

基于改进PID算法的钢铁行车系统建模与控制

陈家煜^{1,2}, 刘丽桑^{1,2}, 张友渊^{1,2}, 陈炯晖^{1,2}, 王晨曦³

(1. 福建理工大学 电子电气与物理学院, 福建 福州 350118;

2. 工业自动化福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350118;

3. 国网福建省供电有限公司霞浦县供电公司, 福建 宁德 355100)

摘要: 行车是钢铁物流过程中最重要的设备之一,其运行的稳定性、安全性至关重要。综合考虑了负载摆动对行车系统的影响,利用拉格朗日方程对钢铁物流行车系统进行动力学建模,分析了系统动能和广泛力,并搭建了滑轨行车仿真实验平台。针对传统比例积分微分(PID)控制器在不确定、非线性系统中控制性能不理想的问题,采用模糊PID和误差反向传播(BP)神经网络自适应调整控制器参数,提高了系统的动态性和抗干扰性。将两种改进的智能PID控制算法与传统PID进行了仿真实验对比。结果表明,采用BP神经网络优化的PID控制器(BP-PID)和模糊PID性能均优于传统PID,且BP-PID的响应速度更快、鲁棒性更强。

关键词: 行车;拉格朗日方程;动力学建模;PID控制;仿真实验平台

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)01-0047-07

Modeling and controlling of iron and steel crane system based on improved PID algorithm

CHEN Jiayu^{1,2}, LIU Lisang^{1,2}, ZHANG Youyuan^{1,2}, CHEN Jionghui^{1,2}, WANG Chenxi³

(1. School of Electronics, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Industrial Automation Engineering Research Center in Colleges and Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China;

3. Xiapu Power Supply Company, State Grid Fujian Power Supply Co., Ltd., Ningde 355100, China)

Abstract: The crane is one of the most important equipment in the process of iron and steel logistics, and its operational stability and safety are crucial. Considering the impact of load swing on the driving system, the Lagrange's equation was used to model the dynamics of the steel logistics driving system, the kinetic energy and the extensive force of the system were analyzed, and the simulation experiment platform of the slide rail driving was built. In response to the problem of poor control performance of traditional PID controllers in uncertain and nonlinear systems, fuzzy PID and BP neural networks were used to adaptively adjust controller parameters, improving the dynamic and anti-interference performance of the system. Finally, simulation experiments were conducted to compare the two improved intelligent PID control algorithms with traditional PID. Results show that both BP-PID and fuzzy PID have better performance than traditional PID, and BP-PID has the fastest response speed and robustness.

Keywords: crane; Lagrange equation; dynamics modeling; PID control; simulation experiment platform

行车(即起重机)在钢铁、机械、船舶、化工等行业应用广泛,传统的搬运方法效率低下且安全

收稿日期:2023-10-31

基金项目:福建省科技厅高校产学研合作项目(2022H6005)

第一作者简介:陈家煜(2000—),男,福建三明人,硕士研究生,研究方向:电气控制、预测算法。

通信作者:刘丽桑(1984—),女,福建莆田人,副教授,博士,研究方向:人工智能、工业自动化。

性不高,而钢铁物流行车具有承载能力强、操作简便等特点,可实现钢铁产品的安全运输。因此,钢铁物流行车的自动化、信息化、智能化等技术一直是研究的焦点。

随着行车的电动化、自动化和智能化发展,炼钢前阶段的行车调度问题也面临着新的挑战和需求。文献[1]调查了钢铁工业板坯场的起重机调度问题,提出了改进的遗传算法,利用一个混合集成编程模型实现优化存储分配和起重机调度。文献[2]研究了多吊具起重机调度问题,并建立了贪心起重机升降序列与超序列之间的联系,解决了寻找最佳起重机升降顺序的问题,但双扩展机起重机的调度问题仍难以通过计算实现。文献[3]主要考虑了集成的码头起重机和堆场卡车调度问题,采用遗传算法减少所有集装箱从集装箱船到其存储位置的完成时间,但完成的时间并不是最优。文献[4]提出了一种改进起重机滑轮块并驱动电机产生转轴扭矩的方法,但是该结构较复杂,应用范围有限。

