

锅炉燃烧控制系统故障诊断观测器的仿真研究

吴迪, 冯志敏*, 张刚, 周昕

(宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对目前故障诊断观测器设计难以满足实际工程对多性能条件的技术要求, 利用建立线性矩阵不等式方法, 引入故障灵敏度指标, 并分析多个指标之间的相容性问题, 用极值的方法计算确定指标的取值范围, 最终提出故障诊断观测器的设计方法. 以锅炉燃烧控制系统为例, 对恒偏差型故障、脉冲型故障进行计算机系统仿真研究. 结果表明, 与满足单一稳定性指标的观测器相比, 所提出的故障诊断观测器对干扰有较强的抑制作用和较高的故障灵敏度.

关键词: 故障诊断; 观测器; 线性矩阵不等式; 锅炉燃烧控制系统

中图分类号: TP27

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2014) 02-0025-05

随着工业过程领域科技的发展, 对系统提出了更高的稳定性要求, 故障检测与诊断已成为当前研究的热门课题之一, 且取得了重大进展^[1-3]. 目前, 故障诊断观测器较多从单一稳定性指标的最优化去设计, 已经很难满足复杂工程中的实际要求^[4-6]. 针对存在模型不确定性和测量噪声的线性动态系统, 设计观测器时需较多考虑系统的稳定性、残差对干扰的鲁棒性和协方差指标, 而通常忽略残差对故障灵敏度指标以及相容性问题.

笔者针对上述故障诊断观测器对多性能指标约束的设计问题, 以锅炉燃烧控制系统为实例进行仿真研究. 锅炉燃烧过程中, 其外界干扰和故障的因素较为复杂, 人为操控失当、炉膛负压过于灵敏对锅炉燃烧控制系统的响应速度和燃烧过程的稳定都产生较为严重的影响. 在实际生产当中, 不仅要保证锅炉在执行器件发生故障时有较高的信号传递快速性, 同时, 也要对外界干扰有鲁棒性等问题. 基于锅炉燃烧过程的复杂性和控制难点, 要实现锅炉的高热效率和安全运行, 应保证锅炉燃烧控制系统运行过程在外界干扰和故障的影响下能满足用户的负荷要求^[7]. 笔者以锅炉燃烧控制系统为例, 利用故障诊断原理, 采用极值计算方法,

在多个相容性指标下进行观测器设计. 通过针对执行器恒偏差故障和脉冲故障进行系统仿真研究, 结果表明, 与满足极点性指标的普通观测器相比, 故障诊断观测器更能有效准确得到故障信息, 有良好的干扰抑制作用和较高的故障灵敏度.

1 故障诊断观测器设计原理

在有干扰和故障情况的常见线性控制系统的状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + D_1\omega(t) + Ef(t), \\ y(t) = Cx(t) + D_2\omega(t), \end{cases} \quad (1)$$

设计故障诊断观测器:

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

其中, $x \in R^n$ 为状态量, $\omega(t) \in R^q$ 代表有界干扰输入; D_1, D_2, E 表示适维常数矩阵; $\hat{x} \in R^n$, $\hat{y}(t) \in R^k$ 分别表示状态估计和输出估计; L 是待求的故障诊断观测器增益; 则可定义状态估计误差 $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$; 残差信号 $r(t) = y(t) - \hat{y}(t)$.

锅炉燃烧控制系统的误差动态方程:

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = (A - LC)e(t) + (D_1 - LD_2)\omega(t) + Ef(t), \\ r(t) = Ce(t) + D_2\omega(t). \end{cases} \quad (3)$$

收稿日期: 2013-12-11.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(61071198); 浙江省科技计划项目(2013C31045); 浙江省自然科学基金(LY12F03009); 宁波市自然科学基金(2012A610004).

