

一类线性变参数时滞系统的故障诊断

吴军生, 翁正新, 田作华, 施颂椒

(上海交通大学 自动化系, 上海 200240)

摘 要:研究了线性变参数时滞系统的故障诊断问题. 在参数的凸条件约束和系统参数矩阵的仿射依赖条件假设下, 利用线性分式变换, 将故障滤波器设计问题转化为 H_∞ 鲁棒控制器设计问题, 给出了该变参数控制器的存在条件和增益求解方法. 最后通过仿真算例验证了方法的有效性和可行性.

关键词:故障诊断; 线性变参数时滞系统; H_∞ 滤波器; 线性矩阵不等式 (LMI).

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007- 2683 (2009) 01- 0001- 06

Fault Diagnosis of a Kind of Linear Parameter Varying Time-delay Systems

WU Jun-sheng, WENG Zheng-xin, TIAN Zuo-hua, SHI Song-jiao

(Dept. of Automat., Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai, 200240)

Abstract: This paper proposes a fault diagnosis method for linear parameter varying time-delay system (LPVTD). Under the assumption that the parameters are convex and the system matrices can be of affine parameter dependence, by a linear fractional transformation (LFT), the design of a fault filter can be equal to the design of a H_∞ robust controller. The existence condition and the method to get the gain of the controller are proposed. A simulation example demonstrates the effectiveness of the proposed method.

Key words: fault tolerant control; linear parameter varying time-delay system (LPVTD); H_∞ filtering; linear matrix inequality (LMI)

1 引言

在过去的二十多年里, 随着控制系统的规模增大, 对系统的可靠性、安全性和性能的要求也越来越高. 基于模型的动态系统的故障检测和诊断 (FDI) 成为研究热点并出现了大量的研究成果^[1-3]. 在基于模型的方法中, 最为常见的就是基于观测器/滤波器的方法, 比如利用状态观测器或滤波器产生残差并利用这些残差设定阈值以检测故障. 近年来, 随着

鲁棒控制理论和 H_∞ 优化技术的快速发展, 故障诊断也越来越多的与这些方法相结合, 形成了鲁棒故障诊断的研究热潮. 目前大部分 FDI 问题的研究集中在线性时不变系统 (LTI). 应用于非线性系统, 往往需要通过在给定的工作点附近加以线性化. 如果系统存在工作状态的较大变动, 则此方法的有效性是不能保证的. 因为一大类非线性系统可以抽象为线性变参数系统, 即系统的参数矩阵是依赖于参数变化的. 这类系统的 FDI 研究需要考虑参数变动带来的影响. 有关 LPV 系统的分析和综合问题研究已

收稿日期: 2006 - 01 - 16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60574081)

作者简介: 吴军生 (1979 -), 男, 上海交通大学博士研究生.

经有许多结果^[4-5].将 LPV 系统控制设计方法推广到 FD 设计是一项有意义的工作,因为相对于其他非线性系统,LPV 控制设计问题往往可以用 LM 进行有效的求解.

时滞现象是实际控制系统中广泛存在的,时滞的存在可以使系统的稳定性和性能受到破坏^[6].对于 LPV 时滞系统的研究也引起了越来越多的关注^[7-9].本文考虑一类带有加性故障的线性变参数时滞系统 (LPVTD),对其设计故障诊断滤波器,并通过线性分式变换 (LFT),将故障诊断滤波器的设计问题等同于一个 H_∞ 鲁棒控制器设计问题,利用 LPVTD 系统的控制器综合方法进行设计,使得该故障诊断滤波器的输出等同于故障的估计.最后通过一个算例仿真验证方法的可行性和有效性.

