第 25 卷第 4 期
2008 年 8 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 25 No. 4
Aug. 2008

文章编号: 1000−8152(2008)04−0665−06

不确定奇异时滞系统的时滞相关型鲁棒H_∞弹性控制

高焕丽[1], 胥布工[1], 秦小丽[2]

(1. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640; 2. 北京理工大学 宇航科学技术学院, 北京 100081)

摘要: 讨论了不确定奇异时滞系统的时滞相关型鲁棒弹性控制器设计问题. 在一个关于标称奇异时滞系统的新的时滞相关型稳定性判据的基础上给出了一种新的有界实引理(BRL: bounded real lemma); 基于此给出了时滞相关型鲁棒弹性控制器存在的充分性条件, 最后通过数值算例说明本文结果的有效性.

关键词: 鲁棒弹性控制; 奇异系统; 时滞相关型; 线性矩阵不等式(LMIs)

中图分类号: TP13　　　**文献标识码**: A

Delay-dependent robust resilient control for uncertain singular time-delay systems

GAO Huan-li[1], XU Bu-gong[1], QIN Xiao-li[2]

(1. College of Automation Science and Technology, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;
2. Astronautics School, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The problem of robust resilient control for uncertain singular time-delay systems is discussed. Based on a new delay-dependent asymptotic stability criterion for normal singular time-delay systems, we obtained a new bounded real lemma(BRL) for singular time-delay systems. Using these results, a sufficient condition for the existence of the delay-dependent robust resilient controller is then presented. Finally, a numerical example is given to show the feasibility of the results in this paper.

Key words: robust resilient control; singular systems; delay-dependent; linear matrix inequalities

1 引言(Introduction)

奇异时滞系统, 也称为时滞微分−代数方程或广义时滞系统, 是由矩阵时滞方程和矩阵差分方程耦合在一起得到的一类方程, 具有许多正常时滞系统所不具有的性质, 如非正则性, 解的脉冲性等. 因而关于奇异时滞系统的分析与综合比正常状态空间时滞系统要复杂得多. 文献[1,2]各自独立的推导出了奇异时滞系统正则、无脉冲模且渐近稳定的充分性条件. 但是, 这些结果都是时滞无关型的, 具有较大的保守性. 文献[3,4]分别就一般的线性奇异时滞系统给出了其时滞相关型稳定性判据. 本文引理1给出了一种新型时滞相关型稳定性判据, 较之文献[3,4]具有较小保守性. 近年来, 时滞系统的鲁棒控制问题成为时滞系统领域的热点课题. 奇异时滞系统的鲁棒控制问题也得以研究[5,6], 但该结果是时滞无关型的, 具有较大保守性. 另外, 在实际物理过程中, 由于模型系统中隐含的不确定性, 以及控制器实施过程中所需要的附加调整等原因使得控制器增益常存在一定误差, 从而设计弹性控制器, 即允许控制器增益在一定范围内变化, 是很有意义的. 最近一些研究者给出了一些方法处理弹性控制器设计问题[7~9]. 文献[4]给出了一类关于奇异时滞系统的时滞相关型鲁棒弹性控制. 但是该结果基于文献[4]的稳定性判据. 本文基于较之文献[4]保守性更小的稳定性判据讨论了不确定奇异时滞系统的鲁棒弹性控制问题. 文中所考虑的控制器增益摄动包括加性摄动和乘性摄动两种形式. 引理1给出了标称奇异时滞系统的一种新的时滞相关型稳定性判据, 引理3引入了一种奇异时滞系统的时滞相关型有界实引理(BRL), 并进而给出了鲁棒控制器存在的充分条件, 并利用LMIs和锥补线性化算法给出了控制器的表达式, 最后数值算例显示了结果的有效性.

记号: $C_{n,\tau} := C([-\tau,0],\mathbb{R}^n)$表示由$[-\tau,0]$映射到$\mathbb{R}^n$中的所有连续向量函数构成的Banach空间; $\mathrm{L}_2[0,\infty)$表示$[0,\infty)$上得所有平方可积向量

收稿日期: 2007−01−22; 收修改稿日期: 2007−09−03.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60474047); NSFC–广东联合基金重点资助项目(U0735003).

值函数构成得空间, $\|f\|_2 := (\int_0^\infty \|f(t)\|^2)^{1/2}$表示$L_2[0,\infty)$空间中函数$f(t)$的范数; $\|T(s)\|_\infty = \sup\limits_{w\in L_2[0,\infty),w\neq 0} \dfrac{\| z \|_2}{\| w \|_2}$表示稳定连续系统的传递函数矩阵$T(s)$的$H_\infty$范数.

2 问题描述(Problem statement)

考虑一类不确定奇异时滞系统

$$\begin{cases} E\dot{x}(t) = (A+\Delta A)x(t) + (A_\tau + \Delta A_\tau)x(t-\tau)+ \\ \qquad B_1 u(t) + (B_2 + \Delta B_2)w(t), \\ z(t) = (C+\Delta C)x(t) + Du(t), \\ x(t) = \phi(t),\ t\in[-\tau, 0]. \end{cases} \tag{1}$$

其中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$为状态, $u(t) \in \mathbb{R}^q$为控制输入, $w(t) \in \mathbb{R}^r$为干扰输入, 且$w(t) \in L_2[0,\infty)$, $w(0) = 0$,$z(t) \in \mathbb{R}^s$为受控输出; $E, A, A_\tau, B_1, B_2, C, D$为已知适维常矩阵, $0 < \operatorname{rank} E = p < n$, $0 < \tau \leqslant \tau_m$为未知滞后常数. $\phi(t) \in C_{n,\tau}$为满足相容性条件的初始函数. $\Delta A, \Delta A_\tau, \Delta B_2, \Delta C$为常阵, 表征系统的不确定性并假设具有如下结构:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta A & \Delta A_\tau & \Delta B_2 \\ \Delta C & * & * \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix} F[E_1\ \ E_\tau\ \ E_2], \\ F^{\mathrm T} F \leqslant I. \end{cases} \tag{2}$$

其中: $D_1, D_2, E_1, E_\tau, E_2$为已知实常阵, $F\in\mathbb{R}^{i\times j}$为不确定实常阵.

本文设计控制器:

$$u(t) = (K + \Delta K)x(t) \tag{3}$$

及H_∞性能指标:

$$J_2 = \|T_{zw}(s)\|_\infty = \sup_{w\in L_2[0,\infty),w\neq 0} \frac{\| z \|_2}{\| w \|_2}. \tag{4}$$

其中$T_{zw}(s)$表示控制器(3)作用于系统(1)构成闭环系统从干扰输入$w(t)$到受控输出$z(t)$的传递函数.

