

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.058

煤矿斜井绞车无人值守自动控制系统关键技术的研究

刘鸿利¹,滕宗鸿¹,刘建全¹,王亚云¹,汪涛²,杜磊²

(1. 甘肃华亭煤电股份有限公司东峡煤矿,甘肃 华亭 744100; 2. 陕西航泰电气股份有限公司,陕西 西安 710075)

摘 要:为解决煤矿斜井绞车运行时负载频繁且不规则地变化,使得自动控制系统难以迅速响应并调整控制参数,从而严重影响绞车速度控制精度的问题,提出煤矿斜井绞车无人值守自动控制系统关键技术。依据绞车基本运行数据构建空间状态方程,据此确定绞车的运动学参数与空间位置。根据特定条件判断控制绞车运行状态,同时利用模糊 PID 控制系统动态调整电机转速,实现对绞车运行速度的精准控制。实验结果表明:利用所提方法对煤矿斜井绞车进行速度控制,输出的运行速度与预设速度之间的相关系数高于 0.7,控制精度较高。

关键词:煤矿斜井;绞车;自动控制系统;智能化;速度控制

中图分类号:TD262.1⁺2 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)02-0305-04

Research on Key Technologies of Unmanned Automatic Control System for Coal Mine Inclined Shaft Winch

LIU Hongli¹, TENG Zonghong¹, LIU Jianquan¹, WANG Yayun¹, WANG Tao², DU Lei²

(1. Dongxia Coal Mine, Gansu Huating Coal and Electricity Co., Ltd., Huating 744100, China;

2. Shaanxi Hangtai Electric Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: To improve the accuracy of coal mine shaft winch speed control seriously affected by the difficulty in quick response to the automatic control system and adjustment of control parameters due to frequent and irregular shaft load changes during operation, this article proposes a key technology of unmanned automatic control system for coal mine inclined shaft winch. Based on the basic operating data of the winch, a spatial state equation is constructed to determine the kinematic parameters and spatial position of the winch. The operating state of the winch is judged and controlled according to specific conditions. And the fuzzy PID control system is used to dynamically adjust the motor speed, achieving precise control of the winch operating speed. The experimental results show that the proposed method for speed control of coal mine winches leads to the correlation coefficient between the output operating speed and the preset speed higher than 0.7, with high control accuracy.

Keywords: coal mine inclined shaft; winch; automatic control system; intelligentization; speed control

0 引言

煤矿斜井绞车是煤矿开采关键运输设备,承担着物料与人员垂直或倾斜运输任务,其运行的可靠性和效率关乎煤矿安全生产和经济效益。但传统操作严重依赖人工监控,既耗费人力,又难以在复杂矿山环境中保障绞车精确控制与安全运行。因此,探索斜井绞车无人自动控制系统关键技术是提升煤矿生产效率、降低安全风险的重要手段。

文献[1]依据液压伺服绞车性能参数与历史运行数据,构建空间状态、数学及动力学模型,进而搭建 4 阶线性主动抗扰控制器从而实现智能化控制。此方法引入 S 形速度曲线,提升速度控制平稳性,避免系统共振导致的速度波动。但该方法参数整定复杂,需特定系统调试优化,不适用于

实时性要求高的场景。文献[2]设计了基于 BP 模糊神经网络 PID 的控制器,对不同负载条件下的设备运行状态进行自动化控制,可以在升降等复杂工况下保持稳定的控制。但该方法在控制参数选择和调整过程中存在累积误差,从而影响了控制准确度。文献[3]设计了主动磁通观测器实时观测设备磁通状态,结合电机速度与位置信息制定控制策略,以应对电机参数变化、外部干扰等不确定因素。但该方法需大量实验调试,增加了系统开发与维护难度。文献[4]设计基于 PLC 与变频器控制的煤矿绞车智能系统,运用模糊 PID 算法优化调速策略,提升调速性能与稳定性,实现自动启停、变频调速等功能。但该方法涉及变频器控制、传感器技术等多领域,对硬件要求高,实际应用受限。

