

非线性奇异摄动系统的自适应模糊控制器设计

李莉¹, 孙富春²

(1. 天津师范大学计算机与信息工程学院, 天津 300387;

2. 清华大学计算机科学与技术系人工智能重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为解决模型未知情况下多输入多输出非线性奇异摄动系统的跟踪问题, 提出一种新型的自适应模糊控制器。首先将被控系统分解为快慢子系统, 对慢子系统, 设计后件参数可调的直接型自适应模糊控制器, 能保证系统的慢状态跟踪预定轨迹; 对快子系统, 则设计模糊控制器, 能够保证快子系统的稳定, 最终控制器为二者的合成。Lyapunov 方法证明, 只要摄动参数足够小, 就能保证整个系统的稳定。仿真验证了所提方法的有效性。

关键词: 自适应模糊控制器; 模糊奇异摄动模型; 多时标非线性系统

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)03-0035-05

Fuzzy Adaptive Controller Design for Nonlinear Singularly Perturbed Systems

LI Li¹, SUN Fuchun²

(1. College of Computer and Information Engineering, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. State Key Lab of Intelligent Technology & Systems, Dept. of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: We proposed a new approach of the adaptive fuzzy control to solve the tracking problem of the MIMO NSPS with unknown models. The NSPS was decomposed into slow and fast subsystems. For the slow-subsystem, a direct adaptive fuzzy controller with adjustable parameters was designed to make the slow variables follow desired trajectory. As for the fast-subsystem, a fuzzy controller was used to guarantee the fast variables stable. The whole controller was the composition of the slow and fast control. Lyapunov synthesis approach could guarantee the stability of the whole system provided that the perturbation parameter is small enough. Simulations illustrate the effectiveness of the proposed approach.

Key words: adaptive fuzzy controller; fuzzy singularly perturbed system; multi-time scale nonlinear system

0 引言

对一大类具有快慢模态的物理系统而言, 病态及复杂的计算问题使得其控制器的设计相对困难。人们曾经用低阶模型估计阶次较高的系统, 在此基础上设计有限阶控制器, 但这种方法往往忽略系统的快模态和某些慢模态, 从而导致控制性能较差甚至闭环不稳

定。后来奇异摄动理论开始被广泛研究^[1-4]。只要奇异摄动参数足够小, 动态奇异摄动系统就可以由降阶系统和边界层子系统进行逼近, 之后采用两步法来设计合成控制器。该方法首先将奇异摄动系统分解为快慢子系统, 分别用最优^[2]或滑模控制^[3]方法设计子控制器, 最终的控制器是两个子控制器的合成。但以上方法均需要奇异摄动系统的模型预先已知, 而这在工业领域有时并不能得到满足。由于人工智能(AI)技术如模糊逻辑和神经网络已成功运用于许多具有不确定性和建模误差的系统中^[5-10], 因此在奇异摄动系统领域, 它也应能提高其控制性能。1996年, Reza Langari 在最优辨识基础上, 将 Kalman 滤波器和分层模糊控制相结合, 用于非线性奇异摄动系统^[11]。在文献[11]中, 首度将模糊控制器引入到非线性奇异摄动系统的综合问题中, 不过

收稿日期: 2012-06-12

修回日期: 2012-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(61103074); 天津市自然科学基金(11JCYBJC00600); 天津师范大学校博士基金(52X09012); 上海市高可信计算重点实验室开放课题(53H10058); 天津市教委高等学校科技发展基金(20110816, 20071315)

作者简介: 李莉(1978—), 女, 山东莱州人, 博士, 讲师, 研究方向为模糊系统、自适应控制和飞行控制。

该文献并没有给出仿真以验证该思想的有效性。2002年, Lin^[12]设计了两时标模糊控制器, 用于柔性机器人的控制。快子系统控制器能通过最优控制方法来减小柔性结构的振动, 而慢子系统控制器则采用模糊方法实现轨迹跟踪。文献[13] 通过将普通的 T-S 模糊模型进行推广, 提出一种模糊奇异摄动模型(FSPM), 并进一步提出基于该模型的 H_∞ 和 H_2 ^[14] 控制, 闭环系统的稳定分析则在文献[15]中给出。

以上提出的方法多数需要假设快子系统动态已知, 且只适用于解决单输入单输出奇异摄动系统的调节问题。本文将提出一种基于两步法的自适应模糊控制器, 其中快慢子控制器均采用模糊理论, 不需要快慢模型已知。该方法还能够用于多输入多输出非线性奇异摄动系统的跟踪问题, 仿真验证了其有效性。

