第 21 卷 第 7 期 控 制 与 决 策 2006 年 7 月
Vol 21 No. 7 Control and Decision July 2006

文章编号: 1001-0920(2006)07-0809-05

数值界不确定性关联大系统分散鲁棒 H ∞输出反馈控制

谢永芳, 桂卫华, 蒋朝辉
(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 研究一类状态矩阵、控制矩阵及关联矩阵中存在数值界不确定性关联大系统的分散鲁棒 H_∞ 输出反馈控制器设计方法. 基于有界实引理, 将控制器的存在条件归结为一个非线性矩阵不等式, 采用同伦迭代方法求解控制器, 使闭环大系统鲁棒稳定, 并且满足给定的 H_∞ 性能指标. 最后通过仿真验证了该方法的有效性.

关键词: 数值界不确定性; 分散 H_∞ 控制; 输出反馈; 非线性矩阵不等式; 同伦方法
中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Decentralized Robust H ∞ Output Feedback Controller Design for Value Bounded Uncertain Large-scale Interconnected Systems

XIE Yong-fang, GUI Wei-hua, JIANG Zhao-hui
(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China. Correspondent: XIE Yong-fang, E-mail: yfxie@mail. csu. edu. cn)

Abstract: For large-scale interconnected systems with value bounded uncertainties existing in the state, control and interconnected matrices, a robust decentralized H_∞ output feedback controller is designed. Based on the bounded real lemma a sufficient condition for the existence of the decentralized robust H_∞ output feedback controller is derived. This condition is expressed as the solvability of a certain nonlinear matrix inequality (NLMI). The controller which enables the closed-loop large-scale systems robust stable and satisfies the given H_∞ performance is obtained by a homotopy iterative method. A numerical example is given to demonstrate the effectiveness of the method.

Key words: Value bounded uncertainty; Decentralized H_∞ control; Output feedback; NLMI; Homotopy method

1 引 言

由于实现的实时发、可靠性和经济性, 分散控制成为大系统理论中一个十分活跃的分支[1]. 目前, 大系统分散 H_∞ 控制得到了深入研究, 文献[2～4]研究了标称情形下大系统分散 H_∞ 控制器设计问题, 但没有考虑系统模型的不确定性. 而系统模型中常含有不确定性, 按照标称参数设计的控制器可能达不到预期的性能指标, 因而不确定性关联大系统鲁棒 H_∞ 控制引起了控制界的重视, 并取得了重大进展[5～9].

在实际系统中, 不确定项往往具有数值界的表达形式. 本文针对一类状态矩阵、控制输入矩阵及关联矩阵中含有数值界不确定性关联大系统, 研究其分散鲁棒 H_∞ 输出反馈控制器设计, 利用有界实引理, 将控制器设计归结为一个非线性矩阵不等式(NLMI) 的求解问题. 运用线性矩阵不等式(LMI) 方法[10], 通过选取适当的同伦函数, 迭代求解分散鲁棒 H_∞ 输出反馈控制器, 使大系统鲁棒稳定, 并且满足给定的 H_∞ 性能指标.

2 问题描述

考虑一类由 N 个子系统组成的状态矩阵、控制矩阵及关联矩阵中含有数值界不确定性的关联大系统, 其子系统的方程为

收稿日期: 2005-04-25; **修回日期**: 2005-07-29.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60474003); 教育部博士点基金项目(20050533028).
作者简介: 谢永芳(1972—), 男, 河南郸城人, 副教授, 博士, 从事分散控制、鲁棒控制的研究; 桂卫华(1950—), 男, 湖北襄樊人, 教授, 博士生导师, 从事分散控制、复杂生产过程等研究.

$$
\begin{cases}
\dot{x}_i(t) = (A_{ii} + \Delta A_{ii})x_i(t) + B_{1i}\omega_i(t) + (B_{2i} + \\
\qquad \Delta B_{2i})u_i(t) + \sum\limits_{j=1, j\neq i}^{N} (A_{ij} + \Delta A_{ij})x_j(t), \\
z_i(t) = C_{1i}x_i(t) + D_{12i}u_i(t), \\
y_i(t) = C_{2i}x_i(t) + D_{21i}\omega_i(t).
\end{cases} \tag{1}
$$

