

II型模糊控制综述

潘永平, 黄道平, 孙宗海

(华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: II型模糊集合是传统I型模糊集合的扩展, 其特征是隶属度值本身为模糊集合. 基于II型模糊集合的II型模糊控制器可以同时有效地处理语言和数据不确定性, 在高不确定场合具有明显超过相应I型控制器的性能表现. 本文首先对II型模糊集合及系统理论进行了概述, 然后对II型非自适应模糊控制器II型自适应模糊控制器和II型自组织模糊控制器的研究进展分别进行了详细综述, 最后给出了本文的总结和进一步研究问题的展望.

关键词: II型模糊集合; II型模糊系统; 不确定性; II型模糊控制器; II型自适应模糊控制器; II型自组织模糊控制器

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Overview of type-2 fuzzy logic control

PAN Yong-ping, HUANG Dao-ping, SUN Zong-hai

(School of Automation Science and Technology, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: A type-2 fuzzy set(T2-FS), which has the characteristic of its membership grades themselves being fuzzy sets, is the extension of the traditional type-1 fuzzy set(T1-FS). The type-2 fuzzy logic controller(T2-FLC) based on the T2-FS can deal with both the linguistic and the numerical uncertainty effectively. Thus it can obviously outperform its T1 counterpart under the situation of high uncertainty. We introduce the type-2 fuzzy set and the related system theory; and then, we give a detail review on the research progress of type-2 non-adaptive fuzzy controllers, type-2 adaptive fuzzy controllers and type-2 self-organizing fuzzy controllers, respectively. Finally, we propose the conclusion remarks and further research prospects of the T2-FLC.

Key words: type-2 fuzzy sets; type-2 fuzzy logic systems; uncertainty; type-2 fuzzy logic controllers; type-2 adaptive fuzzy controllers; type-2 self-organizing fuzzy controllers

1 引言(Introduction)

传统的I型模糊控制器(type-1 fuzzy logic controller, T1-FLC)是指以Zadeh^[1]在1965年提出的I型模糊集合(type-1 fuzzy set, T1-FS)理论为工具, 能够利用人类的经验和知识, 把直觉推理纳入到决策中的一种智能控制器. 作为基于规则的非线性控制器, T1-FLC提供了一种由专家构造语言信息并将其转化为控制策略的系统方法, 能够解决许多复杂而无法建立精确数学模型系统的控制问题, 因此是处理控制系统中不确定性和不精确性问题的一种有效手段^[2,3]. 而作为一类通用非线性逼近器, I型模糊系统(type-1 fuzzy logic system, T1-FLS)除了具有可解释性强、可利用语言信息等独特的优势外, 在逼近精度与效率、学习算法收敛速度等方面也不亚于B-样条、决策树、神经网络、小波等其他非线性逼近方法^[4], 因此是基于辨识或逼近的非线性控制中逼近模型的良好选择.

然而在现实非结构化的动态环境和许多具体应用中, T1-FLC都会面临诸多不确定性, 主要包括^[5~7]: 1) 测量噪音不确定性, 即传感器测量由于受到各种高噪音和测量条件变化的影响导致用于调节或优化系统参数的训练数据含有噪音; 2) 执行器特性不确定性, 即由于磨损、环境等造成的执行器特性变化导致控制输入发生变化; 3) 语言不确定性, 包括同一语言对于不同人含义的差异性, 以及同一规则由专家问卷调查得到结论的差异性; 4) 运行环境不确定性, 即系统运行条件发生改变导致相应的输入和输出发生变化. 可见, 用于建立模糊规则库的语言知识和数据都可能存在不确定性, 而这些不确定性都将导致模糊规则前件和/或后件的不确定性, 并最终转化为相应隶属度函数的不确定性^[8]. T1-FLC的局限在于它使用了由精确隶属度函数表示的T1-FS, 因此并不能直接处理这些模糊规则的不确定性^[9].

作为对T1-FS的扩展, Zadeh^[10]在1975年提出II型

模糊集合(type-2 FS, T2-FS)的概念. T2-FS的特征是对模糊集合中的隶属度值再次进行模糊化表示, 即其隶属度值本身为T1-FS. T2-FS增强了集合的模糊性, 从而可以提高其处理不确定的能力^[11]. 由于II型模糊系统(T2-FLS)和II型模糊控制器(T2-FLC)均采用了基于模糊隶属度函数表示的T2-FS, 因此可以同时对话语言和不确定性进行建模, 从而直接处理模糊规则的不确定性^[5]. 实践结果表明, 在高不确定性场合T2-FLC具有明显超过相应T1-FLC的性能表现, 并且不确定程度越高, 这种优势就越明显. 不仅如此, T2-FLC在减少规则数量、平滑控制输出和优化控制响应性能等方面也具有独特的优势^[7]. 近年来, T2-FLC已经发展成为处理现实高不确定场合控制问题的重要手段, 并且在移动机器人、工业过程、电力变换、智能家居环境等诸多控制领域获得了成功应用^[7,12].

本文首先在第2节对II型模糊集合及系统理论进行了概述. 然后在第3节把非自适应模糊控制器分为基本型、优化型和融合其他控制结构型3种类型, 并就其发展状况分别进行了综述. 接着在第4节分别讨论了在线优化型和模糊逼近型两种类型的II型自适应模糊控制器(type-2 adaptive fuzzy controller, T2-AFC)研究进展. 在第5节则对II型自组织模糊控制器(type-2 self-organizing fuzzy controller, T2-SOFC)设计相关理论的研究进展作了全面的论述. 最后, 本文给出了T2-FLC研究现状的总结和进一步研究问题的展望.

2 II型模糊集合及系统概述(Overview of the T2-FS and T2-FLS)

2.1 II型模糊集合基本概念(Basic concepts of the T2-FS)

记 $\tilde{A}$ 为某一T2-FS, $x \in X$ 为表示现实物理量的主变量(primary variable), $u \in J_x$ 为次变量(secondary variable), 其中 $J_x \subseteq [0, 1]$ 为主隶属度(primary membership). T2-FS可视为三维空间 $X \times [0, 1] \times [0, 1]$ 内的曲面^[13], 需要使用三维的隶属度函数表示, 而图1为其二维简化表示示意图^[9]. 如图中所示, 对于任意 $x' \in X$, 则有 $J_{x'} = [MF_1(x'), MF_N(x')]$, 其中 N 为 $J_{x'}$ 的离散点个数. 如此, $\tilde{A}$ 可表示如下:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \left(\int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x, u)/u \right) / x, \quad (1)$$

其中 $\int$ 表示逻辑并. 图1中右上角为 $\tilde{A}$ 在点 x' 处的垂直切片(vertical slice), 即次隶属度函数(secondary membership function), 可表示为

$$\mu_{\tilde{A}}(x') = \int_{u \in J_{x'}} \mu_{\tilde{A}}(x', u)/u. \quad (2)$$

相应次隶属度值(secondary grade)为

$$f_{x'}(u_i) = \mu_{\tilde{A}}(x', u_i) = W_{x'i}, i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

式(1)中次隶属度都取值为1的T2-FS定义为区间II型模糊集合(interval T2-FS, IT2-FS). 而次隶属度取得不同值的T2-FS称为广义II型模糊集合(generalized T2-FS, GT2-FS).

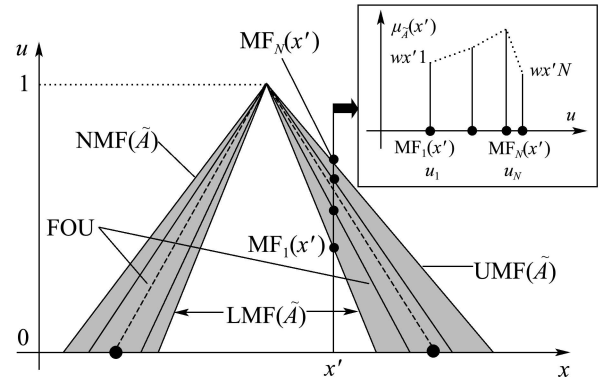


图1 II型模糊集合二维平面示意图

Fig. 1 Type-2 fuzzy set in 2-dimension plane

如图1中灰色区域所示, $\tilde{A}$ 的三维隶属度函数映射到二维平面时的覆盖区域称为 $\tilde{A}$ 的不确定域(foot-print of uncertain, FOU), 可表示为

$$\text{FOU}(\tilde{A}) = \int_{x \in X} J_x / x, \quad (4)$$

其上界记为 $\text{UMF}(\tilde{A})$, 下界记为 $\text{LMF}(\tilde{A})$. 在FOU内的任意一个T1-FS定义为内嵌I型模糊集合(embedded T1-FS, ET1-FS), 表示如下:

$$A_e = \int_{x \in X} u / x, u \in J_x. \quad (5)$$

可见, $\text{UMF}(\tilde{A})$ 和 $\text{LMF}(\tilde{A})$ 也属于ET1-FS. 内嵌II型模糊集合(embedded T2-FS, ET2-FS)则定义为带有次隶属度值的ET1-FS, 可表示为

$$\tilde{A}_e = \int_{x \in X} (\mu_{\tilde{A}}(x, u)/u) / x, u \in J_x. \quad (6)$$

如图1的FOU中虚线所示, 首隶属度函数(principal membership function)定义为所有次隶属度均取值为1的ET1-FS.

