

# 解析模糊控制理论: 模糊控制系统的结构和稳定性分析\*

丁永生

应浩

(东华大学信息科学与技术学院 上海 200051) (美国得克萨斯大学医学院)

任立红 邵世煌

(东华大学信息科学与技术学院)

**摘要** 采用经典控制理论中成熟的解析方法分析和设计模糊控制系统是发展模糊控制理论的一条重要途径。系统地综述和讨论了其中两个主要方向, 即模糊控制器的解析结构和模糊控制系统的稳定性分析的最新研究成果, 并对今后的研究工作进行了展望。

**关键词** 模糊控制器, 模糊控制系统, 解析结构, 稳定性分析

**分类号** TP 18

## Analytical Fuzzy Control Theory: Structure and Stability Analysis of Fuzzy Control Systems

Ding Yongsheng

Ying Hao

Ren Lihong, Shao Shihuang

(East China University) (The University of Texas Medical Branch)

(East China University)

**Abstract** A analysis and design of fuzzy control systems using the mature analytical methods in classical control theory is an important way to develop fuzzy control theory. Recent research results of analytical analysis on structures of fuzzy controllers and stability of fuzzy control systems are overviewed and discussed systematically. The directions for future research are provided.

**Key words** fuzzy controllers, fuzzy control systems, analytical structure, stability analysis

### 1 引言

模糊系统技术具有语词计算和处理不精确性、不确定性和模糊信息的能力, 近年来已被证明是解决许多实际复杂建模和控制问题的一种有效方法。但是, 目前许多模糊系统仍采用黑箱方法, 这是因为其结构的复杂性已成为传统数学分析的主要障碍。这种黑箱方法与经典控制理论中广泛采用的基于解析技术的设计方法有很大不同, 它既不能提供对模糊系统的解析洞察, 也不能对系统特性和性能进行有效的数学分析。这种缺陷会使其在许多领域的控制问题应用带来不实际性和不安全性。

为了发展模糊控制理论并让其具有坚实的理论

基础, 解析方法已引起许多学者的重视。基于解析方法, 经典系统理论中许多成熟的方法能用于模糊系统的某些分析和设计。模糊控制器的解析结构分析和模糊控制系统的稳定性分析是其中两个主要方向。本文将系统地综述这两个方向的最新研究成果, 并对今后的研究工作进行展望。

### 2 模糊控制系统组成

模糊控制器一般包括 5 部分: 1) 模糊化接口: 将真实的确定量通过隶属函数转换成模糊量; 2) 数据库: 用于存放输入和输出变量全部模糊子集的隶属函数; 3) 模糊规则集: 以 IF-THEN 控制规则形式

\* 国家自然科学基金项目 (69874038) 和教育部留学回国人员科研启动基金项目 (1999- 363)

1998- 10- 23 收稿, 1999- 01- 06 修回

给出的信息,根据模糊规则形式,模糊控制器主要可分为Mamdani和Takagi-Sugeno(TS)两类;4)模糊推理机构:基于模糊规则,采用模糊逻辑操作和推理方法而获得模糊输出;5)解模糊接口:用于将模糊输出转换成系统的数值输出。

根据输入和输出变量的数目,可将模糊控制系统划分为单变量和多变量模糊控制系统。绝大多数模糊系统都是复杂的非线性系统,其输入和输出之间的非线性是由模糊控制器的上述各个组成部分引起的。

### 3 模糊控制器的结构分析

根据常规控制理论解析分析模糊控制器的结构,是发展模糊控制技术的一条重要途径。这对于模糊控制器的实际应用具有一定的指导意义,因为模糊控制技术中许多重要而难度较大的方面(如分析、设计、稳定性和鲁棒性),可用(非线性)控制理论中现有的数学技术有效地加以研究。目前,许多学者已很好地分析了Mamdani模糊控制器和TS模糊控制器,包括一些较复杂的模糊控制器的解析结构。我们从以下几方面来展开讨论。

#### 3.1 模糊控制器是非线性PD控制器

线性离散PD的表达式为

$$u(n) = k_p \left\{ e(n) + \sum_{i=0}^{n-1} e(i) + \frac{T}{T_i} [e(n) - e(n-1)] \right\} \quad (1)$$

