

## 模糊控制系统近年来的研究与发展

张恩勤 施颂椒 高卫华 翁正新

(上海交通大学自动化系·上海, 200030)

**摘要:** 主要总结了近年来模糊控制系统的研究与发展, 介绍了最近模糊控制系统研究的一些主要方面及研究成果, 分析了它们的优缺点, 并探讨了这一研究领域的研究趋向。

**关键词:** 模糊控制; 模糊系统; 函数逼近; 稳定性

**文献标识码:** A

## Recent Researches and Developments on Fuzzy Control System

ZHANG Enqin, SHI Songjiao, GAO Weihua and WENG Zhengxin

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200030, P. R. China)

**Abstract:** Recent developments in fuzzy control system is mainly discussed here. Main research parts and results in this field is introduced and analyzed. In the end, some problems needed to solve is proposed.

**Key words:** fuzzy control; fuzzy system; function approximation; stability

### 1 引言(Introduction)

美国加利福尼亚大学 L. A. Zadeh 教授在 1965 年提出的《Fuzzy Set》<sup>[1]</sup>开创了模糊数学的历史, 从此模糊数学科学逐渐发展起来了, 模糊数学用于控制始于 1973 年, 其后模糊控制得到了迅速发展, 主要研究方面在: 模糊逻辑(隶属度函数、模糊推理等); 模糊控制器设计; 模糊逻辑硬件设计; 应用研究等等。模糊控制系统的研究具有丰富的内容, Lee 在文[2]中对 1990 年以前的研究发展作了非常详尽的总结, 因此本文主要针对模糊控制系统近年来的研究与发展。90 年代以来, 模糊控制系统的研究取得了一些比较突出的进展, 如模糊系统的万能逼近特性, 模糊状态方程及稳定性分析, 软计算技术等等, 这些研究逐步丰富和发展了模糊系统的理论体系。

### 2 模糊逻辑系统的研究(Researches on fuzzy logic systems)

关于模糊逻辑系统的研究, 各种文献参考书上介绍比较详细, 本文只着重介绍一下非模糊化方法, 并概括总结常见的一些模糊逻辑系统。

#### 2.1 非模糊化方法(Defuzzification methods)

非模糊化处理是模糊系统中的一个关键环节, 它是将模糊推理中产生的模糊量转化为精确量, 常见的非模糊化方法有以下几种<sup>[2]</sup>: 1) 最大隶属度值法(MC: max criterion); 2) 最大隶属度平均值法(MOM: mean of maximum method); 3) 面积平均法(COA: center of area); 4) 重心法(COG: center of gravity)。

由于这些非模糊化方法在不同程度上都具有一定的局

限性, Filev 和 Yager<sup>[3]</sup>采用学习机制提出了一种基本非模糊化分布函数法(BADD: basic defuzzification distribution), 对 COG 中的加权因子进行了修正, 在此基础上, 后来又提出半线性非模糊化方法(SLIDE: semilinear defuzzification), 改进半线性非模糊化方法(MSLIDE: modified semilinear defuzzification)<sup>[4]</sup>。BADD, SLIDE 及 MSLIDE 注意到 MOM 及 COG 的优缺点, 结果仍不是很理想。

Jiang 和 Li<sup>[5]</sup>对常见非模糊化方法进行了总结, 提出基于广义传递函数的非模糊化方法(generalized transformation-based defuzzification), 具有以下形式:

$$d = \frac{\sum u_i T_i x_i}{\sum u_i T_i}$$

$u$  为隶属度,  $T$  为广义传递函数,  $x$  为论域值。

选取不同的传递函数  $T$ , 可求得不同的非模糊化方法, 以上各种非模糊化方法都是这种方法的特例, 同其他方法相比, Jiang 和 Li 的方法适用面要广一些, 但他们的方中广义传递函数的选取很关键, 同时一些参数通过自学习机制来确定, 计算比较复杂。

