文章编号: 1001-0920 (2012) 12-1876-05

不确定广义系统多约束指标的相容性

刘 胜, 王五桂

(哈尔滨工程大学 自动化学院，哈尔滨 150001)

摘 要: 针对一类线性不确定广义系统, 研究了容许性、H_∞ 指标和状态方差相容条件下的输出反馈控制器的设计问题. 首先建立了一个使闭环广义系统满足容许性和给定 H_∞ 指标的充要条件; 然后利用 quasi-Newton 方法, 将非线性矩阵不等式的可行解问题转化为求解最大特征值的最小问题, 在广义系统容许的条件下, 对具有指定 H_∞ 指标及相容状态方差约束的控制问题给出了满意控制设计方法, 同时给出了方差约束指标的取值范围; 最后, 仿真结果表明了所提出方法的有效性, 且更能保证系统的动态性能.

关键词: 广义系统；H_∞ 指标；方差约束；指标相容性

中图分类号: TP13 **文献标志码:** A

Consistency of multiple constraint indices for uncertain descriptor systems

LIU Sheng, *WANG Wu-gui*

(College of Automation，Harbin Engineering University，Harbin 150001，China. Correspondent：WANG Wu-gui, E-mail：wangwugui88888@yahoo.com.cn)

Abstract: The consistency of constraint indices of admissibility, H_∞ and state variance is investigated for a class of uncertain descriptor systems with the output feedback control. Firstly, a necessary and sufficient condition is presented for the closed-loop descriptor system with admissibility and H_∞ constraints are given. Then, by using quasi-Newton approach, the solvability of nonlinear matrix inequality is transformed into the minimization problem of maximum eigenvalue. Satisfactory control design methods are provided for the output feedback control with constraints of admissibility, H_∞ and consistency state-variance, and a range is presented for the state-variance which is consistent with the given H_∞. Finally, a numerical example illustrates that the proposed method is effective and can guarantee the dynamic performance of the system.

Key words: descriptor system；H_∞ index；dariance constraint；consistency of multiple indices

1 引 言

自 19 世纪 80 年代以来, 广义系统理论的研究吸引了国内外众多学者的关注, 许多正常系统的结论被推广到广义系统中[1-2]. 近年来, 广义系统的滤波[3]和 H_∞ 鲁棒镇定[4]成为了研究热点. 广义系统的脉冲模式和正则性是与正常系统最主要的区别, 许多学者对这两个问题进行了深入的研究. 文献 [5] 研究了基于动态补偿的一般广义系统的正则化、无脉冲、稳定性与极点配置问题. [6] 讨论了一类线性连续广义系统脉冲模可控性问题. [7] 对一类连续广义系统在输出反馈作用下的圆形区域极点配置问题进行了研究. 但这些文献都没有考虑多约束指标的相容性.

实际工程应用中, 通常要考虑所设计的控制器具有物理可实现性, 以使系统达到所期望的性能, 如广义系统的容许性表征系统的正则性、无脉冲和稳定性; H_∞ 指标表征系统对有界干扰的抑制能力; 稳态方差指标表征系统的稳态精度. 王远钢等[8]研究了一类线性随机状态反馈控制系统的极点配置指标、H_∞ 抑制指标和稳态状态方差上界指标的相容性. 程相权等[9]根据满意控制思想设计动态输出反馈控制器, 使连续线性随机系统满足给定的 H_∞ 指标、扇形区域极点指标和协方差上界指标要求, 以保证系统具有期望的性能. Yagoubi[10]研究了广义系统容许性、D 允许和 H_2 与 H_∞ 范数的扩展 LMI 特性. 上述文献都是采用 Matlab LMI 工具箱来求解线性矩阵不等式, 这种设计方法增大了对软件的依赖性.

收稿日期: 2011-06-17；**修回日期:** 2011-08-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60704004, 51079033)；中央高校基本科研业务费专项基金项目(HEUCF110403).

作者简介: 刘胜(1957−), 男, 教授, 博士生导师, 从事随机系统最优估计与控制、船舶航行与姿态控制等研究；王五桂(1985−), 男, 博士生, 从事智能控制系统理论的研究.

