

基于后置滤波器的线性系统故障检测方法

何 洪, 彭 涛

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412008)

摘 要: 针对线性时不变动态系统, 给出了故障检测观测器设计问题的描述, 采用后置滤波器达到对故障具有尽可能大的灵敏度, 而同时对未知输入信号的影响具有尽可能强的鲁棒性目标。通过仿真算例, 说明了该方法的有效性。

关键词: 故障检测; 后置滤波器; 线性系统

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)03-0074-04

Fault Detection Method for Linear Systems Based on Post-Filters

He Hong, Peng Tao

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008)

Abstract: A problem for fault detection observer and its optimal design problem are formulated for linear time invariant system. Using post-filter can reach the aim when the system is designed to be as possible as sensitive to faults and simultaneously as possible as robust to the unknown inputs such as disturbance. The simulation results illustrate the effectiveness of the proposed approach.

Key words: fault detection; post-filter; linear system

0 引言

基于观测器的方法一直是故障检测研究的热点, 在能够获得系统的精确数学模型的情况下, 观测器方法是最直接有效的方法^[1,2]。但模型的不确定性、干扰和噪声会直接影响到故障检测系统的性能指标, 特别会导致系统的灵敏度降低。近年来出现许多针对线性系统的方法, Zhong 等人针对具有建模误差的不确定线性时不变系统, 采用最优残差产生器作为参考残差模型来设计鲁棒检测观测器, 通过引入线性矩阵不等式, 来解决观测的最优化问题^[3]; Chen 等人设计了一种对线性时不变系统的最优随机故障检测滤波器^[4]。但是, 这些方法涉及到的符号运算和算法过于复杂。本文针对线性时不变系统, 构建输出观测器, 通过后滤波器来抑制残差中不感兴趣部分, 而加强其中反映故障的部分, 以区分故障与模型不确定性等未知输入

的影响, 达到尽可能好的检测性能指标。

1 基于观测器的故障检测方法

基于观测器故障检测的基本思想是通过构建一个输出观测器, 生成残差信号, 与一个预置阈值进行比较, 当残差大于阈值, 表示有故障发生。通常期望抑制残差中不感兴趣部分, 而加强其中反映故障的部分, 以区分故障与模型不确定性等未知输入的影响。因此, 故障检测观测器的设计目标是使生成的残差对故障具有尽可能大的灵敏度, 而同时对未知输入信号的影响具有尽可能强的鲁棒性。

考虑线性时不变动态系统在有故障情况下的状态空间描述为:

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

收稿日期: 2008-02-25

作者简介: 何 洪 (1981-), 男, 湖北荆门人, 湖南工业大学硕士研究生, 主要研究方向为控制理论与控制工程。

式中: $x(t) \in R^n$ 、 $u(t) \in R^k$ 和 $y(t) \in R^m$ 分别表示系统的状态、控制输入和输出;

$d(t) \in R^k$ 表示包括干扰、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;

$f(t) \in R^k$ 是表征必须检测出的系统所有可能的加性故障, 即执行器故障、元部件故障及传感器故障;

A 、 B 、 C 、 D 、 E_d 、 E_f 、 F_d 和 F_f 是具有适合维数的已知系数矩阵, 并假设:

A1) (C, A) 是可检测的;

A2) $\begin{bmatrix} A - j\omega I & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 对于所有的 ω 具有行满秩。

构建一个输出观测器, 其残差可以描述为^[5]:

$$r(s) = T_{rd}(s)d(s) + T_{rf}(s)f(s) = r_d(s) + r_f(s) \quad (2)$$

式中: $T_{rd}(s) = Q^{-1/2} D Q^{-1/2} C (sI - A - LC)^{-1} (B - LD)$;

$$T_{rf}(s) = Q^{-1/2} - Q^{-1/2} C (sI - A + LC)^{-1} L$$

且有 $Q = DD^T$, $L = (BD^T + YC^T)Q^{-1}$, $Y=0$ 是如下

Riccati 方程的解:

$$\begin{cases} A_1^T Y - Y A_1 - Y C^T Q^{-1} C Y + B^T (I - D^T Q^{-1} D) B^T = 0, \\ A_1 = A - B D^T Q^{-1} C \end{cases} \quad (3)$$

一般地用残差向量 $r(s)$ 的 H_2 范数作为残差评价函

$$\text{数}^{[6]}: \|r\|_2 = \|r\|_2 = \left(\int_{-1}^1 r^T(t)r(t)dt \right)^{1/2} \quad (4)$$

一旦选择了评价函数, 即可确定阈值 J_{th} 。最常用的故障检测逻辑可表示为:

$$\begin{cases} \|r\|_2 \geq J_{th} \rightarrow \text{有故障发生;} \\ \|r\|_2 < J_{th} \Rightarrow \text{无故障发生;} \end{cases} \quad (5)$$

