

T-S 模糊广义系统研究综述

袁宇浩¹ 张广明¹

摘要 对目前 T-S 模糊广义系统的研究成果加以总结. 主要讨论了 T-S 模糊广义系统的分析、综合与应用的问题, 并对这一研究领域仍需解决的问题和未来的发展方向作了进一步的展望.

关键词 T-S 模糊广义系统, 时滞 T-S 模糊广义系统, 容许性, 线性矩阵不等式, 并行分布补偿

DOI 10.3724/SP.J.1004.2010.00901

Research on T-S Fuzzy Descriptor Systems: A Review

YUAN Yu-Hao¹ ZHANG Guang-Ming¹

Abstract The achievements on T-S fuzzy descriptor systems are summarized. The problems of analysis, synthesis, and applications of T-S fuzzy descriptor systems are mainly discussed. At the end of the article, the problems to be solved and the future work are prospected.

Key words T-S fuzzy descriptor system, T-S fuzzy descriptor system with time-delay, admissibility, linear matrix inequality (LMI), parallel distributed compensations (PDC)

对于广义系统的研究, 通常采用传统的状态空间方法、频域方法和几何方法. 这些方法主要用于线性广义系统, 国内外有关研究已趋于成熟. 随着认知能力的发展和相关研究工具的完善, 人们认识事物的范围、深入的程度都在不断地扩大和加深. 因此, 研究者们不仅仅局限于考虑线性广义系统, 而要向更复杂的非线性广义系统的研究挑战. 目前, 非线性广义系统的研究成果相对较少. 原因之一是缺乏有效的方法来描述和分析这类非线性系统的脉冲行为, 致使在相关研究中, 总是假设系统无脉冲, 这与广义系统特有的脉冲行为相抵触.

在非线性广义系统为数不多的研究成果中, 文献 [1] 从可解性和数值解的角度对非线性广义系统的性质进行了讨论. 另外, 文献 [2] 将传统的 Lyapunov 稳定性理论向非线性广义系统做了自然的推广, 得出相关的 Lyapunov 稳定性定义和描述, 并给出镇定准则. 进一步地, 文献 [3] 以两个 Hamilton-Jacobi 不等式给出了非线性广义系统的 H_∞ 控制结果, 并且借助于三个辅助方程研究了降阶控制器的设计问题, 进而由两个交叉耦合的 Hamilton-Jacobi

方程给出了 H_2/H_∞ 混合控制策略. 而文献 [4] 主要讨论了通过定义一组非奇异变换将非线性广义系统转化为线性广义系统的问题. 陈伯山^[5] 则首次利用一次近似理论讨论了广义系统的局部结构理论和分支问题.

由于非线性广义系统结构的复杂性, 至今没有形成比较系统、完整的理论框架. 为了更加合理、有效地对非线性广义系统进行描述, 学者们关注到了在模糊集理论^[6-7] 基础上建立并发展而来的 T-S 模糊模型^[8]. T-S 模糊模型将线性系统理论与模糊理论相结合来解决非线性系统控制问题, 将整个非线性系统的控制看作是多个局部线性系统控制的模糊逼近. 这不仅开创了模糊模型辨识的新方法, 同时也为模糊控制系统的稳定性分析和设计提供了模型基础. 基于 T-S 模糊模型的优点, 学者们尝试将其进行推广, 提出了 T-S 模糊广义系统模型 (本文所提到的 T-S 模糊广义系统模型类似于通常意义下的正常 T-S 模糊系统模型, 只是在状态导数位置带有奇异的系数矩阵, 此系数矩阵可能为定常矩阵, 也可能为时变矩阵). 由于 T-S 模糊广义系统比 T-S 模糊模型的结构更加复杂, 目前还没有建立一套完整的分析系统稳定性和系统化的设计方法. 虽然有关 T-S 模糊广义系统的稳定性、鲁棒性的研究已有一些报道, 但仍有很多问题需要研究和解决.

本文对 T-S 模糊广义系统的研究现状作了总体的回顾, 介绍了相关控制问题的重要结果, 并对有待解决的问题和未来的发展方向作了一些讨论.

收稿日期 2008-10-31 录用日期 2010-03-02
Manuscript received October 31, 2008; accepted March 2, 2010
南京工业大学学科基金 (39710004), 江苏省工业装备数字制造及控制技术重点实验室项目 (BM2007201), 南京工业大学研究生精品课程项目资助

Supported by Science Foundation of Nanjing University of Technology (39710004), Jiangsu Key Laboratory of Digital Manufacturing for Industrial Equipment and Control Technology (BM2007201), and Excellent Course Project for Postgraduate of Nanjing University of Technology

1. 南京工业大学自动化与电气工程学院 南京 210009
1. College of Automation and Electrical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009

1 T-S 模糊广义系统的研究现状

1.1 T-S 模糊广义系统模型描述

1999 年, Taniguchi 等^[9] 将正常 T-S 模糊模型推广到更一般情况, 提出了 T-S 模糊广义系统模型. 这一模型利用多个局部线性广义系统模型逼近或表示一个全局非线性广义系统模型, 从而可以借助于线性广义系统的分析和控制手段, 解决全局非线性广义系统的控制问题. T-S 模糊广义系统的特点是:

1) 描述了一类包括物理模型和非动态约束条件在内的更广泛的系统, 而且能够更加清晰地表达出系统的实时参数扰动.

2) 应用模糊广义系统进行控制器设计时, 可以有效地减少求解过程中线性矩阵不等式 (Linear matrix inequality, LMI) 的个数^[10].

另外, 文献 [10] 举例说明了采用模糊广义系统模型对非线性系统建模的优越性, 并且例证 T-S 模糊广义系统模型确实能有效地逼近一个非线性系统, 从而说明提出其模型的必要性.

模糊广义模型的提出为解决一类非线性广义系统的控制问题提供了一条新的途径. 文献 [9] 中考虑的 T-S 模糊广义系统模型比较具有一般性:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) E_i \dot{\mathbf{x}}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i \mathbf{x}(t) + B_i \mathbf{u}(t)] \\ \mathbf{y}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

2000 年, Taniguchi 等^[10] 又将模型 (1) 进行了推广, 考虑了等式两端的模糊规则数与隶属度函数均不相同的情况:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^r v_k(z(t)) E_k \dot{\mathbf{x}}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i \mathbf{x}(t) + B_i \mathbf{u}(t)] \\ \mathbf{y}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $h_i(z(t))$ 和 $v_k(z(t))$ 是模糊规则的规范化权重, 且满足 $h_i(z(t)) \geq 0$, $\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1$, $v_k(z(t)) \geq 0$, $\sum_{k=1}^r v_k(z(t)) = 1$. $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$ 是状态向量, $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{R}^m$ 是输入向量, $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{R}^q$ 是输出向量. 一般来说, $E_k \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 是奇异矩阵, $A_i \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $B_i \in \mathbf{R}^{n \times m}$, $C_i \in \mathbf{R}^{q \times n}$.

如果直接寻求模型 (1) 或模型 (2) 的研究方法, 可能会因为导数矩阵为时变的“不定型”而使问题变得复杂, 为了克服这个困难, Taniguchi 等分别对系统 (1) 和系统 (2) 做了如下变换:

定义 $\mathbf{x}^*(t) = [\mathbf{x}^T(t) \quad \dot{\mathbf{x}}^T(t)]^T$, 系统 (1) 和系统

(2) 分别描述为

$$\begin{aligned} E^* \dot{\mathbf{x}}^*(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i^* \mathbf{x}^*(t) + B_i^* \mathbf{u}(t)] \\ \mathbf{y}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i^* \mathbf{x}^*(t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E^* \dot{\mathbf{x}}^*(t) &= \sum_{i=1}^r \sum_{k=1}^r h_i(z(t)) v_k(z(t)) [A_{ik}^* \mathbf{x}^*(t) + B_i^* \mathbf{u}(t)] \\ \mathbf{y}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i^* \mathbf{x}^*(t) \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$E^* = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_i^* = \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_i & -E_i \end{bmatrix}$$

$$A_{ik}^* = \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_i & -E_k \end{bmatrix}, \quad B_i^* = \begin{bmatrix} 0 \\ B_i \end{bmatrix}, \quad C_i^{*\top} = \begin{bmatrix} C_i^\top \\ 0 \end{bmatrix}$$

虽然文献 [9–10] 采用了上述构造增广系统的办法解决了导数项矩阵 E 为时变的困难, 但是带来了新的问题:

1) 在对构造的增广系统进行求解时, 由于系统矩阵的维数增加, 有可能导致需要计算的 LMI 的维数增加, 进而增加计算的复杂度.