#### 2.2 常见模糊逻辑系统(Fuzzy logic systems)

模糊化处理, 模糊推理, 非模糊化处理各自有各种不同的选取方法, 因此构成了很多种模糊系统, 常见的模糊系统有以下几种:

##### 1) 基本模糊系统。

基本模糊系统指的是最基本意义下的模糊系统, 具有标准的模糊化处理, 模糊推理, 非模糊化处理三个环节, 其规则具有以下形式:

$R^i$ : If  $x_1$  is  $A_1^i$ ,  $x_2$  is  $A_2^i \cdots$  and  $x_n$  is  $A_n^i$ ,  
then  $y$  is  $B^i$ ,

其中  $A_i^j$  和  $B^j$  均为模糊量, 模糊推理一般采用常见的 sup-\* 合成。

### 2) 基于 TS 模型的模糊系统.

TS 模型最早是由 Takagi 和 Sugeno<sup>[6]</sup> 提出的, 规则输出段采用线性集结方法:

$R^i$ : If  $x_1$  is  $A_1^i$ ,  $x_2$  is  $A_2^i \cdots$  and  $x_n$  is  $A_n^i$ ,  
then  $y^i = c_1^i x_1 + c_2^i x_2 + \cdots + c_n^i x_n$ .

这类模糊系统采用局部线性环节整体实现非线性, 形式简单, 易于工程应用。

### 3) 基于函数 FBF 的模糊系统.

模糊基函数 (FBF: fuzzy basic function) 是 Wang<sup>[7]</sup> 首先提出的. 这类模糊系统具有重心平均非模糊化机制, 乘积推理规则及单值模糊化机制, 表示为以下形式:

$$f(x) = \frac{\sum_i y^i \left( \prod_k \mu_{A_k^i}(x_k) \right)}{\sum_i \left( \prod_k \mu_{A_k^i}(x_k) \right)} = \sum_i \left( \frac{\prod_k \mu_{A_k^i}(x_k)}{\sum_i \left( \prod_k \mu_{A_k^i}(x_k) \right)} \cdot y^i \right).$$

Wang 最初的模糊系统采用 Gaussian 型隶属度函数<sup>[8]</sup>. Zeng<sup>[9]</sup> 基于梯形隶属度函数, 提出另外一种 FBF, 具有一些比较特殊的性质, 但模糊系统结构与 Wang 相同. 基于 FBF 模糊系统从函数基展开的角度去研究模糊系统, 在理论上具有很重要的价值。

### 4) SAM 模糊系统.

标准加型 (SAM: standard additive model) 模糊系统是 Kosko<sup>[10]</sup> 提出的. 通过对一般模糊系统的映射关系的分析, Kosko 提出椭圆体规则映射关系. 从映射角度, 论域空间与输出空间局部是一种椭圆体映射关系, 而全局上采用加权平均的方式, 形成一种模糊系统. 这类模糊系统结构类似于上述基于 FBF 函数的模糊系统. 但它从映射的角度去研究模糊系统, 同时它的应用范围也要更广泛一些。

## 3 模糊控制器的研究 (Researches on fuzzy logic controller)

### 3.1 一般模糊控制器设计与结构分析 (Design of fuzzy controller and its structure analysis)

模糊控制器一般采用反馈控制结构, 从结构上分析, 常见模糊控制器一般可分为二维、三维模糊控制器. 类似于 PID 控制器, 二维模糊控制器一般也称 PD 或 PI 型模糊控制器. 三维模糊控制器称为 PID 型模糊控制器<sup>[11]</sup>. 这方面工作最早是由 Tang<sup>[12]</sup> 明确提出的, 通过对常规模糊控制器机理进行分析, 他指出了一般模糊控制器同 PI 控制器的相似性. 随后, Abdelnour<sup>[13]</sup> 从 PID 控制角度出发, 提出了 FZ-PI, FZ-PD, FZ-PID 三种形式模糊控制器. Ying<sup>[14]</sup>, Li<sup>[15]</sup>, Lee<sup>[11]</sup>, 刘向杰<sup>[16]</sup> 等采用各种方式得出了模糊控制器中量化因子、比例因子同 PID 控制器的因子  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_D$  之间的关系式. Ying 对基于简单线性规则 TS 模型的模糊控制器进行了分析, 指出了这类模糊控制器是一种非线性变增益 PID 控制器. 作者<sup>[17]</sup> 比较分析了模糊控制器与 PID 控制器, 提出了一类基于 TS