2 加后置滤波器的故障检测方法

考虑状态方程空间描述 (1), 故障检测滤波器的结构如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) - Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)); \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) + Du(t); \\ r(t) = V(y(t) - \hat{y}(t)) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $r(t)$ 为残差信号。

假设满足:

B1) (C, A) 是可检测的;

B2) $\begin{bmatrix} A - j\omega I & E_d \\ C & F_d \end{bmatrix}$ 对于任意的 ω 具有行满秩。

故障检测滤波器的设计任务是选取 L 和 V , 使得矩阵 $A - LC$ 稳定, 且式 (6) 渐近稳定, 同时对扰动信号具有较强的鲁棒性, 对故障信号具有较高的灵敏度。

由式 (6) 可得:

$$\begin{aligned} r(s) = & V \left(C (sI - A + LC)^{-1} (E_f - LF_f) + F_f \right) f(s) + \\ & V \left(C (sI - A + LC)^{-1} (E_d - LF_d) + F_d \right) d(s) - \\ & T_{vrd}(s)f(s) + T_{vrd}(s)d(s) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $T_{vrd}(s) = V \left(C (sI - A - LC)^{-1} (E_f - LF_f) + F_f \right)$;

$$T_{vrd}(s) = V \left(C (sI - A + LC)^{-1} (E_d - LF_d) + F_d \right)$$

最理想情况为实现对扰动的全解耦, 即:

$$\begin{cases} r(t) = 0, & \text{if } f(t) = 0; \\ r(t) \neq 0, & \text{if } f(t) \neq 0. \end{cases} \quad (8)$$

但是, 通常情况下该条件往往太苛刻, 难以满足; 同时, 由于系统中建模误差、扰动等未知输入的存在, 使得 $T_{vrd}(s) = 0$ 无法满足。因此, 需要通过故障诊断滤波器的设计使得残差对于故障具有较高的灵敏度, 同时对于扰动具有较强的鲁棒性, 即:

$$\begin{cases} \text{残差对于故障的灵敏度} \rightarrow \max; \\ \text{扰动对于残差有影响} \rightarrow \min. \end{cases} \quad (9)$$

假设系统中的信号满足 H_2 范数有界, 通常故障诊断性能指标选取为:

$$\text{I: } J_{\infty/\infty} = \min_{H^2} \frac{\|T_{vrd}(s)\|_{\infty}}{\|T_{vrf}(s)\|_{\infty}} \quad (10)$$

$$\text{II: } J_{\infty/\min} = \min_{H^2} \frac{\|T_{vrd}(s)\|_{\infty}}{\|T_{vrf}(s)\|_{\min}} \quad (11)$$

$$\text{III: } J_{\infty/\infty} = \min_{H^2} (\|T_{vrd}(s)\|_{\infty} - \|T_{vrf}(s)\|_{\infty}) \quad (12)$$

$$\text{IV: } J_{\infty/\min} = \min_{H^2} (\|T_{vrd}(s)\|_{\infty} - \|T_{vrf}(s)\|_{\min}) \quad (13)$$

定理^[7] 对式 (6) 所描述的故障检测滤波器有:

$$\begin{cases} L = (E_d F_d^T + Y C^T) Q^{-1} \\ V = Q^{-1/2} \end{cases} \quad (14)$$

是性能指标 (10) ~ (13) 的最优解, 其中 $Q = F_d F_d^T$ 且 $Y \geq 0$ 是如下 Riccati 方程的解:

$$\begin{cases} A_1^T Y + Y A_1 - Y C^T Q^{-1} C Y + E_d^T (I - F_d^T Q^{-1} F_d) E_d^T = 0, \\ A_1 = A - E_d F_d^T Q^{-1} C \end{cases} \quad (15)$$

且最优化性能指标值为:

$$\begin{cases} J_{\infty/\infty} = \frac{1}{\|T_{vrf}(s)\|_{\infty}}; \\ J_{\infty/\min} = \frac{1}{\|T_{vrf}(s)\|_{\min}}; \\ J_{\infty/\infty} = 1 - \|T_{vrd}(s)\|_{\infty}; \\ J_{\infty/\min} = 1 - \|T_{vrd}(s)\|_{\min} \end{cases} \quad (16)$$

说明: 1) 残差向量的维数不多于被检测系统的阶数 n ;

2) 残差系统中的 V 也可以采用稳定的动态加权矩阵 $V(s) \in RH_{\infty}$, 以改变残差的动态特性。

3 实例仿真

考虑线性时不变系统^[8]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -6 & 1.5 \\ 2 & 3 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} -2 \\ 2 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} d(t) + \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} f(t), \\ y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) + F_d d(t) + F_f f(t), \end{cases}$$

