模糊双曲正切模型研究综述

会国涛 [1]　张化光 [1,2]　汪 刚 [1]　解相朋 [3]　吴振宁 [1]

摘 要 模糊双曲正切模型 (Fuzzy hyperbolic tangent model, FHM) 是一种全局模糊模型也是一种神经网络模型. 根据此模型设计的控制器能够实现系统的性能指标达到最优. FHM 与其他模糊模型相比, 更加适用于对多变量及系统内部信息所知有限的非线性系统进行建模. 本文依据 FHM 的模型发展历程对现有的研究成果加以总结, 并对这一研究领域内待解决的问题和未来发展方向作了进一步的展望.

关键词 模糊双曲正切模型, 广义模糊双曲正切模型, 时滞模糊双曲正切模型, 神经网络

引用格式 会国涛, 张化光, 汪刚, 解相朋, 吴振宁. 模糊双曲正切模型研究综述. 自动化学报, 2013, **39**(11): 1849−1857

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.01849

Research on Fuzzy Hyperbolic Tangent Model: A Review

HUI Guo-Tao[1]　ZHANG Hua-Guang[1,2]　WANG Gang[1]　XIE Xiang-Peng[3]　WU Zhen-Ning[1]

Abstract Fuzzy hyperbolic tangent model (FHM) is a global fuzzy model and also a neural network model. The controller based on the FHM can achieve the optimal performance index of the whole system. Compared to the existing fuzzy models, the FHM is more suitable to model a multi-variable nonlinear system, in which the information of plant is insufficient. This paper presents a survey of achievements in order of the development on the modeling of FHM. Finally, the problems and the future research direction are analyzed and discussed.

Key words Fuzzy hyperbolic tangent model (FHM), general fuzzy hyperbolic tangent model, delay fuzzy hyperbolic tangent model, neural network

Citation Hui Guo-Tao, Zhang Hua-Guang, Wang Gang, Xie Xiang-Peng, WU Zhen-Ning. Research on fuzzy hyperbolic tangent model: a review. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(11): 1849−1857

自从美国加州大学的 Zadeh 教授创立模糊集理论[1] 及提出模糊控制基本原理[2] 以来, 模糊控制理论无论在理论和应用上都得到了广泛的发展并成为自动控制领域中一个非常活跃且硕果累累的分支[3−10]. 其根源在于采用模糊推理方法能够有效地解决复杂非线性系统的描述、分析及控制等问题. 此外, 模糊控制与传统的控制技术相比, 具有诸如不需要被控对象的精确模型、鲁棒性强、能够处理复杂甚至 "病态" 系统等优点. 鉴于这些优点, 许多专家和学者认为模糊控制技术将是本世纪最重要的控制技术之一[11−13]. 然而, 对于模糊控制领域研究人员来讲, 需要清醒地意识到模糊控制理论的发展还不完善, 不同于其他领域, 模糊控制理论的发展目前面临着一个重要约束, 即缺乏一个常规完备的控制基础理论作为指导, 从而能够形成一个可遵循的通用设计准则. 自上世纪 90 年代后期, 随着科技的迅猛发展, 与人类生活和生产相关的如电力系统、经济系统、生态系统、计算机通信系统、工业控制系统等均出现了高度复杂化和高度智能化的发展趋势. 这就要求模糊控制理论的研究人员要在大量的生产实践当中不断地对模糊建模和模糊控制技术进行探索, 进一步丰富和发展模糊控制理论, 从而满足时代发展的需要. 模糊双曲正切模型 (Fuzzy hyperbolic tangent model, FHM) 及相关控制技术正是在这种需求的驱动下被提出并展开研究的.

FHM 是由张化光等于 2000 年和 2001 年在文献 [14−15] 中首次提出的. 在 FHM 被提出之前, 已有的研究成果所考虑的模糊模型主要有三种: 1) 模糊关系模型[16−17]; 2) T-S 模糊模型[18−19]; 3) 模糊动态模型[20−22]. 模糊关系模型的建模思想在于通过在输入空间和输出空间之间建立一个模糊映射从而

收稿日期 2013-07-02　录用日期 2013-08-28
Manuscript received July 2, 2013; accepted August 28, 2013
国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2009CB320601), 国家自然科学基金 (61034005, 61374124), 中国博士后科学基金 (2013M542018) 资助
Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB320601), National Natural Science Foundation of China (61034005, 61374124), and China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (2013M542018)
庆祝《自动化学报》创刊 50 周年专刊约稿
Invited Articles for the Special Issue for the 50th Anniversary of Acta Automatica Sinica
1. 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819　2. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110819　3. 华中科技大学控制系 武汉 430074
1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819　2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Shenyang 110819　3. Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

构造一个近似理想的控制行为. T-S 模糊模型是基于输入模糊划分的思想, 通过隶属函数将一系列用于表示子系统的线性方程连接为一个全局模型, 从而实现对一类非常广泛的静态或动态非线性系统进行逼近. 这里需要特别指出的是, 模糊关系模型和 T-S 模糊模型中的每一条模糊规则都是一个局部模型, 每一个模型的输出也仅仅是一个局部输出. 然而, 局部模型并不能代表真实的动态系统. 当进行模糊控制器的设计时, 局部稳定性和全局稳定性之间由于形成不了充要判别条件从而导致设计变得非常困难. 区别于以上两种模型, 模糊动态模型是基于 T-S 模糊模型基础之上提出的一个全局模型. 通过模糊隶属函数将多个描述系统动态的线性方程光滑地连接起来, 从而将全局稳定的控制器设计问题转化为各局部子系统稳定控制器的设计问题. 尽管模糊动态模型构造了一个全局模型, 但由于光滑约束条件的存在, 设计者在隶属函数以及相关参数的确定问题上很难找到一个有效且通用的解决方法. 区别于上述三种主要的模糊模型, 由于 FHM 是一种全局模糊模型, 基于此模型进行的稳定性分析及控制器的设计将有效地回避之前所提到的约束和缺点. 此外, 针对多变量非线性对象, FHM 相比于其他模糊模型对控制对象的信息需求量较少. 只要状态变量的导数和用于描述 "输入–输出" 的模糊推理关系已知, 便可得到用于描述复杂非线性系统的 FHM.

