

于家凤^{1,2} 李沁生^{1,3} 邢文⁴ 韩春松⁵ 冯茂岩¹

模糊多智能体系统的 H_∞ 一致跟踪控制

摘要

本文研究非线性多智能体系统在有向拓扑下的领导跟随 H_∞ 一致性问题. 首先, 提出一种新的多项式模糊建模方法来描述由领导者与跟随者构建的偏差动态系统. 然后, 设计一致控制协议使跟随者渐近跟踪领导者的轨迹. 基于多项式李雅普诺夫函数技术, 提出松弛的渐近一致的充分条件并确保存在外界干扰时多智能体系统具有 H_∞ 抑制性能. 将导出的条件转化为平方和形式并能够进行数值求解. 最后, 给出一个实例来验证所提出的一致控制协议的有效性.

关键词

多智能体系统; 模糊模型; H_∞ 一致性; 有向拓扑

中图分类号 TP273

文献标志码 A

收稿日期 2020-03-02

资助项目 江苏省自然科学基金(BK20191457); 江苏省现代教育技术研究课题(61980) 重点项目; 黑龙江省自然科学基金(F2017028); 黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(135109242, 135409426, 135409102)

作者简介

于家凤, 女, 博士, 研究方向为模糊控制与复杂动态网络系统. yyujie99@163.com

- 1 江苏海事职业技术学院 轮机电气与智能工程学院, 南京, 211170
- 2 阿德莱德大学 电子电气学院, 阿德莱德, 5005, 澳大利亚
- 3 上海大学 机电工程和自动化学院/上海电站自动化技术重点实验室, 上海, 200072
- 4 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨, 150001
- 5 齐齐哈尔大学 机电工程学院, 齐齐哈尔, 161002

0 引言

T-S 模糊模型被认为是能够以任意精度逼近光滑非线性系统的一个有效工具^[1-2], 得到了广泛的关注^[3-4]. 近年来, 多项式模糊模型被提出用来建模非线性系统^[5], 可看作 T-S 模糊模型的一种推广. 多项式模糊模型得到了广泛的关注, 例如, 采用平方和方法的多项式模糊控制系统的控制研究^[6-7].

另一方面, 由于多智能体系统广泛的应用性和显著的扩展性, 多智能体系统的一致问题不断吸引着研究者的兴趣, 包括集群控制、群集控制、编队控制、复杂网络同步和通信网络的拥塞控制^[8-9]. 采用多种控制方法以实现多智能体的一致, 例如自适应控制^[10-11]、事件触发控制^[8,12]、滑模控制^[13]、 H_∞ 控制^[7,14]. 特别地, 文献[14]研究了 T-S 模糊多智能体系统在无向拓扑下的领导跟随 H_∞ 一致控制问题. 文献[7]研究了多项式模糊多智能体系统在无向拓扑下的领导跟随 H_∞ 一致控制问题. 为了在模糊模型中处理系统状态, 文献[7,14]提出了一些严格的假设条件.

受文献[7,14]启发, 本文研究非线性多智能体系统在有向拓扑下的领导跟随 H_∞ 一致性问题. 首先, 建立一个多项式模糊模型来描述领导-跟随构成的非线性多智能体系统, 去除了文献[7,14]的一些假设条件. 进一步, 设计了一个新的控制协议以确保多智能体系统达到一致. 将提出的多项式模糊模型应用于非线性多智能体系统的 H_∞ 一致控制问题, 即在预设的一个 H_∞ 性能指标下, 设计一个 H_∞ 控制协议以实现跟随者和领导者一致. 基于多项式李雅普诺夫函数进行稳定性分析, 推导出的多项式矩阵不等式条件转化为平方和(SOS)^[15]的条件并进行数值求解.

1 问题描述

1.1 图论

记 $G = (V, E, A)$ 为有向的通信拓扑图, 其中 $V = (v_1, v_2, \dots, v_N)$ 为点集, $E = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V\}$ 为边集, $A = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 为加权邻接矩阵. 在有向图 G 中, 若 $(v_i, v_j) \in E$, 则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$. $N_i = \{v_j \in V : (v_i, v_j) \in E\}$ 表示点 v_i 的邻居集. 图 G 的 Laplacian 矩阵 $L = [L_{i,j}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 定义为

$$L_{i,j} = \begin{cases} \sum_{k=1, k \neq i}^N a_{ik}, & i = j, \\ -a_{ij}, & i \neq j. \end{cases}$$

1.2 多项式模糊模型

假设多智能体系统由一个领导者和 N 个跟随者组成,智能体 i 的动态方程系统描述为

$$\dot{\mathbf{x}}_i = f(\mathbf{x}_i) + \mathbf{u}_i, i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

其中 $\mathbf{x}_i \in \mathbf{R}^n, \mathbf{u}_i \in \mathbf{R}^n$ 分别为智能体 i 的状态和控制输入, $f(\mathbf{x}_i) \in \mathbf{R}^n$ 表示多项式向量函数.