其中: $i = 1, 2, \cdots, N$; $x_i(t) \in R^{n_i}$, $\omega_i(t) \in R^{r_i}$, $u_i(t) \in R^{m_i}$, $z_i(t) \in R^{l_i}$, $y_i(t) \in R^{p_i}$ 分别为第 i 个子系统的状态、扰动输入、控制输入、被控输出、可测量输出向量; 矩阵 $A_{ii}, B_{1i}, B_{2i}, C_{1i}, C_{2i}, D_{12i}, D_{21i}$ 为具有相应维数的常数阵; A_{ij} 为第 j 个子系统与第 i 个子系统的关联阵; 矩阵 $\Delta A_{ii}, \Delta B_{2i}$ 和 ΔA_{ij} 分别为状态阵、控制输入阵和关联阵的不确定性, 它们有如下数值界:

$$
|\Delta A_{ij}| \prec R_{ij},\ |\Delta B_{2i}| \prec S_i,\ i, j = 1, 2, \cdots, N. \tag{2}
$$

其中: R_{ij} 和 S_i 为具有非负元素的实常数矩阵, 并分别与 ΔA_{ij} 和 ΔB_{2i} 同维. $|\Delta| \prec \bar{\Delta}$ 的含义是: $|e_{ij}| \leq \bar{e}_{ij}$, e_{ij} 和 $\bar{e}_{ij}$ 分别为矩阵 Δ 和 $\bar{\Delta}$ 的第 (i, j) 个对应元素, $i, j = 1, 2, \cdots, N$.

整个关联大系统可描述为

$$
\begin{cases}
\dot{x} = (A + \Delta A)x + B_1\omega + (B_2 + \Delta B_2)u, \\
z = C_1x + D_{12}u,\ y = C_2x + D_{21}\omega
\end{cases} \tag{3}
$$

其中

$$
\begin{aligned}
& A = [A_{ij}]_{N\times N},\ B_1 = \text{block-diag}\{B_{11}, \cdots, B_{1N}\}, \\
& B_2 = \text{block-diag}\{B_{21}, \cdots, B_{2N}\}, \\
& C_1 = \text{block-diag}\{C_{11}, \cdots, C_{1N}\}, \\
& C_2 = \text{block-diag}\{C_{21}, \cdots, C_{2N}\}, \\
& D_{12} = \text{block-diag}\{D_{121}, \cdots, D_{12N}\}, \\
& D_{21} = \text{block-diag}\{D_{211}, \cdots, D_{21N}\}, \\
& \Delta A = [\Delta A_{ij}]_{N\times N},\ i, j = 1, 2, \cdots, N, \\
& \Delta B_2 = \text{block-diag}\{\Delta B_{21}, \cdots, \Delta B_{2N}\}, \\
& x = \text{col}\{x_1, \cdots, x_N\},\ \omega = \text{col}\{\omega_1, \cdots, \omega_N\}, \\
& u = \text{col}\{u_1, \cdots, u_N\},\ z = \text{col}\{z_1, \cdots, z_N\}, \\
& y = \text{col}\{y_1, \cdots, y_N\}.
\end{aligned}
$$

本文研究的问题是: 为每个子系统设计一个严格真的输出反馈控制器, 使闭环大系统对所有满足式(2)的不确定性渐近稳定, 且具有 H_∞ 性能指标 γ(对于给定的 $\gamma > 0$, 有 $\|T_{z\omega}(s)\|_\infty < \gamma$, $T_{z\omega}(s)$ 是从扰动 ω 到被控输出 z 的传递函数).

引理 1 若 $n \times m$ 阶矩阵 ΔA 满足 $|\Delta A| \prec D$, 则有

$$
\Omega(D) \geq \Delta A \Delta A^T,\ \Gamma(D) \geq \Delta A^T \Delta A.
$$

其中

$$
\Omega(D) = \begin{cases}
\|DD^T\| I, \ \|DD^T\| I < \\
n * \text{diag}(DD^T); \\
n * \text{diag}(DD^T), \ \text{其他}.
\end{cases}
$$

$$
\Gamma(D) = \begin{cases}
\|D^TD\| I, \ \|D^TD\| I < \\
m * \text{diag}(D^TD); \\
m * \text{diag}(D^TD), \ \text{其他}.
\end{cases}
$$

式中: $\text{diag}(R) = \text{diag}(r_{11}, r_{22}, \cdots, r_{nn})$, $R = (r_{ij})$ 为 n 阶对称实阵.

