第 21 卷 第 7 期 控 制 与 决 策 2006 年 7 月
Vol 21 No. 7 Control and Decision July 2006

文章编号: 1001-0920(2006)07-0735-04

一类线性不确定切换系统的非脆弱控制器设计方法

汪 锐[1], 冯佳昕[2], 赵 军[1]
(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 上海财经大学 信息管理与工程学院, 上海 200433)

摘 要: 针对一类线性不确定切换系统, 在控制器增益存在加性摄动的情况下, 给出了非脆弱状态反馈控制器的两种设计方案: 方案 1 是利用多 Lyapunov 函数方法, 通过子系统之间的切换, 使系统对所有可允许的不确定性保持渐近稳定; 方案 2 是基于平均驻留时间方法, 给出了非脆弱状态反馈控制器存在的一个充分条件. 相应的结果都是以线性矩阵不等式的形式给出. 最后以一个数值例子说明了上述两种方法的有效性.

关键词: 切换系统; 非脆弱控制; 多 Lyapunov 函数; 平均驻留时间
中图分类号: TP13 **文献标识码**: A

Design Methods of Non-fragile Controllers for a Class of Uncertain Switched Linear Systems

WANG Rui[1], *FENG Jia-xin*[2], *ZHAO Jun*[1]
(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. School of Information Management and Engineering, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China. Correspondent: WANG Rui, E-mail: ruiwang01@126.com)

Abstract: Two kinds of design schemes of non-fragile state-feedback controllers for a class of uncertain switched linear systems are developed. The controller gain to be designed is assumed to have additive gain variations. Based on multiple-Lyapunov function technique, the first design method guarantees that the switched system is asymptotically stable for all admissible uncertainties by means of switching among subsystems. The second method presents a sufficient condition for the existence of non-fragile controllers by employing average dwell time method. The corresponding results are all given in terms of linear matrix inequalities (LMIs). Finally, a simulation example shows the effectiveness of the proposed approaches.

Key words: Switched system; Non-fragile control; Multiple-Lyapunov function; Average dwell time

1 引 言

近年来, 切换系统已成为控制领域的一个热门研究课题, 并取得了丰硕的成果[1~6]. 切换系统是混杂动态系统中的一个重要类型, 它是由一组连续微分方程描述的子系统以及作用在其中的切换规则所构成. 这种控制系统在许多实际工程中经常遇到, 如电力系统网络的切换, 某些机器人控制系统等.

切换系统的稳定性分析是近年来研究最为集中的问题之一. 共同 Lyapunov 函数方法可保证任意切换下的稳定性, 然而实际系统中存在共同 Lyapunov 函数的情况并不多见. 于是一些学者转向研究切换系统在一些确定切换策略下的稳定性条件. 文献[1]利用多 Lyapunov 函数方法, 通过设计适当的切换律, 研究切换系统的稳定性. 一些文献表明, 在切换系统的稳定性分析中, 驻留时间方法已成为一个有效的工具[7~9]. 文献[8]将驻留时间的概念推广到平均驻留时间.

在实际中, 控制器的实现由于硬件(如 A/D 和

收稿日期: 2005-06-21; **修回日期**: 2005-10-24.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60574013, 60274009); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20020145007); 辽宁省自然科学基金项目(20032020).
作者简介: 汪锐(1977—), 女, 辽宁铁岭人, 博士生, 从事切换系统、容错控制的研究; 赵军(1957—), 男, 辽宁海城人, 教授, 博士生导师, 从事复杂非线性系统、切换系统等研究.

D/A 转换)、软件(如计算截断误差)等原因,存在着一定的控制器参数变化,这种变化将导致闭环系统的性能下降甚至稳定性被破坏.此时采用传统的鲁棒控制方法,将表现出高度的脆弱性.因此,对于非脆弱控制问题的研究具有重要的实际意义[10~12].由于切换系统的连续动态和离散动态同时存在,对其非脆弱控制的研究要相对复杂和困难.到目前为止,基于非脆弱控制方法,切换系统的稳定化问题尚未见报道.

本文研究一类线性不确定切换系统的非脆弱控制问题.在考虑控制器增益存在加性摄动的情况下,分别利用多Lyapunov函数方法和平均驻留时间方法,给出了非脆弱状态反馈控制器存在的充分条件,相应的结果都以线性矩阵不等式(LMI)的形式给出.最后用数值仿真验证了所得结果的有效性.

