第 23 卷第 6 期
2006 年 12 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 23 No. 6
Dec. 2006

文章编号: 1000−8152(2006)06−0918−05

线性多时滞不确定离散时间线性系统的时滞相关 H_∞ 控制

张先明[1,2], 吴 敏[1]

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 数学科学与计算技术学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 讨论了线性多时滞不确定离散时间线性系统的时滞相关H_∞控制问题. 首先, 建立了一个基于二次型项的有限和不等式. 然后, 利用这一不等式, 采用Lyapunov-Krasovskii泛函方法, 获得了系统不仅内部稳定而且具有给定的H_∞性能的时滞相关条件, 同时以LMI的形式给出了无记忆H_∞控制器的设计方法. 最后, 数值例子说明了本文方法的有效性.

关键词: 离散时间线性系统; 时滞相关; H_∞控制; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP13 **文献标识码**: A

Delay-dependent H-infinity control for linear discrete-time uncertain systems with multiple unknown delays

ZHANG Xian-ming[1,2], WU Min[1]

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;
2. School of Mathematical Science and Computing Technology, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: The delay-dependent H-infinity control of linear discrete-time uncertain systems with unknown delays is discussed via memoryless state feedback. Firstly, an inequality for finite sums of quadratic terms is established. Based on a linear matrix inequality (LMI), a new delay-dependent condition is then derived by employing Lyapunov-Krasovskii functional method, which can ensure that the resulting closed-loop system is asymptotically stable with a prescribed H-infinity performance. Moreover, the suitable H-infinity controller is designed in light of the feasibility of the obtained LMI. Finally, a numerical example is given to illustrate the effectiveness of the proposed approach.

Key words: discrete-time linear system; delay-dependent; H-infinity control; linear matrix inequality

1 引言(Introduction)

包含时滞及不确定性的动态系统的鲁棒稳定与稳定化问题的研究一直受到人们极大的关注[1~3]. 近几年来, 对于动态系统的H_∞控制问题, 包含时滞信息的基于LMI的各类时滞相关条件不断涌现[4~9], 但众多条件均是针对连续系统而言的, 针对离散系统的却较少. 主要原因之一是离散时间线性定常时滞系统可以转化为高维无时滞的离散时间线性系统, 参见文献[10,11], 这样就可以借助于离散时间线性系统的H_∞ 控制理论获得H_∞控制器. 但是当时滞未知或系统含有不确定性时, 这一方法不再有效. 文献[12] 引入Riccati方程方法讨论了具有未知时滞离散系统的稳定性, 文献[13,14] 将这一方法推广到具有未知时滞的离散系统讨论H_∞控制问题; 文献[15]在某一假设下将具有未知时滞离散系统的H_∞控制问题转化为无时滞离散系统的H_∞控制, 并获得了H_∞控制器. 然而, 它们都没有考虑受控输出也具有时滞的情况; 文献[16]虽然考虑了这一点, 但所得条件是时滞无关的, 对于小时滞系统, 具有较大的保守性.

本文提出了一种新方法, 讨论了线性多时滞不确定离散时间线性系统的时滞相关H_∞控制问题. 通过建立一个有限和不等式, 采用Lyapunov-Krasovskii泛函方法, 获得了在无记忆控制器作用下系统不仅仅内部稳定而且具有给定的H_∞性能的时滞相关的充分条件, 同时以LMI的形式给出了无记忆H_∞控制器的设计方法, 数值例子说明了本文方法的有效性.

收稿日期: 2004−08−27; 收修改稿日期: 2006−02−27.
基金项目: 国家博士点基金资助项目(20050533015); 国家杰出青年科学基金资助项目(60425310); 国家自然科学基金资助项目(60574014).

