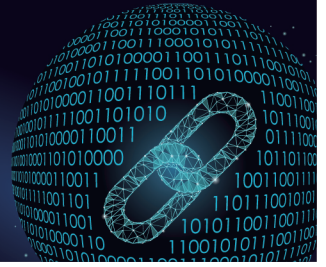




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



桥式起重机3D防摇动力学理论模型及控制策略

戚其松, 操尚峰, 董青, 沈舒杰, 张宇乐

引用本文:

戚其松, 操尚峰, 董青, 沈舒杰, 张宇乐. 桥式起重机3D防摇动力学理论模型及控制策略[J]. 控制与决策, 2024, 39(10): 3319–3327.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1227>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于能量分析的桥式起重机防摆控制方法

Anti-swing control method of bridge crane based on energy analysis

控制与决策. 2021, 36(12): 3091–3096 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0694>

基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller

控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller

控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor

控制与决策. 2021, 36(6): 1449–1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

线控转向系统的自适应高阶滑模控制

Adaptive higher-order sliding mode control for SbW system

控制与决策. 2021, 36(6): 1529–1536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1526>

桥式起重机3D防摇动力学理论模型及控制策略

戚其松[†], 操尚峰, 董青, 沈舒杰, 张宇乐

(太原科技大学 机械工程学院, 太原 030024)

摘要: 以桥式起重机为研究对象, 针对其在三维复杂欠驱动系统中因状态参量高度耦合而导致动力学方程难以线性化处理和滑模控制器本身控制力输出的高频抖振等系列问题, 设计一种基于分层滑模控制的改进超螺旋滑模控制器, 以期当负载质量和钢丝绳长度等参数不断变化时, 仍实现对起重机的精确定位并有效抑制负载摆角. 采用Lyapunov函数对控制器稳定性和可行性进行证明, 通过搭建物理模型对所研究内容进行验证, 仿真与实验结果的一致性证明了所提出的控制器对抑制负载摆动现象具有较好效果. 以上结果表明所研究的控制器能够在不降低系统鲁棒性的前提下有效消除系统抖振并抑制负载摆角幅度, 具有重要的理论意义与应用潜力.

关键词: 桥式起重机; 欠驱动系统; 超螺旋滑模控制; 防摇控制; Lyapunov函数; 鲁棒性

中图分类号: TH215; TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1227

引用格式: 戚其松, 操尚峰, 董青, 等. 桥式起重机3D防摇动力学理论模型及控制策略[J]. 控制与决策, 2024, 39(10): 3319-3327.

Research on 3D anti-swing dynamics theoretical model and control strategy of overhead cranes

QI Qi-song[†], CAO Shang-feng, DONG Qing, SHEN Shu-jie, ZHANG Yu-le

(School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In this dissertation, a super-twisting sliding controller based on hierarchical sliding mode control is developed for the model of 3D overhead cranes in case of linearizing the dynamical equations hardly and high-frequency oscillation of the sliding mode controller, in order to achieve accurate positioning and anti swing angle effectively during the load mass and rope length constantly changing. The stability and accessibility of this controller are proved by constructing Lyapunov functions, building physical model to validate research, the consistency of the simulation and experimental results proves that this controller is effective in anti swing. The above results show that this controller can eliminate oscillation, keeping payload swings small and robustness of the system, it has important theoretical significance and application potential.

Keywords: overhead crane; underactuated system; super-twisting sliding control; anti-swing control; Lyapunov functions; robustness

0 引言

桥式起重机是在装备制造、航空航天等行业中具有重要地位的运载工具, 结构简单、占地面积小、工作效率高等优点使其在上述行业中被广泛应用. 桥式起重机常通过卷筒与钢丝绳形成柔性吊运系统以实现被吊运货物的起升与下降, 而在起重机运动过程中常由于货物惯性导致产生无法避免的摆动, 不仅影响吊装过程的定位精度还降低了起重机的整体服役性能, 同时还存在较大安全隐患. 因此, 探索起重机货物及柔性缠绕系统的摆动原因及防摇摆机理是实现

起重机安全、高效服役的重要手段与途径^[1], 已成为当前起重机领域的一项重要研究方向, 国内外诸多研究人员均针对此问题开展相关理论研究工作并取得了一系列重要成果.

起重机运行中钢丝绳下端吊具及货物的摆动特征可采用动力学建模的方法进行研究, 探索货物及吊具摆动特征的关键是通过动力学模型建立起重机系统参数间的复杂耦合关系. Lu等^[2]建立了针对双桥式起重机小车耦合系统的动力学模型, 并提出了一种非线性控制策略, 充分考虑了两台起重机小车之间的

收稿日期: 2023-08-28; 录用日期: 2023-12-03.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52105269); 山西省基础研究计划面上项目(202203021221156).

责任编辑: 易建强.

[†]通讯作者. E-mail: qiqisong@tyust.edu.cn.

协调性,有效地处理了各参数间的耦合关系;Wu等^[3]针对变绳长对起重机摆动的影响,建立了变绳长双摆起重机系统动力学模型,采用基于速度和位移控制的非线性滑模控制方法对起重机进行防摇控制;Wang等^[4]针对非线性桥式吊车系统,提出了一种基于摆角约束的轨迹规划方法,使小车快速到达目的地的同时抑制负载摆动;Chen等^[5]针对二维桥式起重机系统非制动状态下的输入饱和问题,提出了一种模型预测控制算法,能够快速准确地实现小车定位和抑制负载摆动;张珂等^[6]针对起重机初始摆角对防摆控制的影响,提出了一种基于能量分析方法的防摆控制策略;庞振华等^[7]针对小车速度与摆角的耦合关系,设计了基于PID控制的PI控制系统,研究了控制系统对小车和负载运动状态的影响;张梦华^[8]针对二级摆效应构建的二级摆型桥式吊车模型,实现了小车的精确定位和负载摆动的有效抑制和消除;程文明等^[9]针对存在参数不确定和外界扰动的起重机防摆跟踪控制问题,提出了一种基于RBF神经网络的鲁棒自适应控制器,具有良好的轨迹跟踪性能和防摆效果,且鲁棒性强;梁慧慧等^[10]针对桥式起重机防摆控制器设计问题,提出了两种比例微分滑模控制器使台车到达目标位置,并通过实验和仿真验证了所提出方法的有效性.上述文献将起重机负载的摇摆过程进行由三维至二维的转化,并通过简化动力学数学模型,实现了起重机柔性摆动的高效抑制.但由于起重机复杂服役过程的实质是一种空间3D运动,在三维空间中的起重机柔性摇摆控制模型存在变量交叉耦合、自由度多、动力学方程难以线性化等系列问题,导致其动力学行为难以预计、负载防摇及定位控制难度大等.

