

文章编号: 1001-0920(2007)03-0289-05

极点与状态方差约束下的动态输出反馈可靠控制

张 刚^{1,2}, 韩祥兰³, 王执钐¹

(1. 南京理工大学 自动化系, 南京 210094; 2. 宁波日报报业集团 电脑中心,
浙江 宁波, 315000; 3. 浙江大学 宁波理学院, 浙江 宁波 315100)

摘 要: 研究了线性不确定系统区域极点与状态方差约束下的动态输出反馈可靠控制器的设计问题. 首先在连续型执行器故障模型下, 利用线性矩阵不等式方法, 建立了容错控制中区域极点指标与方差上界指标间的相容性理论; 然后, 应用极值原理分析了与区域极点指标相容的方差上界指标的取值范围; 最后, 给出了同时满足区域极点与状态方差约束下的动态输出反馈可靠控制器的设计步骤. 仿真实例验证了结果的有效性.

关键词: 容错控制; 执行器故障; 区域极点; 状态方差; 相容性

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Dynamic output feedback reliable control with pole and state variance constraints

ZHANG Gang^{1,2}, HAN Xiang-lan³, WANG Zhi-quan¹

(1. Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Computer Center, Ningbo Newspaper Group, Ningbo 315000, China; 3. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China. Correspondent: ZHANG Gang, E-mail: zhanggang_njust@126.com)

Abstract: The problem of dynamic output feedback reliable controller design for linear uncertain systems is discussed. A continuous gain actuator failure model is adopted. Based on the linear matrix inequality approach, the consistency theory between regional pole index and steady state variance index is setted up. The extremum theory is adopted to analyze the range of state variance indices in detail which is consistent with regional pole. The effective reliable controller design steps are provided with consistent indices constraint. A simulation example shows the effectiveness of the design method.

Key words: Fault tolerant control; Actuator failures; Regional pole; State variance; Consistency

1 引 言

在实际工程控制系统中, 由于所处的环境和结构的复杂性等因素, 故障的产生是不可避免的, 任何微小的故障都可能导致整个系统性能的恶化, 造成人员伤亡和财产损失. 目前容错控制理论的研究对于解决故障前后系统的稳定性问题已基本成熟^[1-3]. 但在实际中, 工程控制系统的设计通常要同时满足多种性能约束条件, 只有期望的各项性能指标都得以满足的控制系统才是令人满意的^[4]. 而且, 系统发生故障后, 人们希望能通过一定的控制手段, 不仅使其继续安全稳定地运行, 而且能保持规定的多项性能约束, 或者具有比较满意的多项性能指标. 因此,

研究多约束条件下的容错控制系统设计具有重要的理论意义和应用价值.

目前, 关于多指标约束下的容错控制系统的讨论尚不多见. 文献[5]首次提出了多约束条件下的容错控制概念, 但对具体的理论和技术没有深入地研究和探讨. 文献[6]研究了一类线性不确定随机系统相容指标下的鲁棒 H_∞ 容错控制器设计方法, 但所采用的故障模型简单且没有考虑极点指标和方差指标约束. 文献[7, 8]研究了区域极点指标以及方差指标约束下的控制系统设计问题, 但没有考虑容错性.

本文研究一类线性不确定系统在同时具有区域极点指标和方差上界指标约束下的动态输出反馈容错控制器的设计问题. 采用连续型执行器故障模型,

收稿日期: 2005-11-03; 修回日期: 2006-01-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60574082).

作者简介: 张刚(1976—), 男, 四川遂宁人, 博士生, 从事故障检测与诊断、容错控制的研究; 王执钐(1939—), 男, 武汉人, 教授, 从事动态大系统的容错控制、混沌控制理论与应用等研究.