本文针对一类具有容许性、H_∞ 指标和状态方差上界 3 类约束指标的不确定广义系统, 研究在输出反馈控制下多约束指标的相容性. 在闭环系统满足容许性和给定 H_∞ 指标下, 给出了相容状态方差上界指标的取值范围及相容性约束指标下满意控制策略的设计方法. 针对非线性矩阵不等式可行解问题, 利用 quasi-Newton 方法, 将这类不等式的求解问题转化为求解最大特征值的最小问题.

2 问题描述

考虑如下一般线性时不变不确定广义系统:

$$\begin{cases} E\dot{x}(t) = (A+\Delta A)x(t) + \\ \qquad\qquad (B+\Delta B)u(t) + Dw(t), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \tag{1}$$

其中: $x(t) \in \boldsymbol{R}^n$ 为系统状态向量; $u(t) \in \boldsymbol{R}^q$ 为控制输入向量; $w(t) \in \boldsymbol{R}^k$ 为单位强度的零均值高斯白噪声过程, 且 $x(0)$ 与 $w(t)$ 不相关; $y(t) \in \boldsymbol{R}^p$ 为输出向量, 且可直接测量. 矩阵 $E \in \boldsymbol{R}^{n\times n}$ 为奇异阵, 且假定 $\mathrm{rank}E = r < n$. $A \in \boldsymbol{R}^{n\times n}, B \in \boldsymbol{R}^{n\times q}, C \in \boldsymbol{R}^{p\times n}, D \in \boldsymbol{R}^{n\times k}$ 为常量矩阵. ΔA 和 ΔB 为系统的参数不确定矩阵, 假定具有如下形式:

$$[\,\Delta A \ \ \Delta B\,] = MF(t)[\,N_1 \ \ N_2\,]. \tag{2}$$

其中: M, N_1, N_2 为具有相应维数的已知常值矩阵, 矩阵 $F(t)$ 的元素 Lebegue 可测且满足

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

定义 1[11] 对于系统 (1) 的自由系统 $E\dot{x}(t) = Ax(t)$: 1) 存在 $s \in C$, 使得 $\det(sE - A) \neq 0$, 则称 (E, A) 是正则的; 2) 如果 (E, A) 是正则的, 对所有的 $s \in C$ 均满足 $\deg(\det(sE - A)) = \mathrm{rank}(E)$, 则称 (E, A) 是无脉冲的; 3) 如果 (E, A) 的所有特征值都有负实部, 则称 (E, A) 是稳定的.

定义 2[11] 如果 (E, A) 是正则、无脉冲和稳定的, 则称 (E, A) 是容许的.

若采用定常输出反馈控制 $u(t) = Ky(t)$ 镇定系统 (1), 则相应的闭环广义系统为

$$\begin{cases} E\dot{x}(t) = (\bar{A}+\Delta\bar{A})x(t) + Dw(t), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \tag{4}$$

其中: $\bar{A} = A + BKC$, $\Delta\bar{A} = \Delta A + \Delta BKC$. 如果 $(E, \bar{A}+\Delta\bar{A})$ 是容许的, 则闭环系统的稳态状态协方差矩阵 X 定义为

$$X := \lim_{t\to\infty} X(t) = \lim_{t\to\infty} \mathrm{E}\left\{x(t)x^{\mathrm{T}}(t)\right\}, \tag{5}$$

满足如下 Lyapunov 方程

$$(\bar{A}+\Delta\bar{A})XE^{\mathrm{T}} + EX(\bar{A}+\Delta\bar{A})^{\mathrm{T}} + DD^{\mathrm{T}} = 0. \tag{6}$$

定义 3 对于广义系统 (1), 给定常数 γ 及方差上界指标 τ^2, 称 H_∞ 指标 γ 与方差上界指标 τ^2 相容, 若存在输出反馈控制器 K, 使闭环广义系统 (4) 同时满足: 1) $(E, \bar{A}+\Delta\bar{A})$ 是容许的; 2) 从外部干扰 $w(t)$ 到输出 $y(t)$ 的传递函数矩阵满足 $\|H(s)\|_\infty \leqslant \gamma$; 3) 闭环广义系统的状态协方差矩阵 X 满足 $\mathrm{diag}(X) \leqslant \tau^2$.

本文在闭环广义系统 $(E, \bar{A}+\Delta\bar{A})$ 是容许的基础上, 主要研究不确定广义系统 (1) 的 H_∞ 指标 γ 与方差上界指标 τ^2 的相容性, 并对上述相容指标的输出反馈问题给出满意控制的设计方法.

