

# 双摆杂技机器人 DD2DU 仿人智能控制器设计\*

但远宏 徐 鹏\*\* 谭 智

(重庆理工大学人工智能系统研究所,重庆 400054)

**摘 要:**双摆杂技机器人的两根顶杆有四个平衡点:Down-Down(DD)、Down-Up(DU)、Up-Down(UD)、Up-Up(UU)。针对双摆杂技机器人从 DD 转换到 DU 平衡点(DD2DU)的大范围非线性欠驱动控制问题,应用基于动觉智能图式的仿人智能控制理论,将 DD2DU 控制任务分解为初始扰动、外杆摆起、姿态调整、稳定控制 4 个阶段,并设计出每个阶段的关联图式、运动图式(控制器),进而构建多模态控制的仿人智能控制器,最后通过验证实验证明了该控制方法的有效性。

**关键词:**双摆杂技机器人;欠驱动控制;DD2DU;仿人智能控制;多模态控制

中图分类号:TP273 文献标识码:A doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2016.03.020

## Design of Controller of DD2DU on Double Pendulum Robot Based on Human Simulated Intelligent Control\*

DAN Yuanhong XU Peng\*\* TAN Zhi

(Institute of Artificial Intelligent System, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054)

**Abstract:** Double Pendulum Robot has four equilibrium points: Down-Down(DD), Down-Up(DU), Up-Down(UD) and Up-Up(UU). The control problem of transfer action from Down-Down to Down-Up(DD2DU) is discussed, which is a non-linear under-actuated control task. Human Simulated Intelligent Control Theory is applied to analyze the control process of DD2DU, and the control process is divided into four phases: Initial disturbance phase, outer rod swing up phase, posture adjustment phase, and balance control phase. Sub-controller for each control phases is designed, and then a multi-mode Human Simulated Intelligent control system is formed. Experimental results testify the validity of proposed method.

**Key words:** double pendulum robot; under-actuated control; DD2DU; Human Simulated Intelligent Control; multi-mode control

## 1 引言

双摆杂技机器人的原型为旋转二级倒立摆,属于典型的非线性、强耦合、欠驱动控制系统。由于其控制难度极大并能直观反映出控制方法的有效性,因此一直以来都是自动控制领域的研究热点之一。截止目前,三级倒立摆乃至四级倒立摆在倒立平衡点的平衡控制已经得以实现,相关控制方法有模糊控制、线性二次型(LQR)、拟人智能控制、云理论等<sup>[1-4]</sup>,然而针对摆杆平衡点之间相互切换的大范围非线性运动控制难度更高,相关报道更少<sup>[5-8]</sup>。

为实现诸如双摆机器人各个平衡状态切换的杂技动作,必须突破传统控制理论(经典控制理论和

现代控制理论)单控制与单控制模态的控制器结构,而具备分层递阶结构的多控制器与多模态控制的仿人智能控制器,能够模拟人的控制决策过程,并与认知科学中的图式理论相结合,解决了一系列复杂难控系统的控制问题<sup>[9]</sup>。文献[9-13]展示了仿人智能控制器的设计过程,以及在典型难控对象上的应用情况。

基于动觉智能图式仿人智能控制理论,本文将双摆杂技机器人 DD2DU 杂技动作进行任务分解,并针对各个阶段设计响应控制器,从而构建仿人智能多模态控制器,并在实际设备上验证实验,以证明仿人智能多模态控制算法的有效性。

## 2 数学模型与问题描述

双摆杂技机器人的物理结构如图 1 所示,运用拉格朗日建模方法可建立双摆杂技机器人的动力学微分方程如式(1)所示,数学模型中相关物理参数说明参见表 1。

2015-09-23 收稿,2015-11-12 接受,2016-06-25 网络发表

\* 重庆市教委科学技术研究项目(KJ130829, KJ130807, KJ1400924),  
重庆市科委科技人才培养计划项目(cstc2013-qnrc40010)资助

\*\* 通讯作者, E-mail: xupeng5477@126.com; Tel: 023-62563152

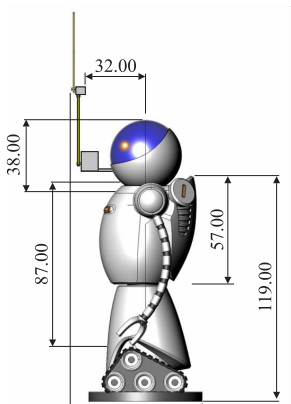


图 1 双摆杂技机器人实物(单位:cm)