模型参数辨识也是在模糊建模过程中的一个重要技术, 其关系到所建立的模糊模型是否能够高度逼近被建模的对象. 迄今为止, 广大研究人员针对上述三个主要模糊模型提出了很多辨识算法, 如模糊聚类方法[23−25]、动态规划理论[26−30]、基于神经网络和遗传算法的模糊辨识等[31−35]. 尽管这些方法取得了不错的效果, 但是还没有达到完善的程度. 本质上来讲, 辨识技术的评价包含两个指标, 一个是辨识精度, 另外一个是辨识速度. 两者之间是一种既统一又矛盾的关系. 相对于其他模糊模型来讲, FHM 可以通过神经网络的拓扑结构来实现. 基于这个特点, 很多基于遗传算法的辨识技术可以应用其中. 在文献 [35] 中, 作者提出了遗传算法不仅能够实现模糊系统的全局优化, 而且辨识精度较高, 但缺点是寻优过程一般需要较长时间. 针对这一问题, 近些年来大量能够加快辨识速度的改进型遗传算法被提出[36−39], 这也为 FHM 的广泛应用提供了有力的理论和技术支持. 此外, 影响辨识速度的另外一个原因是辨识的复杂性, 即模型中需要辨识的未知参数的数量. 当输入变量个数和模糊子空间个数采取相同条件时, FHM 同 T-S 模糊模型相比具有辨识参数少、辨识速度快的特点. 因此, FHM 更适合对复杂性高的非线性系统进行建模.

自 FHM 提出以来, 相关的理论和应用研究也逐渐展开. 针对不同类型的非线性对象, FHM 被发展为广义模糊双曲正切模型、时滞模糊双曲正切模型以及相应的带有随机性质的模糊随机双曲正切模型等. 此外, 基于这些模型的系统控制、滤波、混沌等问题的研究均取得了非常有意义的成果. 本文将基于这些研究成果对 FHM 的研究现状进行总体的回顾. 从模型发展角度概括为以下 4 个部分: 第 1 节, FHM 的研究现状概述; 第 2 节, 广义模糊双曲正切模型 (Generalized fuzzy hyperbolic model, GFHM) 的研究现状概述; 第 3 节, 时滞模糊双曲正切模型 (Time delays based on fuzzy hyperbolic model, DFHM) 的研究现状概述; 第 4 节, 有待解决的问题以及未来的发展方向.

1 FHM 的研究现状概述

1.1 FHM 的描述

双曲正切型模糊规则基的第 l 条模糊规则可以被表示为如下形式[14−15]:

$$\begin{aligned}R^l: &\text{IF } x_1 \text{ is } F_{x_1} \text{ and } x_2 \text{ is } F_{x_2} \cdots \text{and } x_n \text{ is } F_{x_n}\\ &u_1 \text{ is } F_{u_1} \text{ and } u_2 \text{ is } F_{u_2} \cdots \text{and } u_p \text{ is } F_{u_p}\\ &\text{THEN } \dot{x}_l = \pm c_{x_1} \pm \cdots \pm c_{x_n} \pm c_{u_1} \pm \cdots \pm c_{u_p},\\ &l = 1, 2, \cdots, L\end{aligned} \tag{1}$$

其中, 状态变量为 $x = (x_1(t), \cdots, x_n(t))^{\mathrm{T}}$; 输入变量为 $u = (u_1(t), \cdots, u_p(t))^{\mathrm{T}}$; 模糊子集 F_{x_i} 和 F_{u_j} 均包括正 (P) 和负 (N) 两个语言值; c_{x_i} 和 c_{u_j} 是与模糊子集对应的正常数且前面的符号与模糊子集的语言值相关联; c_{x_i} 或 c_{u_j} 与状态变量或输入变量是一一对应的; 当第 l 条模糊规则的 IF 部分包括 m 个模糊变量, 则这个 $\dot{x}_l$ 共对应 2^m 个模糊规则.

在给定如式 (1) 的一组双曲正切型模糊规则基的前提下, 如果 P_z 和 N_z (其中, z 为任意的状态变量或输入变量) 的隶属函数被定义为如下形式[14−15]:

$$\mu_{N_z}(x) = \mathrm{e}^{-\frac{1}{2}(x+k_z)^2}, \quad \mu_{N_z}(x) = \mathrm{e}^{-\frac{1}{2}(x+k_z)^2} \tag{2}$$

则可得出如下形式的数学模型:

$$\dot{x} = A\tanh(k_x x) + \hat{B}\tanh(k_u u) \tag{3}$$

$k_x = \mathrm{diag}\{k_{x_1}, \cdots, k_{x_n}\}$, $k_u = \mathrm{diag}\{k_{u_1}, \cdots, k_{u_p}\}$.

如果将式 (3) 对 u 线性化并将输入矩阵 $\hat{B}k_u$ 合并为 B, 则可以得到模糊双曲正切模型[14−15]:

$$\dot{x} = A\tanh(Kx) + Bu \tag{4}$$

从双曲正切型模糊规则基和隶属函数的表达式可以看出, 文献 [14−15] 提出的双曲正切型模糊规则基有以下三个特点: 1) 原点附近具有全局逼近性能可用于对多种非线性模型进行建模和分析; 2) 与其他模糊模型相比, 例如, 文献 [11, 19], 模糊集数量较少 (每个模糊变量仅包含两个); 3) 输入变量并不出现在每个模糊规则的输出部分从而易于实现. 基于以上三个特点, 系统的建模和辨识问题可以很容易地通过一定的专家经验和系统的输入输出数据来解决. 此外, 适合于工程应用的稳定及满足优化指标的控制器也可以依据现有的控制理论来进行设计[40].

1.2　FHM 的神经网络实现

FHM 的神经网络拓扑结构如图 1 所示. 被控对象的状态变量 $x = (x_1(t), \cdots, x_n(t))^{\mathrm{T}}$ 和输入变量 $u = (u_1(t), \cdots, u_m(t))^{\mathrm{T}}$ 作为神经网络模型的输入, 模型输出为状态变量的导数. k_i $(i = 1, 2, \cdots, n)$, g_j $(j = 1, 2, \cdots, m)$, c_{ij} $(i, j = 1, 2, \cdots, n)$ 和 d_{ij} $(i = 1, 2, \cdots, n,\ j = 1, 2, \cdots, m)$ 为需要学习的连接权系数.

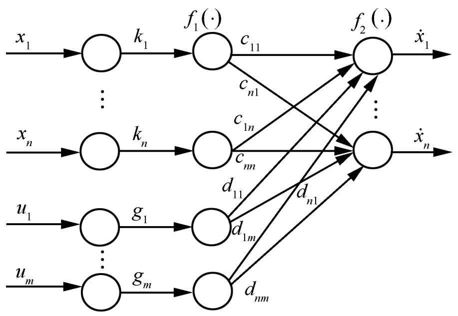

图 1　模糊双曲正切模型神经网络拓扑结构

Fig. 1　The neural network topology of FHM

如果隐层函数 $f_1(x) = \tanh(x)$, 输出层激活函数 $f_2(x) = x$, 则可以得到如下模型

$$\dot{x} = A\tanh(k_x x) + B\tanh(k_u u) \tag{5}$$

$k_x = \mathrm{diag}\{k_1, \cdots, k_n\}$, $k_u = \mathrm{diag}\{g_1, \cdots, g_m\}$, A 和 B 为常数矩阵, 其元素由权系数 c_{ij} 和 d_{ij} 来构成. 明显的, 当对变量 u 进行线性化之后, 能够得到与式 (4) 相同的表达式. 因此, FHM 可以由神经网络模型来搭建和实现, 其模型中的参数可以通过反向传播 (Back propagation, BP) 算法来训练[41−43].