1 问题的描述

设一类奇异摄动系统可用下式描述

$$\begin{cases} [x_{11}^{(r_1)}(t) \cdots x_{p1}^{(r_p)}(t)]^T = F_{11}(x(t)) + F_{12}(x(t)) \cdot \\ z(t) + G_1(x(t))u(t) + d(x, t), \\ \varepsilon \dot{z}(t) = F_{21}(x(t)) + F_{22}(x(t))z(t) + G_2(x(t))u(t), \\ y(t) = [y_1(t) \cdots y_p(t)]^T \end{cases} \quad (1)$$

为简便起见, 下文公式中涉及的 (t) 均省略, 则式(1)中的符号解释为 $F_{11}(x) = [f_1^1(x_1) \cdots f_p^1(x_p)]^T \in \mathbf{R}^p$, $F_{12}(x) = [f_1^2(x_1) \cdots f_p^2(x_p)]^T \in \mathbf{R}^{p \times n_2}$, $G_1(x) = [G_{11}^T(x) \cdots G_{1p}^T(x)]^T \in \mathbf{R}^{p \times p}$, $G_{ii}(x) = [g_{i1}(x) \cdots g_{ip}(x)]^T \in \mathbf{R}^p$; $x = [x_1^T \cdots x_p^T]^T$, $x_i = [x_{i1} \cdots x_{ir_i}]^T$, $z \in \mathbf{R}^{n_2}$ 分别是系统的快慢状态变量; $u = [u_1 \cdots u_p]^T$ 为控制器输入; $y = [y_1 \cdots y_p]^T$ 为输出; $f_i^1(x_i) \in \mathbf{R}$, $f_i^2(x_i) \in \mathbf{R}^{1 \times n_i}$, $g_{ij}(x_i) \in \mathbf{R}$, $F_{21}(x) \in \mathbf{R}^{n_2 \times 1}$, $F_{22}(x) \in \mathbf{R}^{n_2 \times n_2}$, $G_2(x) \in \mathbf{R}^{n_2 \times p}$ 是未知的连续函数; $d_i(x_i, t)$ 为外部干扰; n_2 为快状态维数; r_i 为慢状态维数且有 $r_1 + r_2 + \cdots + r_p = n$, $i, j = 1, \cdots, p$ 。

控制目标为使被控系统的慢变量 x 在所有信号均有界的情况下跟踪指定的状态 $x_d = [x_{d1}^T, \cdots, x_{dp}^T]^T$ 。定义跟踪误差为 $e_i = x_{i1} - x_{d1}$ ($i = 1, \cdots, p$), 控制目标即设计一种控制律 u , 使其在所有信号有界的情况下保证当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e_i \rightarrow 0$ ($i = 1, \cdots, p$), 并使得 z 稳定。

2 慢子系统控制器设计

令式(1)中的 $\varepsilon = 0$, 则有

$$F_{21}(\bar{x}) + F_{22}(\bar{x})\bar{z} + G_2(\bar{x})u_s = 0 \quad (2)$$

假设 1 $F_{21}(\bar{x}) + F_{22}(\bar{x})\bar{z} + G_2(\bar{x})u_s = 0$ 可解, 且其解为

$$\bar{z} = -F_{22}^{-1}(\bar{x})F_{21}(\bar{x}) - F_{22}^{-1}(\bar{x})G_2(\bar{x})u_s \quad (3)$$

根据式(1)和式(3), 可获得如下的慢子系统

$$[\bar{x}_{11}^{(r_1)} \cdots \bar{x}_{p1}^{(r_p)}]^T = F(\bar{x}) + G(\bar{x})u_s + d(\bar{x}, t) \quad (4)$$

