第 22 卷 第 9 期　控 制 与 决 策　2007 年 9 月
Vol. 22 No. 9　Control and Decision　Sep. 2007

文章编号: 1001-0920(2007)09-1073-04

# 一类切换系统极限环的反馈镇定研究

林相泽[1], 李世华[2]
(1. 南京农业大学 工学院, 南京 210031; 2. 东南大学 自动化学院, 南京 210096)

**摘　要**: 利用多 Lyapunov 函数法讨论一类切换系统极限环的反馈镇定问题. 首先给出切换系统极限环的有界状态反馈、有界输出反馈以及动态反馈镇定定理; 然后利用 Jurdjevic-Quinn 方法给出反馈控制器的具体形式, 并证明了在给定反馈控制器的作用下, 切换系统的极限环渐近稳定. 仿真例子验证了结论的正确性.

**关键词**: 切换系统; Jurdjevic-Quinn 方法; 反馈镇定; 多 Lyapunov 函数; 极限环
**中图分类号**: TP13　　**文献标识码**: A

# Feedback stabilization of limit cycles of a class of switched systems

*LIN Xiang-ze*[1], *LI Shi-hua*[2]
(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China; 2. School of Automation, Southeast Uninversity, Nanjing 210096, China. Correspondent: LIN Xiang-ze, E-mail: xzlin@njau.edu.cn)

**Abstract**: The feedback stabilization of limit cycles of a class of switched systems is discussed by using multiple Lyapunov functions. Theorems for bounded state feedback stabilization, bounded output feedback stabilization and dynamic feedback stabilization of limit cycles are presented. Based on Jurdjevic-Quinn method, feedback control laws are explicitly presented. Asymptotical stability of limit cycles of the switched systems under the control of the designed controllers is proved. Simulation results show the correction of the proposed method.

**Key words**: Switched systems; Jurdjevic-Quinn method; Feedback stabilization; Multiple Lyapunov functions; Limit cycle

## 1 引　　言

Jurdjevic-Quinn 方法[1]是研究非线性系统反馈镇定问题非常有效的经典设计方法, 大量文献中的反馈控制器设计都基于此方法[2-5]. 文献[2,3]基于 Jurdjevic-Quinn 方法讨论了无源非线性系统的平衡点的反馈镇定问题; Lin[4]基于此方法, 利用有界状态反馈控制器, 讨论了一类连续非线性系统平衡点的反馈镇定问题; Shiriaev[5]则将这一方法推广到不变集的反馈控制中.

切换系统是一类既有连续动态, 又有离散动态且两者相互作用、相互影响的一类复杂非线性系统, 在工程实践中大量存在. 对它的分析与综合引起了广大学者的关注, 并取得了大量成果[6-11]. 其中 Peleties 和 DeCarlo[6] 以及 Branicky[7] 提出的多 Lyapunov 函数方法被广泛地应用于切换系统稳定性分析以及控制器设计中.

在很多实际物理系统中, 如电子振荡器[12]、行走机器人[13,14]等, 切换的引入常会使系统运动呈现周期性, 从而产生极限环. 因此, 对切换系统的极限环运动进行研究既有很好的理论价值, 又有广泛的实际应用前景. 目前, 对切换系统极限环的研究主要集中在讨论极限环的稳定性方面. Hiskens[13] 以及 Nersesov 等[15]基于 Poincare 映射方法, 分别讨论了一类切换系统极限环的稳定性. 但关于切换系统极限环的反馈镇定问题的讨论尚未见报道.

本文利用多 Lyapunov 函数方法讨论切换系统极限环的有界状态反馈镇定、有界输出反馈镇定以及动态反馈镇定, 并利用 Jurdjevic-Quinn 方法设计反馈控制器. 仿真例子验证了结论的正确性.

