

文章编号: 1001-0920(2008)11-1277-04

基于快速起摆的 Furuta 摆切换控制系统

高丙团¹, 张晓华², 陈宏钧²

(1. 东南大学 电气工程学院, 南京 210096; 2. 哈尔滨工业大学 电气工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对由一个驱动臂和一个未驱动摆杆组成的欠驱动 Furuta 摆系统, 设计了实现其稳定的切换控制系统. 控制任务是将未驱动摆杆稳定在上方不稳定平衡点的同时, 将驱动臂控制到零点, 分为两部分: 首先基于部分反馈线性化技术设计一个饱和的状态反馈控制器, 将摆杆快速控制到上方不稳定平衡点附近; 然后切换到一个线性的全状态反馈控制器, 实现系统的稳定控制. 仿真实验验证了控制器的有效性.

关键词: Furuta 摆; 切换控制; 欠驱动; 起摆; 部分反馈线性化

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Switching control of Furuta pendulum system with aggressive swing-up

GAO Bing-tuan¹, ZHANG Xiao-hua², CHEN Hong-jun²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China. Correspondent: GAO Bing-tuan, E-mail: gaopu1089@163.com)

Abstract: A switching control scheme is presented for an underactuated Furuta pendulum system, which consists of an actuated arm and an unactuated pendulum. The control task is to bring the pendulum to the upper unstable equilibrium position with converging the arm displacement to zero. It is separated into two parts, aggressive swing-up the pole from the under plane into the upper plane and stabilizing the pendulum to its upper unstable equilibrium point with regulating the arm displacement. Based on partial feedback linearization, the aggressive swing-up controller is developed by using saturated state feedback technique, and the stabilization controller is followed by linear all state feedback controller. Finally, the simulation results illustrate the effectiveness of the approach.

Key words: Furuta pendulum; Switching control; Underactuated; Swing-up; Partial feedback linearization

1 引言

Furuta 摆首先由 Furuta^[1] 给出, 因而称为 Furuta 摆, 也可以称为旋转倒立摆^[2]. 它与车摆系统、Pendubot 系统和 Acrobot 系统等常见的欠驱动机械系统一样, 作为欠驱动机械系统基准系统, 已成为控制领域热门的研究对象^[3-5].

Furuta 摆系统和倒立摆系列的欠驱动机械系统, 一般情况下其控制目标是将摆杆从自然下垂的初始状态控制到垂直的不稳定平衡点. 通常控制任务分为起摆控制和稳定控制两部分, 即首先通过一个起摆控制器将摆杆从自然下垂状态控制到垂直的不稳定平衡点附近, 再切换到一个稳定控制器实现系统状态的稳定控制^[6,7]. 在实际的控制过程中, 起摆控制尤为重要, 同时也相对困难, 因此受到了更多

的关注. 到目前为止, 较为有效的是基于能量的起摆控制方案^[1,8], 文献[2]则兼顾考虑了能量和动量设计了 Furuta 摆系统的起摆控制器. 文献[9]基于配置的部分反馈线性化设计了一个合适的 Lyapunov 函数, 从而实现了 Furuta 摆系统在不稳定平衡点附近的渐近稳定控制.

本文设计了一个切换控制系统, 实现将 Furuta 摆从自然下垂的初始状态稳定到垂直不稳定平衡点的控制任务, 重点研究了一种基于部分反馈线性化的快速起摆控制, 并采用线性的全状态反馈实现系统的稳定控制.

2 动力学模型

Furuta 摆系统由 1 个旋转臂和安装在其上的 1 个倒立摆组成, 如图 1 所示. 旋转臂 1 与电机输出轴

收稿日期: 2007-08-04; 修回日期: 2007-09-24.

作者简介: 高丙团(1981—), 男, 江苏淮安人, 博士, 从事非线性控制与机器人控制的研究; 张晓华(1961—), 男, 哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 从事智能机器人与运动控制、机器视觉与自主控制等研究.

直接相连,在输出转矩 τ 的作用下在水平面内转动,旋转角度为 θ_1 . 倒立摆 2 在旋转臂 1 的作用下在垂直于旋转臂 1 的一个垂直平面内转动,其旋转角度为 θ_2 . m_1, I_1, L_1, l_1 分别表示旋转臂 1 和倒立摆 2 的质量、转动惯量、总长度和质心长度.

