文章编号: 1001-0920(2006)05-0550-05

线性时滞系统故障检测滤波器设计H_∞优化方法

马传峰, 钟麦英, 何 宁
(山东大学 控制科学与工程学院, 济南 250061)

摘 要: 研究一类线性时滞系统的基于观测器的故障检测滤波器设计问题. 通过对线性时滞系统进行广义坐标变换, 得到了只包含输入、输出时滞, 无状态时滞的新的系统表达形式. 在此基础上, 选用基于观测器的故障检测滤波器作为残差产生系统, 使得到的残差动态方程为仅包含未知输入时滞和故障时滞的线性时不变形式, 进而可应用已取得的线性时不变系统故障诊断研究成果设计故障检测滤波器. 同时给出一种线性时滞系统故障检测滤波器设计的H_∞优化设计方法, 并通过算例验证了所提方法的有效性.

关键词: 故障检测; 滤波器; 广义坐标变换; 时滞系统; H_∞优化
中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

H_∞ Approach to Fault Detection Filter for Linear Time-delay Systems

MA Chuan-feng, ZHONG Mai-ying, HE Ning
(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China. Correspondent: ZHONG Mai-ying, E-mail: myzhong@sdu.edu.cn)

Abstract: Observer-based fault detection filter problem for a class of linear time-delay systems is studied. The key of this study is the introduction of a generalized coordinate change such that in the new coordinates all the time-delay terms are injected by the system input and output. Based on the new obtained system expression, an observer-based fault detection filter (FDF) is considered as the residual generator, while the dynamics of the residual is changed into a general linear time invariant form with unknown input and fault time-delay terms. The FDF problem can be solved by applying approaches to general LTI systems. An H_∞ approach is developed and a numerical example is given to illustrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: Fault detection; Filter; Generalized coordinate transformation; Time-delay systems; H_∞ optimization

1 引 言

近20多年来, 基于解析模型的故障检测(FD)理论受到了国内外控制界的高度重视, 并取得了大量研究成果[1~3]. 常见的有未知输入观测器方法, 等价空间方法, H_2与H_∞优化方法等, 但这些成果大多是关于无时滞系统的研究.

时滞现象广泛存在于现实的许多控制系统中, 如机械、化工、通信等领域, 有关时滞系统的研究已引起越来越多学者的广泛关注, 但关于时滞系统故障检测问题的研究还很不深入[4~7]. 文献[4]未考虑系统所受的外部扰动影响; 文献[5]研究了时滞系统的故障检测滤波器(FDF)设计问题, 并将其归结为两目标非线性规划问题, 但只能应用数值方法求解; 文献[6]研究了线性时不变(LTI)时滞系统的FDF设计线性矩阵不等式方法, 但其中的加权矩阵选择对FDF性能影响较大; 文献[7]结合应用特征结构配置方法和H_∞优化技术, 得到了一类时滞系统的FDF设计方法.

收稿日期: 2005-03-28; **修回日期**: 2005-06-03.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60374021); 山东省自然科学基金项目(Y2002G05); 教育部留学回国人员基金项目.
作者简介: 马传峰(1965—), 男, 济南人, 博士生, 从事故障诊断与容错控制等研究; 钟麦英(1965—), 女, 山东博兴人, 教授, 博士生导师, 从事故障诊断与容错控制等研究.

本文将首先对线性时滞系统进行广义坐标变换[8], 并在新的坐标系下构造基于观测器的残差产生器, 使得到的残差动态方程转换为一般的 LTI 形式, 进而可以将 LTI 系统故障检测研究成果应用于时滞系统 FDF 设计. 文中给出了一种 FDF 设计的 H_∞ 最优化方法, 并通过算例验证了该方法的有效性.