3 分散鲁棒 H_∞ 控制器设计

考虑为每个子系统设计如下形式的输出反馈控制器:

$$
\begin{cases}
\dot{x}_{ci} = A_{ci}x_{ci} + B_{ci}y_i, \\
u_i = C_{ci}x_{ci},
\end{cases} \quad i = 1, 2, \cdots, N. \tag{4}
$$

其中: $x_{ci} \in R^{n_i}$ 为第 i 个局部控制器的状态; A_{ci}, B_{ci}, C_{ci} 为需要确定的常数矩阵. 结合大系统(1)和控制器(4), 得到的闭环大系统为

$$
\dot{x}_{c1} = A_{c1}x_{c1} + B_{c1}\omega,\ z = C_{c1}x_{c1}. \tag{5}
$$

其中

$$
\begin{aligned}
& x_{c1} = \text{col}\{x, x_c\},\ x_c = \text{col}\{x_{c1}, \cdots, x_{cN}\}, \\
& A_c = \text{block-diag}\{A_{c1}, \cdots, A_{cN}\}, \\
& B_c = \text{block-diag}\{B_{c1}, \cdots, B_{cN}\}, \\
& A_{c1} = \begin{bmatrix} A + \Delta A & (B_2 + \Delta B_2)C_c \\ B_cC_2 & A_c \end{bmatrix}, \\
& C_{c1} = [C_1 \quad D_{12}C_c],\ B_{c1} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_cD_{21} \end{bmatrix}, \\
& C_c = \text{block-diag}\{C_{c1}, \cdots, C_{cN}\}.
\end{aligned}
$$

下面给出基于矩阵不等式的分散鲁棒 H_∞ 控制器存在的条件及其求解方法.

定理 1 如果存在正数 $\alpha > 0$ 和 $\beta > 0$, 以及块对角正定矩阵 X, Y 和块对角矩阵 F, L, Q (每个子块的维数与相应子系统的维数相匹配), 使得

$$
T(X, Y, F, L, Q, \alpha, \beta) =
\begin{bmatrix}
J_{11} & J_{21}^T & B_1 & W_1^T \\
J_{21} & J_{22} & W_2 & C_1^T \\
B_1^T & W_2^T & -\gamma I & 0 \\
W_1 & C_1 & 0 & -\gamma I
\end{bmatrix} < 0, \tag{6}
$$

$$
\begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} > 0 \tag{7}
$$

成立, 其中

$$
\begin{aligned}
J_{11} = {} & AX + XA^T + B_2F + F^TB_2^T + (\alpha + \\
& \beta)I + \alpha^{-1}X\Gamma(R)X + \beta^{-1}F^T\Gamma(S)F, \\
J_{22} = {} & A^T + YAX + LC_2X + YB_2F + \\
& Q + (\alpha + \beta)Y + \alpha^{-1}\Gamma(R)X, \\
J_{22} = {} & YA + A^TY + LC_2 + (LC_2)^T + \\
& (\alpha + \beta)Y^2 + \alpha^{-1}\Gamma(R), \\
\Gamma(R) = {} & \Gamma([R_{ij}]_{N\times N}),\ i, j = 1, 2, \cdots, N, \\
\Gamma(S) = {} & \text{block-diag}\{\Gamma(S_1), \cdots, \Gamma(S_N)\}, \\
W_1 = {} & C_1X + D_{12}F,\ W_2 = YB_1 + LD_{21}.
\end{aligned}
$$

则大系统(1) 在分散输出反馈控制器(4) 作用下, 得到的闭环大系统(5) 渐近稳定且具有给定的H_∞性能指标γ. 在此情形下, 控制器参数可取

$$A_c = V^{-1}QU^{-T},\ B_c = V^{-1}L,\ C_c = FU^{-T},\quad (8)$$

且

$$UV^T = I - XY.\quad (9)$$

证明　利用式(6), (7), (9) 的解构造分块对称矩阵 P, 即

$$P = \begin{bmatrix} Y & V \\ V^T & U^{-1}XYXU^{-T} - U^{-1}XU^{-T} \end{bmatrix}.$$

