第 17 卷 第 1 期 控 制 与 决 策 2002 年 1 月
Vol. 17 No. 1 Control and Decision Jan. 2002

文章编号: 1001-0920(2002)01-0015-04

# 状态时滞系统故障诊断问题的LMI方法研究

钟麦英[1], 汤兵勇[1], Steven X Ding[2], 黄小原[3]
(1. 东华大学 工商管理学院, 上海 200051; 2. Lansitz 应用科学大学, 德国; 3. 东北大学 工商管理学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘 要**: 应用$H_\infty$控制技术,探讨具有不确定输入以及状态时滞系统的鲁棒故障诊断(FD)问题。以残差对扰动信号$L_2$增益体现其对扰动的鲁棒性,而以其对故障信号的$L_2$增益体现残差对故障信号的灵敏度,研究基于状态观测器的FD系统设计线性矩阵不等式(LMI)方法,给出并证明解存在的条件以及观测器增益矩阵的求解方法。最后通过一个简例说明了算法的有效性。

**关键词**: 状态观测器; 故障诊断; $H_\infty$范数; $L_2$增益; 线性矩阵不等式
**中图分类号**: TP 273 **文献标识码**: A

# LMI approach to design state-delayed fault detection system

*ZHONG Mai-ying*[1], *TANG Bing-yong*[1], *Steven X Ding*[2], *HUANG Xiao-yuan*[3]
(1. Business and Management School, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. Lausitz University of Applied Sciences, Germany; 3. Business and Administration School, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract**: Uncertainty and the existence of inherent time-delay are one of the unavailable important behaviors. The robust fault detection (FD) problem for uncertain LTI system with state time-delay is investigated. The robust of residual to unknown input and the sensitivity to fault signal are reflected by $L_2$-gain. By applying of $H_\infty$ optimization techniques, an LMI approach to design observer-based robust FD system is proposed. The existence condition of identity observer and the solution of observer gain matrix are also given and proved. An numerical example illustrated the usefulness of the proposed method.

**Key words**: observer; fault detection; $H_\infty$-norm; $L_2$-gain; LMI

## 1 引 言

20 世纪 80 年代以来,鲁棒控制理论的迅速发展促进了鲁棒故障诊断理论的发展,并在基于状态观测器的线性时不变 FD 系统设计方面取得了许多令人满意的结果[1~9]。任何系统都具有不同程度的不确定性和时滞现象,有关不确定时滞系统鲁棒控制的研究一直是这一领域的热点之一。近年来,对不确定时滞系统$H_\infty$控制的研究已取得了大量成果[10,11],对不确定时滞系统 FD 问题的研究同样具有重要的价值,但目前有关时滞系统 FD 问题的研究还未见报道。

本文应用$H_\infty$控制技术,探讨具有不确定输入以及状态时滞系统的 FD 问题,研究基于状态观测器的 FD 系统设计LMI方法。

**收稿日期**: 2000-08-31; **修回日期**: 2000-11-27
**作者简介**: 钟麦英(1965—),女,山东博兴人,副研究员,博士,从事鲁棒$H_\infty$控制、智能鲁棒控制和鲁棒故障诊断的研究; 汤兵勇(1950—),男,上海人,教授,博士生导师,从事经济控制理论、智能控制和电子商务及供应链的研究。

## 2 基于状态观测器的 FD 问题

### 2.1 FD 问题描述

考虑被控系统

$$\dot{x} = Ax + Bu + B_f f + B_w w \tag{1}$$

$$y = Cx + Du + D_f f + D_w w \tag{2}$$

其中, $x \in R^n$ 为状态向量, $u \in R^p$ 为控制输入向量, $y \in R^q$ 为测量输出向量, $f \in R^l$ 为要诊断和分离的故障信号向量, $w \in R^m$ 为不确定性输入信号(包括不确定外部扰动和影响不大的小故障信号等)。不失一般性, 设 $w$ 为 $L_2$ 范数有界信号; $A, B, C, D, B_f, B_w, D_f$ 和 $D_w$ 为适当维数的已知矩阵或向量。

