

煤矿井下智能巡检机器人关键技术与应用实践

刘泽宇

山西宁武德盛煤业有限公司 山西 忻州 036700

【摘要】：煤矿井下作业环境复杂多变，空间狭窄、粉尘浓度高、光照条件差且存在瓦斯等易燃易爆气体，传统人工巡检不仅效率低下，还易受环境因素影响引发安全事故。智能巡检机器人依托多类传感与自动控制技术，可替代人工完成井下设备状态监测、环境参数采集及异常情况预警等工作。本文围绕煤矿井下智能巡检机器人的核心技术构成、系统集成方式及现场应用效果展开分析，结合井下实际作业场景细化技术落地要点，探讨机器人在复杂地质与工况条件下的稳定运行策略，为煤矿智能化建设与井下安全生产提供实践参考，推动煤矿巡检工作从人工值守向无人化、智能化方向转型。

【关键词】：煤矿井下；智能巡检机器人；传感技术；自主导航；应用实践

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.047

引言

我国煤矿井下作业环境复杂，空间狭窄、粉尘大、光照差且存在瓦斯等易燃易爆风险，传统人工巡检效率低、安全隐患突出、数据准确性不足，难以适配煤矿智能化与安全生产升级需求。智能巡检机器人作为井下无人化作业的核心装备，依托多模态感知、自主导航、防爆防尘等关键技术，可替代人工完成设备监测、环境采集与异常预警，大幅提升巡检可靠性与响应速度。

1 煤矿井下巡检作业现状与机器人应用需求

1.1 传统井下巡检的实际局限

煤矿井下巷道分布复杂，各类机电设备分散布置，人工巡检需要依靠工作人员携带检测仪器逐点排查，长时间在巷道内行走会大幅增加体力消耗，同时难以保证巡检路线的完整性。井下粉尘、水雾会遮挡视线，降低人工观察设备故障的精准度，部分高风险区域存在顶板垮塌、瓦斯泄漏隐患，巡检人员进入后面临较高的安全风险。人工巡检数据多依靠手动记录，信息传输存在延迟，数据准确性易受人为因素干扰，无法实现实时上传与动态分析，难以及时捕捉设备早期故障特征，容易导致小隐患逐步发展为影响生产的重大问题。

1.2 智能巡检机器人的应用必要性

智能化巡检模式能够突破人工巡检的诸多限制，机器人可按照预设路线持续执行巡检任务，不受作业时间与环境强度的约束。针对井下特殊工况，机器人搭载的专用检测设备可精准采集瓦斯浓度、温度、湿度及设备振动等参数，数据采集精度与稳定性远高于人工操作。机器人具备自主避障与异常报警功能，在发现设备异响、气体浓度超标等危险情况时，可快速向地面监控中心传输信号，缩短应急响应时长。随着煤矿智能化建设推进，井下无人化作业成为发展趋势，智能巡检机器人的应用能够优化人力资源配置，提升矿井整体安全生产管控水平^[1]。

2 煤矿井下智能巡检机器人核心关键技术

2.1 多模态环境感知技术

煤矿井下环境存在大量干扰因素，单一传感器无法满足巡检需求，多模态感知技术将视觉、气体、温度及振动等传感器融合应用，提升机器人对环境的识别能力。视觉传感器经过防尘、防爆处理后，可清晰捕捉设备外观损伤、管线脱落等情况，配合图像识别算法过滤粉尘与水雾造成的干扰，准确提取关键故障特征。气体传感器实时监测甲烷、一氧化碳等有害气体浓度，通过算法优化消除环境波动带来的数值漂移，确保数据稳定可靠。振动传感器贴附于机电设备表面，采集设备运行时的振动频率与幅度，判断轴承、电机等核心部件是否存在异常磨损，各类传感器数据协同传输，为机器人决策提供全面依据。

2.2 井下自主导航与定位技术

井下巷道无卫星信号覆盖，传统定位方式难以实现精准导航，巡检机器人依托惯性导航、激光雷达及巷道特征匹配相结合的方式完成定位。激光雷达实时扫描巷道轮廓，构建三维环境地图，识别障碍物位置与距离，引导机器人调整行驶路线。惯性导航装置持续记录机器人行驶姿态与位移数据，弥补巷道内信号不稳定的缺陷，保证定位连续性。通过预先录入巷道地图信息，机器人可自主规划最优巡检路径，遇到临时障碍物时能够自动绕行，无需人工远程干预。定位精度可控制在较小范围内，确保机器人能够准确抵达每一个巡检点位，避免出现路线偏离或漏检问题^[2]。

