

旋转二级倒立摆摆起倒立混合控制*

但远宏^{1,2} 徐鹏^{*,2} 谭智^{1,2} 李祖枢^{1,2}

(1. 重庆大学智能自动化研究所, 重庆 400044; 2. 重庆理工大学人工智能系统研究所, 重庆 400054)

摘要:参考仿人智能控制思想,提出一种混合控制策略,实现了旋转二级倒立摆摆起倒立控制。将旋转二级倒立摆的摆起倒立稳定过程分为能量累积、姿态调整以及稳定控制三个阶段。基于无源系统理论的分析方法设计出摆杆的能量累积策略,以动力学分析方法设计出摆杆的姿态调整策略,以局部线性化方法进行摆杆的倒立稳定控制。仿真和实时实验结果证明了算法的有效性。

关键词:旋转二级倒立摆;仿人智能控制;摆起倒立控制;无源系统

中图分类号:TP273 文献标识码:A doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2015.05.018

Hybrid Swing-up and Handstand Control of Rotary Double Inverted Pendulum*

DAN Yuanhong^{1,2} XU Peng^{*,2} TAN Zhi^{1,2} LI Zushu^{1,2}

(1. Institute of Intelligent Automation, Chongqing University, Chongqing, 400044;

2. Institute of Artificial Intelligence System, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054)

Abstract: Based on human simulated intelligent control theory, hybrid control method is proposed for the control problem of swing-up and handstand for a rotary rouble inverted pendulum. The proposed algorithm can be divided into three stages, which are energy accumulation, pose adjustment and balance control. Energy accumulation strategy for both rods is obtained according to passive system theory. Pose adjustment strategy between inner rod and outer rod is designed through dynamic analysis. Balance control is achieved by local linearization at the inverted equilibrium. Simulation and experimental results show the effectiveness of the algorithm.

Key words: rotary double inverted pendulum; human simulated intelligent control; swing-up and handstand control; passive system

1 引言

倒立摆是经典的欠驱动复杂难控制对象,众多控制界研究者以此为研究平台进行控制理论与方法的创新与验证工作。倒立摆的现有研究工作集中在:倒立平衡点的稳定控制和从悬垂位置到倒立位置的摆起倒立稳定控制两方面。目前已经实现了从一级倒立摆到四级倒立摆的稳定控制^[1-6],所用控制方法有滑模控制^[1]、基于反馈线性化的混合控制^[2]、模糊神经网络控制^[3]、拟人智能控制^[4]、变论域自适应模糊控制^[5]、云控制^[6]等。对于摆起倒立稳定控制,仅有二级倒立摆以下的实时控制报道与三级倒立摆以下的仿真控制报道,采用的控制方法有:能量控制^[7]、基于无源系统理论的控制^[8,9]、基于逆系统理论的控制^[10,11]、仿人智能控制^[12-14]等。

其中最值得关注的是,文献[9]采用基于无源系统的设计思想结合反馈线性化的方法,将二级倒立摆系统分解成两个闭环反馈的无源子系统,以系统能量作为存储函数(Storage Function),实现了直线二级倒立摆的摆起倒立仿真控制;文献[10]将二级倒立摆摆起倒立过程的初状态与末状态作为动力学微分方程组的已知边值条件,将摆起倒立过程作为已知两点边值微分方程进行求解,得到理想轨迹和前馈控制量,然后再沿理想轨迹线性化得到反馈补偿控制量,实现了小车二级倒立摆的实时控制。文献[11]采用同样方法实现了小车三级倒立摆的摆起倒立仿真控制。文献[12]运用仿人智能控制思想结合图式理论,设计出正负反馈结合、开闭环结合的多模态控制器,实现了倾斜轨道上二级倒立摆的摆起倒立实时控制。基于同样的思路,文献[13]实现了小车三级倒立摆摆起倒立的仿真控制,文献[14]系统地提出了倒立摆平衡态之间的任意转换控制问题及其解决思路。

总的来说,文献[9]所述方法能实现能量单调

2015-06-23 收稿,2015-08-11 接受

* 重庆市教委科学技术研究项目(KJ130829),重庆市科委科技人才培养计划项目(cstc2013-qncr40010)资助

** 通讯作者,E-mail:xupeng5477@126.com; Tel:15310259706

收敛到目标能量状态,以及输入能量的高效利用,但无法兼顾摆杆姿态。文献[10,11]实现了运动轨迹的自动生成,基于参考轨迹的反馈控制能有效提高系统的鲁棒性,但对模型的精确性要求较高。文献[12-14]将任务分解,设计出合理的多模态控制器结构,较好地兼顾了摆杆间的相对姿态,但对人的经验要求较高。本文参考文献[12]的设计思路,将旋转二级倒立摆的摆起倒立过程划分为能量累积、姿态调整以及稳定控制三个阶段。参考文献[9]中所采用的无源系统设计方法并进行适当改进,得到兼顾摆杆姿态的能量累积策略;以动力学分析加局部线性化的方法实现了“姿态调整”与“稳定控制”的控制律设计。

