文章编号: 1000-8152(2005)01-0144-05

时滞LPV系统的H_∞控制新方法

王俊玲, 王常虹, 高会军
(哈尔滨工业大学 空间控制与惯性技术研究中心,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 研究了具有随参数变化状态时滞的线性参数变化系统的H_∞控制问题,该系统的状态空间矩阵和时滞是实时可测且在闭集内变化的参数的确定函数.提出了一种新的依赖于参数的H_∞性能准则,该准则通过引入附加矩阵解除了系统矩阵与依赖于参数的Lyapunov函数之间的耦合而更易于数值实现.在此基础上设计了系统的H_∞状态反馈控制器,该控制器能够保证相对于所有能量有界的输入信号闭环系统满足给定的性能指标.采用线性矩阵不等式技术,将控制器存在的充分条件转化为凸优化问题.最后用数值仿真验证了所提出算法的可行性.

关键词: 线性参数变化系统; H_∞性能; 线性矩阵不等式; 状态时滞

中图分类号: TP13　　**文献标识码:** A

Advanced H-infinity control approach for time-delayed LPV systems

WANG Jun-ling, WANG Chang-hong, GAO Hui-jun
(Space Control and Inertial Technology Research Centre, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: The problem of H-infinity control for linear parameter-varying (LPV) systems with a parameter-varying state delay is investigated. The state-space matrices and the time delay of the systems are assumed to be dependent on parameters that are measurable in real-time and vary in a compact set. A new parameter-dependent H-infinity performance criterion is achieved by the introduction of a slack variable that eliminates the coupling between Lyapunov functions and system matrices, which enables us to obtain a more easily tractable condition. Under the new condition, the H-infinity state feedback controllers are designed to guarantee the desired performance for the closed-loop system with respect to all energy-bounded input signals. Sufficient conditions for the existence of such controllers are established in terms of linear matrix inequalities, upon which the design of admissible controllers is cast into a convex optimization problem. Numerical example is provided to demonstrate the feasibility of the proposed condition and controllers design procedure.

Key words: linear parameter-varying system; H-infinity performance; linear matrix inequality; state delay

1 引言(Introduction)

线性参数变化系统(Linear Parameter-Varying Systems)是一类重要的时变系统,其状态空间模型矩阵是某些时变参数的确定函数,而这些时变参数是可以实时测量的,许多实际系统都可用上述模型进行描述.近年来,针对上述系统的研究已有大量的成果报道[1~7].

由于时滞大量存在于实际的物理系统中并常常造成系统不稳定或使系统性能变差,对时滞LPV系统的研究具有较大的理论和现实意义.目前对时滞LPV系统的研究才刚刚起步,其中文献[4,5]主要研究的是时滞LPV系统的H_∞控制,文献[6]分析了时滞无关及时滞相关LPV系统的稳定性问题.本文在文献[4,6]的基础上,进一步探索了一类具有随参数变化状态时滞的线性参数变化系统的H_∞控制问题.

受文献[7~9]的启发,本文首先针对时滞LPV系统提出了一个新的依赖于参数H_∞性能准则.该准则通过引入一个附加矩阵变量而呈现出Lyapunov矩阵与系统矩阵之间的分离特性,从而得到比文献[4]更易于实现的H_∞性能准则.在此基础上采用线性矩阵不等式技术设计了相应的H_∞状态反馈控制器,将控制器存在的充分条件转化为线性矩阵不等式的求解问题,并利用近似基函数和网格技术[2,4]将无限维的线性矩阵不等式组的求解问题近似为有限维线性矩阵不等式组的求解问题. 文章所得的结

收稿日期:2003-04-17; 收修改稿日期:2004-02-26.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(69874008).

果可以推广到具有多重状态时滞和输入时滞的 LPV 系统. 数值仿真验证了所提出方法的可行性.