定义 1 考虑不确定奇异时滞系统(1), 若存在弹性控制器(3)使得对任意常时滞$\tau : 0 < \tau \leqslant \tau_m$, 由式(1)和(3)构成的闭环系统都是正则、无脉冲模且鲁棒内稳定(即$w(t) \equiv 0$时闭环系统鲁棒渐近稳定), 并且对于事先给定的常数$\gamma > o$, H_∞性能指标满足$J_2 \leqslant \gamma$(即在零初始条件下有: $\|Z\|_2 \leqslant \gamma\|W\|_2, \forall W \in L_2[0,\infty), W \neq 0$), 则称控制器(3)为系统(1)的一个鲁棒$H_\infty$弹性控制器.

关于式(3)中的控制器增益摄动, 考虑两种形式:

1) 加性摄动:

$$\Delta K = D_3 F_3 E_3,\ F_3^{\mathrm T} F_3 \leqslant I; \tag{5}$$

2) 乘性摄动:

$$\Delta K = D_4 F_4 E_4 K, F_4^{\mathrm T} F_4 \leqslant I. \tag{6}$$

其中: $D_i, E_i (i = 3, 4)$为已知实常阵, $F_i (i = 3, 4)$为不确定实常阵. 若$\Delta A, \Delta A_\tau, \Delta B_2, \Delta C, \Delta K$满足式(2)及(5)(6), 称其为容许不确定性.

注 1 由于$0 < \operatorname{rank} E = p < n$, 所以存在非奇异矩阵$M, N$使得

$$\bar{E} = MEN = \begin{bmatrix} I_p & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{7}$$

定义

$$\begin{cases} \bar{A} = MAN,\ \bar{A}_\tau = MA_\tau N,\ \bar{B}_1 = MB_1, \\ \bar{B}_2 = MB_2,\ \bar{C} = CN,\ \bar{K} = KN, \\ \begin{bmatrix} \Delta\bar{A} & \Delta\bar{A}_\tau & \Delta\bar{B}_2 \\ \Delta\bar{C} & * & * \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix} F \begin{bmatrix} E_1 & E_\tau & E_2 \end{bmatrix}, \\ \Delta\bar{K} = \begin{cases} D_3 F_3 E_3 N = D_3 F_3 \bar{E}_3, \\ D_4 F_4 E_4 K N = D_4 F_4 E_4 \bar{K}, \end{cases} \end{cases} \tag{8}$$

并对应于$\bar{E}$分块, 其中:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix},\ \bar{A}_\tau = \begin{bmatrix} A_{\tau 11} & A_{\tau 12} \\ A_{\tau 21} & A_{\tau 22} \end{bmatrix}, \tag{9}$$

那么通过引入坐标变换$y(t) = N^{-1}x(t) = \begin{bmatrix} y_1^{\mathrm T}(t) & y_2^{\mathrm T}(t) \end{bmatrix}^{\mathrm T}$, 其中: $y_1(t) \in \mathbb{R}^p, y_2(t) \in \mathbb{R}^{(n-p)}$, 系统(1)可转化r.s.e等价系统:

$$\begin{cases} \bar{E}\dot{y}(t) = (\bar{A} + \Delta\bar{A})y(t) + (\bar{A}_\tau + \Delta\bar{A}_\tau)y(t-\tau)+ \\ \qquad \bar{B}_1 u(t) + (\bar{B}_2 + \Delta\bar{B}_2)w(t), \\ z(t) = (\bar{C} + \Delta\bar{C})y(t) + Du(t), \\ y(t) = N^{-1}\phi(t),\ t\in[-\tau, 0]. \end{cases} \tag{10}$$

控制器可写为

$$u(t) = (\bar{K} + \Delta\bar{K})y(t), \tag{11}$$

为方便通过讨论其等价系统设计原系统的控制器.

控制器(11)作用等价系统(10)形成闭环系统:

$$\begin{cases} \bar{E}\dot{y}(t) = (\bar{A}_c + \Delta\bar{A}_c)y(t) + (\bar{A}_\tau + \Delta\bar{A}_\tau)y(t- \\ \qquad \tau) + (\bar{B}_2 + \Delta\bar{B}_2)w(t), \\ z(t) = (\bar{C}_c + \Delta\bar{C}_c)y(t), \\ y(t) = N^{-1}\phi(t), \quad t\in[-\tau, 0]. \end{cases} \tag{12}$$

其中: $\bar{A}_c = \bar{A} + \bar{B}_1\bar{K}, \Delta\bar{A}_c = \Delta\bar{A} + \bar{B}_1\Delta\bar{K},\ \bar{C}_c = \bar{C} + D\bar{K},\ \Delta\bar{C}_c = \Delta\bar{C} + D\Delta\bar{K}$.

对于加性控制器, 不确定矩阵$\Delta\bar{A}_c, \Delta\bar{C}_c$可写为

$$\Delta\bar{A}_c = D_{a1} F_a E_a,\ \Delta\bar{C}_c = D_{a2} F_a E_a, \tag{13}$$

$$\begin{cases} D_{a1} = \begin{bmatrix} \bar{D}_1 & \bar{B}_1 D_3 \end{bmatrix}, D_{a2} = \begin{bmatrix} D_2 & DD_3 \end{bmatrix}, \\ E_a = \begin{bmatrix} \bar{E}_1 \\ \bar{E}_3 \end{bmatrix}, F_a = \begin{bmatrix} F & 0 \\ 0 & F_3 \end{bmatrix}. \end{cases} \tag{14}$$

对于乘性控制器, 不确定矩阵$\Delta\bar{A}_c, \Delta\bar{C}_c$可写为

$$\Delta\bar{A}_c = D_{m1} F_m E_m,\ \Delta\bar{C}_c = D_{m2} F_m E_m, \tag{15}$$

$$\begin{cases} D_{m1}=\begin{bmatrix}\bar D_1 & \bar B_1 D_4\end{bmatrix},\ D_{m2}=\begin{bmatrix}D_2 & DD_4\end{bmatrix}, \\ E_m=\begin{bmatrix}\bar E_1 \\ E_4\bar K\end{bmatrix},\ F_m=\begin{bmatrix}F & 0\\ 0 & F_4\end{bmatrix}. \end{cases} \tag{16}$$