## 2 系统描述及相关引理

考虑切换系统

$$\dot{x} = f_i(x),\ i \in Q = \{1, 2, \cdots, N\}. \tag{1}$$

其中: $x \in X \subset R^n$ 为状态向量, $X$ 为系统状态空间, $X = \bigcup_{i=1}^{N} X_i$, $X_i\ (i \in Q)$ 是划分系统状态空间的一系

**收稿日期**: 2006-05-13; **修回日期**: 2006-08-28.
**基金项目**: 国家自然科学基金项目(60504007); 南京农业大学工学院引进人才基金项目(RCQD06-03).
**作者简介**: 林相泽(1977 —), 男, 山东青岛人, 硕士, 从事切换系统、复杂系统理论等研究; 李世华(1975 —), 男, 江西萍乡人, 副教授, 博士, 从事非线性系统控制等研究.

列内部两两互不相交的多面体;$f_i(\cdot)$ 是局部 Lipschitz 连续的. 令 $x(t)\in X$ 为定义在 $[0,T]$ 上的逐段 $C^1$ 连续的函数, $\forall t\in[0,T]$, $x(t)\in X_i$, 有 $\dot{x}(t)=f_i(x)$, 则称 $x(t)$ 为切换系统的轨迹. 当 $x(t)$ 由 $X_i$ 到达 $X_j$ 时, 向量场从 $f_i$ 变为 $f_j$. 设发生切换的时刻为 $t=t_i$, 由此可产生切换序列 $\{(\sigma(t_i),t_i)\}$, $i=1,2,\cdots$. 假设系统在有限时间内只发生有限次切换, 且 $\sigma(t_i)\neq\sigma(t_{i+1})$, $\forall i$. 本文讨论的切换系统的解是连续的, 且系统的解对初值 $x_0\in X$ 连续依赖. 关于切换系统轨迹对初值的连续依赖问题的详细讨论, 可参见文献[16].

为讨论切换系统极限环的反馈镇定, 首先给出如下引理:

**引理 1**[17] 假设切换系统(1) 的轨迹 $s(t,x_0)$ 是有界的, 即存在 $M\in R$, 使得 $\|s(t,x_0)\|<M$, $\forall t\geq 0$, 则轨迹 $s(t,x_0)$ $(t\geq 0)$ 的 $\omega$ 极限集 $\omega(x_0)$ 是一个非空的紧不变集, 且当 $t\to\infty$ 时, $s(t,x_0)\to\omega(x_0)$.

**引理 2**[17] 对切换系统(1), 假设 $X_c\subset X$ 是系统的一个紧的正不变集, 如果存在 $C^r$ $(r\geq 1)$ 的光滑函数 $V_i: X_c\cap\overline{X_i}\to R$, $i\in Q$ 且 $L_{f_i}V_i(x(t))\leq 0$, $x(t)\in X_c\cap X_i$. 在系统轨迹 $x(t)$ 由 $X_i$ 到达 $X_j$ 的切换点 $x(t_i)$, $V_j(x(t_i))\leq V_i(x(t_i))$. 令

$$K_i=\{x(t)\in X_c\cap X_i: L_{f_i}V_i(x(t))=0\},$$

$$K=\bigcup_{i=1}^{N}K_i.$$

设 $M$ 是 $K$ 中的最大不变集. 如果 $x_0\in X_c$, 那么当 $t\to\infty$ 时, $x(t,x_0)\to M$, $\overline{X_i}$ 表示集合 $X_i$ 的闭包.

## 3 极限环的有界反馈镇定

### 3.1 利用有界状态反馈镇定切换系统的极限环

考虑具有仿射非线性子系统的切换系统

$$\dot{x}=f_i(x)+g_i(x)u_i. \tag{2}$$

其中: $x\in X\subset R^n$ 为状态向量, $X$ 为系统状态空间, $u_i\in U\subseteq R^m$ 为控制输入. 任意 $i\in Q$, $f_i, g_i\in C^\infty$. 切换序列如系统(1) 所述.

