

基于LMI双故障动态输出反馈完整性控制

王福忠^{1,2}, 姚 波³, 张庆灵²

(1. 沈阳工程学院 基础部, 辽宁 沈阳 110136; 2. 东北大学 理学院, 辽宁 沈阳 110004;

3. 沈阳师范大学 数学与系统科学学院, 辽宁 沈阳 110034)

摘要: 针对线性系统, 基于线性矩阵不等式(LMI)给出了具有完整性的动态输出反馈控制器的设计方案, 所得到的结论, 不仅给出分别考虑执行器和传感器两类部件发生故障的完整性设计方案, 而且给出了考虑执行器或传感器任何一类部件发生故障的完整性设计方案. 本文使用了比离散故障模型更具有实际意义的连续故障模型. 一个数值例子说明了所提方法的有效性.

关键词: 执行器故障; 传感器故障; 双故障; 完整性; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

LMI-based dynamic output feedback control possessing integrity when either actuator or sensor fails

WANG Fu-zhong^{1,2}, YAO Bo³, ZHANG Qing-ling²

(1. Basic Science Course Department, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang Liaoning 110136, China;

2. School of Science, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China;

3. College of Mathematics and Systems Science, Shenyang Normal University, Shenyang Liaoning 110034, China)

Abstract: For linear system, a LMI (linear matrix inequality)-based approach is presented to design a dynamic output feedback controller for the closed-loop system to possess integrity, not only when sensor and actuator failure occurs separately, but also when either actuator or sensor failure occurs. A more practical continuous model of sensor and actuator failures than discrete model is also considered. Finally, a numerical example is given to show the effectiveness of the obtained results.

Key words: actuator failure; sensor failure; two failures; integrity; linear matrix inequality (LMI)

1 引言(Introduction)

系统具有完整性控制器的设计是指设计控制器, 使得系统无论部件(传感器和执行器)是否出现故障都能使系统保持渐近稳定性. 到目前为止, 人们对具有完整性控制器设计取得了一定的进展, 文献[1,2]利用离散故障模型分别给出了考虑执行器故障和传感器故障的完整性控制器设计. 文献[3]使用连续故障模型, 给出了更实用的完整性控制器的设计方法. 但是, 由于文献[1,3]利用Riccati方程使得结论的保守性较大, 而且控制器参数矩阵解析解的确定非常困难. 文献[4]使用LMI确定了完整性控制器的参数矩阵的数值解. 文献[5]和文献[6]分别研究了考虑执行器故障和传感器故障的状态反馈区域极点

可靠配置问题. 但是, 对于具有完整性的动态输出反馈控制的设计还鲜见于文献中. 虽然, 文献[3,5,6]分别研究了考虑传感器和执行器故障的完整性状态反馈控制器的设计. 但是, 这样设计的完整性系统并不能真正保证系统的完整性. 仿真中可以看到, 对于考虑执行器故障的完整性系统, 当不是执行器发生故障而是传感器发生故障时, 系统将失去稳定性. 另一方面, 对于考虑传感器故障完整性系统, 当执行器出现故障时也可能失去稳定性.

本文使用连续故障模型, 基于LMI给出了动态输出反馈完整控制器的存在的充分条件. 不仅分别讨论了执行器故障和传感器故障的完整性控制器设计, 而且提出了考虑执行器和传感器故障的双故障

系统完整性设计.

2 问题描述(Problem description)

考虑如下线性系统

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx.\end{aligned}\quad (1)$$

其中: $x \in \mathbb{R}^n$ 为系统的状态变量, $y \in \mathbb{R}^p$ 为系统的测量输出, $u \in \mathbb{R}^m$ 为控制输入, A, B, C 为适当维数的常值矩阵.

动态输出反馈控制形式为

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= A_0 \hat{x} + B_0 y, \\ u &= C_0 \hat{x} + D_0 y.\end{aligned}\quad (2)$$

由系统(1)和控制器(2)构成的闭环系统

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A} \bar{x}.\quad (3)$$

$$\text{其中: } \bar{x} = \begin{bmatrix} x \\ \hat{x} \end{bmatrix}, \bar{A} = \begin{bmatrix} A + BD_0C & BC_0 \\ B_0C & A_0 \end{bmatrix}.$$

本文采用传感器连续增益故障模型, 描述如下:

$$y^F = F_s y.\quad (4)$$

其中: $y \in \mathbb{R}^p$ 是传感器测量输出的正常信号向量, $y^F \in \mathbb{R}^p$ 是考虑传感器故障的测量输出信号向量, F_s 为传感器故障矩阵, 其形式为

$$F_s = \text{diag}(f_{s1}, f_{s2}, \dots, f_{sp}).\quad (5)$$

其中: $\underline{f}_{si} \leq f_{si} \leq \bar{f}_{si}, 0 \leq \underline{f}_{si} \leq 1, \bar{f}_{si} \geq 1, \underline{f}_{si} \neq \bar{f}_{si} (i = 1, 2, \dots, p)$.