1.3　基于 FHM 的控制系统设计

作为一种全局模糊模型, FHM 不仅可以被看作是对线性模型的扩展, 而且根据此模型所设计的最优控制器必定是能够使系统的性能指标达到全局最优的. 一般来讲, FHM 系统的渐近稳定性可以通过与之相对应的线性系统的鲁棒稳定性来判定. 基于这个特点, 近些年来出现了大量的基于 FHM 的稳定性分析与控制综合的研究成果.

Margaliot 等[44] 研究了一种新型的状态空间模型和相应的最优控制问题, 称为双曲最优控制. 文献 [15] 通过模糊双曲正切模型来对非线性模型进行建模, 分别利用极点配置法, 最优控制理论和 H_∞ 控制理论为模糊双曲正切模型设计三种稳定的控制器. 从控制倒立摆系统的仿真结果来看, 其根据 FHM 设计的控制器可以很好地对系统进行控制. 针对一类连续非线性系统的分析与设计问题, 文献 [45] 设计了满足 H_∞ 性能指标的模糊双曲正切型控制器. 不仅提出了在有多胞不确定性情况存在下系统的稳定性判别条件，而且通过引入自由权矩阵从而降低了设计的保守性. 针对滑模控制问题, 文献 [46] 提出了基于 FHM 的积分滑膜控制器的设计策略. 通过使用这种策略, 所设计的控制器能够保证系统的状态变量在有限时间内进入指定的滑膜面进行运动. 针对一类离散非线性系统, 文献 [47−49] 分别提出了可靠保性能控制器、混合 H_∞ 控制器以及具有非脆弱性质的保性能控制器的设计方法. 通过矩阵的变换方法和相应的缩放策略, 有效地降低了线性矩阵不等式求解的保守性问题, 得到了较好的控制分析结果. 针对一类带有重复标量非线性离散系统, 文献 [50] 首先利用 FHM 对其进行建模, 之后对系统模型的全局渐近稳定性和鲁棒性问题进行了分析. 文献 [51] 基于 FHM 研究了非线性系统的网络控制问题. 通过提出一种新颖的处理网络诱导时滞的方法, 不仅得到了闭环系统稳定的充分条件, 而且设计了使系统稳定的状态反馈控制器. 此外, 针对一类同时实现转动和平移运动的实际机械系统, 文献 [52] 基于 FHM 设计了一个模糊控制器. 通过与以往的成果进行比较, 所设计的控制器具有更好的控制效果.

2　GFHM 的研究现状概述

2.1　GFHM 的描述

在 FHM 的基础上, 文献 [53] 提出一种广义模糊双曲正切模型 GFHM. 此模型可以看作是 FHM 的扩展. 由于 GFHM 对输入变量做了多次线性变换, 此模型具有万能逼近性质, 即可以任意精度逼近实际模型.

定义 2[53]**.** 多输入单输出系统的输入变量和输出变量分别被表示为为 $x = (x_1(t), \cdots, x_n(t))^{\mathrm{T}}$ 和 y, 如果定义一组模糊规则基为广义双曲正切模糊规则基, 则其必须满足以下条件:

1) 广义双曲正切模糊规则基的第 l 条模糊规则

被表示为

$$\begin{aligned}
R^l:\ &\text{IF}\ (x_1-d_{11})\ \text{is}\ F_{x_{11}}\ \text{and}\ (x_1-d_{12})\\
&\text{is}\ F_{x_{12}}\cdots\\
&\text{and}\ (x_1-d_{1w_1})\ \text{is}\ F_{x_{1w_1}}\ \text{and}\ (x_2-d_{21})\\
&\text{is}\ F_{x_{21}}\cdots\\
&\text{and}\ (x_2-d_{2w_2})\ \text{is}\ F_{x_{2w_2}}\cdots\text{and}\\
&(x_n-d_{nw_n})\ \text{is}\ F_{x_{nw_n}}\\
\text{THEN}\ &y^l=c_{F_{11}}+c_{F_{12}}+\cdots+c_{F_{1w_1}}+\\
&c_{F_{21}}+\cdots+c_{F_{2w_2}}+c_{F_{n1}}+c_{F_{n2}}+\cdots+c_{F_{nw_n}}
\end{aligned}\tag{6}$$

其中, $w_i\ (i=1,2,\cdots,n)$ 为将 x_i 线性变换的个数, $d_{ij}\ (i=1,2,\cdots,n, j=1,2,\cdots,w_i)$ 为 x_i 线性变换点, $F_{x_{iw_j}}$ 是与输入变量对应的模糊子集且只包括正 (P) 和负 (N) 两个语言值, $c_{F_{iw_j}}$ 是与模糊子集相对应的的常数.

2) 输入变量和输出变量均是可选的, 但是需要满足输出项与输入变量之间一一对应的关系.

3) 此模糊规则基共有 $2^{w_1+w_2+\cdots+w_n}$ 条模糊规则, 其中 $w_i\ (i=1,2,\cdots,n)$ 表示相应的输入变量线性变换的个数.

引理 2[53]**.** 在给定如式 (6) 的广义双曲模糊规则基的基础之上, 定义广义输入变量为如下形式:

$$x_i=x_z-d_{zj}\tag{7}$$

其中, $w_z\ (z=1,2,\cdots,n)$ 为将 x_z 线性变换的个数, $d_{zj}\ (j=1,2,\cdots,w_z)$ 为 x_z 线性变换点. 设 $m=\sum_{z=1}^{n}w_z$ 并取广义输入变量对应的模糊集合 P_{x_i} 和 N_{x_i} 的隶属函数为

$$\mu_{P_{x_i}}(x_i)=\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(x_i-k_{x_i}\right)^2},\ \mu_{N_{x_i}}(x_i)=\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(x_i+k_{x_i}\right)^2}\tag{8}$$

其中, k_i 为常数.

为表达简便, $\mu_{P_{x_i}}(x_i)$ 被简写为 μ_{P_i}, k_{x_i} 被简写为 k_i, 则可以根据此规则基得到 GFHM 的数学模型

$$f(x)=\sum_{i=1}^{m}\frac{c_{P_i}\mathrm{e}^{k_ix_i}+c_{N_i}\mathrm{e}^{-k_ix_i}}{\mathrm{e}^{k_ix_i}+\mathrm{e}^{-k_ix_i}}\tag{9}$$

从广义模糊双曲正切模型的表达式可以看出, 由于将输入变量做了线性变换, 则可以任意选择模糊规则数目达到其任意精度逼近非线性函数的目的. 此外, 由于 c_{P_z} 与 c_{N_z} 可以取为任意常数, GFHM 可以以任意精度逼近原点不对称的非线性系统.