2 问题描述与预备知识

考虑如下一类线性不确定切换系统:

$$\dot{x} = (A_\sigma + \Delta A_\sigma)x + B_\sigma u_\sigma \tag{1}$$

其中:$x \in R^n$ 是状态;u_i 是控制输入;$\sigma(t):[0,+\infty) \to M = \{1,2,\cdots,m\}$ 是切换信号,它是一个依赖于时间 t 或状态 x 的分段常值函数;A_i 和 B_i 是具有适当维数的常数矩阵;$\Delta A_i(\cdot)$ 是不确定实值矩阵函数,且具有如下形式:

$$\Delta A_i(t) = D_i F_{1i}(t) E_i.$$

其中:D_i 和 E_i 是具有适当维数的已知常数矩阵;$F_{1i}(t)$ 是未知矩阵函数,且满足 $F_{1i}^{\mathrm T}(t)F_{1i}(t) \le I$.

对于给定的不确定切换系统(1),当控制器参数存在摄动时,本文考虑如下形式的状态反馈控制器:

$$u_i(t) = (K_i + \Delta K_i)x(t). \tag{2}$$

其中:K_i 为控制器增益,ΔK_i 为控制器增益摄动.本文假设该摄动满足如下形式:

$$\Delta K_i = H_i F_{2i} G_i, \tag{3}$$

其中 $F_{2i}^{\mathrm T}(t)F_{2i}(t) \le I,\ i \in M$. 文献[10]称其为加法式增益摄动.

对于切换系统(1),本文要解决的问题是:设计非脆弱状态反馈控制器,使得系统(1)对于所有可能的不确定性渐近稳定.下面利用多Lyapunov函数方法和平均驻留时间方法,给出此问题的两种解决方案.

3 主要结果

3.1 多Lyapunov函数方法

下面的定理利用多Lyapunov函数方法,给出了当控制器增益具有加法式摄动时,非脆弱状态反馈控制器的设计方案.

定理1 如果存在同时非负或同时非正的常数 $\beta_{ij}(i,j \in M)$ 以及正数 $\epsilon_{1i},\epsilon_{2i},\alpha$,使得矩阵不等式组

$$\begin{aligned}&P_iA_i + A_i^{\mathrm T}P_i + \epsilon_{1i}P_iD_iD_i^{\mathrm T}P_i + \epsilon_{1i}^{-1}E_i^{\mathrm T}E_i + \\ &\epsilon_{2i}P_iB_iH_iH_i^{\mathrm T}B_i^{\mathrm T}P_i + \epsilon_{2i}^{-1}G_i^{\mathrm T}G_i - \\ &2\alpha P_iB_iB_i^{\mathrm T}P_i + \sum_{j=1}^m \beta_{ij}(P_j - P_i) < 0\end{aligned} \tag{4}$$

有正定解矩阵 P_i,则存在非脆弱状态反馈控制器(2),使系统(1)渐近稳定,其控制器参数变化 ΔK_i 满足式(3),控制增益 $K_i = -\alpha B_i^{\mathrm T}P_i$.

证明 当 β_{ij} 同为非负时,由矩阵不等式组(4)知,任意一个固定的 $i \in M$,如果对于 $x \in R^n$ 有 $x^{\mathrm T}(P_j - P_i)x \ge 0,\ \forall j \in M$,则有

$$\begin{aligned}&P_iA_i + A_i^{\mathrm T}P_i + \epsilon_{1i}P_iD_iD_i^{\mathrm T}P_i + \\ &\epsilon_{2i}P_iB_iH_iH_i^{\mathrm T}B_i^{\mathrm T}P_i + \epsilon_{1i}^{-1}E_i^{\mathrm T}E_i + \\ &\epsilon_{2i}^{-1}G_i^{\mathrm T}G_i - 2\alpha P_iB_iB_i^{\mathrm T}P_i < 0.\end{aligned} \tag{5}$$

显然,对于 $\forall x \in R^n \setminus \{0\}$,必有一个 $i \in M$,使得 $x^{\mathrm T}(P_j - P_i)x \ge 0,\ \forall j \in M$. 对于任意 $i \in M$,令

$$\Omega_i = \{x \in R^n \mid x^{\mathrm T}(P_j - P_i)x \ge 0,\ \forall j \in M\},$$