综上所述,传统方法存在响应速度慢、控制精

度低、安全隐患大等不足。因此,本研究分析煤矿斜井绞车无人自动控制系统的关键技术,以期煤矿生产提供一种更安全、更高效、更可靠的绞车运输解决方案。

1 无人值守自动控制系统设计

煤矿斜井绞车无人值守自动控制系统由硬件与软件系统协同运作,显著提升了煤矿生产的安全性及效率。硬件系统作为基础,PLC(可编程逻辑控制器)作为控制系统核心,接收各类传感器信号并按预设程序逻辑运算,凭借高速处理能力与丰富接口便捷连接其他硬件。工控机用于监控系统,能展示绞车速度、位置等运行状态,存储分析数据助力系统优化与故障诊断,适用于井下恶劣环境。磁电式速度传感器用于测量绞车速度,深度传感器确定矿车在斜井的位置,限位开关识别矿车极限位置,到达时发送信号使绞车停车。块式制动器由液压或电磁系统控制,依指令执行制动与松开操作,管控绞车制动。

软件系统由 PLC 编程软件和监控管理软件组成。PLC 编程软件编写控制逻辑以实现自动化,监控管理软件则显示运行状态、存储分析数据,为系统优化与故障诊断提供支撑。该绞车配备的低速大转矩液压马达抗过载能力与抗冲击能力强。设有行程传感器控制极限行程,正反转推车速度在 0.3 ~ 1.5 m/s 间可调节,采用 PLC 集中电气控制。

无人值守控制基本要求涉及安全性、可靠性与自动化^[5]。安全层面设置超速、过卷、欠压等多重保护机制;可靠性通过冗余设计,关键设备备份,以及具备故障诊断与预警功能来保障;自动化要求绞车运行全程自动,依预设参数指令调整关键参数。其技术特征体现在先进的传感器技术,如磁电式速度传感器精准采集多参数且抗干扰性强;智能控制算法采用模糊 PID 系统优化运行;远程监控与通信技术支持地面监控中心实时获取数据、图像,借助无线通信实现远程操作控制。

2 自动控制系统关键技术设计

2.1 绞车运动学参数计算

在煤矿斜井绞车无人值守自动控制系统关键技术的研究中,绞车的运动学参数分析是系统设计的基础,直接决定了绞车的运行特性和性能^[6]。

结合动力学原理,构建绞车空间状态方程,以此计算绞车拉力^[7],表达式如下:

$$\begin{cases} X_g = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{a_i \cdot b_d \cdot q_e} \\ F_b = \frac{X_g}{\sqrt{\beta_f}} \|y_s\| \end{cases} \quad (1)$$

式中: a_i 为绞车的加速度; n 为绞车运行状态参数采样点个数; k_i 为第 i 个采样点的统计周期; b_d 为钢丝绳直径; q_e 为最大牵引质量; X_g 为绞车空间状态方程; β_f 为矿车质量; F_b 为绞车拉力; y_s 为钢丝绳安全系数。

进一步求取绞车运动学参数,包括转动惯量和制动力矩^[8],如下式所示:

$$\begin{cases} h_s = \frac{F_b}{q_g/M_f} \\ u_r = \frac{|\alpha_r|}{2e_j} \end{cases} \quad (2)$$

式中: q_g 为绞车传动效率; M_f 为绞车对负载变化的响应速度; α_r 为绞车振动水平; e_j 为传动系统控制参量; h_s 、 u_r 分别为绞车转动惯量和制动力矩。

根据绞车基本运行数据,构建绞车空间状态方程,由此求取绞车运动学参数,为接下来绞车位置的确定提供便利条件。

2.2 绞车位置确定

绞车的位置确定直接影响到煤炭的运输效率、安全性以及后续自动化控制系统的设计与实施。系统需要根据绞车的位置来规划信号传输路径、监测设备布局以及控制指令的发送^[9]。因此,应综合考虑煤炭的运送方向、地质条件、斜井设计要求以及绞车的运行要求等多方面因素,确定绞车的具体位置^[10]。

