

面向电网检修的多功能可视化监控 操作平台设计与实现

李悦, 张哲, 宋欣雨*

(国网北京平谷供电公司, 北京 平谷 101200)

摘要: 在电力系统作业现场中, 输配电线路通常具有点多面广、分布范围大、设备类型多样等特点。当线路设备发生突发缺陷或故障需快速处置时, 尤其在夜间进行倒闸操作或带电作业时, 由于可见度降低、设备辨识困难、视线易受遮挡等原因, 使用绝缘操作杆操作开关设备往往存在耗时长、效率低、操作安全隐患大等问题。针对上述挑战, 文章基于物联网与视频监控技术, 研制了一种多功能可视化监控操作平台。该平台集成了可自由调节方向的高清视频监控、智能可控低照度补光、多轴旋转云台及无线数据传输等功能, 可在人工检修过程中与绝缘操作杆快速组装。通过高清视频实时回传与在线研判, 有效解决了夜间高空作业视觉判断困难的问题, 并支持专家远程会诊与指挥现场操作, 从而显著提升输配电线路检修作业的安全性与处置时效性。

关键词: 电网检修; 多功能可视化; 物联网; 绝缘操作杆

中图分类号: TM862

DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2602F012

CSTR: 32400.14.ncdqh.2602F012

Design and Implementation of a Multi-functional Visual Monitoring and Operation Platform for Power System Maintenance

LI Yue, ZHANG Zhe, SONG Xinyu*

(State Grid Beijing Pinggu Power Supply Company, Beijing Pinggu 101200, China)

Abstract: Transmission and distribution lines feature numerous points, extensive coverage, large distribution areas, and diverse equipment types in power system. When sudden defects or faults in line equipment require rapid intervention especially during nighttime switching operations or line work-visibility reduction, equipment identification challenges, and obstructed sightlines often lead to prolonged operation times, low efficiency, and significant safety risks when using insulation operating rods for switchgear operations. To address these challenges, this study develops a multifunctional visual monitoring and operation platform based on IoT and video surveillance technologies. The platform integrates features such as directional-adjustable high-definition video surveillance, intelligent controllable low-light augmentation, multi-axis rotating PTZ cameras, and wireless data transmission. It can be quickly assembled with an insulation operating rod during manual maintenance processes. Through real time HD video feedback and online analysis, it effectively resolves visual judgment difficulties in nighttime aerial operations, while supporting remote expert consultation and on-site command. This significantly enhances the safety and timeliness of transmission and distribution line maintenance operations.

Keywords: power grid maintenance; multi-functional visualization; internet of things; insulation operating rod

0 引言

绝缘操作杆^[1]主要由绝缘杆、操作头部和握柄组成, 在电力系统的实际运行过程中, 它扮演着不可或缺的关键角色, 特别是在夜间倒闸操作、

收稿日期: 2026-02-11; 修回日期: 2026-03-16

带电作业、故障抢修等复杂且具有挑战性的工作场景中^[2]。

夜间倒闸操作是一项需要高度精确性和安全性的工作, 在黑暗环境下, 操作人员的视觉受限, 传统绝缘操作杆在这种情况下存在诸多不便^[3]。夜间操作时, 绝缘操作杆与刀闸等操作目标的对准难度

增大，操作人员难以凭借肉眼准确判断两者之间的距离和相对位置。由于光线不足，操作人员可能无法清晰识别绝缘操作杆顶端与带电部分的安全距离。此外，在夜间操作时，操作人员的心理压力也会因视觉障碍而增大，可能导致操作失误。

带电作业对绝缘操作杆的性能要求极高，在高压电场环境中，绝缘操作杆不仅要保证操作人员与带电设备之间的绝缘安全，还须具备良好的操作灵活性和精确性。电场力可能会干扰绝缘操作杆的操作方向，导致操作人员难以准确地将绝缘操作杆的操作头对准目标^[4]。同时，由于带电作业通常要求长时间保持操作姿势，绝缘操作杆的质量、手握舒适度等因素也会影响操作的稳定性和操作人员的疲劳程度，进而影响作业的安全性和效率^[5]。