利用线性矩阵不等式(LMI)方法,分析了相容指标的取值范围和多约束指标下的容错控制器存在的充分条件,并给出了控制器的构造性设计方法。

2 问题描述与引理

考虑如下的线性不确定系统:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= (A + \Delta A)x(t) + \\ &\quad (B + \Delta B)u(t) + D\omega(t), \\ y(t) &= Cx(t).\end{aligned}\quad (1)$$

其中: $x \in R^n$ 为具有零初值的状态向量, $u \in R^p$ 为控制输入, $y \in R^k$ 为被控输出, $\omega(t) \in R^q$ 为零均值高斯白噪声过程,其强度为 $W > 0$,且 $\omega(t)$ 与零均值初始状态 $x(0)$ 不相关; $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times p}$, $C \in R^{k \times n}$, $D \in R^{n \times q}$ 为已知的常值矩阵; $\Delta A, \Delta B$ 是不确定性实值矩阵函数,反映了系统模型中的时变参数不确定性,并具有如下结构:

$$[\Delta A \quad \Delta A_1] = HF(t)[E_1 \quad E_2], \quad (2)$$

$H \in R^{n \times i}$, $E_1 \in R^{i \times n}$, $E_2 \in R^{i \times p}$ 均为实常矩阵, $F(t)$ 是一个具有 Lebesgue 可测元的未知矩阵,满足

$$F(t) \Sigma = \{F(t) \in R^{i \times j} \mid F^T(t)F(t) \leq I\}.\quad (3)$$

考虑一个具有以下状态空间实现的动态输出反馈控制器:

$$\begin{aligned}\dot{x}_K(t) &= A_K x_K(t) + B_K y(t), \\ u(t) &= C_K x_K(t) + D_K y(t).\end{aligned}\quad (4)$$

其中: $x_K \in R^n$ 是控制器的状态; A_K, B_K, C_K, D_K 是待定的适当维数实矩阵. 将控制器(4)应用于系统(1),得到闭环系统

$$\dot{\bar{x}}(t) = (\bar{A} + \tilde{H}F(t)\bar{E})\bar{x}(t) + \bar{D}\omega(t).\quad (5)$$

其中

$$\bar{x}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ x_K(t) \end{bmatrix}, \quad \bar{A} = \begin{bmatrix} A + BD_K C & BC_K \\ B_K C & A_K \end{bmatrix},$$

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{H} = \begin{bmatrix} H \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{E} = [E_1 + E_2 D_K C \quad E_2 C_K].$$

考虑到执行器可能的失效,引入开关阵 M ,其形式为^[9,10]

$$M = \text{diag}[m_1, m_2, \dots, m_p],$$

其中 $0 \leq m_{il} \leq m_i \leq m_{iu}$. 显然,当 $m_{il} = m_{iu} = 0$ 时,表示第 i 个执行器完全失效;当 $m_{il} = m_{iu} = 1$ 时,表示第 i 个执行器工作正常;当 $0 \leq m_{il} < m_i < m_{iu}$ 且 $m_i \neq 1$ 时,第 i 个执行器部分失效. 为便于分析,记

$$M_0 = \text{diag}[m_{01}, m_{02}, \dots, m_{0p}],$$

$$J = \text{diag}[j_1, j_2, \dots, j_p],$$

$$L = \text{diag}[l_1, l_2, \dots, l_p].$$

其中: $j_i = (m_{iu} - m_{il}) / (m_{iu} + m_{il})$, $m_{\alpha i} = (m_{il} +$

$m_{iu}) / 2$, $l_i = (m_i - m_{0i}) / m_{0i}$. 容易验证

$$M = M_0(I + L), \quad L^2 \leq J^2, \quad (6)$$

其中 $\|\cdot\|$ 代表给定矩阵的 L_2 范数. 此时,包含执行器失效的闭环系统状态方程为

$$\dot{\bar{x}}(t) = (A_f + H_f F(t) E_f) \bar{x}(t) + D_f \omega(t).\quad (7)$$

其中

$$A_f = \begin{bmatrix} A + BMD_K C & BMC_K \\ B_K C & A_K \end{bmatrix}, \quad D_f = \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$H_f = \begin{bmatrix} H \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E_f = [E_1 + E_2 MD_K C \quad E_2 MC_K].$$

