

6-5-2020

Fuzzy Sliding Mode Control of Double Inverted Pendulum Based on Linear Adaptive QPSO Tuning

Xin Jing

1. School of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;;2. Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing, Xi'an 710048, China;;

Xiangshuai Han

1. School of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;;2. Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing, Xi'an 710048, China;;

Yanming Liang

1. School of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;;2. Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing, Xi'an 710048, China;;

Cuicui Yan

3. School of Engineering, Xi'an Siyuan University, Xi'an 710043, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Fuzzy Sliding Mode Control of Double Inverted Pendulum Based on Linear Adaptive QPSO Tuning

Abstract

Abstract: *To solve the problem of balancing control of linear double inverted pendulum, fuzzy sliding mode control method based on linear adaptive QPSO tuning is presented. According to the coupling property of the linear double inverted pendulum system, decoupling is applied twice and fuzzy sliding mode balancing controller is designed. The parameters of fuzzy sliding mode controller are determined by the linear adaptive quantum particle swarm optimization algorithm (LAQPSO). Linear double inverted pendulum balancing control simulation results show that the proposed method can effectively reduce the chattering phenomenon existing in the traditional sliding mode controller and improve the accuracy and rapidity of balancing control of linear double inverted pendulum system. Physical experiment results show that the proposed method is reasonable and effective.*

Keywords

linear double inverted pendulum, balancing control, LAQPSO, fuzzy sliding mode control

Recommended Citation

Xin Jing, Han Xiangshuai, Liang Yanming, Yan Cuicui. Fuzzy Sliding Mode Control of Double Inverted Pendulum Based on Linear Adaptive QPSO Tuning[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(11): 2909-2917.

基于线性自适应 QPSO 整定的倒立摆模糊滑模控制

辛菁^{1,2}, 韩相帅^{1,2}, 梁炎明^{1,2}, 颜翠翠³

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 西安思源学院工学院, 陕西 西安 710043)

摘要: 针对直线二级倒立摆平衡控制问题, 提出了一种基于线性自适应量子粒子群整定的倒立摆模糊滑模控制方法。根据直线二级倒立摆系统的耦合特性, 对其进行了两次解耦, 设计了模糊滑模平衡控制器, 其中模糊滑模控制器的参数利用线性自适应量子粒子群算法进行优化确定。直线二级倒立摆平衡控制仿真结果表明, 与传统的倒立摆滑模平衡控制方法相比, 提出的方法可以有效地削弱“抖振”, 提高直线二级倒立摆平衡控制的精度和快速性。实物控制结果进一步验证了该控制方法的合理性和有效性。

关键词: 直线二级倒立摆; 平衡控制; 线性自适应量子粒子群算法; 模糊滑模控制

中图分类号: TP24 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 11-2909-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201711042

Fuzzy Sliding Mode Control of Double Inverted Pendulum Based on Linear Adaptive QPSO Tuning

Xin Jing^{1,2}, Han Xiangshuai^{1,2}, Liang Yanming^{1,2}, Yan Cuicui³

(1. School of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing, Xi'an 710048, China;

3. School of Engineering, Xi'an Siyuan University, Xi'an 710043, China)

Abstract: To solve the problem of balancing control of linear double inverted pendulum, fuzzy sliding mode control method based on linear adaptive QPSO tuning is presented. According to the coupling property of the linear double inverted pendulum system, decoupling is applied twice and fuzzy sliding mode balancing controller is designed. The parameters of fuzzy sliding mode controller are determined by the linear adaptive quantum particle swarm optimization algorithm (LAQPSO). Linear double inverted pendulum balancing control simulation results show that the proposed method can effectively reduce the chattering phenomenon existing in the traditional sliding mode controller and improve the accuracy and rapidity of balancing control of linear double inverted pendulum system. Physical experiment results show that the proposed method is reasonable and effective.

Keywords: linear double inverted pendulum; balancing control; LAQPSO; fuzzy sliding mode control

引言

倒立摆是一种典型的非线性、高阶次、不稳定、

强耦合的复杂系统, 其控制方法的研究一直是控制领域的热点问题。同时该系统也为很多先进控制方法的研究和应用提供了一个理想的实验验证平台。根据控制目的的不同, 倒立摆控制主要分为三类, 即起摆控制、平衡控制(也称稳定控制)和跟踪控制, 其中平衡控制和跟踪控制在实际中最常用^[1]。目前, 已经提出了大量的倒立摆平衡控制方法, 如



收稿日期: 2016-03-21 修回日期: 2016-06-17;
基金项目: 陕西省自然科学基金(61203345), 陕西省教育厅重点实验室科学研究计划(16JS071), 陕西省现代装备绿色制造协同创新项目(304-210891702);
作者简介: 辛菁(1975-), 女, 甘肃天水, 博士, 副教授, 研究方向为工业机器人视觉伺服。

<http://www.china-simulation.com>

• 2909 •

智能控制^[2]、自适应控制^[3]、滑模控制^[4]、反步控制^[5]等,其中滑模控制作为一种非线性控制方法,因其具有设计简单、对系统参数变化和外界扰动不敏感等优点而得到了广泛的应用^[4,6]。由于滑模控制器的不连续性导致滑模控制自身存在“抖振”现象,为此研究者提出了多种消弱“抖振”的方法,如,王钰等^[7]在传统指数趋近律中的等速趋近项引入 s^2 项,使控制器输出抖振趋于光滑;孙彪等^[8]利用幂次函数构造一种新的趋近律离散控制算法来削弱抖振;王宗义等^[9]利用带有自适应调节算法的模糊控制来调节滑模控制的增益,并将之应用于移动机器人的轨迹跟踪控制中,研究结果表明该算法不仅具有较强鲁棒性,同时有效地削弱了抖振。将模糊控制与滑模控制相结合构成模糊滑模控制器可以有效地消弱抖振,但模糊滑模控制器参数较多,最优参数的确定有一定困难^[10]。因此,寻找适合于倒立摆系统的简单有效的模糊滑模器参数的整定方法,对提高该控制器性能具有重要实际意义。

