第18卷 第2期 控 制 与 决 策 2003年3月
Vol. 18 No. 2 Control and Decision Mar. 2003

文章编号: 1001-0920(2003)02-0145-05

基于传感器与执行器同时失误的鲁棒可靠 H_∞ 控制

陈 兵[1], 张嗣瀛[2]
(1. 锦州师范学院 数学系, 辽宁 锦州 121003; 2. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 讨论线性不确定系统的鲁棒可靠 H_∞ 控制问题。对于执行器和传感器同时失误的情况, 基于线性矩阵不等式方法, 给出了经估计状态反馈可靠 H_∞ 控制的设计方案。采用该方案设计的可靠控制系统, 不仅在系统运行良好的条件下, 而且在系统的传感器和执行器元件均出现失误的情况下, 仍能确保系统内部状态的稳定性, 并同时满足给定的 H_∞ 性能指标。最后, 以一个数值例子说明了所给出结论的有效性。

关键词: 可靠控制; 观测器; 线性矩阵不等式; 执行器失误; 传感器失误
中图分类号: TP13 文献标识码: A

Robust H_∞ reliable control against simultaneous failures of sensor and actuator

CHEN Bing[1], *ZHANG Si-ying*[2]
(1. Department of Mathematics, Jinzhou Teacher's College, Jinzhou 121003, China; 2. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The reliable H_∞ control design problem for linear uncertain systems is dealt with using observer-based output feedback. A reliable control design scheme is proposed for the case of a simultaneous presence of actuator failures and sensor failures. An approach of linear matrix inequalities (LMIs) is developed to solve the problem addressed. Based on this approach, observer-based feedback control laws are designed that guarantee closed-loop asymptotic stability and reduction of the effect of an augmented disturbance input on the controlled output of a prescribed level, not only when the system is operating properly, but also under actuator and sensor failures. A numerical example is presented to demonstrate the applicability and effectiveness of the proposed approaches.

Key words: Reliable control; Observer; Linear matrix inequality; Actuator failures; Sensor failures

1 引 言

人们在设计控制系统时, 通常基于一个基本假定, 即系统的传感器与执行器均处于良好的工作状态, 不出现任何失误。然而, 系统在实际运行中由于各种因素的影响, 可能导致传感器或执行器的一些元件出现失误。这时, 按照理想状态设计的系统将难以达到所期望的性能指标, 甚至导致系统不稳定。因此, 要求设计出一种可靠控制系统, 在系统的某些元件出现失误时, 也能保证系统的稳定性以及一些最基本的性能。自从 Mac Farlance[1] 提出可靠控制这一概念后, Shimemura 等[2] 便开始在状态空间中研究相应的可靠控制问题。近年来, 人们在线性、非线性系统的可靠控制设计方面取得了许多研究结果。在系统不含未知因素的条件下, Veillette 等[3~5] 研

收稿日期: 2002-02-27; 修回日期: 2002-09-02。
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(79970114)。
作者简介: 陈兵(1958—), 男, 辽宁岫岩人, 教授, 博士, 从事非线性系统的鲁棒控制等研究; 张嗣瀛(1925—), 男, 山东章丘人, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 从事相似组合系统、微分对策等研究。

究了可靠观测器的设计以及可靠 H_∞控制等问题; Yang 等[6] 则拓展了 Veillette 的研究结果; Seo 等[7, 8]讨论了线性不确定系统经状态反馈后, 执行器出现失误时的可靠控制问题; 其他研究结果可参见文献[9～11]。目前, 已有的可靠控制问题的研究结果均针对传感器失误或执行器失误的情况, 尚未考虑传感器和执行器同时出现失误时可靠系统的设计问题。