模型的模糊控制器, 经过分析, 指出这类模糊控制器是一种模糊 PID 复合控制器, 也可看作一种参数时变的 PID 控制器. 此外, 胡包钢<sup>[18]</sup> 对模糊控制器的维数作了分析, 提出四项系统功能评价指标: 控制量合成, 耦合影响, 增益相关, 规则指数增长; 并提出一维模糊控制器, 其在规则数目处理上相对较优。

将模糊控制与其他控制方法综合起来进行新的控制器设计也是一种新的研究方法. Palm<sup>[19]</sup> 将模糊规则应用于滑模控制, 提出了模糊滑模控制 (FSMC), 用以解决滑模控制中的高频颤动问题. 将模糊模型应用于预测控制, 张化光等提出了模糊预测控制. 类似的研究还有模糊变结构控制 (FVSC), 模型参考自适应控制器, 最优模糊控制器, 分层递阶模糊控制器, 自适应模糊控制器等等<sup>[20-23]</sup>. 在后面将专门介绍自适应模糊控制器的研究成果。

### 3.2 基于模糊状态方程的模糊控制器设计 (Design of fuzzy controller based on fuzzy dynamic systems)

基于模糊状态方程的模糊控制器设计采用了一种新的方法. 它基于现代控制理论, 并将相应的结果应用于模糊控制器设计及稳定性分析. 模糊状态方程 (模糊动态模型) 最早是由 Cao 等<sup>[24]</sup> 提出的, 其离散模型一般采用如下形式:

$$R^i: \text{ If } x_1(k) \text{ is } A_1^i, x_2(k) \text{ is } A_2^i \cdots \text{ and } x_n(k) \text{ is } A_n^i, \\ \text{ then } \begin{cases} x(k+1) = Fx(k) + G_u(k), \\ y(k) = Cx(k) + D_u(k). \end{cases}$$

模糊状态方程是对最初 TS 模型的进一步推广. 在 TS 模型基础上, Tanaka<sup>[25]</sup> 最早提出了一种稳定模糊控制器的设计, 对于所有子模型, 其结果是要找到一个公共的正定矩阵. 但这一要求在实际中很难满足. Cao 等<sup>[24]</sup> 将这一条件进行弱化, 提出只要找到一组正定矩阵, 就可以满足稳定性要求, 并做了相应的控制器设计. 孙增圻<sup>[26]</sup> 针对模糊状态方程的连续模型, 给出了一种状态反馈控制器的设计方法, 同时也提出了模糊状态观测器的设计方法. 类似的研究还有采用极点配置的模糊控制器设计<sup>[27]</sup>, 基于 LMI 的模糊控制器设计<sup>[28,29]</sup> 等等。

## 4 自适应模糊控制的研究 (Researches on adaptive fuzzy controllers)

由于初始控制规则一般比较粗糙, 很难达到控制要求, 于是就出现了自适应模糊控制器. 自适应模糊控制器的研究最早是由 Procyk & Mamdani<sup>[30]</sup> 于 1979 年提出的, 称作语言自组织模糊控制器 (SOC). 自适应模糊控制的思想就在于在线或离线调节模糊控制规则的结构或参数, 使之趋近于最优状态. 根据所采用的结构和参数调节方法的不同, 关于自适应模糊控制的研究可以大致分为以下几类。