基于以上不利因素,现有的二维单摆模型控制方法无法直接应用于三维桥式起重机系统,针对三维空间状态下的起重机防摇控制研究正在大规模开展,并取得了一系列的研究成果:余震等^[11]建立了起重机三维动力学模型,研究了起重机运行中驱动力、载荷、质量等参数对负载摆角的耦合响应;石怀涛等^[12]针对双摆型塔式起重机系统负载摆动幅值大、抗干扰能力差等问题,基于能量耦合的分析方法设计了一种防摆控制器,在系统参数、目标位置发生变化和存在外界干扰时具有优良的鲁棒性;Zhu等^[13]针对有集中扰动的起重机系统控制问题,提出了一种基于区间观测器的抗干扰控制器,可以对未知和已知的控制输入进行解耦;杜文正等^[14]针对浮式桥式起重机系统存在自由度多、多变量耦合等问题,提出了一种基于滑模自抗扰消摆跟踪方法,该方法在较强的外界干扰

下仍具有良好的控制性能;Qian等^[15]针对船载起重机动力学模型自由度多、变量耦合复杂等问题,提出了一种自适应鲁棒控制耦合方法,实现了同时抑制负载摆动和消除外界扰动的目的;Zhang等^[16]提出了一种基于有限时间干扰观测的终端滑模控制器,对于变量较多的控制系统具有良好的控制性能;Su等^[17]提出了一种基于解耦方法自适应神经网络滑模控制器,划分了不同子系统并设计了对应的滑模面;Chwa^[18]设计了一种基于滑模控制的有限时间防摆控制器,能够在负载质量、初始摆角等参数不确定的情况下亦具有良好的控制效果;Zhang等^[19]提出了一种比例微分滑模控制方法,可以实现负载精准定位的同时抑制摆动.上述文献虽建立了三维模型,但将各机构运动过程视作相互独立,忽略了多机构之间的耦合关系对于系统运行的影响.本文提出的动力学模型能够针对此类情况进行有效的数值模拟,为多机构耦合运动研究提供有价值的参考.

滑模控制由于其优秀的鲁棒性和抗干扰性,成为目前针对起重机进行高效防摇控制的一种热点研究方法,但滑模控制本身的控制力输出抖振问题会造成防摆效果不佳.为解决上述问题,康庄等^[20]提出了一种新的模糊滑模控制器设计方法,能够使系统在有限时间内达到稳态;Ngo等^[21]针对集装箱起重机系统参数不确定性的问题,提出了一种模糊滑模变结构控制方法,通过灵活控制增益系数来减少抖振现象;Lu等^[22]设计了一个二阶滑模控制器实现了导数连续的控制输入,为解决滑模控制的抖振问题提供了一种有效的解决方案;于涛等^[23]提出了一种解耦滑模控制算法,能够有效地降低抖振幅度;Tuan等^[24]提出了一种二阶滑模控制方法,有效地降低了负载的残余摆动;Zhang等^[25]提出了一种自适应HJI滑模控制器,可大幅度削减负载的残余摆动.上述研究通过将控制输入的不连续项放入一阶甚至二阶导数里,通过积分获得连续的控制输入,从而有效减少由于不连续切换所导致的控制量抖振现象,但如此高频切换会产生过度补偿误差,导致过量控制从而影响负载定位的精准度.本文所采用的超螺旋滑模控制器通过积分来获取实际控制量,避免了高频切换导致的抖振现象,同时还能补偿由于切换产生的过渡误差.

起重机是一种典型的空间运动机械,在起重机各方向运动耦合的影响下,钢丝绳下端负载的运动将呈现非常复杂的变化特征.探索起重机负载摆动产生的原因,通过动力学理论量化负载摆动的特征,采用先进的控制算法实现负载摆动抑制,将为起重机的安

全服役提供保障. 本文针对三维驱动系统中因起重机状态参量高度耦合而导致动力学方程难以线性化处理的问题, 基于起重机防摇动力学机理模型, 通过数值仿真和实验验证的方法对起重机进行防摇控制策略研究, 采用基于分层滑模控制的超螺旋滑模控制器来实现负载的摆动抑制, 同时解决传统滑模控制力输出的高频抖振问题. 本文研究内容可为实现起重机的安全服役提供可靠的解决方案, 具有重要的理论意义与工程应用价值.

1 起重机动力学建模

1.1 桥式起重机模型

桥式起重机大致由桥架结构、大车运行机构、小车运行机构、小车架和电气系统共同组成, 起重机通过各机构电机完成特定的服役动作, 而在起重机的服役运动过程中, 起重机的运行速度、加速度、钢丝绳下端负载质量、钢丝绳长度等指标共同影响负载的摆动特征. 采用如图1所示的桥式起重机运动系统进行面向负载摆动的动力学建模, 在笛卡尔坐标系内, 负载的3个运动方向X、Y、Z如图1所示. 表1为对图1中各参数及起重机摇摆模型中关键参数的说明.

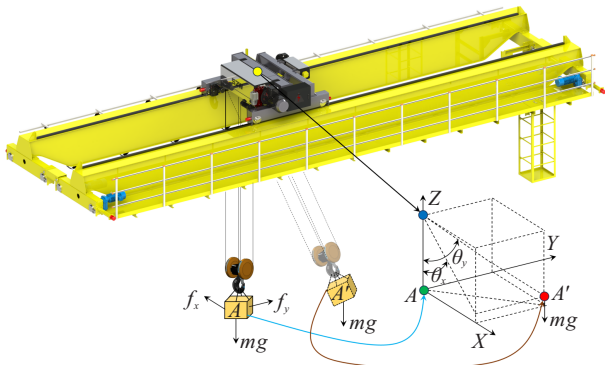


图1 负载摇摆示意图

表1 图1中各参数及起重机摇摆模型中关键参数的说明

符号	意义	符号	意义
X	大车运行方向	Y	小车运行方向
Z	负载起升方向	m_x	起重机整机质量
m_y	小车质量	m	负载质量
θ_x	XZ平面上摆角投影	θ_y	YZ平面上摆角投影
f_x	X方向上驱动力	f_y	Y方向上驱动力
x	起重机大车位移	y	起重机小车位移
f_l	负载提升力	D_x	X方向阻尼系数
D_y	Y方向阻尼系数	D_l	Z方向阻尼系数
f_l	负载提升力	D_x	X方向阻尼系数
l	钢丝绳长度	g	重力加速度

1.2 动力学建模

对桥式起重机而言, 由于其运行过程呈现出不稳定的非线性特征, 本文将采用机理建模的方式来建立

起重机数学模型. 基于拉格朗日方程的动力学分析方法构建桥式起重机的动力学模型, 具体建模过程如下:

$$L = T - V, \tag{1}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = f_i. \tag{2}$$

其中: L 为拉格朗日算子, T 和 V 分别为系统动能和势能, q_i 为广义坐标系, f_i 为系统广义力.