由式(7) 和 Schur 补引理[10], 可证 X_{c1} 是正定矩阵. 利用引理 3 并令

$$Q = VA_cU^T, L = VB_c, F = C_cU^T,$$

代入式(6) 并经推导, 可以证明

$$\begin{bmatrix} A_{c1}^TP + PA_{c1} & PB_{c1} & C_{c1}^T \\ B_{c1}^TP & -\gamma I & 0 \\ C_{c1} & 0 & -\gamma I \end{bmatrix} < 0$$

成立. 由有界实引理[11] 可知定理 1 成立. □

在定理 1 中, 式(6) 为一 NLMI. 为求解该 NLMI, 引入实数 $\lambda \in [0, 1]$, 并定义矩阵

$$H(X, Y, F, L, Q, \alpha, \beta, \lambda) = G(X, Y, F, L, Q) + \lambda K(X, Y, F, L, Q, \alpha, \beta).$$

其中

$$K(X, Y, F, L, Q, \alpha, \beta) = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{21}^T & 0 & 0 \\ Z_{21} & Z_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$G(X, Y, F, L, Q) = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21}^T & B_1 & W_1^T \\ A_{21} & A_{22} & W_2 & C_1^T \\ B_1^T & W_2^T & -\gamma I & 0 \\ W_1 & C_1 & 0 & -\gamma I \end{bmatrix},$$

$$A_{11} = AX + XA^T + B_2F + F^TB_2^T,$$
$$A_{21} = A^T + YAX + LC_2X + YB_2F + Q,$$
$$A_{22} = YA + A^TY + LC_2 + C_2^TL^T.$$

显然

$$H(X, Y, F, L, Q, \alpha, \beta, \lambda) = \begin{cases} G(X, Y, F, L, Q), & \lambda = 0; \\ T(X, Y, F, L, Q, \alpha, \beta), & \lambda = 1. \end{cases}$$

因此通过求解

$$H(X, Y, F, L, Q, \alpha, \beta, \lambda) < 0,\quad \lambda \in [0, 1],\quad (10)$$

可以得到式(6) 的解(即当λ从 0 变到 1 时, 可得到式(6) 的解).

由 Schur 补引理, 可得到与式(10) 等价的两个矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{21}^T & B_1 & W_1^T & X & F^T \\ M_{21} & M_{22} & W_2 & C_1^T & I & 0 \\ B_1^T & W_2^T & -\gamma I & 0 & 0 & 0 \\ W_1 & C_1 & 0 & -\gamma I & 0 & 0 \\ X & I & 0 & 0 & -\alpha\lambda^{-1}\Gamma(R)^{-1} & 0 \\ F & 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta\lambda^{-1}\Gamma(S)^{-1} \end{bmatrix} < 0;\quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} N_{11} & N_{21}^T & B_1 & W_1^T & I & I \\ N_{21} & N_{22} & W_2 & C_1^T & Y & Y \\ B_1^T & W_2^T & -\gamma I & 0 & 0 & 0 \\ W_1 & C_1 & 0 & -\gamma I & 0 & 0 \\ I & Y & 0 & 0 & -\alpha^{-1}\lambda^{-1}I & 0 \\ I & Y & 0 & 0 & 0 & -\beta^{-1}\lambda^{-1}I \end{bmatrix} < 0.\quad (12)$$

式(11) 中

$$M_{11} = AX^T + XA^T + B_2F + F^TB_2^T + \lambda(\alpha + \beta)I,$$
$$M_{21} = A^T + YAX + LC_2X + YB_2F + Q + \lambda(\alpha + \beta)Y,$$
$$M_{22} = Y^TA + A^TY + LC_2 + C_2^TL^T + \lambda(\alpha + \beta)Y^2;$$

