

文章编号: 1001-0920(2008)09-0987-07

具有极点约束的鲁棒 H_2/H 满意容错控制

韩笑冬, 谢德晓, 王执钊

(南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

摘要: 针对不确定性不满足匹配条件的随机线性离散系统, 研究执行器发生故障时满意容错控制器的设计问题. 在更一般的连续型执行器故障模型下, 所设计的控制器可保证闭环系统同时满足区域极点指标、 H 范数指标和 H_2 性能指标约束. 建立了 3 类指标的相容性, 并给出了相容指标约束下控制器存在的充分条件和设计步骤. 仿真实例验证了该方法的有效性, 并通过与不考虑故障的系统进行比较, 说明对系统进行满意容错控制的必要性.

关键词: 容错控制; 执行器故障; 相容性理论

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Robust H_2/H satisfactory fault-tolerant control with pole constraints

HAN Xiaodong, XIE Dexiao, WANG Zhiqian

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China. Correspondent: WANG Zhiqian, E-mail: wangzqwhz@yahoo.com.cn)

Abstract: For a class of stochastic linear discrete-time systems with two controlled outputs and uncertainties which do not satisfy matching conditions, the problem of satisfactory fault-tolerant controller design against actuator failures is presented. Based on a more practical and general model of actuator continuous gain failures, the closed-loop systems are guaranteed by the designed controller to meet the required constraints on regional pole index, H index and H_2 performance index simultaneously. Meanwhile, the consistency of the performance indices mentioned earlier is also set up for fault-tolerant control. Furthermore, sufficient conditions for the existence of satisfactory fault-tolerant controller are given and the effective design steps with constraints of consistent indices are provided. A simulation example shows the effectiveness of the proposed method. Compared with the systems taking no account of failures, the necessity of such a satisfactory fault-tolerant control is proved further.

Key words: Fault-tolerant control; Actuator failures; Consistency theory

1 引言

近年来,随着对系统可靠性要求的不断提高,容错控制的研究得到了广泛重视.然而,大多数文献都是针对系统发生传感器或执行器故障时的稳定性进行设计,很少考虑系统故障前后的其他性能指标^[1-3].在实际工程中,当系统发生故障后,人们不仅希望系统继续安全稳定运行,而且能保持比较满意的多项性能约束^[4].因此,研究多约束条件下的容错控制系统具有重要的理论意义和应用价值.满意容错控制(SFTC)就是针对实际工程系统对可靠性和控制性能要求日益提高的现状,在容错控制的研究中融入满意控制的思想,使容错控制系统同时满足

多个性能指标的控制策略.

实际工程中,区域极点指标、 H 扰动衰减指标和 H_2 性能指标,是控制理论中 3 类重要的性能指标.将系统的极点指标配置到期望的区域内,系统能满足一定的动态性能. H_2/H 控制不仅可使整个系统获得良好的调节性能,而且能保持系统的鲁棒性.文献[5,6]将极点配置技术与 H_2/H 混合控制相结合,但没有考虑系统发生故障的情况.以往的大部分文献在研究鲁棒控制时,均假定系统的不确定性满足强匹配条件^[7-11],但在实际工程中,系统的不确定项往往只有数值界的形式.

本文针对具有两个不同被调输出且不确定性不

收稿日期: 2007-07-02; 修回日期: 2007-09-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60574082).

作者简介: 韩笑冬(1983—),男,太原人,博士生,从事故障检测与诊断、容错控制的研究;王执钊(1939—),男,武汉人,教授,博士生导师,从事容错控制、混沌控制等研究.

满足强匹配条件的随机离散线性系统,研究其在执行器发生故障时,满足区域极点指标、 H_2 扰动衰减指标和 H_2 性能指标约束的满意容错控制问题. 在连续型执行器故障模型下,利用线性矩阵不等式方法,分析了3类指标相容的取值范围,并在指标相容的前提下,给出了多约束条件满意容错控制器存在的充分条件和构造性设计方法.