对于基于状态观测器的 FD 系统, 设状态观测器的状态空间方程描述为

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

$$\hat{y} = C\hat{x} + Du \tag{4}$$

定义 $e = x - \hat{x}$, $\epsilon = y - \hat{y}$ 分别表示状态和输出估计误差, 得

$$\dot{e} = (A - HC)e + (B_f - HD_f)f + (B_w - HD_w)w \tag{5}$$

$$\epsilon = Ce + D_f f + D_w w \tag{6}$$

取残差信号 $r = \epsilon$, 即

$$\begin{aligned} r(s) = {} & (C(sI - A + HC)^{-1}(B_f - HD_f) + D_f)f(s) + (C(sI - A + HC)^{-1} \times \\ & (B_w - HD_w) + D_w)w(s) := T_{rf}(s)f(s) + T_{rw}(s)w(s) \end{aligned}$$

本文将给出设计鲁棒 FD 滤波器的方法, 其主要思想是选择适当的稳定加权矩阵函数 $W_f$ [1, 5], 并定义广义的残差信号

$$r_e = r - W_f f = T_{rw}w + (T_{rf} - W_f)f$$

给定 $\gamma > 0$, 求状态观测器增益矩阵 $H$, 使系统(5) 和(6) 渐近稳定且满足

$$\| T_{rw} \|_\infty \le \gamma, \quad \| W_f - T_{rf} \|_\infty \to \min$$

设 $W_f$ 的状态空间实现为 $(A_0, B_0, C_0, D_0)$, 并令

$$\begin{cases} \bar{A} = \begin{bmatrix} A - HC & 0 \\ 0 & A_0 \end{bmatrix} \\ \bar{B}_f = \begin{bmatrix} B_f - HD_f \\ B_0 \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_w = \begin{bmatrix} B_w - HD_w \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \\ \bar{C} = [C \ \ -C_0], \quad \bar{D}_f = D_f - D_0 \end{cases} \tag{7}$$

以及 $r_1 = r - W_f f\ (w = \mathbf{0})$, $r_2 = r - W_f f\ (f = \mathbf{0})$, 则

$$r_1 = \bar{C}(sI - \bar{A})^{-1}\bar{B}_f f + \bar{D}_f f := T_{r_1 f}(s)f(s) \tag{8}$$

$$r_2 = \bar{C}(sI - \bar{A})^{-1}\bar{B}_w w + D_w w := T_{r_2 w}(s)w(s) \tag{9}$$

$$r_e = r_1 + r_2 \tag{10}$$

另一方面, 从输入输出信号的角度看, LTI 系统从输入到输出传递函数的 $H_\infty$ 范数小于等于 $\gamma$, 称为系统具有不大于 $\gamma$ 的 $L_2$ 增益, 所以

$$\| T_{rf} - W_f \|_\infty \le \beta \Leftrightarrow \int^\infty r_1^T r_1 \mathrm{d}t \le \beta^2 \int^\infty f^T f \mathrm{d}t$$

$$\| T_{rw} \|_\infty \le \gamma \Leftrightarrow \int^\infty r_2^T r_2 \mathrm{d}t \le \gamma^2 \int^\infty w^T w \mathrm{d}t$$

因此, 鲁棒 FD 系统设计目标就是选择观测器增益阵 $H$, 使系统(5) 和(6) 渐近稳定且满足

$$\int^\infty r_1^T r_1 \mathrm{d}t \le \beta^2 \int^\infty f^T f \mathrm{d}t \tag{11}$$

$$\int^\infty r_2^T r_2 \mathrm{d}t \le \gamma^2 \int^\infty w^T w \mathrm{d}t \tag{12}$$

$$\beta \to \min$$

显然, 如果

$$\int^\infty r_e^T r_e \mathrm{d}t \le \beta^2 \int^\infty f^T f \mathrm{d}t + \gamma^2 \int^\infty w^T w \mathrm{d}t \tag{13}$$

成立, 则不等式(11), (12) 一定成立。所以基于状态观测器的鲁棒 FD 问题可转化为如下最优化问题

$$\min_H \beta$$

$$\text{s.t.} \ (9) \sim (11), (13)$$

在 $w$ 属于 $L_2$- 范数有界集的假设条件下, 即 $\int^\infty w^T w \mathrm{d}t \le M$ ($M$ 为已知正数), 阈值 $J_{th}$ 可选为 $J_{th} = \gamma^2 M$, 从而有