领导者的动态方程可描述为

$$\dot{\mathbf{s}} = f(\mathbf{s}), \quad (2)$$

其中 $\mathbf{s} \in \mathbf{R}^n$ 为领导者的状态.

定义偏差状态 $\mathbf{e}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{s}$, 则偏差动态方程可表述为

$$\dot{\mathbf{e}}_i = a(\mathbf{x}_i, \mathbf{e}_i)\mathbf{e}_i + \mathbf{u}_i, i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

其中 $a(\mathbf{x}_i, \mathbf{e}_i)\mathbf{e}_i = f(\mathbf{x}_i) - f(\mathbf{s}), a(\mathbf{x}_i, \mathbf{e}_i)$ 为 \mathbf{x}_i 和 \mathbf{e}_i 的多项式向量函数.

建立如下的模糊规则:

$$\begin{aligned} &\text{If } \phi_{i,1}(t) \text{ is } M_1^p \text{ and } \dots \text{ and } \phi_{i,q}(t) \text{ is } M_q^p, \\ &\text{then } \dot{\mathbf{e}}_i = a_p(\mathbf{e}_i)\mathbf{e}_i + \mathbf{u}_i, \\ &i = 1, 2, \dots, N, p = 1, 2, \dots, r, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\boldsymbol{\phi}_i(t) = [\phi_{i,1}(t), \phi_{i,2}(t), \dots, \phi_{i,q}(t)]^T$ 是前件变量, M_k^p 是模糊集合, 其中 $p = 1, 2, \dots, r$ 和 $k = 1, 2, \dots, q$, 常数 r 是模糊规则数. $a_p(\mathbf{e}_i)$ 表示关于 \mathbf{e}_i 的多项式矩阵, 因此 $a_p(\mathbf{e}_i)\mathbf{e}_i + \mathbf{u}_i$ 表示为一个多项式向量. 区别于传统的 T-S 模糊模型, 多项式模糊模型是采用多项式表达式.

采用反模糊化后, 式(4) 表示为

$$\dot{\mathbf{e}}_i = \sum_{p=1}^r h_p(\boldsymbol{\phi}_i(t))(a_p(\mathbf{e}_i)\mathbf{e}_i + \mathbf{u}_i), \quad (5)$$

其中

$$h_p(\boldsymbol{\phi}_i(t)) = \frac{\omega_p(\boldsymbol{\phi}_i(t))}{\sum_{p=1}^r \omega_p(\boldsymbol{\phi}_i(t))}$$

$$\omega_p(\boldsymbol{\phi}_i(t)) = \prod_{j=1}^q M_j^p(\boldsymbol{\phi}_i(t)).$$

$$h_p(\boldsymbol{\phi}_i(t)) \text{ 满足条件: } h_p(\boldsymbol{\phi}_i(t)) \geq 0,$$

$$\sum_{p=1}^r h_p(\boldsymbol{\phi}_i(t)) = 1.$$

进一步, 整个多智能体系统的偏差多项式模糊模型可表示为

$$\dot{\mathbf{e}} = \sum_{p=1}^r h_p(\boldsymbol{\phi}(t))(A_p(\mathbf{e})\mathbf{e} + \mathbf{u}), \quad (6)$$

其中

$$h_p(\boldsymbol{\phi}(t)) = \text{diag}\{h_p(\boldsymbol{\phi}_1(t)), h_p(\boldsymbol{\phi}_2(t)), \dots, h_p(\boldsymbol{\phi}_N(t))\},$$

$$\mathbf{u} = \text{diag}\{\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_N\},$$

$$A_p(\mathbf{e}) = \text{diag}\{a_p(\mathbf{e}_1), a_p(\mathbf{e}_2), \dots, a_p(\mathbf{e}_N)\}.$$

2 多智能体系统的 H_∞ 一致

基于建立的模糊模型, 推导出多智能体系统达到一致的条件, 并保持在给定的 H_∞ 范数界.

