于模糊逻辑定义了满意度、满意解,开始了满意度形式化表示的研究。他把满意度思想引入优化领域,并产生了满意优化的概念和理论雏形<sup>[7]</sup>。靳蕃教授从模糊神经计算智能系统输出解的一般性评定的需要出发,给出了满意度的几种表示方式,定义了具体可用的计算公式,对满意度概念的系统化以及在神经网络等计算智能中的应用作出了贡献<sup>[8]</sup>。Goodrich对满意控制进行研究,通过把满意作为一种关系建立了满意控制理论,并把该理论应用到一些经典的控制中,解决了经典控制理论无法解决的一些问题<sup>[9]</sup>。

### (3) 应用阶段

与多数理论一样,满意理论在没有完全成熟的情况下,逐渐受到多个领域的关注,比较典型的是优化、控制、管理、决策、资源分配、任务调度等领域。大多数满意研究是通过修改原理论体系中的部分内容,把满意的思想引入到相关应用领域中。这方面的研究成果较多,Hopfield提出一种基于满意准则原理的全互联型神经网络模型,比较成功地解决了一些大规模组合优化难题<sup>[10]</sup>。靳蕃教授把分区计算后再组合起来求满意度的方法应用到TSP的求解中,得到了满意度很高的解<sup>[11]</sup>。另外,金炜东在列车的操纵优化<sup>[12]</sup>,罗刚在PID和MIMO控制<sup>[13]</sup>,席裕庚在复杂工业控制<sup>[14]</sup>,马丰宁在遗传算法<sup>[15]</sup>,郭耀煌在多目标群决策问题<sup>[16]</sup>等方面,都应用了满意度的思想。

## 3 满意度原理的基本概念

由于研究的发展阶段、出发点和研究方法的不同,在满意度研究中出现了许多具有代表性的概念,这些概念在一定程度上反映了满意度研究的核心思想。

### 3.1 满意准则

许多学者把满意作为一种准则提出,从Simon的令人满意准则,任平的满意优化准则<sup>[7]</sup>,到靳蕃的神经计算满意解输出准则<sup>[11]</sup>。其共同点是用满意准则来代替传统的最优化准则,且逐渐走向数学化并获得应用。

### 3.2 满意度和满意解

满意度和满意解一直是满意理论中研究最多、应用最广的概念。先后出现过多种满意度、满意解的定义,下面介绍几种主要的定义形式。

### 3.2.1 基于模糊数学的定义

任平利用模糊数学的方法对满意度进行定义<sup>[7]</sup>。考虑论域 $U$ 到目标值集合 $V$ 的一个映射 $f:U \rightarrow V$ , $U$ 为全体可能解或可能策略的集合, $V$ 是衡量解或策略的某种标准集。定义 $V$ 的一个Fuzzy子集 $\tilde{G}$ 为“满意”,其隶属函数为 $\mu_{\tilde{G}}:V \rightarrow [0,1]$ ,令 $\tilde{C}$ 为 $U$ 的Fuzzy子集,则有如下定义:

**定义1** 对满足 $C_{\lambda} \neq \Phi, G_{\lambda} \neq \Phi$ 的任一 $\lambda(0 \leq \lambda \leq 1)$ 值,称

$$M_{\lambda} = \{u | u \in C_{\lambda}, f(u) \in G_{\lambda}\}$$

为 $f$ 在 $\tilde{C}$ 上的 $\lambda$ -水平的满意解集。其中 $C_{\lambda}$ 和 $G_{\lambda}$ 分别为 $\tilde{C}$ 和 $\tilde{G}$ 的 $\lambda$ -水平集。即

$$\begin{cases} C_{\lambda} = \{u | u \in U, \mu_{\tilde{C}}(u) \geq \lambda\} \\ G_{\lambda} = \{v | v \in V, \mu_{\tilde{G}}(v) \geq \lambda\} \end{cases} \quad (2)$$

**定义2** 考虑 $\tilde{C}$ 的一Fuzzy子集 $\tilde{M}$ ,其隶属函数规定为

$$\mu_{\tilde{M}}(u) = \sup_{u \in M_{\lambda}} \lambda, \quad 0 \leq \lambda \leq 1$$