许多模糊控制器都能表示成(1)式的形式,只是控制器的增益随其输入的变化而变化,因此说,模糊控制器是非线性PD控制器。Ying<sup>[1]</sup>最先提出模糊PD控制器的解析结构,并证明了采用两个线性输入模糊集、四条模糊规则、Zadeh模糊逻辑AND和OR操作及重心解模糊器的最简单的Mamdani模糊控制器是非线性PI控制器;接着又进一步将其结果推广到采用其它推理方法(如Mamdani最小、Larsen乘积、drastic乘积和有界乘积等)的各类Mamdani模糊控制器<sup>[2]</sup>。更复杂的情况是采用两个输入变量、多个对称或非对称的三角形输入模糊集、线性控制规则、均匀分布的独点输出模糊集、不同推理方法和重心解模糊器的Mamdani模糊控制器,已被证明是一个全局的两维多值继电器控制器和一个局部的非线性PI控制器之和<sup>[3,4]</sup>。这些结果被一般化到采用非线性控制规则的单输入单输出<sup>[5]</sup>和两输入两输出模糊控制器<sup>[6]</sup>。其它一些类似的结果见文

献[7-10]。

人们已研究了基本Mamdani模糊控制器的各种扩展设计及其结构分析,证明了模糊PD<sup>[11-13]</sup>、模糊PI+D<sup>[14]</sup>、模糊PD+I<sup>[15]</sup>、串行模糊PI+PD<sup>[16]</sup>、并行模糊PI+PD<sup>[17]</sup>和模糊(PI+D)<sup>[18]</sup>控制器都是非线性PD控制器,并推导出其非线性增益的明晰表达式。另外,一种基于开—关控制技术的时变模糊控制器的结构与非线性PD控制器解析地联系起来,并证明它是一种带有非线性控制偏量的非线性PD控制器<sup>[19]</sup>。

最近,我们开始讨论TS模糊控制器的解析结构,将一种简单的2×2模糊规则集结构用于分析一类TS模糊PI(或PD)控制器的非线性<sup>[20]</sup>。推导了TS模糊PI(或PD)控制器增益的明晰表达式,并研究了其增益变化的范围和几何形状等特性。TS模糊PI(或PD)控制器实际上是一种非线性PI(或PD)控制器。上述简单的TS模糊PI(或PD)控制器的解析结果还被推广到更典型和复杂的各类TS模糊控制器<sup>[21-23]</sup>。这些TS模糊控制器由三个或多个梯形(或任意)输入模糊集、带有线性后项的TS模糊规则、Zadeh模糊逻辑AND操作和重心解模糊器构成。

模糊控制器与线性PD控制器相联系的解析结构,一方面揭示了模糊控制器在非线性、时变和纯滞后等系统的应用中比线性PD控制器优越的机理,同时也提供了根据它们之间的增益关系来解析设计模糊控制系统并确保其稳定性的一种方法。

#### 3.2 模糊控制器作为滑模变结构控制器

对于一大类非线性系统,模糊控制器是由与状态 $x(n)$ 和 $\dot{x}(n)$ 相对应的偏差 $e(n)$ 和偏差变化率 $\dot{e}(n)$ 确定的相平面来设计的。对于二维模糊控制器,一般设计方法是通过一个开关线将相平面划分为两个半平面。其开关函数定义为

$$S = E + R = k_a(\lambda e + \dot{e}) \quad (2)$$

二维控制规则集的零对角线上的控制输入为零。在工作原理上,模糊控制器类似于滑模变结构控制器<sup>[10,24-28]</sup>。Wu和Liu将模糊控制表示成一类变结构控制,滑模用于确定模糊控制规则中的最好参数值<sup>[29]</sup>。若采用变结构类型的规则集,则模糊控制器具有语义和定量两方面的变结构特性,对于二维和三维模糊控制器,已推导出其具体的数学表达式<sup>[30]</sup>。与通常的滑模控制相比,模糊控制具有更强的鲁棒性,且模糊控制器的变结构特性有助于人们设计鲁棒稳定的模糊控制器。

### 3.3 模糊控制器是非线性增益规划控制器

典型和复杂的各类 TS 模糊控制器, 从结构上已被证明是非线性增益规划器<sup>[20, 21]</sup>。这些 TS 模糊控制器由多个梯形(或三角形)输入模糊集、带有线性后项的 TS 模糊规则、Zadeh 模糊逻辑 AND 操作和重心解模糊器构成。与常规增益规划器在不同操作点带有不同常数增益的线性控制器不同的是: 非线性增益规划器的增益随着被控系统的输出而不断变化。这些证明不仅弥补了以往一些学者对模糊控制器与增益控制器之间关系的简单说明, 而且从另一方面解释了模糊控制器在处理非线性问题中的有效性。