根据绞车运行状态和斜井条件,将惯性传感器安装在绞车上面,以确定绞车的姿态^[11],表达式如下:

$$V_d = \frac{Y_f \sqrt{F_{\max}^2 \times F_{\min}^2}}{\theta_c \cdot c_h} \quad (3)$$

式中: Y_f 为牵引齿轮转动一圈绞车的位移; $F_{\max}$ 、 $F_{\min}$ 分别为绞车最大静拉力和最小静张力; θ_c 为计算矩阵; c_h 为传感器数据融合误差; V_d 为绞车姿态方程。当绞车在工作面执行煤炭运输时,绞车卷筒与执行动作之间的对应关系为

$$C_r = \frac{V_d \times \delta_e \times G_l}{v'/P_q} \quad (4)$$

式中: V_d 为绞车姿态方程; δ_e 为误差阈值函数; G_l 为叠加标度函数; v' 表示卷筒转速; P_q 表示斜井角度对应的弧度; C_r 表示执行动作控制函数。

结合绞车固定方式、电缆和管线的布置方案,利

用线性插值方法确定绞车的实时位置^[12],公式如下:

$$\begin{cases} x_0 = C_r \cdot \varpi_e \\ y_0 = \frac{C_r}{z_h} \\ z_0 = \tau_e / m'' \end{cases} \quad (5)$$

式中: ϖ_e 为钢丝绳单位长度质量; z_h 为转换系数; τ_e 为绞车运行延时; m'' 为特征函数; (x_0, y_0, z_0) 为绞车空间位置坐标。基于绞车运动学参数,计算绞车最大静拉力和最小静拉力,结合绞车姿态方程确定绞车空间位置,便于绞车控制系统对绞车运行的控制。

2.3 绞车运行状态控制

煤矿斜井绞车无人值守自动控制系统是集成了监测、控制和通信等技术,实现斜井绞车运行自动化和智能化的系统^[13]。通过预设的条件与算法,自动调整绞车的运行状态,提升斜井运输的安全性与效率。

采用编码器采集绞车钢丝绳长度,结合绞车传动系统外限位和高限位设定值,确定绞车的平均转矩,表达式为

$$N_r = \frac{Y_t \sqrt{x_0^2 \times y_0^2 \times z_0^2}}{|\psi_0 / o_j|} \quad (6)$$

式中: Y_t 为制动半径; (x_0, y_0, z_0) 为绞车空间位置坐标; ψ_0 为制动力; o_j 为绞车初始速度。

进一步求取绞车上限位校准绳长度,即

$$L_q = N_r \times B_d \times \Delta t \quad (7)$$

式中: B_d 为单位矩阵; Δt 为时间变化量。

根据当前钢丝绳长度计算绞车上限位减速距离^[14],公式如下:

$$L_H = \frac{\gamma_T}{Q_j} \quad (8)$$

式中: γ_T 为钢丝绳摩擦因数; Q_j 为决策函数。

若 $L_q < L_H$,绞车一级减速;若 $L_q > L_H$,绞车一级加速;若 $L_q = L_H$,绞车停止运行。至此,完成煤矿斜井绞车无人值守自动控制系统关键技术的研究。

3 实例论证分析

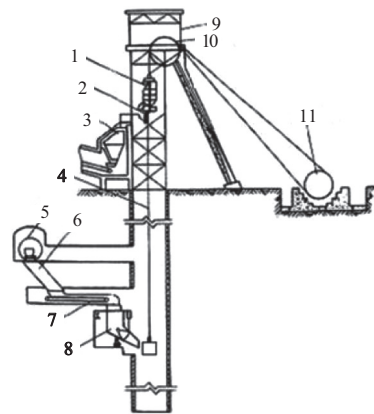
3.1 研究概况

本次实验所选取的煤矿位于我国北方的某大型煤炭产区,设计为大型井工煤矿,煤层储量丰富,年产量超过 500 万吨。煤矿采用三条斜井进行开拓,分别为主斜井、副斜井和回风斜井。其中,主斜井进口标高为+1 245 m,倾角为 10°,井巷

