文章编号: 1001-0920(2005)09-1012-05

基于时滞依赖H∞滤波器的时滞系统故障诊断

白雷石, 田作华, 施颂椒
(上海交通大学 自动化系, 上海 200030)

摘　要: 针对一类具有不确定输入的状态时滞系统, 基于时滞依赖H_∞滤波器探讨了系统的鲁棒故障诊断(RFD)问题. 首先, 引入一个参考模型, 形成广义残差系统, 以此广义残差信号对扰动信号及其故障信号L_2的增益来体现其对扰动的鲁棒性和对故障的灵敏性; 其次, 利用对偶原理, 针对对偶系统, 借助线性矩阵不等式(LMI)技术, 研究基于状态观测器的时滞依赖RFD系统设计问题, 并推导出具有时滞依赖解存在的条件及观测器增益矩阵的求解方法; 最后, 通过仿真实例验证了该方法的可行性和有效性.

关键词: 时滞系统; 鲁棒故障诊断; 时滞依赖; LMI; H_∞范数
中图分类号: TP273　　**文献标识码**: A

Fault Diagnosis for Time-delay Systems Based on Delay-dependent H∞ Filter

BAI Lei-shi, TIAN Zuo-hua, SHI Song-jiao
(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China. Correspondent: BAI Lei-shi, E-mail: baileishi@sjtu.edu.cn)

Abstract: A robust fault detection (RFD) scheme is proposed for a class of time-delay systems with uncertainty inputs. The fault detection filter is designed by using H_∞ control theory. The reference model is introduced to formulate the generalized residual, and the robustness of residual to unknown inputs and the sensitivity to fault signal are reflected by an L_2-gain. By using the dual principle and linear matrix inequality (LMI) approach, the design of observer-based RFD system is proposed. The existence condition and the solution of observer gain matrix, which are dependent on the size of the delay, are also given. Finally, an example is given to demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

Key words: Time-delay systems; Robust fault detection; Delay-dependent; LMI; H_∞ norm

1 引　　言

基于模型的鲁棒故障诊断(RFD), 尤其是有关鲁棒故障滤波器的设计问题, 引起了众多学者的关注并已取得了许多令人满意的成果[1~3], 但这些结果主要集中于线性时不变系统中. 而实际系统不可避免地具有不同程度的不确定性和时滞现象, 因此对不确定时滞系统的研究具有重要的科学价值和工程意义. 近年来, 虽然对不确定时滞系统鲁棒控制的研究取得了大量结果[4], 但有关时滞系统的故障诊断问题的成果却很少. 文献[5]研究了离散时滞系统的鲁棒故障诊断问题, 文献[6]基于线性矩阵不等式(LMI)技术研究了状态时滞系统的故障诊断问题. 但上述文献推导出的解都是时滞独立的, 即此解对于系统的很大或很小时滞都适用, 因此它具保守性, 甚至有时会造成无解的情况. 所以有必要研究时滞依赖条件下不确定时滞系统的鲁棒故障诊断问题, 即设计与时滞大小有关的RFD.

本文利用对偶原理, 对此对偶系统应用H_∞控制理论的思想, 探讨了一类具有不确定输入的状态时滞系统的鲁棒故障诊断问题, 借助LMI技术, 得到了依赖于时滞大小的可用于故障检测的鲁棒H_∞滤波器的设计方法, 实现了对不确定时滞系统的鲁

收稿日期: 2004-09-27; **修回日期**: 2004-11-17.
作者简介: 白雷石(1976—), 男, 山东临沂人, 博士生, 从事时滞系统鲁棒故障诊断与容错控制的研究; 田作华(1946—), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士生导师, 从事控制系统远程故障诊断、智能控制技术的应用与研究.

