

基于改进双闭环模糊PID 控制算法的桥式起重机控制系统

张友渊^{1,2}, 刘丽桑^{1,2}, 柯程扬^{1,2}, 梁景润^{1,2}, 郭凯琪^{1,2}

(1. 福建理工大学 电子电气与物理学院, 福建 福州 350118;

2. 福建省工业集成自动化行业技术开发基地, 福建 福州 350118)

摘要: 针对起重机在吊装作业时产生的负载摇摆以及行车定位的问题, 提出了一种改进双闭环模糊PID控制算法, 利用拉格朗日方程建立工业起重机防摇摆及行车定位控制系统数学模型。将该算法运用在建立的模型中, 并在Simulink仿真平台上分别设计了PID控制系统、模糊PID控制系统和改进双闭环模糊PID控制系统进行对比实验。仿真实验的结果表明, 与PID控制系统以及模糊PID控制系统相比, 改进双闭环模糊PID控制系统对摆角的抑制能力分别提高了32.6%、16.5%, 对小车的位置调节时间分别减少了5.442、2.743 s, 且无超调量。改进双闭环模糊PID控制系统的精确性更好、稳定性更强, 可以更好地满足桥式起重机系统的控制要求。

关键词: 桥式起重机; 防摇摆控制; 模糊PID控制; Matlab; 拉格朗日方程

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)03-0258-09

Overhead crane control system based on improved dual-loop fuzzy PID control algorithm

ZHANG Youyuan^{1,2}, LIU Lisang^{1,2}, KE Chengyang^{1,2}, LIANG Jingrun^{1,2}, GUO Kaiqi^{1,2}

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

2. Industrial Integrated Automation Industry Technology Development Base of Fujian Province, Fuzhou 350118, China)

Abstract: To address the issue of load swing and crane positioning during lifting operations of cranes, an improved dual-loop fuzzy PID control algorithm is proposed. The mathematical model for the industrial crane anti-swing and crane positioning control system is established using the Lagrangian equation. This algorithm is applied to the constructed model, and PID control systems, fuzzy PID control systems, and an improved dual-loop fuzzy PID control system are designed on the Simulink simulation platform for comparative experiments. Simulation results indicate that the improved dual-loop fuzzy PID control system exhibits a 32.6% and 16.5% increase in suppression capability for swing angles in comparison with the PID control system and fuzzy PID control system, respectively. The adjustment time for the position of the trolley is reduced by 5.442 s and 2.743 s, respectively, with no overshoot. The improved dual-loop fuzzy PID control system demonstrates better accuracy and stability, meeting the control requirements of the bridge crane system more effectively.

Keywords: overhead crane; anti-swing control; fuzzy PID control; Matlab; Lagrange equation

桥式起重机能够高效灵活地悬吊货物, 相较于地面起重设备, 能够避开地面障碍物, 具备更强的

提升能力且不易对地面和周围设备造成损害, 通常在工厂使用。桥式起重机一般由人为控制, 容易受

收稿日期: 2023-11-17

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: 张友渊(1999—), 男, 福建福州人, 硕士研究生, 研究方向: 桥式起重机智能控制。

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。

到人为因素的制约,无法满足当今起重机技术日益复杂和多样化的需求^[1]。现实生活中,企业对桥式起重机的高效性和精确性有着迫切需求,尤其体现在提高起重机运行速度和减少吊物摆动方面。根据统计数据,减少吊物摆动所花费的时间大约占整个吊运过程的40%左右,因此,有效抑制吊物摆动对于提高桥式起重机作业效率至关重要^[2]。

随着自动控制技术的不断发展,一些经典控制方法已被引入到防摇摆控制领域,包括LQR控制、输入整形控制、滑模控制、PID控制等。陈志梅、孟文俊^[3-4]提出了一种融合了滑模控制和输入整形技术的前馈控制器。经过仿真实验验证,这一控制器在实现小车定位和抑制吊具摆动方面表现出显著的效果。Cho^[5]在其研究中引入了双闭环控制,专注起重机防摇和定位两个问题,采用两个独立的闭环反馈系统进行分别控制。Liu^[6]和Solihin^[7]结合模糊控制与PID控制,提出了一种能够动态更新控制器参数的方法,并采用两个PID控制器分别用于起重机的摆动和定位控制。通过反馈控制机制,系统的自适应性得到了强化。模糊控制算法本身具备卓越的自适应性^[8],与传统PID控制结合,使得PID控制器能够自适应地更新其参数,从而构建了高度灵活的模糊PID控制系统。近年来,模糊PID控制系统在起重机控制领域取得了广泛应用^[9-10]。

本研究提出了一种改进双闭环模糊PID控制系统。针对传统PID控制器缺乏自适应性参数调整的能力,采用模糊控制与传统PID算法结合,使PID控制器能够自适应地更新其参数;针对起重机的防摆动及定位两个问题,引入了两个独立的反馈系统进行控制;设计一个基于模糊推理的比例因子自整定模块,该模块对输入信号 e 与误差变化率 \dot{e} 进行预处理,能够实现比例因子的在线自适应调整。