对于向量域 $f_i, g_i$, $1\leq i\leq N$, 定义分布

$$D_i=\mathrm{span}\{\mathrm{ad}_{f_i}^k g_i: 0\leq k\leq n-1, 1\leq i\leq m\}.$$

根据 $D_i$, 定义集合

$$\Omega_i=\{x\in X_i\subseteq R^n: L_{f_i}^k V_i(x)=0,\ k=1,\cdots,r\},$$

$$S_i=\{x\in X_i\subseteq R^n: L_{f_i}^k L_\tau V_i(x)=0,\ \forall\tau\in D_i, k=0,1,\cdots,r-1\}.$$

**定理 1** 如果切换系统(1) 存在一个极限环 $\Gamma$, 且系统满足以下假设:

1) 存在 $\Gamma$ 的邻域 $U_0$ 及 $C^r$ $(r\geq 1)$ 函数 $V_i: R^n\to R$, $V_i|_{\Gamma\cap X_i}\equiv 0$, $V_i(x)>0$, $\forall x\notin\Gamma\cap X_i$ 且 $L_{f_i}V_i(x)\leq 0$, $\forall x\in X_i$;

2) 在系统轨迹 $x(t)$ 由 $X_i$ 到达 $X_j$ 的切换点 $x(t_i)$, $V_j(x(t_i))\leq V_i(x(t_i))$;

3) 存在 $\Gamma$ 的邻域 $U_1\subset U_0$, 使得在邻域 $U_1$ 中, $S_i\cap\Omega_i=\Gamma\cap X_i$, $i\in Q$.

则存在任意小的状态反馈控制 $u_i(x)$, 使得极限环 $\Gamma$ 渐近稳定. $u_i(x)$ 可取如下形式:

$$u_i(x)=-\frac{\beta}{1+L_{g_i}V_i(x)[L_{g_i}V_i(x)]^{\mathrm{T}}}[L_{g_i}V_i(x)]^{\mathrm{T}},\quad\forall\beta>0.$$

**证明** 对任意 $x\in U_0\cap X_i$, 取

$$u_i(x)=-\frac{\beta}{1+L_{g_i}V_i(x)[L_{g_i}V_i(x)]^{\mathrm{T}}}[L_{g_i}V_i(x)]^{\mathrm{T}},\quad\forall\beta>0.$$

对 $V_i(x)$ 求导并将上式代入可得

$$\dot{V}_i(x)=L_{f_i}V_i(x)-\frac{\beta}{1+L_{g_i}V_i(x)[L_{g_i}V_i(x)]^{\mathrm{T}}}\times L_{g_i}V_i(x)[L_{g_i}V_i(x)]^{\mathrm{T}}\leq 0. \tag{3}$$

令 $Z_i=\{x\in X_i: L_{f_i}V_i(x)=0, L_{g_{ij}}V_i(x)=0\}$, $Z=\bigcup_{i=1}^{N}Z_i$, 记 $M$ 为 $Z$ 中的最大不变集. 由假设知, $\Gamma\subseteq M$.

由式(3) 和假设 2) 可知, 能量函数沿系统轨迹是非增的. 由引理 1 和引理 2 可知, 存在 $\omega$ 极限集 $\omega(x_0)\subseteq M$, 且系统轨迹 $s(t,x_0)$ 渐近趋向于 $M$. 对任意 $x_0\in U_0$, 如果 $\omega(x_0)\subseteq\Gamma$, 则极限环 $\Gamma$ 渐近稳定; 否则, 利用反证法: 假设存在 $x_0\in U_0$, 使得集合 $\omega(x_0)\cap(M\backslash\Gamma)$ 非空. 不妨设 $x_0^*\in\omega(x_0)\cap(M\backslash\Gamma)$. 由引理 1 知, $\omega(x_0)$ 是一个非空的紧不变集, 于是系统由 $x_0^*$ 出发的正半轨线 $\gamma^+(x_0^*)\subseteq\omega(x_0)$. 因为 $M$ 是不变集, 所以切换系统(1) 由 $x_0^*$ 出发的系统轨迹 $x=s(t,x_0^*)\subseteq M\subseteq Z$ 且 $\delta_i(t)=\left(\frac{\partial V_i(x)}{\partial x}\cdot\mathrm{ad}_{f_i}^0 g_{ij}\right)(x)\equiv 0$, $\forall x=s(t,x_0^*)\in X_i$, 其中 $s(t,x_0^*)$ 是系统(1) 经过 $x_0^*$ 点的轨迹.