则 $\bigcup_{i=1}^m \Omega_i = R^n \setminus \{0\}$. 构造集合

$$\bar\Omega_1 = \Omega_1, \cdots, \bar\Omega_i = \Omega_i - \bigcup_{j=1}^{i-1} \bar\Omega_j,$$

$$\cdots, \bar\Omega_m = \Omega_m - \bigcup_{j=1}^{m-1} \bar\Omega_j,$$

显然有

$$\bigcup_{i=1}^m \bar\Omega_i = R^n \setminus \{0\},\ \bar\Omega_i \cap \bar\Omega_j = \phi,\ i \ne j.$$

构造切换律

$$\sigma = \arg\min\{x^{\mathrm T}P_ix,\ i \in M\}, \tag{6}$$

取Lyapunov函数 $V_i(x(t)) = x^{\mathrm T}P_ix$,$P_i$ 为满足式(4)的对称正定矩阵.当 $x(t) \in \bar\Omega_i$ 时,$V_i(x(t))$ 沿系统(1)对时间 t 的导数为

$$\begin{aligned}&\dot V_i(x(t)) = \\ &x^{\mathrm T}[(A_i + \Delta A_i)^{\mathrm T}P_i + P_i(A_i + \Delta A_i)]x + \\ &x^{\mathrm T}[(K_i + \Delta K_i)^{\mathrm T}B_i^{\mathrm T}P_i + P_iB_i(K_i + \Delta K_i)]x \le \\ &x^{\mathrm T}(A_i^{\mathrm T}P_i + P_iA_i + \epsilon_{1i}P_iD_iD_i^{\mathrm T}P_i + \epsilon_{1i}^{-1}E_i^{\mathrm T}E_i + \\ &\epsilon_{2i}P_iB_iH_iH_i^{\mathrm T}B_i^{\mathrm T}P_i + \epsilon_{2i}^{-1}G_i^{\mathrm T}G_i - 2\alpha P_iB_iB_i^{\mathrm T}P_i)x.\end{aligned}$$

故由式(5)及多Lyapunov函数方法可知,系统(1)是渐近稳定的.

当 β_{ij} 同为非正时,类似可证存在非脆弱状态反馈控制器,使系统(1)渐近稳定. □

注1 令 $X_i = P_i^{-1}$,对式(4)两端分别左乘和右乘 X_i,由Schur补引理可得如下LMIs形式:

$$\begin{bmatrix}\Gamma_i & \Psi_i^{\mathrm T}\\ \Psi_i & Y_i\end{bmatrix} < 0. \tag{7}$$

其中

$$\Gamma_i = A_iX_i + X_iA_i^{\mathrm T} + \epsilon_{1i}D_iD_i^{\mathrm T} + \epsilon_{2i}B_iH_iH_i^{\mathrm T}B_i^{\mathrm T} - 2\alpha_iB_iB_i^{\mathrm T} - \sum_{j=1}^{m}\beta_{ij}X_i,$$

$$\Psi_i = (E_iX_i \quad G_iX_i \quad X_i \quad \cdots \quad X_i)^{\mathrm T} \times (I \quad 0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0),$$

$$\Upsilon_i = \mathrm{diag}\{-\epsilon_{1i}I,\ -\epsilon_{2i}I,\ -\beta_{i1}^{-1}X_1,\ \cdots,\ -\beta_{i,i-1}^{-1}X_{i-1},\ \cdots,\ -\beta_{im}^{-1}X_m\}.$$

3.2　平均驻留时间方法

定义 1[8]　对于切换信号 σ 和 $t \geq \tau \geq 0$, $N_\sigma(\tau, t)$ 表示在时间段 (τ, t) 上切换的次数. 如果存在 $N_0 \geq 0$, $\tau_a > 0$, 使得

$$N_\sigma(t, \tau) \leq N_0 + \frac{t - \tau}{\tau_a} \tag{8}$$

成立, 则正数 τ_a 称为平均驻留时间(本文取 $N_0 = 0$).