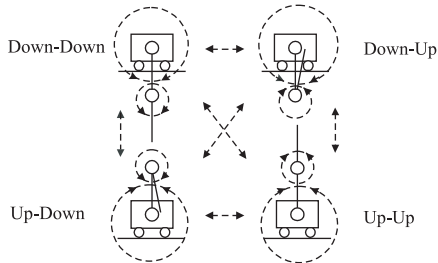


图 2 双摆杂技机器人的四个平衡点

1

0

0

$M_{21}$

$M_{22}$

$M_{23}$

$M_{31}$

$M_{32}$

$M_{33}$

$\ddot{\Theta}$

$C_{21}$

$C_{22}$

$C_{23}$

$C_{31}$

$C_{32}$

$C_{33}$

$\Theta$

$G_1$

$G_2$

$G_3$

(1)

其中,

$$M_{21} = k_1 \cos \theta_1, M_{22} = k_2, M_{23} = k_4 \cos(\theta_1 - \theta_2)$$
$$M_{31} = k_3 \cos \theta_2, M_{32} = M_{23}, M_{33} = k_5$$
$$C_{21} = -(k_4 \sin \theta_2 + k_2 \sin \theta_1) \dot{\theta}_0 \cos \theta_1, C_{22} = c_1 + c_2$$
$$C_{23} = k_4 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - c_2$$
$$C_{31} = -(k_4 \sin \theta_1 + k_5 \sin \theta_2) \dot{\theta}_0 \cos \theta_2, C_{33} = c_2$$
$$C_{32} = -k_4 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) - c_2$$
$$G_1 = u, G_2 = k_6 g \sin \theta_1, G_3 = k_7 g \sin \theta_2$$
$$k_1 = (m_1 l_1 + m_2 L_1 + m_b L_1) L_0, k_3 = m_2 l_2 L_0$$
$$k_2 = J_1 + m_1 l_1^2 + m_2 L_1^2 + m_b L_1^2, k_4 = m_2 l_2 L_1$$
$$k_5 = J_2 + m_2 l_2^2, k_6 = m_1 l_1 + m_2 L_1 + m_b L_1$$
$$k_7 = m_2 l_2$$

图 2 为内杆和外杆组合得到的四个平衡点及其切换过程:Down - Down 内杆与外杆垂直向下;Down - Up 内杆垂直向下,外杆垂直向上;Up - Down 内杆垂直向上,外杆垂直向下;Up - Up 内杆与外杆垂直向上。双摆杂技机器人 DD2DU 过程的初始状态为两摆杆垂直向下的自然稳定状态,目标状态为内

摆杆垂直向下外摆杆垂直向上的临界稳定状态。控制器的任务即是通过控制水平旋转杆的来回转动,使得外摆杆从垂直向下的位置摆起到垂直向上的位置并稳定。在控制过程中有三个目标需要同时兼顾:尽量保持水平旋转杆位于零点位置、尽量保持内杆垂直向下的状态、实现外杆从 Down 位置摆起到 Up 位置。控制的难度体现在外杆不能直接控制,只能通过水平旋转杆 - 内杆关节以及内杆 - 外杆关节的惯性耦合作用实现有限的控制影响。在通过对旋转杆施加控制实现对外杆的影响时,也必然会改变水平旋转杆和内杆的状态。

表 1 双摆杂技机器人的物理参数说明

| 符号                             | 说明                              |
|--------------------------------|---------------------------------|
| $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ | 旋臂、内杆、外杆角度(rad)                 |
| $m_1, m_2, m_b$                | 内杆、外杆、编码器质量(kg)                 |
| $L_0, L_1, L_2$                | 旋臂、内杆、外杆长度(m)                   |
| $l_1, l_2$                     | 内杆、外杆的质心位置(m)                   |
| $c_1, c_2$                     | 内杆、外杆关节摩擦系数                     |
| $J_1, J_2$                     | 内杆、外杆转动惯量(kg·m <sup>2</sup> )   |
| $u$                            | 控制量(旋臂角加速度,rad/s <sup>2</sup> ) |