棒故障诊断

2　系统描述

考虑如下一类含有故障的不确定状态时滞系统:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t-h) + Bu(t) + B_f f(t) + B_d d(t), \tag{1}$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + D_f f(t) + D_d d(t),\quad x(t) = 0,\ t \le 0. \tag{2}$$

其中: $x \in R^n$ 为系统的状态向量; $u \in R^p$ 为系统的控制输入向量; $y \in R^q$ 为系统的输出向量; $d \in R^m$ 为平方可积的不确定扰动信号(包括建模误差、外部扰动和影响不大的小故障信号等), 并满足 $\int^\infty d^T(t)d(t)dt \le N$, N 为已知正数; $f \in R^l$ 为需要诊断和分离的故障信号向量; $h \ge 0$ 为滞后时间常数; $A, A_d, B, C, D, B_f, B_d, D_f$ 和 D_d 为适当维数的已知矩阵或向量.

对系统(1), (2) 设计如下全阶故障检测滤波器用以实现故障诊断:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + A_d\hat{x}(t-h) + Bu(t) + H(y(t) - \hat{y}(t)), \tag{3}$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) + Du(t). \tag{4}$$

其中: $\hat{x} \in R^n$ 和 $\hat{y} \in R^q$ 分别是系统状态和输出的估计值, H 为需要确定的观测器增益. 定义状态误差估计 $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$, 残差信号 $r(t) = y(t) - \hat{y}(t)$, 可得残差系统的方程为

$$\dot{e}(t) = (A - HC)e(t) + A_d e(t-h) + (B_f - HD_f)f(t) + (B_d - HD_d)d(t), \tag{5}$$

$$r(t) = Ce(t) + D_f f(t) + D_d d(t). \tag{6}$$

通过求 Laplace 变换, 系统(5), (6) 可写为

$$r(s) = T_{rf}(s)f(s) + T_{rd}(s)d(s). \tag{7}$$

其中 $T_{rf}(s)$ 和 $T_{rd}(s)$ 分别表示故障信号 f 和不确定输入信号 d 到残差信号 r 的传递函数.

本文设计 RFD 滤波器的主要思想是选择适当的参考模型 W_f[7], 并定义如下的广义残差信号:

$$r_d = r - W_f f = T_{rd}d + (T_{rf} - W_f)f. \tag{8}$$

设计滤波器(3), (4), 对于给定的 $\gamma > 0$, 求状态观测器增益矩阵 H, 对所有滞后时间 $h \in [0, \bar{h}]$, 其中 $\bar{h}$ 为最大滞后时间, 系统(5), (6) 渐近稳定, 并且满足

$$\|T_{rd}\|_\infty \le \gamma,\ \|T_{rf} - W_f\|_\infty \Rightarrow \min,$$

由文献[6, 7] 可知, 对于给定的 $\gamma > 0$ 和 $\beta > 0$, 如果

$$\int^\infty r_e^T r_e dt \le \beta^2 \int^\infty f^T f dt + \gamma^2 \int^\infty d^T d dt \tag{9}$$

成立, 则不等式

$$\|T_{rd}\|_\infty \le \gamma,\ \|T_{rf} - W_f\|_\infty \le \beta \tag{10}$$

一定成立.

设参考模型 W_f 的状态空间实现为

$$\dot{\zeta}(t) = (A - H^*C)\zeta(t) + A_d\zeta(t-h) + (B_f - H^*D_f)f(t), \tag{11}$$

$$r_f = C\zeta(t) + D_f f(t),\quad \zeta(t) = 0,\ t \le 0. \tag{12}$$

其中 H^* 为需要确定的参考模型矩阵. 则可得增广系统为

$$\dot{\bar{e}}(t) \equiv \bar{A}\bar{e}(t) + \bar{A}_d\bar{e}(t-h) + \bar{B}_f f(t) + \bar{B}_d d(t), \tag{13}$$

$$r_e = \bar{C}\bar{e}(t) + D_d d(t). \tag{14}$$

其中

$$\bar{e} = \begin{bmatrix} e \\ \zeta \end{bmatrix},\ \bar{A} = \begin{bmatrix} A - HC & 0 \\ 0 & A - H^*C \end{bmatrix},$$

$$\bar{A}_d = \begin{bmatrix} A_d & 0 \\ 0 & A_d \end{bmatrix},\ \bar{B}_f = \begin{bmatrix} B_f - HD_f \\ B_f - H^*D_f \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}_d = \begin{bmatrix} B_d - HD_d \\ 0 \end{bmatrix},\ \bar{C} = [C \quad -C].$$

