

文章编号: 1001-0920(2007)08-0956-05

# 混杂切换 Hamilton 系统的 H 控制

朱礼营, 王玉振

(山东大学 控制科学与工程学院, 济南 250061)

**摘要:** 研究含无穷个子模型的混杂切换 Hamilton 系统在(任意)切换路径下的 H 控制问题. 对于系统存在外部干扰的情况, 利用耗散 Hamilton 结构特性, 给出系统在(任意)切换路径下的 H 控制器的设计方案; 并将新结果用于一般非线性混杂切换系统中, 得到了该类系统的 H 控制器. 仿真例子验证了所得结果的正确性和实用性.

**关键词:** 混杂切换 Hamilton 系统; H 鲁棒控制; 耗散结构; 充分条件

中图分类号: TP273

文献标识码: A

## H control strategy for hybrid and switched Hamiltonian systems

ZHU Li-ying, WANG Yu-zhen

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Ji 'nan 250061, China. Correspondent: ZHU Li-ying, E-mail: lyzhu@mail.sdu.edu.cn)

**Abstract:** Based on the Hamiltonian structural properties, an H control scheme is obtained for hybrid and switched Hamiltonian systems with infinite subsystems under (arbitrary) switching paths. By utilizing the new result obtained, an H controller is designed for ordinary nonlinear hybrid and switched systems under exterior interference. An example with numerical simulations shows that the new controller obtained here is very effective.

**Key words:** Hybrid and switched Hamiltonian systems; H robust control; Dissipative structure; Sufficient condition

### 1 引言

广义 Hamilton 系统的 Hamilton 函数是系统的总能量, 在一定条件下可构成系统的 Lyapunov 函数. 因此, 广义 Hamilton 系统已在众多的控制问题中表现出明显的优越性, 并得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>. 然而, 对于许多实际问题, 仅用单个 Hamilton 模型难以获得更高的建模精度和控制性能, 混杂 Hamilton 系统已逐渐受到重视<sup>[4-5]</sup>, 近年来, 切换系统成为人们的研究热点之一<sup>[6-12]</sup>. 目前, 对于含有有限个子模型的切换系统, 已有许多重要研究成果<sup>[6-10]</sup>. 其中, 共同 Lyapunov 函数<sup>[6]</sup>和多重 Lyapunov 函数法<sup>[8]</sup>已成为目前分析切换系统稳定性的两种主要工具.

在实际工业过程中, 由于系统本身固有属性以及某些随机因素的影响, 实际系统的某些参数会在无穷多个变量间发生跳变. 这类系统可由含无穷个子模型的混杂切换系统来刻画. 因而, 研究无穷个子模型的混杂切换系统, 不但具有重要的理论意义, 而且还有较好的应用前景. 然而, 研究该类系统难度很

大, 这是因为, 从有限多个子系统推广至无限多个子系统时, 现有的研究方法已不再适用. 在文献[11]中, 作者率先提出一类含无穷个子模型的混杂切换 Hamilton 系统, 并研究了该类混杂系统的稳定性. 据作者所知, 目前还没有关于这类系统的 H 控制的研究结果.

本文基于文献[11]所得的稳定结果, 研究含无穷个子模型的混杂切换 Hamilton 系统在(任意)切换路径下的 H 控制问题. 首先针对系统有外部干扰的情形, 给出一种 H 鲁棒控制方案; 然后, 将得到的新结果运用到一般非线性混杂切换系统中, 得到了该类系统的 H 控制器; 最后, 通过数值仿真验证了所得结果的正确性和实用性.

### 2 预备知识

考虑如下带干扰的混杂切换 Hamilton 系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = [J(x, (t)) - R(x, (t))] \nabla H(x, (t)) + \\ \quad g_1(x, (t)) u + g_2(x, (t)) \quad , \\ z = h(x, (t)) g_1^T(x, (t)) \nabla H(x, (t)) \quad , \\ (t) = c_m \quad K, t \in [t_m, t_{m+1}), m = 0, 1 \dots \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2006-05-23; 修回日期: 2006-09-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(G60474001); 教育部博士点专项基金项目(G20040422059).