易知 $\delta_i(0)=\delta_i'(0)=\cdots=\delta_i^{(k)}(0)=0$, $\forall k\geq 0$, 即

$$\delta_i^{(k)}(0)=\left(\frac{\partial V_i(x)}{\partial x}\cdot\mathrm{ad}_{f_i}^k g_{ij}\right)(x_0^*)=0,\ \forall k\geq 0.$$

故 $x_0^*=s(0,x_0^*)\in S_i\cap\Omega_i$. 因为 $S_i\cap\Omega_i=\Gamma\cap X_i$, $i\in Q$, 与假设矛盾, 所以 $\omega(x_0)\subseteq\Gamma$. 由此可知, $\Gamma$ 是渐近稳定的极限环.

另外, $\|u_i(x)\|\leq\frac{1}{2}\beta_i<\beta_i$, $\forall\beta_i>0$. 取足够小的 $\beta$, 状态反馈控制 $u_i(x)$ 便可任意小. □

### 3.2　利用有界输出反馈镇定切换系统的极限环

具有无源仿射非线性子系统的切换系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f_i(x) + g_i(x) u_i, \\ y = h_i(x). \end{cases} \tag{4}$$

其中: $x \in X \subset R^n$ 为状态向量, $X$ 为系统状态空间, $u \in R^m$ 为控制输入, $h_i \in C^\infty$ 为系统输出. $\forall i \in Q$, $f_i, g_i \in C^\infty$. 切换序列如系统(1) 所述.

由定理 1 不难得到切换系统(4) 的极限环的有界输出反馈控制定理:

**定理 2**　假设切换系统(1) 存在一个极限环 $\Gamma$, 切换系统(4) 的每个子系统是无源的, 如果满足:

1) 存在 $\Gamma$ 的邻域 $U_0$ 及每个子系统存在 $C^r(r \geq 1)$ 的函数 $V_i: R^n \to R$, $V_i|_{\Gamma\cap X_i} \equiv 0$, $V_i(x) > 0$, $\forall x \notin \Gamma \cap X_i$;

2) 在系统轨迹 $x(t)$ 由 $X_i$ 到达 $X_j$ 的切换点 $x(t_i)$, $V_j(x(t_i)) \leq V_i(x(t_i))$;

3) 存在 $\Gamma$ 的邻域 $U_1 \subset U_0$, 使得在邻域 $U_1$ 中, $S_i \cap \Omega_i = \Gamma \cap X_i$, $i \in Q$.

则存在任意小的输出反馈控制 $u_i(y)$, 使得极限环 $\Gamma$ 渐近稳定. 可取

$$u_i(y) = -\beta \frac{h_i(x)}{1 + \|h_i(x)\|^2}, \forall \beta > 0.$$

**证明**　因为切换系统的子系统是无源的, 所以 $L_{g_i} V(x) = h_i^{\mathrm{T}}(x)$. 由定理 1 不难得到定理 2. □

## 4　极限环的动态反馈镇定

**定理 3**　如果切换系统(1) 存在一个极限环 $\Gamma$, 且系统满足以下假设:

1) 存在 $\Gamma$ 的邻域 $U_0$ 及 $C^r(r \geq 1)$ 函数 $V_i: R^n \to R$, $V_i|_{\Gamma\cap X_i} \equiv 0$, $V_i(x) > 0$, $\forall x \notin \Gamma \cap X_i$ 且 $L_{f_i} V_i(x) \leq 0$, $\forall x \in X_i$;

2) 在系统轨迹 $x(t)$ 由 $X_i$ 到达 $X_j$ 的切换点 $x(t_i)$, $V_j(x(t_i)) \leq V_i(x(t_i))$;

3) 存在 $\Gamma$ 的邻域 $U_1 \subset U_0$, 使得在邻域 $U_1$ 中, $S_i \cap \Omega_i = \Gamma \cap X_i$, $i \in Q$.