执行器连续增益故障模型为

$$u^F = F_a u.\quad (6)$$

其中: $u \in \mathbb{R}^m$ 为执行器正常信号向量, $u^F \in \mathbb{R}^m$ 为考虑执行器故障的信号向量, F_a 为执行器故障矩阵, 其形式为

$$F_a = \text{diag}(f_{a1}, f_{a2}, \dots, f_{am}).\quad (7)$$

其中: $\underline{f}_{ai} \leq f_{ai} \leq \bar{f}_{ai}, 0 \leq \underline{f}_{ai} \leq 1, \bar{f}_{ai} \geq 1, \underline{f}_{ai} \neq \bar{f}_{ai} (i = 1, 2, \dots, p)$.

在考虑传感器故障时, 设集合

$$\delta_s = \left\{ \varphi_{si} \left| \begin{array}{l} \varphi_{si} = \text{diag}(\varphi_{si1}, \varphi_{si2}, \dots, \varphi_{sip}), \\ \varphi_{sij} = \underline{f}_{sj} \text{ or } \bar{f}_{sj}, j = 1, 2, \dots, p \end{array} \right. \right\}.\quad (8)$$

显然, 当 $\underline{f}_{sj} \neq \bar{f}_{sj}$ 时, 集合 δ_s 有 2^p 个元素. 由集合 δ_s 的元素为顶点构成的超多面体及内部表述的集合是凸的, 记为

$$\Delta_s = \left\{ F_s \left| \begin{array}{l} F_s = \text{diag}(f_{s1}, f_{s2}, \dots, f_{sp}), \\ \underline{f}_{si} \leq f_{si} \leq \bar{f}_{si}, i = 1, 2, \dots, p \end{array} \right. \right\}.\quad (9)$$

这样, 任意故障矩阵 $F_s \in \Delta_s$. 对于任意 $F_s \in \Delta_s$, 总可以找到 $\alpha_{si} \geq 0 (i = 1, 2, \dots, 2^p)$ 满足 $\sum_{i=1}^{2^p} \alpha_{si} = 1$, 使得

$$F_s = \sum_{i=1}^{2^p} \alpha_{si} \varphi_{si}.\quad (10)$$

类似地, 在考虑执行器故障时, 设集合

$$\delta_a = \left\{ \varphi_{ai} \left| \begin{array}{l} \varphi_{ai} = \text{diag}(\varphi_{ai1}, \varphi_{ai2}, \dots, \varphi_{aim}), \\ \varphi_{aij} = \underline{f}_{aj} \text{ or } \bar{f}_{aj}, j = 1, 2, \dots, m \end{array} \right. \right\}.\quad (11)$$

给出不考虑故障动态输出反馈控制器的设计方案.

定理 1 对于系统(1)存在一个输出反馈控制器(2)使闭环系统渐近稳定, 当且仅当存在矩阵 X, Y 和矩阵 $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}$ 使得下列LMIs

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} &> 0, \\ \begin{bmatrix} AX + (AX)^T + B\hat{C} + (B\hat{C})^T \\ * \\ \hat{A}^T + A + B\hat{D}C \\ YA + (YA)^T + \hat{B}C + (\hat{B}C)^T \end{bmatrix} &< 0 \end{aligned}\quad (12)$$

是可行的. 如不等式(12)(13)的可行解为 $(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}, X, Y)$, 输出反馈控制器(2)的参数矩阵为

$$\begin{cases} D_0 = \hat{D}, B_0 = N^{-1}(\hat{B} - YBD_0), \\ C_0 = (\hat{C} - D_0CX)(M^T)^{-1}, \\ B_0 = N^{-1}(\hat{B} - YBD_0), \\ A_0 = N^{-1}[\hat{A} - (YAX + YBD_0CX + NB_0CX + YBC_0M^T)](M^T)^{-1}. \end{cases}\quad (14)$$

其中矩阵 M 和 N 通过 $I - XY$ 奇异值分解得到, 即

$$I - XY = MN^T.\quad (15)$$

证 版面所限, 略.