第一作者: 吴迪(1987-), 男, 湖北荆州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 故障诊断与容错控制. E-mail: wuyuheng0728@sina.com

*通信作者: 冯志敏(1960-), 男, 浙江宁波人, 教授, 主要研究方向: 机械设备状态监测与故障诊断. E-mail: fengzhimin@nbu.edu.cn

定义 1 考虑误差动态系统(3), 给定开圆盘 $\Phi(q, r)$ (表示复平面内中心在 $(-q, 0)$ 、半径为 r 的开圆盘 ($q > r > 0$)), 方差指标 σ^2 , 正常数 $\gamma > 0$ 和 $\beta > 0$, 需设计一定常状态观测器增益矩阵 L , 使得系统(3)同时满足下述条件:

① 系统稳定条件: 系统极点集 $\Lambda(A-LC) \subset \Phi(q, r)$.

② 噪声对残差条件: 估计误差稳态协方差阵 P 满足 $\text{diag}(P) \leq \sigma^2$, 其中 P 定义为 $P = \lim_{t \rightarrow \infty} P(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} E\{e(t)e^T(t)\}$.

③ 扰动输入对残差条件: 从扰动输入 $\omega(t)$ 到残差信号 $r(t)$ 的传递函数 $\|H(s)\|_\infty < \gamma$.

④ 故障灵敏度条件: 从故障 $f(t)$ 到残差信号 $r(t)$ 的传递函数 $\|H(s)\|_\infty > \beta$, 则称误差动态系统的区域极点指标、协方差指标与 H_- / H_∞ 范数相容.

引理 1^[8] 考虑动态系统 $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$, 给定正实数 β , 以下表达式等价:

(1) $\sigma_{\min}(G_f(j\omega)) > \beta$.

(2) 存在合适维数矩阵变量 X , 使下式成立:

$$X(A + BR^{-1}D^TC) + (A + BR^{-1}D^TC)^TX + XBR^{-1}B^TX + C^T(I + DR^{-1}D^T)C > 0. \quad (4)$$

此时, $R = \beta^2 I - D^TD$.

2 主要结论和设计步骤

定理 1 系统(1)存在观测器增益 L 使误差动态方程(3)满足约束条件①~④的充要条件是存在实变量 γ^2 , $\beta_1 < \beta < \beta_2$, 正定对称矩阵 $X(X > 0)$ 和矩阵 Y , 实数 $\alpha = \beta^2$ 的如下 LMIS 有解. 此时, $Y = XL$.

$$\begin{bmatrix} -rX & X(A + qI) - YC \\ (A + qI)^TX - C^TY & -rX \end{bmatrix} < 0, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} XA + A^TX - C^TY^T - YC & XD_1 - YD_2 & C^T \\ D_1^TX - D_2^TY & -\gamma I & D_2^T \\ C & D_2 & -\gamma I \end{bmatrix} < 0, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} XA + A^TX - C^TY^T - YC + C^TC & XE \\ E^TX & -\alpha I \end{bmatrix} < 0, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} A^TX + XA - YC - C^TY^T & YD_2 & XD_1 \\ D_2^TY & -W^{-1} & 0 \\ D_1^TX & 0 & -W^{-1} \end{bmatrix} < 0. \quad (8)$$

证明 若系统存在观测器增益 L 满足约束条件极点集 $\Lambda(A-LC) \subset \Phi(q, r)$. 由文献[9]可知, 单

变量 X 的(5)式必有正定解. 假定 X 为(5)式的正定解, 选取适当的正常数 λ , 展开(5)式, 记 $X_\lambda = \lambda X$, 则有 $(A-LC)X_\lambda + X_\lambda(A-LC)^T < 0$.

由文献[10]可得:

$$(A-LC)X_\lambda + X_\lambda(A-LC)^T + (D_1 - LD_2) \cdot (D_1 - LD_2)^T / \gamma + \frac{1}{\gamma} \begin{bmatrix} C^T \\ D_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C & D_2 \end{bmatrix} < 0.$$

固定 X_λ , 再取充分大数 γ , 可使得 (γ, X_λ) 满足(6)式, 显然 X_λ 仍然是(5)式的正定解, 此时, 取 $Y = X_\lambda L$, 则 (γ, X_λ, Y) 是 LMIS(5)~(6)的解.

