

一类不确定线性切换系统的鲁棒 H_∞ 滑模控制

连捷, 赵军

(东北大学 流程工业综合自动化教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 对一类含有非匹配不确定性且有外部干扰的线性切换系统, 研究了 H_∞ 滑模变结构控制问题. 利用LMI技术和单Lyapunov函数方法, 设计单 H_∞ 滑模面, 切换律以及子系统的变结构控制器, 确保了切换系统的闭环系统为鲁棒稳定, 且具有 H_∞ 扰动衰减度 γ . 系统状态到达滑模面后, 该滑模面成为切换系统的全局鲁棒滑模面, 可提高系统的暂态性能和鲁棒性. 仿真例子说明所提出设计方法的有效性.

关键词: 切换系统; 滑模控制; 单 H_∞ 滑模面

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Robust H-infinity sliding mode control for a class of uncertain switched linear systems

LIAN Jie, ZHAO Jun

(Key Laboratory of Integrated Automation of Process Industry, Ministry of Education,
Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China)

Abstract: The robust H-infinity sliding-mode variable-structure control is addressed for a class of switched linear systems with mismatched uncertainties and external disturbances. Based on the linear matrix inequality (LMI) technique and the single Lyapunov-function approach, a single H-infinity sliding surface, a switching law and variable structure control laws of subsystems are designed such that the resultant closed-loop system is robustly stable and satisfied with the H-infinity disturbance attenuation level γ . Once the state of the system reaches the sliding surface, the sliding surface becomes a global sliding surface, improving the transient performance and robustness. A numerical example illustrates the effectiveness of the proposed design method.

Key words: switched systems; sliding mode control; single H-infinity sliding surface

1 引言(Introduction)

切换系统是混杂动态系统中的一类重要模型, 在计算机磁盘驱动, 智能高速公路等实际系统中有着广泛的应用背景, 近几年已经引起国内外的广泛关注^[1~3]. 此外, 由于在对实际对象建模过程中, 总会存在未知因素, 因此对不确定切换系统的研究具有重要的实际价值和理论意义^[4~6].

另一方面, 变结构控制作为一种消除不确定性影响的有效方法, 具有响应速度快, 鲁棒性能好等优点^[7]. 文献[8]研究了一类系统矩阵中具有非匹配不确定性和匹配干扰的线性系统的变结构控制问题, 设计鲁棒滑模面, 确保闭环系统是二次稳定的. 文献[9]针对一类系统矩阵中含有非匹配不确定性且输入矩阵中含有匹配不确定性的线性系统, 研究了此类系统的变结构控制问题, 设计滑模面, 使系统在滑模面上对匹配和非匹配不确定性具有完全的自适应

应性.

虽然对于一般非切换系统变结构控制的研究已得到丰富的成果, 但对切换系统的变结构控制问题的研究成果却十分有限. 文献[10]针对二阶线性切换系统, 设计了确保切换系统滑模存在并能保证任意切换稳定的变结构控制器. 但该文献仅设计了变结构控制器, 却未给出滑模面的设计方法. 文献[11]研究了二阶线性自治切换系统的滑模面的存在问题, 估计滑模存在区域, 但并未给出切换律的设计方法. 文献[12]针对线性切换系统, 提出了带有滑模区的切换系统的滑模变结构控制, 在不同的滑模区内系统状态的同一类范数递减, 设计变结构控制律用于在子系统之间切换, 确保切换系统是二次稳定的. 在对于不确定线性切换系统的鲁棒 H_∞ 滑模控制问题的研究中, 同时给出滑模面, 切换律, 变结构控制器设计方法的研究成果至今尚未见到报道.

本文针对一类具有非匹配不确定性和外部干扰的不确定线性切换系统,研究鲁棒 H_∞ 滑模控制问题.同时给出切换系统的滑模面,切换律,子系统的变结构控制器的设计方法.首先,通过求解两个LMIs设计单 H_∞ 滑模面,使得切换系统在滑模面上是具有 H_∞ 扰动衰减度 γ 稳定的,其次,利用单Lyapunov函数方法,设计切换律,然后,设计子系统变结构控制器,确保切换系统状态在有限时间内到达单滑模面.系统的状态一旦到达滑模面,由于在以后的切换时刻,子系统的初始状态位于滑模面上,消除到达阶段,单滑模面成为切换系统的全鲁棒滑模面,提高了系统的暂态性能和鲁棒性.

