

文章编号: 1001-0920(2005)04-0408-04

基于模糊自适应滑模的非线性系统的故障调节

张颖伟, 王小刚, 王福利

(东北大学 教育部流程工业综合自动化重点实验室 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 对于非线性系统提出故障调节控制的设计方法, 通过附加控制律补偿故障所带来的影响 利用模糊逻辑系统估计故障并提供故障的修正行为, 即主动容错 引入滑模控制抵消模糊逼近误差, 经故障调节后闭环系统是稳定的 通过仿真算例证明了该方法的有效性

关键词: 闭环稳定性; 故障调节; 主动容错

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Fault accommodation for nonlinear systems using fuzzy adaptive sliding control

ZHANG Yingwei, WANG Xiaogang, WANG Fuli

(Key Lab Process Industry Automation of Ministry of Education, School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China Correspondent: ZHANG Yingwei, Email: zhang-yingwei2001@yahoo.com.cn)

Abstract An active fault accommodation control law is developed for a class of nonlinear systems to guarantee the closed-loop stability in the presence of a fault, based on a fuzzy logic system representation of the dynamics due to faults. It uses fuzzy logic system to approximate the dynamic caused by the fault. Through the adaptive process of the parameters, the dynamics caused by the fault is counteracted. The fuzzy sliding mode control is introduced to attenuate the fuzzy approximation error. The closed-loop system is stable in Lyapunov sense and the tracking error converges to a neighbourhood of zero. The example shows that the fault accommodation control law is effective for nonlinear systems.

Key words: closed-loop stability; fault-accommodation; active fault tolerant control

1 引 言

近年来, 由于考虑工业的安全性和经济性, 故障诊断和容错控制得到广泛关注^[1,2]. 容错控制分为被动容错控制和主动容错控制. 被动容错控制设计适当固定结构的控制器, 该控制器除考虑正常工作状态的参数值外, 还要考虑在故障情况下的参数值, 即无论是控制部件正常运行还是执行器、传感器等部件失效时, 均能保障系统的稳定性. 主动容错控制在故障发生后需要重新调整控制器参数, 也可改变控制器结构. 在被动容错控制中, 应用鲁棒策略^[3~5],

并依靠冗余设计保证对系统的可靠控制^[5~7]. 因故障发生前后使用的是同一个控制器而不进行调节, 虽然无故障和故障发生时闭环系统是稳定的, 但它使得系统在无故障时不能达到较高的性能指标, 故障发生后更无法保证良好的性能, 因此仅适用于故障较小或初始故障的情况.

故障调节是在故障发生后通过附加控制律等方法进行调节, 属于主动容错. 故障发生前使用控制器 u_N , 故障发生后补偿 u_F , 于是 $u = u_N + u_F$ 成为新的控制器以调节故障系统. 文献[8]对故障调节问

收稿日期: 2004-10-20; 修回日期: 2004-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(60374003); 辽宁省科学基金项目(20031016); 沈阳市科学基金项目(1032040-1-01).

作者简介: 张颖伟(1969—), 女, 河北定县人, 副教授, 博士后, 从事复杂系统的故障诊断和容错控制等研究; 王福利(1957—), 男, 辽宁辽阳人, 教授, 博士生导师, 从事复杂过程智能控制等研究.

题作出概括性论述; [9] 对于单输入多输出系统提出的逼近适用于传感器故障调节; [10] 和[11] 将自适应策略用于容错控制 本文提出一种新的容错策略, 即将故障引起的动态应用模糊逻辑系统表示, 利用滑模控制减小模糊逼近误差 控制器的精确数学模型可减小滑模控制引起的抖动

2 问题描述

考虑如下非线性系统:

$$\dot{x} = a(x) + \sum_{i=1}^p b_i(x)u_i, \quad (1)$$

$$y_i = c_i(x), i = 1, 2, \dots, p. \quad (2)$$

其中: $x \in R^n, y, u \in R^p$ 分别为系统的状态、输出和输入; $a(x) \in R^n, b_i(x) \in R^n, c(x) = [c_1(x), \dots, c_p(x)]^T \in R^p$.