$$\int^\infty r^T r \mathrm{d}t > J_{th} \Rightarrow$$

故障信号被检测到 ⇒ 报警

### 2.2 状态时滞系统的 FD 问题

$$\dot{x} = A_0 x(t) + \sum_{i=1}^N A_i x(t - d_i(t)) + Bu + B_f f + B_w w \tag{14}$$

$$y = Cx + Du + D_f f + D_w w \tag{15}$$

式中 $A_i (i = 0, 1, \cdots, N)$ 为适当维数的已知矩阵或向量。假设时滞项满足

$$d_i(t) \le \bar{d} < \infty, \quad \dot{d}_i(t) \le \bar{m}_i < 1$$

基于 2.1 节介绍的方法, 构造如下状态观测器

$$\dot{\hat{x}} = A_0 \hat{x} + \sum_{i=1}^N A_i \hat{x}(t - d_i(t)) + Bu + H(y - \hat{y})$$

$$\hat{y} = Cx + Du$$

并定义 $e=x-\hat{x}$, $r=y-\hat{y}$ 分别表示状态和残差信号, 得

$$\dot{e}=(A-HC)e+\sum_{i=1}^{N}A_ie(t-d_i(t))+(B_f-HD_f)f+(B_w-HD_w)w$$

$$r=Ce+D_ff+D_ww$$

选择适当的 $\gamma>\gamma_{min}$ 和稳定的加权函数矩阵 $W_f(s)$, 并如式(7) 定义 $\bar{A},\bar{B}_f,\bar{B}_w,\bar{C}$ 和 $D_f$。另外, 设 $\bar{A}_i=\mathrm{diag}\{A_i,0\}$, 得增广系统

$$\dot{\bar{e}}=\bar{A}\bar{e}+\sum_{i=1}^{N}\bar{A}_i\bar{e}(t-d_i(t))+\bar{B}_ff+\bar{B}_ww \tag{16}$$

$$r_e=\bar{C}\bar{e}+\bar{D}_ff+D_ww \tag{17}$$

从而, 可将状态时滞系统鲁棒 FD 设计问题转化为如下的 $H_\infty$ 最优化问题

$$\min_H \beta$$

$$\text{s t}\ (13),(16),(17)$$

## 3　状态时滞系统 FD 问题的 LMI 方法

从上节的讨论可知, 理想的基于状态观测器故障诊断系统设计问题可以转化成一个 $H_\infty$ 优化设计问题。

**引理 1**　给定 $\gamma>0$, 对于系统

$$\dot{x}=Ax+\sum_{i=1}^{N}A_ix(t-d_i(t))+Bw$$

$$z=Cx+Dw$$

如果存在正定矩阵 P,Q 满足 Riccati 不等式

$$A^TP+PA(PB+C^TD)(\gamma^2I-D^TD)^{-1}(B^TP+D^TC)+C^TC+Q+N\sum_{i=1}^{N}c_iPA_iQ^{-1}A_i^TP\le 0$$

且 $\gamma^2I-D^TD>0$, 则系统渐近稳定且具有不大于 $\gamma$ 的 $L_2$ 增益, 即

$$\int^{\infty}z^Tz\,dt\le\gamma^2\int^{\infty}w^Tw\,dt$$

这里

$$\frac{1}{1-\dot{d}_i(t)}\le\frac{1}{1-\bar{m}_i}=c_i$$

下面给出状态时滞系统 FD 问题设计的 LMI 方法, 即本文的主要结论。

**定理 1**　考虑不确定性状态时滞系统(14) 和(15), 给定 $\gamma>\gamma_{min}$, $\beta>0$ 以及加权函数矩阵 $W_f(s)$, 如果存在正定矩阵 P,Q 以及矩阵 Y 满足 LMI

$$\begin{bmatrix}\omega_{11}&\omega_{12}&\omega_{13}&\omega_{14}&\omega_{15}\\ \omega_{12}^T&\omega_{22}&\omega_{23}&\omega_{24}&0\\ \omega_{13}^T&\omega_{23}^T&\omega_{33}&\omega_{34}&0\\ \omega_{14}^T&\omega_{24}^T&\omega_{34}^T&\omega_{44}&0\\ \omega_{15}^T&0&0&0&\omega_{55}\end{bmatrix}<0 \tag{18}$$