对于故障 $f(t)$ 到残差 $r(t)$ 的传递函数 $G_{rf}(s) = C[sI - (A-LC)]^{-1}E$, 运用引理 1 可得:

$$X(A-LC)^T + (A-LC)X + C^TC + EE^T / \beta^2 < 0. \quad (9)$$

保持 X 不变, 取适当实数 β , 可使 (X, Y, β) 满足(9)式, 显然 (X, Y) 仍然是 LMIS(5)~(6)的解, 则 (X, Y, β) 是 LMIS(5)~(7)的解.

假定存在实数 β_1 满足 $(\beta > 0)$:

$$X(A-LC)^T + (A-LC)X + C^TC + EE^T / \beta^2 = 0, \quad (10)$$

取适当实数 β , 需满足 $\beta > \beta_1$, 才可使(9)式成立.

假定关于 (X, Y, α) 的 LMIS(5)~(7)有解, 取极大值 $\max(\alpha): (X, Y, \alpha)$, 记 (X_2, Y_2, α_2) 为极大值点. 即极大值 $\beta_2 = \sqrt{\alpha_2}$. 因此, 要满足条件成立, 实数 β 的取值范围为 $\beta_1 < \beta < \beta_2$. 若满足如下 LMIS(5)~(7)成立, 则满足 $\beta_1 < \beta < \beta_2$ 的 H_- 指标都与区域极点指标和 H_∞ 指标相容.

由文献[11]可得:

$$(A-LC)X + X(A-LC)^T + LD_2WD_2^TL^T + D_1WD_1^T < 0. \quad (11)$$

运用 Schur 补性质可得(8)式. 相容性证明类似于文献[12].

注 1 从定理 1 可知, 对于 LMIS(5)~(8)成立的控制系统, 所有满足 $\sigma^2 \geq \text{diag}(X_1)$ 的方差指标 σ^2 都与满足 $\beta_1 < \beta < \beta_2$ 的 H_- 指标、区域极点指标和 H_∞ 指标相容.

注 2 对于误差动态系统(3), 存在正定对称矩阵 $X(X > 0)$ 和矩阵 Y 满足域极点 $\Phi(q, r)$ 、 H_∞ 指标 γ^2 、方差指标 σ^2 满足 $\sigma^2 \geq \text{diag}(X_1)$ 与满足 $\beta_1 < \beta < \beta_2$ 的 H_- 指标条件, 则关于 (X, Y) 的 LMIS(5)~(8)和 $X < X_1$ 总有可行解, 且若 (X, Y) 是其任意可行解, 则 $L = X^{-1}Y$ 就是一个满足条件①~④的观测器增益, 其中 X_1 满足 $\text{diag}(X_1) = \sigma^2$, 且 $X_1 > X_2$ 的任

意正定对称矩阵.

为便于实际中操作,给出同时满足上述指标要求的故障诊断观测器设计步骤:

(1) 对于所有可能的执行器失效,用 Matlab 求解器 feasp 验证关于变量 (X, Y, γ, β) 的 LMIS(5)~(8) 的可行性,从而辨别故障诊断观测器存在.

(2) 若 LMIS(5)~(8) 满足可行,用 Matlab 求解器 mincx 求解以 (X, Y, γ) 为变量, LMIS(5)~(6) 为约束, $\min \gamma$ 极小值问题记为极小值为 γ_0 .

(3) 取满足条件 $\gamma^2 > \gamma_0^2$ 的任意值,用 Matlab 求解器 mincx 求解以 (X, Y, β) 为变量, LMIS(5)~(7) 为约束,求得 β 的取值范围 $\beta_1 < \beta < \beta_2$.

(4) 取满足 $\beta_1 < \beta < \beta_2$ 的任意值,用 Matlab 求解器 mincx 求解 (X, Y) 为变量, LMIS(5)~(8) 为约束, $\min(\text{tr}X)$ 为目标函数的极小值问题,得到 X_1 ,从而可知对于任意给定的、满足 $\sigma^2 \geq \text{diag}(X_1)$ 的方差指标必定与满足 $\beta_1 < \beta < \beta_2$ 的 H_- 指标、区域极点指标和 H_∞ 指标相容.