2) 构造的增广系统改变了原系统的脉冲模, 无法确认两个系统之间的脉冲关系. 当 $\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) E_i$ 或 $\sum_{k=1}^r v_k(z(t)) E_k$ 不为可逆时变矩阵时, 增广系统出现了原系统不存在的脉冲模. 因此, 从容许性角度讲, 增广系统与原系统是不等价的.

更直观地, 文献 [9–10] 中由增广系统给出的稳定性条件要求 E_i 必须都是可逆的, 这更与建立广义系统模型的初衷相违背. Taniguchi 等的有关研究中, 基本上都作出了增广系统无脉冲的假设, 但是这并不表明原系统无脉冲. 无疑这种变量代换在运用上具有局限性, 因此, 需要寻找另外的办法, 解决导数矩阵时变的问题.

文献 [11] 分两种情况讨论了如何解决导数矩阵 E 时变的问题. 这两种情况都必须满足前提: 时变矩阵的秩始终保持不变. 此假设保证了系统的独立变量的个数不变, 即要求系统变量的相关性不随时间的变化而变化. 在这个假设下, 通过引入非奇异的坐标变换和相应的矩阵变换将原系统转化为具有常值导数矩阵的系统进行研究.

另外, 文献 [12] 在子系统导数矩阵 E_i 的秩均相等的情况下, 假设存在公共的可逆矩阵 Q , 使得 $E_i Q = [E_{i1} \quad 0]$, 其中, $E_{i1} \in \mathbf{R}^{n \times n_1}$, $i = 1, 2, \dots, r$, 在此假设的基础上, 对于每个 E_i , 选取对应的

$Q_i, i = 1, 2, \dots, r$, 使得

$$Q_i E_i Q = \text{diag}\{I_{n_1}, 0\} = E$$

然后构造新的状态变量 $\tilde{x} = Qx$, 并将系统矩阵作相应的非奇异变换, 最终得到了导数矩阵为常数矩阵 E 的模糊广义系统模型.

文献 [13–15] 针对具体的问题, 从不同角度考虑了模糊广义系统的建模和参数辨识的问题. 为了解决“规则爆炸”或“维数灾难”的问题, 文献 [13] 引入广义分层 T-S 模糊系统, 并且通过引入中间变量, 证明了分层模糊系统的输入输出关系可以表示为带有中间变量的 T-S 模糊广义系统. 文献 [14] 提出了基于遗传算法搜索 T-S 模型广义系统最优结构参数的方法, 采用二进制编码与实数编码并存的矩阵方式, 获得最优或次优模型. 文献 [15] 则在总结模糊系统逼近性的基础上, 给出了逼近性的证明. 从中可以看到 T-S 模糊广义系统可以以任意的精度逼近一类非线性的广义系统. 进而将这一结论由多输入单输出情形推广到多输入多输出情形, 并且利用神经网络的方法, 建立了 T-S 模糊广义系统的神经网络模型.

从上述的研究成果可以看出, 将模型 (1) 或模型 (2) 中的导数矩阵转化为常数矩阵的方法并不完善, 有的方法不能“等价”地进行转化, 有的方法又有比较理想化的限制条件. 因此, 目前广泛研究的仍然是全局系统中导数矩阵为常值矩阵的模糊模型. 至于是否可以直接考虑系统 (1) 或 (2) 的分析与综合问题, 还有待于进一步研究. Hong Bae Park 等在一篇手稿中将一类正常 T-S 模糊系统模型表示成 E 为非时变的 T-S 模糊广义模型, 解决其稳定性分析及镇定问题, 所给结果具有较小保守性. 这也说明虽然变量代换不能确定二者之间的脉冲关系, 但新的 T-S 模糊广义模型本身还是具有研究价值的.

1.2 T-S 模糊广义系统的稳定性分析

对于广义系统来说, 其稳定性与正常的状态空间系统稳定性有所不同. 除了要研究通常意义下的系统稳定性, 还要考虑其正则性和脉冲行为. 考虑正则性, 是因为正则性可以保证广义系统解的存在与唯一性; 考虑脉冲行为, 是因为脉冲可以破坏广义系统的正常工作, 甚至毁掉整个系统. 正则性、无脉冲、稳定性这三个性质又合称为容许性. 容许性可以理解为广义的“稳定性”.

自 T-S 模糊广义系统模型提出以来, 有关的理论和应用研究也逐步展开. 对于其“稳定性”或者说容许性的研究, 通常有两种思路: 一种是假设系统是正则且无脉冲的, 而直接讨论其稳定性; 另一种则是整体讨论系统的容许性. 无疑, 遵循第二种思路

的研究方法是更加具有广义系统特色的. Taniguchi 等提出了用 LMI 技术寻找状态反馈增益矩阵和构造公共 Lyapunov 函数的方法, 并给出了模糊广义系统二次稳定的 6 组稳定性条件, 进而得到通过并行分布补偿 (Parallel distributed compensations, PDC) 模糊控制器镇定广义系统的充分条件和放宽的稳定性条件^[8]. 进一步地, 文献 [16] 分别讨论了子系统 and 全局系统的正则、无脉冲、稳定的关系, 举例说明了子系统的正则、无脉冲、稳定并不能保证全局系统的正则、无脉冲、稳定. 指出了对模糊广义系统进行研究的可行性和必要性.

并行分布补偿模糊控制器的设计方法意即根据模糊模型自身的特点, 针对每个局部的线性系统设计局部控制器, 而整体的控制器便是各个局部控制器的模糊加权, 加权函数即为控制器所对应子系统的隶属度函数. 这样一种模糊控制器可以理解为由模糊系统模型“衍生”出来的, 是一种自然的、合乎逻辑的想法. 实践证明, 这种 PDC 方法设计模糊控制器是方便、有效的. 但是, 这种方法也并不是万能的, 或者说, 并不总是最理想的. 有时为了实现多种控制目的, 或是改善控制器的保守性, 需要直接从整体的角度考虑模糊系统的控制问题, 这时就需要构造“整体”的控制器, 而不能拘泥于 PDC 的控制器形式. 从模糊控制器设计方法的不断演化, 也可以从中感受到对这一领域研究的不断深入.

从选取 Lyapunov 函数的类型来看, 文献 [17–18] 基于公共 Lyapunov 函数方法研究了模糊广义系统的稳定性和鲁棒稳定性问题. 如果要求取满足所有子系统上的 LMI 的公共矩阵, 将会为稳定性分析及控制问题的研究带来很大的保守性, 特别是对于较复杂的系统, 模糊规则数较多时, 公共矩阵的求取就更为困难. 文献 [19] 根据隶属度函数的取值对状态空间重新进行划分, 进而构造相应的分片光滑的广义 Lyapunov 函数, 基于模糊极值子系统的思想, 研究了一类 T-S 模糊广义系统的二次稳定性与非线性模糊控制器的设计问题. 利用模糊极值子系统给出了模糊广义系统二次稳定的一个充分必要条件, 最后通过两个新条件将充分必要条件中的精确上界条件减弱为近似上界, 从而放宽了对充分必要条件的限制.

