

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.056

考虑载荷摆角的码头装卸起重机消摆自动控制

阚冬杰^{1,2}, 马晓雪^{1,2}

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 天津水运工程研究院有限公司, 天津 300456)

摘 要:当前码头装卸起重机消摆控制过程中均只考虑了振动摆角,未考虑载荷摆角,导致在不同状态下控制精度低,且存在安全隐患。为此设计一种考虑载荷摆角的码头装卸起重机消摆自动控制方法。针对控制过程中的载荷摆角问题,深入研究起重机的动力学特性,查找准确的控制参数。基于该参数设计跟踪微分控制器,实时跟踪起重机系统在不同阶段下的状态变化,为后续的消摆控制提供可靠的依据。结合延迟控制理论,针对不同的状态变化设计滑模控制器,通过精确控制起重机的运动,有效抑制了载荷的摆动。实验结果表明:所提方法不仅能够准确跟踪起重机的台车位移与载荷摆角,还具备较高的位移控制精度和良好的消摆效果。

关键词:起重机;载荷摆角;跟踪微分控制器;消摆控制;滑模控制器

中图分类号:TP273 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)03-0289-06

Automatic Control of Anti-sway for Dock Loading and Unloading Cranes Considering Load Swing Angle

KAN Dongjie^{1,2}, MA Xiaoxue^{1,2}

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M. O. T., Tianjin 300456, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: To handle the low control accuracy and safety hazards in different states of controlling in the movement and dissipation of loading and unloading cranes at the dock due to the sole consideration of vibration swing by neglecting load swing angle, a method for automatic control of anti-sway of dock loading and unloading cranes considering load swing angle is proposed. The problem of load swing angle during the control process being focused on, the dynamic characteristics of the crane were thoroughly studied to find accurate control parameters, based on which a tracking differential controller was designed to track the real-time state changes of the crane system at different stages, providing a reliable basis for subsequent anti-sway control. Combined with delay control theory, a sliding mode controller was designed for different state changes, which effectively suppressed the swing of the load by accurately controlling the movement of the crane. The experimental results show that the proposed method not only accurately tracks the displacement of the crane trolley and the load swing angle, but also has high displacement control accuracy and good anti-swing effect.

Keywords: crane; load swing angle; tracking differential controller; anti-swing control; sliding mode controller

0 引言

在码头装卸起重机的作业过程中,特别是在进行负载提升、小车移动和精确定位卸货时,由于小车的加速与减速操作以及负载的提升动作,常常导致负载产生显著的摆动。这种摆动不仅加剧了作业现场的安全风险,而且极大地增加了精确定位卸货的难度,进而影响了整体作业效率。因此,寻求一种更为先进、自动化的控制方法,以实现当前亟待解决的问题。

陆峰等^[1]建立了起重机模型,在系统能量分

析的基础上获得台车驱动与负载空间内摆角、大臂转动之间的关系。该方法的弊端是在设计控制器时,未考虑载荷摆角,可能导致控制器无法充分考虑实际工况下负载的变化,控制策略缺乏针对性。林静正等^[2]将起重机的干扰分为两部分,通过周期估计确定起重机的周期干扰,引入迭代学习方法补偿起重机的周期干扰,采用神经网络补偿起重机的非周期干扰。该方法的弊端是在通过周期估计确定起重机的周期干扰时,未考虑载荷摆角可能导致周期干扰估计不准确。BOZKURT等^[3]采用粒子群算法对PID控制器展开优化,利用优化后的PID控制器控制起重机在作业过程中的垂直位置与速度。该方法的弊端是在防摆控制

第一作者简介: 阚冬杰(1992—),男,天津人,工程师,硕士,研究方向为水运工程咨询、设计,kdj826@163.com。

过程中,未考虑载荷摆角会导致控制系统对于负载摆动反应不及时或者反应不准确。刘惠康等^[4]分析桅杆式起重机的动力学特性,建立三维模型,设计自抗扰消摆控制器。该方法同样未考虑载荷摆角可能会导致对桅杆式起重机的动力学特性分析不准确。为了解决上述方法中存在的问题,提出一种考虑载荷摆角的码头装卸起重机消摆自动控制方法。