双摆杂技机器人刚开始处于 Down-Down 的自然稳定状态,需要施加一个控制作用来打破这种稳定状态,并进行外杆的摆起控制。由于实际控制时电机的力矩受限,以及对外杆的耦合传导作用相对较为微弱,一次性将外杆摆起非常困难,需要多次来回震荡来实现外杆的能量累积。而当双摆杂技机器人接近 Down-Up 平衡状态时,需要进行稳定控制。由于 Down-Up 属于临界稳定点,在外杆摆起的过程中需要进行精确的能量控制,为增大控制器的稳定性,在进行稳定控制前先调整摆杆姿态,使得摆杆进入稳定区间时的状态更好。

根据上述分析,可将 DD2DU 控制过程分为四个阶段(如图 3 所示):初始扰动阶段、外杆摆起阶段、姿态调整阶段、稳定控制阶段。下面分别阐述每个控制阶段的详细设计过程。

3 DD2DU 过程仿人智能多模态控制器设计

1)初始扰动阶段:双摆杂技机器人的初始状态位于 Down-Down 平衡点,本阶段的目标就是通过对于水平旋转杆施加一个初始扰动来打破内杆与外杆的这种稳定状态,从而为下一个阶段(外杆摆起阶段)做好准备。本阶段的控制图式(子控制器)可由式(2)表示。公式左边是控制量,也就是水平旋转杆的加速度(通过伺服驱动器的内部闭环实现);公式右边是用于判断当前控制阶段是否结束的条件,也

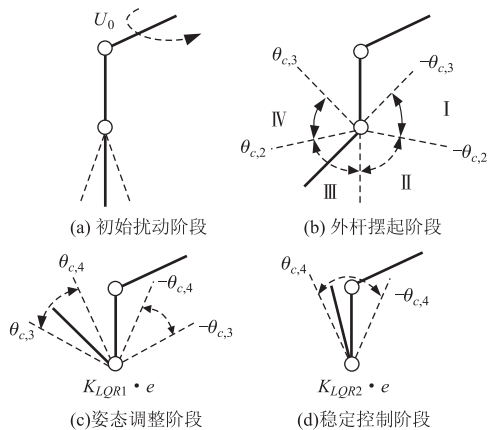


图3 DD2DU 控制过程的四个阶段

即是下一控制阶段的进入条件。切换条件  $\theta_0 > \theta_{c,1}$  用于确保初始扰动控制量  $U_0$  能够持续作用特定的时间长度,而条件  $\dot{\theta}_2 < 0$  则用于确保外杆是朝着逆时针方向旋转(外杆摆起阶段所需的初始条件)。

$$S_{KG1} = \{u = U_0 \quad \dot{\theta}_2 < 0 \& \theta_0 > \theta_{c,1}\} \tag{2}$$

2)外杆摆起阶段:本阶段包含两个子目标:尽量保持内杆位于垂直向下位置的邻域;与此同时,将外杆从垂直向下位置摆起到垂直向上位置邻域。本阶段摆杆姿态区域示意图如图3(b)所示,根据其模型的动力学分析可知,当外杆位于垂直向下位置时外杆的可控性较高,而当外杆位于水平线位置附近时可控性非常低。根据外杆可控性的高低,将本阶段外杆活动区域继续细分为两个区间:外杆高可控区间(即图3(b)中的Ⅱ、Ⅲ区域),外杆低可控区间(即图3(b)中的Ⅰ、Ⅳ区域)。内杆在垂直向下区域的可控性都比较高,相对而言,当外杆位于Ⅱ、Ⅲ区域时内杆的可控性相对较低,当外杆位于Ⅰ、Ⅳ区域时内杆的可控性相对较高。

根据上述的可控性分析以及本阶段的控制目标,在Ⅰ、Ⅳ区域以控制水平旋转杆静止为目标,以避免水平旋转杆偏离零点位置太远,在此以水平旋转杆的角速度为控制反馈,驱动水平旋转杆趋近静止状态,即控制律可设计如下:

$$u = p \cdot e_{\dot{\theta}_0}$$

其中,  $e_{\dot{\theta}_0}$  是水平旋转杆以零速度为目标时的角速度误差,由于内杆在 Down 位置是自然稳定的,因此在重力和转动摩擦系数的作用下,内杆会自动趋向于 Down 稳定状态。

当外杆位于Ⅱ、Ⅲ区域时,以控制外杆摆起为目标。根据简单的动力学分析可知,当给水平旋转杆施加逆时针方向的脉冲力矩时,外杆将会顺时针旋转;当给水平旋转杆施加顺时针方向的脉冲力矩时,外杆将会逆时针旋转。为使外杆越摆越高,仅需要

