



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2401891

引用格式:吴仁杰,孙淼,李仕华,等.桥式起重机的防摆控制技术及其仿真实验[J].科学技术与工程,2025,25(13):5484-5490.

Wu Renjie, Sun Miao, Li Shihua, et al. Anti-swing control technology and simulation experiment of bridge crane[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(13): 5484-5490.

桥式起重机的防摆控制技术及其仿真实验

吴仁杰¹, 孙淼², 李仕华¹, 高有山¹, 王爱红^{1*}

(1. 太原科技大学机械工程学院, 太原 030024; 2. 太原重工股份有限公司, 太原 030027)

摘要 为解决桥式起重机在负载升降过程中出现钢丝绳摆角太大问题,提出了一种以桥式起重机单摆模型为研究对象的模糊分层滑模控制方法。该方法首先建立了桥式起重机单摆模型系统,在传统滑模控制的基础上,设计两层滑模面联合控制,将分层滑模面与模糊控制相结合设计了控制器,通过理论证明了该方法下桥式起重机闭环系统的李雅普诺夫稳定性(Lyapunov),并进行了仿真实验。仿真结果表明,对比线性二次调节控制器(linear quadratic regulator, LQR)和多滑模控制器(multiple sliding mode control, MSMC),小车到达期望位置时间节省了68%,负载最大摆角降低了15%,达到良好的防摆效果。

关键词 桥式起重机; 分层滑模; 模糊控制; 单摆; Lyapunov 证明

中图分类号 TP273;

文献标志码 A

Anti-swing Control Technology and Simulation Experiment of Bridge Crane

WU Ren-jie¹, SUN Miao², LI Shi-hua¹, GAO You-shan¹, WANG Ai-hong^{1*}

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Taiyuan 030027, China)

[Abstract] To solve the problem that the wire rope swing angle is too large during the load lifting and lowering process of the bridge crane, a fuzzy layered sliding mode control method was proposed with the single pendulum model of the bridge crane as the research object. The method firstly establishes the bridge crane single pendulum model system, designs the two-layer sliding mode surface joint control based on traditional sliding mode control, combines the layered sliding mode surface with fuzzy control to create the controller, proves the Lyapunov stability of the closed-loop system of the bridge crane under the method through theory and carries out simulation experiments. The simulation results show that compared with the LQR controller and the multi-sliding mode controller, the trolley arrives at the desired position in 68% less time, and the maximum swing angle of the load is reduced by 15%, which achieves a good anti-swing effect.

[Keywords] bridge crane; hierarchical sliding mode; fuzzy control; single pendulum; Lyapunov proof

桥式起重机是一种常见的起重作业设备,通常由跨越工作区域的桥梁结构和悬挂在桥梁上的起重机构组成。它通常用于工厂、仓库、港口等场所,用于搬运、装卸重物,具有承载能力强、操作灵活、覆盖范围广等特点。起重机在运输作业时,由于负载重量分布不均匀、驾驶员操纵不当导致小车快速启停、急转弯、外界风力干扰等原因,会使负载出现球面摆动的状况,导致货物运输效率下降,进而导致货物损坏,对工作人员的人身安全造成威胁。因此如何实现起重机小车快速定位以及消除负载摆动成为了近年来国内外学者研究的热点。

迄今为止,国内外抑制起重机负载摆动主要有

开环控制和闭环控制两大方法。开环控制方法主要包括输入整形、轨迹规划等,闭环控制方法主要包括模糊控制、比例-积分-微分(proportion-integration-differentiation, PID)控制、滑模控制、自适应控制等方法。赵志杰等^[1]提出了一种基于模糊补偿的自适应控制器,考虑了工作环境对摩擦项的影响,解决了塔式起重机定位与消摆难度大的问题;刘惠康等^[2]为了抑制桅杆起重机在进行旋转和俯仰运动下的负载摆动,提出了一种自抗扰控制器,但未考虑建模时风力等外界干扰对起重机系统的影响;庞振华等^[3]通过试验研究了吊重摆长对起重机PID防摇控制的影响,得出起重机吊重摆长越长,系统

收稿日期:2024-03-17 修订日期:2025-01-09

基金项目:山西省留学人员科技活动择优资助重点项目(20240021);山西省科技成果转化引导专项(202304021301045);山西省研究生实践创新项目(2023SJ257,2023SJ255)

第一作者:吴仁杰(1999—),男,汉族,山西朔州人,硕士研究生。研究方向:桥式起重机防摆控制。E-mail:wurenjie@stu.tyust.edu.cn。