2 问题描述和预备知识(Problem formulation and preliminaries)

考虑如下—类含有非匹配不确定性和具有外部干扰的切换系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_\sigma x(t) + DF_\sigma(t)Ex(t) + B[u_\sigma(t) + H(t)u_\sigma(t) + f_\sigma(x, t)] + G\omega(t), \\ z(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 为系统状态; $u_i(t) \in \mathbb{R}^m$ 为第 i 个子系统的控制输入; $z(t)$ 为调节输出; $\sigma(t) \in [0, \infty) \rightarrow \Xi = \{1, 2, \dots, k\}$ 是一个依赖于 t 或状态 $x(t)$ 的分段常值切换信号; $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为系统特征矩阵; $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 为列满秩的输入矩阵, 且 $m < n$; D, E, G 为适当维数的常数矩阵, 且矩阵 E 右可逆; $F_i(t)$ 为具有Lebesgue可测元的未知矩阵函数, 满足 $F_i^T(t)F_i(t) \leq I$; $H(t)$ 和 $f_i(x, t)$ 分别为输入矩阵不确定性和非线性不确定性.

对切换系统(1), 首先作如下假设:

- 1) 存在已知的非负常数 $\varphi, 0 \leq \varphi < 1$, 使得 $\|H(t)\| \leq \varphi$;
- 2) 存在已知的正函数 $\phi(x)$, 使得 $\|f_i(x, t)\| \leq \phi(x), i \in \Xi$;
- 3) 存在正常数 ϖ , 使得 $\|\omega(t)\| \leq \varpi$.

注 1 假设1)~3) 是文献中标准的假设条件, 它们给出了不确定性和外部干扰的上界, 这对于变结构控制器的设计是必要的.

本文研究的问题是, 对不确定线性切换系统(1), 首先, 设计单 H_∞ 滑模面 $\zeta(t) = Sx(t) = 0, S \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 和切换律, 使得下面的条件成立:

- i) SB 为非奇异矩阵;
- ii) 在滑模面上, 系统(1)对于匹配和非匹配不确定性具有完全的自适应性;
- iii) 当 $\omega(t) = 0$ 时, 切换系统的 $(n - m)$ 阶滑动模态是全局渐近稳定的; 当 $\omega(t) \neq 0$ 时, 在滑模面上, 对于不满足匹配条件的外部干扰具有 H_∞ 衰减

度 γ ; 其次, 设计子系统的变结构控制器, 使得切换系统(1)的闭环系统状态轨迹在有限时间内到达并驻留于滑模面上.

注 2 单滑模面 $Sx(t) = 0$ 是当切换系统的某个子系统被激活时该子系统的滑模面. 设计切换系统的单滑模面的目的是为了削减在切换过程中滑模到达过程, 改善切换系统的暂态性能, 提高切换系统的鲁棒性.

为了得到本文的主要结果, 需要下面的定义.

定义 1^[13] 考虑如下不确定线性切换系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_\sigma x + B\omega, \\ z(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (2)$$

对给定常数 $\gamma > 0$, 如果存在切换律 $\sigma = \sigma(x)$, 正定对称矩阵 P 和正常数 $\varepsilon > 0$, 使得在这个切换律下, 不等式

$$x^T(A_\sigma^T P + PA_\sigma + \gamma^{-2}PBB^T P + C^T C)x < -\varepsilon x^T x \quad (3)$$

成立, 则称系统(2) 是渐近稳定的且具有 H_∞ 扰动衰减度 γ .

3 主要结果(Main results)

首先, 定义如下 $n \times n$ 对称矩阵:

$$\Gamma = \begin{cases} I, & \tilde{B}^T D = 0, \\ I - E^g E, & \tilde{B}^T D \neq 0, \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\tilde{B}$ 为 B 的正交补, E^g 为 E 的Moore-Penrose逆.

下面采用单Lyapunov函数方法, 设计切换律. 为证明简洁仅讨论 $k = 2$ 的情况, 对于 $k > 2$ 的情形, 结果仍然成立.