2　问题描述

考虑线性时滞系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + \sum_{i=1}^{N} A_i x(t-\tau_{xi}) + Bu(t) + \\ \qquad \sum_{l=1}^{L} B_l u(t-\tau_{ul}) + B_f f(t) + B_w w(t), \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + D_f f(t) + D_w w(t), \\ x(t) = 0,\ t \le 0. \end{cases} \tag{1}$$

其中: $u(t) \in R^p$, $w(t) \in R^{k_d}$, $f(t) \in R^{k_f}$ 分别为系统的控制输入、未知输入和故障向量; $A, A_i (i=1,2,\cdots,N), B, B_l (l=1,2,\cdots,L), B_w, B_f, C, D, D_w, D_f$ 分别为适当维数的已知矩阵. 记

$$Q_k(d) = \begin{bmatrix} C(d) \\ C(d)A(d) \\ \vdots \\ C(d)A^{k-1}(d) \end{bmatrix},$$

其中

$$A(d) = A + \sum_{i=1}^{N} A_i d_i,\ C(d) = C + \sum_{i=1}^{N} C_i d_i,$$

算子 d_i, d_j 定义为

$$\begin{aligned} &d = \{d_i\},\ d_i x(t) = x(t-\tau_i), \\ &d_i d_j x(t) = x(t-\tau_i-\tau_j), \\ &\qquad i, j = 1,2,\cdots,N. \end{aligned} \tag{2}$$

对于复数集合 $z = \{z_i\}, i = 1,2,\cdots,N$, 其中 z_i 为任意复数. 用 $z_i \in z$ 代替算子 d_i, 在满足 $Q_k(z)$ 列满秩的条件下, 文献[8] 介绍了一种广义坐标变换 $\xi(t) = T(d)x(t)$, 使系统(1) 可变换为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{\xi}(t) = \bar{A}\xi(t) + \bar{F}(d)y(t) + T(d)B(d)u(t) + \\ \qquad T(d)B_w w(t) + T(d)B_f f(t), \\ y(t) = \bar{C}\xi(t) + Du(t) + D_w w(t) + D_f f(t). \end{cases} \tag{3}$$

其中

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & I_m & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & I_m \\ & & & 0 \end{bmatrix},\ \bar{C} = [I_m \quad 0 \quad \cdots \quad 0],$$

$\xi(t) \in R^{n_\xi}$, $n_\xi \ge n$, $T(d)$ 是 d 的多项式矩阵, 并且

$$\begin{aligned} &T(d) = [T_1^{\mathrm{T}}(d) \quad \cdots \quad T_k^{\mathrm{T}}(d)]^{\mathrm{T}}, \\ &T_1(d) = C(d), \\ &T_{i+1}(d) = T_i(d)A(d) - \bar{F}_i(d)C(d), \\ &[\bar{F}_k(d) \quad \cdots \quad \bar{F}_1(d)] = C(d)A^k(d)Q_k^L(d), \\ &\bar{F}(d) = [\bar{F}_1^{\mathrm{T}}(d) \quad \cdots \quad \bar{F}_k^{\mathrm{T}}(d)]^{\mathrm{T}}, \\ &\qquad i = 1,\cdots,k-1, \end{aligned} \tag{4}$$

$Q_k^L(z)$ 是 $Q_k(z)$ 的左逆矩阵, $k \le n$ 为对于 $z_i \in z$ 满足 $Q_k(z)$ 为列满秩的最小正整数.

残差产生是故障检测的主要任务, 本文使用基于观测器的 FDF 作为残差产生系统, 即

$$\begin{cases} \dot{\hat{\xi}}(t) = \bar{A}\hat{\xi}(t) + \bar{F}(d)y(t) + \\ \qquad T(d)B(d)u(t) + H(y - \hat{y}), \\ \hat{y}(t) = \bar{C}\hat{\xi}(t) + Du(t), \\ r(t) = R(s)(y(t) - \hat{y}(t)). \end{cases} \tag{5}$$

其中: $\hat{\xi}(t) \in R^{n_\xi}$, r 为产生的残差, $R(s)$ 为稳定的后置滤波器, 观测器增益矩阵 H 和 $R(s)$ 是要设计的 FDF 参数. 令 $e(t) = \xi(t) - \hat{\xi}(t)$, 由式(3)～(5) 得

$$\begin{cases} \dot{e} = (\bar{A} + H\bar{C})e + (T(d)B_w - \\ \qquad HD_w)w + (T(d)B_f - HD_f)f, \\ r = R(s)(\bar{C}e + D_w w + D_f f). \end{cases} \tag{6}$$