则存在动态反馈控制器, 使得极限环 $\Gamma$ 渐近稳定. 动态反馈控制器可取

$$\begin{cases} \dot{\xi} = -[L_{g_i} V_i(x)]^{\mathrm{T}} - \xi, \\ u_i = \xi. \end{cases} \tag{5}$$

**证明**　利用动态反馈控制器(5) 可得闭环系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f_i(x) + g_i(x)\xi, \\ \dot{\xi} = -[L_{g_i} V_i(x)]^{\mathrm{T}} - \xi. \end{cases} \tag{6}$$

取 Lyapunov 函数 $W_i(x,\xi) = V_i(x) + \frac{1}{2}\xi^{\mathrm{T}}\xi$, 求导得

$$\dot{W}_i(x,\xi) = L_{f_i} V_i(x) - \xi^{\mathrm{T}}\xi \leq 0.$$

由假设 2) 知, 在系统轨迹 $x(t)$ 由 $X_i$ 到达 $X_j$ 的切换点 $x(t_i)$, $V_j(x(t_i)) \leq V_i(x(t_i))$, 因此在切换点 $x(t_i)$ 上闭环系统(6) 的能量函数 $W_i(x,\xi)$ 也是非增的. 由此可知, 闭环系统(6) 的能量函数 $W_i(x,\xi)$ 沿系统轨迹是非增的.

令 $\dot{W}_i(x,\xi) = 0$, 则 $L_{f_i} V_i(x) = 0$, $\xi = 0$. 于是, $\dot{\xi} = \{-[L_{g_i} V_i(x)]^{\mathrm{T}} - \xi\}_{\xi=0} = 0$, $L_{g_i} V_i(x) = 0$. 经迭代运算可知

$$L_{f_i}^{k+1} V_i(x) = 0, L_{f_i}^k L_\tau V_i(x) = 0,$$
$$\forall \tau \in D, 0 \leq k \leq r-1.$$

由假设 3), 对任意 $(x,\xi) \in \{(x,\xi): \dot{W}_i(x,\xi) = 0\}$, 可得 $x \in \Gamma$, $\xi = 0$. 由引理 2, 极限环渐近稳定. □

## 5　仿真例子

具有 $A$, $B$ 两个子系统的切换系统为

$$A: \dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{4} \\ 4 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & -8 \end{bmatrix} u_A,$$

$$B: \dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & -2 \\ \frac{1}{2} & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} -2\sqrt{2} & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} u_B.$$

将状态空间 $R^2$ 划分为

$$X_A = \left\{x: |x_1| \leq \frac{\sqrt{5}}{2}|x_2|\right\},$$

$$X_B = \left\{x: |x_1| \geq \frac{\sqrt{5}}{2}|x_2|\right\}.$$

取

$$V_A(x) = \frac{1}{4}\left(x_1^2 + \left(\frac{x_2}{4}\right)^2 - 1\right)^2,$$

$$V_B(x) = \frac{1}{4}\left(\left(\frac{x_1}{2}\right)^2 + x_2^2 - 1\right)^2,$$

则 $L_{f_A} V_A(x) \equiv 0$, $L_{f_B} V_B(x) \equiv 0$, 且在系统的切换面 $\left\{(x_1, x_2): |x_1| = \frac{\sqrt{5}}{2}|x_2|\right\}$ 上, $V_A(x) \equiv V_B(x)$. 因此极限环

$$\Gamma = \{x \in X_A: x_1^2 + (x_2/4)^2 = 1\} \cup \{x \in X_B: (x_1/2)^2 + x_2^2 = 1\}$$

是稳定的, 但不是渐近稳定的.

利用有界状态反馈, 取如下控制器:

$$u_A = \frac{x_1^2 + \left(\frac{x_2}{4}\right)^2 - 1}{4 + (x_1^2 + x_2^2)\left(x_1^2 + \left(\frac{x_2}{4}\right)^2 - 1\right)^2} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix},$$

$$u_B = \frac{\sqrt{2}\left(\left(\frac{x_1}{2}\right)^2 + x_2^2 - 1\right)}{2 + (x_1^2 + x_2^2)\left(\left(\frac{x_1}{2}\right)^2 + x_2^2 - 1\right)^2} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}.$$

可以验证 $S_i \cap \Omega_i = \Gamma \cap X_i$, $i = \{A, B\}$. 由定理 1 可知, 极限环 $\Gamma$ 在控制器作用下渐近稳定.