假设控制器(4)镇定故障闭环系统(7),则系统(7)的稳态状态协方差矩阵

$$X_{KL} := \lim_{t \rightarrow \infty} E \left\{ \begin{bmatrix} x(t) \\ x_K(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x_K(t) \end{bmatrix}^T \right\} = \begin{bmatrix} X_L & X_K \\ X_K^T & X_{KK} \end{bmatrix}$$

存在,且是如下代数 Lyapunov 方程

$$\begin{aligned}X_{KL}(A_f + H_f F(t) E_f)^T + \\ (A_f + H_f F(t) E_f) X_{KL} + D_f W D_f^T = 0\end{aligned}$$

的唯一正定解.

下面,先给出故障闭环系统(7)区域极点指标与稳态状态协方差指标间的相容性概念.

定义 1 考虑不确定故障系统(7),给定开圆盘 $\Phi(q, r)$ (表示复平面上中心在 $(-q, 0)$,半径为 r 的开圆盘 ($0 < r < q$)) 以及向量 $\sigma^2 \geq 0$,若存在动态输出反馈控制 A_K, B_K, C_K, D_K ,使故障闭环系统(7)同时满足下述条件:

1) 故障闭环系统的极点集 $\Lambda(A_C + \Delta A_C) \subset \Phi(q, r)$;

2) 被控系统状态的稳态方差矩阵满足 $\text{diag}(X) \leq \sigma^2$;

则称方差上界指标 $\sigma^2 \geq 0$ 与极点指标 $\Phi(q, r)$ 相对于系统的动态输出反馈(4)是相容的.

于是,本文的设计目标可描述如下:对不确定故障系统(7)设计动态输出反馈控制器 A_K, B_K, C_K, D_K ,给出同时满足约束条件 1), 2) 的鲁棒容错控制器的充分条件;研究与区域极点指标相容的被控系统稳态状态方差上界指标 σ^2 的取值范围;当系统区域极点指标与方差上界指标相容时,给出鲁棒容错控制器的构造性设计方法.

下面先引入几个有用的引理.

引理 1^[8] 设 Y 为对称矩阵, N_1, N_2 为适维常值矩阵, Ξ 为时变适维矩阵,且满足 $\Xi^T \Xi \leq \rho I$, 其中 $\rho > 0, \alpha > 0$, 则 $Y + N_1 \Xi N_2 + N_2^T \Xi^T N_1^T < 0$ 的充分必要条件为

$$Y + \alpha N_1 N_1^T + \rho \alpha^{-1} N_2^T N_2 < 0.$$

引理 2^[9] 设 R_1, R_2 为适维常值矩阵, Σ 为时变适维对角矩阵且 $|\Sigma| \leq U$, U 为正定对角矩阵 $\beta >$

0, 则

$$R_1 \Xi R_2 + R_2^T \Xi^T R_1^T \leq \beta R_1 U R_1^T + \beta^{-1} R_2^T U R_2.$$

引理 3^[8] 若包含变量 $P = P^T > 0, A_K, B_K,$
 C_K, D_K 的矩阵不等式

$$(A_f + H_f F(t) E_f + qI) P (A_f + H_f F(t) E_f + qI)^T - r^2 P + q D_f W D_f^T < 0 \quad (8)$$

有解, 则故障闭环系统存在满足约束条件 1) 的动态输出反馈控制器, 且闭环系统的稳态状态方差矩阵 $X_{KL} < P$.