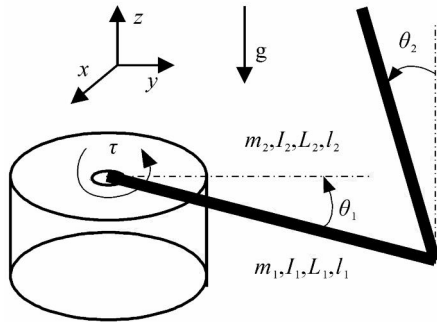


图 1 Furuta 摆

由图 1, 两个连杆质心的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \sin \theta_1 \\ l_1 \cos \theta_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 \cos \theta_1 \\ L_1 \cos \theta_1 - l_2 \sin \theta_2 \sin \theta_1 \\ l_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

则其线性速度为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{z}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 \\ -l_1 \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 - l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 + l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \dot{\theta}_2 \\ -L_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 - l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 - l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \dot{\theta}_2 \\ -l_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Furuta 摆的动能为

$$K = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2, \quad (5)$$

计算并整理可得

$$K = \frac{1}{2} [m_1 l_1^2 + I_1 + m_2 L_1^2 + m_2 l_2^2 \sin^2 \theta_2] \dot{\theta}_1^2 + m_2 L_1 l_2 \cos \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{2} (m_2 l_2^2 + I_2) \dot{\theta}_2^2. \quad (6)$$

Furuta 摆的势能为

$$V(\theta_2) = m_2 g l_2 \cos \theta_2. \quad (7)$$

因而, 旋转摆的拉格朗日算子可写成

$$L = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} - m_2 g l_2 \cos \theta_2. \quad (8)$$

惯性矩阵中的元素为

$$d_{11} = m_1 l_1^2 + I_1 + m_2 L_1^2 + m_2 l_2^2 \sin^2 \theta_2 =: J_1 + J_2 \sin^2 \theta_2,$$

$$d_{12} = m_{21} = m_2 L_1 l_2 \cos \theta_2 =: J_3 \cos \theta_2,$$

$$d_{22} = m_2 l_2^2 + I_2 =: J_4.$$

Furuta 摆的运动的欧拉 - 拉格朗日方程如下:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

即

$$d_{11}(\theta_2) \ddot{\theta}_1 + d_{12}(\theta_2) \ddot{\theta}_2 + 2m_2 l_2^2 \sin \theta_2 \cos^2 \theta_1 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_2 l_2 L_1 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 = \tau, \quad (10)$$

$$d_{21}(\theta_2) \ddot{\theta}_1 + d_{22}(\theta_2) \ddot{\theta}_2 - m_2 l_2^2 \sin \theta_2 \cos \theta_2 \dot{\theta}_1^2 - m_2 g l_2 \sin \theta_2 = 0. \quad (11)$$

由动力学描述(10)和(11)可以看出, Furuta 摆系统中只有 1 个施加在旋转臂上的驱动转矩, 但却有 2 个形态变量需要控制, 即旋转臂的角度 θ_1 和倒立摆的角度 θ_2 , 因此, Furuta 摆是一个典型的欠驱动机械系统.

将系统模型(10)和(11)写成欠驱动机械系统的一般矩阵形式为

$$D(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + g(\theta) = F. \quad (12)$$

其中

$$D(\theta) = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix},$$

$$C(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} a_{12} \dot{\theta}_2 - b_{12} \dot{\theta}_1 + a_{11} \dot{\theta}_1 \\ -a_{21} \dot{\theta}_1 \end{bmatrix},$$

$$g(\theta) = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$a = J_2 \sin \theta_2 \cos \theta_2, \quad b = J_3 \sin \theta_2.$$

注意到 $D(\theta)$ 是对称的, 且

$$\det(D(\theta)) = \det \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} = (m_1 l_1^2 + I_1 + m_2 l_2^2 \sin^2 \theta_2) (m_2 l_2^2 + I_2) + m_1 L_1^2 l_2 + m_2^2 L_1^2 l_2^2 \sin^2 \theta_2 > 0. \quad (13)$$

因此, 对于所有的 θ , 有 $D(\theta)$ 是正定的. 对于 $D(\theta)$ 和 $C(\theta, \dot{\theta})$ 之间有如下关系:

$$\dot{D}(\theta) - 2C(\theta, \dot{\theta}) = (2a_{11} - b_{12}) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

这保证 $\dot{D}(\theta) - 2C(\theta, \dot{\theta})$ 是一个斜对称矩阵. $D(q)$ 是正定对称矩阵, 且 $\dot{D} - 2C$ 是斜对称矩阵, 这些特征将在其控制设计中起到重要作用^[1,8].