设小车在坐标系中的位置为 $(x, y, 0)$, 则负载在坐标系中的位置矢量为

$$\begin{cases} x_m = x + l \sin \theta_x \cos \theta_y, \\ y_m = y + l \sin \theta_y, \\ z_m = -l \sin \theta_x \cos \theta_y. \end{cases} \tag{3}$$

桥式起重机系统中的能量包括大车运行时的动能 T_c 、小车运行时的动能 T_t 和负载动能 T_p , 各部分动能计算如下所示:

$$\begin{cases} T_c = \frac{1}{2} m_x \dot{x}^2, \\ T_t = \frac{1}{2} m_y (\dot{x}^2 + \dot{y}^2), \\ T_p = \frac{1}{2} m (\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2 + \dot{z}_m^2). \end{cases} \tag{4}$$

桥式起重机运动系统中的势能包括起重机部件的重力势能和负载重力势能两部分, 选取 $Z = 0$ 平面作为零势能面, 由于起重机部件除吊具和钢丝绳外均在该平面内运动, 在忽略系统结构形变的条件下可视作该部分重力势能均为零, 则起重机系统的势能可由下式简化表达:

$$V = -mgl \sin \theta_x \cos \theta_y. \tag{5}$$

选取广义坐标 q 为 $[x, y, l, \theta_x, \theta_y]$, 在不计风力和空气阻尼的条件下, 通过求解负载的动能与势能以及受力分析, 代入拉格朗日方程推导出起重机系统的动力学模型如下:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + D\dot{q} = F. \tag{6}$$

其中: q 为起重机系统的状态变量; F 为外部驱动力, $F = [f_x, f_y, f_l, 0, 0]^T$; $M(q)$ 为对称质量矩阵; $C(q, \dot{q})$ 为离心刚度矩阵; D 为系统建模中存在的确定性及外部干扰, $D = [d_1, d_2, d_3, 0, 0]^T$; $G(q)$ 为重力矢量矩阵, $G(q) = [0, 0, g_3, g_4, g_5]^T$. 具体定义如下:

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} & m_{14} & m_{15} \\ 0 & m_{22} & m_{23} & 0 & m_{25} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & 0 & 0 \\ m_{41} & 0 & 0 & m_{44} & 0 \\ m_{51} & m_{52} & 0 & 0 & m_{55} \end{bmatrix},$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} & c_{14} & c_{15} \\ 0 & 0 & c_{23} & 0 & c_{25} \\ 0 & 0 & 0 & c_{34} & c_{35} \\ 0 & 0 & c_{43} & c_{44} & c_{45} \\ 0 & 0 & c_{53} & c_{54} & c_{55} \end{bmatrix}.$$

对称质量矩阵 $M(q)$ 的元素定义为

$$\begin{aligned} m_{11} &= m_x + m, \quad m_{13} = m_{31} = m \sin \theta_x \cos \theta_y, \\ m_{22} &= m_y + m, \quad m_{14} = m_{41} = ml \cos \theta_x \cos \theta_y, \\ m_{33} &= m, \quad m_{44} = ml^2 \cos^2 \theta_y, \quad m_{55} = ml^2, \\ m_{15} &= m_{51} = -ml \sin \theta_x \sin \theta_y, \\ m_{25} &= m_{52} = ml \cos \theta_y. \end{aligned}$$

离心刚度矩阵 $C(q, \dot{q})$ 的元素定义为

$$\begin{aligned} c_{13} &= m \cos \theta_x \cos \theta_y \dot{\theta}_x - m \sin \theta_x \sin \theta_y \dot{\theta}_y, \\ c_{14} &= m \cos \theta_x \cos \theta_y \dot{l} - ml \sin \theta_x \cos \theta_y \dot{\theta}_x - \\ &\quad ml \cos \theta_x \sin \theta_y \dot{\theta}_y, \\ c_{15} &= -m \sin \theta_x \sin \theta_y \dot{l} - ml \cos \theta_x \sin \theta_y \dot{\theta}_x - \\ &\quad ml \sin \theta_x \cos \theta_y \dot{\theta}_y, \\ c_{23} &= m \cos \theta_y \dot{\theta}_y, \quad c_{43} = ml \cos^2 \theta_y \dot{\theta}_x, \\ c_{25} &= m \cos \theta_y \dot{l} - ml \sin \theta_y \dot{\theta}_y, \\ c_{44} &= ml \cos^2 \theta_y \dot{l} - ml^2 \sin \theta_y \cos \theta_y \dot{\theta}_y, \\ c_{53} &= ml \dot{\theta}_y, \quad c_{54} = ml^2 \sin \theta_y \cos \theta_y \dot{\theta}_x, \quad c_{55} = mll. \end{aligned}$$

重力矢量矩阵 $G(q)$ 和外部干扰 D 的元素定义为

$$\begin{aligned} g_3 &= -mg \cos \theta_x \cos \theta_y, \quad g_4 = mgl \sin \theta_x \cos \theta_y, \\ g_5 &= mgl \cos \theta_x \sin \theta_y, \quad d_1 = \text{sign}(x), \\ d_2 &= \text{sign}(y), \quad d_3 = \text{sign}(l). \end{aligned}$$

1.3 动力学方程解耦

由起重机的服役运动特征及上述动力学模型可知,本文研究的桥式起重机负载摆动系统具有5个输出量 $q = [x, y, l, \theta_x, \theta_y]$ 和3个输入量 $T = [f_x, f_y, f_l]$, 因此可以将动力学方程分解为驱动与欠驱动两部分. 分别定义 $q_a = [x, y, l]$ 与 $q_u = [\theta_x, \theta_y]$ 为驱动状态变量与欠驱动状态变量,通过 q_a 和 q_u 可将式(6)拆分为如下两部分:

$$M_{11}\ddot{q}_a + M_{12}\ddot{q}_u + C_{11}\dot{q}_a + C_{12}\dot{q}_u + G_1 = T, \quad (7)$$

$$M_{21}\ddot{q}_a + M_{22}\ddot{q}_u + C_{21}\dot{q}_a + C_{22}\dot{q}_u + G_2 = 0. \quad (8)$$

联立并化简后可得

$$M_a\ddot{q}_a + C_a\dot{q}_a + C_u\dot{q}_u + G_a + D_a = T. \quad (9)$$

针对起重机模型进行了适当的假设与简化,采用第二类拉格朗日方程和虚位移原理建立了桥式起重

机三维动力学模型. 将动力学方程解耦为驱动和欠驱动两部分,获得了如式(9)的计算矩阵,将用于滑模控制器设计.