2 问题描述

考虑由如下状态方程描述的不确定随机线性离散系统:

$$\begin{cases} x(k+1) = (A + \Delta A)x(k) + (B + \Delta B)u(k) + B_2 w(k), \\ z_0(k) = C_0 x(k) + D_0 u(k), \\ z_1(k) = C_1 x(k) + D_1 u(k). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in R^n$ 是系统的状态向量, $u(k) \in R^m$ 是控制输入, $w(k) \in R^p$ 是外部扰动输入, $z_0(k) \in R^q$ 和 $z_1(k) \in R^r$ 是被调输出; A, B, B_2, C_0, C_1, D_0 和 D_1 是描述名义系统模型的已知实常数矩阵; ΔA 和 ΔB 是反映系统模型中参数不确定性的未知实矩阵.

在大多数文献中,均假设不确定性矩阵满足匹配条件 $[\Delta A \quad \Delta B] = E(k)[F_a \quad F_b]$. 其中: E, F_a 和 F_b 为具有适当维数的已知矩阵; (k) 为未知函数矩阵,满足 $(k) = \{ (k) \mid (k)^T (k) = I, \forall k \}$. 但在实际系统中,系统的不确定项往往只有数值界的形式. 本文的不确定项不要求满足上述匹配条件,只需用已知的数值进行界定. 即 $\Delta A = a$,

$\Delta B = b$, 其中 \cdot 表示矩阵的谱范数.

控制器采用状态反馈形式

$$u(k) = Kx(k), \quad (2)$$

其中 K 为待求的状态反馈增益矩阵.

考虑到可能的执行器故障,定义执行器故障矩阵^[7,8]

$$M = \text{diag}(m_1, m_2, \dots, m_p). \quad (3)$$

其中: $0 \leq m_{ii} \leq m_i \leq m_{iu}, m_{ii} < 1, m_{iu} \leq 1, i = 1, 2, \dots, p$. 显然,当 $m_i = 0$ 时,表示执行器第 i 条通道完全失效;当 $m_i = 1$ 时,表示执行器第 i 条通道正常工作;当 $0 \leq m_{ii} \leq m_i \leq m_{iu}, m_{ii} < 1, m_{iu} \leq 1, m_i < 1$ 时,表示执行器第 i 条通道部分失效.

引进如下矩阵:

$$M_0 = \text{diag}(m_{01}, m_{02}, \dots, m_{0p}),$$

$$L = \text{diag}(l_1, l_2, \dots, l_p), \quad J = \text{diag}(j_1, j_2, \dots, j_p).$$

其中

$$m_{0i} = \frac{m_{ii} + m_{iu}}{2}, \quad l_i = \frac{m_i - m_{0i}}{m_{0i}},$$

$$j_i = \frac{m_{iu} - m_{ii}}{m_{iu} + m_{ii}}, \quad i = 1, 2, \dots, p.$$

由此得到

$$M = M_0(I + L), \quad |L| \leq J - I. \quad (4)$$

因此,包含执行器故障闭环系统的状态方程为

$$\begin{cases} x(k+1) = \bar{A}_c x(k) + B_2 w(k), \\ z_0(k) = C_{0c} x(k), \quad z_1(k) = C_{1c} x(k). \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\bar{A}_c = A_c + \Delta A_c, \quad A_c = A + BMK,$$

$$A_c = A + BMK, \quad C_{0c} = C_0 + D_0 MK,$$

$$C_{1c} = C_1 + D_1 MK.$$

本文研究在极点约束下鲁棒 H_2/H 满意容错控制问题,即求解状态反馈控制(2),使其对于所有允许的参数不确定性,故障闭环系统(5)同时满足下述期望性能指标:

1) 对于可能的执行器故障,所有闭环极点均位于圆盘 (q, r) , 它表示复平面上单位圆中心在 $q + j0$, 半径为 r 的圆盘,其中 q 和 r 满足 $|q| + r < 1$;