2 数学模型

旋转二级倒立摆结构如图1所示, $\theta_0 \sim \theta_2$ 依次为旋臂、内杆、外杆角度。定义广义坐标 $\Theta = [\theta_0, \theta_1, \theta_2]^T$, 采用旋臂的角加速度($\ddot{\theta}_0$)作为控制量,应用拉格朗日建模方法推导出如式(1)所示的动力学模型。

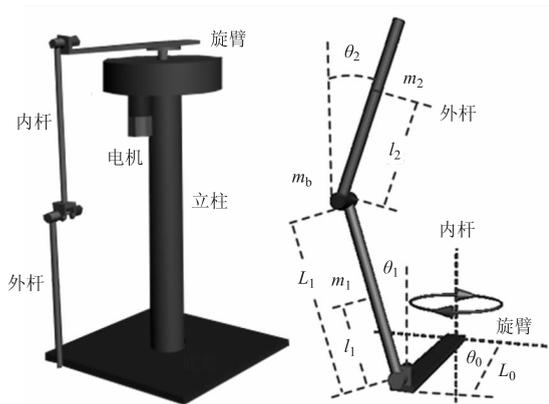


图1 旋转二级倒立摆

$$M\ddot{\Theta} + N\dot{\Theta} = G \quad (1)$$

其中,

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ M_1 & M_2 & M_3 \\ m_2 l_2 L_0 \cos \theta_2 & M_3 & J_2 + m_2 l_2^2 \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ N_1 & c_1 + c_2 & N_2 \\ N_3 & N_4 & c_2 \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} u \\ G_1 \\ m_2 l_2 g \sin \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$M_1 = (m_1 l_1 + m_2 L_1 + m_b L_1) L_0 \cos \theta_1$$

$$M_2 = J_1 + m_1 l_1^2 + m_2 L_1^2 + m_b L_1^2$$

$$M_3 = m_2 l_2 L_0 \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

$$N_1 = (m_2 l_2 L_1 \sin \theta_2 - M_2 \sin \theta_1) \dot{\theta}_0 \cos \theta_1$$

$$N_2 = m_2 l_2 L_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - c_2$$

$$N_3 = (m_2 l_2 L_1 \sin \theta_1 - (J_2 + m_2 l_2^2) \sin \theta_2) \dot{\theta}_0 \cos \theta_2$$

$$N_4 = -m_2 l_2 L_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) - c_2$$

$$G_1 = (m_1 l_1 + m_2 L_1 + m_b L_1) g \sin \theta_1$$

各物理参数含义如表1所示。

表1 物理参数

参数符号	参数含义
m_1	内杆质量
m_2	外杆质量
m_b	编码器质量
J_1	内杆转动惯量
J_2	外杆转动惯量
L_0	旋臂长度
L_1	内杆长度
l_1	内杆质心 - 轴心距
l_2	外杆质心 - 轴心距
c_1	旋臂 - 内杆转轴摩擦系数
c_2	内杆 - 外杆转轴摩擦系数
g	重力加速度

3 控制器设计

旋转二级倒立摆从垂直向下位置摆起到垂直向上位置的运动过程,需要精确实现能量的迁移控制以及摆杆的姿态控制,采用单一的控制方法很难实现。一般将该运动过程分为从垂直向下位置运动到垂直向上的摆起控制、在垂直向上位置附近的稳定控制。而受限于实际设备的控制力矩,摆起过程被细分为:1)以增加摆杆能量为目的,使摆杆从水平线下方运动到水平线上方的能量累积阶段;2)以调节内杆与外杆间能量分布与相对姿态为目的的姿态调整阶段;3)将内杆与外杆稳定在倒立平衡点附近的稳定控制阶段。摆起倒立稳定控制的控制阶段划分如图2所示。

