第19卷 第3期　　控 制 与 决 策　　2004年3月
Vol. 19 No. 3　　Control and Decision　　Mar. 2004

文章编号: 1001-0920(2004)03-0358-03

具有非线性扰动多时滞系统的鲁棒故障检测

张登峰[1], 孙金生[1], 王执铨[1], 胡寿松[2]
(1. 南京理工大学 自动化系, 江苏 南京 210094; 2. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘　要: 基于状态观测器的方法研究了一类具有非线性扰动的多重状态时滞系统的鲁棒故障检测问题. 应用RBF神经网络逼近系统的非线性扰动, 采用线性矩阵不等式(LMI)给出了与时滞上界相关的增益阵设计方法, 并利用Lyapunov函数和一致有界引理证明了故障检测残差信号的一致有界稳定条件和对非线性扰动的鲁棒性. 仿真示例说明了该方法的有效性.

关键词: 故障检测; 状态观测器; 时滞系统; 非线性扰动; 线性矩阵不等式
中图分类号: TP277　　**文献标识码**: A

Robust fault detection for multiple time-delay systems with nonlinear perturbations

ZHANG Deng-feng[1], *SUN Jin-sheng*[1], *WANG Zhi-quan*[1], *HU Shou-song*[2]
(1. Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Faculty of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China. Correspondent: ZHANG Deng-feng, E-mail: Zhangdf73@sina.com.cn)

Abstract: A robust RBF ANN-observer-based fault detection scheme is proposed for a class of multiple state time-delay systems with nonlinear perturbations. An LMI approach, connecting with upper bound of time-delays, is presented to design the observer gain-matrix. The uniform bounded stable condition of the residual and its robustness to nonlinear perturbations are proved by using Lyapunov function and uniform bounded lemma. Numerical simulation demonstrates the effectiveness of the proposed scheme.

Key words: fault detection; observer; time-delay system; nonlinear perturbations; LMI

1　引　　言

任何实际系统都有不同程度的时滞现象, 因此关于时滞系统的鲁棒控制等问题近年来得到了广泛研究[1], 而对于时滞系统的鲁棒故障诊断却鲜有报道. 文献[2]利用LMI方法研究了一类不确定性时滞系统的鲁棒故障诊断问题. 文献[3]对一类特定的确定性时滞系统得到了时滞独立的故障诊断方法. 实际系统中除了存在时滞以外, 还可能带有结构参数不确定性、噪声和非线性干扰等因素, 因此, 具有非线性扰动的不确定时滞系统的故障诊断研究具有重要的意义. 本文基于Lyapunov函数和一致有界引理, 探讨一类具有非线性扰动的状态多时滞系统的故障检测问题, 采用带记忆的神经网络非线性观测器得到了与时滞上界相关的鲁棒故障检测方法.

2　问题描述

考虑一类有非线性扰动的多重状态时滞系统

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + \sum_{i=1}^{N} A_i x(t - d_i) + Bu(t) +$$

收稿日期: 2002-11-19; **修回日期**: 2003-02-27.
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60234010); 国防科技行业重点预研基金资助项目(40404070102).
作者简介: 张登峰(1973—), 男, 陕西咸阳人, 博士生, 从事动态系统的故障检测与诊断、智能控制等研究; 王执铨(1939—), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士生导师, 从事动态大系统的建模与控制、容错控制等研究.

$$f(x, x_{d_i}, u, t) + f_a(t), \tag{1a}$$

$$y(t) = Cx(t) + f_s(t), \tag{1b}$$

$$x(t) = \phi(t). \tag{1c}$$

其中: $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^r$ 和 $\phi(t) \in R^n[-d, 0]$ 分别为系统的状态向量、控制向量、输出向量和初始状态向量; $t \in [-d, 0]$; A, $A_i \in R^{n\times n}$ $(i = 1, 2, \cdots, N)$; B 和 C 为已知适维定常矩阵; d_i $(i = 1, 2, \cdots, N)$ 为状态时滞, 满足条件 $0 < d_i \leq d < \infty$ (d 为已知的时滞上界); $f_a(t) \in R^n$, $f_s(t) \in R^r$ 分别为执行器或结构参数故障函数和传感器输出故障函数(假设为单故障); $f(x, x_{d_i}, u, t) \in R^n$ 为未知的连续非线性扰动函数(x_{d_i} 为 $x(t-d_i)$ 的简写), 不失一般性, 它包括系统大部分的结构不确定性、建模误差、噪声和非线性干扰等因素.

