

时滞依赖 H_2/H_∞ 观测器的线性系统故障检测

沈喆^{1†}, 邢俊雷², 杨光红³, 朱莹莹⁴

(1. 中科院沈阳自动化研究所机器人视觉研究组, 辽宁沈阳110016; 2. 空军装备部重点型号部, 北京100000;

3. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳110819; 4. 武警北京指挥学院信息技术与装备教研室, 北京100000)

摘要: 本文研究了线性连续时滞系统的鲁棒故障检测问题. 利用 H_2/H_∞ 故障检测方法, 设计了故障检测观测器, 并给出了时滞依赖的故障检测观测器设计条件. 本文直接给出刻画有限频故障检测性能的线性矩阵不等式条件, 避免因引入加权函数而产生的不准确性. 最后, 仿真算例表明时滞依赖的有限频故障检测观测器可以取得比已有结果更好的故障检测性能.

关键词: 故障检测; 时滞依赖; H_2/H_∞ 观测器; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Delay-dependent H_2/H_∞ observer design in fault detection for linear systems

SHEN Zhe^{1†}, XING Jun-lei², YANG Guang-hong³, ZHU Ying-ying⁴

(1. Robot Vision Group, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China;

2. Key Model Ministry of Air Force Armament Department, Beijing 100000, China;

3. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China;

4. Information Technology and Equipment Department, Beijing Armed Police Command College, Beijing 100000, China)

Abstract: This paper is concerned with the robust fault detection (FD) problem for linear continuous time-delay systems. Using H_2/H_∞ fault detection techniques, we design the fault detection observer and give the design conditions for the delay dependent FD observer. We provide linear matrix inequality conditions for finite frequency FD performance, and avoid the approximations associated with frequency weights. An example is given to show that, in comparison with existing results, the proposed delay-dependent FD observer can achieve better FD performance.

Key words: fault detection (FD); delay-dependent; H_2/H_∞ observer; linear matrix inequalities (LMIs)

1 引言(Introduction)

实际系统的外部扰动可能属于高频段, 也可能属于低频段. 但早期故障由于变化缓慢却常常属于低频段. 文献[1]等通过引入加权函数刻画干扰和故障的有限频特性, 设计故障检测系统. 但是, 设计加权函数会增加故障检测系统的复杂度, 而且使用加权函数来刻画频率范围往往是不准确的. 针对上述原因, Yang 和 Wang 等^[2]借助于文献[3]所提出的广义KYP(Kalman-Yakubovič-Popov)引理来描述故障和干扰的有限频特性, 直接描述了有限频性能指标.

在各类工业系统中, 时滞现象是极其普遍的, 文献[4]针对有限频域内连续多时滞系统状态反馈控制问题给出最小增益条件. 很多文献研究了时滞系统的故障检测问题^[5-6], 文献[6]研究了连续时滞系

统有限频鲁棒故障检测问题. 因此, 结合文献[4]将上述Yang和Wang等提出的有限频故障检测方法推广至线性时滞系统. 然而, 文献[6]没有考虑时滞对故障检测系统设计的影响, 只是给出了时滞独立的故障检测滤波器设计条件. 所以, 当时滞较小时, 文献[6]的方法将具有很大的保守性.

本文将文献[6]中的结果加以推广, 在有限频域内, 利用 H_2/H_∞ 故障检测方法, 考虑了连续时滞系统的故障检测观测器设计问题, 同时给出了时滞依赖的故障检测观测器设计条件. 最后, 与文献[6]中时滞独立方法相比较说明了本文方法的优越性.

2 问题描述和预备知识(Problem statement and preliminaries)

考虑如下线性连续时滞系统:

收稿日期: 2012-03-15; 收修稿日期: 2012-12-05.

[†]通信作者. E-mail: angelzheshen@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60974043, 60904010, 60804024); 国家创新研究群体科学基金资助项目(60821063); 中国国家“973”资助项目(2009CB320604); “111”计划资助项目(B08015); 国家教育部博士学科基金资助项目(20100042110027); 全国优秀博士学位论文基金资助项目(201157).