2　问题描述(Problem statement)

为简单起见, 本文讨论具有两个未知时滞的离散系统

$$\begin{cases} x(k+1)=Ax(k)+A_1x(k-h_1)+A_2x(k-\\ \qquad h_2)+B_1w(k)+B_2u(k),\\ z(k)=Cx(k)+C_1x(k-h_1)+C_2x(k-\\ \qquad h_2)+D_{11}w(k)+D_{12}u(k),\\ x(k)=0,\ k\leqslant 0. \end{cases} \tag{1}$$

式中: $x(k)\in\mathbb{R}^n$为系统状态, $u(k)\in\mathbb{R}^m$为控制输入, $w(k)\in\mathbb{R}^l$ 为扰动输入, 且$w(k)\in l_2$, $z(k)\in\mathbb{R}^p$为受控输出, $A, A_1, A_2, B_1, B_2, C, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}$ 为具有适当维数的常数实矩阵, 正整数h_1, h_2 为纯量未知时滞, 分别以d_1, d_2 为其上界.

本文讨论的问题是: 设计如下无记忆状态反馈

$$u(k)=Kx(k). \tag{2}$$

使得系统(1)在(2)的作用下不仅内部稳定而且具有给定的H_∞性能$\gamma>0$, 即满足

$$J=\sum_{k=0}^{\infty}z^{\mathrm{T}}(k)z(k)-\gamma^2w^{\mathrm{T}}(k)w(k)<0. \tag{3}$$

为此, 首先建立如下引理.

引理 1　设$y(k):=x(k+1)-x(k)$, 则对$\forall M_1$, $M_2, R\in\mathbb{R}^{n\times n}(R>0), \forall h\geqslant 0$, 以下不等式成立:

$$\begin{aligned} &-\sum_{i=k-h}^{k-1}y^{\mathrm{T}}(i)Ry(i)\leqslant\\ &\xi^{\mathrm{T}}(k)\begin{bmatrix} M_1^{\mathrm{T}}+M_1 & -M_1^{\mathrm{T}}+M_2\\ * & -M_2^{\mathrm{T}}-M_2 \end{bmatrix}\xi(k)+\\ &h\xi^{\mathrm{T}}(k)\begin{bmatrix} M_1^{\mathrm{T}}\\ M_2^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}R^{-1}\begin{bmatrix} M_1 & M_2 \end{bmatrix}\xi(k). \end{aligned} \tag{4}$$

其中$\xi(t)=\mathrm{col}\{x(k), x(k-h)\}$ (这里符号$*$表示对称矩阵的对称项, 下同).

证　记$Y:=[M_1\ \ M_2]$, $G:=\begin{bmatrix} R^{1/2} & R^{-1/2}Y\\ 0_{2n\times n} & 0_{2n\times 2n} \end{bmatrix}$, 则有$\begin{bmatrix} R & Y\\ Y^{\mathrm{T}} & Y^{\mathrm{T}}R^{-1}Y \end{bmatrix}=G^{\mathrm{T}}G\geqslant 0$, 于是

$$\sum_{i=k-h}^{k-1}\begin{bmatrix} y(i)\\ \xi(k) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix} R & Y\\ Y^{\mathrm{T}} & Y^{\mathrm{T}}R^{-1}Y \end{bmatrix}\begin{bmatrix} y(i)\\ \xi(k) \end{bmatrix}\geqslant 0. \tag{5}$$

整理式(5), 即得式(4).

不等式(4)称为基于二次型项的有限和不等式. 下面利用这一不等式首先建立系统(1)在(2)的作用下所得的闭环系统不仅内部稳定而且具有给定的H_∞性能的时滞相关条件, 然后讨论控制器的设计方法.

3　主要结果(Main results)

这一节, 陈述本文的主要结果. 系统(1)在控制器(2) 的作用下导致的闭环系统为

$$\begin{cases} x(k+1)=A_Kx(k)+A_1x(k-h_1)+\\ \qquad A_2x(k-h_2)+B_1w(k),\\ z(k)=C_Kx(k)+C_1x(k-h_1)+\\ \qquad C_2x(k-h_2)+D_{11}w(k),\\ x(k)=0,\ k\leqslant 0. \end{cases} \tag{6}$$

其中: $A_K:=A+B_2K, C_K=C+D_{12}K$. 利用引理1, 得到如下定理.

