

引用格式:毛轩昂,邱永峰,郑祎,等.桥式起重机多段速防摇摆及精准定位控制方法研究[J].有色设备,2024,38(6):63-68.
MAO Xuanang, QIU Yongfeng, ZHENG Yi, et al. Research on multi speed anti sway and precise positioning control method for bridge crane[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(6): 63-68.

桥式起重机多段速防摇摆及精准定位控制方法研究

毛轩昂,邱永峰*,郑祎,查铂,廖济红,沈国腾

(湖南天桥嘉成智能科技有限公司,湖南株洲412007)

[摘要]针对由变频器和可编程逻辑控制器(PLC)控制的全自动桥式起重机,在搬运作业过程中由于惯性和风荷载而产生摇摆的问题,本文提出了桥式起重机多段速防摇摆及精准定位控制方法,通过对起重机的实际工况、自动定位、防摇摆算法和控制程序开发进行研究,建立了多段速度曲线数学模型,开发了PLC防摇摆控制程序,控制程序嵌入在起重机主控制程序中,定位移动时通过变频器控制起重机的移动速度,消除移动过程中吊物的摇摆。该控制方法在钢铁冶金旋流池抓斗式起重机中进行了测试与应用,定位精度和防摇摆效果满足旋流池抓渣全自动桥式起重机使用要求,提高了起重机的作业效率,降低了安全风险。

[关键词]变频器;可编程逻辑控制器;桥式起重机;定位;防摇摆;多段速度曲线

[中图分类号] TH215 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)06-0063-06

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.06.009

0 引言

起重机和吊钩之间通过柔性钢丝绳进行连接,相较于刚性提升机,这种设计有效减轻了起重机的动载荷,提高了起重机装卸货物的灵活性,降低了系统的功率消耗。然而,起重机在水平运动时,柔性钢丝绳的连接会导致吊钩产生摆动,使得负载难以准确对位^[1-2]。此外,在起重机作业时,频繁地吊起与放下吊物,随着吊绳绳长的不断变化,吊钩摆动的参数随之改变,进一步增加了吊钩准确对位的难度,从而降低了工作效率。随着起重机自动化程度的不断提升,用户对其装卸效率的要求也越来越高^[3-4]。

同时,摆动的吊钩可能与周围的物体或人员发生碰撞,导致财物损失甚至人员伤亡,存在一定的安全隐患^[5-6]。因此,研究如何通过电气防摇摆算法抑制负载摇摆,实现低成本、高效率的防摇摆功能,成为了一个极具研究价值的课题。

为了提高起重机的作业效率并增强其使用安全性,众多学者们针对桥式起重机因惯性引发的摇摆问题,展开了广泛又深入的研究。欧阳慧琴等^[7]针对桥式起重机荷载摆动问题,提出了一种基于S型曲线的轨道生成法进行残留摆动抑制,该方法运动速度曲线采用S型。周奇才等^[8]针对制动阶段防摇摆效果不明显的问题,提出了两种制动阶段防摇摆控制方案,方案一通过模拟司机操作采用分段减速制动,方案二采用消除制动阶段速度反向超调来实现。林永屹^[9]在研究桥式起重机定位及防摇摆控制问题,提出了基于反步法的防摇摆控制策略,在忽略外界环境和悬挂重物摩擦力情况下,实现了起重机小车精准到达目标位置,并使在重物运行过程中的负载摆角尽可能减小。范波等^[10]基于负载能量耦合的桥式起重机定位消摆控制,构建基于位移与摆角的耦合函数,并对闭环系统在平衡点处的稳定性进行分析,实现了消摆。王晓军等^[11]基于模糊的桥式起重机的定位和防摆控制研究,利用2个模

[收稿日期] 2024-09-26

[第一作者] 毛轩昂(1986—),男,湖南娄底人,工程师,硕士,主要研究方向为起重机防摇摆控制、自动控制、供配电电气设计。

[通信作者] 邱永峰(1985—),男,湖南娄底人,高级工程师,博士后,主要从事控制系统、智能制造等方面的研究工作,现任湖南天桥嘉成智能科技有限公司总工程师。

[基金项目] 科技成果转化及产业化计划-高新技术产业科技创新引领计划-5G重载搬运智能装备研发及产业化(2021GK4008);工信部年度智能制造系统解决方案揭榜挂帅项目(面向工程机械的柔性智能切割下料分拣产线)。