线性自适应量子粒子群算法(LAQPSO)将寻优过程分为“粗寻优”和“细寻优”两个阶段,与传统的 QPSO 相比,该方法对多维参数具有更强的全局和局部搜索能力^[11]。基于此,本文设计了直线二级倒立摆模糊滑模平衡控制器,然后将 LAQPSO 算法应用于模糊滑模控制器参数的整定中,提出了基于 LAQPSO 算法整定的倒立摆模糊滑模平衡控制方法,仿真结果表明了该方法的有效性。

1 直线二级倒立摆平衡控制问题描述

直线二级倒立摆系统如图 1 所示,由导轨、小车及与小车相连接的两根摆杆构成。系统的输入是作用在小车的力 F (也可看作是施加在小车电机上的控制电压 u),输出是小车的位置 x 和两个摆杆的角度 θ_1 和 θ_2 。这三个输出值均可通过安装在小车伺服电机、摆杆 1 和摆杆 2 上的光电编码器测量得到,然后通过差分运算得到小车速度、摆杆 1 角速度和摆杆 2 角速度。

图中, x 为小车位移, θ_1 和 θ_2 分别为摆杆 1 和

摆杆 2 与垂直向上方向的夹角; F 为作用在小车上的力, M 为小车质量, m_1 和 m_2 分别为摆杆 1 和摆杆 2 的质量; l_1 和 l_2 分别为摆杆 1 和摆杆 2 的转动轴心到杆质心长度。

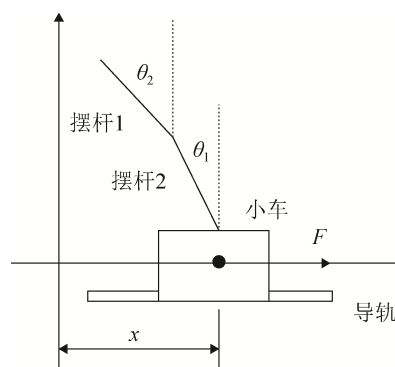


图 1 直线二级倒立摆系统示意图

Fig.1 schematic diagram of the Double Inverted Pendulum System

定义直线二级倒立摆的状态变量分别为小车位置、小车速度、摆杆 1 位置、摆杆 1 速度、摆杆 2 位置和摆杆 2 速度,即:

$$x_1 = x, x_2 = \dot{x}, x_3 = \theta_1, x_4 = \dot{\theta}_1, x_5 = \theta_2, x_6 = \dot{\theta}_2$$

忽略一些次要因素,比如空气阻力和各种摩擦,利用拉格朗日方程可推导出直线二级倒立摆的系统方程。拉格朗日方程是以能量的观点建立起系统的运动方程。首先计算直线二级倒立摆系统的动能和势能,其次在广义坐标对方程求导,并在平衡位置进行线性化处理。文献[12]给出了直线二级倒立摆系统的状态空间模型,如式(1)(2)所示:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & k_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_3 & k_4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ k_5 \\ k_6 \end{bmatrix} u \quad (1)$$

$$y = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (2)$$

式(1)中, 参数 k_1, \dots, k_6 的定义如下:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{3g(m_1 + 2(m_2 + m_3))}{(4m_1 + 3(m_2 + 4m_3))l_1} & k_2 &= \frac{-9gm_2}{2(4m_1 + 3(m_2 + 4m_3))l_1} \\ k_3 &= \frac{-9g(m_1 + 2(m_2 + m_3))}{2(4m_1 + 3(m_2 + 4m_3))l_2} & k_4 &= \frac{3g(m_1 + 3(m_2 + m_3))}{(4m_1 + 3(m_2 + 4m_3))l_2} \\ k_5 &= \frac{3(2m_1 + m_2 - 4m_3)}{2(4m_1 + 3(m_2 + 4m_3))l_1} & k_6 &= \frac{3(m_1 - l_2m_3)}{2(4m_1 + 3(m_2 + 4m_3))l_2} \end{aligned}$$

由状态空间模型可知直线二级倒立摆是一个开环不稳定系统, 其平衡控制的目的就是通过设计合适的控制器得到控制输入 u (这个控制输入就是施加在小车上的力 F)使得小车的位置 x 发生变化, 从而使两根摆杆始终保持竖直向上; 下面将详细介绍本文所设计的直线二级倒立摆模糊滑模平衡控制器的基本原理。

2 直线二级倒立摆模糊滑模平衡控制器设计

根据滑模控制器的设计思想, 本文所提出的直线二级倒立摆模糊滑模平衡控制方法由两部分组成, 即滑模面切换函数设计和滑动模态控制律设计。首先设计滑模面切换函数, 目的是使它所确定的滑动模态渐近稳定且具有良好的动态品质; 接着设计滑动模态控制律, 目的是使系统快速到达滑模面。

2.1 滑模面切换函数的设计

由公式(1)和(2)可知, 直线二级倒立摆系统是一个强耦合的六阶系统。在设计滑模面切换函数之前首先对系统进行解耦, 把系统解耦成沿直线方向运动的小车子系统、一级摆杆平衡子系统以及二级摆杆平衡子系统共计三个子系统。