引理 1[10] 对于任何常时滞$\tau, 0<\tau\leqslant\tau_m$, 等价标称奇异时滞系统

$$\begin{cases} \bar E\dot y(t)=\bar Ay(t)+\bar A_\tau y(t-\tau), \\ y(t)=N^{-1}\phi(t),\ t\in[-\tau,0] \end{cases} \tag{17}$$

是正则、无脉冲模且零解渐近稳定, 如果存在矩阵$\bar Q\in\mathbb{R}^{n\times n}$, $\bar Z\in\mathbb{R}^{n\times n}$, $\bar Q>0$, $\bar Z>0$, 及$\bar P\in\mathbb{R}^{n\times n}$, $Y\in\mathbb{R}^{n\times p}$, $W\in\mathbb{R}^{n\times p}$满足下列LMIs:

$$\bar P\bar E=\bar E^{\mathrm T}\bar P^{\mathrm T}\geqslant 0, \tag{18}$$

$$\begin{bmatrix} \Theta_{11} & \Theta_{12} & -\tau_m Y & \tau_m\bar A^{\mathrm T}\bar Z \\ * & -\Theta_{22} & -\tau_m W & \tau_m\bar A_\tau^{\mathrm T}\bar Z \\ * & * & -\tau_m L\bar ZL^{\mathrm T} & 0 \\ * & * & * & -\tau_m\bar Z \end{bmatrix}<0. \tag{19}$$

其中:

$$\Theta_{11}=\bar A^{\mathrm T}\bar P^{\mathrm T}+\bar P\bar A+YL+L^{\mathrm T}Y^{\mathrm T}+\bar Q,$$
$$\Theta_{12}=\bar P\bar A_\tau-YL+L^{\mathrm T}W^{\mathrm T},$$
$$\Theta_{22}=WL+L^{\mathrm T}W^{\mathrm T}+\bar Q,\ L=[I_p\ \ 0].$$

引理 2[11] 给定适维矩阵$\varOmega,\varGamma$及$\varXi$, 其中$\varOmega$为对称阵, 则对于所有满足$FF^{\mathrm T}\leqslant I$的$F$, 式$\varOmega+\varGamma F\varXi+(\varGamma F\varXi)^{\mathrm T}<0$成立的充要条件为: 存在标量$\epsilon>0$, 使得下式成立: $\varOmega+\epsilon\varGamma\varGamma^{\mathrm T}+\epsilon^{-1}\varXi^{\mathrm T}\varXi<0$.

3 主要结果(Main results)

首先考虑系统(1)的r.s.e等价无控制标称系统:

$$\begin{cases} \bar E\dot y(t)=\bar Ay(t)+\bar A_\tau y(t-\tau)+\bar B_2w(t), \\ z(t)=\bar Cy(t), \\ y(t)=N^{-1}\phi(t),\ t\in[-\tau,0]. \end{cases} \tag{20}$$

下面给出系统(20)的一个新的时滞相关型BRL.

引理 3 对于给定的常数$\gamma>0$, 若存在适维矩阵$\bar Q>0$, $\bar Z>0$及$\bar P,X,Y,W$满足式(18)及下列LMI:

$$\begin{bmatrix} \Theta_{11} & \Theta_{12} & \Theta_{13} & \tau_m\bar A^{\mathrm T}\bar Z & -\tau_mY & \bar C^{\mathrm T} \\ * & -\Theta_{22} & -L^{\mathrm T}X^{\mathrm T} & \tau_m\bar A_\tau^{\mathrm T}\bar Z & -\tau_mW & 0 \\ * & * & -\gamma^2I & \tau_m\bar B_2^{\mathrm T}\bar Z & -\tau_mX & 0 \\ * & * & * & -\tau_m\bar Z & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\tau_mL\bar ZL^{\mathrm T} & 0 \\ * & * & * & * & * & -I \end{bmatrix}<0. \tag{21}$$

其中: $\Theta_{13}=\bar P\bar B_2+L^{\mathrm T}X^{\mathrm T}$, 而$\Theta_{11},\Theta_{12},\Theta_{22},L$如引理1中定义, 则对任意常时滞$\tau, 0<\tau\leqslant\tau_m$, 系统(20)正则、无脉冲模、内稳定且传递函数满足$\|T_{zw}(s)\|_\infty<\gamma$.

证 由引理1及式(21)知系统(20)正则、无脉冲模且内稳定. 下证$\|T_{zw}(s)\|_\infty<\gamma$. 即证: 在$N^{-1}\phi(t)=0, t\in[-\tau,0]$时, 有$\|z\|_2\leqslant\gamma\|w\|_2$, $\forall w\in\mathrm{L}_2[0,\infty)$, $w(0)=0$.

由$(\bar E,\bar A)$正则、无脉冲模知存在可逆矩阵$\bar M,\bar N$使得$(\bar E,\bar A)$r.s.e于Weierstrass标准型$(\tilde E,\tilde A)$,

$$\tilde E=\bar M\bar E\bar N=\begin{bmatrix}I_p & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix},\ \tilde A=\bar M\bar A\bar N=\begin{bmatrix}A_1 & 0\\ 0 & I_{n-p}\end{bmatrix}.$$

为方便起见, 不妨仍沿用式(7)~(9)中的记号, 要强调的只是$\bar A$形如上式.

这样系统(20)可写为

$$\begin{cases} \dot y_1(t)=A_1y_1(t)+A_{\tau11}y_1(t-\tau)+ \\ \qquad A_{\tau12}y_2(t-\tau)+B_{21}w(t), \\ 0=y_2(t)+A_{\tau21}y_1(t-\tau)+ \\ \qquad A_{\tau22}y_2(t-\tau)+B_{22}w(t), \\ z(t)=\bar Cy(t), \\ y(t)=0,\ t\in[-\tau,0]. \end{cases} \tag{22}$$

引入Lyapunov-Krasovskii泛函:

$$V(y_t)=V_1(y_t)+V_2(y_t)+V_3(y_t),\ t\geqslant\tau,$$

其中:

$$V_1(y_t)=y^{\mathrm T}(t)\bar P\bar Ey(t),$$
$$V_2(y_t)=\int_{-\tau}^{t}y^{\mathrm T}(s)\bar Qy(s)\mathrm ds,$$
$$V_3(y_t)=\int_{-\tau}^{0}\int_{t+\beta}^{t}\dot y^{\mathrm T}(\alpha)\bar E^{\mathrm T}\bar Z\bar E\dot y(\alpha)\mathrm d\alpha\mathrm d\beta.$$