因此基于 H_∞ 滤波器的鲁棒故障诊断可转化为如下最优化问题[6, 7]: 对于给定的 $\gamma \ge \gamma^*$ (γ^* 为 γ 的最优值) 和 $\beta > 0$, 设计观测器增益矩阵 H, 使系统渐近稳定, 并在满足 $\|T_{rd}\|_\infty \le \gamma$ 的条件下, 最小化 β, 即

$$\min_H \beta,\quad \text{s.t.}\ 式(9), (13), (14). \tag{15}$$

在 $\int^\infty d^T(t)d(t)dt \le N$ (N 为已知正数) 的假设条件下, 阈值 J_{th} 可选为

$$J_{th} = \gamma^2 N, \tag{16}$$

并基于以下逻辑关系诊断故障的发生:

$$\int^\infty r^T(t)r(t)dt > J_{th} \Rightarrow \text{故障被检测到} \Rightarrow \text{报警},$$

$$\int^\infty r^T(t)r(t)dt \le J_{th} \Rightarrow \text{没有故障}.$$

在实际工程中, 时间 t 不可能取到无穷大, 因此用 $\|r\|_{2,T}^2 = \int_{t_1} r^T r dt$ (其中 $T = t_1 - t_2$) 代替 $\int^\infty r^T r dt$.

3　时滞依赖鲁棒 H_∞ 故障诊断滤波器设计

由第 2 节可知, 通过选取一个合适的参考模型, 基于 H_∞ 滤波器的 RFD 系统设计问题可转化为一个 H_∞ 最优控制问题.

3.1　参考模型选择

首先选取参考模型 W_f, 由

$$\int r_f^T r_f dt \ge \alpha^2 \int f^T f dt \tag{17}$$

可以明显看出, α代表了对故障的灵敏度, α越大, 对故障的灵敏度越高; α越小, 对所发生的故障反应越迟钝. 因此, 通过求最大的α值可确定参考模型 W_f, 于是有如下引理:

引理 1[7]　对于给定的 $\alpha > 0$ 和系统(11), (12), 如果存在对称正定矩阵 P, Q 和矩阵 Y, 使得如下LMI

$$\begin{bmatrix} -A^{\mathrm{T}}P - PA + C^{\mathrm{T}}Y^{\mathrm{T}} + YC - Q & -PB_f + YD_f & C^{\mathrm{T}} & -PA_d \\ * & -\alpha I & D_f^{\mathrm{T}} & 0 \\ * & * & -\alpha I & 0 \\ * & * & * & Q \end{bmatrix} > 0 \tag{18}$$

成立, 那么式(17) 成立, 且 $H^* = P^{-1}Y$. 其中 * 为矩阵的对称项.

3.2　时滞依赖 H_∞ 滤波器设计

首先给出如下引理:

引理 2[8]　给定 $\gamma > 0$, 对于系统

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t-h) + Bd(t), \tag{19}$$

$$y(t) = Cx(t) + Dd(t). \tag{20}$$

其中: $x \in R^n, y \in R^p, d \in R^q, A, A_d, B, C$ 和 D 为已知的矩阵或向量, $h \geq 0$ 为滞后时间. 如果存在对称正定矩阵 P 和 S, 满足如下LMI:

$$\begin{bmatrix} A^{\mathrm{T}}P + PA + S & PB & C^{\mathrm{T}} & PA_d \\ B^{\mathrm{T}}P & -\gamma I & D^{\mathrm{T}} & 0 \\ C & D & -\gamma I & 0 \\ A_d^{\mathrm{T}}P & 0 & 0 & -S \end{bmatrix} < 0, \tag{21}$$

则系统渐近稳定, 且具有 H_∞ 性能 γ.

