电子测量技术
ELECTRONIC MEASUREMENT TECHNOLOGY
第40卷 第12期
2017年12月

基于有限时间稳定的含不确定性离散切换系统控制

刘 冲
（上海大学机电工程与自动化学院 上海 200072）

摘 要： 针对一类含有不确定性的离散时间切换系统，研究了该类切换系统的有限时间稳定性问题。通过构造类Lyapunov函数和利用线性矩阵不等式的方法，给出了在任意切换序列条件下，能够使含不确定性的离散时间切换系统满足有限时间稳定的一个充分条件，在所给定理的基础上，对于该类切换系统进行有限时间控制，给出了使其可保持有限时间稳定的切换状态反馈控制器设计方法。最后，通过一个数值算例仿真验证了所提出方法的有效性和可行性。

关键词： 有限时间稳定；不确定性；切换系统；网络控制
中图分类号： TP13　　**文献标识码：** A　　**国家标准学科分类代码：** 510.8010

Finite-timestability for discrete-time switched system with uncertainty

Liu Chong
（Institute of Electrical and Mechanical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China）

Abstract: In this paper, the finite-time stability for a class of discrete-time switched systems with uncertainty is considered. Firstly, under the arbitrary switching signals, a sufficient condition of the finite-time stability which makes the discrete-time switched system with uncertainty stability is given by constructed the Lyapunov-like function and utilized the linear matrix inequalities methods. Second, based on the given theorem, the finite-time control problem is considered, and the method of designing the switching state feedback controllers is given. Finally, a numerical example proves the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Keywords: finite-time stability; switched system; uncertainty; network control

0 引　言

切换系统是一类特殊的混杂系统，有一族子系统和相应的切换规则构成[1]，其广泛存在于电力系统、工业控制、经济系统等实际系统[2-6]中。对于切换系统的稳定性和状态反馈镇定是切换系统理论研究的一个重要方面，目前，大多数文献都是研究切换系统在无穷时间内系统的渐进稳定和指数渐进稳定[7]。然而，在实际应用中，切换系统在某一段时间内系统的稳定性更切合实际需求，因而有限时间稳定被提出并应用于控制系统中[8]。有限时间稳定注重的是某一段时间内系统的状态维持指定范围内变化，反映了系统在一段时间上的暂态性能，因而与通常意义下的稳定性概念有着很大的区别。

早期关于有限时间稳定的结果是由Weiss等人[9]所给出，由于对有限时间稳定的缺乏验证条件，直到线性矩阵不等式被应用与有限时间稳定的研究，并取得了丰硕成果[9-12]。值得指出的是，文献[9-12]对一些系统给出了有限稳定和镇定的结果，但这些结果都是对于非切换系统的研究。考虑到切换系统在工程实际问题中广泛的应用，对于切换系统的有限时间稳定性问题的研究吸引了很多学者的关注，可参考文献[13-17]。Du等人[14]针对线性切换系统，分别对连续和离散时间切换系统进行研究，并给出了使系统稳定的一个充要条件和几个充分条件。对于含有固定时间延时的离散时间切换系统，Hou等人[15]采用了锥补线性化的方法将有限时间状态反馈控制应用其中。Lin等人[16]考虑了含有不稳定子系统的线性切换系统的有限时间稳定，并给出了使系统稳定的充分条件。林祥泽等人[17]基于线性矩阵不等式技术，给出了在任意切换信号作用下，离散线性切换系统有限时间稳定的充分条件。

然而对于切换系统有限时间稳定的研究，大部分考虑的是线性系统情况下的稳定性情况，对于含有不确定性的切换系统研究的文献还相对较少。本文对含有不确定项离散切换系统的有限时间稳定和状态反馈控制问题进行了探讨，并给出了使此类系统有限时间稳定和有限时间镇定的

收稿日期：2017-04

充分条件，最后，通过数值算例验证了方法的有效性。

符号说明：在本文中，$\boldsymbol{I}$ 表示单位矩阵，$\boldsymbol{M}>0$ 表示矩阵 $\boldsymbol{M}$ 为所有特征值均>0，$\lambda_{\max}(\boldsymbol{M})$ 和 $\lambda_{\min}(\boldsymbol{M})$ 表示矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的最大特征值和最小特征值，矩阵上标 $\boldsymbol{T}$ 表示矩阵转置。