针对上述三个相互耦合的子系统, 分别设计出如公式(3)所示的三个滑模面切换函数:

$$\begin{cases} s_1 = \dot{x} + \lambda_1 x \\ s_2 = \dot{\theta}_1 + \lambda_2 \theta_1 \\ s_3 = \dot{\theta}_2 + \lambda_3 \theta_2 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, s_1, s_2, s_3 分别为小车子系统、一级摆杆子系统、二级摆杆子系统的滑模面切换函数;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别为对应的三条切换线的斜率, 为使其都满足滑模面的可达性条件, 须有 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \in R^+$ 。

得到三个相互独立的滑模面切换函数之后, 利用 s_1, s_2, s_3 三个子系统滑模面切换函数可进一步设计出如式(4)所示的整个系统的滑模面切换函数 s 。

$$s = s_1 + \phi_1 s_2 + \phi_2 s_3 \quad (4)$$

式(4)中, ϕ_1, ϕ_2 为耦合系数, 它们反映了三个子系统的滑模面 s_1, s_2, s_3 之间的相互耦合作用。通过调整耦合系数的值可以改变三个子系统的滑模面在整个系统滑模面中的影响作用。

由于在直线二级倒立摆系统中(如图(1)所示), 在外力 F 的作用下, 小车子系统 s_1 的运动方向与摆杆 1 子系统 s_2 相反, 而与摆杆 2 子系统 s_3 相同。因此, 为满足可达性条件, 须有 $\phi_1 \in R^+, \phi_2 \in R^-$ 。

滑模面切换函数斜率 $\lambda_i (i=1,2,3)$ 和耦合系数 $\phi_i (i=1,2)$ 取值影响最终的控制性能, 合理的参数值有助于提高整个系统的控制性能。为了得到最优的控制效果, 将 $\lambda_i (i=1,2,3)$ 与 $\phi_i (i=1,2)$ 设计为由固定值和调整变化值两部分组合而成, 如公式(5)所示:

$$\begin{cases} \lambda_i = \lambda_i^b + B_i \Delta \lambda_i, i=1,2,3 \\ \phi_i = \phi_i^b + M_i \Delta \phi_i, i=1,2 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, $\lambda_i^b (i=1,2,3)$ 和 $\phi_i^b (i=1,2)$ 为基值, $B_i (i=1,2,3)$ 和 $M_i (i=1,2)$ 为调整斜率, $\Delta \lambda_i (i=1,2,3)$ 和 $\Delta \phi_i (i=1,2)$ 为调整变量。本文通过设计模糊规则分别求取 5 个调整变量, 即每一个调整变量对应于一个模糊控制器的输出, 依次设计五个模糊控制器 Fuz1, ..., Fuz5, 每个模糊控制器的输入量分别为小车位置 x 、摆杆 1 位置 θ_1 、摆杆 2 位置 θ_2 , 一级摆杆子系统滑模面切换函数 s_2 和二级摆杆子系统滑模面切换函数 s_3 , 输出量依次为对应的 5 个调整变量 $\Delta \lambda_i (i=1,2,3)$ 和 $\Delta \phi_i (i=1,2)$ 。各模糊控制器的输入输出论域取值如下:

(1) Fuz1: 在直线二级倒立摆中, 小车运动范围为 1 米, 考虑到正负方向, 因此 Fuz1 的输入量, 即小车位置 x 的模糊输入论域取为 $[0 \ 0.5]$, 输出 $\Delta \lambda_1$ 的论域取为 $[0 \ 0.5]$ 。

(2) Fuz2、Fuz3: Fuz2、Fuz3 的模糊输入量分

别为一级摆杆角位置 θ_1 和二级摆杆角位置 θ_2 , 考虑摆杆摆动角度范围, 输入 θ_1 和 θ_2 的论域均取为 $[0\ 0.2]$, 输出 $\Delta\lambda_2$ 和 $\Delta\lambda_3$ 的论域均取为 $[0\ 0.5]$ 。

(3) Fuz4、Fuz5: Fuz4、Fuz5 的输入量分别为一、二级摆杆子系统的滑模面切换函数 s_2 和 s_3 , 对应的模糊输出量分别为 $\Delta\phi_1$ 和 $\Delta\phi_2$ 。因此取输入 s_2 和 s_3 的论域都为 $[0\ 0.2]$, 输出论域为 $[0\ 1]$ 。五个模糊控制器的输入、输出论域的模糊集均取为 $\{ZO, PS, PM, PB\}$, 模糊隶属度函数均采用三角形隶属度函数, 则建立出如表 1 所示的模糊规则。

表 1 模糊控制器模糊规则
Tab. 1 Fuzzy Rule of the Fuzzy Controller

输入	ZO	PS	PM	PB
输出	ZO	PS	PM	PB

2.2 滑动模态控制律设计

为了克服参数不确定性及外干扰的影响, 削弱滑模控制的抖振程度, 可设计模糊规则调整控制量 u 的大小, 确保可达性条件满足。因此, 本文设计了二级直线倒立摆模糊控制器 FSMC, 其输入为 2.1 节设计出的系统滑模面切换函数 s (如公式(4)所示), 输出为控制量 u , 该控制量将加在直线二级倒立摆系统 (如图 1 所示) 的小车上, 使小车在导轨上移动, 从而使两个摆杆保持竖直向上, 实现直线二级倒立摆的平衡控制。