2 问题描述(Problem fomulation)

考虑如下时滞 LPV 系统:

$$
\begin{aligned}
\dot{\boldsymbol{x}}(t) &= A(\boldsymbol{\rho}(t))\boldsymbol{x}(t) + A_h(\boldsymbol{\rho}(t))\boldsymbol{x}(t-h(\boldsymbol{\rho}(t))) + \\
&\quad B_1(\boldsymbol{\rho}(t))\boldsymbol{\omega}(t) + B_2(\boldsymbol{\rho}(t))\boldsymbol{u}(t),\\
\boldsymbol{z}(t) &= C(\boldsymbol{\rho}(t))\boldsymbol{x}(t) + C_h(\boldsymbol{\rho}(t))\boldsymbol{x}(t-h(\boldsymbol{\rho}(t))) + \\
&\quad D(\boldsymbol{\rho}(t))\boldsymbol{u}(t),\\
\boldsymbol{x}(\theta) &= \boldsymbol{\phi}(\theta),\ \forall\theta\in[-h(\boldsymbol{\rho}(0)),0].
\end{aligned} \tag{1}
$$

式中: $\boldsymbol{x}(t)\in\mathbb{R}^n$ 为状态变量; $\boldsymbol{z}(t)\in\mathbb{R}^p$ 为控制输出; $\boldsymbol{u}(t)\in\mathbb{R}^m$ 为控制输入; $\boldsymbol{\omega}\in\mathbb{R}^q$ 为扰动输入. 假定系统矩阵 $A(\cdot),A_h(\cdot),B_1(\cdot),B_2(\cdot),C(\cdot),C_h(\cdot),D(\cdot)$ 和滞后 $h(\cdot)$ 为时变参数 $\boldsymbol{\rho}(\cdot)$ 的函数, 且 $h(t)$ 满足

$$0 < h(t) \leqslant H < +\infty,\ \dot{h}(t)\leqslant\sigma<1,\ \forall t\geqslant 0. \tag{2}$$

参数向量 $\boldsymbol{\rho}(t)=[\rho_1(t)\quad\rho_2(t)\quad\cdots\quad\rho_s(t)]^{\mathrm T}$ 满足 $\rho_i(t)$ 实时可测且 $\rho_i(t)\in[\underline{\rho_i},\bar{\rho}_i]$, 参数的变化率 $\tau_i(t)\in[\underline{\tau_i},\bar{\tau}_i]$. 以下为了记号方便, 用 $\boldsymbol{\rho}$ 和 ρ_i 分别代表 $\boldsymbol{\rho}$ 和 $\rho_i(t)$.

构造如下形式的无记忆状态反馈控制器

$$\boldsymbol{u}(t) = K(\boldsymbol{\rho})\boldsymbol{x}(t), \tag{3}$$

其中 $K(\boldsymbol{\rho})$ 为待求的依赖于参数的反馈增益矩阵. 此时闭环系统为

$$
\begin{aligned}
\dot{\boldsymbol{x}}(t) &= \bar{A}(\boldsymbol{\rho})\boldsymbol{x}(t)+\bar{A}_h(\boldsymbol{\rho})\boldsymbol{x}(t-h(\boldsymbol{\rho}))+\bar{B}(\boldsymbol{\rho})\boldsymbol{\omega}(t),\\
\boldsymbol{z}(t) &= \bar{C}(\boldsymbol{\rho})\boldsymbol{x}(t) + \bar{C}_h(\boldsymbol{\rho})\boldsymbol{x}(t-h(\boldsymbol{\rho})),
\end{aligned} \tag{4}
$$

其中

$$
\begin{aligned}
&\bar{A}(\boldsymbol{\rho}) = A(\boldsymbol{\rho}) + B_2(\boldsymbol{\rho})K(\boldsymbol{\rho}),\ \bar{B}(\boldsymbol{\rho}) = B_1(\boldsymbol{\rho}),\\
&\bar{C}(\boldsymbol{\rho}) = C(\boldsymbol{\rho}) + D(\boldsymbol{\rho})K(\boldsymbol{\rho}),\\
&\bar{A}_h(\boldsymbol{\rho}) = A_h(\boldsymbol{\rho}),\ \bar{C}_h(\boldsymbol{\rho}) = C_h(\boldsymbol{\rho}).
\end{aligned} \tag{5}
$$