对系统(1), 构造非线性状态观测器

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = A\bar{x}(t) + \sum_{i=1}^{N} A_i \bar{x}(t-d_i) + \\ \qquad B u(t) + L(y(t) - \bar{y}(t)) + \\ \qquad f_{NN}(\bar{x}, \bar{x}_{d_i}, u, t), \\ \bar{y}(t) = C\bar{x}(t), \end{cases} \tag{2}$$

以实现其故障检测. 式中: $\bar{x}(t)$ 和 $\bar{y}(t)$ 分别为观测器状态向量和输出向量, L 为增益阵, f_{NN} 为非线性扰动的逼近. 定义 $e(t) = x(t) - \bar{x}(t)$, $\epsilon(t) = y(t) - \bar{y}(t)$ 分别表示状态和输出估计误差, 从而有估计误差方程

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = (A - LC)e(t) + \sum_{i=1}^{N} A_i e(t-d_i) + \\ \qquad f_a(t) + f_e(\bar{x}, \bar{x}_{d_i}, u, t) - Lf_s(t), \\ \epsilon(t) = Ce(t) + f_s(t). \end{cases} \tag{3}$$

其中 $f_e = f - f_{NN}$ 为非线性扰动的逼近误差. 由于误差输出包含了故障信息, 取故障检测残差信号 $r(t) = \epsilon(t)$, 则需要设计观测器(2), 使得对于设定的检测阈值 J_{th}, 当无故障($f_a(t)$ 和 $f_s(t)$ 为零) 时, 有 $\| r(t) \| = \| \epsilon(t) \| < J_{th}$, 而在 $\| f_a(t) \| > \| f_{a\min} \|$ 或 $\| f_s(t) \| > \| f_{s\min} \|$ 时, 有 $\| r(t) \| > J_{th}$, 其中 $f_{s\min}$ 和 $f_{a\min}$ 为可检测的最小故障.

3　主要结果

引理 1[1]　对任意向量 $z, y \in R^n$, 任给对称正定阵 $X \in R^{n\times n}$, 有

$$\pm 2z^{\mathrm{T}}y \leq z^{\mathrm{T}}X^{-1}z + y^{\mathrm{T}}Xy. \tag{4}$$

引理 2[4]　如果有紧集 $S \subset R^n$, 对 $\forall x \in S$, 存在正定函数 $V(x, t)$, 其全导数连续, 若对某个 $B > 0$, $\{x: \| x \| < B\} \subset S$, 当 $\| x \| > B$ 时有 $\dot{V}(x, t) < 0$, 则系统一致有界稳定.

由于实际系统中 f 的形式往往难以解析表达, 而 RBF 神经网络具有对任意未知连续非线性函数优越的逼近能力, 并已有相应的离线和在线网络训练算法[5, 6]. 因此, 这里采用 RBF 神经网络对非线性扰动进行逼近以提高状态估计精度, 而实际系统中 f 的数据可采用多种方法获取[7].

定理 1　考虑状态时滞系统(1), 当系统无故障时, 对于任意给定的对称正定阵 P_1, P_2, P_3 和 P_4, 如果存在对称正定矩阵 R 以及实数 $\beta > 0$, 使

$$\begin{bmatrix} Q & dM & dY \\ dM^{\mathrm{T}} & -X & 0 \\ dY^{\mathrm{T}} & 0 & -J \end{bmatrix} < 0 \tag{5}$$

成立, 则其基于 RBF 神经网络状态观测器(2) 的估计误差(3) 必鲁棒一致有界稳定, 且有观测器增益阵 $L = (\beta R)^{-1}C^{\mathrm{T}}$. 从而故障检测残差 $r(t)$ 对非线性扰动也鲁棒一致有界稳定. 其中

$$X = \mathrm{diag}(dP_1, dP_2, dP_3),$$

$$J = \mathrm{diag}(dP_1^{-1}, d(P_2^{-1}),$$

$$Q = \Big(A + \sum_{i=1}^{N} A_i\Big)R + R\Big(A + \sum_{i=1}^{N} A_i\Big)^{\mathrm{T}} - \frac{1}{\beta}(R^{-1}C^{\mathrm{T}}CR + RC^{\mathrm{T}}CR^{-1}) + P_4^{-1},$$

$$Y = \Big[(A - (\beta R)^{-1}C^{\mathrm{T}}C)R, \Big(\sum_{i=1}^{N} A_i\Big)R\Big],$$

$$M = \Big[\Big(\sum_{i=1}^{N} A_i\Big)^{\mathrm{T}}, \Big(\sum_{i=1}^{N} A_i\Big)^{\mathrm{T}}, \Big(\sum_{i=1}^{N} A_i\Big)^{\mathrm{T}}\Big].$$