由于文献[9, 10] 推导出的时滞依赖稳定条件不适合求解滤波器增益, 对此, 本文利用对偶原理, 推导出适合时滞依赖RFD 问题的求解方法.

对于由式(19), (20), 构成的系统 Σ_1, 由对偶原理可知, 此系统的对偶系统 Σ_2 为

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A^{\mathrm{T}}\tilde{x}(t) + A_d^{\mathrm{T}}\tilde{x}(t-h) + C^{\mathrm{T}}\tilde{y}(t), \tag{22}$$

$$\tilde{d}(t) = B^{\mathrm{T}}\tilde{x}(t) + D^{\mathrm{T}}\tilde{y}(t). \tag{23}$$

其中: $\tilde{x} \in R^n, \tilde{y} \in R^p, \tilde{d} \in R^q$.

通过计算可知

$$\begin{aligned} &\| T_1(s) \|_\infty = \\ &\| C(sI - A - A_d e^{-sh})^{-1}B + D \|_\infty = \\ &\| B^{\mathrm{T}}(sI - A^{\mathrm{T}} - A_d^{\mathrm{T}} e^{-sh})C^{\mathrm{T}} + D^{\mathrm{T}} \|_\infty = \\ &\| T_2(s) \|_\infty, \end{aligned}$$

且系统 Σ_1 和系统 Σ_2 的特征方程等价[10], 因此对系统 Σ_1 的 H_∞ 最优控制问题可通过其对偶系统 Σ_2 的 H_∞ 最优控制问题等价. 在文献[11] 的基础上, 稍加改动, 可得到如下定理:

定理 1　对于给定的标量 $\gamma > 0$, 如果存在对称正定矩阵 $X_1 > 0, Q > 0$ 和矩阵 X_2, X_3 (可逆), 满足如下LMI:

$$\begin{bmatrix} X_2 + X_2^{\mathrm{T}} & X_3 - X_2^{\mathrm{T}} + X_1(A + A_d) & X_1BD^{\mathrm{T}} & 0 & X_1B & \bar{h}X_2^{\mathrm{T}} \\ * & -X_3 - X_3^{\mathrm{T}} & C^{\mathrm{T}} & \bar{h}A_d^{\mathrm{T}}Q & 0 & \bar{h}X_3^{\mathrm{T}} \\ * & * & DD^{\mathrm{T}} - \gamma^2 I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -\bar{h}Q & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -I & 0 \\ * & * & * & * & * & -\bar{h}Q \end{bmatrix} < 0, \tag{24}$$

则系统 Σ_1 对于所有的时滞 $h \in [0, \bar{h}]$ 渐近稳定, 且 $\| T_1(s) \|_\infty < \gamma$. 其中 $T_1(s)$ 为系统 Σ_1 的传递函数, * 由矩阵的对称性得到.

证明　定义 $\dot{x}(t) = \epsilon(t)$, 则

$$0 = -\epsilon(t) + (A + A_d)x(t) - A_d\int_{-h}^{0}\epsilon(s)\,\mathrm{d}s + Bd(t),$$

并定义如下Lyapunov-Krasovskii 泛函:

$$V(t) = [x^{\mathrm{T}}(t) \quad \epsilon^{\mathrm{T}}(t)]EP\begin{bmatrix} x(t) \\ \epsilon(t) \end{bmatrix} + \int_{-h}^{0}\int_{t+\alpha}^{t}\epsilon^{\mathrm{T}}(s)Q^{-1}\epsilon(s)\,\mathrm{d}s\mathrm{d}\alpha.$$

其中

$$E = \begin{bmatrix} I_n & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ P_2 & P_3 \end{bmatrix},$$

$$P_1 > 0, Q > 0.$$

令

$$X = P^{-1} = \begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ X_2 & X_3 \end{bmatrix}, X_1 > 0.$$

仿照文献[11] 的证明过程, 可以容易证得定理 1. □

对于系统(13), (14), 应用定理 1, 可得出本文的主要结论.