其中

$$\omega_{11}=A^TP_1+P_1A-C^TY_1^T-Y_1C+C^TC+Q_1$$
$$\omega_{12}=-C^TC_0$$
$$\omega_{13}=(P_1B_f-Y_1D_f-C^TD_0+C^TD_f)\beta^{-1}$$
$$\omega_{14}=(P_1B_w+C^TD_w)\gamma^{-1}$$
$$\omega_{15}=[P_1A_1\ \cdots\ P_1A_N]$$
$$\omega_{22}=A_0^TP_2+P_2A_0+Q_2+C_0^TC_0$$
$$\omega_{23}=(P_2B_0-C_0^TD_f+C_0^TD_0)\beta^{-1}$$
$$\omega_{24}=-\gamma^{-1}C_0^TD_w$$
$$\omega_{33}=-I-\beta^{-2}(D_0^TD_f+D_f^TD_0-D_0^TD_0-D_f^TD_f)$$
$$\omega_{34}=-\gamma^{-1}\beta^{-1}(D_0^TD_w+D_f^TD_w)$$
$$\omega_{44}=-I+\gamma^{-2}D_w^TD_w$$
$$\omega_{55}=\mathrm{diag}\left[-\frac{1}{N}c_1^{-1}Q_1,\cdots,-\frac{1}{N}c_N^{-1}Q_1\right] \tag{19}$$

$\gamma_{min}>0$ 为满足

$$\begin{bmatrix}T_{11}&T_{12}&L_{1w}\\ T_{12}^T&D_w^TD_w-\gamma^2I&0\\ L_{1w}^T&0&\Omega_{1w}\end{bmatrix}\le 0 \tag{20}$$

的 $\gamma$ 最小值。式中

$$T_{11}=A^TP_w+P_wA-C^TY_w^T-Y_wC+C^TC+Q_w$$
$$T_{12}=P_wB_w-Y_wD_w+C^TD_w$$
$$L_{1w}=[P_w\bar{A}_1\ \cdots\ P_w\bar{A}_N]$$

$P_w,Q_w$ 正定, $Y_m$ 为适当维数的矩阵。

则可得基于状态观测器的 FD 系统, 且观测器增益阵 $H=P^{-1}Y$。

**证明**　根据引理 1 易知, 当存在适当的 H 以及正定矩阵 $P_w$ 和 $Q_w$ 满足 Riccati 不等式

$$(A-HC)^TP_w+P_w(A-HC)+(P_w(B_w-HD_w)+C^TD_w)(\gamma^2I-D_w^TD_w)^{-1}((B_w-HD_w)^TP_w+D_w^TC)+N\sum_{i=1}^{N}c_{xi}P_wA_iQ_w^{-1}A_i^TP_w+C^TC+Q_w\le 0 \tag{21}$$

且 $\gamma^2I-D_w^TD_w>0$ 时, 有

$$\int^{\infty} r_2^{\mathrm T} r_2 \mathrm{d}t \leq \gamma^2 \int^{\infty} w^{\mathrm T} w \,\mathrm{d}t$$

具有不大于 $\gamma > 0$ 的 $L_2$ 增益。记 $\gamma$ 的最小值为 $\gamma_{\min}$, $Y_w = P_w H$, 根据 Schur 补可知不等式(21) 等价于 LMI(20)。对于 $\gamma > \gamma_{\min}$ 和 $\beta > 0$, 将系统(16) 和(17) 进一步整理得

$$\dot{\bar e} = \bar A \bar e + \sum_{i=1}^{N} \bar A_i \bar e(t - d_i(t)) + [\bar B_f \beta^{-1} \quad \bar B_w \gamma^{-1}]\begin{bmatrix}\beta f\\ \gamma w\end{bmatrix} \qquad (22)$$

$$r_e = \bar C \bar e + [\bar D_f \beta^{-1} \quad D_w \gamma^{-1}]\begin{bmatrix}\beta f\\ \gamma w\end{bmatrix} \qquad (23)$$

根据引理 1, 当存在正定矩阵

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & P_2\end{bmatrix},\quad Q = \begin{bmatrix} Q_1 & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & Q_2\end{bmatrix}$$