2 控制器设计及稳定性分析

2.1 控制器设计

起重机的运动过程一般可分为加速启动、匀速运动和减速制动3个阶段. 在起重机加速启动和减速制动过程中,起重机柔性摇摆模型的运动传递过程始终呈现出负载运动滞后的特征. 起重机防摇摆运动的实质是通过控制载荷的非线性变换来降低负载的滞后运动指标. 滑模变结构控制作为一种非线性控制方法,具有非连续控制的特点及优秀的控制特性,并且滑模控制系统的结构可根据实时状态进行相应变换,使被控制系统的状态轨迹按照滑动模态运动,以上优点使其广泛应用于起重机防摇摆控制的研究中. 本文为实现起重机负载的快速防摇摆控制,以解耦的桥式起重机动力学模型为研究对象,采用超螺旋滑模控制算法对起重机柔性摇摆系统进行动力学理论分析. 起重机柔性摇摆系统的动力学模型如下所示:

$$M_a\ddot{q}_a + C_a\dot{q}_a + G_a + D_a = U. \quad (10)$$

桥式起重机防摇摆控制的目的是使系统从初始状态 q_0 稳定运行至期望状态 q_d , 假设 x_d, y_d 和 l_d 分别为大车位置、小车位置和钢丝绳长的期望值,由于起重机防摇摆控制的目标设置为 θ_x 和 θ_y 的期望值为0,可定义系统的位置偏差 e_a 和角度偏差 e_u 分别为

$$e_a = q_a - q_{ad} = [x - x_d, y - y_d, l - l_d]^T, \quad (11)$$

$$\dot{e}_a = \dot{q}_a - \dot{q}_{ad} = [\dot{x} - \dot{x}_d, \dot{y} - \dot{y}_d, \dot{l} - \dot{l}_d]^T, \quad (12)$$

$$e_u = q_u - q_{ud} = [\theta_x - 0, \theta_y - 0]^T. \quad (13)$$

对滑模面的定义可参见

$$s = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 \end{bmatrix} e_a + \dot{e}_a + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} e_u. \quad (14)$$

对应各参数见表2.

表2 参数说明

符号	数值	符号	数值
m_x/kg	48	m_y/kg	20
l/m	1.0	m/kg	5
c_1	1.0	c_2	1.2
c_3	1.6	x_d	1.5
y_d	1.0	l_d	1.0
b_1	-1.0	b_2	-1.0

由式(14)可知,此类滑模面本质上与PD控制器类似,当系统的状态向量到达滑模面,即系统滑模面

s 趋近于0时,其误差 e_a 和 e_u 均趋近于0. 此类滑模面的弊端在于,由于惯性因素的存在使系统运动轨迹在到达切换面后无法停留在滑模面之上,而是在切换面两侧不断进行穿越并引发滑模控制的抖振现象. 抖振不仅影响控制精度的准确性、增加能量消耗,严重时甚至会使系统产生震荡或失稳,导致控制器部件的损坏. 因此,消除变结构控制信号的抖动始终是研究变结构控制的首要工作.

控制律的设计应满足滑模面 $s = \dot{s} = 0$, 所以由式(14)可得

$$\begin{aligned} \dot{s} &= M_a^{-1}(U - C_a \dot{q}_a - G_a - D_a) - \\ &\quad \ddot{q}_{ad} + c\dot{e}_a + b\dot{e}_u. \end{aligned} \quad (15)$$

根据滑模控制器的设计规则,可选择如下所示的控制律:

$$u = u_{eq} + u_{sw}. \quad (16)$$

其中: u_{eq} 为等效控制律,由式(10)推导而来,表示为

$$u_{eq} = M_a(\ddot{q}_{ad} - c\dot{e}_a - b\dot{e}_u) + C_a \dot{q}_a + G_a + D_a; \quad (17)$$

u_{sw} 为切换控制律,用于补偿动力学模型误差及外部干扰的参量,本文采用的切换律表示为

$$u_{sw} = -K \text{sign}(s). \quad (18)$$

$K = \text{diag}[K_1, K_2, K_3]$ 为常对角矩阵,且 $K_i > 0$; $\text{sign}(s)$ 为符号函数,表示为

$$\text{sign}(s) = \begin{cases} 1, & s > 0; \\ 0, & s = 0; \\ -1, & s < 0. \end{cases} \quad (19)$$

由上述分析过程可知,因符号函数 $\text{sign}(s)$ 的存在,使一阶滑模控制器在状态切换过程中存在显著的非连续特性,从而引发控制量的高频抖振. 为避免抖振现象对防摇控制的干扰,本文采用超螺旋滑模控制器对起重机柔性防摇系统进行研究,系统状态变量分别为 q_a 和 q_u , 主控制律 u 和等效控制律 u_{eq} 仍沿用上述推导结果,超螺旋滑模控制的特征在于切换控制律 u_{sw} 采用了如下所示的形式:

$$\begin{cases} u_{sw} = -K_1 \sqrt{|s|} \text{sign}(s) + v, \\ \dot{v} = -K_2 \text{sign}(s). \end{cases} \quad (20)$$

由式(20)所表征的超螺旋滑模控制器较一般滑模控制器主要存在两部分改进:第1部分可由 $\sqrt{|s|} \text{sign}(s)$ 表征,该部分通过平方根函数使得不连续的符号函数变成了连续的曲线,此方法可有效减少由于不连续切换所导致的控制量高频率抖振现象;

第2部分由 $\int \text{sign}(s) dt$ 表征,用于补偿由于频繁切换产生的过渡误差. 由于符号函数 $\text{sign}(s)$ 非连续特性的存在,抑制抖振并未达到理想效果. 本文在此基础上将符号函数 $\text{sign}(s)$ 替换为饱和函数 $\text{sat}(s)$ 来实现准滑动模态,即在边界层外采用切换控制,在边界层内采用连续状态的反馈控制,进一步有效地削弱了抖振. 图2所示为改进后的超螺旋滑模控制器与一般滑模控制器和超螺旋滑模控制器在某状态下对控制输出量的比对结果,可明显看出3种控制器的特征,且改进超螺旋滑模控制器具有显著的稳定特征.