2) 当 $w(k)$ 被看成一个有限能量的扰动信号时,从 $w(k)$ 到 $z_1(k)$ 的闭环传递函数 $G(z) = C_{1c}(zI - A_c - \Delta A_c)^{-1} B_2$ 满足

$$G(z) < \gamma, \quad (6)$$

其中 $G(z) = \sup_0 \sup_2 \max [G(e^{j\omega})]$, $\max[\cdot]$ 表示矩阵的最大奇异值;

3) 当 $w(k)$ 被看成一个具有单位谱密度的白噪声信号时,要求指标

$$J(K) = \sup_i \lim_i E\{z_0^T(k) z_0(k)\} \leq \bar{J}(K). \quad (7)$$

其中: $\bar{J}(K)$ 是一个确定的常数,表示闭环系统 H_2 性能指标值的上界; $E\{\cdot\}$ 表示矩阵的期望算子.

如果 \bar{A}_c 是渐近稳定的,则 $J(K)$ 可表示成

$$J(K) = \sup_P \text{trace}\{B_2^T \bar{P} B_2\}. \quad (8)$$

其中 $\bar{P} = \tilde{P}^T = 0$ 是由如下离散时间 Lyapunov 方程确定的矩阵:

$$\bar{A}_c^T \bar{P} \bar{A}_c - \bar{P} + C_{0c}^T C_{0c} = 0. \quad (9)$$

3 主要结果

引理1^[9] 实常数矩阵 A 的所有特征值均位于圆盘 (q, r) 内,当且仅当如下变量 P 的离散 Lyapunov 矩阵不等式有正定解矩阵:

$$(A - qI)^T P (A - qI) - r^2 P < 0.$$

引理2^[10] 存在控制增益 K ,使故障闭环系统(5)满足约束条件1)的充分必要条件是:实变量 $\gamma > 0$, 矩阵变量 $P = P^T > 0$, K 的如下矩阵不等式组有可行解:

$$\begin{cases} I - B_2^T P B_2 > 0, \\ \bar{A}_c^T \bar{P} \bar{A}_c - P + \bar{A}_c^T P B_2 (I - B_2^T P B_2)^{-1} B_2^T \bar{P} \bar{A}_c + C_{1c}^T C_{1c} < 0. \end{cases} \quad (10)$$

其中: $\bar{A}_{er} = (\bar{A}_c - qI)/r$, $\bar{r} = (1 - |q|)/r^2$. 如果 (P, K) 是上述不等式组的任一可行解, 则反馈控制增益 K 相应的闭环系统 $G(z) < \cdot$.

利用矩阵变换和 Schur 补性质, 可得引理 2 的线性矩阵不等式形式如下:

定理 1 考虑故障闭环系统 (5), 存在控制增益 K , 满足约束条件 1) 的充分必要条件是: 实变量 $X > 0$, $Y > 0$ ($i = 1 \sim 9$), 矩阵变量 $X = X^T > 0$, Y 的如下线性矩阵不等式有可行解:

$$\begin{bmatrix} 11 & 0 & (AX + BY)^T & 0 & 13 \\ * & -i^{-1}I & B_2^T & B_2^T & 0 \\ * & * & 12 & 0 & 0 \\ * & * & * & -2X & 0 \\ * & * & * & * & 14 \end{bmatrix} < 0. \tag{11}$$

其中

$$\begin{aligned} 11 &= 1 - |q|, \quad 2 = (i^{-1} - 1)^{-1}, \\ 11 &= \\ &- q[AX + BY + (AX + BY)^T + \\ &+ BJB^T + 2aI + 3bI + 4bI] + (q^2 - r^2)X, \\ 12 &= \\ &- X + 5aI + 6BJB^T + 7bI + 8bI, \\ 13 &= [(C_1X + D_1Y)^T, Y^T, X, Y^T, \\ &Y^T, X, Y^T, Y^T, Y^T, Y^T], \\ 14 &= \\ &\text{diag}[-i^{-1}I + 9D_1JD_1^T, -1J^{-1}, \\ &-2I, -3I, -4J^{-1}, -5I, \\ &-6J^{-1}, -7J^{-1}, -8J^{-1}, -9J^{-1}]. \end{aligned}$$