定理 1 对于切换系统(1), 如果存在对称矩阵 X 和 Y 满足下式:

$$\begin{cases} \Gamma X \Gamma + BYB^T > 0, \\ \tilde{B}^T (\bar{A} \Gamma X \Gamma + \Gamma X \Gamma \bar{A}^T + \gamma^{-2}GG^T + \Gamma X \Gamma C^T C \Gamma X \Gamma) \tilde{B} < 0, \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\bar{A} \in \gamma_{\alpha_1, \alpha_2}(A_1, A_2)$ 为 A_1, A_2 的凸组合, 那么可以设计线性单 H_∞ 滑模面:

$$\zeta(t) = Sx(t) = B^T(\Gamma X \Gamma + BYB^T)^{-1}x(t) = 0, \quad (6)$$

使得条件i)~iii)满足.

证 定义如下非奇异变换矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} \tilde{B}^T \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{B}^T \\ B^T P^{-1} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中 $P = \Gamma X \Gamma + BYB^T$. 因此有

$$M^{-1} = [P\tilde{B}(\tilde{B}^T P\tilde{B})^{-1} \quad B(SB)^{-1}]. \quad (8)$$

作如下变换:

$$\begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = Mx(t) = \begin{bmatrix} \tilde{B}^T \\ B^T P^{-1} \end{bmatrix} x(t), \quad (9)$$

其中: $\xi_1 \in \mathbb{R}^{n-m}$, $\xi_2 = \zeta \in \mathbb{R}^m$, 将变换代入系统(1), 可以得到

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\xi}_1 \\ \dot{\zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{\sigma 11} & \bar{A}_{\sigma 12} \\ \bar{A}_{\sigma 21} & \bar{A}_{\sigma 22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \zeta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{B}^T G \\ SG \end{bmatrix} \omega(t) + \\ \begin{bmatrix} 0 \\ SB \end{bmatrix} (u_\sigma(t) + H(t)u_\sigma(t) + f_\sigma(x, t)), \\ z = C [P\tilde{B}(\tilde{B}^T P\tilde{B})^{-1} \quad B(SB)^{-1}] \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \zeta \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{aligned} \bar{A}_{\sigma 11} &= \tilde{B}^T [A_\sigma + DF_\sigma(t)E] P\tilde{B}(\tilde{B}^T P\tilde{B})^{-1}, \\ \bar{A}_{\sigma 12} &= \tilde{B}^T [A_\sigma + DF_\sigma(t)E] B(SB)^{-1}, \\ \bar{A}_{\sigma 21} &= S [A_\sigma + DF_\sigma(t)E] P\tilde{B}(\tilde{B}^T P\tilde{B})^{-1}, \\ \bar{A}_{\sigma 22} &= S [A_\sigma + DF_\sigma(t)E] B(SB)^{-1}. \end{aligned}$$

当 $\zeta = \dot{\zeta} = 0$ 时, 切换系统(1)的滑动模式方程为:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \tilde{B}^T A_\sigma P\tilde{B}(\tilde{B}^T P\tilde{B})^{-1} \xi_1 + \tilde{B}^T DF_\sigma(t) \times \\ EP\tilde{B}(\tilde{B}^T P\tilde{B})^{-1} \xi_1 + \tilde{B}^T G\omega, \\ z = CP\tilde{B}(\tilde{B}^T P\tilde{B})^{-1} \xi_1. \end{cases} \quad (11)$$

由于 $\bar{A} \in \gamma_{\alpha_1, \alpha_2}(A_1, A_2)$, 所以存在常数 $\alpha \in [0, 1]$, 使得

$$\bar{A} = \alpha A_1 + (1 - \alpha) A_2, \quad (12)$$

将式(12)代入式(5)中, 可得

$$\begin{aligned} \alpha(\tilde{B}^T(A_1 \Gamma X \Gamma + \Gamma X \Gamma A_1^T + \gamma^{-2} G G^T + \\ \Gamma X \Gamma C^T C \Gamma X \Gamma) \tilde{B}) + (1 - \alpha)(\tilde{B}^T(A_2 \Gamma X \Gamma + \\ \Gamma X \Gamma A_2^T + \gamma^{-2} G G^T + \Gamma X \Gamma C^T C \Gamma X \Gamma) \tilde{B}). \end{aligned} \quad (13)$$