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t - \tau) + B_f f(t) + B_d d(t), \\ y(t) = Cx(t) + D_f f(t) + D_d d(t), \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 是状态向量, $y(t) \in \mathbb{R}^{n_y}$ 是测量输出, $d(t) \in \mathbb{R}^{n_d}$ 代表有界干扰输入, 满足 $d(t) \in L_2$, $f(t) \in \mathbb{R}^{n_f}$ 代表故障向量. A, A_d, B_f, B_d, C, D_f 和 D_d 是已知的具有合适维数的常值矩阵. τ 是未知常数时滞满足 $0 < \tau \leq \bar{\tau}$, 其中 $\bar{\tau}$ 表示时滞上界. 不失一般性, 假设 (A, C) 可观测.

本文采用如下形式的故障检测观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + A_d \hat{x}(t - \tau) + K(y(t) - \hat{y}(t)), \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t), \\ r(t) = y(t) - \hat{y}(t), \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\hat{x}(t) \in \mathbb{R}^n, \hat{y}(t) \in \mathbb{R}^{n_y}$ 分别表示状态和输出的估计向量, $r(t) \in \mathbb{R}^{n_r}$ 是残差信号. 设计观测器增益矩阵 K . 定义 $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$, 可以得到

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = \bar{A}e(t) + A_d e(t - \tau) + \bar{B}_f f(t) + \bar{B}_d d(t), \\ r(t) = Ce(t) + D_f f(t) + D_d d(t), \end{cases} \quad (3)$$

这里, $\bar{A} = A - KC, \bar{B}_d = B_d - KD_d, \bar{B}_f = B_f - KD_f$.

本文目标是设计观测器(2)使得下面的条件成立:

1) $\bar{A} = A - KC$ 是稳定的, (4)

2) $\sigma_{\min}(G_{rf}(j\omega)) > \beta_1, \forall \omega \in [-\omega_1, \omega_1]$, (5)

3) $\sigma_{\max}(G_{rd}(j\omega)) < \beta_2, \forall \omega \in [-\omega_2, \omega_2]$, (6)

其中:

$$G_{rf}(s) = C(sI - \bar{A} - e^{-\tau s} A_d)^{-1} \bar{B}_f + D_f,$$

$$G_{rd}(s) = C(sI - \bar{A} - e^{-\tau s} A_d)^{-1} \bar{B}_d + D_d.$$

注 1 条件(5)和(6)是两个有限频性能指标, 分别用来度量故障敏感性和干扰鲁棒性. ω_1, ω_2 是两个已知的实数分别代表故障和干扰的频率范围.

本文采用文献[4]中结果. 给定线性时滞系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t - d) + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t) + Du(t), \end{cases} \quad (7)$$

这里, $u(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ 是控制输入, A, A_d, B, C, D 是已知具有合适维数的常数矩阵, 标量 $d > 0$ 是未知常数时滞满足 $0 < d \leq \bar{d}$, 其中 \bar{d} 是正常数表示时滞上界.

从 $u(t)$ 到 $y(t)$ 的传递函数为

$$G(s) = C(sI - A - e^{-ds} A_d)^{-1} B + D. \quad (8)$$

定义 1 对于线性连续时滞系统(7), 传递函数

$G(s)$ 的有限频 H_2 指标定义为

$$\|G(s)\|_- := \inf_{\omega} \sigma_{\min}(G(j\omega)), \forall \omega \in \Omega,$$

其中: σ_{\min} 代表最小奇异值, Ω 是一个实数子集.

注意到定义 1 中给出的 H_2 指标不是一个矩阵范数, 但是它给出了一个有效的最小敏感性量度. 这里, 用它来量度最小故障敏感度.

