

文章编号: 1001-0920(2005)12-1423-03

一类非线性系统的鲁棒故障估计

王占山^{1,2}, 张化光¹

(1. 东北大学 教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室, 沈阳 110004; 2. 沈阳理工大学 信息工程系, 沈阳 110168)

摘要: 针对一类非线性系统, 研究基于自适应观测器的故障估计问题. 设计了保证诊断系统稳定的实现故障估计的自适应调节律, 并通过 H 跟踪性能, 分析了调节律中的参数对故障估计精度的影响. 数值仿真验证了该方法的有效性.

关键词: 非线性系统; 故障估计; 观测器; 自适应调节律; H 性能

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Robust Fault Estimation for a Class of Nonlinear Systems

WANG Zhan-shan^{1,2}, ZHANG Hua-guang¹

(1. Key Lab of Process Industry Automation of Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Department of Information Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China
Correspondent: WANG Zhan-shan, E-mail: zhanshan-wang@163.com)

Abstract: Fault estimation based on adaptive observer is studied for a class of nonlinear systems. An adaptive fault updating law is designed to guarantee the stability of the diagnosis system, and the effects of parameters in adaptive updating law on fault estimation accuracy are discussed based on H tracking performance. By simulation, the comparison is made using different updating laws and the result shows the correctness of the obtained results.

Key words: Nonlinear system; Fault estimation; Observer; Adaptive updating law; H tracking performance

1 引言

由于对控制系统和生产过程的高可靠性和安全性的要求, 在近 30 多年中, 故障检测和诊断方法的研究和应用受到人们的日益关注^[1,2], 其中, 基于模型的故障诊断方法得到了深入研究. 近年来, 基于自适应观测器的故障检测和诊断方法在线性系统中已得到广泛研究^[3], 但在非线性系统方面, 却不如线性系统那样成果丰硕. 与故障检测相比较, 故障估计是另一个重要的问题, 特别是在容错控制中, 容错控制律根据故障估计结果进行在线更新, 实现自适应容错控制^[4]. 文献[5], 针对存在非线性不确定性的一类线性系统, 研究了故障估计问题. 而在很多情况下, 非线性系统是本质非线性的, 如文献[6]针对一类非线性系统, 研究了故障估计问题, 但所设计的自

适应律不能保证高估计精度. 因此, 研究非线性系统的故障估计具有重要意义.

本文针对一类带干扰的非线性系统, 首先基于线性矩阵不等式技术, 给出求解观测器增益矩阵的方法; 然后, 通过设计故障估计自适应律, 保证误差系统的一致有界稳定, 并通过 H 跟踪性能, 对影响故障估计精度的因素进行了说明, 进而通过调节相应的参数提高故障估计精度. 数值仿真验证了本文的结论.

2 系统描述

考虑如下非线性系统:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B(y, u) + Ef(\Theta u) + Nw, \\ y &= Cx + Df(\Theta u) + Mw. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x \in \mathbf{R}^n$ 是状态变量, $u \in \mathbf{R}^m$ 是控制项, y

收稿日期: 2004-12-14; 修回日期: 2005-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(60244017, 60325311); 辽宁省自然科学基金项目(20022030).

作者简介: 王占山(1971—), 男, 辽宁抚顺人, 博士生, 从事故障诊断与容错控制、非线性控制等研究; 张化光(1959—), 男, 吉林省吉林市人, 博士生导师, 从事非线性控制、模糊控制等研究.

R 是输出; (A, C) 可观测且 $\text{rank}(D) = q - r$; 故障项 $f(\theta, u)$ 是 θ 和 u 的非线性函数, $\theta \in \mathbb{R}^p$ 是参数向量, w 表示外界干扰等; E, N 和 M 是具有适当维数的阵. 假设 $w < w_0, \theta < a, \hat{\theta} < b$

假设 1 存在一个已知的正函数 $K(u)$ 使得对于任意范数有界的 θ 和 $\hat{\theta}$, 满足

$$f(\hat{\theta}, u) - f(\theta, u) \leq K(u) \|\hat{\theta} - \theta\|. \quad (2)$$

3 故障估计

考虑如下形式的故障估计观测器:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + B(y, u) + \\ &\quad E f(\hat{\theta}, u) + L(y - \hat{y}), \\ \hat{y} &= C\hat{x} + D f(\hat{\theta}, u), \end{aligned} \quad (3)$$