2.2 II型模糊系统基本概念(Basic concepts of the T2-FLS)

只要在模糊规则前件或后件隶属度函数中包含T2-FS, 相应的模糊系统即称为T2-FLS. 如图2所示, T2-FLS与T1-FLS的区别在于在输出处理中增加了降阶(type-reduction, TR)部分^[5]. T2-FLS中的模糊推理输出为T2-FS, 因此需要首先降阶为I型TR集合, 然后才能进行解模糊得到清晰量输出.

考虑 p 输入单输出的T2-FLS, 其中输入 $x_i \in X_i \subset \mathbb{R}$, 输出 $y \in Y \subset \mathbb{R}$, $i = 1, \dots, p$. 假设T2-FLS中包含如下 M 条模糊规则^[14]:

$$R^l: \text{If } x_1 \text{ is } \tilde{F}_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_p \text{ is } \tilde{F}_p^l \text{ then } y \text{ is } \tilde{G}^l, (7)$$

其中 $\tilde{F}_i^l$ 和 $\tilde{G}^l$ 分别表示 x_i 和 y 的语言变量, $i = 1, \dots, p$,

$l = 1, \dots, M$. 分别记 $\sqcup$ 、 $\sqcap$ 和 $*$ 为join运算、meet运算和 t -范数^[15], 记 μ_F 为语言变量或推理表达 F 相应的隶属度函数. 假设输入向量 $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_p]$ 模糊化为某一T2-FS $\tilde{A}_{\mathbf{x}}$, 其隶属度函数记为

$$\mu_{\tilde{A}_{\mathbf{x}}}(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^p \mu_{\tilde{X}_i}(x_i), \quad (8)$$

其中 $\tilde{X}_i$ 表示描述输入模糊集合的语言变量. 记 $\tilde{F}_1^l \times \dots \times \tilde{F}_p^l = \tilde{A}^l$, $\tilde{A}_{\mathbf{x}} \circ \tilde{A}^l \rightarrow \tilde{G}^l = \tilde{B}^l$, 其中“ $\times$ ”表示笛卡尔积, 则基于扩展sup-*合成的模糊推理输出隶属度函数可表示为

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{B}^l}(y) &= \bigcup_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} [\mu_{\tilde{A}_{\mathbf{x}}}(\mathbf{x}) \sqcap \mu_{\tilde{A}^l \rightarrow \tilde{G}^l}(\mathbf{x}, y)] = \\ &= \mu_{\tilde{G}^l}(y) \sqcap \left\{ \prod_{i=1}^p \left[\bigcup_{x_i \in X_i} \mu_{\tilde{X}_i}(x_i) \sqcap \mu_{\tilde{F}_i^l}(x_i) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

如果采用单值模糊化, 则式(9)可简化为

$$\mu_{\tilde{B}^l}(y) = \mu_{\tilde{G}^l}(y) \sqcap E_l(\mathbf{x}), \quad (10)$$

其中激活集合 $E_l(\mathbf{x})$ 定义为

$$E_l(\mathbf{x}) \triangleq \prod_{i=1}^p \mu_{\tilde{F}_i^l}(x'_i), \quad (11)$$

其中 $x'_i \in X_i$ 为使 $\mu_{\tilde{X}_i}(x'_i)$ 取得非零值的点. 记所有 M 条模糊规则推理输出的集合为 $\tilde{B} = \bigcup_{l=1}^M \tilde{B}^l$, 则相应的隶属度函数可表示如下:

$$\mu_{\tilde{B}}(y) = \bigcup_{l=1}^M \mu_{\tilde{B}^l}(y). \quad (12)$$

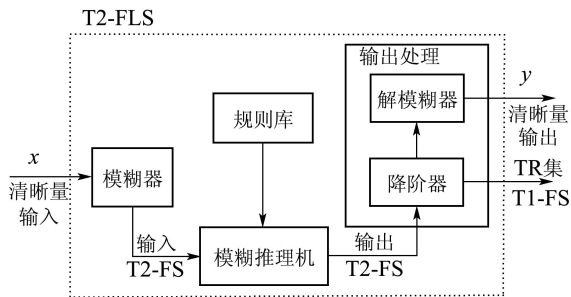


图 2 II型模糊逻辑系统框图

Fig. 2 Block diagram of T2-FLS

T2-FLS的TR方法主要包括质心(centroid)型、集合中心(center-of-set, COS)型和顶点(height)型3种类型^[14]. 对于广义II型模糊系统(GT2-FLS), 这3种TR方法都涉及到巨大的运算量. 对于区间II型模糊系统(IT2-FLS), 一种实用的TR方法为基于KM算法的COS型TR^[9]. 求取IT2-FS $\tilde{B}$ 质心区间 $C_{\tilde{B}}$ 的KM算法迭代公式表示如下:

$$C_{\tilde{B}} = [c_l(\tilde{B}), c_r(\tilde{B})], \quad (13a)$$

$$c_l(L) = \frac{\sum_{i=1}^L y_i \bar{\mu}_{\tilde{B}}(y_i) + \sum_{i=L+1}^N y_i \underline{\mu}_{\tilde{B}}(y_i)}{\sum_{i=1}^L \bar{\mu}_{\tilde{B}}(y_i) + \sum_{i=L+1}^N \underline{\mu}_{\tilde{B}}(y_i)}, \quad (13b)$$

$$c_r(R) = \frac{\sum_{i=1}^R y_i \underline{\mu}_{\tilde{B}}(y_i) + \sum_{i=R+1}^N y_i \bar{\mu}_{\tilde{B}}(y_i)}{\sum_{i=1}^R \underline{\mu}_{\tilde{B}}(y_i) + \sum_{i=R+1}^N \bar{\mu}_{\tilde{B}}(y_i)}, \quad (13c)$$

其中: y_i 表示输出论域 Y 上的离散点, $\underline{\mu}_{\tilde{B}}$ 和 $\bar{\mu}_{\tilde{B}}$ 分别表示 $\tilde{B}$ 的LMF和UMF, 切换点序号 L, R 分别为使 c_l 取得最小值, c_r 取得最大值的离散点序号. 如此, IT2-FLS基于KM算法的COS型TR可表示如下:

$$Y_{\cos}(\mathbf{x}) = [y_l(\mathbf{x}), y_r(\mathbf{x})], \quad (14a)$$

$$y_l(\mathbf{x}) = \min_{\forall f^l \in [\underline{f}^l, \bar{f}^l]} \left[\sum_{l=1}^M y_l^l f^l / \sum_{l=1}^M f^l \right], \quad (14b)$$

$$y_r(\mathbf{x}) = \max_{\forall f^l \in [\underline{f}^l, \bar{f}^l]} \left[\sum_{l=1}^M y_r^l f^l / \sum_{l=1}^M f^l \right], \quad (14c)$$

其中: $[y_l^l, y_r^l]$ 为用KM算法得到的模糊规则后件 $\tilde{G}^l$ 质心区间, $[\underline{f}^l, \bar{f}^l]$ 为由式(11)计算得出的区间型激活集合, 式(14b)(14c)由式(13)的KM算法解出. 如此, IT2-FLS的解模糊可以表示为

$$y = (y_l(\mathbf{x}) + y_r(\mathbf{x})) / 2. \quad (15)$$

3 II型非自适应模糊控制器(Type-2 non-adaptive fuzzy controllers)

模糊控制被认为是模糊系统应用最为广泛的领域, 但由于计算复杂性问题, 早期T2-FLS的主要应用并不在控制领域^[7]. 在分别提出基于KM迭代算法^[16]和WM近似算法^[17]的TR方法之后, T2-FLS在控制中的应用开始崭露头角, 并且无论是在实时控制还是在仿真实验中都显示出其处理高不确定性问题的突出优势.