### 3.4 模糊控制器与多值继电控制器的关系

Kickert 和 M am dani 揭示了模糊控制器与多值继电控制器的关系。一类简单的模糊控制器, 其输入—输出特性具有多值继电特性, 故可看作多值继电控制器<sup>[31]</sup>。Ying<sup>[3]</sup> 证明了采用两个输入变量、多个三角形输入模糊集、线性控制规则、均匀分布的独点输出模糊集、不同推理方法和重心解模糊器的 M am dani 模糊控制器, 是一个全局的两值多值继电控制器和一个局部的非线性 PI 控制器之和<sup>[3]</sup>。这些结果被一般化到采用非均匀分布的多个三角形输入模糊集的 SISO、采用非线性控制规则的 SISO 和 M MO M am dani 模糊控制器<sup>[4-6]</sup>。根据模糊控制器与多值继电控制器的关系, 可用经典控制理论中描述函数的方法来分析和设计模糊控制系统, 并确保其稳定性。

### 3.5 模糊控制器的极限结构理论

一些学者注意到, 当模糊控制规则的数目增加到足够大时, 对被控过程的影响很小甚至没有影响, 从而产生了模糊控制器的极限结构理论<sup>[32-34]</sup>。对于采用线性控制规则的一般模糊控制器, 随着控制规则数目的增加, 其输出变为输入的线性函数<sup>[32]</sup>。特别是当控制规则的数目很大时, 对于两输入的模糊控制器, 其输出近似等于线性 PI 控制器的输出; 对于三输入的模糊控制器, 其输出近似等于线性 PD 控制器的输出。这些结构被一般化到采用多状态变量和多输出模糊集的模糊控制器<sup>[33]</sup>。若采用任意函数  $f$  表达的非线性控制规则, 模糊控制器的解析结构则是一个全局的依赖于  $f$  的非线性控制器和一个局部的非线性控制器之和, 随着控制规则的数目增加到  $\infty$ , 局部非线性控制器也将随之消失<sup>[34]</sup>。若采用线性控制规则, 则随着控制规则的数目增加到  $\infty$ , 全局控制器将变成一个全局近似于线性控制器

的多维多值继电控制器<sup>[34]</sup>。这些结果对于任意模糊逻辑操作、推理方法和解模糊器都适用。极限结构理论说明了模糊控制器的模糊集和模糊规则的数目并非越多越有效, 故在实际设计时, 要根据具体问题合适地选择模糊集和规则的数目。

### 3.6 M MO 模糊控制器的结构分解

工业过程中的许多被控对象都比较复杂, 往往需要采用 M MO 模糊控制器。一般 M MO M am dani 模糊控制器, 总能分解成一个仅由模糊规则确定的全局非线性控制器和一个由模糊控制器所有组成部分确定的局部非线性控制器之和<sup>[35]</sup>。另外, 基于乘积—和—重心推理的  $N$  个变量的模糊系统可分解表达成  $N$  个单变量模糊子系统的加或乘<sup>[36]</sup>。

## 4 模糊控制系统的稳定性分析

通过对模糊控制系统的稳定性分析, 能使设计者了解设计方法的所有步骤。由于模糊控制系统是复杂的非线性系统, 且具有各种不同形式, 使其稳定性分析较难。目前基于经典控制理论的模糊控制系统稳定性分析方法主要有以下几种:

### 4.1 李亚普诺夫方法

基于李亚普诺夫直接方法, 许多学者讨论了离散时间和连续时间模糊控制系统的稳定性分析和设计<sup>[37-44]</sup>。其中, Tanaka 和 Sano 将[43]中的基本稳定性条件推广到 SISO 系统的(非)鲁棒稳定性条件, 稳定性判据变为从一组李亚普诺夫不等式中寻找一个共同的李亚普诺夫函数问题<sup>[44]</sup>。由于没有一般的有效方法来解析地寻找一个公共李亚普诺夫函数, 故 Tanaka 等人<sup>[43, 44]</sup>都没有提供寻找李亚普诺夫稳定性条件的公共矩阵  $P$  的方法。为解决这一问题, 文献[45-47]提出用线性矩阵不等式描述稳定性条件, 还有一些学者用一组  $P$  矩阵代替文献[43, 44]中李亚普诺夫函数的一个公共矩阵  $P$ , 构造一个逐段近似平滑的二次型李亚普诺夫函数, 用于稳定性分析<sup>[37]</sup>。每一个矩阵  $P$  仅对应一个子系统, 并表明当且仅当一组合适的 Riccati 等式有正定对称解, 且能得到这些解时, 模糊控制系统才是全局稳定的。

