一类非线性互联系统的 H_∞ 模型参考跟踪分散输出反馈模糊控制

佟绍成, 王铁超
(辽宁工学院数理系, 辽宁锦州 121001)

摘　要: 本文对一类不确定状态不可测非线性互联系统,给出了一种基于观测器的 H_∞ 模型参考跟踪分散输出反馈模糊控制方法. 设计中, 首先采用模糊不确定 T-S 模型对非线性互联系统进行模糊建模, 在此基础上, 给出模糊分散观测器的 H_∞ 设计和基于观测器的模型参考跟踪分散模糊控制的设计. 应用李亚普诺夫和线性矩阵不等式方法给出了模糊分散系统稳定的充分条件. 仿真结果进一步验证了所提出的模糊分散控制方法的有效性.

关键词: H_∞ 分散模糊控制; 参数不确定; 观测器; 线性矩阵不等式; 稳定性分析
中图分类号: TP273　文献标识码: A　文章编号: 0372-2112 (2006) 12-2221-06

Decentralized Model Reference Tracking H_∞ Output Feedback Control for Nonlinear Interconnected Systems

TONG Shao-cheng, WANG Tie-chao
(*Liaoning Institute of Technology, Jinzhou, Liaoning 121001, China*)

Abstract: A fuzzy decentralized model reference tracking H_∞ output feedback control method for a class of nonlinear interconnected systems is studied based on state observer. First, an equivalent T-S fuzzy model represents the nonlinear interconnected system and fuzzy decentralized observer is designed. Then a decentralized fuzzy observer and model reference H_∞ fuzzy controller based on the observer are developed. The sufficient conditions for the stability of the fuzzy decentralized system are proposed by using Lyapunov function combined with linear matrix inequality (LMI). Finally, the simulation example is given to illustrate the effectiveness of the proposed methods.

Key words: decentralized fuzzy H_∞ control; parametric uncertainties; observer; linear matrix inequalities; stability analysis

1 引言

近年来, 基于模糊 T-S 模型的非线性不确定系统的控制器设计及其理论研究已经取得了很大的进展[1,2], 如模糊控制系统的状态反馈和基于观测器的输出反馈设计方法, 模糊控制系统的稳定性和鲁棒性分析等, 初步建立了与现代控制理论相平行的设计和理论体系. 文献[3]给出了一类非线性互联系统的模糊建模方法, 但没有涉及系统的控制设计问题. 文献[4, 6]分别提出了一类模糊互联系统的模糊分散控制方法, 然而, 这两种方法要求互联系统的状态是完全可测的. 文献[5]针对一类不确定非线性互联系统, 提出了一种基于观测器的模糊参考模型 H_∞ 分散控制策略, 但该方法没有考虑系统存在参数不确定的情况, 因此模糊控制缺少鲁棒性的优化算法.

本文针对一类不确定非线性互联系统, 利用参数不确定模糊 T-S 模型对其进行建模, 然后把并行分布补偿(PDC), H_∞ 控制技术和线性矩阵不等式(LMI)相结合, 给出了一种 H_∞ 模型参考跟踪分散输出反馈模糊控制方法. 此方法不但保证在模糊系统在存在参数不确定性时的稳定性, 而且在存在参数不确定性时, 能够取得 H_∞ 的控制性能. 另外, 模糊系统的稳定性条件是用线性矩阵不等式(LMI)的形式表示, 因此, 易于用现有的优化技术求解.

2 输出反馈分散跟踪模糊控制的设计

考虑由模糊 T-S 模型所来描述的非线性互联系统, 其第 i 个模糊分散系统表示如下:

系统模糊规则 i:

如果 $z_1(t)$ 是 F_{1k} 且 $z_2(t)$ 是 F_{2k} 且 … 且 $z_l(t)$ F_{lk}, 则

收稿日期: 2005-06-28; 修回日期: 2006-01-16
基金项目: 国家 973 计划项目(No. 2002CB312200); 辽宁省优秀青年人才基金(No. 2005219001)

$$\dot{\boldsymbol{x}}_k(t)=(\boldsymbol{A}_{ik}+\Delta\boldsymbol{A}_{ik})\boldsymbol{x}_k(t)+(\boldsymbol{B}_{ik}+\Delta\boldsymbol{B}_{ik})\boldsymbol{u}_k(t)+\sum_{h=1\,h\neq k}^{N}\boldsymbol{R}_{ihk}\boldsymbol{x}_k(t)+\omega_k(t)\tag{1}$$

式中,$F_{gk}(g=1,2,\cdots,l)$为模糊集,$\boldsymbol{z}(t)=[z_1(t),\cdots,z_l(t)]^{\mathrm{T}}$是可测系统变量,即前件变量.

采用单点模糊化,乘积推理及平均加权反模糊化,第 k 个模糊分散子系统的模型为:

$$\dot{\boldsymbol{x}}_k(t)=\sum_{i=1}^{r_k}\mu_{ik}\Big[(\boldsymbol{A}_{ik}+\Delta\boldsymbol{A}_{ik})\boldsymbol{x}_k(t)+(\boldsymbol{B}_{ik}+\Delta\boldsymbol{B}_{ik})\boldsymbol{u}_k(t)+\sum_{h=1\,h\neq k}^{N}\boldsymbol{R}_{ihk}\boldsymbol{x}_h(t)\Big]+\omega_k(t)$$

$$\boldsymbol{y}_k(t)=\sum_{i=1}^{r_k}\mu_{ik}(\boldsymbol{C}_{ik}\boldsymbol{x}_k(t))\tag{2}$$

设计第 k 个模糊分散子系统的模糊分散观测器如下:

观测器规则 i:如果 $z_1(t)$ 是 F_{1k} 且 $z_2(t)$ 是 F_{2k} 且 …且 $z_l(t)F_{lk}$,则

$$\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}_k(t)=\boldsymbol{A}_{ik}\hat{\boldsymbol{x}}_k(t)+\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{u}_k(t)+\sum_{h=1\,h\neq k}^{N}\boldsymbol{R}_{ihk}\hat{\boldsymbol{x}}_h(t)+\boldsymbol{L}_{ik}(\boldsymbol{y}_k(t)-\boldsymbol{y}_k(t))$$

$$\hat{\boldsymbol{y}}_k(t)=\boldsymbol{C}_{ik}\hat{\boldsymbol{x}}_k(t)\tag{3}$$

则第 k 个子系统的模糊分散观测器为:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}_k(t)=\sum_{i=1}^{r_k}\mu_{ik}\Big[\boldsymbol{A}_{ik}\hat{\boldsymbol{x}}_k(t)+\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{u}_k(t)+\sum_{h=1\,h\neq k}^{N}\boldsymbol{R}_{ihk}\hat{\boldsymbol{x}}_h(t)+\boldsymbol{L}_{ik}(\boldsymbol{y}_k(t)-\hat{\boldsymbol{y}}_k(t))\Big]$$

$$\hat{\boldsymbol{y}}_k(t)=\sum_{i=1}^{r_k}\mu_{ik}\boldsymbol{C}_{ik}\hat{\boldsymbol{x}}_k(t)\tag{4}$$

式中,$\boldsymbol{L}_{ik}$为观测器增益矩阵,且 $\boldsymbol{A}_{ik}$,$\boldsymbol{B}_{ik}$是局部可控的,$\boldsymbol{A}_{ik}$,$\boldsymbol{C}_{ik}$是局部可观测的.

利用并行分布补偿(PDC)技术,设计各个子系统的模糊控制器,第 k 个子系统的模糊控制器设计为:

模糊控制规则 i:

如果 $z_1(t)$ 是 F_{1k} 且 $z_2(t)$ 是 F_{2k} 且 …且 $z_l(t)F_{lk}$,则

$$\boldsymbol{u}_k(t)=\boldsymbol{K}_{ik}(\hat{\boldsymbol{x}}_k(t)-\boldsymbol{x}_{rk}(t))\tag{5}$$

采用单点模糊化,乘积推理及平均加权反模糊化,基于观测器的模糊分散控制器为:

$$\boldsymbol{u}_k(t)=\sum_{i=1}^{r_k}\mu_{ik}\boldsymbol{K}_{ik}(\hat{\boldsymbol{x}}_k(t)-\boldsymbol{x}_{rk}(t)),\quad k=1,2,\cdots,N\tag{6}$$

式中,$\boldsymbol{K}_{ik}$为增益反馈矩阵.

定义估计误差为:$\boldsymbol{e}_k(t)=x_k(t)-\hat{x}_k(t)$,则估计误差的方程:

$$\dot{e}_k(t)=\dot{x}_k(t)-\dot{\hat{x}}_k(t)=\sum_{h=1\,h\neq k}^{N}\sum_{i=1}^{r_k}\sum_{j=1}^{r_k}\mu_{ik}\mu_{jk}\Big[\frac{1}{N-1}(\Delta\boldsymbol{A}_{ik}+\Delta\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk})\boldsymbol{x}_k(t)+\frac{1}{N-1}(\boldsymbol{A}_{ik}-\Delta\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk}-\boldsymbol{L}_{ik}\boldsymbol{C}_{jk})\boldsymbol{e}_k(t)-\frac{1}{N-1}\cdot\Delta\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk}\boldsymbol{x}_{rk}(t)+\boldsymbol{R}_{ihk}\boldsymbol{e}_h(t)\Big]+\omega_k(t)\tag{7}$$

考虑第 k 个子系统跟踪的参考模型为:

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{rk}(t)=\boldsymbol{A}_{rk}\boldsymbol{x}_{rk}(t)+\boldsymbol{r}_k(t)\tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{x}_{rk}(t)$表示第 k 个子系统跟踪的参考状态;$\boldsymbol{A}_{rk}$表示一个已知的稳定矩阵;$\boldsymbol{r}_k(t)$表示有界的参考输入.把式(4),(7)和式(8)合并起来,经过简单的运算,可表示为如下的增广系统:

$$\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{x}}_k(t)\\ \dot{\boldsymbol{e}}_k(t)\\ \dot{\boldsymbol{x}}_{rk}(t)\end{bmatrix}=\sum_{h=1\,h\neq k}^{N}\sum_{i=1}^{r_k}\sum_{j=1}^{r_k}\mu_{ik}\mu_{jk}\cdot\left\{\frac{1}{N-1}\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_{ik}+\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk}\\ 0 & \boldsymbol{A}_{ik}-\boldsymbol{L}_{ik}\boldsymbol{C}_{jk} & 0\\ 0 & 0 & \boldsymbol{A}_{rk}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_k(t)\\ \boldsymbol{e}_k(t)\\ \boldsymbol{x}_{rk}(t)\end{bmatrix}+\frac{1}{N-1}\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{A}_{ik}+\Delta\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\Delta\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\Delta\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk}\\ \Delta\boldsymbol{A}_{ik}+\Delta\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\Delta\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\Delta\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk}\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_k(t)\\ \boldsymbol{e}_k(t)\\ \boldsymbol{x}_{rk}(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{ihk} & 0 & 0\\ 0 & \boldsymbol{R}_{ihk} & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_k(t)\\ \boldsymbol{e}_k(t)\\ \boldsymbol{x}_{rk}(t)\end{bmatrix}\right\}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{I} & 0 & 0\\ \boldsymbol{I} & 0 & 0\\ 0 & \boldsymbol{I} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\omega_k(t)\\ \boldsymbol{r}_k(t)\\ 0\end{bmatrix}\tag{9}$$