其中: \hat{x} 是观测器状态向量, \hat{y} 是观测器输出, $\hat{\theta}$ 是参数 θ 的估计, L 是待设计的观测器增益矩阵. 定义状态误差为 $e = \hat{x} - x$, 输出残差为 $\epsilon = \hat{y} - y$. 则误差动态系统为

$$\begin{aligned} \dot{e} &= (A + LC)e + (LD + E)\tilde{f} - \\ &\quad (LM + N)w, \\ \epsilon &= Ce + D\tilde{f} - Mw, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\tilde{f} = f(\hat{\theta}, u) - f(\theta, u)$. 定义 $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$

定理 1 对于给定的 $Q > 0$, 如果下面的线性矩阵不等式存在对称正定矩阵 P 和矩阵 Y :

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA + YC + (YC)^T + C^T C + Q & YD + PE & YM + PN \\ (YD + PE)^T & - (1/\alpha_0)I_1 & 0 \\ (YM + PN)^T & 0 & - (1/\alpha_0)I_2 \end{bmatrix} < 0, \quad (5)$$

则观测器增益为 $L = P^{-1}Y$, 其中 I_1 和 I_2 为具有适当维数的单位矩阵. 同时, 如果采用如下故障估计自适应律:

$$\dot{\hat{\theta}} = -K_0 H^{-1} \epsilon - \delta H^{-1} \hat{\theta}, \quad (\epsilon, \hat{\theta}) \in D_0, \quad (6)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = -K_0 H^{-1} \epsilon, \quad (\epsilon, \hat{\theta}) \in D_1, \quad (7)$$

其中: $K_0 > 0$ 是待设计的正定矩阵, $H = H^T > 0$ 是给定的加权矩阵, 且

$$D_0 = \left\{ (\epsilon, \hat{\theta}) \mid \frac{\lambda_{\min}(P)}{2C^2} \|\epsilon\|^2 + \frac{\lambda_0 \|\hat{\theta}\|^2}{2} - \lambda_6 \|\hat{\theta}\| > \lambda_5 a^2 + \frac{\lambda_7}{\lambda_4} - \lambda_6 a - \frac{\lambda_{\min}(P)}{C^2} M^2 w_0^2 \right\}, \quad (8)$$

$$D_1 = \left\{ (\epsilon, \hat{\theta}) \mid \frac{\lambda_{\min}(P)}{2C^2} \|\epsilon\|^2 + \frac{\lambda_0 \|\hat{\theta}\|^2}{2} - \lambda_6 \|\hat{\theta}\| > \lambda_5 a^2 + \frac{\lambda_7}{\lambda_4} - \lambda_6 a - \frac{\lambda_{\min}(P)}{C^2} M^2 w_0^2 \right\}, \quad (9)$$

$$\lambda_0 = \min(\lambda_{\min}(Q), \lambda_1), \quad (10)$$

$$\lambda_1 = \delta - \frac{1}{\alpha_0} K(u)^2 - \alpha_0 \|H\|^{-2} -$$

$$3 \|HK_0 H^{-1}\|^2 - DK(u)^2 > 0, \quad (11)$$

$$\lambda_2 = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \|M\|^2 \right) w_0^2 + \frac{1}{\alpha_2} b^2 + \delta \alpha^2 > 0, \quad (12)$$

$$\lambda_3 = \max(\lambda_{\min}(P), \lambda_{\max}(H)), \quad (13)$$

$$\lambda_4 = \lambda_0 / \lambda_3, \quad (14)$$

$$\lambda_5 = \lambda_{\min}(H) - \frac{D^2 \lambda_{\min}(P) K(u)^2}{C^2} > 0, \quad (15)$$

$$\lambda_6 = \frac{2\lambda_{\min}(P)}{C^2} DK(u) - M w_0 \quad (16)$$

则基于上述设计的观测器增益 L , 故障估计自适应律 (6), (7) 和观测器 (3) 构成的故障估计系统是一致有界稳定的, 其中: $\delta > 0, \alpha_0 > 0, \alpha_1 > 0$ 和 $\alpha_2 > 0$ 为满足上述约束的实常数, $\lambda_{\min}(P)$ 和 $\lambda_{\max}(P)$ 分别表示矩阵 P 的最小和最大特征值