定理 1　给定$\gamma>0$. 若存在$P>0, R_1>0, R_2>0, Q_1>0, Q_2>0$, 以及$M_{1j}, M_{2j}\in\mathbb{R}^{n\times m}(j=1,2)$, 使得以下矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_1^{\mathrm{T}} & h_1\Gamma_1^{\mathrm{T}} & h_2\Gamma_1^{\mathrm{T}} & h_1\Gamma_2^{\mathrm{T}} & h_2\Gamma_3^{\mathrm{T}} & \Gamma_4^{\mathrm{T}}\\ * & -P^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ * & * & -h_1R_1^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0\\ * & * & * & -h_2R_2^{-1} & 0 & 0 & 0\\ * & * & * & * & -h_1R_1 & 0 & 0\\ * & * & * & * & * & -h_2R_2 & 0\\ * & * & * & * & * & * & -I \end{bmatrix}<0. \tag{7}$$

其中:

$$\Phi=\begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{13} & PB_1\\ * & \varphi_{22} & 0 & 0\\ * & * & \varphi_{33} & 0\\ * & * & * & -\gamma^2I \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} &\varphi_{11}=P(A_K-I)+(A_K^{\mathrm{T}}-I)P+\\ &\qquad\sum_{i=1}^{2}(Q_i+M_{1i}^{\mathrm{T}}+M_{1i}),\\ &\varphi_{12}=PA_1-M_{11}^{\mathrm{T}}+M_{21},\\ &\varphi_{13}=PA_2-M_{12}^{\mathrm{T}}+M_{22},\\ &\varphi_{22}=-Q_1-M_{21}^{\mathrm{T}}-M_{21},\\ &\varphi_{33}=-Q_2-M_{22}^{\mathrm{T}}-M_{22},\\ &\Gamma_1=[A_K-I\ \ A_1\ \ A_2\ \ B_1],\\ &\Gamma_2=[M_{11}\ \ M_{21}\ \ 0\ \ 0],\\ &\Gamma_3=[M_{12}\ \ 0\ \ M_{22}\ \ 0],\\ &\Gamma_4=[C_K\ \ C_1\ \ C_2\ \ D_{11}], \end{aligned}$$

则闭环系统(6)不仅内部稳定而且具有给定的H_∞性能γ.

证　取如下Lyapunov-Krasovskii泛函

$$V(k)=x^{\mathrm{T}}(k)Px(k)+V_1(k)+V_2(k).$$

其中:

$$V_j(k)=\sum_{\theta=-h_j+1}^{0}\sum_{i=k-1+\theta}^{k-1}y^{\mathrm T}(i)R_jy(i)+\sum_{i=k-h_j}^{k-1}x^{\mathrm T}(i)Q_jx(i),$$

$$y(k)=x(k+1)-x(k).$$

$j=1,2$. 对$V(k)$沿系统(6)取差分, 得到

$$\Delta V(k)=V(k+1)-V(k)=2x^{\mathrm T}(k)Py(k)+y^{\mathrm T}(k)(P+h_1R_1+h_2R_2)y(k)+\sum_{j=1}^{2}\left[x^{\mathrm T}(k)Q_jx(k)-x^{\mathrm T}(k-h_j)Q_jx(k-h_j)\right]-\sum_{i=k-h_1}^{k-1}y^{\mathrm T}(i)R_1y(i)-\sum_{i=k-h_2}^{k-1}y^{\mathrm T}(i)R_2y(i). \tag{8}$$