引理 1^[4] 考虑系统(7), 传递函数为(8), 给定矩阵 Φ, Ψ, Ψ_0 和 $\Pi \in H_{n_y+n_\omega}$, 当时滞 d 满足 $0 < d \leq \bar{d}$, 如果存在埃尔米特矩阵 $P, Q > 0$, 以及 $X_1 = X_1^*, Z_1 = Z_1^* > 0$ 满足不等式条件

$$\begin{bmatrix} A & A_d & B \\ I & 0 & 0 \end{bmatrix}^* (\Phi \otimes P + \Psi \otimes Q + \Psi_0 \otimes \bar{d}Z_1) \begin{bmatrix} A & A_d & B \\ I & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 & D \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}^* \Pi \begin{bmatrix} C & 0 & D \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 + Z_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} < 0, \quad (9)$$

则有限频不等式

$$\begin{bmatrix} G(j\omega) \\ I \end{bmatrix}^* \Pi \begin{bmatrix} G(j\omega) \\ I \end{bmatrix} < 0, \forall \omega \in \Omega \quad (10)$$

成立. 其中:

$$X_1 = \begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ * & -X_1 \end{bmatrix}, Z_1 = \begin{bmatrix} -\bar{d}^{-1}Z_1 & \bar{d}^{-1}Z_1 \\ * & -\bar{d}^{-1}Z_1 \end{bmatrix}.$$

基于引理 1, 下面将给出保证时滞系统(7) H_2 性能成立的 LMI 条件.

引理 2 考虑系统(7), 传递函数为式(8), 给定矩阵 Φ, Ψ, Ψ_0 和 $\Pi = \begin{bmatrix} -I & 0 \\ 0 & \beta^2 I \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(n_y+n_\omega) \times (n_y+n_\omega)}$, 如果存在埃尔米特矩阵 $P, Q > 0$, 以及 $X_1 = X_1^*, Z_1 = Z_1^* > 0$ 使得不等式(9)成立, 则有限频不等式

$$\sigma_{\min}(G(j\omega)) > \beta, \forall \omega \in \Omega \quad (11)$$

成立, 其中 β 是一个正实变量.

证 同文献[5]中定理 1.

3 主要结果(Main results)

3.1 故障敏感性条件(Fault sensitivity condition)

取式(3)中的干扰 $d(t) = 0$, 得到

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = \bar{A}e(t) + A_d e(t - \tau) + \bar{B}_f f(t), \\ r(t) = Ce(t) + D_f f(t). \end{cases} \quad (12)$$

定理 1 考虑系统(12), 给定正实数 ω_1 , 取 $\Pi_1 = \begin{bmatrix} -I & 0 \\ 0 & \beta_1^2 I \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(n_r+n_f) \times (n_r+n_f)}$, 给定 $\Phi = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \Psi_0$

$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 和 $\Psi_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & \varpi_1^2 \end{bmatrix}$, $\beta_1 > 0$. 如果存在具有合适维数的对称矩阵 $P_1, Q_1 > 0, Z_1 > 0$ 和矩阵 X_1, W, V_{f1}, V_{f2} 和 \mathcal{K} 满足线性矩阵不等式

$$T \begin{bmatrix} \Delta_1 & P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & \varpi_1^2 Q_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & \beta_1^2 I & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \Delta_2 & \Delta_3 \\ * & * & * & * & * & \Delta_4 \end{bmatrix} T^* < \text{He} \left(\begin{bmatrix} WR_1 \\ V_{f1} \\ V_{f2} \\ \Delta_5 \\ \Delta_6 \\ \Delta_7 \end{bmatrix} \right), \tag{13}$$

则对满足 $0 < \tau \leq \bar{\tau}$ 的任意时滞 τ 存在一个观测器(2)使得不等式条件

$$\sigma_{\min}(G_{rf}(j\omega)) > \beta_1, \forall \omega \in [-\varpi_1, \varpi_1] \tag{14}$$

成立. 其中 R_1 是事先给定的适合矩阵.

