文章编号:1004-1478(2012)04-0091-03

一类时滞中立型模糊切换系统的保性能控制

孟晓玲, 周长芹, 毛北行

(郑州航空工业管理学院 数理系, 河南 郑州 450015)

摘要:针对一类时滞中立型模糊切换系统的保性能控制问题,依据Lyapunov稳定性理论,以线性矩阵不等式的形式给出了该系统渐稳的充分条件和切换律的设计方案.

关键词:时滞中立型模糊切换系统;保性能控制;Lyapunov稳定性理论

中图分类号:O23.1 **文献标志码**:A DOI:10.3969/j.issn.1004-1478.2012.04.023

Guaranteed cost control of fuzzy switched systems for delay neutral model

MENG Xiao-ling, ZHOU Chang-qin, MAO Bei-xing

(*Dept. of Mathe. and Phy., Zhengzhou Inst. of Aer. Ind. Mana., Zhengzhou* 450015, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of the guaranteed cost control of delay neautral fuzzy switched systems, the system gradual stability sufficient condition and the switching law design scheme are given with linear matrix inequality (LMI) by using the Lyapunov stability theory.

Key words: delay neutral fuzzy switched system; guaranteed cost control; Lyapunov stability theory

0 引言

近年来,时滞中立系统受到了广泛的关注,但针对时滞中立系统的研究多集中于稳定性分析,以寻找系统渐近稳定的条件.另一方面,切换系统是混杂动态系统中一种重要的类型,如果切换子系统都是时滞中立系统,则这种切换系统称为时滞中立型切换系统.文献[1]研究了不确定中立型系统的鲁棒稳定性,文献[2]研究了一类线性中立型摄动系统基于LMI方法的反馈镇定问题,文献[3-5]研究了一类切换线性中立时滞系统的稳定性分析,文献[6]研究了时滞中立系统的费易碎保成本控制问题.本文拟研究时滞中立模糊切换系统的保性能控制问题,给出系统稳定的充分条件以及切换律的设计方案,以使闭环稳定.

1 问题的描述

考虑时滞中立型模糊切换系统

R^i: if $\xi_1(k)$ is $M_{\sigma 1}^i \cdots$ and $\xi_p(k)$ is $M_{\sigma p}{}^i$, then

$$\dot{x}(t)=\boldsymbol{A}_{\sigma i}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{A}_{\sigma i}{}^h\boldsymbol{x}(t-\tau)+\boldsymbol{A}_{\sigma i}{}^d\dot{x}(t-\tau)+\boldsymbol{B}_{\sigma i}u(t)$$
$$\boldsymbol{x}(t)=\varphi(t) \qquad t\in[-\tau,0]$$

其中,模糊规则数 $i\in I=\{1,2,\cdots,s\}$;$M_{\sigma j}{}^i$ 是模糊集合;模糊前件变量 $\xi_j(t)\in R^p$;状态向量 $\boldsymbol{x}(t)\in R^n$;系统的控制输出 $u(t)\in R^m$;$h>0$ 为时滞常数;$\boldsymbol{A}_{\sigma i},\boldsymbol{A}_{\sigma i}^h,\boldsymbol{A}_{\sigma i}^d,\boldsymbol{B}_{\sigma i}$ 为常数矩阵;$\sigma:[0,\infty)\to\{1,2,\cdots m\}$ 为切换信号.本文考虑依赖于状态的切换信号 $\sigma=\sigma(\boldsymbol{x}(t))$,设 $\{\tilde{\Omega}_1,\cdots,\tilde{\Omega}_l\}$ 是 R^n 的一个分割,即 $\bigcup_{i=1}^{l}\tilde{\Omega}_i=R^n\backslash\{0\}$,且 $\tilde{\Omega}_i\cap\tilde{\Omega}_I=\Phi,i\neq j$, 当 $\boldsymbol{x}(t)\in$

收稿日期:2012-02-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51072184)

作者简介:孟晓玲(1976—),女,安徽省安庆市人,郑州航空工业管理学院讲师,硕士,主要研究方向为复杂系统.

