

舰载机弹药调运不确定系统的T-S模糊优化模型

夏国清¹, 栾添添^{1†}, 孙明晓¹, 仲伟东², 刘彦文¹

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001; 2. 中国船舶工业集团公司 第708研究所, 上海 200011)

摘要: 具有不确定性的弹药调运过程是影响舰载机作战能力的关键因素. 针对弹药调运系统内部和外部不确定性因素的多级供应链网络, 研究带有不确定项的弹药动态调运系统的模糊建模和优化问题. 利用Takagi-Sugeno模糊方法对系统中不确定项进行非线性建模, 基于鲁棒稳定条件, 优化设计弹药调运方案. 通过与其他模糊控制方法的对比仿真, 验证了优化模型的有效性和可靠性, 所提方法能够削弱非线性系统内外部不确定项引起的弹药存储量和代价目标的波动, 保证弹药持续稳定且及时供应.

关键词: Takagi-Sugeno系统; 模糊控制; 弹药调运; 不确定性; 非线性

中图分类号: TP273

文献标志码: A

T-S fuzzy optimization model for uncertain weapons transporting system in carrier aircraft

XIA Guo-qing¹, LUAN Tian-tian^{1†}, SUN Ming-xiao¹, ZHONG Wei-dong², LIU Yan-wen¹

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. 708th Institute of China State Shipbuilding Corporation, Shanghai 200011, China)

Abstract: The weapons dispatching with various uncertain factors is the main factor that affects the fight ability of the aircraft carrier. Aiming at the multi-echelon supply chain network with internal and external uncertainties, the fuzzy optimization is used to control the multi-echelon supply chain network. The Takagi-Sugeno method is applied in modeling the uncertainties of system. The weapons scheduling scheme is designed based on robust stability condition. The effectiveness and reliability of the proposed controller are verified by comparing with other fuzzy control methods. The scheme can weaken the fluctuations of the weapons storage and cost induced by internal and external uncertainties, thus ensuring the sustained and stable supply for weapons.

Keywords: Takagi-Sugeno system; fuzzy control; weapons transporting; uncertainty; nonlinearity

0 引言

随着各国航母的建造和发展, 研究如何提高其作战能力成为学者们持续关注的热点和难点. 弹药的组装和转运过程是影响航母作战能力的主要因素^[1-3]. 弹药的组装和转运过程中存在各种不确定性因素^[4-6], 如需求(弹药数量和组合)、流程(弹药组装的可靠性)、供应(弹药转运的可靠性), 因此需要对弹药的组装和转运过程进行合理地动态控制.

鲁棒策略对于具有不确定因素的系统实用性优良, 因此很多研究人员利用其消除不确定性对系统的影响. 杜贞斌^[7]综合了模糊T-S模型和模糊逻辑系统, 通过模糊逻辑系统消除系统的不确定性; 刘文安等^[8]

研究了一类不确定线性切换系统在任意切换方案下的鲁棒控制问题; 邱若臻等^[9]运用对偶理论将多周期库存鲁棒优化模型转化为易于求解的凸规划问题; Muthukumar等^[10]提出了基于T-S模糊模型的预测控制方法; Nguang等^[11]讨论了一类模糊不确定动态系统的鲁棒输出反馈控制器的设计问题; Sun等^[12]提出了鲁棒容错控制设计方案. 然而, 以上方法大多忽略了系统内部的不确定性和非线性因素对于系统控制的影响.

本文综合考虑弹药调运系统的内外部不确定性因素, 应用基于T-S的模糊非线性(F-N)优化方法实现弹药组装和转运速率的控制.

收稿日期: 2017-03-14; 修回日期: 2017-08-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61304076); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(HEUCF0415).

责任编委: 梁樑.

作者简介: 夏国清(1962—), 男, 教授, 博士, 从事舰载机架次出动能力等研究; 栾添添(1988—), 女, 博士, 从事舰载机架次出动能力的研究.