定理 2　考虑切换系统(1), 如果存在正定矩阵 P_i 及正数 ϵ_{1i}, ϵ_{2i}, α_i, λ_0 和 $\mu \geq 1$, 使得矩阵不等式组

$$P_iA_i + A_i^{\mathrm T}P_i + \epsilon_{1i}P_iD_iD_i^{\mathrm T}P_i + \epsilon_{1i}^{-1}E_i^{\mathrm T}E_i + \epsilon_{2i}P_iB_iH_iH_i^{\mathrm T}B_i^{\mathrm T}P_i + \epsilon_{2i}^{-1}G_i^{\mathrm T}G_i - 2\alpha_iP_iB_iB_i^{\mathrm T}P_i + 2\lambda_0P_i < 0, \tag{9}$$

$$P_i \leq \mu P_j,\ \forall i, j \in M \tag{10}$$

成立, 则对于任意满足平均驻留时间

$$\tau_a \geq \tau_a^* = \frac{\ln \mu}{2\lambda},\ \lambda \in (0, \lambda_0) \tag{11}$$

的切换律, 存在非脆弱状态反馈控制器(2), 使系统(1) 指数稳定, 其控制器参数变化 ΔK_i 满足式(3), 控制增益 $K_i = -\alpha_iB_i^{\mathrm T}P_i$.

证明　定义分段 Lyapunov 函数

$$V(t) = V_i(x) = x^{\mathrm T}P_ix, \tag{12}$$

其中 P_i 为满足式(9) 和(10) 的对称正定矩阵. 由式(12) 知存在两个正数 a 和 b, 使

$$a\|x\|^2 \leq V_i(x) \leq b\|x\|^2. \tag{13}$$

其中: $a = \inf\limits_{i \in M}\lambda_{\min}(P_i)$, $b = \sup\limits_{i \in M}\lambda_{\max}(P_i)$.

当第 i 个子系统被激活时, 结合式(9) 可得 $V_i(x)$ 沿相应的子系统对时间 t 的导数满足

$$\dot V_i < -2\lambda_0V_i. \tag{14}$$

对于 $\forall t > 0$, 令 $0 = t_0 < t_1 < \cdots < t_k = t_{N_\sigma(t,0)}$ 表示在时间段 $(0, t)$ 上的切换点, 由式(14) 可得

$$\begin{aligned} V(t) &\leq V(t_k)\mathrm e^{-2\lambda_0(t-t_k)} \leq \\ &\mu[V(t_{k-1})\mathrm e^{-2\lambda_0(t_k-t_{k-1})}]\mathrm e^{-2\lambda_0(t-t_k)} \leq \\ &\cdots \leq \mu^{N_\sigma(t,0)}\mathrm e^{-2\lambda_0t}V(0) = \\ &\mathrm e^{-2\lambda_0t+N_\sigma(t,0)\ln\mu}V(0). \end{aligned} \tag{15}$$

如果 τ_a 满足条件(11), 则由定义 1 可知, 对于 $\forall t > 0$, 有

$$N_\sigma(t, 0)\ln\mu \leq 2\lambda t$$

所以式(15) 可变为

$$V(t) \leq \mathrm e^{-2(\lambda_0-\lambda)t}V(0). \tag{16}$$

由式(13) 和(16) 可得

$$\|x(t)\| \leq \sqrt{b/a}\,\mathrm e^{-(\lambda_0-\lambda)t}\|x_0\|.$$

所以切换系统(1) 是指数稳定的. □

注 2　令 $X_i = P_i^{-1}$, $X_j = P_j^{-1}$, 对式(9) 两端分别左乘和右乘 X_i, 对式(10) 两端分别左乘和右乘 X_j, 由 Schur 补引理可得如下 LMIs 形式:

$$\begin{bmatrix} A_iX_i + X_iA_i^{\mathrm T} + \epsilon_{1i}D_iD_i^{\mathrm T} + 2\lambda_0X_i + \epsilon_{2i}B_iH_iH_i^{\mathrm T}B_i^{\mathrm T} - 2\alpha_iB_iB_i^{\mathrm T} & X_iE_i^{\mathrm T} & X_iG_i^{\mathrm T} \\ E_iX_i & -\epsilon_{1i}I & 0 \\ G_iX_i & 0 & -\epsilon_{2i}I \end{bmatrix} < 0, \tag{17}$$

$$\begin{bmatrix} -\mu X_j & X_j \\ X_j & -X_i \end{bmatrix} < 0,\ \forall i, j \in M. \tag{18}$$

注 3　当 $\mu = 1$ 时, $\tau_a^* = 0$, 则有

$$V(t) \leq \mathrm e^{-2\lambda_0t}V(0),\ \|x(t)\| \leq \sqrt{b/a}\,\mathrm e^{-\lambda_0t}\|x_0\|.$$

因此系统(1) 在任意切换下达到全局指数稳定.