1　系统描述和准备工作

考虑如下含不确定项离散时间切换系统：

$$\boldsymbol{x}(k+1)=\bar{A}_{\sigma(k)}\boldsymbol{x}(k)+B_{\sigma(k)}\boldsymbol{u}(k) \tag{1}$$

其中，$\boldsymbol{x}(k)\in R^n$ 表示系统状态，$\boldsymbol{u}(k)\in R^n$ 表示系统的控制输入，$\sigma(k)$ 为一个有限时间、时间齐次性的马尔科夫链切换信号，且在有限集合 $N=\{1,2,\cdots,N\}$ 取值，N 是其模态的数目。对于任意 $\sigma(k)\in N$，有 $\bar{\boldsymbol{A}}_i\in\{\boldsymbol{A}_i+\boldsymbol{L}_i\Delta_i\boldsymbol{N}_i\mid\Delta_i\in\boldsymbol{R}^{m_i\times p_i},\ \|\boldsymbol{\Delta}_i\|\leqslant w_i\}$，$i\in N$，其中，$\boldsymbol{A}_i\in\boldsymbol{R}^{n\times n}$，$\boldsymbol{L}_i\in\boldsymbol{R}^{n\times m}$ 和 $\boldsymbol{N}_i\in\boldsymbol{R}^{p\times n}$ 是常数矩阵，w_i 是给定系统的扰动半径。

对于含不确定性离散切换系统(1)，不考虑外部扰动的影响，仅考虑如的线性切换状态反馈控制器：

$$\boldsymbol{u}(k)=K_{\sigma(k)}\boldsymbol{x}(k) \tag{2}$$

下面给出有限时间稳定的定义。

定义 给定标量 $c_1>0,c_2>c_1$ $c_2>c_1$，正整数 N 及矩阵 $\boldsymbol{R}$，当 $\boldsymbol{u}(k)=0$ 时，含不确定性离散切换系统(1)是关于 $(c_1,c_2,N,\boldsymbol{R},\sigma)$ 是有限时间稳定的，如果满足：

$$\boldsymbol{x}(0)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}(0)\leqslant c_1\Rightarrow\boldsymbol{x}(k)\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}(k)<c_2$$

2　主要结果

首先，考虑控制输入 $\boldsymbol{u}(k)=0$ 情况下，重写含不确定性离散切换系统(1)为：

$$\boldsymbol{x}(k+1)=\bar{A}_{\sigma(k)}\boldsymbol{x}(k) \tag{3}$$

其中，含不确定性离散切换系统(3)的各项参数与前面的切换系统(1)的参数相同。

下面将给出含不确定项离散切换系统(3)的有限时间稳定的充分条件。

定理1 如果存在实数 $\gamma\geqslant1$，矩阵 $\boldsymbol{R}>0$ 以及对称矩阵 $\widetilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}=\boldsymbol{R}^{1/2}\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{R}^{1/2}>0$，满足：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Pi}_{11} & \boldsymbol{\Pi}_{12} & \boldsymbol{N}_i^{\mathrm{T}}\\ * & \boldsymbol{\Pi}_{22} & 0\\ * & * & \boldsymbol{\Pi}_{33}\end{bmatrix}\leqslant0 \tag{4}$$

$$\boldsymbol{L}_i^{\mathrm{T}}\widetilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}\boldsymbol{L}_i\leqslant s_i\boldsymbol{I} \tag{5}$$

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\gamma^k c_1\leqslant c_2 \tag{6}$$