对于第 i 个智能体, 考虑外界干扰 $\mathbf{w}_i(t)$, 其偏差动态方程和控制输出可分别表示为

$$\dot{\mathbf{e}}_i = \sum_{p=1}^r h_p(\boldsymbol{\phi}_i(t))(a_p(\mathbf{e}_i)\mathbf{e}_i + \mathbf{u}_i + d_p(\mathbf{e}_i)\mathbf{w}_i(t)),$$

$$\mathbf{z}_i = \sum_{p=1}^r h_p(\boldsymbol{\phi}_i(t))(c_{zp}(\mathbf{e}_i)\mathbf{e}_i + \mathbf{u}_i + d_{zp}(\mathbf{e}_i)\mathbf{w}_i(t)),$$

其中 $d_p(\mathbf{e}_i), c_{zp}(\mathbf{e}_i)$ 和 $d_{zp}(\mathbf{e}_i)$ 都是多项式矩阵.

对于第 i 个智能体, 设计如下一致控制协议:

$$\mathbf{u}_i = -c \sum_{j \in N_i} a_{ij} \boldsymbol{\Gamma}(\mathbf{e})(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) - cd_i \boldsymbol{\Gamma}(\mathbf{e})(\mathbf{x}_i - \mathbf{s}), \quad (7)$$

其中 c 是耦合强度系数, N_i 表示智能体 i 的邻居集, a_{ij} 表示智能体 i 接收智能体 j 的信息, 当 $j \in N_i$ 时, $a_{ij} > 0$. 记 $\mathbf{e} = [\mathbf{e}_1^T, \mathbf{e}_2^T, \dots, \mathbf{e}_N^T]^T$, $\boldsymbol{\Gamma}(\mathbf{e})$ 是关于 \mathbf{e} 的待求解的正定多项式矩阵. d_i 表示信息流权重, 若智能体 i 能够接收到领导者的状态信息, $d_i > 0$, 否则 $d_i = 0$. 控制协议 \mathbf{u}_i 将确保所有跟随者的状态趋向于领导者.

整个多智能体网络的偏差动态方程和控制输出分别表示为

$$\dot{\mathbf{e}} = \sum_{p=1}^r h_p(\boldsymbol{\phi}(t))(A_p(\mathbf{e})\mathbf{e} + c(\bar{\mathbf{L}} \otimes \boldsymbol{\Gamma}(\mathbf{e}))\mathbf{e} + \mathbf{D}_p \mathbf{w}(t)), \quad (8)$$

$$\mathbf{z} = \sum_{p=1}^r h_p(\boldsymbol{\phi}(t))(C_{zp} \mathbf{e} + \mathbf{D}_{zp} \mathbf{w}(t)), \quad (9)$$

其中符号 \otimes 表示 Kronecker 积,

$$\bar{\mathbf{L}} = -\mathbf{L} - \mathbf{D}, \mathbf{D} = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_N\},$$

$$\mathbf{D}_p = \mathbf{I}_N \otimes d_p(\mathbf{e}_i), \quad \mathbf{D}_{zp} = \mathbf{I}_N \otimes d_{zp}(\mathbf{e}_i),$$

$$\mathbf{C}_{zp} = \mathbf{I}_N \otimes c_{zp}(\mathbf{e}_i), \quad \mathbf{z}(t) = [\mathbf{z}_1^T, \mathbf{z}_2^T, \dots, \mathbf{z}_N^T]^T,$$

$$\mathbf{w}(t) = [\mathbf{w}_1^T(t), \mathbf{w}_2^T(t), \dots, \mathbf{w}_N^T(t)]^T.$$

本文主要结果表述如下:

定理 1 给定扰动抑制性能指标 $\gamma > 0$, 如果拓扑图 G 有一个有向生成树, 且存在对称正定多项式矩阵 $p(\mathbf{e}) \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 和 $\bar{\boldsymbol{\Gamma}}(\mathbf{e}) \in \mathbf{R}^{N \times N}$, 任意向量 $\boldsymbol{\eta}_1, \boldsymbol{\eta}_2$ 和 $\boldsymbol{\eta}_3$, 非负多项式 $\varepsilon_1(\mathbf{e}), \varepsilon_2(\mathbf{e})$ 和 $\varepsilon_3(\mathbf{e})$, 使得下列式子满足平方和(SOS)条件, $p = 1, 2, \dots, r$,

$$\boldsymbol{\eta}_1^T(p(\mathbf{e}) - \varepsilon_1(\mathbf{e})\mathbf{I})\boldsymbol{\eta}_1 \text{ 是 SOS}, \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\eta}_2^T(\bar{\boldsymbol{\Gamma}}(\mathbf{e}) - \varepsilon_2(\mathbf{e})\mathbf{I})\boldsymbol{\eta}_2 \text{ 是 SOS}, \quad (11)$$