证明 选取如下形式的 Lyapunov 函数:

$$V = e^T P e + \tilde{\theta}^T H \tilde{\theta} \quad (17)$$

则沿着误差动态系统 (4) 的解, V 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2e^T P [(A + LC)e + (LD + \\ &\quad E)\tilde{f}(\tilde{\theta}, u) - (LM + N)w] + \\ &\quad 2\tilde{\theta}^T H (\dot{\tilde{\theta}} - \tilde{\theta}). \end{aligned} \quad (18)$$

同时, 根据不等式 $\pm 2X^T Y \leq \alpha X^T X + \frac{1}{\alpha} Y^T Y$, 其中 X 和 Y 是具有相同维数的列向量, 并考虑假设 1, 则由式 (18) 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq e^T [(A + LC)^T P + P(A + LC) + \\ &\quad \alpha_0 P(LD + E)(LD + E)^T P + C^T C + \\ &\quad \alpha_1 P(LM + N)(LM + N)^T P] e + \\ &\quad \frac{1}{\alpha_0} K(u)^2 \tilde{\theta}^T \tilde{\theta} + \frac{1}{\alpha_1} w^T w + \\ &\quad \alpha_2 \tilde{\theta}^T H H^T \tilde{\theta} + \frac{1}{\alpha_0} \tilde{\theta}^T \tilde{\theta} + \\ &\quad 3\tilde{\theta}^T H K_1 K_1^T H^T \tilde{\theta} + w^T M^T M w - \\ &\quad \delta \tilde{\theta}^T \tilde{\theta} + \delta \tilde{\theta}^T \tilde{\theta} + \tilde{\theta}^T K(u)^T D^T D K(u) \tilde{\theta} \end{aligned}$$

其中 $K_1 = K_0 H^{-1}$. 根据 Schur 补性质, 由式 (5) 及条件 (10) ~ (12), 上式等价于

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \lambda_{\min}(Q) \|e\|^2 - \lambda_4 \|\tilde{\theta}\|^2 + \lambda_6 \\ &\quad - \lambda_0 (\|e\|^2 + \|\tilde{\theta}\|^2) + \lambda_5 \end{aligned} \quad (19)$$

同时, 由 (17) 可知

$$V \leq \lambda_{\max}(P) \|e\|^2 + \lambda_{\max}(H) \|\tilde{\theta}\|^2 - \lambda_3 (\|e\|^2 + \|\tilde{\theta}\|^2),$$

则 $\dot{V} \leq -\lambda_4 V + \lambda_6$

另一方面, 当 $(\epsilon, \hat{\theta}) \in D_0$ 时, 下面的不等式成立:

$$\begin{aligned} V &\leq \lambda_{\min}(P) \|e\|^2 + \lambda_{\min}(H) \|\tilde{\theta}\|^2 \\ &\quad - \frac{1}{C^2} \lambda_{\min}(P) \|\epsilon - D\tilde{f} + Mw\|^2 + \\ &\quad \lambda_{\min}(H) \|\tilde{\theta}\|^2. \end{aligned} \quad (20)$$

经相应的代数和范数运算, 则由 (20) 可得



$$\begin{aligned}
 &V \\
 &\frac{\lambda_{\min}(P)}{2C^2} \epsilon^2 - \lambda_6 (\hat{\theta} + \theta) - \\
 &\frac{\lambda_{\min}(P)}{C^2} M^2 w_0^2 + \lambda_6 \theta^2 \\
 &\frac{\lambda_{\min}(P)}{2C^2} \epsilon^2 + \lambda_6 \left[\frac{\hat{\theta}^2}{2} - \theta^2 \right] - \\
 &\lambda_6 (\hat{\theta} + \theta) - \frac{\lambda_{\min}(P)}{C^2} M^2 w_0^2 \quad \frac{\lambda_6}{\lambda_1} \quad (21)
 \end{aligned}$$

从上面的不等式可见, 当 $(\epsilon, \hat{\theta}) \in D_0$ 时, $\dot{V} < 0$; 当 $(\epsilon, \hat{\theta}) \in D_1$ 时, $(\epsilon, \hat{\theta})$ 是一致有界的. 因此, 由观测器(3)及故障估计调节律(6)和(7)所构成的自适应故障估计观测器能够保证 $(\epsilon, \hat{\theta})$ 是一致有界稳定的, 且 $(\epsilon, \hat{\theta})$ 以不小于 $e^{-\lambda_1 t}$ 的速率收敛到 D_1 .