4　仿真研究

考虑如下线性不确定切换系统:

$$\dot x(t) = (A_i + \Delta A_i)x(t) + B_iu_i,\ i = 1, 2 \tag{19}$$

其中

$$A_1 = \begin{bmatrix} -5 & 0 \\ 3 & 1 \end{bmatrix},\ A_2 = \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -2 & 1 \end{bmatrix},\ B_2 = \begin{bmatrix} -1 & 2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$D_i = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix},\ E_i = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 \\ 0.5 & 0 \end{bmatrix},$$

$$F_{1i}(t) = \sin t,\ i = 1, 2$$

假设控制增益具有加性摄动, 即 $\Delta K_i = H_iF_{2i}G_i$, 其中

$$G_i = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix},\ F_{2i}(t) = \sin t,\ H_i = 0.1.$$

取初始点 $x(0) = (-1 \quad 2)^{\mathrm T}$, 则系统(19) 两个子系统的闭环状态响应分别如图 1 和图 2 所示.

下面分别采用多 Lyapunov 函数方法和平均驻留时间方法, 验证所得结论的有效性.

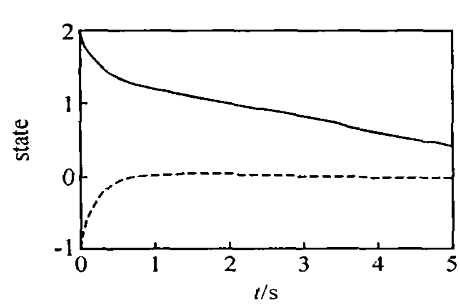

图 1　第 1 个子系统的状态响应

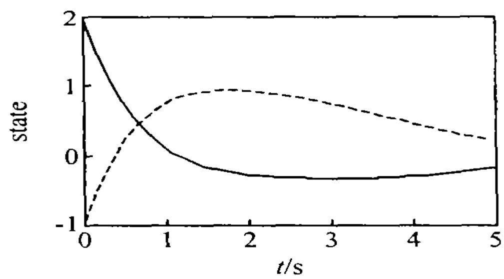

图 2　第 2 个子系统的状态响应

(1) 多 Lyapunov 函数方法

取 $\beta_{12} = 1.5$, $\beta_{21} = 1$, $\alpha_i = 0.5$, $\epsilon_{1i} = \epsilon_{2i} = 1$, 利用定理 1 的方法求解 LMIs(7), 得到正定矩阵

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.2501 & 0.3107 \\ 0.3107 & 0.5677 \end{bmatrix},$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0.5792 & 0.4180 \\ 0.4180 & 0.4754 \end{bmatrix}.$$

令

$$\Omega_1 = \{x \in R^n \mid x^{\mathrm{T}}(P_2 - P_1)x \geq 0, x \neq 0\},$$

$$\Omega_2 = \{x \in R^n \mid x^{\mathrm{T}}(P_1 - P_2)x \geq 0, x \neq 0\}.$$

则 $\Omega_1 \cup \Omega_2 = R^n \setminus \{0\}$. 给出切换律的设计如下:

$$\sigma(t) = \begin{cases} 1, x(t) \in \Omega_1; \\ 2, x(t) \in \Omega_2 \setminus \Omega_2. \end{cases}$$

设计相应的非脆弱状态反馈控制器

$$u_\sigma(t) = (K_\sigma + \Delta K_\sigma)x(t), \sigma \in \{1, 2\}.$$

其中 ΔK_i 满足式(3), $K_i = -\alpha B_i^{\mathrm{T}} P_i$.

由图 3 可以看出, 在所设计的非脆弱控制器下, 系统(19) 的闭环系统是渐近稳定的.