1 桥式起重机模型建立

桥式起重机的工作方式大致可以分为两种:一种是大车或小车单独运行,另一种是大车和小车同时运行。前者通常用于直线吊运,大车和小车在电机的驱动下加速和减速,由于负载通过柔性钢丝绳连接,负载的速度变化滞后于车速的变化,因此导致吊物出现摆动现象。在第二种情况下,吊物在加速和减速时会在三维方向上呈现类似椭圆的摆动运动。然而,由于实际应用中吊物

摆动通常较小,吊物以小车上的吊点为中心,在运行方向上表现出简谐摆动运动。为了提高工作效率,通常在实际工作中采用大车和小车同时运行。

国内外的研究已明确指出,大车和小车在协同工作时的运动可以被分解和理解为自己独立的二维运动^[11]。在实际作业中,起重机受到多种因素的影响,包括吊物的形状、质量、钢丝绳的长度、外部扰动等,使其成为一个多变量的非线性系统。要考虑所有这些因素并进行数学建模非常复杂,为了更好地建立运动模型以进行抑制摆动研究,需要在符合工程实际且能够充分描述系统性能的前提下简化系统。忽略一些影响相对较小的因素,对系统作出3个假设。

假设1. 系统结构和材料:钢缆的质量远小于吊起的重物质量,吊起的重物被视为刚体。起重机轨道和小车都保持稳定,不发生形变,且小车的重量不改变。吊具的重心被等效地视为在吊点上。

假设2. 运动摩擦和阻力:在运行过程中,轨道和车轮之间的摩擦力与运行速度成比例。系统在运行过程中忽略空气阻力和风力等扰动的影响。

假设3. 控制和动力系统:小车的驱动力是可控的,由变频电机提供,忽略了减速机等传动机构的衰减。

以小车单独运动为例将系统简化为小车-吊物二维模型进行分析,如图1所示。

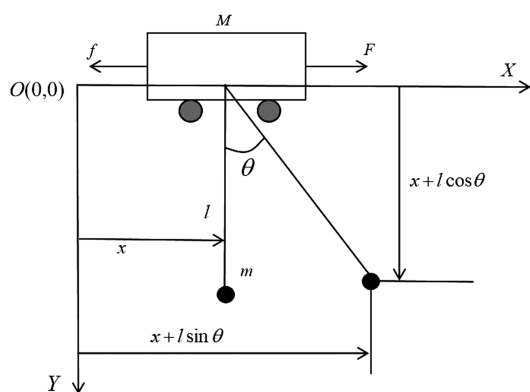


图1 桥式起重机简化二维模型

Fig.1 Simplified two-dimensional model of overhead crane

图1中, M 为小车质量, m 为吊重质量, l 为摆绳长度, θ 为吊绳与垂直方向夹角, x 代表水平方向位移。基于之前的假设,将起重机防摇摆及行车定位控制系统动力学模型简化为一个类似于滑块单摆系统的模型。本研究采用分析力学来分析整个系统,使用拉格朗日方程和广义坐标来建立

具有有限自由度的小车和吊物系统的微分方程,只需要考虑已知的主动力,可以大大简化系统动力学模型的建立。其定义形式如式(1)^[12]:

$$\begin{cases} L(q_i, \dot{q}_i) = T(q_i, \dot{q}_i) - V(q_i, \dot{q}_i) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = f_i \end{cases} \quad (1)$$

式中,拉格朗日算子 L 用于描述动力学行为; T 为质点系动能,涉及质点的运动能量;系统动能 V 考虑了系统内各部分的运动;广义坐标 q_i 描述系统的位置信息; i 为质点系的自由度, f_i 为系统的广义外力, $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

在小车位移 x_M 为广义坐标的前提下,吊重系统所受水平方向外力为摩擦力 f 以及行车驱动力 F 。由假设 2 知,小车与轨道的摩擦力为摩擦系数与小车水平方向速度乘积: $f = \mu \dot{x}_M$ 。可以推出:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_M} = (M+m) \dot{x}_M + m \dot{\theta} \cos \theta + m \dot{l} \sin \theta \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_M} \right) = (M+m) \ddot{x}_M + m \ddot{l} \sin \theta + 2m \dot{\theta} \cos \theta + \\ m \ddot{\theta} \cos \theta - m \dot{\theta}^2 \sin \theta \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_M} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_M} = F - f \end{cases} \quad (2)$$

在摆绳长度 l 为广义坐标的前提下,受到的外力为钢丝绳拉力 F_l ,可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial l} = m \dot{l} + m \dot{x}_M \sin \theta \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{l}} \right) = m \ddot{l} + m \dot{x}_M \dot{\theta} \cos \theta + m \ddot{x}_M \sin \theta \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{l}} \right) - \frac{\partial L}{\partial l} = F_l \end{cases} \quad (3)$$