### 4.1 一般自适应模糊控制器研究 (Common adaptive fuzzy controllers)

为了提高模糊控制器的适应能力, He 等<sup>[31]</sup> 采用一种带有修正因子的控制算法, 可描述为:  $u = -(a \cdot E + (1-a) \cdot EC)$ ,  $a \in (0, 1)$ , 其中  $a$  称作修正因子. 调整修正因子  $a$ , 相当于改变了控制规则的特性. Procyk & Mamdani 提出的语言

自组织模糊控制器(SOC), 直接对模糊规则进行修正, 这是一种规则自组织模糊控制器. Raju<sup>[32]</sup>对控制规则进行分级管理, 提出自适应分层模糊控制器. 此外, Linkens<sup>[33]</sup>等学者提出了规则自组织自学习算法, 对规则的参数以及规则数目进行自动修正. 这方面的研究重点是针对于学习算法的, 常见算法由梯度下降法、变尺度法、奖励因子学习法等, 近来也出现了采用遗传算法学习.

但是, 对于规则自组织模糊控制器, 一个重要的难题在于如何采取合理的规则表示法. 随着神经网络的深入研究, 采用神经网络来解决这类模糊控制器的规则表示及学习算法问题已成为新的研究方向.

#### 4.2 基于神经网络的模糊控制器研究(Fuzzy controllers based on neural networks)

为了解决模糊控制的适应性, 结合神经网络的特点, 出现了模糊神经网络控制. 1990年, 日本著名的神经网络专家甘利俊一发表了他对神经网络与模糊技术相结合的看法. Keller<sup>[19]</sup>等于1992年提出利用神经网络实现模糊逻辑推理的方法, 同年, Yager<sup>[35]</sup>等提出利用神经网络实现模糊控制的方法. 目前, 模糊理论与神经网络的融合模式大致分以下三种: 1) 在模糊推理控制中引入神经网络技术, 解决隶属度最优设计、知识自动获取等问题; 2) 在神经网络设计中引入模糊技术, 改善神经网络结构可修正性; 3) 模糊推理与神经网络各自独立工作, 分别完成系统不同的功能.

利用神经网络的结构映射模糊控制器的输入输出, 也就形成了各种不同模糊神经网络. Wang在万能逼近理论的基础上, 将模糊逻辑系统表示成一个前馈网络系统, 采用反向传播学习算法(BP算法)对网络进行训练. 但由于采用BP算法, 不可避免地存在着局部极小等问题. 在一定的约束条件下, Jang<sup>[36]</sup>等证明了模糊系统与RBF网络存在着函数等价性, 提出了基于RBF网络的自适应模糊系统. 在此基础上, Cho<sup>[37]</sup>研究了RBF网络在模糊系统中的应用, 用RBF网络成功地构造了自适应模糊系统, 并进一步用扩展的RBF网络实现了模糊系统的三种不同结构. 由于RBF网络结构上具有输出-权值线性关系, 因而基于RBF网络的自适应模糊系统具有训练方法快速易行、且不存在局部最优问题等优点. 基于自适应网络的模糊推理系统是Jang在文[38]中提出的, 通过调整自适应节点的参数改变模糊规则, 其模糊规则的前件和后件的参数都能得到调整. 类似的研究还有Lin等<sup>[39]</sup>给出了一种基于神经网络的模糊逻辑控制和决策系统, Carpenter等<sup>[40]</sup>给出了模糊ART映射, Bezdek等<sup>[41]</sup>提出Kohonen分组网络, Jou<sup>[42]</sup>提出的模糊小脑模型控制等等.

神经网络为模糊控制提供了一种比较好的结构体系, 采用神经网络解决模糊控制中的结构与参数调节问题, 以及实现模糊控制的自适应能力是一种很好的方法.