使用李亚普诺夫线性化方法, Ying 建立了包括非线性对象的 TS 模糊控制系统局部稳定性的必要和充分条件<sup>[23]</sup>。另外, 一种在大系统中使用的向量李亚普诺夫直接方法, 被用于推导多变量模糊系统的稳定性条件<sup>[48]</sup>; 李亚普诺夫第二方法被用于判别

模糊系统量化因子选择的稳定性<sup>[49]</sup>;波波夫—李亚普诺夫方法被用于研究模糊控制系统的鲁棒稳定性<sup>[50]</sup>。

但是,李亚普诺夫的一些稳定性条件通常比较保守,即当稳定性条件不满足时,控制系统仍是稳定的。

#### 4.2 基于滑模变结构系统的方法

由于模糊控制器是采用语义表达,系统设计中不易保证模糊控制系统的稳定性和鲁棒性。而滑模控制有一个明显的特点,即能处理控制系统的非线性,而且是鲁棒控制。因此一些学者提出设计带有模糊滑模表面的模糊控制器,从而能用李亚普诺夫理论来获得闭环控制系统稳定性的证明<sup>[25, 27, 51-54]</sup>。Palm和Driankov采用滑模控制的概念分析了增益规划的闭环模糊控制系统的稳定性和鲁棒性<sup>[55]</sup>。另有一些学者用模糊推理来处理控制系统的非线性和减少控制震颤,使得基于李亚普诺夫方法可保证控制系统的稳定性<sup>[26]</sup>。

基于变结构系统理论,可以得到控制系统的跟踪精度和模糊控制器的I/O模糊集映射形状之间的关系,从而可以解释模糊控制器的鲁棒性和控制性能。文献[24, 56, 57]研究了基于变结构控制框架的模糊控制系统的稳定性,通过输出反馈的模糊变结构控制,并用李亚普诺夫方法证明了闭环控制系统是全局有界输入有界输出稳定的<sup>[58]</sup>。若使用变结构控制类型的模糊规则集,模糊控制器从语义和定量上可显示出变结构的特性。为便于李亚普诺夫稳定性判据能指导设计和调整模糊控制器,文献[30]推导出模糊控制器的具体数学表达式。

#### 4.3 小增益理论方法

小增益理论是非线性控制理论中用于连续系统和离散系统的一个非常一般的工具。基于模糊控制器的解析结构,结合对象和模糊控制器的非线性本质,一些学者采用小增益理论,建立了Mamdani模糊PI<sup>[59]</sup>、PD<sup>[9]</sup>、PD<sup>[14]</sup>及一类简单和典型的TS<sup>[20, 21]</sup>模糊控制系统的有界输入有界输出(BBO)稳定性的充分条件;并证明了用非线性模糊PI控制器替代常规PI控制器,不影响平衡点处的稳定性。因为这些稳定性的结果是基于控制器的结构,所以比那些模糊控制器解析结构未知的稳定性结果更具不保守性。

#### 4.4 相平面分析方法

使用相平面分析技术有助于描述和理解低阶模糊控制系统的动态行为,故相平面分析方法被用于

分析一些模糊系统的稳定性<sup>[60-62]</sup>,但这种技术只限于二维规则结构的模糊系统。

#### 4.5 描述函数方法

描述函数方法可用于预测极限环的存在、频率、幅度和稳定性。通过建立模糊控制器与多值继电控制器的关系,描述函数方法可用于分析模糊控制系统的稳定性<sup>[31]</sup>。另外,指数输入的描述函数技术也能用于调查模糊控制系统的暂态响应<sup>[63]</sup>。虽然描述函数方法能用于SISO和MISO模糊控制器以及某些非线性对象模型,但不能用于三输入及以上的模糊控制器。由于这种方法一般都用于非线性系统中确定周期振荡的存在性,因此只是一种近似方法。