注 1 自适应律(6)使故障估计误差朝着 $(\epsilon, \hat{\theta}) \in D_1$ 的吸引域方向移动, 且保证 $(\epsilon, \hat{\theta})$ 是一致有界稳定的. 当进入吸引域 D_1 后, 自适应律(7)将保证获得较高的故障估计精度. 参数 K_0 和 δ 对故障估计的影响, 采用类似文献[7]的方法, 可通过 H 跟踪性能分析得到, 具体推导过程从略. 一般来说, 大的 K_0 具有较快的故障估计响应速度; 小的 K_0 具有较慢的响应速度. 如果仅采用故障估计自适应律(6), 对于固定的 K_0 , δ 值越大, 故障估计误差越大.

4 数值仿真

为说明上述设计的故障估计调节律和分析的有效性, 考虑如下非线性系统:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} -1 & 4 \\ 1 & -4 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} u - y \\ y(3 - y^2) \end{bmatrix} + \\
 &\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \sin(\theta(t)u(t)) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} w, \\
 y(t) &= [0 \ 1]x + \sin(\theta(t)u(t)) + \eta
 \end{aligned}$$

其中参数 $\theta(t) \in [0.5 \ 2]$. 参数没发生故障时, $\theta(t) = 1, w = 0.1 \text{ rand}, \eta = 0.1 \text{ randn}$.

假定时变故障具有如下形式:

$$\theta(t) = \begin{cases} 1 + 0.1 \sin(0.5t), & 0 \leq t < 13; \\ 1.5 - 0.2e^{3-t}, & 13 \leq t < 20; \\ 0.6 + 0.2e^{10-t}, & 20 \leq t < 25. \end{cases}$$

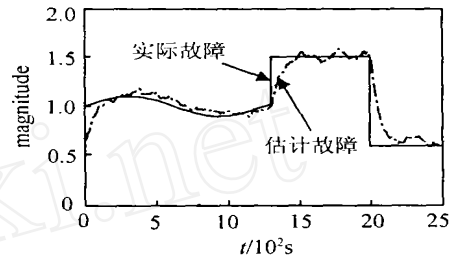
选取采样周期 $T_s = 0.01 \text{ s}, Q = I_2$, 求解线性矩阵不等式(5)得到

$$\begin{aligned}
 P &= \begin{bmatrix} 0.6720 & -0.4293 \\ -0.4293 & 0.8474 \end{bmatrix}, \\
 L &= \begin{bmatrix} -0.8968 \\ -0.4563 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

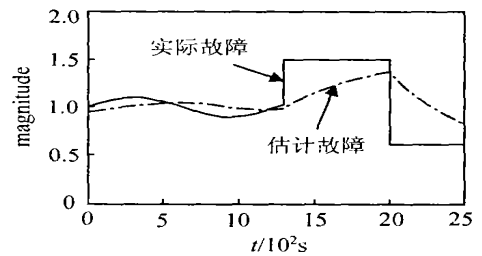
在仿真中, 采用单位反馈, 由此可知 $u(t)$ 的上界等于 1. 选取参数 $H = 1, \alpha_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = 1, w_0 = 1, a = 1.5, b = 0.5, \delta = 79, K_0 = 5$, 则 $\lambda_0 = \lambda_1 = 1, \lambda_2 =$

$180, \lambda_3 = 1.1979, \lambda_4 = 0.8348, \lambda_5 = 0.6784, \lambda_6 = 0.6431$.

图 1 分别给出了采用自适应律(6), (7) 和不同 K_0 值时的估计曲线. 当 $K_0 = K(u) = |u(t)|$ 时, 是文献[6]采用的调节律, 显然不能很好跟踪故障参数. 而通过对设计参数 K_0 的选择却能很好地实现故障估计, 且收敛到 D_1 的速率不小于 $e^{-\lambda_1 t} = e^{-0.8348t}$.



(a) $K_0 = 5$



(b) $K_0 = |u(t)|$

图 1 故障估计曲线

5 结 语

针对一类非线性系统研究了基于自适应观测器的故障估计方法. 通过设计故障估计的自适应律, 不但保证了诊断系统的稳定性, 而且还给出了提高故障估计精度的参数调节方法. 通过数值仿真, 验证了文中结论的有效性.