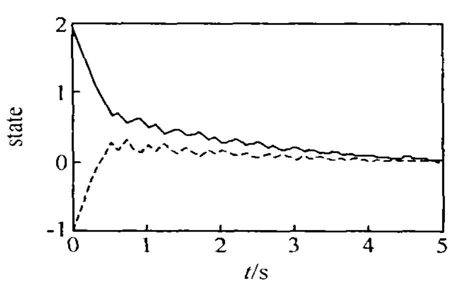

图 3　切换系统(19) 的状态响应

(2) 平均驻留时间方法

取 $\alpha_i = 1$, $\epsilon_{1i} = \epsilon_{2i} = 1$, $\lambda_0 = 0.25$, $\mu = 1.1275$, 利用定理 2 的方法求解 LMIs(17) 和(18), 得到正定矩阵

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.4302 & 0.2707 \\ 0.2707 & 0.4148 \end{bmatrix},$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0.4618 & 0.2859 \\ 0.2859 & 0.4155 \end{bmatrix}.$$

令 $\lambda = 0.15$, 由 $\tau_a \geq \tau_a^* = \dfrac{\ln \mu}{2\lambda}$ 可知 $\tau_a^* = 0.4$, 取驻留时间 $\tau_a = 0.5$. 假设下面的切换序列成立:

$$\sigma = \begin{cases} 1, k = 0, 2, \cdots, \\ 2, k = 1, 3, \cdots, \end{cases} t_k = 0.5k.$$

设计非脆弱状态反馈控制器(2).

从图 4 可以看出, 切换系统(19) 在所设计的非脆弱控制器下能够快速收敛.

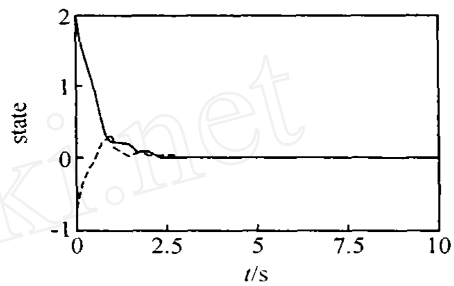

图 4　切换系统(19) 的状态响应

5　结　　论

本文研究一类具有时变参数不确定性的线性切换系统的非脆弱控制问题. 当控制器增益存在加法式摄动时, 给出了非脆弱控制器的两种设计方案. 分别利用多 Lyapunov 函数方法和平均驻留时间方法, 使得闭环系统对所有允许的不确定性, 在所设计的非脆弱控制器下是渐近稳定的. 应用线性矩阵不等式(LMIs) 的可解性, 给出了闭环系统渐近稳定的充分条件.

参考文献(References)

[1] Branicky M S. Multiple Lyapunov Functions and Other Analysis Tools for Switched and Hybrid Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(4): 475-482.

[2] Liberzon D. *Switching in Systems and Control*[M]. Boston: Birkhauser, 2003.

[3] Sun Z D, Ge S S. *Switched Linear Systems Control and Design*[M]. New York: Springer-Verlag, 2004.

[4] Zhao J, Spong M W. Hybrid Control for Global Stabilization of the Cart-pendulum System [J]. *Automatica*, 2001, 37(12): 1941-1951.

[5] Zhao J, Dimirovski G M. Quadratic Stability of a Class of Switched Nonlinear Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004, 49(4): 574-578.

[6] Xie G M, Wang L. Necessary and Sufficient Conditions for Controllability and Observability of Switched Impulsive Control Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004, 49(6): 960-966.

[7] Zhai G S, Hu B, Asuda K, et al. Disturbance Attenuation Properties of Time-controlled Switched Systems[J]. *J of the Franklin Institute*, 2001, 338(7): 765-779.

(下转第 744 页)

值示例说明了本文方法的可行性. 在多目标问题中, 参数依赖型 Lyapunov 函数方法具有明显的优势. 如何利用参数依赖型 Lyapunov 函数的思想, 解决具有极点约束或其他性能指标约束的多目标滤波器设计问题, 是有待于进一步研究的课题.

参考文献(References)

[1] De Souza C E, Shaked U, Fu M. Robust H_∞ Filter for Continuous Time Varying Uncertain Systems with Deterministic Input Signals [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1995, 43 (3): 709-719.

[2] Li H, Fu M. A Linear Matrix Inequality Approach to Robust H_∞ Filtering [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1997, 45(9): 2338-2350.