式(12) 中

$$N_{11} = AX^T + XA^T + B_2F + F^TB_2^T + \alpha^{-1}\lambda X\Gamma(R)X + \beta^{-1}\lambda F^T\Gamma(S)F,$$
$$N_{21} = A^T + YAX + LC_2X + YB_2F + Q + \alpha^{-1}\lambda\Gamma(R)X,$$
$$N_{22} = Y^TA + A^TY + LC_2 + C_2^TL^T + \alpha^{-1}\lambda\Gamma(R).$$

可以看出, 对于固定的变量 Y, L 和λ, 式(11) 是关于变量 X, F, Q, α和β的 LMI. 如果固定变量 X, F 和λ, 则式(12) 是关于变量 Y, L, Q, α^{-1} 和 β^{-1} 的 LMI, 因此可以逐步增加λ以及交替求解式(11) 和(12) 来获得满足式(10) 和(7) 的解. 故有如下迭代 LMI 求解算法:

Step 1: 取$\lambda = 0$时的值为初始值. 当$\lambda = 0$时求解式(10), 等价于求解 $G(X, Y, F, L, Q) < 0$. 在 $G(X, Y, F, L, Q)$ 中, 约束A_{21}为块对角结构矩阵Q_F, 计算满足$G(X, Y, F, L, Q_F) < 0$和式(7) 的块对角约束解, 作为初始值X_0, Y_0, F_0, L_0.

Step 2: 设M 为一正整数, 并确定M 的上限$M_{\max}$. 设迭代次数为K, 并置$K = 0$.

Step 3: 令$K = K + 1$和$\lambda_K = K/M$, 固定Y_{K-1}和L_{K-1}求解式(11) 和(7), 如果无解, 则转至 Step 4; 如果有解, 则求得块对角阵 X 和 F, 并令$X_K = X, F_K = F$. 固定X_K和F_K求解式(12) 和(7), 得相应解 Y, L, Q, α^{-1}, β^{-1}, 并令$Y_K = Y, L_K = L, Q_K = Q$, 转至 Step 6.

Step 4: 固定X_{K-1}和F_{K-1}求解式(12) 和(7), 如

果无解, 则转至 Step 5; 如果有解, 则求得 Y 和 L, 并令 $Y_K = Y, L_K = L$. 固定 Y_K 和 L_K 求解式(11) 和(7), 得相应解 X, F, Q, α, β, 并令 $X_K = X, F_K = F, Q_K = Q$, 转至 Step 6.

Step 5: 令 $M = 2M$ 且满足约束条件 $M \le M_{\max}$. 令 $X_{2(K-1)} = X_{K-1}, Y_{2(K-1)} = Y_{K-1}, F_{2(K-1)} = F_{K-1}, L_{2(K-1)} = L_{K-1}, K = 2(K-1)$, 转至 Step 3. 如果 M 的值不能再增大, 则表明该算法无解.

Step 6: 如果 $K < M$, 则转至 Step 3; 如果 $K = M$, 则 $X_K, Y_K, F_K, L_K, Q_K, \alpha, \beta$ 为式(6) 和(7) 的解.

Step 7: 由 $UV^{T} = I - X_K Y_K$ 进行奇异值分解, 求得 U 和 V, 进而通过式(8) 求得控制器(4) 的参数.

4　仿真示例

考虑由两个子系统构成的不确定性大系统(1), 其不确定性具有数值界. 其中

$$A_{11} = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 3 & 0 \end{bmatrix},\ B_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},\ B_{21} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix},\ C_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},\ D_{121} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$C_{21} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}^{T},\ D_{211} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}^{T},\ A_{22} = \begin{bmatrix} -2 & -3 \\ 2 & -1 \end{bmatrix},$$

$$B_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},\ B_{22} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},\ A_{21} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -2 & -1 \end{bmatrix},$$

$$C_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},\ D_{122} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},\ C_{22} = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}^{T},$$

$$D_{212} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}^{T},\ R_{11} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.05 \\ 0.15 & 0 \end{bmatrix},\ S_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix},$$

$$R_{12} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.05 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix},\ R_{22} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.15 \\ 0.1 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$R_{21} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0 \\ 0.1 & 0.05 \end{bmatrix},\ S_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix}.$$