令

$$\begin{aligned} \Omega_i = \\ \{\xi_1 | \xi_1^T (\tilde{B}^T P\tilde{B})^{-1} (\tilde{B}^T (A_i \Gamma X \Gamma + \Gamma X \Gamma A_i^T + \\ \gamma^{-2} G G^T + \Gamma X \Gamma C^T C \Gamma X \Gamma) \tilde{B}) (\tilde{B}^T P\tilde{B})^{-1} \xi_1 < \\ 0\}, i = 1, 2, \end{aligned}$$

则 $R^{n-m} \setminus \{0\} = \Omega_1 \cup \Omega_2$. 设计切换律如下:

$$\sigma(\xi_1) = \begin{cases} 1, & \xi_1 \in \Omega_1, \\ 2, & \xi_1 \in \Omega_2 \setminus \Omega_1. \end{cases} \quad (14)$$

按不确定性进入系统的方式不同, 对下面两种情况分别加以讨论.

当 $\tilde{B}^T D = 0$, 有

$$\begin{cases} \Gamma = I, \\ P = X + BYB^T > 0, \end{cases} \quad (15)$$

可以得到: $\tilde{B}^T P\tilde{B} = \tilde{B}^T X\tilde{B} > 0$.

因此系统(11)变为

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \tilde{B}^T A_\sigma X\tilde{B}(\tilde{B}^T X\tilde{B})^{-1} \xi_1 + \tilde{B}^T G\omega, \\ z = CX\tilde{B}(\tilde{B}^T X\tilde{B})^{-1} \xi_1, \end{cases} \quad (16)$$

令:

$$\begin{aligned} Q_{1\sigma} &= \tilde{B}^T A_\sigma X\tilde{B}(\tilde{B}^T X\tilde{B})^{-1} P_1 + P_1 (\tilde{B}^T X\tilde{B})^{-1} \tilde{B}^T \times \\ &\quad XA_\sigma^T \tilde{B} + \gamma^{-2} \tilde{B}^T G G^T \tilde{B} + P_1 (\tilde{B}^T X\tilde{B})^{-1} \times \\ &\quad \tilde{B}^T X C^T C X\tilde{B}(\tilde{B}^T X\tilde{B})^{-1} P_1. \end{aligned}$$

选取正定矩阵 $P_1 = \tilde{B}^T X\tilde{B}$, 根据单Lyapunov函数方法, 在切换律(14)下有 $\xi_1^T P_1^{-1} Q_{1\sigma} P_1^{-1} \xi_1 < 0, \forall \xi_1 \neq 0$.

当 $\tilde{B}^T D \neq 0$, 有

$$\begin{cases} \Gamma = I - E^g E, \\ P = (I - E^g E)X(I - E^g E) + BYB^T > 0, \end{cases} \quad (17)$$

可以得到

$$\begin{aligned} EP\tilde{B} &= E[(I - E^g E)X(I - E^g E) + BYB^T] \tilde{B} = 0, \\ \tilde{B}^T P\tilde{B} &> 0. \end{aligned}$$

因此, 系统(11)可变为

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \tilde{B}^T A_\sigma (I - E^g E)X(I - E^g E) \tilde{B} [\tilde{B}^T \times \\ (I - E^g E)X(I - E^g E) \tilde{B}]^{-1} \xi_1 + \tilde{B}^T G\omega, \\ z = C(I - E^g E)X(I - E^g E) \tilde{B} [\tilde{B}^T \times \\ (I - E^g E)X(I - E^g E) \tilde{B}]^{-1} \xi_1. \end{cases} \quad (18)$$

令:

$$\begin{aligned} Q_{2\sigma} &= \\ \tilde{B}^T A_\sigma X_0 \tilde{B} (\tilde{B}^T X_0 \tilde{B})^{-1} P_2 &+ P_2 (\tilde{B}^T X_0 \tilde{B})^{-1} \times \\ \tilde{B}^T X_0 A_\sigma^T \tilde{B} + \gamma^{-2} \tilde{B}^T G G^T \tilde{B} &+ P_2 (\tilde{B}^T X_0 \tilde{B})^{-1} \times \\ \tilde{B}^T X_0 C^T C X_0 \tilde{B} (\tilde{B}^T X_0 \tilde{B})^{-1} P_2, \end{aligned}$$

其中 $X_0 = (I - E^g E)X(I - E^g E)$. 选取正定矩阵 $P_2 = \tilde{B}^T (I - E^g E)X(I - E^g E) \tilde{B}$, 根据单Lyapunov函数方法, 在切换律(14)下有 $\xi_1^T P_2^{-1} Q_{2\sigma} P_2^{-1} \xi_1 < 0, \forall \xi_1 \neq 0$, 由定义1可知条件i)~iii)满足. 定理1获证.