$\tilde{\Omega}_\sigma$ 切换信号为 $\sigma = \sigma(\boldsymbol{x}(t))$，这一切换信号可由函数

$$v_\sigma(\boldsymbol{x}(t)) = \begin{cases} 1 & \boldsymbol{x}(t) \in \tilde{\Omega}_\sigma \\ 0 & \boldsymbol{x}(t) \notin \tilde{\Omega}_\sigma \end{cases}$$

得到. 通过单点模糊化、乘积推理和中心平均反模糊化方法，模糊系统的总体模型为

$$\dot{x}(t) = \sum_{\sigma=1}^{l}\sum_{i=1}^{s} v_\sigma(\boldsymbol{x}(t)) h_i(\xi(t)) [\boldsymbol{A}_{\sigma i}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}_{\sigma i}u(t) + \boldsymbol{A}_{\sigma i}^{h}\boldsymbol{x}(t-\tau) + \boldsymbol{A}_{\sigma i}^{d}\dot{x}(t-\tau)]$$

其中

$$[A(h), A_h(h), A_d(h), B(h)] = \sum_{\sigma=1}^{l}\sum_{i=1}^{s} v_\sigma(\boldsymbol{x}(t)) h_i(\xi(t)) [\boldsymbol{A}_{\sigma i}, \boldsymbol{A}_{\sigma i}^{h}, \boldsymbol{A}_{\sigma i}^{d}, \boldsymbol{B}_{\sigma i}]$$

所以

$$\dot{x}(t) = A(h)\boldsymbol{x}(t) + B(h)u(t) + A^h(h)\boldsymbol{x}(t-\tau) + A^d(h)\dot{x}(t-\tau)$$

设计状态反馈控制器

$$u(t) = \sum_{\sigma=1}^{l}\sum_{i=1}^{s} v_\sigma(\boldsymbol{x}(k)) h_i(\xi(k)) K_{\sigma i}\boldsymbol{x}(t)$$

$$\dot{x}(t) = \sum_{\sigma=1}^{l}\sum_{i=1}^{s} v_\sigma(\boldsymbol{x}(t)) h_i(\xi(t)) [\boldsymbol{A}_{c\sigma i}x(t) + \boldsymbol{A}_{\sigma i}^{h}ux(t-\tau) + \boldsymbol{A}_{\sigma i}^{d}\dot{x}(t-\tau)] \qquad ①$$

其中，$\boldsymbol{A}_{c\sigma i} = \boldsymbol{A}_{\sigma i} + \boldsymbol{B}_{\sigma i}K_{\sigma i}$.

对于系统①定义二次型性能指标函数

$$J = \int_0^\infty [\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{S}_1\boldsymbol{x}(t) + u^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{S}_2u(t)]\mathrm{d}t$$

其中 $\boldsymbol{S}_1, \boldsymbol{S}_2$ 是给定的对称正定矩阵.

引理 1[7]　对给定的对称矩阵 $\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{S}_{11} & \boldsymbol{S}_{12} \\ \boldsymbol{S}_{21} & \boldsymbol{S}_{22} \end{bmatrix}$，其中 $\boldsymbol{S}_{11}$ 是 $r \times r$ 维的，则以下 3 个条件等价：

1) $\boldsymbol{S} < 0$；

2) $\boldsymbol{S}_{11} < 0, \boldsymbol{S}_{22} - \boldsymbol{S}_{12}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_{11}^{-1}\boldsymbol{S}_{12} < 0$；

3) $\boldsymbol{S}_{22} < 0, \boldsymbol{S}_{11} - \boldsymbol{S}_{12}\boldsymbol{S}_{22}^{-1}\boldsymbol{S}_{12}^{\mathrm{T}} < 0$.