除调度问题外,行车在作业过程可能存在晃动现象,导致吊杆不能把钢材准确地安放到指定位置,或者不能将钢材平稳地吊起,从而降低了钢材搬运过程的效率。控制抑制摆动目前主要有反馈控制和前馈控制这两种方法。例如,文献[5]提出由前馈和反馈路径组成的 2-DOF 倾斜控制器,采用一种新的轨迹跟踪方法,通过状态反馈控制律补偿系统输出与参考轨迹的任何偏差。文献[6]引入低通滤波器降低了滑模面的开关频率,同时利用模糊控制对滑模增益进行调节。然而,上述研究都没有充分考虑到控制器在参数不确定性下的鲁棒性,可能导致闭环系统的不稳定性。

综上,本研究模拟实际行车的工作原理等比例还原现场行车的工作情况,用拉格朗日法对行车系统进行动力学建模,分析行车在运动过程中摆动的影响因素,采用模糊技术、BP(反向传播)神经网络自适应调整 PID(比例积分微分)控制器参数来提高行车运动的快速性和稳定性,从而进一步提高物流工作效率。

1 滑轨行车系统建模

滑轨行车是一种典型的欠驱动非线性系统^[7],在工作过程中会受到多种因素的干扰,主要包括行车与导轨之间的摩擦力以及空气阻力

等。图 1 所示为滑轨行车系统的物理模型。其中,吊绳吊着负载 Mg 与行车相连, l 表示吊绳长度; F_x 为行车滑轨上顺着 x 方向运动的作用力, F_y 为行车滑轨上顺着 y 方向运动的作用力; T_l 表示吊绳拉着负载在 z 方向上升或者下降的拉力。在行车的运动工作中,负载 Mg 会随着行车的运动而摆动, θ_1 和 θ_2 分别表示负载摆动的大小和方向。在如图 1 所示滑轨行车系统中, F_x 、 F_y 、 T_l 是控制量, x 、 y 、 l 、 θ_1 、 θ_2 是需要控制的状态量,因此该系统是一个具有 5 个自由度的欠驱动系统。

本研究采用拉格朗日方程建立行车系统的数学模型,如式(1):

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (1)$$

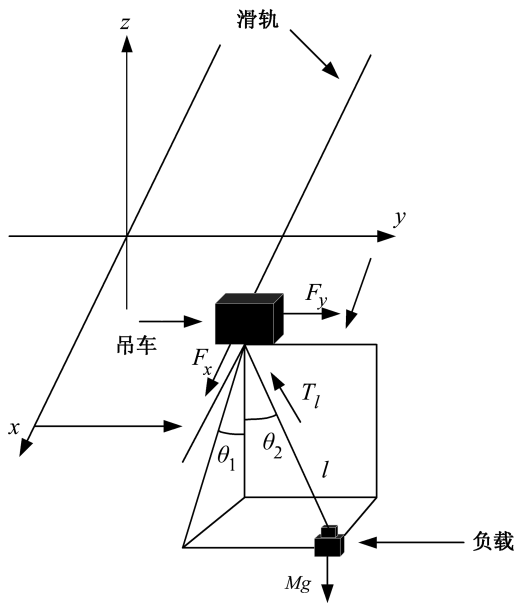


图 1 滑轨行车三维模型图

Fig.1 3D model diagram of slide rail crane

其中,行车系统动能用 $L \in R$ 表示,行车系统的状态量用 $q_i \in R$ 表示, Q_i 表示行车系统的广义力, $i=1,2,\dots,n$ 。行车系统的自由度数用 n 表示。

分别计算行车系统的动能和广义力可以得到系统的动力学模型。

1.1 系统动能

行车的动能与负载动能之和为:

$$L = \frac{1}{2}(M_x \dot{x}^2 + M_y \dot{y}^2) + \frac{1}{2}Mv_q^2 \quad (2)$$

其中, M_x 、 M_y 分别为行车沿滑轨在 x 方向、 y 方向上运动的等效质量;负载质量为 M ,负载运动速度为 v_q 。 v_q 的表达式为:

$$v_q^2 = \dot{x}_q^2 + \dot{y}_q^2 + \dot{z}_q^2 \quad (3)$$

式中, $(x_q, y_q, z_q) \in R^3$ 为负载质心的位置。对位移求导, 得到负载沿 x 、 y 、 z 轴方向的速度如式(4):

$$\begin{cases} \dot{x}_q = \dot{x} + l \sin \theta_1 \cos \theta_2 + \\ \quad l \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - l \dot{\theta}_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ \dot{y}_q = \dot{y} + l \sin \theta_2 + l \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \\ \dot{z}_q = -l \cos \theta_1 \cos \theta_2 + l \dot{\theta}_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \\ \quad l \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \end{cases} \quad (4)$$