则称 $\tilde{M}$ 为 $f$ 在 $\tilde{C}$ 上的满意解。这时, $\mu_{\tilde{C}}(u)$ 就是解 $u$ 的满意度。

上述定义反映了满意度具有模糊性的本质特性,但受限于隶属度的表示方式,并没有正确反映满意度的本质内涵。

### 3.2.2 基于线性取值的满意度定义

基于线性取值的满意度定义较多,比较早的是胡继继教授的工作,他在探讨铁路运输计划指令性指标按纵向从上到下或从下到上进行分解的方法时,给出了如下的定义<sup>[17]</sup>:

**定义3** 设 $f_i$ 为指标数值, $f_i^*$ 和 $f_i^{\#}$ 分别为指标的最佳解和最差解,则指标 $f_i$ 的满意度为

$$\alpha_i = \frac{f_i - f_i^{\#}}{f_i^* - f_i^{\#}}$$

很明显,定义3是针对具体环境提出的,对一般应用来说,解的最佳和最差的先验知识无从得知,所以这种定义不具有通用性。

### 3.2.3 基于模糊神经计算的定义

靳蕃教授从模糊神经计算智能系统输出解的一般性评定满意度的需要出发,按照解的离散/连续性质,实时/非实时要求,给出了不同满意度的表示方法<sup>[11]</sup>。

**定义4** 设离散解集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为有效解集,对解 $x_i \in X$ 的某种性能评价用 $q(x_i)$ 表示,定义子集

$$X_i = \{x | q(x) > q(x_i), x \in X\} \quad (4)$$

则当模糊神经计算智能系统(FNCIS)输出解  $x_i$  时,其满意度定义为

$$S(x_i) \triangleq \frac{|X| - |X_i|}{|X|} = 1 - \frac{|X_i|}{|X|} \quad (5)$$

式中  $|\cdot|$  表示集合中元素的数目。

**定义 5** 设  $\tilde{\omega}(q)$  表示  $-\infty < q_a \leq q \leq q_b \leq \infty$  的解概率密度函数,则当获得质量为  $q_{x_i}$  的解  $x_i$  时,满意度为

$$S(x_i) = 1 - \int_{q_{x_i}}^{q_b} \tilde{\omega}(q) dq \quad (6)$$

上述两种满意度与时间无关,称为静态满意度。而下面定义的用来刻画神经网络在一定时间内输出解的满意程度,称为动态满意度。

**定义 6** 设 FNCIS 在  $t_0 \geq 0$  时刻输出可供选择的解数为  $N(t_0)$ ,在单位时间  $\Delta t$  后获得可供选择的解数为  $N(t_0 + \Delta t)$ ,则该系统在  $t_0$  时刻输出解的动态满意度为

$$s_d(t_0) = \frac{N(t_0)}{N(t_0 + \Delta t)} \quad (7)$$

以上几个满意度的定义反映了智能信息系统在解空间中搜索时的满意停止条件或准则,即当搜索过程已几乎找不到解时就停止搜索,此时可认为已找到了问题的满意解。尤其在 TSP 中的应用表明,该满意度定义是合理且可行的。

### 3.2.4 其他定义

马丰宁等定义了类似于动态满意度的遗传算法中的满意度<sup>[15]</sup>:

**定义 7** 满意度  $\mu(s)$  是与遗传次数有关的指标函数

$$\mu(s) = m\left(\bigcup_{i=0}^s H_i\right) / m(A) \quad (8)$$

其中:  $A$  为代码串空间,  $H_i \subset A$  为第  $i$  次遗传所覆盖的集合,  $s$  为遗传次数。

$\mu(s)$  体现了 GA 的结果与最优解的“靠近距离”。这种靠近距离并不是指 GA 解的值与最优解的值之间的差距,它是选取 GA 解的范围指标。

Pirjanian 定义的满意解如下<sup>[16]</sup>:

**定义 8(满意解)** 向量优化问题的一个满意集合就是每个目标值都超过期望水平(或目标函数)的可行解的一个子集,其中的元素是满意解。

王光远和陈树勋<sup>[19]</sup>在进行结构的多目标模糊优化设计时,借助于模糊数学定义了约束满足度和目标满意度、满足满意解等概念,认为满足满意解是在设计空间中,再也找不到一个解能使其各目标的

趋优满意程度以及各约束的满足程度比它更好的解。白广忱<sup>[20]</sup>认为,问题的非劣解即可作为原多目标优化模型的满意解。吴清烈等定义了满意解以及范围在 0-1 之间的目标满意度和综合满意度<sup>[21]</sup>。郭耀煌等定义了线性满意度和加权组合满意度,然后把决策问题转化为求以满意度为自变量的问题<sup>[16]</sup>。张世英等提出了交互式的满意度决策方法和目标满意度<sup>[23]</sup>。祝世京提出了目标满意度、满意解集<sup>[24]</sup>。Sakawa 定义了复合满意度<sup>[25]</sup>。

前面介绍的许多满意度、满意解概念都是满意的思想在相应领域中的应用,都与其应用领域密切相关,具有局限性和狭义性,没有很好地反映满意度原理的核心思想。

### 3.3 满意决策

满意决策在满意概念中应用较早也较多。Simon 就是从决策问题出发进行研究的,他认为决策问题应该追求满意解而不是最优解。

Mesarovic<sup>[3]</sup>定义满意决策问题为:给定备择集合  $M$ ,条件集合  $\Omega$  和函数

$$g: M \times \Omega \rightarrow R, \quad \tau: \Omega \rightarrow R$$

其中:  $g$  为一个代价(或属性)函数,  $\tau$  为一个期望水平(或容忍水平)函数。满意决策问题是寻找  $\hat{m} \in M$ ,满足  $(\forall \omega)(\omega \in \Omega \Rightarrow g(\hat{m}, \omega) \geq \tau(\omega))$  的过程。

上述定义概括了多种类别的决策问题。许多研究人员都曾把满意的思想应用到决策领域中,如多准则多方案决策、大规模含整变量多目标决策、群决策、主从策略的两层决策、多属性决策及博弈等。

### 3.4 其他概念

除了前面介绍的一些主要概念之外,还有许多满意概念,如满意规划、满意分配、满意过程、满意寻优、满意行为及整体满意度、组合满意度等。

满意度的相关研究还有很多,涉及到的科学研究和工程应用领域也很广。其中在满意推理、基于满意度的知识系统、基于满意度的搜索算法、遗传算法、资源分配及任务调度等方面,都有不少研究和应用成果。

## 4 代表性研究工作

### 4.1 满意控制

Goodrich 在其博士论文中较系统地研究了单代理满意控制理论、多代理满意控制理论及其应用。随后,Goodrich 和 Stirling 等在满意控制方面做了一系列工作,形成了较为系统的满意控制理论。席裕庚<sup>[14]</sup>针对复杂工业过程的特点与用户要求,提出了满意控制的概念,给出了满意控制的基本框架,分析

了满意控制对复杂工业环境的适应性。

#### 4.2 满意决策

在决策科学中,如多目标决策、多层决策、主从决策和随机决策等,都有满意度的具体应用。Takatsu 等对满意决策进行了较深入的研究,对满意决策的数学属性、满意准则、求解方法做了较详尽的阐述,其研究成果基本上形成了满意决策的理论体系。邓志良<sup>[26]</sup>讨论了满意决策与传统决策之间假设前提、应用效果、观念等的区别,阐述了满意决策的一些特性。吴清烈等把满意度应用到多目标决策的交互式方法中<sup>[23]</sup>。王仁超等对满意群决策进行了分析<sup>[27]</sup>。

#### 4.3 交互式多目标优化满意方法

Sakawa 等<sup>[25,28,29]</sup>阐述了了几种类型的多目标模糊满意方法,对整数优化、0-1 规划等复杂优化问题进行了分析处理。

### 5 满意度原理研究存在的主要问题

总体上讲,满意度原理发展至今,已初步形成了以满意度、满意解、满意控制等概念为核心的满意理论,在许多领域受到了足够的关注和重视,并对这些领域产生了一定的影响,有效地解决了一些传统优化理论不能解决的问题。但与优化、控制等理论相比,满意理论还远不成熟,主要存在以下几方面问题:

1) 在知识的系统化方面,作为比最优化更一般的理论,满意度原理还差得很多,其中包括满意度相关概念的完善,满意度原理公理化体系的建立,满意度原理应用的规范化等。因此,满意度原理知识系统的完善工作十分必要。

2) 满意度原理在问题求解方法上不够系统,特别是满意度的表示和满意度函数的建立。满意度具有丰富的内涵,因此在具体使用过程中,满意度的设计方法可能不同。研究合理的满意度建立方法进而建立求解满意问题的系统方法,将是满意度原理应用研究中的一个重点。

3) 在多数研究中,满意度应用都在问题的可行域上进行。对于一般问题而言,寻找可行解本身就是一个难点,且多数问题的可行解不充满整个解空间;有时可行域可能是非连通集合,一些问题的可行解甚至难以表达。因此,如何确定问题的可行域,是满意度原理首先要解决的问题。对于一些具有特殊性的非凸、不连续等问题,如何确定可行域就显得更加重要。

4) 从人性化方面考虑,满意度原理在一定程度上

上遵从了一种人性化的理念。那么在处理问题过程中,如何把这种人类的偏好在应用中体现出来,是满意度研究的关键问题之一。

### 6 发展前景展望

#### (1) 理论体系的完善

随着理论研究与应用成果的不断丰富,满意度原理将会形成一个新的领域,满意度原理的知识体系将会更加合理、完善。满意度的表示形式、获取方式、问题识别等方面将是短时间内研究的重点。

#### (2) 满意度原理的应用

满意问题非常广泛,把满意度原理应用到具体问题的求解过程中,发挥它的作用,是满意度理论研究成果得到验证的保证,也是加速满意度研究发展的动力。在以后的研究中,满意度原理可能在两个应用方向上得到发展:其一是作为一套独立的包容了最优化理论的理论体系,对优化理论进行扩展,从而不仅在最优化理论的应用领域,而且在决策、控制等领域得到广泛的应用;其二是满意度原理作为一种思路和方法论的补充,在优化、控制、管理及人工智能等研究领域会得到具体的应用,对于解决一些问题将起到协助作用。

#### (3) 与其他理论的结合

作为代表人性化思维的一种科学新理论,满意度原理与人类的许多科学研究、工程应用乃至社会生活领域均存在着联系。在今后的研究中,满意度原理研究将与其他学科领域更多地融合并产生更多的研究成果。

图 1 给出了满意度研究的 3 个发展趋势。

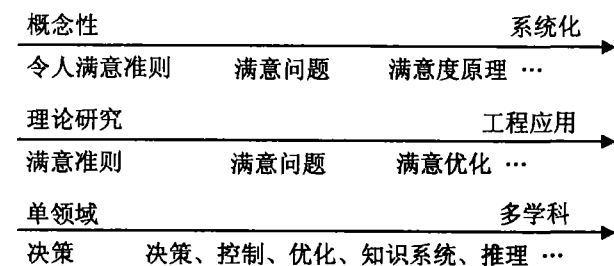


图 1 满意度研究发展趋势

总之,满意度原理具有普遍性、模糊性、智能性以及相对性等特点,更能反映人类的人性化本质。满意度原理不仅包容了最优化原理,而且也适用于推理机、知识获取、人工智能、模式识别、管理工程及可靠性等领域。目前,该原理还没有得到完善和系统化,还存在着大量的研究空间,因此研究满意度原理是大有可为的。