给出符号的意义如下:

- 1) $F_{s0} = \text{diag}(f_{s10}, f_{s20}, \dots, f_{sp0})$;
- 2) $J_s = \text{diag}(j_{s1}, j_{s2}, \dots, j_{sp})$;
- 3) $L_s = \text{diag}(l_{s1}, l_{s2}, \dots, l_{sp})$;
- 4) $|L_s| = \text{diag}(|l_{s1}|, |l_{s2}|, \dots, |l_{sp}|)$.

其中: $j_{si} = \frac{\bar{f}_{si} - \underline{f}_{si}}{\bar{f}_{si} + \underline{f}_{si}}, f_{si0} = \frac{1}{2}(\underline{f}_{si} + \bar{f}_{si}), l_{si} =$

$\frac{f_{si} - f_{si0}}{f_{si0}}, i = 1, 2, \dots, p$; 同理可得 $F_{a0}, J_a, L_a, |L_a|, j_{ai}, f_{ai0}, l_{ai}$.

对于传感器故障矩阵可以得到如下关系:

$$F_s = F_{s0}(I + L_s), |L_s| \leq J_s \leq I. \quad (16)$$

同样, 对于执行器故障矩阵也可以得到相类似的关系. 为了理论证明的需要, 给出如下定理.

定理 2 设 S 为 $n \times n$ 正定矩阵, R 为 $n \times m$ 矩阵, 对于任何 $m \times m$ 的半正定矩阵 Q , 则矩阵 H 为半正定矩阵的充分必要条件为 $Q - R^T S^{-1} R$ 为半正定, 其中

$$H = \begin{bmatrix} S & R \\ R^T & Q \end{bmatrix}.$$

证 版面所限, 略.

根据定理2可知下列矩阵为半正定矩阵, 进行三角分解, 分别得

$$\begin{bmatrix} \alpha F_{s0} J_s F_{s0} & (F_{s0} - I) \\ (F_{s0} - I) & \alpha^{-1} J_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11}(\alpha) & 0 \\ W_{21}(\alpha) & W_{22}(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{11}(\alpha) & 0 \\ W_{21}(\alpha) & W_{22}(\alpha) \end{bmatrix}^T, \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \beta F_{a0} J_a F_{a0}^T & (F_{a0} - I) \\ (F_{a0} - I) & \beta^{-1} J_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{11}(\beta) & 0 \\ U_{21}(\beta) & U_{22}(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{11}(\beta) & 0 \\ U_{21}(\beta) & U_{22}(\beta) \end{bmatrix}^T. \quad (18)$$

其中 $\alpha > 0, \beta > 0$ 为可调参数.

3 考虑传感器故障的完整性(Control posessing integrity with sensor failures)

由系统(1)考虑传感器故障(4), 构成的闭环系统为

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}_s \bar{x}. \quad (19)$$

$$\text{其中: } \bar{x} = \begin{bmatrix} x \\ \hat{x} \end{bmatrix}, \bar{A}_s = \begin{bmatrix} A + BD_0 F_s C & BC_0 \\ B_0 F_s C & A_0 \end{bmatrix}.$$

如下定理给出了考虑传感器故障动态输出完整性控制器存在的充分条件.

定理 3 对于系统(19), 如果存在矩阵 $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}$ 以及矩阵 X 和 Y , 适当调整参数 $\alpha > 0$, 使得LMIs式(20) 和不等式(12)存在可行解, 则系统存在考虑传感器故障的完整性动态输出反馈控制器(2). 如果LMIs(20)和(12)的可行解为 $(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}, X, Y)$, 则相应的考虑传感器故障完整性控制器的参数矩阵可由式(14)确定, 矩阵 M 和 N 通过式(15)确定, 其中 $W_{11}(\alpha), W_{21}(\alpha), W_{22}(\alpha)$ 由式(17)确定.

$$\begin{bmatrix} E_1 & E_2 & E_3 & (CX)^T W_{22}(\alpha) \\ * & E_4 & \hat{B} W_{11}(\alpha) & 0 \\ * & * & -I & 0 \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 2^p), \quad (20)$$