定义向量

$$\zeta(k)=\mathrm{col}\{x(k),x(k-h_1),x(k-h_2),w(k)\}.$$

由式(6), 有

$$y(k)=\Gamma_1\zeta(k). \tag{9}$$

又由引理1, 对$\forall\ M_{1j},M_{2j}\in\mathbb{R}^{n\times n}(j=1,2)$有

$$-\sum_{i=k-h_j}^{k-1}y^{\mathrm T}(i)R_jy(i)\leqslant \begin{bmatrix}x(k)\\x(k-h_j)\end{bmatrix}^{\mathrm T}\begin{bmatrix}M_{1j}^{\mathrm T}+M_{1j} & -M_{1j}^{\mathrm T}+M_{2j}\\ * & -M_{2j}^{\mathrm T}-M_{2j}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x(k)\\x(k-h_j)\end{bmatrix}+h_j\begin{bmatrix}x(k)\\x(k-h_j)\end{bmatrix}^{\mathrm T}\begin{bmatrix}M_{1j}^{\mathrm T}\\M_{2j}^{\mathrm T}\end{bmatrix}R_j^{-1}\begin{bmatrix}M_{1j} & M_{2j}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x(k)\\x(k-h_j)\end{bmatrix}. \tag{10}$$

将式(9)(10)代入式(8), 经整理后得到

$$\Delta V(k)-\gamma^2w^{\mathrm T}(k)w(k)\leqslant \zeta^{\mathrm T}(k)\{\varPhi+\varGamma_1^{\mathrm T}P\varGamma_1+\varGamma_1^{\mathrm T}(h_1R_1+h_2R_2)\varGamma_1+h_1\varGamma_2^{\mathrm T}R_1^{-1}\varGamma_2+h_2\varGamma_3^{\mathrm T}R_2^{-1}\varGamma_3\}\zeta(k). \tag{11}$$

其中$\varPhi,\varGamma_1,\varGamma_2,\varGamma_3$定义于式(7). 以下从两个方面证明结论.

首先, 证明闭环系统(6)内部稳定. 此时设$w(k)=0,\forall k\geqslant 0$. 如果矩阵不等式(7)成立, 则下面的矩阵不等式也成立:

$$\begin{bmatrix}\tilde\varPhi & \tilde\varGamma_1^{\mathrm T} & h_1\tilde\varGamma_1^{\mathrm T} & h_2\tilde\varGamma_1^{\mathrm T} & h_1\tilde\varGamma_2^{\mathrm T} & h_2\tilde\varGamma_3^{\mathrm T}\\ * & -P^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0\\ * & * & -h_1R_1^{-1} & 0 & 0 & 0\\ * & * & * & -h_2R_2^{-1} & 0 & 0\\ * & * & * & * & -h_1R_1 & 0\\ * & * & * & * & * & -h_2R_2\end{bmatrix}<0. \tag{12}$$

其中：

$$\tilde\varPhi=\begin{bmatrix}\varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{13}\\ * & \varphi_{22} & 0\\ * & * & \varphi_{33}\end{bmatrix},$$

$$\tilde\varGamma_1=[A_K-I\quad A_1\quad A_2],$$

$$\tilde\varGamma_2=[M_{11}\quad M_{21}\quad 0],$$

$$\tilde\varGamma_3=[M_{12}\quad 0\quad M_{22}],$$

对式(12)应用Schur补[17]并由式(11)得到$\Delta V(k)<0$, 于是由Lyapunov-Krasovskii稳定性定理知闭环系统(6)渐近稳定.

其次, 证明闭环系统(7)在零初始条件下对任意$w(k)\in l_2(w(k)\neq 0)$ 满足$J<0$. 此时, 有

$$J\leqslant\sum_{k=0}^{\infty}[z^{\mathrm T}(k)z(k)-\gamma^2w^{\mathrm T}(k)w(k)+\Delta V(k)]. \tag{13}$$

将式(11)代入式(13), 得到

$$J\leqslant\sum_{k=1}^{\infty}\zeta^{\mathrm T}(k)\{\varPhi+\varGamma_1^{\mathrm T}(P+h_1R_1+h_2R_2)\varGamma_1+h_1\varGamma_2^{\mathrm T}R_1^{-1}\varGamma_2+h_2\varGamma_3^{\mathrm T}R_2^{-1}\varGamma_3+\varGamma_4^{\mathrm T}\varGamma_4\}\zeta(k).$$

其中$\varGamma_4$定义于式(7). 如果矩阵不等式(7)成立, 则由Schur补, 就有$J<0$, 这就完成了定理的证明.