由于$y_1(t)-y_1(t-\tau)=\int_{t-\tau}^{t}y_1(\alpha)\mathrm d\alpha$, 所以$V(y_t)$沿系统(22)轨线求导数并结合式(21)有

$$\dot V(y_t)|_{(22)}+z^{\mathrm T}(t)z(t)-\gamma^2w^{\mathrm T}(t)w(t)= \\ \tau^{-1}\int_{t-\tau}^{t}\eta^{\mathrm T}(t,\alpha)\varXi\eta(t,\alpha)\mathrm d\alpha. \tag{23}$$

其中:

$$\eta^{\mathrm T}(t,\alpha)=\begin{bmatrix}y^{\mathrm T}(t)\,y^{\mathrm T}(t-\tau)\,w^{\mathrm T}(t)\,\dot y_1^{\mathrm T}(\alpha)\end{bmatrix},$$

$$\varXi=\begin{bmatrix} \varXi_{11} & \varXi_{12} & \varXi_{13} & -\tau Y \\ * & \varXi_{22} & \varXi_{23} & -\tau W \\ * & * & \varXi_{33} & -\tau X \\ * & * & * & -\tau L\bar ZL^{\mathrm T} \end{bmatrix},$$

$$\varXi_{11}=\Theta_{11}+\tau\bar A^{\mathrm T}\bar Z\bar A+\bar C^{\mathrm T}\bar C,$$
$$\varXi_{12}=\Theta_{12}+\tau\bar A^{\mathrm T}\bar Z\bar A_\tau,\ \varXi_{22}=-\Theta_{22}+\tau\bar A_\tau^{\mathrm T}\bar Z\bar A_\tau,$$
$$\varXi_{23}=-L^{\mathrm T}X^{\mathrm T}+\tau\bar A_\tau^{\mathrm T}\bar Z\bar B_2,$$
$$\varXi_{13}=\bar P\bar B_2+L^{\mathrm T}X^{\mathrm T}+\tau\bar A^{\mathrm T}\bar Z\bar B_2,$$
$$\varXi_{33}=-\gamma^2I+\bar B_2^{\mathrm T}\bar Z\bar B_2.$$

由Schur's补及式(21)知$\varXi<0$, 上式两边由0到∞积分得

$$\int_0^\infty\{\dot V(y_t)|_{(22)}+z^{\mathrm T}(t)z(t)-\gamma^2w^{\mathrm T}(t)w(t)\}\mathrm dt<0,$$

此即

$$\|z\|_2^2 \leqslant \|w\|_2^2 + V(y_t)|_{t=0} - V(y_t)|_{t=\infty}.$$

而$V(y_t)|_{t=0} = 0, V(y_t)|_{t=\infty} \geqslant 0$, 故$\|z\|_2^2 \leqslant \|w\|_2^2$, $\forall w \in \mathrm{L}_2[0,\infty), w(0) = 0$. 从而$\|T_{zw}(s)\|_\infty < \gamma$.

证毕.

下面给出H_∞弹性控制器存在的充分性条件. 由引理3知, 给定的$\gamma > 0$, 闭环系统(12)对于所有常时滞$\tau, 0 < \tau \leqslant \tau_m$正则、无脉冲模、内稳定且传递函数满足$\|T_{zw}(s)\|_\infty < \gamma$的一个充分条件是: 存在适维矩阵$\bar Q > 0,\ \bar Z > 0$及$\bar P, X, Y, W$满足式(18)及下列LMI:

$$\Sigma := \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} & \Sigma_{13} & \Sigma_{14} & -\tau_m Y & \Sigma_{16} \\ * & -\Theta_{22} & -L^{\mathrm T}X^{\mathrm T} & \Sigma_{24} & -\tau_m W & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & \Sigma_{34} & -\tau_m X & 0 \\ * & * & * & -\tau_m\bar Z & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\tau_m L\bar Z L^{\mathrm T} & 0 \\ * & * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0. \tag{24}$$

其中:

$$\Sigma_{11} = (\bar A_c + \Delta\bar A_c)^{\mathrm T}\bar P^{\mathrm T} + \bar P(\bar A_c + \Delta\bar A_c) + YL + L^{\mathrm T}Y^{\mathrm T} + \bar Q,$$

$$\Sigma_{12} = \bar P(\bar A_\tau + \Delta\bar A_\tau) - YL + L^{\mathrm T}W^{\mathrm T},$$

$$\Sigma_{13} = \bar P(\bar B_2 + \Delta\bar B_2) + L^{\mathrm T}X^{\mathrm T},$$

$$\Sigma_{14} = \tau_m(\bar A_c + \Delta\bar A_c)^{\mathrm T}\bar Z,\ \Sigma_{16} = (\bar C_c + \Delta\bar C_c)^{\mathrm T},$$

$$\Sigma_{24}=\tau_m(\bar A_\tau+\Delta\bar A_\tau)^{\mathrm T}\bar Z,\ \Sigma_{34}=\tau_m(\bar B_2+\Delta\bar B_2)^{\mathrm T}\bar Z,$$

$\Theta_{22}, \bar A_c, \Delta\bar A_c, \bar C_c, \Delta\bar C_c$如前所述. 定义

$$\Sigma_1 := \begin{bmatrix} \Sigma_{111} & \Theta_{12} & \Theta_{13} & \tau_m\bar A_c^{\mathrm T}\bar Z & -\tau_m Y & \bar C_c^{\mathrm T} \\ * & -\Theta_{22} & -L^{\mathrm T}X^{\mathrm T} & \tau_m\bar A_\tau^{\mathrm T}\bar Z & -\tau_m W & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & \tau_m\bar B_2^{\mathrm T}\bar Z & -\tau_m X & 0 \\ * & * & * & -\tau_m\bar Z & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\tau_m L\bar Z L^{\mathrm T} & 0 \\ * & * & * & * & * & -I \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{111} = \bar P\bar A_c + \bar A_c^{\mathrm T}\bar P^{\mathrm T} + YL + L^{\mathrm T}Y^{\mathrm T} + \bar Q,$$