其中: $F(\bar{x}) = F_{11}(\bar{x}) - F_{12}(\bar{x})[F_{22}(\bar{x})]^{-1}F_{21}(\bar{x})$, $G(\bar{x}) = G_1(\bar{x}) - F_{12}(\bar{x})[F_{22}(\bar{x})]^{-1}G_2(\bar{x})$, 为定义快子系统, 取快时标 $\tau = t/\varepsilon$ 及 $z_f = z - z_s$ 。设在该时标内, 慢变量不变, 则根据式(1)和式(3), 可获得快子系统

$$\varepsilon \dot{z}_f = F_{22}(\bar{x})z_f + G_2(\bar{x})u_f \quad (5)$$

在设计慢子控制器前, 还需要满足假设 2 和假设 3。

假设 2 $[F_{22}(\bar{x}) \quad G_2(\bar{x})]$ 能够稳定。

假设 3

1) 假设 $G(\bar{x})$ 非奇异, 对所有的 $\bar{x} \in S_x$, $\|G(\bar{x})\|$ 均有界, 这里 $S_x \in \mathbf{R}^n$ 为紧集。也就是说, 需要假设 $\lambda_{\max}(G(\bar{x})) < \infty$, $\lambda_{\min}(G(\bar{x})) > 0$, $\lambda_{\max}(G(\bar{x}(t)))$ 和 $\lambda_{\min}(G(\bar{x}))$ 分别是 $G(\bar{x})$ 的最大和最小特征值。

2) 假设式(4) 能反馈线性化, 其相对阶为 $r = [r_1 \cdots r_p]^T$ 并且零状态稳定。

3) $G(\bar{x})$ 的每个元素 (除主对角线外) 均满足 $|g_{ij}(\bar{x})| < \bar{g}_{ij}$, $i, j = 1, \cdots, p$, $i \neq j$ 。而主对角线上的元素则满足 $0 < \bar{g}_{ii} \leq g_{ii}(x) \leq \bar{g}_{ii} < \infty$ 和 $\frac{1}{g_{ii}} \sum_{j=1, j \neq i}^p \bar{g}_{ij} < 1$, $i = 1, \cdots, p$, 其导数满足 $|\dot{g}_{ii}(x)| \leq M_{ii}(x)$, 这里 $M_{ii}(x)$ 是一个已知有界的函数。

定义误差

$$e_{si} = [k_0^i, \cdots, k_{r_i-2}^i, 1][e_{i1}, \cdots, e_{i1}^{(r_i-1)}]^T \quad (6)$$

期望输出为 $y_m = [y_{m1} \cdots y_{mp}]^T$, 为保证系统收敛, 误差系数矩阵应使式(7)的根位于左半开平面上。

$$\hat{L}(s) = s^{r_i-1} + k_{r_i-2}^i s^{r_i-2} + \cdots + k_0^i \quad (7)$$

其中, $i = 1, \cdots, p$ 。

自适应模糊控制器由 T-S 模糊逻辑系统构成, 应用中心平均解模糊化, 标准推理和单值模糊化, 则总的 T-S 模糊系统为

$$\hat{u}_{si} = \xi_i(\bar{x}_i)\theta_i X_i = \sum_{l=1}^m \xi_i^l(\bar{x}_i) X_i^T \theta_i^l \quad (8)$$

其中: $\theta_i = [\theta_i^1, \cdots, \theta_i^m]^T \in \mathbf{R}^{m \times (r_i+1)}$, $\theta_i^l = [a_{i0}^l, \cdots, a_{ir_i}^l]^T \in \mathbf{R}^{r_i+1}$, $X_i = [1, \bar{x}_{i1}, \cdots, \bar{x}_{ir_i}]^T \in \mathbf{R}^{r_i+1}$ 。

假设第 i 个理想控制器可以表示为

$$u_i^* = \xi_i(\bar{x}_i)\theta_i^* X_i = \sum_{l=1}^m \xi_i^l(\bar{x}_i) X_i^T \theta_i^{*l} + \varepsilon_i(\bar{x}_i) \quad (9)$$

这里 $\varepsilon_i(\bar{x}_i)$ 为重构误差; θ_i^* 为最优估计参数, 定义为

$$\theta_i^* = \arg \min_{\theta_i \in \Omega_i} \sup_{\bar{x}_i(t) \in S_i, t \geq 0} |\xi_i(\bar{x}_i)\theta_i^* X_i - u_i^*| \quad (10)$$

这里 Ω_i 是紧集, 且有 $\theta_i \in \Omega_i$ 。

假设 4 设未知外界干扰 $d_i(\bar{x}, t) < D_i$, 且重构误

差 $\varepsilon_i(\bar{x}_i) \leq D_{ei}(\bar{x}_i)$, $|\xi_i(\bar{x}_i)X_i^T\Phi_i| \leq \bar{U}_i(\bar{x})$ 。由于 $\xi_i(\bar{x}_i), X_i^T$ 已知, 则可以找到这样的 $\bar{U}_i(\bar{x})$ 。