在吊物摆角 θ 为广义坐标的前提下,由假设 2,此时系统所受外力 $F_\theta = 0$,可推:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \theta} = m \dot{x}_M \cos \theta + m l^2 \dot{\theta} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = m l^2 \ddot{\theta} + 2 \dot{l} \dot{\theta} \sin \theta + m \ddot{x}_M \cos \theta + m \dot{x}_M \dot{l} \cos \theta - \\ m \dot{x}_M \dot{\theta} \sin \theta \\ \frac{\partial L}{\partial \theta} = m \dot{x}_M \dot{l} \cos \theta - m \dot{x}_M \dot{\theta} \sin \theta - m g l \sin \theta \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = F_\theta \end{cases} \quad (4)$$

式中, g 其为重力加速度。联立式(1)与式(2)、式(3)、式(4)分别建立行车驱动力 F ,外力为钢丝绳拉力 F_l 及关于吊物摆角 θ 的拉格朗日方程,经化简整理可得:

$$\begin{cases} (M+m) \ddot{x}_M + m \ddot{l} \sin \theta + 2m \dot{\theta} \cos \theta - m \dot{\theta}^2 \sin \theta + \\ m \ddot{\theta} \cos \theta = F - \mu \dot{x}_M \\ \ddot{l} + m \ddot{x}_M \sin \theta + m \dot{x}_M \dot{\theta} \cos \theta = F_l \\ \ddot{\theta} + 2 \dot{l} \dot{\theta} + g \sin \theta + \ddot{x}_M \cos \theta = 0 \end{cases} \quad (5)$$

考虑到实际情况中桥式起重机通常将吊物提升到设定高度后才开始吊装作业,并在行车及吊物到达目标位置后才放下吊物。因此可以忽略吊物过程中钢丝绳的形变,即 $\ddot{l} = \dot{l} = 0$ 。此外,实际情况中摆角 θ 不允许过大,防止出现安全事故,一般在稳定点附近有较小的摆动。可设 $\cos \theta = 1$, $\sin \theta = \theta$, $\dot{\theta} = 0$,最终可得:

$$\begin{cases} (M+m) \ddot{x}_M + m \ddot{\theta} + \mu \dot{x}_M = F \\ \ddot{\theta} + \ddot{x}_M + g \theta = 0 \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)进行拉普拉斯变换得:

$$\begin{cases} F(s) = (Ms^2 + ms^2 + \mu s) X_M(s) + m l s^2 \theta(s) \\ l s^2 \theta(s) + g \theta(s) + s^2 X_M(s) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)整理可得小车-吊物系统两个传递函数:

$$\begin{cases} G_1(s) = \frac{X_M(s)}{F(s)} = \frac{l s^2 + g}{M l s^4 + \mu l s^3 + (M+m) g s^2 + \mu g s} \\ G_2(s) = \frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{-s^2}{M l s^4 + \mu l s^3 + (M+m) g s^2 + \mu g s} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $G_1(s)$ 为小车位置传递函数,输入为小车驱动力,输出为小车位置, $G_2(s)$ 为吊重摆角传递函数,输入为小车驱动力,输出为吊重摆角。

2 桥式起重机防摇摆及行车定位控制

2.1 传统 PID 控制系统

在控制系统中, PID (比例-积分-微分) 控制算法是最早发展起来并被广泛使用的算法,其具有简单且良好的适用性和稳定的可靠性。在工业生产制造过程中,常常采用这种控制方法,图 2 为其控制系统原理图。

PID 控制器的公式为^[13]:

$$u_t = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

式中, K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, K_d 为微分系数。

在实际场景中,随着时间和工作环境的变化,过程参数和模型结构可能会发生变动,这给传统 PID 控制器的性能带来了挑战。为了解决这些问题,现在 PID 控制已经逐步朝着智能化、自适应化和最优化的方向发展。

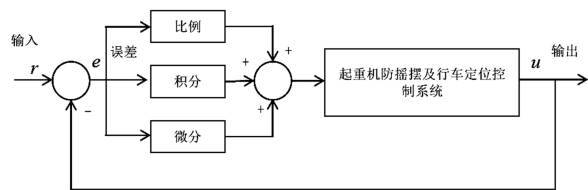


图 2 PID 控制系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of PID control system

2.2 模糊 PID 控制系统

模糊 PID 控制器是一种常用于自动控制系统的先进控制技术。它结合了传统的 PID 控制器和模糊逻辑控制的优点,可以提供更好的性能和适应性,尤其在复杂和变化的控制环境中。其核心思想在于利用语言分析的数学模型,将复杂

系统或过程的描述转化为可计算的算法语言^[14]。这种方法通过建立数学框架,使自然语言的描述能够更直接地映射到计算机可理解和执行的指令。通过这种方式能够更有效地处理对系统的理解和控制,从而在处理复杂性和提高计算机可读性方面取得更显著的进展。