理想的残差产生器应满足 $r = 0$ 当且仅当 $f = 0$, 即未知输入全解耦. 然而, 由于时滞的存在, 很难求得使系统(6) 实现残差 r 对未知输入 w 完全解耦的 H 和 $R(s)$. 本文将考虑在不可能实现未知输入完全解耦的情况下, 如何求 H 和 $R(s)$ 使系统(6) 渐近稳定, 并满足

$$\min_{R(s),H} J = \min_{R(s),H} \frac{\|G_{r,w}\|_\infty}{\|G_{r,f}\|_\infty}, \tag{7}$$

其中: G_{rw}, G_{rf} 分别表示从 w 和 f 到 r 的映射, 且

$$\|G_{r,w}\|_\infty =: \sup_{\|w\|_2 \ne 0, f=0} \frac{\|r\|_2}{\|w\|_2},$$

$$\|G_{r,f}\|_\infty =: \sup_{\|f\|_2 \ne 0, w=0} \frac{\|r\|_2}{\|f\|_2}.$$

注 1　与传统的基于全阶观测器的残差产生器相比较, 该残差产生器具有如下特点: 1) 选取较高维数的观测器用于估计状态 $x(t)$ 以及状态的滞后项 $T(d)x(t)$, 观测器的系统矩阵 $\bar{A}$ 为已知矩阵; 2) 在观测器(5) 中, 除包含输出估计误差项 $H(y-\hat{y})$ 外, 还引入了输出滞后项 $\bar{F}(d)y(t)$ 和输入滞后项 $T(d)B(d)u(t)$; 3) 估计误差方程(6) 中不包含状态估计误差的时滞项, 从而可以考虑应用一般线性时不变系统 FDF 方法求解 H 和 $R(s)$.

3　故障检测滤波器的设计

考虑到 $T(d)$ 是滞后算子 d 的多项式矩阵, 可以进一步将 $T(d)B_w w$ 表示成

$$T(d)B_w w =$$

$$[T_{w0}\quad T_{w1}\quad \cdots\quad T_{w\bar N_w}]\begin{bmatrix} w(t)\\ w(t-\hat\tau_{w1})\\ \vdots\\ w(t-\hat\tau_{w\hat N_w})\end{bmatrix},$$

$$T(d)B_f f =$$

$$[T_{f0}\quad T_{f1}\quad \cdots\quad T_{f\bar N_f}]\begin{bmatrix} f(t)\\ f(t-\hat\tau_{f1})\\ \vdots\\ f(t-\hat\tau_{f\hat N_f})\end{bmatrix},$$

其中: $\bar N$, T_i, $\hat\tau_i(i=1,2,\cdots,\bar N)$ 的确定可参考例 1.

例 1 已知

$$T(d)=\begin{bmatrix}1 & 2+d_1\\ d_1d_2 & 1+d_1d_2+d_2^2\end{bmatrix},B_w=\begin{bmatrix}-1\\1\end{bmatrix},$$

则有

$$T(d)B_ww=\begin{bmatrix}1+d_1\\1+d_2^2\end{bmatrix}=[T_{w0}\quad T_{w1}\quad T_{w2}]\hat w,$$

其中

$$[T_{w0}\quad T_{w1}\quad T_{w2}]=\begin{bmatrix}1&1&0\\1&0&1\end{bmatrix},$$

$$\hat w=\begin{bmatrix}w(t)\\ w(t-\tau_1)\\ w(t-2\tau_2)\end{bmatrix}.$$

对于系统(6), 记

$$B_{\hat w}=[T_{w0}\quad T_{w1}\quad\cdots\quad T_{w\bar N_w}],$$

$$\hat w=[w^{\mathrm T}(t)\quad w^{\mathrm T}(t-\hat\tau_1)\quad\cdots\quad w^{\mathrm T}(t-\hat\tau_{\bar N_w})]^{\mathrm T},$$