自适应模糊控制器为

$$U_s = \hat{U}_s + U_d \quad (11)$$

式中: $\hat{U}_s = [\hat{u}_{s1} \ \cdots \ \hat{u}_{sp}]^T; U_d = [u_{d1} \ \cdots \ u_{dp}]^T; u_{di} = \text{sgn}(e_{si})(\sigma_i + \sum_{j=1, j \neq i}^p \frac{\bar{g}_{ij} U_{\max}}{\bar{g}_{ii}}) + \rho_i; \sigma_i = \sum_{j=1}^p \frac{\bar{g}_{ij} D_j(\bar{x}_i)}{\bar{g}_{ii}} + \sum_{j=1}^p \frac{\bar{g}_{ij} D_{ej}(\bar{x}_i)}{\bar{g}_{ii}} + \sum_{j=1, j \neq i}^p \frac{\bar{g}_{ij}}{\bar{g}_{ii}} \bar{U}_j$ 。需要满足 $|u_{di}(t)| \leq U_{\max}$, 即

$$|u_{di}(t)| \leq |\sigma_i| + |\rho_i| + U_{\max} \sum_{j=1, j \neq i}^p \frac{\bar{g}_{ij}}{\bar{g}_{ii}} \leq U_{\max} \quad (12)$$

这样需要

$$U_{\max} \geq \max_{i=1, \dots, p} \left[(|\sigma_i| + |\rho_i|) / (1 - \sum_{j=1, j \neq i}^p \frac{\bar{g}_{ij}}{\bar{g}_{ii}}) \right] \quad (13)$$

自适应律为

$$\dot{\theta}_i = \Gamma_{ui} \xi_i^T(\bar{x}_i) X_i^T e_{si} \quad (14)$$

其中: $\Gamma_{ui} \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 为正定对角矩阵, 为自适应增益。为保证 $\theta_i \in \Omega_i$, 采用参数投影算法。

定理 若期望轨迹 $y_m(t)$ 及其导数有界且系统满足假设2和假设3, 应用控制律(11)和自适应律(14), 可以得到如下结果:

- 1) 系统状态变量、输出向量及其导数有界;
- 2) 控制信号有界, 即 $\|U_s\| \in L_\infty$;
- 3) 输出误差渐近趋于零, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_i = 0, i = 1, \dots, p$ 。

证明:

考虑理想反馈线性化控制器为

$$U^* = G^{-1}(\bar{x})(-F(\bar{x}) + \nu) \quad (15)$$

其中, $\nu = [\nu_1, \dots, \nu_p]$, 是线性化系统输入。

将式(15)代入式(4), 则有

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_{11}^{(r_1)} & \cdots & \bar{x}_{p1}^{(r_p)} \end{bmatrix}^T = F(\bar{x}) + G(\bar{x})u_s - G(\bar{x})U^* + G(\bar{x})U^* + d(\bar{x}, t) \quad (16)$$

令

$$\bar{e}_{si} = \dot{e}_{si} - e_i^{(r_i)} = [k_0^i, \dots, k_{r_i-2}^i] [\dot{e}_i, \dots, e_i^{(r_i-1)}]^T \quad (17)$$

则

$$\nu_i = y_{mi}^{(r_i)} + \eta_i e_{si} + \bar{e}_{si} \quad (18)$$

其中, $\eta_i > 0$ 为设计参数。

$$e_i^{(r_i)} = y_{mi}^{(r_i)} - y_i^{(r_i)} = -\eta_i e_{si} - \bar{e}_{si} - \sum_{j=1}^p g_{ij}(\bar{x}_i)(u_j - u_j^*) - \sum_{j=1}^p g_{ij}(\bar{x}_i) d_j \quad (19)$$

则有

$$\dot{e}_{si} = -\eta_i e_{si} - \sum_{j=1}^p g_{ij}(x_i)(u_j - u_j^*) - \sum_{j=1}^p g_{ij}(\bar{x}_i) d_j \quad (20)$$

令 $\Phi_i = \theta_i - \theta_i^*$, 选择 Lyapunov 函数为

$$V = \sum_{i=1}^p V_i \quad (21)$$

$$V_i = \frac{1}{2g_{ii}(\bar{x}_i)} e_{si}^2 + \frac{1}{2} \text{tr}[\Phi_i^T \Gamma_{ui}^{-1} \Phi_i] \quad (22)$$