注3 由式(4)定义的矩阵 Γ , 对单 H_∞ 滑模面的设计及其滑动模式的动态品质起着重要的作用. 当 $\tilde{B}^T D = 0$, 即不确定性 $DF_i(t)E, i = \Xi$ 满足匹配条件, 系统在滑模面上对匹配不确定性具有自适应性; 当 $\tilde{B}^T D \neq 0$ 即不确定性 $DF_i(t)E, i = \Xi$ 不满足匹配条件, 通过 Γ 的选择, 使得系统在滑模面上对非匹配不确定性也具有自适应性.

注4 在切换系统(1)的状态到达滑模面以后, 由于在下一切换时刻激活的子系统的初始状态位于滑模面上, 因此消除了到达阶段, 所设计的单滑模面成为切换系统的

全鲁棒滑模面,改善了系统的暂态性能,提高了系统的鲁棒性。

下面设计子系统的变结构控制器,使得切换系统(1)的状态在有限时间内到达滑模面。

定理2 对于带有外部干扰和不确定性的线性切换系统(1),设计如下控制器使得闭环系统状态在有限时间内到达滑模面(6):

$$u_{\sigma} = -(SB)^{-1}SA_{\sigma}x(t) - \frac{(SB)^{-1}}{1-\varphi}(\|SA_{\sigma} \times x(t)\| + \|SD\| \cdot \|Ex(t)\| + \|SB\| \phi(x) + \|SG\| \varpi + \mu) \operatorname{sgn} \zeta, \quad (19)$$

其中 μ 为正常数。

证 定义如下Lyapunov函数:

$$V = \frac{1}{2}\zeta^2,$$

由假设1)~3)和式(19),可以得到

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &\leq \zeta^T SA_{\sigma}x(t) + \zeta^T SDF_{\sigma}(t)Ex(t) + \\ &\quad \zeta^T SBu_{\sigma}(t) + \zeta^T SBf_{\sigma}(x, t) + \\ &\quad \zeta^T SG\omega(t) + \frac{\varphi}{1-\varphi}[(2-\varphi)\|SA_{\sigma}x(t)\| + \\ &\quad \|SD\| \cdot \|Ex(t)\| + \|SB\| \phi(x) + \\ &\quad \|SG\| \varpi + \mu] \|\zeta\| \leq \\ &\quad -\mu \|\zeta\| - (1-\varphi)\|SA_{\sigma}x(t)\| \|\zeta\|, \end{aligned}$$

保证了滑模面 $\zeta(x) = 0$ 可达。定理2获证。

注5 由于变结构控制系统中采用了继电器函数 $\operatorname{sign} x$,它在系统自动调节过程中,不断地进行切换,在实际工程中,系统的切换是不允许过于频繁的^[14]。文献[15]通过 $\lim_{\rho \rightarrow \infty} \tanh(\frac{x}{\rho}) = \operatorname{sgn} x$,利用 $\tanh(\frac{x}{\rho})$ 设计光滑的切换律来逼近 $\operatorname{sign} x$ 函数,减弱了高频抖振。

4 仿真示例(Simulation example)

考虑如下不确定线性切换系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + DF_i Ex(t) + B[u_i(t) + H(t)u_i(t) + f_i(x, t)] + G\omega(t), \\ z(t) = Cx(t), i = 1, 2, \end{cases} \quad (20)$$

其中: $\omega(t) = 0$; $F_1 = F_2 = \eta$, η 为不确定参数,且 $\eta \in [-1, 1]$; $f_1(x, t) = f_2(x, t) = 0$; $H(t) = 0$;

$$A_1 = \begin{bmatrix} -1 & 1.25 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ -1 & -1 & -0.5 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 1 & -0.25 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.5 \\ 1 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$D = [1 \ -1 \ 0]^T, E = [1 \ 1 \ 0].$$

取初始状态 $x(0) = [1 \ -2 \ -1]^T$,常数 $\mu = 1.5$;