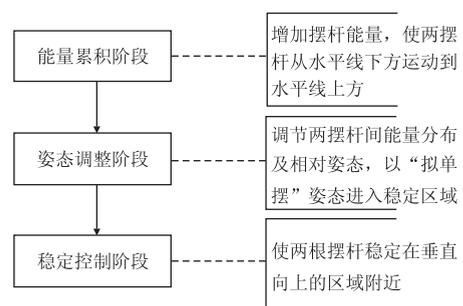


图2 摆起倒立稳定控制的阶段划分

3.1 能量累积阶段

本阶段的控制目标是向两摆杆注入足够的能量,使两摆杆从悬垂点运动到水平线上方,同时保持两摆杆相对姿态的基本一致。受限于电机的控制力矩以及摆杆在水平线上下动力学特性的迥异,拟将能量积累过程分为两步:1)采用较小控制量,通过摆杆来回振荡,逐步增加摆杆能量。2)在摆杆角度接近水平线附近时,采用较大控制量,一次性注入足够能量,使摆杆能够靠惯性运动到水平线上方。

本阶段先采用基于无源系统理论^[15]的分析方法得到摆杆的能量控制策略,但由于能量是标量,从而无法兼顾摆杆的相对姿态,因此对能量控制策略做出适当改进,以牺牲某些时刻摆杆能量的严格递增来实现两摆杆运动趋势的基本一致。具体分析与设计过程如下。

将式(1)所示系统等效为线性子系统 Σ_1 与非线性子系统 Σ_2 :

$$\begin{aligned} \Sigma_1: \dot{X}_1 &= A_1 X_1 + B_1 u \\ \Sigma_2: \dot{X}_2 &= A_2 + B_2 u \end{aligned} \quad (2)$$

其中,

$$X_1 = [\theta_0 \quad \dot{\theta}_0]^T, X_2 = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2]^T$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ M_{11}^{-1} N_{11} \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{11}^{-1} M_{12} \end{bmatrix}$$

$$M_{11} = \begin{bmatrix} M_2 & M_3 \\ M_3 & J_2 + m_2 l_2^2 \end{bmatrix}, M_{12} = \begin{bmatrix} -M_1 \\ -m_2 l_2 L_0 \cos \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$N_{11} = \begin{bmatrix} G_1 \\ m_2 l_2 g \sin \theta_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & N_2 \\ N_4 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_1 \\ N_3 \end{bmatrix} \theta_0$$

非线性系统 Σ_2 的总能量(即内杆与外杆的动能与势能之和)为

$$\begin{aligned} E(X_2) &= \frac{1}{2}(J_2 + m_2 l_2^2) \dot{\theta}_2^2 + m_2 l_2 L_1 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \\ &+ \frac{1}{2} M_2 \dot{\theta}_1^2 + (m_1 l_1 + m_2 L_1 + m_b L_1) g \cos \theta_1 \\ &+ m_2 l_2 g \cos \theta_2 \end{aligned} \quad (3)$$

考虑能量的变化率,有

$$E(X_2) = \frac{\partial E(X_2)}{\partial X_2} X_2 = \frac{\partial E(X_2)}{\partial X_2} (A_2 + B_2 u) \quad (4)$$

在任意初始条件下($X_{20} \in \mathbf{R}^4$),由于转动摩擦系数 c_1, c_2 的存在,根据能量守恒定律,系统 Σ_2 零输入响应的能量必然单调递减,即

$$\dot{E}(X_{20}) = \frac{\partial E(X_{20})}{\partial X_{20}} A_2(X_{20}) < 0$$

由于初始条件 X_{20} 的任意性,根据式(4)可得

$$E(X_2) < k_1 \cdot \frac{\partial E(X_2)}{\partial X_2} B_2 u, (k_1 \geq 1) \quad (5)$$

以 $E(X_2)$ 为存储函数, u 为输入,则相对于输出 y_2 (见式(6)),非线性子系统 Σ_2 是无源系统^[16]。

$$\begin{aligned} y_2 &= k_1 \frac{\partial E(X_2)}{\partial X_2} B_2 \\ &= k_1 (m_1 l_1 + m_2 L_1 + m_b L_1) L_0 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \\ &+ m_2 l_2 L_0 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \end{aligned} \quad (6)$$

选取 $u_{x1} = -K \cdot X_2$ 作为线性子系统 Σ_1 的输入,只要使得 $K(sI - A_1)^{-1} B$ 正定,则相对于输出 $y_1 = K \cdot X_1$,系统 Σ_1 也是无源的。根据无源系统的串联设计理论^[16],将 Σ_1 与 Σ_2 进行如图3所示的反馈连接,则采用控制律

$$u_x = u_{x1} - y_2 \quad (7)$$

可实现式(1)所示倒立摆系统的稳定以及存储函数(即摆杆能量)向目标状态的单调收敛。其中, u_{x1} 保证旋臂的角度和角速度收敛到零点, y_1 则实现摆杆能量的递增。