#### 4.6 圆稳定性判据方法

圆判据可用于分析和再设计一个模糊控制系统。使用扇区有界非线性的概念,一般化的奈魁斯特(圆)稳定性判据可用于分析SISO和MIMO模糊系统的稳定性<sup>[62]</sup>,并且扩展圆判据可用于推导一类简单模糊PI控制系统稳定性的充分条件<sup>[63]</sup>。由于圆判据要求比较严格,Furutani提出一种移动的波波夫判据,用于分析模糊控制系统的稳定性。当此判据中参数 $\theta$ 设为零时,该判据与圆判据一致<sup>[64]</sup>。

#### 4.7 其它方法

鲁棒控制技术(如向量稳定化、 $H_\infty$ 控制理论和线性矩阵不等式)被用于推导带有不确定性的TS模糊控制系统<sup>[46]</sup>。另外,一般化能量概念<sup>[65]</sup>、胞胞映射概念<sup>[66]</sup>、几何状态空间方法<sup>[67]</sup>、Hurwitz稳定性条件方法<sup>[68]</sup>、绝对稳定判据方法<sup>[69]</sup>、基于Kudrewicz理论方法<sup>[70]</sup>及扩展Haddad方法<sup>[71]</sup>等,都已被用于分析模糊控制系统的稳定性。

从模糊控制系统稳定性分析的结果可知,最一般的方法是李亚普诺夫方法,但比较保守,圆判据则更保守。对于其它一些典型的模糊控制系统稳定性分析方法,要求对象模型确定且应满足一些连续性限制。如描述函数分析极限环,本质上要求一个线性时不变对象或者具有某一特定数学形式的对象,使得非线性在循环中有界于一个非线性元件。

## 5 结论和展望

通过对模糊控制器结构的解析分析,可以揭示模糊控制器的本质和工作机理,建立模糊控制器与经典控制器之间的关系,而稳定性分析结果可用于指导模糊控制系统的分析和设计。虽然目前已得到许多解析结果,但与经典控制理论相比,解析模糊控

理理论显得仍不成熟。许多经典控制理论和概念有待于进一步推广到模糊控制系统的分析和设计:

1) 在解析结构分析方面, TS 模糊控制器的结构分析需推广到更一般的情况及 M M O 控制器; 一般 M am dani 和 TS 模糊控制器的极限结构理论需进一步讨论; 同时, 复杂系统模糊控制的解析理论有待进一步深入。如: 分层递阶模糊控制系统可解决多变量模糊控制器的维数灾问题, 且已被证明是万能控制器<sup>[72]</sup>, 因此, 有必要对这类控制器的结构进行解析分析。

2) 模糊控制稳定性分析结果尚较缺乏。目前的方法多少都受到一些限制, 更一般化的稳定性判据, 尤其是基于模糊控制器解析结构的易理解且具广泛应用性的方法应加以研究。

3) 其它如模糊控制系统的鲁棒性、能观性和可控性等同样有待于深入研究和进一步发展。

4) 需开发基于解析理论的模糊系统计算机辅助设计软件。鉴于目前许多模糊系统开发软件都缺乏解析能力, 我们正在研制一种能用于解析分析、设计和开发模糊系统的软件包。

总之, 成熟且丰富的经典控制理论与模糊控制相结合, 将有助于更好地分析和设计模糊控制系统, 从而奠定模糊控制理论基础, 并使 21 世纪这一人类智能的核心技术更具生命力。