$$B_{\hat f}=[T_{f0}\quad T_{f1}\quad\cdots\quad T_{f\bar N_f}],$$

$$\hat f=[f^{\mathrm T}(t)\quad f^{\mathrm T}(t-\hat\tau_1)\quad\cdots\quad f^{\mathrm T}(t-\hat\tau_{\bar N_f})]^{\mathrm T},$$

$$D_{\hat w}=[D_w\quad 0\quad\cdots\quad 0],$$

$$D_{\hat f}=[D_f\quad 0\quad\cdots\quad 0],$$

则式(6) 可进一步表示为

$$\begin{cases}\mathring e=(\bar A-H\bar C)e+(B_{\hat w}-\\ \qquad HD_{\hat w})\hat w+(B_{\hat f}-HD_{\hat f})\hat f,\\ r=R(s)(\bar Ce+D_{\hat w}\hat w+D_{\hat f}\hat f).\end{cases}\tag{8}$$

若 $w(t)=0(t<0)$, $f(t)=0(t<0)$, 则

$$\|\hat w\|_2=(\bar N_w+1)^{1/2}\|w\|_2,$$

$$\|\hat f\|_2=(\bar N_r+1)^{1/2}\|f\|_2,$$

从而

$$\frac{\|G_{r,\hat w}(s)\|_\infty}{\|G_{r,\hat f}(s)\|_\infty}=$$

$$\frac{(\bar N_f+1)^{1/2}}{(\bar N_w+1)^{1/2}}\times\frac{\sup\limits_{\|w\|_2\neq 0,f=0}\dfrac{\|r\|_2}{\|w\|_2}}{\sup\limits_{\|f\|_2\neq 0,w=0}\dfrac{\|r\|_2}{\|f\|_2}}=$$

$$\frac{(\bar N_f+1)^{1/2}}{(\bar N_w+1)^{1/2}}\times\frac{\|G_{r,w}\|_\infty}{\|G_{r,f}\|_\infty},$$

其中: $G_{r,\hat w}(s)$, $G_{r,\hat f}(s)$ 分别表示从 $\hat w$, $\hat f$ 到 r 的传递函数矩阵. 因此, 时滞系统 FDF 问题可进一步归结为求 H, $R(s)$, 使系统(8) 渐近稳定并满足最优化问题

$$\min_{H,V}J=\min_{H,V}\frac{\|G_{r,\hat w}\|_\infty}{\|G_{r,\hat f}\|_\infty}.\tag{9}$$

下面的引理 1 提供了求解该问题的 H_∞ 优化算法.

引理 1[9] 对于残差系统

$$r(s)=R(s)[G_{\hat w}(s)w(s)+G_{\hat f}(s)f(s)],$$

其中

$$G_{\hat w}(s)=C(sI-A+HC)^{-1}(B_w-HD_w),$$

$$G_{\hat f}(s)=C(sI-A+HC)^{-1}(B_f-HD_f).$$

假设 (A, C) 可检测, $\begin{bmatrix}A-\mathrm j\omega I & B_w\\ C & D_w\end{bmatrix}$, $\forall\omega\in[0,\infty)$ 为行满秩, 则最优化问题

$$\min_{H,R(s)}J=\min_{R(s)\in RH_\infty,H}\frac{\|R(s)G_{\hat w}(s)\|_\infty}{\|R(s)G_{\hat f}(s)\|_\infty}\tag{10}$$

存在如下解:

$$H^*=(B_wD_w^{\mathrm T}+YC^{\mathrm T})Q^{-1},$$

$$R^*(s)=Q^{1/2},Q=D_wD_w^{\mathrm T},\tag{11}$$

且对应的 $R(s)G_{\hat w}(s)$ 为互内矩阵(co-inner), 其中 $Y\geq 0$ 满足 Riccati 方程

$$Y(A-B_wD_w^{\mathrm T}Q^{-1}C)^{\mathrm T}+(A-B_wD_w^{\mathrm T}Q^{-1}C)Y-$$
$$YC^{\mathrm T}Q^{-1}CY+B_w(I-D_w^{\mathrm T}Q^{-1}D_w)B_w^{\mathrm T}=0.$$

引理 2[10] 对于任意使 $A-HC$ 稳定的观测器增益矩阵 H, 如果式(11) 中的 $(H^*, R^*(s))$ 是最优化问题(10) 的解, 则存在如下的后置滤波器:

$$R_h(s)=Q^{-1/2}(I+C(sI-A+$$
$$H^*C)^{-1}(H-H^*)),$$

使 $(H, R_h(s))$ 也为最优化问题(10) 的解.

