

文章编号: 1001-0920(2011)10-1545-04

基于模糊逼近的一类不确定非线性系统的容错控制

杜贞斌¹, 陈为胜², 王培进¹, 宋宜斌¹

(1. 烟台大学 计算机学院, 山东 烟台 264005; 2. 西安电子科技大学 应用数学系, 西安 710071)

摘要: 针对一类不确定非线性系统, 提出了一种模糊容错控制方案. 采用模糊 T-S 模型来逼近非线性系统, 由线性矩阵不等式设计模糊模型的控制律. 构建了模糊逻辑系统作为补偿器来抵消对非线性系统的建模误差和因故障引起的不确定性, 并证明了闭环系统能够满足期望的跟踪性能. 仿真实例表明了所提出容错控制方案的有效性.

关键词: 模糊 T-S 模型; 模糊逻辑系统; 容错控制; 非线性系统

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Fault-tolerant control for a class of uncertain nonlinear systems based on fuzzy approximation

DU Zhen-bin¹, CHEN Wei-sheng², WANG Pei-jin¹, SONG Yi-bin¹

(1. School of Computer Science and Technology, Yantai University, Yantai 264005, China; 2. Department of Applied Mathematics, Xidian University, Xi'an 710071, China. Correspondent: DU Zhen-bin, E-mail: zhenbindu@yahoo.com.cn)

Abstract: A fuzzy fault-tolerant control scheme is presented for a class of uncertain nonlinear system. The original nonlinear systems is approximated by a fuzzy T-S model based on which a state-feedback controller is constructed by using the linear matrix inequalities. The approximating error and the uncertainties caused by the faults are eliminated by an adaptive compensator based on fuzzy logic systems. It is proved that the closed-loop system satisfies the anticipant tracking performance. A simulation example shows the effectiveness of the proposed fault-tolerant control scheme.

Key words: fuzzy T-S model; fuzzy logic systems; fault-tolerant control; nonlinear systems

1 引言

工程系统越复杂, 整个控制系统出现故障的可能性越大, 因此迫切需要建立系统发生故障时的有效重构控制方案. 容错技术是解决系统发生故障时稳定性的有效手段. 文献[1-7]提出了多种基于上述方法的容错控制方案, 不但具有较好的理论突破, 而且已成功应用于工程设计中. [1]的增益预置法对非线性系统在不同的工作点建模, 但该方法需要大量的增益预置表, 同时控制律在不同工作点切换时可能造成参数突变. [2]的非线性动态逆方法通过被控对象非线性耦合特性准确建模, 但对建模误差较为敏感. [3]基于神经网络的容错控制方法无需建立标称系统, 但影响了系统的预期性能. [4]提出的故障补偿方法对于模型的依赖性较大. [5]提出了滑模容错控制方法, 但控制器的设计需要相当的约束条件. [6]提出了基于模

糊 T-S 模型的容错控制方法, 忽略了原先的非线性系统, 所设计的控制器不一定能保证原系统稳定. [7]提出基于可靠性准则的容错控制方法, [8]讨论了容错控制的参数调节问题, 但这些方法仍未给出统一的容错控制方案.

模糊 T-S 模型是将非线性系统线性化的一种有效的工具, 以此为基础可设计模糊控制器来保证系统的稳定性和期望性能^[9]. 模糊逻辑系统具有一致逼近特性, 能够充分利用语言信息和专家信息, 通过一系列模糊规则对不确定性非线性系统建模^[10].

本文针对一类非线性系统, 综合模糊 T-S 模型和模糊逻辑系统, 提出了一种容错控制方案. 首先, 采用模糊 T-S 模型对非线性系统建模, 由线性矩阵不等式设计模糊状态反馈控制器使得模糊 T-S 模型稳定; 然后, 构建模糊逻辑系统作为补偿器来消除由外部扰

收稿日期: 2010-06-17; 修回日期: 2010-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60974028, 60804021); 山东省自然科学基金项目(ZR2011FQ037).

作者简介: 杜贞斌(1978—), 男, 讲师, 博士, 从事模糊控制的研究; 陈为胜(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 从事非线性自适应控制等研究.

动、建模误差以及执行机构故障等引起的未知不确定性对非线性系统稳定性的影响. 通过理论分析和仿真实验表明了本文提出的容错控制方案的有效性.