注 1 现有文献中使用的 Furuta 摆系统的动力学大都来自 Fantoni 建立的模型^[1], 本文所建立

的 Furuta 摆系统的动力学模型 (10) 和 (11) 与 Fantoni 建立的模型区别在于,完整考虑了倒立摆对于旋转臂动力学的作用,从而惯性矩阵的第一个元素中多出了 $m_2 L_1^2$ 这一项.

当 Furuta 摆的倒立摆在顶部不稳定平衡点附近时,可以通过一个线性的控制器实现系统的稳定控制.为了研究该线性平衡控制器,必须将系统的非线性模型在顶部不稳定平衡点附近进行线性化处理,且可以通过考察线性化模型的能控性矩阵的秩证明这一点.

首先根据式(10)和(11)将非线性模型重写为

$$\ddot{\theta}_1 = (J_4 - 2J_2 J_4 \sin^2 \theta_2 \cos^2 \theta_1) \ddot{\theta}_1 + J_3 J_4 \sin^2 \theta_2 - J_3^2 g \sin \theta_2 \cos^2 \theta_1 / L_1 - J_2 J_3 \sin \theta_2 \cos^2 \theta_1 / \det(D(\theta)), \quad (15)$$

$$\ddot{\theta}_2 = (-J_3 \cos \theta_2 + 2J_2 J_3 \sin \theta_2 \cos^2 \theta_1) \ddot{\theta}_1 + J_3^2 \sin \theta_2 \cos^2 \theta_1 + (J_1 + J_2 \sin^2 \theta_2) (J_3 g \sin \theta_2 / L_1 + J_2 \sin \theta_2 \cos^2 \theta_1) / \det(D(\theta)). \quad (16)$$

在顶部不稳定平衡点附近线性化处理,可得到

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-J_3^2 g / L_1}{J_1 J_4 - J_3^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{J_1 J_3 g / L_1}{J_1 J_4 - J_3^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{J_4}{J_1 J_4 - J_3^2} \\ 0 \\ \frac{-J_3}{J_1 J_4 - J_3^2} \end{bmatrix} = A X + B. \quad (17)$$

根据线性化模型,计算能控性矩阵的行列式得到

$$\det(B / AB / A^2 B / A^3 B) = \frac{J_1 J_3^3 g^2 / L_1}{(J_1 J_4 - J_3^2)^2}, \quad (18)$$

因此,线性化矩阵是可控的.这样就可以设计一个全状态反馈控制律

$$\ddot{\theta} = -K^T X, \quad (19)$$

通过选择合适的状态反馈矩阵 K 实现系统在平衡点附近的稳定控制.

3 旋转摆系统的快速起摆

旋转摆的起摆控制是指将未驱动的倒立摆从下半平面控制到上半平面的不稳定平衡点附近,即将 θ_2 控制到零附近.对于系统的强非线性动力学模型(10)和(11),很难直接进行这一设计,但注意到

式(11)可简化为

$$\ddot{\theta}_1 + \frac{d_{22}(\theta_2)}{d_{21}(\theta_2)} \ddot{\theta}_2 - \frac{b_2}{L_1} \sin^2 \theta_1 - \frac{g}{L_1} \tan \theta_2 = 0. \quad (20)$$

基于非配置部分反馈线性化,应用控制变换

$$= (d_{12}(\theta_2) - \frac{d_{11}(\theta_2) d_{22}(\theta_2)}{d_{21}(\theta_2)}) u + 2J_2 \sin \theta_2 \cos^2 \theta_1 \ddot{\theta}_2 - J_3 \sin^2 \theta_2 + d_{11}(\theta_2) \frac{b_2}{L_1} \sin^2 \theta_1 + d_{11}(\theta_2) \frac{g}{L_1} \tan \theta_2 \quad (21)$$

(其对于 $\theta_2 = \pi/2$ 严格定义)将形态变量 θ_2 的动力学特性转换成

$$\ddot{\theta}_2 = u. \quad (22)$$

对于该二次积分器,可通过如下的状态反馈:

$$u = -c_1 \theta_2 - c_2 \dot{\theta}_2, \quad c_1, c_2 > 0, \quad (23)$$

将其渐近稳定到原点 $(\theta_2, \dot{\theta}_2) = 0$,控制输入 u 将给出下面的输入转矩:

$$= \frac{\det(D(\theta))}{J_3 \cos \theta_2} (c_1 \theta_2 + c_2 \dot{\theta}_2) + 2J_2 \sin \theta_2 \cos^2 \theta_1 \ddot{\theta}_2 - J_3 \sin^2 \theta_2 + d_{11}(\theta_2) \frac{b_2}{L_1} \sin^2 \theta_1 + d_{11}(\theta_2) \frac{g}{L_1} \tan \theta_2. \quad (24)$$

