文章编号：1000 - 8152(2004)05 - 0800 - 04

区间离散广义系统状态反馈鲁棒 H_∞ 控制

舒伟仁[1,2]，张庆灵[1]

（1.东北大学 理学院，辽宁 沈阳 110004；2.江南大学 理学院，江苏 无锡 214063）

摘要：讨论了一类区间离散广义系统的状态反馈鲁棒 H_∞ 控制问题.在给出区间离散广义系统的等价描述之后，基于系统参数矩阵不等式，得到了问题可解的充分条件，并给出了状态反馈控制器显式表示.所得的控制器保证闭环系统正则，具有因果关系，稳定并且满足给定的 H_∞ 性能指标.数值例子说明了该方法的正确性.

关键词：区间矩阵；离散广义系统；状态反馈；鲁棒 H_∞ 控制

中图分类号：TP13　　　**文献标识码**：A

State feedback robust H-infinity control for interval discrete-time singular systems

SHU Wei-ren[1,2], ZHANG Qing-ling[1]

(1.College of Science, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China;

(2.College of Science, Southern Yangtze University, Wuxi Jiangsu 214063, China)

Abstract: The problem of state feedback robust H_∞ control for a class of interval discrete-time singular systems is discussed. Firstly, a kind of equivalent description of the interval discrete-time singular systems was given. Then a sufficient condition for the solvability of the problem and the explicit expression of state feedback robust H-infinity controller were obtained in terms of matrix inequalities. The designed controller guaranteed that the closed-loop systems was regular, causal, stable and satisfying a prescribed H-infinity norm bounded constraint. Finally, an example was given to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: interval matrix; discrete-time singular systems; state feedback; robust H-infinity control

1 引言(Introduction)

近年来，关于离散广义系统的研究受到了人们的极大关注，并取得了较多的研究成果[1~5].在实际的控制系统中，由于模型误差、线性化和数据误差等因素均可引起系统矩阵的不确定性，所以参数不确定性是普遍存在的.其中一类不确定性可描述为系统参数矩阵的各个元素在一些确定的区间内变化，这就是所谓的区间系统.本文中讨论了一类区间离散广义系统的状态反馈鲁棒 H_∞ 控制问题.首先给出了区间系统的一种等价描述形式，其次基于系统参数矩阵不等式，得到了此类系统状态反馈鲁棒 H_∞ 控制问题可解的充分条件，并给出了状态反馈鲁棒 H_∞ 控制器的构造方法，最后用一个数值例子表明了该方法的有效性.

2 问题描述与预备知识(Problem formulation and preliminaries)

考虑如下形式的区间广义系统：

$$\begin{cases} Ex(t+1) = A^{I}x(t) + B_1\omega(t) + B^{I}u(t), \\ z(t) = C^{I}x(t). \end{cases} \tag{1}$$

其中，$x(t) \in \mathbb{R}^n$ 为系统的状态向量，$\omega(t) \in \mathbb{R}^l$ 且 $\omega(t) \in L_2[0,\infty)$ 为系统的外部输入向量，$u(t) \in \mathbb{R}^p$ 为系统的控制输入向量，$z(t) \in \mathbb{R}^q$ 为系统的控制输出向量，$E \in \mathbb{R}^{n\times n}$ 是常数矩阵，且 $\operatorname{rank}E = r < n$，$B_1$ 是具有适当维数的常数矩阵，A^{I}，B^{I} 和 C^{I} 都是区间矩阵，即

$$\begin{aligned} A^{I} &= [A^m, A^M] = \\ &\{A = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{n\times n} \mid a_{ij}^m \leqslant a_{ij} \leqslant a_{ij}^M, \\ &\quad i,j = 1,2,\cdots,n\}, \end{aligned} \tag{2}$$

$$B^{I} = [B^m, B^M] =$$

收稿日期：2003 - 06 - 20；收修改稿日期：2004 - 02 - 02.