为实现模糊 PID 控制系统,需要实时采集起重机吊重小车位置控制系统的状态数据作为反馈信号。这些位置数据与期望输入相减形成误差信号,对其求导得到误差信号变化率,通过一组预设的比例因子后进行模糊化处理作为模糊 PID 控制器的输入。在控制器中,模糊规则进行复杂的逻辑推理运算,实时输出 3 个修正量,用以调整 PID 控制的参数^[15]。最终,通过这些修正量能够修改 PID 参数的表达式,从而更精准地控制起重机控制系统。调整后的 PID 参数可以表示为:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (10)$$

式中, K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 、 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 分别为模糊 PID 控制参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的预定值与修正量。模糊 PID 控制系统原理如图 3 所示。

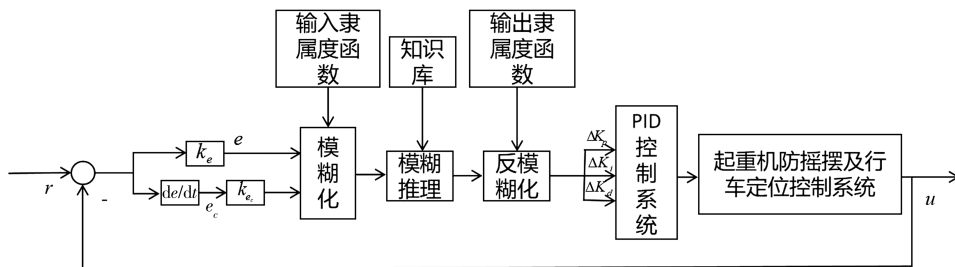


图 3 模糊 PID 控制系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of fuzzy PID control system

图 3 中, e 为误差信号, e_c 为误差信号变化率。模糊 PID 控制算法以实时优化为特点,通过定义模糊规则和相应的模糊逻辑语言,动态调整系统的 K_p 、 K_i 、 K_d 3 个参数,克服了传统 PID 控制在实时参数调整方面的限制^[16-17]。在模糊控制器的工作流程中,输入参数首先被模糊化,然后经过知识库进行模糊推理并去模糊化,最终产生清晰的输出参数。知识库包含语言变量的隶属函数等信息,而规则库则以模糊语言表达控制规则。这种设计使得模糊控制器能够处理不确定性和模

糊性,提高了系统对复杂控制任务的适应性。考虑到起重机对控制精度的要求,将控制系统的输入信号划分为 7 个模糊子集,以增加对不同操作环境的适应性,表示为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。选择误差信号 e 与其导数 e_c 为输入,模糊论域设定为 $[-1, 20]$ 与 $[-15, 2]$ 。模糊控制规则表如表 1~3 所示,系统输出为 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,模糊论域分别设定为 $[-1.5, 1.5]$ 、 $[-0.1, 0.5]$ 、 $[-0.1, 0.1]$ 。

表 1 ΔK_p 模糊控制规则表Tab.1 Fuzzy control rule table for ΔK_p

e_c	ΔK_p						
	$e =$	$e =$	$e =$	$e =$	$e =$	$e =$	$e =$
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
NM	PM	PM	PM	PS	ZO	ZO	ZO
NS	ZO	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM
ZO	NS	NS	NS	ZO	NS	NS	NS
PS	NM	NM	NM	NS	ZO	ZO	ZO
PM	ZO	ZO	ZO	PS	PM	PM	PM
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

表 2 ΔK_i 模糊控制规则表Tab.2 Fuzzy control rule table for ΔK_i

e_c	ΔK_i						
	$e =$	$e =$	$e =$	$e =$	$e =$	$e =$	$e =$
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
NM	NM	NM	NS	NS	NS	NS	NS
NS	PM	PM	PS	PS	PS	PM	PM
ZO	PM	PM	PS	ZO	PS	PM	PM
PS	PM	PM	PS	PS	PS	PS	PM
PM	NM	NM	NS	NS	NS	NM	NM
PB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB

表 3 ΔK_d 模糊控制规则表Tab.3 Fuzzy control rule table for ΔK_d

e_c	ΔK_d						
	$e =$	$e =$	$e =$	$e =$	$e =$	$e =$	$e =$
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NM	NB	NB
NM	ZO	ZO	NM	NM	NM	NM	NM
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
PS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
PM	ZO	ZO	NM	NM	PS	ZO	ZO
PB	NB	NB	NM	NM	NM	NB	NB

2.3 双闭环改进模糊 PID 控制系统

桥式起重机控制系统在实际工作中易受外界干扰,而传统的模糊 PID 控制方法存在比例因子参数的非自适应调整等问题。为了提高控制系统的精确性和稳定性,需使用能根据输入信号误差 e 及其变化率 e_c 自整定的比例因子。