*通信作者:王爱红(1974—),女,汉族,山西太原人,博士,教授。研究方向:工程机械结构疲劳寿命和可靠性分析。E-mail:wah0611@tyust.edu.cn。

达到稳定状态的时间越长、最大摆角越小的结论;张珂等^[4]提出了一种基于能量耦合的船舶起重机控制方法,解决船舶起重机在外部海浪干扰下负载摆动幅度大、小车定位精度不高、抗干扰能力差的问题;Liu 等^[5]研究了受死区约束的切换欠驱动非线性系统的基于事件触发的自适应定时控制问题,提出了一种结合分层滑模技术和事件触发机制的有效控制方法;Pham 等^[6]采用分层滑模控制方法设计了一种高效的六自由度起重机控制器,既保证了桥式起重机的稳定性,又使桥式起重机在将载荷运送到指定位置时的摇摆和振荡降到最低;Zhang 等^[7]针对具有执行器故障的不确定欠驱动切换非线性系统,用模糊逻辑系统的逼近能力对欠驱动切换非线性系统的未知不确定函数进行逼近,提出了一种自适应模糊分层滑模控制方法;Yang 等^[8]利用模糊技术对桥式起重机系统进行线性化,建立了具有适当隶属函数的模糊桥式起重机模型,并通过滑模控制(sliding mode control, SMC)方法研究了模糊桥式起重机系统建模和有限时间稳定性和有界性问题;姚亚鑫等^[9]针对吊车运行过程中的双摆效应提出一种基于扩张观测器的分层滑模控制方法,有效保证了吊车快速平稳运行;Liu 等^[10]研究了具有未知间隙滞后和任意切换的欠驱动非线性系统的自适应有限时间跟踪控制,提出了一种考虑外部扰动和滞后非线性的分层滑模控制方案;Zhu 等^[11]提出了一种缆索驱动多环起重机欠驱动定位的分层耦合控制,降低了海上重型起重机的防摆成本;Calgan 等^[12]设计了一种混合控制器,该控制器结合了线性二次调节器(linear quadratic regulator, LQR)和分数阶比例积分微分控制器,以确保最佳的跟踪动力学、抗干扰的鲁棒性和传感器噪声抑制;Lu 等^[13]集成了 Skyhook 和 LQR,以衰减传输到机舱的振动,并加入了一种增益自适应算法,设计了一种改进卡车座舱动力学的协调控制器;Jeong 等^[14]提出了一种鲁棒耦合多滑模控制方法,用于具有非完整约束和外部扰动的欠驱动气垫船系统的跟踪控制;刘忠等^[15]在传统滑模理论的基础上设计了欠驱动二维桥式起重机的分层滑模控制器,有效抑制了起重机在运输过程中载荷的摆动,并且能够实时追踪小车的位置。

上述研究都在一定程度上解决了桥式起重机运输作业负载摆动问题,但所建模型较为复杂,考虑到外界的各种干扰因素,无法简化系统的数学模型,设计相对麻烦。目前国内外只有基于桥式起重机双摆模型的分层滑模控制,双摆模型参数估计困难、控制策略复杂,且动态行为容易受到多个因素的影响包括重力、摆的长度等。而单摆模型只考虑

一个摆动自由度,模型简洁,使得问题更容易理解和分析,适用于简单且忽略次级摆动影响的场景,通过单摆模型的分析,可以发现改进起重机设计的方法,提高其效率、稳定性和安全性。

鉴于单摆模型的诸多优点,现提出基于单摆模型的模糊分层滑模控制器(fuzzy hierarchical sliding mode, FHSMC),在分层滑模控制技术的基础上,引入模糊控制调整切换增益 k ,在理论上验证系统在滑模面上的稳定性,在仿真实验上证明模糊分层滑模控制器的有效性和优越性,解决目前缺乏单摆模型的分层滑模控制方法。

1 桥式起重机系统的动力学建模

如图 1 所示为建立的桥式起重机小车负载系统的模型,为了更加简洁明了地对系统进行分析,将负载看作一个单摆,负载通过钢丝绳与小车连接,起重机模型中各符号代表的含义如表 1 所示, f 为作用在小车上的线性阻尼,其大小由 $f = \mu_t \dot{x}$ 决定, μ_t 为摩擦因数。不考虑钢丝绳长度的变化。