满足 Riccati 不等式

$$\bar A^{\mathrm T}P + P\bar A + \bar C^{\mathrm T}\bar C + Q + \{P[\bar B_f\beta^{-1} \quad \bar B_w\gamma^{-1}] + \bar C^{\mathrm T}[\bar D_f\beta^{-1} \quad D_w\gamma^{-1}]\}\{I - [\bar D_f\beta^{-1} \quad D_w\gamma^{-1}]^{\mathrm T}\times [\bar D_f\beta^{-1} \quad D_w\gamma^{-1}]\}^{-1}\{[\bar B_f\beta^{-1} \quad B_w\gamma^{-1}]^{\mathrm T}P + [\bar D_f\beta^{-1} \quad D_w\gamma^{-1}]^{\mathrm T}\bar C\} + N\sum_{i=1}^{N} c_i P\bar A \bar Q^{-1}\bar A_i^{\mathrm T}P \leq 0$$

且

$$I - [\bar D_f\beta^{-1} \quad D_w\gamma^{-1}]^{\mathrm T}[\bar D_f\beta^{-1} \quad D_w\gamma^{-1}] > 0$$

时, 系统(22) 和(23) 渐近稳定且满足

$$\int^{\infty} r_e^{\mathrm T} r_e \mathrm{d}t \leq \beta^2 \int^{\infty} f^{\mathrm T} f \,\mathrm{d}t + \gamma^2 \int^{\infty} w^{\mathrm T} w \,\mathrm{d}t$$

进一步, 将式(7) 定义的 $\bar A, \bar B_f, \bar B_w, \bar C, \bar D_f$ 以及 $A_i = \mathrm{diag}\{A_i, \mathbf{0}\}$ 代入不等式(24) 左端, 并按式(19) 定义 $\omega_{ij}(i, j = 1, 2, 3, 4, 5)$ 和 $H = P_1^{-1}Y_1$, 然后应用 Schur 补可推得矩阵不等式(24) 等价于 LMI(18)。□

当然, 定理 1 仅提供在加权函数矩阵 $W_f(s)$, $\gamma > \gamma_{\min}$, $\beta > 0$ 给定条件下, 求解使故障诊断滤波器稳定且满足条件(13) 的状态观测器增益矩阵 H 的方法, 鲁棒故障诊断器的设计还需要重复调用定理 1 的结果进行迭代计算, 求得使 $\beta \to \min$ 的增益矩阵 H。

## 4 算 例

考虑被控系统

$$\dot x = \begin{bmatrix} 0 & 1\\ -2 & 1\end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 0\\ 0.1 & 0.1\end{bmatrix} x(t - d_1) + \begin{bmatrix} 0 & 0\\ 0.05 & 0.05\end{bmatrix} x(t - d_2) + u + \begin{bmatrix} 0.05 & 0 & 0\\ 0 & 0.1 & 0\end{bmatrix} f + \begin{bmatrix} 0.01\\ 0.01\end{bmatrix} d$$

$$y = \begin{bmatrix} 0.1 & -0.01\\ 0.1 & -0.1\end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & -0.04\\ 0 & 0.9 & -0.2\end{bmatrix} f + \begin{bmatrix} 0.02\\ 0.01\end{bmatrix} d$$

应用第 3 节介绍的 LMI 方法设计基于状态观测器的故障诊断滤波器系统。

利用 Matlab 的 LMI 工具箱求解 LMI(20) 得 $\gamma_{\min} \leq 0.3$, 在取加权函数矩阵 $W_f(s)$ 的参数矩阵

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1\\ -1 & -0.1\end{bmatrix},\quad B_0 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0\\ 0 & 0.5 & 0\end{bmatrix}$$

$$C_0 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0\\ 0 & 0.1\end{bmatrix},\quad D_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0\\ 0 & 0.5 & 0.2\end{bmatrix}$$

的假设条件下, 取 $\gamma = 0.05$, 求解 LMI(18) 得 $\beta$ 的最小值为 $\beta_{\min} = 0.6516$, 相应的状态观测器增益矩阵为

$$H = 10^4 \begin{bmatrix} 3.6790 & -0.3671\\ 9.6209 & -0.9594\end{bmatrix}$$

显然, 该状态观测器增益太大。如果选择 $\gamma = 0.05$, $\beta = 0.7$, 同样可求解 LMI(24) 得次优故障诊断器, 且对应的状态观测器增益矩阵为

$$H = \begin{bmatrix} 128.8252 & -14.0517\\ 248.5134 & -26.6742\end{bmatrix}$$

## 5 结 语

本文研究具有不确定性扰动以及状态时滞系统的故障诊断问题, 并应用 $H_\infty$ 控制技术, 以残差对扰动信号的 $L_2$ 增益体现其对扰动的鲁棒性, 而以其对故障信号的 $L_2$ 增益表示残差对故障的灵敏度, 给出了基于状态观测器的时滞 FD 系统设计 LMI 方法。

参考文献(References):


[1] Ding X, Frank P M. Fault detection via factorization approach[J]. System and Control Letters, 1990, 14(4): 431-436.