则对于加性控制器增益摄动有

$$\Sigma = \Sigma_1 + \begin{bmatrix} \Sigma_{211} & \bar P\Delta\bar A_\tau & \bar P\Delta\bar B_2 & \tau_m\Delta\bar A_c^{\mathrm T}\bar Z & 0 & \Delta\bar C_c \\ * & 0 & 0 & \tau_m\Delta\bar A_\tau^{\mathrm T}\bar Z & 0 & 0 \\ * & * & 0 & \tau_m\Delta\bar B_2^{\mathrm T}\bar Z & 0 & 0 \\ * & * & * & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & 0 \end{bmatrix} =$$

$$\Sigma_1 + \begin{bmatrix} \bar P D_{a1} & \bar P\bar D_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \tau_m\bar Z D_{a1} & \tau_m\bar Z\bar D_1 \\ 0 & 0 \\ D_{a2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a^{\mathrm T} & 0 \\ 0 & \bar E_\tau^{\mathrm T} \\ 0 & E_2^{\mathrm T} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm T} +$$

$$\left\{ \begin{bmatrix} \bar P D_{a1} & \bar P\bar D_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \tau_m\bar Z D_{a1} & \tau_m\bar Z\bar D_1 \\ 0 & 0 \\ D_{a2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a^{\mathrm T} & 0 \\ 0 & \bar E_\tau^{\mathrm T} \\ 0 & E_2^{\mathrm T} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm T} \right\}^{\mathrm T} < 0.$$

其中$\Sigma_{211} = \Delta\bar A_c^{\mathrm T}\bar P^{\mathrm T} + \bar P\Delta\bar A_c$. 由引理2知: $\Sigma < 0$成立的充要条件是存在$\epsilon > 0$使得

$$\Sigma_1 + \epsilon \begin{bmatrix} \bar P D_{a1} & \bar P\bar D_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \tau_m\bar Z D_{a1} & \tau_m\bar Z\bar D_1 \\ 0 & 0 \\ D_{a2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar P D_{a1} & \bar P\bar D_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \tau_m\bar Z D_{a1} & \tau_m\bar Z\bar D_1 \\ 0 & 0 \\ D_{a2} & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm T} +$$

$$\epsilon^{-1} \begin{bmatrix} E_a^{\mathrm T} & 0 \\ 0 & \bar E_\tau^{\mathrm T} \\ 0 & E_2^{\mathrm T} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a^{\mathrm T} & 0 \\ 0 & \bar E_\tau^{\mathrm T} \\ 0 & E_2^{\mathrm T} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm T} < 0, \tag{25}$$

那么由Schur's补知, 若存在适维矩阵$\bar Q > 0,\ \bar Z > 0$及$\bar P, X, Y, W$和标量$\epsilon > 0$满足

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Theta_{12} & \Theta_{13} & \Gamma_{14} & -\tau_m Y & \Gamma_{16} & E_a^{\mathrm T} & 0 \\ * & -\Theta_{22} & -L^{\mathrm T}X^{\mathrm T} & \tau_m\bar A_\tau^{\mathrm T}\bar Z & -\tau_m W & 0 & 0 & \bar E_\tau^{\mathrm T} \\ * & * & -\gamma^2 I & \tau_m\bar B_2^{\mathrm T}\bar Z & -\tau_m X & 0 & 0 & E_2^{\mathrm T} \\ * & * & * & \Gamma_{44} & 0 & \Gamma_{46} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\tau_m L\bar Z L^{\mathrm T} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & \Gamma_{66} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -\epsilon I & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & -\epsilon I \end{bmatrix} < 0. \tag{26}$$

其中:

$$\Gamma_{11} = \Sigma_{111} + \epsilon\bar P D_a D_a^{\mathrm T}\bar P^{\mathrm T},$$

$$\Gamma_{14} = \tau_m\bar A_c^{\mathrm T}\bar Z + \epsilon\tau_m\bar P D_a D_a^{\mathrm T}\bar Z,$$

$$\Gamma_{16} = \bar C_c^{\mathrm T} + \epsilon\bar P D_{a1} D_{a2}^{\mathrm T},\ \Gamma_{44} = \epsilon\tau_m\bar Z D_{a1} D_{a2}^{\mathrm T},$$

$$\Gamma_{46} = \tau_m\bar A_c^{\mathrm T}\bar Z + \epsilon\tau_m\bar P D_a D_a^{\mathrm T}\bar Z,$$

$$\Gamma_{66} = -I + \epsilon D_{a2} D_{a2}^{\mathrm T},\ D_a = \begin{bmatrix} D_{a1} & \bar D_1 \end{bmatrix},$$

则$\bar Q, \bar Z, \bar P, X, Y, W$必使得式(24)成立. 由式(18)可

知: $\bar{P}=\begin{bmatrix}P_{11} & P_{12}\\ 0 & P_{22}\end{bmatrix}, P_{11}\geqslant 0$. 同引理1证明$\bar{P}$非奇异, 故$P_{11}>0$. 将式(18)左乘$\bar{P}^{-1}$, 右乘$\bar{P}^{-1}$; 将式(26)左乘$\mathrm{diag}\{\bar{P}^{-1},\bar{P}^{-1},I,\bar{Z}^{-1},L\bar{P}^{-1}L^{\mathrm{T}},I,I,I\}$, 右乘$\mathrm{diag}\{\bar{P}^{-1},\bar{P}^{-1},I,\bar{Z}^{-1},L\bar{P}^{-1}L^{\mathrm{T}},I,I,I\}^{\mathrm{T}}$, 并令: $\tilde{P}=\bar{P}^{-T}, U=\bar{K}\tilde{P}, \tilde{Q}=\bar{P}^{-1}\bar{Q}\bar{P}^{-T}, \tilde{X}=XL\bar{P}^{-T}, \tilde{Y}=\bar{P}^{-1}YL\bar{P}^{-T}, \tilde{Z}=\bar{Z}^{-1}, \tilde{W}=\bar{P}^{-1}WL\bar{P}^{-T}$, 分别可得

$$\bar{E}\tilde{P}=\tilde{P}^{\mathrm{T}}\bar{E}^{\mathrm{T}}\geqslant 0, \tag{27}$$

$$\begin{bmatrix}
\Psi_{11} & \Psi_{12} & \Psi_{13} & \Psi_{14} & -\tau_m\tilde{Y}L^{\mathrm{T}} & \Psi_{16} & \tilde{P}^{\mathrm{T}}E_a^{\mathrm{T}} & 0\\
* & -\Psi_{22} & -\tilde{X}^{\mathrm{T}} & \tau_m\tilde{P}^{\mathrm{T}}\bar{A}_\tau^{\mathrm{T}} & -\tau_m\tilde{W}L^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & \tilde{P}^{\mathrm{T}}E_\tau^{\mathrm{T}}\\
* & * & -\gamma^2 I & \tau_m\bar{B}_2^{\mathrm{T}} & -\tau_m\tilde{X}L^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & E_2^{\mathrm{T}}\\
* & * & * & \Psi_{44} & 0 & \Psi_{46} & 0 & 0\\
* & * & * & * & -\Psi_{55} & 0 & 0 & 0\\
* & * & * & * & * & \Gamma_{66} & 0 & 0\\
* & * & * & * & * & * & -\epsilon I & 0\\
* & * & * & * & * & * & * & -\epsilon I
\end{bmatrix}<0. \tag{28}$$