FSMC 的输入 s 的论域取为 $[-1.2\ 1.2]$, 模糊输出 u 的论域取为 $[-15\ 15]$ 。由于控制量 u 作用在小车本体上, 因此可取输入、输出论域的模糊集为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。隶属度函数选取 Z 型、S 型及三角形相结合的隶属度函数, 则可建立出如表 2 所示的模糊规则。

表 2 FSMC 模糊控制器模糊规则
Tab. 2 Fuzzy Rule of the FSMC Fuzzy Controller

输入 s	NB	ZO	PM	NM	PS	PB	NS
输出 u	PB	ZO	NM	PM	NS	NB	PS

这样, 就实现了直线二级倒立摆的模糊滑模控制, 然而模糊控制器 FSMC 中的基值 $\lambda_i^b (i=1, 2, 3)$

和 $\phi_i^b (i=1, 2)$, 调整斜率 $B_i (i=1, 2, 3)$ 和 $M_i (i=1, 2)$ 的取值对最终的平衡控制性能有重要的影响。不合适的参数取值会导致系统控制性能下降甚至使系统不稳定。基于此本文进一步采用一种改进的量子粒子群算法, 即线性自适应量子粒子群算法 (LAQPSO) 对模糊控制器 FSMC 中的基值和调整斜率共计 10 个参数进行优化整定。

3 基于线性自适应量子粒子群算法的模糊滑模控制器参数整定

在上文的模糊滑模控制器的设计中, 可以看到, 需要整定的参数较多。文献^[10]中, 根据经验确定出了相关参数并取得了较好的控制效果, 但这种方法工作量较大, 且依赖于设计者的经验和技巧。量子粒子群算法 (QPSO) 是从量子力学出发, 提出的一种基于量子行为的粒子群优化算法。该算法认为粒子具有量子行为, 由于在量子空间中粒子满足集聚态的性质完全不同, 使得算法可以在整个可行区域内搜索, 是一种全局收敛算法, 因而它的全局搜索能力远远优于标准粒子群算法, 在参数整定中得到了广泛应用。

针对传统 QPSO 算法在迭代后期的种群多样性下降、收敛速度慢等缺点, 线性自适应量子粒子群算法 (LAQPSO) 被提出^[11], 该算法在迭代前期采用较大的压缩-扩张因子 β 有利于全局搜索, 收敛速度快; 在后期采用较小的 β 有利于局部搜索, 能得到更为精确的解。 β 值大小随着迭代的进行, 自适应改变。因此该算法具有更强的全局和局部搜索能力, 适合于多参数的优化问题。本文将 LAQPSO 算法应用于所设计的模糊控制器 FSMC 参数整定中, 并针对二级直线倒立摆系统的特点确定了粒子的取值范围。参数优化整定中适应度函数的定义如下:

3.1 适应度函数定义

适应度函数是粒子群算法中的一个重要概念, 粒子群算法在进化过程中, 只依靠适应度的大小来

评价个体的优劣, 以此来选择最优的个体, 因此该函数的选取直接影响到最终的优化结果。直线二级倒立摆系统的控制目标是实现小车和两个摆杆到达指定位置, 因此可取目标函数如式(6)所示。

$$J = \sum_{i=1}^n (\Delta|x_i| + \Delta|\theta_{1i}| + \Delta|\theta_{2i}|) \quad (6)$$

该目标函数用于控制参数优化, 能够综合评价控制系统的动态和稳态性能, 如调节时间、超调量以及稳态误差等, 则适应度函数可取为目标函数的倒数, 即:

$$F_{fit} = 1/J \quad (7)$$

每个粒子表示模糊控制器 FSMC 中的 10 个参数: 基值 $\lambda_i^b (i=1,2,3)$ 和 $\phi_i^b (i=1,2)$, 调整斜率 $B_i (i=1,2,3)$ 和 $M_i (i=1,2)$ 。

3.2 基于 LAQPSO 算法的模糊滑模控制器参数整定过程

本文提出的基于线性自适应量子粒子群优化算法(LAQPSO)的模糊滑模控制器参数整定过程如下:

Step1: 在一个 $N=10$ 维的目标搜索空间中, 随机产生 M 个个体, 组成初始种群 X 。

Step2: 对于粒子群 X 中的每一个粒子 $i (1 \leq i \leq M)$, 执行 Step3~Step5。

Step3: 根据公式(6)计算粒子 i 的当前位置 $X_i(t)$ 的适应值, 更新粒子的个体最好位置, 即将 $X_i(t)$ 适应值与前一次迭代最优的 $P_i(t-1)$ 的适应值比较, 如果优于, 则 $P_i(t)=X_i(t)$; 否则, 保持不变。

Step4: 对于粒子 i , 将 $P_i(t)$ 的适应值与全局最好位置 $G(t-1)$ 的适应值比较, 若优于, 则置 $G(t)=P_i(t)$; 否则, 全局最好位置保持不变。

Step5: 计算粒子的新位置, 粒子群进化方程中参数 β 按如下取值:

如果 $\beta \geq \beta_e$, 则: $\beta = \beta_0 - s \cdot \beta_{01} + a \cdot \beta_{02}$;

如果 $\beta < \beta_e$, 则: $\beta = (\beta_0 - \beta_1) \cdot (t_{\max} - t) / t_{\max} + \beta_1$ 。