长为 145 m,主要用于煤炭的运输和矿井的通风;副斜井标高为+1 566.3 m,倾角为 12°,井巷长为 215 m,主要用于设备和材料的运输,以及矿井的辅助通风;回风斜井井口标高为+955 m,倾角为 22°,井巷长为 145 m,主要负责矿井的通风和排尘。煤矿的斜井结构坚固,设计合理,能够承受较大的运输负荷和机械振动。斜井内壁采用高强度混凝土加固,厚度达到 50 cm,确保运输过程中的稳定性和安全性。

3.2 实验准备

实验中采用的绞车是专为煤矿斜井设计的重型提升设备,型号为 JYB-60·1.25。该型绞车主要用于矿山倾斜角小于 30°的巷道中牵引矿车,采用行星齿轮传动方式,其基本结构如图 1 所示。



1—箕斗；2—卸载曲轨；3—地面煤仓；4—钢丝绳；5—翻车机；6—翻车机煤仓；7—给煤机；8—装载设备；9—井架；10—天轮；11—提升机卷筒。

图1 绞车基本构造

该绞车的基本性能参数如下:功率为 90 kW,电压为 660/1 140 V,电动机转速为 980 r/min,卷筒直径 720 mm,容绳量 650 m,钢丝绳直径 26 mm,基准层上钢丝绳静张力 60 kN,基准层上钢丝绳速度 1.25 m/s,牵引力 60 kN,平均绳速 580 m/min,电动机功率 55 kW,总减速比值 41.325。

绞车通常固定安装在斜井旁的稳固基础上。其工作流程如下:煤矿工人装物料入箕斗,符合装载量规定。操作人员用无人值守系统下达启动指令,电机按预设加速度启动,转速提升带动卷筒转,钢丝绳拉箕斗沿斜井轨道上行,运行时传感器监测参数反馈给系统。箕斗接近井口预设位置,系统控制电机减速停靠,井口卸载装置卸料。卸料后电机反转,箕斗下行回井下装载点。过程中无人值守系统持续监测设备,异常时启动安全保护机制。

无人值守控制系统有节能措施。实验采用变频调速技术,传感器监测绞车载荷。载荷轻时,系

统降低变频器输出频率使电机低速运转,因电机输出功率与转速立方成正比,能耗大幅降低;载荷重时,系统提高变频器频率使电机增速输出足够转矩。系统还具备智能调度策略,依煤矿井下生产流程和物料运输规律安排绞车运行时间与频次,减少空转避免无效电能消耗。经实际验证,这些措施使绞车在不同载荷下保持高能源利用效率,降低能耗成本。

实验平台基于煤矿自动化控制平台搭建,集成了西门子 S7-300 系列 PLC、ABB ACS800 变频器、WinCC 监控软件等核心组件。该平台能模拟绞车的操作、监控、控制等功能,并支持远程控制和监控。绞车自动控制系统运行后,可通过上位机交互页面直接控制绞车的运行状态。

实验设置绞车正常提升速度为 2 m/s,维护速度为 0.5 m/s,启动加速度为 0.2 m/s²,减速加速度为 -0.2 m/s²,紧急制动时间为 5 s。通信协议采用 TCP/IP,通信速率为 100 Mbps。基于这些实验数据,对本文设计的方法进行性能测试与分析。

3.3 对比实验与分析

为验证本文方法的有效性,进行对比实验。在实验中,采用基于 S 型速度曲线的方法(方法 1)、基于 BP 模糊神经网络 PID 控制的调度(方法 2)作为对照组,本文方法为实验组,采用相关系数 R 作为评价指标,其数值越高,表明两者的吻合程度越高,控制精度越高。对比结果如图 2 所示。