根据拉格朗日第二类能量方程,建立桥式起重机的动力学方程如下。

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} + m\dot{l}\sin\theta + ml\ddot{\theta}\cos\theta + \\ 2m\dot{l}\dot{\theta}\cos\theta - ml\dot{\theta}^2\sin\theta + u\dot{x} = F \\ m\ddot{x}\sin\theta + m\ddot{l} - ml\dot{\theta}^2 - mg\cos\theta = F_l \\ \ddot{x}\cos\theta + \ddot{l} + 2\dot{l}\dot{\theta}\cos^2\theta + g\sin\theta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

钢丝绳长视为不变,故 $\dot{l} = \ddot{l} = 0$,代入式(1)可将动力学方程化简为

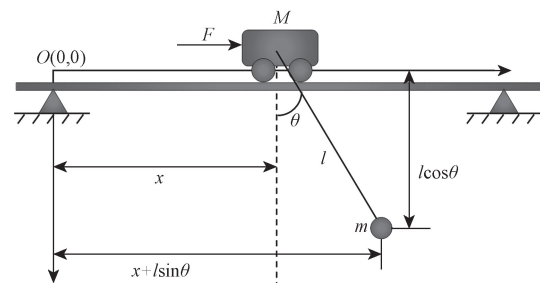


图 1 桥式起重机动力学模型

Fig. 1 Dynamic model of bridge crane

表 1 起重机模型参数

Table 1 Parameters of the bridge crane model

符号	含义
M	小车质量
m	负载质量
l	钢丝绳长度
θ	负载摆角
x	小车位置
F	驱动力
f	线性阻尼

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{ml\ddot{\theta}\sin\theta + mgsin\theta\cos\theta - u\dot{x} + F}{M + m\sin^2\theta} \\ \ddot{\theta} = -\frac{ml\dot{\theta}^2\sin\theta\cos\theta + m\sin\theta}{M + ml\sin^2\theta} + \\ \frac{M\cos\theta - u\dot{x}\cos\theta + F\cos\theta}{M + ml\sin^2\theta} \end{cases} \quad (2)$$

定义状态变量 $X = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}]^T$, 式(2)可继续化简为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1 + b_1 F \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_2 + b_2 F \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $f_{1,2}$ 、 $b_{1,2}$ 为系统动力学的部分, 具体表达式如下。

$$\begin{cases} f_1 = \frac{ml\dot{\theta}^2\sin\theta + mgsin\theta\cos\theta - u\dot{x}}{M + m\sin^2\theta} \\ b_1 = \frac{1}{M + m\sin^2\theta} \\ f_2 = \frac{-ml\dot{\theta}^2\sin\theta\cos\theta - Mgsin\theta}{Ml + ml\sin^2\theta} - \\ \frac{mgsin\theta - u\dot{x}\cos\theta}{Ml + ml\sin^2\theta} \\ b_2 = \frac{-\cos\theta}{Ml + ml\sin^2\theta} \end{cases} \quad (4)$$

2 模糊分层滑模器的设计及稳定性证明

2.1 分层滑模面的设计

假设当前位置 x 与期望位置 x_d 的误差为 e , 即 $e = x - x_d$, 可将第一层滑模面^[16]设计为

$$\begin{cases} s_1 = c_1 e + \dot{e} \\ s_2 = c_2 \theta + \dot{\theta} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: c_1 、 c_2 为正常数。设切换控制率为 u_{sw} , 总控制率 u 由切换控制率 u_{sw} 和总等效控制率 u_{eq} 组成。等效控制率 u_{eq} 能够实现系统状态的跟踪, 即将系统的状态一直保持在滑模面上。切换控制率 u_{sw} 的作用是使系统状态趋近于滑模面。令 $\dot{s}_1 = \dot{s}_2 = 0$ 代入式(5)中可得等效控制率为

$$\begin{cases} u_{eq1} = -\frac{c_1 \dot{e} + f_1}{b_1} \\ u_{eq2} = -\frac{c_2 \dot{\theta} + f_2}{b_2} \end{cases} \quad (6)$$

因此总控制率 u 的表达式为

$$u = u_{sw} + u_{eq1} + u_{eq2} \quad (7)$$

设计第二层滑模面为

$$S = k_1 s_1 + k_2 s_2 \quad (8)$$

式(8)中: k_2 为根据系统状态选择的常数。

$$k_2 = \begin{cases} k_{20}, & s_1 s_2 \geq 0 \\ -k_{20}, & s_1 s_2 < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: k_1 、 k_{20} 为正常数, 并设计 $k_1 > \frac{|b_2|k_{20}}{b_1}$,