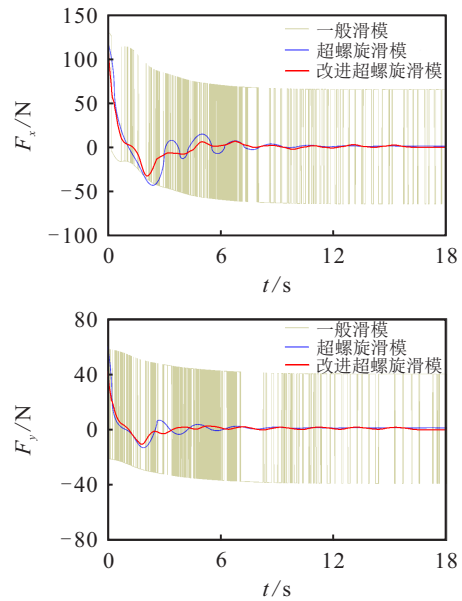


图2 3种算法控制力输出对比

2.2 稳定性分析

为了验证改进超螺旋滑模控制器具有理论上的稳定性,设计如下Lyapunov函数:

$$V = \frac{1}{2} s^T s. \quad (21)$$

由于滑模控制面应满足 $s = \dot{s} = 0$, 上述Lyapunov函数是正定的,对式(21)求导可得

$$\dot{V} = s^T \dot{s}. \quad (22)$$

将式(10)代入(22)中可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \\ &= s^T \left(-K_1 \sqrt{|s|} \text{sign}(s) - K_2 \int \text{sign}(s) dt + D_a \right) = \\ &= \sum_{i=1}^3 s_i \left(-k_{1i} \sqrt{|s_i|} \text{sign}(s_i) - k_{2i} \int \text{sign}(s_i) dt + D_{a_i} \right). \end{aligned} \quad (23)$$

对式(23)进行缩放可得

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^3 s_i \left(-k_{1i} \sqrt{|s_i|} \text{sign}(s_i) - k_{2i} \int \text{sign}(s_i) dt + D_{a_i} \right) \leq$$

$$\sum_{i=1}^3 \left(-k_{1i} \sqrt{|s_i|} |s_i| - k_{2i} |s_i| \int \text{sign}(s_i) dt + D_{ai} |s_i| \right). \tag{24}$$

将式(24)中的干扰项写成积分形式可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \sum_{i=1}^3 \left(-k_{1i} \sqrt{|s_i|} |s_i| - |s_i| \int (k_{2i} - \dot{D}_{ai}) dt \right) \leq \\ & \sum_{i=1}^3 \left(-k_{1i} \sqrt{|s_i|} |s_i| - |s_i| \int (k_{2i} - \bar{D}_{ai}) dt \right), \end{aligned} \tag{25}$$

其中 \bar{D}_{ai} 表示第 i 个广义坐标系中干扰导数的上界. 由 Lyapunov 函数稳定性定理可知, 当 $V > 0$ 且 $\dot{V} < 0$ 时, 即 $k_{2i} > \bar{D}_{ai}$, 系统是渐近稳定的.

3 仿真验证

为了验证本文所采用的改进超螺旋滑模控制器的有效性与可行性, 在 Matlab 软件的 Simulink 环境中搭建桥式起重机数学模型, 利用 S 函数模块分别建立桥式起重机和改进超螺旋滑模控制器的仿真模型来进行数值验证, 如图3所示为仿真模型, 所涉及的参数定义可见第2节中的式(11)~(13).

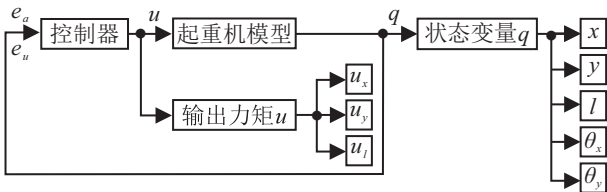


图3 仿真模型

为验证改进超螺旋滑模控制器的控制性能, 首先与一般滑模控制器和超螺旋滑模控制器进行比较; 其次, 分别设置3组实验用于测试分析系统的运动反馈情况, 以检验本文控制方法的稳定性及抖振抑制性能; 最后对系统抗外部干扰的鲁棒性进行实验分析, 检验控制方法的稳定性、收敛速度以及抖振抑制性能在实际工况中的应用效果, 即起重机加速启动后在接近目标位置时再减速制动的过程. 其中: 实验组b验证所设计的控制器在负载质量和绳长存在不确定性因素时的控制性能; 实验组a和实验组c检验当负载质量和绳长发生变化时控制器的控制效果, 与实验组b进行鲁棒性对比. 3个实验组的相关参数如表3所示, 3种控制器均沿用表2所示参数. 仿真结果见图4, 分别展示了不同控制算法作用下大车位置、小车位置随着时间的变化的情况. 3种控制器在收敛速度几乎相同的情况下, 改进超螺旋滑模控制器能够更精准地到达目标位置.

表3 实验组参数说明

实验组	m_x / kg	m_y / kg	m / kg	l / m	$g / (\text{m/s}^2)$
a	48	20	2	0.5	9.8
b	48	20	5	1.0	9.8
c	48	20	10	1.5	9.8