基金项目：辽宁省普通高校学科带头人基金资助项目(124210)；辽宁省科技基金资助项目(2001401041).

$$\{B=(b_{ij})\in\Xi^{n\times p}\mid b_{ij}^m\leqslant b_{ij}\leqslant b_{ij}^M,\ i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,p\},\tag{3}$$

$$C^1=[C^m,C^M]=\{C=(c_{ij})\in\Xi^{q\times n}\mid c_{ij}^m\leqslant c_{ij}\leqslant c_{ij}^M,\ i=1,2,\cdots,q;j=1,2,\cdots,n\}.\tag{4}$$

这里, $A^m=(a_{ij}^m),A^M=(a_{ij}^M),B^m=(b_{ij}^m),B^M=(b_{ij}^M),C^m=(c_{ij}^m),C^M=(c_{ij}^M)$ 都是常数矩阵.

令

$$A_0=\frac{A^m+A^M}{2},H_A=(h_{ij})=\frac{A^M-A^m}{2},$$

$$B_0=\frac{B^m+B^M}{2},H_B=(t_{ij})=\frac{B^M-B^m}{2},$$

$$C_0=\frac{C^m+C^M}{2},H_C=(r_{ij})=\frac{C^M-C^m}{2},$$

$$D_1=[\sqrt{h_{11}}e_1,\cdots,\sqrt{h_{1n}}e_1,\cdots,\sqrt{h_{n1}}e_n,\cdots,\sqrt{h_{nn}}e_n]\in\Xi^{n\times n^2}$$

$$G_{11}=[\sqrt{h_{11}}e_1,\cdots,\sqrt{h_{1n}}e_n,\cdots,\sqrt{h_{n1}}e_1,\cdots,\sqrt{h_{nn}}e_n]^{\mathrm T}\in\Xi^{n^2\times n}$$

$$D_2=[\sqrt{t_{11}}e_1,\cdots,\sqrt{t_{1p}}e_1,\cdots,\sqrt{t_{n1}}e_n,\cdots,\sqrt{t_{np}}e_n]\in\Xi^{n\times np},$$

$$G_{12}=[\sqrt{t_{11}}\bar e_1,\cdots,\sqrt{t_{1p}}\bar e_p,\cdots,\sqrt{t_{n1}}\bar e_1,\cdots,\sqrt{t_{np}}\bar e_p]^{\mathrm T}\in\Xi^{np\times n}.$$

这里, $e_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为 n 阶单位矩阵的第 i 列, $\bar e_j(j=1,2,\cdots,p)$ 为 p 阶单位矩阵的第 j 列.

$$\bar F_1=\{F_1\mid F_1=\mathrm{diag}(\alpha_{11},\cdots,\alpha_{1n},\cdots,\alpha_{n1},\cdots,\alpha_{nn}),\ |\alpha_{ij}|\leqslant1,i,j=1,2,\cdots,n\},$$

$$\bar F_2=\{F_2\mid F_2=\mathrm{diag}(\beta_{11},\cdots,\beta_{1p},\cdots,\beta_{n1},\cdots,\beta_{np}),\ |\beta_{ij}|\leqslant1,i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,p\}.$$

显然有 $F_1^{\mathrm T}F_1\leqslant I_{n^2},F_2^{\mathrm T}F_2\leqslant I_{np},I_{n^2}$ 与 I_{np} 分别为 n^2 阶和 np 阶单位矩阵. 类似地可以构造矩阵 D_3,G_3 和 $\bar F_3$.