本文主要讨论系统的传感器和执行器同时出现失误情况下系统的可靠控制问题。另外, 采用文献[7] 提出的失误模型, 即: 若用 u_i^F 表示第 i 个执行器出现失误后的输出信号, 则假定 $u_i^F \in L^2_{[0,\infty)}$, 而并非简单地令 $u_i^F = 0$; 对于传感器失误的情况, 亦作同样的假定。显然, 与目前的一些失误模型[3～6, 9～11] 相比, 这样的失误模型更为复杂。本文将失误的执行器和传感器的输出信号作为扰动输入, 利用 H_∞ 控制技术对其进行处理, 基于线性矩阵不等式方法给出了可靠 H_∞ 控制的设计方案, 在传感器和执行器同时出现失误时, 确保系统内部状态渐近稳定, 并使失误部分的输出和外部扰动输入对系统控制输出的影响满足所给定的 H_∞ 性能指标。

2　系统描述及基本假定

考虑如下微分方程描述的线性不确定系统

$$\dot{x}(t) = [A + \Delta A]x(t) + Bu(t) + Gw(t) \tag{1a}$$

$$z(t) = Hx(t) \tag{1b}$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{1c}$$

其中: $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$ 和 $w(t) \in R^q$ 分别为系统的状态、控制输入和干扰输入向量; $z(t) \in R^p$ 和 $y(t) \in R^s$ 分别为系统的控制输出和测量输出; A, B, G, H 和 C 为实常数矩阵; $\Delta A(t)$ 为实值矩阵函数, 描述了系统的参数不确定性, 并假设具有如下形式

$$\Delta A(t) = MF(t)E \tag{2}$$

$M \in R^{n\times i}$ 和 $E \in R^{j\times n}$ 为已知的常数矩阵, $F(t) \in R^{i\times j}$ 为未知的矩阵函数, 并满足不等式

$$F(t)^{\mathrm T}F(t) \le I \tag{3}$$

为讨论可靠控制的设计问题, 引入如下符号:

1) 符号 $\Omega \subseteq \{1, 2, \cdots, m\}$ 表示容许执行器失误的集合, 这类执行器在系统运行中可能出现失误。文献[7] 指出, 这类执行器对于系统的镇定是多余的, 但可以起到改善系统性能的作用。

2) 符号 $\bar\Omega = \{1, 2, \cdots, m\} - \Omega$ 表示在系统运行中处于良好工作状态的执行器的集合, 这类执行器对于系统的镇定或保持系统的基本性能是必不可少的。

在此假定下, 系统的执行器可分解为

$$B = B_\Omega + B_{\bar\Omega} \tag{4}$$

其中 $B_{\bar\Omega}$ 和 B_Ω 是分别将 B 中对应于 Ω 和 $\bar\Omega$ 的列取为零列得到的。一个基本的假定是 $(A, B_{\bar\Omega})$ 是可稳定的。设 $\omega = \Omega$ 为一子集, 则有

$$B = B_\omega + B_{\bar\omega} \tag{5}$$

对传感器集合作同样分类, 于是有

$$C = C_\Theta + C_{\bar\Theta} \tag{6}$$

其中: $\Theta \subseteq \{1, 2, \cdots, s\}$ 表示传感器元件可能失误的子集, $\bar\Theta = \{1, 2, \cdots, s\} - \Theta$ 表示正常工作的传感器元件子集。当 $\theta \subseteq \Theta$ 时, 有

$$C = C_\theta + C_{\bar\theta} \tag{7}$$

并假定 $(A, C_{\bar\Theta})$ 是可观测的。

3　主要结果及证明

为叙述本文结果, 引入符号 $\bar w = [w^{\mathrm T}, (u_\omega^F)^{\mathrm T}, (y_\theta^F)^{\mathrm T}]^{\mathrm T}$, 这里 u_ω^F 和 y_θ^F 分别表示失误的执行器和失误的传感器的输出向量, $\omega \in \Omega$, $\theta \in \Theta$。对于系统(1), 考虑如下基于鲁棒观测器的控制器

$$\begin{cases} \dot{\hat x} = A\hat x + Bu + L[y - C\hat x] \\ u = K\hat x \end{cases} \tag{8}$$

