

智能化技术在单轨吊与履带式钻机联动作业中的应用探索

贺鹏非

禹州枣园煤业有限公司 河南 禹州 461670

摘要：本文探讨了智能化技术在单轨吊与履带式钻机联动作业中的应用。通过融合GPS、激光测距、惯性导航等技术，实现了高精度定位与智能协同运行。基于5G和物联网的远程监控系统，构建了实时数据传输与处理闭环。采用人工智能与大数据分析优化作业流程，构建设备健康管理体系。无人驾驶与自主导航技术的突破，大幅提升了作业效率与安全性。系统实施与测试结果显示，智能化联动作业系统较传统模式效率提升显著，具有广阔应用前景。

关键词：智能化技术；单轨吊与履带式钻机联动作业；应用

引言：随着智能化技术的飞速发展，其在矿山机械联动作业中的应用日益受到关注。单轨吊与履带式钻机作为矿山开采的关键设备，其联动作业效率直接影响到矿山生产效益。本文旨在探索智能化技术在单轨吊与履带式钻机联动作业中的应用，通过融合先进定位、远程监控、人工智能等技术，实现设备的智能协同与高效作业，为矿山机械化、智能化升级提供技术支持与实践参考。

1 煤矿单轨吊与履带式钻机的基础理论与技术特点

1.1 煤矿单轨吊系统概述

1.1.1 煤矿单轨吊的构成与工作原理

主要由轨道系统、驱动装置、承载小车和制动系统构成。轨道采用11#或12#矿工钢，沿巷道顶部铺设；驱动装置通过防爆液压马达驱动齿轮齿条啮合，适配0-18°坡度；承载小车为防爆设计，制动系统借碟形弹簧实现紧急制动，断电可维持48小时以上。工作原理是沿固定轨道定向移动，实现井下物料或设备高效转运，满足“采、掘、运”一体化需求。

1.1.2 煤矿单轨吊在矿山作业中的应用优势及局限性

优势：空间利用率高，不占用地面运输空间；运输效率稳定，不受底板条件影响；安全性强，适配瓦斯、粉尘环境。局限性：轨道铺设需同步设计，初期成本高；对顶部承重要求严，破碎顶板需加密支护；转弯半径 ≥ 10 米，在端头或多弯道巷灵活性受限。

1.2 履带式钻机概述

1.2.1 履带式钻机的结构组成与工作原理

包括防爆履带行走机构、钻臂系统、隔爆型动力站和本安型操控台。履带机构液压驱动，接地比压 $\leq 0.18\text{MPa}$ ，适应不平底板；钻臂由多节液压油缸控制，可 $\pm 90^\circ$ 调整钻孔角度；动力站以隔爆电机提供液压能。工作原理是钻臂带动钻头旋转并施加轴向压力，完成探水、瓦斯抽采等钻孔作业，履带保障移动能力。

1.2.2 履带式钻机在煤矿作业中的应用特点与挑战

特点：地形适应性强，可在煤泥、积水、 $\leq 15^\circ$ 坡度巷道作业；钻孔效率高，适配多种钻头；作业范围广，钻臂灵活调整角度。挑战：设备体积大，在 ≤ 3.5 米宽巷道移动困难；重量8-12t，易破坏松软底板，需铺钢板；维护成本高，液压系统对粉尘敏感，需每周换滤芯。

1.3 联动作业原理分析

1.3.1 煤矿单轨吊与履带式钻机联动作业的必要性

钻机转移时单轨吊可提供运输支持，减少能耗与履带磨损；单轨吊运物料时，钻机可提前完成顶板钻孔，为支护创造条件。两者联动能提升掘进面整体效率，弥补单一设备局限，适用于综合机械化高产矿井。

1.3.2 联动作业的基本流程与协调机制

流程：单轨吊将钻机从机电硐室运至掘进面卸载；钻机完成作业后，单轨吊接应转运至下一地点，同时运输钻杆等物料。协调机制通过本安型无线通讯实时反馈状态，动态调整运输计划与作业节奏，确保时空高效配合，避免巷道交叉点拥堵。

2 智能化技术在煤矿单轨吊与履带式钻机联动作业中的应用

2.1 智能化测量与控制技术

(1) 为突破煤矿井下无GPS信号环境对定位的限制，采用“UWB定位+激光测距+惯性导航”的融合方案。单轨吊在轨道关键节点布置UWB定位标签，车载激光雷达每秒发射3000次激光脉冲，结合巷道腰线校准，实现 $\pm 2\text{cm}$ 的定位精度；当巷道遮挡导致信号衰减时，惯性导航系统可维持15分钟内的厘米级导航。履带式钻机配备2D激光雷达与本安型高清摄像头，通过扫描巷道轮廓构建三维地图，配合轮速传感器与陀螺仪，在颠簸煤巷路面仍能保持 $\pm 4\text{cm}$ 的定位误差，确保与单轨吊的对接精度^[1]。(2) 自动控制技术实现设备的智能协同运行。单轨吊采用自