## 参考文献(References):

- [1] Simon H A. 管理决策新科学[M]. 李柱流译. 北京: 中国社会科学出版社, 1998.
- [2] Simon H A. 现代决策理论的基石[M]. 杨砾译. 北京: 北京经济学院出版社, 1989.
- [3] Mesarovic M D, Takahara Y. On a qualitative theory of satisfactory control [J]. *Information Sciences*, 1972, 4(4):291-313.
- [4] Matsuda T, Takatsu S. Characterization of satisficing decision criterion [J]. *Information Sciences*, 1979, 17(2):131-151.
- [5] Takatsu S. Latent satisficing decision criterion [J]. *Information Sciences*, 1981, 25(2):145-152.
- [6] Matsuda T, Takatsu S. Algebraic properties of satisficing decision criterion [J]. *Information Sciences*, 1979, 17(2):221-237.
- [7] 任平. 优化理论中的令人满意准则[J]. 模糊数学, 1983, (4):111-112.  
(Ren Ping. The satisfaction criterion in optimization theories [J]. *Fuzzy Mathematics*, 1983, (4):111-112.)
- [8] 靳蕃. 神经计算的满意解原理[J]. 科学, 1992, 19(5): 49-55.  
(Jin Fan. Satisfaction solution theory of neural computing [J]. *Scientific American*, 1992, 19(5): 49-55.)
- [9] Goodrich M A. A theory of satisficing control [D]. Provo: Brigham Young University, 1996.
- [10] Hopfield J J, Tand D W. Neural computation of decision in optimization problems [J]. *Biological Cybernetics*, 1985, 52:141-152.
- [11] 靳蕃. 神经计算智能基础原理与方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2000.
- [12] 金炜东. 满意优化问题与列车操纵优化方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 1998.
- [13] 罗刚. 满意解原则及其在控制系统中应用的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 1999.
- [14] 席裕庚. 复杂工业过程的满意控制[J]. 信息与控制, 1995, 24(2):14-20.  
(Xi Yugeng. Satisfactory control of complex industrial process [J]. *Information and Control*, 1995, 24(2):14-20.)
- [15] 马丰宁, 寇纪松, 李敏强, 等. 遗传算法中的满意度与最优距[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 13(1):19-21.  
(Ma Fengning, Kou Jisong, Li Minqiang, et al. The satisfactory degree and optimum radius in genetic algorithms theory [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 1998, 13(1):19-21.)
- [16] 郭耀煌, 徐飞, 张伟. 基于满意度水平的多目标群决策问题的迭代算法[J]. 管理工程学报, 1997, 11(1):25-32.  
(Guo Yaohuang, Xu Fei, Zhang Wei. An iterative algorithm for solving multi-objective group decision making problem based on concept of degree of satisfaction [J]. *J of Industrial Engineering/Engineering Management*, 1997, 11(1):25-32.)
- [17] 胡思继. 铁路运输计划指标纵向分解的满意度法[J]. 铁道学报, 1993, 15(1):118-122.  
(Hu Siji. Satisfactory method to the vertical decomposition of railway transformation plan index [J]. *J of China Railway Society*, 1993, 15(1):118-122.)
- [18] Pirjanian P. Satisficing action selection [A]. *Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems* [C]. 1998. 157-168.
- [19] 王光远, 陈树勋. 工程结构系统软设计理论及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [20] 白广忱. 系统可靠性多目标优化的满意解[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(8):85-87.  
(Bai Guangchen. Satisfactory solution of multi-objective optimization of system reliability [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2000, 22(8):85-87.)
- [21] 吴清烈, 徐南荣. 基于目标满意度多目标决策的改进交互式方法[J]. 管理工程学报, 1996, 10(4):217-222.  
(Wu Qinglie, Xu Nanrong. An improved interactive method based on satisfaction degree of objectives for multiobjective decision making [J]. *J of Industrial Engineering/Engineering Management*, 1996, 10(4): 217-222.)
- [22] 吴清烈, 徐南荣. 基于满意度大规模含整变量多目标决策方法[J]. 控制与决策, 1996, 11(4):439-445.  
(Wu Qinglie, Xu Nanrong. A method for large-scale multiobjective decision making with integer variables based on satisfaction degree of objectives [J]. *Control and Decision*, 1996, 11(4):439-445.)
- [23] 张世英, 林禾. 交互式广义目标规划决策方法——满意度决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 1994, 9(5):6-13.  
(Zhang Shiyong, Lin He. An interactive decision making method for generalized goal programming-satisfactory degree decision making method [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 1994, 9(5):6-13.)
- [24] 祝世京. 冲突调解与目标满意度愿望水平的调整[J]. 华中理工大学学报, 1994, 22(8):1-6.  
(Zhu Shijing. Conflict mediation and adjustment of objective aspiration [J]. *J of Huazhong University of Scientific and Technology*, 1994, 22(8):1-6.)