其中，$i\in N$，$\boldsymbol{\Pi}_{11}=\boldsymbol{A}_i^{\mathrm{T}}\widetilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}\boldsymbol{A}_i-\gamma\widetilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}$，$\boldsymbol{\Pi}_{12}=\boldsymbol{A}_i^{\mathrm{T}}\widetilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}\boldsymbol{L}_i$，$\boldsymbol{\Pi}_{22}=\dfrac{-1}{(w_i)^2}\boldsymbol{I}$，$\boldsymbol{\Pi}_{33}=\dfrac{-1}{1+s_i(w_i)^2}\boldsymbol{I}$，$\lambda_1=\min\limits_{\forall i\in N}\lambda_{\min}(\boldsymbol{P}_i)$，$\lambda_2=\max\limits_{\forall i\in N}\lambda_{\max}(\boldsymbol{P}_i)$，则含不确定性离散切换系统(3)关于 $(c_1,c_2,N,\boldsymbol{R},\sigma)$ 是有限时间稳定。

证明：取如下类 Lyapunov 函数

$$V(\boldsymbol{x}(k))=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\widetilde{P}_{\sigma(k)}^{-1}\boldsymbol{x}(k)$$

分两步来证明定理1：

1)假设 $\sigma(k)=i,\sigma(k+1)=j$，其中，$i,j\in N$。

由构造的类 Lyapunov 函数和含不确定性离散切换系统(3)，可知：

$$V(\boldsymbol{x}(k+1))=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k+1)\widetilde{P}_{\sigma(k)}^{-1}\boldsymbol{x}(k+1)=(\bar{A}_{\sigma(k)}\boldsymbol{x}(k))^{\mathrm{T}}\widetilde{P}_{\sigma(k)}^{-1}\bar{A}_{\sigma(k)}\boldsymbol{x}(k) \tag{7}$$

将系统矩阵 $\bar{\boldsymbol{A}}_i$ 表达式代入式(7)可知，

$$V(\boldsymbol{x}(k+1))=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)((\boldsymbol{A}_i+L_i\boldsymbol{\Delta}_iN_i)^{\mathrm{T}}\cdot\widetilde{P}_{\sigma(k)}^{-1}(\boldsymbol{A}_i+\boldsymbol{L}_i\boldsymbol{\Delta}_i\boldsymbol{N}_i))\boldsymbol{x}(k)=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)(\boldsymbol{A}_i^{\mathrm{T}}\widetilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}\boldsymbol{A}_i+\boldsymbol{A}_i^{\mathrm{T}}\widetilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}\boldsymbol{L}_i\boldsymbol{\Delta}_i\boldsymbol{N}_i+(\boldsymbol{L}_i\boldsymbol{\Delta}_i\boldsymbol{N}_i)^{\mathrm{T}}\widetilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}\boldsymbol{A}_i+\boldsymbol{N}_i^{\mathrm{T}}\Delta_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}_i^{\mathrm{T}}\widetilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}\boldsymbol{L}_i\Delta_i\boldsymbol{N}_i)\boldsymbol{x}(k)=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)(\boldsymbol{E}_i+\boldsymbol{F}_i\boldsymbol{G}_i+(\boldsymbol{F}_i\boldsymbol{G}_i)^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{G}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}_i^{\mathrm{T}}\widetilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}\boldsymbol{L}_i\boldsymbol{G}_i)\boldsymbol{x}(k) \tag{8}$$

其中，$\boldsymbol{E}_i=\boldsymbol{A}_i^{\mathrm{T}}\widetilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}\boldsymbol{A}_i$，$\boldsymbol{F}_i=\boldsymbol{A}_i^{\mathrm{T}}\widetilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}\boldsymbol{L}_i$，$\boldsymbol{G}_i=\boldsymbol{\Delta}_i\boldsymbol{N}_i$。

由定理1中的条件(5)，可得：

$$\boldsymbol{E}_i+\boldsymbol{F}_i\boldsymbol{G}_i+(\boldsymbol{F}_i\boldsymbol{G}_i)^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{G}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}_i^{\mathrm{T}}\widetilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}\boldsymbol{L}_i\boldsymbol{G}_i\leqslant\boldsymbol{E}_i+\boldsymbol{F}_i\boldsymbol{G}_i+(\boldsymbol{F}_i\boldsymbol{G}_i)^{\mathrm{T}}+s_i\boldsymbol{G}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_i\leqslant\boldsymbol{E}_i+(w_i)^2\boldsymbol{F}_i(\boldsymbol{F}_i)^{\mathrm{T}}+\left(\frac{1}{w_i^2}+s_i\right)\boldsymbol{G}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_i \tag{9}$$