图4还展示了不同控制器作用下摆角 θ_x 和摆角 θ_y 随着时间的变化情况, 3种控制器作用下 θ_x 的最大

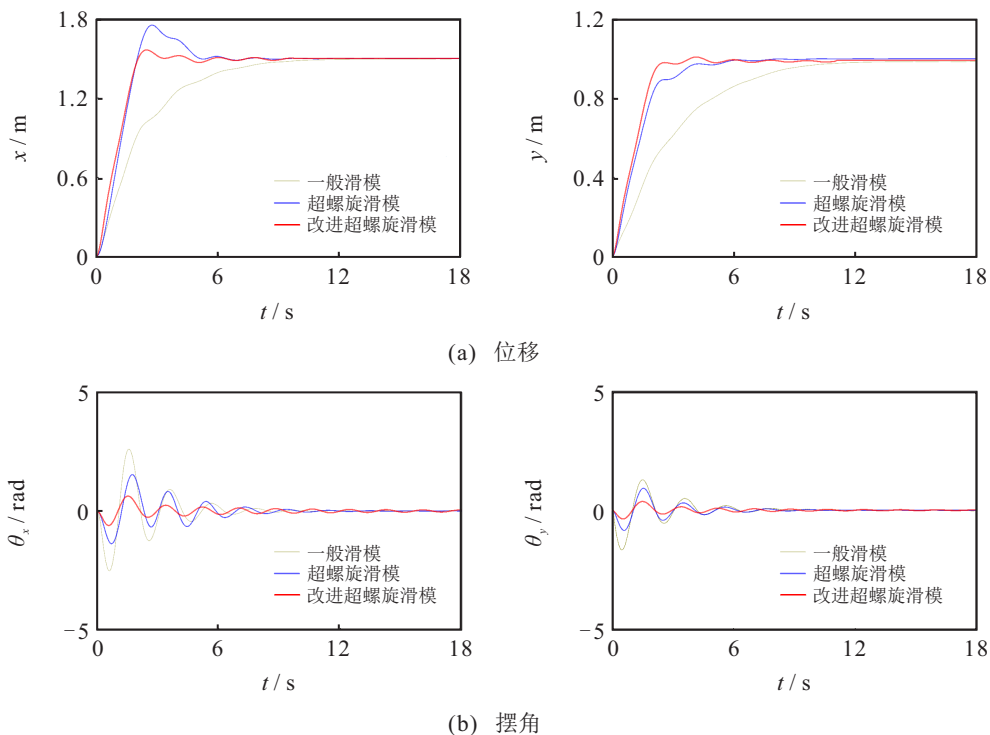


图4 X和Y方向的系统状态(仿真)

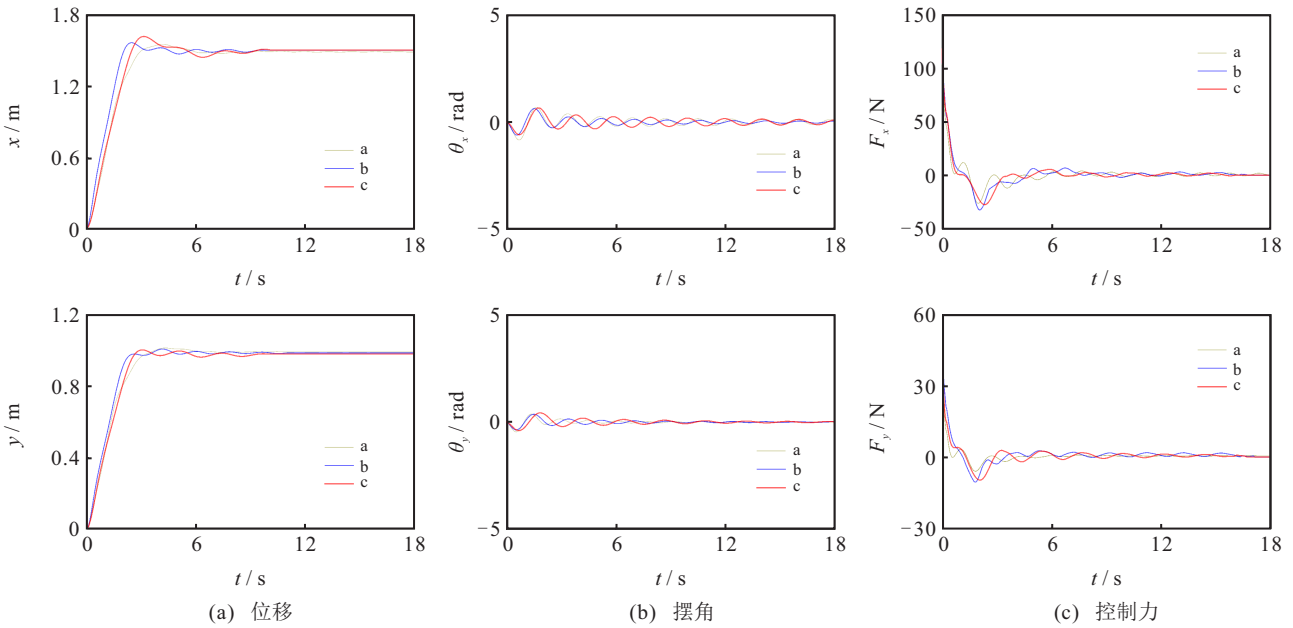


图5 X和Y方向的系统状态及控制量

值分别为 0.73° 、 1.52° 和 2.61° , θ_y 的最大值分别为 0.46° 、 0.88° 和 1.27° . 可明显看出改进超螺旋滑模控制器作用下的负载摆角幅度明显小于另外两种滑模控制器, 且收敛速度更快. 由此可知, 在控制负载精确定位和抑制负载摆动上, 该控制器性能更优异.

为验证超螺旋滑模控制器的鲁棒性, 根据表3所示的对照组进行仿真验证. 仿真结果如图5所示, 3组实验中的大小车均在10.8s左右到达平衡状态; 在该过程中, 负载摆角 θ_x 和 θ_y 的幅值均在 0.4° 和 0.7° 左右, 且在大小车到达期望位置后迅速收敛至平衡状态, 并将残余摆动控制在 0.73° 以内. 改进超螺旋滑模控制器输出的控制力大小随着时间的变化基本一致, 除了低速运行阶段由于Stribeck效应导致速度与控制力无法匹配, 可以看出该控制器有效避免了控制量输出的抖振现象. 根据绳长可以计算b组吊重在X方向的最大摆动距离约为 $1.0 \times \cos(0.7^\circ) \times \sin(0.7^\circ) \approx 0.012\text{m}$, 在Y方向的最大摆动距离约为 $1.0 \times \sin(0.4^\circ) \approx 0.007\text{m}$, 3个对照组的摆动幅值基本一致. 由上述结果可知, 改进超螺旋滑模控制器在精准控制负载位置、抑制负载摆动、消除残余摆动和抖振方面具有优异性能, 同时具备较好的鲁棒性.