本研究设计的改进双闭环模糊 PID 控制系统原理如图 4 所示,该系统包含 3 个关键部分。首先,考虑到桥式起重机实际工作时易受外界干扰且反馈信号是时变的,固定的比例因子将会影响系统性能,设计了一个基于模糊推理的比例因子自整定模块,该模块根据输入信号的误差 e 及其变化率 e_c 的变化实现比例因子在线自整定。其次,设计了模糊 PID 起重机防摇摆及行车定位控制系统,其中比例因子自整定模块整定后的误差及误差率变化作为该部分输入。最后,通过双闭环控制,将小车位置与吊重摆角信息实时反馈到系统中,以更好实现吊重摆角的精确控制。

在比例因子自整定模块中,以系统反馈的位置数据与输入期望值的差值 e 及其变化率 e_c 作为模块的输入。模糊化后通过预先设定的模糊规则进行逻辑推理,产生比例因子的调整量 ΔK_e 和 ΔK_{e_c} ,之后通过得到的偏差量在线更新比例因子,以实现比例因子自整定,应对小车位置反馈数据的变化及外界干扰。整定后的输入期望值的误差 e 及其误差变化率 e_c 作为模糊 PID 控制系统的输入,从而生成更高精度的控制指令。比例因子自整定模块输入与输出的模糊论域均设为 $[-3, 3]$,模糊控制规则如表 4 所示,比例因子的修正公式为:

$$\begin{cases} K_e = K_{e_0} + \Delta K_e \\ K_{e_c} = K_{e_{c_0}} + \Delta K_{e_c} \end{cases} \quad (11)$$

式中, K_e 与 K_{e_c} 是位姿数据与期望位姿数据之间的差值 e 以及差值变化率 e_c 的比例因子, K_{e_0} 与 $K_{e_{c_0}}$ 为比例因子预定值, ΔK_e 与 ΔK_{e_c} 为修比例因子修正量。

在 Matlab R2022b 的 Simulink 中建立桥式起重机的改进双闭环模糊 PID 控制系统的仿真模型。两个模糊控制器分别为基于模糊推理的比例因子自整定模块与模糊 PID 控制模块,输出为误差比例因子的调整量 ΔK_e 和误差变化率比例因子的调整量 ΔK_{e_c} ,以及模糊 PID 控制模块的输出

ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 。参数变化曲面图 5 表明,模糊推理曲面覆盖整个输入空间,且分布较为均匀。

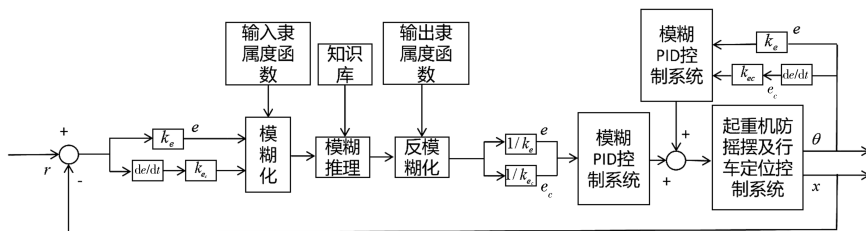
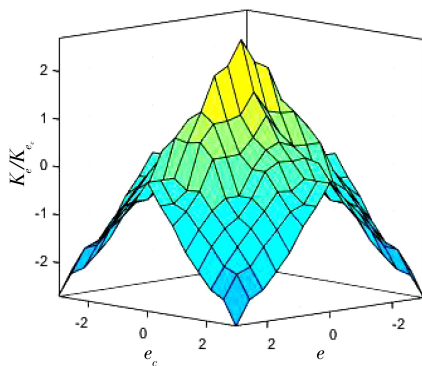
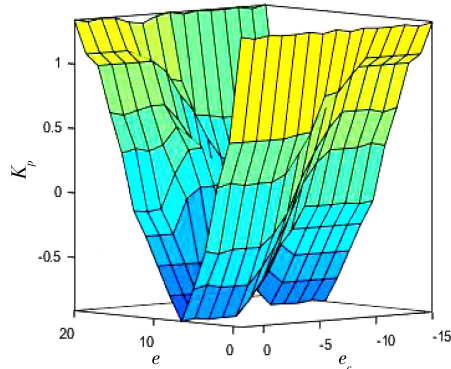


图 4 改进双闭环模糊 PID 控制器原理图

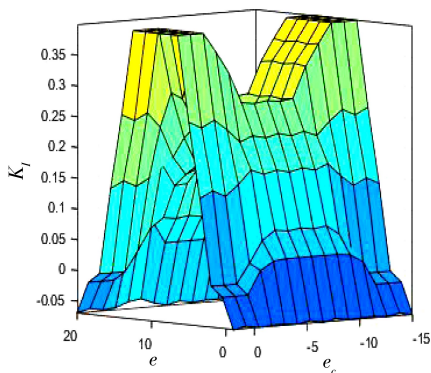
Fig.4 Schematic diagram of improved dual-loop fuzzy PID controller