2 问题描述

考虑如下带有加性故障的 n 维 LPVTD 系统 $P(\theta)$

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_p(\theta(t))x(t) + A_{dp}(\theta(t))x(t - \tau(t)) + \\ &\quad B_p(\theta(t))u(t) + F_p(\theta(t))f(t) \\ y_p(t) &= C_p(\theta(t))x(t) + D_p(\theta(t))u(t) + \\ &\quad H_p(\theta(t))f(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中: $x(t)$ 为系统状态向量, $\tau(t)$ 为有界时变时滞参数满足 $0 \leq \tau(t) \leq \tau^+$, $\tau^+ \geq \tau(t) \geq 0$, 且 τ^+ , τ^* 已知, $u(t)$ 为控制输入向量, $f(t)$ 为故障向量. $A_p, A_{dp}, B_p, C_p, D_p, F_p, H_p$ 为具有适当维数的实数矩阵,并存在如下假设.

1) 参数 $\theta(t)$ 在由顶点 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r$ 组成的多边形 Θ 中取值. 即

$$\theta(t) \in \Theta := \text{co}\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r\} = \left\{ \sum_{i=1}^r \alpha_i \theta_i : \alpha_i \geq 0, \sum_{i=1}^r \alpha_i = 1 \right\}$$

2) 各参数矩阵仿射依赖于时变参数 $\theta(t)$.

为简便起见,以下将时间变量 t 省去不写.

对于带有加性故障的系统 (1),故障诊断的结构图见图 1.

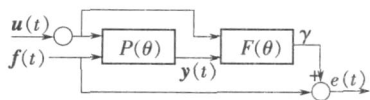


图 1 故障诊断结构示意图

设计图 1 中故障诊断滤波器 $F(\theta)$, 有如下

形式:

$$F(\theta) \begin{cases} \dot{x}_f = A_f(\theta)x_f + B_f(\theta)y \\ \gamma = C_f(\theta)x_f + D_f(\theta)y \end{cases} \quad (2)$$

其中: x_f 为滤波器的状态向量; γ 为滤波器的输出, 也就是对故障向量的估计; $y^T = [u^T \ y_p^T]$ 为滤波器的输入向量; 而 A_f, B_f, C_f, D_f 为需要求取的具有适当维数的实参数矩阵.

滤波器的设计目标: 在系统具有控制输入和故障输入的情况下, 最小化误差 $e = \gamma - f$

3 故障诊断滤波器设计

首先, 图 1 可调整为图 2

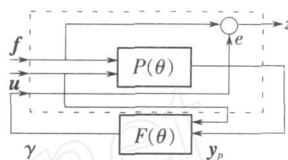


图 2 带滤波器系统的结构图

将图 2 中虚线框中部分看作一个整体, 则带滤波器系统可进一步描述为图 3 的线性分式变换 (LFT) 形式

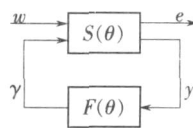


图 3 线性分式变换形式

图 3 中 $w^T = [u^T \ f^T]$ 为控制输入和故障输入的联合向量. 图 3 是一个 H_∞ 鲁棒控制器设计标准形式. 因而故障诊断滤波器的设计问题可以等同于一个 H_∞ 控制器综合问题.

问题可表述为: 设计控制器 $F(\theta)$, 使得 $\|T_{ew}\|_\infty \leq \lambda$, 其中 λ 为给定的正常数. 且通过迭代来最小化常数 λ , 达到最优化的目的.

写出 $S(\theta)$ 的状态空间描述

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_s &= A_s(\theta)x_s + A_{ds}(\theta)x_s(t - \tau) + B_s(\theta)w \\ z_s &= C_{s1}(\theta)w + \eta \\ y_s &= C_{s2}(\theta)x_s + D_s(\theta)w \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中: $x_s = x$; $z_s = e$; $A_s = A_p$; $B_s = [B_p \ F_p]$; $A_{ds} = A_{dp}$; $C_{s1} = [0 \ -I]$; $C_{s2} = [0]$; $D_s = \begin{bmatrix} I & 0 \\ D_p & H_p \end{bmatrix}$.