1.2 广义力计算

定义广义力为 $Q_j = \delta W / \delta q_j$, 其中 δq_j 为各状态量方向上的虚位移。如图1所示, 步进电机的拖动力 F_x 、 F_y , 吊绳的拉力 T_l , 负载的重力 Mg , 轨道间的摩擦力 f , 行车受到的空气阻力 d , 吊绳吊着负载时所受的机械摩擦, 和摆动的阻力都是行车系统所受的外力^[5]。这些力所做的虚功可以表示如式(5):

$$\delta W_s = (F_x - d_x \dot{x} - f_{ax}) \delta x + (F_y - d_y \dot{y} - f_{ay}) \delta y + (F_l - d_l \dot{l}) \delta l \quad (5)$$

其中, d_x 、 d_y 是行车在 x 、 y 方向运动的空气阻力系数, d_l 是吊绳拉着负载运动所受的机械摩擦系数, f_{ax} 、 f_{ay} 分别是行车在 x 、 y 方向与滑轨的摩擦力。 δx 、 δy 、 δl 表示虚位移。根据实验分析提出了摩擦力模型如式(6):

$$f_{ai} = f_{a0i} (\tanh(\dot{x}) - A_i \tanh(\dot{x} - B_i \tanh(\dot{x}))) + k_{ai} \dot{x} \quad (6)$$

其中, f_{a0i} 、 A_i 、 B_i 、 k_{ai} 是未知系统系数。行车的重力不做功, 负载所受重力做的虚功计算如式(7):

$$\delta W_g = -Mgl \sin \theta_1 \cos \theta_2 \delta \theta_1 - \\ Mg l \sin \theta_2 \cos \theta_1 \delta \theta_2 + Mg \cos \theta_1 \cos \theta_2 \delta l \quad (7)$$

其中, $\delta \theta_1$ 、 $\delta \theta_2$ 分别表示 θ_1 和 θ_2 的变分。假设负载摆动时, 空气阻尼系数为 d_f , 则空气阻力所做虚功为:

$$\delta W_f = -d_f \dot{x}_q \delta x_q - d_f \dot{y}_q \delta y_q - d_f \dot{z}_q \delta z_q \quad (8)$$

通过以上计算可得系统外力所做的虚功和为:

$$\delta W = \delta W_s + \delta W_g + \delta W_f \quad (9)$$

根据广义力的定义以及式(4)可得到行车系统在 x 、 y 、 l 、 θ_1 、 θ_2 这5个状态量方向上所受力/力矩为:

$$\begin{cases} Q_x = F_x - d_x \dot{x} - f_{rx} - d_f \dot{x}_q \\ Q_y = F_y - d_y \dot{y} - f_{ry} - d_f \dot{y}_q \\ Q_l = T_l - d_l \dot{l} + Mg \cos \theta_1 \cos \theta_2 - d_f \dot{x}_q \sin \theta_1 \cos \theta_2 - \\ \quad d_f \dot{y}_q \sin \theta_2 + d_f \dot{z}_q \cos \theta_1 \cos \theta_2 \\ Q_{\theta 1} = -Mgl \cos \theta_2 \sin \theta_1 - d_f \dot{x}_q l \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \\ \quad d_f \dot{z}_q l \cos \theta_2 \sin \theta_1 \\ Q_{\theta 2} = -Mgl \cos \theta_1 \sin \theta_2 + d_f \dot{x}_q l \sin \theta_1 \sin \theta_2 - \\ \quad d_f \dot{y}_q l \cos \theta_2 - d_f \dot{z}_q l \cos \theta_1 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (10)$$

1.3 电机动力学数学模型

步进电机有易于控制、定位精度高、等诸多优点, 被广泛应用于机械驱动系统和工业机器人中。在不考虑定子两极和两端漏磁的基础上, 忽略了永磁回路的漏磁、磁滞效应、涡流效应、饱和效应和定子线圈自感的谐波分量。电机动力学数学模型已建立, 步进电机原理示意图如图2所示。

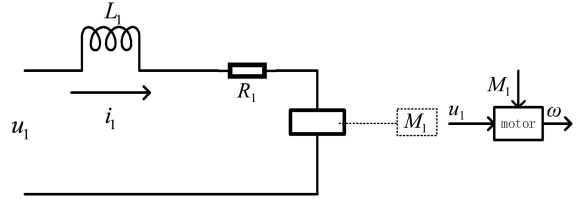


图2 步进电机原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of stepper motor

根据基尔霍夫定律可得:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 R_1 + k_d \omega = u_1 \quad (11)$$