## 参 考 文 献

- H Ying, W Siler, J J Buckley. Fuzzy control theory: A nonlinear case *Automatica*, 1990, 26(3): 513- 520
- H Ying. The simplest fuzzy controllers using different inference methods are different nonlinear proportional-integral controllers with variable gains *Automatica*, 1993, 29: 1579- 1589
- H Ying. A fuzzy controller with linear control rules is the sum of a global two- dimensional multilevel relay and a local nonlinear proportional- integral controller. *Automatica*, 1993, 29: 499- 505
- C L Chen, S N Wang, C C Hsieh *et al.* Theoretical analysis of crisp- type fuzzy logic controllers using various  $t$ - norm sum - gravity inference methods *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1998, 6(1): 122- 136
- H Ying. Practical design of nonlinear fuzzy controllers with stability analysis for regulating processes with unknown mathematical models *Automatica*, 1994, 30 (7): 1185- 1195
- H Ying. Analytical structure of a two- input, two- output fuzzy controller and its relation to PI and multilevel relay controllers *Fuzzy Sets and Systems*, 1994, 63: 21- 33
- J J Buckley. Nonlinear fuzzy controller. *Information Sciences*, 1992, 60: 261- 274
- C L Chen, F C Kuo. Design and analysis of a fuzzy controller. *Int J System s Science*, 1995, 26 (5): 1223- 1248
- H A M alki, H L i, G R Chen. New design and stability analysis of fuzzy proportional- derivative control systems *IEEE Trans on Fuzzy System s*, 1994, 2(4): 245- 254
- D P Filev, R R Yager. On the analysis of fuzzy logic controllers *Fuzzy Sets and System s*, 1994, 68: 39- 66
- G R Chen. Conventional and fuzzy PD controllers: An overview. *Int J Intelligent Control and System s*, 1996, 1(2): 235- 246
- 刘向杰, 柴天佑, 张焕水. 三维模糊控制器的结构研究 *自动化学报*, 1998, 24(2): 230- 235
- 胡包钢, G K IM ann, R G Gosine. 关于模糊 PD 控制器推理机维数的研究 *自动化学报*, 1998, 24(5): 608- 615
- D M isir, H A M alki, G R Chen. Design and analysis of a fuzzy proportional- integral- derivative controller. *Fuzzy Sets and System s*, 1996, 79(3): 297- 314
- H A M alki, D M isir, D Feigen span *et al.* Fuzzy PD control of a flexible- joint robot arm with uncertainties from time- varying loads *IEEE Trans on Control System s Technology*, 1997, 5(3): 371- 378
- H X L i. A comparative design and tuning for conventional fuzzy control *IEEE Trans on System s M an and Cybernetic*, 1997, 27(5): 884- 889
- 丁永生. 模糊系统的解析分析和设计及其在激光热疗法中的应用(英文). 中国纺织大学博士学位论文, 1998
- P Sooraksa, G R Chen. Fuzzy (PI+ D)<sup>2</sup> control for flexible robot arms. In: *Proc of the 1996 IEEE Int Symp Intelligent Control New York*, 1996. 536- 541
- Y S D ing, H Ying, S H Shao. Real- time fuzzy control of tissue temperature during laser heating *Int J Intelligent Control and System s*, 1998, 2: 361- 379
- Y S D ing, H Ying, S H Shao. Structure and stability analysis of a Takagi- Sugeno fuzzy PI controller with application to tissue hyperthermia therapy. *Soft Computing*, 1999, 2(4): 183- 190
- Y S D ing, H Ying, S H Shao. Structure and stability analysis of typical Takagi- Sugeno fuzzy PI control systems. In: *The 6th Int Conf Fuzzy Theory and Technology. North Carolina*, 1998. 163- 166