3 主要结论

引理 1[12] (E, A) 是容许的且 $\|H(s)\|_\infty \leqslant \gamma$ 成立的充要条件是存在 $Y \in \boldsymbol{R}^{n\times n}$, 使下式成立:

$$YE^{\mathrm{T}} = EY^{\mathrm{T}} \geqslant 0,$$

$$YA^{\mathrm{T}} + AY^{\mathrm{T}} + BB^{\mathrm{T}} + \gamma^{-2}YC^{\mathrm{T}}CY^{\mathrm{T}} < 0.$$

引理 2[13] 对于任意同维向量或者矩阵 X 和 Y, 有 $X^{\mathrm{T}}Y + Y^{\mathrm{T}}X \leqslant X^{\mathrm{T}}ZX + Y^{\mathrm{T}}Z^{-1}Y$, 对 $\forall Z > 0$ 成立.

定理 1 广义系统 (1) 存在输出反馈控制器 K 满足性能约束条件 1) 和 2) 的充要条件是存在实数 $\varepsilon>0$, $\gamma>0$ 及非奇异矩阵 $Q \in \boldsymbol{R}^{n\times n}$, 使下列不等式有解:

$$EQ^{\mathrm{T}} = QE^{\mathrm{T}} \geqslant 0, \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} Q\bar{A}^{\mathrm{T}} + \bar{A}Q^{\mathrm{T}} & * & * & * & * \\ D^{\mathrm{T}} & -I & * & * & * \\ \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon}}M^{\mathrm{T}} & 0 & -I & * & * \\ \sqrt{\varepsilon}(N_1 + N_2KC)Q^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & -I & * \\ \gamma^{-1}CQ^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \tag{8}$$

并且相应的稳态状态方差阵满足 $EXE^{\mathrm{T}} \leqslant QE^{\mathrm{T}}$, 其中“$*$”表示对称位置上的转置矩阵.

证明 充分性. 对于 $\varepsilon>0$, $\gamma>0$, 不等式 (7) 和 (8) 有可行解. 根据 Schur 补性质, 不等式 (8) 可转化为

$$Q\bar{A}^{\mathrm{T}} + \bar{A}Q^{\mathrm{T}} + DD^{\mathrm{T}} + \varepsilon^{-1}MM^{\mathrm{T}} + \gamma^{-2}QC^{\mathrm{T}}CQ^{\mathrm{T}} + \varepsilon Q(N_1 + N_2KC)^{\mathrm{T}}(N_1 + N_2KC)Q^{\mathrm{T}} < 0. \tag{9}$$

由引理 2 和式 (3), 有

$$\begin{aligned} & Q(\bar{A}+\Delta\bar{A})^{\mathrm{T}} + (\bar{A}+\Delta\bar{A})Q^{\mathrm{T}} + DD^{\mathrm{T}} + \gamma^{-2}QC^{\mathrm{T}}CQ^{\mathrm{T}} = \\ & Q\bar{A}^{\mathrm{T}} + \bar{A}Q^{\mathrm{T}} + DD^{\mathrm{T}} + \gamma^{-2}QC^{\mathrm{T}}CQ^{\mathrm{T}} + \\ & Q(MFN_1 + MFN_2KC)^{\mathrm{T}} + \\ & (MFN_1 + MFN_2KC)Q^{\mathrm{T}} \leqslant \\ & Q\bar{A}^{\mathrm{T}} + \bar{A}Q^{\mathrm{T}} + DD^{\mathrm{T}} + \\ & \gamma^{-2}QC^{\mathrm{T}}CQ^{\mathrm{T}} + \varepsilon^{-1}MFF^{\mathrm{T}}M^{\mathrm{T}} + \\ & \varepsilon Q(N_1 + N_2KC)^{\mathrm{T}}(N_1 + N_2KC)Q^{\mathrm{T}}. \end{aligned} \tag{10}$$

由引理 1 及式 (7) 和 (9) 得到广义系统 (1) 存在输出反馈控制器 K 满足性能约束 1) 和 2), 即充分性成立.