2　主要结果

定理 1　若存在对称正定的矩阵 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{i}} > 0, \boldsymbol{Q}_{\mathrm{i}} > 0, \boldsymbol{R}_{\mathrm{i}} > 0$，假设存在同时非负或者非正的实数 $\beta_{\sigma\lambda}$($\sigma = 1,\cdots,l$; $\lambda = 1,\cdots,s_\sigma$)，矩阵 $\boldsymbol{P}_{\sigma i} > 0, \boldsymbol{P}_{\lambda i} > 0$ ($i \in I$) 满足不等式

$$\begin{bmatrix} \Omega & \boldsymbol{P}_iA_h(h) & \boldsymbol{P}_iA_d(h) & \boldsymbol{A}_c(h)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_i \\ * & -\boldsymbol{Q}_{\mathrm{i}} & 0 & A_h(h)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_i \\ * & * & -\boldsymbol{R}_i & \mathrm{A}_d(h)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_i \\ * & * & * & -\boldsymbol{R}_i \end{bmatrix} < 0 \qquad ②$$

其中，$\Omega = \boldsymbol{P}_iA_c(h) + A_c(h)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_i + \boldsymbol{Q}_i + \boldsymbol{S}_1 + K_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_2K_i + \sum_{\lambda=1,\lambda\neq\sigma}^{l}\beta_{\sigma\lambda}(\boldsymbol{P}_{\lambda i} - \boldsymbol{P}_{\sigma i})$，则

$$u(t) = \sum_{\sigma=1}^{l}\sum_{i=1}^{s} v_\sigma(\boldsymbol{x}(k)) h_i(\xi(k)) K_{\sigma i}\boldsymbol{x}(t)$$

是闭环系统①的保性能控制器，相应的系统性能上界是

$$J^* = \boldsymbol{x}(0)^T\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{x}(0) + \int_{-\tau}^{0}\boldsymbol{x}(s)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{x}(s)\mathrm{d}s + \int_{-\tau}^{0}\dot{x}(s)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_i\dot{x}(s)\mathrm{d}s$$

证明　不失一般性，假设 $\beta_{\sigma\lambda} \geqslant 0$，对任意

$$\boldsymbol{\eta}(t) = [\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t) \quad \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t-\tau) \quad \dot{x}(t-\tau)]^{\mathrm{T}} \in R^n \backslash \{0\}$$

至少存在一个 $\sigma \in M$ 使得 $\boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{P}_{\lambda i} - \boldsymbol{P}_{\sigma i})\boldsymbol{\eta}(t) \geqslant 0$，令

$$\Omega_\sigma = \{\eta(t) \in R^n \mid \boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}(t)(\boldsymbol{P}_{\lambda i} - \boldsymbol{P}_{\sigma i})\boldsymbol{\eta}(t) \geqslant 0, \ \forall \boldsymbol{\eta}(t) \neq 0\}$$

则 $\bigcup_\sigma \Omega_\sigma = R^n \backslash \{0\}$，构造集合

$$\tilde{\Omega}_1 = \tilde{\Omega}_1, \tilde{\Omega}_2 = \Omega_2 - \tilde{\Omega}_1, \cdots, \tilde{\Omega}_\sigma = \Omega_\sigma - \bigcup_{i=1}^{\sigma-1}\tilde{\Omega}_i$$

显然有 $\bigcup_{i=1}^{l}\tilde{\Omega}_i = R^n \backslash \{0\}$ 且 $\tilde{\Omega}_i \cap \tilde{\Omega}_j = \emptyset, i \neq j$.

构造切换律 $\sigma(\dot{x}(t)) = \sigma$，当 $\eta(t) \in \tilde{\Omega}_\sigma, \sigma \in M$. 构造 Lyapunov 函数：

$$V(\boldsymbol{x}(t)) = \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{x}(t) + \int_{(t-\tau)}^{l}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{x}(s)\mathrm{d}s + \int_{t-\tau}^{l}\dot{x}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{R}_i\dot{x}(s)\mathrm{d}s$$

$$\dot{V} = \boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}(t)\Gamma(h)\boldsymbol{\eta}(t)$$

$$\boldsymbol{\eta}(t) = [\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t) \quad \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t-\tau) \quad \dot{x}^{\mathrm{T}}(t-\tau)]^{\mathrm{T}}$$

$$\Gamma(h) = \begin{bmatrix} \Delta & \boldsymbol{P}_iA_h(h) & \boldsymbol{P}_iA_d(h) \\ * & -\boldsymbol{Q}_i & 0 \\ * & * & -\boldsymbol{R}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_c^T(h) \\ A_h^T(h) \\ A_d^T(h) \end{bmatrix} \boldsymbol{R}_i \begin{bmatrix} A_c(h) \\ A_h(h) \\ A_d(h) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

其中，$\Delta = \boldsymbol{P}_iA_c(h) + A_c(h)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_i + \boldsymbol{Q}_i + \boldsymbol{S}_1 + \boldsymbol{K}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_2\boldsymbol{K}_i$.