作者简介: 朱礼营(1972—), 男, 山东莒南人, 博士生, 从事混杂(切换) Hamilton 控制系统理论研究; 王玉振(1963—), 男, 山东肥城人, 教授, 博士生导师, 从事非线性控制、Hamilton 系统理论等研究.

其中:  $x \in \mathbb{R}^n$  是系统的状态,  $u \in \mathbb{R}^m$  是输入,  $w \in \mathbb{R}^q$  是外部干扰;  $J^T(x, c) = -J(x, c) \in \mathbb{R}^{n \times n}, 0 \in R(x, c) \in \mathbb{R}^{n \times n}, g(x, c) \in \mathbb{R}^{n \times m}; H(x, c)$  是子系统的 Hamilton 函数(总能量), 且满足  $H(x, c) > 0 (\forall 0 \neq x \in \mathbb{R}^n, \forall c \in K), H(0, c) = 0$  以及  $\nabla H(x, c) = \partial H(x, c) / \partial x (\forall c \in K); g_1(x, c) \in \mathbb{R}^{n \times m}, g_2(x, c) \in \mathbb{R}^{n \times q}; z \in \mathbb{R}^s$  是罚信号,  $h(x, c)$  是一权矩阵;  $(t) : [t_0, +\infty) \rightarrow K \subseteq \mathbb{R}$  是分段常值函数, 称为切换路径, 并且  $(t) = c_m \in K, m = 0, 1, \dots$  表示第  $c_m$  个子系统起作用;  $K$  是一有界闭集,  $\{t_m\}_{m=0}^{\infty}$  是其切换时间序列, 且满足

$$t_0 < t_1 < \dots < t_m < \dots, m = 0, 1, \dots; \quad (2)$$

$\{x_m\}_{m=0}^{\infty}$  是相应于切换时间序列的切换状态序列.

为方便起见, 令  $Z_+ := \{0, 1, \dots\}$  表示非负整数集;  $c := \{c_0, c_1, \dots\}$  表示切换指标集;  $T_m := [t_m, t_{m+1}) (m \in Z_+)$  表示时间区间. 不失一般性, 本文假定切换路径满足式(2) 以及: 1)  $t_m + \epsilon \in T_m + \epsilon$ ; 2) 指标集  $c$  不是一单点集.

类似文献[12], 给出如下假设:

**假设 1** 对  $\forall c \in K$  和  $\forall x, y \in \mathbb{R}^n$ , Hamilton 函数  $H(x, c)$  满足  $H(x, c) > H(y, c) \Leftrightarrow x^T P x > y^T P y$ , 其中  $x^T P x := \sup_{x \in \mathbb{R}^n} x^T P x, P > 0$  为一正定矩阵.

**注 1** 假设 1 要求  $H(x, c)$  的函数值随  $x$  的  $P$  范数增加而增加. 显然, 这一假设对绝大多数的切换 Hamilton 系统来说都能满足, 因而是一合理假设.

在假设 1 下, 有如下结论:

**引理 1<sup>[11]</sup>** 在假设 1 下, 若  $R(x, c) > 0, \forall c \in K$ , 则当  $u = 0$  和  $w = 0$  时, 系统(1) 对于任意切换路径  $(t)$  都是全局渐近稳定的.

**引理 2<sup>[11]</sup>** 在假设 1 下, 若系统(1) 存在某个常数  $c_l \in K$  使得  $R(x, c_l) > 0$ , 并且对于某一给定的切换路径  $(t)$ , 存在一个切换时间子序列  $\{t_{m_k}\}_{k=0}^{\infty}$  使得  $(t) = c_l, t \in [t_{m_k}, t_{m_{k+1}})$ , 则当  $u = 0$  和  $w = 0$  时, 系统(1) 在该路径  $(t)$  下是全局渐近稳定的.

### 3 混杂切换 Hamilton 系统的 H 控制

本节研究系统(1) 的 H 控制问题. 基于非线性系统的  $L_2$  干扰抑制理论, 设计系统(1) 的一类 H 鲁棒控制器.