因为 $\|\boldsymbol{\Delta}_i\|\leqslant w_i$，$\dfrac{(\boldsymbol{\Delta}_i)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Delta}_i}{(w_i)^2}\leqslant\boldsymbol{I}$，则：

$$\left(\frac{1}{w_i^2}+s_i\right)\boldsymbol{G}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_i\leqslant(1+s_i(w_i)^2)(\boldsymbol{N}_i)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}_i \tag{10}$$

将式(9)和(10)代入式(8)，从而可得：

$$V(\boldsymbol{x}(k+1))=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k+1)\widetilde{P}_{\sigma(k)}^{-1}\boldsymbol{x}(k+1)\leqslant\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)(\boldsymbol{E}_i+(w_i)^2\boldsymbol{F}_i\boldsymbol{F}_i^{\mathrm{T}}+(1+s_i(w_i)^2)\boldsymbol{N}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}_i)\boldsymbol{x}(k) \tag{11}$$

利用 Schur 补引理，式(4)可等价于：

$$\boldsymbol{E}_i+(w_i)^2\boldsymbol{F}_i(\boldsymbol{F}_i)^{\mathrm{T}}+(1+s_i(w_i)^2)\boldsymbol{N}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}_i\leqslant\gamma\widetilde{P}_{\sigma(k)}^{-1} \tag{12}$$

从而可知：

$$V(\boldsymbol{x}(k+1))\leqslant\gamma\boldsymbol{x}_k^{\mathrm{T}}\widetilde{P}_{\sigma(k)}^{-1}x_k \tag{13}$$

2)在区间 $[0,k]$ 上，由式(13)进行迭代运算可知：

$$V(\boldsymbol{x}(k))\leqslant\gamma^kV(\boldsymbol{x}(0)) \tag{14}$$

由 $V(\boldsymbol{x}(0))=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(0)\widetilde{P}_{\sigma(0)}^{-1}\boldsymbol{x}(0)$，且已知 $\widetilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}=\boldsymbol{R}^{1/2}\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{R}^{1/2}$ 以及 λ_1 和 λ_2 的定义可得到：

$$V(\boldsymbol{x}(k))=\gamma^k\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(0)\boldsymbol{R}^{1/2}\boldsymbol{P}_{\sigma(0)}\boldsymbol{R}^{1/2}\boldsymbol{x}(0)\leqslant\gamma^k\lambda_2\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(0)\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}(0)\leqslant\gamma^k\lambda_2c_1 \tag{15}$$

$$V(\boldsymbol{x}(k))=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\widetilde{\boldsymbol{P}}_{\sigma(k)}^{-1}\boldsymbol{x}(k)\geqslant\lambda_1\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}(k) \tag{16}$$

整理式(15)和(16)可得

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}(k)\leqslant\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\gamma^kc_1\leqslant c_2$$

即含不确定性离散切换系统(3)是关于 $(c_1,c_2,N,\boldsymbol{R},\sigma)$ 有限时间稳定的。

证明完毕。

当含不确定性离散切换系统(1)的控制输入 $\boldsymbol{u}(k)\neq0$ 时，采用状态反馈控制器式(2)对系统进行闭环控制，则将

状态反馈控制器表达式(2)代入含不确定性离散切换系统(1),可得到如下闭环形式下含不确定性离散切换系统

$$x(k+1)=(\bar{A}_{\sigma(k)}+B_{\sigma(k)}K_{\sigma(k)})x(k) \tag{17}$$

在定理 1 的基础上,得出有限时间镇定状态反馈控制器的设计方法。

定理 2 如果存在实数 $\gamma\geqslant 1$,$s_i>0$,矩阵 $\boldsymbol{R}>0$ 及对称矩阵 $\tilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}=\boldsymbol{R}^{1/2}\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{R}^{1/2}>0$,满足:

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Psi}_{11} & \boldsymbol{\Psi}_{12} & N_i^{\mathrm{T}}\\ * & \boldsymbol{\Psi}_{22} & 0\\ * & * & \boldsymbol{\Psi}_{33}\end{bmatrix}\leqslant 0 \tag{18}$$

$$(\boldsymbol{L}_i)^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}\boldsymbol{L}_i\leqslant s_iI \tag{19}$$

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\gamma^k c_1\leqslant c_2 \tag{20}$$

其中,$i\in\mathcal{N}$,$\Psi_{11}=(\boldsymbol{A}_i+\boldsymbol{B}\boldsymbol{K})^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}(\boldsymbol{A}_i+\boldsymbol{B}_i\boldsymbol{K}_i)-\gamma\tilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}$,$\Psi_{12}=(\boldsymbol{A}_i+\boldsymbol{B}_i\boldsymbol{K}_i)^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{P}}_i^{-1}\boldsymbol{L}_i$,$\Psi_{22}=\dfrac{-1}{(w_i)^2}\boldsymbol{I}$,$\Psi_{33}=\dfrac{-1}{1+s_i\,(w_i)^2}\boldsymbol{I}$,$\lambda_1=\min\limits_{\forall i\in\mathcal{N}}\lambda_{\min}(\boldsymbol{P}_i)$,$\lambda_2=\max\limits_{\forall i\in\mathcal{N}}\lambda_{\max}(\boldsymbol{P}_i)$,则含不确定性离散切换系统(17)关于 $(c_1,c_2,N,\boldsymbol{R},\sigma)$ 是有限时间稳定。

证明:将定理 1 中的 $\boldsymbol{A}_i$ 用 $\boldsymbol{A}_i+\boldsymbol{B}_i\boldsymbol{K}_i$ 代替,则可得出含不确定性离散闭环切换系统(17)是关于 $(c_1,c_2,N,\boldsymbol{R},\sigma)$ 有限时间稳定的,其证明过程与定理 1 推导过程类似,不再推导。

3　数值仿真分析

在这一部分,将给出一个数值例子,通过仿真可以验证定理 1 所提方法的有效性。

考虑离散时间不确定切换系统:$\boldsymbol{x}(k+1)=\bar{A}_{\sigma(k)}\boldsymbol{x}(k)$,其中,$\sigma(k)=1,2$,$\bar{\boldsymbol{A}}_i\in\{\boldsymbol{A}_i+\boldsymbol{L}_i\boldsymbol{\Delta}_i\boldsymbol{N}_i\mid\boldsymbol{\Delta}_i\in\mathbb{R}^{m_i\times p_i},\|\boldsymbol{\Delta}_i\|\leqslant w_i\}$,矩阵 $\bar{\boldsymbol{A}}_i$ 的各项参数如下:

$$\boldsymbol{A}_1=\begin{bmatrix}0.7 & 0.2\\ 0.1 & 0.4\end{bmatrix},\boldsymbol{L}_1=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 1 & 1\end{bmatrix},\boldsymbol{N}_1=\begin{bmatrix}1 & 1\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{A}_2=\begin{bmatrix}0.5 & 0.1\\ 0.1 & 0.3\end{bmatrix},\boldsymbol{L}_2=\begin{bmatrix}1 & 2\\ 0 & 1\end{bmatrix},\boldsymbol{N}_2=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}。$$

且扰动半径为 $w_1=0.3$,$w_2=0.25$,不确定性矩阵表示如下:

$$\boldsymbol{\Delta}_1=\begin{bmatrix}0.3\sin(0.5k)\\ 0.3\cos(0.5k)\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\Delta}_2=\begin{bmatrix}0.25\cos(0.1k) & 0\\ 0 & 0.25\sin(0.1k)\end{bmatrix}。$$

利用 MATLAB 的 LMI 工具箱,对定理 1 中式(4)~(6)进行求解,可得到

$$\boldsymbol{P}_1=\begin{bmatrix}0.5707 & -0.6487\\ -0.6487 & 1.6943\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{P}_2=\begin{bmatrix}1.0469 & -2.4548\\ -2.4548 & 5.9565\end{bmatrix}。$$