#### 4.3 基于遗传算法的模糊控制器研究(Fuzzy controllers based on genetic algorithms)

遗传算法作为一种新的搜索算法, 具有并行搜索、全局收敛等特性, 将遗传算法应用于模糊控制中, 可以解决一般

模糊控制器中隶属度函数及规则的参数调节问题. 这方面研究主要有两方面: 其一是采用遗传算法对隶属度函数参数进行调节, 这方面的研究比较多, 比较典型的见Karr<sup>[43]</sup>, Park<sup>[44]</sup>, Homaifar<sup>[45]</sup>; 其二是对规则数目进行调整, 规则数目的调整一般比较困难, 这方面工作主要是Ishibuchi<sup>[46]</sup>提出的. 遗传算法, 神经网络与模糊技术是软计算技术的三大支柱, 三者结合促进了这软计算技术的进一步发展.

#### 5 模糊系统的函数逼近特性研究(Fuzzy systems as function approximators)

模糊系统的函数逼近特性研究是90年代以来模糊系统理论研究的重要方向, 同时也是模糊系统理论的一个重要支柱. 模糊系统关于连续函数的逼近特性给模糊系统在系统辨识、控制等方面提供了重要的理论基础.

##### 5.1 几类特殊模糊系统的函数逼近特性(Several special fuzzy systems as function approximators)

近年来关于这方面的研究比较多, 众多学者针对于各种不同的模糊系统, 分别研究了其函数逼近特性, 指出这些特殊的模糊系统是一种万能逼近器. Buckley<sup>[47]</sup>对一类三维模糊控制系统进行分析, 采用Stone-Weierstrass定理证明了这类系统的逼近特性, 并指出这类模糊控制器是“universal fuzzy controller”; Wang<sup>[8]</sup>采用Gaussian型隶属度函数, 提出一类FBF, 证明了一类模糊系统的逼近特性; Kosko<sup>[10]</sup>基于加型模糊系统(additive fuzzy system), 采用有限覆盖定理, 构造性地证明了一类模糊系统的逼近特性; Ying<sup>[48]</sup>, Zeng<sup>[9]</sup>, Castro<sup>[49]</sup>等对以上工作作出相应拓展. Zeng基于梯形隶属度函数, 采用类似于Wang的FBF, 提出了一类模糊系统, 这类模糊系统具有自己较为特殊的性质. Castro对以上特殊模糊系统作出了一定的推广, 提出较为一般性的模糊系统, 其结果相对要普遍一些.

以上研究大致可分为两大类, 其一是Buckley, Wang, Ying, Zeng, Castro等采用Stone-Weierstrass定理间接证明了一类模糊系统的逼近特性, 证明方法比较系统化, 但其证明过程中看不出模糊系统逼近特性的内在本质; 其二是Kosko基于有限覆盖定理, 采用构造性方法, 直接证明了这一结论, 其构造性证明过程反映出模糊系统逼近特性的本质, 并且得出影响逼近能力的重要因素. 模糊系统具有万能逼近特性, 但实际中模糊系统在函数逼近方面存在很多局限性, 如何客观分析影响其逼近能力的重要因素, 仍须进一步研究.

##### 5.2 万能逼近的充分和必要条件(Sufficient and necessary conditions for function approximation)

早期的函数逼近即万能逼近(Wang<sup>[8]</sup>)研究都是基于一类特殊的模糊系统. 虽然作为应用, 某些特殊的模糊系统是足够了, 但作为模糊系统理论分析, 这一点仍不完善, Castro<sup>[49]</sup>在分析前人结果的基础上, 提出的一类较为一般的模糊系统, 指出了其万能逼近特性. 但由于模糊系统本身具有三大基本环节, 每个环节又有不同的选取方法, 因此任何一种模糊系统都很难达到“一般”性.