矩阵中 * 表示由矩阵的对称性得到的矩阵块. 如果 (X, Y, i, \cdot) ($i = 1 \sim 9$) 是上述不等式的任一可行解, 则反馈控制增益 $K = M_0^{-1}YX^{-1}$ 必使闭环系统 (5) 满足约束条件 1), 且 $G(z) < \cdot$.

证明 由引理 2 可知, 闭环系统 (5) 满足约束条件 1) 的充分必要条件是矩阵不等式 (10) 有可行解. 利用矩阵的 Schur 补性质, 式 (10) 等价于

$$\begin{bmatrix} A_{11} + C_{1c}^T C_{1c} & \bar{A}_c^T P B_2 \\ * & -i^{-1}(I - B_2^T P B_2) \end{bmatrix} < 0,$$

其中

$$A_{11} = \bar{A}_c^T P \bar{A}_c - q P \bar{A}_c - q \bar{A}_c^T P + (q^2 - r^2)P.$$

令 $X = P^{-1}$, 再次利用矩阵的 Schur 补性质, 可得

$$\begin{bmatrix} A_{12} & 0 & X \bar{A}_c^T & 0 & X C_{1c}^T \\ * & -i^{-1}I & B_2^T & B_2^T & 0 \\ * & * & -X & 0 & 0 \\ * & * & * & -2X & 0 \\ * & * & * & * & -i^{-1}I \end{bmatrix} < 0, \tag{12}$$

其中

$$A_{12} = -q \bar{A}_c X - q X \bar{A}_c^T + (q^2 - r^2)X.$$

令 $Y = M_0 K X$, 对于任意满足 A 和 a 和 B 的不确定性, 有下述不等式成立:

$$\begin{aligned} &- q \bar{A}_c X - q X \bar{A}_c^T \\ &- q[AX + BY + (AX + BY)^T + \\ &+ BJB^T + i^{-1}Y^T J Y + 2aI + i^{-1}X + \\ &+ 3bI + i^{-1}Y^T Y + 4bI + i^{-1}Y^T J Y], \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & X A^T & 0 \\ AX & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + i^{-1} \begin{bmatrix} X \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [X \ 0 \ 0] \times \tag{14}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & (B M_0 L K X)^T & 0 \\ B M_0 L K X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + i^{-1} \begin{bmatrix} Y^T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} J [Y \ 0 \ 0], \tag{15}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & (B M_0 K X)^T & 0 \\ B M_0 K X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + i^{-1} \begin{bmatrix} Y^T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} J [Y \ 0 \ 0], \tag{16}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & (B M_0 L K X)^T & 0 \\ B M_0 L K X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + i^{-1} \begin{bmatrix} Y^T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} J [Y \ 0 \ 0], \tag{17}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & (D_1 M_0 L K X)^T & 0 \\ D_1 M_0 L K X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + i^{-1} \begin{bmatrix} Y^T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} J [Y \ 0 \ 0]. \tag{18}$$

式 (13) ~ (18) 代入式 (12), 即得线性矩阵不等式 (11).

引理 2 在极点可配置的基础上融入了 H 指标约束, 进一步扩展其包含的指标集约束, 有以下结论:

引理 3 存在控制增益 K , 使故障闭环系统 (5)

描述.

满足定理 2 的可行解不一定总存在,它与给定的性能指标有着密切关系.因此,性能指标的取值不是任意的,只有给定的性能指标都在可行范围内,所求的满意容错控制才有可行解.在求取可行解时,首先要判断给定的性能指标是否在可行范围内.