由文献[6,7]知,区间矩阵(2),(3)和(4)可分别等价地表示为下列形式:

$$A^1=[A^m,A^M]=\{A=A_0+D_1F_1G_{11}\mid F_1\in\bar F_1\},$$

$$B^1=[B^m,B^M]=\{B=B_0+D_2F_2G_{12}\mid F_2\in\bar F_2\},$$

$$C^1=[C^m,C^M]=\{C=C_0+D_3F_3G_3\mid F_3\in\bar F_3\}.$$

令

$$D=[D_1\quad D_2],$$

$$\bar F=\{F\mid F=\mathrm{diag}(F_1,F_2),F_1\in\bar F_1,F_2\in\bar F_2\},$$

$$G_1=\begin{bmatrix}G_{11}\\0\end{bmatrix},\ G_2=\begin{bmatrix}0\\G_{12}\end{bmatrix},$$

则有 $DFG_1=D_1F_1G_{11},DFG_2=D_2F_2G_{12}$.

于是系统(1)可以等价地表示为下列系统:

$$\begin{cases}Ex(t+1)=(A_0+DFG_1)x(t)+B_1\omega(t)+\\ \qquad(B_0+DFG_2)u(t),F\in\bar F,\\ z(t)=(C_0+D_3F_3G_3)x(t),F_3\in\bar F_3.\end{cases}\tag{5}$$

并称广义系统

$$\begin{cases}Ex(t+1)=A_0x(t)+B_1\omega(t),\\ z(t)=C_0x(t)\end{cases}\tag{6}$$

为相应的无控制标称广义系统.

假设状态向量 $x(t)$ 完全可测. 对系统(5)做如下状态反馈:

$$u(t)=Kx(t),\tag{7}$$

得闭环系统

$$\begin{cases}Ex(t+1)=\bar Ax(t)+B_1\omega(t),\ F\in\bar F,\\ z(t)=\bar Cx(t),F_3\in\bar F_3.\end{cases}\tag{8}$$

其中, $\bar A=A_0+B_0K+DF(G_1+G_2K),\bar C=C_0+D_3F_3G_3$.

本文研究目的是设计状态反馈控制器(7),使得闭环系统(8)对所有 $F\in\bar F,F_3\in\bar F_3$ 满足以下性能指标:

Ⅰ) 当 $\omega(t)=0$ 时,系统(8)的第一式是正则的、具有因果关系且是稳定的;

Ⅱ) $\|G(z)\|_\infty<\gamma$.

这里, $G(z)=\bar C(zE-\bar A)^{-1}B_1,\gamma>0$ 是给定的常数,且 $\|G(z)\|_\infty=\sup\limits_{\omega\in[0,2\pi]}\sigma_{\max}[G(e^{j\omega})]$,其中 $\sigma_{\max}$ 表示矩阵的最大奇异值.

下面给出一些引理,以备使用.

引理1[1]　离散广义系统(6)正则、具有因果关系且稳定(当 $\omega(t)=0$ 时),并且其传递函数矩阵 $G(z)=C_0(zE-A_0)^{-1}B_1$ 满足 $\|G(z)\|_\infty<\gamma$ 的充要条件是存在可逆对称矩阵 $P\in\Xi^{n\times n}$, 使得以下矩阵不等式同时成立:

$$E^{\mathrm T}PE\geqslant0,\tag{9}$$

$$\gamma^2I-B_1^{\mathrm T}PB_1>0,\tag{10}$$

$$A_0^{\mathrm T}PA_0-E^{\mathrm T}PE+C_0^{\mathrm T}C_0+A_0^{\mathrm T}PB_1(\gamma^2I-B_1^{\mathrm T}PB_1)^{-1}B_1^{\mathrm T}PA_0<0.\tag{11}$$

其中, $\gamma>0$ 是预先给定的常数.