对式(22)求导并考虑式(20), 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i = & -\frac{\eta_i}{g_{ii}(\bar{x}_i)} e_{si}^2 - \frac{\dot{g}_{ii}(\bar{x}_i)}{2g_{ii}^2(\bar{x}_i)} e_{si}^2 - \frac{e_{si}}{g_{ii}(\bar{x}_i)} \cdot \\ & \left[\sum_{j=1}^p g_{ij}(\bar{x}_i) d_j + \sum_{j=1}^p g_{ij} u_{dj} \right] - \frac{e_{si}}{g_{ii}(\bar{x}_i)} \left[\sum_{j=1, j \neq i}^p g_{ij} X_i^T \cdot \right. \\ & \left. \Phi_j \xi_j - \sum_{j=1}^p g_{ij} e_j \right] \leq -\frac{\eta_i}{g_{ii}(\bar{x}_i)} e_{si}^2 \quad (23) \end{aligned}$$

则有

$$\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^p \frac{\eta_i}{g_{ii}(\bar{x}_i)} e_{si}^2 \quad (24)$$

因此闭环系统稳定, 且有 $e_{si}, \bar{e}_{si} \in L_\infty$ 。由于输入信号有界, 则有 $y_i, \dots, y_i^{(r_i-1)} \in L_\infty$ 。根据输出有界和系统假设2, 则 $x_1(t), \dots, x_n(t)$ 有界, 表明状态轨迹局限在紧集 S_x 中。由假设3知 $\hat{u}_{si} \in L_\infty, i = 1, \dots, p$ 。因为 \bar{U}_i 定义为一个连续函数, 且 D_i 有界, 则 $\sigma_i \in L_\infty, \rho_i \in L_\infty$ 。由于 $e_{si} \in L_\infty$, 则 $U_{\max} \in L_\infty$, 可得 $u_{di} \in L_\infty$, 最终得 $\|U_s\| \in L_\infty$ 。

为证明定理中的3), 考虑式(24), 可得

$$\int_0^\infty \sum_{i=1}^p \frac{\eta_i}{g_{ii}(\bar{x}_i)} e_{si}^2 dt \leq -\int_0^\infty \dot{V} dt = V(0) - V(\infty) < \infty \quad (25)$$

则 $e_{si} \in L_2$ 。

前面已经证明 $e_{si} \in L_\infty, \dot{e}_{si} \in L_\infty$, 由于 $e_{si} \in L_2 \cap L_\infty$

且 $\dot{e}_{si} \in L_\infty$, 根据 Barbalat 引理可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_{si} = 0$ 。因此可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_i = 0, i = 1, \dots, p$ 。

本节假设主对角线元素为正值, 事实上它可以是负值, 其原理与正值情形一样, 只要将控制律和证明做相应的变化即可。

3 合成控制器设计

假定慢状态在边界层是不变的, 则式(7)可以看作是一个线性系统。由假设1可知该线性系统可镇定。因此可以采取传统的针对线性系统设计调节器的方法使之稳定。由于模型未知, 这里采用模糊控制的方法, 设控制器的第 l 条规则是:

$$R_l^l: \text{IF } z_1 \text{ is } A_1^l, \text{ and } \dots, \text{ and } z_{n_z} \text{ is } A_{n_z}^l, \text{ Then } u_j^l \text{ is } B^l$$

这里 $A_1^l, A_{n_z}^l$ 和 B^l 为第 l 个模糊集。采用乘积推理、高斯

隶属函数和中心解模糊化,可以得到模糊控制器 u_f 。合成控制器为快子控制器与慢子控制器的合成,即

$$u = u_s + u_f \quad (26)$$

对慢子系统,本节设计了一种自适应模糊控制器 u_s ,对快子系统则设计一种模糊控制器 u_f 以获得系统稳定。因为系统首先被分解成快慢子系统,之后再行进行控制器设计,原则上达到了降阶和减少模糊规则数的目的。