1 码头装卸起重机载荷摆角问题分析

在码头装卸起重机中通常有一个或多个小车,这些小车可以在起重机的桥架或主梁上移动。小车的主要功能是通过其上的抓斗或其他类型的吊具来抓取、移动和卸载物料。在移动过程中,小车的加减速操作可能会导致负载产生摆动,也就是说起重机的振动会引入额外的动态力,导致载荷摆动幅度增大。同时,载荷的摆动所产生的反作用力又会作用于起重机,进一步激发起重机额外的振动。起重机振动与载荷摆动相互影响,产生耦合效应,导致起重机整体性能下降、作业效率减缓以及安全风险的增加。

考虑码头装卸起重机在作业过程中产生的载荷摆角,建立图1所示的起重机模型。

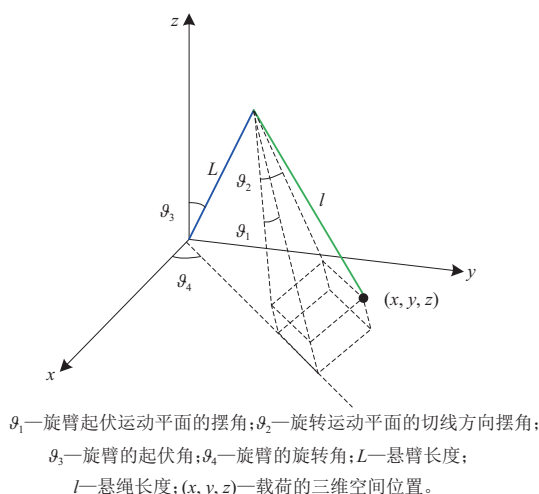


图1 起重机模型

图1中的 θ_1 、 θ_2 均属于码头装卸起重机的载荷摆角。假设码头装卸起重机模型在仿真过程中存在下述特点:

- 1) 可以不考虑悬绳产生的扭力,将载荷作为质点;
- 2) 可以测量旋臂的旋转角和起伏角以及对应的角速度;

3) 摆角 θ_i 的值通常较小,存在 $\sin\theta_i \approx \theta_i$ 、 $\cos\theta_i \approx 1, i=1, 2$ 。

通过式(1)描述旋臂在正常状态下的旋转运动:

$$J\ddot{\theta}_4 + d = Ku \quad (1)$$

式中: J 为旋臂在转动过程中产生的惯量; $\ddot{\theta}_4$ 为 θ_4 的二阶导; d 为系统外部干扰; K 为起重机系统的参数; u 为起重机的指令电压。

在拉格朗日运动方程的基础上建立由载荷与悬绳构成的起重机振动系统运动学方程^[5]。

$$\begin{cases} l(1+\theta_1^2)\ddot{\theta}_1 + l\theta_1\theta_2\ddot{\theta}_2 - l\ddot{\theta}_2\ddot{\theta}_4 + r l\dot{\theta}_1(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) - \\ (L\sin\theta_3 + r l\dot{\theta}_1)\dot{\theta}_4^2 - 2l\dot{\theta}_2\dot{\theta}_4 + g\theta_1 = 0 \\ l\theta_1\theta_2\ddot{\theta}_2 + r l(1+\theta_2^2)\ddot{\theta}_2 - l\ddot{\theta}_2\ddot{\theta}_4 + l\theta_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) + \\ (L\sin\theta_3 + r l\dot{\theta}_1)\dot{\theta}_4^2 + 2l\dot{\theta}_1\dot{\theta}_4 + g\theta_2 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\ddot{\theta}_1$ 、 $\ddot{\theta}_2$ 分别为 θ_1 、 θ_2 的二阶导; $\dot{\theta}_1$ 、 $\dot{\theta}_2$ 、 $\dot{\theta}_4$ 分别为 θ_1 、 θ_2 、 θ_4 的一阶导; g 为重力加速度; r 为速度反馈增益参数。通过调整速度反馈增益,可以优化系统在运动学方程范围内的速度控制特性,进而影响载荷摆角的稳定性和准确性。因此,载荷摆角控制方法设计过程中,速度反馈增益 r 是一个关键的控制参数。

2 码头装卸起重机消摆自动控制方法设计

由上节的运动学方程,为消摆自动控制提供了基本的数学模型。基于此起重机动力学特性,设计跟踪微分控制器和滑模控制器,通过调整起重机的运动参数(加速度、速度等),实现对载荷摆动的有效抑制。