证明　记 $A - LC = A_C$, $A_0 = A_C + \sum_{i=1}^{N} A_i$, 在 $t > d_i$ 且系统无故障时, 式(3) 可写为

$$\dot{e}(t) = A_0 e(t) - \sum_{i=1}^{N}\Big\{A_i \int_{-d_i}^{0}\Big[A_C e(t+\theta) + \sum_{j=1}^{N} A_j e(t - d_i + \theta) + f_e(\bullet)\Big]\mathrm{d}\theta\Big\} + f_e(\bar{x}, \bar{x}_{d_i}, u, t). \tag{6}$$

取 Lyapunov 函数为

$$V(e(t), t) = e^{\mathrm{T}}(t)Pe(t) + W(e(t), t),$$

其中 P 为对称正定阵, 而

$$W(e(t), t) = \int_{-d_i}^{0}\Big\{\int_{t+\theta}^{t}[e^{\mathrm{T}}(s)A_C^{\mathrm{T}}P_1A_Ce(s)]\mathrm{d}s + \int_{t+\theta}^{t}[f_e^{\mathrm{T}}(\bullet)P_3f_e(\bullet)]\mathrm{d}s + \int_{t+\theta}^{t}\Big[e^{\mathrm{T}}(s)\Big(\sum_{i=1}^{N} A_i\Big)^{\mathrm{T}}P_2\Big(\sum_{i=1}^{N} A_i\Big)e(s)\Big]\mathrm{d}s\Big\}\mathrm{d}\theta$$

利用引理 1, 计算可知 V 沿式(6) 轨线的导数为

$$\begin{aligned}&\dot{V}(e,t)=\\&\mathring{e}^{\mathrm{T}}(t)Pe(t)+e^{\mathrm{T}}(t)P\mathring{e}(t)+\dot{W}(e(t),t)\le\\&e^{\mathrm{T}}(t)\{A_0^{\mathrm{T}}P+PA_0+PP_4^{-1}P+\\&dP\Big(\sum_{i=1}^{N}A_i\Big)[P_1^{-1}+P_2^{-1}+P_3^{-1}]\Big(\sum_{i=1}^{N}A_i\Big)^{\mathrm{T}}P+\\&dA_C^{\mathrm{T}}P_1A_C+d\Big(\sum_{i=1}^{N}A_i\Big)^{\mathrm{T}}P_2\Big(\sum_{i=1}^{N}A_i\Big)\}e(t)+\\&f_e^{\mathrm{T}}(\overline{x},\overline{x}_{d_i},u,t)(dP_3+P_4)f_e(\overline{x},\overline{x}_{d_i},u,t)=\\&e^{\mathrm{T}}(t)Ze(t)+f_e^{\mathrm{T}}(\overline{x},\overline{x}_{d_i},u,t)Sf_e(\overline{x},\overline{x}_{d_i},u,t).\end{aligned}\tag{7}$$

对 Z 两边同乘以 P^{-1}, 并令 $R=P^{-1}$, 取增益阵 $L=(\beta R)^{-1}C^{\mathrm{T}}$, 代入 $P^{-1}ZP^{-1}$ 中. 根据 Schur 补引理可知, 当条件式(5) 满足时有 $Z<0$, 从而有 $\dot{V}(e,t)\le Z\|e(t)\|^2+S\|f_e(\overline{x},\overline{x}_{d_i},u,t)\|^2\le Z\|e(t)\|^2+S\alpha^2$, $\alpha>0$ 为给定的网络逼近有界误差. 因为 S, $-Z$ 均为正定阵, 根据引理 2, 当 $\|e(t)\|>\alpha\sqrt{\lambda_{\max}(S)/\lambda_{\min}(-Z)}$ 时, 必有 $\dot{V}(e,t)<0$. 因此估计误差 $e(t)$ 一致有界稳定, 其稳定域边界体现了对非线性扰动的鲁棒性. 进而可知残差 $r(t)$ 对非线性扰动也鲁棒一致有界稳定. 其中 $\lambda_{\max}(\cdot)$ 和 $\lambda_{\min}(\cdot)$ 分别表示矩阵的最大和最小特征值. □