†通讯作者. E-mail: luantiantian1988@126.com

1 弹药调运系统描述

1.1 弹药调运系统基本模型

选择“尼米兹”号航母^[1]在高强度演习中的弹药调运过程作为研究对象. 弹药组装任务需要一系列步骤: 从转运托盘上取出弹药, 用弹药升降机把弹药提升至弹药装配区, 并利用弹药升降机固定好稳定翼, 将弹药从平台提升至弹药架上. 其中, 弹药组装可以在弹药库前部和后部同时进行, 通过升降机将弹药库中的弹药运至甲板上的两个弹药堆放区. 将以上弹药调运过程简化成由两个弹药组装区和两个弹药堆放区组成的非线性弹药动态调运系统网络模型. 弹药数量在 k 时刻的状态方程可以表示为

$$\begin{cases} x_1(k+1) = \\ x_1(k) + u_1(k) - p_{11}(k)u_{11}(k) - p_{12}(k)u_{12}(k), \\ x_2(k+1) = \\ x_2(k) + u_2(k) - p_{21}(k)u_{21}(k) - p_{22}(k)u_{22}(k), \\ y_1(k+1) = \\ y_1(k) + p_{11}(k)u_{11}(k) + p_{21}(k)u_{21}(k) - v_1(k), \\ y_2(k+1) = \\ y_2(k) + p_{12}(k)u_{12}(k) + p_{22}(k)u_{22}(k) - v_2(k). \end{cases} \quad (1)$$

其中: 状态变量 $x_1(k)$ 和 $x_2(k)$ 分别为两个弹药组装区的弹药存储数量, $y_1(k)$ 和 $y_2(k)$ 分别为两个弹药堆放区的弹药存储数量; 控制变量 $u_1(k)$ 和 $u_2(k)$ 分别为两个弹药组装区的弹药组装数量, $u_{11}(k)$ 和 $u_{12}(k)$ 分别为两个弹药堆放区向第1个弹药组装区的弹药预定数量, $u_{21}(k)$ 和 $u_{22}(k)$ 为两个弹药堆放区向第2个弹药组装区的弹药预定数量; 外部扰动变量 $v_1(k)$ 和 $v_2(k)$ 分别为两个弹药堆放区的弹药消耗需求; $p(k) \in [0, 1]$ 为弹药组装区和弹药堆放区之间的调运关系.

1.2 弹药调运系统模糊模型

选取控制输出方程为代价目标, 得到离散T-S模糊模型

Plant Rule i :

if $x_1(k)$ is L_1^i , and $x_2(k)$ is L_2^i , then

$$\begin{aligned} X(k+1) &= (A_i + \Delta A_i)X(k) + (B_i + \\ &\quad \Delta B_i)U(k) + (E_i + \Delta E_i)V(k), \\ z(k) &= (C_i + \Delta C_i)X(k) + (D_i + \\ &\quad \Delta D_i)U(k) + (F_i + \Delta F_i)V(k), \end{aligned}$$

$$X(k) = \varphi(k),$$

$$i = 1, 2, \dots, r, k \in \{0, 1, \dots, N\}. \quad (2)$$

其中: Plant Rule i ($i = 1, 2, \dots, r$) 为第 i 条弹药存储数量规则, r 为规则总数; L 为集合; $\varphi(k)$ 为弹药调运系统初始向量; $V(k) \in l_2[0, \infty)$ 为 k 时刻的弹药消耗需求变量; $X^T(k) = [x_1(k), x_2(k), y_1(k), y_2(k)]$ 为各节点弹药存储数量的状态变量; $U^T(k) = [u_1(k), u_2(k), u_{11}(k), u_{12}(k), u_{21}(k), u_{22}(k)]$ 为弹药组装数量或弹药预定数量的控制变量; $V^T(k) = [0, 0, v_1(k), v_2(k)]$ 为甲板上的弹药消耗需求扰动的外部需求变量; $z(k)$ 为该非线性系统总代价的输出量; A_i 为弹药存储状态的矩阵; B_i 为弹药组装能力和预定能力的矩阵; C_i 为弹药存储代价的矩阵; D_i 为弹药组装和预定代价的矩阵; E_i 为弹药消耗需求的矩阵; F_i 为弹药消耗代价的矩阵; ΔA_i 、 ΔB_i 、 ΔC_i 、 ΔD_i 、 ΔE_i 和 ΔF_i 为相应的内部不确定项矩阵.

处理式(2)可以得到

Plant Rule i :

if $x_1(k)$ is L_1^i , and $x_2(k)$ is L_2^i , then

$$\begin{aligned} X(k+1) &= \\ &\sum_{i=1}^4 h_i(X(k))[(A_i + \Delta A_i)X(k) + \\ &\quad (B_i + \Delta B_i)U(k) + (E_i + \Delta E_i)V(k)], \\ z(k) &= \\ &\sum_{i=1}^4 h_i(X(k))[(C_i + \Delta C_i)X(k) + \\ &\quad (D_i + \Delta D_i)U(k) + (F_i + \Delta F_i)V(k)]. \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $h_i(X(k)) = f_i(X(k)) / \sum_{i=1}^r f_i(X(k))$ 为第 i 个

隶属度, $f_i(X(k)) = \prod_{j=1}^n L_j^i(x_j(k))$, $i = 1, 2, \dots, r$, $L_j^i(x_j(k))$ 为 $x_j(k)$ 的隶属函数.