设计目标是: 考虑系统(1). 给定一干扰抑制水平  $\gamma > 0$  和任一切换路径  $(t)$ , 设计一个反馈控制律  $u = u(x, (t))$  使得:

R1: 对任意  $c_m \in K, -$  耗散不等式

$$\dot{H}(x(t), c_m) + Q(x(t), c_m) - \frac{1}{2} \{ \gamma^2 (w^T w) - z^T z \},$$

$$\forall t \in T_m, m \in Z_+, \quad (3)$$

沿着由系统(1) 和  $u = u(x, (t))$  构成的闭环系统的所有轨线都成立, 其中,  $Q(x, c) = 0$  为一标量函数;

R2: 当无外部干扰( $w = 0$ ) 时, 闭环系统渐近稳定.

对于上述的控制设计, 有如下结果:

**定理 1** 在假设 1 下, 若给定一干扰抑制水平  $\gamma > 0$ , 对  $\forall c \in K$  满足

$$R(x, c) + \frac{1}{2} [g_1(x, c) g_1^T(x, c) - g_2(x, c) g_2^T(x, c)] > 0, \\ R(x, c) + g_1(x, c) \left[ \frac{1}{2} h^T(x, c) h(x, c) + \frac{1}{2} I_m \right] g_1^T(x, c) > 0,$$

则在任意切换路径  $(t)$  下, 系统(1) 满足 R1 和 R2 的 H 鲁棒控制器可设计为  $u = u(x, (t))$ , 即

$$u(x, c_m) = - \left[ \frac{1}{2} h^T(x, c_m) h(x, c_m) + \frac{1}{2} I_m \right] g_1^T(x, c_m) \nabla H(x, c_m), \\ t \in T_m, m = 0, 1, \dots \quad (4)$$

其中:  $I_m$  为  $m \times m$  单位矩阵,  $Q(x, c_m)$  可取为

$$Q(x, c_m) = \nabla^T H(x, c_m) [R(x, c_m) + \frac{1}{2} (g_1(x, c_m) g_1^T(x, c_m) - g_2(x, c_m) g_2^T(x, c_m))] \nabla H(x, c_m) > 0.$$

**证明** 设  $(t) = c_m \in K, t \in T_m, m \in Z_+$  为一任意切换路径. 对于  $c_m \in K$ , 由式(1) 和(4) 可得

$$\dot{H}(x(t), c_m) = \nabla^T H(x, c_m) [J(x, c_m) - R(x, c_m)] \nabla H(x, c_m) + \nabla^T H(x, c_m) g_1(x, c_m) u + \nabla^T H(x, c_m) g_2(x, c_m) w - \nabla^T H(x, c_m) R(x, c_m) \nabla H(x, c_m) - \frac{1}{2} \nabla^T H(x, c_m) g_1(x, c_m) g_1^T(x, c_m) \times \nabla H(x, c_m) + \nabla^T H(x, c_m) g_2^T(x, c_m) \nabla H(x, c_m) - \frac{1}{2} \nabla^T H(x, c_m) g_1(x, c_m) h^T(x, c_m) \times h(x, c_m) g_1^T(x, c_m) \nabla H(x, c_m) - \nabla^T H(x, c_m) [R(x, c_m) - \frac{1}{2} g_2(x, c_m) g_2^T(x, c_m) + \frac{1}{2} g_1(x, c_m) g_1^T(x, c_m)] \nabla H(x, c_m) -$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \nabla^T H(x, c_m) g_2(x, c_m) g_2^T(x, c_m) \times \\ & \nabla H(x, c_m) + \frac{1}{2} \nabla^T H(x, c_m) g_2(x, c_m) + \\ & \frac{1}{2} g_2^T(x, c_m) \nabla H(x, c_m) - \\ & \frac{1}{2} ( \quad^2 + \quad^2 - z^2 ) = \\ & - \nabla^T H(x, c_m) [ R(x, c_m) - \\ & \frac{1}{2} g_2(x, c_m) g_2^T(x, c_m) + \\ & \frac{1}{2} g_1(x, c_m) g_1^T(x, c_m) ] \nabla H(x, c_m) + \\ & \frac{1}{2} ( \quad^2 - z^2 ) - \frac{1}{2} \quad - \\ & \frac{1}{2} g_2^T(x, c_m) \nabla H(x, c_m) \quad^2, t \in T_m. \end{aligned}$$