(5) 对于给定的方差上界指标 $\sigma^2 \geq \text{diag}(X_1)$,选取满足条件的 γ, β ,则求解关于变量 (X, Y) 的 LMIS(5)~(8) 以及 $X_1 > X$,利用上述 LMIS 可行解构造同时满足①~④的故障诊断观测器.若无可行解,重新选取 γ, β ,再次计算求解.

3 系统仿真

以某个 300 MV 单元机组负压运行煤粉燃烧锅炉为例.锅炉燃烧控制系统首先要维持蒸汽压力稳定,保证锅炉燃烧过程的正常安全运行.其次,在燃烧过程中,要保证热量被充分利用,则可以通过送风量与引风量来调节;同时,炉膛压力的稳定也关系到锅炉的安全运行和经济效益.因此,锅炉燃烧控制系统可以通过 3 个调节量——喷油量、送风量和引风量来控制 3 个变量——蒸汽压力 p_m 、炉膛负压 p_s 和氧含量 o_2 . 锅炉控制系统结构如图 1 所示.

图 2 为锅炉燃烧控制系统的原理框图.在图 2 中,各个环节特性传递函数如下^[7]:

$$G_1 = -(0.1 + \frac{1}{30s}), G_2 = \frac{0.0033}{(30s+1)s}, G_3 = \frac{-0.3}{5s+1},$$

$$G_4 = \frac{1.8}{30s+1}, G_5 = \frac{0.5}{5s+1}, G_6 = \frac{-1}{5s+1}.$$

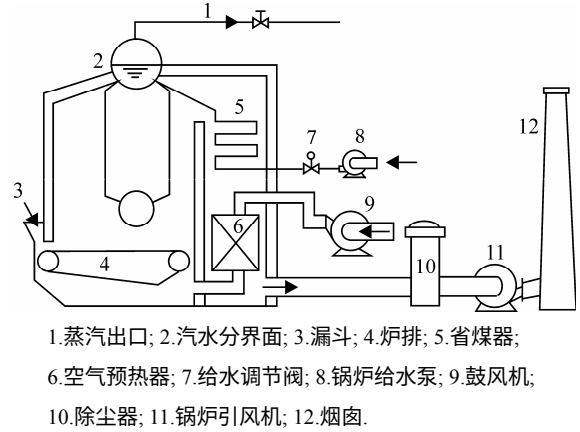


图1 锅炉控制系统结构

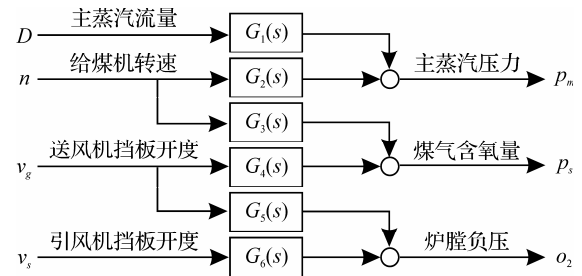


图2 锅炉控制系统原理框图

根据锅炉燃烧控制系统原理,将数学模型得到的传递函数转化为状态方程表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -0.033 & 0 & 0 \\ 1 & -0.2 & 0 \\ 0 & 0 & -0.033 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} u(t) + \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \omega(t) + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} f(t), \\ y(t) = \begin{bmatrix} 0.0001 & -0.06 & 0 \\ 0 & 0.06 & 0.1 \\ 0 & 0 & -0.2 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \omega(t). \end{cases}$$

其中,输出变量 $y = [p_m, o_2, p_s]$, 输入变量 $u = [n, v_g, v_s]$, 扰动量 $W = \text{diag}\{0.1, 0.1, 0.1\}$.

在锅炉燃烧控制系统运行过程中,常发生燃烧器马达失灵、不转或者间歇性停机等执行器件故障,多数由保险环损坏、接触器不动作、空气压力开关失灵、电磁阀泄漏等因素造成.针对锅炉燃烧控制系统燃烧机、循环泵和风机等执行器的故障,主要是恒偏差故障和脉冲故障,其表达方式如下:

$$\text{恒偏差型故障: } f(t) = \begin{cases} 0.5, t \geq 20 \text{ s}, \\ 0, t < 20 \text{ s}. \end{cases}$$