取初始值 $x(0) = (-2.2, 2.4)$,如图 1 所示,切换系统的极限环在控制 $u_A$ 和 $u_B$ 的作用下渐近稳定.

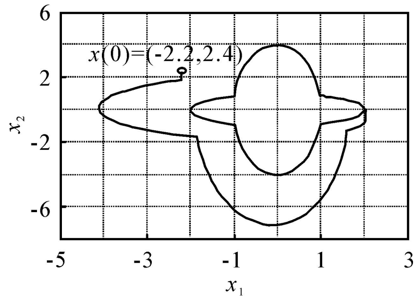


图 1 有界状态反馈

对极限环进行动态反馈镇定. 取反馈控制器

$$A:\begin{cases}\dot{\xi} = \frac{1}{2}\left(x_1^2 + \left(\frac{x_2}{4}\right)^2 - 1\right)\begin{bmatrix}x_1\\x_2\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\xi_1\\\xi_2\end{bmatrix},\\ u_A = \xi;\end{cases}$$

$$B:\begin{cases}\dot{\xi} = \frac{\sqrt{2}}{2}\left(\left(\frac{x_1}{2}\right)^2 + x_2^2 - 1\right)\begin{bmatrix}x_1\\x_2\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\xi_1\\\xi_2\end{bmatrix},\\ u_B = \xi.\end{cases}$$

取初始值 $x(0) = (-2.2, 2.4)$, $\xi(0) = (3, 4)$,如图 2,图 3 所示,切换系统的极限环在动态反馈控制作用下渐近稳定,且动态反馈控制器的轨迹 $\xi(t) \to 0$, $t \to \infty$.

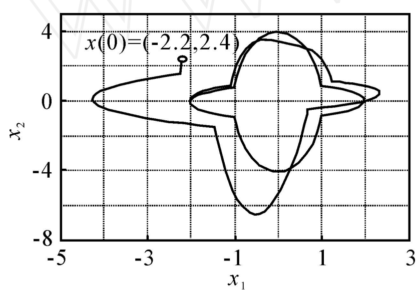


图 2 动态反馈

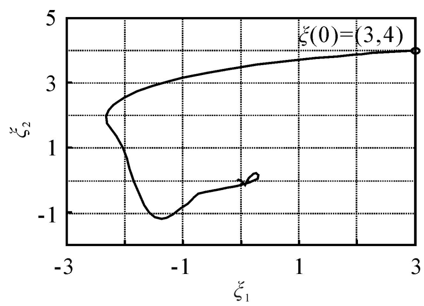


图 3 $\xi$ 轨迹图

## 6 结 语

本文利用多 Lyapunov 函数讨论了一类切换系统极限环的有界状态反馈、有界输出反馈镇定以及动态反馈镇定问题,给出了相应的反馈镇定定理,并利用 Jurdjevic-Quinn 方法设计了反馈镇定控制器. 通过仿真例子验证了文中结论的正确性.

## 参考文献(References)


[1] Jurdjevic V, Quinn J P. Controllability and stability[J]. J of Differential Equations, 1978, 28(3): 381-389.

[2] Byrnes C I, Isidori A, Willems J C. Passivity, feedback equivalence, and the global stabilization of minimum phase nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1991, 36(11): 1228-1240.

[3] Hill D, Moylan P. The stability of the nonlinear dissipative systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1976, 21(5): 708-711.

[4] Lin W. Global asymptotic stabilization of general nonlinear systems with stable free dynamics via passivity and bounded feedback[J]. Automatica, 1996, 32(6): 915-924.

[5] Shiriaev A S. The notion of V-detectability and stabilization of invariant sets of nonlinear systems[J]. System and Control Letters, 2000, 39(5): 327-338.

[6] Peleties P, DeCarlo R A. Asymptotic stability of m-switched systems using Lyapunov-like functions[C]. Proc of American Control Conf. Arizona, 1991: 1679-1684.

[7] Branicky M. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 43(4): 475-482.