3.1 基本II型模糊控制器(Basic T2-FLCs)

对于基本型T2-FLC的研究, 为了验证其在现实不确定环境中比相应T1-FLC更具优越性, 首先是涌现出大量的嵌入式实时控制应用成果^[18~26]. Hagnas^[18]在2004年最先设计出实时执行的T2-FLC, 并成功应用于自主移动机器人的导航控制问题中. 为了解决T2-FLC的规则爆炸和计算复杂性问题, 文中提出图3所示包含行为控制层和协调层的分级T2-FLC, 其中行为控制层由分别控制机器人各种行为的区间II型模糊控制器(IT2-FLC)组成, 相应输出为作为行为优先级的TR集合, 协调层用单独一个IT2-FLC协调机器人的各种行为. 在现实非结构化动态环境中的实时控制实验表明, 文中提出的控制器在极大减少控制规则和实现良好实时响应的情况下, 可以获得比相应T1-FLC更好的跟踪性能. 随后, IT2-FLC在机器人足球比赛的移动目标实时跟踪问题中也得到了实际应用^[19]. 文[18,19]中的IT2-FLC都采用了基于KM算法的COS型TR. Lynch等^[20]则设计了基于WM算法的实时IT2-FLC, 并应用于船舶牵引柴

油机的速度控制问题中. 实时控制实验结果一致表明, 文[19,20]中提出的IT2-FLC在现实不确定环境下可以以较少控制规则获得超过常规PID控制器和相应T1-FLC的鲁棒性能. 得益于GT2-FS几何学表示方法的研究, Coupland等^[21~24]首次构建了广义II型模糊控制器(GT2-FLC), 并在现实环境的两轮自主移动机器人曲线障碍物边缘跟随控制中得到应用. 最近, 基于 z 切片表示理论^[27]建立的GT2-FLC也被应用到相同的控制问题中^[25,26]. 实时控制实验结果显示, 上述GT2-FLC都可以获得比相应T1-FLC和相应IT2-FLC均明显要好的控制性能.

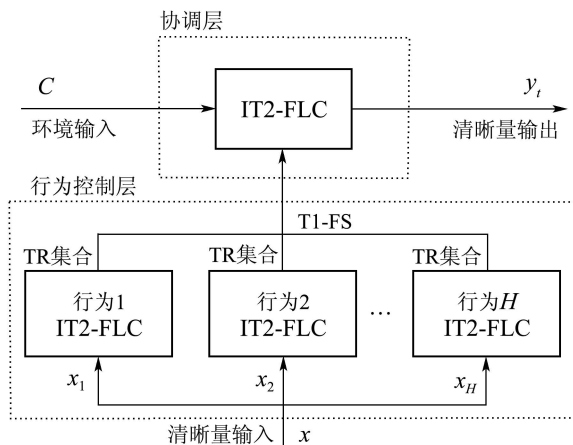


图3 II型分级模糊控制器结构图

Fig. 3 Architecture of hierarchical T2-FLC

同时, 在仿真方面 IT2-FLC 也出现了不少成果^[28~33], 并且都采用了基于KM算法的COS型TR. Sepúlveda等^[28]对IT2-FLS进行了3个方面的应用研究, 包括非线性反馈控制、区间II型ANFIS^[34]时间序列预测和区间II型T-S模糊模型逼近. 关于IT2-FLC更多的仿真研究成果则是在工业过程控制中的应用实例, 如实现分布参数非线性催化反应器^[29]、分叉非线性连续生物反应器^[30]、混合废弃物降解生化反应器^[31]、非恒温连续搅拌反应釜(CSTR)^[32]、青霉素发酵过程^[33]等的控制. 文[28~33]的仿真结果一致表明, 在不确定存在的情况下IT2-FLC具有比相应T1-FLC更好的性能表现.

3.2 离线优化II型模糊控制器(Off-line optimized T2-FLCs)

基本T2-FLC的设计一般基于经验和凑试法, 在大多数情况下并不能得到最优的控制效果. 因此采用各种最优化算法离线优化IT2-FLC的方法应运而生, 并成为设计IT2-FLC的一个重要手段^[35~39]. Wu和Tan^[35]首先提出基于基因算法(genetic algorithm, GA)离线优化的IT2-FLC, 并指出IT2-FLC的主要优点之一是在系统引入未建模动态时可以消除控制器的持续振荡. 基于“IT2-FLC可以在系统

输出接近静态点时提供更多衰减作用”的思想, 他们又提出一种只在操作行为静态点使用IT2-FS的简化IT2-FLC, 并同样采用GA算法进行离线优化设计^[36]. 在耦合水箱液位系统的实时控制实验中表明, 文[35, 36]中提出的IT2-FLC可以获得比相应T1-FLC和I型模糊神经网络(type-1 fuzzy-neural network, T1-FNN)控制器都要好的控制性能. 随后, 针对其他应用场合的GA离线优化IT2-FLC^[37,38]和进化计算离线优化IT2-FLC^[37]也相继被提出. 以上方法都采用了基于KM算法的COS型TR. 针对WM算法近似TR导致损失不确定性信息的问题, 文[39]采用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法对近似TR输出进行了再次优化, 从而减小近似TR相对于迭代TR的逼近误差. 在汽车非线性悬架系统的控制仿真中显示, 文中所提算法的控制效果要优于原有WM算法.

3.3 融合其他控制结构的II型模糊控制器(T2-FLCs with other control structures)

同时, 为了提高IT2-FLC的性能, 出现了与滑模控制、逆控制等其他控制结构相融合的IT2-FLC^[40~43], 并且其中都采用了基于KM算法的COS型TR. 为了增强IT2-FLC对不确定的处理能力, 研究者们提出了区间II型模糊滑模控制器(IT2 fuzzy slide-mode controller, IT2-FSMC)^[40~42]. Lin^[44]等先是针对DC-DC变换器的控制问题给出了相应的IT2-FLC, 其后又设计了如图4所示的IT2-FSMC^[40]. 文中实验结果表明, 在面临输入电压和负载不确定性的情况下, IT2-FSMC的实时控制性能要明显优于PI控制器、相应T1-FLC和相应IT2-FLC. 随后, IT2-FSMC又被应用于3种不同的控制场合, 包括50%参数变化的二阶线性系统、改变连杆特性的倒立摆以及带有不确定和外界干扰的Duffing强迫振荡系统, 并在仿真实验中获得比相应T1-FLC、相应IT2-FLC和相应I型滑模控制器都要好的性能表现^[41]. 最近, 针对具有模型和参数不确定性的柔性关节机器人手控制问题, Chaoui和Gueaieb^[42]提出了能够抵制扭矩和加速度噪音信号影响的IT2-FSMC. 仿真实验同样验证了其对于高不确定性的良好补偿能力. 在逆控制方法中引入IT2-FLS, 则可以充分利用IT2-FLS在不确定环境中对非线性的建模能力. 缆绳驱动并行装置的水平调整被认为是难以建立精确数学模型以实施有效控制的复杂过程, 而IT2-FLS的引入为这种复杂过程的控制问题提供了一种途径^[43]. 如图5所示, 在基于逆控制的IT2-FLC设计中, 首先通过训练基于IT2-FLS的区间II型模糊神经网络(IT2-FNN)建立不确定性对象的离线逆模型, 其中规则后件参数采用迭代最小二乘法估计, 然后将逆模型与对象反馈串联组成逆控制结构. 实时控制实验同样验证了其处理高

不确定性的优势.