$\alpha > k_{20}|b_2||h| + q$, $h = u_{eq1} - u_{eq2}$, 取指数趋近率

$\dot{S} = -\alpha \text{sgn}(S) - \beta S$, 其中 α, β 均为正常数, 显然 q 也为正常数, 为了保证滑模面的可达性^[17] 和跟踪性, 令切换控制率为

$$u_{sw} = -\frac{k_1 b_1 u_{eq2} + k_2 b_2 u_{eq1} + \alpha \text{sgn}(S) + \beta S}{k_1 b_1 + k_2 b_2} \quad (10)$$

将式(6)和式(10)代入式(7)中, 可得控制器为

$$u = \frac{k_1 b_1 u_{eq1} + k_2 b_2 u_{eq2} - \alpha \text{sgn}(S) - \beta S}{k_1 b_1 + k_2 b_2} \quad (11)$$

2.2 模糊规则的引入

为了更快地使小车达到指定位置并更有效地消除负载摆角, 将趋近率 \dot{s} 中的常系数 α 用受模糊规则控制的时间函数 $k(t)$ 来表示, 其中 \dot{S} 为模糊控制器的输入, Δk 为模糊控制器的输出, 其中 Δk 是 $k(t)$ 的变化率, 将输入、输出信号的模糊子集划分为 7 个等级 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PM}, 并将输入、输出信号的论域均设为 $\{-3, 3\}$ 。为保证滑模面存在并且系统在滑模面上稳定, 需满足 $\dot{S} < 0$, 所以设计的模糊规则^[18] 如下

If $S\dot{S}$ is PB, then Δk is PB;

If $S\dot{S}$ is PM, then Δk is PM;

If $S\dot{S}$ is ZO, then Δk is ZO;

If $S\dot{S}$ is NM, then Δk is NM;

If $S\dot{S}$ is NB, then Δk is NB。

引入受模糊控制的时变增益 $k(t)$ 后, 小车的控制率 u 为

$$u = \frac{k_1 b_1 u_{eq1} + k_2 b_2 u_{eq2} - k(t) \text{sgn}(S) - \beta S}{k_1 b_1 + k_2 b_2} \quad (12)$$

2.3 稳定性分析

构造 Lyapunov 函数 $V_1(t) = \frac{S^2}{2}$, 求导后可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) &= S\dot{S} = S[-k(t)S - \beta \text{sgn}(S)] \\ &= -k(t)S^2 - \beta|S| \leq 0 \end{aligned}$$

其中 $V_1(t) \geq 0, \dot{V}_1(t) \leq 0$, 当且仅当 $S=0$ 时等式才成立。由李雅普诺夫第二法可知, 系统的第二层滑模面是渐进稳定的。若当 $t = t_f$ 时, $V_1(t) = 0$, 以上一阶微分方程继续化简, 并进行分离变量可得

$$\dot{V}_1(t) \leq -\beta |S| = -\beta \sqrt{2V_1(t)}$$

$$2 \sqrt{V_1(t)} - 2 \sqrt{V_1(0)} \leq -\sqrt{2}\beta t$$

代入 t_f 可得 $t_f \leq \frac{\sqrt{2V_1(0)}}{\beta}$ 。所以系统的状态

变量能在有限时间 t_f 内到达第二层滑模面 $S = 0$ 。接着证明第一层滑模面的稳定性。继续构造 Lyapunov 函数 $V_2(t) = \frac{s_1^2}{2}$, 对函数继续求导可得:

$\dot{V}_2 = s_1 \dot{s}_1 = s_1(c_1 \dot{e} + \ddot{e}) = s_1(c_1 \dot{x} + \ddot{x})$, 将式(3)、式(6)和式(12)代入可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) &= s_1 [c_1 \dot{x} + f_1 + b_1 u] = [b_1(u - u_{eq1})] \\ &= \frac{b_1}{k_1 b_1 + k_2 b_2} [b_2 h k_2 s_1 - k(t) s_1 \operatorname{sgn}(S) - \beta s_1 S] \\ &\leq \frac{b_1}{k_1 b_1 + k_2 b_2} [k_2 |b_2 s_1 h| - k(t) |s_1| - \beta s_1 (k_1 s_1 + k_2 s_2)] \\ &= \frac{b_1}{k_1 b_1 + k_2 b_2} [k_2 |b_2 s_1 h| - k(t) |s_1| - k_1 \beta |s_1|^2 - k_2 \beta s_1 s_2] \\ &\leq \frac{b_1}{k_1 b_1 + k_2 b_2} |s_1| [|k_2| |b_2 h| - k(t)] \\ &\leq -\frac{b_1 q}{k_1 b_1 + k_2 b_2} |s_1| \leq 0. \end{aligned}$$