根据负载和电机的特性可得:

$$\frac{LJ}{k_d k_m} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \frac{R_1 J}{k_d k_m} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{1}{k_d} u_1 - \frac{L_1}{k_d k_m} \frac{dM_1}{dt} - \frac{R_1}{k_d k_m} M_1 \quad (12)$$

经过拉普拉斯变化后, 电机速度和电机传递函数均可得到为式(13):

$$G_1(s) = \frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{\frac{1}{k_d}}{\frac{L_1 J}{k_d k_m} s^2 + \frac{R_1 J}{k_d k_m} s + 1} \quad (13)$$

其中, 转动惯量 $J = 0.01 \text{ m}^2$; 电阻 $R_1 = 1.5 \Omega$; 电感 $L_1 = 0.01 \text{ H}$; $M_1 = 0$; 放大系数 $K_v = 5$; 减速比 $K_r = 5$; 扭矩系数 $k_d = 0.05$; 阻力扭矩系数 $k_m = 0.05$ 。电压为输入, 角速度为输出, 开环传递函数

如式(14):

$$G(s) = K_v \times G_1(s) \times \frac{1}{K_r} = \frac{20}{0.04s^2 + 6s + 1} \quad (14)$$

2 行车智能控制算法

2.1 传统 PID 控制算法

传统的 PID 控制由比例、积分和微分 3 部分组成。其中,比例控制使系统能快速响应、减小稳态误差;积分控制通过对误差信号的不断积分来消除稳态误差,但太大的积分时间参数会降低系统的快速性,需要微分控制来优化控制性能,如减少信号误差、超调和欠调^[8]。

2.2 智能 PID 控制算法

智能控制算法能够根据系统状态和环境变化自动调整控制策略,具有良好的学习和优化能力。本研究采用模糊控制和神经网络对 PID 参数进行自适应调整,使系统能更好适应非线性、模糊和动态变化环境,并通过学习和优化来提高控制效果,具备一定的抗干扰能力。

2.2.1 模糊 PID 算法

在控制系统中,模糊控制通常被称为非线性 PID 控制,它与 PID 控制密切相关。将模糊控制的可变适应性和 PID 控制的高精度相结合,可以使系统取得良好的控制效果。模糊 PID 控制可以实现 PID 参数的自动最优调节,系统结构如图 3 所示。在模糊控制中,输入变量为偏差和偏差变化率,输出变量为 PID 控制的 3 种变化率(ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d)。输入和输出变量之间存在模糊关系。由于运行过程中偏差和偏差变化率不断变化,基于模糊连接,需要对 3 个参数实时动态修正^[9]。

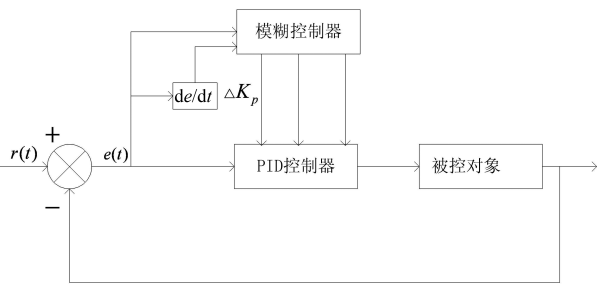


图 3 模糊 PID 控制系统

Fig.3 Fuzzy PID control system

2.2.2 BP-PID 算法

BP 算法(反向传播算法)是用于多层前馈神经网络的常用算法,它通过递归计算输出误差和

权重之间的梯度,利用梯度下降的方法来优化网络的性能,实现预期的学习效果。采用 BP 神经网络优化的 PID 控制器称为 BP-PID,其系统结构如图 4 所示。在 BP-PID 控制器中,PID 元件负责被控对象的闭环控制,BP 神经网络对 PID 参数进行在线自整定。因此 BP-PID 控制器可以根据系统的实时反馈对 PID 参数进行自适应和优化^[10],从而提高了整体性能。