当 $\theta_2 = \pi/2$ 时方程被 $\cos \theta_2$ 除,所以对于几乎所有的 θ_2 ,有 $(\theta_2, \dot{\theta}_2, \ddot{\theta}_2)$.为了避免这个奇异性,可应用下面的饱和转矩:

$$\text{app}(\theta_2, \dot{\theta}_2, \ddot{\theta}_2) = \max \text{sat}(\tau / \tau_{\max}), \quad (25)$$

其中 $\tau_{\max} > 0$ 是最大的允许转矩.下面给出界定 app 饱和问题的结论.

命题 1 考虑 $0 < \theta_2 < \pi/2$ 和 $I = [0, \tau_{\max}]$ 的一个邻域

$$N = \{(\theta_2, \dot{\theta}_2, \ddot{\theta}_2) \in I \times R^2 \mid |\theta_2 - \pi/2| < \delta, |\dot{\theta}_2| < n_0, |\ddot{\theta}_2| < n_1, n_0, n_1 > 0\}, \quad (26)$$

则存在

$$\tau^*(\theta_2, n_0, n_1) > 0, \quad \tau^*(\theta_2, n_0, n_1) = \frac{a_1 + a_2 n_0}{\sin \theta_2} + a_3 n_0^2 + a_4 n_0 n_1 + a_5,$$

$a_i > 0, \theta_2 = \pi/2$ 的一个邻域 $U \subset N$,从而对于所有的 $\tau \in [\tau^*, \text{app}(\theta_2, \dot{\theta}_2, \ddot{\theta}_2)]$ 在 $(\theta_2, \dot{\theta}_2) \subset U$ 上是饱和的,即 $|\text{app}(\theta_2, \dot{\theta}_2, \ddot{\theta}_2)| = \tau_{\max}$,同时在 $I \times [-n_0, n_0] \setminus N$ 上是不饱和的.

证明 定义

$$D_0 = \det(D(\pi/2)), M_0 = d_{11}(\pi/2). \quad (27)$$

注意到对于所有的 $\theta_2 \in [-\pi/2, \pi/2]$,有 $\det(D(\theta)) = D_0$ 和 $d_{11}(\theta) = M_0$.对于 $0 < \theta_2 < \pi/2$ 和 $\theta_2 = \pi/2 \pm \delta$,得到

$$\begin{aligned} | \dot{\theta}_1 | < \frac{D_0(c_1 + m_0 c_2)}{J_3 \sin} + \\ 2J_2 m_0 m_1^2 + J_3 \dot{\theta}_0^2 + \frac{M_0 l_2}{L_1} \end{aligned} \quad (28)$$

因此,定义 $f(\theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2)$ 为不等式(28)的右边,则有

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{D_0 c_1 + M_0 J_3 g / L_1}{J_3}, \\ a_2 &= \frac{D_0 c_2}{J_3}, \quad a_3 = J_3^{-2}, \\ a_4 &= 2J_2^{-2}, \quad a_5 = \frac{M_0 l_2}{L_1}. \end{aligned} \quad (29)$$

综上,命题 1 得证.

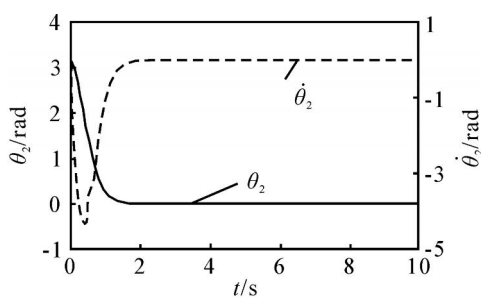
注 2 本文给出的饱和的非线性起摆控制器(25)考虑了实际控制输入的有限性问题,同时设计方法简单,由于控制器实质上为基于二次积分(22)的状态反馈控制(23),其可实现摆杆的角度(几乎)指数收敛到零,但不是真正的指数收敛,因为在某些时刻控制输入是饱和的.