2.1 跟踪微分控制器的状态跟踪

传统的消摆控制方法往往没有对这些状态进行细致的区分,导致控制效果不够理想,尤其是在台车启动和停车的初始与结束阶段,对其平稳性的要求更高,传统的控制方法往往难以满足。本文针对这一问题,深入分析了起重机在不同运动状态下的载荷摆角特性,基于速度反馈增益这一关键控制参数,设计了新型的跟踪微分控制器。该控制器能够根据载荷摆角的变化,实时跟踪起重机系统在不同阶段下的状态变化。具体过程描述如下。

在码头装卸起重机消摆控制器设计过程中,跟踪微分器可以跟踪起重机产生的微分信号并实现微分信号的过渡,避免起重机消摆控制过程中

出现超调与阶跃响应等问题。基于速度反馈增益这一关键控制参数,设计的跟踪微分控制器如下:

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = u \exp v_2 \\ \dot{v}_2 = -r^2(v_1 - x_d) - 2uv_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中 v_1 、 v_2 为跟踪微分控制器的输出状态变量。其中 v_1 为参考输入信号 x_d 的跟踪值;其一阶导表示为 $\dot{v}_1$, v_2 为信号 x_d 的实际跟踪速度,其一阶导表示为 $\dot{v}_2$; u 为速度反馈增益。

起重机搬运货物的距离一般情况下在 10 m 左右,在此过程中,减速运动、加速运动、匀速运动都会引起载荷摆角。为了提高台车停车以及启动状态下对平稳性的要求,在初始阶段与结束阶段台车速度轨迹应该为 S 型曲线。在台车减速运动、匀速运动以及加速运动过程中,为了避免曲线出现断点,构造的曲线需要保证不同运动阶段之间的连续性。Sigmoid 函数 $\text{sig}(x)$ 具有饱和性、单调性和光滑性等特点。

$$\text{sig}(x) = \frac{1}{(1 + e^{-x})} \quad (4)$$

式中 e 为对数底。

设置指数因子 q 对 Sigmoid 函数的近似线性区间展开调节,将其控制在 $(-1, 1)$ 区间内,调节后的 Sigmoid 函数表示为 $\text{sig}(q, x)$ [6]:

$$\text{sig}(q, x) = u \exp \frac{1}{(1 + e^{-qx})} - 1 \quad (5)$$

根据上述分析,考虑载荷摆角的码头装卸起重机消摆自动控制方法在 Sigmoid 函数的基础上建立光滑性、连续性的非对称 S 型速度曲线 $g(v_1, x_d)$:

$$g(v_1, x_d) = \begin{cases} \frac{2l_d \text{sig}(q, x)(r_1, v_1 + \phi)}{r} & v_1 \leq \frac{x_d}{2} \\ \frac{2l_d \text{sig}(q, x)(r_2, v_1 - x_d)}{r} & \frac{x_d}{2} < v_1 \leq x_d \end{cases} \quad (6)$$

式中: l_d 为速度反馈增益调节的上限; r_1 为加速调节因子; ϕ 为极小的正数,其主要作用是保证初始加速度; r_2 为减速调节因子。

采用非对称 S 型速度曲线 $g(v_1, x_d)$ 改进式(3)所示的跟踪微分控制器,建立新型跟踪微分器,以此实现码头装卸起重机系统状态的跟踪。

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = u \exp v_2 \\ \dot{v}_2 = -r^2 g(v_1, x_d) - 2uv_2 \end{cases} \quad (7)$$

2.2 滑模控制器消摆控制

起重机系统内的各机构在工作过程中均存在在减速阶段与加速阶段,这种间歇式作业特性使得吊重摆动成为难以避免的现象 [7]。由第 2.1 节建立的起重机参数计算,认识到通过减小速度 $\dot{v}_1$ 、 $\dot{v}_2$ 和加速度 g 可以有效控制载荷摆角 ϑ_1 、 ϑ_2 ,但在追求工作效率的同时,如何有效控制跟踪微分控制器操作后存在的自由摆动成为一个关键问题。通过对起重机系统自身输出信号进行时间延迟处理并与原始输出信号进行比较,可以获得用于消摆控制的控制信号。这些信号被反馈到起重机系统中,与跟踪微分控制器的输出相结合,共同实现对起重机运动的精确控制。具体过程描述如下。