其中:

$$\Psi_{11}=(\bar{A}\tilde{P}+\bar{B}_1U)^{\mathrm{T}}+(\bar{A}\tilde{P}+\bar{B}_1U)+\tilde{Y}+\tilde{Y}^{\mathrm{T}}+\tilde{Q}+\epsilon D_aD_a^{\mathrm{T}},$$
$$\Psi_{12}=\bar{A}_\tau^{\mathrm{T}}\tilde{P}-\tilde{Y}+\tilde{W}^{\mathrm{T}},$$
$$\Psi_{13}=\bar{B}_2+\tilde{X}^{\mathrm{T}},$$
$$\Psi_{14}=\tau_m(\bar{A}\tilde{P}+\bar{B}_1U)^{\mathrm{T}}+\epsilon\tau_mD_aD_a^{\mathrm{T}},$$
$$\Psi_{16}=\tilde{P}^{\mathrm{T}}\bar{C}^{\mathrm{T}}+U^{\mathrm{T}}D^{\mathrm{T}}+\epsilon D_{a1}D_{a2}^{\mathrm{T}},$$
$$\Psi_{22}=\tilde{W}+\tilde{W}^{\mathrm{T}}+\tilde{Q},$$
$$\Psi_{44}=-\tau_m\tilde{Z}+\epsilon\tau_m^2D_aD_a^{\mathrm{T}},$$
$$\Psi_{46}=\epsilon\tau_mD_{a1}D_{a2}^{\mathrm{T}},$$
$$\Psi_{55}=\tau_mL\tilde{P}^{\mathrm{T}}L^{\mathrm{T}}L\tilde{Z}^{-1}L^{\mathrm{T}}L\tilde{P}^{\mathrm{T}}L^{\mathrm{T}}.$$

由上分析可知: 若式(27)(28)有解$\tilde{Q}>0, \tilde{Z}>0$和$\tilde{P},\tilde{X},\tilde{Y},\tilde{W}$及标量$\epsilon>0$, 等价于式(18)和式(26)有解$\bar{Q}>0$, $\bar{Z}>0$和$\bar{P},X,Y,W$及标量$\epsilon>0$, 其中$\bar{K}=U\tilde{P}^{-1}$.

从而可得如下定理:

定理 1　考虑等价不确定奇异时滞系统(10), 若存在适维矩阵$\tilde{Q}>0,\tilde{Z}>0$及$\tilde{P},\tilde{X},\tilde{Y},\tilde{W}$和标量$\epsilon>0$满足式(27)(28), 则具有加性增益摄动的控制器: $u(t)=(U\tilde{P}^{-1}+D_3F_3\bar{E}_3)y(t)$为系统(10)的一个时滞相关型鲁棒$\mathrm{H}_\infty$弹性控制器. 也即$u(t)=(U\tilde{P}^{-1}N^{-1}+D_3F_3E_3)x(t)$为原系统(1)的一个时滞相关型鲁棒$\mathrm{H}_\infty$弹性控制器.

关于乘性控制器增益摄动, 同理可得如下定理:

定理 2　考虑等价不确定奇异时滞系统(10), 若存在适维矩阵$\tilde{Q}>0,\tilde{Z}>0$及$\tilde{P},\tilde{X},\tilde{Y},\tilde{W}$和标量$\epsilon>0$满足式(27)及

$$\begin{bmatrix}
\Psi_{m11} & \Psi_{12} & \Psi_{13} & \Psi_{m14} & \Psi_{15} & \Psi_{m16} & \Psi_{17} & \Psi_{18} & 0\\
* & -\Psi_{22} & -\tilde{X}^{\mathrm{T}} & \Psi_{24} & \Psi_{25} & 0 & 0 & 0 & \Psi_{29}\\
* & * & -\gamma^2I & \tau_m\bar{B}_2^{\mathrm{T}} & \Psi_{35} & 0 & 0 & 0 & E_2^{\mathrm{T}}\\
* & * & * & \Psi_{m44} & 0 & \Psi_{m46} & 0 & 0 & 0\\
* & * & * & * & -\Psi_{55} & 0 & 0 & 0 & 0\\
* & * & * & * & * & \Gamma_{m66} & 0 & 0 & 0\\
* & * & * & * & * & * & -\epsilon I & 0 & 0\\
* & * & * & * & * & * & * & -\epsilon I & 0\\
* & * & * & * & * & * & * & * & -\epsilon I
\end{bmatrix}<0. \tag{29}$$

这里$\Psi_{m11},\Psi_{m14},\Psi_{m16},\Psi_{m44},\Psi_{m46},\Psi_{m66}$, 即将$\Psi_{11}$, $\Psi_{14},\Psi_{16},\Psi_{44},\Psi_{46},\Psi_{66}$中的$D_a$换为$D_m$. 其中:

$$D_m=\begin{bmatrix}D_{m1} & \bar{D}_1\end{bmatrix},\ \Psi_{15}=-\tau_m\tilde{Y}L^{\mathrm{T}},$$
$$\Psi_{17}=\tilde{P}^{\mathrm{T}}E_1^{\mathrm{T}},\ \Psi_{18}=U^{\mathrm{T}}E_4^{\mathrm{T}},\ \Psi_{24}=\tau_m\tilde{P}^{\mathrm{T}}\bar{A}_\tau^{\mathrm{T}},$$
$$\Psi_{25}=\tau_m\tilde{W}L^{\mathrm{T}},\ \Psi_{29}=\tilde{P}^{\mathrm{T}}E_\tau^{\mathrm{T}},\ \Psi_{35}=-\tau_m\tilde{X}L^{\mathrm{T}},$$

则具有乘性控制器增益摄动的控制器$u(t)=(I+D_4F_4E_4)U\tilde{P}^{-1}y(t)$为系统(10)的一个时滞相关型鲁棒$\mathrm{H}_\infty$弹性控制器. 也即: $u(t)=(I+D_4F_4E_4)U\tilde{P}^{-1}N^{-1}x(t)$为原系统(1)的一个时滞相关型鲁棒$\mathrm{H}_\infty$弹性控制器.