随着这一理论的发展, Ying<sup>[48]</sup>首先研究了一般模糊系统

作为万能逼近器的充分条件,充分条件的提出与 Wang<sup>[8]</sup> 等人的证明较为类似,但换了一个角度来考虑这一问题,并且他所提出的模糊系统也相对具有一定的一般性,此后, Ying<sup>[30]</sup> 又分析了一类特殊模糊系统作为万能逼近器的必要条件。

由于模糊系统本身结构的多样性,给模糊系统的理论分析带来一定的难度,尽管很多类模糊系统的万能逼近特性已被证明,但要研究一般模糊系统的逼近特性仍存在一定的难度, Ying 的方法,即分开研究其充分条件及必要条件,也是一种新的思路。

## 6 模糊控制系统的稳定性分析 (Stability analysis of fuzzy control systems)

稳定性分析是模糊控制器的一个基本问题, Tong<sup>[31]</sup> 于 1978 年就提出闭环模糊系统描述模型,并在模糊关系基础上提出了稳定性概念,基于 Lyapunov 稳定性分析方法, Kiszka<sup>[32]</sup> 等于 1985 年定义了模糊系统能量函数,并讨论了模糊系统稳定性,这些研究一般都是对模糊控制器提出了一定的简化模型,其结果很难适用于一般的模糊控制系统,近年来,随着 TS 模糊模型的研究,一种基于 TS 模型的模糊系统的稳定性分析取得了一定的发展。

Tanaka<sup>[25]</sup> 关于 TS 模糊模型的稳定性分析给模糊系统的稳定性分析提出了新的思路,针对于离散系统,提出一种模糊控制器,采用各局部控制的加权组合,并且基于一种能量函数,利用 Lyapunov 方法证明了模糊控制系统的稳定性。

Tanaka 的研究基于 TS 模糊模型,其思想为后来的模糊状态方程的提出奠定了基础, Cao 提出的模糊状态方程为模糊系统的稳定性分析提供新的思路,基于 Lyapunov 方法, Cao<sup>[24]</sup> 及孙增圻<sup>[26]</sup> 研究了模糊控制器的稳定性,指出这种模糊控制系统的全局渐近稳定性条件,基于 TS 模型的模糊系统稳定性分析对于模糊系统的稳定性分析提出了新的方法,但由于这类模糊系统的特殊性,其应用范围仍存在的问题,仍须进一步研究。

## 7 结论 (Conclusions)

近年来,模糊控制系统的研究取得了很大的进展,特别是模糊控制器的结构分析,模糊系统的万能逼近特性,模糊状态方程及稳定性分析,软计算技术等;同时,模糊逻辑在软件硬件方面也取得了飞速的发展,但模糊系统理论仍存在的问题,主要有以下不足之处:

1) 尽管模糊系统的万能逼近特性已被证明,但只是一个存在性定理,实际中,对于一般的未知系统,如何找到一个合理的模糊逼近器,尚无确定的方法。

2) 常见的模糊系统种类比较多,如 TS, FBF, SAM 等,一般的模糊系统应具有怎样的形式,目前仍不很清晰,模糊系统的系统化设计方法仍须进一步研究。

3) 模糊控制系统的稳定性分析近年来有了一定的进展,但这些分析都是针对一定的特殊系统,模糊控制器具有一定的鲁棒性,但只能从概念上讲,严格的理论分析仍须进一步深入研究,稳定性和鲁棒性的分析仍依赖于模糊系统的