进而, 由式 (2)、(3) 组成的闭环系统为

$$\begin{bmatrix} x_s \\ x_f \end{bmatrix} = \hat{A}(\theta) \begin{bmatrix} x_s \\ x_f \end{bmatrix} + \hat{B}(\theta) w + \hat{A}_d(\theta) \begin{bmatrix} x_s(t-\tau) \\ x_f(t-\tau) \end{bmatrix}$$

$$z = \hat{C}(\theta) \begin{bmatrix} x_s \\ x_f \end{bmatrix} + \hat{D}(\theta) w \quad (4)$$

其中:

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A_s & 0 \\ B_f C_{s2} & A_f \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} B_s \\ B_f D_s \end{bmatrix}, \hat{A}_d = \begin{bmatrix} A_d & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{C} = [D_f C_{s2} \quad C_f], \hat{D} = (C_{s1} + D_f D_s) \quad (5)$$

针对上述系统,考虑假设 1)、2),得到输出反馈控制器 $F(\theta)$ 的存在性定理.

定理 1 给定常数矩阵 $0 < \Psi = \begin{bmatrix} \Psi_1 & \Psi_2 \\ \Psi_2^T & \Psi_3 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{2n \times 2n}$, $\bar{\Psi}_1 = (1 - \tau^*) \Psi_1$, 存在如 (2) 所示输出反馈

控制器使得闭环系统 (4) 二次稳定且满足给定的性能指标 λ , 如果存在 n 维正定对称矩阵 Ω, Γ, Π , 使得下列线性矩阵不等式系统成立

$$\begin{bmatrix} r & -\bar{C}_{s2}^T(\theta) \bar{C}_{s1}(\theta) \Omega A_d(\theta) \\ * & -I & 0 \\ * & * & \bar{\Psi}_1 \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} -\beta I & \Psi_2 \Pi - M^T \Psi_2 \\ \Pi \Psi_2^T - \Psi_2^T M & -I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} a + b + c & \Gamma & \Pi & B_s(\theta) & \Gamma \Omega A_{ds}(\theta) \\ * & -\Psi_1 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\Psi_3 & 0 & 0 \\ * & * & * & d & 0 \\ * & * & * & * & -\bar{\Psi}_1 \end{bmatrix} < 0 \quad (8)$$

$$\min \beta \text{ s.t. } (7-8)$$

其中, $r = \bar{\Omega} A(\theta) + \bar{A}^T(\theta) \Omega - \lambda^2 \bar{C}_{s2}^T(\theta) \bar{C}_{s2}(\theta) + \Psi_1$, $a = A_s(\theta) \Gamma$; $b = \Gamma A_s^T(\theta)$; $c = \Psi_2^T N + N^T \Psi_2$; $d = -\lambda^2 I + C_{s1}^T(\theta) C_{s1}(\theta)$; θ 在顶点 $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r)$ 中取值, $\beta > 0$, $\bar{A}(\theta) = A_s(\theta) - B_s(\theta) \bar{C}_{s2}(\theta)$, $\bar{C}_{s2}(\theta) = D_s^\dagger(\theta) C_{s2}(\theta)$. $D_s^\dagger(\theta)$ 为 $D_s(\theta)$ 的广义逆, $*$ 表示矩阵的对称项.

证明: 1) 首先给出以下引理:

引理 1^[10] 给定矩阵 Γ, Λ 和 $\Phi = \Phi^T$. 则矩阵不等式

$$\Gamma F \Lambda + (\Gamma F \Lambda)^T + \Phi < 0$$

的解 F 存在, 当且仅当 $\begin{cases} \Gamma^\perp \Phi \Gamma^\perp < 0, \\ \Lambda^T \Phi \Lambda^T < 0. \end{cases}$