$h = u_{eq1} - u_{eq2}$, 同理由李雅普诺夫第二法可得第一层滑模面 s_1 渐进稳定。设常数 $\delta \leq \frac{b_1 q}{k_1 b_1 + k_2 b_2}$, 同样用分离变量的方法解得 $t_n \leq \frac{\sqrt{2V_2(0)}}{\delta}$, 所以系统的状态变量能在有限时间 t_n 到达第一层滑模面 s_1 。令 $t_m = \max\{t_f, t_n\}$, 当 $t = t_m$ 时, 系统状态变量能到达第二层滑模面 S 和第一层滑模面 s_1 , 这时滑模面 $S = s_1 = 0$, 又因为 $s_2 = \frac{S - k_1 s_1}{k_2} = 0$, 所以系统在 t_m 时间内也能到达第一层滑模面 s_2 , 所有滑模面的可达性证毕。

3 仿真与实验

为验证模糊分层滑模控制器的防摆效果的优越性, 现基于 MATLAB/Simulink 数值仿真平台对所提出的方法进行测试, 并同时与 LQR 控制

器^[19]、多滑模控制器^[20]进行了效果对比。在仿真实验中, 桥式吊车的系统模型参数设置如表 2 所示, 引入 MSMC 控制器和 LQR 控制器^[21]进行对比, 具体设计两种控制器的结构。

表 2 桥式起重机仿真参数

参数	物理意义	取值
M	小车质量	3 kg
m	负载质量	10 kg
l	钢丝绳长度	3 m
μ_f	摩擦因数	0.2
x_d	小车期望位置	1 m
k_1	第二层滑模面增益	1.1
k_2	第二层滑模面增益	0.01
β	趋近率增益	0.3

3.1 LQR 控制器的设计

设系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (13)$$

LQR 控制器的控制性能指标为

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [X^T QX + U^T RU] dt \quad (14)$$

式中: X 为 n 维状态向量; U 为 r 维输入向量; Y 为 m 维输出向量; Q, R 为加权矩阵; A 为系统矩阵, 描述了系统状态之间相互作用的方式; B 为输入矩阵, 指出了外部输入如何影响系统状态; C 为输出矩阵, 说明了系统状态如何影响输出; D 为直接传递矩阵, 表明了输入如何直接作用于输出。

式(13)取极小值时, LQR 控制器才能实现其控制目的。

$$H = -\frac{1}{2} [X^T QX + U^T RU] + \lambda^T [AX + BU] \quad (15)$$

对式(8)求导获得极小值, 得到最优控制率为 $u = R^{-1} B^T \lambda = -KX$ 。

其中 $\lambda = -PX, K = [k_1, k_2, k_3, k_4]^T, P$ 为黎卡提方程的解即: $PA + A^T P - PBR^{-1}BP^T + Q = 0$, 所以 $u = -k_1 x - k_2 \dot{x} - k_3 \theta - k_4 \dot{\theta}$ 。

3.2 MSMC 控制器的设计

设计第一层滑模面为

$$\begin{cases} s_1 = c_1 e + \dot{e} \\ s_2 = c_2 \theta + \dot{\theta} \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中: $e = x - x_d; c_1, c_2$ 为正常数, 由等效控制理论可得

$$\begin{cases} u_{eq1} = Mc_1 \dot{e} \\ u_{eq2} = \frac{Ml}{\cos\theta} \left(c_2 \dot{\theta} + \frac{g}{l} \sin\theta \right) \end{cases} \quad (17)$$

设计第二层滑模面: $S = k_1 s_1 + k_2 s_2$ 其中 k_1, k_2 为正常数, 令 $\dot{S} = -\alpha \text{sgn}(S) - \beta S$ 为趋近率, 则总控制率 u 为

$$\begin{aligned} u &= u_{eq1} + u_{eq2} + u_{sw} \\ &= \frac{k_1 l}{k_1 l + k_2 \cos\theta} u_{eq1} + \frac{k_2 \cos\theta}{k_1 l + k_2 \cos\theta} u_{eq2} + \\ &\quad \frac{k_2 \cos\theta}{k_1 l + k_2 \cos\theta} [\alpha \text{sgn}(S) + \beta S] \end{aligned} \quad (18)$$