2 问题描述

考虑如下的不确定非线性系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ &\vdots \\ \dot{x}_{(\beta_1-1)} &= x_{\beta_1}, \\ \dot{x}_{\beta_1} &= f_1(x, u) + \tilde{f}_1(x, u), \\ \dot{x}_{(\beta_1+1)} &= x_{(\beta_1+2)}, \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f_m(x, u) + \tilde{f}_m(x, u), \\ y &= Cx. \end{aligned} \tag{1}$$

其中: $x \in R^n$ 是已知的系统状态向量, $x = [x_1, x_2, \dots, x_1^{(\beta_1-1)}, \dots, x_{(n-\beta_m+1)}, \dots, x_{(n-\beta_m+1)}^{(\beta_m-1)}]^T$; $u \in R^m$ 是控制输入向量; $y \in R^p$ 是系统的输出向量; 定常矩阵 $C \in R^{p \times n}$; $f_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 是已知光滑非线性函数, $\tilde{f}_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 是不确定未知非线性函数, 表示由外部扰动、建模误差或者执行机构故障等引起的未知不确定性. 控制任务是给定期望参考信号 $r(t)$, 设计控制器使得非线性系统 (1) 稳定, 并使系统输出跟踪参考信号 $r(t)$.

采用模糊 T-S 模型对非线性系统 (1) 的已知特性进行建模, 有

$R^{(i)}$: if $z_1(t)$ 为 F_1^i , and, \dots , and $z_s(t)$ 为 F_s^i , then

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t), \quad i = 1, 2, \dots, L; \tag{2}$$

$$y(t) = Cx(t). \tag{3}$$

其中: $z_i(t) (i = 1, 2, \dots, s)$ 是模糊规则的前件变量; $F_j^i (j = 1, 2, \dots, s)$ 是模糊集; L 是规则数; A_i, B_i 是适维矩阵, $B_i = [0, \dots, b_{i1}^T, \dots, 0, \dots, b_{im}^T]^T \in R^{n \times m}$, $b_{i1} \in R^m, \dots, b_{im} \in R^m$. 对上述局部模型加权, 得到全局系统为

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^L \mu_i A_i x(t) + \sum_{i=1}^L \mu_i B_i u(t), \tag{4}$$

$$y(t) = Cx(t). \tag{5}$$

其中

$$\mu_i = v_i(z(t)) / \sum_{i=1}^L v_i(z(t)), \quad v_i(z(t)) = \prod_{j=1}^s F_j^i(z_j(t)),$$

$F_j^i(z_j(t))$ 是 $z_j(t)$ 关于 F_j^i 的隶属度函数, $\mu_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, L)$ 且 $\sum_{i=1}^L \mu_i = 1$. 模糊 T-S 模型对系统 (1) 的建模误差和不确定非线性部分为

$$\begin{aligned} B\Delta(x) &= [x_2 \ \dots \ f_1 + \tilde{f}_1 \ \dots \ f_m + \tilde{f}_m]^T - \\ &\left(\sum_{i=1}^L \mu_i A_i x(t) + \sum_{i=1}^L \mu_i B_i u(t) \right). \end{aligned}$$

其中

$$B = \text{diag}[\bar{B}_1, \bar{B}_2, \dots, \bar{B}_m],$$

$$\bar{B}_i = [0, \dots, 0, 1]^T \in R^{\beta_i},$$

$$\Delta(x) = [\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_m]^T.$$

于是, 非线性系统 (1) 可改写为

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^L \mu_i A_i x(t) + \sum_{i=1}^L \mu_i B_i u(t) + B\Delta(x), \tag{6}$$

$$y(t) = Cx(t). \tag{7}$$

3 容错控制器的设计

引入新的状态变量 $x_e(t)$, 对跟踪误差微分有

$$\dot{x}_e(t) = y(t) - r(t) = Cx(t) - r(t). \tag{8}$$

将基于模糊 T-S 模型的状态反馈控制和基于模糊逻辑系统的自适应控制结合起来, 设计控制器为

$$u(t) = u_l(t) - u_f(t). \tag{9}$$

其中: $u_l(t)$ 是基于模糊 T-S 模型的状态反馈控制, $u_f(t)$ 是基于模糊逻辑系统的自适应补偿器. 基于模糊 T-S 模型的全局状态反馈控制为

$$u_l(t) = \sum_{i=1}^L \mu_i K_i x(t) + \sum_{i=1}^L \mu_i V_i x_e(t). \tag{10}$$