其中:

$$\begin{aligned} E_1 &= AX + (AX)^T + B\hat{C} + (B\hat{C})^T, \\ E_2 &= \hat{A}^T + A + B\hat{D}\varphi_{si}C, \\ E_3 &= B\hat{D}W_{11}(\alpha) + (CX)^T W_{21}(\alpha), \\ E_4 &= YA + (YA)^T + \hat{B}\varphi_{si}C + (\hat{B}\varphi_{si}C)^T. \end{aligned}$$

证 对于系统(19), 设

$$T_{s1} = \begin{bmatrix} P_1 + P_1^T & [P_2 + P_3]^T \\ * & P_4 + P_4^T \end{bmatrix},$$

其中:

$$\begin{aligned} P_1 &= AX + BD_0 F_s CX + BC_0 M^T, \\ P_2 &= YAX + YBD_0 F_s CX + NB_0 F_s CX, \\ P_3 &= YBC_0 M^T + NA_0 M^T + A + BD_0 F_s C, \\ P_4 &= Y(A + BD_0 F_s C) + NB_0 F_s C. \end{aligned}$$

可得

$$T_{s1} = \begin{bmatrix} O_1 + O_1^T & [O_2 + P_3]^T \\ * & P_4 + P_4^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_3 & O_4^T \\ O_4 & 0 \end{bmatrix}.$$

其中:

$$\begin{aligned} O_1 &= AX + BD_0 CX + BC_0 M^T, \\ O_2 &= YAX + YBD_0 CX + NB_0 CX, \\ O_3 &= BD_0(F_s - I)CX + [BD_0(F_s - I)CX]^T, \\ O_4 &= [YBD_0(F_s - I)CX + NB_0(F_s - I)CX]^T. \end{aligned}$$

设

$$T_{s2} = \begin{bmatrix} O_3 & O_4^T \\ O_4 & 0 \end{bmatrix},$$

由式(16), 可得到

$$T_{s2} = \begin{bmatrix} O_3^T & (\hat{B}(F_{s0} - I)CX)^T \\ \hat{B}(F_{s0} - I)CX & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_5 & (\hat{B}F_{s0}L_sCX)^T \\ \hat{B}F_{s0}L_sCX & 0 \end{bmatrix}.$$

其中

$$O_5 = BD_0 F_{s0} L_s CX + (BD_0 F_{s0} L_s CX)^T.$$

又设

$$T_{s3} = \begin{bmatrix} O_5 & (\hat{B}F_{s0}L_sCX)^T \\ \hat{B}F_{s0}L_sCX & 0 \end{bmatrix},$$

根据式(16), 可得

$$T_{s3} \leq \alpha \begin{bmatrix} BD_0F_{s0} \\ \hat{B}F_{s0} \end{bmatrix} J_s \begin{bmatrix} BD_0F_{s0} \\ \hat{B}F_{s0} \end{bmatrix}^T + \alpha^{-1} \begin{bmatrix} (CX)^T \\ 0 \end{bmatrix} J_s \begin{bmatrix} (CX)^T \\ 0 \end{bmatrix}^T.$$

结合 T_{s1} , T_{s2} 和 T_{s3} , 可得

$$T_{s1} \leq \begin{bmatrix} O_1 + O_1^T & [O_2 + P_3]^T \\ * & P_4 + P_4^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} BD_0 \\ \hat{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (CX)^T \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha F_{s0} J_s F_{s0} & (F_{s0} - I) \\ (F_{s0} - I) & \alpha^{-1} J_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} BD_0 \\ \hat{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (CX)^T \\ 0 \end{bmatrix}^T.$$

根据定理1, 利用式(17)和式(10), 定理3获证.

4 考虑执行器故障的完整性(Control possessing integrity with actuator failures)

对于系统(1)考虑执行器故障(6), 构成的闭环系统为

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}_a \bar{x}. \quad (21)$$

$$\text{其中: } \bar{x} = \begin{bmatrix} x \\ \hat{x} \end{bmatrix}, \bar{A}_a = \begin{bmatrix} A + BF_a D_0 C & BF_a C_0 \\ B_0 C & A_0 \end{bmatrix}.$$

如下定理给出了考虑传感器故障动态输出完整性控制器存在的充分条件.