由上式得

$$\begin{aligned} & H(x(t), c_m) + \nabla^T H(x, c_m) [ R(x, c_m) + \\ & \frac{1}{2} ( g_1(x, c_m) g_1^T(x, c_m) - \\ & g_2(x, c_m) g_2^T(x, c_m) ) ] \nabla H(x, c_m) = \\ & \frac{1}{2} ( \quad^2 - z^2 ) - \frac{1}{2} \quad - \\ & \frac{1}{2} g_2^T(x, c_m) \nabla H(x, c_m) \quad^2 \\ & \frac{1}{2} ( \quad^2 - z^2 ), t \in T_m. \end{aligned}$$

故 R1 满足.

当  $\epsilon = 0$  时, 闭环系统可表示为

$$\begin{aligned} \dot{x} = & [ J(x, c_m) - \{ R(x, c_m) + \\ & g_1(x, c_m) ( \frac{1}{2} h^T(x, c_m) h(x, c_m) + \\ & \frac{1}{2} I_m ) g_1^T(x, c_m) \} ] \nabla H(x, c_m), \end{aligned} \quad (5)$$

其中:  $t \in T_m, c_m \in K, m \in Z_+$ . 因为假设 1 对系统 (1) 成立, 所以由系统 (5) 和引理 1 知, 当  $\epsilon = 0$  时闭环系统渐近稳定, 即 R2 也满足.

**定理 2** 在假设 1 下, 若给定一干扰抑制水平  $\epsilon > 0$ , 对  $\forall c \in K$  满足

$$\begin{aligned} R(x, c) + \frac{1}{2} [ g_1(x, c) g_1^T(x, c) - \\ g_2(x, c) g_2^T(x, c) ] > 0. \end{aligned}$$

若系统 (1) 存在某个常数  $c_l \in K$  使得

$$\begin{aligned} R(x, c_l) + g_1(x, c_l) [ \frac{1}{2} h^T(x, c_l) h(x, c_l) + \\ \frac{1}{2} I_m ] g_1^T(x, c_l) > 0. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R(x, c_l) + g_1(x, c_l) [ \frac{1}{2} h^T(x, c_l) h(x, c_l) + \\ \frac{1}{2} I_m ] g_1^T(x, c_l) > 0, \\ \forall c_l \in c_l, i, l \in Z_+ \end{aligned}$$

成立, 并对某一给定的切换路径  $(t)$ , 存在一切换时间子序列  $\{ t_{m_k} \}_{k=0}^{\infty}$  使得  $(t) = c_l, t \in [t_{m_k}, t_{m_{k+1}})$ , 则系统 (1) 在该路径  $(t)$  下满足 R1 和 R2 的鲁棒控制器可设计为式 (4).

证明 类似于定理 1, 由引理 2 可得定理 2.

### 4 几个推论

考虑如下系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, (t)) + g_1(x, (t)) u + \\ \quad g_2(x, (t)) \quad, \\ (t) = c_m \quad K, t \in T_m, m = 0, 1, \dots \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $x \in R^n$  是系统状态,  $u$  是控制输入,  $R^s$  是外界干扰;  $f(x, \cdot): R^n \rightarrow R^n$  是连续向量场并且  $f(0, \cdot) = 0, \forall \cdot \in K$ , 映射  $(t): [t_0, +\infty) \rightarrow K$  是一段常值函数.

**假设 2** 系统 (6) 的每一子系统都存在一 Lyapunov 函数  $V(x, c), \forall c \in K$ , 且对  $\forall x, y \in R^n$  满足  $V(x, c) > V(y, c) \Leftrightarrow x^p > y^p$ .