将延迟反馈控制加入吊臂顶点,以此消除吊重摆动。起重机吊臂顶点的控制由两部分完成,分别是变幅操作与回转操作 [8-10],因此所提方法设计的控制器为:相对于吊臂顶点,对吊重的摆动进行延迟处理 [11],并根据一定的比例将延迟叠加到起重机吊臂顶点的运动中。

$$\begin{cases} x_{\text{pref}} = x_i + kl \cos \vartheta_2(t - \tau) \cdot \sin \vartheta_1(t - \tau) \cdot \\ \sin \vartheta_4 - kl \sin \vartheta_2(t - \tau) \cdot \cos \vartheta_4 \\ y_{\text{pref}} = y_i + kl \cos \vartheta_2(t - \tau) \cdot \sin \vartheta_1(t - \tau) \cdot \\ \sin \vartheta_4 + kl \sin \vartheta_2(t - \tau) \cdot \sin \vartheta_4 \end{cases} \quad (8)$$

式中: (x_i, y_i) 、 $(x_{\text{pref}}, y_{\text{pref}})$ 分别为吊臂顶点的初始位置与加入反馈后对应的位置; k 为延迟反馈增益系数 [12-14]; τ 为延迟时间。

与吊重的摆动运动相比,起重机吊臂顶点的运动速度相对较低,因此可不考虑吊臂顶点运动产生的影响 [15-16],建立吊重摆动加入延迟控制后的运动方程:

$$\begin{cases} \ddot{\vartheta}_1(t) + \left(\frac{g}{h} - \dot{\vartheta}_4^2 \right) \cdot \vartheta_1 + k \ddot{\vartheta}_1(t - \tau) - k \dot{\vartheta}_4^2 \vartheta_1(t - \tau) = 0 \\ \ddot{\vartheta}_2(t) + \left(\frac{g}{h} - \dot{\vartheta}_4^2 \right) \cdot \vartheta_2 + k \ddot{\vartheta}_2(t - \tau) - k \dot{\vartheta}_4^2 \vartheta_2(t - \tau) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

对上述运动方程求解,即可获得码头装卸起重机的消摆控制量 ϑ :

$$\vartheta = ae^{\sigma t} \cdot \cos(\omega t + \vartheta_0) \quad (10)$$

式中: ϑ_0 为初始相位角; ω 为摆动频率 [17]; a 为摆幅;当参数 σ 小于 0 时收敛,载荷摆角 ϑ_1 得到控制,收敛速度随着 σ 值的减小而加快 [18-20]。

码头装卸起重机消摆控制器如图 2 所示。

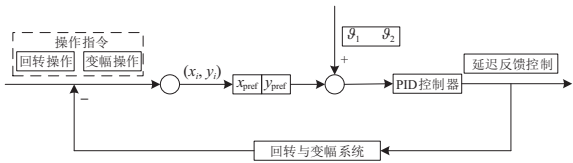


图2 码头装卸起重机消摆控制器

联合两种控制器,限制负载摆动幅度,从而完成了码头装卸起重机消摆自动控制。

3 实验与分析

为了验证考虑载荷摆角的码头装卸起重机消摆自动控制方法的整体有效性,需要对其展开测试,本次测试所用的起重机相关参数如表1所示。

表1 起重机相关参数

参数	数值
台车质量/kg	6.5
采样周期/s	0.001
负载质量/kg	1
重力加速度/(m/s ²)	9.8
吊绳长度/m	0.75
旋臂惯量/(kg·m ²)	100

设置参数:跟踪速度调节参数为0.5 m/s²,跟踪微分控制器开始工作时的位置为(0,0),速度状态为0 m/s,滑模控制器延迟反馈增益系数为0.2,延迟时间为0.05 s,起重机控制系统外部干扰为0.1 Nm。