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= -Q_1 + \bar{\tau}Z_1, \Delta_2 = X_1 - \bar{\tau}^{-1}Z_1, \\ \Delta_3 &= \bar{\tau}^{-1}Z_1, \Delta_4 = -X_1 - \bar{\tau}^{-1}Z_1, \\ \Delta_5 &= -A^*WR_1 + C^*\mathcal{K}R_1 - V_{f1} - C^*V_{f2}, \\ \Delta_6 &= -A_d^*WR_1, \\ \Delta_7 &= -B_f^*WR_1 + D_f^*\mathcal{K}R_1 - D_f^*V_{f2}. \end{aligned}$$

此时, 观测器(2)的增益可由下式得到:

$$\begin{aligned} \mathcal{K} &= K^*W, \\ [M_1 \ M_2 \ M_3 \ M_4 \ M_5 \ M_6]T &= \\ [M_1 \ M_2 \ M_3 \ M_6 \ M_4 \ M_5]. \end{aligned} \tag{15}$$

这里矩阵 M_1, M_2, M_3, M_4, M_5 和 M_6 的维数分别为 n, n, n_r, n, n_f 和 n .

证 由引理2, 可得式(14)成立的充分条件是

$$[\mathcal{M}_1 \ I]T\Delta T^*[\mathcal{M}_1 \ I]^* < 0 \tag{16}$$

成立, 其中:

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_1 &= \begin{bmatrix} A^* - C^*K^* & I & C^* \\ A_d^* & 0 & 0 \\ B_f^* - D_f^*K^* & 0 & D_f^* \end{bmatrix}, \\ \Delta &= \begin{bmatrix} \Phi \otimes P + \Psi_1 \otimes Q + \Psi_0 \otimes \bar{\tau}Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & \Pi_1 & 0 \\ 0 & 0 & X_1 + Z_1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

定义 $\mathcal{Q} = T\Delta T^*$, $\mathcal{H} = \begin{bmatrix} I \\ -\mathcal{M}_1 \end{bmatrix}$, 根据Finsler引理, 条件(16)等价于下列不等式:

$$T\Delta T^* < \text{He}(\mathcal{H}\mathcal{X}). \tag{17}$$

\mathcal{X} 是一限制乘子, 为使问题可解, 限制 \mathcal{X} 的形式为

$$\mathcal{X} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} WR_1 + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} V_f, \tag{18}$$

其中: $W \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是满秩方阵, 待选矩阵 $V_f \in \mathbb{R}^{(n+n_r) \times (4n+n_f+n_r)}$ 且 $R_1 \in \mathbb{R}^{n \times (4n+n_f+n_r)}$. R_1 的选取标准参考文献[7].

于是定义 $\mathcal{K} = K^*W$ 和 $V_f = \begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \end{bmatrix}$, 经过矩阵运算, 可以得出式(17)可化简为条件(13). 证毕.

注 2 如果 R_1 给定, 则定理1中的式(13)就是关于变量 $P_1, Q_1, X_1, Z_1, W, V_{f1}, V_{f2}$ 和 \mathcal{K} 的线性矩阵不等式, 因此数值上可解. 实际上, 定理1结论保守性的大小与 R_1 的选取有关.

3.2 干扰抑制条件(Disturbance robustness condition)

令故障 $f(t) = 0$, 则系统(3)变为

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = \bar{A}e(t) + A_d e(t - \tau) + \bar{B}_d d(t), \\ r(t) = Ce(t) + D_d d(t). \end{cases} \tag{19}$$

定理 2 考虑系统(19), 给定正实数 ϖ_2 , 取 $\Pi_2 = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & -\beta_2^2 I \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(n_r+n_d) \times (n_r+n_d)}$, $\Psi_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & \varpi_2^2 \end{bmatrix}$, $\Phi, \Psi_0, \beta_2 > 0$. 如果存在具有合适维数的对称矩阵 $P_2, Q_2 > 0, Z_1 > 0$ 和矩阵 X_1, W, V_{f1}, V_{f2} 和 \mathcal{K} 满足不等式

$$T \begin{bmatrix} \Delta'_1 & P_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & \varpi_2^2 Q_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -\beta_2^2 I & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \Delta_2 & \Delta_3 \\ * & * & * & * & * & \Delta_4 \end{bmatrix} T^* < \text{He} \left(\begin{bmatrix} WR_2 \\ V_{f1} \\ V_{f2} \\ \Delta'_5 \\ \Delta'_6 \\ \Delta'_7 \end{bmatrix} \right), \tag{20}$$