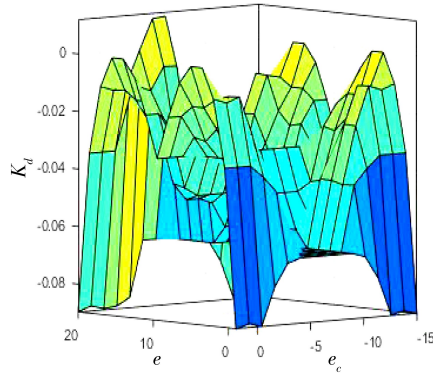
(a) ΔK_e 与 ΔK_{e_c} 模糊推理曲面



(b) ΔK_p 模糊推理曲面



(c) ΔK_i 模糊推理曲面



(d) ΔK_d 模糊推理曲面

图 5 改进双闭环模糊 PID 参数整定曲面

Fig.5 Improved dual-loop fuzzy PID parameters tuning curve

续表

表 4 比例因子模糊控制规则表

Tab.4 Fuzzy control rule table for scale factors

		$\Delta K_e / \Delta K_{e_c}$					
		$e =$	$e =$	$e =$	$e =$	$e =$	$e =$
		NB	NM	NS	ZO	PS	PB
e_c	$e =$	NB	NB	NM	NM	NM	NB
	NB	NB	NB	NM	NM	NM	NB
	NM	ZO	ZO	NM	NM	NM	NM
	NS	ZO	NS	NM	NM	NS	ZO

		$\Delta K_e / \Delta K_{e_c}$					
		$e =$	$e =$	$e =$	$e =$	$e =$	$e =$
		NB	NM	NS	ZO	PS	PB
e_c	$e =$	NB	NM	NS	ZO	PS	PB
	NB	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	NM	ZO	NS	NM	NM	NS	ZO
	NS	ZO	ZO	NM	NM	NM	NM
	ZO	NB	NB	NM	NM	NM	NB

3 系统仿真实验与分析比较

3.1 桥式起重机控制器模型

在 Simulink 中建立桥式起重机的 PID 控制、模糊 PID 控制、改进双闭环模糊 PID 控制系统的仿真模型。控制系统参数设置如表 5 所示,由式 (8) 可得起重机控制系统摆角传递函数与起重机控制系统小车位移传递函数。