2) 由线性时滞系统二次稳定判定定理^[11]: 系统

(4) 是二次稳定的, 且满足 w 到 z 的传递函数的无穷范数小于给定的值 λ , 即 $\|T_{zw}\|_\infty \leq \lambda$, 如果存在正定对称矩阵

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 \\ P_2^T & P_3 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{2n \times 2n}, P_1 = P_1^T \in \mathbf{R}^{n \times n}$$

使得矩阵不等式 (9) 可解.

$$\Xi(\theta) = \begin{bmatrix} a & b & c & d \\ * & e & D^{\wedge T}(\theta) & 0 \\ * & * & -I & 0 \\ * & * & * & -\bar{\Psi} \end{bmatrix} < 0 \quad (9)$$

其中: $a = P \hat{A}(\theta) + \hat{A}^T(\theta) P + \Psi$; $b = P \hat{B}(\theta)$; $c = \hat{C}^T(\theta)$;

$d = P \hat{A}_d(\theta)$; $e = -\lambda^2 I$

引入正定对称矩阵

$$\Sigma = P^{-1} = \begin{bmatrix} \Gamma & \Pi \\ \Pi^T & \Sigma_3 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{2n \times 2n}, \Gamma = \Gamma^T \in \mathbf{R}^{n \times n}$$

将式 (5) 代入式 (9) 得到 (为简便, 矩阵中参数变量略去不写):

$$\Xi(\theta) = \begin{bmatrix} \Xi_{11} & \Xi_{12} & \Xi_{13} & \Xi_{14} & \Xi_{15} & 0 \\ * & \Xi_{22} & \Xi_{23} & \Xi_{24} & \Xi_{25} & 0 \\ * & * & \Xi_{33} & \Xi_{34} & 0 & 0 \\ * & * & * & \Xi_{44} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \Xi_{55} & \Xi_{56} \\ * & * & * & * & * & \Xi_{66} \end{bmatrix} < 0$$

其中: $\Xi_{11} = \Omega A_s + A_s^T \Omega + P_2 B_f C_s + C_s^T B_f^T P_2^T + \Psi_1$,
 $\Xi_{12} = P_2 A_f + A_s^T P_2 + C_s^T B_f^T P_3^T + \Psi_2$,
 $\Xi_{13} = \Omega B_s + P_2 B_f D_s$, $\Xi_{14} = C_{s2}^T D_f^T$, $\Xi_{15} = \Omega A_{ds}$,
 $\Xi_{22} = P_3 A_f + A_f^T P_3^T + \Psi_3$, $\Xi_{23} = P_2^T B_s + P_3 B_f D_s$,
 $\Xi_{24} = C_f^T$, $\Xi_{25} = P_2^T A_{ds}$,
 $\Xi_{33} = -\lambda^2 I$, $\Xi_{34} = C_{s1}^T + D_s^T D_f^T$,
 $\Xi_{44} = -I$, $\Xi_{55} = -\lambda^2 I$, $\Xi_{56} = -\lambda^2 I$, $\Xi_{66} = -\lambda^2 I$.

分离出 $\Xi(\theta)$ 中不带 A_f, B_f, C_f 和 D_f 的部分, 记为 Δ :

$$\Delta = \begin{bmatrix} Q & J & \Omega B_s & 0 & \Omega A_{ds} & 0 \\ * & \Psi_3 & P_2^T B_s & 0 & P_2^T A_{ds} & 0 \\ * & * & -\lambda^2 I & C_{s1}^T & 0 & 0 \\ * & * & * & -I & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\Psi_1 & -\Psi_2 \\ * & * & * & * & * & -\Psi_3 \end{bmatrix}$$

其中: $Q = \Omega A_s + A_s^T \Omega + \Psi_1$; $J = A_s^T P_2 + \Psi_2$. 剩余部分记为 Δ_r , 有:

$$\Delta_r = \Lambda_{\Xi} F Y_{\Xi} + Y_{\Xi}^T F^T \Lambda_{\Xi}^T$$

其中:

$$\Lambda_{\Xi} = \begin{bmatrix} 0 & P_2 \\ 0 & P_3 \\ 0 & 0 \\ I & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} D_c & C_d \\ B_c & A_c \end{bmatrix},$$

$$Y_{\Xi} = \begin{bmatrix} C_{s2} & 0 & D_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