由矩阵 $\boldsymbol{P}_1$ 和 $\boldsymbol{P}_2$ 分别可求出 $\lambda_1=0.039$ 和 $\lambda_2=6.9$,同时可求得 $s_1=1.5$,$s_2=1$。

在本节仿真中,令 $c_1=0.1$,$c_2=30$,$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{I}$,$\gamma=1.2$ 和 $N=7$ 是定理 1 的可行解,从而在任意切换信号 $\sigma(k)$ 作用下,含不确定性离散切换系统(3)是关于 $(0.05,30,7,\boldsymbol{I},\sigma)$ 有限时间稳定。此外,由于切换信号是任意的,本文分别采用图 1 和 2 所示的切换规则,且含不确定性离散切换系统(3)的初始状态为 $\boldsymbol{x}(0)=[0.15\quad 0.26]^{\mathrm{T}}$,则根据已给出的已知条件可得含不确定性离散切换系统在输入 $\boldsymbol{u}(k)=0$ 和不同切换条件下切换系统的状态轨迹 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}(k)$,如图 3 和 4 所示。分析图 2 和图 4 中的含不确定性离散切换系统(3)的状态轨迹 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}(k)$,可知在所给定的有限时间间隔 $k\in(0,7]$ 内,不管在切换规则 $\sigma_1(k)$ 还是任意切换规则 $\sigma_2(k)$ 作用下,系统的状态轨迹始终不超出所设定状态轨迹范围[0.05,30]。因此,通过该数值实例仿真表明含不确定性离散时间切换系统(3)在任意切换规则下是关于 $(0.05,30,7,\boldsymbol{I},\sigma)$ 有限时间稳定的,从而验证了定理 1 中所给结论的正确性和有效性。

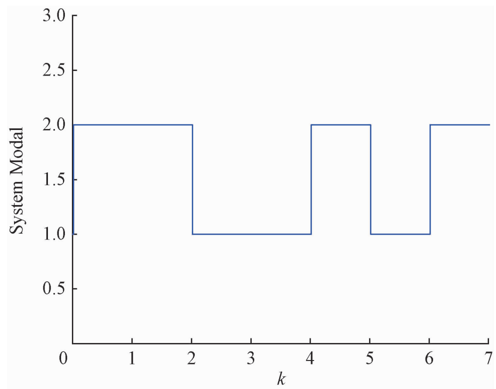

图 1　切换信号 $\sigma_1(k)$

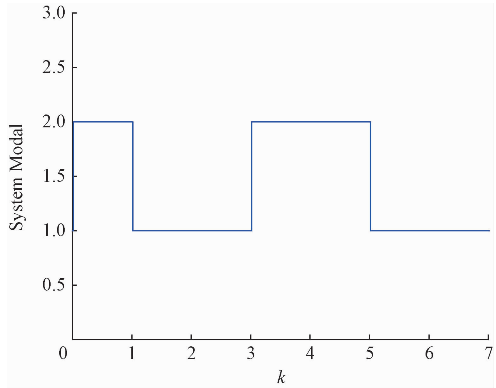

图 2　切换信号 $\sigma_2(k)$

4　结　　论

针对一类含有不确定性离散时间切换系统,研究了其有限时间稳定和有限时间镇定问题,综合利用类 Lyapunov 函数方法和线性矩阵不等式,给出了使此类系统有限时间稳定和镇定的充分条件,最后通过数值算例验证了所提方法的有效性。