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_k(t)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_k(t)\\ \boldsymbol{e}_k(t)\\ \boldsymbol{x}_{rk}(t)\end{bmatrix}\qquad \tilde{\omega}_k(t)=\begin{bmatrix}\omega_k(t)\\ \boldsymbol{r}_k(t)\\ 0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{I}_k=\begin{bmatrix}\boldsymbol{I} & 0 & 0\\ \boldsymbol{I} & 0 & 0\\ 0 & \boldsymbol{I} & 0\end{bmatrix}$$

令:
$$A_{ijk}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_{ik}+\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk}\\ 0 & \boldsymbol{A}_{ik}-\boldsymbol{L}_{ik}\boldsymbol{C}_{jk} & 0\\ 0 & 0 & \boldsymbol{A}_{rk}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{ihk}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{ihk} & 0 & 0\\ 0 & \boldsymbol{R}_{ihk} & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

$$\Delta\boldsymbol{A}_{ijk}=\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{A}_{ik}+\Delta\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\Delta\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\Delta\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk}\\ \Delta\boldsymbol{A}_{ik}+\Delta\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\Delta\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\Delta\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk}\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

因此,式(9)所定义的增广系统可以写成如下的形式:

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_k(t)=\sum_{h=1\,h\neq k}^{N}\sum_{i=1}^{r_k}\sum_{j=1}^{r_k}\mu_{ik}\mu_{jk}\left\{\frac{1}{N-1}\boldsymbol{A}_{ijk}\tilde{\boldsymbol{x}}_k(t)+\frac{1}{N-1}\Delta\boldsymbol{A}_{ijk}\tilde{\boldsymbol{x}}_k(t)+\boldsymbol{R}_{ihk}\tilde{\boldsymbol{x}}_h(t)\right\}+\boldsymbol{I}_k\tilde{\omega}_k(t),\quad k=1,2,\cdots N\tag{10}$$

如果 $\tilde{\omega}_k=0$,称式(10)为无干扰增广系统.

假设 1 设参数不确定矩阵 $\Delta\boldsymbol{A}_{ik}$,$\Delta\boldsymbol{B}_{ik}$是模有界的,即满足

$$[\Delta\boldsymbol{A}_{ik}\quad \Delta\boldsymbol{B}_{ik}]=\boldsymbol{D}_{ik}\boldsymbol{F}_{ik}(t)[\boldsymbol{E}_{Aik}\quad \boldsymbol{E}_{Bik}]$$

式中,$\boldsymbol{D}_{ik}$,$\boldsymbol{E}_{Aik}$和$\boldsymbol{E}_{Bik}$是适当维数的已知矩阵,$\boldsymbol{F}_{ik}(t)$是未知函数矩阵,并且满足 $\boldsymbol{F}_{ik}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{F}_{ik}(t)\leqslant I$.

本文的控制目标:基于模糊分散观测器(4),设计模糊分散控制(6),使得无干扰增广系统稳定,且跟踪误差取得如下的 H_∞性能指标:

$$\int_0^{t_f}\{[\boldsymbol{x}_k(t)-\boldsymbol{x}_{rk}(t)]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_k[\boldsymbol{x}_k(t)-\boldsymbol{x}_{rk}(t)]\}\,dt$$

$$= \int_0^{t_f} \tilde{\boldsymbol{x}}_k^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Q}_k\tilde{\boldsymbol{x}}_k(t)dt \leqslant \tilde{\boldsymbol{x}}_k^{\mathrm{T}}(0)\boldsymbol{P}_k\tilde{\boldsymbol{x}}_k(0) + \rho^2\int_0^{t_f}\tilde{\omega}_k^{T}(t)\tilde{\omega}_k(t)dt \tag{11}$$

式中, $\boldsymbol{P}_k$ 是正定对称加权矩阵,

$$\boldsymbol{Q}_k = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Q}_{k1} & 0 & -\boldsymbol{Q}_{k1} \\ 0 & 0 & 0 \\ -\boldsymbol{Q}_{k1} & 0 & \boldsymbol{Q}_{k1} \end{bmatrix}, \boldsymbol{Q}_{k1} = \boldsymbol{Q}_{k1}^{\mathrm{T}} > 0$$

3　稳定性主要结果及鲁棒优化算法

定理 1

如果下面的矩阵不等式存在正定的公共矩阵 $\boldsymbol{P}_k = \boldsymbol{P}_k^{\mathrm{T}}$, 则无干扰增广系统在李雅普诺夫意义下稳定.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{N-1}\Phi_{ijk} & \boldsymbol{P}_k\boldsymbol{R}_{ihk} \\ \boldsymbol{R}_{ihk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_k & 0 \end{bmatrix} \leqslant 0$$

$$k, h = 1, 2, \cdots, N \text{ 且 } h \neq k;\ i, j = 1, 2, \cdots, r_k \tag{12}$$

其中, $\Phi_{ijk} = (A_{ijk} + \Delta A_{ijk})^{\mathrm{T}}P_k + P_k(A_{ijk} + \Delta A_{ijk})$.

定理 2

如果存在正定矩阵 $\boldsymbol{P}_k = \boldsymbol{P}_k^{\mathrm{T}}$, 满足如下的矩阵不等式(13), 则增广系统在李雅普诺夫意义下稳定, 并且取得 H_∞ 跟踪性能指标(11).

