

基于智能机器人的电力电缆隧道巡检方法

李成万

山东中茂实业集团有限公司禹城分公司

DOI:10.32629/pe.v4i3.21059

[摘要] 针对电力电缆隧道环境复杂、人工巡检风险高、故障定位难等问题,分析集成主机、中继器、移动机器人的智能巡检系统。该系统通过多机协同架构,实现高精度路径导引、信号无缝中继、多点同步数据采集,有效克服隧道长距离通信衰减和盲区限制。实证表明,该方案显著提升巡检效率、数据完整性,降低运维人员暴露于高危环境的风险,为电缆隧道智能化运维提供可靠技术支撑,推动电力设施管理向无人化、精细化转型。

[关键词] 智能机器人; 电力电缆隧道; 巡检方法

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Intelligent Robot-Based Inspection Method for Power Cable Tunnels

Chengwan Li

Shandong Zhongmao Industrial Group Co., Ltd.

[Abstract] To address the challenges of complex environments, high risks associated with manual inspection, and difficulties in fault localization in power cable tunnels, this paper analyzes an intelligent inspection system integrating a host unit, repeaters, and mobile robots. Through a multi-robot collaborative architecture, the system achieves high-precision path guidance, seamless signal relaying, and multi-point synchronized data acquisition, effectively overcoming long-distance communication attenuation and blind spot limitations in tunnels. Empirical results show that the proposed solution significantly improves inspection efficiency and data integrity, reduces the exposure of operation and maintenance personnel to high-risk environments, provides reliable technical support for intelligent operation and maintenance of cable tunnels, and promotes the transition of power facility management toward unmanned and refined practices.

[Key words] intelligent robot; power cable tunnel; inspection method

引言

在长期运行下,接头容易因接触电阻增大引发局部过热、绝缘老化等安全隐患,亟需高频次巡检,防范故障升级。然而,隧道空间狭窄、环境潮湿、存在有毒气体风险,传统人工巡检不仅效率低下,更严重威胁作业人员生命安全。尽管机器人技术在变电站巡检中已广泛应用,但直接移植至隧道场景面临严峻挑战,复杂地形导致移动平台操控困难,单一机器人难以实现长距离分布数据的同步采集,且隧道结构对无线信号屏蔽效应显著,造成通信链路不稳定,甚至中断。因此,研发具备高精度导引、可靠通信中继、多点协同采集能力的专用巡检机器人系统,成为突破隧道运维困境的关键路径,对于提升电网本质安全水平具有重要现实意义。

1 智能巡检机器人整体架构

电缆故障巡检运维机器人系统采用“主机-中继器-机器人”协同架构,旨在突破隧道长距离通信盲区、作业空间受限问题。主机部署于隧道入口,作为指挥中枢,通过下行无线链路向移动

终端发送行驶轨迹规划、中继器投放/回收指令、数据采集触发信号,实现远程精准操控。机器人作为执行主体,搭载高精度导航模块和多源传感器,依据指令自主行进至目标点位,完成中继器布设,延伸通信覆盖范围,并同步采集电缆接头温度、局部放电等关键故障特征数据。中继器则充当动态通信桥梁,接收机器人上传的视野图像及传感数据,经过信号增强处理后通过上行链路回传至主机,构建起稳定可靠的双向数据传输通道,解决深部隧道信号衰减难题,实现故障信息的实时汇聚、可视化呈现,显著提高巡检作业的自动化水平(如图1所示)。

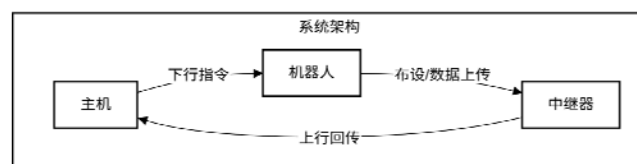


图1 智能巡检机器人整体架构

2 智能巡检机器人架构功能设计

2.1 主机设计

主机作为巡检系统的指挥中枢,集成显示、操控、通信、存储、中央处理、电源模块,构建起高效的信息交互和决策平台。电源系统为各组件提供稳定能源保障;同步系统引入动态带宽管理机制:当监测到中继器无线信号质量劣化时,自动执行分级降级策略,依次关闭中继器数据采集功能及其无线传输通道,确保在极端工况下核心视觉信息的连续回传,维持远程操控的可行性。中央处理器则承担多源数据融合任务,实时解析操作日志、现场传感数据、自检状态,为上层决策提供算力支撑^[1]。