在假设 2 下, 为研究系统 (6) 的  $H$  鲁棒控制, 取罚信号为

$$z = h(x(t), c_m) g_1^T(x(t), c_m) \nabla V(x(t), c_m),$$

其中:  $t \in T_m, m = 0, 1, \dots$

类似上一节, 系统 (6) 的  $H$  鲁棒控制可表述如下:

设计目标: 给定一干扰抑制水平  $\epsilon > 0$  和任一切换路径  $(t)$ , 设计一个反馈控制律  $u = u(x, (t))$  使得:

R1: 对任意  $c_m \in K$  以及  $\forall t \in T_m, m \in Z_+$ , - 耗散不等式

$$\begin{aligned} \dot{V}(x(t), c_m) + Q(x(t), c_m) \\ \frac{1}{2} \{ \quad^2 - z(x(t)) \quad^2 \}, \end{aligned} \quad (7)$$

沿着由系统 (6) 和  $u = u(x, (t))$  构成的闭环系统的所有轨线都成立, 其中  $Q(x, c_m) > 0$  为一标量函数;

R2: 当无外部干扰 ( $\epsilon = 0$ ) 时, 闭环系统渐近稳定.

类似文献 [11], 由 Hamilton 实现理论<sup>[2,3]</sup> 以及第 3 节的结果可得系统 (6) 的如下  $H$  鲁棒控制结果 (证明略):

**推论 1** 在假设 1 下, 若给定一干扰抑制水平  $\epsilon > 0$ , 对  $\forall c \in K$  满足:



$$1) \frac{L_{f(x,c)}V(x,c)}{\nabla V(x,c)} \frac{1}{2} I_n + \frac{1}{2} [g_2(x,c) g_2^T(x,c) - g_1(x,c) g_1^T(x,c)] \leq 0;$$

$$2) - \frac{L_{f(x,c)}V(x,c)}{\nabla V(x,c)} \frac{1}{2} I_n + g_1(x,c) \times \left[ \frac{1}{2} h^T(x,c) h(x,c) + \frac{1}{2} I_m \right] g_1^T(x,c) > 0.$$

则在任意切换路径  $(t)$  下,系统(6) 满足 R1 和 R2 的鲁棒控制器可设计为  $u = u(x, (t))$ , 即

$$u(x, c_m) = - \left[ \frac{1}{2} h^T(x, c_m) h(x, c_m) + \frac{1}{2} I_m \right] \times g_1^T(x, c_m) \nabla V(x, c_m), t \in [t_m, t_{m+1}), m = 0, 1, \dots \quad (8)$$

其中:  $I_m$  为  $m \times m$  单位矩阵,  $Q(x, c_m)$  可取为

$$Q(x, c_m) = - \nabla^T V(x, c_m) \left[ \frac{L_{f(x,c_m)}V(x, c_m)}{\nabla V(x, c_m)} \frac{1}{2} I_n + \frac{1}{2} (g_2(x, c_m) g_2^T(x, c_m) - g_1(x, c_m) g_1^T(x, c_m)) \right] \nabla V(x, c_m) \leq 0.$$

**推论 2** 在假设 1 下,若给定一干扰抑制水平

$\epsilon > 0$ , 对  $\forall c \in K$  满足

$$\frac{L_{f(x,c)}V(x,c)}{\nabla V(x,c)} \frac{1}{2} I_n + \frac{1}{2} [g_2(x,c) g_2^T(x,c) - g_1(x,c) g_1^T(x,c)] \leq 0.$$

若系统(1) 存在某个常数  $c_l \in Q$  使得

$$- \frac{L_{f(x,c_l)}V(x, c_l)}{\nabla V(x, c_l)} \frac{1}{2} I_n + g_1(x, c_l) \left[ \frac{1}{2} h^T(x, c_l) h(x, c_l) + \frac{1}{2} I_m \right] g_1^T(x, c_l) > 0,$$

$$- \frac{L_{f(x,c_l)}V(x, c_l)}{\nabla V(x, c_l)} \frac{1}{2} I_n + g_1(x, c_l) \left[ \frac{1}{2} h^T(x, c_l) h(x, c_l) + \frac{1}{2} I_m \right] g_1^T(x, c_l) \leq 0,$$

$$\forall c_l \in c_l \in Q, i, l \in Z_+,$$

并且对某一给定的切换路径  $(t)$ , 存在一切换时间子序列  $\{t_{m_k}\}_{k=0}^{\infty}$  使得  $(t) = c_l, t \in [t_{m_k}, t_{m_{k+1}})$ , 则系统(6) 在该路径  $(t)$  下, 满足 R1 和 R2 的鲁棒控制器可设计为式(8).