$-\eta_3^T(\Theta + \varepsilon_3(e)I)\eta_3$ 是 SOS, (12)

则系统(8)是渐进稳定的,即多智能体系统能够实现 H_∞ 一致跟踪.

其中

$$\Theta = \begin{bmatrix} \Omega + C_{zp}^T C_{zp} & C_{zp}^T D_{zp} + P(e)D_p \\ D_{zp}^T C_{zp} + D_p P(e) & D_{zp}^T D_{zp} - \gamma^2 I \end{bmatrix},$$

$$P(e) = I_N \otimes p(e), \bar{\Gamma}(e) = cp(e)\Gamma(e),$$

$$\Omega = \text{He}(P(e)A_p(e)) + \text{He}(\bar{L} \otimes \bar{\Gamma}(e)) +$$

$$\sum_{k=1}^n \frac{\partial P(e)}{\partial e_k} (A_p^k(e) + c(\bar{L} \otimes \Gamma(e))^k) e.$$

$A_p^k(e)$ 和 $c(\bar{L} \otimes \Gamma(e))^k$ 分别表示多项式矩阵 $A_p(e)$ 和 $c(\bar{L} \otimes \Gamma(e))$ 的第 k 行元素. $\text{He}(A)$ 表示 $A + A^T$.

证明 构造如下多项式李雅普诺夫函数:

$$V = e^T P(e) e, \quad (13)$$

其中 $P(e) = I_N \otimes p(e)$ 表示正定对称多项式矩阵.

SOS 条件(10)和(11)分别确保 $\Gamma(e) > 0$ 和 $V > 0$.沿(8)的轨迹对 V 求微分可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= 2e^T P(e) \dot{e} + e^T \dot{P}(e) e = \\ & 2 \sum_{p=1}^r h_p(\phi(t)) e^T P(e) (A_p(e) e + \\ & c(\bar{L} \otimes \Gamma(e)) e + D_p w(t)) + \\ & e^T \sum_{p=1}^r h_p(\phi(t)) \sum_{k=1}^n \frac{\partial P(e)}{\partial e_k} (A_p^k(e) e + \\ & c(\bar{L} \otimes \Gamma(e))^k e) e. \end{aligned} \quad (14)$$

假设外界干扰 $w(t) = 0$,式(14)可以写为

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sum_{p=1}^r h_p(\phi(t)) e^T P(e) \\ & (\text{He}(P(e)A_p(e)) + \text{He}(\bar{L} \otimes \bar{\Gamma}(e)) + \\ & \sum_{k=1}^n \frac{\partial P(e)}{\partial e_k} (A_p^k(e) + c(\bar{L} \otimes \Gamma(e))^k) e) e. \end{aligned}$$

因此,若 $\Omega < 0$,则有 $\dot{V}(t) < 0$.进一步,为说明 H_∞ 范数有界,假设零初始条件并存在非零外界干扰,定义如下性能指标:

$$J = \dot{V} + (z^T z - \gamma^2 w^T(t) w(t)). \quad (15)$$

若

$$\int_0^\infty (z^T z - \gamma^2 w^T(t) w(t)) dt < 0$$

满足 $\|z\|_2 < \gamma \|w(t)\|_2$,则有 $J < 0$.式(8)和(9)代入式(15),可以得到:

$$J = \dot{V}(t) + \sum_{p=1}^r h_p(\phi(t)) \cdot$$

$$(e^T C_{zp}^T C_{zp} e + e^T C_{zp}^T D_{zp} w(t) + w^T(t) D_{zp}^T C_{zp} e + w^T(t) D_{zp}^T D_{zp} w(t) - \gamma^2 w^T(t) w(t)). \quad (16)$$

定义 $\xi = [e^T \quad w^T(t)]^T$,式(16)可表述为

$$J = \xi^T \begin{bmatrix} \Omega + C_{zp}^T C_{zp} & C_{zp}^T D_{zp} + P(e)D_p \\ D_{zp}^T C_{zp} + D_p P(e) & D_{zp}^T D_{zp} - \gamma^2 I \end{bmatrix} \xi. \quad (17)$$

进一步可知 SOS 条件(12)成立,可确保 $J < 0$.因此,证明完毕.