定义 1 对于所有整数 $m_i < r_i - 1$ 和 $\forall x \in R^n$, 如果以下方程成立:

$$\begin{cases} L_b L_a^{m_i} c_i(x) = 0, \\ L_b L_a^{r_i-1} c_i(x) = 0, \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, p; \quad (3)$$

那么系统(1) 有一致强相关度向量 $[r_1, \dots, r_p]^T$.

假设 1 对于 $\forall x \in R^n$, 系统(1) 有一致强相关度向量 $[r_1, \dots, r_p]^T$.

由假设 1, 存在微分同胚^[12]

$$(\xi, \eta) = T(x), \quad (4)$$

使得

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_1 &= \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 &= \xi_3, \\ &\vdots \\ \dot{\xi}_{r_i} &= \zeta(\xi, \eta) + g_i(\xi, \eta)u_i = \\ &\quad \zeta(x) + g_i(x)u_i; \end{aligned} \quad (5)$$

$$y_i = \xi_i + \beta(t - T_i)f_i(x). \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} \zeta(x) &= L_a^{r_i} c_i(x) = \zeta(\xi, \eta), \\ \zeta(x) &= (\zeta_1(x), \dots, \zeta_p(x))^T; \\ g_i(x) &= L_b L_a^{r_i-1} c_i(x) = g_i(\xi, \eta), \\ g(x) &= (g_1^T(x), \dots, g_p^T(x))^T; \\ \xi &= (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{r_i})^T, \\ f &= (f_1, f_2, \dots, f_p)^T; \end{aligned}$$

$\eta \in R^{n-r}$ 是内部动态, 可表示为

$$\dot{\eta} = q_i(\xi_i, \eta) = q_i(x); \quad (7)$$

f_i 为第 i 个传感器故障所引起的动态; T_i 为第 i 个传感器故障发生时间(由故障检测确定); 切换函数

$$\beta(t - T) = \text{diag}(\beta(t - T_1), \beta(t - T_2),$$

$$\dots, \beta(t - T_p)). \quad (8)$$

其中

$$\beta(t - T_i) = \begin{cases} 0, & t < T_i; \\ 1, & t \geq T_i \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, p. \quad (9)$$

无故障的系统(1) 称为“健康”系统

假设 2 $g(x)$ 在紧集 $S \subset R^n$ 上是有界的, 且

$$\|g(x)\|^2 = \text{tr}(g^T(x)g(x)) \leq b > 0 \quad (10)$$

令 y_m 为参考输入, 假设 $y_m, \dot{y}_m, \dots, y_m^{(r)}$ 都是有界并可测的, 定义跟踪误差为

$$\begin{aligned} e_i(t) &= y_i(t) - y_{im}(t), \\ e &= (e_1, e_2, \dots, e_p)^T, \\ y_m &= (y_{1m}, y_{2m}, \dots, y_{pm})^T. \end{aligned} \quad (11)$$

其控制目标是设计容错控制器, 使得: 1) 闭环系统的所有变量均为有界; 2) 跟踪误差 $e(t)$ 渐近收敛到零或零的一个邻域

3 模糊逻辑系统

模糊逻辑系统有如下模糊语言描述规则:

$$\begin{aligned} R^l: & \text{if } x_1 \text{ is } A^l_1 \text{ and } x_2 \text{ is } A^l_2 \\ & \text{and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A^l_n, \\ & \text{then } y \text{ is } B^l, l = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (12)$$

其中: $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in U$ 为模糊逻辑系统的输入, $y \in R$ 为输出, A^l_i 和 B^l 为模糊集 令 N 为模糊规则数, 模糊逻辑系统的输出可写成

$$y(x) = \frac{\sum_{l=1}^N \mathcal{Y}_l \prod_{i=1}^n A^l_i(x_i)}{\sum_{l=1}^N \left[\prod_{i=1}^n A^l_i(x_i) \right]} \quad (13)$$