根据当前外杆的旋转方向对水平旋转杆施加相应的控制量即可,控制律可设计如下:

$$u = \text{sign}(\dot{\theta}_2) \cdot U_1$$

其中,  $U_1$  是一个相对较大的 bang-bang 控制量,其方向由外杆旋转方向  $\text{sign}(\dot{\theta}_2)$  确定,从而实现向外杆注入能量,使其振幅越来越大,最终进入 Up 领域。综上所述,可将外杆摆起阶段的控制图式归纳如下:

$$S_{KG2} = \left\{ \begin{aligned} S_{KG21} &= \{u = p \cdot e_{\dot{\theta}_0} \quad \text{abs}(\theta_2) < \theta_{c,2}\} \\ S_{KG22} &= \{u = \text{sign}(\dot{\theta}_2) \cdot U_1 \quad \text{abs}(\theta_2) > \theta_{c,2}\} \end{aligned} \right. \tag{3}$$

$\text{abs}(\theta_2) > \theta_{c,3}$

表达式的右边是本阶段的结束条件,也即进入下一阶段(姿态调整阶段)的初始条件,  $\theta_{c,3}$  是一个靠近 Up 位置附近的角速度常量,当外杆振幅大于该角度时可以认为外杆已进入姿态调整区域,随即激活姿态调整控制。式(3)的中间部分为本阶段两个控制模态的切换条件,当外杆振幅大于  $\theta_{c,2}$  时进入Ⅰ、Ⅳ区域,选择  $S_{KG21}$  实现旋转杆转速控制;当振幅小于  $\theta_{c,2}$  时进入Ⅱ、Ⅲ区域,选择  $S_{KG22}$  实现外杆摆起控制。

3)姿态调整阶段:经过上一阶段的控制,外杆以一定的旋转角速度进入垂直向上附近区域。在理想情况下,外杆在初速度惯性作用以及重力影响下,继续向上摆起并在到达 Up 平衡点时静止。由于众多不确定因素的影响(如电源电压、电机疲劳特性、同步带弹性形变、空气流动、水平杆谐振等),外杆进入 Up 邻域时的角速度存在较大幅度波动。为提高后续稳定控制的成功率,引入姿态调整控制,用于调整外摆杆的能量与姿态。本阶段的控制图式设计如下:

$$S_{KG3} = \{P \cdot e_{\theta} + D \cdot e_{\dot{\theta}} \quad \text{abs}(\theta_2) > \theta_{c,4}\} \tag{4}$$

式中,  $P = [p_1 \quad p_2 \quad p_3]$ ,  $e_{\theta} = [e_{\theta_1} \quad e_{\theta_2} \quad e_{\theta_3}]$ ,  $D = [d_1 \quad d_2 \quad d_3]$ ,  $e_{\dot{\theta}} = [e_{\dot{\theta}_1} \quad e_{\dot{\theta}_2} \quad e_{\dot{\theta}_3}]$ 。这些参数通过线性最优二次型(LQR)计算得到,即在内杆垂直向下外杆位于  $\theta_{c,3}$  位置对双摆杂技机器人数学模型进行线性化,再对线性化后的模型进行 LQR 最优计算得到 PD 参数。

4)稳定控制阶段:与姿态调整阶段类似,Down-Up 位置对双摆杂技机器人的动力学模型进行线性化,然后再运用线性最优二次型计算出水平旋转杆、内杆、外杆的 PD 控制系数  $K_{LQR2}$ 。因此本阶段控制律可表示如下:

$$S_{KG4} = \{K_{LQR2} \cdot e \quad \text{abs}(\theta_2) < \theta_{c,5}\} \tag{5}$$

综合前述各阶段控制图式(2)~(5)可得 DD2DU 的总体动觉智能图式

$$S_{KG} = \begin{cases} \{u = U_0 & , \dot{\theta}_2 < 0 \ \& \ \theta_0 > \theta_{c,1} \\ \begin{cases} u = p \cdot e_{\theta 0} & , abs(\theta_2) < \theta_{c,2} \\ u = sign(\dot{\theta}_2) \cdot U_1 & , abs(\theta_2) > \theta_{c,2} \end{cases} \\ \{u = K_{LQR1} \cdot e & , abs(\theta_2) > \theta_{c,4} \\ \{u = K_{LQR2} \cdot e & , abs(\theta_2) < \theta_{c,5} \end{cases}$$

(6)