4 仿真结果

本节将上述提出的自适应模糊控制器用于两输入两输出非线性奇异摄动系统的跟踪控制中。假设该系统的动态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_{11} = x_{12} \\ \dot{x}_{12} = \frac{1 - e^{-x_{11}}}{1 + e^{-x_{11}}} - (x_{12}^2 + 2x_{11}) \sin x_{12} + z \sin x_{11} + (1 + e^{-x_{11}})u_1 - 0.5x_{11} \sin(3t) \\ \dot{x}_{21} = x_{22} \\ \dot{x}_{22} = \frac{9.8 \sin x_{21} - 0.05x_{21}^2 \cos x_{21} \sin x_{21}/1.1}{0.5(0.75 - \cos^2 x_{11}/11)} + \frac{\cos x_{21}}{0.55(0.75 - \cos^2 x_{11}/11)}u_2 \\ \varepsilon \dot{z} = 2x_{11} - z + 0.5u_1 \\ y_1 = x_{11} \\ y_2 = x_{21} \end{cases} \quad (27)$$

式中, $\varepsilon = 0.11$, 参考信号为 $y_{m1} = y_{m2} = e^{-t}$ 。根据式(11)和式(14)设计慢控制器 u_s ,由式(25)构建快控制器 u_f 。假设系统(27)的初始状态 $x(0) = [0.1, 0, -0.1, 0]^T, z(0) = 0$,其数学模型未知,将上述合成控制器用于跟踪控制。仿真结果如图1~图5所示。

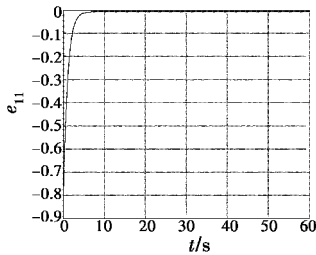


图 1 x_{11} 与期望值 $y_{m1} = e^{-t}$ 间的跟踪误差 e_{11}

Fig. 1 The tracking error e_{11} between state x_{11} and its desired value $y_{m1} = e^{-t}$

从图1~图5能够看出动态跟踪误差在10s后趋于零,而快状态则趋于稳定。这是因为虽然奇异摄动系统的数学模型未知,由于其子控制器分别为自适应模糊控制器和模糊控制器,即使存在估计误差,也能通