3 主要结果

定理 1 考虑故障闭环系统 (7), 给定开圆盘 $\Phi(q, r)$, 如果存在标量 $\varepsilon > 0$, 使得具有未知变量 X, Y, A, B, C, D 的线性矩阵不等式 (9) 是可行的, 则故障闭环系统存在满足约束条件 1) 的动态输出反馈控制器, 且被控系统的稳态状态方差矩阵 $X_L < X$.

$$\begin{bmatrix} -rX & -rI & XA + BC + qX \\ -rI & -rY & A + BM_0 DC + qI \\ * & * & -rX \\ * & * & -rI \\ * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * \end{bmatrix} \rightarrow$$
$$\begin{bmatrix} A + qI & XBM_0 JM_0 E_2^T \\ AY + BM_0 C + qY & BM_0 JM_0 E_2^T \\ -rI & E_1^T + C^T D^T M_0 E_2^T \\ -rY & Y^T E_1^T + C^T M_0 E_2^T \\ * & -\varepsilon I + E_2 M_0 JM_0 E_2^T \\ * & * \\ * & * \\ * & * \\ * & * \end{bmatrix} \leftarrow$$
$$\begin{bmatrix} 0 & XH & XBM_0 J^{1/2} & 0 \\ 0 & XH & BM_0 J^{1/2} & 0 \\ C^T D^T J^{1/2} & 0 & 0 & XD W^{1/2} \\ C^T J^{1/2} & 0 & 0 & D W^{1/2} \\ \leftarrow 0 & 0 & 0 & 0 \\ -I & 0 & 0 & 0 \\ * & -\varepsilon^{-1} I & 0 & 0 \\ * & * & -I & 0 \\ * & * & * & -q^{-1} rI \end{bmatrix} < 0, \quad (9)$$

其中 * 代表由矩阵的对称性得到的矩阵子块.
证明 由矩阵的 Schur 补性质, 矩阵不等式 (8)

等价于

$$L(P, A_K, B_K, C_K, D_K) :=$$
$$\begin{bmatrix} -rP & (A_f + H_f F(t) \times \\ & E_f + qI) Q \\ Q(A_f + H_f \times \\ F(t) E_f + qI)^T & -rP + q r^{-1} \overline{D} W \overline{D}^T \end{bmatrix} < 0.$$

根据引理 1 和式 (2) 可知, 上式对所有满足 $F^T(t) F(t) \leq I$ 的矩阵成立当且仅当存在正常数 $\varepsilon > 0$, 使得

$$\begin{bmatrix} -rP + \varepsilon \widetilde{H} \widetilde{H}^T & (\overline{A} + qI) P & 0 \\ P(\overline{A} + qI)^T & -rP + q r^{-1} \overline{D} W \overline{D}^T & (\widetilde{E} P)^T \\ 0 & \widetilde{E} P & -\varepsilon I \end{bmatrix} < 0. \quad (10)$$

引入新的记号

$$\overline{A} = \begin{bmatrix} A + BM_0 D_K C & BM_0 C_K \\ B_K C & A_K \end{bmatrix},$$
$$\Pi = \begin{bmatrix} BM_0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \Omega = E_2 M_0,$$
$$\widetilde{E} = [E_1 + E_2 M_0 D_K C \quad E_2 M_0 C_K],$$
$$\Sigma = [D_K C \quad C_K],$$

则式 (10) 可以重新写成

$$\begin{bmatrix} -rP + \varepsilon \widetilde{H} \widetilde{H}^T & (\overline{A} + qI) P & 0 \\ P(\overline{A} + qI)^T & -rP + q r^{-1} \overline{D} W \overline{D}^T & (\widetilde{E} P)^T \\ 0 & \widetilde{E} P & -\varepsilon I \end{bmatrix} +$$
$$\begin{bmatrix} \Pi \\ 0 \\ \Omega \end{bmatrix} L \begin{bmatrix} 0 & \Sigma P & 0 \end{bmatrix} + \left\{ \begin{bmatrix} \Pi \\ 0 \\ \Omega \end{bmatrix} L \begin{bmatrix} 0 & \Sigma P & 0 \end{bmatrix} \right\}^T < 0.$$