其中: $x = (x_1, \dots, x_n) \in R^n, A^l_i(x_i)$ 为 A^l_i 的隶属函数值, $\mathcal{Y}_l = \max_{y \in R} B^l(y)$. 令

$$v(x) = \frac{\sum_{l=1}^N \prod_{i=1}^n A^l_i(x_i)}{\sum_{l=1}^N \left[\prod_{i=1}^n A^l_i(x_i) \right]}, \quad (14)$$

则式(13) 可写为

$$y(x) = \sum_{l=1}^N \mathcal{Y}_l v_l(x). \quad (15)$$

如果隶属函数选择 Gauss 函数, 则有如下引理:

引理 1^[13] 假设 $\alpha(x)$ 是一个紧集 $U \subset R^n$ 上的连续函数, 则对任意 $\epsilon > 0$, 存在一个模糊系统 $y(x)$, 使得

$$|\alpha(x) - y(x)| \leq \epsilon \quad (16)$$

4 故障调节

滑模控制器的目的是^[14]: 1) 抵消参数不确定性; 2) 抵消未建模动态

本文引入模糊滑模控制器是为了减小模糊逼近误差 定义滑模平面

$$s_i(t) = \left(\frac{d}{dt} + U_i \right)^{(r_i-1)} e_i, \quad (17)$$

其中 U_i 为正常数

根据引理 1, 对于任意 $\epsilon_i > 0$ 和可调参数向量 Y_i , 存在模糊逻辑系统, 使得 $f_i(x) = \hat{Y}_i^V(x)$.

设计模糊控制器

$$u_N = g^{-1}(x) [-\zeta(x) + K^T e + y_m^{(n)} + \frac{1}{2} \mu s] - k u_b, \quad (18)$$

$$u_F = g^{-1}(x) [-f(x|Y)] \quad (19)$$

其中: $k = g^{-1}(x) \in K^T = (k_0, \dots, k_{n-1})^T$, 且 K 的选择满足 Hurwitz 多项式: $L(s) = s^{(n)} + k_{n-1}s^{(n-1)} + \dots + k_0$, 其根在开左半平面 令 $u_b = (u_{1b}, \dots, u_{pb})^T$ 为模糊滑模控制器, 定义 s_i 和 u_{ib} 的语言集分别为

$$\begin{aligned} T(s_i) &= \{NB, NM, ZR, PM, PB\} = \\ &\{C^1, C^2, \dots, C^5\}, \\ T(u_{ib}) &= \{NB, NM, ZR, PM, PB\} = \\ &\{F^1, F^2, \dots, F^5\}. \end{aligned} \quad (20)$$

其中: NB, NM, ZR, PM 和 PB 分别表示模糊集负大、负中、零、正中和正大 它们的隶属函数是三角模糊集

由直觉推理建立误差 s_i 和模糊控制 u_{ib} 的模糊关系

$$R^j: \text{if } s_i \text{ is } C^j, \text{ then } u_{ib} \text{ is } F^{6-j}, \quad j = 1, 2, \dots, 5 \quad (21)$$

由第 j 条规则得到的模糊关系为

$$R^j: C^j \times F^{6-j}, \quad \text{i.e. } R^j(s_i, u_{ib}) = C^j(s_i) F^{6-j}(u_{ib}). \quad (22)$$

总的模糊关系为

$$R = \bigcap_{j=1}^5 R^j, \quad \text{i.e. } R(s_i, u_{ib}) = \bigcap_{j=1}^5 [C^j(s_i) F^{6-j}(u_{ib})] \quad (23)$$