定理4 对于系统(2), 如果存在矩阵 $\hat{A}$, $\hat{B}$, $\hat{C}$, $\hat{D}$ 以及矩阵 X 和 Y , 适当调整参数 $\beta > 0$, 使得LMIs式(22)和不等式(12)可行, 则系统存在考虑执行器故障的完整性动态输出反馈控制器(2). 如果LMIs(22)和(12)的可行解为 $(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}, X, Y)$, 则考虑执行器故障的完整性控制器的参数矩阵可由式(14)确定, 矩阵 M 和 N 通过式(15)确定, 对于式中的 $U_{11}(\beta)$, $U_{21}(\beta)$, $U_{22}(\beta)$ 由式(18)确定.

$$\begin{bmatrix} V_1 & V_2 & \hat{C}^T U_{21}(\beta) & \hat{C}^T U_{22}(\beta) \\ * & V_3 & V_4 & (\hat{D}C)^T U_{22}(\beta) \\ * & * & -I & 0 \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 2^p). \quad (22)$$

其中:

$$V_1 = AX + (AX)^T + B\varphi_{ai}\hat{C} + (B\varphi_{ai}\hat{C})^T,$$

$$V_2 = \hat{A}^T + A + B\varphi_{ai}\hat{D}C,$$

$$V_3 = YA + \hat{B}C + [YA + \hat{B}C]^T,$$

$$V_4 = YBU_{11}(\beta) + (\hat{D}C)^T U_{21}(\beta).$$

证 版面所限, 略.

5 双故障完整性控制(Control possessing integrity with two failures)

综合定理3和定理4, 可得双故障完整性控制器存在的充分条件和设计方法.

定理5 对于系统(1), 传感器故障模型(4)和执行器故障模型(6). 如果存在矩阵 $\hat{A}$, $\hat{B}$, $\hat{C}$, 以及正定矩阵 X 和 Y , 适当调整参数 $\alpha > 0$ 和 $\beta > 0$, 使得LMIs(12)(20)和(22)可行, 则系统存在双故障完整性动态输出反馈控制器(2). 如果LMIs(12)(20)和(22)的可行解为 $(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, X, Y)$, 则双故障完整性控制器的参数矩阵可由式(14)确定, 矩阵 M 和 N 通过式(15)确定, 其中 $W_{11}(\alpha)$, $W_{21}(\alpha)$, $W_{22}(\alpha)$ 和 $U_{11}(\beta)$, $U_{21}(\beta)$, $U_{22}(\beta)$ 分别由式(17)和式(18)确定.

6 仿真实例(Example)

考虑如下线性系统

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 2 & 1 \end{bmatrix} u, \\ y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} x. \end{cases} \quad (23)$$

传感器故障增益变化范围为 $0 \leq f_{s1} \leq 1.2, 0.2 \leq f_{s2} \leq 1.2$; 执行器故障增益变化范围为 $0.2 \leq f_{a1} \leq 1.2, 0 \leq f_{a2} \leq 1.2$.

为了描述传感器发生故障时, 闭环系统的极点的分布情况, 给出闭环极点的实部 x 和虚部 y 随传感器故障矩阵 F_s 变化的函数:

$$x = \text{Re} \left(\text{eig} \left(\begin{bmatrix} A + BD_0 F_s C & BC_0 \\ B_0 F_s C & A_0 \end{bmatrix} \right) \right),$$

$$y = \text{Im} \left(\text{eig} \left(\begin{bmatrix} A + BD_0 F_s C & BC_0 \\ B_0 F_s C & A_0 \end{bmatrix} \right) \right).$$

其中 $\text{eig}(Z)$ 表示矩阵 Z 的极点.

利用定理4, 可得考虑执行器故障的具有完整性动态输出反馈控制参数矩阵. 当系统的执行器没有发生故障而传感器发生故障时, 系统的完整性也将受到破坏(见图1).

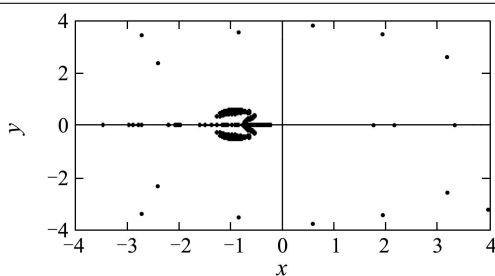


图1 当传感器发生故障时系统(21)闭环极点

Fig. 1 When sensor failure occurs, closed loop pole of system (21)

利用定理5, 可得双故障动态输出反馈控制参数矩阵. 从图2和图3可以看出双故障完整性系统无论传感器或执行器哪个发生故障都可以使系统保证完整性.