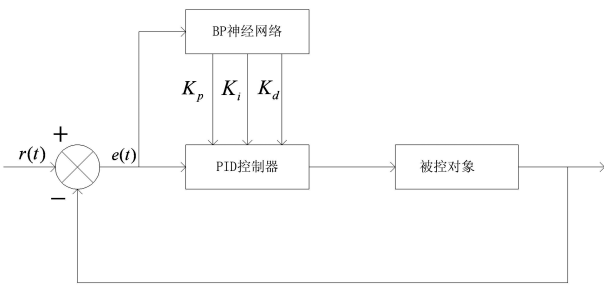


图 4 BP-PID 控制系统

Fig.4 BP-PID control system

3 行车仿真平台设计与实现

3.1 仿真平台设计流程图

电机控制动滑轨主要由电机和滑轨两部分组成,通过电机控制滑轨的运动实现平移效果。本研究搭建的仿真实物平台也是利用电机控制滑轨移动,并在滑轨上安装吊钩来取吊物件模拟行车的工作状况。具体的框架如图 5 所示。

电机是仿真平台的核心部件。为保证系统的控制精度,本研究选择 57 步进电机;采用单片机为主控芯片来实现电机的启动、停止、速度调节和方向控制等功能,从而实现对滑轨的精确控制^[11]。滑轨是仿真平台的另一个重要组成部分,由轨道、滑块和底座等组件构成,可用于实现物体的平移和移动效果^[12]。滑轨的长度和宽度应尽可能适应真实场景搭建。滑轨行车仿真平台采用 24 V 驱动电源,包括 2 条 1.5 m 的动态滑轨和 1 条 1.2 m 的动态滑轨,主吊钩采用电磁铁代替,同时,x、y、z 轴的滑轨可通过野火 STM432 开发板 F407 控制 3 台 57 步进电机来实现驱动。

3.2 垂直轴(z 轴)的设计

要在 z 轴设计一个吊钩来勾住物体,首先需要在 z 轴方向上安装一个支架或固定装置,用于支撑和固定吊钩的位置。这个固定装置用电磁铁代替。在固定装置的顶部加装一个悬挂装置,用于悬挂吊钩,悬挂装置可以是钢丝绳、链条或者其

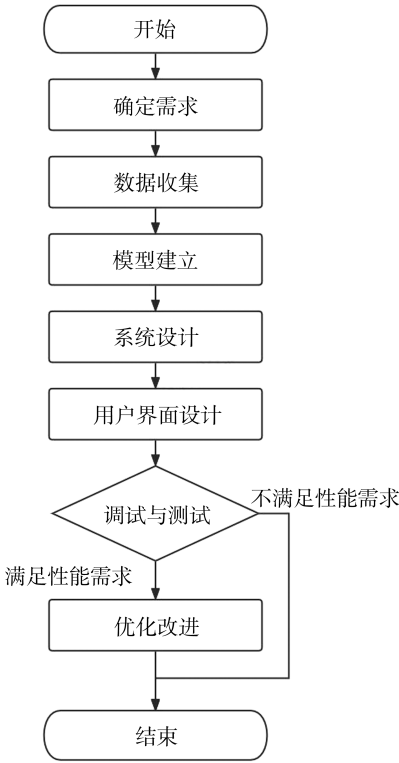


图 5 仿真平台设计框架图

Fig.5 Simulation platform design framework

他合适的材料制成。在悬挂装置的下端连接一个吊钩,吊钩可以是简单的卡环式吊钩或者是更复杂的开合式吊钩等,根据实际需要进行选择。在这过程中,需要把滑轨行车架高,让吊钩在一定的高度吊取物体,运用电磁铁来代替实际过程中的钢材,吊钩上的电磁铁与放在下方的电磁铁达到准确勾住物体的目的。

滑轨行车仿真平台沿 x 方向设置,横梁横跨在滑轨上,两个端部分别由运动部件和电机驱动,通过电机控制运动部件在滑轨上运行,从而控制横梁在 x 方向的位置。同时,滑块安装于横梁的导轨上,一台电机控制滑块在 y 方向上运动,另一台电机控制滑块在 z 方向上运动使 z 轴机构沿着 y 轴方向移动。简言之,滑轨上的电机将旋转运动转化为直线运动,通过联轴器与连接杆连接,实现对横向和纵向的控制。此外,电机的转速和方向可以通过控制器来进行调整,以达到更精准的位置控制从而更真实地模拟工业现场行车运动。搭建的半实物仿真平台如图 6 所示。