根据引理 1 和引理 2 可得本文的主要结论:

定理 1 对于残差系统(6), 如果

$$\begin{bmatrix}\bar A-\mathrm j\omega I & B_{\hat w}\\ \bar C & D_{\hat w}\end{bmatrix},\ \forall\omega\in[0,\infty)$$

行满秩, 则存在满足最优化问题(7) 的 FDF

$$H^*=(B_{\hat w}D_{\hat w}^{\mathrm T}+YC^{\mathrm T})Q^{-1},$$

$$R^*(s)=Q^{-1/2},Q=D_{\hat w}D_{\hat w}^{\mathrm T}.$$

其中 $Y\geq 0$ 满足 Riccati 方程

$$Y(A-B_{\hat w}D_{\hat w}^{\mathrm T}Q^{-1}C)^{\mathrm T}+(A-B_{\hat w}D_{\hat w}^{\mathrm T}Q^{-1}C)Y-$$
$$YC^{\mathrm T}Q^{-1}CY+B_{\hat w}(I-D_{\hat w}^{\mathrm T}Q^{-1}D_{\hat w})B_{\hat w}^{\mathrm T}=0.$$

进一步, 对于任意使 $\bar A-H\bar C$ 渐近稳定的观测器增益矩阵 H 和后置滤波器

$$R_h(s)=Q^{-1/2}(I+C(sI-A+$$
$$H^*C)^{-1}(H-H^*))\tag{12}$$

也是满足最优化问题(7) 的 FDF 的解.

证明 略.

注 2 尽管本文提出了一种时滞系统 FDF 设计

的最优化方法, 但注意到残差产生系统(6) 可进一步转换为式(8) 的LTI形式, 因此, 关于LTI系统FDF 设计的其他方法也可用于求解本文的时滞系统FDF 问题

4　算　例

对于线性时滞系统(1), 已知参数矩阵为

$$A=\begin{bmatrix}-1&-1&1&1\\1&0&0&1\\0&0&-1&0\\0&0&0&-1\end{bmatrix},$$

$$A_1=\begin{bmatrix}-1&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\end{bmatrix},A_2=\begin{bmatrix}0&0&1&0\\0&0&1&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\end{bmatrix},$$

$$B=\begin{bmatrix}0\\1\\0.45\end{bmatrix},B_w=\begin{bmatrix}0.3&0.5\\0.1&0.5\\0.75&0.2\\0.4&0.1\end{bmatrix},B_f=\begin{bmatrix}1.8\\1.2\\1\\1.2\end{bmatrix},$$

$$C=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\end{bmatrix},D=\begin{bmatrix}0.1\\3\end{bmatrix},$$

$$D_w=\begin{bmatrix}-0.25&-0.1\\0.4&-0.05\end{bmatrix},D_f=\begin{bmatrix}0.6\\0.4\end{bmatrix}.$$

时滞参数为 $\tau_1=1$ s, $\tau_2=2$ s 计算可得

$$\bar{A}=\begin{bmatrix}0&0&1&0\\0&0&0&1\\0&0&0&0\\0&0&0&0\end{bmatrix},\bar{C}=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\end{bmatrix},$$

$$T(d)=\begin{bmatrix}T_1(d)\\T_2(d)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\1&0&1+d_2&1\\0&1&d_2&1\end{bmatrix},$$

$$[\bar{F}_2(d)\quad \bar{F}_1(d)]=$$
$$\begin{bmatrix}-1-d_1&-1&-2-d_1&-1\\1&0&1&-1\end{bmatrix}.$$