则不等式条件

$$\sigma_{\max}(G_{rd}(j\omega)) < \beta_2, \forall \omega \in [-\varpi_2, \varpi_2] \tag{21}$$

成立. R_2 是事先给定的适合矩阵.

$$\begin{aligned} \Delta'_1 &= -Q_2 + \bar{\tau}Z_1, \Delta'_6 = -A_d^*WR_2, \\ \Delta'_5 &= -A^*WR_2 + C^*\mathcal{K}R_2 - V_{f1} - C^*V_{f2}, \\ \Delta'_7 &= -B_f^*WR_2 + D_f^*\mathcal{K}R_2 - D_f^*V_{f2}. \end{aligned}$$

证 同定理1.

3.3 稳定性条件(Stability condition)

引理 3^[4] 考虑系统(7), 传递函数为(8), 给定矩阵 Φ, Ψ 和 Ψ_0 , 如果存在埃尔米特矩阵 $P_s = P_s^* > 0, X_2 = X_2^* > 0, Z_2 = Z_2^* > 0$ 满足不等式条件

$$\begin{bmatrix} A & A_d \\ I & 0 \end{bmatrix}^* (\Phi \otimes P_s + \Psi_0 \otimes \bar{\tau} Z_2) \begin{bmatrix} A & A_d \\ I & 0 \end{bmatrix} + X_2 + Z_2 < 0, \quad (22)$$

则对任意时滞 τ 满足 $0 < \tau \leq \bar{\tau}$ 系统渐近稳定. 其中:

$$X_2 = \begin{bmatrix} X_2 & 0 \\ * & -X_2 \end{bmatrix}, Z_2 = \begin{bmatrix} -\bar{\tau}^{-1} Z_2 & \bar{\tau}^{-1} Z_2 \\ * & -\bar{\tau}^{-1} Z_2 \end{bmatrix}.$$

定理 3 考虑系统(3), 给定 Φ, Ψ_0 . 如果存在对称矩阵 $P_s > 0, X_2 > 0, Z_2 > 0$ 和矩阵 W 和 \mathcal{K} 使得下列不等式条件成立:

$$\Xi < \text{He} \left(\begin{bmatrix} W \\ -A^*W + C^*\mathcal{K} \\ -A_d^*W \end{bmatrix} [-qI \ pI \ 0] \right), \quad (23)$$

则对满足 $0 < \tau \leq \bar{\tau}$ 的任意时滞 τ 存在一个观测器(2)使得 \bar{A} 稳定. 其中: R_s 为事先给定的适合矩阵, $\mathcal{K} = K^*W$, p 和 q 是任意固定实数满足 $qp + pq < 0$,

$$\Xi = \begin{bmatrix} \bar{\tau} Z_2 & P_s & 0 \\ * & X_2 - \bar{\tau}^{-1} Z_2 & \bar{\tau}^{-1} Z_2 \\ * & * & -X_2 - \bar{\tau}^{-1} Z_2 \end{bmatrix}.$$

证 由引理3, 可得条件(22)成立的充分条件

$$\begin{bmatrix} \bar{A} & A_d \\ I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}^* \Xi \begin{bmatrix} \bar{A} & A_d \\ I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} < 0. \quad (24)$$

因为 $\begin{bmatrix} I \\ -\bar{A}^* \\ -A_d^* \end{bmatrix}$ 核空间的基矩阵是 $\begin{bmatrix} \bar{A}^* & I & 0 \\ A_d^* & 0 & I \end{bmatrix}$, 应用

Finsler引理, 得到式(24)成立的一个充分条件

$$\Xi < \text{He} \left(\begin{bmatrix} I \\ -\bar{A}^* \\ -A_d^* \end{bmatrix} W R_s \right), \quad (25)$$

其中 $R_s = [-qI \ pI \ 0]$, 选取 W 与定理1和定理2保持一致, 则式(25)可化简为式(23). 证毕.