注 2　非线性项Ψ_{55}使得式(28)不再是LMI, 故不能直

接利用MATLAB中的LMI工具箱求解. 但利用文献[4]中的修改锥补算法知可通过求解一系列隶属于LMIs的凸优化算法求解, 从而设计出控制器, 具体分析如下:

引入矩阵变量$\varPi > 0$, 将式(29)中的$\varPsi_{55}$换为$\varPi$所得的不等式的左边定义为新的变量$\varOmega$. 易知如果: $\varOmega < 0$及

$$\tau_m L\tilde{P}^{\mathrm{T}}L^{\mathrm{T}}L\tilde{Z}^{-1}L^{\mathrm{T}}L\tilde{P}^{\mathrm{T}}L^{\mathrm{T}} > \varPi, \tag{30}$$

则式(27)(28)成立. 由Schur's补知式(30)等价于

$$\begin{bmatrix} \tau_m L\tilde{Z}^{-1}L^{\mathrm{T}} & L\tilde{P}^{-1}L^{\mathrm{T}} \\ * & \varPi^{-1} \end{bmatrix} > 0 \tag{31}$$

再引入$V > 0, T > 0, \varUpsilon > 0$, 则式(31)可写为

$$\begin{bmatrix} \tau_m V & T \\ * & \varUpsilon \end{bmatrix} > 0, \tag{32}$$

$$VL\tilde{Z}L^{\mathrm{T}} = I, TL\tilde{P}L^{\mathrm{T}} = I, \varUpsilon\varPi = I. \tag{33}$$

由上分析可知：若式(27)(32)(33)及$\varOmega < 0$有解$\tilde{Q} > 0, \tilde{Z} > 0$及$\tilde{P}, \tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{W}, U, V, T, \varUpsilon, \varPi$和标量$\epsilon > 0$, 则式(27)(28)有解$\tilde{Q} > 0, \tilde{Z} > 0$及$\tilde{P}, \tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{W}, U$和标量$\epsilon > 0$. 故可通过求解如下凸优化问题来求解鲁棒控制器:

$$\min\{\mathrm{tr}(VL\tilde{Z}L^{\mathrm{T}} + TL\tilde{P}L^{\mathrm{T}} + \varUpsilon\varPi)\} \tag{34}$$

s.t. LMIs : 式(32) 和

$$\begin{cases} L\tilde{P}L^{\mathrm{T}} > 0,\ \tilde{Q} > 0,\ \tilde{Z} > 0,\ V > 0,\ \varOmega < 0, \\ T > 0,\ \varUpsilon > 0,\ \varPi > 0,\ \epsilon > 0, \\ \begin{bmatrix} L\tilde{Z}L^{\mathrm{T}} & I \\ I & V \end{bmatrix} \geqslant 0,\ \begin{bmatrix} L\tilde{P}L^{\mathrm{T}} & I \\ I & T \end{bmatrix} \geqslant 0,\ \begin{bmatrix} \varPi & I \\ I & \varUpsilon \end{bmatrix} \geqslant 0. \end{cases} \tag{35}$$

算法

步骤1 对给定的$\tau_m > 0$寻找式(32)(35)的一组可行解: $\tilde{Q}, \tilde{Z}, \tilde{P}, \tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{W}, U, V, T, \varUpsilon, \varPi, \epsilon$. 若无解, 则退出; 否则, 记: $V^{(0)} = V$, $\tilde{Z}^{(0)} = \tilde{Z}$, $T^{(0)} = T$, $\tilde{P}^{(0)} = \tilde{P}$, $\varUpsilon^{(0)} = \varUpsilon$, $\varPi^{(0)} = \varPi$, 并验证式(28)是否成立. 若式(28)成立, 则系统(1)的具有加性增益摄动的鲁棒H_∞弹性控制器为$u(t) = (U\tilde{P}^{-1}N^{-1} + D_3F_3E_3)x(t)$; 否则, 令$k = 0$, 进入步骤2.

步骤2 求关于$\tilde{Q}, \tilde{Z}, \tilde{P}, \tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{W}, U, V, T, \varUpsilon, \varPi, \epsilon$的凸优化问题:

$$\begin{aligned} &\min\{\mathrm{tr}(V^{(k)}L\tilde{Z}L^{\mathrm{T}} + VL\tilde{Z}^{(k)}L^{\mathrm{T}} + T^{(k)}L\tilde{P}L^{\mathrm{T}} + \\ &\quad TL\tilde{P}^{(k)}L^{\mathrm{T}} + \varUpsilon^{(k)}\varPi + \varUpsilon\varPi^{(k)})\} \\ &\text{s.t. LMIs : 式(32) 和 (35),} \end{aligned}$$

并记

$$V^{(k+1)} = V,\ \tilde{Z}^{(k+1)} = \tilde{Z},\ T^{(k+1)} = T,$$
$$\tilde{P}^{(k+1)} = \tilde{P},\ \varUpsilon^{(k+1)} = \varUpsilon,\ \varPi^{(k+1)} = \varPi.$$

步骤3 验证式(28)是否成立. 若式(28)成立, 则系统(1)的具有加性增益摄动的鲁棒H_∞弹性控制器为$u(t) = (U\tilde{P}^{-1}N^{-1} + D_3F_3E_3)x(t)$; 否则, 令$k = k + 1$, 进入步骤2; 若式(27)(28)在给定的迭代步数内不成立, 则退出.

4 算例(Example)

考虑不确定奇异时滞系统(1), 其中:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},\ A = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -2 & 2 \end{bmatrix},\ A_\tau = \begin{bmatrix} -1 & 0.5 \\ 1 & 0.1 \end{bmatrix},$$
$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix},\ B_2 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0.2 \end{bmatrix},\ D_1 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix},$$
$$C = [2\ \ 1],\ D = 0.1,\ D_2 = [0.1\ \ 0],$$
$$E_1 = E_\tau = I_{2\times 2},\ E_2 = [1\ \ 0]^{\mathrm{T}},\ L = [1\ \ 0],\ \tau_m = 2.$$

设计H_∞弹性控制器(3), 其中$\gamma = 1$. 若控制器增益摄动具有加性摄动(5), 其中: $D_3 = [1\ \ 1]$, $E_3 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}$, 则由定理1, 利用MATLAB中的LMI Toolbox, 不必迭代即可算得$K = [-15.9380\ \ -8.3652]$; 若控制器增益摄动具有乘性摄动(6), 其中: $D_4 = [0.2\ \ 0.2]$, $E_4 = [0.1\ \ 0]^{\mathrm{T}}$, 则由定理1知不必迭代即可算得$K = [-8.4411\ \ -3.3861]$.