记

$$\hat{w}=[w^{\mathrm{T}}(t)\quad w^{\mathrm{T}}(t-\tau_2)]^{\mathrm{T}},$$
$$\hat{f}=[f^{\mathrm{T}}(t)\quad f^{\mathrm{T}}(t-\tau_2)]^{\mathrm{T}},$$

可得

$$B_{\hat{w}}=\begin{bmatrix}0.3&0.5&0&0\\0.1&0.5&0&0\\1.45&0.8&0.75&0.2\\0.5&0.6&0.75&0.2\end{bmatrix},B_{\hat{f}}=\begin{bmatrix}1.8&0\\1.2&0\\4&1\\2.4&1\end{bmatrix},$$

$$D_{\hat{w}}=\begin{bmatrix}-0.25&-0.1&0&0\\0.4&-0.05&0&0\end{bmatrix},D_{\hat{f}}=\begin{bmatrix}0.6&0\\0.4&0\end{bmatrix}.$$

根据定理1 可求得FDF 的一组最优解为

$$R^*(s)=\begin{bmatrix}7.0233&3.1033\\3.1033&4.0833\end{bmatrix},$$

$$H^*=\begin{bmatrix}8.6246&5.0478\\0.9214&2.4828\\12.5355&9.3736\\5.0929&5.1578\end{bmatrix}.$$

对于任意满足 $\bar{A}-H\bar{C}$ 稳定的观测器增益矩阵 H, 其 $R(s)$ 最优解可根据式(12) 计算

假设在[0, 50] s 时间内, 两未知输入扰动信号是能量0.01 的白噪声信号, 对于故障分别为幅值是1 的脉冲($10\le t\le 30$ s) 和正弦信号($t\ge 10$ s) 两种

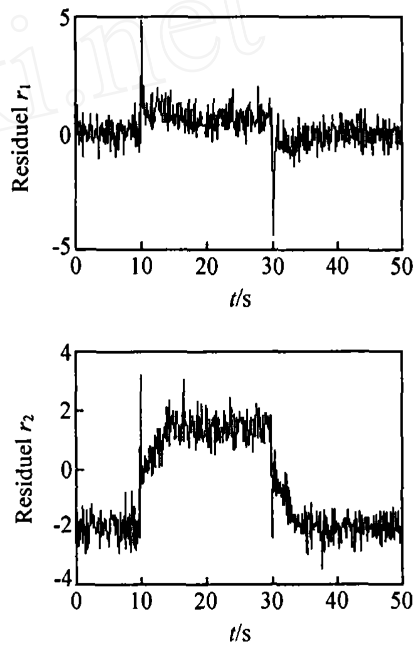

图 1　故障为脉冲信号时的残差信号

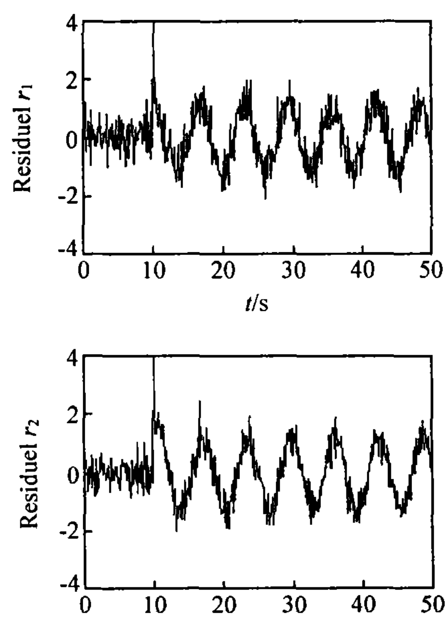

图 2　故障为正弦信号时的残差信号

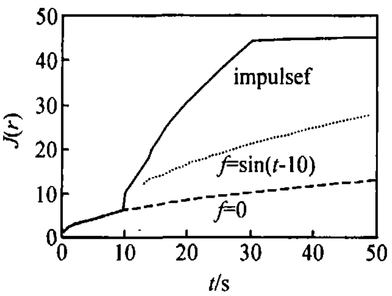

图3　残差评价信号

情况进行了Simulink仿真 图1给出了故障为脉冲信号时的残差信号; 图2为故障是正弦信号的情况

假设$J(r) = \sqrt{\int r^{\mathrm{T}}(\tau) r(\tau) \mathrm{d}\tau}$作为残差评价函数, 图3给出了残差评价函数的变化曲线 当阈值选取为$J_{th} = \sup_{f=0} J(r) \approx 13$时, 仿真结果表明, 本文给出的脉冲、正弦故障分别在发生1.7 s和3.7 s后可检测到