Step6: 若算法的终止条件不满足, 置 $t=t+1$, 返回 Step2; 否则算法结束。

其中, β_0 和 β_1 分别为最大压缩—扩张因子和最小压缩—扩张因子; t 表示当前的迭代次数; t_{\max} 表示最大迭代次数; s 为进化速度因子, 可根据公式(8)计算得到, 该值表征了在迭代过程中, 当前迭代的全局最优值 $P_{gbest(T)}$ 总是要优于或至少等于上一次迭代的全局最优值 $P_{gbest(T-1)}$ 的性质; β_{01} 为进化速度因子 s 作用下的权重, 一般取值在 0.4 到 0.6 之间的数; a 为粒子聚集度, 可根据公式(9)计算得到, 该值表征了全局最优值总是优于所有粒子最优的均值 $\bar{P}_{gbest(T)}$ 的性质。 β_{02} 为进化速度因子 a 作用下的权重, 一般取值为 0.05 到 0.2 之间的数。 β_e 为人为设定的精度。

$$s = \frac{\min(P_{gbest(T)}, P_{gbest(T-1)})}{\max(P_{gbest(T)}, P_{gbest(T-1)})} \quad (8)$$

$$a = \frac{\min(P_{gbest(T)}, \bar{P}_{gbest(T)})}{\max(P_{gbest(T)}, \bar{P}_{gbest(T)})} \quad (9)$$

4 仿真研究

4.1 仿真模型及参数设置

本部分以公式(1)、(2)所示的直线二级倒立摆系统为对象, 在 MATLAB/SIMULINK 环境下建立了如图 2 所示的直线二级倒立摆模糊滑模变结构控制仿真模型。

分别采用传统 QPSO 算法与线性自适应 QPSO 算法对所设计的 FSMC 控制器的十个参数 $\lambda_i^b (i=1,2,3)$ 、 $\phi_i^b (i=1,2)$ 、 $B_i (i=1,2,3)$ 、 $M_i (i=1,2)$ 进行整定。QPSO 算法参数取值为: 群体规模 $PopSize=20$, 粒子维数 $D=10$, 进化代数 $Gen=100$, 结合小车滑动范围、小车速度, 以及一级摆杆和二级摆杆的允许摆动幅度确定初始种群中粒子的取值范围(十维空间)为:

$$\{[0,5],[0,1],[0,10],[0,5],[0,10],[0,5],[0,1],[0,1],[-2,0],[-1,1]\}.$$

控制器参数整定过程中适应度值的优化过程如图 3 所示。从图中可以看出线性自适应 QPSO 算法的收敛速度优于传统 QPSO 算法。

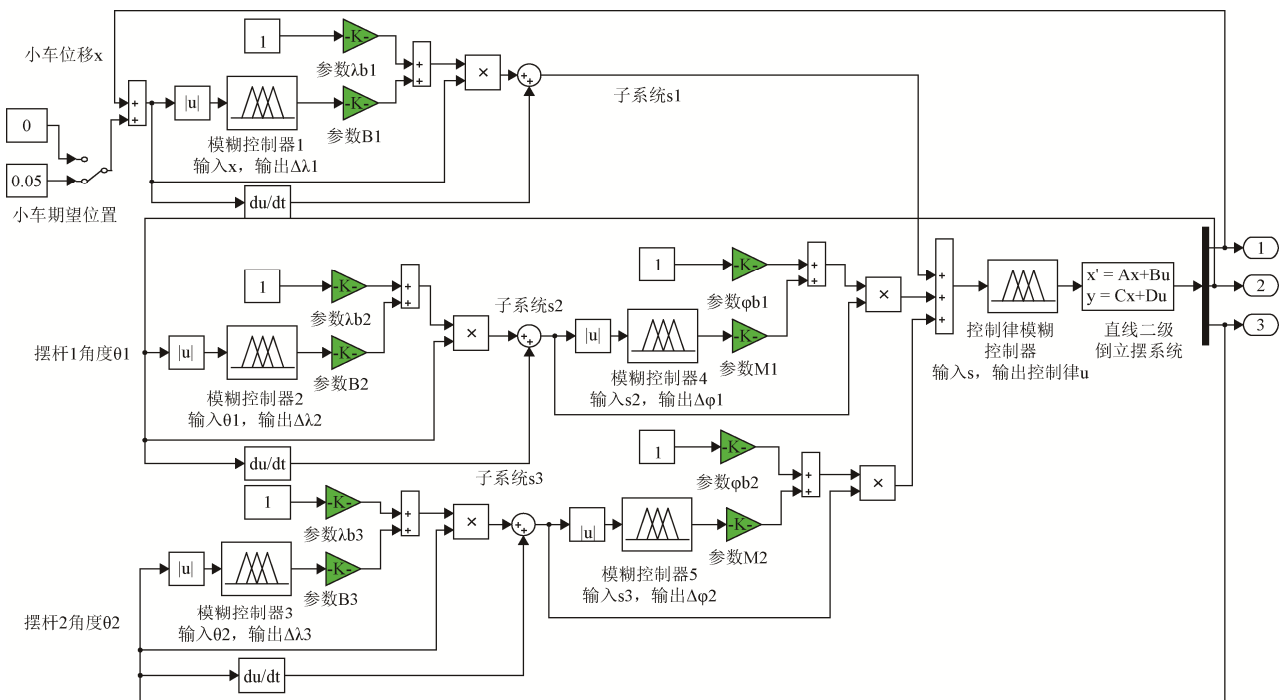


图 2 直线二级倒立摆模糊滑模控制仿真模型

Fig.2 Simulation Model of the Fuzzy Sliding Mode Control of Double Inverted Pendulum