糊控制器分别对小车位置和负载的摆动进行控制,模仿起重机操作人员的实际操作经验实现防摆。史良伟等^[12]采用模糊自适应PID控制的方法研究了起重机的定位防摆,通过探究偏差和偏差变化率与PID控制器参数之间的模糊关系,进行了一系列吊重摆动控制的仿真分析。然而,现有的研究偏重于理论和纯算法的研究,在算法研究与工程应用推广相结合的案例很少^[13]。鉴于此,本文结合起重机的实际应用场景,考虑实际摇摆绳长的补偿和起重机的加减速限制等问题,综合考虑理论方法和工程实践两个方面,提出了多段速防摇摆及定位控制方法,建立了速度控制模型,开发了自动定位防摇摆PLC控制程序,并在具体项目中开展了应用,且取得了良好的效果。

1 理论分析与数学模型研究

1.1 摇摆周期计算

桥式起重机的防摇摆控制遵循以下逻辑:定位防摇摆模型算法集成在PLC控制程序中,由PLC根据大小车的坐标数据、起升钢丝绳的绳长和移动距离,确定防摇摆运动曲线,进而对起重机的速度输出进行精确控制,以实现稳定的吊装作业。变速度曲线控制算法首先通过采集2组不同绳长和摇摆周期数据,推算出摇摆周期参数和绳长补偿值,然后根据绳长补偿值、绳长测量值以及摇摆参数,计算出吊钩的摇摆周期 T ,为后续的防摇摆控制提供关键依据,从而确保起重作业的高效与安全。

绳长补偿值 L_0 ,计算见式(1)。

$$L_0 = \frac{L_1 \times T_2^2 - L_2 \times T_1^2}{T_1^2 - T_2^2} \quad (1)$$

摇摆系数 K ,计算见式(2)。

$$K = \sqrt{\frac{T_1^2 - T_2^2}{L_1 - L_2}} \quad (2)$$

摇摆周期 T ,计算见式(3)。

$$T = K \times \sqrt{L + L_0} \quad (3)$$

式中: T 为绳长修正后起重机实际的摇摆周期; L 为未补偿前的实际绳长值; L_0 和 K 分别为公式(1)和公式(2)计算得到的周期计算参数; L_0 表示绳长补偿量; K 为计算系数; L_1 和 L_2 为摇摆测量时的两组绳长数据; T_1 和 T_2 分别为对应绳长 L_1 和 L_2 情况下记录的起重机吊钩的实际摇摆周期值。

1.2 定位防摇摆运动速度曲线研究

根据定位距离和变频器设置的最大加减速速度,本文确定起重机定位运动曲线模型,以实现自动定位并防止摇摆。在起重机的实际使用过程中,定位和防摇摆的有效性至关重要。为了提高定位精度,通常需要在接近目标位置时降低速度。然而,由于受到外部因素的影响,速度无法无限接近零速,为了满足定位精度要求,起重机平稳移动会有一个低速限值,以低速限值建立防摇摆运动曲线移动距离定义为低速距离阈值,当定位距离小于低速距离阈值时,表明移动距离非常短,此时采用超短距离运动模型。起重机首先加速至低速限值,然后以低速限值匀速运行 $T/6$ 时间,再继续加速至低速限值的2倍。当离目标距离小于减速制动距离时开始减速,首先减速至低速限值,再以低速限值匀速运行。若起重机进入目标位置范围,减速至0即停止运行。

低速距离阈值 S_{\min} ,计算见式(4)。

$$S_{\min} = \frac{T \times V_{\min}}{6} + \frac{V_{\min}^2}{2 \times a_{\text{up}}} + \frac{V_{\min}^2}{2 \times a_{\text{dw}}} \quad (4)$$