本文的目的是针对系统(1), 研究其 H_∞ 性能准则, 并设计形如(3)式的状态反馈控制器, 使其满足: a) 闭环系统(4)渐近稳定; b) 闭环系统(4)具有一定的 H_∞ 扰动衰减水平, 即从扰动输入 $\boldsymbol{\omega}(t)$ 到控制输出 $z(t)$ 的 L_2-L_2 增益小于给定值. 即在零初始条件下(当 $\boldsymbol{\phi}(t)=0$ 时)满足

$$\sup_{\omega\in L_2-0}\frac{\|z\|_2^2}{\|\boldsymbol{\omega}\|_2^2} < \gamma^2, \tag{6}$$

其中 γ 为给定的正数, $\|\boldsymbol{\omega}\|_2^2=\int_0^\infty\boldsymbol{\omega}^{\mathrm T}(t)\boldsymbol{\omega}(t)\mathrm{d}t$, $\|z\|_2^2=\int_0^\infty z^{\mathrm T}(t)z(t)\mathrm{d}t$.

3 主要结果(Main results)

引理 1[4] 对系统(1)和给定的正常数 γ, 如果存在连续可微的对称正定矩阵 $P(\boldsymbol{\rho})\in\mathbb{R}^{n\times n}$ 和对称正定矩阵 $Q\in\mathbb{R}^{n\times n}$, 使得

$$
\begin{bmatrix}
\begin{pmatrix}\bar{A}^{\mathrm T}(\boldsymbol{\rho})P(\boldsymbol{\rho})+P(\boldsymbol{\rho})\bar{A}(\boldsymbol{\rho})+\\ \sum\limits_{i=1}^{s}(\tau_i\dfrac{\partial P}{\partial\rho_i})+Q\end{pmatrix} & * & * & *\\
\bar{A}_h^{\mathrm T}(\boldsymbol{\rho})P(\boldsymbol{\rho}) & -\mu Q & * & *\\
\bar{B}^{\mathrm T}(\boldsymbol{\rho})P(\boldsymbol{\rho}) & 0 & -\gamma I & *\\
\bar{C}(\boldsymbol{\rho}) & \bar{C}_h(\boldsymbol{\rho}) & 0 & -\gamma I
\end{bmatrix} < 0 \tag{7}
$$

对所有参数变化轨迹成立, 则闭环系统(4)渐近稳定且满足给定的 H_∞ 性能指标. 其中

$$\mu = (1-\sum_{i=1}^{s}(\tau_i\frac{\partial h}{\partial\rho_i})).$$

从引理1中可以看出, 条件(7)中存在 Lyapunov 函数矩阵 $P(\boldsymbol{\rho})$ 与闭环系统矩阵的乘积项, 考虑(5)式, 条件(7)为双线性矩阵不等式. 为解决这一问题, 借鉴文献[7~9]的思想, 引入附加矩阵来解耦, 从而得到新的 H_∞ 性能准则.

定理 1 对系统(1)和给定的正常数 γ, 如果存在连续可微的对称正定矩阵 $P(\boldsymbol{\rho})\in\mathbb{R}^{n\times n}$、对称正定矩阵 $Q\in\mathbb{R}^{n\times n}$ 和矩阵 $W\in\mathbb{R}^{n\times n}$, 对所有参数变化轨迹满足以下线性矩阵不等式, 则闭环系统(4)渐近稳定且满足给定的 H_∞ 性能指标.

$$
\begin{bmatrix}
-(W+W^{\mathrm T}) & * & * & * & * & *\\
\bar{A}^{\mathrm T}(\boldsymbol{\rho})W+P(\boldsymbol{\rho}) & -P(\boldsymbol{\rho})+\sum\limits_{i=1}^{s}(\tau_i\dfrac{\partial P}{\partial\rho_i})+Q & * & * & * & *\\
\bar{A}_h^{\mathrm T}(\boldsymbol{\rho})W & 0 & -\mu Q & * & * & *\\
\bar{B}^{\mathrm T}(\boldsymbol{\rho})W & 0 & 0 & -\gamma I & * & *\\
0 & \bar{C}(\boldsymbol{\rho}) & \bar{C}_h(\boldsymbol{\rho}) & 0 & -\gamma I & *\\
W & 0 & 0 & 0 & 0 & -P(\boldsymbol{\rho})
\end{bmatrix} < 0. \tag{8}
$$