选取凸组合系数: $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$;

选取扰动衰减度: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{2}}$;

通过求解不等式(5),可以得到:

$$X = \begin{bmatrix} -126.15 & 131.9427 & 289.0062 \\ 131.9427 & 391.2252 & 288.8079 \\ 289.0062 & 288.8079 & 1.1693 \end{bmatrix},$$

$$Y = 0.2605;$$

可以得到切换系统单H_∞滑模面为

$$\zeta(t) = Sx(t) = [-7.6781 \ -7.6781 \ 0] x(t) = 0,$$

由定理2可求得变结构控制器为:

$$\begin{aligned} u_1 &= -2(x_1 + 0.75x_2) - \\ &\quad 0.39 \tanh(-7.6781x_1 - 7.6781x_2), \\ u_2 &= 2(x_1 - 0.25x_2 - x_3) - \\ &\quad 0.39 \tanh(-7.6781x_1 - 7.6781x_2). \end{aligned}$$

MATLAB仿真结果如图1~4所示。

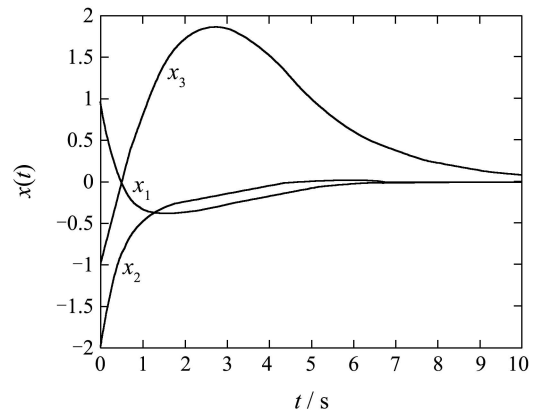


图1 第1个子系统的状态响应

Fig. 1 The state responses of the subsystem 1

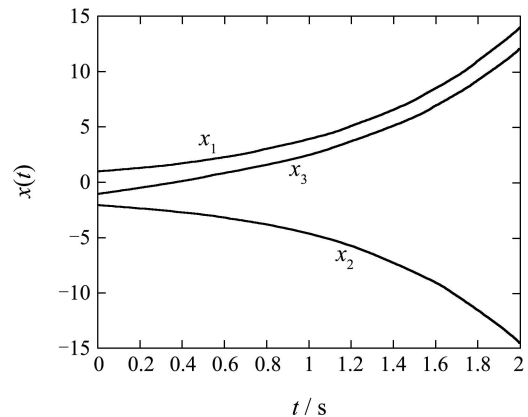


图2 第2个子系统的状态响应

Fig. 2 The state responses of the subsystem 2

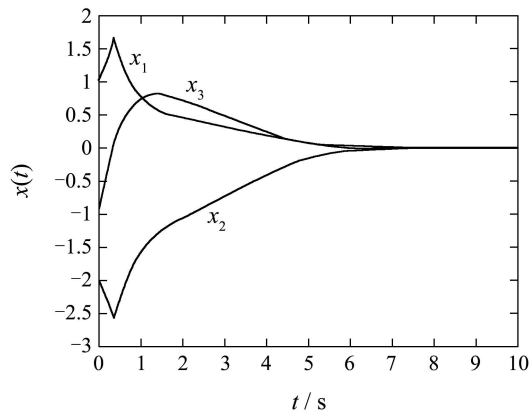


图3 切换系统(20)状态响应

Fig. 3 The state responses of switched system (20)

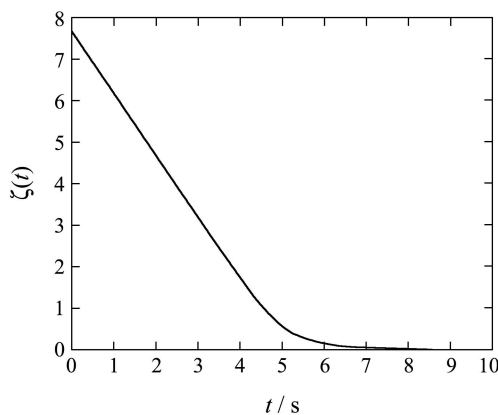


图4 滑模面变化曲线

Fig. 4 The trajectory of the sliding surface

由上述仿真结果可以看出, 对于含有一个稳定子系统和一个不稳定子系统的不确定线性切换系统(20), 在所设计切换律和变结构控制器的作用下, 其闭环系统是渐近稳定的且暂态响应优于稳定的子系统1.