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{N-1}\Phi_{ijk} & \boldsymbol{P}_k\boldsymbol{R}_{ihk} & \frac{1}{N-1}\boldsymbol{P}_k\boldsymbol{I}_k \\ \boldsymbol{R}_{ihk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_k & 0 & 0 \\ \frac{1}{N-1}\boldsymbol{I}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_k & 0 & -\frac{1}{N-1}\rho^2\boldsymbol{I} \end{bmatrix} \leqslant 0$$

$$k, h = 1, 2, \cdots, N \text{ 且 } h \neq k;\ i, j = 1, 2, \cdots, r_k \tag{13}$$

其中, $\Phi_{ijk} = (\boldsymbol{A}_{ijk} + \Delta\boldsymbol{A}_{ijk})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_k + \boldsymbol{P}_k(\boldsymbol{A}_{ijk} + \Delta\boldsymbol{A}_{ijk})$.

为了获得较好的鲁棒跟踪性能, 使得 H_∞ 跟踪性能指标尽可能的小, 鲁棒跟踪控制问题(11)可以归结为如下的最小优化问题.

$$\begin{aligned} &\min_{P_k} \rho^2 \\ &\text{s. t.}\quad \boldsymbol{P}_k = \boldsymbol{P}_k^{\mathrm{T}} > 0 \text{ 和式(13)} \end{aligned} \tag{14}$$

由于在式(13)中存在不确定项 $\Delta\boldsymbol{A}_{ijk}$, 所以采用如下方法处理. 根据式(13)得:

$$\Xi + \begin{bmatrix} \frac{1}{N-1}(\Delta\boldsymbol{A}_{ijk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_k + \boldsymbol{P}_k\Delta\boldsymbol{A}_{ijk}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \leqslant 0 \tag{15}$$

式中,

$$\Xi = \begin{bmatrix} \frac{1}{N-1}(\boldsymbol{A}_{ijk}\boldsymbol{P}_k + \boldsymbol{P}_k\boldsymbol{A}_{ijk} + \boldsymbol{Q}_k) & \boldsymbol{P}_k\boldsymbol{R}_{ihk} & \frac{1}{N-1}\boldsymbol{P}_k\boldsymbol{I}_k \\ \boldsymbol{R}_{ihk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_k & 0 & 0 \\ \frac{1}{N-1}\boldsymbol{I}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_k & 0 & -\frac{1}{N-1}\rho^2\boldsymbol{I} \end{bmatrix}$$

由假设 1, 可以得到

$$\Delta\boldsymbol{A}_{ijk} = \boldsymbol{D}_{ik}\boldsymbol{F}_{ik}(t)\boldsymbol{E}_{ijk} \tag{16}$$

式中,

$$\boldsymbol{D}_{ik} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D}_{ik} & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{D}_{ik} & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{D}_{ik} \end{bmatrix}, \boldsymbol{F}_{ik}(t) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_{ik}(t) & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{F}_{ik}(t) & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{F}_{ik}(t) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{E}_{ijk} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{E}_{Aik} + \boldsymbol{E}_{Bik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\boldsymbol{E}_{Bik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\boldsymbol{E}_{Bik}\boldsymbol{K}_{jk} \\ \boldsymbol{E}_{Aik} + \boldsymbol{E}_{Bik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\boldsymbol{E}_{Bik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\boldsymbol{E}_{Bik}\boldsymbol{K}_{jk} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

把式(16)带入到式(15), 则式(15)等价于如下的不等式:

$$\Xi + \begin{bmatrix} \frac{1}{N-1}\boldsymbol{P}_k\boldsymbol{D}_{ik} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{F}_{ik}(t)[\boldsymbol{E}_{ijk}\quad 0\quad 0] + \begin{bmatrix} \boldsymbol{E}_{ijk}^{\mathrm{T}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{F}_{ik}^{\mathrm{T}}(t) \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{N-1}\boldsymbol{D}_{ik}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_k & 0 & 0 \end{bmatrix} \leqslant 0 \tag{17}$$

根据文献[2]中的引理知: 矩阵不等式(17)成立的充分必要条件是对于给定的常数 $\varepsilon_{ik} > 0$, 下面的不等式成立

$$\Xi + \begin{bmatrix} \boldsymbol{E}_{ijk}^{\mathrm{T}} & \frac{1}{N-1}\boldsymbol{P}_k\boldsymbol{D}_{ik} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{ik}^{-1}\boldsymbol{I} & 0 \\ 0 & \varepsilon_{ik}\boldsymbol{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{E}_{ijk} & 0 & 0 \\ \frac{1}{N-1}\boldsymbol{D}_{ik}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_k & 0 & 0 \end{bmatrix} \leqslant 0 \tag{18}$$

利用 Schur 补性质, 式(18)可写成如下的不等式:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{N-1}(\boldsymbol{A}_{ijk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_k + \boldsymbol{P}_k\boldsymbol{A}_{ijk} + \boldsymbol{Q}_k) & * & * & * & * \\ \boldsymbol{R}_{ihk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_k & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{N-1}\boldsymbol{I}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_k & 0 & -\frac{1}{N-1}\rho^2\boldsymbol{I} & 0 & 0 \\ \boldsymbol{E}_{ijk} & 0 & 0 & -\varepsilon_{ik}\boldsymbol{I} & 0 \\ \frac{1}{N-1}\boldsymbol{D}_{ik}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_k & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{ik}^{-1}\boldsymbol{I} \end{bmatrix} \leqslant 0 \tag{19}$$

因而, 式(14)中的最小优化问题等价于:

$$\begin{aligned} &\min_{P_k} \rho^2 \\ &\text{s. t.}\quad \boldsymbol{P}_k = \boldsymbol{P}_k^{\mathrm{T}} > 0 \text{ 和式(19)} \end{aligned} \tag{20}$$

为了设计方便, 令:

$$\boldsymbol{P}_k = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{11k} & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{P}_{22k} & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{P}_{33k} \end{bmatrix}$$

式中, $\boldsymbol{P}_{11k} = \boldsymbol{P}_{11k}^{\mathrm{T}} > 0$, $\boldsymbol{P}_{22k} = \boldsymbol{P}_{22k}^{\mathrm{T}} > 0$, $\boldsymbol{P}_{33k} = \boldsymbol{P}_{33k}^{\mathrm{T}} > 0$.