超短距离减速制动距离 S_{dw} ,计算见式(5)。

$$S_{\text{dw}} = \frac{V_{\min} \times T}{12} + \frac{V_{\min}^2}{2 \times a_{\text{dw}}} \quad (5)$$

式中: V_{\min} 为低速限值的2倍; T 为摇摆周期; a_{dw} 为起重机减速度; a_{up} 为加速度。

当移动距离大于低速距离阈值时,综合考虑摇摆周期、移动距离、额定加速度、额定减速度和起重机最大移动速度确定防摇摆定位模型,提前规划定位速度变化曲线,实现精准定位的同时完成吊钩防摇摆。

在运动模式1中,若起重机能够在半个摇摆周期内加速到额定速度,或者半个摇摆周期内不能加速到额定速度,但是移动距离小于两段速距离阈值 S_1 ,则加速曲线为两段,运动曲线的最大速度为 V_1 ,且当 V_1 大于额定速度时设 V_1 等于额定速度,启动运动后起重机先以恒加速度为 a_{up} 进行加速,加速至 $V_1/2$,再保持匀速 $T/6$ 时间,然后继续以恒加速度为 a_{up} 加速至 V_1 ,当离目标距离小于 S_{dw} 开始减速,如图1所示。 S_1 和 V_1 计算式分别见式(6)、式(7)。

$$S_1 = a_{\text{up}} \times \frac{5T^2}{24} + \frac{a_{\text{up}}^2 T}{8a_{\text{dw}}} \quad (6)$$

$$V_1 = \frac{-T + \sqrt{T^2 + 72 \left(\frac{1}{a_{\text{dw}}} + \frac{1}{a_{\text{up}}} \right) S}}{6 \left(\frac{1}{a_{\text{dw}}} + \frac{1}{a_{\text{up}}} \right)} \quad (7)$$

式中: S 为定位移动距离; T 为摇摆周期; a_{dw} 为减速度; a_{up} 为加速度, 且当 $V_1 > V_n$ 时, 设 $V_1 = V_n$ 。

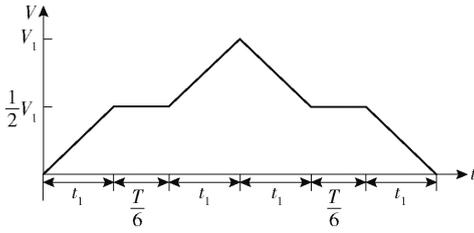


图1 短距离运动曲线

Fig. 1 Short-distance motion curve

在运动模式 2 中, 若起重机额定速度大于 $a_{up} \times T/2$, 同时移动距离大于两段速距离阈值 S_1 , 且小于三段速距离阈值 S_2 , 或者起重机额定速度大于 $a_{up} \times T/2$ 并小于 $a_{up} \times T$, 同时移动距离大于三段速距离阈值 S_2 , 则加速曲线也为两段, 运动曲线的最大速度为 V_2 , 如图 2 所示。 V_2 和 S_2 计算式分别见式(8)、式(9)。

$$V_2 = \frac{a_{up} T}{2} \quad (8)$$

$$S_2 = T a_{up} \left(\frac{5T}{6} + \frac{a_{up} T}{2a_{dw}} \right) \quad (9)$$

式中: T 为摇摆周期; a_{dw} 为减速度; a_{up} 为加速度; S_2 为三段速距离阈值。

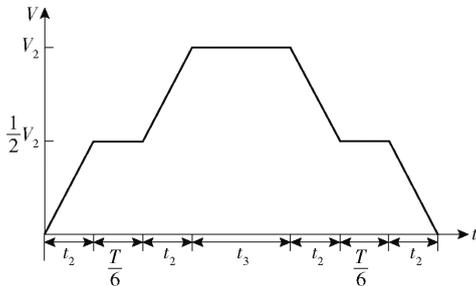


图2 两段速度运动曲线图

Fig. 2 Two-stage velocity motion curve

在运动模式 3 中, 若起重机额定速度大于 $a_{up} \times T$, 同时移动距离大于三段速距离阈值 S_2 , 且小于四段速距离阈值 S_3 ; 或者起重机额定速度大于 $a_{up} \times T$ 且小于 $a_{up} 3T/2$, 同时移动距离大于四段速距离阈值 S_3 , 则防摇摆控制加速曲线为三段加速三段减速运动曲线, 运动过程中能到达的最大速度为 $V_3 = a_{up} \times T$ 。 S_3 计算见式(10)。

$$S_3 = \frac{9T}{4} a_{up} \left(\frac{5T}{6} + \frac{a_{up} T}{2a_{dw}} \right) \quad (10)$$