脉冲型故障: $f(t) = \begin{cases} 0.5, t = 35 \text{ s}, \\ 0, \text{其它}. \end{cases}$

考虑到残差的瞬间相应性能, 将故障诊断观测器的极点配置在 $\Phi(5,3)$ 的圆域内. 根据故障诊断设计原理, 可求得 $\gamma_{\min} = 1.2780$, 取 $\gamma = 1.5$, 设计 $\beta = 0.282$. 其故障诊断观测器增益矩阵为:

$$L = \begin{bmatrix} -17.8256 & 212.0611 & 69.9173 \\ -17.6689 & 129.4994 & 43.1840 \\ -0.1882 & -3.3489 & -28.9949 \end{bmatrix}.$$

由此, 笔者基于设计的观测器对锅炉燃烧控制系统中燃烧机、循环泵和风机等执行器常见的恒偏差故障、脉冲故障进行多组合仿真试验, 并与追求单个稳定极点性能指标极值的观测器进行分析对比. 为了验证观测器对不同故障的敏感程度, 给控制输入 $u = 0.1\sin(t)$, 仿真时间为 50 s.

3.1 控制系统中的执行器未发生故障时

图 3 可见, 由于干扰输入信号的影响, 即使系统不存在故障, 极点性能指标下观测器的输出残差已经相当大, 无法用于诊断; 同时也会出现误报和漏报等现象, 给系统正常故障诊断带来困难. 图 4 可见, 在系统没有发生执行器故障时, 输出残差近似趋近于零, 有效地抑制了噪声干扰的影响.

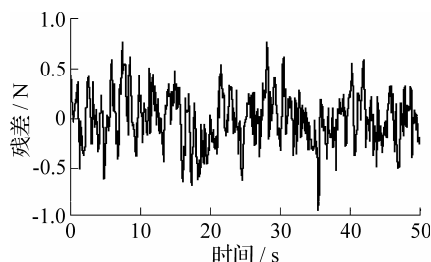


图 3 极点性能指标下观测器的残差信号

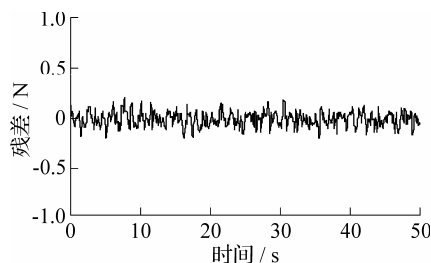


图 4 本文观测器的残差信号

3.2 控制系统中的执行器发生故障时

图 5 可见, 极点性能指标下观测器仍然可以模糊地检测出故障信号, 但由于干扰信号给系统故障信号的识别造成相当程度的困难. 图 6 表明能有

效检测出当 $t = 20 \text{ s}$ 时执行器发生了恒偏差故障.

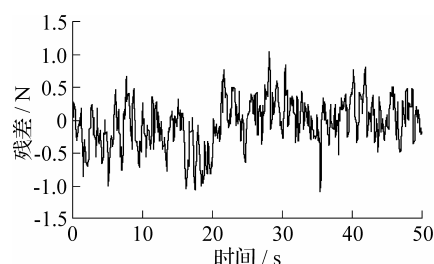


图 5 极点性能指标下观测器的残差信号

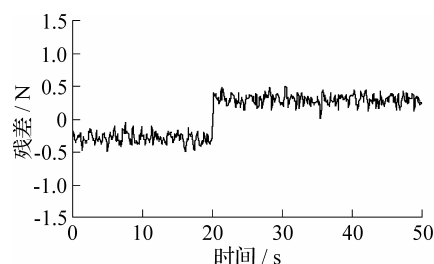


图 6 本文观测器的残差信号

由图 7 可见, 极点性能指标下观测器由于干扰信号影响几乎识别不出故障信号. 图 8 反映了在 $t = 35 \text{ s}$ 时执行器发生了脉冲型故障.