考虑到模糊系统模型的特殊性, 即全局系统是局部线性子系统的模糊加和, 那么能不能构造相应的类似形式的 Lyapunov 函数, 尽量让 Lyapunov 函数中的每个 P_i 对应各自的子系统, 在各自的模糊区域上“各尽其职”? 本着这样一个想法, 文献 [20–21] 考虑构造模糊 Lyapunov 函数来研究模糊广义系统. 作为多 Lyapunov 函数的一种, 模糊 Lyapunov 函数是若干个二次 Lyapunov 函数的模糊加权, 具有和

系统模型相同的隶属度函数. 因此, Lyapunov 函数的导数中就含有隶属度函数的导数项, 当所考虑系统的隶属度函数不可导时, 就不能够运用此种方法进行相应的研究. 为了克服隶属度函数可导的困难, 文献 [22] 基于积分型模糊 Lyapunov 函数得出了新的稳定性充分条件, 但是文中的 Lyapunov 函数矩阵和控制增益需要分步进行求解, 即不能将最终的问题转化为凸优化问题进行求解, 使得控制器设计的难度和保守性均有所增加. 由于 T-S 模糊广义系统本身描述的是非线性系统, 所以公共 Lyapunov 函数的选取无疑会为问题的研究带来更大的保守性, 其他类型 Lyapunov 函数的相继提出会从某种程度上降低保守性, 但这些函数的优势也不是绝对的. 因而对于 Lyapunov 函数的选取及其相关问题的研究正在继续深入.

当开环系统的性能不能达到要求时, 需要对系统实施控制, 如果采用状态反馈控制器, 则需要系统状态是物理可量测的, 如果状态仅仅部分可测, 则需构造状态观测器, 提取观测器系统的状态作为反馈控制器的状态变量. 针对上述问题, 文献 [23] 提出了 T-S 模糊广义系统的广义观测器模型, 基于此模型利用 LMI 的方法, 对模糊广义系统的稳定性进行了分析, 得到一个保证闭环系统稳定的充分条件, 并证明了分离原理在模糊广义系统中仍然成立, 即可以分别设计系统的状态观测器和控制器, 使其满足渐近稳定的充分条件. 由于 T-S 模型是非线性系统的“万能逼近器”, 即是原系统的一种近似, 而任何近似都存在着一一定程度的误差, 所以, 文献 [24] 考虑了“真实系统”(即带有原系统与模糊广义系统模型之间的建模误差)的观测器设计问题, 给出了观测器的分步求解方案. 另外, 文献 [25] 将动态输出反馈控制器的设计问题转化为一组矩阵不等式的可行解问题, 使得闭环系统不仅具有鲁棒性能, 而且将闭环系统极点配置在一个给定的圆形区域内, 从而保证系统具有期望的动态性能.

由于模糊广义系统模型的特殊性, 即各个模糊规则对应着线性广义系统, 文献 [26] 运用区间动态系统理论, 将 T-S 模糊广义系统转化为带有范数有界扰动的线性广义系统, 使得线性广义系统鲁棒控制的分析和设计方法可以用于 T-S 模糊广义系统的研究.

通常对于模糊广义系统的研究结果给出的都是充分性条件. 文献 [27–28] 分别研究了模糊广义系统的二次稳定性问题和状态反馈控制器以及观测器的设计问题, 得出了一个使系统二次稳定的必要条件. 首先验证满足该必要条件的公共矩阵是否存在, 确定可能存在后再进行求解, 从而减少在判断系统二次稳定性时的计算量. 此方法从不同于以往的角度

考虑了控制问题, 进一步拓宽了研究思路.

对于离散模糊广义系统, 文献 [29–31] 单纯研究了开环系统的容许性问题. 其中, 文献 [29] 采用迭代映射的方法, 通过构造一系列映射, 寻找矩阵列的收敛点来获得最终的解. 由于所构造的一系列映射只适合于对单个变量进行求解, 因此, 该方法不宜推广到控制器的设计问题上, 即同时对 P 和 $K_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 进行求解. 进一步地, 文献 [30] 综合考虑各个子系统之间的相互作用, 引入描述子系统相互关系的关联矩阵, 得到了保证系统正则、因果 (离散广义系统的“因果性”对应于连续广义系统的“脉冲性”)、鲁棒稳定的充分条件. 文献 [32] 选取特殊形式的广义 Lyapunov 函数 $V(x(k)) = x^T(k)E^T E x(k)$, 即将通常需要进行求取的矩阵 P 取为单位矩阵 I , 这种设置方法避免了求取非严格 LMI (含有等式约束的 LMI 称为非严格 LMI, 通常 Matlab 中的 LMItoolbox 只能解决严格 LMI, 而不能对非严格 LMI 进行求解), 却增加了方法的保守性 (对于离散广义系统的矩阵 P 只要求为可逆对称矩阵).

1.3 T-S 模糊广义系统的控制

1.3.1 T-S 模糊广义系统的 H_∞ 控制

针对现代控制理论存在的问题, Zames 在 1981 年提出了著名的 H_∞ 控制思想^[33]. 经过近 30 年的发展, H_∞ 控制理论取得了大量的研究成果, 由于其特殊的优点, 在鲁棒控制中占有重要的位置, 是一个十分活跃的研究领域.

近来许多学者注意到, 以往 T-S 模糊系统与稳定性相关的研究中, 更多地注意每个局部子系统的稳定, 而较少考虑子系统之间的相互作用, 所以其条件过于保守. 而文献 [34–35] 给出了 T-S 模糊广义系统二次可稳的一个新的充分条件, 然后给出相应的 H_∞ 控制器存在的一个新的充分条件, 其条件由一个负定矩阵的形式给出, 所给条件不但简洁而且包含了子系统之间的相互作用. 这种兼顾整体与局部的思想为研究类似问题提供了一个新思路.

更具体地, 文献 [36] 针对前件变量是给定的函数、系统输出以及广义变量三种情况, 分别讨论了动态输出反馈 H_∞ 控制器的设计问题.

另外, 为了避免对模糊广义系统子模型的分析, 文献 [37] 通过构造等效系统, 将对模糊广义系统 H_∞ 控制的分析转化为对线性广义系统 H_∞ 控制的分析. 给出了在前件变量不可测时, 线性 H_∞ 控制器的设计方法. 不足之处是, 将原模糊广义系统转化为带有范数有界不确定性的线性广义系统时, 子系统的选取没有规律可以遵循, 不同的选取可能会导致不同的结果. 当考虑系统的不确定性时, 文献

[38–39] 研究了不确定模糊广义系统鲁棒 H_∞ 控制问题, 其中, 文献 [39] 还考虑了动态输出反馈 H_∞ 控制器的设计问题, 所得条件均由 LMI 表示。

对于离散 T-S 模糊广义系统的 H_∞ 控制问题, 文献 [40] 引入新的容许条件克服了由于矩阵 E 的奇异性而导致的无法进行控制器设计的问题, 并且采用文献 [34–35] 中的方法对得到的 H_∞ 控制条件进行了放宽。但是, 文献 [40] 在矩阵分解的过程中选取形式较为特殊的待求矩阵, 为问题的求解带来一定的保守性。文献 [41] 通过引入辅助矩阵变量得到了新的容许性条件, 克服了由于矩阵 P 的不定性导致的难于将非线性 Lyapunov 不等式转化为 LMI 的困难, 进而将其转化为严格矩阵不等式形式的条件。

1.3.2 T-S 模糊广义系统的保成本控制

在保证系统容许的基础上, 通常要求系统满足一定的性能, 比如使得预先给定的成本函数取得较小的值, 即消耗较小的成本达到预期的目的。文献 [42] 以 LMI 的形式给出了使得系统二次性能指标上界最小的优化设计方法, 同时给出了使得系统二次稳定的状态反馈控制器的设计方法。对系统中的所有容许的不确定参数, 文献 [43–44] 设计了状态反馈最优保成本控制器, 使得闭环系统不仅渐近稳定, 而且具有最小性能指标上界。进一步地, 考虑执行器可能出现故障时的情况, 文献 [45] 研究了参数不确定并且部分执行器失效的鲁棒容错保性能控制问题。对于所容许的不确定参数, 给出了鲁棒容错保性能控制器存在的充分条件。