证 应用投影引理[8],不等式(8)等价于式(9),

$$\begin{bmatrix} 0 & * & * & * & * & * \\ P(\boldsymbol{\rho}) & -P(\boldsymbol{\rho})+\sum_{i=1}^{s}(\tau_i\dfrac{\partial P}{\partial \rho_i})+Q & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -\mu Q & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma I & * & * \\ 0 & \bar{C}(\boldsymbol{\rho}) & \bar{C}_h(\boldsymbol{\rho}) & 0 & -\gamma I & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -P(\boldsymbol{\rho}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -I \\ \bar{A}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\rho}) \\ \bar{A}_h^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\rho}) \\ \bar{B}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\rho}) \\ 0 \\ I \end{bmatrix} W \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} + (*) < 0. \quad (9)$$

而$[I\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$,$[-I\ \bar{A}(\boldsymbol{\rho})\ \bar{A}_h(\boldsymbol{\rho})\ \bar{B}(\boldsymbol{\rho})\ 0\ I]$的零空间分别为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \bar{A}(\boldsymbol{\rho}) & \bar{A}_h(\boldsymbol{\rho}) & \bar{B}(\boldsymbol{\rho}) & 0 & I \\ I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix},$$

故投影条件产生

$$\begin{bmatrix} -P(\boldsymbol{\rho})+\sum_{i=1}^{s}(\tau_i\dfrac{\partial P}{\partial \rho_i})+Q & 0 & 0 & \bar{C}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\rho}) & 0 \\ 0 & -\mu Q & 0 & \bar{C}_h^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\rho}) & 0 \\ 0 & 0 & -\gamma I & 0 & 0 \\ \bar{C}(\boldsymbol{\rho}) & \bar{C}_h(\boldsymbol{\rho}) & 0 & -\gamma I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -P(\boldsymbol{\rho}) \end{bmatrix} < 0, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{A}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\rho})P(\boldsymbol{\rho})+P(\boldsymbol{\rho})\bar{A}(\boldsymbol{\rho})-P(\boldsymbol{\rho})+\sum_{i=1}^{s}(\tau_i\dfrac{\partial P}{\partial \rho_i})+Q & * & * & * & * \\ \bar{A}_h^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\rho})P(\boldsymbol{\rho}) & -\mu Q & * & * & * \\ \bar{B}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\rho})P(\boldsymbol{\rho}) & 0 & -\gamma I & * & * \\ \bar{C}(\boldsymbol{\rho}) & \bar{C}_h(\boldsymbol{\rho}) & 0 & -\gamma I & * \\ P(\boldsymbol{\rho}) & 0 & 0 & 0 & -P(\boldsymbol{\rho}) \end{bmatrix} < 0. \quad (11)$$

由 Schur 补引理[10],可知(11)式等价于引理1的式(7),而式(10)为约束条件

$$-P(\boldsymbol{\rho})+\sum_{i=1}^{s}(\tau_i\frac{\partial P}{\partial \rho_i})+Q<0.$$

这意味着式(8)的结果包含在式(7)之中,是闭环系统渐近稳定的充分条件.因此式(8)能够保证闭环系统渐近稳定且满足给定的H_∞性能指标. 证毕.

注 1 通过引入附加矩阵W,定理1消除了Lyapunov函数与系统矩阵之间的耦合,这种特性使得将该条件用于系统的分析及综合时,更易于数值实现.