5 结论(Conclusions)

本文研究了不确定奇异时滞系统的时滞相关型鲁棒弹性控制器的设计问题, 考虑了控制器增益的加性摄动和乘性摄动, 获得了一种时滞相关型有界实引理(BRL), 并在此基础上给出了时滞相关型状态反馈弹性控制器存在的充分性条件及基于LMIs和锥补线性化技术的设计算法.

参考文献(References):

[1] XU S, DOOREN P V, STEFAN R, et al. Robust stability and stabilization for singular systems with state delay and paramete uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(7): 1122 – 1128.

[2] FENG J, ZHU S, CHENG Z. Guaranteed cost control of linear uncertain singular time-delay systems[C]//*Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision Control*. Las Vegas, Nenasa, USA: IEEE Press, 2002: 1802 – 1807.

[3] GAO H, ZHU S, CHENG Z, et al. Delay-dependent state feedback guaranteed cost control for uncertain singular time-delay systems[C]//*Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*. Seville, Spain: IEEE Press, 2005: 4354 – 4359.

[4] ZHU S, CHENG Z, FENG J. Delay-dependent robust stability criterion and robust stabilization for uncertain singular time-delay systems[C]// *Proceedings of the American Control Conference*. Portland, OR, USA: IEEE Press, 2005: 2839 – 2844.

[5] HUNG S S, LEE T T. Memoryless controller for singular systems with delayed state and control[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 1999, 336(6): 911 – 923.

[6] SHI P, BOUKAS E K, AGARWAL R K. Robust control of singular continuous-time systems with delays and uncertainties[C]//*Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision Control*. Sydney, Australia: IEEE Press, 2000: 1515 – 1520.

(下转第676页)

的收敛方式, 进而决定了滑模控制系统的运动品质即滑模控制模型的拟合精度. λ的不同取值对本模型拟合精度的影响规律将另文阐述.

参考文献(References):

[1] ZHANG H M, KIM T. A car-following theory for multiphase vehicular traffic flow[J]. *Transportation Research, Part B*, 2005, 39(5): 385 – 399.

[2] BHAM G H, BENEKOHAL R F. A high fidelity traffic simulation model based on cellular automata & car-following concepts[J]. *Transportation Research, Part C* , 2004, 12(1): 1 – 32.

[3] AHN S, CASSIDY M J, LAVAL J. Verification of a simplified car-following theory[J]. *Transportation Research, Part B*, 2004, 38(5): 431 – 440.

[4] BRACKSTONE M, MCDONALD M. Car-following: a historical review[J]. *Transportation Research, Part F*, 1999, 2(4): 181 – 196.

[5] RUSSELL S, NORVIG P. 人工智能—一种现代方法[M]. 第2版. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
(RUSSELL S, NORVIG P. *Artificial Intelligence–A Morden Approach*[M]. 2nd ed. Beijing: Posts and Telecom Press, 2004.)

[6] JACQUES J, SLOTINE E. Sliding controller for non-linear systems[J]. *International Journal of Control*, 1984, 40(2): 421 – 434.

[7] 高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990.
(GAO Weibing. *Variable Structure Control Theory*[M]. Beijing: China Science & Technology Press, 1990.)

[8] 王立新. 模糊系统与模糊控制M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
(WANG Lixin. *A Course in Fuzzy Systems and Control*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)

[9] 王殿海. 交通流理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
(WANG Dianhai. *Traffic Flow Theory*[M]. Beijing: China Communication Press, 2002.)

作者简介:

吴 洋 (1977—), 男, 博士研究生, 研究方向为交通工程, E-mail: wuyang333@yahoo.com.cn;

罗 霞 (1962—), 女, 博士, 教授, 研究方向为区域交通规划、智能交通系统、物流供应链管理;

刘昱岗 (1977—), 男, 博士研究生, 研究方向为物流工程.

(上接第664页)

[7] MU X P, WU Q. Synthesis of a complete sagittal gait cycle for a five link biped[J]. *Robotica*, 2003, 21(5): 581 – 587.

[8] HUANG Q, YOKOI K, KAJITA S, et al. Planning walking patterns for a biped robot[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17(3): 280 – 289.

[9] 胡凌云, 孙增圻. 基于T–S模糊再励学习的稳定双足步态生成算法[J]. 机器人, 2004, 26(5): 461 – 466.
(HU Lingyun, SUN Zengqi. Stable biped gait generation algorithm based on T-S Fuzzy Reinforcement Learning Method[J]. *Robot*, 2004, 26(5): 461 – 466.)

作者简介:

汤 卿 (1982—), 男, 博士研究生, 研究领域为仿人形机器人的步态规划和运动控制算法等, E-mail: tangq@iipc.zju.edu.cn;

熊 蓉 (1972—), 女, 浙江大学工业控制技术国家重点实验室副教授, 主要研究方向为运动控制、智能环境建模等, E-mail; rxiong@iipc.zju.edu.cn;

褚 健 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为自动控制理论及应用、自动化仪表及装置.

(上接第670页)

[7] DORATO P. Non-fragile controllers design: an overview[C]//*Proceedings of the American Control Conference*. Philadephia, Pennsylvania: IEEE Press, 1998: 2829 – 2831.

[8] GUAN X, ZHANG Q. Design of resilient guaranteed cost controllers for a class of generalized systems[C]//*Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Shanghai: IEEE Press, 2002: 160 – 164.

[9] MAHMOUD M S. Resilient linear filtering of uncertain systems[J]. *Automatica*, 2004, 40(10): 1797 – 1802.

[10] GAO H, XU B, ZHANG Y, et al. A new delay-dependent stability criterion for singular time-delay systems[C]//*Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Control and Automation.* Guangzhou: IEEE Press, 2007: 2252 – 2256.

[11] PETERSON I R. A stabilization algorithm for a class uncertain linear systems[J]. *Systems & Control Letters*, 1987, 8(4): 351 – 357.

作者简介:

高焕丽 (1977—), 女, 博士研究生, 研究方向为奇异系统、时滞与不确定系统的控制与综合, E-mail: shanggaohl@126.com;

胥布工 (1956—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为时滞与不确定系统的控制与综合、及鲁棒控制等, E-mail: aubgxu@scut.edu.cn;

秦小丽 (1979—), 女, 博士研究生, 研究方向为飞行器控制, E-mail: wrqxl@yahoo.com.cn.