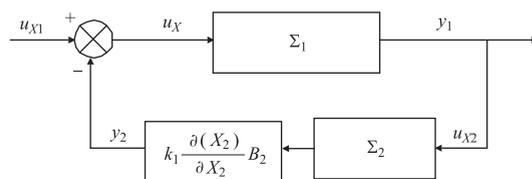


图3 无源系统的反馈串联

实时控制中,受限于编码器精度,摆杆角度存在一定的测量误差,摆杆角速度通过角度差分得到,进一步将误差放大,导致 $|y_2(t_i)|$ 的数值存在干扰, $y_2(t_i)$ 的正负符号也可能频繁跳变,不利于保持两摆杆姿态的一致性。因此将 $y_2(t_i)$ 作如下简化。

$$\begin{aligned} y_2(t_i) &= |y_2(t_i)| \cdot \text{sgn}(y_2(t_i)) \\ &\approx U \cdot \lambda(t_i) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, U 为 $|y_2(t_i)|$ 的 bang-bang 等效值, k_1 越大则 U 越大,摆杆能量增加越快。 $\lambda(t_i)$ 为 $\text{sgn}(y_2(t_i))$ 的简化,即以符号保持策略($\lambda(t_i) = \lambda(t_{i-1})$)代替了两摆杆运动趋势不一致($\dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 \leq 0$)情况下 $y_2(t_i)$ 的符号,以避免频繁的切换扰动。

$$\lambda(t_i) = \begin{cases} 1 & , \dot{\theta}_1(t_i) < 0 \cup \dot{\theta}_2(t_i) < 0 \\ -1 & , \dot{\theta}_1(t_i) > 0 \cup \dot{\theta}_2(t_i) > 0 \\ \lambda(t_{i-1}) & , \dot{\theta}_1(t_i) \cdot \dot{\theta}_2(t_i) \leq 0 \end{cases}$$

在此,仅定性说明上述等效简化的合理性,不做严格证明。在能量累积阶段,两摆杆的角度位于水平线以下,即: $|\theta_1|, |\theta_2| \in (\pi/2, \pi]$, 得 $\cos(\theta_1), \cos(\theta_2) < 0$ 。因此, $y_2(t_i)$ 的正负主要取决于 $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$, 且在长度与质量相等以及摆杆振幅较小的情况下,内杆与外杆的自由运动趋势基本一致 ($\dot{\theta}_1(t_i) \cdot \dot{\theta}_2(t_i) > 0$), 运动趋势不一致的情况 ($\dot{\theta}_1(t_i) \cdot \dot{\theta}_2(t_i) \leq 0$) 持续时间较短,以 $\lambda(t_i)$ 代替 $\text{sign}(y_2(t_i))$ 不会从根本上影响摆杆能量的递增,但有利于保持两摆杆姿态的一致性。

在能量积累阶段,不需要旋臂角度和角速度收敛到零点,只需保证旋臂的角度和角速度在一定范围内即可(即 Σ_1 不发散)。因此可将分量 u_{x1} 去掉,通过构造分段的 U 值来保证旋臂在一定范围内来回摆动(即 Σ_1 不发散)。通过简化等效后的能量累积阶段的控制律为

$$u_1 = \begin{cases} U_1 & , |\theta_{m1}| < \theta_{c1} \\ -U\lambda(t_i) & , |\theta_{m1}| \geq \theta_{c1} \end{cases} \quad (9)$$

$$U = \begin{cases} 2U_1 & , |\theta_{m1}| \in [\theta_{c1}, \theta_{c2}] \\ U_2 & , |\theta_{m1}| > \theta_{c2} \cup \theta_{D1} \in [\theta_{c3}, \theta_{c2}] \\ U_3 & , |\theta_{m1}| > \theta_{c2} \cup \theta_{D1} \in [\theta_{c4}, \theta_{c3}] \end{cases}$$

式中, $\theta_{m1}, \theta_{D1} \in [-\pi, +\pi]$ 是内杆以悬垂点为终点的角度振幅和角度,顺时针为正方向。刚启动控制时,施加 U_1 控制量打破摆杆的平衡状态,然后以 $2U_1$ 的控制量使摆杆来回振荡,当内杆振幅大于给定值时施加较大的控制量 U_3 , 一次性注入足够能量,使摆杆能够靠惯性运动到水平线以上。在施加 U_3 之前先以较小的控制量 U_2 维持摆杆的运动趋势,以等待合适的摆杆姿态。能量累积阶段的控制律与摆杆姿态对应关系如图 4 所示。