2.2 GFHM 的神经网络实现

假定模型前提结构已定, 即已知将每个输入变量线性划分的个数 w_z, 如果取 $f_1(x)=x$, $f_2(x)=\mathrm{e}^x/(\mathrm{e}^x+e^{-x})$ 则构造一个神经网络模型 (如图 2 所示) 可以使得网络输出与模糊双曲正切模型输出相同, 其输出为

$$y=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{w_i}\frac{c_{P_{ij}}\mathrm{e}^{k_{ij}x_i}+c_{N_{ij}}\mathrm{e}^{-k_{ij}x_i}}{\mathrm{e}^{k_{ij}x_i}+\mathrm{e}^{-k_{ij}x_i}}\tag{10}$$

从式 (10) 和图 2 可以看出, GFHM 可以通过神经网络模型来搭建和实现, 其模型中的参数可以通过神经网络强大的学习功能进行辨识和优化. 此外, 通过 GFHM 的表达式和神经网络实现的结构可以看出[40, 53, 71], 广义模糊双曲正切模型相当于生成 $\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}w_i$ 个广义输入变量, 需要辨识的参数为 $\frac{3}{2}\sum_{i=1}^{n}w_i$ 个. 即使输入变量或模糊子空间个数有所增加, 广义模糊双曲正切模型辨识器的辨识参数数量亦按照线性增长速度递增. 然而, 当取相同条件时 (输入变量个数和模糊子空间划分个数), 一般的 T-S 模糊模型的辨识参数数量为 $\sum_{i=1}^{n}2w_i+\prod_{i=1}^{n}w_i(n+1)$ 个. 非常明显, 只要当中任何一个变量有所增加, 辨识参数数量就呈现几何增长趋势. 因此, GFHM 同 T-S 模糊模型相比具有辨识参数少、辨识速度快的特点. GFHM 更适合对复杂性高的非线性系统进行建模.

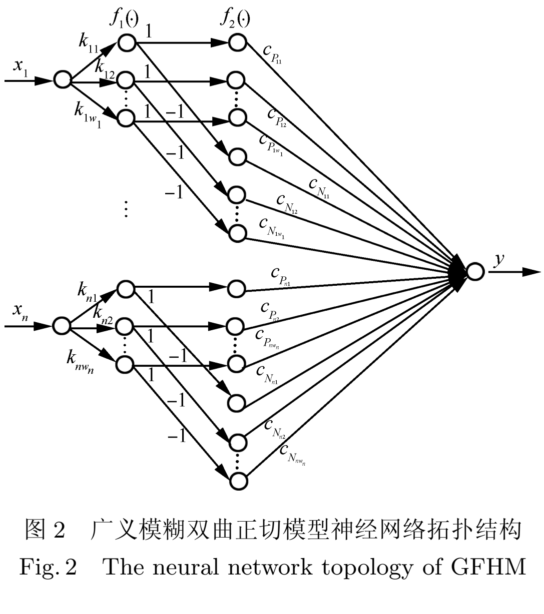

图 2 广义模糊双曲正切模型神经网络拓扑结构

Fig. 2 The neural network topology of GFHM

2.3 基于 GFHM 的分析与综合

基于 GFHM 的稳定性分析和控制器设计方面的研究, 近些年来出现了大量非常有意义的成果. 文献 [54] 分析了 GFHM 控制器的解析结构, 证明了 GFHM 相比其他模糊控制器具有更强的非线性

变化能力, 验证了 GFHM 也是一个确保 PID 性能的模糊系统. 文献 [55] 分析了广义模糊双曲正切控制器的非线性变化能力, 并给出一种新型三区域 GFHM 模型, 在每个区域只需要调节两个参数就可以实现该区域的非线性曲线, 从而减少了参数调整的复杂性. 针对一类离散非线性系统, 文献 [56−57] 基于 GFHM 提出了模糊自适应控制方法并设计了 GFHM 的模型参考自适应控制器. 针对一类连续非线性系统, 文献 [58−59] 均考虑了其中不确定项的影响因素, 分别提出了一种基于 GFHM 的鲁棒直接自适应控制方法和间接自适应控制方法. 在文献 [60] 中, 作者研究了基于 GFHM 的自适应动态规划问题并提出了相应的最优控制方法. 文献 [61] 基于 GSHM 提出了用于控制机器人的模糊自适应控制策略.

3　DFHM 的研究现状概述

3.1　DFHM 的描述

针对非线性时滞系统的稳定性分析和控制器设计问题, 文献 [62] 在 FHM 的基础之上提出了时滞模糊双曲正切模型 (Time delays based on fuzzy hyperbolic model, DFHM).

定义 2[62]**.** 对给定的被控对象, 考虑 n 个状态变量 $x(t)=[x_1(t),\cdots,x_n(t)]^{\mathrm{T}}$, 如果定义一组模糊规则基为时滞模糊双曲正切模糊规则基, 则其必须满足以下条件:

1) 时滞模糊双曲正切模糊规则基的每一个模糊规被表示为如下形式:

$$\begin{aligned}&\text{IF } x_1(t) \text{ is } F_{x_1} \text{ and } x_2(t) \text{ is } F_{x_2}\cdots\\&\quad x_m(t) \text{ is } F_{x_m} \text{and } x_1(t-\tau) \text{ is } F_{x_{\tau 1}}\\&\quad\cdots\text{and } x_{m'}(t-\tau) \text{ is } F_{x_{\tau m'}}\\&\text{THEN } \dot{x}_r(t)=\pm c_{x_1}^r\pm\cdots\pm c_{x_m}^r\pm c_{x_{\tau 1}}^r\pm\\&\qquad\cdots\pm c_{x_{\tau m'}}^r\end{aligned}\tag{11}$$

其中, $r=1,\cdots,n$, $F_{x_i}\ (i=1,\cdots,m)$, $F_{x_{\tau j}}\ (j=1,\cdots,m')$ 分别是 $x_i(t)$ 和 $x_j(t-\tau)$ 的模糊子集, 包含 P_{x_i}(正), N_{x_i}(负), $P_{x_{\tau j}}$(正) 和 $N_{x_{\tau j}}$(负) 两类情况.

2) 在 THEN 部分的常数项 $\pm c_{x_i}^r\ \left(\pm c_{x_{\tau j}}^r\right)$ 对应于 IF 部分的 $F_{x_i}\ \left(F_{x_{\tau j}}\right)$.

3) 对于每一个模糊规则, 如果在 IF 部分出现 $m+m'\ (m\le n, m'\le n)$ 个模糊变量, 则 $\dot{x}_r(t)$ 一共对应 $2^{(m\times m')}$ 条模糊规则.

引理 3[62]**.** 给定 n 个 DFHM 的模糊规则基, 如果定义 P_z 和 N_z 的隶属函数为

$$\mu_{P_z(z)}=\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}(z-l_z)^2},\quad \mu_{N_z(z)}=\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}(z+l_z)^2}\tag{12}$$

那么可以导出如下的模型

$$\dot{x}=A\tanh(Lx)+A_\tau\tanh(Lx_\tau)\tag{13}$$

其中, A 和 A_τ 是具有相容维数的常矩阵, $L=\mathrm{diag}\{l_1,\cdots,l_n\}$, $l_i\ (i=1,\cdots,n)$ 是正常数, $x=x(t)$, $x_r=x(t-\tau)$, $\dot{x}=\dot{x}(t)$.