定理1给出了系统(1)经无记忆控制器(2)作用下的闭环系统不仅内部稳定而且具有给定的H_∞ 性能的时滞相关条件. 从定理的证明可以看出, 引理1建立的有限和不等式(4)对于时滞相关条件的获得起了很重要的作用, 与通常方法相比较, 它不仅使模型变换成为多余, 而且也不需对交叉项进行界定.

容易看出, 定理1得到的矩阵不等式是非线性的, 因此不能直接解出H_∞控制器, 下面的过程给出了一种求解H_∞控制器的线性化方法.

定理 2 给定$\gamma>0,\lambda_j,\mu_j\in\mathbb{R}\ (j=1,2)$. 如果存在$\bar P>0,\bar R_1>0,\bar R_2>0,\bar Q_1>0,\bar Q_2>0$, 以及具有适当维数的实矩阵$Y$, 使得以下LMI成立:

$$\begin{bmatrix}\varXi & N\\ * & \varLambda\end{bmatrix}<0. \tag{14}$$

其中：

$$\varXi=\begin{bmatrix}\varXi_{11} & \varXi_{12} & \varXi_{13} & B_1\\ * & \varXi_{22} & 0 & 0\\ * & * & \varXi_{33} & 0\\ * & * & * & -\gamma^2I\end{bmatrix},$$

$$\varXi_{11}=(A-I)\bar P+\bar P(A^{\mathrm T}-I)+B_2Y+Y^{\mathrm T}B_2^{\mathrm T}-\sum_{j=1}^{2}[\lambda_j\mu_j^{-1}(A_j\bar Q_j+\bar Q_jA_j^{\mathrm T})+\lambda_j^2\mu_j^{-2}\bar Q_j],$$

$$\varXi_{12}=\bar P+\mu_1^{-1}A_1\bar Q_1+\lambda_1\mu_1^{-1}\bar Q_1+\lambda_1\mu_1^{-2}\bar Q_1,$$

$\Xi_{22} = -2\mu_1^{-1}\bar{Q}_1 - \mu_1^{-2}\bar{Q}_1,$
$\Xi_{13} = \bar{P} + \mu_2^{-1}A_2\bar{Q}_2 + \lambda_2\mu_2^{-1}\bar{Q}_2 + \lambda_2\mu_2^{-2}\bar{Q}_2,$
$\Xi_{33} = -2\mu_2^{-1}\bar{Q}_2 - \mu_2^{-2}\bar{Q}_2,$
$N = [N_1^{\mathrm{T}}\ \ h_1N_1^{\mathrm{T}}\ \ h_2N_1^{\mathrm{T}}\ \ N_2^{\mathrm{T}}\ \ N_3^{\mathrm{T}}\ \ N_4^{\mathrm{T}}\ \ N_5^{\mathrm{T}}\ \ N_5^{\mathrm{T}}],$
$N_1 = [\alpha_1\ \ \mu_1^{-1}\ \ A_1\bar{Q}_1\ \ \mu_2^{-1}\ \ A_2\bar{Q}_2\ \ B_1],$
$N_2 = [0\ \ h_1\bar{R}_1\ \ 0\ \ 0],$
$N_3 = [0\ \ 0\ \ h_2\bar{R}_2\ \ 0],$
$N_4 = [\alpha_2\ \ \mu_1^{-1}C_1\bar{Q}_1\ \ \mu_2^{-1}C_2\bar{Q}_2\ \ D_{11}],$
$N_5 = [\bar{P}\ \ 0\ \ 0\ \ 0],$
$\alpha_1 = (A-I)\bar{P}+B_2Y-\lambda_1\mu_1^{-1}A_1\bar{Q}_1-\lambda_2\mu_2^{-1}A_2\bar{Q}_2,$
$\alpha_2 = C\bar{P} + D_{12}Y - \lambda_1\mu_1^{-1}C_1\bar{Q}_1 - \lambda_2\mu_2^{-1}C_2\bar{Q}_2,$
$\Lambda = \mathrm{diag}(-\bar{p}, -h_1\bar{R}_1, -h_2\bar{R}_2, -h_1\bar{R}_1,$
$\quad - h_2\bar{R}_2, -I, -\bar{Q}_1, -\bar{R}_2).$

则系统(1)在控制器(2)作用下不仅内部稳定而且具有给定的H_∞性能γ, 并且控制器增益$K = Y\bar{P}^{-1}$.