把 $\boldsymbol{P}_k$ 代入式(19)中, 并且令: $\boldsymbol{W}_{11k} = \boldsymbol{P}_{11k}^{-1}$, $\boldsymbol{M}_{jk} = \boldsymbol{K}_{jk}\boldsymbol{P}_{11k}^{-1} = \boldsymbol{K}_{jk}\boldsymbol{W}_{11k}$, $\boldsymbol{N}_{ik} = \boldsymbol{P}_{22k}\boldsymbol{L}_{ik}$, 对式(19)右侧的矩阵两侧同时乘以 diag$(\boldsymbol{P}_{11k}^{-1}\quad \boldsymbol{I}\quad \boldsymbol{I}\quad \cdots\quad \boldsymbol{I})$ 可得到式(21).

$$
\left[\begin{array}{ccccccccccccccc}
\frac{1}{N-1}\Omega & -\frac{1}{N-1}\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk} & -\frac{1}{N-1}(\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{K}_{jk}+\boldsymbol{W}_{11k}\boldsymbol{Q}_k) & R_{ihk} & 0 & 0 & \frac{1}{N-1}\boldsymbol{I} & 0 & 0 & \boldsymbol{W}_{11k}\boldsymbol{E}_{Aik}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{M}_{jk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}_{Bik}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{W}_{11k}\boldsymbol{E}_{Aik}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{M}_{jk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}_{Bik}^{\mathrm{T}} & 0 & \frac{1}{N-1}\boldsymbol{D}_{ik} & 0 & 0 \\
* & \frac{1}{N-1}\Phi & 0 & 0 & \boldsymbol{P}_{22k}\boldsymbol{P}_{ihk} & 0 & \frac{1}{N-1}\boldsymbol{P}_{22k} & 0 & 0 & -\boldsymbol{K}_{jk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}_{Bik}^{\mathrm{T}} & -\boldsymbol{K}_{jk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}_{Bik}^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & \frac{1}{N-1}\boldsymbol{P}_{22k}\boldsymbol{D}_{ik} & 0 \\
* & 0 & \frac{1}{N-1}\Theta & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{N-1}\boldsymbol{P}_{33k} & 0 & -\boldsymbol{K}_{jk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}_{Bik}^{\mathrm{T}} & -\boldsymbol{K}_{jk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}_{Bik}^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{N-1}\boldsymbol{P}_{33k}\boldsymbol{D}_{ik} \\
* & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & * & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
* & * & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{N-1}\rho^2\boldsymbol{I} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & * & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{N-1}\rho^2\boldsymbol{I} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{N-1}\rho^2\boldsymbol{I} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
* & * & * & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{ik}\boldsymbol{I} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
* & * & * & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{ik}\boldsymbol{I} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{ik}\boldsymbol{I} & 0 & 0 & 0 \\
* & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{ik}\boldsymbol{I} & 0 & 0 \\
0 & * & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{ik}\boldsymbol{I} & 0 \\
0 & 0 & * & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{ik}\boldsymbol{I}
\end{array}\right] \tag{21}
$$

式中:

$$\Theta=\boldsymbol{P}_{33k}\boldsymbol{A}_{rk}+\boldsymbol{A}_{rk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{33k}+\boldsymbol{Q}_k$$

$$\Omega=\boldsymbol{A}_{ik}\boldsymbol{W}_{11k}+\boldsymbol{W}_{11k}\boldsymbol{A}_{ik}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{M}_{jk}+\boldsymbol{M}_{jk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_{ik}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{W}_{11k}\boldsymbol{Q}_k\boldsymbol{W}_{11k}$$

$$\Phi=\boldsymbol{P}_{22k}\boldsymbol{A}_{ik}+\boldsymbol{A}_{ik}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{22k}-\boldsymbol{N}_{ik}\boldsymbol{C}_{jk}-\boldsymbol{C}_{jk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}_{ik}^{\mathrm{T}}$$

因此,基于观测器的 H_∞ 模糊分散跟踪控制问题可以重新归纳为如下的优化问题:

$$\min_{\{W_{11k}\ P_{22k}\ P_{33k}\}}\rho^2 \tag{22}$$

s.t. $\boldsymbol{W}_{11k}=\boldsymbol{W}_{11k}^{\mathrm{T}}>0$, $\boldsymbol{P}_{22k}=\boldsymbol{P}_{22k}^{\mathrm{T}}>0$, $\boldsymbol{P}_{33k}=\boldsymbol{P}_{33k}^{\mathrm{T}}>0$ 和式(21)

以下的两个步骤分别先后求得控制器和观测器的参数.