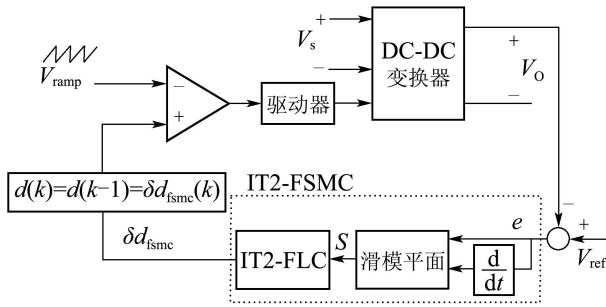


图4 DC-DC变换器区间II型模糊滑模控制

Fig. 4 IT2-FSMC of DC-DC converter

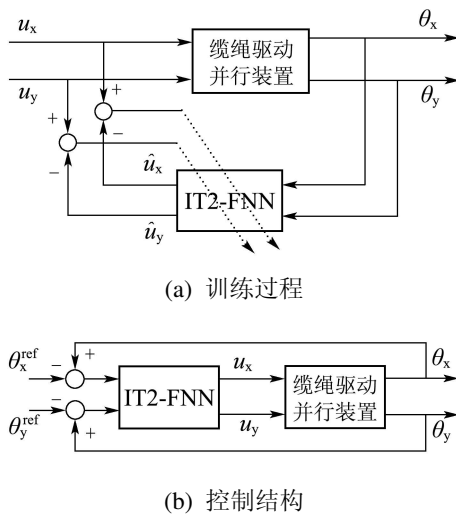


图5 缆绳驱动并行装置II型模糊控制方案

Fig. 5 T2-FLC scheme of cable-driven parallel mechanism

4 II型自适应模糊控制器(T2-AFCs)

虽然非自适应的IT2-FLC获得了广泛应用,但其缺点也是明显的.即使通过最优化算法得到离线优化的控制器,当系统参数具有时变特性时,非自适应的IT2-FLC仍显得能力不足. Mendel^[45]给出了与隶属度函数选择无关的IT2-FLS求导计算公式,解决了IT2-FLS自适应设计中可能遇到的求导问题. Ying^[46]则证明了Mamdani型IT2-FLS的非线性通用逼近特性,为其应用于基于辨识或逼近的非线性控制提供了理论依据^[47].随着IT2-FLS的TR问题得到解决^[14,16,17,48],IT2-AFC逐渐得以实现.并且这些已有的IT2-AFC除特别说明的外,都采用了基于KM算法的COS型TR.

4.1 在线优化II型自适应模糊控制器(On-line optimized T2-AFCs)

在线优化型T2-AFC也即为在线学习型T2-FNN控制器,其实质是一类由前向神经网络实现的T2-FLS.此类控制器的最大优点是可以在T2-FLC中方便引入神经网络强大的学习功能,从而实现模糊

规则前件和后件参数同时自寻优^[49].因此,在T2-AFC研究方面T2-FNN系统及控制器最先受到了广泛关注^[50~62].

1998年, John^[50]首次提出区间II型ANFIS.随后文^[51]设计了基于实数编码GA优化模糊规则前件和后件的IT2-FNN.但文^[50, 51]都没有给出相关的应用实例验证. Méndez和Leduc^[52]提出了基于混合学习算法的IT2-FNN,其中采用梯度下降反向传播(back propagation, BP)算法实现规则前件参数学习,采用递推最小二乘(recursive least squares, RLS)算法或平方根滤波器实现规则后件参数学习.其后, Méndez和Hernandez^[53]又提出另外一种混合学习的IT2-FLS,即在文^[52]的基础上将原有的规则后件参数学习算法替换为正交RLS算法.在分别考虑单值、I型和II型3种模糊化方法的情况下,文^[52, 53]将提出的IT2-FNN应用于建立扁钢热轧机锅垢清除器入口区传动杆的温度预测模型,获得了优于相应I型系统的预测效果.最近, Castro等^[54]则提出混合学习的T-S型IT2-FNN,其中分别采用了BP算法和带自适应学习率的BP算法.在非线性系统辨识和Mackey-Glass混沌时间序列预测中的仿真实验结果表明,文中提出的系统具有比I型ANFIS更好的处理不确定能力.

2004年, Wang等^[55]首次将IT2-FNN应用于控制问题中.他们基于倒车控制设计了基于BP算法动态优化的IT2-FNN控制器,并采用GA在线优化传播律和学习律,同时用Lyapunov方法保证闭环系统的稳定性.但Hagras^[56]指出其用于调节参数的BP方程式存在错误,这将影响到文后的仿真结果.同年, Melin和Castillo^[57]基于二连杆欠驱动机械手(Pendubot)这一类不确定非线性系统给出如图6所示的在线优化型T2-AFC的设计方法.图中基于双曲正切神经元激活函数的区间II型T-S动态模糊模型用于在线建立对象模型,自适应律基于Levenberg-Marquardt算法设计,区间II型T-S模糊控制器则基于建立的对象模型在线镇定^[63].实时控制验证了文中控制器比相应I型控制器在控制精度和效率方面所具有的优势.针对船舶柴油机的速度控制问题, Lynch等分别开发了基于KM算法的嵌入式IT2-FNN控制器^[58],以及基于WM算法的嵌入式实时IT2-FNN控制器^[59],并同时与相应T1-FLC和Viking25(一种商业化非线性PID控制器)进行了实时控制比较实验.结果表明所提两种控制器的性能均明显优于相应T1-FLC和Viking25,而嵌入式实时IT2-FNN控制器在算法复杂度大幅简化的情况下仍具有与嵌入式IT2-FNN控制器非常相近的性能表现.其后, Tan和Kamal^[60]基于非线性pH值中和过程控制问题提出如图7中所示具有比例反馈

和IT2-FNN前馈结构的前馈反馈IT2-FNN控制器,其中使用BP算法实现规则前件和后件参数在线学习.Cao等^[61,62]则基于车辆主动悬架系统给出一种在线优化型IT2-AFC,其中采用最小二乘平均值法调节规则后件参数,并通过仿真实验表明所提控制器的性能能够大幅超过相应I型控制器.此类控制器的不足之处是其控制增益过大.

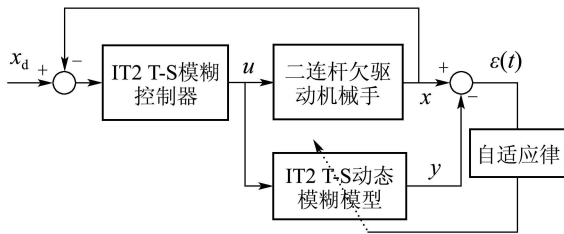


图6 欠驱动机械手的区间II型自适应模糊控制

Fig. 6 IT2-AFC of pendubot

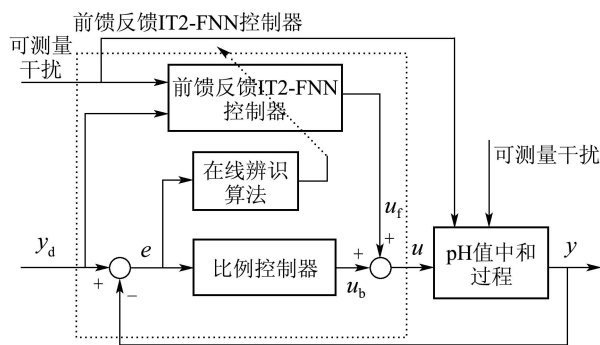


图7 前馈反馈区间II型模糊神经网络控制结构

Fig. 7 Feed-forward feedback IT2-FNN control scheme

4.2 II型基于逼近的自适应模糊控制器(Type-2 approximation-based AFCs, T2-AAFCs)

在线优化型T2-AFC实现直观方便,但也存在一些不足:一是学习速度通常较慢;二是对于某些复杂输入-输出关系存在局部极小值问题;三是一般难以给出系统稳定性和学习算法收敛性的理论分析^[49].反馈线性化、滑模控制、Backstepping设计和Lyapunov综合法等方法与基于模糊逼近的T2-FLC相融合形成了一类T2-AAFC^[64~77],并在一定程度上解决了上述存在的问题.

针对积分链式不确定仿射非线性系统的控制问题,反馈线性化方法的融入形成了一类称为直接型或间接型IT2-AFC的T2-AAFC. Chafaa等^[64,65]首次基于感应电动机控制问题设计了间接型IT2-AFC.但文中的设计方法只是在文[78]的设计框架下用IT2-FLS简单代替T1-FLS,因此在消除逼近误差影响和监督控制器设计方面都还存在诸多问题. Zhou等^[66]指出了文[64]的另一个不足,即其中使用的KM算法迭代计算需要用到当前规则后件模糊集合的升序排列,而后件模糊集合正是需要自适应调整的对象,因此造成了设计矛盾.然后,文[66]基

于不依赖规则后件参数且为闭公式表示的TR^[46]给出间接型IT2-AFC的设计过程.但文中的TR在每次循环周期中计算加权平均的次数达到 2^M 次,因此计算量仍然非常大.文[67]则提出一类捕食与被捕食生物系统的直接型IT2-AFC,但可以看出其只是文[79]中非线性参数化AFC设计方法的简单推广.针对MIMO不确定非线性系统的 H_∞ 性能跟踪问题, Lin等^[68]先是给出直接型IT2-AFC设计方法,接着又给出基于观测器的间接型IT2-AFC设计方法^[69].最近,针对时滞非线性系统 H_∞ 跟踪问题的间接型IT2-AFC也被提出^[70].仿真实验表明文[68~70]提出的控制器在处理未建模动态、外界干扰、逼近误差和训练数据噪音等不确定性方面都具有比相应I型控制器更好的表现.但文[68]中方法要求控制增益函数矩阵为已知或至少部分已知, Pan和Huang^[71]则指出文[70]中的自适应律设计方法是不恰当的,并给出了正确的解决方案.