引理2　给定适当维数的矩阵 A_0,D,G 以及对称矩阵 P,如果存在标量 $\varepsilon>0$, 使得

$$\varepsilon I-D^{\mathrm T}PD>0,\tag{12}$$

则对任意 $F\in\bar F$, 有

$$A_0^{\mathrm T}PDFG+(DFG)^{\mathrm T}PA_0+(DFG)^{\mathrm T}P(DFG)\leqslant A_0^{\mathrm T}PD(\varepsilon I-D^{\mathrm T}PD)^{-1}D^{\mathrm T}PA_0+\varepsilon G^{\mathrm T}G.\tag{13}$$

证　令 $Y=(\varepsilon I-D^{\mathrm T}PD)^{-\frac12}D^{\mathrm T}PA_0-(\varepsilon I-D^{\mathrm T}PD)^{\frac12}FG$, 则有 $Y^{\mathrm T}Y\geqslant0$, 于是

$A_0^{\mathrm{T}}PD(\varepsilon I - D^{\mathrm{T}}PD)^{-1}D^{\mathrm{T}}PA_0 - A_0^{\mathrm{T}}PDFG -$
$(DFG)^{\mathrm{T}}PA_0 + G^{\mathrm{T}}F^{\mathrm{T}}(\varepsilon I - D^{\mathrm{T}}PD)FG \geqslant 0.$

注意到 $F^{\mathrm{T}}F \leqslant I$. 可证得结论成立. 证毕.

3 主要结果(Main results)

定理 1 给定标量 $\gamma > 0$,对系统(5),如果存在状态反馈控制器(7)及可逆对称矩阵 $P \in \Xi^{n\times n}$, 使得不等式(9)和(10)及以下不等式

$$\bar{A}^{\mathrm{T}}P\bar{A}-E^{\mathrm{T}}PE + \bar{C}^{\mathrm{T}}\bar{C}+\bar{A}^{\mathrm{T}}PB_1(\gamma^2 I-B_1^{\mathrm{T}}PB_1)^{-1}B_1^{\mathrm{T}}P\bar{A} < 0 \tag{14}$$

对所有的 $F \in \bar{F}$、$F_3 \in \bar{F}_3$ 都成立,则闭环系统(8)满足性能指标Ⅰ),Ⅱ).

该定理可由引理 1 推得.

引理 3 若存在标量 $\delta > 0$, 使得

$$\delta I - D_3^{\mathrm{T}}D_3 > 0, \tag{15}$$

则对任意 $F_3 \in \bar{F}_3$, 有

$$\bar{C}^{\mathrm{T}}\bar{C} \leqslant C_0^{\mathrm{T}}(I - \delta^{-1}D_3D_3^{\mathrm{T}})^{-1}C_0 + \delta G_3^{\mathrm{T}}G_3. \tag{16}$$

证 由于 $\delta I - D_3^{\mathrm{T}}D_3 > 0$, 于是利用引理2和矩阵求逆引理,得

$$\begin{aligned}
&\bar{C}^{\mathrm{T}}\bar{C} = (C_0 + D_3F_3G_3)^{\mathrm{T}}(C_0 + D_3F_3G_3) = \\
&C_0^{\mathrm{T}}C_0 + C_0^{\mathrm{T}}D_3F_3G_3 + (D_3F_3G_3)^{\mathrm{T}}C_0 + \\
&(D_3F_3G_3)^{\mathrm{T}}(D_3F_3G_3) \leqslant \\
&C_0^{\mathrm{T}}C_0 + C_0^{\mathrm{T}}D_3(\delta I - D_3^{\mathrm{T}}D_3)^{-1}D_3^{\mathrm{T}}C_0 + \delta G_3^{\mathrm{T}}G_3 = \\
&C_0^{\mathrm{T}}[I + D_3(\delta I - D_3^{\mathrm{T}}D_3)^{-1}D_3^{\mathrm{T}}]C_0 + \delta G_3^{\mathrm{T}}G_3 = \\
&C_0^{\mathrm{T}}(I - \delta^{-1}D_3D_3^{\mathrm{T}})^{-1}C_0 + \delta G_3^{\mathrm{T}}G_3.
\end{aligned}$$

证毕.