很容易由②得到

$$\Gamma(h)<\begin{bmatrix}-\boldsymbol{S}_1-K_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_2K_i & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}<0$$

所以系统①渐稳.

$u(t)=\sum_{\sigma=1}^{l}\sum_{i=1}^{S}v_\sigma(\boldsymbol{x}(k))h_i(\xi(k))K_{\sigma i}x(t)$ 是闭环系统①的保性能控制器,相应的系统性能上界是

$$J^*=\boldsymbol{x}(0)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{x}(0)+\int_{-\tau}^{0}\boldsymbol{x}(s)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{x}(s)\mathrm{d}s+\int_{-\tau}^{0}\dot{x}(s)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_i\dot{x}(s)\mathrm{d}s$$

定理2　若存在矩阵 $\boldsymbol{X}_i>0,\boldsymbol{Y}_i>0,\boldsymbol{Z}_i>0,\boldsymbol{M}_i$ 以及标量 $\varepsilon_{ij}>0$,假设存在同时非负或者非正的实数 $\beta_{\sigma\lambda}(\sigma=1,\cdots,l;\lambda=1,\cdots,s_\sigma)$,矩阵 $\boldsymbol{P}_{\sigma i}>0,\boldsymbol{P}_{\lambda i}>0(i\in I)$ 满足不等式

$$\Pi_{ii}<0,i,j=1,\cdots,N;\Pi_{ij}+\Pi_{ji}<0,i<j<N \quad ③$$

$$\Pi_{ij}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\psi}_1 & A_{hi}\boldsymbol{X}_i & A_{di}\boldsymbol{Z}_i & \boldsymbol{\Psi}_2 & \boldsymbol{X}_i\boldsymbol{S}_1 & \boldsymbol{\Psi}_3\\ * & -\boldsymbol{Y}_i & 0 & \Sigma_1 & 0 & 0\\ * & * & -\boldsymbol{Z}_i & \Sigma_2 & 0 & 0\\ * & * & * & -\boldsymbol{Z}_i & 0 & 0\\ * & * & * & * & -\boldsymbol{S}_1 & 0\\ * & * & * & * & * & -\boldsymbol{S}_2\end{bmatrix} \quad ④$$

其中

$$\boldsymbol{\Psi}_1=\boldsymbol{A}_{\sigma i}\boldsymbol{X}_i+\boldsymbol{X}_i\boldsymbol{A}_{\sigma i}{}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{B}_{\sigma i}\boldsymbol{M}_j+\boldsymbol{M}_j^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_{\sigma i}{}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{Y}_i+\sum_{\lambda=1,\lambda\neq\sigma}^{l}\beta_{\sigma\lambda}(\boldsymbol{P}_{\lambda i}-\boldsymbol{P}_{\sigma i})$$

$$\boldsymbol{\psi}_2=\boldsymbol{X}_i\boldsymbol{A}_{\sigma i}{}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{M}_j^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_{\sigma i}{}^{\mathrm{T}}\qquad \boldsymbol{\psi}_3=\boldsymbol{M}_j^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_2$$

$$\Sigma_1=\boldsymbol{X}_i\boldsymbol{A}_{hi}{}^{\mathrm{T}}\qquad \Sigma_2=\boldsymbol{Z}_i\boldsymbol{A}_{di}{}^{\mathrm{T}}$$

证明　构造 Lyapunov 函数

$$V(\boldsymbol{x}(t))=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{x}(t)+\int_{t-\tau}^{t}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{x}(s)\mathrm{d}s+\int_{t-\tau}^{t}\dot{x}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{R}_i\dot{x}(s)\mathrm{d}s$$