4 实验研究

为验证所提控制器在实际应用中的控制性能, 用图6所示的桥式起重机模型进行实验验证. 该模型主要包括大车、小车和起升机构等. 大车沿主梁上方铺设的轨道运行, 小车可沿大车轨道运行, 起升机构由卷筒、定滑轮、动滑轮、吊钩和钢丝绳等组成. 桥式起重机实验平台的整机尺寸为 $2.1\text{m} \times 1.2\text{m} \times$

2.0m . 通过该物理模型对所设计控制器进行控制性能验证, 具体的实验方案为: 沿用第3节中表3的物理参数, 设置不同绳长和负载质量的3个实验组, 通过模拟桥式起重机的吊装作业过程, 收集吊装过程中各机构的运动参数, 绘制位移和摆角随时间变化的曲线. 其中位移的变化由带编码的直流电机测量, 负载摆角的变化由固定在负载下方的六轴陀螺仪测量.

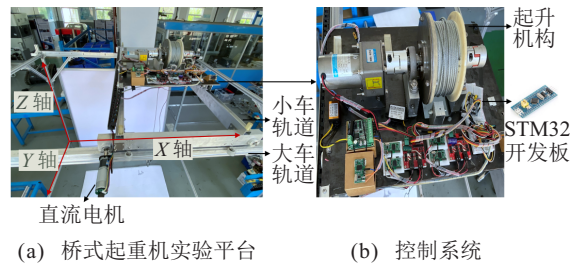


图6 桥式起重机物理模型

实验结果如图7所示, 可以看出3组实验的曲线基本重合, 且与仿真结果曲线保持一致. 实验中设定大车运行机构的行程为 1.5m , 小车运行机构的行程为 1.0m , 大小车的运行最大速度均为 0.2m/s . 大车自0s启动, 在12.5s左右到达期望位置, 小车自0.3s启动, 在10.5s左右到达期望位置. 负载摆角 θ_x 和 θ_y 的幅值均在 1.85° 和 0.95° 左右, 两个方向的摆角均在16s左右消除摆动, 残余摆动在 0.1° 以内. 由于桥式起重机实验平台自身硬件条件(如电机的转动、钢丝绳的伸长、平台自身振动等)及外界扰动因素对控制精度的影响, 实验结果与仿真结果相比较存在一定误差, 但是其变化趋势基本符合预期效果. 这表明本文所采用的控制器有效地抑制了负载在运输过程中的摆动, 具有良好的防摆控制性能.

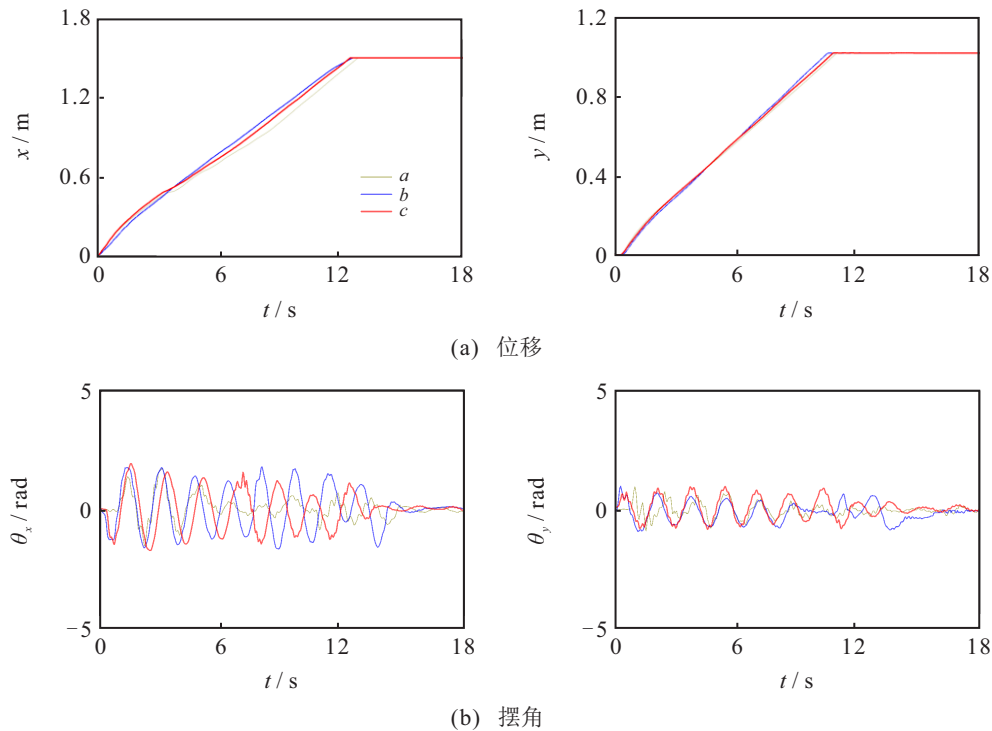


图7 X和Y方向的系统状态(实验平台)

5 结论

本文针对桥式起重机这一类复杂的欠驱动系统,将严重耦合和难以线性化处理的三维桥式起重机数学模型解耦为驱动和欠驱动两部分,并提出了一种基于分层滑模控制器的改进超螺旋滑模控制器.分别通过动力学理论建模、仿真和实验解决了桥式起重机三维复杂欠驱动系统动力学方程难以线性化和滑模控制器高频抖振两个问题.本文的研究结论如下:

1) 对一阶滑模切换函数的连续性及其增益固定问题进行了优化,通过Lyapunov理论证明了控制系统的稳定性,该控制器不仅可实现桥式起重机的精确定位,还可以有效地抑制运行过程中负载的摆动幅度和残余摆动;

2) 改进超螺旋滑模控制器可根据系统响应来对吊重质量和绳长等参数的变化进行在线调整,并实时调整控制输出,从而提高整个系统对外界环境的抗干扰能力.

仿真和实验结果表明,改进超螺旋滑模控制器对减缓滑模控制器输出控制力的抖振现象具有较好的表现.本文研究对控制起重机在空间运行中的负载摆动具有较好效果,对实现起重机运动防摇及服役安全具有重要现实意义.

参考文献(References)

[1] 王伟, 易建强, 赵冬斌, 等. 基于滑模方法的桥式吊车系统的抗摆控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(9):

1013-1016.

(Wang W, Yi J Q, Zhao D B, et al. Anti-swing control of overhead cranes based on sliding-mode method[J]. Control and Decision, 2004, 19(9): 1013-1016.)

[2] Lu B, Fang Y C, Sun N. Modeling and nonlinear coordination control for an underactuated dual overhead crane system[J]. Automatica, 2018, 91: 244-255.