3.3 对比仿真实验测试及结果

在保证系统参数一致的情况下, 搭建 LQR、MSMC 模糊分层滑模控制器的 Simulink 平台进行实验测试, 各项控制性能指标对比如表 3 所示, 实验结果对比如图 2 所示, 3 种控制器均能使小车达到指定位置, 并有效抑制负载摆动, 且模糊分层滑模控制器的各项性能指标更加卓越。

表 3 控制性能指标量化结果

Table 3 Quantitative results of control performance indicators

控制器种类	小车到达时间/s	小车最终位置/m	小车最大驱动力/N	摆角镇定时间/s	最大摆角/rad
FHSMC	4.43	1	38.36	3.34	-0.18
LQR	13.83	1	67	11.88	-0.21
MSMC	13.24	1	99	6.79	-0.23

通过对比图 2 以及分析表 3 中 3 种控制器的性能参数可以看出如下结论。

(1) 小车运动轨迹方面: 在相同收敛精度的情况下, FHSMC 控制器下的小车达到指定位置的速度最快, 所用时间远少于 LQR 和 MSMC 控制器, 且系统没有超调现象的发生。

(2) 抑制负载摆角方面: FHSMC 控制器下的小车摆角镇定时间最短, 且最大摆角幅度最低, 防摆效果突出。

(3) 小车驱动力方面: FHSMC 控制器下的小车最大驱动力远小于其他两种控制器的最大驱动力, 且 FHSMC 控制器所对应的控制力 u 曲线非常平稳, 波动范围较小, 这种情况表明 FHSMC 控制器有着很好的节能效果, 应用到实际工程中可以降低成本。

3.4 FHSMC 控制器鲁棒性实验分析

以模糊分层滑模控制器作用下的桥式起重机为研究对象, 将工况 1 中的参数作为参照样本, 进一步探究在不同负载和绳长工况下模糊分层滑模控制器的控制效果, 选取工况参数如表 4 所示, 鲁棒性实验结果如图 3 所示, 实验结果显示所设计的模糊

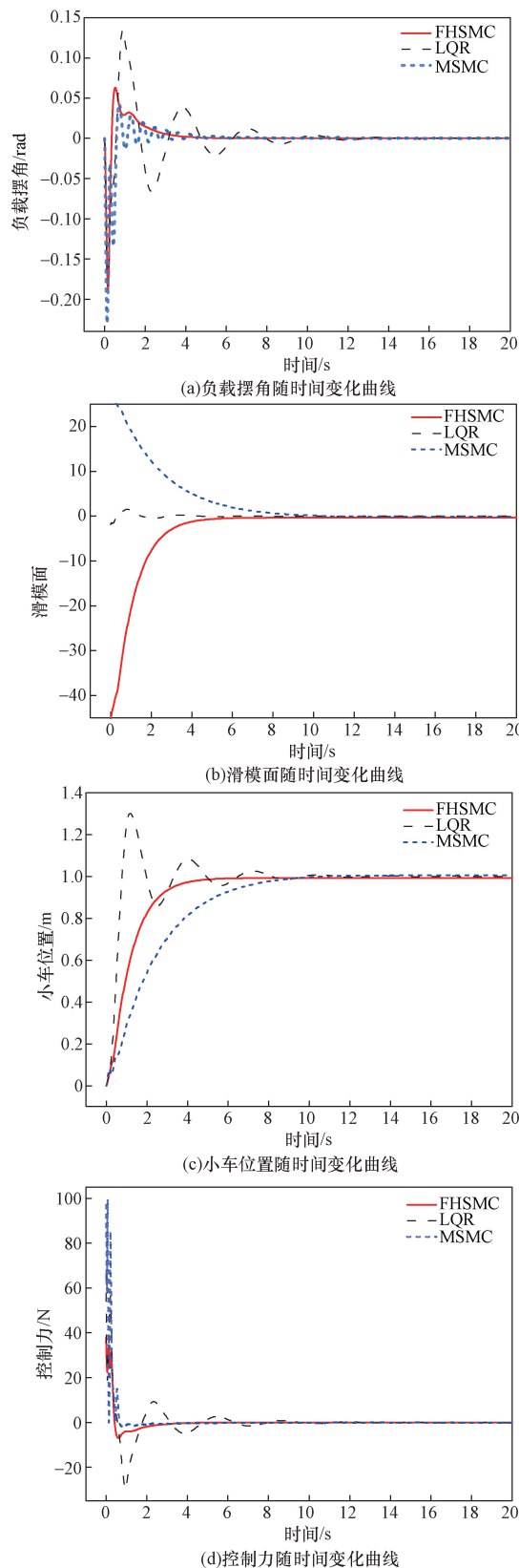
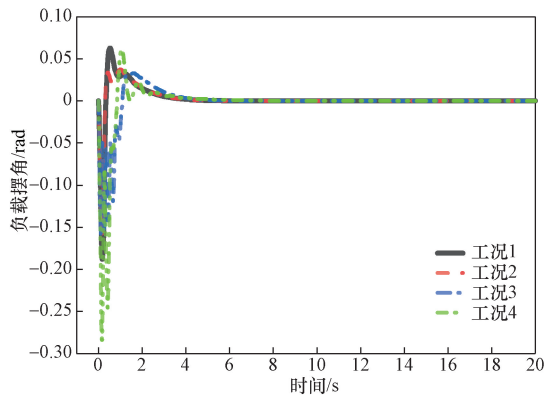