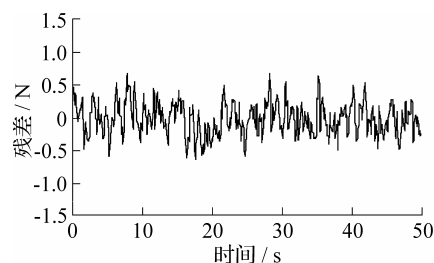


图 7 极点性能指标下观测器的残差信号

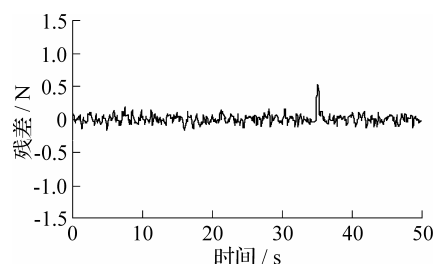


图 8 本文观测器的残差信号

因此, 无论执行器发生何种故障, 残差输出同样体现出相应的变化, 残差信号的形状反映了对应的故障类型. 从不同的仿真试验结果可知, 控制系统中的执行器发生故障时, 都可通过笔者提出的观测器检测方法及时准确地反应出来, 其方法在控制系统的故障诊断中十分有效.

4 结论

采用建立线性矩阵不等式方法,对锅炉燃烧控制系统进行故障诊断观测器设计,并对其计算机仿真研究。结果表明,多性能要求下的故障诊断观测器对于锅炉复杂系统的故障诊断,其干扰抑制作用和故障灵敏度都优于传统单一稳定性指标的观测器,但对于其他复杂系统的优化效果,需要进一步探讨研究。

参考文献:

- [1] Li Juan, Tang Gongyou. Fault diagnosis for discrete-time delayed systems based on observers[J]. Control and Decision, 2010, 25(8):1221-1224.
- [2] 杨波,李惠光,沙晓鹏,等. 基于 $I & I$ 与 Hamiltonian 理论的机器人速度观测器设计[J]. 自动化学报, 2012, 38(11):1757-1764.
- [3] 杨光红,王恒,李箫剑. 基于模型的线性控制系统故障检测方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [4] 薄翠梅,王执铨,张广明,等. 一类多指标约束下模糊非线性系统的满意容错控制[J]. 控制与决策, 2010, 25(7):998-1003.
- [5] Yang Dongmei, Zhang Jing. Robust H. Observer design for a class of Lur's control systems with uncertain time-delay[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2013, 34(3):305-307.
- [6] 姜云春,邱静,刘冠军. 基于多指标约束的鲁棒故障检测方法[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(1):79-82.
- [7] 陈非,孙灵芳. 锅炉燃烧控制的优化设计及应用[J]. 电站系统工程, 2009, 25(1):57-58.
- [8] Liu Jian, Wang Jianliang, Yang Guanghong. An LMI approach to minimum sensitivity analysis with application to fault detection[J]. Automatica, 2005, 41(11):1995-2004.
- [9] 孙新柱,胡寿松. 多目标约束下的满意容错控制方法[J]. 自动化学报, 2008, 34(8):938-942.
- [10] Zhong Maiying, Ye Hao, Chen Guiyon, et al. An ILMI approach to RFDF for uncertain linear systems with nonlinear perturbations[J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(2):297-300.
- [11] 程相权,郭治,王远钢,等. 连续不确定系统满意估计研究[J]. 自动化学报, 2003, 29(5):785-790.
- [12] 张刚,王执铨. 多性能指标约束下的容错控制系统设计[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35(增 2):5-9.

Simulation: Fault Diagnosis Observer Design for Boiler Combustion Control System

WU Di, FENG Zhi-min*, ZHANG Gang, ZHOU Xin

(Maritime College, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: At present, the observer design does not meet the requirements of multi-performance constraints for real-time complex engineering system. This paper first analyzes the compatibility of multiple indices based on linear matrix inequality method, and calculates the range of performance index using the extreme value theory. Then, a fault diagnosis observer design is presented in detail. Finally, a system simulation is conducted for detecting both actuator constant bias fault and pulse fault in boiler combustion control system. The results show that, compared with the ordinary observer with pole assignment constraint, the proposed fault diagnosis observer has strong robustness to interference and higher sensitivity to the fault.

Key words: fault diagnosis; observer; linear matrix inequality; boiler combustion control system

(责任编辑 章践立)