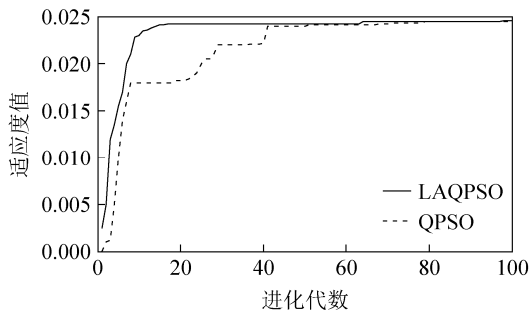


图 3 适应值优化过程

Fig.3 Optimization Process of the Cost Function

经过 100 代进化,采用线性自适应 QPSO 算法获得的 FSMC 中的 10 个参数值如下:

基值:

$$\lambda_i^b = [0.1909; 15.5197; 5.8446]$$

$$B_i = [4.3210; 10.4652; 8.8113]$$

调整变化值:

$$\varphi_i^b = [0.8136; -2.4659]$$

$$M_i = [0.1554; -2.4646]$$

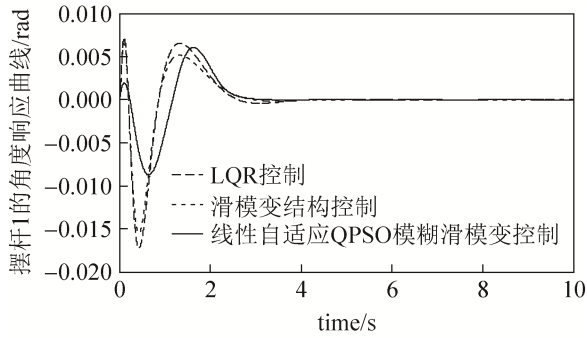
4.2 仿真结果

本节以直线二级倒立摆平衡控制实验为例说明本文所提出的控制方法的有效性。

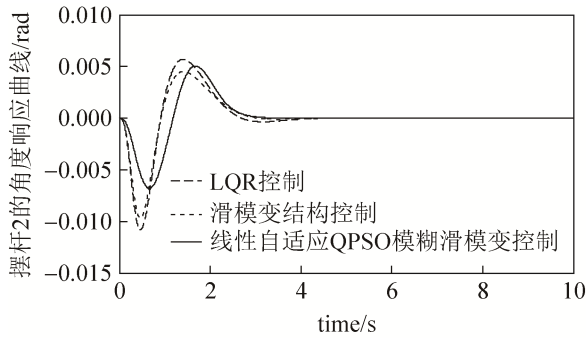
实验中分别采用线性二次型调节器(LQR)、基于指数趋近律的滑模变结构控制(SMC)和本文所提出的模糊滑模变结构控制器(FSMC)实现直线二级倒立摆的平衡控制。LQR 控制参数 $K=[17.32 \ 110.87 \ -197.57 \ 18.46 \ 2.70 \ -32.14]$, SMC 采用阿克曼公式设计滑模面,参数 $k=25$, $\varepsilon=0.6$, 倒立摆的初始状态为 $[0,0,0,0,0]$, 期望状态为 $[0.05,0,0,0,0]$ 。

实验 1: 无扰动平衡控制

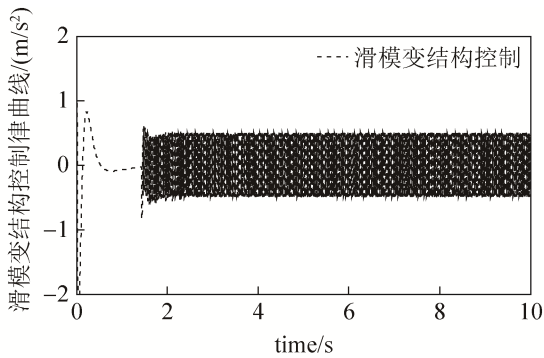
采用三种不同控制算法的直线二级倒立摆系统中两个摆杆的角度响应曲线分别如图 4(a)、4(b)所示,平衡控制过程中 SMC 控制算法和本文提出的控制算法的控制量变化曲线分别如图 4(c)、4(d)所示。图 4(a)、4(b)中双划线为 LQR 控制结果,虚线为 SMC 控制结果,实线为本文所设计的控制算法控制结果。从图 4(a)~(b)可以看出,无扰动情况下上述三种控制方法都有效的实现了倒立摆的平衡控制,但本文算法超调量更小,响应时间更快。同时从图 4(c)~(d)可以看出,本文设计的控制器有效地削弱了系统的抖振。



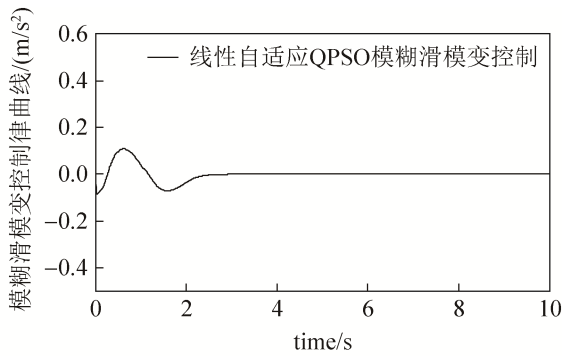
(a) 摆杆 1 的响应曲线



(b) 摆杆 2 的响应曲线



(c) SMC 控制律变化曲线



(d) FSMC 控制律变化曲线

图 4 无扰动时直线二级倒立摆平衡控制结果

Fig.4 Balancing Control Results Of the Linear Double Inverted Pendulum (Without Disturbance)