本次实验在不同运动状态下进行测试,设计了跟踪微分控制器,旨在实时跟踪起重机系统在

不同阶段(初始、加速、稳定)下的状态变化。跟踪结果如图3所示。

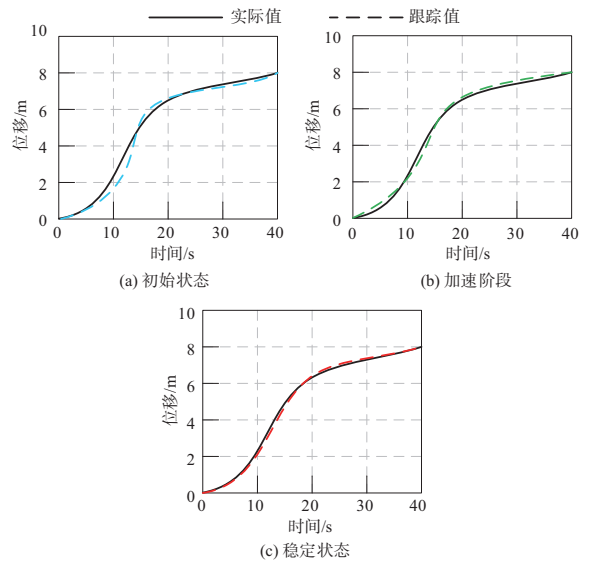


图3 不同运动状态下车车位移跟踪结果

分析图3可以看出,本文方法能够有效地实现对系统状态的跟踪与控制,在不同阶段下具有良好的稳定性和响应性。通过对实际值与跟踪值的比较,验证了所设计的跟踪微分控制器在实际环境中的可靠性和准确性,为进一步的控制优化提供了可靠的实验基础。

在起重机消摆控制过程中,准确跟踪起重机的状态是实现精准控制的关键。为了进一步验证本文方法的有效性,对其进行了与文献[1]方法、文献[3]方法和文献[4]中方法的系统状态跟踪对比测试。测试结果如图4所示。

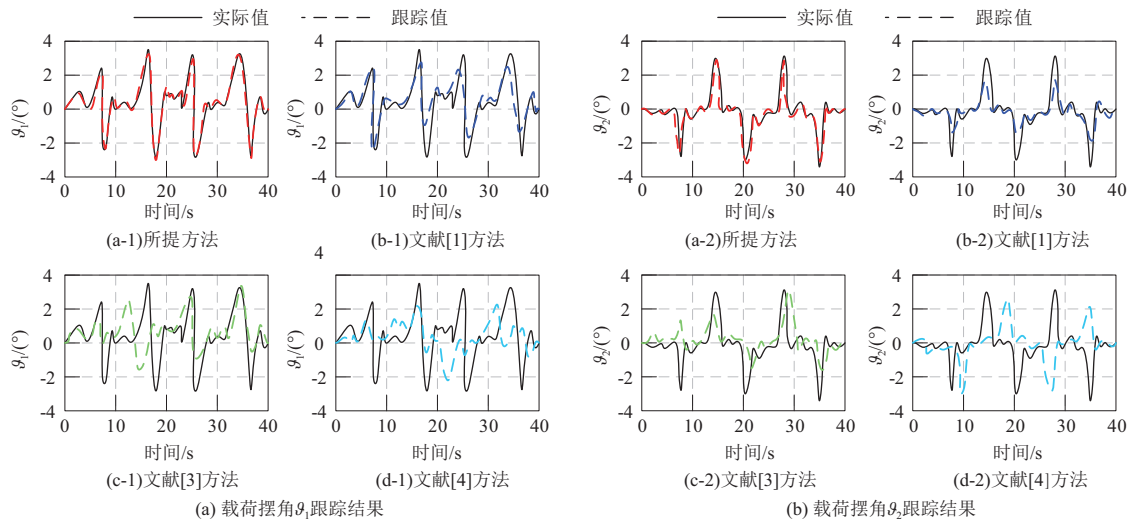


图4 载荷摆角 θ_1 、 θ_2 跟踪结果

通过上述测试可知,所提方法获得的台车位移跟踪曲线及载荷摆角跟踪曲线均符合实际变化情况,文献[1]方法、文献[3]方法和文献[4]方法获得的台车位移跟踪曲线及载荷摆角跟踪曲线均与实际变化曲线之间存在不同程度的误差。通过上述测试可知,所提方法具有较高的跟踪精度,能够实时跟踪起重机系统在不同阶段下的状态变化。