假设系统在 15 s 时发生幅值为 1 的阶跃故障, 扰动信号为方差 0.01 的白噪声。

1) 当 $F_d = F_f = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}$ 时, $Q = F_d F_d^T \neq 1$ 。

① 构建如式 (6) 的故障检测滤波器, 可得:

$$V = \begin{bmatrix} 2.5 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} 2.5884 & 1.1835 \\ 0.9274 & 4.2346 \end{bmatrix},$$

检测到的残差信号如图 1、2 所示。

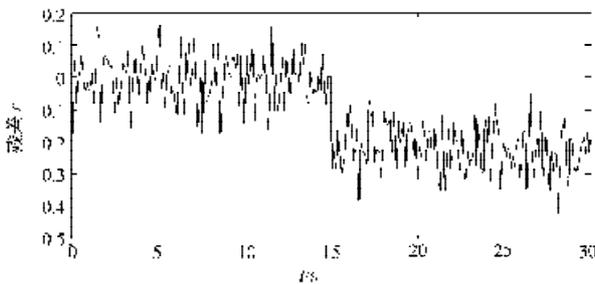


图 1 残差信号 r_1

Figure 1 The residual signal r_1

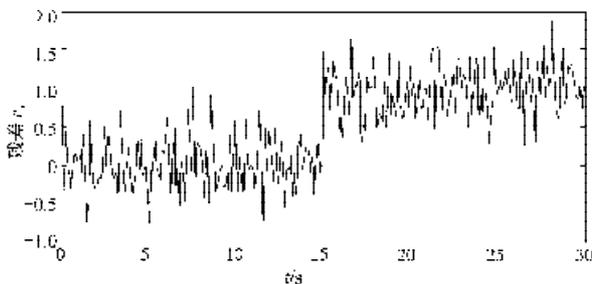


图 2 残差信号 r_2

Figure 2 The residual signal r_2

② 当不加后置滤波器时, 构建如式 (2) 的检测观测器, 可得:

$$L = \begin{bmatrix} -56.080 & 370 & 168 & 241 & 112 \\ -64 & 623 & 442 & 193 & 870 & 328 \end{bmatrix},$$

检测出的残差信号如图 3、4 所示。

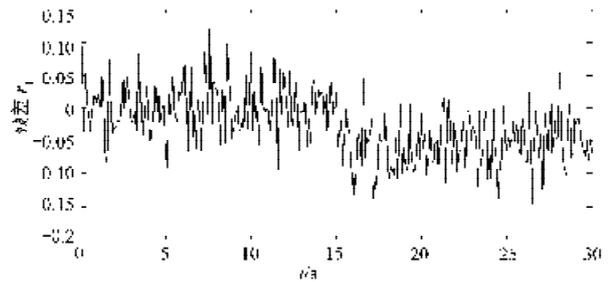


图 3 不加后置滤波器时残差信号 r_1

Figure 3 The residual signal r_1 of non post-filters

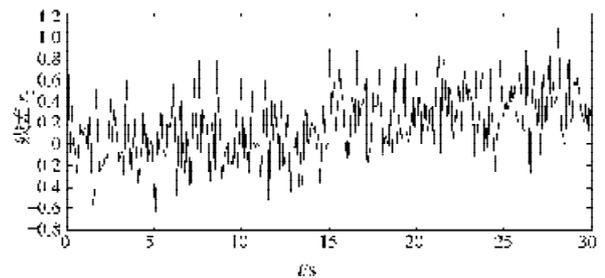


图 4 不加后置滤波器时残差信号 r_2

Figure 4 The residual signal r_2 of non post-filters

2) 当 $F_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$, $F_f = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 \end{bmatrix}$ 时, $Q = F_d F_d^T = 1$,

构建如式 (6) 的故障检测滤波器, 可得:

$$L = \begin{bmatrix} 9.0726 \\ 36.9668 \end{bmatrix}, V = 1, \text{ 检测出的残差信号如图 5 所示。}$$