参考文献 (References)

- [1] Frank P M, Ding X. Survey of Robust Residual Generation and Evaluation Methods in Observer-based Fault Detection Systems [J]. *J of Process Control*, 1997, 7(6): 403-424
- [2] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K, et al. A Review of Process Fault Detection and Diagnosis, Part I: Quantitative Model-based Methods [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2003, 27(1): 293-311
- [3] Wang H, Daley S. Actuator Fault Diagnosis: An Adaptive Observer-based Technique [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41(7): 1073-1078

(下转第 1433 页)

算法描述及仿真实例分析可知, 基于协方差 ICA 分析的多重振荡源分离定位方法切实可行. 同时通过对比分析, 发现其他时域 PCA/ICA, 协方差 PCA 等方法对解决该类问题存在着不足

参考文献(References)

- [1] Hagglund T. A Control-loop Performance Monitor[J]. *Control Engineering Practice*, 1995, 3(11): 543-1551.
- [2] Xia C, Howell J. Loop Status Monitoring and Fault Localisation [J]. *J of Process Control*, 2003, 13(7): 679-691.
- [3] Thornhill N F, Shah S L, Huang B, et al Spectral Principal Component Analysis of Dynamic Process Data [J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(8): 833-846
- [4] Thornhill N F, Huang B, Zhang H. Detection of Multiple Oscillations in Control Loops[J]. *J of Process Control*, 2003, 13(1): 91-100
- [5] Xia C, Howell J. Isolating Multiple Sources of Plant-wide Oscillations Via Independent Component Analysis [J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(8): 1027-1035
- [6] Hyvarinen A, Karhunen J, Oja E. *Independent Components Analysis* [M]. New York: Wiley-Interscience, 2001.
- [7] 杨竹青, 李勇, 胡德文. 独立成分分析方法综述[J]. *自动化学报*, 2002, 28(5): 762-772
(Yang Z Q, Li Y, Hu D W. Independent Component Analysis: A Survey[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(5): 762-772.)
- [8] Li R F, Wang X Z. Dimension Reduction of Process Dynamic Trends Using Independent Component Analysis [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2002, 26(3): 467-473
- [9] Kano M, Hasebe S, Hashimoto I, et al Evolution of Multivariate Statistical Process Control: Application of Independent Component Analysis and External Analysis [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2004, 28(6-7): 1157-1166
- [10] 张贤达. *现代信号处理*[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002: 7-8
(Zhang X D. *Modern Signal Process* [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 7-8.)

(上接第 1425 页)

- [4] Claudio B, Andrea P, Lorenzo M. Fault Tolerant Control of the Ship Propulsion System Benchmark [J]. *Control Engineering Practices*, 2003, 11(4): 483-492
- [5] Zhang X D, Polycarpou M M, Parisini T. A Robust Detection and Isolation Scheme for Abrupt and Incipient Faults in Nonlinear Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(4): 576-593
- [6] Jiang B, Wang J L, Soh Y C. An Adaptive Technique for Robust Diagnosis of Faults with Independent Effects on System Outputs [J]. *Int J of Control*, 2002, 75(11): 792-802
- [7] 王占山, 张化光. 一类自适应观测器的故障估计性能 [J]. *东北大学学报*, 2004, 25(12): 1134-1137.
(Wang Z S, Zhang H G. Performance of Fault Estimation of a Class of Adaptive Observer [J]. *J of Northeastern University*, 2004, 25(12): 1134-1137.)

(上接第 1428 页)

- [4] 罗翊, 石纯一. Agent 协作求解中形成联盟的行为策略 [J]. *计算机学报*, 1997, 20(11): 961-965
(Luo Y, Shi C Y. Behavior Strategy to Form Coalition in Agent Cooperative Problem-solving [J]. *Chinese Journal of Computers*, 1997, 20(11): 961-965)
- [5] Leen K S, Costas T. Utility-based Multiagent Coalition Formation with Incomplete Information and Time Constraints [A]. *Proc of SM C-03* [C]. Washington, DC: IEEE Press, 2003: 1481-1486
- [6] Leen K S, Costas T. Real-time Satisficing Multiagent Coalition formation [A]. *Working Notes of the AAAI Workshop on Coalition Formation in Dynamic Multiagent Environments* [C]. Menlo Park: AAAI Press, 2002: 7-15
- [7] Maria V B, Ricardo C, Jose L P, et al A Stable and Feasible Payoff Division for Coalition Formation in a Class of Task Oriented Domains [A]. *Proc of the 8th Int Workshop on Intelligent Agents VIII* [C]. London: Springer-Verlag Press, 2002: 324-334