

文章编号: 1001-0920(2005)07-0773-05

一种故障检测滤波器的多目标优化设计方法

彭涛^{1,2}, 桂卫华¹, Ding S X³, 谢勇²

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 株洲工学院 电气工程系, 湖南 株洲 412008;
3. 杜伊斯堡—埃森大学 自动控制和复杂系统研究, 杜伊斯堡 47048, 德国)

摘要: 提出一种基于观测器的故障检测滤波器的非凸多目标优化设计方法。针对线性时不变动态系统, 构建一个由输出观测器和后滤波器组成的故障检测滤波器, 将其残差动态特性描述为非凸的双线性矩阵不等式形式。利用双线性矩阵不等式中可完全平方非正定项的上界替代原非正定项, 将双线性矩阵不等式转化为一组线性矩阵不等式, 进而获得多目标优化问题的可解条件以及观测器增益与后滤波器矩阵的求解方法。仿真算例说明了算法的有效性。

关键词: 基于观测器故障检测; 后滤波器; 多目标优化; 双线性矩阵不等式; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP277

文献标识码: A

Multi-objective Optimal Design Approach to Fault Detection Filters

PEN G Tao^{1,2}, GU I W ei-hua¹, D ing S X³, X IE Yong²

(1. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Department of Electrical Engineering, Zhuzhou Institute of Technology, Zhuzhou 412008, China; 3. Institute for Automatic Control and Complex Systems, University of Duisburg-Essen, Duisburg 47048, Germany. Correspondent: PEN G Tao, E-mail: pengtao@zhuzit.edu.cn)

Abstract: A non-convex multi-objective optimal design approach to observer-based fault detection filters is proposed. A fault detection filter with an output observer and a post-filter is constructed for linear time invariant systems. The dynamics of generated residual is formulated as non-convex and in terms of bilinear matrix inequality (BMI). BMI terms can be translated into a serial of linear matrix inequalities (LMI) by applying the completing square into BMI to replace the non-positive terms by their upper bounds. The existence condition of multiobjective optimal problem and the solution of observer gain and post-filter matrix are also given and proved. The simulation results show the effectiveness of the proposed approach.

Key words: Observer-based fault detection; Post-filter; Multi-objective optimization; BMI; LMI

1 引言

近年来, 基于观测器的故障检测系统多目标设计问题引起了人们的关注^[1-3]。基于观测器的故障检测方法, 是通过构建一个输出观测器, 校验由相同系统输入信号驱动的系统名义模型的估计输出与实际系统的测量输出之间的不一致性(输出估计误差), 生成所谓的残差信号, 从中提取系统的故障信息^[4]。为生成残差提供更大的设计自由度, 通常会在

输出估计误差后串入一个后滤波器, 以提高残差生成性能^[4-6]。因为扰动、噪声、模型不确定性等未知输入的影响, 残差信号混夹在一些不感兴趣信号之中, 所以故障检测系统设计的关键问题实质是一个滤波的问题, 即抑制信号中不感兴趣部分而加强其中反映故障的部分。因此在保证系统稳定的前提下, 如何使残差生成器对故障具有高灵敏度而对未知输入具有强鲁棒性是至关重要的。

收稿日期: 2004-07-26; 修回日期: 2004-10-08

基金项目: 国家 973 计划项目(2002CB312200)。

作者简介: 彭涛(1965—), 女, 湖南汉寿人, 副教授, 博士生, 从事系统故障检测与诊断研究; 桂卫华(1950—), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士生导师, 从事工业大系统递阶和分散控制等研究。

系统期望的各目标之间是相互冲突的, 其中一个目标的改善往往会造成其他目标的变坏, 因而给设计带来了困难. 线性矩阵不等式(LMI)技术具有获得全局最优解的能力, 使其在基于观测器故障检测系统的多目标设计方面具有很大优势. 但后滤波器的引入使得这一多目标优化问题被描述为双线性矩阵不等式(BMIs)形式, 受非凸表征的限制, 难以直接用LMI方法得到问题的优化解. 文献[2, 3]利用LMI技术, 通过将多目标故障检测问题转化为约束的H_∞问题, 获得了一些解决途径. 但关于应用LMI技术, 对引入后滤波器的故障检测多目标优化问题进行研究的报道至今未见.