运用引理 2 以及 Schur 补性质, 上式小于零等价于

$$\begin{bmatrix} -rP & (\overline{A} + qI) P & \Pi J \Omega^T \\ P(\overline{A} + qI)^T & -rP & (\widetilde{E} P)^T \\ \Omega J \Pi^T & \widetilde{E} P & -\varepsilon I + \Omega J \Omega^T \\ 0 & J^{1/2} \Sigma P & 0 \\ \widetilde{H}^T & 0 & 0 \\ J^{1/2} \Pi^T & 0 & 0 \\ 0 & W^{1/2} \overline{D}^T & 0 \\ 0 & \widetilde{H} & \Pi J^{1/2} & 0 \\ (J^{1/2} \Sigma P)^T & 0 & 0 & \overline{D} W^{1/2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \leftarrow -I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\varepsilon^{-1} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -q^{-1} rI \end{bmatrix} < 0. \quad (11)$$

为了将被控系统的状态方差上界从正定矩阵 P 中分解出来, 将矩阵 P 和它的逆作以下分块:

$$P = \begin{bmatrix} Y & S \\ S^T & R \end{bmatrix}, P^{-1} = \begin{bmatrix} X & T \\ T^T & Z \end{bmatrix},$$

其中 X, Y 为对称矩阵. 由等式 $PP^{-1} = I$ 可知

$$TS^T = I - XY.$$

定义 $\Phi_1 = \begin{bmatrix} X & I \\ T^T & 0 \end{bmatrix}, \Phi_2 = \begin{bmatrix} I & Y \\ 0 & S^T \end{bmatrix}$, 通过矩阵运算可得

$$P\Phi_1 = \Phi_2, \Phi_1^T P\Phi_1 = \Phi_2^T \Phi_1 = \begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix}. \quad (12)$$

定义一组新变量

$$\begin{aligned} A &= X(A + BM_0 D_K C)Y + \\ &\quad TB_K CY + XBM_0 C_K S^T + TA_K S^T, \\ B &= XBM_0 D_K + TB_K, \\ C &= D_K CY + C_K S^T, \\ D &= D_K. \end{aligned} \quad (13)$$

则对给定的正定矩阵 X, Y 和可逆矩阵 S, T , 控制器参数矩阵 A_K, B_K, C_K, D_K 可以由 A, B, C, D 唯一确定. 进一步通过矩阵运算, 得到

$$\begin{aligned} \Phi_1^T \bar{A} P \Phi_1 &= \begin{bmatrix} XA + BC & A \\ A + BM_0 DC & AY + BM_0 C \end{bmatrix}, \\ \Phi_1^T \Pi J \Omega^T &= \begin{bmatrix} XBM_0 JM_0 E_2^T \\ BM_0 JM_0 E_2^T \end{bmatrix}, \Phi_1^T \tilde{H} = \begin{bmatrix} XH \\ H \end{bmatrix}, \\ \Phi_1^T \Pi J^{1/2} &= \begin{bmatrix} XBM_0 J^{1/2} \\ BM_0 J^{1/2} \end{bmatrix}, \Phi_1^T \bar{D} W^{1/2} = \begin{bmatrix} XD W^{1/2} \\ D W^{1/2} \end{bmatrix}, \\ \Phi_1^T (\tilde{E}P)^T &= [E_1 + E_2 M_0 DC \quad E_1 Y + E_2 M_0 C]^T, \\ \Phi_1^T (J^{1/2} \Sigma P)^T &= [J^{1/2} DC \quad J^{1/2} C]^T. \end{aligned} \quad (14)$$

对矩阵不等式(11) 分别左乘矩阵 $\text{diag}[\Phi_1^T \quad \Phi_1^T \quad I \quad I \quad I \quad I]$ 和右乘矩阵 $\text{diag}[\Phi_1 \quad \Phi_1 \quad I \quad I \quad I \quad I]$, 利用式(12) 和(14) 即可推出式(9) 和(11) 是等价的, 从而由引理3 可得本定理的结论. $\square$

对给定的正常数 $\varepsilon > 0$, 式(9) 是一个线性矩阵不等式, 因此, 可应用 LMI 工具箱中的求解器 feasp 来求解. 若上述线性矩阵不等式系统有解, 则从其任意一个可行解出发, 首先, 对矩阵 $TS^T = I - XY$ 进行奇异值分解, 确定两个可逆矩阵 T, S ; 然后通过式(13), 便可求取同时满足约束条件1) 和2) 的动态输出反馈控制器参数 A_K, B_K, C_K, D_K .