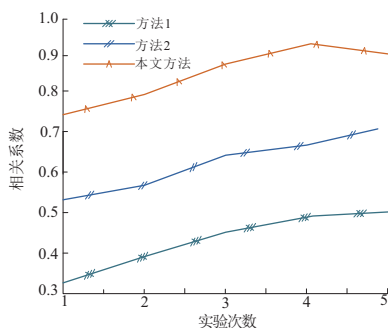


图2 对比结果

由图 2 可以看出,应用本文设计的方法对煤矿绞车速度进行自适应控制,通过比较后,得到的相关系数显著高于对照组方法,表明本文方法能够将绞车运行速度准确控制为预设速度大小,控制精度相对较高。

4 结语

在煤矿斜井绞车无人自动控制系统关键技术的研究中,通过计算绞车动力学参数和确定绞车实时位置,实现了对煤矿绞车运行状态的控制。该技术不仅实现了绞车的自主操作和智能监控,而且显著提高了煤矿生产的安全性和效率。同时,为深入了解和解决煤炭开采生产中的实际问题提供了宝贵的经验和启示。

参考文献:

- [1] 刘琛华. 基于 S 型速度曲线的液压伺服绞车自抗扰控制[J]. 现代制造工程, 2023(10): 145-154.
- [2] 朱鹏程, 张晴, 张文华, 等. 基于 BP 模糊神经网络 PID 控制的牵引绞车张力控制研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(21): 137-143.
- [3] BUTARU F, CARSTEA C, RATIU A I, et al. Active flux observer-based high-speed control of a permanent magnet synchronous motor[C]//2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). Bucharest, Romania: IEEE, 2023: 1-5.
- [4] 陈静. 煤矿绞车智能控制系统设计与研究[J]. 机械工程与自动化, 2024(2): 185-187.
- [5] 宋健. 煤矿井下用无极绳绞车变频驱动研究[J]. 机械管理开发, 2023, 38(12): 177-178, 181.
- [6] 刘建峰. 煤矿井下绞车的控制系统研究及应用[J]. 机械管理开发, 2023, 38(12): 212-213, 218.
- [7] 何培洪, 李龙建, 何志波, 等. 石油钻机绞车变频控制系统的钩速选定及制动能力计算[J]. 电气传动自动化, 2024, 46(4): 8-12.
- [8] 刘晓进, 赵延明, 敬明洋. 电驱动海洋绞车自动排缆控制系统建模与仿真[J]. 机械工程师, 2024(2): 74-78.
- [9] 廖薇, 韩维敏, 胡盼, 等. 海洋绞车升沉补偿系统缆绳张力控制分析[J]. 工程机械, 2023, 54(7): 82-86, 11.
- [10] 高伟鹏, 谢永和, 李德堂, 等. 拖网渔船曳纲绞车速度控制液压系统的设计和仿真[J]. 机械工程师, 2023(5): 59-63, 67.
- [11] 赵安. 石油钻机绞车传动系统防提断控制技术研究[J]. 中国机械, 2024(4): 61-64.
- [12] 李炳林, 杨双业, 樊勇利, 等. 电驱动测井绞车电缆张力模糊控制方法研究[J]. 石油矿场机械, 2022, 51(3): 71-76.
- [13] 武龙. 一种用于石油钻机绞车系统的断轴保护控制及方法[J]. 电气传动自动化, 2022, 44(2): 14-16, 40.
- [14] 余帆, 黄一敏, 赵君宝. 倾转旋翼无人机过渡段控制策略研究[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(4): 230-234.

收稿日期: 2024-12-18

2026-1 期勘误:

页码

P187

P218

错误

第一作者简介: 滕进华

第一作者简介: 刘国辉

更正

第一作者简介: 滕进华

第一作者简介: 龚小溪