引理 4 如果存在标量 $\varepsilon > 0$, 使得

$$\varepsilon I - D^{\mathrm{T}}QD > 0, \tag{17}$$

则对任意 $F \in \bar{F}$, 有

$$\begin{aligned}
&\bar{A}^{\mathrm{T}}P\bar{A} + \bar{A}^{\mathrm{T}}PB_1(\gamma^2 I - B_1^{\mathrm{T}}PB_1)^{-1}B_1^{\mathrm{T}}P\bar{A} \leqslant \\
&A_0^{\mathrm{T}}UA_0 + K^{\mathrm{T}}B_0^{\mathrm{T}}UA_0 + A_0^{\mathrm{T}}UB_0K + K^{\mathrm{T}}(B_0^{\mathrm{T}}UB_0 + \\
&\varepsilon G_2^{\mathrm{T}}G_2)K + \varepsilon G_1^{\mathrm{T}}G_1.
\end{aligned} \tag{18}$$

其中, $Q = (P^{-1} - \gamma^{-2}B_1B_1^{\mathrm{T}})^{-1}$, $U = (Q^{-1} - \varepsilon^{-1}DD^{\mathrm{T}})^{-1}$.

证 根据矩阵求逆引理,有 $P + PB_1(\gamma^2 I - B_1^{\mathrm{T}}PB_1)^{-1}B_1^{\mathrm{T}}P = (P^{-1} - \gamma^{-2}B_1B_1^{\mathrm{T}})^{-1} = Q$,

于是

$$\begin{aligned}
&\bar{A}^{\mathrm{T}}P\bar{A} + \bar{A}^{\mathrm{T}}PB_1(\gamma^2 I - B_1^{\mathrm{T}}PB_1)^{-1}B_1^{\mathrm{T}}P\bar{A} = \\
&\bar{A}^{\mathrm{T}}[P + PB_1(\gamma^2 I - B_1^{\mathrm{T}}PB_1)^{-1}B_1^{\mathrm{T}}P]\bar{A} = \\
&\bar{A}^{\mathrm{T}}Q\bar{A} = (A_0 + B_0K)^{\mathrm{T}}Q(A_0 + B_0K) + (G_1 + \\
&G_2K)^{\mathrm{T}}(DF)^{\mathrm{T}}Q(A_0+B_0K)+(A_0+B_0K)^{\mathrm{T}}Q(DF)(G_1+ \\
&G_2K) + (G_1 + G_2K)^{\mathrm{T}}(DF)^{\mathrm{T}}Q(DF)(G_1 + G_2K).
\end{aligned}$$

由于 $\varepsilon I - D^{\mathrm{T}}QD > 0$, 对最后一个等式右端的后三项利用引理 2,并再次利用矩阵求逆引理得

$$\begin{aligned}
&\bar{A}^{\mathrm{T}}Q\bar{A} \leqslant \\
&(A_0+B_0K)^{\mathrm{T}}Q(A_0+B_0K) + \varepsilon(G_1+G_2K)^{\mathrm{T}}(G_1+G_2K)+ \\
&(A_0 + B_0K)^{\mathrm{T}}QD(\varepsilon I - D^{\mathrm{T}}QD)^{-1}D^{\mathrm{T}}Q(A_0 + B_0K) = \\
&(A_0 + B_0K)^{\mathrm{T}}[Q + QD(\varepsilon I - D^{\mathrm{T}}QD)^{-1}D^{\mathrm{T}}Q](A_0 + \\
&B_0K) + \varepsilon(G_1 + G_2K)^{\mathrm{T}}(G_1 + G_2K) = \\
&(A_0 + B_0K)^{\mathrm{T}}(Q^{-1} - \varepsilon^{-1}DD^{\mathrm{T}})^{-1}(A_0 + B_0K) + \\
&\varepsilon(G_1 + G_2K)^{\mathrm{T}}(G_1 + G_2K) = \\
&(A_0+B_0K)^{\mathrm{T}}U(A_0+B_0K)+\varepsilon(G_1+G_2K)^{\mathrm{T}}(G_1+G_2K).
\end{aligned}$$

将上式展开后注意到 $G_1^{\mathrm{T}}G_2 = 0, G_2^{\mathrm{T}}G_1 = 0$ 即可证得结论. 证毕.