3.2　DFHM 的神经网络实现

DFHM 可以被看作是一个递归神经网络模型 (Recurrent neural network, RNN), 其结构如图 3 所示. 其中状态变量和延时状态变量通过连接权参数形成交叉连接, 双曲正切函数作为激活函数的表达式, $c_{x_i}^r$ 和 $c_{x_{\tau j}}^r\ (r,i,j=1,\cdots,n)$ 是需要被调整的连接权. 因此, 我们很容易就会得到形如 DFHM 的数学模型.

需要特别指出的是, 与其他的神经网络不同, 图 3 中的连接权参数的初值不能进行任意取值. 本质上, 虽然 DFHM 可以通过 RNN 的神经网络来进行建模和实现, 但其还是一个模糊模型. 连接权参数的初值应根据专家经验和实际工程环境的需要来进行设定. 不过在初值设定之后, DFHM 的连接权参数可以参考 RNN 的参数训练方法来进行训练, 比如 BP 算法、模拟退火算法等.

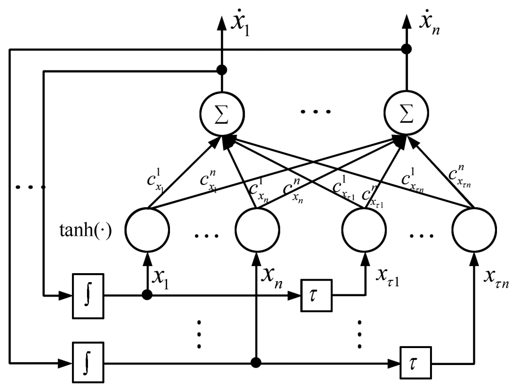

图 3　时滞模糊双曲正切模型递归神经网络拓扑结构

Fig. 3　The recursion neural network topology of DFHM

3.3　基于 DFHM 的控制系统分析

目前在非线性时滞系统的研究上, 最常采用的是基于 T-S 模糊模型的方法. 这种方法最大的特点是通过将局部线性子系统进行叠加从而能够使用线性时滞系统的分析方法用以解决非线性时滞系统的相关问题. 一般来讲, 基于 T-S 模糊时滞系统的分析和设计都离不开线性不等式 (LMI) 的求解问题, 而 LMI 的数量与其定义的模糊规则数是相关的. 如果规则越多, 那么就会造成 LMI 数量增多, 且可能出现难以求解甚至无解的情况发生. 通过前面的分析和介绍, DFHM 结合了模糊模型、RNN 模型和线

性系统模型的优点于一身, 因此, 采用 DFHM 来建立系统模型可以有效地回避这一劣势. 近些年来, 作为研究复杂非线性系统建模与控制的一种有效方法, 基于 DFHM 的稳定性分析和控制综合技术也越来越受到广大研究人员的关注, 并且出现了很多优秀的理论研究成果.

针对一类连续非线性时滞系统的分析与设计问题, 文献 [62] 结合 Lyapunov 稳定性理论并采用自由权矩阵方法, 给出了带有多胞不确定和范数不确定两种类型的系统稳定性判据. 文献 [63] 基于 Lyapunov 稳定性理论提出一种新颖的时滞独立的 Lyapunov 泛函结构, 设计了混合 H_2/H_∞ 控制器. 针对不确定非线性时滞系统的鲁棒 H_∞ 干扰抑制问题, 文献 [64] 不仅设计了满足给定干扰条件下的鲁棒无记忆状态反馈控制器, 而且对 LMI 的可行解域进行了优化分析. 其求解过程不需要系统变形和引入自由权值矩阵, 同样也可降低结果的保守性和计算负担. 针对时滞的随机特性, 文献 [65] 不仅提出了一种新颖的随机模糊双曲正切模型对非线性随机系统进行建模, 而且基于此模型研究了鲁棒 H_∞ 控制器的设计问题. 其通过采用一种新的非线性矩阵线性化方法, 在控制器的设计过程减少了计算环节, 不仅提高了控制精度, 而且降低了所得结果的保守性. 针对离散非线性时滞系统模糊双曲正切 H_∞ 滤波器的设计问题, 文献 [66] 不仅利用 DFHM 对系统进行了模型描述, 而且利用 Lyapunov 稳定性理论来建立其 H_∞ 滤波器的存在条件, 最后, 利用 LMI 进行求解. 针对非线性时滞大系统的可靠性问题, 控制器设计问题, H_∞ 滤波问题, 文献 [67−69] 分别进行了深入的探讨和研究, 得到了相关的稳定性判别条件、满足性能指标的充分条件、可靠控制器设计等重要的理论成果. 文献 [70] 在 DFHM 的模型基础之上, 进一步提出了具有时变时滞的模糊双曲时滞神经网络模型. 不仅验证了此模型对很多非线性特性具有很好的逼近性能, 而且证明了其是一种全局指数稳定模型. 这个结果对基于 DFHM 的进一步研究起到了非常有力的推动作用.

4 待研究问题及展望

相对于其他模糊模型来讲, 如模糊关系模型、T-S 模糊模型等, FHM 的提出从时间上看要晚十多年. 然而, 在短短的十几年里就取得了迅速的发展, 不论是在理论方面[71−79], 还是在实际工业过程控制中[80−85], FHM 及其相关控制理论都逐渐显示出其自身的活力, 这与 FHM 自身的很多独特优点是分不开的. 尽管如此, 由于模糊控制理论在体系上还不完备, 系统的研究尚不够充分, 因此, FHM 的研究在理论和系统设计等方面还有很大的提升空间. 其中有几个关键的问题值得我们进行更深层次的研究:

1) 传统的控制理论对于控制的稳定性分析已经比较完善, 但是与其相比, 模糊控制对于稳定性的分析还处于起步阶段. FHM 是模糊领域内的一个重要模型, 对于它的研究也都是基于模糊控制领域内的方法, 因此, 如何丰富和完善 FHM 稳定性的分析手段和方法也是目前值得继续研究的重要问题.

2) FHM 及相关扩展的模型方法对用于描述连轧连铸复杂工业生产过程、具有高自由度机械手臂动态执行过程、多关节机器人整体运动过程、精密化数控机床的工作过程、发电厂热工现象、智能电网的发、配、送整体协调过程等高度复杂非线性动态行为具有广泛的应用和开发研究前景.

3) 电动汽车是一种绿色环保的新型汽车, 它的发展已经取得了一定的成功. 不过在电量计算和动态均衡方面的研究还处于起步阶段. 大规模电池组的使用过程是一个高度复杂化的非线性过程, 它随着时间、环境和使用方法的推移和不同将会产生非常复杂的动态特性过程. 在电量计算方面, 采用模糊模型建模, 利用动态规划及近似动态规划理论来进行分析是目前广大学者和专家认可的一个可行方向. 由于 FHM 及相关扩展的模型均为神经网络可实现化的模型, 因此, 非常有必要在这类实践领域内展开工作, 从而解决这个世界难题.