从而

$$\Xi(\theta) = \Delta + \Lambda_{\Xi} F Y_{\Xi} + Y_{\Xi}^T F^T \Lambda_{\Xi}^T < 0 \quad (10)$$

由引理 1, 式 (10) 等价于

$$\begin{cases} \Lambda_{\Xi}^{\perp} \Delta \Lambda_{\Xi}^{\perp T} < 0 \\ Y_{\Xi}^{\perp T} \Delta Y_{\Xi}^{\perp T} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中: $\Lambda_{\Xi}^{\perp}$ 和 $Y_{\Xi}^{\perp T}$ 分别为 Λ_{Ξ} 和 Y_{Ξ}^T 的正交补, 且不唯一, 取为:

$$\Lambda_{\Xi}^{\perp} = \begin{bmatrix} \Gamma & \Pi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 \end{bmatrix}$$

$$Y_{\Xi}^{\perp T} = \begin{bmatrix} I & 0 & -C_{s2}^T D_s^{\dagger} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix}$$

将式 (11) 展开, 经过化简可以得到下面两个矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} \bar{\Omega}_A + \bar{A}^T \bar{\Omega} - \lambda^2 \bar{C}_{s2}^T \bar{C}_{s2} + \Psi_1 & -\bar{C}_{s2}^T C_{s1} & \Omega_{A_{ds}} \\ * & -I & 0 \\ * & * & -\Psi_1 \end{bmatrix} < 0 \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} a & \Gamma & \Pi & B_s & \Gamma \Omega_{A_{ds}} \\ * & -\Psi_1 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\Psi_3 & 0 & 0 \\ * & * & * & b & 0 \\ * & * & * & * & -\Psi_1 \end{bmatrix} < 0 \quad (13)$$

其中: $a = A_s \Gamma + \Gamma A_s^T + \Pi \Psi_2^T \Gamma + \Gamma \Psi_2 \Pi$; $b = -\lambda^2 I + C_{s1}^T C_{s1}$; $\bar{A} = A_s - B_s C_{s2}$; $\bar{C}_{s2} = D_s^{\dagger} C_{s2}$, $D_s^{\dagger}$ 为 D_s 的广义逆.

3) 注意到矩阵不等式 (13) 是一个双线性矩阵不等式 (BMI), 是非凸的.

$(A_s \Gamma + \Gamma A_s^T + \Pi \Psi_2^T \Gamma + \Gamma \Psi_2 \Pi)$ 项中 Γ 和 Π 都是待求矩阵, 给求解带来难度, 需要转化为线性矩阵不等式来进行求解.

给 BMI(13) 引入一个等式约束

$$\Pi \Psi_2^T = \Psi_2^T M \quad (14)$$

其中 M 是一个非奇异矩阵. 并令 $M \Gamma = N$, 则有:

$$\begin{bmatrix} a & \Gamma & \Pi & B_s & \Gamma \Omega_{A_{ds}} \\ * & -\Psi_1 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\Psi_3 & 0 & 0 \\ * & * & * & b & 0 \\ * & * & * & * & -\Psi_1 \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