针对一类严格参数反馈不确定非线性系统, Ezziani等^[72]基于感应式电机的控制问题首次给出了直接型Backstepping IT2-AFC的设计方法.但文中方法需要反复凑试设计参数才能得到稳定的闭环系统,因此实际上并没有严格证明闭环系统的稳定性.把滑模控制结构融入到T2-AFC设计中则形成了一类称为自适应IT2-FMSC的T2-AAFC^[73~75].在非完整轮式移动机器人的轨迹跟踪控制问题中, Hsiao等^[73]针对其中动力学控制和运动学控制问题分别设计了Backstepping控制器和自适应IT2-FMSC.此后, Hsiao等^[74]又在文[73]的基础上改进了控制器的设计,即用IT2-FLC代替文[73]中的Backstepping控制器. Lin^[75]则给出一种称为直接型IT2-FNN自适应滑模控制器的自适应IT2-FMSC,但此控制器必须已知控制增益.仿真结果表明了在不确定存在情况下文[73~75]中控制器均比相应I型控制器具有更好的跟踪性能.

最近, Lin和Chou^[76]针对永磁同步直线电机(PMSLM) X-Y轴运动控制问题设计了如图8所示的IT2-FNN控制器.图中IT2-FNN用于逼近对象的未知部分,带集中不确定自适应估计的鲁棒补偿器用于应对逼近误差、参数误差、外界干扰和泰勒级数高阶项等不确定因素对系统的影响,自适应律用于调整IT2-FNN参数和不确定估计参数.文中的IT2-FNN控制器实质为一类T2-AAFC,其自适应律基于Lyapunov综合法设计,理论上保证了闭环系统的稳定性.随后, Lin等^[77]又把相似的方法应用于超声直线电机跟踪变化等高线的X-Y- θ 轴运动控制中.仿真和实时控制实验一致显示,文[76,77]提出的控制器均具有比相应I型控制器明显要好的鲁棒性和调节性能.

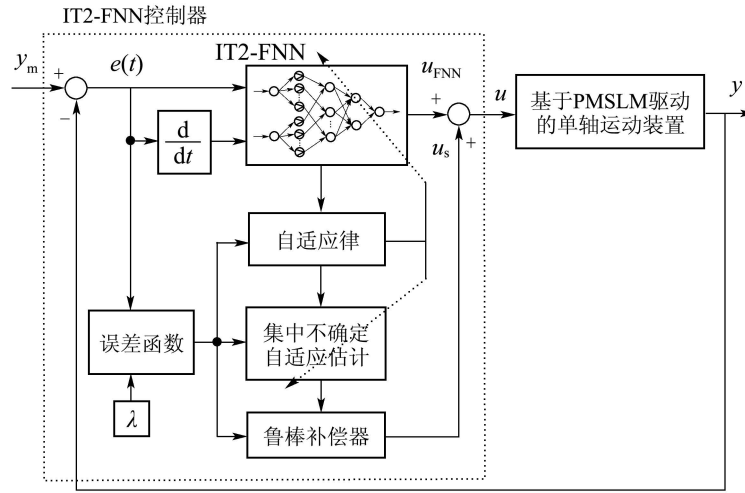


图8 X-Y轴运动系统的IT2-FNN控制

Fig. 8 IT2-FNN control of X-Y axis motion system

5 II型自适应模糊控制器(T2-SOFCs)

实现T2-AAFC需要事先指定模糊系统的结构, 但此种指定通常是非直观的, 因为对象模型和输入输出样本都是非先验的^[80]. T2-AAFC的跟踪性能很大程度上取决于模糊逼近误差的上确界, 适当选取T2-FLS的结构和参数学习方法是提高跟踪性能的有效手段^[81]. 因此, 对于更高级的T2-AAFC, 应该能够同时实现结构和参数在线学习, 而T2-SOFC就是这样一种T2-AAFC. 除了特别说明外, 以下所提方法中的IT2-FLS都采用了基于KM算法的COS型TR.

5.1 II型模糊结构学习方法(Type-2 fuzzy structure learning methods)

II型模糊结构学习一般采用聚类算法, 主要解决规则数量的确定问题^[82]. Zhang等^[83,84]基于改进型模糊C-均值聚类(fuzzy C-means clustering, FCMC)首次提出了IT2-FLS的规则提取方法, 并应用于路口群落交通流的预测与控制问题中. 随后, GT2-FLS的改进型FCMC规则提取方法也被提出^[85]. 为了解决计算复杂性问题, Uncu和Turksen^[86]提出了离散IT2-FLS的FCMC结构辨识方法. Liu等^[87]则在两足机器人步伐的简化切换控制设计问题中提出GT2-FLS新的模糊C-均方聚类结构辨识算法. 最近, Wang等^[88]针对广义II型TS模糊模型建模问题提出了一种改进的最小邻域聚类算法, 其首先通过聚类确定GTS-FS的主隶属度, 然后根据数据的聚类信息采用高斯混合模型得到次隶属度值, 最后用正交最小二乘算法确定模糊规则后件参数. 目前, 上述II型模糊结构学习方法都只能离线进行, 但是为T2-SOFC的实现提

供了重要理论前提.

5.2 II型自组织模糊系统及控制器(Type-2 self-organizing fuzzy systems and controllers)

构建II型自组织模糊系统及控制器的工作是最近才开始进行的^[89~96]. Juang等^[89]最先提出一种Mamdani型自组织IT2-FNN, 其中结构辨识采用在线聚类算法, 规则后件参数辨识采用规则排序型Kalman滤波算法. 把文^[89]中Mamdani型IT2-FLS替换为TSK型IT2-FLS, 再加上基于梯度下降法的规则前件参数辨识, 则得出了一种TSK型自主进化IT2-FNN^[90]. 这种系统先是被应用于非线性系统辨识问题中^[90], 随后又被应用于非线性系统建模、自适应消噪和混沌信号预测问题中^[91]. 然后Juang等^[92]提出了TSK型递归IT2-FNN, 其学习结构与文^[89]的IT2-FNN完全相同, 并指出此类神经网络特别适合处理带有时变特性的问题. 接着Juang等^[93]又提出TSK型自主进化递归IT2-FNN, 即在文^[92]的基础上加上基于梯度下降法的前件参数辨识和内部反馈环权值学习算法. 此系统被应用于动态系统辨识和混沌信号预测问题中. 基于 α -平面表示理论^[97,98], Jeng等^[94]首次设计了TSK型的广义II型模糊神经网络(GT2-FNN), 其中采用相似模糊聚类和最小二乘线性回归实现结构辨识, 采用PSO和RLS算法分别实现规则前件和后件参数的估计.

以上II型自组织模糊系统都未曾在控制问题中得到应用. 最近, Juang和Hsu^[95]首次给出了区间II型自组织模糊控制器(IT2-SOFC)的设计方法, 其中采用Q值辅助加强型局部-全局蚁群优化算法同时实现结构和后件参数在线学习, 并应用于倒车

控制、磁悬浮控制和混沌系统控制问题中. 为了实现简化运算, Juang和Hsu^[96]进一步提出改进型IT2-SOFC, 其中采用上下端点型TR代替文[94]中基于KM算法的迭代TR, 并应用于轮式移动机器人曲线障碍物边缘跟随控制问题中. 文[95,96]中的实验结果都验证了所提方法在处理测量噪音和环境不确定中的优越性, 但均未给出闭环系统稳定性和学习算法收敛性的理论分析.