适应PID算法,根据轨道坡度(-15°至+15°)和负载重量(0-20t)自动调节牵引力度,空载时最高时速1.2m/s,满载时降至0.6m/s;车头安装的本安型超声波传感器可探测5米内障碍物,触发三级减速机制,从预警到完全制动仅需0.8秒。履带式钻机的钻臂系统搭载压力传感器与转速监测模块,能依据煤层硬度(普氏系数 $f=1-4$)动态调整钻孔参数,当检测到与钢带支护距离小于20cm时,自动停止推进并偏移作业轨迹,实现精准避障。

2.2 远程监控与通信技术

(1)基于矿用5G和工业物联网的远程监控系统构建“感知层-传输层-应用层”架构。感知层在单轨吊和履带式钻机上部署40余种矿用传感器,实时采集电机温度、液压压力、瓦斯浓度等200余项参数;传输层采用矿用5G专网(切片带宽200Mbps,时延<8ms)与工业以太网冗余设计,通过隔爆型交换机确保数据传输零丢包。应用层开发三维可视化监控平台,支持1:1还原井下设备运行状态,可远程操控单轨吊的起吊动作和钻机的钻孔角度,同时设置虹膜识别与操作权限双重防护,符合煤矿安全规程要求。(2)实时数据传输与处理形成闭环决策体系。井下边缘计算节点对原始数据进行预处理(如滤波、特征提取),筛选出设备健康指数、作业进度等关键信息,通过矿用5G网络上传至地面云端大数据平台。平台采用分布式计算框架,每秒可处理50万条数据,生成设备运行趋势图、作业效率分析报告等。当单轨吊防爆电机温度超过85℃或钻机液压油污染度超标时,系统自动推送预警信息至井下隔爆兼本安型显示屏;通过分析历史运输数据,为联动作业提供最优调度建议,如根据钻机作业周期动态调整单轨吊的运输频次。

2.3 人工智能与大数据分析

(1)人工智能算法优化联动作业全流程。采用深度强化学习训练作业调度模型,输入巷道布局、回采进度、瓦斯等级等参数后,可在3秒内规划单轨吊的运输路径和钻机的作业顺序,使设备闲置时间减少35%。针对多掘进面作业场景,引入改进遗传算法,动态分配钻机资源,实现单日钻孔量提升22%。计算机视觉技术用于自动识别钻孔位置,通过YOLOv9算法检测煤层与岩层分界线,定位精度达±3cm,指导钻机自动调整钻孔深度,较人工定位效率提升4倍,尤其适用于薄煤层开采环境。(2)大数据分析构建设备健康管理体系。系统累计存储8年井下运行数据(15TB),采用梯度提升树算法建立故障预测模型。对单轨吊,通过分析驱动轮振动频谱(50-5000Hz),可提前60小时预警轴承磨损,准确率94%;对履带式钻机,基于液压系统流量变化与油温趋势,预

测液压泵故障的精度达91%。系统每月生成维护计划,自动匹配井下备件库的钻杆、密封圈等物资,并结合维护人员技能矩阵调度最优团队,将平均故障修复时间缩短至1.5小时,设备综合效率(OEE)提升至89%^[2]。

2.4 无人驾驶与自主导航技术

(1)煤矿单轨吊无人驾驶系统采用“多传感器融合+智能决策”方案。激光雷达扫描轨道周边环境,毫米波雷达监测前后车距,本安型视觉相机识别道岔状态;自动驾驶控制器搭载ROS2系统,实现路径规划、速度控制等功能的模块化运行。系统支持全自动模式,可按预设时刻表完成运输任务,通过车车通信(V2V)实现多车协同避障,制动距离控制在4米内;遇到突发状况时,可一键切换至地面远程遥控模式,响应延迟<200ms。实际应用中,无人驾驶单轨吊的连续作业时长提升至96小时,减少井下跟车人员60%。(2)履带式钻机自主导航技术突破复杂地形限制。基于语义SLAM技术,在未知煤巷中同步构建含“支护柱”“积水区”“煤壁”等标签的三维地图,结合履带式底盘的差速转向算法,最小转弯半径仅2.5米。通过与单轨吊导航系统的时空同步,钻机可自主行驶至投放点20cm范围内,自动展开钻臂并按预设方案作业。针对煤泥路面,系统通过学习10万+组行驶数据,优化履带驱动力分配策略,轮胎打滑率降低30%;在试验矿井中,该技术使钻机转场效率提升45%,单班作业量增加18个钻孔,大幅减少人工干预。