1.3.3 T-S 模糊广义系统的无源控制和跟踪控制

电路中经过电阻能量耗散引发的输入–输出系统无源的概念已经广泛应用于非线性系统的稳定性分析中。用 Lyapunov 函数研究基于状态空间描述的非线性系统的无源性, 使得储存、耗散能量等概念有了更直观的几何解释。近年来, 作为研究非线性系统的重要工具, 耗散性和无源性的研究更受学者关注。文献 [46–47] 将严格无源的概念引入到 T-S 模糊广义系统中, 并且通过矩阵分解方法, 给出了系统的容许条件。在此基础上, 得到了闭环系统容许、严格无源的充分条件。

文献 [10, 48] 研究了系统跟踪控制问题, 运用模糊广义系统分别表示非线性系统模型和欲跟踪的参考模型, 继而提出“双胞胎并行分布补偿”控制器, 即控制器由两部分构成, 一部分是原系统的状态信息, 一部分是参考模型的状态信息。借助模糊广义系统模型最终实现非线性系统的轨迹跟踪问题, 并得出调节器控制和伺服控制可归结为跟踪控制问题的特殊情形。另外, 文献 [10] 解决了跟踪过程中由于状

态变量相关而引起的问题, 并采用 H_∞ 理论讨论了跟踪控制器的设计, 对跟踪控制进行了鲁棒性分析。

1.3.4 T-S 模糊广义系统的非脆弱控制

众所周知, 基于系统参数的鲁棒控制要求控制器能够精确地实现。事实上, 由于 A/D、D/A 转换、有限字长限制以及舍入误差等因素的影响, 控制器在实现过程中具有一定的不确定性。Keel 等^[49] 指出, 现有的鲁棒控制设计方法对控制器参数的摄动会表现出脆弱性。对于控制器增益存在加法式摄动的情况, 文献 [50] 在系统隶属度函数与控制器隶属度函数不相同的情况下, 给出了非脆弱鲁棒控制器的存在条件和求解方法。另外, 文献 [51] 讨论了两种非脆弱控制器的设计方法, 所设计控制器不仅保证系统是容许的, 而且是无源的。而文献 [52] 研究了具有反馈增益变化的状态反馈控制器的设计问题, 使得所设计的控制器对自身受到的扰动具有“鲁棒性”。

1.3.5 T-S 模糊广义交联系统的分散控制

对于大系统来说, 分散控制的技术优于集中控制技术, 所以近三十年来, 交联大系统的分散控制得到了广泛的研究^[53–56]。在实际系统中, 由于不可避免地带有不同程度的不确定性, 一个数学模型通常不可能精确地描述一个动态系统, 对于大系统尤其如此。因此, 文献 [57] 对广义非线性交联大系统进行了鲁棒控制研究。应用模糊规则及权重的性质, 并考虑建模误差, 得到基于 LMI 优化技术的低保守性的鲁棒模糊分散控制器设计方法。当考虑系统满足一定的性能指标时, 文献 [58] 研究了参数不确定 T-S 模糊广义交联大系统的鲁棒分散 H_∞ 控制问题, 并得到了状态反馈鲁棒分散 H_∞ 控制器的设计方法。另外, 文献 [59] 分别研究了参数不确定的 T-S 模糊广义交联大系统的分散保成本控制问题, 并得到了状态反馈鲁棒分散控制器的设计方案。

2 时滞 T-S 模糊广义系统的研究现状

2.1 时滞 T-S 模糊广义系统的模型描述

时滞系统本质上为无限维系统, 其结构和性质都比不具有时滞的系统更加复杂, 而且很多系统的实际模型都为时滞系统, 因此, 此类系统也越来越为广大学者所关注。

时滞广义系统除了具备时滞系统的解不能反向延展、解轨道可以相交、解具有变异性、解空间为无穷维等性质外, 它还具备广义系统的一些复杂特性, 这些特性仍未得到充分揭示。时滞广义系统的模型是非传统的数学模型, 其动态响应建立在解空间为无穷维的复合流形上, 使得其定性、定量特征很难把握。国内学者谢湘生、李远清、刘永清等就二维情形

分别考虑了系统的动态特性,发现时滞广义系统由于系数的不同选取,会出现不同情形。

时滞广义系统与不含时滞的广义系统在系统结构上有区别,不含时滞的广义系统可以分解为一个动态层的子系统和一个静态层的子系统。但时滞广义系统可能无法做这样的分解,例如:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{x}(t) + \mathbf{y}(t) + a\mathbf{y}(t-d) + \mathbf{f}_1(t) \\ \mathbf{0} &= -2\mathbf{x}(t) + \mathbf{y}(t) + a\mathbf{y}(t-d) + \mathbf{f}_2(t)\end{aligned}$$

若 $a \neq 0$, 要求出所有的状态变量,就必须求解如下两个动态方程

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= 3\mathbf{x}(t) + \mathbf{f}_1(t) - \mathbf{f}_2(t) \\ \mathbf{y}(t) + a\mathbf{y}(t-d) &= 2\mathbf{x}(t) - \mathbf{f}_2(t)\end{aligned}$$

这意味着时滞广义系统不一定能分解成一个动态层子系统和一个静态层子系统。此例说明,时滞广义系统还可以分解为微分方程描述的慢变动态层子系统和代数差分方程描述的快变动态层子系统。这与由动态层子系统和静态层子系统组成的不含时滞的广义系统又有很大的区别,即系统的结构更为复杂。而且对线性定常时滞广义系统,不相容初始条件导致的跳跃不再像正常的线性定常系统那样,只限制于初始时刻,经时滞因素的作用,跳跃间断点将分布到整个时间半轴,以至这样的初始条件所确定的解成为“振荡”解,振幅与原来初始跳跃的强度有关,而频率则取决于时滞 d 的大小,时滞 d 越小,频率越高。由此可见,略去时滞就无法准确地了解系统解的性质。

为了更好地研究非线性时滞系统,通常采用如下形式的模型:

$$E\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t))[A_i\mathbf{x}(t) + A_{1i}\mathbf{x}(t-\tau(t)) + B_i\mathbf{u}(t)] \quad (5)$$

其中, $\mathbf{x}(t-\tau(t))$ 表示系统的时滞状态, $\tau(t)$ 代表时变时滞,如果时滞始终保持不变,则可由 $\mathbf{x}(t-\tau)$ 表示时滞状态,而 τ 代表定常时滞。

2.2 时滞 T-S 模糊广义系统的稳定性分析

随着研究的不断深入,由时滞 T-S 模糊广义模型描述的非线性时滞广义系统的控制问题已初步展开。文献 [60] 单纯考虑了时滞模糊广义系统的稳定性问题。而文献 [12] 在给出时滞模糊广义系统的稳定性准则的基础上给出了状态反馈控制器存在的充分条件。当考虑系统含有不确定因素时,文献 [61] 研

究了鲁棒控制问题,并运用文献 [34-35] 中的方法降低了所得条件的保守性。

对于时滞系统来说,时滞因素对系统性能的影响至关重要,因此,在研究系统稳定性时,将时滞因素考虑进去也是自然的想法。文献 [62] 通过定义新的 Lyapunov 函数,采用 Moon 不等式处理积分中的状态与状态导数的乘积项,给出时滞相关稳定性判据。并进一步考虑模糊权重的作用,给出放宽的模糊控制器设计方案。不同于传统的寻求公共可逆矩阵的方法(广义系统中不要求 Lyapunov 函数中的矩阵为正定的),文献 [63] 基于矩阵测度给出保证时滞系统鲁棒稳定的充分条件,并将此条件进一步转化为 LMI,通过求解 LMI,即可得到状态反馈控制器和静态输出反馈控制器。