- 22 H Ying. The Takagi- Sugeno fuzzy controllers using the simplified linear control rules are nonlinear variable gain controllers. *Automatica*, 1998, 34(2): 157- 167
- 23 H Ying. Constructing nonlinear variable gain controllers via the Takagi- Sugeno fuzzy control. *IEEE Trans on Fuzzy System s*, 1998, 6(2): 226- 234
- 24 G M Aly, M A Tayeb. Fuzzy logic- based variable structure controllers. *J Microcomputer Applications*, 1995, 18(2): 115- 125
- 25 J S Glower, J M unighan. Designing fuzzy controllers from a variable structure standpoint. *IEEE Trans on Fuzzy System s*, 1997, 5(1): 138- 144
- 26 Y R Hwang, M Tom izuka. Fuzzy smoothing algorithms for variable structure system s. *IEEE Trans on Fuzzy System s*, 1994, 2(4): 277- 284
- 27 R Palm. Robust control by fuzzy sliding mode. *Automatica*, 1994, 30(9): 1429- 1437
- 28 Y M Pok, J X Xu. Variable- structured fuzzy control. *Int J Intelligent Control and System s*, 1996, 1(2): 273 - 296
- 29 J C Wu, T S Liu. A sliding- mode approach to fuzzy control design. *IEEE Trans on Control System s Technology*, 1996, 4(2): 141- 151
- 30 H X Li, H B Gatland, A W Green. Fuzzy variable structure control. *IEEE Trans on System s Man and Cybernetics*, 1997, 27(2): 306- 312
- 31 W J M Kickert, E H M amdani. A nalysis of a fuzzy logic controller. *Fuzzy Sets and System s*, 1978, 1: 29- 44
- 32 J J Buckley, H Ying. Fuzzy controller theory: L im it theorem s for linear fuzzy control rules. *Automatica*, 1989, 25: 469- 472
- 33 J J Buckley. Fuzzy controller: Further lim it theorem s for linear control rules. *Fuzzy Sets and System s*, 1990, 36: 225- 233
- 34 H Ying. General analytical structure of typical fuzzy controllers and their lim iting structure theorem s. *Automatica*, 1993, 29(4): 1139- 1143
- 35 H Ying. Structure decomposition of the general M O fuzzy system s. *J Intelligent Control and System s*, 1996, 1(2): 327- 337
- 36 Y Yam. Subsystem inference representation for fuzzy system s based upon product- sum - gravity rule. *IEEE Trans on Fuzzy System s*, 1997, 5(1): 90- 107
- 37 S G Cao, N W Rees, G Feng. Stability analysis of fuzzy control system s. *IEEE Trans on System s Man and Cybernetic*, 1996, 26(1): 201- 204
- 38 S G Cao, N W Rees, G Feng. Lyapunov- like stability theorem s for discrete- time fuzzy control system s. *Int J System s Science*, 1997, 28(3): 297- 308
- 39 S G Cao, N W Rees, G Feng. Further results about quadratic stability of continuous- time fuzzy control system s. *Int J System s Science*, 1997, 28(4): 397- 404
- 40 孙增圻. 基于模糊状态模型的连续系统控制器设计和稳定性分析. *自动化学报*, 1998, 24(2): 212- 216
- 41 C Ham, Z H Qu, J Kabust. Design of globally stabilizing robust fuzzy control for a class of nonlinear system s. *Int J Intelligent Control and System s*, 1996, 1(2): 261- 271
- 42 K Tanaka, M Sano. A robust stabilization problem of fuzzy control system s and its application to backing up control of a truck- trailer. *IEEE Trans on Fuzzy System s*, 1994, 2(2): 119- 134
- 43 K Tanaka, M Sugeno. Stability analysis and design of fuzzy control system s. *Fuzzy Sets and System s*, 1992, 45(2): 135- 156
- 44 K Tanaka, M Sano. Trajectory stabilization of a model car via fuzzy control. *Fuzzy Sets and System s*, 1995, 70: 155- 170
- 45 H O Wang, K Tanaka, M F Griffin. An approach to fuzzy control of nonlinear system s: Stability and design issues. *IEEE Trans on Fuzzy System s*, 1996, 4(1): 14 - 23
- 46 K Tanaka, T Ikeda, H O Wang. Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear system s via fuzzy control: Quadratic stabilizability,  $H$  infinity control theory, and linear matrix inequalities. *IEEE Trans on Fuzzy System s*, 1996, 4(1): 1- 13
- 47 K Tanaka, T Kosaki. Design of a stable fuzzy controller for an articulated vehicle. *IEEE Trans on System s Man and Cybernetics*, 1997, 27(3): 552- 558
- 48 C M Cheng, N W Rees. Stability analysis of fuzzy multivariable system s: Vector Lyapunov function approach. *IEE Proc Control Theory and Applications*, 1997, 144(5): 403- 412
- 49 S Daley, K F Gill. The fuzzy logic controller: An alternate design scheme? *Computers in Industry*, 1985, 6: 3- 14
- 50 C C Fuh, P C Tung. Robust stability analysis of fuzzy control system s. *Fuzzy Sets and System s*, 1997, 88(3): 289- 298
- 51 S W Kim, J J Lee. Design of a fuzzy controller with fuzzy sliding surface. *Fuzzy Sets and System s*, 1995, 71(3): 359- 367
- 52 Y Ohtani, T Yoshimura. Fuzzy control of a manipula-