本文针对线性时不变系统, 提出一种具有后滤波器的基于观测器的故障检测滤波器多目标优化设计方法. 通过用BMIs中可完全平方非正定项的上界替代原非正定项, 将BMIs转化为一组LMIs, 从而用一种迭代LMI算法解决多目标H_∞/H₂故障检测滤波器最优设计问题. 同时给出了优化问题的可解条件和求解方法, 并证明了算法的收敛性.

2 问题描述

线性时不变动态系统的状态空间可描述为^[6]

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + E_d d(t) + E_f f(t), \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + F_d d(t) + F_f f(t). \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^k$ 和 $y(t) \in R^m$ 分别为系统的状态、控制输入和输出; $d(t) \in R^k$ 为包括干扰、噪声或界定在 $\|d\|_2 \leq \Delta_d$ 范围内的模型结构不确定性等未知输入; $f(t) \in R^k$ 为系统所有可能的且必须检测出的加性故障, 即执行器故障、元部件故障及传感器故障等; $A, B, C, D, E_d, E_f, F_d$ 和 F_f 为具有适当维数的已知系数矩阵. 假设:

- 1) (C, A) 是可检测的;
- 2) $\begin{bmatrix} A - j\omega I & E_d \\ C & F_d \end{bmatrix}$ 对于所有的 ω 具有行满秩.

首先按图1构造一个线性全阶输出观测器

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)), \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) + Du(t), \end{aligned} \quad (2)$$

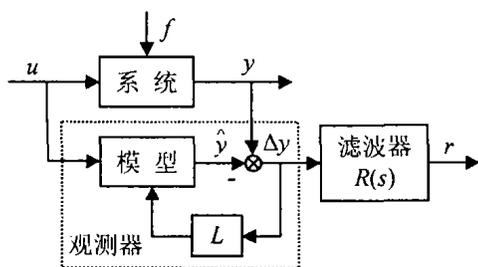


图1 基于观测器的残差生成原理

其中 L 为观测器的增益矩阵, 其选择应保证矩阵 $A - LC$ 的稳定. 令 $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$, $\Delta y = y(t) - \hat{y}(t)$ 分别为状态估计误差和输出估计误差. 观测器(2)的误差动态特性为

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \bar{A}e(t) + \bar{E}_d d(t) + \bar{E}_f f(t), \\ \Delta y &= Ce(t) + F_d d(t) + F_f f(t). \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $\bar{A} = A - LC$, $\bar{E}_d = E_d - LF_d$, $\bar{E}_f = E_f - LF_f$. 然后, 采用后滤波器 $R(s)$ 对 Δy 滤波, 生成残差信号 $r \in R^q$, 即

$$r(s) = R(s)(y(s) - \hat{y}(s)). \quad (4)$$

其中 $R(s) \in R^{q \times m}$ 表示一个可以任意选取的 $q \times m$ 维参数化传递函数矩阵. 引入后滤波器 $R(s)$ 是为了增加设计自由度, 提高残差生成能力, 即: 通过选取 $R(s)$, 尽量减少未知输入 d 的影响, 增大故障 f 的影响, 从而增强残差对未知输入 d 的鲁棒性, 同时提高它对故障 f 的灵敏度. 特别地, 当 $R(s) = V$ 时 (V 为常数矩阵), 残差生成器变为一个标准故障检测滤波器(FDF). 显然, 无后滤波器情况可视为 $R(s) = 1$ 或 $V = 1$ 的特例. 本文主要考虑 FDF 情况, 此时

$$r(t) = V(Ce(t) + F_d d(t) + F_f f(t)). \quad (5)$$

残差生成器的动态特性为

$$r(s) = VT_{rd}(s)d(s) + VT_{rf}(s)f(s) = r_d(s) + r_f(s), \quad (6)$$

其中 $T_{rd}(s) = C(sI - \bar{A})^{-1}\bar{E}_d + F_d$, $T_{rf}(s) = C(sI - \bar{A})^{-1}\bar{E}_f + F_f$.