2 弹药调运系统的模糊优化

2.1 稳定性分析

定义常数矩阵 J 和 G 以及可测不确定项 W . 假设 ΔA_i 、 ΔB_i 、 ΔC_i 、 ΔD_i 、 ΔE_i 和 ΔF_i 的形式为

$$[\Delta A_i \quad \Delta B_i \quad \Delta E_i \quad \Delta C_i \quad \Delta D_i \quad \Delta F_i] = JWG. \quad (4)$$

其中: $W_{1i}^T(k)W_{1i}(k) \leq I$, $W_{2i}^T(k)W_{2i}(k) \leq I$, $i = 1, 2, \dots, r$.

该系统对不确定项的削弱度用参数 β 表示, 有

$$\beta \|V\|_2 \geq \|z\|_2, \quad (5)$$

其中 $\|\cdot\|_2$ 为 $l_2[0, \infty)$.

当 $V(k) = 0$ 时, 系统渐近稳定; 当 $V(k) \neq 0$ 时, 若扰动项满足式(5), 则表示 β 下鲁棒稳定.

2.2 模糊优化控制率

针对式(3)设计弹药存储数量调整规则如下:

$$\begin{aligned} &\text{Control Rule } i: \\ &\text{if } x_1(k) \text{ is } L_1^i, \text{ and } x_2(k) \text{ is } L_2^i, \text{ then} \\ &U(k) = -K_i X(k), i = 1, 2, \dots, r, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 K_i 为控制矩阵.

系统的最终控制率为

$$U(k) = -\sum_{i=1}^r h_i K_i X(k). \quad (7)$$

由文献[11]得到如下的控制方案. 当 $\beta > 0$ 时, 取 $K_i = Y_{ic} X_c^{-1}$, 若存在对称正定矩阵 X 、矩阵 Y 和常数 $\mu > 0$, 满足如下对称不等式组, 则可以得到控制率(7)使得系统(3)在 β 下是鲁棒稳定.

$$\begin{bmatrix} -X_c & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & -\beta^2 I & * & * & * & * & * & * \\ LS_{ii} & E_i & \Phi_{33} & * & * & * & * & * \\ TS_{ii} & F_i & 0 & \Phi_{44} & * & * & * & * \\ US_{ii} & G_{13i} & 0 & 0 & -\mu_{iic} & * & * & * \\ VS_{ii} & G_{23i} & 0 & 0 & 0 & -\mu_{iic} & * & * \end{bmatrix} < 0, i \in I_c; \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} -4X_c & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & -4\beta^2 I & * & * & * & * & * & * & * \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & * & * & * & * & * & * \\ A_{41} & A_{42} & 0 & A_{44} & * & * & * & * & * \\ US_{ij} & G_{13i} & 0 & 0 & A_{55} & * & * & * & * \\ VS_{ij} & G_{23i} & 0 & 0 & 0 & A_{66} & * & * & * \\ US_{ji} & G_{13i} & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{77} & * & * \\ VS_{ji} & G_{23i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{88} & * \end{bmatrix} < 0, \quad (9)$$

$i < j, i, j \in I_c.$

其中

$$\begin{aligned} LS_{ij} &= A_i X_c - B_i Y_{jc}, \\ TS_{ij} &= C_i X_c - D_i Y_{jc}, \\ US_{ij} &= G_{11i} X_c - G_{12i} Y_{jc}, \\ VS_{ij} &= G_{21i} X_c - G_{22i} Y_{jc}; \\ \Phi_{33} &= -X_c + \mu_{iic} J_{1i} J_{1i}^T, \\ \Phi_{44} &= -I + \mu_{iic} J_{2i} J_{2i}^T; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{31} &= LS_{ij} + LS_{ji}, \\ A_{32} &= E_i + E_j, \\ A_{33} &= -X_c + \mu_{ijc} J_{1i} J_{1i}^T + \mu_{jic} J_{1i} J_{1i}^T, \\ A_{41} &= TS_{ij} + TS_{ji}, \\ A_{42} &= F_i + F_j, \\ A_{44} &= I + \mu_{ijc} J_{2i} J_{2i}^T + \mu_{jic} J_{2i} J_{2i}^T; \\ A_{55} &= A_{66} = -\mu_{ijc} I; \\ A_{77} &= A_{88} = -\mu_{jic} I. \end{aligned}$$

I_c 为 O_c 中序号, $c = 1, 2, \dots, \prod_{j=1}^n (m_j - 1)$, m_j 为模糊划分.