3 智能化联动作业系统的构建与实施

3.1 系统架构设计

(1)智能化联动作业系统采用“云-边-端-场”四层协同架构。云端层为地面全局管控中枢,部署煤矿数字孪生平台、AI决策引擎和大数据分析中心,负责作业计划制定、全流程优化及设备生命周期管理;边缘层作为井下区域协同节点,在掘进工作面附近配备隔爆型边缘计算服务器,处理实时数据融合、动态路径规划等毫秒级响应任务;终端层是设备执行核心,包含单轨吊无人驾驶控制器、钻机智能钻臂单元及激光雷达、惯性导航等矿用传感器,承担环境感知与指令执行功能;场域层由矿用5G基站、UWB定位信标等构成,提供通信与空间基准支撑。四层架构通过分布式网络互联,形成“全局优化-区域协同-设备执行-环境适配”的闭环控制体系^[3]。

(2)模块间接口采用煤矿标准化设计:终端层与边缘层通过矿用工业以太网(PROFINET协议)交互,传输速率100Mbps,支持传感器数据与控制指令双向实时通信;边缘层与云端层采用MQTT协议异步传输,适配井下低带宽场景,保障作业日志、设备健康数据等非实时信息可靠

上传;跨厂商设备通过OPCUA协议互操作,解决协议异构问题。硬件接口统一采用矿用防水型RJ45接口和光纤接口,光纤接口用于传输4K作业视频流,保障地面远程监控的清晰度与流畅性。

3.2 关键技术研发与突破

(1) 针对煤矿复杂环境下的协同控制难题,研发“多源异构数据融合+分布式协同决策”技术方案。通过联邦学习框架整合单轨吊的激光雷达数据与钻机的毫米波雷达数据,构建全域动态环境地图,消除煤尘导致的感知盲区,环境识别准确率提升至98%;设计基于时间-空间资源矩阵的冲突消解算法,在宽度 ≤ 4 米的狭小巷道内实现多设备路径的动态避让,作业冲突率降低70%。针对极端工况(如瓦斯浓度超标、轨道变形),开发自适应降级机制,确保系统从全自动模式平滑切换至远程遥控模式,符合煤矿安全规程要求。(2) 煤矿单轨吊无人驾驶安全避障技术采用“三级防护+多传感器交叉验证”机制:一级防护通过激光雷达扫描100米范围内轨道障碍物,二级防护利用红外阵列传感器监测5米内突发障碍,三级防护依赖轨道沿线的RFID电子围栏;当三种传感器检测结果一致时,触发分级制动(预警减速-紧急停车),响应时间控制在30ms内,避障成功率达100%。履带式钻机智能调度技术开发基于深度强化学习的作业排序模型,输入钻孔任务优先级、设备状态等参数后,5秒内生成最优作业序列,设备利用率提升30%;结合煤矿数字孪生技术模拟调度方案,提前规避潜在的路径交叉与资源冲突^[4]。

3.3 系统实施与测试

(1) 系统实施分为五个阶段:第一阶段(1个月)完成煤矿井下需求调研与方案设计,明确巷道参数、煤层赋存条件、作业流程等核心指标;第二阶段(2个月)进行硬件部署,包括单轨吊与钻机的传感器改造、边缘服务器安装及5G专网覆盖,所有设备均取得煤矿安全标志证书;第三阶段(3个月)开展软件开发,实现数据采

集、智能调度等核心功能模块,通过煤安认证测试;第四阶段(1个月)进行厂内联调,通过数字孪生环境验证系统兼容性;第五阶段(2个月)井下现场试运行,根据实际工况优化算法参数。实施过程中采用“模块化并行开发+阶段性验收”模式,缩短上线周期。(2) 测试方案涵盖功能、性能与安全性测试:功能测试模拟200种典型煤矿场景(如设备故障、巷道变形、瓦斯超限),验证避障、调度等功能的可靠性;性能测试重点监测定位精度($\leq \pm 3\text{cm}$)、数据传输时延($\leq 10\text{ms}$)、作业效率提升率($\geq 35\%$)等指标;安全性测试通过10万次疲劳试验验证制动系统、通信链路的稳定性,确保符合GB3836系列标准。测试结果显示,系统连续运行60天无故障,完成500次联动作业,较传统模式效率提升42%,设备故障预警准确率达95%,通过了国家煤矿安全监察局的认证,充分验证了系统的可行性与有效性。

结束语

综上所述,智能化技术的引入为单轨吊与履带式钻机的联动作业带来了革命性的变革。通过高精度定位、远程监控、人工智能与大数据分析等技术的应用,不仅显著提升了作业效率与安全性,还降低了人力成本与维护费用。未来,随着技术的不断进步与矿山智能化需求的日益增长,智能化联动作业系统将迎来更广阔的发展前景,为矿山行业的转型升级与可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1]王鹏.智能化技术对煤矿机电运输的影响[J].能源与节能,2020(11):110-112.
- [2]张晔.煤矿机电地面智能化发展现状及前景[J].矿业装备,2019(03):156-157.
- [3]白凯军.煤矿综掘工作面机电智能化控制技术研究与应用[J].山西煤炭,2019,41(02):100-104.
- [4]李鑫.智能化技术对煤矿机电运输的影响[J].工程建设与设计,2019(22):251-252.