2.3 时滞 T-S 模糊广义系统的控制

2.3.1 时滞 T-S 模糊广义系统的 H_∞ 控制

文献 [64-66] 围绕时滞 T-S 模糊广义系统的 H_∞ 控制问题展开了研究。分别讨论了鲁棒稳定性问题、鲁棒镇定问题以及基于状态反馈的鲁棒 H_∞ 控制问题。其中文献 [64-65] 考虑的系统具有常数时滞,文献 [66] 考虑的系统具有慢变时滞(时滞函数的导数小于 1)。文献 [64-66] 均采用模糊广义系统中常用的一些研究方法,没有采用任何降低问题保守性的方法。文献 [67] 在对子系统矩阵进行分块后,利用 Moon 不等式和对矩阵乘积的放大处理,得到了以矩阵分块形式表达的时滞相关稳定条件和 H_∞ 控制策略。

2.3.2 时滞 T-S 模糊广义系统的可靠控制和非脆弱控制

可靠性是对控制系统非常重要的性能要求之一,而可靠控制则是改善系统可靠性能的有效手段。可靠控制的核心思想是设计一个固定的控制器,使得系统无论是在所有的控制部件正常工作,还是部件部分失效的情况下,都能保持系统的稳定性和其他性能。不同于通常的失效模型,文献 [68] 考虑了一种新的执行器失效模型,给出执行器失效的容许集,即容许的最坏失效情况。所设计的可靠控制器可以保证系统在容许集范围内正则、无脉冲、稳定,并运用分离原理实现观测器的一步设计。

另外,文献 [69-70] 分别研究了时滞模糊广义系统的非脆弱线性二次型 (Linear quadratic, LQ) 模糊控制问题和 H_∞ 控制问题。两者均讨论了控制器存在加型摄动时的设计问题,即使得所设计控制器在实现系统性能的同时,对于自身受到的“扰动”具有较好的鲁棒性。

T-S 模糊广义系统的研究成果中,有一部分是以学位论文的形式呈现的。其中,文献 [71] 中大部

分结果是在假设系统可解的前提下进行研究, 而没有深入讨论系统的正则性和脉冲问题. 文献 [72] 较全面和系统地研究了 T-S 模糊广义系统的分析与控制问题, 其中详细讨论了子系统与全局系统在正则性、脉冲、稳定性方面的关系; 并考虑了稳定性问题、鲁棒 H_∞ 控制问题、无源控制问题、容错控制等问题, 文献 [73] 在相关结论的基础上, 进一步探讨了如何降低问题求解的保守性等问题, 这些学位论文为 T-S 模糊广义系统基础理论的研究提供了较为丰富的成果.

3 T-S 模糊广义系统的应用

在非线性广义系统的研究中, 基于 T-S 模糊模型的控制不失为一种另辟蹊径的好方法. 然而, 关于其具有应用背景的研究工作还相对较少, 尤其在生物经济领域中的应用更是鲜见. 文献 [74] 利用 T-S 模糊广义系统模型描述了一类广义生物经济系统, 并利用 T-S 模糊广义系统控制方法, 设计状态反馈控制器, 保证闭环生物经济系统二次稳定, 通过控制捕获的努力量, 抑制种群的变化, 从而消除系统中出现的奇异诱导分岔及脉冲行为; 另一方面, 考虑带有干扰因素的生物经济系统 H_∞ 控制问题, 通过设计 T-S 模糊广义系统的 H_∞ 状态反馈控制器, 在保证投入较少的控制能量情况下, 外界环境的干扰对系统的状态、输出的影响降低到最小程度, 并使得生物经济系统正常运行. 生物经济系统是典型的非线性复杂系统, 利用 T-S 模糊广义系统控制方法解决生物经济系统问题必将成为生物控制领域的一种新尝试.

目前已经有一些学者借助于广义系统的方法研究各类问题, 例如鲁棒控制问题^[75-76]、时滞系统的控制问题^[77-78]、正常模糊系统控制问题^[79-81]. 这些文章的处理手法类似, 基本上是引入一个名义上的“快变量”, 与原有的微分方程共同构成一个广义系统, 然后运用广义系统的相关理论进行研究. 尤其是对于正常 T-S 模糊系统采用广义系统方法后就转化为了 T-S 模糊广义系统的相关控制问题. 这也从一个角度说明, T-S 模糊广义系统本身就是一种研究问题的工具^[82-84].

目前, T-S 模糊广义系统方法的应用还较少, 比较典型的是对两连杆机器人的研究^[85], 虽然可将机器人的原始模型用 T-S 模糊广义系统模型进行描述, 但是由于此模糊模型的导数矩阵为时变的, 即类似于模型 (2), 目前对这类模型还没有很好的研究办法, 这也促使学者们更注重对模型本身的思考, 如是否可以模型 (2) 直接进行研究, 从而避免一些“等价变换”的失真.

4 T-S 模糊广义系统理论尚待解决的问题

T-S 模糊广义系统模型的建立为非线性广义系统的研究开辟了新途径. 但是目前仍存在一些尚待解决的问题和不足:

1) 当导数矩阵为非线性矩阵时, 如果使用 T-S 模糊控制方法来处理系统中的非线性, 自然的方法是利用一组带有不同导数矩阵的线性广义系统来逼近原系统. 但到目前为止, 已有文献提供的方法是将导数矩阵上的“差异”转移到状态矩阵上. 这种方法存在明显的不足, 即所得到的系统与原系统不等价 (因为变换后系统中会出现脉冲)^[86]. 另外一些方法也需要在导数矩阵具有常秩的前提下进行讨论. 因此, 有关 T-S 模糊广义系统 (特别是局部线性系统的导数矩阵为彼此不相同) 的各种分析与综合问题仍需要进一步的研究: 或者找到更有效的“转化”方法, 或者直接对带有模糊加和形式导数矩阵的模型进行讨论.

2) 对广义系统而言, 与稳定性 (或容许性) 同样重要的性质, 还包括其能控性和能观性. 目前, 关于 T-S 模糊广义系统的能控性和能观性的研究尚未见公开报道. 这是因为 T-S 模糊广义系统本质上为非线性时变广义系统, 而非线性时变广义系统自身的能控性和能观性难于给出定义, 缺乏有效的描述和检验方法. 目前, 对 T-S 模糊广义系统进行的一系列控制问题的研究都是在假设系统能控、能观的基础上进行的. 因此, 尽快从系统内部出发, 建立起 T-S 模糊广义系统的能控性、能观性的描述方法和判断依据, 是进一步深入研究 T-S 模糊广义系统的迫切要求.

3) 系统的任何部分都有可能受到外界不确定因素的影响, 特别是导数矩阵带有不确定性时, 可能使原来的系统发生“质变”. 因此, 考虑导数矩阵带有不确定性的情况非常重要, 这也是非线性广义系统鲁棒控制问题的难点所在. 由于已有的 Lyapunov 方法的限制, 使得在导数矩阵带有不确定性的广义系统的分析与设计问题变得难于处理. 文献中提供的带有广义约束的 Lyapunov 矩阵不等式条件中, 其在导数矩阵上具有等式约束. 这使得不能够利用它来直接处理导数矩阵为不确定的广义系统的问题. 因此, 处理导数矩阵带有摄动的广义系统问题时, 首要的一个问题是如何建立更有效的 Lyapunov 条件, 使得 LMI 方法和其他相关技术能够被方便地应用到其中, 已有一些研究人员在这方面进行了有益的探索^[87-89].

4) 目前, 关于广义系统中脉冲行为的深入研究还较少, 人们对这种脉冲行为的认识还不够全面和深入, 相信随着研究的进一步深入以及不同领域知

识的交融,将会使得人们对脉冲行为的认识更加深入,这种深入将有利于人们对广义系统的研究和控制,使得广义系统理论更加详尽和完善,也将更加有利于广义系统理论在实际中的应用.如何将广义系统中一些好的设计方法应用于实际,解决工程中遇到的实际问题,并用于现场的指导.这也有待于做进一步的研究.

5) 问题的复杂性促使研究者不能局限于单一方法的使用,例如可以把 T-S 模糊广义系统和神经网络相结合,因为它们两者具有互补性质,神经网络可以向模糊系统提供连接式结构(具有容错、分布式表示性质)和学习能力;模糊系统向神经网络提供具有高级模糊思维和推理的机构框架.