式中: T 为摇摆周期; a_{dw} 为减速度; a_{up} 为加速度; S_3 为四段速距离阈值。

三段加速三段减速曲线, 起重机先按 a_{up} 加速至 $\frac{v_3}{4}$, 保持 $\frac{v_3}{4}$ 匀速运动 $T/6$, 再继续加速至 $\frac{3v_3}{4}$, 保持 $\frac{3v_3}{4}$ 匀速运动 $T/6$, 继续加速至 V_3 , 当离目标位置距离小于 S_{dw} 时开始减速, 如图 3 所示。

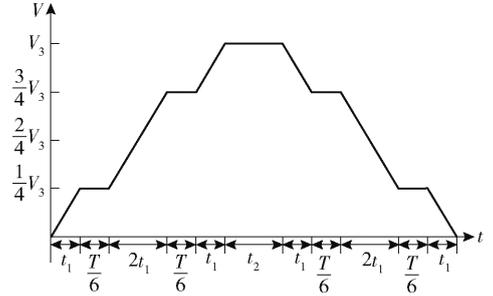


图3 三段速度运动曲线

Fig. 3 Three-stage velocity motion curve

结合上述运动模式的分析, 得出一个通用的运动曲线模型, 第一步先确定运动曲线的段数, 根据定位移动距离 S 、起重机加速度 a_{up} 、减速度 a_{dw} 、摇摆周期 T 和额定速度 V_n 。速度限制曲线加速段数 n_1 和位移限制曲线加速段数值 n_2 分别见式(11)、式(12)。

$$n_1 = \frac{2v_n}{a_{up} T} + 1 \quad (11)$$

$$n_2 = \sqrt{\frac{4s}{T a_{up} \left(\frac{a_{up} T}{2a_{dw}} + \frac{5T}{6} \right)}} + 1 \quad (12)$$

式中: S 为移动的距离; n_1 为速度限制曲线加速段数值; n_2 为位移限制曲线加速段数值。

第二步根据运动曲线加速减速段数, 确定运动过程中的最大运动速度 V_{max} 。

$$V_{max} = a_{up} \times n \times T \quad (13)$$

式中: n 为第一步得到的速度曲线加速段数 n_1 和 n_2 取大值。

n 段加速 n 段减速曲线运动模型, 分为 n 加速模块和 n 减速模块, 加速过程为恒定加速, 每段速度曲线段先以额定加速度 a_{up} 加速至 $\frac{V_{max}}{4n}$, 保持匀速运动 $T/6$, 再继续加速 $\frac{V_{max}}{4n}$, 每块速度增加 $\frac{V_{max}}{2n}$, 经过 n 次循环过程, 一直加速到 V_{max} , 当离目标位置距离小

于 S_{dw1} 时,开始减速,经过 n 次循环减速段,每个减速段内速度先进行一次减速,速度减少 $\frac{V_{max}}{4n}$,并保持匀速运动 $T/6$,依次规律进行循环,循环 n 次一直把速度降至起重机遇到的最低平稳运行速度,直至进入目标位置区间,距目标位置小于 S_b ,则速度减少至 0 时停止运动。减速距离 S_{dw1} 和开始制动距离 S_b 分别见式(14)、式(15)。

$$S_{dw1} = \frac{Tn^2}{4} a_{up} \left(\frac{T}{6} + \frac{a_{up}T}{2a_{dw}} \right) \quad (14)$$

$$S_b = 0.5 a_{dw} \left(\frac{a_{up}T}{4a_{dw}} \right)^2 \quad (15)$$

在(13)式中 S_{dw1} 为减速距离, n 为加速曲线段数;(14)式中 S_b 为开始制动距离。

n 段加速 n 段减速曲线, n 的确定由移动距离 S 、加速度、额定速度和摇摆周期决定,因移动的距离远,所能达到的最大速度 V_{max} 就会大,根据 V_{max} 分布在哪个速度段,决定会有几个消摆区间,运动曲线会结合 V_{max} 和运动距离 S 进行规划调整。