3 仿真实例

本文通过一个仿真实例验证所提出理论结果的正确性.考虑非线性多智能体系统由一个领导者和四个跟随者组成,如图1所示.智能体 i 的动态方程可由种混沌系统描述为

$$\dot{x}_i = f(x_i) + u_i,$$

$$\text{其中 } f(x_i) = \begin{bmatrix} \alpha(x_{i2} - x_{i1}) \\ \beta x_{i1} - x_{i1} x_{i3} - x_{i2} \\ x_{i1} x_{i2} - \lambda x_{i3} \end{bmatrix}, \alpha = 10, \beta = 28, \lambda =$$

$\frac{8}{3}$.状态初始值取 $x_i(0) = [2, -3, 4]^T$ 时,产生的混沌现象如图2所示.

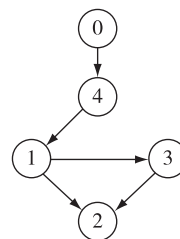


图1 含有一个有向生成树的通信拓扑图

Fig. 1 Communication topology with a directed spanning tree

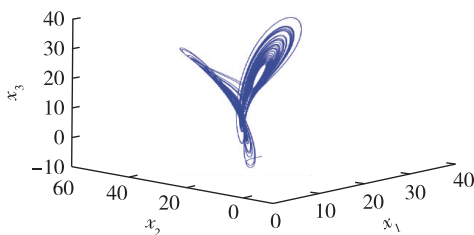


图2 混沌相图 ($x_i(0) = [2, -3, 4]^T$)

Fig. 2 Chaotic phase diagram in $x_i(0) = [2, -3, 4]^T$

领导者的动态方程为

$$\dot{s} = f(s).$$

偏差动态方程为

$$\dot{e}_i = \begin{bmatrix} -\alpha & \alpha & 0 \\ \beta - x_{i3} & -1 & e_{i1} - x_{i1} \\ x_{i3} & x_{i3} - e_{i1} & -\lambda \end{bmatrix} e_i + u_i.$$

偏差动态系统的多项式模糊模型构建如下:

如果 $x_{i1}(t)$ is M_1^q and $x_{i2}(t)$ is M_2^k and $x_{i3}(t)$ is M_3^m , 则 $\dot{e}_i = a_{qkm}(e_i)e_i + u_i, q, k, m = 1, 2$.

其中 x_{i1}, x_{i2} 和 $x_{i3} (i = 1, 2, 3, 4)$ 是前件变量. 假设 $\phi_1(t) \in [M_1^1, M_1^2], \phi_2(t) \in [M_2^1, M_2^2]$ 和 $\phi_3(t) \in [M_3^1, M_3^2]$, 其中 $M_1^1 = -23, M_1^2 = 23, M_2^1 = -32, M_2^2 = 32, M_3^1 = -61, M_3^2 = 61$.

智能体 i 的多项式模糊偏差动态闭环系统可描述为

$$\dot{e}_i = \sum_{p=1}^8 a_p(e_i)e_i - c \sum_{j=1}^4 a_{ij}\Gamma(e)(e_j - e_i) - cd_i\Gamma(e)e_i,$$

其中

$$a_p(e_i) = \begin{bmatrix} -\alpha & \alpha & 0 \\ \beta - M_{3m} & -1 & e_{i1} - M_{1q} \\ M_{2k} & M_{1q} - e_{i1} & -\lambda \end{bmatrix}, p = qkm.$$

因此, 四个跟随者的多项式模糊总偏差动态闭环系统可描述为

$$\dot{e} = \sum_{p=1}^8 h_p(\phi(t))(A_p(e)e + c(\bar{L} \otimes \Gamma(e))e),$$

其隶属度函数为

$$\begin{aligned} M_{11}(x_{i1}) &= \frac{M_1^2 - x_{i1}}{M_1^2 - M_1^1}, & M_{12}(x_{i1}) &= \frac{x_{i1} - M_1^1}{M_1^2 - M_1^1}, \\ M_{21}(x_{i2}) &= \frac{M_2^2 - x_{i2}}{M_2^2 - M_2^1}, & M_{22}(x_{i2}) &= \frac{x_{i2} - M_2^1}{M_2^2 - M_2^1}, \\ M_{13}(x_{i3}) &= \frac{M_3^2 - x_{i3}}{M_3^2 - M_3^1}, & M_{23}(x_{i3}) &= \frac{x_{i3} - M_3^1}{M_3^2 - M_3^1}. \end{aligned}$$

假设 $d_1, d_2, d_3 = 0, d_4 = 1$, 这意味着第四个跟随智能体可接受到领导者的信息.