### 5 数值仿真

考虑混杂切换 Hamilton 系统

$$\dot{x} = [J(x, c) - R(x, c)] \nabla H(x, c) + g_1(x, c) u + g_2(x, c) z, x(0) = x_0,$$

$$z = h(x, c) g_1^T(x, c) \nabla H(x, c), (t) = c_m \in K, t \in [t_m, t_{m+1}), m = 0, 1, \dots \quad (9)$$

其中:  $x = [x_1, x_2, x_3]^T \in \mathbb{R}^3, u = [u_1, u_2]^T \in \mathbb{R}^2$ ,  $\mathbb{R}^2$ , 并且

$$J(x, c) = \begin{bmatrix} 0 & x_3^2 - 1 & \sin x_2^2 \\ 1 - x_3^2 & 0 & -x_1 \\ -\sin x_2^2 & x_1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$R(x, c) = \begin{bmatrix} 0.5 + 2x_2^2 & 0 & 0.5x_2 \\ 0 & 0.4 + 5x_3^2 & 0 \\ 0.5x_2 & 0 & 0.7 \end{bmatrix},$$

$$g_1(x, c) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & x_3 \\ -x_1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$g_2(x, c) = \begin{bmatrix} x_2 & 0 \\ 0 & -3x_3 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$h(x, c) = \begin{bmatrix} 0 \\ -x_1 & 0 \\ 0 & x_3 \end{bmatrix}, K = [0.2, 4.2],$$

$$H(x, c) = (x_1^2 + \frac{1}{2} x_2^2 + 3x_3^2).$$

容易验证系统(9) 对假设 1 成立, 并且对任意  $c \in K$  以及任意干扰抑制水平  $\epsilon = 1/2$ , 易验证

$$R(x, c) + \frac{1}{2} [g_1(x, c) g_1^T(x, c) - g_2(x, c) g_2^T(x, c)] \leq 0,$$

$$R(x, c) + g_1(x, c) \left[ \frac{1}{2} h^T(x, c) h(x, c) + \frac{1}{2} I_m \right] g_1^T(x, c) > 0.$$

即系统(9) 满足定理 1 的所有条件. 由定理 1 知, 系统(9) 在任意切换路径  $(t)$  下的 H 鲁棒控制器可设计为  $u(t) = u(x, (t))$ , 其中

$$u(x, c_m) = - \left[ \frac{1}{2} h^T(x, c_m) h(x, c_m) + \frac{1}{2} I_2 \right] g_1^T(x, c_m) \nabla H(x, c_m), t \in [t_m, t_{m+1}), c_m \in K, m = 0, 1, \dots \quad (10)$$

为验证上述鲁棒控制器的有效性, 下面给出数值仿真. 取干扰抑制水平  $\epsilon = 1$ , 初始值  $x(0) = [0.1, -0.3, -0.1]^T$  以及如下两个不同的切换路径:

$$1) (t) = c_m = 0.2 + 4 \times \text{rand}, t \in [t_m, t_{m+1}), t_{m+1} - t_m = 0.01, m = 0, 1, \dots;$$

$$2) (t) = c_m = 0.2 + 4 \times \text{rand}, t \in [t_m, t_{m+1}),$$

$$t_{m+1} - t_m = 0.1 \times \text{rand}, m = 0, 1, \dots;$$

其中  $0 < \text{rand} < 1$  为一随机数. 分别在时间区间  $[0.8 \text{ s} \sim 1.2 \text{ s}]$  和  $[2.8 \text{ s} \sim 3.2 \text{ s}]$  上加外部干扰  $u = [4, 4]^T$ . 仿真结果如图 1 和图 2 所示, 它们分别是系统 (9) 在两个不同切换路径  $\alpha_1(t)$  和  $\alpha_2(t)$  下的状态  $x$  的响应曲线.