虽然模糊广义系统的研究刚刚起步,遇到的困难也颇多,但是随着理论研究的不断深入,成熟的正常系统理论与广义系统控制理论的结合, T-S 模糊广义系统的分析与综合必将达到一个新的高度、新的水平,必将充满生命力.

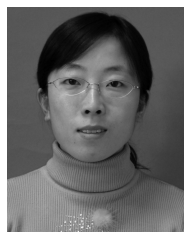
References

- Brenan K E, Campbell S L, Petzold L R. *Numerical Solution of Initial-Value Problems in Differential-Algebraic Equations*. Holland: Elsevier Science, 1989
- Wu H S, Mizukami K. Stability and robust stabilization of nonlinear descriptor systems with uncertainties. In: *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control*. Lake Buena Vista, USA: IEEE, 1994. 2772–2777
- Wang H S, Yung C F, Chang F R. H_∞ control for nonlinear descriptor systems. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 1–11
- Kawaji S, Taha E Z. Feedback linearization of a class of nonlinear descriptor systems. In: *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control*. Lake Buena Vista, USA: IEEE, 1994. 4035–4042
- Chen Bo-Shan. *Qualitative Theory and Control of Nonlinear Descriptor System* [Ph.D. dissertation], South China University of Technology, China, 1999
(陈伯山. 非线性广义系统定性理论与控制 [博士学位论文], 华南理工大学, 中国, 1999)
- Zadeh L A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, **8**(3): 338–353
- Mamdani E H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the IEEE*, 1974, **121**(12): 1585–1588
- 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
- Taniguchi T, Tanaka K, Yamafuji K, Wang H O. Fuzzy descriptor systems stability analysis and design via LMIs. In: *Proceedings of the American Control Conference*. San Diego, USA: IEEE, 1999. 1827–1831
- Taniguchi T, Tanaka K, Wang H O. Fuzzy descriptor systems and nonlinear model following control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2000, **8**(4): 442–452
- Shi Xiao-Yan. *Research on Fuzzy Descriptor Control Systems Based on Takagi-Sugeno Model* [Master dissertation], Tianjin University, China, 2003
(时晓岩. 基于 Takagi-Sugeno 模型的模糊广义控制系统的研究 [硕士学位论文], 天津大学, 中国, 2003)
- Lin C, Wang Q G, Lee T H. Stability and stabilization of a class of fuzzy time-delay descriptor systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2006, **14**(4): 542–551
- Liu Pu-Yin, Li Hong-Xing. Equivalence of generalized Takagi-Sugeno fuzzy system and its hierarchical system. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2000, **36**(5): 612–618
(刘普寅, 李洪兴. 广义 Takagi-Sugeno 模糊系统与其分层系统的等价性. 北京师范大学学报(自然科学版), 2000, **36**(5): 612–618)
- Hu Lian-Jun, Song Hong. Study on generalized T-S fuzzy model in nonlinear system. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology)*, 2006, **31**(3): 38–40
(胡莲君, 宋弘. 非线性系统的广义 T-S 模糊模型的研究. 昆明理工大学学报(理工版), 2006, **31**(3): 38–40)
- Ma Jun-Feng, Zhang Qing-Ling. Approximation property of T-S fuzzy singular systems. *Control Theory and Applications*, 2008, **25**(5): 837–844
(马俊峰, 张庆灵. T-S 模糊广义系统的逼近性. 控制理论与应用, 2008, **25**(5): 837–844)
- Zhu Bao-Yan, Zhang Qing-Ling, Da Ke-Ning. State feedback robust H_∞ control for T-S fuzzy descriptor systems. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2004, **25**(5): 453–456
(朱宝彦, 张庆灵, 笪可宁. 基于状态反馈的广义 T-S 模糊系统鲁棒 H_∞ 控制. 东北大学学报(自然科学版), 2004, **25**(5): 453–456)
- Taniguchi T, Tanaka K, Wang H O. Fuzzy descriptor systems and fuzzy controller designs. In: *Proceedings of the 8th International Fuzzy System Association World Congress*. Taipei, China: Tsinghua University Press, 1999. 655–659
- Ma B P, Sun J. Robust stabilization of uncertain T-S fuzzy descriptor systems. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. Shanghai, China: IEEE, 2004. 334–337
- Liu Guo-Yi, Zhang Qing-Ling, Yang Li, Zhai Ding. Quadratic stability study for a class of T-S fuzzy descriptor systems. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2004, **25**(12): 1131–1133
(刘国义, 张庆灵, 杨丽, 翟丁. 一类 T-S 广义模糊系统二次稳定性问题的研究. 东北大学学报(自然科学版), 2004, **25**(12): 1131–1133)
- Yuan Y H, Zhang Q L, Zhang D Q, Chen B. Admissible condition of fuzzy descriptor systems based on fuzzy Lyapunov function approach. *International Journal of Information and Systems Sciences*, 2008, **4**(2): 219–232
- Yuan Yu-Hao, Zhang Qing-Ling, Chen Bing, Liu Chao. H_∞ control for fuzzy descriptor systems based on fuzzy Lyapunov function approach. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(8): 929–936
(袁宇浩, 张庆灵, 陈兵, 刘超. 基于模糊 Lyapunov 函数方法的模糊广义系统 H_∞ 控制. 自动化学报, 2008, **34**(8): 929–936)
- Chang Xiao-Heng, Jing Yuan-Wei, Gao Xi-Ying. Stability of T-S fuzzy descriptor systems based on fuzzy Lyapunov method. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2007, **26**(4): 563–565
(常晓恒, 井元伟, 高曦莹. 基于 Lyapunov 方法的模糊广义系统稳定性. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2007, **26**(4): 563–565)