图 2 3 种控制器下的负载摆角、滑模面轨迹、控制力、小车位置效果对比

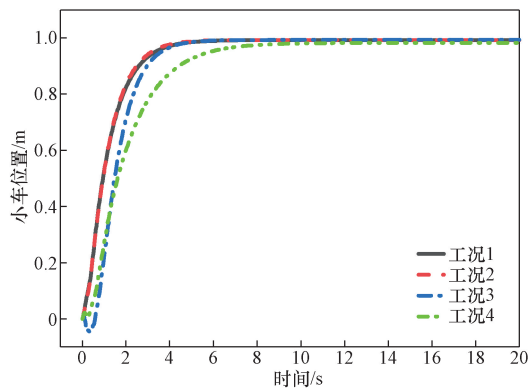
Fig. 2 Comparison of load swing angle, sliding mode surface trajectory, control force, and trolley position effect under three kinds of sliding mode controllers

表4 模糊分层滑模控制小车的四种工况的参数
Table 4 Parameters of fuzzy hierarchical sliding mode control of trolley for four operating conditions

工况条件	小车质量/kg	负载质量/kg	绳长/m
工况1	3	10	3
工况2	3	14	3
工况3	3	14	6
工况4	2	5	6



(a)不同工况下负载摆角随时间变化曲线



(b)不同工况下小车位置随时间变化曲线

图3 模糊分层滑模小车鲁棒性实验结果

Fig. 3 Experimental results of fuzzy hierarchical sliding mode cart robustness

分层滑模器具有优良的稳定性,可以在实际工程中的各种工作情况下都能稳定发挥它的优良控制性能,最大程度降低负载摆角,且作用过程十分迅速,能大大提高桥式起重机地工作效率,降低实际作业成本。

由鲁棒性实验结果可知,无论改变小车质量、负载质量还是绳长,模糊分层滑模控制器都能自如地应对不同的工作情况,很好地抑制负载地摆动,最大摆角不超过 -0.283 rad,且都能出色地完成对小车位置地跟踪,最大跟踪误差不超过 1.04 m。除此之外,工况3、4、5与工况1的图像曲线重合度高,各项性能指标几近相似,可以反映出模糊分层滑模系统的良好鲁棒性。

4 结论

针对桥式起重机负载摆动的问题,提出了一种基于单摆模型的模糊分层滑模控制器。首先建立了桥式起重机的单摆系统模型,其次在分层滑模面的基础上引入模糊规则调整增益 k ,并用李雅普诺夫第二法证明了该系统的稳定性,最后搭建 Simulink 平台进行了仿真实验,与其他控制器做了对比,突出模糊分层滑模控制器的良好防摆效果和较强的鲁棒性,解决了桥式起重机在实际作业中负载摆角大的问题。