其中: $u_l(t)$ 使得系统 (1) 的线性部分稳定; K_i 和 V_i 是适维矩阵, 满足

$$\begin{aligned} \bar{A}_{ij}^T P + P \bar{A}_{ij} + \frac{1}{\rho^2} P P + Q < 0, \\ i, j = 1, 2, \dots, L. \end{aligned} \tag{11}$$

其中

$$\bar{A}_{ij} = \begin{bmatrix} A_i + B_i K_j & B_i V_j \\ C & 0 \end{bmatrix},$$

P 和 Q 是对称正定矩阵, $\rho > 0$.

基于模糊逻辑系统的自适应补偿器为

$$u_f(t) = \begin{cases} E^{-1} \hat{u}(x|\Theta), & E \text{ 非奇异;} \\ E^T (I + E E^T)^{-1} \hat{u}(x|\Theta), & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{12}$$

其中: $u_f(t)$ 消除由外部扰动、建模误差或者执行机构故障等引起的未知不确定性; $E_i = [b_{i1}^T, b_{i2}^T, \dots, b_{im}^T]^T$

$\in R^{m \times m}$; $E = \sum_{i=1}^L \mu_i E_i$; $\hat{u}(x|\Theta)$ 由模糊逻辑系统构建, 权值 Θ 自适应律为

$$\dot{\Theta} = \eta_1 \Psi^T(x) B^T P x, \tag{13}$$

η_1 是正常数, $\Psi(x)$ 是模糊基函数矩阵.

4 稳定性分析

由于

$$\sum_{i=1}^L \mu_i B_i u_f(t) - B\Delta(x) =$$

$$B(Eu_f(t) - \Delta(x)) \underline{\Delta} B(\hat{u}(x|\Theta) - \Delta(x)),$$

将式 (9) 代入 (6), 得到

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^L \mu_i A_i x(t) + \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \mu_i \mu_j B_i [K_j x(t) + V_j x_e(t)] - B(\hat{u}(x|\Theta) - \Delta(x)). \quad (14)$$

令 $\tilde{x}(t) = [x^T(t), x_e^T(t)]^T$, $\bar{B} = [B^T \ 0]^T$. 由式 (8) 和 (14), 得到新的增广闭环系统为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) = & \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \mu_i \mu_j \bar{A}_{ij} \tilde{x}(t) + \\ & \bar{B}(-(\hat{u}(x|\Theta) - \Delta(x)) + d'), \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $d' = [0, -r^T(t)]^T$. 如果自适应模糊逻辑系统 $\hat{u}(x|\Theta)$ 能补偿掉 $\Delta(x)$, 则闭环系统 (15) 稳定.

模糊逻辑系统具有一致逼近特性, 用来逼近向量函数 $\Delta(x)$, 形式如下:

$$\hat{\Delta}(x|\Theta) = \Psi(x)\Theta. \quad (16)$$

其中

$$\Psi(x) = \text{diag}[\xi_1^T(x), \xi_2^T(x), \dots, \xi_m^T(x)],$$

$$\Theta = [\theta_1^T, \theta_2^T, \dots, \theta_m^T]^T,$$

权值 θ 为可调参数.

定义参数逼近误差

$$\tilde{\Theta} = \Theta - \Theta^* = [(\theta_1 - \theta_1^*), \dots, (\theta_m - \theta_m^*)]^T. \quad (17)$$

于是, 模糊逻辑系统对向量函数 $\Delta(x) = [\Delta_1(x), \Delta_2(x), \dots, \Delta_n(x)]^T$ 的逼近误差为

$$\hat{\Delta}(x|\Theta) - \Delta(x) = \Psi(x)\tilde{\Theta} + w, \quad (18)$$

其中 $w = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$ 是残差项.