其中: $a = A_s \Gamma + \Gamma A_s^T + \Psi_2^T N + N^T \Psi_2$; $b = -\lambda^2 I + C_{s1}^T C_{s1}$. 为了有效地利用 MATLAB 的 LMI 工具箱求解, 需要将等式约束 (14) 转化为矩阵不等式. 由 (14), 有:

$$\text{tr}((\Pi \Psi_2^T - \Psi_2^T M)^T (\Pi \Psi_2^T - \Psi_2^T M)) = 0$$

其中 $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹. 令 β 为一个正数. 有:

$$(\Pi \Psi_2^T - \Psi_2^T M)^T (\Pi \Psi_2^T - \Psi_2^T M) \leq \beta I$$

进而由 Schur 补引理, 得到:

$$\begin{bmatrix} -\beta I & \Psi_2 \Pi - M^T \Psi_2 \\ \Pi \Psi_2^T - \Psi_2^T M & -I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (16)$$

通过上面的处理, BMI(12) 的求解转化为 LMI 的优化问题:

$$\min \beta \text{ s.t. } (15) - (16)$$

综上, 如果对于每个参数顶点的取值 $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r)$, 本定理的线性矩阵不等式系统都可行, 那么存在如 (2) 所示输出反馈控制器使得闭环系统 (4) 二次稳定且满足给定的性能指标 λ . 证毕.

下面给出求解该控制器 (等价的, 滤波器 $F(\theta)$) 增益矩阵的方法.

首先将闭环系统 (4) 的参数矩阵写成如下形式

$$\begin{cases} \hat{A}(\theta) = A(\theta) + G(\theta) F(\theta) L(\theta) \\ \hat{B}(\theta) = B(\theta) + G(\theta) F(\theta) R(\theta) \\ \hat{C}(\theta) = C(\theta) + T(\theta) F(\theta) L(\theta) \\ \hat{D}(\theta) = D(\theta) + T(\theta) F(\theta) R(\theta) \\ \hat{A}_d(\theta) = \begin{bmatrix} A_d(\theta) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (17)$$

其中 θ 为一取定的参数值, 且

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} A_s(\theta) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, G(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, T(\theta) = \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix},$$

$$L(\theta) = \begin{bmatrix} C_{s2}(\theta) & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, B(\theta) = \begin{bmatrix} B_s(\theta) \\ 0 \end{bmatrix}, C(\theta) = 0$$

定理 2^[7] 如果闭环系统 (4) 满足定理 1 且其参数矩阵写成 (17) 的形式, 那么随参数 θ 变化的控制器增益 $F(\theta)$ 可通过求解下面的 LM 得到.

$$\begin{bmatrix} H(\Sigma, F, \theta) & \Lambda(\theta, F) & \Phi^T(\theta, F, \Sigma) \\ \Lambda^T(\theta, F) & -\gamma^2 I & \Psi(\theta, F) \\ \Phi(\theta, F, \Sigma) & \Psi^T(\theta, F) & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (18)$$

其中:

$$H(\Sigma, F, \theta) = \Sigma A^T(\theta) + A(\theta) \Sigma + A_d^T(\theta) \Sigma + \Sigma \Psi \Sigma + \Sigma L^T(\theta) F^T(\theta) G^T(\theta) + G(\theta) \times F(\theta) L(\theta) \Sigma$$

$$\Lambda(\theta, F) = B(\theta) + R^T(\theta) F^T(\theta) G^T(\theta),$$

$$\Phi(\theta, F, \Sigma) = T(\theta) F(\theta) L(\theta) \Sigma,$$

$$\Psi(\theta, F) = D_s(\theta) + T(\theta) F(\theta) R(\theta).$$

而 $\Sigma = \begin{bmatrix} \Gamma & \Pi \\ \Pi^T & \Omega^{-1} + \Pi^T \Gamma^{-1} \Pi \end{bmatrix}$ 可以从定理 1 得到.

证明 应用 Schur 补引理, 考虑 (17), 可以容易得到 LM I(18).