令 $\boldsymbol{P}_i=\boldsymbol{X}_i^{-1},\boldsymbol{Q}_i=\boldsymbol{X}_i^{-1}\boldsymbol{Y}_i\boldsymbol{X}_i^{-1},\boldsymbol{R}_i=\boldsymbol{Z}_i^{-1}$,利用 shur 补引理由③④很容易得到②,则

$$u(t)=\sum_{\sigma=1}^{l}\sum_{i=1}^{S}v_\sigma(\boldsymbol{x}(k))h_i(\xi(k))\boldsymbol{M}_l\boldsymbol{X}_i^{-1}\boldsymbol{x}(t)$$

是系统①的保性能控制器,相应的系统性能上界是

$$J^*=\boldsymbol{x}(0)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_i^{-1}\boldsymbol{x}(0)+\int_{-\tau}^{0}\boldsymbol{x}(s)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_i^{-1}\boldsymbol{Y}_i\boldsymbol{X}_i^{-1}\boldsymbol{x}(s)\mathrm{d}s+\int_{-\tau}^{0}\dot{x}(s)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Z}_i^{-1}\dot{x}(s)\mathrm{d}s$$

3　仿真算例

考虑如下模糊规则的时滞中立系统

规则1　如果 $\boldsymbol{x}_1(t)$ 为 $\Gamma_{\sigma1}^1$(e. g, small),则

$$\dot{x}(t)=\boldsymbol{A}_{\sigma1}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{A}_{\sigma1}{}^{h}\boldsymbol{x}(t-\tau)+\boldsymbol{A}_{\sigma1}{}^{d}\dot{x}(t-\tau)+\boldsymbol{B}_{\sigma1}u(t)$$

规则2　如果 $\boldsymbol{x}_1(t)$ 为 $\Gamma_{\sigma2}^2$(e. g, big),则

$$\dot{x}(t)=\boldsymbol{A}_{\sigma2}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{A}_{\sigma2}{}^{h}\boldsymbol{x}(t-\tau)+\boldsymbol{A}_{\sigma2}{}^{d}\dot{x}(t-\tau)+\boldsymbol{B}_{\sigma2}u(t)$$

$$\boldsymbol{A}_{\sigma1}=\begin{bmatrix}0.5 & -0.3\\ 0.1 & 0.2\end{bmatrix}\qquad \boldsymbol{A}_{\sigma2}=\begin{bmatrix}0.8 & 0\\ -0.2 & 0.6\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A}_{\sigma1}{}^{h}=\begin{bmatrix}0.3 & 0.2\\ -0.5 & 0.1\end{bmatrix}\qquad \boldsymbol{A}_{\sigma2}{}^{h}=\begin{bmatrix}0.6 & 0.2\\ 0 & -0.3\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A}_{\sigma1}{}^{h}=\begin{bmatrix}-0.2 & 0.8\\ 0.6 & 0\end{bmatrix}\qquad \boldsymbol{A}_{\sigma2}{}^{h}=\begin{bmatrix}0.5 & -0.2\\ -0.3 & 0.2\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_{\sigma1}=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0.3 & 0.6\end{bmatrix}\qquad \boldsymbol{B}_{\sigma2}=\begin{bmatrix}0.6 & -0.8\\ 0.2 & 0.5\end{bmatrix}\qquad \tau=3.6$$

隶属度函数如下:

$$\mu_1(x(t))=\begin{cases}\dfrac{1}{3} & x_1<-1\\ \dfrac{2}{3}+\dfrac{1}{3}x_1 & |x_1|\leqslant1\\ 1 & x_1>1\end{cases}$$

$$\mu_2(x(t))=\begin{cases}\dfrac{2}{3} & x_1<-1\\ \dfrac{1}{3}-\dfrac{1}{3}x_1 & |x_1|\leqslant1\\ 0 & x_1>1\end{cases}$$

可行解如下:

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}0.0325 & 0.0035\\ 0.0035 & 0.0213\end{bmatrix}>0$$

$$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix}0.1074 & 0.0240\\ 0.0240 & 0.0490\end{bmatrix}>0$$

$$\boldsymbol{Z}=\begin{bmatrix}0.8338 & 0.4737\\ 0.4737 & 1.0282\end{bmatrix}>0$$

$$\boldsymbol{M}_{\sigma1}=\begin{bmatrix}-0.6015 & -0.1468\\ 0.0958 & -0.4798\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{M}_{\sigma2}=\begin{bmatrix}-0.4059 & -0.3106\\ 0.1828 & -0.2935\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{K}_{\sigma1}=\begin{bmatrix}-18.0707 & -3.9511\\ 5.4392 & -23.4024\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{K}_{\sigma2}=\begin{bmatrix}-11.1196 & -12.7663\\ 7.2112 & -14.9467\end{bmatrix}$$

取初值 $\varphi(t)=[0.8\quad -0.8]^{\mathrm{T}},t\in[-3.6,0]$.