4 切换控制器的设计

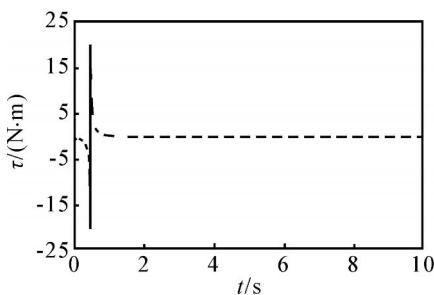
对于初始条件 $(0, 0, \theta_0, \dot{\theta}_0)$ (即 $\theta_2 = \theta_0$),可以使用控制器(25)将摆杆控制到上半平面的区域内(假定 $|\theta_2| < \pi/6$),再切换到线性控制器(19)进行全局稳定控制.这个基于切换的控制器能将 Furuta 摆系统从摆杆下垂的初始状态渐近稳定到其垂直不稳定平衡点处.

5 仿真实验

为了检验前面设计的控制方案,下面给出控制



(a) 倒立摆状态

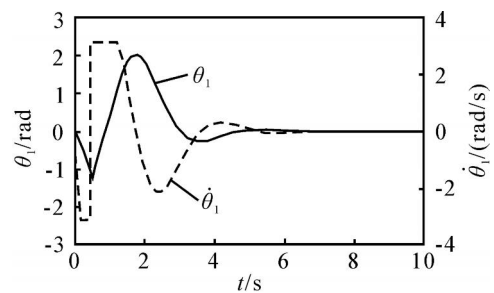


(b) 控制输入

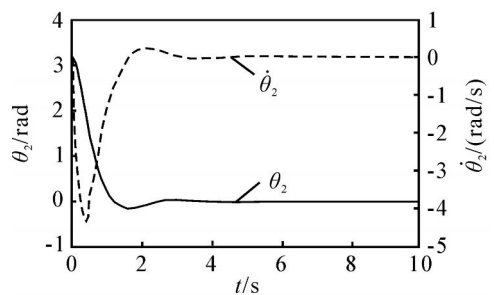
系统的仿真实验. 仿真参数按照文献[1]取为 $m_1 = 0.1 \text{ kg}$, $l_1 = 0.106 \text{ m}$, $L_1 = 0.215 \text{ m}$, $I_1 = 0.0175 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $m_2 = 0.0538 \text{ kg}$, $l_2 = 0.113 \text{ m}$, $I_2 = 0.000198 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

针对快速起摆控制的仿真结果如图 2 所示, 仿真参数取为 $\tau_{\max} = 20 \text{ N} \cdot \text{m}$, $c_1 = c_2 = 15$. 摆杆从下面的位置 $\theta_2 = \theta_0$ 开始, 经过 1.5 s, 摆角(几乎)指数收敛于零, 这个收敛不是真正指数的, 因为控制输入在 0.5 s 左右的时间内是饱和的, 与文献[1]相比, 起摆效率明显得到提高.

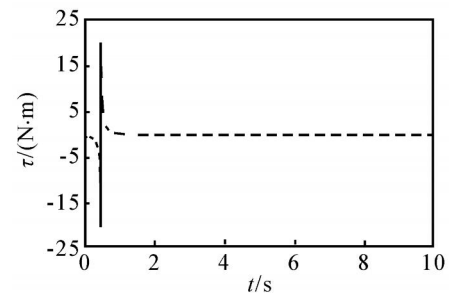
基于切换控制策略的快速起摆控制和全状态反馈稳定控制的仿真结果如图 3 所示. 仿真的初始条件为 $(0, 0, \theta_0, \dot{\theta}_0)$, 即摆杆在自由下垂的位置, 全状态反馈控制矩阵 K 取值为 $[-0.0275, -0.0275, -1.6495, -0.2004]$. 由仿真结果可以看出, 整个系统在 6.5 s 左右实现稳定控制到原点的目标. 仿真结果说明了本文设计的切换控制器能将 Furuta 摆系统迅速稳定到零点.



(a) 旋转臂状态



(b) 倒立摆状态



(c) 控制输入

图 3 切换控制系统仿真结果

(下转第 1285 页)

图 2 快速起摆控制

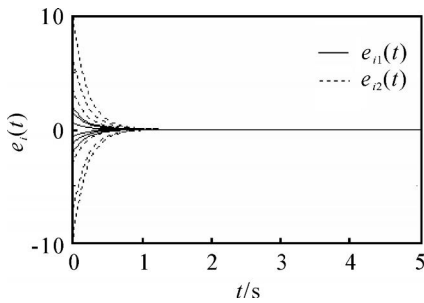


图 4 Duffing 系统的 e_{e1}, e_{e2} 同步稳定轨线

7 结 论

本文基于变结构控制考虑了一类复杂网络的同步稳定问题,并分别考虑了包含已知界的非线性项和未知界的非线性项的情况.通过两个仿真算例,表明了本文方法的有效性.