利用本文方法, 在 $\gamma = 10, M = 8$ 的条件下, 求得的分散 H_∞ 输出反馈控制器为

$$A_{c1} = \begin{bmatrix} -5.858\,7 & -2.339\,4 \\ -114.580\,0 & -54.910\,0 \end{bmatrix},$$

$$B_{c1} = [-6.550\,4 \quad -15.465\,0]^{T},$$

$$C_{c1} = [17.372\,1 \quad 7.538\,0],$$

$$A_{c2} = \begin{bmatrix} -3.954\,6 & -0.606\,7 \\ 0.942\,9 & -10.295\,1 \end{bmatrix},$$

$$B_{c2} = [11.150\,9 \quad -16.120\,9]^{T},$$

$$C_{c2} = [0.570\,2 \quad 1.130\,6].$$

在该控制器的作用下, 当 ΔA_{ij} 和 ΔB_{2i} 在各自的摄动界内取不同值时, 其闭环系统的极点和对应的 H_∞ 性能指标如表 1 所示, 对应的最大奇异值曲线如图 1 所示. 仿真结果表明, 在不同的不确定性影响下, 闭环大系统的极点均位于左半平面, 闭环系统稳定, 且对应的最大奇异值(H_∞ 范数) 均小于预先指定的 $\gamma = 10$, 系统控制器的设计达到了要求.

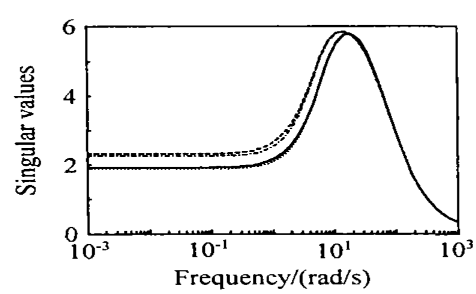

图 1　闭环系统最大奇异值曲线

表 1　闭环系统的计算结果及曲线对应关系

ΔA_{ij}	ΔB_{2i}	闭环特征值			H_∞ 性能指标	对应的最大奇异值曲线
R_{ij}	S_i	$-50.283\,4$	$-8.488\,8$	$-3.149\,4 \pm 3.424\,5i$	5.788 3	图 1 实线
		$-1.250\,7$	$-3.678\,5$	$-4.859\,0 \pm 1.794\,8i$		
R_{ij}	$-S_i$	$-52.316\,8$	$-8.650\,2$	$-2.866\,4 \pm 3.588\,9i$	5.834 0	图 1 虚线
		$-1.357\,9$	$-3.942\,9$	$-3.859\,0 \pm 1.844\,4i$		
$-R_{ij}$	S_i	$-50.274\,6$	$-8.632\,8$	$-3.520\,8 \pm 3.677\,4i$	5.787 8	图 1 点连线
		$-1.228\,7$	$-3.697\,5$	$-4.721\,6 \pm 1.737\,7i$		
$-R_{ij}$	$-S_i$	$-52.310\,4$	$-8.785\,2$	$-3.197\,5 \pm 3.784\,5i$	5.833 2	图 1 点划线
		$-1.333\,7$	$-3.854\,6$	$-3.819\,8 \pm 1.931\,9i$		

5　结　语

本文研究一类状态矩阵、控制矩阵和关联矩阵中存在数值界不确定性关联大系统的分散鲁棒 H_∞ 输出反馈控制器设计问题, 推导出控制器存在的矩阵不等式条件, 通过选取适当的同伦函数, 迭代求解该矩阵不等式. 所获得的控制器能使闭环不确定性大系统鲁棒稳定, 且具有给定的 H_∞ 性能指标. 仿真结果验证了本文方法的可行性.

参考文献(References)

[1] Jamshidi M. *Large Scale Systems: Modeling and Control* [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishing Co Inc, 1983.

[2] Shiau J K, Chow J H. Robust Decentralized State Feedback Control Design Using an Iterative Linear Matrix Inequality Algorithm [A]. *IFAC* 13*th*

Triennial World Congress [C]. San Francisco, 1996: 203-208.

[3] 谢永芳, 桂卫华, 吴敏. 基于线性矩阵不等式的分散 H_2/H_∞ 控制的次优设计[J]. *自动化学报*, 2000, 26(2): 263-266.