2 控制系统软硬件设计

定位防摇摆速度控制程序基于西门子博图软件平台进行开发,算法程序集成在桥式起重机的主控制程序中,算法软件程序包括防摇摆起重机控制设备组态和控制算法程序。本文以 1 台全自动 10 t 桥式起重机抓斗吊为研究对象,图 4 为起重机定位防摇摆控制设备网络拓扑图,控制器采用西门子可编程逻辑控制器(PLC),并通过绝对值编码器测量起升钢丝绳的长度,激光测距仪采集大车、小车的位置数据,进行定位防摇摆逻辑数据运算,控制变频器的速度输出。本控制系统主控制器为西门子 S7-1500 系列 PLC,变频器为西门子通用型 G120 系列变频器,编码器为倍加福绝对值编码器测量精度为 1 mm,SICK 的激光测距定位精度为 ± 1 mm,保证定位防摇摆的控制精度。

图 5 展示了起重机定位防摇摆控制算法的流程图,当起重机接收到定位触发信号后,开始启动定位防摇摆程序。首先,系统会根据输入的绳长、摇摆参数计算出摇摆周期和绳长补偿数据。接着,根据移动距离、额定速度、加速度、减速度和摇摆周期,对运动速度曲线进行分段处理。随后,系统会基于已确定运动曲线,计算出移动过程能达到的最大速度以

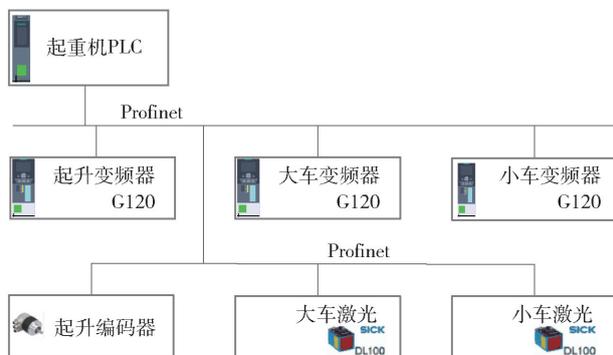


图 4 起重机防摇摆控制设备网络拓扑图

Fig. 4 Topology diagram of crane anti-swing control equipment network

及各曲线段的速度值。最后,系统启动移动控制,通过变频器的速度输出,以确保起重机准确到达目标位置并完成定位防摇摆任务。

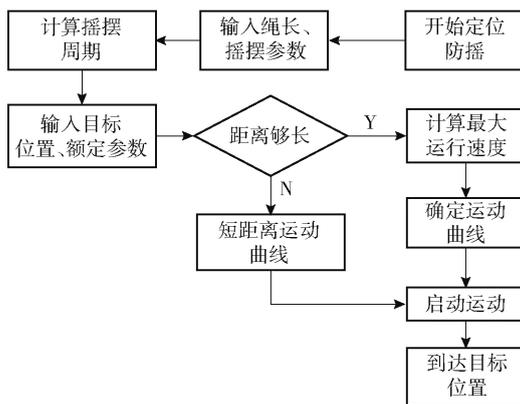


图 5 起重机定位防摇摆控制算法流程图

Fig. 5 Flow chart of crane positioning anti-swing control algorithm

3 控制方法应用与推广

本文所研究的桥式起重机多段速防摇摆及精准定位控制方法,在室外旋流池桥式起重机抓斗吊上进行了实际测试和应用,防摇摆定位试验和应用起重机为全自动桥式起重机抓斗吊。

旋流池全自动抓斗吊配备了远程操作台和行车驾驶室,支持远程和本地手动操作、半自动、全自动三种作业模式。在全自动模式下,旋流池全自动抓斗吊的主要工作是定期自动将旋流池内的渣料抓取并转运至存储池内,当清渣卡车到达并需要装车时,系统会触发装车模式,起重机将优先执行装车任务,自动从存储渣池中抓取渣料并装载至卡车上,在装