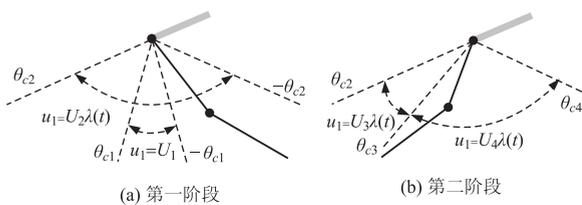


图 4 能量累积阶段控制模式划分

3.2 姿态调整阶段

经过能量累积阶段,摆杆获得足够能量,然而能量在摆杆间的分布、摆杆间的相对姿态以及相对运动趋势还没有实现精确控制。本阶段通过动力学分析,设计出摆杆姿态调节方法,使两根摆杆以接近一条直线的姿态进入稳定控制阶段,进而提高控制的

成功率。

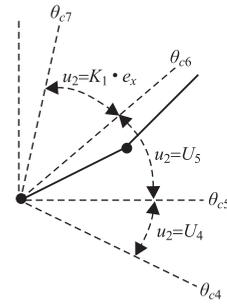


图 5 姿态调整

能量调整示意图如图 5 所示。当内杆位于水平线下方区域时 ($\theta_{D1} \in [\theta_{c5}, \theta_{c4}]$), 若向旋臂施加逆时针控制力矩,则内杆获得顺时针力矩,经过内杆传递外杆获得逆时针力矩,达到抑制内杆摆起加速外杆摆起的目的,实现能量从内杆向外杆的转移。当内杆经过水平线上方区域时 ($\theta_{D1} \in [\theta_{c6}, \theta_{c5}]$), 若向旋臂施加逆时针控制力矩,由于水平线上下动力学特性的变化,内杆获得逆时针力矩,经过内杆传递外杆获得顺时针力矩,达到加速内杆摆起抑制外杆摆起的目的,实现能量从外杆向内杆的转移。因此,可在水平线上下区域分别施加适当的控制力矩 (U_4, U_5), 即可达到调整内杆与外杆相对姿态的目的。当内杆接近稳定控制区域时(图 5 中 $[\theta_{c7}, \theta_{c6}]$), 根据系统在该区域的线性化模型设计针对状态变量的 PD 控制律,实现摆杆姿态的精确调节,以接近直线的相对姿态进入稳定控制阶段。因此,姿态调整阶段的控制律如式(10)所示,对应的控制模式划分如图 6 所示。

$$u_2 = \begin{cases} U_4 & , \theta_{D1} \in [\theta_{c5}, \theta_{c4}) \\ U_5 & , \theta_{D1} \in [\theta_{c6}, \theta_{c5}) \\ K_1 \cdot e_x & , \theta_{D1} \in [\theta_{c7}, \theta_{c6}) \end{cases} \quad (10)$$

式中, U_4, U_5 为 bang-bang 常量; K_1 为行向量,其分量为 PD 控制器比例和微分系数; e_x 为列向量,其分量为旋臂与摆杆的角度及角速度误差。

3.3 稳定控制阶段

取状态变量 $X = [\theta_0 \ \theta_1 \ \theta_2 \ \dot{\theta}_0 \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2]^T$, 通过式(1)推导出对应的线性化数学模型为

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (11)$$

其中,

$$A = \frac{\partial \dot{X}}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{\theta}_0}{\partial \theta_0} & \cdots & \frac{\partial \dot{\theta}_0}{\partial \theta_2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \dot{\theta}_2}{\partial \theta_0} & \cdots & \frac{\partial \dot{\theta}_2}{\partial \theta_2} \end{bmatrix}$$

$$B = \frac{\partial \dot{X}}{\partial u} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{\theta}_0}{\partial u} & \frac{\partial \dot{\theta}_1}{\partial u} & \frac{\partial \dot{\theta}_2}{\partial u} \end{bmatrix}^T$$

将 $\theta_0 = \theta_1 = \theta_2 = \dot{\theta}_0 = \dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = 0$ 代入式(11),得系统在倒立平衡点的线性化模型,以式(12)最小化为目标,解 Riccati 方程得两摆杆稳定控制律如式(13)所示。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (X^T Q X + u^T R u) dt \quad (12)$$

$$u_3 = K_2 \cdot e_X \quad (13)$$

4 仿真实验

根据式(1)的动力学模型以及表 1 所示的物理参数,在 Matlab/Simulink 软件上构建旋转二级摆仿真实验平台。结合旋转二级倒立摆设备实际物理参数值,可得系统物理参数的值如表 2 所示。图 6 显示了在相同初始条件下仿真模型与实际设备的零输入响应曲线。从图 6 可以看出,仿真曲线与实时曲线的变化趋势基本一致,但在振荡周期与谐波频谱方面存在明显差异,表明仿真模型结构与实际设备基本一致,但各物理参数与实际设备存在一定差异,特别是摩擦系数、质心位置以及转动惯量。