通过解除Lyapunov矩阵和系统矩阵之间的耦合来减小设计保守性的思想最早在文献[9]中提出,并应用于不确定离散系统.随后文献[8]借助于投影定理将这种思想扩展到连续系统,文献[7]将其应用到仿射LPV系统的H_∞状态反馈控制器的设计上,然而这种思想在时滞LPV系统中的应用尚未见报道,本文即是受以上文献的启发,推导了应用于时滞LPV系统的依赖于参数的H_∞性能准则.下面设计相应的H_∞状态反馈控制器.

定理 2 对系统(1)和给定的正常数γ,如果存在连续可微的对称正定矩阵$X(\boldsymbol{\rho})\in\mathbb{R}^{n\times n}$、对称正定矩阵$Y\in\mathbb{R}^{n\times n}$、矩阵$V\in\mathbb{R}^{n\times n}$和矩阵$R(\boldsymbol{\rho})\in\mathbb{R}^{m\times n}$使得

$$
\begin{bmatrix}
-(V+V^{T}) & * & * & * & * & * \\
V^{T}A^{T}(\boldsymbol{\rho})+R^{T}(\boldsymbol{\rho})B_2^{T}(\boldsymbol{\rho})+X(\boldsymbol{\rho}) & -X(\boldsymbol{\rho})+\sum_{i=1}^{s}(\tau_i\frac{\partial X}{\partial\rho_i})+Y & * & * & * & * \\
V^{T}A_h^{T}(\boldsymbol{\rho}) & 0 & -\mu Y & * & * & * \\
B_1^{T}(\boldsymbol{\rho}) & 0 & 0 & -\gamma I & * & * \\
0 & C(\boldsymbol{\rho})V+D(\boldsymbol{\rho})R(\boldsymbol{\rho}) & C_h(\boldsymbol{\rho})V & 0 & -\gamma I & * \\
V^{T} & 0 & 0 & 0 & 0 & -X(\boldsymbol{\rho})
\end{bmatrix}<0
\tag{12}
$$

对所有参数变化轨迹成立,则闭环系统(4)渐近稳定且满足给定的H_∞性能指标.

若上述不等式存在可行解,则依赖于参数的状态反馈控制器增益矩阵为

$$K(\boldsymbol{\rho})=R(\boldsymbol{\rho})V^{-1}. \tag{13}$$

证　用$J=\mathrm{diag}\{W^{-1},W^{-1},W^{-1},I,I,W^{-1}\}$对式(8)全等变换,定义$X(\boldsymbol{\rho})=W^{-T}P(\boldsymbol{\rho})W^{-1}$,$Y=W^{-T}QW^{-1}$,$V=W^{-1}$,并考虑式(5)和式(13),则式(12)与式(8)等价.若不等式组有可行解,则得到如式(13)所示的控制器增益矩阵.　证毕.

注2　由于对参数的依赖性,(12)式对应的是无限维的线性矩阵不等式组,借助于文献[2,4]的近似基函数和网格技术可以将其转化为有限维的线性矩阵不等式组.选取近似基函数为$\sum_{j=1}^{n_f}f_j(\boldsymbol{\rho})$,则有

$$X(\boldsymbol{\rho})=\sum_{j=1}^{n_f}f_j(\boldsymbol{\rho})X_j>0, \tag{14}$$

$$R(\boldsymbol{\rho})=\sum_{j=1}^{n_f}f_j(\boldsymbol{\rho})R_j.$$

因此,可以通过求解(12)和(14)式得到H_∞控制器.

注3　式(12)和(14)不仅是矩阵变量$X_1,\cdots,X_{n_f},R_1,\cdots,R_{n_f},Y$和$V$的线性矩阵不等式组,也是关于标量$\gamma$的线性矩阵不等式组,因此可将$\gamma$作为一个优化变量来得到最优扰动衰减水平,即可通过求解如下的凸优化问题来设计系统(1)的最优鲁棒H_∞控制器:

$$\min\ \gamma\ \text{subject to}\ (12),(14) \tag{15}$$

且满足要求的控制器增益矩阵可由式(13)求出.