在零初始条件下, 考虑存在外界干扰时多智能体系统 H_∞ 一致跟踪问题, 扩展的偏差动态系统和相应控制输出可描述为

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \sum_{p=1}^8 h_p(\phi(t))(A_p(e)e + c(\bar{L} \otimes \Gamma(e))e + D_p w(t)), \\ z &= \sum_{p=1}^8 h_p(\phi(t))(C_{zp}e + D_{zp}w(t)), \end{aligned}$$

其中参数取值为 $D_p = [1 \ 1 \ 1]^T, C_{zp} = [1 \ 0 \ 0], D_{zp} = 0.1, \gamma = 1$.

外界干扰为

$$w(t) = \begin{cases} 1, & 0.5 \text{ s} \leq t \leq 1 \text{ s} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

根据定理 1, 选择 $c = 2$, 通过求解 SOS 条件, 可得到控制增益为

$$\bar{\Gamma}(e) = \begin{bmatrix} 3.4134 & 0 & 0 \\ * & 24.7350 & 0 \\ * & * & 26.5296 \end{bmatrix}.$$

仿真结果如下: 图 3 给出了在所设计的控制协议作用下施加扰动的多智能体系统的状态轨迹变化曲线. 由图 3 可知所设计的控制协议实现了扰动跟随-领导多智能体系统的渐近一致跟踪. 图 4 给出了外界干扰出现时控制输出变化曲线. 通过计算, 可以得到 $\|w(t)\|_2 = 499, \|z\|_2 = 0.0932$. 因此, 可计算得到 H_∞ 控制性能指标 $\gamma = 0.0137$, 远小于 1. 这表明所提出的控制方法对外界干扰产生良好的抑制效果.

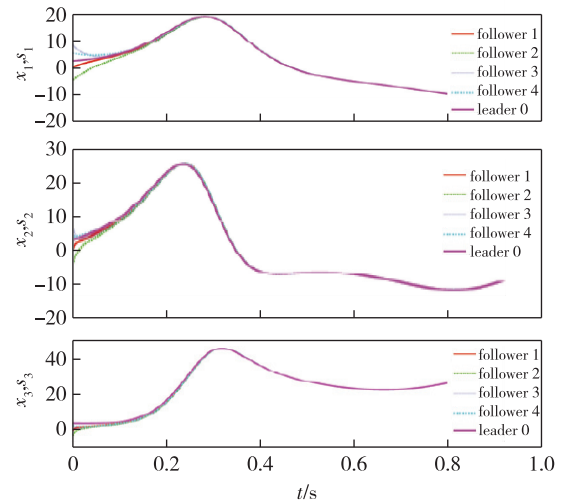


图 3 干扰下多智能体系统状态跟踪轨迹

Fig. 3 State tracking trajectories of multi-agent system under disturbance

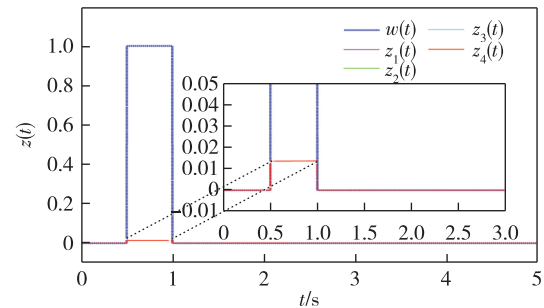


图 4 干扰下控制输出轨迹

Fig. 4 Signal of control output under disturbance

4 结论

本文研究了有向拓扑下的非线性多智能体系统的 H_∞ 一致跟踪控制问题.首先,提出了一种新的多项式模糊建模方法来描述非线性偏差系统,推导出了基于 SOS 松弛的 H_∞ 一致的充分条件.本文所设计的状态反馈控制协议能保证多智能体系统实现渐近一致并满足设定的干扰抑制 H_∞ 性能指标.仿真实例验证了理论结果的有效性.