3.4 故障检测观测器设计(Fault detection observer design)

根据定理1-3, 给定 β_2 , 观测器(2)的增益矩阵 K 可以通过求解如下的最优化问题得到:

$$\begin{aligned} \max \quad & \beta_1, \\ \text{s.t.} \quad & \text{式(13)(20)(23)}. \end{aligned} \quad (26)$$

4 仿真算例(Example)

考虑系统(1)参数如下:

$$A = \begin{bmatrix} -0.1331 & 0.7717 \\ -0.8811 & -0.4880 \end{bmatrix},$$

$$A_d = \begin{bmatrix} -0.4249 & 0.1824 \\ -0.5521 & 0.1287 \end{bmatrix},$$

$$B_f = \begin{bmatrix} 0.7319 \\ -0.5607 \end{bmatrix}, B_d = \begin{bmatrix} -0.3975 \\ 0.1741 \end{bmatrix},$$

$$C = [0.3375 \ 0.3538], D_f = 0.8041, D_d = 0.0475.$$

故障和扰动的频率范围分别为 $\omega \in [-0.01, 0.01]$ 及 $\omega \in [-0.05, 0.05]$. 取

$$q = -1, p = 1, \beta_2 = 0.2,$$

$$R_1 = [I_2 \ I_2 \ R_{13} \ I_2 \ R_{15} \ 0], R_{13} = \begin{bmatrix} -4 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$R_{15} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, R_2 = [R_{21} \ R_{22} \ 0 \ I_2 \ 0 \ 0],$$

$$R_{21} = R_{22} = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}.$$

解优化问题(26), 得到观测器增益矩阵 $K = [0.9134 \ -1.6114]^T$ 和 $\beta_1 = 0.6313$. 如果采用文献[6]中的时滞独立方法, 则得到观测器增益矩阵 $K = [0.4007 \ 1.5474]^T$ 和 $\beta_1 = 0.1200$.

为了进一步验证本文所提方法的有效性, 现给出如下仿真结果: 假设 $\tau = 1$, 未知干扰输入 $d(t) = \sin(0.05t)$. 故障向量 $f(t) = 5, t \geq 6\text{s}$, 其他时间 $f(t) = 0$. 图1中的实线和虚线分别表示了时滞依赖和时滞独立方法得到的残差响应.

这里, 残差估计函数 $J(t)$ 取为

$$J(t) = (t^{-1} \int_0^t r^T(\tau)r(\tau)d\tau)^{1/2}, \quad (27)$$

其中 t 代表检测区间. 利用上式得出阈值 $J_{th} = 0.6265$. 图2给出了时滞依赖和时滞独立方法得到的残差估计函数.

从图1和图2可以看出, 与时滞独立方法相比较, 时滞依赖有限频方法取得了很好的故障敏感性. 由于故障幅值比较大, 时滞独立方法仍然有效. 但是, 如果假设故障 $f(k) = 1.5, t \geq 6\text{s}$, 其他时间 $f(k) = 0$. 其残差估计的仿真结果在图3中给出. 可以看出时滞独立方法不能够检测幅值很小的故障, 然而本文提出的时滞依赖方法仍然有效.