如果故障闭环系统(5)极点指标状态反馈鲁棒可配置,则由定理 1 可知,线性矩阵不等式(11)必有可行解.于是下面的极值问题有意义:

$$\min () : (X, Y, i,) , \text{ s. t. LMI(11)}. \quad (24)$$

可用 Matlab-LMI 求解器 Mincx 求解上述极小值问题,并记相应的极小值点为 (X_L, Y_L, i_L, L) .若给定 H 上界指标 $> L$,则线性矩阵不等式(22)必有可行解.于是,对于给定的极点指标 (q, r) 和 H 上界指标 $> L$,有下述定理:

定理 3 考虑故障闭环系统(5),假设区域极点指标 (q, r) 状态反馈鲁棒可配置,则所有满足 $> L$ 的 H 上界指标 都与区域极点指标 (q, r) 相容,且如下极值问题有意义:

$$\begin{aligned} & \min_{(X, Y, J_0, i,)} \text{trace}(J_0); \\ & \text{s. t. 1) (22),} \\ & \quad 2) \begin{bmatrix} -J_0 & B_2^T \\ B_2 & -X \end{bmatrix} < 0. \end{aligned} \quad (25)$$

证明 根据定理 2,利用问题(25)的任一可行解构造得到的控制律 2),将保证闭环系统满足约束条件 1) 和 2),并且闭环系统的 H_2 性能指标值满足 $J(K) = \text{trace}(B_2^T X^{-1} B_2)$.进而根据矩阵的 Schur 补性质,极值问题(25)的约束条件 2) 等价于 $B_2^T X^{-1} B_2 < J_0$.因此,trace(J_0) 的最小化将保证 H_2 性能指标上界的最小化.

定理 3 刻画了在状态反馈控制下,故障闭环系统 H_2 性能指标上界中与区域极点指标和 H 指标相容的最小值.问题(25)是具有线性矩阵不等式约束和线性目标函数的凸优化问题,可用 Matlab-LMI 求解器 Mincx 求解该问题,并记相应的极小值点为 $(X_{\min}, Y_{\min}, i_{\min}, J_{0 \min})$.如果给定区域极点指标 (q, r) 和 H 上界指标 $> L$,则所有满足 $\bar{J}(K) > J_{0 \min}$ 的 H_2 性能指标都与极点指标和 H 扰动衰减指标相容.当这 3 类指标相容时,它为有效求取满足 3 类相容指标的满意容错控制器提供了理论依据.

定理 4 考虑故障闭环系统(5),假设区域极点指标 (q, r) 状态反馈鲁棒可配置,给定 H 指标 $> L$, H_2 性能指标上界 $\bar{J}(K) = J_{0 \min}$,则关于变量

$(X, Y, i,) (i = 1 \sim 10)$ 的线性矩阵不等式(22) 总有可行解.如果 (X, Y) 是其任一可行解,则区域极点指标 (q, r) , H 指标 和 H_2 性能指标 $J(K)$ 相对于状态反馈增益 $K = M_0^{-1} Y X^{-1}$ 是相容的.称控制器 $u(k) = Kx(k)$ 为不确定随机离散系统(1) 在多目标约束下的满意容错控制器.

证明 由 (X_{\min}, Y_{\min}) 的定义可知,存在一个解系列 $(X^n, Y^n) (n = 1, 2, \dots)$,使得由此生成的状态反馈增益阵 K^n 收敛于 K_{\min} . H 指标和 H_2 性能指标是反馈控制律的连续函数,因此当 $> L$ 和 $\bar{J}(K) = J_{0 \min}$ 时,由极限的保号性可知,存在充分大的整数 m ,使得 K^m 相应的 $G(z) < \bar{J}(K)$ 和 $J(K) = J_{0 \min}$. K^m 是由线性矩阵不等式(22) 的一个可行解 $(X^m, Y^m) (m = 1, 2, \dots)$ 生成的,因而反馈控制律 K^m 必使故障闭环系统(5) 同时满足约束条件 1) ~ 3).故可知区域极点指标、 H 指标和 H_2 性能指标相对于不确定随机离散系统(1) 的状态反馈增益矩阵 K 是相容的.