6 结论与展望(Conclusions and prospects)

综上所述, II型模糊集合及系统的理论体系已经基本建立, 非自适应IT2-FLC在现实环境的实时控制中获得了成功应用, T2-AFC和T2-SOFC研究也相继取得了不少成果. 但是由于T2-FS内在的复杂性, 目前T2-FLC的研究成果都还存在诸多不足, 特别是T2-AFC和T2-SOFC的理论研究均还不够成熟, 其实际应用成果则更少. 以下给出T2-FLC进一步研究问题的展望.

首先, 关于非自适应T2-FLC的进一步简化问题. 主要研究内容包括: 1) 实际应用中IT2-FLC的TR方法都还停留在使用KM算法或WM算法的阶段, 目前已经提出的减少TR迭代次数^[99~101]和回避迭代TR^[14,102,103]的许多方法都还未得到实际应用. 因此, 利用这些TR方法得到实时性更好的IT2-FLC将很具有现实意义. 2) 目前关于GT2-FLC的研究成果还比较少, 在理论和实践中都还有很多工作需要完成. 对于这方面的研究, 可以进一步深化三角函数T2-FS理论^[104]、 α -平面表示理论^[97]和 z -切片表示理论^[26]等GT2-FS简化理论, 以得到可以精确计算并实时执行的GT2-FLC. 3) 高维模糊系统的规则爆炸是至今没有得到很好解决的难题, 目前在T2-FLC中的相关成果还非常少. 解决这个问题有3个可行途径: 一是采用精简规则的简约型T2-FLC^[105,106], 二是采用分层的T2-FLC结构^[18], 三是将并规则结构模糊系统方法拓展到T2-FLC中^[107].

其次, 关于T2-AFC自适应律设计中的相关问题. 主要体现在: 1) 目前IT2-AFC的设计基本上照搬了相应I型控制器的设计方法, 因此延续了I型控制器原有的设计难题, 例如模糊逼近误差的处理问题, 自适应参数的收敛问题等. 这方面的研究工作在II型系统中仍有必要继续进行. 2) IT2-AFC中广泛使用的基于KM算法的迭代TR有两个缺陷: 一是不能得到闭公式表示, 这给相关的求导运算带来很大困难, 并且将直接增加计算复杂性^[108]; 二是这种迭代算法会在自适应律设计过程中造

成设计矛盾^[66]. 寻求闭公式表示的TR^[14,104]有助于解决IT2-AFC的自适应律设计问题. 3) 目前对GT2-AFC的研究还处于空白, 而GT2-FS简化理论和TR闭公式表示的研究, 将有助于实现GT2-AFC并达到实时执行的要求.

最后, 关于T2-SOFC的结构在线学习、稳定性和收敛性分析等问题. 由于T2-FS采用三维的隶属度函数表示, 因此T2-FLC的结构学习比T1-FLC要困难得多, 并且当模糊系统维数增加时, 将面临更加困难的稀疏数据学习问题. 目前已有关于T2-FLS结构学习的聚类方法大多只能离线进行, 因此不能直接应用到T2-SOFC的设计中. 文[95, 96]中目前仅有关于IT2-SOFC的研究成果则缺乏对系统稳定性和算法收敛性的理论分析. T2-SOFC进一步研究的可行思路是将T2-FLC与神经网络、GA、PSO、支持向量机^[109,110]等非模糊控制方法相结合, 使之能够尽可能多地利用各种不同形式的信息, 以期在系统稳定性、算法收敛性、稀疏数据学习、计算复杂性等方面的难题中取得突破.

参考文献(References):

- [1] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. *Information and Control*, 1965, 8(13): 338 – 353.
- [2] COUPLAND S, JOHN R I. Type-2 fuzzy logic and the modelling of uncertainty[M] // *Fuzzy Sets and Their Extensions: Representation, Aggregation and Models*. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 3 – 22.
- [3] 张化光. 模糊双曲正切模型: 建模·控制·应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
(ZHANG Huguang. *Fuzzy Hyperbolic Tangent Model: Modeling, Control and Applications*[M]. Beijing: Science Press, 2009.)
- [4] 王立新. 模糊系统: 挑战与机遇并存-十年研究之感悟[J]. *自动化学报*, 2001, 27(4): 585 – 590.
(WANG Lixin. Fuzzy systems: challenges and chance-my experiences and perspectives[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(4): 585 – 590.)
- [5] KARNIK N N, MENDEL J M, LIANG Q. Type-2 fuzzy logic systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1999, 7(6): 643 – 658.
- [6] MENDEL J M, JOHN R I. Type-2 fuzzy sets made simple[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2002, 10(2): 117 – 127.
- [7] HAGRAS H. Type-2 FLCs: A new generation of fuzzy controllers[J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2007, 2(1): 30 – 43.
- [8] MENDEL J M. Type-2 fuzzy sets: Some questions and answers[J]. *IEEE Neural Networks Society Newsletter*, 2003, 1: 10 – 13.
- [9] MENDEL J M. Type-2 fuzzy sets and systems: an overview[J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2007, 2(1): 20 – 29.
- [10] ZADEH L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I[J]. *Information Sciences*, 1975, 8(1): 199 – 249.
- [11] HISDAL E. The IF THEN ELSE statement and interval-valued fuzzy sets of higher type[J]. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1981, 15(44): 385 – 455.