定理 1 表明, 系统正常时残差信号 $r(t)$ 将收敛到一个对非线性扰动鲁棒的稳定域内, 且由于 RBF 神经网络的逼近误差可以非常小, 能使其稳定域很小. 而在故障信号超出最小可检测故障时, $r(t)$ 的模值将大于设定的检测阈值 J_{th}, 实现故障检测. 由此可得到鲁棒故障检测逻辑

$$\|r(t)\|=\|\epsilon(t)\|\Rightarrow\begin{cases}>J_{\mathrm{th}},\ \text{fault};\\ \le J_{\mathrm{th}},\ \text{normal}\end{cases}\tag{8}$$

4 仿真示例

考虑系统(1), 其参数为

$$A=\begin{bmatrix}-0.2&0.4\\-1.4&-2.5\end{bmatrix},A_1=\begin{bmatrix}0&0.3\\0.1&0.4\end{bmatrix},$$

$$A_2=\begin{bmatrix}0.2&0.3\\0.3&0.1\end{bmatrix},B=\begin{bmatrix}1\\1\end{bmatrix},$$

$$C=[1.2\quad 2],N=2,$$

时滞 $d_1=0.02$, $d_2=0.04$. 设非线性扰动为

$$f(x,x_{d_i},u,t)=\begin{bmatrix}f_1\\f_2\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}0.4\sin(x_1(t-d_1))+0.5\cos(x_1(t)x_2(t-d_2))\\0.4\sin(x_1(t-d_1))+0.5\cos(x_1(t)x_2(t-d_2))\end{bmatrix},$$

它由 RBF 神经网络逼近, 得网络结构为 5-29-2. 取 $P_1=P_2=P_3=P_4=I_{2\times2}$, 求解式(5) 得 $\beta=0.5$ 时, $R=\begin{bmatrix}1.2088&-0.6324\\-0.6324&0.5352\end{bmatrix}$, 观测器增益阵 $L=\begin{bmatrix}7.7231\\12.864\end{bmatrix}$, 至此便得到了系统的鲁棒故障检测观测器(2). 对该系统进行故障检测的仿真结果表明, 基于观测器(2) 和设定的残差检测阈值 J_{th}, 及式(8) 的检测逻辑可正确实现系统的故障检测. 仿真结果略.

5 结 语

本文研究了一类具有非线性扰动的多重状态时滞系统的鲁棒故障检测问题, 得到了基于 RBF 神经网络状态观测器的鲁棒故障检测方法. 利用 Lyapunov 函数和一致有界引理证明了故障检测时残差信号对非线性扰动的鲁棒性和一致有界稳定性, 并给出了与系统的时滞上界有关的观测器增益阵 LMI 设计方法. 仿真结果验证了其有效性.

参考文献(References):

[1] Carlos E de Souza, Li X. Delay-dependent robust H-infinite control of uncertain linear state-delayed systems [J]. *Automatica*, 1999, 35(7): 1313-1321.

[2] 钟麦英, 汤兵勇, Steven X Ding, 等. 状态时滞系统故障诊断问题的 LMI 方法研究[J]. 控制与决策, 2002, 17(1): 15-18.
(Zhong M Y, Tang B Y, Steven X Ding, et al. LMI approach to design state-delayed fault detection system [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(1): 15-18.)

[3] Yang H, Saif M. Observer design and fault diagnosis for state-retarded dynamical systems[J]. *Automatica*, 1998, 34(2): 217-227.

[4] Kreisselmeier G, Narendra K S. Stable model reference adaptive control[J]. *IEEE Trans Automat Control*, 1982, 27(6): 1169-1175.

[5] Hu Shousong, Zhou Chuan, Hu Weili, et al. An approach to robust fault detection for nonlinear system based on RBF neural network observer[J]. *Control Theory and Applications*, 1999, 16(6): 853-857.

[6] Klancar G, Juricic D, Karba R. Robust fault detection based on compensation of the modelling error[J]. *Int J of Systems Science*, 2002, 33(2): 97-105.

[7] 张洪钺, 金宏, 陈志炜, 等. 用 B-样条神经网络设计非线性观测器[J]. 自动化学报, 2000, 26(2): 199-205.
(Zhang H Y, Jin H, Chen Z W, et al. Nonlinear observer design for systems with unknown nonlinearity via B-spline network approach[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(2): 199-205.)