采用乘积推理规则和单点模糊化方法, 得

$$F(u_{ib}) = \bigcap_{j=1}^5 [C^j(s_i) F^{6-j}(u_{ib})] \quad (24)$$

应用重心非模糊化方法, 进一步可取精确的控制

$$u_{ib} = \frac{\int_{-3/2}^{3/2} u_{ib} F(u_{ib}) du_{ib}}{\int_{-3/2}^{3/2} F(u_{ib}) du_{ib}} \quad (25)$$

精确的数学表达式为

$$u_{ib} = \begin{cases} 1, z_i < -1; \\ \frac{(2z_i + 3)(3z_i + 1)}{2(4z_i^2 + 6z_i + 1)}, & -1 < z_i < -0.5; \\ \frac{z_i(2z_i + 1)}{2(4z_i^2 + 2z_i - 1)}, & -0.5 < z_i < 0; \\ \frac{z_i(2z_i - 3)}{2(4z_i^2 - 2z_i - 1)}, & 0 < z_i < 0.5; \\ -1, z_i > 0.5; \end{cases} \quad (26)$$

其中 $z_i = s_i/\varphi$ 当 $|s_i| > \varphi$ 时, $u_{ib} = -\text{sgn}(s_i)$. 这里 φ 为边界层的宽度

选择自适应律

$$\dot{\hat{Y}} = -\eta_1 e^T P B \sigma(x), \quad (27)$$

$$\dot{\hat{\mu}} = \eta_2 (e^T P B)^2 \quad (28)$$

其中: $B = [0 \ 0 \ \dots \ 1]^T$, P 为 $PA + A^T P = -Q$ 的正定解 这里

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_0 & -k_1 & \dots & -k_{n-1} \end{bmatrix}$$

由此本文的结果如下:

定理 1 对于系统(1), 在假设 1 和假设 2 条件下, 如果采用由式(18)和(19)确定的正常控制器 u_N 和故障补偿控制器 u_F , 以及自适应律(27)和(28), 则跟踪误差收敛到原点的任意一个给定的邻域内

证明 选择滑模平面

$$\begin{aligned} s &= e^T P B, \\ \dot{e} &= A e - B [f(x|Y) - \hat{f}(x|Y)] + \\ &B (\mu^*/2) s + B ((\mu^* - \mu)/2) s - \\ &B g(x) k u_b - B [f(x|Y) - f(x)] \end{aligned}$$

令 $\tilde{\mu} = \mu^* - \mu$ 为估计误差, 选取 Lyapunov 函数

$$V = e^T P e + \frac{1}{2\eta_1} Y^T Y + \frac{1}{2\eta_2} \tilde{\mu}^T \tilde{\mu}$$

取 V 的导数, 得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T Q e - \mu^* (e^T P B)^2 \\ &- e^T \Gamma e \quad 0 \end{aligned} \quad (29)$$

其中 $\Gamma = Q + \mu^* P B B^T P$.

假设 λ 为 Γ 的最小特征值, 则式(29)变成

$$\dot{V} = -\lambda |e|^2 \leq 0, \quad (30)$$

所以 $V \in L^\infty, e \in L^\infty$. 结合式(30), 则有

$$\int_0^{\infty} (\lambda |e|^2) dt = V(0) - V(\infty)$$

由 $\dot{e} = -L|e|$, $\frac{d}{dt}|e| = -\frac{e}{|e|} \dot{e} = -L|e|$, 通过应用 Barbalet 引理, 可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0$

5 仿真算例

考虑如下系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, y_1 = \sin x_2, \\ \dot{x}_2 &= (x_2^2 + 2x_1) \sin x_2 + \\ &\quad [1 + \exp(-x_1)]u, \\ y_2 &= \sin x_1. \end{aligned}$$

参考输出为 $y_m = 0, i = 1, 2$ 定义闭集如下:

$$\begin{aligned} A_d &= \left\{ (x_1, x_2): \frac{x_1^2}{4} + \frac{x_2^2}{4} \leq 1 \right\}, \\ A_1 &= \left\{ (x_1, x_2): \frac{x_1^2}{4} + \frac{x_2^2}{4} \leq 1 + 0.1 \right\} \end{aligned}$$