系统化设计方法和模糊系统理论的进一步研究发展。

这些问题都有待于进一步研究。

## 参考文献 (References)

- [1] Zadeh L A. Fuzzy sets [J]. *Information and Control*, 1965, 8: 338 - 353
- [2] Lee C C. Fuzzy logic in control system: fuzzy logic controller, Part I, II [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1990, 20 (2): 404 - 435
- [3] Filev D P and Yager R R. A generalized defuzzification method via BAD distributions [J]. *Int. J. Intelligent Systems*, 1991, 6(7): 687 - 697
- [4] Yager R R and Filev DP. SLIDE: a simple adaptive defuzzification method [J]. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, 1993, 1(1): 69 - 78
- [5] Jiang T and Li Y. Multimode oriented polynomial transformation based defuzzification strategy and parameter learning procedure [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1997, 27(5): 877 - 883
- [6] Takagi T and Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, 15(1): 116 - 132
- [7] Wang L X. Generating fuzzy rules by learning from examples [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, USA, 1992, 22 (6): 1414 - 1427
- [8] Wang L X. Fuzzy systems as universal approximators [A]. *IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems* [C], San Diego, USA, 1992, 1163 - 1170
- [9] Zeng X J and Singh M G. Approximation theory of fuzzy systems-SISO case [J]. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, 1994, 2(2): 162 - 176
- [10] Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators [J]. *IEEE Trans. on Computers*, 1994, 43(11): 1329 - 1333
- [11] Lee J. On method for improving performance of PI-type fuzzy logic controllers [J]. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, 1993, 1(4): 298 - 301
- [12] Tang K L. Comparing fuzzy logic with classical controller design [J]. *IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics*, 1987, 17(6): 1085 - 1087
- [13] Abdelnour G M. Design of a fuzzy controller using input and output mapping factors [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1991, 21(5): 952 - 960
- [14] Ying H. The Takagi-Sugeno fuzzy controllers using the simplified linear control rules are nonlinear variable gain controllers [J]. *Automatica*, 1998, 34(2): 157 - 167
- [15] Li H X. A comparative design and tuning for conventional fuzzy control [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1997, 27(5): 884 - 889
- [16] Liu Xiangjie, Zhang Huanshui and Chai Tianyou. Structure analysis of three-dimensional fuzzy controller [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1998, 24(2): 230 - 235 (in Chinese)
- [17] Zhang Enjin, Shi Songjiao and Weng Zhengxin. Comparative study of fuzzy control and PID control methods [J]. *Journal of Shanghai*