证 对于矩阵不等式(7), 定义

$$W = \begin{bmatrix} P & 0 & 0 \\ M_{11} & M_{21} & 0 \\ M_{12} & 0 & M_{22} \end{bmatrix}.$$

令 $M_{1j} = \lambda_j P,\ M_{2j} = \mu_j Q, \lambda_j,\ \mu_j \in \mathbb{R},\ \mu_j \neq 0,\ j = 1, 2$,则$W$ 可逆, 且

$$W^{-1} = \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 & 0 \\ -\lambda_1\mu_1^{-1}Q_1^{-1} & \mu_1^{-1}Q_1^{-1} & 0 \\ \lambda_2\mu_2^{-1}Q_2^{-1} & 0 & \mu_2^{-1}Q_2^{-1} \end{bmatrix}.$$

定义矩阵

$$H = \mathrm{diag}(W, I, I, I, I, R_1^{-1}, R_2^{-1}, I).$$

对式(7)左边的矩阵进行合同变换, 左乘H^{T}右乘H, 同时记$\bar{P} = P^{-1}, \bar{Q}_j = Q_j^{-1}, \bar{R}_j = R_j^{-1} (j = 1, 2)$以及$Y = KP^{-1}$, 经计算、整理, 并利用Schur 补即得LMI(14).

定理2以LMI形式给出了H_∞控制器的设计方法, 其有效性在于4个参数的调节. 借助于MATLAB优化工具箱, 如优化算法: fminsearch 可以找到这些参数的局部最优组合.

4 数值例子(Numerical examples)

例 1 为简单起见, 考虑如下具有单个时滞的线性离散系统

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + A_1x(k-h) + B_1w(k) + B_2u(k), \\ z(k) = Cx(k) + 0.1u(k). \end{cases} \tag{15}$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1.01 \end{bmatrix},\ A_1 = \begin{bmatrix} -0.02 & -0.005 \\ 0 & -0.01 \end{bmatrix},$$

$$C = [1\ \ 0],\ B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},\ B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.01 \end{bmatrix}.$$

因$D_{12} = 0.1 \neq 0$, 故文献[14]的结论对该例无效. 利用文献[13,15]的方法, 对任意正整数$h \geqslant 1$, 文献[13,15]给出的条件均无解. 因此, 文献[13,15]对该例无能为力. 但是, 利用本文方法,取$\lambda_1 = -1, \mu_1 = 100$, 对于不同的时滞获得的$H_\infty$性能列于表1. 图1绘出了当$h = 10$ 时系统(1)在所得到的无记忆控制器作用下导致的闭环系统的奇异值曲线, 从该曲线可得出该闭环系统获得的最小H_∞性能实际值为$\gamma_{\min} = 18.6709$, 这一结果表明了本文方法的有效性. 图中: F为频率, SV为奇异值.

表 1 对于不同的h系统(15)获得的H_∞ 性能及相应的H_∞控制器增益K

Table 1 Obtained H-infinity performances $\gamma_{\min}$ and controller gains K for different delays h

h	$\gamma_{\min}$	K
2	10.4598	[83.3662 –34.4324]
4	11.4308	[23.0448 –12.2888]
6	13.1352	[8.0264 –6.4352]
8	15.6811	[2.5102 –4.1830]
10	19.7068	[–0.1600 –2.9232]

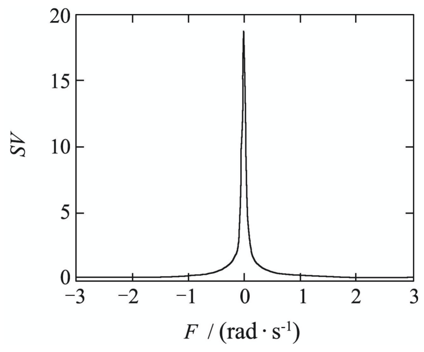

图 1 当$h = 10$时, 系统(15)在所得到的无记忆控制器作用下导致的闭环系统的奇异值曲线

Fig. 1 Singular value curve of system (15) via the obtained memoryless controller when $h = 10$