由上文分析设计,3 种控制系统设计如图 6~8 所示。

表 5 桥式起重机控制系统主要参数

Tab.5 Main parameters of overhead crane control system

物理量	符号	单位	给定值
小车质量	M	kg	8
吊物质量	m	kg	8
重力加速度	g	m/s^2	9.8
摩擦系数	μ	—	0.2
吊绳长度	l	m	4

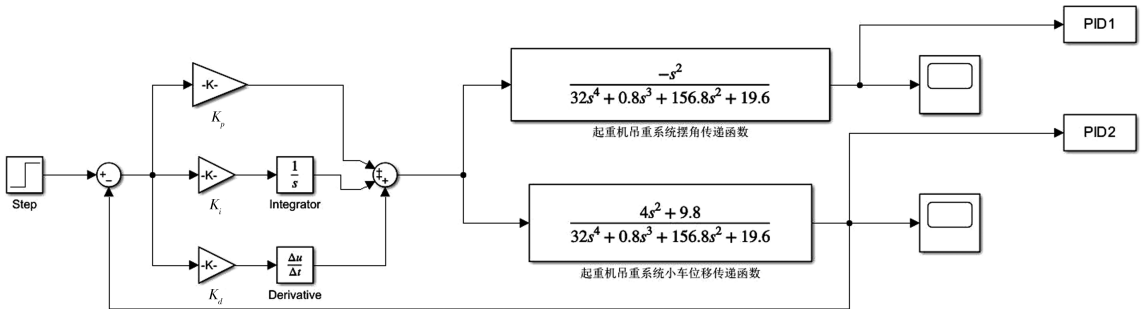


图 6 基于 PID 控制的桥式起重机控制系统

Fig.6 Overhead crane control system based on PID control

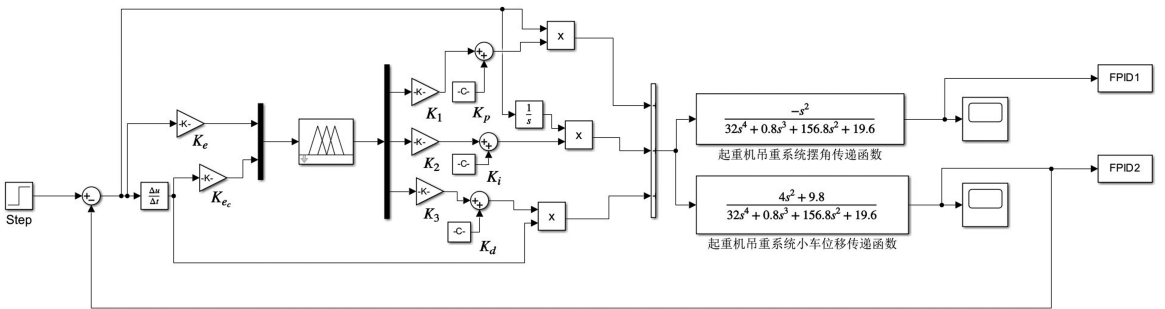


图 7 基于模糊 PID 控制的桥式起重机控制系统

Fig.7 Overhead crane control system based on fuzzy PID control

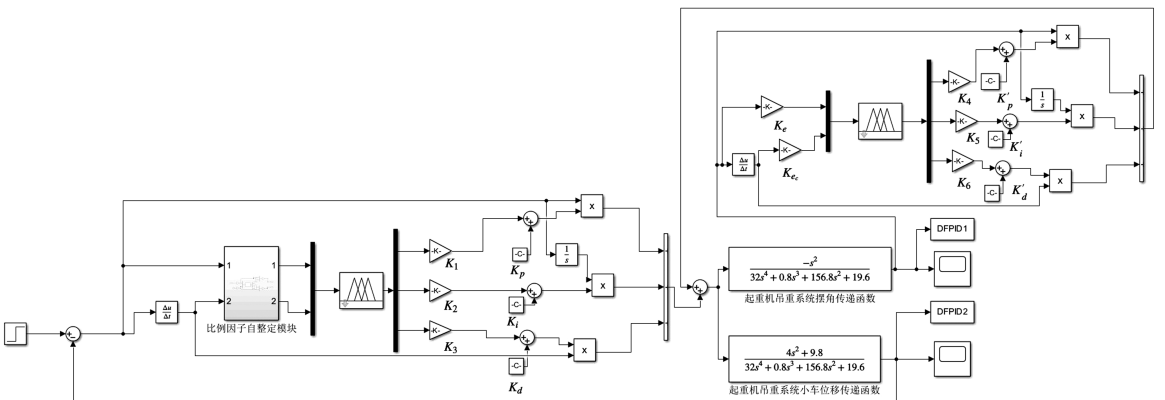


图 8 基于改进双闭环模糊 PID 控制的桥式起重机控制系统

Fig.8 Overhead crane control system based on improved dual-loop fuzzy PID control

3.2 仿真结果及分析

给定输入大小为3的阶跃信号,仿真时间设置为30s,求解器类型选择变步长。为了更直观的比较3种控制系统的控制效果,将仿真结果放在同一张图中对比。3种控制系统在表5所设定的参数下,起重机小车位移的控制效果以及摆角的抑制效果对比结果分别如图9、图10所示。由仿真结果可以看出,传统PID控制系统超调量较大,且存在振荡,而模糊PID控制系统与改进双闭环模糊PID控制系统,无超调且其响应速度较快。相比于模糊PID控制系统,改进双闭环模糊PID控制系统响应速度获得了进一步的提升。在3种控制系统中,改进双闭环模糊PID控制系统对摆角的抑制效果最好,与传统PID控制系统与模糊PID控制系统相比,分别提高了32.6%、16.5%,可见改进双闭环模糊PID控制系统具有最好的控制效果。

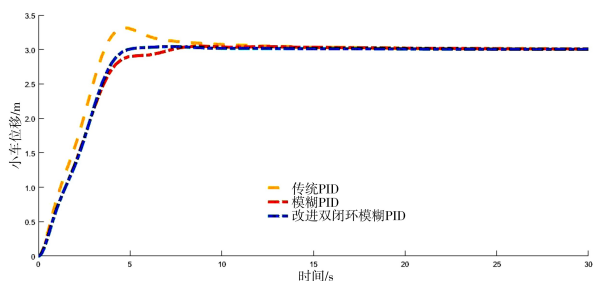


图9 3种控制系统对小车位移的控制效果

Fig.9 Control effects of three control systems on trolley displacement

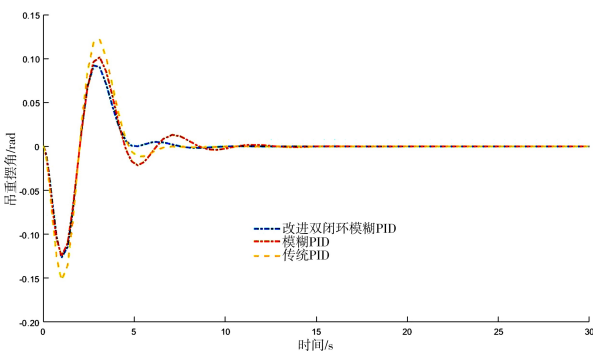


图10 3种控制系统对吊重摆角的抑制效果

Fig.10 Suppression effect of three control systems on swing angle of lifting weights

综上,与PID控制、模糊PID控制相比,改进双闭环模糊PID控制在超调量和调节时间等方面均表现出卓越的性能。为更突出改进双闭环模

糊PID控制的先进性,综合考虑小车超调量、小车稳态值、调节时间和摆角极值4个指标,总结了PID控制、模糊PID控制、改进双闭环模糊PID控制的性能如表6所示。由表6可知,改进双闭环模糊PID控制系统的调节时间为5.510s,相较于模糊PID控制系统与传统PID控制系统分别减少了2.743、5.442s;摆角极值为0.096,抑制效果较其他两种算法分别提高了32.6%、16.5%;且系统无超调量,调节时间最短,相比与传统PID控制系统与模糊PID控制系统分别减少了33.2%、50.3%,具有较强的适应性。