同理, 很容易证明必要性成立. 定义

$$EXE^{\mathrm{T}} = \lim_{t\to\infty} EX(t)E^{\mathrm{T}} = \lim_{t\to\infty} E[\{Ex(t)\}\{Ex(t)\}^{\mathrm{T}}], \tag{11}$$

满足

$$EXE^{\mathrm{T}} = EXE^{\mathrm{T}} \geqslant 0, \tag{12}$$

$$(\bar{A}+\Delta\bar{A})XE^{\mathrm{T}} + EX(\bar{A}+\Delta\bar{A})^{\mathrm{T}} + DD^{\mathrm{T}} = 0. \tag{13}$$

将式 (7) 减 (12), 式 (14) 减 (13), 有

$$E(Q-EX)^{\mathrm{T}} = (Q-EX)E^{\mathrm{T}}, \tag{14}$$

$$(\bar{A}+\Delta\bar{A})(Q-EX)^{\mathrm{T}} + (Q-EX)(\bar{A}+\Delta\bar{A})^{\mathrm{T}} < 0. \tag{15}$$

由于 $(E, \bar{A}+\Delta\bar{A})$ 是容许的, 可得 $EXE^{\mathrm{T}} \leqslant QE^{\mathrm{T}}$. □

定理 1 中不等式 (8) 是非线性的, 所以不能直接用 Matlab LMI 工具箱求解. 在处理类似问题时, 很多文献都是通过引入辅助矩阵将非线性不等式转化为线性矩阵不等式的等价问题, 然后再用 LMI 工具箱求解[3,8-10]. 本文利用 quasi-Newton 方法[14-15]直接对这类问题进行求解.

令 $U \in \boldsymbol{R}^{n\times j}$ 使 $EU = 0$ 且 $\mathrm{rank}(U) = j = n - r$, 取

$$Q = EZ + YU^{\mathrm{T}}. \tag{16}$$

其中: $Z \in \boldsymbol{R}^{n\times n}$, $Y \in \boldsymbol{R}^{n\times j}$, Z 是对称正定阵, 因此

$$EQ^{\mathrm{T}} = QE^{\mathrm{T}} = EZE^{\mathrm{T}} \geqslant 0. \tag{17}$$

式 (7) 和 (8) 的求解问题等价于

$$\lambda_{\max}(M(Z,Y,K,\varepsilon)) < 0. \tag{18}$$

其中

$$M(Z,Y,K,\varepsilon) = \left[\begin{array}{c} (EZ+YU^{\mathrm{T}})\bar{A}^{\mathrm{T}} + \bar{A}(EZ+YU^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}} \\ D^{\mathrm{T}} \\ \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon}}M^{\mathrm{T}} \\ \sqrt{\varepsilon}(N_1+N_2KC)(EZ+YU^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}} \\ \gamma^{-1}C(EZ+YU^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}} \\ 0 \end{array}\right. \rightarrow$$

$$\leftarrow \left.\begin{array}{ccccc} * & * & * & * & * \\ -I & * & * & * & * \\ 0 & -I & * & * & * \\ 0 & 0 & -I & * & * \\ 0 & 0 & 0 & -I & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -Z \end{array}\right].$$

$\min \lambda_{\max}(M(Z,Y,K,\varepsilon))$ 是求解问题的关键, 即只要找到最小问题的负值便能找到式 (7) 和 (8) 的可行解. 问题 (18) 可以转化成如下最小问题:

$$\min_{x}\ \{\lambda_{\max}(M(x))\}. \tag{19}$$

其中: $M(x) \in \boldsymbol{R}^{n_0\times n_0}$ 为关于 x 的实值对称矩阵, $x \in \boldsymbol{R}^{m_0}$ 为由矩阵 Z, Y, K 和 ε 产生的变量.

考虑到最小化问题 (19) 是不可微的, 首先需转化成可微的形式. 假设最优解 $\bar{x}$ 存在, 引入一个标量 λ, 考虑如下可微最小问题:

$$\min_{(\lambda,x)\in\boldsymbol{R}\times\boldsymbol{R}^{m_0}} \{\lambda + rJ(\lambda,x)\}. \tag{20}$$

其中: r 为惩罚函数的权重系数, 惩罚函数 $J(\lambda,x)$ 定义如下:

$$J(\lambda,x) = \begin{cases} [\det(\lambda I - M(x))]^{-1},\ \lambda I - M(x) > 0; \\ \infty,\ \text{otherwise}. \end{cases}$$

下面介绍几个关于 quasi-Newton 方法的引理.