三种控制方法产生的系统响应的均方根误差如表 3 所示,从表 3 可以看出与传统的平衡控制方法相比,本文提出的平衡控制方法具有更高的控制精度。

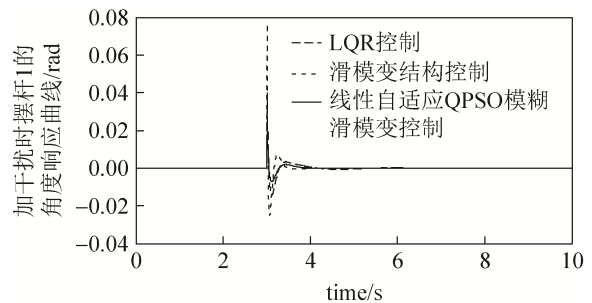
表 3 三种控制方法的均方根误差

Tab.3 MSE Error of the Three Control Method

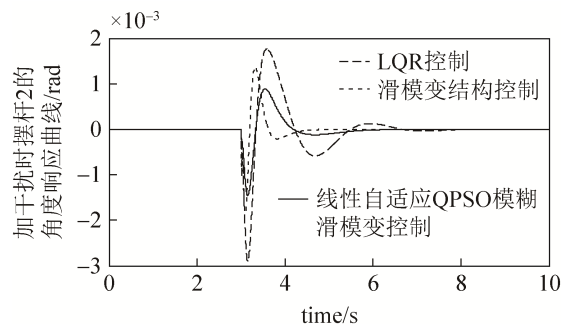
	小车/m	摆杆 1/rad	摆杆 2/rad
LQR	0.014 2	0.003 5	0.002 6
SMC	0.014 2	0.003 1	0.002 2
本文算法	0.015 0	0.002 4	0.002 0

实验 2: 有扰动时平衡控制

为了进一步验证所设计的控制算法的抗扰能力,在系统稳定后加入一个宽为 0.1 s,幅值为 0.01 rad 的脉冲干扰,上述三种控制器作用下的摆杆 1 和摆杆 2 的响应曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出本文所设计的控制器反应速度快、超调量小且抗干扰能力较强。同时也说明本文所提出的参数整定方法能够有效地确定出一组控制器参数值,避免了繁琐的人工调整过程。



(a) 摆杆 1 的响应曲线



(b) 摆杆 2 的响应曲线

图 5 有扰动时直线二级倒立摆平衡控制结果

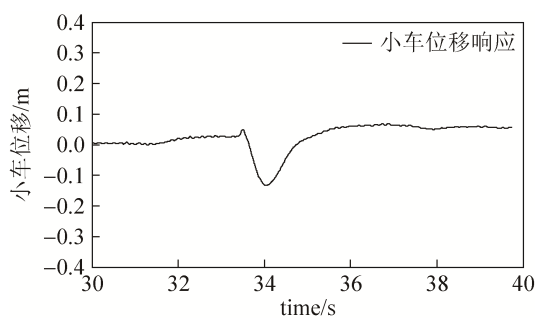
Fig.5 Balancing Control Results Of the Linear Double Inverted Pendulum(With Disturbance)

5 实验研究

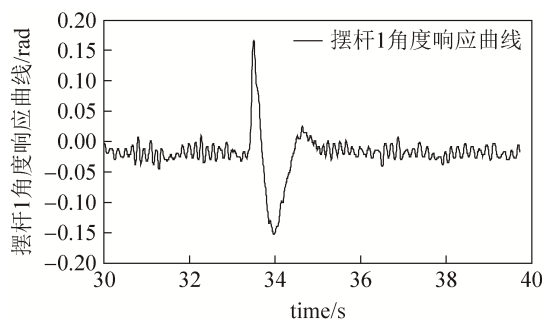
为进一步验证本文方法的合理性和有效性, 本文将所提出的基于 LAQPSO 整定的模糊滑模控制控制方法应用到如图 6 所示的固高 GLIP2002 直线二级倒立摆实物系统中, 并在 33 s 时人为施加了一个扰动(用手轻轻碰触摆杆 2), 平衡控制结果如图 7 所示。从图 7 可以看出本文所设计的控制器控制精度高、动态性能好、抗干扰能力强, 可以有效地应用在直线二级倒立摆实物控制系统中。



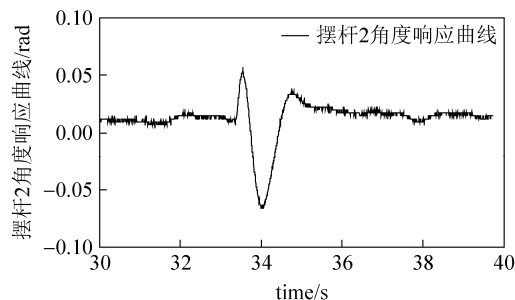
图 6 固高 GLIP2002 直线二级倒立摆系统
Fig.6 GLIP2002 Linear Double Inverted Pendulum



(a) 小车响应曲线



(b) 摆杆 1 响应曲线



(c) 摆杆 2 响应曲线

图 7 直线二级倒立摆实物控制结果
Fig.7 Balancing Control Results Of the Physical Linear Double Inverted Pendulum

6 结论

本文针对直线二级倒立摆的平衡控制问题, 设计了模糊滑模控制器, 并利用线性自适应量子粒子群算法较强的局部和全局搜索能力对该控制器中的十维参数进行了整定。无扰动和存在扰动两种情况下的倒立摆平衡控制仿真结果表明采用线性自适应量子粒子群算法能够有效地确定出一组模糊滑模控制器参数, 提高了参数整定效率。同时从仿真结果也可看出本文所设计的模糊滑模控制器有效地削弱了“抖振”, 加快了系统到达滑平面的速度, 使系统在整个动态响应过程中都具有强鲁棒性。实物控制实验结果进一步验证了所提控制方法的合理性和有效性。

参考文献:

- [1] Wang J J. Simulation studies of inverted pendulum based on PID controllers[J]. Simulation Modelling Practice and Theory(S1569-190X), 2011, 19(1): 440-449.
- [2] Li Zhijun, Zhang Yunong, Yang Yipeng. Support vector machine optimal control for mobile wheeled inverted pendulums with unmodelled dynamics[J]. Neurocomputing (S0925-2312), 2010, 73(13): 2773-2782.
- [3] Yang C, Li Z, Li J. Trajectory Planning and Optimized Adaptive Control for a Class of Wheeled Inverted Pendulum Vehicle Models[J]. IEEE Transactions on Cybernetics (S2168-2267), 2013, 43(1): 24-35.
- [4] 李雪冰, 马莉, 丁世宏. 一类新的二阶滑模控制方法及其在倒立摆控制中的应用[J]. 自动化学报, 2015, 41(1): 193-202.
LI Xuebing, MA Li, DING Shihong. A New Second-

- order Sliding Mode Control and Its Application to Inverted Pendulum[J]. *Acta Automatica Sinica* (S0254-4156), 2015, 41(1): 193-202.
- [5] Chih-Hui Chiu, Ya-Fu Peng, You-Wei Lin. Intelligent backstepping control for wheeled inverted pendulum[J]. *Expert Systems with Applications*(S0957-4174), 2011, 38(4): 3364-3371.
- [6] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(3): 407-418.
LIU Jinkun, SUN Fuchun. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control [J]. *Control Theory and Applications*(S1000-8152), 2007, 24(3):407-418.
- [7] 王钰, 谢慕君. 基于滑模变结构的柔性倒立摆控制研究[J]. *计算机测量与控制*, 2015, 23(12): 4045-4048.
Wang Jue, Xie Mujun. Research on Control of Flexible Inverted Pendulum System based on Sliding Mode Control[J]. *Computer Measurement & Control* (S1671-4598), 2015, 23(12): 4045-4048.
- [8] 孙彪, 孙秀霞. 基于幂次函数的离散滑模控制算法[J]. *控制与决策*, 2011, 26(2): 285-288.
Sun Biao, Sun Xiuxia. Algorithm of discrete-time sliding mode control based on powere-function [J]. *CONTROL AND DECISION* (S1001-0920), 2011, (26)2: 285-288.
- [9] 王宗义, 李艳东. 移动机器人的自适应模糊滑模动力学控制[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2011, 32(6): 792-799.
WANG Zongyi, LI Yandong. Dynamic control of mobile robots based on an adaptive fuzzy sliding mode[J]. *Journal of Harbin Engineering University*(S1006-7043), 2011, 32(6): 792-799.
- [10] 孙德亮. 平面二级倒立摆的模糊滑模变结构控制算法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
Sun Deliang. Sliding Mode Variable Structure Control Algorithm on Planar Double Inverted Pendulum[D]. HeFei: HeFei University of Technology, 2010.
- [11] 颜翠翠. 非刚体点云配准问题研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2015.
Yan Cuicui. Research on Non-rigid point cloud registration[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015.
- [12] 张志强, 李战明. 模糊趋近律滑模变结构的二级倒立摆系统控制仿真[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2008, 27(1): 81-84.
Zhang Zhiqiang, Li Zhanming. Sliding Mode Control Based on Fuzzy Reaching Law for an Inverted Pendulum[J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*(S 1673-159X), 2008, 27(1): 81-84.

(上接第 2908 页)

- [3] Brendon L, Hever M, Alfonso N, et al. Hardware in the Loop Simulation of an Extended Non-linear Dynamic Inversion Augmented with an Immunity-based Adaptive Control System[C]// *AIAA modeling and simulation technologies (MST) Conference*. 2013-5152.
- [4] 刘莉, 王岩松, 周思达, 等. 考虑弹体弹性的导弹半物理仿真方法与影响分析[J]. *北京航空航天大学学报*. 2016, 42(4): 639-645.
Liu Li, Wang Yansong, Zhou Sida, et al. Hardware-in-the-loop simulation method and influence analysis of missiles considering body elasticity[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(4): 639-645.
- [5] 彭亮, 黄心汉. 基于 VC 和 Vega Prime 联合开发的巡航导弹仿真系统研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*. 2010, 41(1): 219-224.
Peng Liang, Huang Xinhan. Simulation system of cruise missile using VC and Vega Prime[J]. *Journal of Central South University*(Science and Technology), 2010, 41(1): 219-224.
- [6] Ernst D, Valavanis K, Garcia R, et al. Unmanned Vehicle Controller Design, Evaluation and Implementation: From MATLAB to Printed Circuit Board[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* (S0921-0296), 2007, 49(1): 85-108.
- [7] Catena A, Melita C D, Muscato G. Automatic Tuning Architecture for the Navigation Control Loops of Unmanned Aerial Vehicles[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* (S0921-0296), 2014, 73(1/4): 413-427.
- [8] Bittar A, de Oliveira N M F, de Figueiredo H V. Hardware-In-the-Loop Simulation with X-Plane of Attitude Control of a SUAV Exploring Atmospheric Conditions[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* (S0921-0296), 2014, 73(1/4): 271-287.
- [9] Kaviyarasu A, Senthil Kumar K. Simulation of Flapping-wing Unmanned Aerial Vehicle using X-plane and Matlab/Simulink[J]. *Defence Science Journal* (S0011-748X), 2014, 64(4): 327-331.
- [10] Orsag M, Cestic J, Haus T, et al. Spincoppter Wing Design and Flight Control[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* (S0921-0296), 2013, 70(1/4): 165-179.