4　仿真(Simulation example)

考虑如下具有随参数变化状态时滞的LPV系统

$$
\begin{aligned}
\dot{x}(t)=&\begin{bmatrix}0 & 1+0.2\rho_1(t)\\ -2 & -3+0.1\rho_1(t)\end{bmatrix}x(t)+\\
&\begin{bmatrix}0.2\rho_1(t) & 0.1\\ -2+0.1\rho_1(t) & -0.3\end{bmatrix}x(t-0.09\rho_2(t))+\\
&\begin{bmatrix}0.2\\0.2\end{bmatrix}\omega(t)+\begin{bmatrix}0.2\rho_1(t)\\0.1+0.1\rho_1(t)\end{bmatrix}u(t),\\
z(t)=&\begin{bmatrix}0 & 1\\0 & 0\end{bmatrix}x(t)+\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}u(t).
\end{aligned}
\tag{16}
$$

其中$\rho_1(t)=\sin(t)$和$\rho_2(t)=|\cos 5t|$为时变参数,满足

$$\rho_1(t)\in[-1,1],\ \rho_2(t)\in[0,1],$$
$$\dot{\rho}_1(t)\in[-1,1],\ \dot{\rho}_2(t)\in[-5,5].$$

$h(t)=0.09\rho_2(t)$为时变时滞,其变化范围为0到0.09,并且满足$\dot{h}(t)<1$.本例的目的是求出使闭环系统渐近稳定的H_∞状态反馈控制器.根据文献[4]选取近似基函数为:

$$f_1(\boldsymbol{\rho})=1,\ f_2(\boldsymbol{\rho})=\rho_1(t),\ f_3(\boldsymbol{\rho})=\rho_2(t),$$

于是有:

$$X(\boldsymbol{\rho})=X_1+\rho_1(t)X_2+\rho_2(t)X_3,$$
$$R(\boldsymbol{\rho})=R_1+\rho_1(t)R_2+\rho_2(t)R_3.$$

用网格技术将参数的变化区域均匀划分为9×9网格,由(15)式可得最优扰动衰减水平$\gamma^*=1.8209$,相应的控制器增益矩阵为

$$
\begin{aligned}
K(\boldsymbol{\rho})=&[-0.2330\quad -0.3667]+\\
&\rho_1(t)[-0.9606\quad -0.4641]+\\
&\rho_2(t)[0.0472\quad 0.0786].
\end{aligned}
\tag{17}
$$

下面分析由系统(16)和控制器(17)所组成的闭环系统.图1给出了当参数$\rho_1(t)$,$\rho_2(t)$变化时,闭环系统特征值的变化区域,可以看出在参数的变化范围内,闭环系统的特征值具有负实部,即闭环系统是渐近稳定的.

图2给出了当时滞$h(t)$的幅值发生变化时,闭环系统的H_∞性能指标的上界.计算方法为针对不同的$h(t)$幅值,由定理1对闭环系统进行评价而得到的扰动衰减性能指标的上界,可以看出在整个$h(t)$幅值的变化范围内,从0到0.09,闭环系统的扰动衰减水平均小于所设定的性能指标,并且闭环

系统的扰动衰减特性随时滞的变化而变化.