表 2 物理参数值

物理参数	估计值
内杆质量(m_1)	0.10 (kg)
外杆质量(m_2)	0.10 (kg)
编码器质量(m_b)	0.21 (kg)
内杆转动惯量(J_1)	0.00133 (kg · m ²)
外杆转动惯量(J_2)	0.00133 (kg · m ²)
旋臂长度(L_0)	0.375 (m)
内杆长度(L_1)	0.40 (m)
内杆质心 - 轴心距(l_1)	0.20 (m)
外杆质心 - 轴心距(l_2)	0.20 (m)
旋臂 - 内杆转轴摩擦系数(c_1)	0.0030
内杆 - 外杆转轴摩擦系数(c_2)	0.0015

在验证被控对象仿真模型基础上,结合式(9)、(10)及(13)分别对能量累积、姿态调整及稳定控制阶段进行控制器设计,通过式(14)进行选择控制,

$$u = \begin{cases} u_1, & \text{step} = 1 \\ u_2, & \text{step} = 2 \\ u_3, & \text{step} = 3 \end{cases} \quad (14)$$

用于实现三个控制阶段之间的严格时序运行,式中的 step 为控制阶段标志变量,控制器参数经过多次分阶段及综合试凑实验整定得到。内杆、外杆以及悬臂杆的运行状态如图 7~9 所示,图 10 为系统控

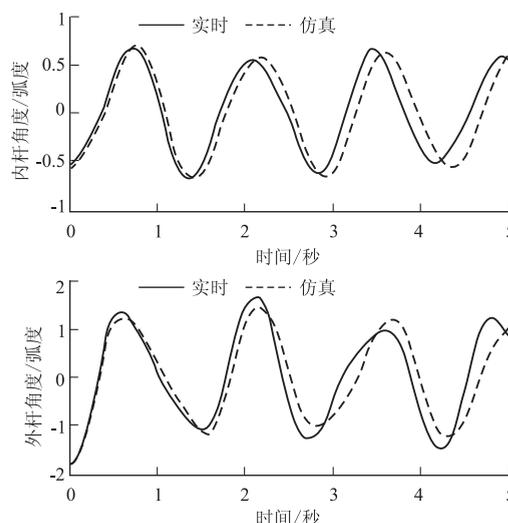


图 6 仿真模型与实际设备的零输入响应制输出,即悬臂杆角加速度。由图 7~10 所示仿真结果可知,采用基于 HSIC 的混合控制算法,旋转二级倒立摆摆起倒立控制得以实现。

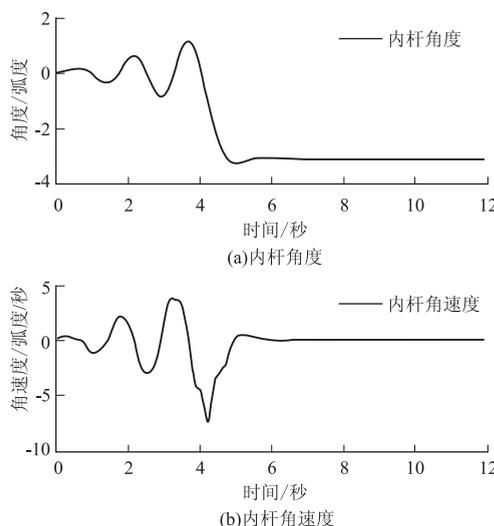


图 7 内杆运动响应

5 实时实验

实时实验采用固高科技生产的旋转二级倒立摆,伺服驱动电机为松下交流伺服电机,额定功率为 0.2 kw,额定转速 3000 r/min,编码器为 600 线光电编码器(4 倍频),结合仿真实验中的控制器及其相关参数设置,实现旋转二级倒立摆摆起倒立控制,系统响应如图 11,视频截图如图 12,实时实验结果同样验证了该控制算法的有效性。