[3] Wu Q X, Wang X K, Hua L, et al. Modeling and nonlinear sliding mode controls of double pendulum cranes considering distributed mass beams, varying roped length and external disturbances[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 158: 107756.

[4] Wang P C, Fang Y C, Jiang Z Y. A direct swing constraint-based trajectory planning method for underactuated overhead cranes[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(11): 2414-2419.

[5] Chen H, Fang Y C, Sun N. A swing constraint guaranteed MPC algorithm for underactuated overhead cranes[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(5): 2543-2555.

[6] 张珂, 于宝森, 石怀涛, 等. 伴有初始负载摆角的桥式起重机能量防摆控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(7): 1779-1784.

(Zhang K, Yu B S, Shi H T, et al. Energy anti-swing control of bridge crane with initial load swing angle[J]. Control and Decision, 2022, 37(7): 1779-1784.)

[7] 庞振华, 刘放, 唐语, 等. 门式起重机速度与摆角的耦合研究[J]. 制造业自动化, 2021, 43(3): 138-142.

(Pang Z H, Liu F, Tang Y, et al. Study on the coupling of speed and swing angle of gantry crane[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(3): 138-142.)

[8] 张梦华. 欠驱动单级摆及二级摆型桥式吊车非线性控

- 制策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2018: 75-86.
(Zhang M H. Nonlinear control for single-pendulum and double-pendulum overhead cranes[D]. Ji'nan: Shandong University, 2018: 75-86.)
- [9] 程文明, 张道裕, 谌庆荣, 等. 欠驱动起重机的神经网络直接鲁棒自适应控制[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2021, 49(5): 120-128.
(Cheng W M, Zhang D Y, Chen Q R, et al. A Directly robust adaptive neural network controller for an underactuated crane[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2021, 49(5): 120-128.)
- [10] 梁慧慧, 吴炜, 楼旭阳, 等. 二维桥式起重机的滑模控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 2163-2169.
(Liang H H, Wu W, Lou X Y, et al. Sliding mode control of two-dimensional overhead crane[J]. Control and Decision, 2022, 37(8): 2163-2169.)
- [11] 余震, 王海兰, 余进, 等. 典型工况下桥式起重机大车运行机构摆角模型[J]. 机床与液压, 2022, 50(22): 143-149.
(Yu Z, Wang H L, Yu J, et al. Swing angle model of crane traveling mechanism of bridge crane under typical working conditions[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(22): 143-149.)
- [12] 石怀涛, 黄建起, 王延臣. 基于能量强耦合的双摆型塔机消摆控制[J]. 控制工程, 2022, 29(8): 1395-1403.
(Shi H T, Huang J Q, Wang Y C. Anti-swing control of double-pendulum tower crane based on strong energy coupling[J]. Control Engineering of China, 2022, 29(8): 1395-1403.)
- [13] Zhu F L, Shan Y. Anti-disturbance state feedback controller based on disturbance reconstruction for underactuated overhead crane[J]. IFAC-PapersOnLine, 2020, 53(2): 4151-4156.
- [14] 杜文正, 张全茂, 何祯鑫. 动基座桥式起重机滑模自抗扰消摆跟踪控制[J]. 机电工程, 2022, 39(2): 150-157.
(Du W Z, Zhang Q M, He Z X. Anti-swing tracking control of mobile base overhead crane based on sliding mode active disturbance rejection[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(2): 150-157.)
- [15] Qian Y Z, Fang Y C, Lu B. Adaptive robust tracking control for an offshore ship-mounted crane subject to unmatched sea wave disturbances[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 114: 556-570.
- [16] Zhang Z C, Li L, Wu Y Q. Disturbance-observer-based antiswing control of underactuated crane systems via terminal sliding mode[J]. IET Control Theory & Applications, 2018, 12(18): 2588-2594.
- [17] Su G J, Gong Q L, Li H Y. Adaptive sliding-mode control based on decoupled method for a class of underactuated system[C]. 2017 36th Chinese Control Conference. Dalian, 2017: 639-643.
- [18] Chwa D. Sliding-mode-control-based robust finite-time antisway tracking control of 3-D overhead cranes[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8): 6775-6784.
- [19] Zhang M H, Zhang Y F, Chen H, et al. Model-independent PD-SMC method with payload swing suppression for 3D overhead crane systems[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 129: 381-393.
- [20] 康庄, 贾利民, 秦勇. 一种新的模糊滑模控制器设计方法[J]. 控制与决策, DOI: 13195/j.kzyjc.2022.1771.
(Kang Z, Jia L M, Qin Y, et al. A new design method of fuzzy sliding mode controller[J]. Control and Decision, DOI: 13195/j.kzyjc.2022.1771.)
- [21] Ngo Q H, Nguyen N P, Nguyen C N, et al. Fuzzy sliding mode control of container cranes[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2015, 13(2): 419-425.
- [22] Lu B, Fang Y C, Sun N. Continuous sliding mode control strategy for a class of nonlinear underactuated systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 63(10): 3471-3478.
- [23] 于涛, 杨昆, 赵伟. 基于解耦滑模控制的桥式吊车系统的抗摆控制[J]. 中国测试, 2017, 43(8): 95-100.
(Yu T, Yang K, Zhao W. Anti-sway control of overhead crane system based on decoupled sliding mode control[J]. China Measurement & Test, 2017, 43(8): 95-100.)
- [24] Tuan L A, Kim J J, Lee S G, et al. Second-order sliding mode control of a 3D overhead crane with uncertain system parameters[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(5): 811-819.
- [25] Zhang S Z, He X X. Adaptive HJI sliding mode control of three dimensional overhead cranes[C]. 2016 Chinese Control and Decision Conference. Yinchuan, 2016: 5820-5855.

作者简介

戚其松(1987—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事机械装备生命周期绿色化及节能算法等研究, E-mail: qiqisong@tyust.edu.cn;

操尚峰(1994—), 男, 硕士生, 从事桥式起重机控制技术的研究, E-mail: 497204014@qq.com;

董青(1989—), 女, 副教授, 博士, 从事数字孪生下重大装备全寿命安全评估的研究, E-mail: qingdong@tyust.edu.cn;

沈舒杰(1998—), 男, 硕士生, 从事机械装备生命周期绿色化及节能算法的研究, E-mail: 2740029698@qq.com;

张宇乐(1999—), 女, 硕士生, 从事机械装备生命周期绿色化及节能算法的研究, E-mail: 201812180139@stu.tyust.edu.cn.