令 $\bar{w} = [0, \dots, -w_1, \dots, 0, \dots, -w_m]^T$, $w' = [\bar{w}^T \ -r^T(t)]^T$, 由式 (18), 式 (15) 改写为

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \mu_i \mu_j \bar{A}_{ij} \tilde{x}(t) + B(-\Psi(x)\tilde{\Theta}) + w'. \quad (19)$$

定理 1 针对非线性系统 (1), 选择容错控制律 (9), 基于模糊 T-S 模型的状态反馈控制器 (10), 模糊逻辑系统的自适应补偿器 (12) 和参数自适应律 (13), 可得闭环系统 (19) 是一致有界的. 对于给定的 $\rho > 0$, 如下的 H_∞ 性能成立:

$$\begin{aligned} & \int_0^T \tilde{x}^T(t) Q \tilde{x}(t) dt \leq \\ & \tilde{x}^T(0) P \tilde{x}(0) + \frac{1}{\eta_1} \tilde{\Theta}^T(0) \tilde{\Theta}(0) + \rho^2 \int_0^T (w'^T w') dt, \end{aligned} \quad (20)$$

其中 P 和 Q 是对称正定矩阵.

证明 选取 Lyapunov 函数

$$V = \tilde{x}^T P \tilde{x} / 2 + \tilde{\Theta}^T \tilde{\Theta} / 2\eta_1,$$

其导数为

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} \tilde{x}^T(t) Q \tilde{x}(t) + \frac{1}{2} \rho^2 w'^T w'.$$

对其积分得 H_∞ 性能 (11). 不等式 (11) 可转换为 LMIs 求解, 有

$$\begin{aligned} \bar{A}_{ij} = & \begin{bmatrix} A_i + B_i K_j & B_i V_j \\ C & 0 \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} A_i & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} + [B_i \ 0] \begin{bmatrix} K_j \\ V_j \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (21)$$

令

$$\bar{A}_i = \begin{bmatrix} A_i & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}, \bar{B}_i = [B_i \ 0], \bar{K}_j = \begin{bmatrix} K_j \\ V_j \end{bmatrix},$$

$$W = P^{-1}, Y_j = \bar{K}_j W.$$

式 (11) 等价于

$$\begin{bmatrix} S & W \\ W & -Q^{-1} \end{bmatrix} < 0, \quad i, j = 1, 2, \dots, L. \quad (22)$$

其中

$$S = \bar{A}_i W + W \bar{A}_i^T + \bar{B}_i Y_j + (\bar{B}_i Y_j)^T + (\rho^2)^{-1} I.$$

由式 (21) 可得 P 和 $\bar{K}_j, j = 1, 2, \dots, L$. \square

5 仿真算例

设定仿真系统为^[11]

$$\dot{\theta} = q, \dot{\alpha} = Z_\alpha \alpha + q + Z_{\delta_e} \delta_e,$$

$$\dot{q} = M_\alpha \alpha + M_q q + M_{\delta_e} \delta_e.$$

其中: θ 为俯仰角, q 为俯仰角速度, α 为迎角, δ_e 为升降舵, δ_{el} 为左升降舵偏转角, δ_{er} 为右升降舵偏转角. 假设歼击机飞行的初始马赫数 $M = 0.6$, 设置在 2.5 s 时发生执行机构故障.

采用本文方法设计模糊容错控制器, 使得俯仰角 θ 跟踪信号 $r(t)$. $r(t)$ 是幅值为 1 的阶跃信号, 在 1 s 时发出. 令 $x_1 = \theta, x_2 = q, x_3 = \alpha, u_1 = \delta_{el}, u_2 = \delta_{er}, y_1 = x_1$, 则系统可改写为式 (1) 的形式.

首先, 设计模糊 T-S 模型, 取模糊前件变量为马赫数 M , 对系统在 $M = 0.4$ 和 $M = 0.8$ 进行模糊 T-S 建模, 得到状态反馈控制器 $u_i(t)$; 其次, 设计自适应补偿器. 仿真结果如图 1~图 3 所示.