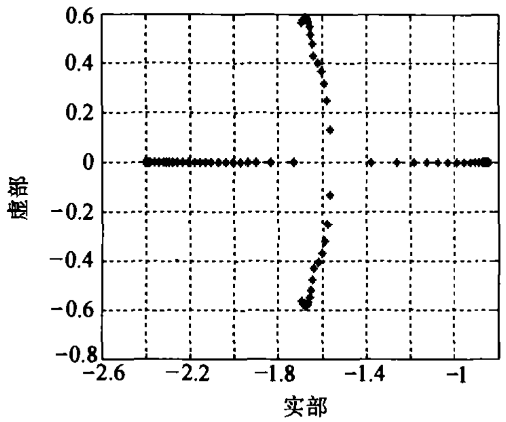

图 1 闭环系统的特征值

Fig. 1 Eigenvalues domain for the closed system

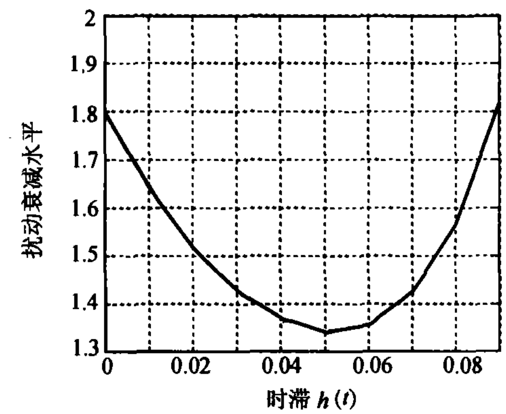

图 2 时滞 $h(t)$ 的幅值与扰动衰减水平

Fig. 2 Delay magnitude vs. disturbance attenuation level.

5 结论(Conclusion)

本文针对一类具有随参数变化状态时滞的线性参数变化系统,提出了新的依赖于参数的 H_∞ 性能准则,并得到了相应的状态反馈控制器的设计方法.文中将控制器存在的充分条件转化为凸优化问题,是对时滞 LPV 系统研究的进一步深入.所得到的结果可以推广到具有多重时变状态时滞以及输入时滞的 LPV 系统.

从数值仿真的结果中可以看出时滞对 LPV 控制系统的影响,因此,时滞相关的 LPV 系统是有待于进一步研究的课题.

参考文献(Reference):

[1] APKARIAN P, GAHINET P. A convex characterization of gain-scheduled H_∞ controllers [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1995,40(5):853 - 864.

[2] APKARIAN P, ADAMS R J. Advanced gain-scheduling techniques for uncertain systems [J]. *IEEE Trans on Control System Technology*, 1998,6(1):21 - 32.

[3] BARA G I, DAAFOUZ J, KRATZ F. Advanced gain scheduling techniques for the design of parameter-dependent observers [C]// *Proc of the 40th Conf on Decision and Control*. Florida, USA: IEEE Press, 2001:3892 - 3897.

[4] WU F, GRIGORIADIS K M. LPV systems with parameter-varying time delays: analysis and control [J]. *Automatica*, 2001, 37(2):221 - 229.

[5] 郑连伟,郭立山,刘晓平.一类线性参数变化时滞系统的 H_∞ 控制[J].控制与决策,2001,16(5):595 - 598.
(ZHENG Lianwei, GUO Lishan, LIU Xiaoping. H_∞ control for a class of time-delayed LPV systems [J]. *Control and Decision*, 2001, 16(5):595 - 598.)

[6] ZHANG X P, TSIOTRAS P, KNOSPE C. Stability analysis of LPV time-delayed systems [J]. *Int J of Control*, 2002,75(7):538 - 558.

[7] BARA G I, DAAFOUZ J, KRATZ F. Parameter-dependent control with-performance for affine LPV systems [C]// *Proc of the 40th Conf on Decision and Control*. Florida, USA: IEEE Press, 2001:2378 - 2379.

[8] APKARIAN P, ADAMS R J. Continuous-time analysis, eigenstructure assignment, and H_2 synthesis with enhanced linear matrix inequalities (LMI) characterizations [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001,46(12):1941 - 1946.

[9] DE OLIVEIRA M C, BERNUSSOU J, GEROMEL J C. A new discrete-time robust stability condition [J]. *Systems and Control Letters*, 1999,37(4):261 - 265.

[10] BOYD S P, EI G L, FERON E, et al. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory* [M]. Philadelphia: SIAM, 1994.

作者简介:

王俊玲 (1968—),女,哈尔滨工业大学控制科学与工程系在读博士研究生,研究方向为时滞 LPV 系统的控制与变增益控制,E-mail: jun_ling2003@yahoo.com.cn;

王常虹 (1961—),男,教授,博士生导师,1991 年于哈尔滨工业大学导航指导与控制专业获博士学位,研究方向为智能控制和鲁棒控制;

高会军 (1976—),男,哈尔滨工业大学控制科学与工程系在读博士研究生,研究方向为时滞不确定系统的鲁棒控制与滤波.