用如下 H_{∞} 范数描述残差生成器对未知输入信号的抑制^[6, 7]:

$$H_{\infty} = \|VT_{rd}\|_{\infty} = \sup_{\omega} \bar{\sigma}(VT_{rd}(j\omega)); \quad (9)$$

用 H_{-} 指数测量残差生成器对故障的最差灵敏度^[1-3]

$$H_{-} = \inf_{\omega \in \Phi} \sigma(VT_{rf}(j\omega)). \quad (10)$$

其中: $\bar{\sigma}(\cdot)$ 和 $\sigma(\cdot)$ 分别表示矩阵 VT_{rd} 和 VT_{rf} 的最大、最小(非零)奇异值, $\Phi = ([\omega_l, \omega_h], \dots, [\omega_l, \omega_h])$ 表示需评价的所有频率范围.

于是, 故障检测滤波器的设计可以描述为一个多目标 H_{∞}/H_{-} 优化问题: 通过选取观测器增益 L 和后滤波器矩阵 V , 期望达到使残差对故障更加灵敏, 而同时对未知输入信号更加鲁棒之间的最佳平衡. 也就是说, 对于给定的系统(1) 满足假设 1) 和 2), 考虑故障检测滤波器(3) 和(5), 确定最优观测器增益 L 和滤波器矩阵 V , 使得

- 1) \bar{A} 渐近稳定;
- 2) 对于标量 $\gamma > 0$, 满足 $J_1 = \min \gamma, \text{ s.t. } H_{\infty} < \gamma$;
- 3) 对于标量 $\beta > 0$, 满足

$$J_2 = \max \beta, \text{ s t } H - \beta \quad (12)$$

3 主要结果

根据有界实引理^[8], 可以得到关于系统鲁棒性问题的刻画

引理 1^[2] 考虑系统 (1) 及观测器 (2), 残差生成器 (3) 和 (5) 渐近稳定并满足 (11) 的条件是: 存在标量 $\gamma > 0$ 以及矩阵 \bar{L}, V 和 $P > 0$, 使如下矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA + C^T V^T V C - \bar{L} C - C^T \bar{L}^T \\ (P E_d - \bar{L} F_d + C^T V^T V F_d)^T \\ P E_d - \bar{L} F_d + C^T V^T V F_d \\ - \gamma^2 I + F_d^T V^T V F_d \end{bmatrix} 0, \quad (13)$$

且观测器增益 $L = P^{-1} \bar{L}$.

故障检测观测器设计的主要结果见如下定理:

定理 1 考虑系统 (1) 及观测器 (2), 残差生成器 (3) 和 (5) 渐近稳定并满足 (11) 的条件是: 存在标量 $\gamma > 0$ 以及矩阵 \bar{L}, V 和 $P > 0$, 使如下线性矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} (A^T P + PA - \bar{L} C - C^T \bar{L}^T) & P E_d - \bar{L} F_d & C^T V^T \\ P E_d^T - F_d^T \bar{L}^T & - \gamma^2 I & F_d^T V^T \\ V C & V F_d & - I \end{bmatrix} 0, \quad (14)$$

且观测器增益 $L = P^{-1} \bar{L}$.