采用 5 条模糊规则

$$R^l: \text{if } x \text{ is } A^l \text{ then } y \text{ is } B^l, \quad l = -2, -1, 0, 1, 2$$

其中

$$A^l = \exp\left[-\frac{(x-l)^2}{2}\right], \quad l = -2, -1, 0, 1, 2$$

定义

$$v_i(x) = \frac{A^i(x)}{\sum_{i=-2}^2 A^i(x)},$$

于是

$$y(x) = \hat{y}^v(x).$$

应用模糊逻辑系统逼近不确定故障函数(当 $T = 1$ s 时加入故障)

$f_1(x) = \theta \sin\left(\frac{\pi}{2}x\right)$, 这里 $\theta \in (-1, 1)$,

$g_i^{-1}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}, u_{ib} = -\text{sgn}(s_i)$

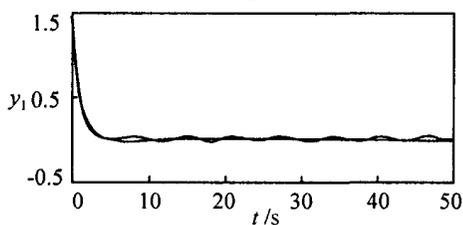


图 1 输出跟踪误差

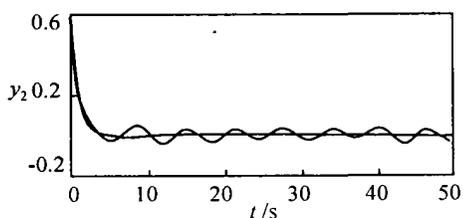


图 2 输出跟踪误差

$\eta = 0.5, \eta_2 = 0.9, \rho = 0.5, \epsilon = 2.0$ 仿真结果如图 1 和图 2 所示

从图 1 和图 2 可以看出, 故障发生后, 模糊自适应滑模控制器的补偿设计具有良好的跟踪性能 另外, 较小的 ρ 值可减小故障所引起的动态影响, 但可能导致控制信号很大

6 结 论

模型参考自适应能使被控过程的输出始终跟踪参考模型的输出, 这种容错不需要 FDI 当发生故障时, 实际被控过程随之发生变化, 控制律将作出相应地调整, 保证了被控对象跟踪参考模型输出, 它是采用隐含方式处理故障 多模型自适应地克服了线性系统的局限性, 使得在设计非线性控制系统时可直接采用线性控制理论 当系统因故障引起工作点发生变化时, 系统将按适应律调整控制参数, 克服故障的影响

需要指出的是, 无论是否因故障造成系统变化, 适应和调整的过程必须及时, 以满足系统稳定的最低要求 可考虑对故障动态剧烈变化采用在线快速学习和调节、模型降阶、减少可调整参数的个数等方法, 提高自适应容错控制的能力

参考文献(References)

- [1] Patton J R, Frank P, Clark R. *Issues of fault diagnosis for dynamic systems* [M]. London: Springer-Verlag, 2000
- [2] Chen R, Patton J R. *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems* [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1999
- [3] Demetriou A M, Polycarpou M M. Incipient fault diagnosis of dynamical systems using online approximators [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(9): 1612-1617
- [4] Zhang Y, Zhang Y, Zhang S. Fuzzy adaptive sliding mode decentralized control for interconnected [A]. *15th Triennial World Congress of the Int Federation of Automatic Control* [C]. Barcelona, 2002: 322-326
- [5] Yang G, Zhang S, Lam J, et al. Reliable control using redundant controllers [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(9): 1588-1593
- [6] Chu D, Malabre M. Numerically reliable design for proportional and derivative state-feedback decoupling controller [A]. *15th Triennial World Congress of the Int Federation of Automatic Control* [C]. Barcelona, 2002: 599-604

(下转第 416 页)