故障抢修是一种紧急情况下的作业，现场环境往往复杂多变。绝缘操作杆要在不同类型的设备故障场景中发挥作用，可能面临设备损坏、空间狭窄、抢修时间紧迫等问题^[6]。在一些故障现场，设备周围可能存在障碍物，限制了绝缘操作杆的操作空间和角度^[7]。而且，不同类型的设备故障可能需要不同功能的绝缘操作杆，对于某些特殊设备的抢修，要求绝缘操作杆具备特殊的操作头或长度。传统绝缘操作杆在这种情况下可能无法快速适应，导致抢修时间延长，影响电力系统的快速恢复。

综上所述，相较于传统绝缘操作杆的使用，研究通过模块化的组件对绝缘操作杆进行升级改造是一种极具前景的方向。通过物联网、视频监控等模块化设计能够使绝缘操作杆根据不同的应用场景，快速、灵活地组装出最适合的形态。例如，在夜间倒闸操作场景中，可以组装带有照明功能模块和可视化视频模块的绝缘操作杆；在带电作业场景中，选择具有高强度绝缘和抗电场干扰模块的绝缘操作杆；在故障抢修场景中，依据现场实际情况，快速组装出能够适应狭窄空间或特殊设备操作的绝缘操作杆。

1 多功能可视化监控操作平台的设计与实现

1.1 平台架构设计

本研究所设计的多功能可视化监控操作平台主要包括绝缘操作杆本体、旋转云平台、可调节多功能支架、移动应用等，见图1。

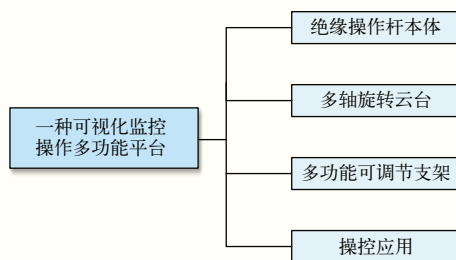


图1 平台架构树状图

绝缘操作杆本体的顶端通过螺纹连接的方式进行固定，固定装置具有专用的自由开合钳口，通过推拉操作杆，即可完成开合工作，实现设备顶端快速固定、拆除，具体示意图见图2。

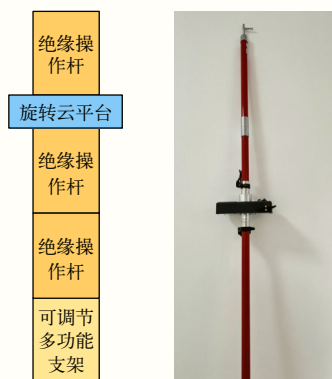


图2 绝缘操作杆与旋转云台组装结构示意图

旋转云平台包括法兰、主控制模块、视频采集模块、补光照明模块、旋转驱动模块、电源模块、存储模块以及通信模块。法兰为安装平台，包括主控制模块、视频采集模块、补光照明模块、电源模块、存储模块以及通信模块，固定安装在绝缘操作杆本体的下端，安装示意图见图3。

1.2 平台研制与测试

多功能可视化监控操作平台的主控制模块与视频采集模块、补光照明模块、旋转驱动模块、电源模块、存储模块以及通信模块通过电气连接，凭借物理接口控制照明模块和旋转驱动模块，同时接入电源模块，并为视频采集模块、补光照明模块、旋转驱动模块、存储模块及通信模块供电。视频采集模块采用工业级高清摄像头模组，提供千万级分辨率视频，并具备三轴防抖云台控制功能，通过串口与主控制模块连接，接收主控模块的控制指令。补光照明模块采用LED补光灯，具备光照控制和指令控制两种工作模式，通过I/O接口与主控制模块连