- [12] HAGRAS H. Type-2 fuzzy logic controllers: a way forward for fuzzy systems in real world environments[M] // *Computational Intelligence: Research Frontiers*. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 181 – 200.
- [13] AISBETT J, RICKARD J T, MORGENTHALER D G. Type-2 fuzzy sets as functions on spaces[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, in press, doi: 10.1109/TFUZZ.2010.2046176.
- [14] MENDEL J M. Advances in type-2 fuzzy sets and systems[J]. *Information Sciences*, 2007, 177(1): 84 – 110.
- [15] KARNIK N N, MENDEL J M. Operations on type-2 fuzzy sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 122(2): 327 – 348.
- [16] KARNIK N N, MENDEL J M. Centroid of a type-2 fuzzy set[J]. *Information Sciences*, 2001, 132(1): 195 – 220.
- [17] WU H, MENDEL J M. Uncertainty bounds and their use in the design of interval type-2 fuzzy logic systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2002, 10(5): 622 – 639.
- [18] HAGRAS H. A hierarchical type-2 fuzzy logic control architecture for autonomous mobile robots[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2004, 12(4): 524 – 539.
- [19] FIGUEROA J, POSADA J, SORIANO J, et al. A type-2 fuzzy logic controller for tracking mobile objects in the context of robotic soccer games[C] // *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Reno, USA: IEEE, 2005: 359 – 364.
- [20] LYNCH C, HAGRAS H, CALLAGHAN V. Embedded type-2 FLC for real-time speed control of marine and traction diesel engines[C] // *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Reno, USA: IEEE, 2005: 347 – 352.
- [21] COUPLAND S, GONGORA M, JOHN R I, et al. A comparative study of fuzzy logic controllers for autonomous robots[C] // *Proceedings of the 2006 Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-based Systems conference*. Paris, France: [s.n.], 2006: 1332 – 1339.
- [22] COUPLAND S, JOHN R I. Geometric type-1 and type-2 fuzzy logic systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2006, 15(1): 3 – 15.
- [23] COUPLAND S, JOHN R I. A fast geometric method for defuzzification of type-2 fuzzy sets[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2008, 16(4): 929 – 941.
- [24] COUPLAND S, WHEELER J, GONGORA M. A generalised type-2 fuzzy logic system embedded board and integrated development environment[C] // *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Hong Kong, China: IEEE, 2008: 681 – 687.
- [25] WAGNER C, HAGRAS H. zSlices based general type-2 FLC for the control of autonomous mobile robots in real world environments[C] // *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Jeju Island, Korea: IEEE, 2009: 718 – 725.
- [26] WAGNER C, HAGRAS H. Towards general type-2 fuzzy logic systems based on zSlices[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, doi: 10.1109/TFUZZ.2010.2045386.
- [27] WAGNER C, HAGRAS H. Slices-towards bridging the gap between interval and general type-2 fuzzy logic[C] // *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Hong Kong, China: IEEE, 2008: 489 – 497.
- [28] SEPULVEDA R, CASTILLO O, MELIN P, et al. Experimental study of intelligent controllers under uncertainty using type-1 and type-2 fuzzy logic[J]. *Information Sciences*, 2007, 177(10): 2023 – 2048.
- [29] LI S, ZHANG X. Fuzzy logic controller with interval-valued inference for distributed parameter system[J]. *International Journal of Innovative Computing Information and Control*, 2006, 2(6): 1197 – 1206.
- [30] GALLUZZO M, COSENZA B, MATHARU A. Control of a nonlinear continuous bioreactor with bifurcation by a type-2 fuzzy logic controller[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2008, 32(12): 2986 – 2993.
- [31] GALLUZZO M, COSENZA B. Control of the biodegradation of mixed wastes in a continuous bioreactor by a type-2 fuzzy logic controller[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2009, 33(9): 1475 – 1483.
- [32] GALLUZZO M, COSENZA B. Control of a non-isothermal CSTR by type-2 fuzzy logic controllers[M] // *Fuzzy Logic and Applications*. Berlin: Springer-Verlag, 2009: 295 – 302.
- [33] 李莉, 孙玉坤. 基于Type-2模糊系统的青霉素发酵过程控制[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2009, 30(1): 66 – 69.
(LI Li, SUN Yukun. Control of penicillin fermentation by type-2 fuzzy logic system[J]. *Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition)*, 2009, 30(1): 66 – 69.)
- [34] JANG J R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1993, 23(3): 665 – 685.
- [35] WU D, TAN W W. Genetic learning and performance evaluation of interval type-2 fuzzy logic controllers[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2006, 19(8): 829 – 841.
- [36] WU D, TAN W W. A simplified type-2 fuzzy logic controller for real-time control[J]. *ISA Transactions*, 2006, 45(4): 503 – 516.
- [37] CASTILLO O, MELIN P. *Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Application*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [38] MARTINEZ R, CASTILLO O, AGUIL L T. Optimization of interval type-2 fuzzy logic controllers for a perturbed autonomous wheeled mobile robot using genetic algorithms[J]. *Information Sciences*, 2009, 179(13): 2158 – 2174.
- [39] 曹江涛, 李平, 刘洪海. 一种改进的区间二型模糊控制器设计[J]. 控制与决策, 2009, 24(10): 1597 – 1600.
(CAO Jiangtao, LI Ping, LIU Honghai. Improved interval type-2 fuzzy logic controller[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(10): 1597 – 1600.)
- [40] LIN P, LIN C, HSU C, et al. Type-2 fuzzy controller design using a sliding-mode approach for application to DC-DC converters[J]. *IEEE Proceedings: Electric Power Applications*, 2005, 152(6): 1482 – 1488.
- [41] HSIAO M, LI T S, LEE J, et al. Design of interval type-2 fuzzy sliding-mode controller[J]. *Information Sciences*, 2008, 178(6): 1696 – 1716.
- [42] CHAOU I H, GUEAIEB W. Type-2 fuzzy logic control of a flexible-joint manipulator[J]. *Journal of Intelligent Robotic Systems*, 2008, 51(2): 159 – 186.
- [43] LI C, YI J, YU Y, et al. Inverse control of cable-driven parallel mechanism using type-2 fuzzy neural network[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 36(3): 459 – 464.
- [44] LIN P, HSU C, LEE T. Type-2 fuzzy logic controller design for buck DC-DC converters[C] // *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Reno, USA: IEEE, 2005: 365 – 370.
- [45] MENDEL J M. Computing derivatives in interval type-2 fuzzy logic systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2004, 12(1): 84 – 98.
- [46] YING H. General interval type-2 Mamdani fuzzy systems are universal approximators[C] // *Proceedings of the 2008 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society*. New York, USA: [s.n.], 2008: 1 – 6.
- [47] WANG L. Stable adaptive fuzzy controllers with application to inverted pendulum tracking[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 1996, 25(5): 677 – 691.

- [48] MENDEL J M, LIU F. Super-exponential convergence of the Karnik-Mendel algorithms for computing the centroid of an interval type-2 fuzzy set[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2007, 15(2): 309 – 320.
- [49] 丛爽. 几种模糊神经网络系统关系的对比研究[J]. 信息与控制, 2001, 30(6): 486 – 491.
(CONG Shuang. Comparative research on relationships between several fuzzy-neural network systems[J]. *Information and Control*, 2001, 30(6): 486 – 491.)
- [50] JOHN R I, CZARNECKI C. A type 2 adaptive fuzzy inferencing system[C] // *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. San Diego, USA: IEEE, 1998, 2: 2068 – 2073.
- [51] LEE C, HONG J, LIN Y, et al. Type-2 fuzzy neural network systems and learning[J]. *International Journal of Computational Cognition*, 2003, 1(4): 79 – 90.
- [52] MENDEZ G M, LEDUC L A. Hybrid Learning algorithm for interval type-2 fuzzy logic systems[J]. *Control and Intelligent Systems*, 2006, 34(3): 206 – 215.
- [53] MENDEZ G M, HERNANDEZ M. Hybrid learning for interval type-2 fuzzy logic systems based on orthogonal least-squares and back-propagation methods[J]. *Information Sciences*, 2009, 179(13): 2146 – 2157.
- [54] CASTRO J R, CASTILLO O, MELIN P, et al. A hybrid learning algorithm for a class of interval type-2 fuzzy neural networks[J]. *Information Sciences*, 2009, 179(13): 2175 – 2193.
- [55] WANG C, CHENG C, LEE T. Dynamical optimal training for interval type-2 fuzzy neural network(T2FNN)[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2004, 34 (3): 1462 – 1477.
- [56] HAGRAS H. Comments on “Dynamical optimal training for interval type-2 fuzzy neural network(T2FNN)”[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B-Cybernetics*, 2006, 36(5): 1206 – 1209.
- [57] MELIN P, CASTILLO O. A new method for adaptive control of nonlinear plants using type-2 fuzzy logic and neural networks[J]. *International Journal of General Systems*, 2004, 33(2): 289 – 304.
- [58] LYNCH C, HAGRAS H, CALLAGHAN V. Embedded interval type-2 neuro-fuzzy speed controller for marine diesel engines[C] // *Proceedings of the 2006 Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-based Systems conference*. Paris, France: [s.n.], 2006: 1340 – 1347.
- [59] LYNCH C, HAGRAS H, CALLAGHAN V. Using uncertainty bounds in the design of an embedded real-time type-2 neuro-fuzzy speed Controller for marine diesel engines[C] // *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Vancouver, Canada: IEEE, 2006: 1446 – 1453.
- [60] TAN W W, KAMAL D H. On-line learning rules for type-2 fuzzy controller[C] // *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Vancouver, Canada: IEEE, 2006: 513 – 520.
- [61] CAO J, LIU H, LI P, et al. Adaptive fuzzy logic controller for vehicle active suspensions with interval type-2 fuzzy membership functions[C] // *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Jeju Island, Korea: IEEE, 2008: 84 – 89.
- [62] CAO J, LIU H, LI P, et al. An interval type-2 fuzzy logic controller for quarter-vehicle active suspensions[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2008, 222(8): 1361 – 1373.
- [63] LAM H K, SENEVIRATNE L D. Stability analysis of interval type-2 fuzzy-model-based control systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2008, 38(3): 617 – 628.
- [64] CHAFAA K, SAIDI L, GHANAI M, et al. Indirect adaptive interval type-2 fuzzy control for nonlinear systems[J]. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2007, 2(2): 106 – 119.
- [65] CHAFAA K, LAAMARI Y, BARKATI S, et al. Adaptive type-2 fuzzy control for induction motor[C] // *Proceedings of the 2008 International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*. Amman, Jordan: [s.n.], 2008: 1 – 6.
- [66] ZHOU H, YING H, DUAN J. Adaptive control using interval type-2 fuzzy logic[C] // *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Jeju Island, Korea: IEEE, 2009: 836 – 841.
- [67] 李医民, 欧阳仁蓉. Lotka-Volterra系统II型模糊自适应控制方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2009, 29(4): 365 – 368.
(LI Yimin, OUYANG Renrong. Type-2 fuzzy adaptive control method of Lotka-Volterra system[J]. *Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition)*, 2009, 29(4): 365 – 368.)
- [68] LIN T, LIU H, KUO M. Direct adaptive interval type-2 fuzzy control of multivariable nonlinear systems[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, 22(3): 420 – 430.
- [69] LIN T, ROOPAEI M. Based on interval type-2 adaptive fuzzy H_{∞} tracking controller for SISO time-delay nonlinear systems[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(12): 4065 – 4075.
- [70] LIN T. Observer-based robust adaptive interval type-2 fuzzy tracking control of multivariable nonlinear systems[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2010, 23(3): 386 – 399.
- [71] PAN Y, HUANG D. Comment on “Based on interval type-2 adaptive fuzzy H_{∞} tracking controller for SISO time-delay nonlinear systems”[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011, 16(3): 1693 – 1696.
- [72] EZZIANI N, HUSSAIN A, ESSOUNBOULI N, et al. Backstepping adaptive type-2 fuzzy controller for induction machine[C] // *Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Cambridge, UK: IEEE, 2008: 443 – 448.
- [73] HSIAO M, CHEN C, LI T S. Interval type-2 adaptive fuzzy sliding-mode dynamic control design for wheeled mobile robots[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2008, 10(4): 268 – 275.
- [74] HSIAO M, CHEN C, TSAI S, et al. Combined interval type-2 fuzzy kinematic and dynamic controls of the wheeled mobile robot with adaptive sliding-mode technique[C] // *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Jeju Island, Korea: IEEE, 2009: 706 – 711.
- [75] LIN T. Based on interval type-2 fuzzy-neural network direct adaptive sliding mode control for SISO nonlinear systems[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(12): 4084 – 4099.
- [76] LIN F, CHOU P. Adaptive control of two-axis motion control system using interval type-2 fuzzy neural network[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(1): 178 – 193.
- [77] LIN F, CHOU P, SHIEH P, et al. Robust control of an LUSM-based $X-Y-\theta$ motion control stage using an adaptive interval type-2 fuzzy neural network[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2009, 17(1): 24 – 38.
- [78] WANG L. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1993, 1(2): 146 – 155.
- [79] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
(WANG Lixin. *A Course of Fuzzy Systems & Control*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)
- [80] FARRELL J A, POLYCARPOU M M. *Adaptive Approximation based Control: Unifying Neural, Fuzzy and Traditional Adaptive Approximation Approaches*[M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