定理 2　对于给定的标量 $\gamma \geq \gamma^*$, $\beta > 0$ 以及参考模型 W_f, 如果存在对称正定矩阵 $X_1 > 0, Q > 0$ 和矩阵 X_2, X_3 以及 Y, 满足如下LMI:

$$[N]_{11\times 11} < 0. \tag{25}$$

其中

$N_{0101} = X_{21} + X_{12}^{\mathrm{T}}, N_{0102} = X_{22} + X_{23}^{\mathrm{T}}$,

$N_{0103} = X_{31} - X_{21}^{\mathrm{T}} + X_{11}A + X_{11}A_d - YC$,

$N_{0104} = X_{32} - X_{23}^{\mathrm{T}}$,

$N_{0105} = \gamma^{-2} X_{11} B_d D_d^{\mathrm T} - \gamma^{-2} Y D_d D_d^{\mathrm T}$,

$N_{0108} = \beta^{-1} X_{11} B_f - \beta^{-1} Y D_f$,

$N_{0109} = \gamma^{-1} X_{11} B_d - \gamma^{-1} Y D_d, N_{0110} = \bar h X_{21}$,

$N_{0111} = \bar h X_{22}, N_{0202} = X_{24} + X_{24}^{\mathrm T}$,

$N_{0203} = X_{33} - X_{22}^{\mathrm T}$,

$N_{0204} = X_{34} - X_{24}^{\mathrm T} + X_{12} A - X_{12} H^* C + H_{12} A_d$,

$N_{0208} = \beta^{-1} X_{12} B_f - \beta^{-1} X_{12} H^* D_f$,

$N_{0210} = \bar h X_{23}, N_{0211} = \bar h X_{24}$,

$N_{0303} = - X_{31} - X_{31}^{\mathrm T}, N_{0304} = - X_{32} - X_{33}^{\mathrm T}$,

$N_{0305} = C^{\mathrm T}, N_{0306} = \bar h A_d^{\mathrm T} Q_1$,

$N_{0310} = \bar h X_{31}^{\mathrm T}, N_{0311} = \bar h X_{33}^{\mathrm T}$,

$N_{0404} = - X_{34} - X_{34}^{\mathrm T}, N_{0405} = - C^{\mathrm T}$,

$N_{0407} = \bar h A_d^{\mathrm T} Q_2, N_{0410} = \bar h X_{32}^{\mathrm T}$,

$N_{0411} = \bar h X_{34}^{\mathrm T}, N_{0505} = \gamma^{-2} D_d D_d^{\mathrm T} - \gamma^2 I$,

$N_{0606} = - \bar h Q_1, N_{0707} = - \bar h Q_2$,

$N_{0808} = N_{0909} = - I, N_{1010} = - \bar h Q_1$,

$N_{1111} = - \bar h Q_2$,

其余为0. γ 为满足

$$\begin{bmatrix} \bar P A + A^{\mathrm T} \bar P - \bar Y C - C^{\mathrm T} \bar Y^{\mathrm T} + S & \bar P B_d - \bar Y D_d & C^{\mathrm T} & \bar P A_d \\ * & -\gamma I & D_d^{\mathrm T} & 0 \\ * & * & -\gamma I & 0 \\ * & * & * & -S \end{bmatrix} < 0 \tag{26}$$

的γ最小值, 其中$\bar P, S$ 为对称正定矩阵, $\bar Y$为适当维数的矩阵. 对于所有的时滞 $h \in [0, \bar h]$, 可得基于H_∞滤波器的RFD 系统, 且观测器增益矩阵$H = X_{11}^{-1} Y$.