[2] Ding S X, Ding E L, Jeinsch T, et al. An approach to a unified design of FDI system[A]. The 3rd Asia Control Conf[C]. Shanghai, 2000. 2812-2817.


(下转第 23 页)

本文采用函数评价的次数(采样次数)和解的精度来评价算法的好坏。

### 5.2　模拟实验

我们比较自适应随机搜索(ARS)、模拟退火(SA)[6]、标准遗传算法(SGA)和本文混合算法(HA)的性能。选择 Rosenbrock 函数: $f(x) = \sum_{i=1}^{n-1}[100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (1 - x_i)^2]$, 它的全局最小点为(1, 1, …, 1), 最小值为 0。

实验结果列于表 1 和表 2。在 Rosenbrock 函数曲面山谷中的点, 其最速下降方向几乎与到函数最小值的最佳方向垂直, 因此传统算法(如最速下降法)较难求解此问题。实验中发现, 在高维情况下, 标准遗传算法也难以求解该问题。

需要说明的是, SGA 为群体算法, 其结果为 10 次的平均值。在 4 维问题的求解中, 有 3 次没有找到最优解。无论从解的质量还是从采样次数看, HA 算法均优于其它算法。

## 6　结　　论

本文将遗传算法与 Nelder-Mead 单纯形法相结合, 构造出一种快速收敛的混合算法来求解优化问题。它不象其它混合遗传算法以遗传算法为主体并直接作用于问题的解空间, 而是实施间接搜索, 即使用遗传算法来生成搜索方向。因此, 算法能搜索整个解空间, 保证了算法的收敛性。该算法利用遗传算法的全局搜索能力, 并采用 Nelder-Mead 单纯形法来加强算法的局部搜索能力, 从而加快了算法的收敛速率。理论分析和模拟实验表明, 该算法是一种具有高效性和鲁棒性的算法。

我们下一步要做的工作是分析算法的收敛速率。

参考文献(References):


[1] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning[M]. Reading: Addison-Wesley, 1989.

[2] Rudolph G. Convergence analysis of canonical genetic algorithms[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1994, 5(1): 96-101.

[3] 曹先彬, 高竣, 王煦法. 基于生态竞争模型的遗传强化学习[J]. 软件学报(J of Software), 1999, 10(6): 658-662.

[4] 陈开明. 非线性规划[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1991.

[5] 陈国良. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.

[6] Corana A. Minimizing multimodal functions of continuous variables with the simulated annealing algorithm[J]. ACM Trans on Math Software, 1987, 13(3): 262-280.


(上接第 18 页)


[3] Ding S X, Ding E L, Jeinsch T. An approach to analysis and design of observer and parity relation based FDI systems[A]. Proc of the 14th IFAC World Congress[C]. Beijing, 1999. 37-42.

[4] Ding X, Guo L, Frank P M. Parameterization of linear observers and its application to observer design[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(8): 1648-1652.

[5] Frank P M, Ding X. Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems[J]. J Process Control, 1997, 7(6): 403-424.

[6] Frank P M. Enhancement of robustness in observer-based fault detection[J]. Int J Control, 1994, 59(4): 955-981.

[7] Wang H, Lam J. An optimization approach to design robust fault detection observers[A]. The 3rd Asia Control Conf[C]. Shanghai, 2000. 3052-3056.

[8] Patton R J, Hou M. On sensitivity of robust fault detection observers[A]. Proc 14th IFAC World Congress Conf[C]. Beijing, 1999. 67-72.

[9] 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(3): 215-238.

[10] Kim J H, Park H B. $H_\infty$ state feedback control for generalized continuous/discrete time-delay system[J]. Automatica, 1999, 35(6): 1443-1451.

[11] Mahmoud M S, Zribi M. $H_\infty$-controllers for time-delay systems using linear matrix inequalities[J]. J of Optim Theory and Appl, 1999, 100(1): 89-122.