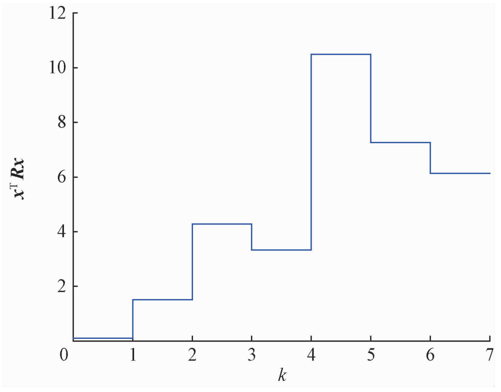

图 3　$\sigma_1(k)$ 作用下状态轨迹 $\boldsymbol{x}^{T}(k)\boldsymbol{Rx}(k)$

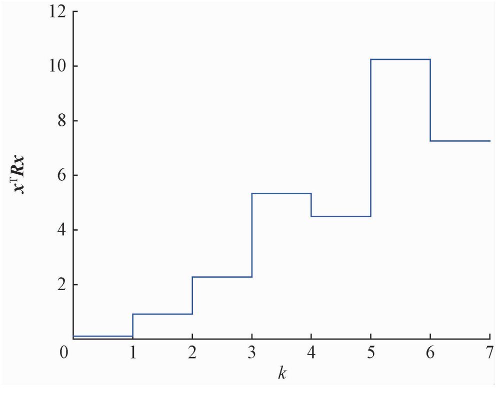

图 4　$\sigma_2(k)$ 作用下状态轨迹 $\boldsymbol{x}^{T}(k)\boldsymbol{Rx}(k)$

参考文献

[1] MALLOCI I, DAAFOUZ J, IUNG C. Stabilization of continuous-time singularly perturbed switched systems[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, IEEE, 2009:6371-6376.

[2] 许伟，徐科军，杨双龙，等. 高低压电源切换励磁控制系统的参数计算和方案改进[J]. 电子测量与仪器学报，2015,29(6):887-894.

[3] 王志杰，方一鸣，李叶红，等. 输入受限的轧机液压伺服系统多模型切换控制[J]. 仪器仪表学报，2013，34(4)：881-888.

[4] 魏振春，郭令，石雷. 基于信标同步及信道预测的井下无线网络切换机制研究[J]. 电子测量与仪器学报，2015,29(8)：1130-1136.

[5] 何成，邹伟生. 基于状态识别的矿浆输送故障停输再启动控制[J]. 电子测量与仪器学报，2016，30(4)：598-604.

[6] 刘雄，张方，姜金辉. 基于直升机 ACSR 的共振式作动器设计[J]. 国外电子测量技术，2016，35(9)：50-56.

[7] 费树岷，周强. 切换系统稳定性研究综述[J]. 机械制造与自动化，2014，43(1):1-5.

[8] KAMENKOV G V. On stability of motion over a finite interval of time[J]. Akad. NaukSssr. Prikl. Mat. Meh，1953:529-540.

[9] WWISS L, INFANTE E F. Finite time stability under perturbingforces and on product spaces[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1967, 12(1)：54-59.

[10] ZUO Z, LI H, WANG Y. New criterion for finite-time stability of linear discretetime systemswith time-varying delay[J]. Journal of the Franklin Institute, 2013, 350(9):2745-2756.

[11] AMATO F, ARIOLA M, DORATO P. Finite-time control of linear systems subject to parametricuncertainties and disturbances[J]. Automatica, 2001(37)：1459-1463.

[12] HUANG X, LIN W, YANG B. Global finite-time stabilization of a class of uncertain nonlinear systems[J]. Automatica, 2005, 41(5):881-888.

[13] AMATO, ARIOLA M, COSENTINO C. Finite-time stabilization via dynamic output feedback [J]. Automatica, 2006, 42(2):337-342.

[14] DU H, LIN X, LI S. Finite-time stability and stabilization of switched linear systems [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, IEEE Xplore, 2010:1938-1943.

[15] HOU L L, ZONG G D, WU Y Q. Finite-time control for discrete-time switched systems withtime delay [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2012, 10(4):855-860.

[16] LIN X, LI S, ZOU Y. Finite-time stability of switched linear systems with subsystems whichare not finite-timestable [J]. IET Control Theory & Applications, 2014, 8(12):1137-1146.

[17] 林相泽，都海波，李世华. 离散线性切换系统的一致有限时间稳定分析和反馈控制及其在网络控制系统中的应用[J]. 控制与决策，2011，26(6)：841-846.

作者简介

刘冲，1990 年出生，硕士研究生，主要研究方向为网络控制系统的切换稳定性。
E-mail:liuchongchn@163.com