证明 先将式 (13) 写为

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA - \bar{L} C - C^T \bar{L}^T & P E_d - \bar{L} F_d \\ P E_d^T - F_d^T \bar{L}^T & - \gamma^2 I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C^T V^T V C & C^T V^T V F_d \\ F_d^T V^T V C & F_d^T V^T V F_d \end{bmatrix} < 0,$$

再对上式应用 Schur 补定理^[9], 即可得证

由文献 [10] 中定理 1, 可以得到关于系统灵敏度问题的刻画

引理 2 考虑系统 (1) 及观测器 (3), 残差生成器 (3) 和 (5) 渐近稳定并满足 (12) 的条件是: 存在标量 $\beta > 0$ 以及矩阵 \bar{L}, V 和 $P > 0$, 使如下矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} C^T V^T V C + \bar{L} C + C^T \bar{L}^T - A^T P - PA \\ (C^T V^T V F_f + \bar{L} F_f - P E_f)^T \\ C^T V^T V F_f + \bar{L} F_f - P E_f \\ - \beta^2 I + F_f^T V^T V F_f \end{bmatrix} 0, \quad (15)$$

或者

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA - \bar{L} C - C^T \bar{L}^T - C^T V^T V C \\ (C^T V^T V F_f + \bar{L} F_f - P E_f)^T \\ C^T V^T V F_f + \bar{L} F_f - P E_f \\ \beta^2 I - F_f^T V^T V F_f \end{bmatrix} 0, \quad (16)$$

且观测器增益 $L = P^{-1} \bar{L}$.

证明 1) 定义一个 Lyapunov 函数 $V(e_f) = e_f^T P e_f$ ($P > 0, P(e_f) = e_f^T P e_f$).

2) 计算 $\Lambda = \int_0^{\infty} r_f^T r_f dt - \beta^2 \int_0^{\infty} f^T f dt$ 将上式写成

$$\Lambda = \int_0^{\infty} (r_f^T r_f - \beta^2 f^T f - \frac{d}{dt} V(e_f)) dt + V(e_f),$$

于是有

$$\Lambda = \int_0^{\infty} (e_f^T \quad f^T) \begin{bmatrix} C^T C - A^T P - PA \\ F_f^T C - \bar{E}_f^T P \\ C^T F_f - P \bar{E}_f \\ - \beta^2 I + F_f^T F_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_f \\ f \end{bmatrix} dt + V(e_f).$$

3) 由已知 $\beta > 0$, 线性矩阵不等式 (15) 成立, 且 $P > 0, -\beta^2 I + F_f^T F_f > 0$, 则有

$$\begin{bmatrix} C^T C - A^T P - PA & C^T F_f - P \bar{E}_f \\ F_f^T C - \bar{E}_f^T P & - \beta^2 I + F_f^T F_f \end{bmatrix} 0,$$

且 $V(e_f) = 0$, 所以必有 $\Lambda = 0$ 成立 \Rightarrow 式 (12) 成立

又由 $P > 0$, 知 P 可逆, 得到观测器增益阵 $L = P^{-1} \bar{L}$. 于是结论成立

式 (15) 或 (16) 是非凸的双线性矩阵不等式, 难以直接应用 Matlab 中 LM I 工具箱得到问题的优化解. 借鉴文献 [11] 的方法, 利用完全平方法将具有非正定项的双线性矩阵不等式转化为一系列的线性矩阵不等式, 从而可通过迭代的 LM I 算法来解决多目标最优设计问题

定理 2 考虑系统 (1) 及观测器 (2), 残差生成器 (3) 和 (5) 渐近稳定并满足 (12) 的条件是: 存在标量 $\beta > 0$ 以及矩阵 $P > 0, \bar{L}$ 和 V (给定 $V_c^{(i)} = V^{(i-1)} C, V_f^{(i)} = V^{(i-1)} F_f, i = 1, 2, \dots$), 使得下面线性矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA - \bar{L} C - C^T \bar{L}^T + 2W_c(V, V_c^{(i)}) \\ F_f^T \bar{L}^T - P E_f^T \\ V C \\ \bar{L} F_f - P E_f & C^T V^T \\ \beta^2 I + 2W_f(V, V_f^{(i)}) & F_f^T V^T \\ V F_f & - I \end{bmatrix} 0, \quad (17)$$

其中

$$W_c(V, V_c^{(i)}) = V_c^{(i)T} V_c^{(i)} - V_c^{(i)T} V C - C^T V^T V_c^{(i)},$$

$$W_f(V, V_f^{(i)}) = V_f^{(i)T} V_f^{(i)} - V_f^{(i)T} V F_f - F_f^T V^T V_f^{(i)},$$

且观测器增益 $L = P^{-1} \bar{L}$.