参考文献

- [1] 赵志杰, 柴琳, 刘惠康, 等. 基于模糊补偿的塔式起重机自适应模糊滑模控制[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(2): 639-648.
Zhao Zhijie, Chai Lin, Liu Huikang, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control of tower crane based on fuzzy compensation[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(2): 639-648.
- [2] 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.
Liu Huikang, Liu Xin, Chai Lin, et al. Positioning and anti-swing control of mast crane based on auto-disturbance rejection theory[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(23): 10073-10079.
- [3] 庞振华, 刘放, 吴涛, 等. 吊重摆长对起重机 PID 防摇控制的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(14): 5828-5832.
Pang Zhenhua, Liu Fang, Wu Tao, et al. Simulation analysis and test verification of PID anti sway factors[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(14): 5828-5832.
- [4] 张珂, 张海峰, 佟圣皓, 等. 基于能量耦合的船舶起重机消摆控制[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(19): 8086-8093.
Zhang Ke, Zhang Haifeng, Tong Shenghao, et al. Sway suppression control of ship cranes based on energy coupling[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(19): 8086-8093.
- [5] Liu S, Niu B, Zong G, et al. Adaptive fixed-time hierarchical sliding mode control for switched under-actuated systems with dead-zone constraints via event-triggered strategy[J]. Applied Mathematics and Computation, 2022, 435: 127441.
- [6] Pham H V, Hoang Q D, Pham M V, et al. An efficient adaptive fuzzy hierarchical sliding mode control strategy for 6 degrees of freedom overhead crane[J]. Electronics, 2022, 11(5): 713.
- [7] Zhang H, Xu N, Zong G, et al. Adaptive fuzzy hierarchical sliding mode control of uncertain under-actuated switched nonlinear systems with actuator faults[J]. International Journal of Systems Science, 2021, 52(8): 1499-1514.
- [8] Yang C, Du C, Liao L. Design and implementation of finite time sliding mode controller for fuzzy overhead crane system[J]. ISA Transactions, 2022, 124: 374-385.
- [9] 姚鑫亚, 陈鹤. 基于扩张状态观测器的双摆吊车分层滑模控制[J]. 智能系统学报, 2024, 19(2): 344-352.
Yao Xinya, Chen He. Hierarchical sliding mode control of a double pendulum crane with an extended state observer[J]. CAAI Trans-

- actions on Intelligent Systems, 2024, 19(2): 344-352.
- [10] Liu S, Zhang L, Niu B, et al. Adaptive neural finite-time hierarchical sliding mode control of uncertain under-actuated switched nonlinear systems with backlash-like hysteresis [J]. Information Sciences, 2022, 599: 147-169.
- [11] Zhu B, Zhao T, Tang Z, et al. Hierarchical coupling control of cable-driven multi-loop crane for underactuated positioning[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 259: 108620.
- [12] Colgan H, Demirtas M. A robust LQR-FOPID μ controller design for output voltage regulation of stand-alone self-excited induction generator[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 196: 107175.
- [13] Lu Y, Khajepour A, Soltani A, et al. Gain-adaptive Skyhook-LQR: a coordinated controller for improving truck cabin dynamics [J]. Control Engineering Practice, 2023, 130: 105365.
- [14] Jeong S, Chwa D. Coupled multiple sliding-mode control for robust trajectory tracking of hovercraft with external disturbances [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(5): 4103-4113.
- [15] 刘忠, 温雨柔, 楼旭阳. 一类二维桥式起重机系统的分层滑模控制 [J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2022, 25(6): 32-39.
Liu Zhong, Wen Yurou, Lou Xuyang. Hierarchical sliding mode control of a class of two-dimensional overhead crane systems [J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2022, 25(6): 32-39.
- [16] Qian D, Yi J, Qian D, et al. Overhead crane control by hierarchical sliding mode[M]. Berlin: Springer, 2015.
- [17] 朱闪闪, 谢中敏, 曹永华. 一种新型趋近律的航空发动机滑模控制 [J]. 装备制造技术, 2021(6): 53-56, 70.
Zhu Shanshan, Xie Zhongmin, Cao Yonghua, et al. An aero-engine sliding mode control with improved approaching law [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2021(6): 53-56, 70.
- [18] 罗文辉, 张宪文, 徐进钊, 等. 基于模糊滑模控制算法的欠驱动控制器研究 [J]. 机电工程技术, 2020, 49(10): 127-129, 64.
Luo Wenhui, Zhang Xianwen, Xu Jinzhao, et al. Research on underactuated controller based on fuzzy sliding-mode algorithm [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(10): 127-129, 64.
- [19] 许占祥. 基于分段优化的避障轨迹规划与模糊前馈 LQR 轨迹跟踪控制[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
Xu Zhanxiang. Based on segment optimization obstacle avoidance trajectory planning and fuzzy feedforward LQR trajectory tracking control[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [20] 邱明明. 考虑动态特性的 DCT 双离合器接合过程多滑模控制方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
Qiu Mingming. Study on multiple sliding mode control method for DCT dual clutch engagement with dynamic characteristics [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [21] 王天雷. 欠驱动非线性桥式吊车安全控制方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
Wang Tianlei. Research on safety control methods for underactuated nonlinear overhead crane [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.