令 $e = x - \hat x$ 表示观测误差, 则得到误差动态方程

$$\dot e = [A - LC]e + \Delta Ax + Gw \tag{9}$$

设计目标是选择观测增益矩阵 L 和反馈矩阵 K, 使得在传感器和执行器所容许的失误集合 Ω 和 Θ 内, 对于传感器和执行器的任何失误, 系统(1) 和(9) 所形成的闭环系统二次渐近稳定, 并满足 H_∞ 性能指标。对此本文有如下结果:

定理1　给定正数 $\gamma > 0$ 及集合 Ω 和 Θ, 对于任意执行器失误子集 $\omega \subseteq \Omega$ 和传感器失误子集 $\theta \subseteq \Theta$, 闭环系统(1) ～(9) 是可二次稳定的, 且在零初始条件下控制输出满足不等式 $\|z\|_2 \le \gamma\|\bar w\|_2$。如果存在正常数 $\epsilon_1 > 0$, $\epsilon_2 > 0$ 以及正定矩阵 X 和 S, 分别满足下述LMIs

$$\begin{bmatrix} \Sigma_1 & XH^{\mathrm T} & XE^{\mathrm T} & XE^{\mathrm T} & XC_{\bar\Theta}^{\mathrm T} \\ * & -I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\epsilon_1 I & 0 & 0 \\ * & * & * & -\epsilon_2 I & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \tag{10a}$$

$$\begin{bmatrix} \Sigma_2 & SG & SM \\ * & -\gamma^2 I & 0 \\ * & * & -\epsilon_2 I \end{bmatrix} < 0 \tag{10b}$$

其中 * 表示其对称位置上元素的转置, 而

$$\Sigma_1 = AX + XA^T - B_\Omega B_\Omega^T - \epsilon_1 MM^T + \gamma^{-2}(B_\Omega B_\Omega^T + GG^T)$$

$$\Sigma_2 = SA + A^TS - C_{\bar\Theta}^T C_{\bar\Theta} + K^TK + \gamma^{-2}C_\Theta^T C_\Theta$$

进而, 反馈增益矩阵和观测增益矩阵为

$$K = -B^TX^{-1} \tag{11a}$$

$$L = S^{-1}C^T \tag{11b}$$

为证明定理 1, 首先给出下面一个简单的引理:

引理 1[12] 给定具有适当维数的常数矩阵 M 和 E 及函数矩阵 $F(t)$, 满足不等式 $F^T(t)F(t) \le I$, 则对任意的正数 $\epsilon > 0$, 有

$$MF(t)E + E^TF^T(t)M^T \le \epsilon MM^T + \frac{1}{\epsilon}E^TE$$

证明　在定理 1 的条件下, 假定传感器和执行器的失误子集分别为 $\theta \subseteq \Theta$ 和 $\omega \subseteq \Omega$, 则有

$$u = K_{\bar\omega}\hat{x} + u_\omega^F, \quad y = C_\theta x + y_\theta^F$$

其中 $K_{\bar\omega} = -B_{\bar\omega}^TP$。注意到 $LC_\theta = L_\theta C_\theta$, $L_\theta = S^{-1}C_\theta^T$, 将 u_ω^F 和 y_θ^F 作为干扰输入, 则闭环系统(1) ～(9) 可表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + B_{\bar\omega}K_{\bar\omega} & -B_{\bar\omega}K_{\bar\omega} \\ L_\theta C_\theta & A - LC \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta A & 0 \\ \Delta A & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G & B_\omega & 0 \\ G & 0 & L_\theta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} w \\ u_\omega^F \\ y_\theta^F \end{bmatrix} \tag{12a}$$

$$z = \begin{bmatrix} H & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix} \tag{12b}$$

于是闭环系统(12) 的实现矩阵分别为

$$A_c = \begin{bmatrix} A + B_{\bar\omega}K_{\bar\omega} & -B_{\bar\omega}K_{\bar\omega} \\ L_\theta C_\theta & A - LC \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta A & 0 \\ \Delta A & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} G & B_\omega & 0 \\ G & 0 & L_\theta \end{bmatrix}, \quad C_c = \begin{bmatrix} H & 0 \end{bmatrix}$$