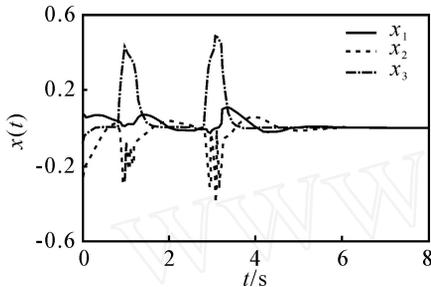


图 1 在路径  $\alpha_1$  下的状态  $x$  曲线

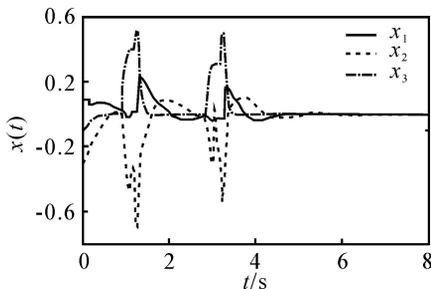


图 2 在路径  $\alpha_2$  下的状态  $x$  曲线

从图 1 和图 2 可以看出, 在切换路径  $\alpha_1(t)$  和  $\alpha_2(t)$  下, 闭环系统很快收敛到零平衡点. 由此可知, 鲁棒控制器 (10) 可以很好地镇定系统 (9). 仿真结果验证了定理 1 的正确性和有效性.

## 6 结 论

本文研究含有无穷多个子模型的混杂切换 Hamilton 系统在(任意)切换路径下的控制设计问题, 设计了一种  $H_\infty$  鲁棒控制方案. 将得到的结果运用到一般非线性混杂切换系统中, 设计了相应的鲁棒控制器. 数值仿真验证了本文结果的正确性和有效性.

## 参考文献(References)

[1] Wang Y, Feng G, Cheng D, et al. Adaptive  $L_2$

disturbance attenuation control of multimachine power systems with SMES units [J]. Automatica, 2006, 42 (7): 1121-1132.

[2] Wang Y, Cheng D, Li C, et al. Dissipative Hamiltonian realization and energy-based  $L_2$ -disturbance attenuation control of multimachine power systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(8): 1428-1433.

[3] Wang Y, Li C, Cheng D. Generalized Hamiltonian realization of time-invariant nonlinear systems [J]. Automatica, 2003, 39(8): 1437-1443.

[4] Escobar G, Van der Schaft A J, Ortega R. A Hamiltonian Viewpoint in the modeling of switching power converters[J]. Automatica, 1999, 35(3): 445-452.

[5] Haddad W M, Nersesor S G, Chellaboina V S. Energy-based control for hybrid port-controlled Hamiltonian systems[J]. Automatica, 2003, 39(8): 1425-1435.

[6] Dayawansa W P, Martin C F. A converse Lyapunov theorem for a class of dynamical systems which undergo switching[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1999, 44(4): 751-760.

[7] Cheng D, Lin Y, Guo L, et al. Stabilization of switched linear systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(5): 661-666

[8] 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.

[9] 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.

[10] Sun Z, Ge S S. Switched linear systems: Control and design[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2005.

[11] Zhu L, Wang Y. Stability of hybrid dissipative Hamiltonian systems[C]. Proc of the 25th Chinese Control Conf. Harbin, 2006: 1060-1065.

[12] 朱礼营, 王玉振. 切换耗散 Hamilton 系统的稳定性研究[J]. 中国科学(E辑), 2006, 36(6): 617-630. (Zhu Li-ying, Wang Yu-zhen. Study on the stability of switched dissipative Hamiltonian systems[J]. Science in China(Series E), 2006, 36(6): 617-630.)

(上接第 955 页)

[5] Wong S K M, Ziarko. Optimal decision rules in decision table[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, 1985, 33(11/12): 693-696.

[6] Skowron A, Rauszer C. The discernibility matrices and functions in information systems [C]. Intelligent Decision Support - Handbook of Applications and

Advances of the Rough Sets Theory. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1992: 331-362.

[7] Lin Meng-quan, Wang Qiang-min, Li Jian-hua. Methodology of quantitative risk assessment for information system security[C]. Proc of Lecture Notes in Artificial Intelligence 3802. Berlin: Springer, 2005: 526-531.