- [81] ZHAO Y, FARRELL J A. Self-organizing approximation-based control for higher order systems[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2007, 18(4): 1220 – 1231.
- [82] 肖建, 白裔峰, 于龙. 模糊系统结构辨识综述[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(2): 135 – 142.
(XIAO Jian, BAI Yifeng, YU Long. Overview of fuzzy system structure identification[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2006, 41(2): 135 – 142.)
- [83] 张伟斌, 胡怀中, 刘文江. 基于二型模糊逻辑的交通流量预测[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(10): 1160 – 1164.
(ZHANG Weibin, HU Huaizhong, LIU Wenjiang. Traffic flow forecast based on type-2 fuzzy logic approach[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, 41(10): 1160 – 1164.)
- [84] 张伟斌, 胡怀中, 刘文江. 路口群落交通流的区间二型模糊预测与多级模糊控制[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(7): 111 – 118.
(ZHANG Weibin, HU Huaizhong, LIU Wenjiang. Traffic forecast of type-2 fuzzy logic and multilayer fuzzy control for intersections community[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2008, 28(7): 111 – 118.)
- [85] 张伟斌, 胡怀中, 刘文江. 二型模糊系统的规则提取算法[J]. 控制与决策, 2009, 24(3): 435 – 439.
(ZHANG Weibin, HU Huaizhong, LIU Wenjiang. Rules extraction algorithm of type-2 fuzzy systems[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(3): 435 – 439.)
- [86] UNC U O, TURKSEN I B. Discrete interval type 2 fuzzy system models using uncertainty in learning parameters[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2007, 15(1): 90 – 106.
- [87] LIU Z, ZHANG Y, WANG Y. A type-2 fuzzy switching control system for biped robots[J]. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2007, 37(6): 1202 – 1213.
- [88] 王梦灵, 李柠, 李少远. 带有测量噪声的 II 型 T-S 模糊建模[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(10): 1957 – 1961.
(WANG Mengling, LI Ning, LI Sgaoyuan. Type-2 T-S fuzzy modeling for the dynamic systems with measurement noise[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(10): 1957 – 1961.)
- [89] JUANG C, TSAO Y. A type-2 self-organizing neural fuzzy system and its FPGA implementation[J]. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2008, 38(6): 1537 – 1548.
- [90] JUANG C, LU C, TSAO Y. A self-evolving interval type-2 fuzzy neural network for nonlinear systems identification[C] // *Proceedings of the 2008 World Congress of International Federation of Automatic Control*. Seoul, Korea: [s.n.], 2008: 7588 – 7593.
- [91] JUANG C, TSAO Y. A self-evolving interval type-2 fuzzy neural network with online structure and parameter learning[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2008, 16(6): 1411 – 1424.
- [92] JUANG C, LIN Y, CHUNG I. Dynamic system identification using a type-2 recurrent fuzzy neural network[C] // *Proceedings of the 2009 Asian Control Conference*. Hong Kong, China: [s.n.], 2009: 768 – 772.
- [93] JUANG C, HUANG R, LIN Y. A recurrent self-evolving interval type-2 fuzzy neural network for dynamic system processing[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2009, 17(5): 1092 – 1105.
- [94] JENG W R, YEH C, LEE S. General type-2 fuzzy neural network with hybrid learning for function approximation[C] // *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Jeju Island, Korea: IEEE, 2009: 1534 – 1539.
- [95] JUANG C, HSU C. Reinforcement interval type-2 fuzzy controller design by online rule generation and Q-value-aided ant colony optimization[J]. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2009, 39(6): 1528 – 1542.
- [96] JUANG C, HSU C. Reinforcement ant optimized fuzzy controller for mobile-robot wall-following control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(10): 3931 – 3940.
- [97] MENDEL J M, LIU F, ZHAI D. α -plane representation for type-2 fuzzy sets: theory and applications[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2009, 17(5): 1189 – 1207.
- [98] MENDEL J M. Comments on “ α -plane Representation for Type-2 Fuzzy Sets: theory and applications” [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2010, 18(1): 229 – 230.
- [99] WU D, MENDEL J M. Enhanced Karnik-Mendel algorithms[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2009, 17(4): 923 – 934.
- [100] DURAN K, BERNAL H, MELGAREJO M. Improved iterative algorithm for computing the generalized centroid of an interval type-2 fuzzy set[C] // *Proceedings of the 2008 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society*. New York, USA: [s.n.], 2008: 1 – 6.
- [101] MELGAREJO M. A fast recursive method to compute the generalized centroid of an interval type-2 fuzzy set[C] // *Proceedings of the 2007 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society*. San Diego, USA: [s.n.], 2007: 190 – 194.
- [102] NIEWIADOMSKI A, OCHELSCA J, SZCZEPANIAK P S. Interval-valued linguistic summaries of databases[J]. *Control and Cybernetics*, 2006, 35(2): 415 – 443.
- [103] GREENFIELD S, CHICLANA F, COUPLAND S, et al. The collapsing method of defuzzification for discretised interval type-2 fuzzy sets[J]. *Information Sciences*, 2009, 179(13): 2055 – 2069.
- [104] STARCZEWSKI J T. Efficient triangular type-2 fuzzy logic systems[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2009, 50(5): 799 – 811.
- [105] LIANG Q, MENDEL J M. Designing interval type-2 fuzzy logic systems using an SVD-QR method: rule reduction[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2000, 15(10): 939 – 957.
- [106] ZHOU S, GARIBALDI J M, JOHN R I, et al. On constructing parsimonious type-2 fuzzy logic systems via influential rule selection[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2009, 17(3): 654 – 667.
- [107] COMBS W E, ANDREWS J E. Combinatorial rule explosion eliminated by a fuzzy rule configuration[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1998, 6(1): 1 – 11.
- [108] LIANG Q, MENDEL J M. Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2000, 8(5): 535 – 549.
- [109] CHEN X, LI Y, HARRISON R, et al. Type-2 fuzzy logic-based classifier fusion for support vector machines[J]. *Applied Soft Computing*, 2008, 8(3): 1222 – 1231.
- [110] JUANG C F, HUANG R B, CHENG W Y. An interval type-2 fuzzy neural network with support vector regression for noisy regression problems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, doi: 10.1109/TFUZZ.2010.2046904.

作者简介:

潘永平 (1982—), 男, 博士研究生, 研究方向为模糊系统及模糊控制、非线性自适应控制, E-mail: pan.yip@email.scut.edu.cn;

黄道平 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能检测与智能控制, E-mail: audhuang@scut.edu.cn;

孙宗海 (1974—), 男, 副研究员, 研究方向为复杂系统建模与控制, E-mail: sunzh@scut.edu.cn.