3.3 数据采集与分析

由于要在吊具工作现场实时地获取其真实作业过程中的姿态信息,并利用这些真实数据去驱



图 6 滑轨行车实物图

Fig.6 Slide rail crane

动行车模型的建立,本研究选用深圳维特智能科技有限公司生产的 BWT901BLE5.0C 姿态传感器。该模块集成了高精度的陀螺仪、加速度计、地磁场传感器,采用高性能的微处理器和先进的动力学解算与卡尔曼动态滤波算法,能够快速求解出模块当前的实时运动姿态^[13]。为实现对行车运行状态数据和工作环境数据的采集,该传感器将配合上位机,并在登录界面中输入设备信息,以衔接相应的传感器管理和数据管理模块^[14]。传感器的性能参数如表 1 所示。

表 1 传感器性能参数

Tab.1 Sensor performance parameters

性能参数名称	描述
物理尺寸	51.3 mm×36 mm×15 mm
测量维度	加速度:3 维,角速度:3 维
量程	加速度:±16g,角速度:±2 000°/s
稳定性	加速度:0.01g,角速度 0.05°/s
姿态测量稳定度	0.05°
数据输出内容	加速度、角速度

该传感器能够在吊具作业过程中稳定可靠地获取吊具的姿态信息,并将姿态信息保存下来,用于后续的吊具的数据驱动建模。

4 实验结果及分析

为了测试所提模型是否适用于实际场景,在 MATLAB R2022b 环境下编写实验程序。硬件条件为 CPU 型号 i5 13400F,10 核 16 线程;GPU 型

号为 RTX 3070;运行内存为 32 GB。分别采用 PID 控制器、模糊 PID 控制器和 BP-PID 控制器来测试电机控制。实验结果如图 7、图 8 所示。

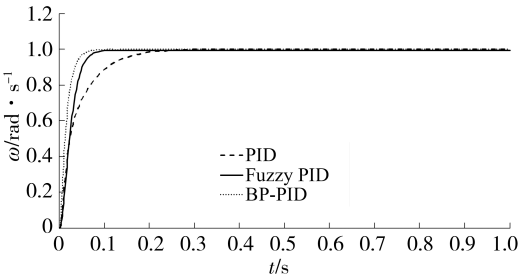


图 7 PID、BP-PID 和模糊 PID 控制器的仿真结果
Fig.7 Simulation results of PID, BP-PID, and fuzzy PID controllers

图 7 为 PID、BP-PID 和模糊 PID 控制器的仿真结果。根据仿真结果所示,3 个控制器的动态响应时间都在 0.30 s 内。BP-PID 控制器和模糊 PID 控制器的性能分别优于传统的 PID 控制器,响应时间分别为 0.08、0.10 s。传统的 PID 控制器的响应时间为 0.25 s。相比之下,BP-PID 控制器响应时间比传统 PID 控制器减少了 0.17 s,模糊 PID 控制器响应时间比传统 PID 控制器减少了 0.15 s。

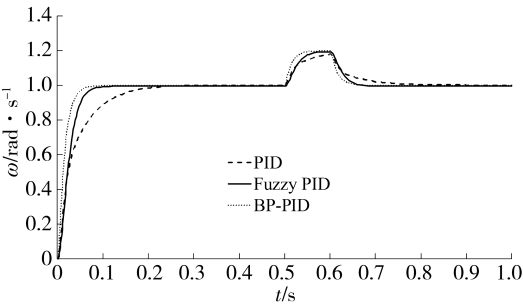


图 8 3 种控制器在扰动下的仿真结果
Fig.8 Simulation results of three controllers with disturbance

为了评估系统的抗干扰性能,在 0.5 s 时引入了一个持续时间为 0.1 s、振幅为 0.2 的方波扰动。图 8 为 3 种控制器在扰动下的仿真结果。相关参数的详细信息如表 2 所示。

根据表 2 可知,BP-PID 控制器的干扰相应时间为 0.07 s,比另外两个控制器的时间短。在扰动输入后 BP-PID 控制器的响应时间最短,恢复速度最快。模糊 PID 控制器比与 BP-PID 控制器慢,而传统 PID 控制器的响应时间最长,恢复速度最慢。在扰动消失后,BP-PID 控制器的下降时

间为 0.04 s,模糊 PID 控制器的下降时间为 0.05 s,传统 PID 控制器的下降时间为 0.17 s。根据 3 种控制器的下降时间可得出结论,该设计的系统使用传统 PID 控制器时响应时间较长,抗干扰性能较差。相反,BP-PID 控制器和模糊 PID 控制器在控制干扰时都表现得更好。其中 BP-PID 控制器的响应时间最短、抗干扰能力最好。