当 $M = I$ 即 $M_0 = I$ 和 $L = 0$ 时,针对无故障正常系统,由定理 4 易得如下推论:

推论 1 考虑闭环系统(5),假设区域极点指标 (q, r) 状态反馈鲁棒可配置,给定 H 指标 $> L$, H_2 性能指标上界 $\bar{J}(K) = J_{0 \min}^*$,则关于变量 $(X, Y, i,) (i = 1 \sim 10)$ 的线性矩阵不等式(22) 总有可行解.如果 (X, Y) 是其任一可行解,则极点指标 (q, r) , H 指标 和 H_2 性能指标 $J(K)$ 相对于状态反馈增益 $K = Y X^{-1}$ 是相容的.称控制器 $u(k) = Kx(k)$ 为不确定随机离散系统(1) 在多目标约束下的满意正常控制器.

根据定理 1 ~ 定理 4,可给出同时满足 3 类指标约束的满意容错控制律或满意正常控制律的设计步骤如下:

Step1: 给定区域极点指标 (q, r) ,验证线性矩阵不等式(11) 的可行性,判断是否存在满足 3 类指标约束的满意容错控制律或满意正常控制律;

Step2: 如果线性矩阵不等式(11) 有可行解,则求解极值问题(24),并确定 H 上界指标 $> L$;

Step3: 对于给定的区域极点指标 (q, r) 和 H 上界指标 $> L$,求解极值问题(25),确定 H_2 性能指标上界的最小值,分析与给定区域极点指标和 H 上界指标相容的 H_2 性能指标的取值范围;

Step4: 根据定理 4,给定 H_2 性能指标上界 $\bar{J}(K) = J_{0 \min}$,利用线性矩阵不等式(22) 的可行解,构造同时满足约束条件 1) ~ 3) 的满意容错控制律或满意正常控制律.

4 仿真实例

考虑不确定随机线性离散系统(1),其中

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1.2 \\ -0.1 & 2 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$C_0 = [1 \ 0], D_0 = [0.5 \ 1],$$

$$C_1 = [0.1 \ 0.8], D_1 = [0.1 \ 0.2].$$

不确定性满足 $A \leq 0.2, B \leq 0.3$. 给定执行器故障矩阵

$$M_l = \begin{bmatrix} 0.7 & 0 \\ 0 & 0.55 \end{bmatrix}, M_u = \begin{bmatrix} 1.3 & 0 \\ 0 & 1.1 \end{bmatrix}.$$

取极点指标 $(0.5, 0.5)$, 求解极值问题(24), 得到故障闭环系统 H 指标上界中与区域极点指标相容的最小上界 $L = 1.7321$, 取 H 指标 $= 2$. 解极值问题(25), 确定 H_2 性能指标的最小值 $J_{0 \min} = 0.5629$, 取 $\bar{J}(K) = 1$. 根据定理4, 求得同时满足3类指标约束的满意容错控制增益