5 结论(Conclusion)

本文研究了一类不确定线性切换系统的鲁棒 H_∞ 滑模控制问题. 通过求解两个LMIs, 构造单 H_∞ 滑模面, 利用切换系统单Lyapunov函数方法, 设计切换规则, 并由滑模到达条件设计子系统的变结构控制器. 在所设计切换律和变结构控制器的作用下, 系统对匹配及非匹配不确定性都具有较强的鲁棒性, 并且在单滑模面上对于非匹配外部干扰具有 H_∞ 衰减度 γ . 单滑模面的设计提高了切换系统的暂态响应性能和系统的鲁棒性.

参考文献(References):

[1] SKAFIDAS E, EVANS R J, SAVKIN A V, et al. Stability results for switched controller systems[J]. *Automatica*, 1998, 3(4): 475 – 482.

- [2] BRANICKY M S. Multiple Lyapunov function and other analysis tools for switched and hybrid systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 25(3): 330 – 334.
- [3] SUN Z, GE S S. Analysis and synthesis of switched linear control systems[J]. *Automatica*, 2005, 41(2): 181 – 356.
- [4] JI Z, WANG L, XIE G, et al. Linear matrix inequality approach to quadratic stabilization of switched systems[J]. *IEEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 2004, 151(3): 289 – 294.
- [5] XI Z, FENG G, JIANG Z P, et al. A switching algorithm for global exponential stabilization of uncertain chained systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(10): 1793 – 1798.
- [6] 孙常春, 刘玉忠. 一类不确定切换系统的鲁棒状态反馈镇定[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(5): 794 – 798.
(SUN Changchun, LIU Yuzhong. Robust state feedback stabilization for a class of uncertain switched systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(5): 794 – 798.)
- [7] UTKIN V I. Variable structure systems with sliding modes [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1977, 22(2): 212 – 222.
- [8] KIM K S, PARK Y, Oh S H. Designing robust sliding hyperplanes for parametric uncertain systems: a Riccati approach[J]. *Automatica*, 2000, 36(7): 1041 – 1048.
- [9] CHOI H H. An LMI-based switching surface design method for a class of mismatched uncertain systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(9): 1634 – 1638.
- [10] 张达科, 胡跃明. 任意切换时间下的二维线性混合系统的滑模控制[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(12): 29 – 31.
(ZHANG Dake, HU Yueming. Sliding mode control of two-dimension linear hybrid systems with random switched time[J]. *Compute Engineering & Applications*, 2004, 40(12): 29 – 31.)
- [11] SONG Y, XIANG Z R, CHEN Q W, et al. Analysis of sliding mode in planar switched systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2005, 31(5): 743 – 748.
- [12] PAN Y, FURUTA K. Stabilization of hybrid system with unstabilizable subsystems[C]//*IEEE Proceedings of the 4th International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. Guangzhou: [s.n.], 2005, 8: 18 – 21.
- [13] 聂宏, 赵军. 一类线性切换系统具有性能指标的二次稳定[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(2): 189 – 194.
(NIE Hong, ZHAO Jun. Quadratic stability with H-infinity performance for a class of switched linear systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(2): 189 – 194.)
- [14] SUN Z D, GE S S. *Switched Linear Systems-Control and Design*[M]. New York: Springer -Verlag, 2004.
- [15] KWATNY H G, TEOLIS C, Mattice M. Variable structure control of systems with uncertain nonlinear friction[J]. *Automatica*, 2002, 38(7): 1251 – 1256.
- [16] 葛友, 李春文. 非线性不确定系统的 H_∞ 滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(6): 949 – 953.
(GE You, LI Chunwen. H_∞ sliding mode control of nonlinear uncertainty systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(6): 949 – 953.)

作者简介:

连捷 (1980—), 女, 东北大学信息科学与工程学院博士研究生, 研究方向为变结构控制、切换控制, E-mail: lianjielj@163.com;

赵军 (1957—), 男, 东北大学信息科学与工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂非线性系统结构、切换系统、鲁棒控制等.