定 由此说明基于模型的网络系统控制方法具有一定程度的鲁棒性

7 结 语

本文从实际情况出发,分析了具有时间延迟的网络控制系统被控对象状态无法直接测量的情况,并提出基于观测器的时延网络控制系统模型 该系统采用状态反馈控制器,在网络信号传输时间间隔内以被控对象模型为依据,计算控制信号,以减少系统对网络的依赖 并且,分别对连续和离散的被控对象给出了系统全局稳定性的判定准则,该准则简单实用,可以综合地反映出网络信号更新时间、被控对象模型误差及由网络引起的时间延迟等因素对系统稳定性的影响,并通过仿真示例对稳定性判定准则进行了有效性验证 在此仅讨论了线性被控对象情况,对非线性被控对象网络控制系统的稳定性还有待进一步的研究

参考文献(References)

- [1] Tipsovan Y, Chow M Y. Control methodologies in networked control systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(10): 1099-1111.
- [2] Hu S S, Zhu Q X. Stochastic optimal control and analysis of stability of networked control systems with long delay [J]. *Automatica*, 2003, 39(11): 1877-1884.
- [3] 朱其新, 胡寿松. 网络控制系统的能控性和能观性 [J]. *控制与决策*, 2004, 19(2): 157-161.
- (Zhu Q X, Hu S S. Controllability and observability of networked control systems [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(2): 157-161.)
- [4] Montestruque L A, Antsaklis P J. On the model-based control of networked systems [J]. *Automatica*, 2003, 39(10): 1837-1843.
- [5] Walsh G C, Ye H, Bushnell L. Stability analysis of networked control systems [J]. *Proc of American Control Conf [C]*. San Diego, 1999: 2876-2880.
- [6] Rabello A, Bhaya A. Stability of asynchronous dynamical systems with rate constraints and applications [J]. *IEE Proc Control Theory and Applications*, 2003, 150(5): 546-550.
- [7] Zhang W, Michael S Branicky, Stephen M Phillips. Stability of networked control systems [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(2): 84-99.
- [8] Hokayem P F, Abdallah C T. Networked control systems: A sampled-data approach [A]. *Proc of the 2003 IEEE Int Symposium on Intelligent Control [C]*. Houston, 2003: 415-419.
- [9] Montestruque L A, Antsaklis P J. State and output feedback control in model-based networked control systems [J]. *41st IEEE Conf Decision and Control [C]*. Las Vegas, 2002: 1620-1625.
- [10] Montestruque L A, Antsaklis P J. Model-based networked control systems stability [R]. American: University of Notre Dame, 2002: 1-58.
- [7] Veillette J R. Reliable linear-quadratic state feedback control [J]. *Automatica*, 1995, 31(1): 137-143.
- [8] Patton J R. Fault-tolerant control: The 1997 situation [A]. *Proc of IFAC Symposium Fault Detection, Supervision Safety for Process [C]*. Spain, 1997: 1033-1055.
- [9] Tortora G, Kouvaritakis B, Clarke D W. Simultaneous optimization of tracking performance and accommodation of sensor faults [J]. *Int J of Control*, 2002, 75(1): 163-176.
- [10] Boskovic D J, Yu H S, Mehra K R. A stable scheme for automatic control reconfiguration in the presence of actuator failures [A]. *Proc of the American Control Conf [C]*. American, 1998: 2455-2459.
- [11] Idan M, Johnson M, Calise J A, et al. Intelligent aerodynamic / propulsion flight control for flight safety: A nonlinear adaptive approach [A]. *Proc of the American Control Conf [C]*. American, 2001: 2918-2923.
- [12] Sastry S S, Isidori A. Adaptive control of linearizable systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 34(8): 1123-1131.
- [13] Wang L X. *A course in fuzzy systems and control* [M]. NJ: Prentice-Hall, 1997.
- [14] Sktine J J E, Li W. *Applied nonlinear control* [M]. NJ: Prentice-Hall, 1991.

(上接第 411 页)