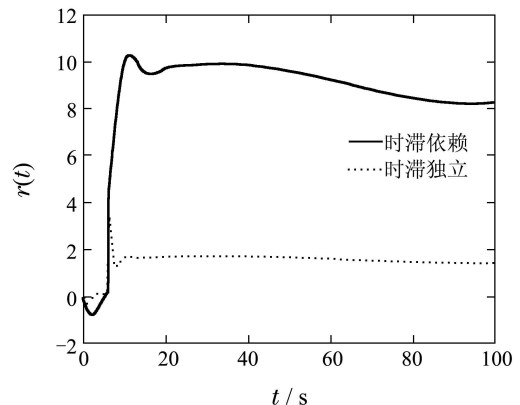


图 1 不同方法的残差输出

Fig. 1 Residual output for different approaches

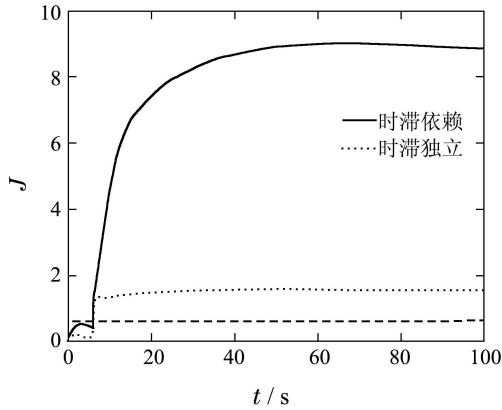


图2 不同方法的残差估计

Fig. 2 Residual evaluation for different approaches

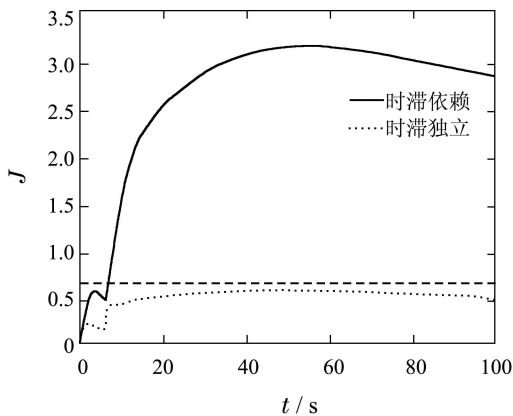


图3 不同方法的残差估计

Fig. 3 Residual evaluation for different approaches

5 结论(Conclusions)

本文给出了有限频故障检测时滞依赖观测器设计的直接方法,避免了加权函数带来的不确定性.利用 H_2/H_∞ 方法,将有限频故障检测问题转化为设计时滞依赖观测器问题.通过一系列线性矩阵不等式给出所要设计的时滞依赖观测器的充分条件.最后

通过仿真算例验证了所提方法的优越性.

参考文献(References):

- [1] ZHONG M, YE H, SHI P, et al. Fault detection for markovian jump systems [J]. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 2005, 152(4): 397 – 402.
- [2] YANG G H, WANG H, XIE L H. Fault detection for output feedback control systems with actuator stuck faults: a steady-state-based approach [J]. *International Journal of Robust Nonlinear Control*, 2010, 20(15): 1739 – 1757.
- [3] IWASAKI T, HARA S, YAMAUCHI H. Dynamical system design from a control perspective: finite frequency positive-realness approach [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(8): 1337 – 1354.
- [4] ZHANG X N, YANG G H. Delay-dependent state feedback control with small gain conditions in finite frequency domains [J]. *International Journal of Systems Science*, 2011, 42(3): 369 – 375.
- [5] 沈喆, 杨光红, 孙鹏. 时滞依赖 H_∞ 滤波器的有限频故障检测方法 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(7): 940 – 944. (SHEN Zhe, YANG Gunghong, SUN Peng. Fault detection approach in finite frequency domain based on delay-dependent H_∞ filter [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(7): 940 – 944.)
- [6] LI X J, YANG G H. Fault detection observer design in low finite frequency domain for linear time-delay systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(11): 1465 – 1469.
- [7] ZHANG X N, YANG G H. Dynamic output feedback control with finite frequency specifications for time-delay systems [C] // *Process of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*. Cancun, Mexico: IEEE, 2008: 3559 – 3564.

作者简介:

沈喆 (1980–), 女, 博士, 做博士后研究, 研究方向为视频异常事件检测、控制系统的故障诊断, E-mail: angelzheshen@163.com;

邢俊雷 (1980–), 男, 博士, 参谋, 目前研究方向为计算机科学与技术, E-mail: xingjunlei@163.com;

杨光红 (1963–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为鲁棒控制、故障诊断, E-mail: yangguanghong@ise.neu.edu.cn;

朱莹莹 (1983–), 女, 硕士, 讲师, 目前研究方向为信息技术与装备, E-mail: zhuyingying@163.com.