- 23 Zhu B Y, Zhang Q L. Stability analysis of the fuzzy descriptor systems based on observer and the separation principle. In: Proceedings of 2004 Chinese Control and Decision Conference. Huangshan, China: Press of Northeastern University, 2004. 440–443
- 24 Lian K Y, Liu P, Liou J J, Wu T C. Robust output feedback control for fuzzy descriptor systems. In: Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Melbourne, Australia: IEEE, 2001. 904–907
- 25 Gao Dan, Cao Yuan-Yuan. Output feedback control for the descriptor T-S fuzzy systems with pole-placement constraints. *Engineering Science*, 2006, **8**(4): 63–67
(高丹, 曹媛媛. 具有极点区域约束的广义模糊系统的输出反馈控制. 中国工程科学, 2006, **8**(4): 63–67)
- 26 Wang Y, Zhang Q L, Liu W Q. Stability analysis and design for T-S fuzzy descriptor systems. In: Proceedings of the 40th Conference on Decision and Control. Orlando, USA: IEEE, 2001. 3962–3967
- 27 Shi Xiao-Yan, Gao Zhi-Wei. Stability analysis for fuzzy descriptor systems. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, **27**(6): 1087–1089
(时晓岩, 高志伟. 模糊广义系统的稳定性分析. 系统工程与电子技术, 2005, **27**(6): 1087–1089)
- 28 Shi Xiao-Yan, Gao Zhi-Wei. Stability analysis and control design of fuzzy descriptor systems. *Journal of Tianjin University*, 2004, **37**(9): 806–809
(时晓岩, 高志伟. 模糊广义系统的稳定性分析与控制器设计. 天津大学学报, 2004, **37**(9): 806–809)
- 29 Huang C P. Stability analysis of discrete singular fuzzy systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, **151**(1): 155–165
- 30 Xu S Y, Song B, Lu J W, Lam J. Robust stability of uncertain discrete-time singular fuzzy systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 2007, **158**(20): 2306–2316
- 31 Zhu Bao-Yan, Zhang Qing-Ling, Tong Shao-Cheng. Stability criteria for a class of Takagi-Sugeno fuzzy discrete descriptor system. *Control Theory and Applications*, 2007, **24**(1): 113–116
(朱宝彦, 张庆灵, 佟绍成. 一类 Takagi-Sugeno 模糊离散广义系统的稳定性判据. 控制理论与应用, 2007, **24**(1): 113–116)
- 32 Wang Y, Zhang Q L, Liu X D. Robustness design of uncertain discrete-time fuzzy descriptor systems with guaranteed admissibility. In: Proceedings of the American Control Conference. Anchorage, USA: IEEE, 2002. 1699–1704
- 33 Zames G. Feedback and optimal sensitivity: model reference, transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1981, **26**(2): 301–320
- 34 Liu X D, Zhang Q L, Rao M. New approaches to H_∞ control for T-S fuzzy descriptor systems via LMI. *Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems, Series B: Applications and Algorithms*, 2004, **11**(1-2): 153–164
- 35 Liu Xiao-Dong, Zhang Qing-Ling, Wang Yan. H_∞ control for T-S fuzzy descriptor systems. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2002, **23**(5): 428–431
(刘晓东, 张庆灵, 王岩. T-S 模糊广义系统的 H_∞ 控制. 东北大学学报 (自然科学版), 2002, **23**(5): 428–431)
- 36 Yoneyama J, Ichikawa A. H_∞ control for Takagi-Sugeno fuzzy descriptor systems. In: Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Tokyo, Japan: IEEE, 1999. 28–33
- 37 Liu Tie-Sheng. Linear H_∞ -controller for fuzzy descriptor system. *Computing Technology and Automation*, 2005, **24**(4): 4–6
(刘铁生. 模糊广义系统的线性 H_∞ 控制器. 计算技术与自动化, 2005, **24**(4): 4–6)
- 38 Wang Yan, Zhang Qing-Ling. Robust H_∞ fuzzy controller design for uncertain fuzzy descriptor systems. *Computing Technology and Automation*, 2003, **22**(1): 3–7
(王岩, 张庆灵. 不确定广义模糊系统的鲁棒模糊 H_∞ 控制器设计. 计算技术与自动化, 2003, **22**(1): 3–7)
- 39 Zhu Bao-Yan, Zhang Qing-Ling. Robust H_∞ control for fuzzy descriptor systems with uncertain parameters. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, **28**(3): 421–428
(朱宝彦, 张庆灵. 参数不确定的广义 T-S 模糊系统的鲁棒 H_∞ 控制. 系统工程与电子技术, 2006, **28**(3): 421–428)
- 40 Lee H J, Kau S W, Lee C H, Hong L, Yang H Z, Fang C H. H_∞ control for discrete-time fuzzy descriptor systems. In: Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Taipei, China: IEEE, 2006. 5059–5064
- 41 Yuan Yu-Hao, Zhang Qing-Ling, Chen Bing. H_∞ control for discrete T-S fuzzy descriptor systems. *Control Theory and Applications*, 2009, **26**(3): 332–336
(袁宇浩, 张庆灵, 陈兵. 离散 T-S 模糊广义系统的 H_∞ 控制. 控制理论与应用, 2009, **26**(3): 332–336)
- 42 Zhou Lin-Na, Zhang Qing-Ling, Liu Guo-Yi. Sub-optimal control of T-S fuzzy descriptor system. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2006, **27**(3): 244–246
(周林娜, 张庆灵, 刘国义. T-S 模糊广义系统的次优控制. 东北大学学报 (自然科学版), 2006, **27**(3): 244–246)
- 43 Zhu Bao-Yan, Zhang Qing-Ling. Optimal guaranteed cost control for T-S fuzzy descriptor systems with uncertain parameters. *Systems Engineering — Theory and Practice*, 2004, **24**(12): 49–57
(朱宝彦, 张庆灵. 参数不确定的广义 T-S 模糊系统的最优保成本控制. 系统工程理论与实践, 2004, **24**(12): 49–57)
- 44 Ma B P, Zhu X M, Sun J. Guaranteed cost control of uncertain T-S fuzzy descriptor systems. In: Proceedings of the 4th International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Guangzhou, China: IEEE, 2005. 742–746
- 45 Zhu Bao-Yan, Zhang Qing-Ling, Da Ke-Ning, Li Hai-Yan. Robust fault-tolerant guaranteed cost control for fuzzy descriptor system with uncertain parameters. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2005, **26**(7): 613–616
(朱宝彦, 张庆灵, 笪可宁, 李海燕. 参数不确定的广义 T-S 模糊系统的鲁棒容错保性能控制. 东北大学学报 (自然科学版), 2005, **26**(7): 613–616)
- 46 Zhu Bao-Yan, Zhang Qing-Ling, Tong Shao-Cheng. Passivity control for uncertain T-S fuzzy descriptor systems. *Acta Automatica Sinica*, 2006, **32**(5): 674–679
- 47 Zhu Bao-Yan, Zhang Qing-Ling, Tong Shao-Cheng. The passivity control for a kind of T-S fuzzy descriptor system. *Systems Engineering — Theory and Practice*, 2006, **26**(6): 81–87
(朱宝彦, 张庆灵, 佟绍成. 一类 T-S 模糊广义系统的无源控制. 系统工程理论与实践, 2006, **26**(6): 81–87)
- 48 Taniguchi T, Tanaka K, Wang H O. Universal trajectory tracking control using fuzzy descriptor systems. In: Proceedings of the 38th Conference on Decision and Control. Phoenix, Arizona: IEEE, 1999. 4852–4857
- 49 Keel L H, Bhattacharyya S P. Robust, fragile, or optimal. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, **42**(8): 1098–1105