3 仿真实验

3.1 参数设定

组装区弹药存储量分为最小存储量、期望存储量和最大存储量3个等级. 根据模型(1), 弹药组装区1和组装区2根据各自弹药存储数量的实际变化情况, 采取如下组装方案: 当组装区存储量小于最小存储量时, 采用按需组装; 当组装区存储量小于期望存储量时采用正常组装; 当组装区存储量小于最大存储量时, 停止组装.

$x_1(k)$ 和 $x_2(k)$ 分别划分为 $Q_1^1(x_1(k))$ 、 $Q_1^2(x_1(k))$ 和 $Q_2^1(x_2(k))$ 、 $Q_2^2(x_2(k))$; S_0 、 S_1 和 S_{\max} 以及 T_0 、 T_1 和 T_{\max} 分别为弹药组装区1和组装区2的最小存储量、期望存储量和最大存储量. 设 $L_1^1 = L_1^2 = Q_1^1$, $L_1^3 = L_1^4 = Q_1^2$, $L_2^1 = L_2^3 = Q_2^1$, $L_2^2 = L_2^4 = Q_2^2$. 系统(1)中存在一个相关规则组 R , 包括4个规则. $p(k)$ 的取值如下:

- 1) 当 $i = 1$ 时
 $p_{11}(k) = p_{12}(k) = p_{21}(k) = p_{22}(k) = 0.5;$
- 2) 当 $i = 2$ 时
 $p_{11}(k) = 0.2, p_{12}(k) = 0.1,$
 $p_{21}(k) = 0.8, p_{22}(k) = 0.9;$
- 3) 当 $i = 3$ 时
 $p_{11}(k) = 0.8, p_{12}(k) = 0.9,$
 $p_{21}(k) = 0.2, p_{22}(k) = 0.1;$
- 4) 当 $i = 4$ 时
 $p_{11}(k) = p_{12}(k) = p_{21}(k) = p_{22}(k) = 0.5.$

设定模型中的参数如下: c_{s1} 和 c_{s2} 分别为弹药组装区1和组装区2的单位存储代价, c_{s3} 和 c_{s4} 分别为弹药堆放区1和堆放区2的单位存储代价, c_{p1} 和 c_{p2}

分别为弹药组装区1和组装区2的正常组装条件下的单位组装代价, c_{n1} 和 c_{n2} 分别为弹药组装区1和组装区2在按需组装条件下的单位组装代价, c_{o1} 和 c_{o2} 分别为弹药堆放区1和堆放区2向弹药组装区1预定的代价, c_{o3} 和 c_{o4} 分别为弹药堆放区1和堆放区2向弹药组装区2预定的代价. 以上代价分别为300、150、100、120、900、800、500、500、800、1500、1500和1200, 单位为元/个. 弹药组装区1的最小存储量和期望存储量分别为 $S_0 = 10$ 和 $S_1 = 100$, 弹药组装区2的最小存储量和期望存储量分别为 $T_0 = 20$ 和 $T_1 = 150$, 单位为个.