引理 3 设 $f(\lambda,x,r) = \lambda + rJ(\lambda,x)$, 有

$$\frac{\partial f(\lambda,x,r)}{\partial\lambda} = 1 - r[\det(\lambda I - M(x))]^{-1}\mathrm{tr}[(\lambda I - M(x))^{-1}\cdot I],$$

$$\frac{\partial f(\lambda,x,r)}{\partial x_i} = r[\det(\lambda I - M(x))]^{-1}\mathrm{tr}\Big[(\lambda I - M(x))^{-1}\cdot\frac{\partial M(x))}{\partial x_i}\Big].$$

引理 4 考虑不等式 (18), 设 $Z = [z_{ij}]$, $Y = [y_{ij}]$, $K = [k_{ij}]$ 和 $\varepsilon = \varepsilon_i$, 对于所有的 i 和 j, 有

$$\frac{\partial M(Z,Y,K,\varepsilon)}{\partial z_{ij}} = M(Q_1,Y,K,\varepsilon) - M(0,Y,K,\varepsilon),$$

$$\frac{\partial M(Z,Y,K,\varepsilon)}{\partial y_{ij}} = M(Z,Q_2,K,\varepsilon) - M(Z,0,K,\varepsilon),$$

$$\frac{\partial M(Z,Y,K,\varepsilon)}{\partial k_{ij}} = M(Z,Y,Q_3,\varepsilon) - M(Z,Y,0,\varepsilon),$$

$$\frac{\partial M(Z,Y,K,\varepsilon)}{\partial\varepsilon_i} = M(Z,Y,K,Q_4) - M(Z,Y,K,0).$$

其中: $Q_1 \in \boldsymbol{R}^{n\times n}$ 为 (i,j) 和 (j,i) 位置元素为 1, 其余元素为零的矩阵; $Q_2 \in \boldsymbol{R}^{n\times j}$ 为 (i,j) 位置元素为 1, 其余元素为零的矩阵; $Q_3 \in \boldsymbol{R}^{q\times p}$ 为 (i,j) 位置元素为 1, 其余元素为零的矩阵; $Q_4 = 1$.

注 1 1) (Z,Y,K,ε) 的初值随机产生; 2) $M(Z,Y,K,0)$ 会引起矩阵出现无解现象, 可以用变量替代方法解决这类问题.

本文利用基于 BFGS 迭代算法的 quasi-Newton 方法求解不等式 (18) 的可行解问题. 文献 [16] 提出的 Levine-Athans 算法、[17] 提出的迭代算法和 [18] 提出的将非线性矩阵不等式转化为线性矩阵不等式算法都是针对矩阵不等式凸约束进行求解的, 对于非凸问题, 这些方法都不能直接应用; 而本文方法可以直接对非凸矩阵不等式进行求解, 找到最优解, 因此本文方法更具一般性. 文献 [11] 所用的 path-following 算法容易得到局部最优解, 因为该方法得到的结果与初始参数的选择有直接的联系; 而本文方法的初始参数都是随机产生, 所得到的结果即为全局最优解.

定理 2　对于给定的状态变量方差上界指标 τ^2 和 $\gamma>0$, 如果存在实数 $\varepsilon>0$ 和输出反馈控制器 K 满足式 (7), (8) 和下式:

$$\mathrm{diag}(EQ^{\mathrm{T}}) \leqslant \tau^2, \tag{21}$$

则闭环广义系统 (4) 同时满足系统性能约束条件 1) ~3).

证明　根据定理 1, 闭环广义系统 (4) 同时满足系统性能约束条件 1) 和 2). 系统的稳态方差矩阵满足 $EXE^{\mathrm{T}} \leqslant QE^{\mathrm{T}}$, 由于 $\mathrm{diag}(EQ^{\mathrm{T}}) \leqslant \tau^2$ 及 E 为奇异矩阵, 通过受限等价变换, 矩阵 E 有如下形式:

$$\bar{E} = \begin{bmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

$(\bar{A}+\Delta\bar{A})$, D 和 $x(t)$ 可以分解成如下形式:

$$(\bar{A}+\Delta\bar{A}) = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix},\ x(t) = \begin{bmatrix} x_r(t) \\ x_{n-r}(t) \end{bmatrix}.$$