若线性矩阵不等式系统有解, 考虑如下的极小值问题:

$$\begin{aligned} \min(\text{tr } X) : & (\varepsilon, X, Y, A, B, C, D), \\ \text{s. t.} & \text{ LMI (9)}. \end{aligned}$$

记 X_s 为上述极值问题的极小值点, 可以得到如下的区域极点指标与被控系统状态方差指标间的相容性定理.

定理2 考虑故障闭环系统(7), 假设对于给定

的极点区域 $\Phi(q, r)$, 系统满足动态输出反馈极点可配置条件(9), 则对于所有满足 $\sigma^2 > \text{diag}(X_s)$ 的方差上界指标 σ^2 都与极点区域指标 $\Phi(q, r)$ 相容.

证明 由闭环系统稳态方差矩阵对动态输出反馈控制器的连续依赖性以及极限的保号性可知定理成立, 类似的推导过程可参见文献[11]. $\square$

在上述的相容性定理基础上, 当方差上界指标 σ^2 满足 $\sigma^2 > \text{diag}(X_s)$ 时, 容易推导出以下定理. 它为具有相容圆形极点区域和状态方差上界指标的容错控制问题, 给出了求取满意动态输出反馈器的有效方法.

定理3 考虑故障闭环系统(7), 若对于给定的极点指标 $\Phi(q, r)$ 系统动态输出反馈可配置, 方差上界指标 σ^2 满足 $\sigma^2 > \text{diag}(X_s)$, 则关于矩阵变量 $(\varepsilon, X, Y, A, B, C, D)$ 的 LMIs(9) 以及 $X < R_0$ 必定有解, 且由其任意一组可行解 $(\varepsilon, X, Y, A, B, C, D)$ 出发, 通过求解方程(13) 得到的控制器参数 A_K, B_K, C_K, D_K 所构成的控制律必定使故障闭环系统(7) 同时满足约束条件1) 和2). 其中 R_0 是满足 $\text{diag}(R_0) = \sigma^2$ 且与 X_s 有相同非对角元的正定矩阵.

证明略.

为便于在实际中操作, 给出同时满足区域极点指标和方差上界指标约束的动态输出反馈容错控制系统的设计步骤:

1) 对于所有可能的执行器失效, 用 Matlab-LMI 求解器 feasp 验证关于矩阵变量 $(\varepsilon, X, Y, A, B, C, D)$ 的 LMI(9) 的可行性, 从而判别故障系统(9) 是否存在满足条件1) 的动态输出反馈控制器;

2) 若 LMI(9) 可行, 用 Matlab-LMI 求解器 mincx 求解以 $(\varepsilon, X, Y, A, B, C, D)$ 为变量, LMI(9) 为约束, $\min(\text{tr } X)$ 为目标函数的极小值问题, 得到 X_s , 从而可知对于任意给定的、满足 $\sigma^2 > \text{diag}(X_s)$ 的方差上界指标必定与系统的区域极点指标相容;

3) 对于给定的方差上界指标 $\sigma^2 > \text{diag}(X_s)$, 求解关于变量 $(\varepsilon, X, Y, A, B, C, D)$ 的 LMIs(9) 以及 $X < R_0$, 利用上述 LMIs 的可行解构造同时满足条件1), 2) 的动态输出反馈控制器.