[3] Palhares R M, Peres P L D. Robust H_∞ Filtering Design with Pole Placement Constraint via Linear Matrix Inequalities [J]. *J of Optimization Theory and Applications*, 1999, 102(2): 239-261.

[4] Goodwin G C, Middleton R H, Poor H V. High-speed Digital Signal Processing and Control[J]. *Proc IEEE*, 1992, 80(2): 240-259.

[5] 张端金, 王忠勇, 吴捷. 系统控制和信号处理中的 Delta 算子方法[J]. *控制与决策*, 2003, 18(4): 385-391.
(Zhang D J, Wang Z Y, Wu J. Survey on System Control and Signal Processing Using the Delta Operator [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(4): 385-391.)

[6] 邵锡军, 杨成梧. 具有约束方差的不确定性 Delta 算子系统的鲁棒滤波器设计[J]. *兵工学报*, 2001, 22 (3): 312-316.
(Shao X J, Yang C W. Robust Filter Design of Delta Operator Systems with Time Varying Uncertainty and Error Variance Constraints [J]. *Acta Annamentari*, 2001, 22(3): 312-316.)

[7] 张端金, 王忠勇, 吴捷. Delta 算子描述的离散系统鲁棒滤波[J]. *系统工程与电子技术*, 2003, 25(1): 71-73.
(Zhang D J, Wang Z Y, Wu J. Robust Filtering for Delta Operator Formulated Discrete Time Systems [J]. *System Engineering and Electronics*, 2003, 25 (1): 71-73.)

[8] 张端金, 吴捷. 具有区域极点和方差约束的 Delta 算子系统鲁棒 H_∞ 滤波[J]. *控制与决策*, 2004, 19(1): 12-16.
(Zhang D J, Wu J. Robust H_∞ Filtering for Delta Operator Formulated Systems with Circular Pole and Error Variance Constraints [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(1): 12-16.)

[9] 王广雄, 李连锋, 王新生. 鲁棒设计中参数不确定性的描述[J]. *电机与控制学报*, 2001, 5(1): 5-7.
(Wang G X, Li L F, Wang X S. The Description of the Parameter Uncertainty for Robust Design [J]. *Electric Machines and Control*, 2001, 5(1): 5-7.)

[10] De Oliveira M C, Bernussou J, Geromel J C. A New Discrete-time Robust Stability Condition [J]. *System and Control Letters*, 1999, 37(3): 261-265.

[11] 向峥嵘, 陈庆伟, 胡维礼. 不确定 Delta 算子系统的鲁棒 H_∞ 重构控制[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(4): 641-643.
(Xiang Z R, Chen Q W, Hu W L. Robust H_∞ Reconfigurable Control of a Class of Uncertain Delta Operator Systems with Actuator Failure [J]. *Control Theory and Applications*, 2003, 20(4): 641-643.)

[12] Gao H J, Wang C H. New Approaches to Robust l_2-l_∞ and H_∞ Filtering for Uncertain Discrete-time Systems [J]. *Science in China (Series F)*, 2003, 46(5): 355-370.

(上接第 738 页)

[8] Hespanha J P, Morse A S. Stability of Switched Systems with Average Dwell-time[A]. *Proc of the 38th IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Phoenix, 1999: 2655-2660.

[9] Ishii H, Francis B A. Stabilizing a Linear System by Switching Control with Dwell Time[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(12): 1962-1973.

[10] Haddad W M, Corrado J R. Robust Resilient Dynamic Controllers for Systems with Parametric Uncertainty and Controller Gain Variations [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Philadephia, 1998: 2837-2841.

[11] 林瑞全, 杨富文. 基于 H_∞ 控制理论的非脆弱控制的研究[J]. *控制与决策*, 2004, 19(5): 598-600.
(Lin R Q, Yang F W. On Non-fragile Control Based on H_∞ Control Theory [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(5): 598-600.)

[12] 关新平, 张群亮, 龙承念. 一类 2-D 不确定离散系统的弹性保成本控制[J]. *控制理论与应用*, 2004, 21 (1): 125-128.
(Guan X P, Zhang Q L, Long C N. Resilient Guaranteed Cost Control for a Class of 2-D Uncertain Discrete Systems [J]. *Control Theory and Applications*, 2004, 21(1): 125-128.)