$(E, \bar{A}+\Delta\bar{A})$ 是容许的, 显然 $x_{n-r}(t)$ 方差依赖于 $x_r(t)$ 方差, 因此只考虑 $x_r(t)$ 方差. 根据定义

$$EXE^{\mathrm{T}} = \lim_{t\to\infty} EX(t)E^{\mathrm{T}} =$$

$$\lim_{t\to\infty} \mathrm{E}[\{Ex(t)\}\{Ex(t)\}^{\mathrm{T}}] =$$

$$\lim_{t\to\infty} \mathrm{E}\Big(\Big\{\begin{bmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_r(t) \\ x_{n-r}(t) \end{bmatrix}\Big\}\times$$

$$\Big\{\begin{bmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_r(t) \\ x_{n-r}(t) \end{bmatrix}\Big\}^{\mathrm{T}}\Big) =$$

$$\lim_{t\to\infty} \mathrm{E}\Big(\begin{bmatrix} x_r(t)x_r(t)^{\mathrm{T}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\Big),$$

可得系统性能约束条件 3) 是满足的. □

注 2　对于存在脉冲模的广义系统, 本文方法同样适用.

4　数值算例

考虑不确定广义系统 (1), 具体参数如下:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},\ A = \begin{bmatrix} -4 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},\ C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},\ D = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.5 \\ 0.75 \end{bmatrix},\ M = \begin{bmatrix} 0.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0 & 0.75 \end{bmatrix},$$

$F = \sin t,\ N_1 = M,\ N_2 = B.$

设 H_∞ 指标 $\gamma = 0.5$, 闭环系统稳态方差指标 $\tau^2 = [\,1.5\ \ 1\ \ 1\,]^{\mathrm{T}}$, $U = [\,0\ \ 0\ \ 1\,]^{\mathrm{T}}$. 利用本文提出的方法计算得

$$\varepsilon = 3.053,$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0.5984 & -0.0185 & -0.3049 \\ -0.0185 & 0.4700 & -0.0225 \\ 0 & 0 & -0.0272 \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} -0.2855 & -0.3481 \\ -0.0559 & 0.2322 \end{bmatrix}.$$

容易验证, 所求得的输出反馈控制器满足本文提出的各项指标.

5　结　论

本文根据满意控制思想, 针对不确定广义系统建立了容许性、H_∞ 指标和状态方差的相容条件下输出反馈控制器的设计方法. 首先得到了一组由非线性矩阵不等式表示的使闭环系统满足容许性和 H_∞ 指标的充要条件, 基于 quasi-Newton 方法, 提出了一种有效解决非线性矩阵不等式可行解问题的方法. 然后, 给出了与容许性和给定 H_∞ 指标相容的状态方差上界指标的取值范围. 最后设计了同时具有上述 3 类相容指标的输出反馈控制器. 算例仿真验证了所提出控制器设计方法的有效性.

参考文献(References)

[1] Chu D L, Ho D W C. Necessary and sufficient conditions for the output feedback regularization of descriptor systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1999, 44(2): 405-412.

[2] 吴爱国, 段广仁. 广义线性系统综述[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(5): 682-690.
(Wu A G, Duan G R. Survey of descriptor linear systems[J]. J of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(5): 682-690.)

[3] Darouach D. H_∞ unbiased filtering for linear descriptor systems via LMI[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2009, 54(8): 1966-1972.

[4] Zhou L, Lu G. Robust stability of singularly perturbed descriptor systems with nonlinear perturbation[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2011, 54(8): 858-863.

[5] 张国山. 基于动态补偿的广义系统的正则化与极点配置[J]. 控制与决策, 2006, 21(1): 51-55.
(Zhang G S. Regularization and pole-placement of descriptor systems by dynamic compensation[J]. Control and Decision, 2006, 21(1): 51-55.)

[6] Hou M. Controllability and elimination of impulsive modes in descriptor systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(10): 1723-1729.

[7] 徐胜元, 徐慧玲, 杨成梧. 广义系统的圆形区域极点配置: 输出反馈情形[J]. 南京理工大学学报, 2000, 24(1): 49-51.
(Xu S Y, Xu H L, Yang C W. Pole assignment in a specified circular region for general systems:output feedback case[J].

J of Nanjing University of Science and Technology, 2000, 24(1): 49-51.)