现将台车位移设置为 6 m,采用所提方法、文献[1]方法、文献[3]方法与文献[4]方法展开消摆控制测试,结果如图 5 和表 2 所示。

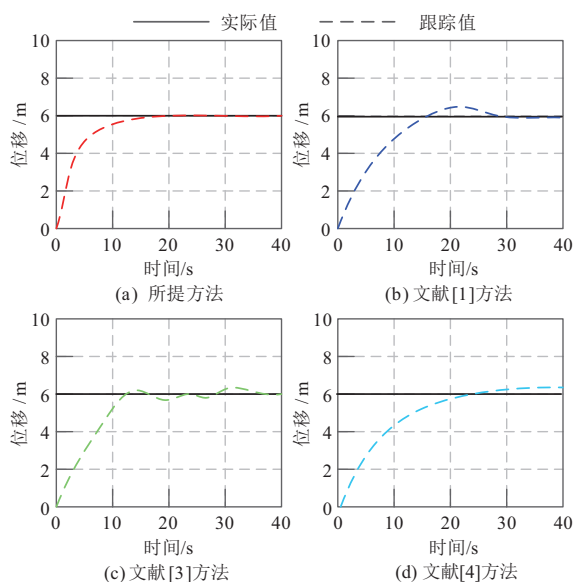


图 5 台车位移控制结果

表 2 载荷摆角变化情况 单位: (°)

时间/ ms	所提方法		文献[1]方法		文献[3]方法		文献[4]方法	
	ϑ_1	ϑ_2	ϑ_1	ϑ_2	ϑ_1	ϑ_2	ϑ_1	ϑ_2
10	0.01	0.04	2.16	1.67	2.03	2.08	1.58	1.51
20	0.02	0.02	2.06	1.86	1.96	1.92	1.47	1.49
30	0.01	0.03	2.18	1.52	1.97	1.83	1.69	1.55
40	0.03	0.03	2.22	1.48	2.05	1.90	1.56	1.66

由图 5 的测试结果可知,所提方法可在短时间内控制台车到达指定位置,其他 3 种方法无法在短时间内精准地控制台车到达指定位置,台车控制精度较低。由表 2 中两个载荷摆角的变化情况可知,所提方法在控制过程中具有良好的消摆效果,其他方法的控制效果较差。与其他方法相比,本文方法的优势在于通过准确识别起重机控制关键因素,并设计跟踪微分控制器实时追踪系统状态,结合延迟控制

理论设计出更加精确和有效的滑模控制器。滑模控制器本身具有对参数变化和外部干扰不敏感的优点,结合延迟控制理论后,能够进一步提高控制精度和稳定性。这种控制器在控制起重机的运动过程中,有效地抑制了载荷的摆动,从而实现了良好的消摆效果。

4 结语

针对当前码头装卸起重机在控制过程中仅考虑振动摆角而忽略载荷摆角,从而导致控制精度低下并存在安全隐患的问题,本文提出了一种全新的、考虑载荷摆角的码头装卸起重机消摆自动控制方法。通过分析起重机的动力学特性,找到关键控制参数并设计跟踪微分控制器。进一步结合延迟控制理论,针对不同状态变化设计了滑模控制器,通过精确控制起重机的运动轨迹和速度,有效抑制了载荷的摆动,显著提高了起重机作业的稳定性和安全性。实验结果验证了所提方法的有效性。所提方法能精准地追踪起重机台车位移与载荷摆角,实现高精度位移控制及显著消摆效果。本文不仅解决了起重机控制核心问题,也为起重机控制系统应用与发展奠定了坚实基础。展望未来,所提方法有望在提升码头装卸效率、保障作业安全以及促进物流行业的智能化、自动化方面发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] 陆峰,张义星,石怀涛,等. 基于能量法的多自由度欠驱动塔机防摆控制[J]. 控制工程, 2023, 30(4): 605-612.
- [2] 林静正,方勇纯,卢彪,等. 基于迭代学习和神经网络的船用起重机控制[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(4): 602-612.
- [3] BOZKURT B, ERTOGAN M. Heave and horizontal displacement and anti-sway control of payload during ship-to-ship load transfer with an offshore crane on very rough sea conditions [J]. Ocean Engineering, 2023, 267: 113309.
- [4] 刘惠康,刘馨,柴琳,等. 基于自抗扰理论的桅杆式起重机定位与消摆控制[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(23): 10073-10079.
- [5] 余震,余进,王海兰,等. 基于拉格朗日算法的起重机摇摆模型构建及其防摇摆模糊控制系统仿真分析[J]. 武汉科技大学学报, 2022, 45(3): 197-203.
- [6] 庞清乐,郑杨,马兆兴,等. 基于 sigmoid 函数的改进功率预测变步长光伏 MPPT 算法[J]. 电源技术, 2023, 47(4): 523-527.
- [7] 王志斌,张阳,周国鹏,等. 筋板及约束条件对双梁桥式起重机主梁挠度的影响研究[J]. 机械制造与自动

- 收稿日期: 2024-04-08

收稿日期:2023-10-09