证明　根据引理2, 当存在适当的矩阵H 以及对称正定矩阵$\bar P$和S, 并令$\bar Y = \bar P H$, 由式(21) 容易得出式(26). 对系统(13), (14) 进一步整理, 得

$$\dot{\bar e}(t) = \bar A \bar e(t) + \bar A_d \bar e(t - h) + [\beta^{-1} \bar B_f \quad \gamma^{-1} \bar B_d] \begin{bmatrix} \beta f(t) \\ \gamma d(t) \end{bmatrix},$$

$$r_e(t) = \bar C \bar e(t) + [0 \quad \gamma^{-1} D_d] \begin{bmatrix} \beta f(t) \\ \gamma d(t) \end{bmatrix}.$$

令

$$X_1 = \begin{bmatrix} X_{11} & 0 \\ 0 & X_{12} \end{bmatrix}, X_2 = \begin{bmatrix} X_{21} & X_{22} \\ X_{23} & X_{24} \end{bmatrix},$$

$$X_3 = \begin{bmatrix} X_{31} & X_{32} \\ X_{33} & X_{34} \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 \\ 0 & Q_2 \end{bmatrix},$$

并记$Y = X_{11} H$, 利用定理1, 可得出式(25) 成立, 且满足

$$\int^{\infty} r_e^{\mathrm T} r_e \mathrm{d}t \le \beta^2 \int^{\infty} f^{\mathrm T}(t) f(t) \mathrm{d}t + \gamma^2 \int^{\infty} d^{\mathrm T}(t) d(t) \mathrm{d}t. \quad \square$$

根据定理2, 鲁棒故障诊断滤波器设计步骤为:

Step 1: 求解式(18), 得到H^*;

Step 2: 求解式(26), 得到最小的γ^*;

Step 3: 给定$\gamma \ge \gamma^*$, $\beta > 0$和$\bar h$, 求解LMI(25), 得$H = X_{11}^{-1} Y$;

Step 4: 若式(25) 有解, 则减小β, 返回Step 3; 若式(25) 无解, 则增大β, 返回Step 3.

4　仿真实例

考虑如下含有故障的不确定状态时滞系统:

$$\dot x(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.1 & 0 \end{bmatrix} x(t - h) + \begin{bmatrix} 0.8 \\ 0.9 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0.05 \\ 0.1 \end{bmatrix} f(t) + \begin{bmatrix} 0.01 \\ 0.01 \end{bmatrix} d(t),$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0.1 & -0.01 \\ 0.1 & -0.1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0.1 \\ -0.2 \end{bmatrix} f(t) + \begin{bmatrix} 0.02 \\ 0.01 \end{bmatrix} d(t), x(t) = 0, t \le 0.$$

按照3.2节步骤, 首先给定$\alpha = 6$, 利用Matlab工具箱中的求解器Feasp, 求解式(18) 可得

$$H^* = \begin{bmatrix} 30.2873 & 14.8936 \\ 18.2613 & 8.6306 \end{bmatrix}.$$

然后利用Matlab 工具箱中的求解器Mincx, 求解式(26), 可得最小的$\gamma^* = 0.102$.

现取$\gamma = 0.4$, $\beta = 0.5$, 滞后时间为$h = 0.8$, 利用Matlab 工具箱求解LMI式(25), 可得相应的状态观测器增益矩阵为

$$H = \begin{bmatrix} 0.5000 & 0.0000 \\ 0.8571 & -0.0714 \end{bmatrix}.$$

假设扰动为能量0.01 的白噪声, 且假定$\int^{\infty} d^{\mathrm T} d \mathrm{d}t = 0.8$, 则阈值为0.13; 故障信号为从1～5 s的单位方波信号, 残差函数为$\| r \|_{2,T}^2 = \int_{t_1}^{t_2} r^{\mathrm T}(t) r(t) \mathrm{d}t$, 其中$T = t_2 - t_1 = 10$ s, 可得仿真结果如图1～图3所示.