证明 矩阵不等式 (16) 可写为

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA - \bar{L} C - C^T \bar{L}^T - \\ 2C^T V^T V C + C^T V^T V C \\ (C^T V^T V F_f + \bar{L} F_f - P E_f)^T \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{array}{c} C^T V^T V F_f + \bar{L} F_f - P E_f \\ \beta^2 I - 2 F_f^T V^T V F_f + F_f^T V^T V F_f \end{array} \right] 0, \\
 & \left[\begin{array}{cc} (A^T P + P A - \bar{L} C - & \bar{L} F_f - P E_f \\ C^T L^T - 2 C^T V^T V C) & \\ F_f^T L^T - P E_f^T & \beta^2 I - 2 F_f^T V^T V F_f \end{array} \right] + \\
 & \left[\begin{array}{cc} C^T V^T V C & C^T V^T V F_f \\ F_f^T V^T V C & F_f^T V^T V F_f \end{array} \right] 0, \\
 & \left[\begin{array}{c} A^T P + P A - \bar{L} C - C^T L^T - 2 C^T V^T V C \\ F_f^T L^T - P E_f^T \\ V C \end{array} \right] \\
 & \left[\begin{array}{cc} \bar{L} F_f - P E_f & C^T V^T \\ \beta^2 I - 2 F_f^T V^T V F_f & F_f^T V^T \\ V F_f & - I \end{array} \right] 0 \quad (18)
 \end{aligned}$$

给定 $V_c^{(i)} = V^{(i-1)} C, V_f^{(i)} = V^{(i-1)} F_f, i = 1, 2, \dots$, 则有

$$\begin{aligned}
 & (V_c^{(i)} - V C)^T (V_c^{(i)} - V C) = 0, \\
 & V_c^{(i)T} V_c^{(i)} - V_c^{(i)T} V C - \\
 & C^T V^T V_c^{(i)} + C^T V^T V C = 0, \\
 & - C^T V^T V C \\
 & V_c^{(i)T} V_c^{(i)} - V_c^{(i)T} V C - C^T V^T V_c^{(i)} = \\
 & W_c(V, V_c^{(i)});
 \end{aligned}$$

以及

$$\begin{aligned}
 & (V_f^{(i)} - V C)^T (V_f^{(i)} - V C) = 0, \\
 & V_f^{(i)T} V_f^{(i)} - V_f^{(i)T} V F_f - \\
 & F_f^T V^T V_f^{(i)} + F_f^T V^T V F_f = 0, \\
 & - F_f^T V^T V F_f \\
 & V_f^{(i)T} V_f^{(i)} - V_f^{(i)T} V F_f - F_f^T V^T V_f^{(i)} = \\
 & W_f(V, V_f^{(i)}).
 \end{aligned}$$

用 $W_c(V, V_c^{(i)})$ 和 $W_f(V, V_f^{(i)})$ 分别替代式(18)中的 $- C^T V^T V C$ 和 $- F_f^T V^T V F_f$ 项, 即为线性矩阵不等式(17).

因此, 如果线性矩阵不等式(17)对于 $P > 0, \bar{L}$ 和 V 是可解的, 则式(18)必定可解. 于是矩阵不等式(15)或(16)对于相同变量也是可解的.

定理3 考虑系统(1)及观测器(2), 残差生成器(3)和(5)渐近稳定并同时满足(11)和(12)的条件是: 存在标量 $\beta > \gamma > 0$ 以及矩阵 \bar{L}, V 和 $P > 0$, 使得矩阵不等式(13)和(16)同时成立, 或使得线性矩阵不等式(14)和(17)同时成立.