6 结论

本文结合仿人智能控制理论,对旋转二级倒立

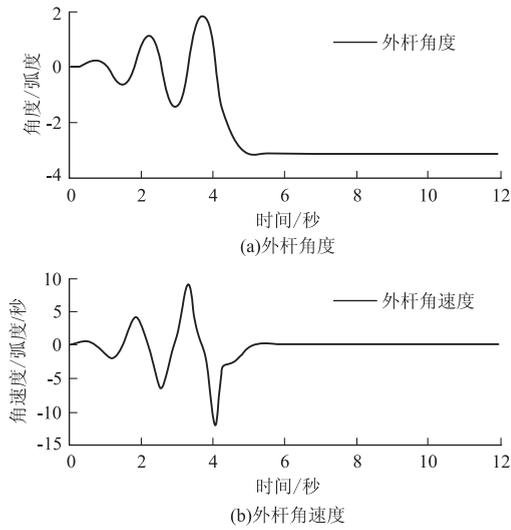


图8 外杆运动响应

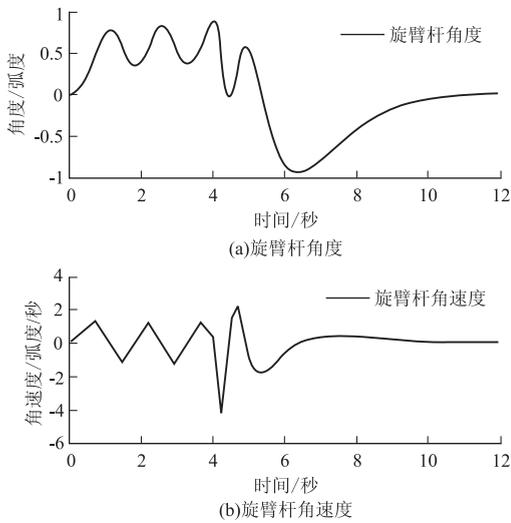


图9 旋臂杆运动响应

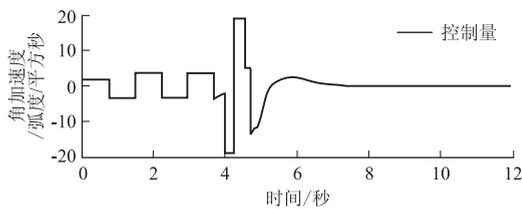


图10 控制量(旋臂杆角加速度)

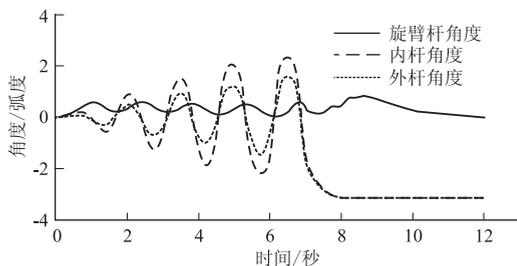


图11 实时控制下系统响应

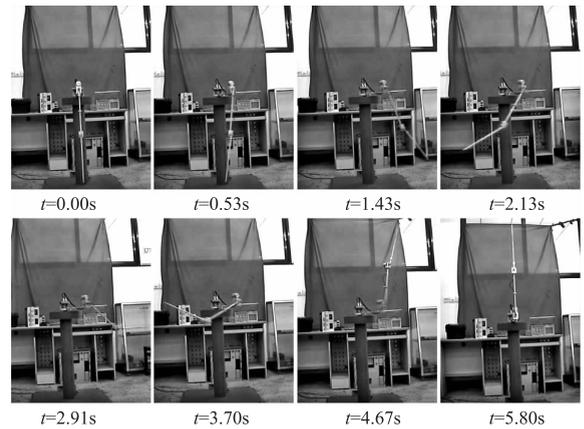


图12 摆起倒立过程视频时序截图

摆摆起倒立过程进行控制阶段划分,以无源系统理论设计出能量累积策略,根据动力学分析和局部线性化方法进行摆杆姿态调整和稳定控制,实现了旋转二级倒立摆的摆起倒立稳定控制,仿真和实时控制结果验证了该控制算法的有效性。

参考文献

[1] HUANG J, GUAN Zhihong, MATSUNO T, et al. Sliding-Mode Velocity Control of Mobile-Wheeled Inverted-Pendulum Systems [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(4): 750-758.

[2] CHANG Longhong, LEE Anchen. A hybrid controller design for bi-axial inverted pendulum system [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2009, 19(5): 512-531.

[3] WAI Rongjong, CHANG Lijung. Stabilizing and Tracking Control of Nonlinear Dual-Axis Inverted-Pendulum System Using Fuzzy Neural Network [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2006, 14(1): 145-168.

[4] 杨亚伟, 张明廉. 三级倒立摆的数控稳定[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(3): 311-314.

[5] 李洪兴, 苗志宏, 王加银. 四级倒立摆的变论域自适应模糊控制[J]. 中国科学(E辑), 2002, 32(1): 65-75.

[6] 李德毅. 三级倒立摆的云控制及动平衡模式[J]. 中国工程科学, 1999, 1(1): 41-46.

[7] FANTONI I, LOZANO R, SPONG M W. Energy Based Control of the Pendubot [J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 2000, 45(4): 725-729.

[8] LUIS A I. Passivity-based swinging up of a pendulum [C]. Proceedings of the 18th IFAC World Congress. Milano: IFAC, 2011: 10667-10672.