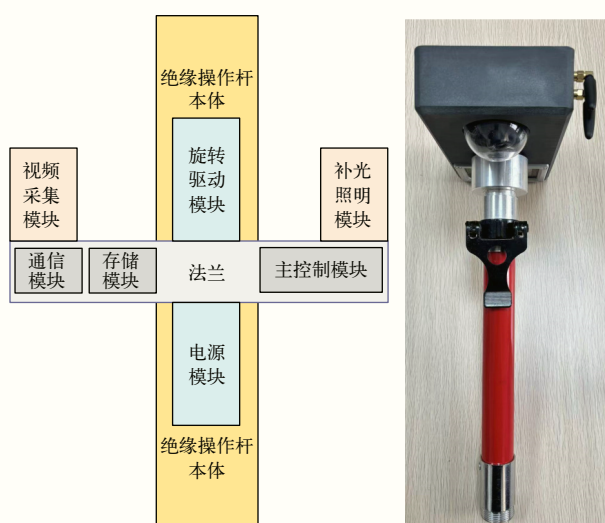


图3 绝缘操作杆本体安装示意图

接，接收主控模块的控制指令。旋转驱动模块采用直流电机驱动法兰旋转，通过串口与主控制模块连接。电源模块采用蓄电池，供电电压为 12 V，采用柱形设计，可灵活放置在绝缘操作杆本体内部，包括充电环，充电环的侧面开设安装槽，充电座安装于安装槽内，充电环的顶端开设电池仓，电池仓内安装供电锂电池。存储模块采用存储卡进行数据存储，存储卡采用 TF 卡形式，最大可支持 512 GB。通信模块提供 Wi-Fi、蓝牙等多种通信方式，通过总线方式与主控制模块连接。旋转云平台进行防水密封设计，采用密封圈进行密封。可调节多功能支架材料为环氧树脂、铝合金材料制成，固定在克棒本体的握柄端。

本平台利用专用自由开合钳口及快速连接装置，补光及工作采用 LED 补光灯，电源部分采用锂电蓄电池，选用工业级成熟的摄像机模组。最高支持 4K@30 Hz、2.7K@60 Hz、1080P@120 Hz 的 H.264 编码的视频，照片像素为 1100 万，支持三轴机械防抖功能。主控模块采用自研方式，实现对摄像机、补光灯及电机的供电管理及电机控制。计划采用一个 STM32 的单片机来实现。主控模块实现的功能包括通信蓝牙，实现与手机应用的数据交换；调试串口，RS232 标准接口，打印调试程序输出；电机控制，通信串口接收到电机控制指令后，对电机进行控制；补光灯控制，对补光灯进行供电控制。

本平台采用嵌入式控制电路板和单片机控制板进行输入电源转换、相机供电与调试串口、蓝牙功

能、电源滤波、调试接口、通信接口等功能的实现，以便于对核心 CUP 进行程序烧录和调试，控制直流电机正反转和转速，连接传感器等。所产出实物见图 4。



图4 绝缘操作杆部分实物图

图 4 (a) 为内嵌式电源模块与旋转驱动模块，内置锂电蓄电池和，供电电压为 12 V；图 4 (b) 为可视化监控操作平台实物，包括视频采集模块、通信传输模块、设备补光模块；图 4 (c) 专用自由开合钳口及快速连接装置，便于设备快速安装，图 4 (d) 为绝缘操作杆工作头，配备绝缘垫，提升安全性。

移动应用通过 Wi-Fi、蓝牙等通信方式与旋转云平台的通信模块连接，采集视频图像及照明设备等信息，且可通过移动应用调节旋转云平台、控制法兰旋转和摄像头云台动作，观察线路、设备情况。移动应用采用跨平台语言开发，可以运行在 Android 和 iOS 手机系统上，实现功能包括，视频查看，视频可最大化，可返回现有样式，通过 RTSP 拉流；云台控制，通过点击箭头，可以进行云台控制；截图，可以将当前视频画面截图保存到本地手机；灯光控制，可以进行补光灯的控制。补

光灯通过蓝牙控制；转轴控制，可以对转轴进行控制，通过蓝牙控制；参数配置，实现对相关运行参数的配置操作。视频部分可最大化，可返回现有样式；云台控制部分可通过点击箭头，进行云台控制。截图部分可以将当前视频画面截图保存到本地手机；灯光控制部分可以进行补光灯的控制，补光灯通过蓝牙控制；转轴控制部分可以通过蓝牙对转轴进行控制。