- tor using the concept of sliding mode. *Int J Systems Science*, 1996, 27(2): 179- 186
- 53 S Y Wang, C M Hong, W T Yang. Design of a static reactive power compensator using fuzzy sliding mode control. *Int J Control*, 1996, 63(2): 393- 413
- 54 S Y Yi, M J Chung. A robust fuzzy logic controller for robot manipulators with uncertainties. *IEEE Trans on System s M an and Cybernetic*, 1997, 27(4): 706- 713
- 55 R Palm, D Driankov. Stability of fuzzy gain schedulers: Sliding - mode based analysis. In: *Proc 6th IEEE Int Conf Fuzzy System s Spain*, 1997, 1: 177- 183
- 56 A Suyitno, J Fujikawa, H Kobayashi *et al.* Variable-structured robust controller by fuzzy logic for servomotors. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1993, 40(1): 80- 88
- 57 S Y Yi, M J Chung. Systematic design and stability analysis of a fuzzy logic controller. *Fuzzy Sets and System s*, 1995, 72(3): 271- 298
- 58 T P Zhang, C B Feng. Fuzzy variable structure control via output feedback. *Int J System s Science*, 1997, 28(3): 309- 319
- 59 S S Farinwata, G Vachtsevanos. Stability analysis of the fuzzy logic controller designed by the phase portrait assignment algorithm. In: *Proc 2nd IEEE Int Conf Fuzzy Syst San Francisco*, 1993, 1377- 1382
- 60 路兆梅, 柏广昌, 冷增祥. 模糊控制系统的相平面分析. *电气自动化*, 1996, 18(6): 11- 13
- 61 G Abdelnour, J Y Cheung, C- H Chang *et al.* Application of describing functions in the transient response analysis of a three- tem fuzzy controller. *IEEE Trans on System s M an and Cybernetic*, 1993, 23: 603- 606
- 62 K S Ray, D D M ajumder. Application of circle criteria for stability analysis of linear SISO and M MO system s associated with fuzzy logic controller. *IEEE Trans on System s M an and Cybernetics*, 1984, 14(2): 345- 349
- 63 J X Xu, C L iu, C C Hang. Designing a stable fuzzy PI control system using extended circle criterion. *Int J Intelligent Control and System s*, 1996, 1(3): 355- 366
- 64 E Furutani, M Saeki, M A raki. Shifted Popov criterion and stability analysis of fuzzy control system s. In: *Proc of the 31st Conf Decision and Control Tucson Arizona*, 1992. 2790- 2795
- 65 J B Kiszka, M M Gupta, P N Nikiforuk. Energetic stability of fuzzy dynamic system s. *IEEE Trans on System s M an and Cybernetics*, 1985, 15(6): 783- 792
- 66 Y Y Chen. The global analysis of fuzzy dynamic system s. Berkeley: Ph D Thesis University of California, 1989
- 67 J A racil, A Garcia Cerezo, A O llero. Stability analysis of fuzzy control system s: A geometric approach in artificial intelligent expert system s and languages in modelling and simulation. *Amsterdam*, 1988. 323- 330
- 68 M M aeda, E Fukum iya. Stability analysis of fuzzy control system by 3D space displ ay. *JSM E Int J Dynam ics*, 1994, 37(4): 685- 691
- 69 J T L in. Absolute stability analysis of class of nonlinear plant s with fuzzy logic controllers. *Electronics Letters*, 1992, 28(21): 1968- 1970
- 70 J Kluska. Stability analysis of SISO, M ISO and M MO continuous fuzzy control system s based on theorem s of Kudrewicz. *Archives of Control Sciences*, 1996, 5(41): 5- 37
- 71 X Wang, T M atsumoto. New time- domain stability criterion for fuzzy control system s. *IEEE Trans on Fundamental of Electronic, Communications and Computer Sciences*, 1996, E79- A (10): 1700- 1706
- 72 L X Wang. Universal approximation by hierarchical fuzzy system s. *Fuzzy Sets and System s*, 1998, 93(2): 223- 230

## 作者简介

丁永生 男, 1967 年生。东华大学(原中国纺织大学)信息科学与技术学院副教授, 博士。1996- 1998 年作为访问学者在美国得克萨斯大学医学院工作。主要学术方向为模糊控制, 智能控制, DNA 计算, 人工免疫系统, 软计算和非线性系统控制。

应浩 男, 1959 年生。美国得克萨斯大学医学院副教授, 博士。主要学术方向为模糊控制, 非线性系统控制, 图象处理的理论研究及其在生物医学工程中的应用。

任立红 女, 1967 年生。东华大学讲师, 在职博士研究生。主要学术方向为 DNA 计算, 软计算, 智能控制, 非线性系统控制的理论研究与应用工作。

邵世煌 见本刊 1996 年第 11 卷第 6 期第 622 页。