选取对角正定矩阵 $T = \mathrm{diag}(P, S)$, 其中 $P = X^{-1}$ 且 X 和 S 满足式(10), 则有

$$TA_c + A_c^TT + \frac{1}{\gamma^2}TB_cB_c^TT + C_c^TC_c =$$

$$\begin{bmatrix} (A - B_{\bar\omega}B_{\bar\omega}^TP)^TP + P(A - B_{\bar\omega}B_{\bar\omega}^TP) & PB_{\bar\omega}B_{\bar\omega}^TP + C_\theta^TL_\theta^TS \\ PB_{\bar\omega}B_{\bar\omega}^TP + SL_\theta C_\theta & (A - QC^TC)^TS + S(A - QC^TC) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} P\Delta A + \Delta A^TP & \Delta A^TS \\ S\Delta A & 0 \end{bmatrix} +$$

$$\frac{1}{\gamma^2}\begin{bmatrix} P(GG^T + B_\omega B_\omega^T)P & PGG^TS \\ SGG^TP & SGG^TS + SL_\theta L_\theta^TS \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} H^TH & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{13}$$

应用引理 1, 有

$$\begin{bmatrix} P\Delta A + \Delta A^TP & \Delta A^TS \\ S\Delta A & 0 \end{bmatrix} \le \begin{bmatrix} \epsilon_1 PMM^TP + \epsilon_1^{-1}E^TE & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_2 E^TE & 0 \\ 0 & \epsilon_2^{-1}SMM^TS \end{bmatrix} \tag{14a}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & PB_{\bar\omega}B_{\bar\omega}^TP \\ PB_{\bar\omega}B_{\bar\omega}^TP & 0 \end{bmatrix} \le \begin{bmatrix} PB_{\bar\omega}B_{\bar\omega}^TP & 0 \\ 0 & PB_{\bar\omega}B_{\bar\omega}^TP \end{bmatrix} \tag{14b}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & PGG^TS \\ SGG^TP & 0 \end{bmatrix} \le \begin{bmatrix} PGG^TP & 0 \\ 0 & SGG^TS \end{bmatrix} \tag{14c}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & C_\theta^TL_\theta^TS \\ SL_\theta C_\theta & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -C_\theta^TC_\theta \\ -C_\theta^TC_\theta & 0 \end{bmatrix} \le \begin{bmatrix} C_\theta^TC_\theta & 0 \\ 0 & C_\theta^TC_\theta \end{bmatrix} \tag{14d}$$

将式(14) 代入(13) 后, 可得到

$$TA_c + A_c^TT + \frac{1}{\gamma^2}TB_cB_c^TT + C_c^TC_c \le \mathrm{diag}(\Phi_1, \Psi_1) \tag{15}$$

其中

$$\Phi_1 = A^TP + PA - PB_{\bar\omega}B_{\bar\omega}^TP + P\epsilon_1 MM^TP + \gamma^{-2}P(GG^T + B_\omega B_\omega^T)P + (\epsilon_2^{-1} + \epsilon_1^{-1})E^TE + H^TH + C_\theta^TC_\theta$$

$$\Psi_1 = A^TS + SA - 2C^TC + PB_{\bar\omega}B_{\bar\omega}^TP + C_\theta^TC_\theta + \gamma^{-2}SGG^TS + \gamma^{-2}C_\theta^TC_\theta + \epsilon_2 SMM^TS$$