$$K = \begin{bmatrix} -0.3671 & 0.0387 \\ 0.0261 & -0.8907 \end{bmatrix}.$$

根据推论1, 得到满意正常控制增益

$$K = \begin{bmatrix} -0.5930 & 0.1243 \\ -0.1122 & -0.6546 \end{bmatrix}.$$

当系统无故障时, 由推论1得到的满意正常控制器将闭环系统的极点配置在指定的圆盘内(见图1). 当执行器发生故障时, 闭环系统的部分极点将跳

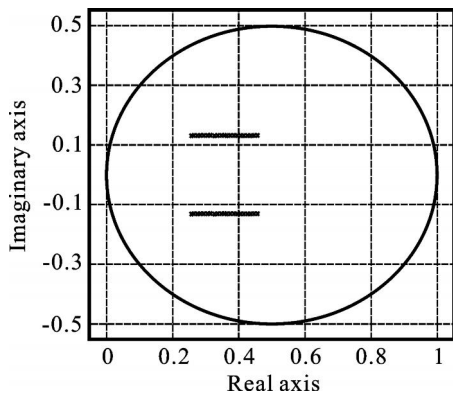


图1 无故障系统在满意正常控制下的极点分布

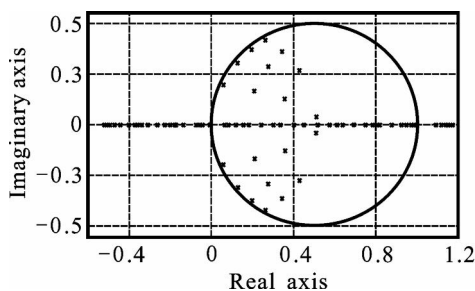


图2 故障系统在满意正常控制下的极点分布

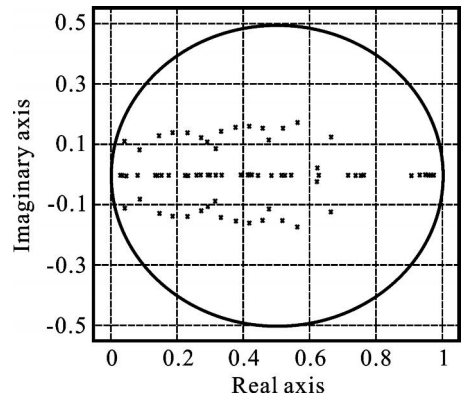


图3 故障系统在满意容错控制下的极点分布

离指定的圆盘, 对于某些故障, 闭环系统的极点成为不稳定极点(见图2). 当执行器发生故障时, 满意容错控制器将故障闭环系统的极点始终保持在指定的圆盘内(见图3).

与满意容错控制器相比, 正常控制器虽然可使闭环系统极点保持在指定的圆盘内, 但是一旦发生故障, 部分极点可能跳离指定圆盘, 有些极点甚至成为不稳定极点. 无论系统是否发生故障, 本文提出的方法都能使闭环系统的极点保持在指定的圆盘内. 因此, 本文提出的满意容错控制器可抵御执行器故障对系统的影响.

当 $w(k)$ 被看成一个有限能量的扰动信号(如正弦信号), 执行器故障矩阵 $M = \text{diag}[0.8 \ 0.9]$ 时, 闭环系统的输出响应曲线如图4所示.

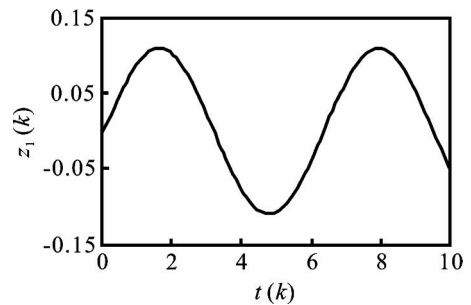


图4 被控输出 $z_1(k)$ 的响应曲线

将扰动 $w(k)$ 和被控输出的采样点的数据导入工作区, 计算其范数有 $\|z_1(k)\|_2 \approx \|w(k)\|_2$. 即在执行器发生故障时, 系统仍满足约束条件2).

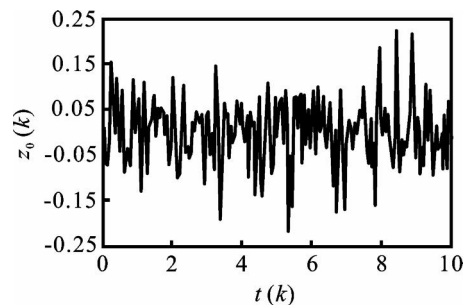


图5 被控输出 $z_0(k)$ 的响应曲线

当 $w(k)$ 被看成一个具有单位谱密度的白噪声信号, 执行器故障矩阵 $M = \text{diag}[0.8 \ 0.9]$ 时, 闭环系统的输出响应曲线如图 5 所示.