本研究通过普通绝缘操作杆和所研制的具备多功能可视化监控操作平台的绝缘操作杆在夜间操作实训场地柱上开关进行对比实验，结果见表1。

2 结果与分析

本研究所研制并开发的面向电网检修的多功能可视化监控操作平台通过推拉固定部分实现装置顶部快速固定。旋转部分采用一体化设计实现云台摄像机及补光灯进行任意角度调节。由锂电蓄电池为旋转平台提供动力，操作人员进行装置操作时，将装置顶部固定于杆上设备可夹导线上，底部握柄利用可调节多功能支架固定于杆上或专用支架上，操作长度通过绝缘操作杆的节数进行灵活调整，并通过手机移动应用进行调节角度查看视频画面。由具有相关工作经验的人员根据摄像头拍摄的画面判断问题原因并做出技术指导。当出现难以处理的复杂情况时，通过手机终端将视频画面传输至后台指挥控制中心，由技术专家实时观测现场缺陷和事故情况对抢修做出专业指导。

本研究通过增加可视化监控组件，旋转平台和多轴云台的设计，解决了目前工作人员在地面无法清晰且多角度查看高处作业面情况的问题。通过无线传输技术，解决远程控制中心无法实时查看现场情况的问题，实现了本地查看和远程控制中心查看现场作业场景的需求。该设计能够及时地对各种情况进行处置，而且不会因操作人员经验不足而无法做出正确的处理方式，从而更加有效地提升了突发情况处理效率。

综上所述，本研究所提出的多功能可视化监控操作平台在电网检修、夜间操作等多种情况下，具有操作更精准、安全性更高、视野条件更好等特点，为电网检修、夜间操作等多种环境时的安全性、时效性提供了一定的保障。

3 结束语

本研究通过对绝缘操作杆的结构升级改造、操作过程的可视化实现及远程操作指导云平台的搭建，显著提升了绝缘操作杆在夜间倒闸操作、带电作业与故障应急抢修等典型电力作业场景中的使用性能。研究通过合理化的电气设计、电子系统开发、机械结构优化及设备精准选型，所研发的改进型绝缘操作杆系统全面达成预设研发目标，为电力系统的安全、高效运行提供了技术支撑与设备保障。

后续研究可围绕该产品开展进一步的优化与功能拓展，重点提升可视化组件的环境适应性与工作性能，强化远程指导云平台的功能完备性、系统兼

表1 实验结果对比表

对比度	普通绝缘操作杆	具备多功能可视化监控操作平台的绝缘操作杆
夜间视野条件	无自主照明，依赖外部光源，视野昏暗、盲区多，设备细节看不清	补光功能自主提供清晰照明，摄像头实时传画面，绝缘操作杆工作头、绝缘子、接线端等细节清晰可见，无视野盲区
操作精准度	视线受阻，对准绝缘操作杆工作头、挂环等关键部位难度大，易出现操作偏差	画面实时可视，精准定位操作点位，绝缘操作杆工作头对接、挂摘动作无偏差，操作精准度大幅提升
操作安全性	视野差易误触带电部位、周边设备，且无法实时观察操作状态，安全隐患高	实时监控操作过程，避免误触风险，补光照明让周边环境、设备间距清晰，降低高空/带电操作安全隐患
协同作业效率	单人操作难度大，需多人配合打光、指挥，沟通成本高，作业效率低	无需专人配合照明/指挥，单人即可完成操作，画面可同步至后台，远程可实时指导，作业流程更高效
故障排查能力	夜间无法直观观察设备是否存在烧蚀、松动等问题，排查难度大	摄像头高清拍摄+补光照明，可清晰地查看设备外观故障，画面可留存，便于后续故障溯源分析
恶劣环境适配性	遇夜间阴雨、大雾、粉尘等环境，视线进一步受阻，基本无法正常操作	平台抗干扰性强，阴雨/大雾/粉尘环境下仍能保持清晰画面，适配各类夜间恶劣作业场景

容性及多场景适配能力,以满足复杂电力作业场景的应用需求。通过对绝缘操作杆系统的二次升级改造,可进一步提升其在各类复杂工况下的适用性与操作可靠性,为电力系统的安全稳定运行提供更坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 李辰雷,陈文汝,赵冠群.基于深度学习的照明一体化令克棒设计研究[J]. 自动化应用,2025,66(4):30-32.
- [2] 郑春雨.一种用于令克棒的避雷芯取送装置:CN201921555595.1[P].CN210527811U[2026-04-13].
- [3] 李春发,向怡骁.关于如何缩短低压配网停电倒闸操作时间的探讨[J]. 电力设备管理,2025(11):12-14.
- [4] 何发海.10 kV配电线路运检工作中带电作业分析[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招

标采购创新论坛:绿色智造·采购革新专题.国网石嘴山供电公司,2025:758-764.