车任务完成后,起重机将继续执行从旋流池进行抓渣的任务。

旋流池测试起重机的额定速度为 1.0 m/s , 加速度 a_{up} 为 0.2 m/s^2 , 减速度 a_{dw} 为 0.2 m/s^2 , 低速限值 V_{min} 为 0.05 m/s , 摇摆周期 T 为 5 s , 测试时分别按照移动距离为 1 m 和 10 m 2 种移动距离进行试验, 首先根据式(4) 计算得 S_{min} 为 0.0504 m , 先通过移动距离与低速距离阈值进行比较, 采用分段加减速运动模式, 由式(11) 和式(12) 先求出加速段的数量, 根据计算移动距离 1 m 均采用两段加速两段减速曲线, 如图6 所示, 移动距离 10 m 采用三段加速三段减速曲线, 起重机的实际移动速度曲线如图7 所示。

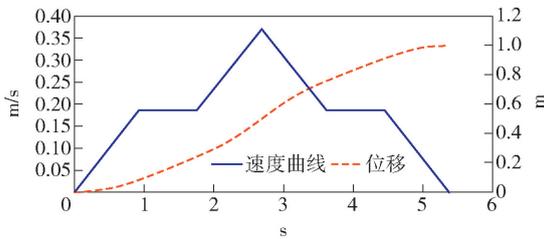


图6 移动距离 1 m 速度运动曲线图

Fig. 6 Velocity motion curve of moving distance 1 m

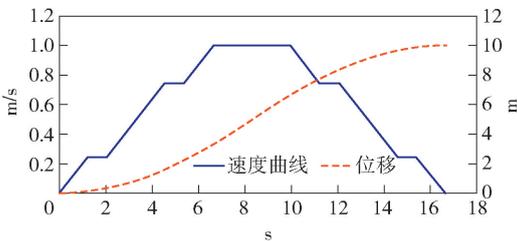


图7 移动距离 10 m 速度运动曲线图

Fig. 7 Velocity movement curve of moving distance 10 m

试验结果表明, 在定位移动距离 1 m 时, 运动曲线为两段加速两段减速。在两段加速完成后, 吊钩的最大摇摆角度为 0.4° , 同时到达目标位置时的定位精度为 $\pm 20 \text{ mm}$; 定位移动距离 10 m , 运动曲线为三段加速三段减速, 在三段加速完成后, 最大摇摆角度为 0.43° , 目标定位精度依然维持在 $\pm 20 \text{ mm}$ ^[14]。

4 结论

针对桥式起重机在移动过程中吊钩摇摆的问题, 本文研究了多段速防摇摆及定位控制方法算法和应用, 根据移动距离、加速度和吊钩绳长确定多段

速度曲线, PLC 和变频器按已确定速度曲线控制起重机移动, 实现无人桥式起重机准确定位, 并在定位过程中完成吊钩消摆, 控制吊钩在到达目标位置后, 在 2 个摇摆周期内, 做到摇摆角度 $\leq 0.5^\circ$, 定位精度 $\leq \pm 30 \text{ mm}$, 防摇摆效果不受起重机加减速能力的影响。本文控制方法已在钢铁冶金行业无人起重机自动定位防摇摆项目中应用和推广, 无论起重机的额定加速度和减速度情况如何, 都能够在到达目标位置时实现精准定位和防摇摆。

[参考文献]