下面给出鲁棒 H_∞ 控制问题可解的充分条件及状态反馈控制器的构造方法.

定理 2 给定实数 $\gamma > 0$,如果存在可逆对称矩阵 P,使得不等式(9) 和(10) 成立,并且存在标量 $\varepsilon > 0, \delta > 0$,使得不等式(15) 和(17) 成立,又存在对称半正定矩阵 $V_1 \geqslant 0$, 使得以下不等式成立:

$$V = B_0^{\mathrm{T}}UB_0 + \varepsilon G_2^{\mathrm{T}}G_2 + V_1 > 0, \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
&A_0^{\mathrm{T}}UA_0+C_0^{\mathrm{T}}(I-\delta^{-1}D_3D_3^{\mathrm{T}})^{-1}C_0+\varepsilon G_1^{\mathrm{T}}G_1+\delta G_3^{\mathrm{T}}G_3 - \\
&E^{\mathrm{T}}PE - A_0^{\mathrm{T}}UB_0V^{-1}B_0^{\mathrm{T}}UA_0 < 0,
\end{aligned} \tag{20}$$

则系统(5)的鲁棒 H_∞ 控制问题有解,而且此时鲁棒 H_∞ 状态反馈控制器可取为

$$u(t) = -V^{-1}B_0^{\mathrm{T}}UA_0x(t). \tag{21}$$

其中, $U = (Q^{-1} - \varepsilon^{-1}DD^{\mathrm{T}})^{-1}$, $Q = (P^{-1} - \gamma^{-2}B_1B_1^{\mathrm{T}})^{-1}$.

证 对系统(5)做状态反馈控制器(21),即 $K = -V^{-1}B_0^{\mathrm{T}}UA_0$, 得闭环系统(8). 则有 $B_0^{\mathrm{T}}UA_0 + VK = 0$. 于是,利用引理 3 和引理 4 以及不等式(20)得

$$\begin{aligned}
&\bar{A}^{\mathrm{T}}P\bar{A}-E^{\mathrm{T}}PE + \bar{C}^{\mathrm{T}}\bar{C}+\bar{A}^{\mathrm{T}}PB_1(\gamma^2 I-B_1^{\mathrm{T}}PB_1)^{-1}B_1^{\mathrm{T}}P\bar{A} \leqslant \\
&A_0^{\mathrm{T}}UA_0-E^{\mathrm{T}}PE + C_0^{\mathrm{T}}(I-\delta^{-1}D_3D_3^{\mathrm{T}})^{-1}C_0+\varepsilon G_1^{\mathrm{T}}G_1 + \\
&\delta G_3^{\mathrm{T}}G_3+K^{\mathrm{T}}B_0^{\mathrm{T}}UA_0+A_0^{\mathrm{T}}UB_0K+K^{\mathrm{T}}(B_0^{\mathrm{T}}UB_0+\varepsilon G_2^{\mathrm{T}}G_2)K \leqslant \\
&A_0^{\mathrm{T}}UA_0-E^{\mathrm{T}}PE+C_0^{\mathrm{T}}(I-\delta^{-1}D_3D_3^{\mathrm{T}})^{-1}C_0+\varepsilon G_1^{\mathrm{T}}G_1+\delta G_3^{\mathrm{T}}G_3- \\
&A_0^{\mathrm{T}}UB_0V^{-1}B_0^{\mathrm{T}}UA_0+(B_0^{\mathrm{T}}UA_0+VK)^{\mathrm{T}}V^{-1}(B_0^{\mathrm{T}}UA_0+VK) = \\
&A_0^{\mathrm{T}}UA_0-E^{\mathrm{T}}PE + C_0^{\mathrm{T}}(I-\delta^{-1}D_3D_3^{\mathrm{T}})^{-1}C_0+\varepsilon G_1^{\mathrm{T}}G_1+\delta G_3^{\mathrm{T}}G_3- \\
&A_0^{\mathrm{T}}UB_0V^{-1}B_0^{\mathrm{T}}UA_0 < 0.
\end{aligned} \tag{22}$$

将不等式(9),(10)与(22)结合,利用定理 1 即可得证本定理的结论. 证毕.