(Xie Y F, Gui W H, Wu M. The Suboptimal Design of Decentralized H_2/H_∞ Control Based on Linear Matrix Inequality [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(2): 263-266.)

[4] Ikeda M, Zhai G, Fujisaki Y. Decentralized H_∞ Controller Design for Large Scale Systems: A Matrix Inequality Approach Using Homotopy Method [J]. *Automatica*, 2001, 37(4): 565-573.

[5] 桂卫华, 陈宁, 吴敏. 不确定关联大系统鲁棒分散可靠 H_∞ 控制[J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(6): 923-926.

(Gui W H, Chen N, Wu M. Robust Decentralized Reliable Control for Uncertain Large-scale Systems [J]. *Control Theory and Applications*, 2002, 19(6): 923-926.)

[6] 甘永梅, 王兆安. 不确定性关联大系统的分散鲁棒状态反馈 H_∞ 控制[J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(2): 297-301.

(Gan Y M, Wang Z A. Decentralized State Feedback Robust H_∞ Control Design for Uncertain Interconnected Large-scale Systems [J]. *Control Theory and Applications*, 2002, 19(2): 297-301.)

[7] Scorletti C, Duc G. An LMI Approach to Decentralized H_∞ Control[J]. *Int J Control*, 2001, 74(3): 211-224.

[8] 程储旺. 不确定性时滞大系统的分散鲁棒 H_∞ 控制[J]. *自动化学报*, 2001, 27(3): 361-366.

(Cheng C W. Decentralized Robust H_∞ Control for Uncertain Delay Large-scale Systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(3): 361-366.)

[9] Cao Y Y, Sun Y X, Mao W J. Output Feedback Decentralized Stabilization: LMI Approach [J]. *Systems and Control Letters*, 1998, 35(3): 183-194.

[10] Boyd S P, Chaou L E, Feron E, et al. *Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory* [M]. Philadelphia: SIAM, 1994.

[11] Iwasaki T, Skelton R E. All Controllers for the General H_∞ Control Problem: LMI Existence Conditions and State Space Formulas [J]. *Automatica*, 1994, 30(8): 1307-1317.

(上接第 808 页)

5 结　　论

相对于以往检测相似重复记录的方法, 本文改进方法的优点主要体现在以下 3 个方面: 1) 该方法按决定属性值划分记录集, 再对各个属性值类进行记录聚类, 大大降低了时间开销; 2) 在决定属性值聚类时, 假定属性值的相似具有传递性, 并合并了字典逆排序的聚类结果, 显著提高了算法的检出率; 3) 对聚类结果进行调整, 减少了记录类数量, 提高了聚类质量.

参考文献(References)

[1] 邱越峰, 田增平, 季文赟, 等. 一种高效的检测相似重复记录的方法[J]. *计算机学报*, 2001, 24(1): 69-77.

(Qiu Y F, Tian Z P, Ji W Y, et al. An Efficient Approach for Detecting Approximately Duplicate Database Records[J]. *Chinese J of Computers*, 2001, 24(1): 69-77.)

[2] Monge A E, Elkan C P. An Efficient Domain-independent Algorithm for Detecting Approximately Duplicate Database Records [A]. *Proc of DMKD'97* [C]. Tucson Arizona, 1997: 23-29.

[3] Hernandez M A, Stolfo S G. The Merge/Purge Problem for Large Databases[A]. *Proc ACM SIGMOD Int Conf on Management of Data* [C]. California, 1995: 127-138.

[4] Lee M L, Lu H J, Ling T W, et al. Cleansing Data for Mining and Warehousing [A]. *10th Int Conf on Database and Expert Systems Applications* [C]. Florence, 1999: 751-760.

[5] Jin L, Li C, Mehrotra S. Efficient Record Linkage in Large Data Sets [A]. *Proc 8th Int Conf on Database Systems for Advanced Applications* [C]. Kyoto, 2003: 137-148.

[6] Gravano L, Ipeirotis P G, Jagadish H V, et al. Approximate String Joins in a Database (almost) for Free [A]. *Proc of the 27th VLDB Conf* [C]. Roma, 2001: 491-500.