根据式(6)所示控制图式描述,以及基于动觉智能图式的仿人智能控制理论,可构建如图 4 所示的控制器结构。图中的关联图式( Associated Schema)接收来自感知图式( Sensor Schema)提取出来的特征信息,判断当前所处控制阶段(即式(6)中的右边部分判断条件),从而激活对应的运动图式(即四个控制阶段:初始扰动( initial vibration)、外杆摆起( swing-up control)、姿态调整( pose adjustment)、稳定控制( balance control))。

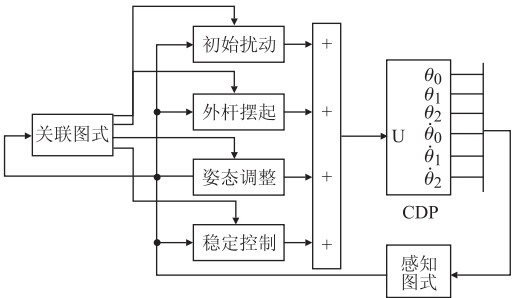


图 4 DD2DU 的控制器结构

4 实时控制实验

实时实验采用固高科技有限公司生产的双摆杂技机器人,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 2400 ppr 光电编码器,实验平台如图 5 所示。通过对基于动觉智能控制图式(6)进行多次的参数调整及实验,得到一组运行效果较理想的参数见表 2,其双摆杂技机器人 DD2DU 的实时响应曲线如图 6~8 所示,图 9 为控制输出曲线,图 10 为 DD2DU 实时控制视频的时序截图。通过图 6~9 的验证实验数据可以看出,该控制器能快速且稳定实现双摆杂技机器人外杆的摆起倒立控制。

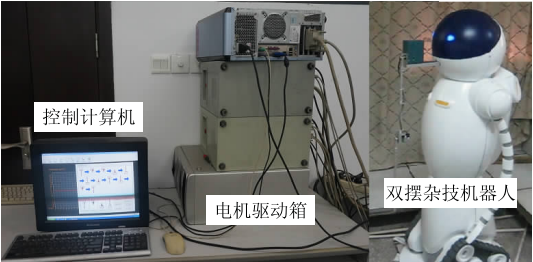


图 5 双摆杂技机器人实验平台

表 2 DD2DU 控制参数与阈值参数

| 参数 | $U_0$          | $U_1$          | $p$            | $\theta_{c,1}$ | $K_{LQR1}$                                      |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------------------------|
| 数值 | 0.9            | 11.1           | 8.8            | 3.5°           | [ -1.58, -1.98, 92.80, 12.62, -139.08, -20.91 ] |
| 参数 | $\theta_{c,2}$ | $\theta_{c,3}$ | $\theta_{c,4}$ | $\theta_{c,5}$ | $K_{LQR2}$                                      |
| 数值 | 80°            | 140°           | 170°           | 150°           | [ -3.16, -3.96, 184.3, 25.04, -278.14, -42.31 ] |

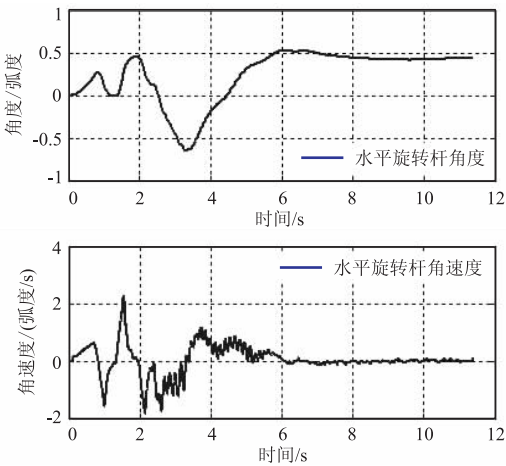


图 6 水平旋转杆响应

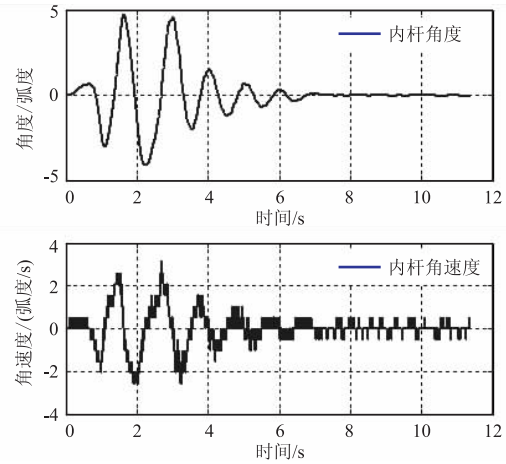


图 7 内杆响应

5 结论

本文推导建立了双摆杂技机器人的动力学模型,采用基于动觉智能图式的仿人智能控制方法,将 DD2DU 整个控制过程分为初始扰动、外杆摆起、姿态调整、稳定控制等四个阶段,并设计出具有多控制器与多模态结构的控制系统,实现了双摆杂技机器