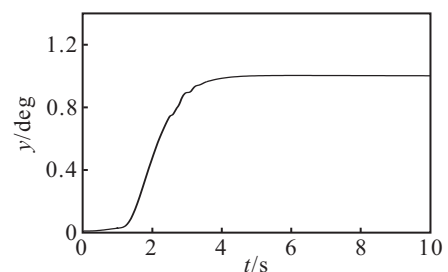


图 1 俯仰角

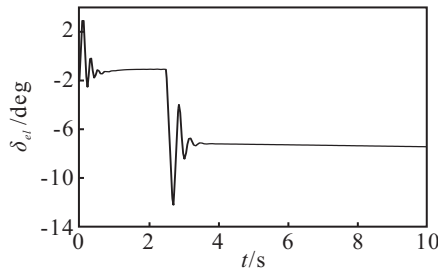


图2 左升降舵曲线

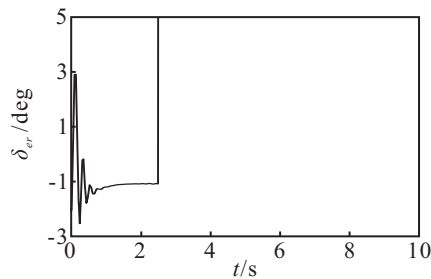


图3 右升降舵曲线

6 结论

本文利用模糊 T-S 模型和模糊逻辑系统的特点,提出了基于模糊逼近的非线性容错控制方案.通过歼击机纵向通道的故障实验验证了所提出的容错控制方案的有效性.仿真结果表明,本文设计的模糊容错控制器能使系统快速稳定.

参考文献(References)

- [1] Wilson J R, Jeff S S. Research on gain scheduling[J]. *Automatica*, 2000, 36(10): 1401-1425.
- [2] Hovakimyan N, Calise A J. Adaptive output feedback control of uncertain multi-input multi-output systems using single hidden layer neural networks[C]. *Proc of ACC*. Anchorage, 2002: 1555-1560.
- [3] Calise A J, Lee S, Sharma M. Development of a reconfigurable flight control law for tailless aircraft[J]. *AIAA J of Guidance, Control and Dynamics*, 2001, 25(5): 896-902.
- [4] Tang X D, Gang T, Suresh M J. Adaptive actuator failure compensation for nonlinear MIMO systems with an aircraft control application[J]. *Automatica*, 2007, 43(11): 1869-1883.
- [5] Jiang B, Staroswiecki M, Cocquempot V. Fault accommodation for nonlinear dynamic systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2006, 51(9): 1578-1583.
- [6] Wu L G, Daniel W C H. Fuzzy filter design for its stochastic systems with application to sensor fault detection[J]. *IEEE Trans Fuzzy Systems*, 2009, 17(1): 233-242.
- [7] Pedro G D, Gary G Y. Tuning of fault-tolerant control design parameters[J]. *ISA Trans*, 2008, 47(1): 127-142.
- [8] Poure P, Weber P, Theilliol D, et al. Fault-tolerant control of a three-phase three-wire shunt active filter system based on reliability analysis[J]. *Electric Power Systems Research*, 2009, 79(2): 325-334.
- [9] Park C M. LMI-based robust stability analysis for fuzzy feedback linearization regulators with its application[J]. *Information Sciences*, 2003, 152: 287-301.
- [10] Chen W S, Zhang Z Q. Globally stable adaptive backstepping fuzzy control for output-feedback systems with unknown high-frequency gain sign[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2010, 161(6): 821-836.
- [11] Blacklock J H. *Automatic control of aircraft and missiles*[M]. 2nd ed. New York, 1991: 17-24.
- [5] Guha S, Rastoqi R, Shim K. Rock: A robust clustering algorithm for categorical attributes[J]. *Information Systems*, 2000, 25(5): 345-366.
- [6] Barbara D, Couto J, Li Y. COOLCAT: An entropy-based algorithm for categorical clustering[C]. *Proc of the Eleventh International Conf on Information and Knowledge Management*. Virginia, 2002: 582-589.
- [7] He Z Y, Xu X F, Deng H C. Squeezer: An efficient algorithm for clustering categorical data[J]. *J of Computer Science and Technology*, 2002, 17(5): 611-624.
- [8] Aranganayagi S, ThangaveI K, Sujatha S. New distance measure based on the domain for categorical data[C]. *The 1st Int Conf on Advanced Computing*. Chennai, 2009: 93-95.
- [9] Ahmad A, Dey L. A k -mean clustering algorithm for mixed numeric and categorical data[J]. *Data & Knowledge Engineering*, 2007, 63(2): 503-527.
- [10] UCI machine Learning Repository[DB/OL]. <http://www.ics.uci.edu/mllearn/MLRepository.html>.

(上接第1544页)