[9] WEI Z, HELMUT R. Energy and Passivity Based Control of the Double Inverted Pendulum on a Cart [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Control Application. Mexico City, Mexico: IEEE, 2001. 896-901.

(下转第 569 页)

- [7] HADDAD A N, DE MORAES SEDREZ M, DE MACEDO PIRES CONDEIXA K, et al. Life cycle assessment: A comparison of ceramic brick inventories to subsidize the development of databases in Brazil [C]. Durham: Trans Tech Publications Ltd Press, 2013.
- [8] TEIXEIRA R F M. Critical Appraisal of Life Cycle Impact Assessment Databases for Agri-food Materials [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2015, 19(1): 38-50.
- [9] TAKANO A, WINTER S, HUGHES M, et al. Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment [J]. *Building and Environment*, 2014, 79: 20-30.
- [10] 张群. 材料生命周期分析网络数据库的研究与开发 [D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- [11] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型 [J]. *环境科学学报*, 2010, 30(10): 2136-2144
- [12] 刘芳, 施进发, 陆长德. 基于 GIS 的产品生命周期评价数据库设计研究 [J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2010, 23(3): 467-469.
- [13] 于亚男, 罗云, 王景人, 等. 特种设备全生命周期风险辨识与数据库的开发 [J]. *安全*, 2012, (9): 37-40.
- [14] 王卫, 李纬光, 刘金朝. 基于生命周期的数据库产品动态定价模式 [J]. *情报理论与实践*, 2012, 35(2): 3531-3534.
- [15] 孙艳彬. 机电产品全生命周期评价基础数据库设计 [D]. 青岛: 大连理工大学, 2013.
- [16] World steel Association. Life cycle assessment methodology report [R]. Brussels: World steel Association, 2011: 1-87.
- [17] European Confederation of Iron and Steel Industries (EUROFER). The European Steel Industry's Contribution to an Integrated Product Policy-Final Report [R]. Brussels: EUROFER, 2008: 1-140.
- [18] Nippon Steel Corporation. NIPPON STEEL Sustainability Report 2010 [R]. Tokyo: Nippon Steel Corporation, 2012: 20-37.
- [19] ARCELOR M. Core Strengths, Sustainable Returns Annual report 2011 [EB/OL]. London: ArcelorMittal, 2013-03-12, <http://www.arcelormittal.com/corp/news-and-media/publications-and-reports/annual-reports>.
- [20] Tata Steel. 105th Annual Report 2011-2012 [R]. Mumbai: Tata Steel, 2012: 42.
- [21] MAURICE B, FRISCHKNECHT R, COELHO-SCHWIRTZ V, et al. Uncertainty analysis in life cycle inventory. Application to the production of electricity with French coal power plant [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2000, 8(2): 95-108.
- [22] Institute of Environmental Sciences-Leiden University. CML-IA Database Version 4.1 [EB/OL]. Leiden: Leiden University, 2012-07-04. <http://www.cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>.
- [23] JEROEN B. Guinée, MARIEKE Gorrée, REINOUT Heijungs, et al. Handbook on Life Cycle Assessment: Operational guide to the ISO standards [C]. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2002: 161-389.
- [24] 国家统计局工交司. 能源统计知识手册 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2006: 70.

(上接第 555 页)

- [10] GRAICHEN K, TREUER M, ZEITZ M. Swing-up of the double pendulum on a cart by feedforward and feedback control with experimental validation [J]. *Automatica*, 2007, 43(1): 63-71.
- [11] 张永立, 程会锋, 李洪兴. 三级倒立摆的自动摆起与稳定控制 [J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(1): 37-45.
- [12] 李祖枢, 王育新, 谭智, 等. 小车二级摆系统的摆起倒立控制与实践 [C] // 第五届全球智能控制与自动化大会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 2004, 6: 2360-2365.
- [13] 李祖枢, 但远宏, 温永玲, 等. 小车三级摆摆起倒立的仿人智能控制 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(增刊): 38-41.
- [14] 李祖枢, 但远宏, 张小川, 等. 双摆机器人摆杆平衡态任意转换运动控制的实现 [J]. *自动化学报*, 2010, 36(12): 1720-1731.
- [15] ARIAN V D S. L2 - Gain and passivity techniques in nonlinear control [M]. London: Springer, 2000.
- [16] SEPULCHRE R, JANKOVIC M, KOKOTOVIC P V, Constructive Nonlinear Control [M]. London: Springer, 1997.
- [17] 关肇直, 陈翰馥. 线性控制系统的能控性和能观性 [M]. 北京: 科学出版社, 1975.