通信层面,主机采用基于ZigBee技术的低功耗无线组网方案,利用其自组织网络特性克服隧道多径效应干扰,实现和中继器集群的稳定连接。显示系统由高清显示屏、专用图像处理器构成,具备多维信息可视化能力。界面实时呈现电缆故障特征数据、机器人全景视野图像、设备通信状态、电量自检报告,同时叠加方向导引矢量和中继器定位坐标,直观反映隧道内部环境态势,并通过整合机器人回收中继器的精确定位数据,辅助操作人员精准判断设备空间分布,显著提升复杂环境下的人机协同效率、应急响应速度,确保巡检作业的安全性。

2.2 机器人设计

行驶系统采用履带底盘适应隧道复杂地形,搭载激光信号传感器接收中继器,实现视觉和导航数据的融合显示。辅助灯光确保低照度环境下的清晰成像,检测系统配置局部放电传感器、温度探头,实时捕捉电缆绝缘状态及热缺陷特征,形成多维故障诊断依据。数据处理器负责解析主机下行指令,同步处理自身采集的传感数据、图像信息、工作日志,通过ZigBee通信模块将关键信息编码上传至中继器网络,确保数据链路的低延迟、高可靠性^[2]。

中继器布控回收系统由机械臂执行单元、超声波定位对接模块、启停控制模块构成。机械臂精准执行中继器的取出、投放、拾取动作,灵活部署动态组网节点。在回收阶段,超声波传感器探测中继器发出的特定频率信号,引导机器人精确对准目标位置,完成物理对接。随后,系统通过机械触发、无线指令激活/关闭中继器功能,并监测其电量和通信状态。一旦检测到信号衰减或电量不足,立即向主机发送预警,触发降级传输策略,保障长距离隧道的连续通信能力,显著提高巡检系统的整体鲁棒性^[3]。

2.3 中继器设计

中继器功能是解决长距离信号衰减、机器人自主导航问题。激光导向系统由发射器与接收器构成,通过扫描前方空间测量最远无障碍指向,并沿此路径持续发射引导光束,为机器人提供高精度的直线行进基准,直至下一中继器部署完成后自动关闭以节能;返程时则逆向逐个激活,形成闭环导引链路。同时,内置超声波发生器在接收到主机回收、置换指令后,发出特定频率声呐信号,辅助机器人实现厘米级精准对接,确保物理连接的可

靠性^[4]。

通信层面,中继器采用ZigBee技术构建多跳自组织网络,承担数据汇聚和指令转发的任务。它实时收集下级中继器及机器人的传感数据、图像信息、状态日志,经过本地处理器初步滤波、压缩后,逐级向上转发至主机;反之,将主机的控制指令逐级下发至末端执行单元,有效降低单点故障风险,全面提高网络鲁棒性。此外,中继器具备电量自检、通信质量监测功能,一旦检测到电池电压低于阈值或信号强度异常,立即向主机发送报警信息,触发系统降级策略。通过这种智能化的动态组网方式,中继器不仅延伸了通信覆盖范围,更实现了隧道内复杂环境下的高精度导航和稳定数据传输,显著提高巡检作业的整体效率^[5]。

3 基于智能机器人的电力电缆隧道巡检试验与应用

3.1 工程应用

某市三条电缆隧道总长超过12 km,投运年限跨度大,内部电缆接头密集、路径起伏,传统巡检模式已无法适应状态检修的数据密度要求。引入智能机器人巡检系统,利用其自主行驶、中继通信、局放采集功能,替代人工完成隧道内例行巡检、故障初筛。应用场景覆盖直线段、弯道、坡道、涉水区段,机器人搭载温湿度、气体浓度、局放传感器,沿预设路径对电缆中间接头逐点检测,数据经中继器链式回传至隧道口主机。

3.2 系统功能试验方法

试验项目覆盖外观完整性、绝缘电阻、电磁兼容抗扰度、高低温湿热循环、振动冲击机械应力、外壳防护等级、高频局放专项测试。电磁兼容试验在3 V/m辐射场强及2 kV电快速瞬变脉冲群注入条件下,验证传感器采集链路和通信模组的信号完整性。局放检测专项测试利用标准脉冲校准源,在5~500 pC视在放电电量范围内检验系统线性度,采样率、频带范围、精度指标均逐项比对规范限值。全套型式试验通过后,系统方获准进入模拟隧道场景的功能联调。