表6 3种控制系统性能指标对比

Tab.6 Performance indicator comparison of three control systems

控制系统	小车超调量/%	小车稳态值/m	调节时间/s	摆角极值/rad
PID控制	3.596	3.023	10.952	0.143
模糊PID控制	0	3.020	8.253	0.115
改进双闭环模糊PID控制	0	3.016	5.510	0.096

4 结论

本研究针对桥式起重机在吊装作业时产生的负载摇摆以及行车定位问题,提出了一种改进双闭环模糊PID控制算法。利用拉格朗日方程建立了工业起重机防摇摆及行车定位控制系统数学模型,将提出的控制算法应用于桥式起重机防摇摆及行车定位控制系统。首先,该系统通过吊重摆角与小车位置两个反馈的误差信号及其变化率作为桥式起重机吊重防摇摆及行车定位控制系统输入,提高了对吊重摆角的抑制性能。其次通过基于模型推理的比例因子自整定模块在线调整期望输入与输出的偏差值与其导数的比例因子,提高系统的适应性。最后在Simulink中搭建了传统PID控制系统,模糊PID控制系统和改进双闭环模糊PID控制系统并进行仿真实验。实验结果表明,改进双闭环模糊PID控制系统与模糊PID控制系统各方面性能均优于传统PID控制系统,降低了小车位移的超调量以及吊重摆角的极值,并且加快了调节时间。仿真实验验证了所提出控

制器的控制性能,满足起重机对控制精度较高的要求,可以将改进双闭环模糊 PID 控制算法应用于桥式起重机防摇摆及行车定位控制系统中。

参考文献:

- [1] 钟斌. 基于吊物防摇控制的起重机快速对位关键技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.
- [2] 孙丽娟. 基于输入整形技术的起重机吊具防摇控制策略研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2020.
- [3] 陈志梅,孟文俊,张井岗. 基于输入整形的桥式起重机组滑模控制[J]. 太原科技大学学报,2013,34(4):282-287.
- [4] 郁春丽,牛王强. 基于输入整形法的码头装卸起重机防摇研究[J]. 计算机仿真,2016,33(11):233-238,253.
- [5] CHO S K, LEE H H. An anti-swing control of a 3-dimensional overhead crane[C]//Proceedings of the 2000 American Control Conference. Chicago: IEEE,2000:1037-1041.
- [6] PISANO A, SCODINA S, USAI E. Load swing suppression in the 3-dimensional overhead crane via second-order sliding-modes[C]//2010 11th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS). Mexico City: IEEE,2010:452-457.
- [7] LIU C, ZHAO H Z, CUI Y. Research on application of fuzzy adaptive PID controller in bridge crane control system[C]//2014 IEEE 5th International Conference on Software Engineering and Service Science. Beijing: IEEE,2014:971-974.
- [8] 周向阳,舒通通,吕子豪,等. 基于模糊切换增益调节的惯性稳定平台滑模控制[J]. 仪器仪表学报,2021,42(12):263-271.
- [9] 翟秀丽,曹旭阳,庞鑫. 集装箱起重机模糊 PID 防扭控制研究[J]. 起重运输机械,2022(18):16-22.
- [10] LIU X Y, LI W L, WANG W J, et al. Control for the new harsh sea conditions salvage crane based on modified fuzzy PID [J]. Asian Journal of Control,2018,20(4):1582-1594.
- [11] LI F, CAO X Y. On fuzzy PID anti-sway control method of bridge crane [J]. Lifting and Transportation Machinery,2021(18):29-35.
- [12] LI H, HUI Y B, MA J, et al. Research on variable universe fuzzy multi-parameter self-tuning PID control of bridge crane [J]. Applied Sciences,2023,13(8):3390.
- [13] 郭瀛舟,郑建立. 基于变增益 PID 控制的起重机防摇摆设计与仿真[J]. 微型机与应用,2017,36(14):1-3.
- [14] 章卫国,杨向忠. 模糊控制理论与应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,2004.
- [15] 艾福强,包建东,刘正权. 基于粒子群优化模糊 PID 控制的多足式真空吸附机器人控制方案设计[J]. 电子测量技术,2023,46(2):67-72.
- [16] 顾祖成,耿小江,王永娟,等. 模糊自适应 PID 控制在无刷直流电机调速系统中的应用[J]. 机械设计与制造工程,2020,49(1):39-41.
- [17] 杨昕红,刘长文. 基于 MATLAB 的直流无刷电机模糊 PID 控制设计[J]. 仪表技术与传感器,2019(11):105-108.

(责任编辑:方素华)