- [1] 胡宏明. 智能起重机防摇及精准控制功能应用分析[J]. 中国高新技术, 2022(7): 62-64.
- [2] 赵炯, 唐超隼, 周奇才, 等. 桥式起重机防摇系统控制参数理论分析及实验研究[J]. 起重运输机械, 2017(11): 6-10.
- [3] 郑祎, 邱永峰, 查铂, 等. 智能重载钢板运输系统的设计与应用研究[J]. 冶金自动化, 2024, 48(S1): 45-49.
- [4] 李威, 邱永峰, 李长云, 等. 基于 Transformer-GAN 的无人天车异常检测模型[J]. 制造业自动化, 2024, 46(8): 123-128.
- [5] 卢凤娇, 刘海江, 油磊, 等. 桥式起重机防摇控制算法综述[J]. 船舶与海洋工程, 2020, 36(1): 1-7.
- [6] 马向华, 陈浩, 包晗秋, 等. 基于数据驱动的桥式起重机防摇控制策略[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(12): 3985-3992.
- [7] 欧阳慧珉, 张广明, 王德明, 等. 基于 S 型曲线轨道的桥式起重机最优控制[J]. 振动与冲击, 2014, 33(23): 5-10.
- [8] 周奇才, 张蕴, 熊彦磊, 等. 桥式起重机制动阶段防摇控制方案研究[J]. 机械工程与自动化, 2021(1): 7-9.
- [9] 林永屹. 桥式起重机定位及防摆控制系统的设计[J]. 电气传动自动化, 2022, 44(5): 23-25.
- [10] 范波, 张炜炜, 廖志明. 基于负载能量耦合的桥式起重机定位消摆控制[J]. 控制工程, 2020(12): 2077-2083.
- [11] 王晓军, 邵惠鹤. 基于模糊的桥式起重机的定位和防摆控制研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(4): 936-939.
- [12] 史良伟, 李虹, 王占军. 基于模糊自适应 PID 控制的桥式起重机定位防摆研究[J]. 机械工程与自动化, 2014(5): 170-172.
- [13] 马迎召, 邱永峰, 郑祎, 等. 面向工程机械领域的视觉引导重载桁架智能分拣控制系统[J]. 有色设备, 2023, 37(2): 1-5.
- [14] 季新峰, 姚桂荣, 徐晓亮. 硫酸装置磁选岗位起重机的修复[J]. 硫酸工业, 2014(2): 31.

Research on multi speed anti sway and precise positioning control method for bridge crane

MAO Xuanang, QIU Yongfeng*, ZHENG Yi, ZHA Bo, LIAO Jihong, SHEN Guoteng
(Hunan Tianqiao Jiacheng Intelligent Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Aiming at the problem that full-automatic bridge crane controlled by frequency converter and programmable logic controller (PLC) swings due to inertia and wind load during handling, this paper puts forward a multi-speed anti-swing and precise positioning control method for bridge crane. By studying the actual working condition, automatic positioning, anti-swing algorithm and control program development of crane, a mathematical model of multi-speed curve is established, and a PLC anti-swing control program is developed. The control program is embedded in the main control program of crane, and the crane is controlled by frequency converter when positioning and moving. The control method has been tested and applied in the grab crane of iron and steel metallurgy cyclone pool. The positioning accuracy and anti-swing effect meet the requirements of the full-automatic bridge crane for slag grabbing in cyclone pool, which improves the working efficiency of the crane and reduces the safety risk.

Keywords: frequency converter; PLC; bridge crane; positioning; anti-swaying; multi-speed curve ▲

(上接第 62 页)

Online evaluation method for open-pit mine road conditions based on driver behavior

TIAN Fengliang
(CCTEG Shenyang Engineering Company, Shenyang 110015, China)

Abstract: Addressing the challenge of measuring road conditions in open-pit mines, an online evaluation method for mine road conditions based on driver behavior has been proposed. This method is fundamentally based on the assumption that poorer road conditions lead to more frequent driver operations. It uses input from the accelerator and brake pedals during driving as basic data. Given the characteristics of high amplitude and low frequency in drivers' routine operation signals, the Fast Fourier Transform is employed to filter out these routine operations. Based on the filtered results, the driver's control power is used to represent the difficulty of driving on a particular road segment, forming an individual perception of the road by the driver. To reduce the randomness in the evaluation process, the Bayesian scoring method is adopted to obtain a comprehensive score for the road. Field studies have shown that the basic assumption that poorer road conditions result in more frequent driver operations is reasonable, and the online evaluation algorithm for road conditions based on driver behavior is effective.

Keywords: open-pit mines; road conditions; driver behavior; fast Fourier transform; online evaluation method ▲