在含直线段、弯道、坡道的模拟隧道内预设A至F六个中继投放点,测试路径覆盖视距和非视距交替区段。机器人由隧道口主机操控,打开图像采集、辅助照明后沿路径行驶,实时自检通信质量,通信质量衰减时主动告警,操作人员在A处投放中继器并校验其通信、电量、激光导向功能。机器人识别导向信号前行,至弯道B处投放新中继器,远程关闭A处激光导向,由B处接力引导。抵达电缆中间接头D处时,中继器开启信号采集和中继功能,将局放及温度数据回传主机;电量下降时远程切换至存储中继模式,电量告警触发中继器替换流程。检测任务完成后,机器人沿导向信号返回,依次回收各中继器并返回起点。

3.3 试验结果

系统在A、B、C三条电缆隧道部署应用,隧道长度0.8~1.6 km,地形复杂度分简单、一般、复杂三档,检测点数量设9点和18点两档。机器人巡检用时和同条件人工巡检用时同步记录,人工用时含进洞前气体检测、通风循环及作业中休整耗时。12组对比数据汇总如下。

表1 智能机器人和人工巡检用时对比

隧道	长度/km	检测点/个	地形复杂度	机器人用时/h	人工用时/h	效率提升/%
A	0.8	9	简单	0.7	1.1	36.4
A	0.8	18	简单	0.9	1.4	35.7
A	1.6	9	简单	0.8	1.2	33.3
A	1.6	18	简单	1	1.5	33.3
B	0.8	9	一般	0.8	1.1	27.3
B	0.8	18	一般	1.1	1.4	21.4
B	1.6	9	一般	1.1	1.2	8.3
B	1.6	18	一般	1.4	1.5	6.7
C	0.8	9	复杂	1.2	1.2	0
C	0.8	18	复杂	1.5	1.6	6.3
C	1.6	9	复杂	1.4	1.4	0
C	1.6	18	复杂	1.9	2	5

数据揭示地形复杂度是制约机器人效率提升的主控因素。简单地形下效率提升33.3%~36.4%，人工准备时间被机器人免换班连续作业抵消；地形转为一般时提升幅度收窄至6.7%~27.3%，中继器投放及回收耗时开始显现。复杂地形效率提升趋近于零甚至持平，机器人0.8 km/9点和1.6 km/9点两组数据、人工用时完全一致，分析其根源在于地形起伏致行驶速度下降、中继器布设次数增多，激光导向信号在弯道叠加区受遮挡需人工介入调

试。18点检测条件下复杂地形机器人用时1.5~1.9 h，检测点密度增加后机器人的连续作业优势部分补偿地形造成的速度损失。

4 结语

本文构建“主机-中继器-机器人”协同架构，突破隧道长距离通信盲区、复杂地形导航瓶颈。通过主机远程指挥、机器人自主巡检、故障采集、中继器动态组网、激光导引的深度融合，实现数据实时回传。该体系有效解决人工巡检高风险、低效率痛点，显著提升电缆故障检测精度，为电力隧道智能化无人值守提供可靠技术范式，推动电网本质安全水平提升。

[参考文献]

- [1]王朋朋,陈子祎,杜璇,等.隧道内电缆故障巡检运维机器人系统研究[J].电力安全技术,2024,26(5):28-31.
- [2]易资兴,唐杰,刘白杨,等.一种狭小封闭场所电力巡检机器人设计[J].邵阳学院学报(自然科学版),2025,22(1):28-37.
- [3]李鸿,冯朝,肖建聪,等.面向地下电缆沟智能巡检机器人的紧耦合SLAM系统[J].计算机测量与控制,2024,32(6):248-255.
- [4]李乾,郭康,任树贞,等.极限环境下电缆管道智能巡检机器人自动化控制系统[J].自动化与仪表,2024,39(4):79-82,93.
- [5]李敏,赵芳芳,洪焕华,等.高压电缆隧道巡检机器人路径规划与应用[J].工业控制计算机,2024,37(6):52-54.

作者简介：

李成万(1990--),男,汉族,山东省德州市禹城市人,大学本科,职称：工程师,研究方向：电力电缆专业。