表 2 3 种控制算法的性能比较分析
Tab.2 Performance comparison and analysis of three control algorithms

控制算法	上升时间/s	干扰响应时间/s	恢复时间/s
PID	0.25	0.15	0.17
BP-PID	0.08	0.07	0.04
Fuzzy PID	0.10	0.09	0.05

两组对比实验结果说明了应用 BP-PID 控制器更适合所搭建的仿真平台,也能够更好地模拟实验平台。

5 结束语

针对工业行车系统中存在行车效率低、调度困难和运动过程中出现晃动现象等缺点,对 BP-PID 模型进行了拓展和应用。首先,考虑负载摆动对行车系统的影响,利用拉格朗日方程对滑轨行车进行了动力学建模。接着,对智能行车系统的动能和广泛力进行了计算和分析,通过对智能行车系统 x 、 y 、 z 轴的实时速度和做功状态,以提高智能行车系统的调度效率。最后,以用户实际需求为数据驱动,搭建了智能滑轨行车系统并对其进行实物仿真验证,分别使用 PID、BP-PID 和模糊 PID 对电机进行智能控制,验证了智能滑轨行车系统的有效性。实验的仿真结果表明,与 PID 和模糊 PID 控制器相比,BP-PID 控制器的上升时间、干扰响应时间和恢复时间更短,可实现对电机的实时稳定控制。

目前所构建的智能滑轨行车系统在传统算法上的控制精度还有待完善,下一步工作将进一步优化行车的控制系统,提高其稳定性和精度,同时研究并实践行车自主智能控制的方案,使其能够在无人值守的情况下完成物流装载、搬运等任务。

参考文献:

- [1] PENG G Z, WU Y Q, ZHANG C J, et al. Integrated optimization of storage location assignment and crane scheduling in an unmanned slab yard[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 161: 107623.
- [2] CHENG C T, PETERING M E H, WU Y. The multi-spreader crane scheduling problem: partitions and supersequences[J]. Discrete Applied Mathematics, 2021, 289: 207–218.
- [3] SKAF A, LAMROUS S, HAMMOUDAN Z, et al. Integrated quay crane and yard truck scheduling problem at port of Tripoli-Lebanon[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 159: 107448.
- [4] CIBICIK A, MYHRE T A, EGELAND O. Modeling and control of a bifilar crane payload[C]//2018 Annual American Control Conference (ACC). Milwaukee, WI: IEEE, 2018: 1305–1312.
- [5] SCHAPER U, DITTRICH C, ARNOLD E, et al. 2-DOF skew control of boom cranes including state estimation and reference trajectory generation[J]. Control Engineering Practice, 2014, 33: 63–75.
- [6] 丁明波, 程骅, 刘惠康, 等. 桥式吊车二级摆型新型分层模糊滑模控制器设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(1): 116–121.
- [7] 马博军, 方勇纯, 刘先恩, 等. 三维桥式吊车建模与仿真平台设计[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(12): 3798–3803.
- [8] 刘宁, 柴天佑. PID 控制器参数的优化整定方法[J]. 自动化学报, 2023, 49(11): 2272–2285.
- [9] SAIN D, MOHAN B M. Modeling, simulation and experimental realization of a new nonlinear fuzzy PID controller using center of gravity defuzzification[J]. ISA Transactions, 2021, 110: 319–327.
- [10] 朱燕飞, 楚友洋, 李传江. BP 神经网络优化参数的螺杆点胶阀无模型自适应控制技术[J]. 液压与气动, 2023, 47(9): 175–181.
- [11] PENG Z, BI C. A position sensorless closed-loop control mode of a three-phase hybrid stepper motor[J]. Energies, 2022, 15(3): 804.
- [12] 文天赐, 方勇纯, 卢彪. 采用神经网络的双吊车自适应防摆控制[J]. 自动化学报, 2023, 49(1): 111–121.
- [13] CAO Y L, ZHAO J H, XING F, et al. Structural process and testing of tunneling attitude sensor based on gravity gradient torque measurements[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2021, 31(12): 125013.
- [14] 李可萌, 陈富国, 杨晖, 等. 基于姿态传感器的高压隔离开关机械故障智能诊断研究[J]. 电网技术, 2023, 47: 3781–3790.

(责任编辑: 方素华)