经计算可得闭环系统的 H_2 性能指标值 $J(K) = 0.7405 < \bar{J}(K)$. 即在执行器发生故障时, 系统仍满足约束条件 3).

5 结 论

本文针对一类不确定性不满足匹配条件而只有数值上界形式的随机离散线性系统, 研究状态反馈控制下的完整性设计问题. 在连续型执行器故障模型下, 给出了具有相容指标约束的满意容错控制器存在的充分条件, 以及控制器的构造性设计方法. 所给结论保证了在相容指标约束下, 对于任意容许的不确定性以及执行器的故障, 相应的闭环系统同时满足区域极点指标、 H 扰动衰减指标和 H_2 性能指标约束. 仿真实例验证了本文方法的有效性, 并与不考虑故障的系统相比较, 进一步说明对系统进行满意容错控制的必要性.

参考文献 (References)

- [1] Ye D, Yang G. Adaptive fault-tolerant tracking control against actuator faults with application to flight control [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2006, 14(6): 1088-1096.
- [2] Jiang B, Staroswiecki M, Cocquemot V. Fault accommodation for nonlinear dynamic systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(9): 1578-1583.
- [3] Lunze J, Steffen T. Control reconfiguration after actuator failures using disturbance decoupling methods [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(10): 1590-1601.
- [4] Zhang G, Wang Z, Han X, et al. Research on satisfactory control theory and its application in fault-tolerant technology [C]. 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou, 2004: 1521-1524.
- [5] Eduardo N, Reinaldo M, Ricard H. Multiobjective optimization applied to robust H_2/H state-feedback control synthesis [C]. Proc of 2004 American Control Conf. Boston, 2004: 4619-4624.
- [6] Neumann D, Araujo H. Mixed H_2/H control for uncertain systems under pole placement constraints using genetic algorithms and LMIs [C]. Proc of 2004 IEEE Int Symp on Intelligent Control. Taipei, 2004: 460-465.
- [7] Yang Y, Yang G, Soh Y. Reliable control of discrete-time systems with actuator failures [J]. IEE Proc of Control Theory and Applications, 2000, 147(4): 428-432.
- [8] 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 F Z, Yao B, Zhang S Y. Reliable control of regional stabilizability for linear systems [J]. Control Theory and Applications, 2004, 21(5): 835-839.)
- [9] Garcia G, Bernussou J. Pole assignment for uncertain systems in a specified disk by state feedback [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1995, 40(1): 184-190.
- [10] Xu S, Yang C, Zhou S. Robust H control for uncertain discrete-time systems with circular pole constraints [J]. Systems & Control Letters, 2000, 39(1): 13-18.
- [11] 张刚, 韩祥兰, 王执铨. 极点与状态方差约束下的动态输出反馈可靠控制 [J]. 控制与决策, 2007, 22(3): 289-293. (Zhang G, Han X L, Wang Z Q. Dynamic output feedback reliable control with pole and state variance constraints [J]. Control and Decision, 2007, 22(3): 289-293.)
- [18] Dong W H, Sun X X, Lin Y. Variable structure model reference adaptive control with unknown high frequency gain sign [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 21(10): 404-408.
- [19] 解学军, 吴昭景, 张嗣瀛. 具有未规范化自适应律的直接模型参考自适应反推控制器 [J]. 控制与决策, 2004, 19(1): 53-56. (Xie X J, Wu Z J, Zhang S Y. Direct model reference adaptive backstepping controller with unnormalized adaptive laws [J]. Control and Decision, 2004, 19(1): 53-56.)
- [20] Morse A S. High-order parameter tuners for the adaptive control of linear and nonlinear systems [C]. Proc of US-Italy Joint Seminar System, Models and Feedback: Theory and Applications. Birkhauser, 1992: 339-364.

(上接第 986 页)