- Jiaotong University, 1999, 33(4):501 - 503 (in Chinese)
- [18] Hu B G, Mann G K I and Gosine R G. Study of dimensionality of fuzzy inference for fuzzy PID controllers [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1998, 24(5):608 - 615 (in Chinese)
- [19] Palm R. Sliding model fuzzy control [A]. *IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems [C]*, San Diego, USA, 1992, 519 - 526
- [20] Li H X. Fuzzy variable structure control [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1997, 27(2):306 - 312
- [21] Layne J R. Fuzzy model reference learning control for cargo ship steering [J]. *IEEE Trans. on Control System Magazine*, 1993, 13(6):23 - 34
- [22] Wang L X. Modeling and control of hierarchical systems with fuzzy system [J]. *Automatica*, 1997, 33(6):1041 - 1053
- [23] Kim Jin-Hwan. Fuzzy model based predictive control [A]. *IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems [C]*, Anchorage, USA, 1998, 405 - 409
- [24] Cao S G, Rhee N W and Feng G. Stability analysis of fuzzy control systems [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1996, 26(1):201 - 204
- [25] Tanak K and Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, 45(2):135 - 156
- [26] Sun Zengqi. Controller design and stability analysis of time-continuous systems based on a fuzzy state model [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1998, 24(2):212 - 216 (in Chinese)
- [27] Kang G, Lee W and Sugeno M. Design of TSK fuzzy controller based on TSK fuzzy model using pole placement [A]. *IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems [C]*, anchorage, USA, 1998, 246 - 251
- [28] Jadbabaie A. A reduction in conservatism in stability and  $L_2$  gain analysis of Takagi-Sugeno fuzzy systems via linear matrix inequalities [A]. *Proceedings of 14th IFAC [C]*, Beijing, 1999, 285 - 289
- [29] Tanaka K. Robust and optimal fuzzy control: a linear matrix inequality approach [A]. *Proceedings of 14th IFAC [C]*, Beijing, 1999, 213 - 218
- [30] Procyk T J and Mamdani E H. A linguistic self-organizing process controller [J]. *Automatica*, 1979, 15(1):15 - 30
- [31] He S Z. Design of an on-line rule-adaptive fuzzy control system [A]. *IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems [C]*, San Diego, USA, 1992, 83 - 91
- [32] Raju G V S. Adaptive hierarchical fuzzy controller [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1993, 23(4):973 - 980
- [33] Linkens D A and Nie J. Constructing rule-based for multivariable fuzzy control by self-learning. Part I: system structure and self-learning [J]. *Int. J. System Science*, 1993, 24(1):111 - 127
- [34] Keller J M, Yager R R and Tahani H. Neural network implementing of fuzzy logic [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, 45(1):1 - 12
- [35] Yager R R. Implementing fuzzy logic controller using a neural network [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, 48(1):53 - 64
- [36] Jang J S Roger and Sun, C T. Functional equivalence between radial basis function networks and fuzzy inference systems [J]. *IEEE Trans. on Neural Networks*, 1995, 4(1):156 - 158
- [37] Cho K B and Wang B H. Radial basis function based adaptive fuzzy systems [A]. *IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems [C]*, New Orleans, Louisiana, USA, 1996, 247 - 252
- [38] Jang J S, Roger J. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1993, 23(3):665 - 685
- [39] Lin C T and Lee C S. Neural networks based fuzzy logic control and decision system [J]. *IEEE Trans. on Computers*, 1991, 40(2):1320 - 1336
- [40] Carpenter G A. Fuzzy ARTMAP: a neural networks architecture for incremental supervised learning of analog multidimensional maps [J]. *IEEE Trans. on Neural Networks*, 1992, 3(5):698 - 713
- [41] Bezdek J C. Fuzzy ohonen clustering methods [A]. *IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems [C]*, San Diego, USA, 1992, 1035 - 1046
- [42] Jou C C. A fuzzy cerebellar model articulation controller [A]. *IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems [C]*, San Diego, USA, 1992, 1171 - 1178
- [43] Karr C L and Gentry E J. Fuzzy control of PH using genetic algorithms [J]. *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, 1993, 1(1):46 - 53
- [44] Park D. Genetic-based new fuzzy reasoning methods with application to fuzzy control [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1994, 24(1):39 - 47
- [45] Hornsifair A and McCormick E. Simultaneous design of membership functions and rule sets for fuzzy controllers using genetic algorithms [J]. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, 1995, 3(2):260 - 270
- [46] Ishibuchi H. Single-objective and two-objective genetic algorithms for selecting linguistic rules for pattern classification problems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, 89(2):135 - 150
- [47] Buckley J J. Universal fuzzy controller [J]. *Automatica*, 1992, 28(6):1245 - 1248
- [48] Ying H. Sufficient conditions on general fuzzy systems as function approximators [J]. *Automatica*, 1994, 30(3):521 - 525
- [49] Castro J L and Pelgado M. Fuzzy systems with defuzzification are universal approximators [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1996, 26(1):149 - 152
- [50] Ying H. Necessary conditions for some typical fuzzy systems as universal approximators [J]. *Automatica*, 1997, 33(7):1333 - 1338
- [51] Tong R M. Analysis and control of fuzzy systems using the relation matrix [J]. *Int. J. Control*, 1978, 27(4):670 - 686
- [52] Kiszka J B. Enegetic stability of fuzzy dynamic systems [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, 15(6):783 - 792

### 本文作者简介

**张恩勤** 1971年生, 1994年毕业于东南大学数学力学系获学士学位, 1997年在东南大学自动化系获硕士学位, 现为上海交通大学自动化系博士生, 主要研究方向为: 模糊系统与模糊控制。

**施颂椒** 1993年生, 上海交通大学自动化系教授, 博士生导师, 主要研究方向为: 鲁棒控制, 自适应控制。

**高卫华** 女, 1973年生, 1997年毕业于西安理工大学获硕士学位, 现为上海交通大学自动化系博士生, 主要研究方向为: 神经网络与模糊控制。

**翁正新** 1966年生, 1995年毕业于哈尔滨工业大学获博士学位, 现为上海交通大学自动化系副教授, 主要研究方向: 鲁棒控制, 自适应控制, 智能控制与神经网络。