显然, $TA_c + A_c^TT + \frac{1}{\gamma^2}TB_cB_c^TT + C_c^TC_c < 0$ 的充分条件是 $\Phi_1 < 0$ 和 $\Psi_1 < 0$。利用如下基本事实

$$B_\Omega B_\Omega^T = B_\omega B_\omega^T + B_{\Omega-\omega}B_{\Omega-\omega}^T$$

$$B_{\bar\Omega}B_{\bar\Omega}^T = B_{\bar\omega}B_{\bar\omega}^T - B_{\Omega-\omega}B_{\Omega-\omega}^T$$

$$C_\Theta^TC_\Theta = C_\theta^TC_\theta + C_{\Theta-\theta}^TC_{\Theta-\theta}$$

$$C_{\bar\Theta}^TC_{\bar\Theta} = C_{\bar\theta}^TC_{\bar\theta} - C_{\Theta-\theta}^TC_{\Theta-\theta}$$

其中 $B_{\Omega-\omega}$ 是通过将 B 中对应于 $\bar\Omega$ 和 ω 的列取为零列得到的。同理确定 $C_{\Theta-\theta}$, 于是得

$$B_\Omega B_\Omega^T \ge B_\omega B_\omega^T, \quad B_{\bar\Omega}B_{\bar\Omega}^T \le B_{\bar\omega}B_{\bar\omega}^T, \quad C_\Theta^TC_\Theta \ge C_\theta^TC_\theta$$

进而得

$$\Phi_1 \le \Phi = A^TP + PA - PB_{\bar\Omega}B_{\bar\Omega}^TP + P\epsilon_1 MM^TP + \gamma^{-2}P(GG^T + B_\Omega B_\Omega^T)P +$$

$$(\epsilon_2^{-1} + \epsilon_1^{-1})E^{\mathrm{T}}E + H^{\mathrm{T}}H + C_\Theta^{\mathrm{T}}C_\Theta \tag{16a}$$

$$\Psi_1 \leq \Psi =$$

$$A^{\mathrm{T}}S + SA - C^{\mathrm{T}}C + PBB^{\mathrm{T}}P +$$

$$\gamma^{-2}SGG^{\mathrm{T}}S + \gamma^{-2}C_\Theta^{\mathrm{T}}C_\Theta + \epsilon_2 SMM^{\mathrm{T}}S \tag{16b}$$

对式(10a)左右分别同时乘以 $\mathrm{diag}(P\ \ I\ \ I\ \ I\ \ I)$ 后，利用 Schur 补定理，得

$$\Phi = A^{\mathrm{T}}P + PA - PB_\Omega B_\Omega^{\mathrm{T}}P +$$

$$P\epsilon_1 MM^{\mathrm{T}}P + \gamma^{-2}P(GG^{\mathrm{T}} + B_\Omega B_\Omega^{\mathrm{T}})P +$$

$$(\epsilon_2^{-1} + \epsilon_1^{-1})E^{\mathrm{T}}E + H^{\mathrm{T}}H + C_\Theta^{\mathrm{T}}C_\Theta < 0 \tag{16c}$$

对式(10b)利用 Schur 补定理，得

$$\Psi = A^{\mathrm{T}}S + SA - C^{\mathrm{T}}C + PBB^{\mathrm{T}}P +$$

$$\gamma^{-2}SGG^{\mathrm{T}}S + \gamma^{-2}C_\Theta^{\mathrm{T}}C_\Theta + \epsilon_2 SMM^{\mathrm{T}}S < 0 \tag{16d}$$

由式(16c)和(16d)知，如下不等式成立

$$A_c^{\mathrm{T}}T + TA_c + \gamma^{-2}TB_cB_c^{\mathrm{T}}T + C_c^{\mathrm{T}}C_c < 0$$

根据文献[12]中的定义，闭环系统(1)～(9)是具有 H_∞ 性能指标二次稳定的。□

4 数值例子

考虑如下不确定线性系统

$$A = \begin{bmatrix} -2 & 0.2 & 0.35 \\ -0.5 & 0.15 & -0.3 \\ 1 & -0.2 & -0.25 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ -0.65 & -0.5 \\ 0.5 & -0.25 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1.5 & -1.5 & 1 \\ 0 & 2.5 & 0.5 \\ 0 & 0.6 & -0.35 \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0.1 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0.2 \end{bmatrix},\quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.2 \\ 0.2 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \\ 0.5 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}},\quad F(t) = \begin{bmatrix} \sin t & 0 \\ 0 & \cos t \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