4 数值例子(Numerical example)

考虑区间离散广义系统(1),其中

$$E = \begin{bmatrix} 2 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},\ A^I = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & [0.9, 1.1] \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},\ B^I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & [0.9, 1.1] \end{bmatrix},$$

$$C^I = [[-0.1, 0.1] \quad 1].$$

经计算得

$$A_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, C_0 = [0 \quad 1],$$

$$H_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, H_B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, H_C = [0.1 \quad 0].$$

取

$$P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & -2.5 \end{bmatrix}, \gamma = 1, \varepsilon = 2, \delta = 1.1,$$

$$V_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 2.8 \end{bmatrix}.$$

则定理 2 中所有不等式皆成立.因此,鲁棒 H_∞ 控制问题有解,鲁棒 H_∞ 状态反馈控制器为

$$u(t) = -\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -2 \end{bmatrix} x(t).$$

5 结论(Conclusion)

区间广义系统是一类重要的参数不确定广义系统.本文研究了一类区间离散广义系统的状态反馈鲁棒 H_∞ 控制问题.基于矩阵不等式给出了存在状态反馈鲁棒 H_∞ 控制器的充分条件,得到的鲁棒 H_∞ 控制器不仅使得闭环系统正则、因果、稳定,而且满足给定的 H_∞ 性能指标.

参考文献(References):

[1] XU S Y, YANG C W. H_∞ state feedback control for discrete singular systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(7): 1405 - 1409.

[2] 徐胜元,陈雪如,杨成梧.一类离散广义系统的 H_∞ 控制[J].控制理论与应用,2000,17(5):739 - 741.
(XU Shengyuan, CHEN Xueru, YANG Chengwu. H_∞ control for a class of discrete singular systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(5): 739 - 741.)

[3] HSIUNG K L, LEE L. Lyapunov inequality and bounded real lemma for discrete-time descriptor systems [J]. *IEE Proc Control Theory and Applications*, 1999, 146(4): 327 - 331.

[4] ZHANG L Q, LAM J, Zhang Q L. Lyapunov and Riccati equations of discrete-time descriptor systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(11): 2134 - 2139.

[5] FANG C, LEE L, CHANG F. Robust control analysis and design for discrete-time singular systems [J]. *Automatica*, 1994, 30(11): 1741 - 1750.

[6] 吴方向,史忠科,戴冠中.区间系统的 H_∞ 鲁棒控制[J].自动化学报,1999,25(5):705 - 708.
(WU Fangxiang, SHI Zhongke, DAI Guanzhong. H_∞ robust control for interval systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(5): 705 - 708.)

[7] 舒伟仁,张庆灵.区间广义系统的鲁棒 H_∞ 控制[J].东北大学学报(自然科学版),2002,23(11):1033 - 1036.
(SHU Weiren, ZHANG Qingling. Robust H_∞ control for interval singular systems [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2002, 23(11): 1033 - 1036.)

作者简介:

舒伟仁　(1962 —),男,江南大学副教授,1993 年于大连理工大学获硕士学位,现为东北大学博士研究生,目前主要从事广义系统的控制和时滞系统的研究,E-mail: wrshu278@sohu.com;

张庆灵　(1956 —),男,东北大学教授,博士生导师,目前主要从事广义系统,时滞系统和生物控制等研究.