- 50 Ma Bao-Ping, Zhao Jin. Robust and non-fragile control for descriptor T-S fuzzy system. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology)*, 2006, **6**(3): 10–14
(马宝萍, 赵谨. 广义 T-S 模糊系统的鲁棒非脆弱控制. 南京师范大学学报(工程技术版), 2006, **6**(3): 10–14)
- 51 Zhang Y, Yuan Z H, Zhang Q L, Zhang J L. Non-fragile passivity control for a class of T-S fuzzy descriptor systems. In: Proceedings of the 4th International Conference on Impulsive and Hybrid Dynamical Systems. Nanning, China: Watam Press, 2007. 1477–1482
- 52 Zhang Yan, Zhang Qing-Ling, Li Qin. Non-fragile H_∞ control for a class of T-S fuzzy descriptor systems. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2007, **28**(11): 1521–1524
(张艳, 张庆灵, 李琴. 一类 T-S 模糊广义系统的非脆弱 H_∞ 控制. 东北大学学报(自然科学版), 2007, **28**(11): 1521–1524)
- 53 Zhang Qing-Ling. *Decentralized and Robust Control for Descriptor Systems*. Xi'an, China: Northwestern Polytechnical University Press, 1997
(张庆灵. 广义大系统的分散控制与鲁棒控制. 西安: 西北工业大学出版社, 1997)
- 54 Park J H, Lee S G. Robust decentralized stabilization of uncertain large-scale discrete-time systems. *International Journal of Systems Science*, 2002, **33**(8): 649–654
- 55 Tseng C S, Chen B S. H_∞ decentralized fuzzy model reference tracking control design for nonlinear interconnected systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2001, **9**(6): 795–809
- 56 Zhang H B, Feng G. Stability analysis and H_∞ controller design of fuzzy large-scale systems based on piecewise Lyapunov functions. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2008, **38**(5): 1390–1401
- 57 Wang Y, Zhang Q L. Robust fuzzy decentralized control for nonlinear interconnected descriptor systems. In: Proceedings of the Conference on Fuzzy Systems. Sydney, Australia: IEEE, 2001. 1392–1395
- 58 Zhu Bao-Yan, Zhang Qing-Ling, Tong Shao-Cheng. Robust becentralized H_∞ control for Takagi-Sugeno fuzzy descriptor interconnected large scale systems with uncertain parameters. *Chinese Journal of Engineering Mathematics*, 2007, **24**(4): 625–630
(朱宝彦, 张庆灵, 佟绍成. 不确定 Takagi-Sugeno 模糊广义交联大系统的鲁棒分散 H_∞ 控制. 工程数学学报, 2007, **24**(4): 625–630)
- 59 Zhu B Y, Zhang Q L, Zhang X F. Decentralized robust guaranteed cost controller for uncertain T-S fuzzy interconnected systems with time delays. *International Journal of Information and Systems Sciences*, 2005, **1**(1): 73–88
- 60 Zhu B Y, Zhang Q L, Tong S C. The stability criterions for fuzzy descriptor systems with time-delay. *Control and Intelligent Systems*, 2007, **35**(3): 223–227
- 61 Wang Y, Sun Z Q, Sun F C. Robust fuzzy control for class of nonlinear descriptor systems with time-varying delay. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2004, **2**(1): 76–82
- 62 Yuan Yu-Hao, Zhang Qing-Ling, Chen Bing. Delay-dependent fuzzy control for nonlinear descriptor systems. *Acta Automatica Sinica*, 2006, **32**(5): 824–828
(袁宇浩, 张庆灵, 陈兵. 非线性广义系统时滞相关的模糊控制. 自动化学报, 2006, **32**(5): 824–828)
- 63 Yuan Yu-Hao, Zhang Qing-Ling, Chen Bing. Robust fuzzy control based on matrix measure for nonlinear descriptor systems with time-delay. *Control and Decision*, 2007, **22**(2): 174–179
(袁宇浩, 张庆灵, 陈兵. 基于矩阵测度的非线性广义时滞系统鲁棒模糊控制. 控制与决策, 2007, **22**(2): 174–179)
- 64 Xiang Z R, Chen Q W, Hu W L. Robust H_∞ control for fuzzy descriptor systems with state delay. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2005, **16**(1): 98–101
- 65 Zhu Bao-Yan, Zhang Qing-Ling. Robust H_∞ control for T-S fuzzy descriptor systems with time-delay. *Electric Machines and Control*, 2005, **9**(4): 352–356
(朱宝彦, 张庆灵. 时滞 T-S 模糊广义系统鲁棒 H_∞ 控制. 电机与控制学报, 2005, **9**(4): 352–356)
- 66 Tian W H, Zhang H G, Yang X M. Robust H_∞ control for fuzzy descriptor systems with time-varying delay and parameter uncertainties. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Natural Computation. Haikou, China: IEEE, 2007. 18–22
- 67 Yuan Y H, Yuan Z H, Zhang Q L, Zhang D Q, Chen B. Reliable control of fuzzy descriptor systems with time-varying delay. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Xi'an, China: Springer-Verlag, 2006. 169–178
- 68 Ren J S. Non-fragile LQ fuzzy control for a class of nonlinear descriptor systems with time delays. In: Proceedings of the 4th International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Guangzhou, China: IEEE, 2005. 797–802
- 69 Zhang H B, Shen Y Y, Gang F. Delay-dependent stability and H_∞ control for a class of fuzzy descriptor systems with time-delay. *Fuzzy Sets and Systems*, 2009, **160**(12): 1689–1707
- 70 Ren J S. Non-fragile robust H_∞ fuzzy controller design for a class of nonlinear descriptor systems with time-varying delays in states. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Xi'an, China: Springer-Verlag, 2006. 119–128
- 71 Wang Yan. Stability Analysis of Fuzzy Systems and Fuzzy Control of Descriptor Systems [Ph. D. dissertation], Northeastern University, China, 2003
(王岩. 模糊系统稳定性分析及广义系统的模糊控制 [博士学位论文], 东北大学, 中国, 2003)
- 72 Zhu Bao-Yan. Analysis and Control for a Kind of T-S Fuzzy Descriptor Systems [Ph. D. dissertation], Northeastern University, China, 2006
(朱宝彦. 一类 T-S 模糊广义系统的分析与控制 [博士学位论文], 东北大学, 中国, 2006)
- 73 Yuan Yu-Hao. Analysis and Synthesis for a Kind of T-S Fuzzy Descriptor Systems [Ph. D. dissertation], Northeastern University, China, 2008
(袁宇浩. 一类 T-S 模糊广义系统的分析与综合 [博士学位论文], 东北大学, 中国, 2008)
- 74 Zhang Yue. Analysis of Complexity and Study of Control Problem for Biology Dynamical Systems [Ph. D. dissertation], Northeastern University, China, 2007
(张悦. 生物动力系统复杂性分析及控制问题研究 [博士学位论文], 东北大学, 中国, 2007)
- 75 Cao Y Y, Lin Z L. A descriptor system approach to robust stability analysis and controller synthesis. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, **49**(11): 2081–2084
- 76 Han Q L. A descriptor system approach to robust stability of uncertain neutral systems with discrete and distributed delays. *Automatica*, 2004, **40**(10): 1791–1796

- 77 Yoneyama J. H_∞ control for fuzzy time-delay systems via descriptor system approach. In: Proceedings of the International Symposium on Intelligent Control. Taipei, China: IEEE, 2004. 407–412
- 78 Fridman E, Shaked U. A descriptor system approach to H_∞ control of linear time-delay systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, **47**(2): 253–270
- 79 Tanaka K, Ohtake H, Wang H O. A descriptor system approach to fuzzy control system designs using fuzzy Lyapunov function. In: Proceedings of the American Control Conference. Minneapolis, USA: IEEE, 2006. 4367–4372
- 80 Tanaka K, Nebuya T, Ohtake H, Wang H O. Fuzzy control system designs using redundancy of descriptor representation: a fuzzy Lyapunov function approach. In: Proceedings of the American Control Conference. Portland, USA: IEEE, 2005. 1096–1101
- 81 Tanaka K, Ohtake H, Wang H O. A descriptor system approach to fuzzy control system design via fuzzy Lyapunov functions. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2007, **15**(3): 333–341
- 82 Yang J, Zhong S M, Xiong L L. A descriptor system approach to non-fragile H_∞ control for uncertain fuzzy neutral systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 2009, **160**(4): 423–438
- 83 Chen Y J, Wang W J, Chang C L. Guaranteed cost control for an overhead crane with practical constraints: fuzzy descriptor system approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, **22**(4-5): 639–645
- 84 Kevin G, Tahar B, Noureddine M. Robust dynamic output feedback fuzzy Lyapunov stabilization of Takagi-Sugeno systems — a descriptor redundancy approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 2009, **160**(19): 2796–2811
- 85 Horst S, Kevin G. Modelling and simulation of two-link robot manipulators based on Takagi-Sugeno fuzzy descriptor systems. In: Proceedings of the International Conference on Industrial Technology. Mumbai, India: IEEE, 2006. 2692–2697
- 86 Zhang Da-Qing. Studies on the Stability and the Controllability of Some Classes of Systems [Ph.D. dissertation], Northeastern University, China, 2007
- (张大庆. 若干类系统的稳定性与能控性的研究 [博士学位论文], 东北大学, 中国, 2007)
- 87 Le V X. Synthesis of proportional-plus-derivative feedbacks for descriptor systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1992, **37**(5): 672–675
- 88 Lin C, Wang Q G, Lee T H. Robust normalization and stabilization of uncertain descriptor systems with norm-bounded perturbations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, **50**(4): 515–520
- 89 Duan Guan-Ren, Zhang Biao. Robust control system design using proportional plus partial derivative state feedback. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(5): 506–510



袁宇浩 南京工业大学自动化与电气工程学院讲师。主要研究方向为智能控制、鲁棒控制。本文通信作者。

E-mail: yyhmds@sohu.com

(**YUAN Yu-Hao** Lecturer at the College of Automation and Electrical Engineering, Nanjing University of Technology. Her research interest covers intelligent control and robust control. Corresponding author of this paper.)



张广明 南京工业大学自动化与电气工程学院教授。主要研究方向为故障诊断、智能系统理论及应用、机电系统综合控制。E-mail: zgmchina@163.com

(**ZHANG Guang-Ming** Professor at the College of Automation and Electrical Engineering, Nanjing University of Technology. His research interest covers fault diagnosis, intelligent systems and applications, and synthesis of mechanical-electrical system.)