References

1 Zadeh L A. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 1965, **8**(3): 338−358

2 Zadeh L A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1973, **3**(1): 28−44

3 Mamdani E H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. In: Proceedings of the 1974 Institution of Electrical Engineers. IEEE, 1974, **121**(12): 1585−1588

4 Chen B, Liu X P, Lin C, Liu K F. Robust H_∞ control of Takagi-Sugeno fuzzy systems with state and input time delays. *Fuzzy Sets and Systems*, 2009, **160**(4): 403−422

5 Lam H K. Polynomial fuzzy-model-based control systems: stability analysis via piecewise-linear membership functions. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2011, **19**(3): 588−593

6 Lee D H, Park J B, Joo Y H. A fuzzy Lyapunov function approach to estimating the domain of attraction for continuous-time Takagi-Sugeno fuzzy systems. *Information Sciences*, 2012, **185**(1): 230−248

7 Ding B C. Improving the asymptotically necessary and sufficient conditions for stability of fuzzy control. *Fuzzy Sets and Systems*, 2010, **161**(21): 2793−2804

8 Feng J, Wang S Q. Reliable fuzzy control for a class of nonlinear networked control systems with time delay. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(7): 1091−1099

9 Kolman E, Margaliot M. Are artificial neural networks white boxes? *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2005, **16**(4): 844−852

10 Pan J T, Guerra T M, Fei S M, Jaadari A. Nonquadratic stabilization of continuous T-S fuzzy models: LMI solution for a local approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2012, **20**(3): 594−602

11 Wang L X, Mendel J M. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1992, **3**(5): 807−814

12 Zadeh L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-III. *Information Sciences*, 1975, **9**(1): 43−80

13 Pedrycz W. An approach to the analysis of fuzzy systems. *International Journal of Control*, 1981, **34**(3): 403−421

14 Zhang Hua-Guang, Quan Yong-Bing. Modeling and control based on fuzzy hyperbolic model. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(6): 729−735
(张化光, 全永兵. 模糊双曲正切模型的建模方法与控制器设计. 自动化学报, 2000, **26**(6): 729−735)

15 Zhang H G, Quan Y B. Modeling, identification, and control of a class of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2001, **9**(2): 349−354

16 Zeng X J, Singh M G. Approximation theory of fuzzy systems-SISO case. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1994, **2**(2): 162−176

17 Wang L X. Fuzzy systems as universal approximations. In: Proceeding of the 1992 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. San Diego: IEEE, 1992. 1163−1170

18 Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, **15**(1): 116−132

19 Sugeno M, Yasukawa T. A fuzzy logic-based approach to qualitative modeling. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1993, **1**(1): 7−25

20 Cao S G, Rees N W, Feng G. Analysis and design for a class of complex control systems, Part I: fuzzy modelling and identification. *Automatica*, 1997, **33**(6): 1017−1028

21 Cao S G, Rees N W, Feng G. Analysis and design for a class of complex control systems, Part II: fuzzy controller design. *Automatica*, 1997, **33**(6): 1029−1039

22 Cao S G, Rees N W, Feng G. Quadratic stability analysis and design of continuous-time fuzzy control systems. *International Journal of Systems Science*, 1996, **27**(2): 193−203

23 Li Shao-Yuan, Wang Qun-Xian, Li Huan-Zhi, Chen Zeng-Qiang, Yuan Zhu-Zhi. Identification and control based on Sugeno′s fuzzy model. *Acta Automatica Sinica*, 1999, **25**(4): 488−492
(李少远, 王群仙, 李焕芝, 陈增强, 袁著祉. Sugeno 模糊模型的辨识与控制. 自动化学报, 1999, **25**(4): 488−492)

24 Huang Miao, Wang Xin, Wang Zhen-Lei. Multiple models adaptive control based on time series for a class of nonlinear systems. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(5): 581−586
(黄淼, 王昕, 王振雷. 一类非线性系统的基于时间序列的多模型自适应控制. 自动化学报, 2013, **39**(5): 581−586)

25 Kim E, Park M, Ji S, Park M. A new approach to fuzzy modeling. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1997, **5**(3): 328−337

26 Messner S, Golodnikov A, Gritsevskii A. A stochastic version of the dynamic linear programming model MESSAGE III. *Energy*, 1996, **21**(9): 775−784

27 Zhang Hua-Guang, Zhang Xin, Luo Yan-Hong, Yang Jun. An overview of research on adaptive dynamic programming. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(4): 303−311
(张化光, 张欣, 罗艳红, 杨珺. 自适应动态规划综述. 自动化学报, 2013, **39**(4): 303−311)

28 Wei Qing-Lai, Zhang Hua-Guang, Liu De-Rong, Zhao Yan. An optimal control scheme for a class of discrete-time nonlinear systems with time delays using adaptive dynamic programming. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(1): 121−129
(魏庆来, 张化光, 刘德荣, 赵琰. 基于自适应动态规划的一类带有时滞的离散时间非线性系统的最优控制策略. 自动化学报, 2010, **36**(1): 121−129)

29 Liu D R, Javaherian H, Kovalenko O, Huang T. Adaptive critic learning techniques for engine torque and air-fuel ratio control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2008, **38**(4): 988−993

30 Vamvoudakis K G, Lewis F L. Multi-player non-zero-sum games: online adaptive learning solution of coupled Hamilton-Jacobi equations. *Automatica*, 2011, **47**(8): 1556−1569

31 Mo Ju-Hua, Huang Min, Wang Xing-Wei. Application of a pull strategy based on fuzzy control for production control of assembly line. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(1): 118−123
(莫巨华, 黄敏, 王兴伟. 基于模糊控制的拉式策略在装配生产控制中的应用. 自动化学报, 2011, **37**(1): 118−123)

32 Ioannidis S, Tsourveloudis N, Valavanis K. Fuzzy supervisory control of manufacturing systems. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, **20**(3): 379−389

33 Li R H, Zhang Y. Fuzzy logic controller based on genetic algorithms. *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, **83**(1): 1−10

34 Joo Y H, Hwang H S, Kim K B, Woo K B. Fuzzy system modeling by fuzzy partition and GA hybrid schemes. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, **86**(3): 279−288

35 You S S, Wook C, et al. A fuzzy modeling method with a GA hybrid scheme. In: Proceedings of the 2nd Asian Control Conference, 1997. 529−53

36 Barber M J, Clark J W. Detecting network communities by propagating labels under constraints. *Physical Review E*, 2009, **80**(2): 026129

37 Yang Dong-Yong, Chen Jin-Yin. Research on detector generation algorithm based on multiple populations GA. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(4): 425−432
(杨东勇, 陈晋音. 基于多种群遗传算法的检测器生成算法研究. 自动化学报, 2009, **35**(4): 425−432)