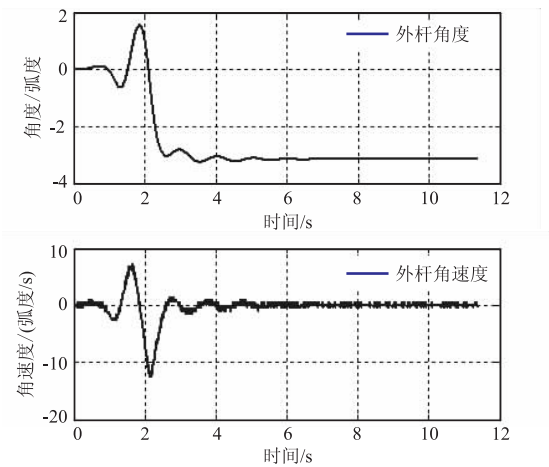


图 8 外杆响应

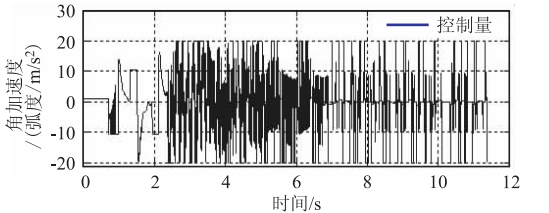


图 9 控制量

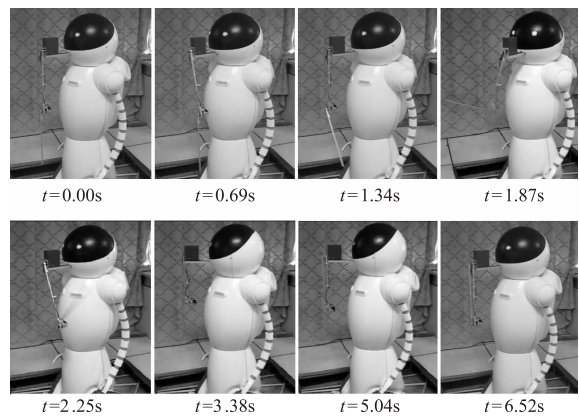


图 10 DD2DU 实时控制视频截图

人从 Down-Down 平衡点向 Down-Up 平衡点的转换运动控制,实时控制实验结果证明了该控制器的有效性。

参考文献

[1] 张义明,战兴群. 二级倒立摆的二次型最优控制研究[J]. 计算机测量与控制,2004,12(11):1067-1069.

[2] 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(2):41-46.

[3] 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.

[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] YAMAKITA M, IWASHIRO M, SUGAHARA Y. Robust Swing Up control of Double Pendulum[C]. Proceedings of the American Control Conference, Seattle; IEEE, 1995:290-295.

[6] FANTONI I, LOZANO R, SPONG M W. Energy based Control of the Pendubot[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 46(4):725-729.

[7] ÅSTRÖM K J, FURUTA K. Swing Up a Pendulum by Energy Control[C]. IFAC 13th World Congress, San Francisco; Elsevier Press, 1996.

[8] RUBI J RUBIOÁ, AVELLO A. Swing-up control problem for a self-erecting double inverted pendulum[J]. IEE Proceedings-Control Theory Applications, 2002, 149(2):169-175.

[9] 李祖枢,涂亚庆. 仿人智能控制[M]. 北京:国防工业出版社, 2003.

[10] 李祖枢. 力矩受限单摆的摆起倒立控制 - 仿人智能控制在非线性系统中的应用[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(2):225-229.

[11] LI Zushu, CHEN Qingchun, LI Xuemei, INOOKA H. Human Simulating Intelligent Control and Its Application to Swinging-up of Cart-Pendulum[C]. Proc. of 6th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication Ro-Man'97, Sendai, Japan, 1997.

[12] 李祖枢,王育新,谭智,等. 小车二级摆的摆起倒立控制与实践[C]. 第 5 届全球智能控制与自动化大会. 杭州:IEEE 出版社, 2004.

[13] 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.