4 仿真研究 (Simulation)

考虑如下时滞 LPV 系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}_p(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 3 + \rho_1(t) \\ -4 & -5 \end{bmatrix} x_p(t) + \\ &\begin{bmatrix} -0.1 & 0 \\ 0.2 & -0.2 + \rho_1(t) \end{bmatrix} x_p(t - \tau) + \\ &\begin{bmatrix} -0.4545 \\ 0.9090 \end{bmatrix} f(t) + \begin{bmatrix} 1 + \rho_1(t) \\ 0.1 + \rho_2(t) \end{bmatrix} u(t) \\ y_p &= [0 \quad 1] x_p(t) + u(t) + 0.2f(t) \end{aligned} \quad (22)$$

其中: $\rho_i(t)$ 为时变参数; $\rho_1(t) = \sin(t) \in [-1, 1]$; $\rho_2(t) = |\cos(t)| \in [0, 1]$. $0 \leq \tau \leq 0.8$, $0 \leq \tau \leq 0.6$ 这些时变参数产生的多边形有 4 个顶点, θ_i , $i = 1, \dots, 4$

首先按照定理 1 验证控制器的存在条件, 将系统 (22) 按照 3.1 所述方法进行处理, 得到 $s(\theta)$ 和带观测器的闭环描述. 对得到的系统, 在 4 个顶点处求解 LM 组. 使用 LM 工具箱中的 mincx 求解器, 在验证可行性的同时, 得到最优化 H_∞ 性能指标 $\lambda = 1.2327$.

假定两个变参数取值为 (0.5, 0.5), 求解凸约束条件 1), 得到符合条件的加权系数.

$$\alpha_1 = 0.05; \alpha_2 = 0.35; \alpha_3 = 0.4; \alpha_4 = 0.1 \quad (23)$$

求解定理 2 中的 LM I 得到在各个顶点处的控

制器 (滤波器) 增益矩阵, 通过加权系数 (23) 求和, 最终得到增益矩阵

$$F(\theta) = \begin{bmatrix} -0.2613 & 0.7709 \\ 0.5318 & -1.9498 \end{bmatrix}$$

通过该滤波器完成对故障信号的估计.

4.1 突变故障情况

假设故障输入 $f(t)$ 为 5~10s 的方波信号, 幅值为 1

仿真结果如图 4、图 5 所示, 图 4 中虚线为故障信号, 实线为故障信号的估计. 图 5 为故障估计与故障输入之间的误差, 可以看到, 本文方法可以对故障进行有效的估计.

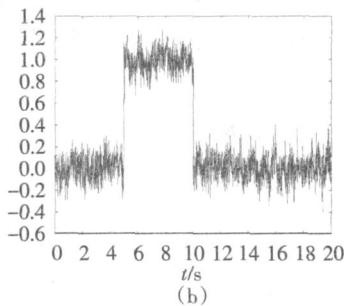
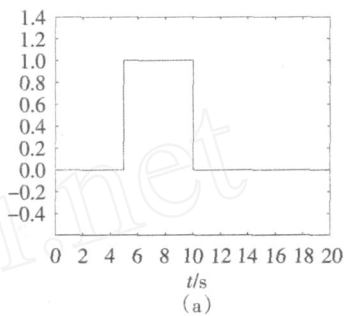


图 4 突变故障估计

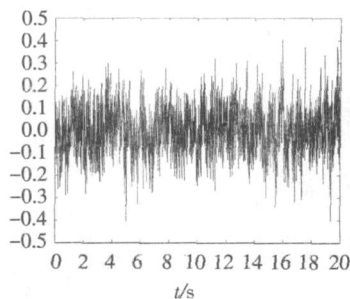


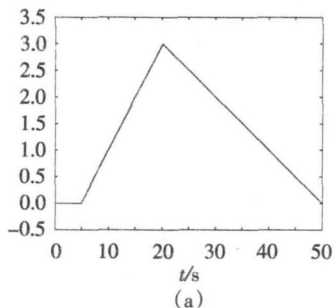
图 5 故障估计误差

4.2 缓变故障情况

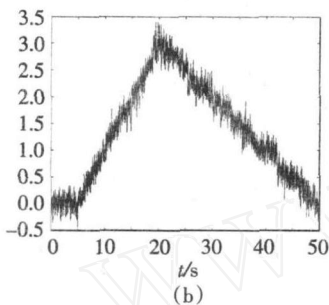
在许多实际系统中, 故障的变化是一个缓慢和渐进的过程, 对这种缓变故障的检测和诊断十分重要. 考虑故障输入