(下转第 650 页)

工业过程的建模问题。F-SVM MM 方法的 RMSE 和 MAXE 均比 USOCPN 小,说明该方法在曲线平滑度和泛化能力比 USOCPN 方法优越。由图 3 和图 4 也可以看出,F-SVMs MM 明显比标准 SVMs 的性能好。

表 1 3 种模型性能比较<sup>[12,13]</sup>

	USOCPN		SVMs	F-SVMs MM
	两输入模型	三输入模型		
RMSE	0.748	0.512	1.958 1	0.419 0
MAXE	2.381	1.973	6.328	1.604

#### 4 结 论

本文将 MM 模型应用于 pH 中和滴定过程,提出一种基于模糊支持向量机的多模型建模方法,解决了传统建模方法泛化能力不强的缺陷。仿真研究表明,采用该建模方法能够达到较好的建模效果,并能有效地改善复杂工业过程模型的预测能力及推广能力。同时,该方法表现出在工业应用中的较大潜力,如软测量建模等。

#### 参考文献(References):

- [1] Li Ning, Li Shaoyuan, Xi Yugeng. A multiple model approach to modeling based on LPF algorithm[J]. *J of Systems Engineering and Electronics*, 2001, 12(3): 64-70.
- [2] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J]. *IEEE Trans on SMC*, 1985, 15(4): 116-132.
- [3] Sugeno M, Kang G T. Structure identification of fuzzy model[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1988, 28(1): 15-33.
- [4] Funahashi K J. On the approximate realization of continuous mapping by neural networks[J]. *Neural Networks*, 1989, 15(2): 183-192.
- [5] Vapnik V. *The Nature of Statistical Learning Theory* [M]. New York: Springer Verlag, 1995.
- [6] Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Function* [M]. Macmillan College Publishing Company Inc, 1994.
- [7] Smola A J, Scholkopf B. A tutorial on support vector regression. [R]. NC2-TR-1998-030, 1998.
- [8] Chang M-W, Lin C-J, Weng R C. Analysis of nonstationary time series using support vector machines[J]. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers.html>, April, 2002.
- [9] Burges C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 1998, 2(2): 113-145.
- [10] U H-C, Krebel. Pairwise classification and support vector machine [A]. *Advances in Kernel Methods: Support Vector Learning* [C]. New York, 1999. 255-268.
- [11] Takuya Inoue, Shigeo Abe. Fuzzy support vector machine for pattern classification [A]. *Proc of IJCNN* [C]. Washington, 2001. 1449-1455.
- [12] Nie J H, Loh A P, Hang C C. Modeling pH neutralization processes using fuzzy-neural approaches [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, 78(1): 5-22.
- [13] 李柠. 多模型建模与控制的若干问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2002.
- [25] Sakawa M. An interactive fuzzy satisficing method for multiobjective linear fractional programming problems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1998, 28: 129-144.
- [26] 邓志良. 古典决策和管理决策的动机与效果浅析[J]. 中南工业大学学报, 1995, (12): 75-78.  
(Deng Zhiliang. Primary analysis on the motive and effect of classical decision and management decision [J]. *J of Center South University of Technology*, 1995, (12): 75-78.)
- [27] 王仁超, 王启文, 林润辉, 等. 一种基于期望满意的群决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 16(2): 12-16.  
(Wang Renchao, Wang Qiwen, Lin Runhui. A group decision making method focusing on individuals' satisfaction [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2001, 16(2): 12-16.)
- [28] Sakawa M, Kosuke K. An interactive fuzzy satisficing method for multiobjective block angular linear programming problems with fuzzy parameters[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, 111: 55-69.
- [29] Sakawa M, Yauchi K. An interactive fuzzy satisficing method for multiobjective nonconvex programming problems with fuzzy numbers through coevolutionary genetic algorithms[J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2001, 31(3): 459-467.

(上接第 645 页)