38 Marino R, Tomei P. An iterative learning control for a class of partially feedback linearizable systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, **54**(8): 1991−1996

39 Li X D, Xiao T F, Zheng H X. Adaptive discrete-time iterative learning control for non-linear multiple input multiple output systems with iteration-varying initial error and reference trajectory. *IET Control Theory and Applications*, 2011, **5**(9): 1131−1139

40 Zhang Hua-Guang. *Fuzzy Hyperbolic Tangent Model-Modeling, Control, Application*. Beijing: Science Press, 2008
(张化光. 模糊双曲正切模型 — 建模, 控制, 应用. 北京: 科学出版社, 2008

41 Li Hong-Ru, Gu Shu-Sheng. A fast parallel algorithm for a recurrent neural network. *Acta Automatica Sinica*, 2004, **30**(4): 516−522
(李鸿儒, 顾树生. 一种递归神经网络的快速并行算法. 自动化学报, 2004, **30**(4): 516−522)

42 Han Min, Wang Xin-Ying. An effective online sparse learning algorithm for echo state networks. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(12): 1536−1540
(韩敏, 王新迎. 一种有效的储备池在线稀疏学习算法. 自动化学报, 2011, **37**(12): 1536−1540)

43 Steil J J. Online stability of backpropagation-decorrelation recurrent learning. *Neurocomputing*, 2006, **69**(7-9): 642−650

44 Margaliot M, Langholz G. Hyperbolic optimal control and fuzzy control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A*, 1999, **29**(1): 1−10

45 Yang J, Liu D R, Feng J, Zhang H G. Controller design for a class of nonlinear systems based on fuzzy hyperbolic model. In: Proceedings of the 6th World Congress on Control and Automation. Dalian: WCICA, 2006. 873−877

46 Yang Jun, Zhang Hua-Guang. Design of integral sliding mode controller based on fuzzy hyperbolic model. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2008, **3**(1): 62−65
(杨珺, 张化光. 基于模糊双曲模型的积分滑模控制. 智能系统学报, 2008, **3**(1): 62−65)

47 Yang Jun, Zhang Hua-Guang, Zheng Cheng-De. Design of reliable controller based on fuzzy hyperbolic model. *Control and Decision*, 2008, **23**(2): 167−170
(杨珺, 张化光, 郑成德. 基于模糊双曲模型的可靠控制器设计. 控制与决策, 2008, **23**(2): 167−170)

48 Yang Jun, Zhang Hua-Guang. Design of mixed H_2/H_∞ controller based on fuzzy hyperbolic model. *Journal of Northeastern University*, 2008, **29**(4): 460−463
(杨珺, 张化光. 基于模糊双曲模型的混合 H_2/H_∞ 控制. 东北大学学报, 2008, **29**(4): 460−463)

49 Yang Jun, Zhang Hua-Guang, Yang Dong-Sheng. Design of non-fragile controller based on fuzzy hyperbolic model and simulation. *Journal of System Simulation*, 2009, **21**(12): 3790−3793
(杨珺, 张化光, 杨东升. 基于模糊双曲模型的非脆弱控制及其仿真研究. 系统仿真学报, 2009, **21**(12): 3790−3793)

50 Margaliot M, Langholz G. A new approach to fuzzy modeling and control of discrete-time systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2003, **11**(4): 486−494

51 Yang J, Zhang H G, Wang Y C, Lun S X. Networked control for a class of nonlinear systems based on fuzzy hyperbolic model. In: Proceedings of the 2008 Chinese Control and Decision Conference. Yantai: CCDC, 2008. 323−328.

52 Margaliot M, Langholz G. Fuzzy control of a benchmark problem: a computing with words approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2004, **12**(2): 230−235

53 Zhang Hua-Guang, Wang Zhi-Liang, Li Ming, Quan Yong-Bing, Zhang Ming-Jun. Generalized fuzzy hyperbolic model: a universal approximator. *Acta Automatica Sinica*, 2004, **30**(3): 416−422
(张化光, 王智良, 黎明, 全永兵, 张明君. 广义模糊双曲正切模型: 一个万能逼近器. 自动化学报, 2004, **30**(3): 416−422)

54 Zhang H G, Liang H L, Liu D. Two new operators in rough set theory with application to fuzzy sets. *Information Science*, 2004, **166**(1−4): 147−165

55 Zhang H G, Li M, Cai L L. Fuzzy adaptive control of nonlinear processes with feedforward compensator and its application. *Cybernetics and Systems*, 2002, **33**(2): 171−187

56 Zhang Ming-Jun, Zhang Hua-Guang. Adaptive controller based generalized fuzzy hyperbolic model. *Control and Decision*, 2004, **19**(11): 1301−1304
(张明君, 张化光. 基于广义模糊双曲正切模型的自适应控制器. 控制与决策, 2004, **19**(11): 1301−1304)

57 Zhang Ming-Jun, Zhang Hua-Guang. A robust direct adaptive fuzzy control algorithm. *Journal of Northeastern University*, 2006, **27**(1): 5−8
(张明君, 张化光. 一种鲁棒直接自适应模糊控制算法. 东北大学学报, 2006, **27**(1): 5−8)

58 Zhang H G, Zhang M J. Robust direct adaptive fuzzy control for nonlinear MIMO systems. *Progress in Natural Science*, 2006, **16**(10): 1098−1105

59 Zhang M J, Zhang H G. Robust adaptive fuzzy control based on generalized fuzzy hyperbolic. In: Proceedings of the 16th IFAC Worlds Congress, 2005

60 Zhang Ji-Lie, Zhang Hua-Guang, Luo Yan-Hong, Liang Hong-Jing. Nearly optimal control scheme using adaptive dynamic programming based on generalized fuzzy hyperbolic model. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(2): 142−149
(张吉烈, 张化光, 罗艳红, 梁洪晶. 基于广义模糊双曲模型的自适应动态规划最优控制设计. 自动化学报, 2013, **39**(2): 142−149)

61 Gao Dao-Xiang, Xue Ding-Yu. Fuzzy adaptive control of manipulators based on the generalized hyperbolic model. *Control and Decision*, 2006, **21**(10): 1124−1128, 1133
(高道祥, 薛定宇. 基于广义双曲正切模型的机器人模糊自适应控制. 控制与决策, 2006, **21**(10): 1124−1128, 1133)

62 Zhang H G, Yang J. Delay-dependent stability of a class of nonlinear systems with time delays based on fuzzy hyperbolic model. In: Proceedings of the 2006 International Conference on Intelligent Computing: Part II. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin. 2006, **4114**: 20−31

63 Yang J, Zhang H G, Liu D R. A novel control scheme for a class of nonlinear systems with time delays based on fuzzy hyperbolic model. In: Proceedings of the 10th International Conference on Fuzzy systems. Automation, Robotics, and Vision, Hanoi, Vietnam, 2008