执行器和传感器的失误集合分别为 $\Omega = \{2\}$，$\Theta = \{3\}$，则有

$$B_\Omega = B_\omega = [0\ \ -0.5\ \ -0.25]^{\mathrm{T}}$$

$$C_\Theta = C_\theta = [0\ \ 0.6\ \ -0.35]$$

取 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$，$\gamma = 1$，$w = \sin t$，求解 LMIs(10)，得

$$X = \begin{bmatrix} 0.4201 & 0.2213 & 0.1783 \\ 0.2213 & 0.6772 & 0.5614 \\ 0.1783 & 0.5614 & 1.4792 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 50.8599 & -5.6742 & -11.3440 \\ -5.6742 & 2.9406 & 3.6726 \\ -11.3440 & 3.6726 & 5.1365 \end{bmatrix}$$

进而得

$$K = \begin{bmatrix} -2.0643 & 2.4927 & -1.0354 \\ -0.4724 & 1.0292 & -0.1647 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} -3.6600 & 2.7813 & 0.9495 \\ 36.7768 & -29.8631 & -9.7387 \\ -34.6706 & 27.4072 & 9.1284 \end{bmatrix}$$

选取初值

$$[x_1(0)\ \ x_2(0)\ \ x_3(0)] = [3\ \ -3\ \ 5]$$

$$[e_1(0)\ \ e_2(0)\ \ e_3(0)] = [3\ \ -3\ \ 5]$$

进行数值仿真。仿真结果如图 1 和图 2 所示。图 1 为当系统的执行器和传感器均处于良好工作状态时，整个闭环系统的状态响应曲线；图 2 为当系统首先在良好工作状态下运行 2 s 后，系统执行器和传感器均出现失误时整个闭环系统的状态响应曲线。仿真结果表明，按本文提出的可靠控制设计方案设计出

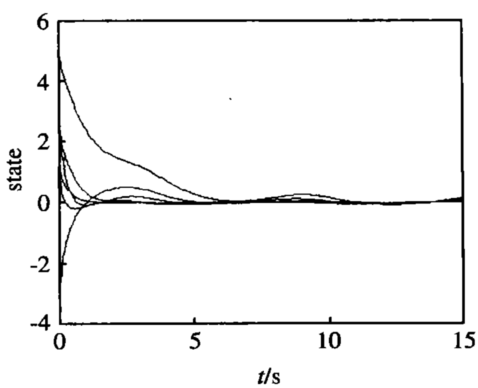

图 1 无失误时闭环系统响应曲线

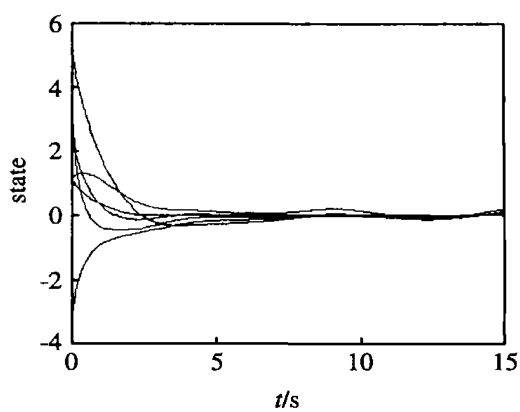

图 2 出现失误时闭环系统响应曲线

的控制系统,不仅在系统元件处于良好工作条件下能够正常运行,即使系统执行器和传感器在所限定的失误集合内出现任何失误,系统仍能正常运行并保持较好的性能。

5 结　　语

本文讨论了线性不确定系统的可靠控制问题,利用 H_∞控制技术给出了在系统的传感器和执行器同时出现某些失误时可靠控制的设计方案。采用该方案所设计的可靠控制在系统不出现失误时,可增强系统的品质;当系统出现某些失误时,仍能保证系统的正常运行。仿真例子进一步显示了所给出的设计方案的设计步骤,同时证实了本文结论的有效性。

参考文献(References):

[1] MacFarlane A G J. *Complex Varyable Methods for Linear Multivariable Feedback Systems*[M]. London: Taylor and Francis Ltd, 1980.