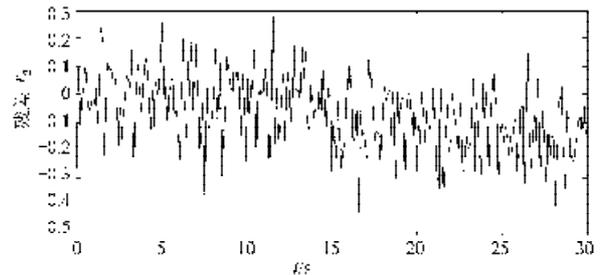


图 5 构建故障检测滤波器后的残差信号 r_1

Figure 5 The residual signal r_1 of fault detection filter

经过比较发现: 在情况 2) 下, 即没有后置滤波器, $V=1$ 时, 与情况 1) 下不采用后置滤波器的残差信号的检测效果一样, 虽然可以检测到故障, 但同时噪声等未知信号也被同样放大了。采用故障检测滤波器的方法不仅可以成功地检测出故障, 而且还可以有效抑制模型不确定性、噪声等未知输入的影响, 达到使故障检测系统对故障尽可能灵敏, 同时对模型不确定性等未知输入尽可能鲁棒之间的最佳平衡。

4 结语

针对线性时不变系统, 给出了故障检测观测器问题描述, 通过采用后置滤波器来抑制残差中不感兴趣

部分而加强其中反映故障的部分, 以区分故障与模型不确定性等未知输入的影响, 达到使生成的残差对故障具有尽可能大的灵敏度, 而同时对未知输入信号的影响具有尽可能强的鲁棒性的设计目标。实例仿真验证了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] Frank P M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy-a survey[J]. *Automatica*, 1990, 26(3): 459-474.
- [2] 周东华, 王庆林. 基于模型的控制系统的故障诊断技术和最新进展[J]. *自动化学报*, 1995, 21(2): 224-247.
- [3] Zhong M Y, Ding S X, Lam J. An LMI approach to design robust fault detection filter for uncertain LTI system[J]. *Automatica*, 2003, 39(2): 543-550.

- [4] Chen R H, Mingori D L, Speyer J L. Optimal stochastic fault detection filters[J]. *Automatica*, 2003, 39(3): 377-390.
- [5] Zhou K, Doyle J C, Glover K. *Robust and optimal control* [M]. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, 1995.
- [6] Chen J, Patton P R. *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [7] Ding S X, Jeansch T, Frank P M, et al. A unified approach to the optimization of fault detection systems[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2000, 14(7): 725-745.
- [8] Zhong M Y, Tang B Y, Ding S X. LMI approach to observer-based FD systems designing[J]. *Journal of Dong Hua University (Eng. Ed.)*, 2001, 18(4): 41-44.

(责任编辑: 张亦静)

(上接第 73 页)

3 结论

1) HDPE/EVA 共混熔体属假塑性流体, 其表观粘度随着剪切速率和切应力的增大而减小, 可以用幂率模型描述;

2) HDPE/EVA 共混熔体表观粘度随温度的升高而减小, 可以用 Arrhenius 关系来描述;

3) HDPE/EVA 共混熔体粘流活化能随剪切速率的增大呈逐渐减小的趋势;

4) HDPE/EVA 共混熔体的粘度与组分配比的关系用 Hashin 模型或 Heitmiller 模型比较合适。

参考文献:

- [1] 樊卫华, 刘玉坤, 白娟, 等. HDPE/E-TMB 共混物熔体的流变行为研究[J]. *塑料工业*, 2005, 33(12): 39-42.
- [2] 于旻, 杨连军, 李三喜, 等. HDPE/EVA 共混体系的研究[J]. *高分子材料科学与工程*, 1993 (6): 89-92.
- [3] 温变英, 李燕. HDPE/EVA 复合薄膜共挤出成型工艺及

机头结构设计[J]. *塑料工业*, 1998, 26(1): 88-91.

- [4] 高俊刚, 王东, 刘悦有, 等. mPE 弹性体/PP 共混物的流变行为与力学性能[J]. *塑料工业*, 2003, 31(3): 45-48.
- [5] 张群安, 史政海. 聚丙烯共混体系的流变性能及界面研究[J]. *南阳师范学院学报*, 2006, 5(9): 47-49.
- [6] 逯琪, 李细林, 严玉蓉, 等. 聚丙烯/改性聚酯共混体系流变行为研究[J]. *化纤与纺织技术*, 2006 (3): 1-3.
- [7] 王冰, 赵耀明, 阳范文. 高粘度 PET/PP 共混物的力学及流变性能研究[J]. *工程塑料应用*, 2008, 36(2): 4-7.
- [8] 柳峰, 刘琼琼, 徐冬梅, 等. PET/PP 共混改性研究进展[J]. *塑料科技*, 2008, 36 (1): 88-93.
- [9] Utracki L A. *Polymer Alloys and Blends*[M]. New York: Carl Hanser, 1981: 131.
- [10] Han C D. *Rheology in Polymer Processing*[M]. New York: Academic Press, 1976.
- [11] Heitmiller R F, Naar Z, Zabusky H H. Effect of Homogeneity on Viscosity in Capillary Extrusion of Polyethylene[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1964 (8): 873-880.

(责任编辑: 张亦静)