定理3不仅提供了故障检测观测器设计问题解存在的条件, 而且给出了观测器增益和后滤波器矩阵的求解方法. 为使所设计的故障检测观测器达到鲁棒性与灵敏度间的最佳平衡, 获得优化问题的最优解, 还需迭代地应用定理2和定理3. 为此, 给出下

面迭代算法:

迭代算法

Step1: 对于足够大的标量 $\gamma = \xi$ 和足够小的 $\beta = \zeta$ 令 $i = 0, j = 0$, 取合适的 m 值控制计算循环解式(14), 获得可行解 P, \bar{L} 和 $V^{(0)}$.

Step2: 将 L 带入式(13)和(16), 对于 $i = i + 1$, 令 $V_c^{(i)} = V^{(i-1)} C, V_f^{(i)} = V^{(i-1)} F_f$, 寻找变量 P 和 $V^{(i)}$ 的可行解;

设 $\gamma_i = 0$ 和 $\beta_i = 0$ 是足够小的调整值, 对于 $\gamma = \gamma - \gamma_i > F_d$ 及 $\beta = \beta + \beta_i < F_f$, 寻找线性矩阵不等式(14)和(17)的可行解 L ;

保存 $\bar{L}_i = \bar{L}, V_i = V$, 重复 Step2, 记录所有可行解, 从中寻找最小的 γ 以及最大的 β .

Step3: 设 $j = j + 1$, 如果 $j < m$, 重复 Step2, 否则停止(无可行解).

定理4 如果执行迭代算法, 故障对残差的影响问题是可解的, 并且一系列解 $P^{(i)}, V^{(i)}$ 和 $\bar{L}^{(i)}$ 使 $J_1 = J_1^{i-1} J_1^{i-1} \dots J_1^0$ 成立. 同理, 可获得关于 J_2 的收敛算法证明.

4 算例

设线性时不变系统(1)的系数矩阵分别为

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} -5.2 & 0.65 & 6.5 & 1.3 \\ -1.56 & -2.6 & 0 & 2.6 \\ -1.3 & 0 & -1.3 & 0 \\ -0.26 & 0 & 3.9 & -1.95 \end{bmatrix}, \\
 E_d &= \begin{bmatrix} 0.5 \\ -1.5 \\ 1.0 \\ 0.5 \end{bmatrix}, B = E_f = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 4 \\ -4 \end{bmatrix}, \\
 C &= \begin{bmatrix} -0.3 & 0.3 & 0 & 0.3 \\ 0.3 & 0 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.06 \end{bmatrix}, \\
 F_d &= \begin{bmatrix} 0.15 \\ 0.3 \end{bmatrix}, F_f = \begin{bmatrix} 1.6 \\ -0.8 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

用 Matlab 中的 LM I 工具以及前面介绍的优化算法, 当 $\gamma = 0.43, \beta = 2.56$ 时, 同时满足目标(11)和(12), 并获得最优观测器增益

$$\begin{aligned}
 L^* &= \begin{bmatrix} -9.8533 & -22.3425 \\ -3.6425 & -9.7267 \\ 6.2183 & 7.4432 \\ -1.9408 & 1.1161 \end{bmatrix}, \\
 V &= \begin{bmatrix} 1.5841 & -0.7919 \\ -0.7919 & 0.3962 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

假设未知输入 $d(t)$ 是方差为 0.1 的白噪声, 故障信号

$$f = \begin{cases} 0.2(t - 5), 5s < t < 7.5s; \\ 0.2(10 - t), 7.5s < t < 10s; \\ 0, \text{其他} \end{cases}$$