(下转第97页)

定的.

3 结论

本文分析了带有时滞与饱和发生率的SIR脉冲接种模型,给出了无病周期解全局稳定的条件,即当疾病传播的基本再生数 $R^* <1$ 时,疾病可以根除.可以通过多种途径来降低 R^*,比如可以增加成功接种的比例 p,降低垂直传染的比例 q,增加疾病接种的周期 τ 等.本文还给出了疾病控制的最大接种周期 τ_{max},即当接种周期 $\tau<\tau_{max}$ 时,疾病就可以根除.该脉冲接种模型相比较传统的接种模型,所需成本更低,且更加有效.

但是,本文考虑的模型是脉冲接种模型,且具有时滞与饱和发生率.事实上,模型本身还有很多值得改进的地方,如考虑其他形式的非线性疾病发生率、考虑多个时滞存在的情况、考虑状态依赖模型等,更多因素的考虑有可能使模型更接近客观实际,提供的理论结果也更有实际意义,这将是今后研究的方向.

参考文献:

[1] d'Onofrio A. Stability properties of pulse vaccination strategy in SEIR epidemic model[J]. Math Biosci,2002,179(1):57.

[2] Shulgin B, Stone L, Agur Z. Pulse vaccination strategy in the SIR epidemic model[J]. Bull Math Biol, 1998, 60:1123.

[3] Stone L, Shulgin B, Agur Z. Theoretical examination of the pulse vaccination policy in the SIR epidemic model[J]. Math Comp Modelling,2000,31:207.

[4] Agur Z, Cojocaru L, Mazor G, et al. Pulse mass measles vaccination across age cohorts[J]. Proc Nat Acad Sci USA,1993,90:11698.

[5] Hui J, Chen L. Impulsive vaccination of SIR epidemic models with nonlinear incidence rates[J]. Discrete and Continuous Dynamical System(Series B),2004(4):595.

[6] Liu W M, Hethcote H W, Levin S A. Dynamical behavior of epidemiological models with nonlinear incidence rates[J]. J Math Biol,1987,25(4):359.

[7] Liu W M, Levin S A, Iwasa Y. Influence of nonlinear incidence rates upon the behavior of SIRS epidemiological models[J]. J Math Biol,1986,23(2):187.

[8] Cull P. Global stability for population models[J]. Bull Math Bio,1981,43(1):47.

(上接第93页)

4 结语

本文研究了一类时滞中立模糊切换系统的保性能控制问题,用矩阵不等式的形式给出了系统稳定的充分条件和切换律的设计方案,找到了系统的性能上界,所得结果以线性不等式形式给出,便于Matlab求解.

参考文献:

[1] Mathmoud M S. Control of uncertain state-delay systems: guaranteed cost approach[J]. IMA J of Math Control and Infor,2001,18(1):109.

[2] Xu S Y, Lam J, Yang C W. H_∞ and positive-real control for linear neutral delay systems[J]. IEEE Trans on Auto Control,2001,46(8):1321.

[3] Han Qing-long. On robust stability of neutral systems with time-varying discrete delay and norm-bounded uncertainty[J]. Automatica,2004,40:1087.

[4] 孙希明,付俊,孙洪飞,等.一类切换线性中立时滞系统稳定性的分析[J].中国电机工程学报,2005,25(23):42.

[5] 毛北行,喻军,卜春霞.一类时滞中立型切换系统的反馈镇定[J].郑州大学学报:理学版,2011,43(1):1.

[6] 王彤,朱伟.中立型模糊时滞系统的非易碎保成本控制[J].南京师范大学学报:工程技术版,2010,10(1):5.

[7] 俞立.鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M].北京:清华大学出版社,2002.