4 仿真例子

考虑线性不确定系统

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -4 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0.2 & 0 \\ 0 & 1 & 0.2 \end{bmatrix}, D = [I_3 \times 3 \quad 0_{3 \times 2}], \\ W &= I_5 \times, H = E_1 = 0.5 I_3 \times, E_2 = B. \end{aligned}$$

给定极点区域指标为 $\Phi(q, r) = \Phi(3, 2)$, 即圆心为 $-3 + 0i$, 半径为 $r = 2$ 的圆. 执行器故障矩阵模型为

$$M = \text{diag}[m_1 \quad m_2],$$

其中 $0.4 \leq m_1 \leq 1.6, 0.2 \leq m_2 \leq 1.4$. 简单计算可得

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.8 \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0.6 & 0 \\ 0 & 0.75 \end{bmatrix}.$$

由定理计算得到满足区域极点可配置的动态输出反馈控制器参数为

$$A_K = \begin{bmatrix} -3.8864 & 2.3133 & 6.1163 \\ -2.3660 & -1.5771 & -106.4901 \\ 0.0929 & 0.3540 & -35.2134 \end{bmatrix},$$

$$B_K = \begin{bmatrix} 10.0623 & 3.3341 \\ 4.0525 & -6.6781 \\ 0.3408 & -1.6781 \end{bmatrix},$$

$$C_K = \begin{bmatrix} -0.0067 & -0.0509 & -3.3299 \\ 0.2741 & 0.7216 & -65.5690 \end{bmatrix},$$

$$D_K = \begin{bmatrix} -0.0989 & 0.2243 \\ 0.2243 & -3.4274 \end{bmatrix},$$

此时, 被控系统的状态稳态方差

$$X < \begin{bmatrix} 5.7905 & -0.3939 & 0.1010 \\ -0.3939 & 4.3163 & -0.9305 \\ 0.1010 & -0.9405 & 1.1066 \end{bmatrix}.$$

5 结 论

本文研究了一类线性不确定系统动态输出反馈控制下的完整性控制问题. 在更一般、更实际的执行器故障模式下, 给出了具有相容指标约束的动态输出反馈容错控制器存在的充分条件, 以及容错控制器的构造性设计方法; 所给结论保证了对于任意容许的不确定性以及执行器的故障, 相应的闭环系统极点满足区域极点约束, 且被控系统的稳态状态方差不超过给定的上界. 数值例子验证了本文所给结论的有效性.

参考文献(References)

[1] Zhang X D, Thomas P, Marios M P. Adaptive fault-tolerant control of nonlinear uncertain systems: An information-based diagnostic approach[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(8): 1259-1274.
[2] Kwan C, Xu R. A note on simultaneous isolation of

sensor and actuator faults[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2004, 12(1): 183-192.
[3] Marx B, Koenig D, Georges D. Robust fault tolerant control for descriptor systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(10): 1869-1875.
[4] Guo Z, Qian L J. Satisfactory control, estimation, and model reduction[C]. Proc of the 3th World Congress on Intelligent Control and Automation. Hefei, 2000:91-94.
[5] 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.
[6] 李军, 吴刚, 胡寿松, 等. 相容性指标下的鲁棒 H_∞ 容错控制器设计[J]. 南京理工大学学报, 2004, 28(6): 561-565.
(Li J, Wu G, Hu S S, et al. Design for H_∞ fault-tolerant controller of uncertain continuous systems based on consistency[J]. J of Nanjing University of Science and Technology, 2004, 28(6): 561-565.)
[7] Wang Z D, Chen X M, Guo Z. Controller design with variance and circular pole constraints for continuous time systems [J]. Int J Systems Science, 1995, 26(5): 1249-1256.
[8] 王远钢, 郭治. 状态反馈中圆形极点与状态方差约束的相容性[J]. 自动化学报, 2001, 27(2): 423-427.
(Wang Y G, Guo Z. Consistency of circular pole and state variance constraints in state-feedback control[J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(2): 423-427.)
[9] 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.)
[10] Yang Y, Yang G H, Soh Y C. Reliable control of discrete-time systems with actuator failure [J]. IEE Proc — Control Theory Application, 2000, 147(4): 428-432.
[11] 王远钢, 郭治. 反馈控制系统多性能约束指标的相容性 [J]. 控制理论与应用, 2000, 20(3): 423-426.
(Wang Y G, Guo Z. Consistency of multiple performance indices of feedback control system [J]. Control Theory and Applications, 2000, 20(3): 423-426.)