- [5] 程千陌,马丽亚.农电配网抢修中故障预测与快速响应机制构建的实证研究[J]. 数字农业与智能农机,2025(9):103-106.
- [6] 黄凯,张茜楠,李强,等.机械化施工在大型电网检修工程中的应用分析[J]. 江西电力,2025,49(5):57-60,67.
- [7] 何霄,成玲.配电线路带电作业状态识别与故障预警方法[J]. 光源与照明,2025(12):109-111.

作者简介

李悦(1998—),男,硕士,从事电力运维检修工作, E-mail: ly1121just@163.com.

张哲(1995—),男,本科,工程师,从事电力工程管理工作, E-mail: 15201495898@qq.com.

宋欣雨(1997—),女,硕士,工程师,从事电气试验工作, E-mail: s13552899821@163.com.

(责任编辑:张峰亮)

(上接第73页)

响应时间由30 min缩短至5 min(t 检验, $p < 0.01$),满足了方案中“故障响应时间 ≤ 5 min”的核心设计目标。测量误差主要源于通信延迟,约 ± 10 s,在工程允许范围内。

3.4.2 带电清洗场景验证

对云栖小镇10 kV线路上100片盐密初始值 > 0.03 mg/cm²的绝缘子,执行标准化带电清洗作业。作业采用前述3级监测流程。结果显示,绝缘子表面平均盐密由0.05 mg/cm²显著降至0.021 mg/cm²(t 检验, $p < 0.01$),憎水性均恢复至HCI—HC2级,完全达到绝缘安全要求。盐密测试采用PM-100型等值盐密仪,精度为 ± 0.001 mg/cm²,结果可靠。

3.4.3 高阻故障场景验证

基于云栖小镇故障录波数据库,收集2024年发生的10次过渡电阻大于1 000 Ω (实际范围为1 200~4 500 Ω)的高阻故障录波数据作为测试样本。应用本文提出的TA断线优化判据,即公式(5)进行故障类型判别,正确识别9次,误判1次,识别准确率达90%(χ^2 检验, $p < 0.05$)。保护拒动率由优化前的10%成功降至0%(t 检验, $p < 0.01$),显著提升了保护动作的可靠性。

4 结论

本研究提出融合CVaR模型、改进I-Greedy算法与物联网架构的传感器网络优化方案,有效解

决云栖小镇示范区部署冗余、能耗高、可靠性低及特殊工况监测缺失等痛点。通过CVaR鲁棒性优化提升网络稳定性,动态部署与低功耗通信适配负荷波动并延长网络寿命。优化网络在带电清洗三级绝缘监测与高阻故障智能识别中验证了可靠性与实用性。仿真与现场验证表明,该方案显著提升了监测网络的整体性能。未来将引入人工智能预测模型实现参数自适应优化,并拓展至35 kV等更高电压等级,为构建全域感知智能配电网运维体系提供支撑。

参考文献

- [1] 张弛.基于物联网的配电运检设备状态监测与智能维护系统分析[J]. 集成电路应用,2024,41(10):410-411.
- [2] 陈晓雷,高志坚,曲钰,等.基于物联网技术的配电设备运行状态实时监测研究[J]. 自动化与仪器仪表,2024(7):365-368.
- [3] 聂希柱,李冲,柳璐.基于物联网的配电设备运行状态监测系统分析[J]. 电子技术,2024,53(6):218-219.
- [4] 樊阔.基于物联感知的配电设备在线监测与状态评估[D].北京:华北电力大学,2023.
- [5] 高安迪,吴晓霞,李峰.基于I-Greedy求解CVaR模型的传感器网络布局优化[J]. 机械设计与制造,2023(12):138-141.
- [6] 关天一,胡一平,陈丹,等.关于配电自动化多级级差精准自愈的研究[J]. 农村电气化,2025(9):59-62.
- [7] 徐艺,肖潇.衢州山区配电网通信可靠性提升策略研究[J]. 农村电气化,2025(6):34-37.

作者简介

章锡明(1985—),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为配电网运维及管理, E-mail: 15711331886@163.com.

(责任编辑:袁航)