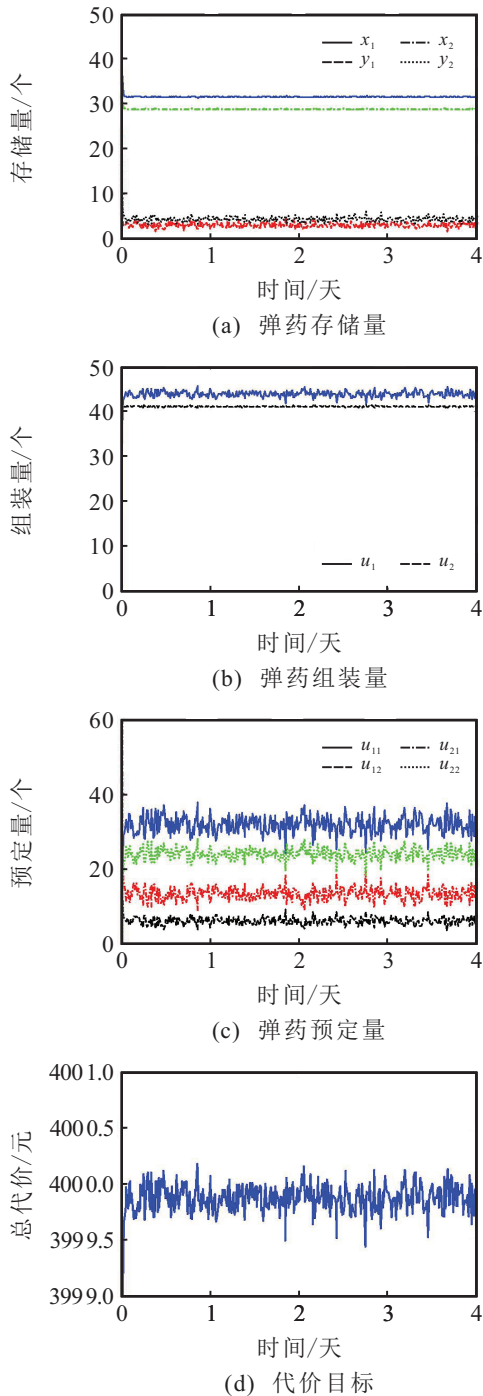


图1 DT-S仿真结果

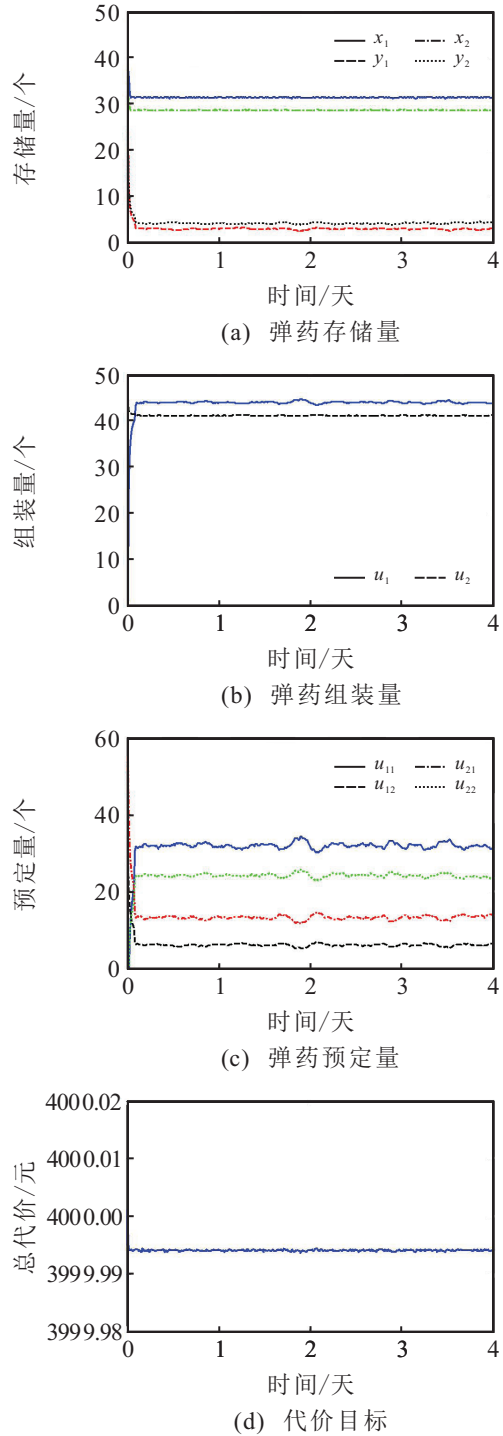


图2 F-N仿真结果

3.2 结果与分析

仿真总时长为4天, 考虑弹药消耗需求为正态分布, $v_1(k) = v_2(k)$ 满足 $N(15, 0.5^2)$. 设弹药存储量初值为 $x_1(0) = 3, x_2(0) = 2, y_1(0) = 4, y_2(0) = 2$. 基准值为 $\bar{x}_1(k) = 35, \bar{x}_2(k) = 30, \bar{y}_1(k) = 20, \bar{y}_2(k) = 21$. 将文献[12]的DT-S方法与本文设计的F-N方法进行仿真对比, 仿真结果如图1和图2所示.