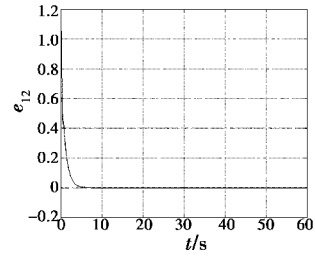


图 2 x_{12} 与期望值 $\dot{y}_{m1} = -e^{-t}$ 的跟踪误差 e_{12}

Fig. 2 The tracking error e_{12} between state x_{12} and

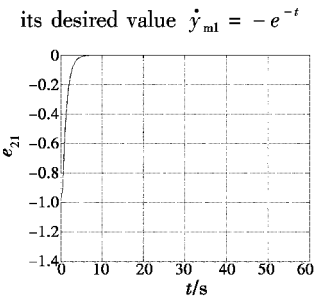


图 3 x_{21} 与期望值 $y_{m2} = e^{-t}$ 间的跟踪误差 e_{21}

Fig. 3 The tracking error e_{21} between state

x_{21} and its desired value $y_{m2} = e^{-t}$

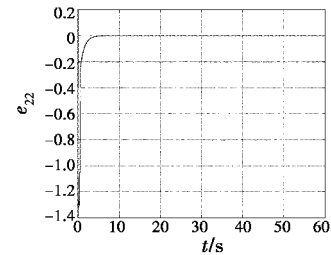


图 4 x_{22} 与期望值 $\dot{y}_{m2} = -e^{-t}$ 的跟踪误差 e_{22}

Fig. 4 The tracking error e_{22} between state

x_{22} and its desired value $\dot{y}_{m2} = -e^{-t}$

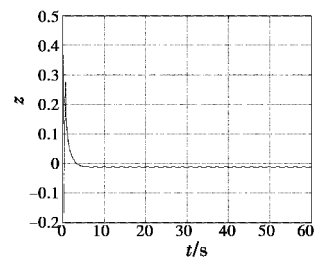


图 5 快变量 z

Fig. 5 The fast variable z

过调整自身的参数,减少对系统性能的影响。

5 结束语

本文针对多输入多输出非线性奇异摄动系统,提出合成的自适应模糊控制器,能够获得较好的跟踪性能,该控制器的设计不需要奇异摄动系统的模型已知。

仿真结果验证了所提方法的有效性。

参考文献

- [1] GAJIC Z, LIM M T. Optimal control of singularly perturbed linear systems and applications-high accuracy techniques [M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 2001.
- [2] CHOW J H, KOKOTOVIC P V. A decomposition of near-optimum regulators for systems with slow and fast modes [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1976, 21(5):701-705.
- [3] ZHANG Xiaoyu, JIN Hongzhang, ZHANG Haipeng, et al. Robust sliding mode control for a class of uncertain nonlinear singularly perturbed systems [C]//SICE 2wz, Aug. 5-7, 2002:2616-2621.
- [4] LIU Huaping, SUN Fuchun. Survey of singularly perturbed systems: Theory and application [J]. Control theory & Applications, 2003, 20(1):1-7.
- [5] LEE C C. Fuzzy logic in control systems; Fuzzy logic controller, Part I and Part II [J]. IEEE Transactions on systems, Man and Cybernetics, 1990, 20(2):404-435.
- [6] WANG L X. Stable adaptive fuzzy controller with application to inverted Pendulum Tracking [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1996, 26(5):677-691.
- [7] HAN Hugang, SU Chunyi, STEPANENKO Y. Adaptive control of a class of nonlinear systems with nonlinearly parameterized fuzzy approximators [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2001, 9(2):315-323.
- [8] SPOONER J T, PASSINO K M. Stable adaptive controls using fuzzy systems and neural networks [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1996, 4(3):339-359.
- [9] LHEE C G, PARK J S, AHN H S, et al. Sliding mode-like fuzzy logic control with self-tuning the dead zone parameters [J]. IEEE Transactions on Fuzzy systems, 2001, 9(2):343-348.
- [10] SLOTINE J J E, COETSEE J A. Adaptive sliding controller synthesis for non-linear systems [J]. International journal of Control, 1986, 43(4):1631-1651.
- [11] LANGARI R, LI Wei. Analysis and efficient implementation of fuzzy logic control algorithms [C]//1996 Biennial Conference of the North American Volume, 19-22 Jun, 1996:1-4.
- [12] LIN J, LEWIS F L. Fuzzy controller for flexible-link robot arm by reduced-order techniques [J]. IEE Proceedings Control Theory and Application, 2002, 147(3):177-187.
- [13] LIU Huaping, SUN Fuchun. Controller design and stability analysis for fuzzy singularly perturbed systems [J]. Acta Automatic Sinica, 2003, 29(4):494-500.
- [14] LIU Huaping, SUN Fuchun. H_2 state feedback control for fuzzy singularly perturbed systems [C]//Proceedings of the 42nd IEEE conference on decision and control, Maui, Hawaii USA, 2003:5239-5243.
- [15] LIU Huaping, SUN Fuchun. Simultaneous stabilization for singularly perturbed systems via linear matrix inequalities [J]. Acta Automatic Sinica, 2004, 30(1):1-7.
- (上接第34页)
- [2] 周东华, DING X. 容错控制理论及其应用 [J]. 自动化学报, 2000, 26(6):788-797.
- [3] 胡昌华, 陈新海. 对部分执行器失效具有完整性的导弹容错控制设计 [J]. 西北工业大学学报, 1997, 15(4):563-568.
- [4] 胡昌华, 许化龙. 控制系统故障诊断与容错控制的分析和设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [5] BLANKE M, KINNAERT M, LUNZE J, et al. Diagnosis and fault-tolerant control [M]. Germany: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [6] 张柯, 姜斌, 刘京津. 基于自适应观测器控制系统的快速故障调节 [J]. 控制与决策, 2008, 23(7):771-775.
- [7] JIN Xiaozheng, YAN Guanghong. Adaptive fault-tolerant H_∞ compensation controller design with actuator failures [C]//2009 American Control Conference Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA June 10-12, 2009:5516-5521.
- [8] GAO Z, DING S X. Sensor fault reconstruction and sensor compensation for a class of nonlinear state-space systems via a descriptor system approach [J]. IET Control Theory Appl, 2007, 1(3):578-585.
- [9] 陈世年. 控制系统设计 [M]. 北京: 宇航出版社, 1996.
- [10] BOSKOVIC J D, MEHRA R K. A hybrid fault-tolerant scheme for flight control applications [C]//Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Montreal, Canada, 2001: AIAA-2001-4400.
- [11] 曹祥宇, 胡昌华, 乔俊峰. 基于解析冗余的导弹执行机构故障诊断方法研究 [C]//2011 中国自动化大会论文, 北京, 2011:26-29.