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 5 \\ 0.2(t-5) & 5 < t \leq 20 \\ 3 - 0.1(t-20) & 20 < t \leq 50 \end{cases}$$

仿真结果如图 6、图 7 所示. 图 6 中虚线为故障信号, 实线为故障信号的估计. 图 7 为故障估计与故障输入之间的误差, 可以看到, 本文方法对缓变故障依然能够进行有效的估计. 证明本文提出的故障诊断策略是有效的.



(a)



(b)

图 6 缓变故障估计

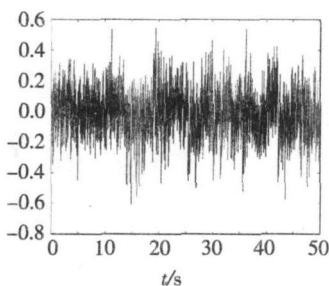


图 7 故障估计误差

5 结 论

本文研究了线性变参数时滞系统的故障诊断问题. 首先将线性变参数时滞系统的故障诊断滤波器

设计问题转化为一个标准的 H_∞ 鲁棒控制问题, 以求解一组线性矩阵不等式约束的线性目标函数的最小化问题的形式给出了该控制器的求解方法. 在此基础上实现了故障的估计. 最后, 通过一个仿真例子验证了方法的有效性.

参 考 文 献:

- [1] ZHANG You-min, JIANG Jin. Issues on Integration of Fault Diagnosis and Reconfigurable Control in Active Fault-tolerant Control Systems[C]//Proc of IFAC Symp. on SafeProcess '06 Beijing, China, Oct. 2006: 1513 - 1523.
- [2] JIE CHEN, PATTON J. Robust Model-based Fault Diagnosis for Dynamic Systems[M]. Norwell, MS: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [3] VENKATASUBRAMANIAN R R, KEWEN Yin, et al. A Review of Process Fault Detection and Diagnosis Part I: Quantitative Model-based Methods[J]. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27: 293 - 311.
- [4] SCHERER C W. LPV Control and Full Block Multipliers[J]. Automatica, 2001, 37: 361 - 375.
- [5] MASAYUKI Sato. Filter Design for LPV Systems Using Quadratically Parameter-dependent Lyapunov Functions[J]. Automatica, 2006, 42: 2017 - 2023.
- [6] RICHARD J P. Time-delay Systems: an Overview of Some Recent Advances and Open Problems[J]. Automatica, 2003, 39: 1167 - 1694.
- [7] MAHMOUD M S. New Results on Linear Parameter-varying Time-delay Systems[J]. Journal of Franklin Institute, 2004, 341: 675 - 703.
- [8] WU Fen, KAROLOS M. LPV Systems With Parameter-varying Time Delays: Analysis and Control[J]. Automatica, 2001, 37: 221 - 229.
- [9] WU L, SHIP, WANG C, GAO H. Delay-dependent Robust H_∞ and $L_2 - L_\infty$ Filtering for LPV Systems with Both Discrete and Distributed Delays[J]. IEE Proc. - Control Theory Appl, 2006, 153 (4): 483 - 492.
- [10] GAHNET P, APKARIAN P. A Linear Matrix Inequality Approach to H_∞ Control[J]. Int. J. Robust and Nonlinear Control, 1994, 4: 421 - 448.
- [11] GUO L. H_∞ Output Feedback Control for Delay Systems with Nonlinear and Parametric Uncertainties[J]. IEE Proc. Control Theory Appl, 2002, 149 (3): 226 - 236.

(编辑:王 萍)