5 结论(Conclusion)

本文通过建立一个基于二次型项的有限和不等式, 利用Lyapunov-Krasovskii泛函方法讨论了多时滞离散时间线性系统的时滞相关H_∞控制问题, 获得了在无记忆控制器作用下系统不仅内部稳定而且具有给定的H_∞性能的时滞相关条件, 同时以LMI的形式给出了H_∞控制器的设计方法, 数值例子表明了本文方法的有效性.

参考文献(References):

[1] BRAVTON R K. Small signal stability criterion for electrical networks containing lossless transmission lines[J]. *IBM J of Research and Development*, 1968, 12: 431 – 440

[2] HALANAY A, RASVAN V. Stability radii for some propagation models[J]. *IMA J of Mathematical Control and Information*, 1997, 14: 95 – 107.

[3] HALE J K, VERDUYN LUNEL S M. *Introduction of Functional Differential Equations*[M]. New York: Springer, 1993.

[4] FRIDMAN E, SHAKED U. An improvement stabilization method for linear time-delay systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(11): 1931 – 1937.

[5] LEE Y S, MOON Y S, KWON W H, et al. Delay-dependent robust H-infinite control for uncertain systems with a state-delay[J]. *Automatica*, 2004, 40(1): 65 – 72.

[6] HAN Q L. Robust stability of uncertain delay-differential systems of neutral type[J]. *Automatica*, 2002, 38(4): 719 – 723.

[7] HE Y, WU M, SHE J H, et al. Parameter dependent Lyapunov-Krasovskii functional for stability of time-delay systems with polypic-type uncertainties[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004, 49(5): 828 – 832.

[8] GAO H J, WANG C H. Comments and further results on "A descriptor system approach to H-infinite control of linear time-delay systems"[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(3): 520 – 525.

[9] GU K, KHARITONOV V L, CHEN J. *Stability of Time-Delay Systems*[M]. Boston: Birkhauser , 2003.

[10] ASTROM K J, WITTERNMARK B. *Computer-Controlled System: Theory and Applications*[M]. New York: Prentice-Hall, 1984.

[11] SONG S H, KIM J K, YIM C H, et al. H-infinity control of discrete-time linear systems with time-varying delays in state[J]. *Automatica*, 1999, 35(9): 1587 – 1591.

[12] VERRIEST E, IVANOV A F. Robust stability for delay-difference equations[C]// *Proc of the 34th IEEE Conf on Decision and Control*. New Orleans, LA: [s.n.], 1995: 386 – 391.

[13] KAPILA V, HADDAD W. Memoryless H-infinite controllers for discrete-time systems with time-delay[J]. *Automatica*, 1998, 34(9): 1141 – 1144.

[14] MAHMOUD M S. Robust H-infinity control of discrete systems with uncertain parameters and unknown delays[J]. *Automatica*, 2000, 36(4): 627 – 635.

[15] SONG S H, KIM J K. H-infinity control of discrete-time linear systems with norm-bounded uncertainties and time-varying delay in state[J]. *Automatica*, 1999, 35(9): 1587 – 1591.

[16] KIM K T, CHO S H, KIM J K, et al. H-infinite controller design for discrete-time linear systems with time-varying delays in state[C]// *Proc of the 40th IEEE Conf on Decision and Control*. Orlando, Florida: [s.n.], 2001: 1446 – 1447

[17] BOYD S, GHAOUI L, FERON E, et al. *Linear Matrix Inequality in Systems and Control Theory*[M]. Philadelphia: SIAM, 1994.

作者简介:

张先明 (1968—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为时滞系统鲁棒控制及其应用, E-mail: zhangxmy@yahoo.com.cn;

吴 敏 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为鲁棒控制、智能控制和过程控制及其应用, E-mail: min@mail.csu.edu.cn.