参考文献

References

- [1] Wang Y, Xia Y, Ahn C K, et al. Exponential stabilization of Takagi-Sugeno fuzzy systems with aperiodic sampling: an aperiodic adaptive event-triggered method [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(2) : 444-454
- [2] Wu Z G, Xu Y, Lu R, et al. Event-triggered control for consensus of multiagent systems with fixed/switching topologies [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 48(10) : 1736-1746
- [3] Fei Z Y, Shi S, Wang T, et al. Improved stability criteria for discrete-time switched T-S fuzzy systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019: 1-9
- [4] Shi P, Zhang Y, Chadli M, et al. Mixed H-infinity and passive filtering for discrete fuzzy neural networks with stochastic jumps and time delays [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(4) : 903-909
- [5] Tanaka K, Yoshida H, Ohtake H, et al. A sum-of-squares approach to modeling and control of nonlinear dynamical systems with polynomial fuzzy systems [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2009, 17(4) : 911-922
- [6] Gassara H, El Hajjaji A, Krid M, et al. Stability analysis and memory control design of polynomial fuzzy systems with time delay via polynomial Lyapunov-Krasovskii functional [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2018, 16(4) : 2011-2020
- [7] Tabarisaadi P, Mardani M M, Shasadeghi M, et al. A sum-of-squares approach to consensus of nonlinear leader-follower multi-agent systems based on novel polynomial and fuzzy polynomial models [J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(18) : 8398-8420
- [8] 许文盈, 曹进德. 基于事件驱动机制的多智能体系统协调控制研究综述 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(4) : 395-400
XU Wenyong, CAO Jinde. An overview of recent progress in the study of event-triggered coordinated schemes of multi-agent systems [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2018, 10(4) : 395-400
- [9] 胡鸿翔, 梁锦, 温广辉, 等. 多智能体系统的群集行为研究综述 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(4) : 415-421
HU Hongxiang, LIANG Jin, WEN Guanghui, et al. A survey of development on swarming behavior for multi-agent systems [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2018, 10(4) : 415-421
- [10] Shi P, Shen Q. Observer-based leader-following consensus of uncertain nonlinear multi-agent systems [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2017, 27(17) : 3794-3811
- [11] Wen G X, Chen C L P, Liu Y, et al. Neural network-based adaptive leader-following consensus control for a class of nonlinear multiagent state-delay systems [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(8) : 2151-2160
- [12] Zhang H, Yang R, Yan H, et al. H_∞ consensus of event-based multi-agent systems with switching topology [J]. Information Sciences, 2016, 370/371 : 623-635
- [13] Zhang J, Lyu M, Shen T, et al. Sliding mode control for a class of nonlinear multi-agent system with time delay and uncertainties [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1) : 865-875
- [14] Zhao Y, Li B, Qin J, et al. H_∞ consensus and synchronization of nonlinear systems based on a novel fuzzy model [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 43(6) : 2157-2169
- [15] Prajna S, Papachristodoulou A, Parrilo P A. Introducing SOSTOOLS: a general purpose sum of squares programming solver [C] // Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002: 741-746

Fuzzy-model-based H_∞ consensus tracking control of multi-agent systems

YU Jiafeng^{1,2} LI Qinsheng^{1,3} XING Wen⁴ HAN Chunsong⁵ FENG Maoyan¹

1 School of Marine & Electrical & Intelligent Engineering, Jiangsu Maritime Institute, Nanjing 211170

2 School of Electrical and Electronic, The University of Adelaide, Adelaide SA 5005, Australia

3 School of Mechatronic Engineering and Automation/Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Shanghai University, Shanghai 200072

4 College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001

5 School of Mechanical and Electrical Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161002

Abstract This paper is concerned with the H_∞ consensus problem for nonlinear leader-follower multi-agent systems (MASs) with a directed communication network. A polynomial fuzzy modeling approach is proposed to describe the error system which is formulated by leader and follower agents. Then, the consensus control protocols are designed for MASs to enforce all the followers to track the trajectory of a leader asymptotically. Based on the polynomial Lyapunov function method, sufficient conditions are presented to ensure the consensus for MASs subject to external disturbances. The obtained conditions are converted into sum of squares and can be numerically solved. Finally, a simulation example is provided to demonstrate the effectiveness of the derived theoretical results.

Key words multi-agent systems; fuzzy modeling; H_∞ consensus; directed topology