5　结　　语

在系统观测性矩阵满足一定的秩的条件下, 可以通过广义坐标变换, 将线性时滞系统转换为无状态时滞的表达形式 根据新得到的系统模型, 选用基于观测器的故障检测滤波器作为残差产生器, 将时滞系统的故障检测转换为仅包含未知输入时滞、故障时滞的线性时不变形式, 从而可应用针对LTI系统的研究成果设计时滞系统故障检测滤波器 本文将LTI系统故障检测滤波H_∞最优化方法应用于具有状态和输入时滞的情况, 得到了线性时滞系统FDF设计的一种新方法 算例进一步验证了所提出方法的有效性

参考文献(References)

[1] Chen J, Patton R J. *Robust Model-based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.

[2] Frank P M, Ding Steven X, Koeppen Seliger B. Current Development in the Theory of FDI[A]. *Proc of the SAFEPROCESS 2000*[C]. Budapest: Elsevier Science, 2000: 16-27.

[3] Kinnaert M. Fault Diagnosis Based on Analytical Models for Linear and Nonlinear Systems—A Tutorial [A]. *Proc of the SAFEPROCESS 2003* [C]. Washington: Elsevier Science, 2003: 37-50.

[4] Jiang Bin, Staroswieck M, Cocquempot V. Fault Identification for a Class of Time-delay Systems[A]. *Proc of American Control Conf* [C]. Anchorage: Elsevier Science, 2002: 8-10.

[5] Jiang Bin, Staroswieck M, Cocquempot V. H_∞ Fault Detection Filter for a Class of Discrete-time Systems with Multiple Time Delays[A]. *Proc of 15th IFAC World Congress*[C]. Barcelona, 2002: 770-775.

[6] Ding Steven X, Zhong M Y, Tang B Y. An LMI Approach to the Design of Fault Detection Filter for Time-delay LTI Systems with Unknown Inputs[A]. *Proc of the ACC* [C]. Arlington: Elsevier Science, 2001: 2137-2142.

[7] Zhong M Y, Ding Steven X, Zhang C H, et al. Fault Detection Filter Design for LTI Systems with Time Delays[A]. *The 42th IEEE CDC*[C]. Hawaii: IEEE Press, 2003: 1467-1472.

[8] Hou M, Zitek P, Patton R J. An Observer Design for Linear Time-delay Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(1): 121-125.

[9] Ding Steven X, Ding E L, Jeinsch T. A New Optimization Approach to the Design of Fault Detection Filters[A]. *Proc of the SAFEPROCESS 2000*[C]. Budapest: Elsevier Science, 2000: 250-255.

[10] 钟麦英, 张承慧, Ding Steven X. 一种鲁棒故障检测与反馈控制的最优集成设计方法[J]. *自动化学报*, 2004, 30(2): 294-299.
(Zhong M Y, Zhang C H, Ding Steven X. An Optimization Approach to Feedback Controller and Robust Fault Detection Filter Integrated Design[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(2): 294-299.)

(上接第545页)

[14] Hu T, Sung S Y. Detecting Pattern-based Outliers [J]. *Pattern Recongition Letters*, 2003, 24(16): 3059-3068.

[15] He Z, Xu X, Deng S. Discovering Cluster-based Local Outliers[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24(9-10): 1642-1650.

[16] He Z, Xu X, Huang J Z, et al. Mining Class Outliers: Concepts, Algorithms and Applications in CRM [J]. *Expert Systems with Applications*, 2004, 27(4): 681-697.