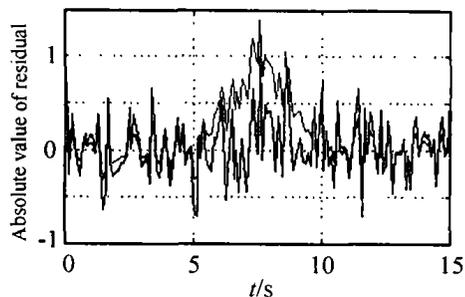


图 2 故障 f 的残差响应

则残差响应曲线如图 2 所示。由图可见,采用本文提出的残差生成器优化设计方法,可以成功地检测出故障,并有效抑制未知输入的影响。

5 结 语

针对线性时不变系统,研究基于观测器的故障检测滤波器的非凸多目标 H_{∞}/H_2 优化设计问题。首先构建一个由输出观测器和后滤波器组成的残差生成器,获得由灵敏度指标 H_{∞} 指数和鲁棒性指标 H_2 范数描述的残差信号动态特性,并将其描述为非凸的双线性矩阵不等式(BMIs)形式。然后通过在一定条件下将 BMIs 转化为一组线性矩阵不等式,获得了优化问题的可解条件、求解方法以及获得最优解的迭代算法,并证明了算法的收敛性。所设计的故障检测滤波器可以达到对故障具有高灵敏度而同时对未知输入具有强鲁棒性。相比仅基于输出观测器而无后滤波器的故障检测滤波器,该方法具有更大的设计自由度。

参考文献(References)

- [1] Ding S X, Jeinsh T, Frank P M, et al. A Unified Approach to the Optimization of Fault Detection Systems[J]. *Int J of Adaptive Control and Signal Processing*, 2000, 14(7): 725-745.
- [2] Hou M, Patton R J. An LM I Approach to H_{∞}/H_2 Fault Detection Observers [A]. *IEE Proc of the UKACC Int Conf on Control*[C]. Cornwall, 1996: 305-310.
- [3] Wang H B, Wang J L, Liu J, et al. Iterative LM I Approach for Robust Fault Detection Observer Design [A]. *Proc of the 42nd IEEE Conf on Design and Control*[C]. Hawaii, 2003: 1974-1979.
- [4] Frank P M. Handling Modeling Uncertainty in Fault Detection and Isolation Systems [J]. *Control Engineering and Applied Informatics*, 2002, 4(4): 29-46.
- [5] 周东华,叶昊,王桂增,等. 基于观测器方法的故障诊断技术若干问题的探讨[J]. *自动化学报*, 1998, 24(3): 338-344.
(Zhou D H, Ye H, Wang G Z, et al. Discussion of Some Important Issues of Observer Based Fault Diagnosis Technique [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1998, 24(3): 338-344.)
- [6] Chen J, Patton R J. *Robust Model-based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*[M]. Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [7] 钟麦英,汤兵勇, Ding S X, 等. 状态时滞系统故障诊断问题的 LM I 方法研究[J]. *控制与决策*, 2002, 17(1): 15-18.
(Zhong M Y, Tang B Y, Ding S X, et al. LM I Approach to Design State-delayed Fault Detection System [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(1): 15-18.)
- [8] Zhou K, Doyle J C, Glover K. *Robust and Optimal Control*[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [9] Boyd S, El Ghaoui L, Feron E, et al. *Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory* [M]. Philadelphia: SIAM, 1994.
- [10] Ding S X, Zhong M Y, Tang B Y, et al. An LM I Approach to Design of Fault Detection Filter for Time Delay LTI Systems with Unknown Inputs [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Virginia, 2001: 2137-2142.
- [11] Shimomura T, Fujii T. Multiobjective Control Design via Successive Over-bounding of Quadratic Terms [A]. *Proc of the 39th CDC* [C]. Sydney, 2000: 2763-2768.
- [4] Xiong Y, Saif M. Unknown Disturbance Inputs Estimation Based on a State Function Observer Design [J]. *Automatica*, 2003, 39: 1389-1398.
- [5] Jaime Moreno. Unknown Input Observers for SISO Nonlinear Systems [A]. *Proc of the 39th IEEE Conf on Decision and Control*[C]. Australia, 2000: 790-795.
- [6] Yang H L, Saif M. Monitoring and Diagnostics of a Class of Nonlinear Systems Using a Nonlinear Unknown Input Observer [A]. *Proc of the 1996 IEEE Conf on Control Applications* [C]. Dearborn, 1996: 1006-1011.
- [7] 刘亚. 复杂非线性系统的智能自适应重构控制 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2003.
(Liu Y. *Intelligent Adaptive Reconfigurable Control for Complex Nonlinear System* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003.)

(上接第 772 页)