首先,从以下不等式(21)解得 $\boldsymbol{W}_{11k}$ 和 $\boldsymbol{K}_{jk}$. 由于式(21)成立,必然有下面的不等式成立,

$$\boldsymbol{A}_{ik}\boldsymbol{W}_{11k}+\boldsymbol{W}_{11k}\boldsymbol{A}_{ik}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{M}_{jk}+\boldsymbol{M}_{jk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_{ik}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{W}_{11k}\boldsymbol{Q}_k\boldsymbol{W}_{11k}\leqslant 0 \tag{23}$$

然而式(23)并不是线性矩阵不等式(LMI). 因此,利用 Schur 补性质,式(23)等价于:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_{ik}\boldsymbol{W}_{11k}+\boldsymbol{W}_{11k}\boldsymbol{A}_{ik}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_{ik}\boldsymbol{M}_{jk}+\boldsymbol{M}_{jk}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_{ik}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{W}_{11k} \\ \boldsymbol{W}_{11k} & -\boldsymbol{Q}_k^{-1} \end{bmatrix}\leqslant 0 \tag{24}$$

其次,解如下的不等式的特征值问题(EVP),得到 $\boldsymbol{P}_{22k}$, $\boldsymbol{P}_{33k}$, $\boldsymbol{N}_{ik}$.

$$\min_{\{P_{22k}\ P_{33k}\ N_{ik}\}}\rho^2$$
$$\text{s.t.}\quad P_{22k}=P_{22k}^{\mathrm{T}}>0,\quad P_{33k}=P_{33k}^{\mathrm{T}}>0\ \text{和(24)} \tag{25}$$

因此,基于观测器的 H_∞ 模糊分散跟踪控制问题等价于解:

$$\min_{\{W_{11k}\ \ P_{22k}\ \ P_{33k}\}}\rho^2$$
$$\text{s.t.}\quad \text{(22)和(24)} \tag{26}$$

4 数值仿真

考虑由如下数学模型表示的双电机互联系统[6]:

$$\dot{x}_{1k}(t)=x_{2k}(t)$$

$$\dot{x}_{2k}(t)=-\frac{D_k+d_k}{M_k}x_{2k}(t)+\frac{1}{M_k}u_k(t)+\sum_{h=1,h\neq k}^{2}\frac{E_kE_hY_{hk}}{M_k}\cdot[\cos(\delta_{hk}^0-\theta_{hk})-\cos(x_{1k}(t)-x_{1h}(t)+\delta_{hk}^0-\theta_{hk})]+\omega_{2k}(t)$$

$$y_k(t)=x_{1k}(t) \tag{27}$$

其中式(27)中的参数与文[6]中的选取相同. 假定状态变量 $x_{11}(t)\in[-\pi/2,\pi/2]$ 和 $x_{12}(t)\in[-\pi/2,\pi/2]$ 是可测的, $x_{21}(t)$ 和 $x_{22}(t)$ 是不可测的. 分别对两个子系统在工作点 $-\pi/2$, 0, $\pi/2$ 处部线性化, 构成模糊系统规则如下:

规则 1　如果 $x_{11}(t)$ 约是 $-\pi/2$ 且 $x_{12}(t)$ 大约是 $-\pi/2$, 则

$$\dot{\boldsymbol{x}}_k(t)=\left(\boldsymbol{A}_{1k}+\Delta\boldsymbol{A}_{1k}\right)\boldsymbol{x}_k(t)+(\boldsymbol{B}_{1k}+\Delta\boldsymbol{B}_{1k})\boldsymbol{u}_k(t)+\sum_{h=1,h\neq k}^{2}\cdot\boldsymbol{R}_{1hk}\boldsymbol{x}_h(t)+\omega_k(t)$$

$$\boldsymbol{y}_k=\boldsymbol{C}_{1k}\boldsymbol{x}_k(t)$$

规则 2　如果 $x_{11}(t)$ 约是 $-\pi/2$ 且 $x_{12}(t)$ 约是 0, 则

$$\dot{\boldsymbol{x}}_k(t)=(\boldsymbol{A}_{2k}+\Delta\boldsymbol{A}_{2k})\boldsymbol{x}_k(t)+(\boldsymbol{B}_{2k}+\Delta\boldsymbol{B}_{2k})\boldsymbol{u}_k(t)+\sum_{h=1,h\neq k}^{2})\cdot\boldsymbol{R}_{2hk}\boldsymbol{x}_h(t)+\omega_k(t)$$

$$\boldsymbol{y}_k(t)=\boldsymbol{C}_{2k}\boldsymbol{x}_k(t)$$

规则 3　如果 $x_{11}(t)$ 约是 $-\pi/2$ 且 $x_{12}(t)$ 大约是 $\pi/2$, 则

$$\dot{\boldsymbol{x}}_k(t)=(\boldsymbol{A}_{3k}+\Delta\boldsymbol{A}_{3k})\boldsymbol{x}_k(t)+(\boldsymbol{B}_{3k}+\Delta\boldsymbol{B}_{3k})\boldsymbol{u}_k(t)+\sum_{h=1,h\neq k}^{2}\boldsymbol{R}_{3hk}\boldsymbol{x}_h(t)+\omega_k(t)$$

$$\boldsymbol{y}_k(t)=\boldsymbol{C}_{3k}\boldsymbol{x}_k(t)$$

规则 4　如果 $x_{11}(t)$ 大约是 0 且 $x_{12}(t)$ 约是 $-\pi/2$, 则

$$\dot{\boldsymbol{x}}_k(t)=(\boldsymbol{A}_{4k}+\Delta\boldsymbol{A}_{4k})\boldsymbol{x}_k(t)+(\boldsymbol{B}_{4k}+\Delta\boldsymbol{B}_{4k})\boldsymbol{u}_k(t)+\sum_{h=1,h\neq k}^{2}\boldsymbol{R}_{4hk}\boldsymbol{x}_h(t)+\omega_k(t)$$