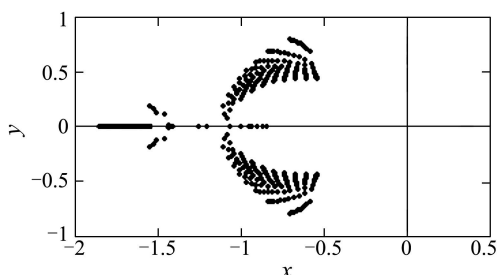


图2 双故障完整性系统当传感器发生故障时闭环极点

Fig. 2 When sensor failure occurs, closed loop pole of integrity with either failure

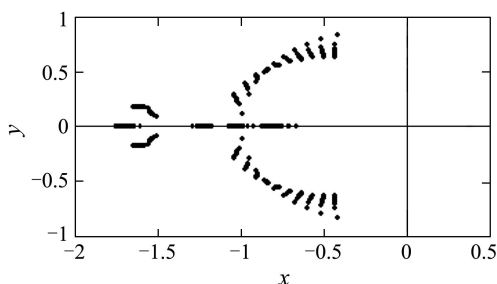


图3 双故障完整性系统当执行器发生故障时闭环极点

Fig. 3 When actuator failure occurs, closed loop pole of integrity with either failure

7 结论(Conclusion)

本文利用LMI, 研究了线性系统动态输出反馈具有完整性控制器的设计. 使用连续故障模型, 本文给

出的双故障完整性系统的设计方案. 所设计系统, 无论执行器或传感器哪个发生故障都可使系统保持完整性.

参考文献(References):

- [1] VEILLETTE R J, MEDANIC J V, PERKINS W R. Design of reliable control system[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(3): 770 – 784.
- [2] 张华春, 谭民. 具有执行器完整性的容错控制器设计[J]. *控制理论与应用*, 2000, 17 (5) : 687 – 690.
(ZHANG Huachun, TAN Min. Design of fault-tolerant controller possessing integrity to actuator[J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17 (5) : 687 – 690.)
- [3] YANG G H, WANG J L, SOH Y C. Reliable H_∞ design for linear system[J]. *Automatica*, 2001, 37 (5): 717 – 725.
- [4] 姚波, 王福忠, 张庆灵. 基于LMI可靠跟踪控制器设计[J]. *自动化学报*, 2004, 11(6) : 863 – 871.
(YAO Bo, WANG Fuzhong, ZHANG Qingling. LMI-based design of reliable tracking controller[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 11(6): 863 – 871.)
- [5] 姚波, 张庆灵, 王福忠, 等. 具有传感器故障的可靠圆盘极点配置[J]. *控制与决策*, 2004, 19(3) : 246 – 248.
(YAO Bo, ZHANG Qingling, WANG Fuzhong, et al. Reliable circular disk pole placement with sensor failures[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(3): 346 – 348.)
- [6] 王福忠, 姚波, 张嗣瀛. 线性系统区域稳定的可靠控制[J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(5): 835 – 839.
(WANG Fuzhong, YAO Bo, ZHANG Siying. Reliable control of regional stabilizability for linear systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(5): 835 – 839.)
- [7] WANG F Z, ZHANG Q L, YAO B. LMI-based reliable filtering with sensor failure[J]. *Int J of Innovative Computing, Information & Control*, 2006, 2(4): 737 – 748.
- [8] 俞立, 陈国定, 杨马英. 不确定系统的鲁棒输出反馈区域极点配置[J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(2) : 244 – 247.
(YU Li, CHEN Guoding, YANG Maying. Robust regional pole assignment of uncertain systems via output feedback controllers[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(2): 244 – 247.)

作者简介:

王福忠 (1963—), 男, 教授, 博士, 2001年9月至2004年9月东北大学攻读博士学位, 研究领域为动态系统的鲁棒控制和容错控制, E-mail: Fuzhong163@163.com;

姚波 (1963—), 女, 沈阳师范大学数学与系统科学学院教授, 博士, 研究领域为广义系统的可靠控制;

张庆灵 (1975—), 男, 东北大学理学院院长, 教授, 博士生导师, 研究领域为广义系统理论.