参考文献(References)

[1] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of small-world networks[J]. Nature, 1998, 393(6684) : 440-442.

[2] Strogatz S H. Exploring complex networks[J]. Nature, 2001, 410(7024) : 268-276.

[3] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286 (5439) : 509-512.

[4] Wang X F, Chen G. Synchronization in small-world dynamical networks[J]. Int J Bifurcation Chaos, 2002, 12(2) : 187-192.

[5] Wang X F, Chen G. Synchronization in scale-free dynamical networks: Robustness and fragility[J]. IEEE Trans, 2002, 49(1) : 54-62.

[6] Lu J H, Yu X H, Chen G R. Chaos synchronization of general complex networks dynamical [J]. Physica A, 2004, 334(1) : 281-302.

[7] Li Z, Chen G R. Robust adaptive synchronization of uncertain dynamical networks [J]. Physics Letters A, 2004, 324(2) : 166-178.

[8] Li C G, Chen G R. Synchronization in general complex dynamical networks with coupling delays [J]. Physica A, 2004, 343(15) : 263-278.

[9] Li P, Zhang Y, Zhang L. Global synchronization of a class of delayed complex networks[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2006, 30(4) : 903-908.

[10] Chou Chien-Hsin, Cheng Chih-Chiang. A decentralized reference adaptive variable structure controller for large-scale time-varying delay systems[J]. IEEE Trans Automatic Control, 2003, 48(7) : 1213-1217.

[11] Shyu Kuo-Kai, Liua Wen-Jeng, Hsu Kou-Cheng. Design of large-scale time-delayed systems with dead-zone input via variable structure control [J]. Automatica, 2005, 41(7) : 1239-1246.

[12] Lee J L, Wang W J. Robust decentralized stabilization via sliding mode control [J]. Theory and Advanced Technology, 1997, 10(2) : 622-631.

(上接第 1280 页)

6 结 论

本文针对 Furuta 摆这一欠驱动机械系统的基本准系统,设计了将其从摆杆自由下垂位置稳定到垂直不稳定平衡点位置的切换控制系统.基于部分反馈线性化,设计一个饱和的状态反馈控制器作为系统的起摆控制器,该控制器能够实现倒立摆的摆角(几乎)指数收敛到零,稳定控制由线性的全状态反馈控制器实现.最后对文中给出的控制方案进行了仿真实验,实验结果表明了该方案有效性和起摆控制的快速性.同时,本文给出的快速起摆的设计方法可用来进行其他倒立摆系统的起摆控制设计,如车摆系统的快速起摆控制.

参考文献(References)

[1] Fantoni I, Lozano R. Stabilization of the Furuta pendulum around its homoclinic orbit [J]. Int J of Control, 2002, 75(6) : 390-398.

[2] Gordillo F, Acosta J A, Aracil J. A new swing-up law for the Furuta pendulum[J]. Int J of Control, 2003, 76(8) : 836-844.

[3] Sorenson A, Shiriaev A S. Friction compensation in the

Furuta pendulum for stabilizing rotational modes [C]. IEEE Conf on Decision and Control. Orlando, 2001 : 3772-3777.

[4] Carlos A I, Hebertt S R. A linear differential flatness approach to controlling the Furuta pendulum [J]. IMA J of Mathematical Control and Information, 2007, 24(1) : 31-45.

[5] Nair S, Leonard N E. A normal form for energy shaping: Application to the Furuta pendulum [C]. IEEE Conf on Decision and Control. Las Vegas, 2002 : 516-521.

[6] Acosta J A, Aracil J, Gordillo F. Nonlinear control strategies for the Furuta pendulum [J]. Control and Intelligent Systems, 2001, 29(3) : 101-107.

[7] Ding H S, Li Y P, Mao J Q, et al. Dynamic switching control for the swing-up and stabilizing control of the Furuta pendulum [C]. IEEE Conf on Industrial Electronics and Applications. Singapore, 2006 : 1-5.

[8] Astroem K J, Furuta K. Swinging up a pendulum by energy control[J]. Automatica, 2000, 36(2) : 287-295.

[9] Carlos A I, Juan H A. Stabilization of the Furuta pendulum based on Lyapunov function [J]. Nonlinear Dynamics, 2007, 49(1/2) : 1-8.