$$\boldsymbol{y}_k(t)=\boldsymbol{C}_{4k}\boldsymbol{x}_k(t)$$

规则 5　如果 $x_{11}(t)$ 约是 0 且 $x_{12}(t)$ 大约是 0, 则

$$\dot{\boldsymbol{x}}_k(t)=(\boldsymbol{A}_{5k}+\Delta\boldsymbol{A}_{5k})\boldsymbol{x}_k(t)+(\boldsymbol{B}_{5k}+\Delta\boldsymbol{B}_{5k})\boldsymbol{u}_k(t)+\sum_{h=1,h\neq k}^{2}\boldsymbol{R}_{5hk}\boldsymbol{x}_h(t)+\omega_k(t)$$

$$\boldsymbol{y}_k(t)=\boldsymbol{C}_{5k}\boldsymbol{x}_k(t)$$

规则 6　如果 $x_{11}(t)$ 约是 0 且 $x_{12}(t)$ 约是 $\pi/2$, 则

$$\dot{\boldsymbol{x}}_k(t)=(\boldsymbol{A}_{6k}+\Delta\boldsymbol{A}_{6k})\boldsymbol{x}_k(t)+(\boldsymbol{B}_{6k}+\Delta\boldsymbol{B}_{6k})\boldsymbol{u}_k(t)+\sum_{h=1,h\neq k}^{2}\boldsymbol{R}_{6hk}\boldsymbol{x}_h(t)+\omega_k(t)$$

$$\boldsymbol{y}_k(t)=\boldsymbol{C}_{6k}\boldsymbol{x}(t)$$

规则 7　如果 $x_{11}(t)$ 约是 $\pi/2$ 且 $x_{12}(t)$ 约是 $-\pi/2$, 则

$$\dot{\boldsymbol{x}}_k(t)=(\boldsymbol{A}_{7k}+\Delta\boldsymbol{A}_{7k})\boldsymbol{x}_k(t)+(\boldsymbol{B}_{7k}+\Delta\boldsymbol{B}_{7k})\boldsymbol{u}_k(t)+\sum_{h=1,h\neq k}^{2}\boldsymbol{R}_{7hk}\boldsymbol{x}_h(t)+\omega_k(t)$$

$$\boldsymbol{y}_k(t)=\boldsymbol{C}_{7k}\boldsymbol{x}(t)$$

规则 8　如果 $x_{11}(t)$ 约是 $\pi/2$ 且 $x_{12}(t)$ 约是 $-\pi/2$, 则

$$\dot{\boldsymbol{x}}_k(t)=(\boldsymbol{A}_{7k}+\Delta\boldsymbol{A}_{7k})\boldsymbol{x}_k(t)+(\boldsymbol{B}_{7k}+\Delta\boldsymbol{B}_{7k})\boldsymbol{u}_k(t)+\sum_{h=1,h\neq k}^{2}\boldsymbol{R}_{7hk}\boldsymbol{x}_h(t)+\omega_k(t)$$

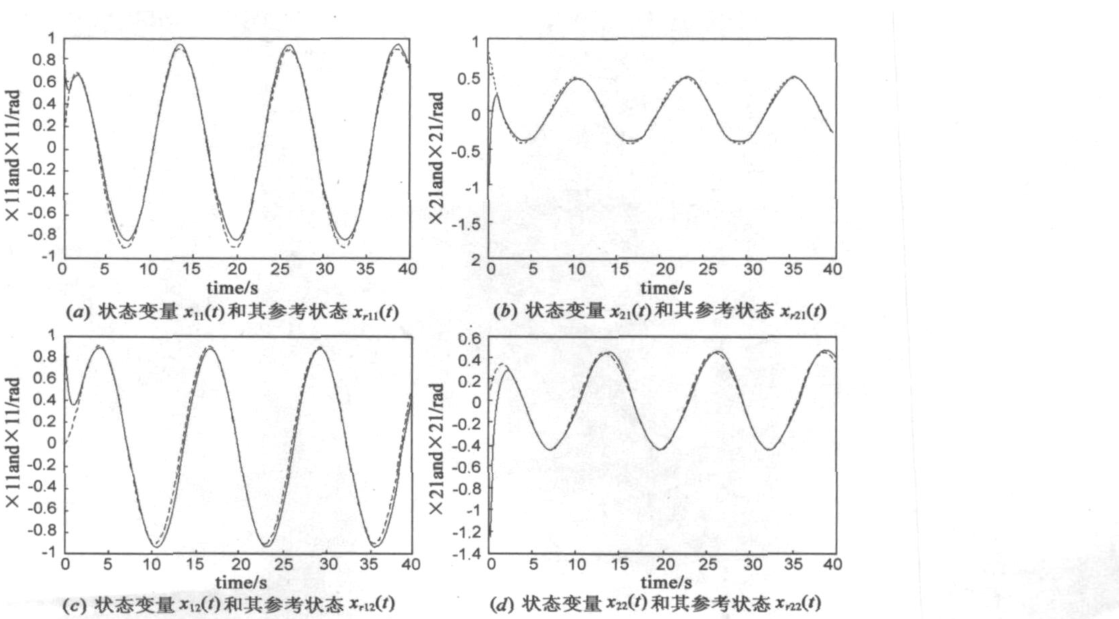
$$\boldsymbol{y}_k(t)=\boldsymbol{C}_{7k}\boldsymbol{x}(t)$$