[2] Shimemura E, Fujita M. A design method for linear state feedback systems possessing integrity based on a solution of Riccati-type equation[J]. *Int J Control*, 1985, 24(4): 887-899.

[3] Veillette R J. Reliable state feedback and reliable observer[A]. *Proc 31st IEEE Conf on Decision and Control*[C]. Tucson, 1992. 2898-2903.

[4] Veillite R J, Medanic J V, Perkins W R. Design of reliable control systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(3): 290-304.

[5] Veillette R J. Reliable linear-quadratic state feedback control[J]. *Automatica*, 1995, 31(1): 137-143.

[6] Yang G H, Wang J L, Soh Y C. Reliable H-infinite controller design for linear systems[J]. *Automatica*, 2001, 37(3): 717-725.

[7] Seo C J, Kim B K. Robust and reliable H_∞ control for linear systems with parameter uncertainty and actuator failue[J]. *Automatica*, 1996, 32(2): 465-467.

[8] Wang Z, Huang B, Unbehauen H. Robust reliable control for a class of uncertain nonlinear state-delayed systems[J]. *Automatica*, 1999, 35(2): 955-963.

[9] 孙金生,李军,王执铨. 时滞不确定系统的鲁棒容错控制[J]. 控制理论与应用, 1998, 15(2): 266-217.
(Sun J S, Li J, Wang Z Q. Robust fault-tolerant control of uncertain time-delay systems[J]. *Control Theory and Applications*, 1998, 15(2): 266-271.)

[10] 胡寿松,曹坚,王永. 关联大系统的分散强稳定控制[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(3): 282-286.
(Hu S S, Cao J, Wang Y. Decentralized strong stable control of a class of interconnected systems[J]. *Control Theory and Applications*, 1996, 13(3): 282-286.)

[11] 顾永如,李岐强,程正群,等. 具有状态滞后的不确定系统的鲁棒可靠 H_∞控制[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(1): 149-151.
(Gu Y R, Li Q Q, Cheng Z Q, et al. Robust reliable control for linear uncertain systems with delayed state[J]. *Control Theory and Applications*, 1999, 16(1): 149-151.)

[12] Xie L H, Souza C E De. Robust H-infinite control for linear systems with norm-bounded time-varying uncertainty[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(2): 1188-1191.

(上接第 144 页)

[3] Bloemen H H J, Van den Boom T J J. MPC for Wiener systems[A]. *Proc of the 38th IEEE Conf on Decision and Control*[C]. Phoenix, 1999. 4595-4600.

[4] Feng E B, Yu J S, Jiang W S. New method for predictive controller design for bilinear systems[J]. *Int J of Control*, 1991, 53(1): 97-111.

[5] Michalska H, Mayne D Q. Robust receding horizon control of constrained nonlinear systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1993, 38(11): 1623-1633.

[6] Yang J J, Wang W. Global numerical approach to constrained nonlinear generalized predictive control[A]. *Proc of the 14th IFAC*[C]. Beijing, 1999. 13-17.

[7] Onnen C, Babuska R, Kaymak U, et al. Genetic algorithms for optimization in predictive control[J]. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(10): 1363-1372.

[8] Fravolini M L, La Cava M. Evolutionary algorithms for adaptive predictive control[A]. *7th IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA '99*[C]. Barcelona, 1999. 55-61.

[9] Martinez M, Senent J S, Blasco X. Generalized predictive control using genetic algorithms (GAGPC)[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 1998, 11(3): 355-367.

[10] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.

[11] Cannon M, Kouvaritakis B, Lee Y I, et al. Efficient nonlinear model based predictive control[D]. *Oxford: University of Oxford*, 1999.