2.3 防爆防尘与稳定运动控制技术

煤矿井下存在易燃易爆气体，机器人整机需满足防爆设计标准，核心电气元件采用隔爆与本安结合的防护结构，防止电路火花引发安全事故。机器人外壳采用高强度密封材质，有效阻挡粉尘与水汽侵入内部元器件，延长设备在恶劣环境下的使用寿命。运动控制系统适配井下复杂路况，针对巷道坡度、积水及凹凸路面，可自动调整行驶速度与车轮扭矩，保证行驶平稳性。采用履带式或轮式复合行走结构，提升机器人在泥泞、

碎石路面的通过能力，避免出现打滑、卡顿现象，确保在各类井下工况下持续稳定运行。

3 智能巡检机器人系统集成与现场部署

3.1 整机系统集成设计

智能巡检机器人将感知、导航、控制及通信模块整合为一体系统，各模块之间通过专用接口实现数据互通，减少信号传输延迟。地面监控中心与机器人建立无线通信连接，传输信号采用抗干扰编码技术，适应井下复杂电磁环境，保证数据传输稳定不中断。机器人搭载数据存储单元，可实时缓存巡检数据，在信号短暂中断时暂存信息，待通信恢复后自动补传，避免数据丢失。系统内置自主诊断功能，实时监测机器人自身电量、传感器状态及通信质量，出现故障时自动发出提示，便于维护人员及时处理。

3.2 井下现场部署与调试要点

机器人部署前需完成井下巷道地图测绘，标记巡检点位、障碍物分布及危险区域，构建精准的数字化地图模型。调试过程中重点测试导航精度与传感器灵敏度，根据实际粉尘浓度、光照条件调整识别算法参数，确保机器人适应现场环境。对通信信号覆盖薄弱区域进行优化，增设信号中继装置，保证机器人在全巷道范围内与地面中心稳定通信。同时开展续航能力测试，结合巡检路线长度调整电池配置，确保机器人单次充电可完成全流程巡检任务，减少中途更换电池带来的作业中断^[1]。

4 应用实践效果与技术优化方向

4.1 实际应用成效

智能巡检机器人投入井下使用后，显著提升了巡检工作效率，可实现 24 小时不间断作业，覆盖所有预设巡检点位，无

漏检、错检情况发生。环境参数与设备状态数据实时上传至监控平台，管理人员可远程查看实时信息，无需深入井下即可掌握现场情况。异常情况预警响应速度明显加快，在气体浓度超标、设备温度异常等隐患出现初期即可发出报警，有效降低安全事故发生概率。相比人工巡检，机器人运行成本更低，减少了井下作业人员数量，缓解了人力资源紧张问题，推动矿井安全生产管理模式升级。

4.2 后续技术优化方向

当前机器人在极端复杂地质条件下的导航适应性仍有提升空间，需进一步优化多传感器融合算法，增强对突发障碍物、巷道变形的识别能力。通信信号在长距离巷道及复杂分支区域易出现衰减，可结合 5G 技术与边缘计算提升传输稳定性与数据处理速度。针对不同类型机电设备的故障特征，完善图像识别与振动分析模型，提高微小故障的检出率。同时优化机器人能耗管理技术，延长续航时长，提升设备在深井、超长巷道等场景下的适配能力，推动智能巡检机器人在煤矿井下实现更广泛、更稳定的应用。

5 结论

煤矿井下智能巡检机器人有效破解传统人工巡检的安全、效率与数据短板，实现 24 小时不间断精准巡检与实时预警，显著降低事故风险、优化人力配置，推动矿井安全管理模式升级。当前机器人在极端地质适应、长距离通信、微小故障检出等方面仍有优化空间，未来需强化多传感器融合、5G 与边缘计算融合、低能耗管控等技术迭代。持续完善技术与部署方案，可进一步提升机器人在复杂井下场景的适配性，为煤矿智能化建设与长效安全生产提供坚实装备与技术保障。

参考文献：

- [1] 杨文杰.煤矿井下智能巡检机器人设计[J].中国宽带,2026,22(02):168-170.
- [2] 甄明哲,张树华.煤矿输送设备智能巡检机器人设计与应用[J].中国机械,2025,(34):28-31.
- [3] 王江华,郭琦,王延圣.煤矿井下巷道全方位巡检轮式机器人设计分析[J].中国设备工程,2025,(20):133-135.