[8] 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, 2003, 20(3): 423-426.
(Wang Y G, Guo Z. Consistency of multiple performance indices of feedback control systems[J]. Control Theory & Applications, 2003, 20(3): 423-426.)

[9] 程相权, 郭治, 王远钢. 满足 H_∞, 区域极点和方差指标约束的动态输出反馈控制研究[J]. 控制与决策, 2002, 17(3): 282-286.
(Cheng X Q, Guo Z, Wang Y G. On dynamic output control with constraints on H_∞, pole placement and covariance[J]. Control and Decision, 2002, 17(3): 282-286.)

[10] Yagoubi M. On multiobjective synthesis for parameter dependent descriptor systems[J]. IET Control Theory and Applications, 2010, 4(5): 818-826.

[11] Zhang G S, Liu L. Linear quadratic optimal control based on dynamic compensation for rectangular descriptor systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(12): 1752-1757.

[12] Masubuchi I, Kamitane Y, Ohara A, et al. H_∞ control for descriptor systems: A matrix inequalities approach[J]. Automatica, 1997, 33(4): 669-673.

[13] 付主木, 费树岷. 一类不确定切换奇异系统的动态输出反馈鲁棒 H_∞ 控制[J]. 自动化学报, 2008, 34(4): 482-487.
(Fu Z M, Fei S M. Robust H_∞ dynamic output feedback stabilization for a class of uncertain switched singular systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(4): 482-487.)

[14] Goh K C, Safonov M G, Papavassilopoulos G P. A global optimization approach for the BMI problem[C]. Proc of the 33rd Conf on Decision and Control. Lake Buena Vista: IEEE, 1994: 2009-2014.

[15] Collins E G, Selekwa M F. A fuzzy logic approach to LQG design with variance constraints[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2002, 10(1): 32-42.

[16] Levine W S, Athans M. On the determination of the optimal constant output feedback gains for linear multivariable systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1970, 15(1): 44-48.

[17] Ding F, Liu P X, Ding J. Iterative solutions of the generalized sylvester matrix equations by using the hierarchical identification principle[J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 197(1): 41-50.

[18] Lin C, Wang Q G, Lee T H. Robust normalization and stabilization of uncertain descriptor systems with norm-bounded perturbations[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(4): 515-520.

(上接第1875页)

[5] Wei X K, Huang G B, Li Y H. Mahalanobis ellipsoidal learning machine for one class classification[C]. Proc of the 6th Int Conf on Machine Learning and Cybernetics. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2007: 3528-3533.

[6] Vapnik V. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1995: 123-167.

[7] Mahesh Pal, Giles M Foody. Feature selection for classification of hyper spectral data by SVM[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(5): 2297-2307.

[8] Scholkopf B, Smola A, Bartlet P. New support vector algorithms[J]. Neural Computation, 2000, 12(5): 1207-1245.

[9] Tsang I W, Kwok J T, Cheung P M. Core vector machines: Fast SVM training on very large data sets[J]. J of Machine Learning Research, 2005, 6: 363-392.

[10] Suykens J A, Vandewalle J. Least squares support vector machines classifiers[J]. Neural Processing Letters, 1999, 19(3): 293-300.

[11] Mangasarian O, Musicant D. Lagrange support vector machines[J]. J of Machine Learning Research, 200l, 1: 161-177.

[12] Lee Y J, Mangasarian O. SSVM: A smooth support vector machines[J]. Computational Optimization and Applications, 2001, 20 (1): 5-22.

[13] Juszczak P. Learning to recognize: A study on one-class classification and active learning[D]. Delft: Delft University of Technology, 2006.

[14] Dolia A, Harris C, Shawe-Taylor J. Kernel ellipsoidal trimming[J]. Computational Statistics and Data Analysis, 2007, 52(1): 309-324.

[15] Alsaadi F E, Elmirghani J M H. High-speed spot diffusing mobile optical wireless system employing beam angle and power adaptation and imaging receivers[J]. J of Lightwave Technology, 2010, 28(16): 2191-2206.

[16] 邓乃扬, 田英杰. 支持向量机——理论、算法与拓展[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 34-38.
(Deng N Y, Tian Y J. Support vector machine — Theory, algorithm and extension[M]. Beijing: Chinese Science Press, 2009: 34-38.)

[17] Muller K R, Mika S, et al. An introduction to kernel-based learning algorithms[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2001, 12(1): 181-201.