64 Zhang H G, Gong Q X, Wang Y C. Delay-dependent robust H_∞ control for uncertain fuzzy hyperbolic systems with multiple delays. *Progress in Natural Science*, 2008, **18**(1): 97−104

65 Wang Yi-Zhong, Zhang Hua-Guang. Control and simulation of stochastic hyperbolic tangent model. *Journal of System Simulation*, 2008, **20**(10): 2689−2692
(王以忠, 张化光. 随机双曲正切模型的控制与仿真. 系统仿真学报, 2008, **20**(10): 2689−2692)

66 Zhang H G, Lun S X, Liu D R. Fuzzy H_∞ filter design for a class of nonlinear discrete-time systems with multiple time delay. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2007, **15**(3): 453−469

67 Liu X R, Zhang H G, Dai J. Delay-dependent robust and reliable H_∞ fuzzy hyperbolic decentralized control for uncertain nonlinear interconnected systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 2010, **161**(6): 872−892

68 Zhang H G, Liu X R, Gong Q X, Chen B. New sufficient conditions for robust H_∞ fuzzy hyperbolic tangent control of uncertain nonlinear systems with time-varying delay. *Fuzzy Sets and Systems*, 2010, **161**(15): 1993−2011

69 Liu Xin-Rui, Zhang Hua-Guang. Sample-data decentralized H_∞ reliable hyperbolic control for uncertain fuzzy large-scale systems with time-varying delay. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(12): 1534−1540
(刘鑫蕊, 张化光. 不确定时变时滞模糊大系统的采样分散可靠 H_∞ 双曲控制. 2009, **35**(12): 1534−1540)

70 Wang G, Zhang H G, Chen B, Tong S C. Fuzzy hyperbolic neural network with time-varying delays. *Fuzzy Sets and Systems*, 2010, **161**(19): 2533−2551

71 Zhang H G, Liu D. *Fuzzy Modeling and Fuzzy Control*. Boston, Basel, Berlin: Birkhauser, 2006

72 Zhang H G, Wang Z L, Liu D. Chaotifying fuzzy hyperbolic model using adaptive inverse optimal control approach. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2004, **14**(10): 3505−3517

73 Zhang H G, Wang Z L, Wang Z L, Liu D R. Chaotifying fuzzy hyperbolic model using impulsive and nonlinear feedback control approaches. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2005, **15**(8): 2603−2610

74 Zhang H G, Wang Z L, Liu D R. Chaotification of FHM model: an adaptive inverse optimal control approach. *Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems Series B: Applications and Algorithms*, 2005, **11**(S1): 45−52

75 Liu Y J, Tong S C, Chen C L P. Adaptive fuzzy control via observer design for uncertain nonlinear systems with unmodeled dynamics. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2013, **21**(2): 275−288

76 Zhou Q, Shi P, Xu S Y, Li H Y. Adaptive output feedback control for nonlinear time delay systems by fuzzy approximation approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2013, **21**(2): 301−313

77 Su X J, Shi P, Wu L G, Song Y D. A novel control design on discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems with time-varying delays. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2013, **21**(4): 655−671

78 Kim S Y. Relaxation technique for a Takagi-Sugeno fuzzy control design based on a continuous-time fuzzy weighting-dependent Lyapunov function. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2013, **21**(4): 761−766

79 Zhang H G, Xie X P. Relaxed stability conditions for continuous-time T-S fuzzy control systems via augmented multi-indexed matrix approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2011, **19**(3): 478−492

80 Zhang H G, Xie X P, Tong S C. Homogenous polynomially parameter-dependent H_∞ filter designs of discrete-time fuzzy systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part-B: Cybernetics*, 2011, **41**(5): 1313−1322

81 Xie X P, Ma H J, Zhao Y, Ding D W, Wang Y C. Control synthesis of discrete-time T-S fuzzy systems based on a novel non-PDC control scheme. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2013, **21**(1): 147−157

82 Ding D W, Li X L, Xie X P. Further studies on relaxed stabilization conditions for discrete-time two-dimension Takagi-Sugeno fuzzy systems. *Information Sciences*, 2012, **189** (2): 143−154

83 Chen Jun, Gao Ze-Feng, Liu Fei. Stochastic stabilization for a class of fuzzy bilinear jump systems. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(5): 587−593
(陈珺, 高泽峰, 刘飞. 一类模糊双线性跳变系统的随机镇定问题. *自动化学报*, 2013, **39**(5): 587−593)

84 Zhao Da-Yong, Chai Tian-You. Fuzzy switching control for sump level interval and hydrocyclone pressure in regrinding process. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(5): 556−564
(赵大勇, 柴天佑. 再磨过程泵池液位区间与给矿压力模糊切换控制. *自动化学报*, 2013, **39**(5): 556−564)

85 Wang Yong-Fu, Wang Dian-Hui, Chai Tian-You. State estimate-based friction fuzzy modeling and robust adaptive control. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(2): 245−252
(王永富, 王殿辉, 柴天佑. 基于状态估计的摩擦模糊建模与鲁棒自适应控制. *自动化学报*, 2011, **37**(2): 245−252)

会国涛 东北大学信息科学与工程学院博士后. 主要研究方向为网络控制系统, 自适应动态规划, 模糊控制.
E-mail: hgt820112@163.com
(**HUI Guo-Tao** Postdoctor at the School of Information Science and Engineering, Northeastern University. His research interest covers networked control system, adaptive dynamic programming, and fuzzy control.)

张化光 东北大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为自适应动态规划, 模糊控制, 网络控制混沌控制. 本文通信作者. E-mail: zhanghuaguang@mail.neu.edu.cn
(**ZHANG Hua-Guang** Professor at the School of Information Science and Engineering, Northeastern University. His research interest covers adaptive dynamic programming, fuzzy control, network control, and chaos control. Corresponding author of this paper.)

汪 刚 东北大学信息科学与工程学院副教授. 主要研究方向为时滞神经网络的稳定性分析, 模糊控制, 非线性控制及其在工业中的应用.
E-mail: gangwang@mail.neu.edu.cn
(**WANG Gang** Associate professor at the School of Information Science and Engineering, Northeastern University. His research interest covers stability theory of neural networks with time delays, fuzzy control, nonlinear control and their industrial application.)

解相朋 华中科技大学自动化学院博士后. 主要研究方向为模糊控制, 智能优化算法及其在工业中的应用.
E-mail: xiexiangpeng1953@163.com
(**XIE Xiang-Peng** Postdoctor in the Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology. His research interest covers fuzzy modeling and control, optimization in process industries and intelligent optimization algorithms.)

吴振宁 东北大学信息科学与工程学院博士生. 主要研究方向为无损检测, 管道泄漏检测, 故障诊断.
E-mail: wuzn2003@hotmail.com
(**WU Zhen-Ning** Ph. D. at the College of Information Science and Engineering, Northeasten University. His research interest covers non-destructive testing, safety technology of long pipelines, and fault diagnosis.)