当外部需求满足正态分布时, 通过调节弹药组装区的组装方案和弹药堆放区的预定方案, 使得F-N的弹药存储量和代价目标的波动更小, 经过初始调整后

达到渐近稳定. 弹药调运量的调整与DT-S相比也更平稳, 最终达到控制目的. 另外, 仿真结果也表明: 本文设计的控制方法不仅能够削弱外部不确定需求的影响, 而且能够对非线性弹药动态调运系统内部不确定项进行抑制, 从而保证系统鲁棒稳定. 通过设计的优化方案, 可以使弹药组装速率与期望消耗速率相匹配, 避免弹药组装速率太慢导致舰载机没有弹药攻击敌军目标, 也避免了弹药组装速率太快造成弹药堆积而使活动区变得拥挤. 同时, 优化方案的控制时间较短, 控制幅度较小, 弹药存储量波动较小, 能够保持稳定的系统运作效果, 保证航母持续稳定的作战能力.

4 结 论

本文考虑弹药动态调运内外部不确定性因素, 分析了舰载机弹药调运系统的流程和不确定项, 并给出了基于T-S模糊方法的数学模型描述. 通过对弹药调运系统进行模糊鲁棒优化, 得到以下结论: 1) 较之DT-S优化方法, F-N优化方法的鲁棒稳定性能更好, 算法更简单; 2) 利用F-N优化方法, 保证了在一定调运费用下的弹药持续稳定和及时供应, 从而保证了航母持续稳定的作战能力; 3) 所提优化模型能够削弱非线性系统内外部不确定项引起的波动, 对相似系统提供理论借鉴.

参考文献(References)

- [1] Angelyn J, Maureen A W, Colleen M K G, et al. USS nimitz and carrier airwing nine surge demonstration[D]. Alexandria: Center for Naval Analyses, 1998.
- [2] Xia G Q, Luan T T, Sun M X, et al. Dynamic analysis of catapult availability based on CBM[J]. Int J of Hybrid Information Technology, 2016, 9(10): 31-42.
- [3] Xia G Q, Luan T T, Sun M X. Research on uncertain and nonlinear dynamic weapons dispatching system using fuzzy robust control[C]. Proc of the 2016 Int Conf on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Changsha: ICNC-FSKD, 2016: 1038-1043.
- [4] Xia G Q, Luan T T, Sun M X. Evaluation analysis for sortie generation of carrier aircrafts based on nonlinear fuzzy matter-element method[J]. J of Int and Fuzzy Systems, 2016, 31(6): 3055-3066.
- [5] Xia G Q, Luan T T, Sun M X, et al. Research on modeling of parallel closed-loop support process for carrier aircraft based on system dynamics[J]. Int J of Control and Automation, 2016, 9(11): 259-270.
- [6] Xia G Q, Luan T T, Sun M X. An evaluation method for sortie generation capacity of carrier aircrafts with principal component reduction and catastrophe progression method[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017(6): 547-561.
- [7] 杜贞斌. 不确定非线性系统的模糊鲁棒 H_∞ 跟踪控制[J]. 控制与决策, 2015, 30(7): 1325-1328. (Du Z B. Fuzzy robust H_∞ tracking control for uncertain nonlinear systems[J]. Control and Decision, 2015, 30(7): 1325-1328.)
- [8] 孙文安, 赵军. 基于LMIs的不确定线性切换系统 H_∞ 鲁棒控制[J]. 控制与决策, 2005, 20(6): 650-655. (Sun W A, Zhao J. H_∞ robust control of uncertain switched linear systems based on LMIs[J]. Control and Decision, 2005, 20(6): 650-655.)
- [9] 邱若臻, 黄小原, 苑红涛. 需求分布不确定条件下的多周期库存鲁棒优化模型[J]. 控制与决策, 2014, 29(9): 1644-1648. (Qiu R Z, Huang X Y, Yuan H T. Robust optimization model of multi-period inventory with uncertain demand distribution[J]. Control and Decision, 2014, 29(9): 1644-1648.)
- [10] Muthukumar P, Balasubramaniam P, Ratnavelu K. T-S fuzzy predictive control for fractional order dynamical systems and its applications[J]. Nonlinear Dynamic, 2016, 86(5): 751-763.
- [11] Nguang S K, Shi P. Robust H_∞ output feedback control design for fuzzy dynamic systems with quadratic D stability constraints: An LMI approach[J]. Information Sciences, 2006, 176(8): 2161-2191.
- [12] Sun C, Wang F L, He X Q. Robust dynamic output feedback fault-tolerant control for Takagi-Sugeno fuzzy systems with interval time-varying delay via improved delay partitioning approach[J]. Open Mathematics, 2016, 14(10): 986-1006.

(责任编辑: 齐 霖)