规则 9　如果 $x_{11}(t)$ 约是 $\pi/2$ 且 $x_{12}(t)$ 约是 $-\pi/2$, 则

$$\dot{\boldsymbol{x}}_k(t)=(\boldsymbol{A}_{7k}+\Delta\boldsymbol{A}_{7k})\boldsymbol{x}_k(t)+(\boldsymbol{B}_{7k}+\Delta\boldsymbol{B}_{7k})\boldsymbol{u}_k(t)+\sum_{h=1,h\neq k}^{2}\boldsymbol{R}_{7hk}\boldsymbol{x}_h(t)+\omega_k(t)$$

$$\boldsymbol{y}_k(t)=\boldsymbol{C}_{7k}\boldsymbol{x}(t)$$

在上述模糊规则中, $\boldsymbol{A}_{ik}$, $\Delta\boldsymbol{A}_{ik}$, $\boldsymbol{B}_{ik}$, $\Delta\boldsymbol{B}_{ik}$, $\boldsymbol{R}_{ihk}$ 和模糊隶属函数与文[6]中的选取相同, $\boldsymbol{C}_{ik}=[1,0]$. 给定参考模型为



(a) 状态变量 $x_{11}(t)$ 和其参考状态 $x_{r11}(t)$　(b) 状态变量 $x_{21}(t)$ 和其参考状态 $x_{r21}(t)$

(c) 状态变量 $x_{12}(t)$ 和其参考状态 $x_{r12}(t)$　(d) 状态变量 $x_{22}(t)$ 和其参考状态 $x_{r22}(t)$

图 1　状态不完全可测的情况下状态响应曲线

$$\boldsymbol{A}_{rk}=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -100 & -101\end{bmatrix},\ \boldsymbol{r}_1(t)=\begin{bmatrix}0\\ 100\sin(0.5t)\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{r}_2(t)=\begin{bmatrix}0\\ 100\cos(0.5t)\end{bmatrix},\ k=1,2;$$

给定

$$\boldsymbol{Q}_1=\begin{bmatrix}0.0064 & 0\\ 0 & 0.0090\end{bmatrix},\ \boldsymbol{Q}_2=\begin{bmatrix}0.0025 & 0\\ 0 & 0.0081\end{bmatrix},\ \varepsilon_{ik}=1,$$

用 Matlab 中的 LMI 工具箱解式(26),得到控制器和观测器参数为:

$$K_{i1}=[-16.244\quad -13.744],$$

$$K_{i2}=[-19.551\quad -17.756]\quad i=1,2,\cdots,7$$

$$L_{11}=\begin{bmatrix}1050.2\\ 2492.3\end{bmatrix},\ L_{21}=\begin{bmatrix}1049.9\\ 2488.3\end{bmatrix},\ L_{31}=\begin{bmatrix}1049.9\\ 2488.6\end{bmatrix},$$

$$L_{41}=\begin{bmatrix}1050.3\\ 2495.5\end{bmatrix},\ L_{51}=\begin{bmatrix}1050.2\\ 2492.8\end{bmatrix}$$

$$L_{61}=\begin{bmatrix}1049.9\\ 2488.1\end{bmatrix},\ L_{71}=\begin{bmatrix}1050.3\\ 2495.1\end{bmatrix},\ L_{12}=\begin{bmatrix}853.99\\ 495.61\end{bmatrix},$$

$$L_{22}=\begin{bmatrix}854\\ 491.91\end{bmatrix},\ L_{32}=\begin{bmatrix}854.05\\ 488.04\end{bmatrix},\ L_{42}=\begin{bmatrix}854.04\\ 497.3\end{bmatrix},$$

$$L_{52}=\begin{bmatrix}854\\ 495.74\end{bmatrix},\ L_{62}=\begin{bmatrix}854.04\\ 488.97\end{bmatrix},\ L_{72}=\begin{bmatrix}854.04\\ 497.23\end{bmatrix}$$

假定仿真的初始条件为:

$$[x_{11}(0)\quad x_{21}(0)\quad x_{12}(0)\quad x_{22}(0)]=[1\quad 0\quad 1\quad 0]$$

仿真的步长为 0.02,图 1 中(a)~(d)给出了仿真结果.图中实线为状态变量的响应曲线,虚线为其参考状态的响应曲线.

5 结论

本文针对一类不确定非线性互联系统,基于模糊 T-S 模型和分布补偿(PDC)算法,给出了一种 H∞模型参考跟踪分散输出反馈模糊控制设计方法和鲁棒算法.基于李雅普诺夫稳定性理论给出了闭环系统的稳定性条件.

参考文献:

[1] K Tanaka, T Ikeda, H O Wang. Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control: quadratic stability H∞ control theory and linear matrix inequalities[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1996, 4(1): 1-13.

[2] H J Lee, J B Park, G R Chen. Robust fuzzy control of nonlinear systems with parametric uncertainties[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2001, 9(2): 369-379.

[3] Feng-Hsiag Hsiao, Jiing-Dong Jiang. Stability analysis of the fuzzy large-scale systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, 2001, 32(1): 122-126.

[4] Wen-June Wang, Leh Luoch. Stability and stabilization of fuzzy Large-scale systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2004, 12(3): 309-315.

[5] C S Tseng, B S Chen. Decentralized fuzzy model reference tracking control design for nonlinear interconnected systems[J]. IEEE Transaction on Fuzzy systems, 2001, 9(6): 795-809.

[6] 佟绍成,王铁超.一类非线性互联系统的模型参考跟踪模糊 H∞控制[J].控制与决策, 2006, 21(6): 31-48.
Tong Shaocheng, Wang Tiechao. Fuzzy model reference tracking H∞ control for nonlinear interconnected systems[J]. Control and Decision, 2006, 21(6): 31-48. (in Chinese)

作者简介:

佟绍成 男,1960 年出生于辽宁凌海,博导,教授,大连理工大学兼职博士生导师,主要研究方向:模糊系统理论、模糊非线性控制和智能控制. E-mail: jztsc@sohu.com

王铁超 男,1971 年出生于辽宁凌海,硕士研究生,研究方向为:模糊系统理论和模糊控制.