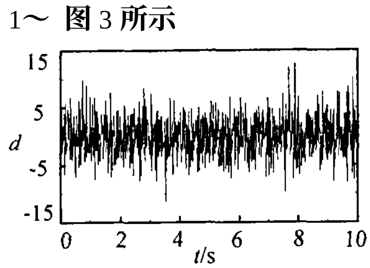

图1　扰动信号

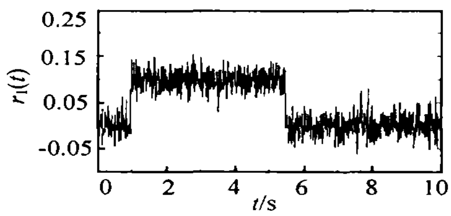

图 2 残差信号 r_1

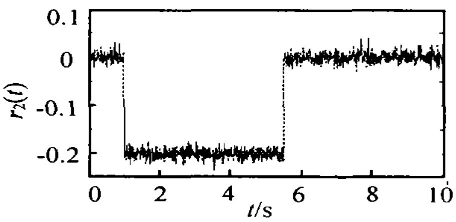

图 3 残差信号 r_2

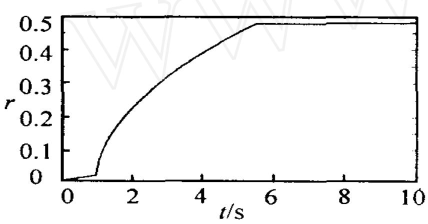

图 4 残差函数 $\|r\|^2_{2,T}$

仿真结果表明,本文的方法是可行和有效的.

5 结 语

本文研究了具有不确定性扰动的状态时滞系统的时滞依赖鲁棒故障诊断问题. 针对故障系统,借助于参考模型形成广义残差,然后利用对偶原理,并对此对偶系统应用 H_∞ 最优控制技术,给出了具有时滞依赖稳定的基于状态观测器的时滞系统 RFD 设计方法. 此观测器增益的存在是以 LMI 形式给出的,利用 Matlab 工具箱中的求解器可方便地求解,并通过仿真实例验证了该方法的有效性.

参考文献(References)

[1] Frank P M, Ding S X. Survey of Robust Residual Generation and Evaluation Methods in Observer-based Fault Detection Systems [J]. *Int J Process Control*, 1997, 7(6): 403-424.

[2] Patton R J, Chen J. Robust Fault Detection and Isolation (FDI) Systems [J]. *Control and Dynamic Systems*, 1996, 74(2): 171-224.

[3] Niemann H, Saberi A, Stoorvogel A A, et al. Exact, Almost and Delayed Fault Detection: An Observer Based Approach [J]. *Int J Robust and Nonlinear Control*, 1999, 9(2): 215-238.

[4] Kim J H, Park H B. H_∞ State Feedback Control for Generalized Continuous/discrete System [J]. *Automatic*, 1999, 35(6): 1443-1451.

[5] 王执铨,张登峰,孙金生. 基于 H_∞ 滤波器的离散时滞系统鲁棒故障检测方法[J]. *南京理工大学学报*, 2003, 27(5): 489-494.

(Wang Z Q, Zhang D F, Sun J S. Robust Fault Detection for Discrete Time-delay Systems Based on H_∞ Filter[J]. *J of Nanjing University of Science and Technology*, 2003, 27(5): 489-494.)

[6] 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.)

[7] Steven X Ding, Zhong M Y, Tang B Y, et al. An LMI Approach to the Design of Fault Detection Filter for Time-dealy LTI Systems with Unknown Inputs [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Arlington, 2001: 2137-2142.

[8] 俞立. *鲁棒控制线性矩阵不等式处理方法*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 199-207.

[9] Fridman E, Shaked U. New Bounded Real Lemma Representations for Time-delay Systems and Their Application [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(12): 1973-1979.

[10] Carlos E de Souza, Xi Li. Delay-Dependent Robust Control of Uncertain Linear State-delayed Systems [J]. *Atomatica*, 1999, 35(7): 1313-1321.

[11] Fridman E, Uri Shaked. A New H_∞ Filter Design for Linear Time Delay Systems [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2001, 49(11): 2839-2843.