[8] Ye H, Michel A N, Hou L. Stability theory for hybrid dynamical systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 43(4): 475-482.

[9] Liberzon D, Morse A S. Basic problems in stability and design of switched systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1999, 19(5): 59-70.

[10] Hespanha J P. Uniform stability of switched linear systems: Extensions of LaSalle's invariance principle[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(4): 470-482.

[11] Hespanha J P, Liberzon D, Angeli D, et al. Nonlinear norm-observability notions and stability of switched systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(2): 154-168.

[12] Arrowsmith D K, Place C M. Dynamical systems — Differential equations, maps and chaotic behavior[M]. London: Chapman & Hall, 1992.

[13] Hiskens I A. Stability of hybrid system limit cycles: Application to the compass gait biped robot[C]. Proc of the 40th IEEE Conf on Decision and Control. Orlando, 2001: 774-779.

[14] Spong M W. The passivity paradigm in robot control[C]. Proc of the 23rd Chinese Control Conf. Wuxi, 2004: 15-23.


(下转第 1080 页)

工业出版社, 2003.
(Li Deng-feng. Fuzzy multi-objective many-person decision makings and games [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.)

[6] 李敏. 试论指派问题的对称解法[J]. 青海大学学报, 1997, 15(3): 13-19.
(Li Min. A trial discussion on the symmetrical solving method of allotter problem[J]. J of Qinghai University, 1997, 15(3): 13-19.)

[7] Kang C Y, Zhang X H, Zhang A H, et al. Underwater acoustic targets classification using welch spectrum estimation and neural networks[C]. Advances in Neural Networks ISNN2004. Dalian: Springer, 2004: 930-935.

[8] Zhang X H, Kang C Y, Xia Z J. Recognition of radiated noises of ships using auditory features and support vector machines [C]. Advances in Neural Networks ISNN2005. Chongqing: Springer, 2005: 387-392.


(上接第 1072 页)


[4] Wu M, He Y, She J H. Delay-dependent criteria for robust stability of time-varying delay systems [J]. Automatica, 2004, 40:1435-1439.

[5] Xu S, James L. Improved delay-dependent stability criteria for time-delay systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(3): 384-387.

[6] Xu S, James L, Zou Y. New results on delay-dependent robust $H_\infty$ control for systems with time-varying delays [J]. Automatica, 2006, 42(2): 343-348.

[7] Dai L Y. Singular Control Systems[M]. Berlin: Spring-Verlag, 1989.

[8] Xu S Y, Paul V D, Stefan R, et al. Robust stabilization for singular systems with state delay and parameter uncertainty [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 47(7): 1122-1128.

[9] Masubuchi, Kamitane Y, Ohara A, et al. $H_\infty$ control for descriptor systems: A matrix inequalities approach [J]. Automatica, 1997, 33(4): 669-673.

[10] Fridman E. Stability of linear descriptor systems with delay: A Lyapunov-based approach [J]. J of Mathematics Analysis and Application, 2002, 273(1): 24-44.

[11] Zhong R X, Yang Z. Robust stability analysis of singular linear system with delay and parameter uncertainty [J]. J of Control Theory and Appplications, 2005, 22(2): 195-199.

[12] Xie Li. Output feedback $H_\infty$ control of systems with parameter uncertainty[J]. Int J Control, 1996, 63(4): 741-750.


(上接第 1076 页)


[15] Nersesov S G, Chellaboina V, Haddad W M. A generalization of Poincare's theorem to hybrid and impulsive dynamical systems [C]. Proc of American Control Conf. Anchorage, 2002: 1240-1245.

[16] Lygeros J, Johansson K H, Simic S N, et al. Dynamical properties of hybrid automata [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(1): 2-16.

[17] 林相泽, 田玉平. 切换系统的不变性原理与不变集的状态反馈镇定[J]. 控制与决策, 2005, 20(2): 127-131.
(Lin Xiang-ze, Tian Yu-ping. Invariance principle and state feedback stabilization of invariant sets of switched systems[J]. Control and Decision, 2005, 20(2): 127-131.)


# 下 期 要 目