

Non-invasive Electrical Inspection Visualization Technology Based on Insulated Endoscope and Its Application

Weijun Sun Yong Cui Yu Yang Lin Ge Cong Bai

State Grid Harbin Power Supply Company, Harbin, Heilongjiang, 150001, China

Abstract

To address critical challenges in electricity usage inspections and anti-theft investigations—including invisibility in concealed spaces, power outage detection impacts on supply stability, difficulties in evidence collection, and inconsistent judgment accuracy—this study establishes an insulating endoscope-based non-invasive anti-theft and electricity inspection technology system. The system incorporates multi-layer insulation with electric field stress equilibrium protection structures, megapixel-level wide-angle imaging and flexible joint detection modules, along with a two-stage defect recognition and edge deployment workflow integrating pose metadata using YOLOv5. Field validation conducted during multi-site inspections demonstrated significant improvements: the theft and defect detection rate increased from 75% to 95%, single-household/equipment inspection time reduced from 2 hours to 0.5 hours, operational cost index decreased from 1.00 to 0.60, coverage rate of concealed theft points rose from 60% to 90%, and repeated detection consistency improved from 85% to 97%. The research proves that this system enables visualized inspection of blind spots such as meters, cables, cabinets, and concealed interlayers without power outages or destructive operations, effectively balancing anti-theft investigation efficiency, legal evidence validity, and operational safety.

Keywords

Insulated endoscope; Anti-theft electricity inspection; Live-line inspection; YOLOv5; Electricity usage inspection

基于绝缘内窥镜的非侵入式用电检查可视化技术及应用

孙伟军 崔勇 杨宇 葛林 白聪

国网哈尔滨供电公司, 中国·黑龙江 哈尔滨 150001

摘要

面向用电检查、反窃电稽查中隐蔽空间不可视、停电检测影响供电、窃电取证难、判定不稳等痛点, 本文构建绝缘内窥镜非侵入式反窃电与用电检查技术体系, 覆盖多层绝缘与电场应力均衡的防护结构、百万像素级广角成像与柔性关节探测模块, 以及融合姿态元数据的 YOLOv5 两级缺陷识别与边缘部署流程。在多地用电检查与反窃电现场完成工程验证, 结果表明, 窃电与缺陷识别率由 75% 提升至 95%, 单户/单设备检测时间由 2 h 降至 0.5 h, 运维成本指数由 1.00 降至 0.60, 隐蔽窃电点可达覆盖率由 60% 升至 90%, 重复检测一致性由 85% 升至 97%。研究证明该体系能够在不停电、非破坏条件下实现电表、线缆、柜体、隐蔽夹层等窃电盲区的可视化巡检, 有效兼顾反窃电稽查效率、取证合法性、作业安全。

关键词

绝缘内窥镜; 反窃电稽查; 带电巡检; YOLOv5; 用电检查

1 引言

城市用电供用全过程均是人工巡检、停电拆除、常规设备检测, 受封闭式计量箱、墙柜隔间、天棚吊顶、电缆沟道、包封混凝土、柜内夹层等狭小隐蔽空间的局限性影响, 致使红外测温技术、接触法测温技术不能覆盖私接、短路窃电、剪线窃电、变容窃电等关键窃电部位和故障边界, 上述的潜伏性窃电、绝缘击穿、过热故障不易发现。带电接近作业又受强电场、锐利金属边缘与狭窄通道等约束, 传统探棒

与贴附式传感器在可进入性与安全裕度之间难以取得平衡。更为关键的是, 依赖人工经验与单点读数的判定机制受光照反射与环境噪声影响, 误判与漏判风险显著上升, 导致窃电排查周期长、取证不充分、停电组织复杂。为回应高可靠供电、线损治理、反窃电攻坚需求, 本文提出以绝缘内窥镜为核心的非侵入、可视化、可取证、智能判别一体化技术路径, 通过多层绝缘与电场应力均衡保障带电接近安全, 以广角高清成像与柔性关节实现对隐蔽窃电盲区的覆盖, 并以融合姿态约束的缺陷识别算法提升窃电判定稳定性, 旨在在不影响供电、不破坏用户财物的前提下建立面向用电检查与反窃电的高效稽查体系。

【作者简介】孙伟军(1971-), 男, 中国山东莱州人, 硕士, 高级工程师, 高级技师, 从事内线计量, 线损管理, 用电检查以及反窃电研究。

2 传统用电检查与反窃电的痛点分析

常规用电检查与反窃电仍以人工巡视、开箱拆柜、停电检测与手持仪表点检为主，传统方式在隐蔽空间可达性、窃电取证有效性、检测连续性、判定可靠性方面暴露出多重制约。设备 / 装潢拆解是触及顶棚、墙体、电缆封包内窃电线路的常用手段，但解体环节易破坏用户财物、引入二次风险，且涉及停电计划，直接把稽查成本与供电中断风险推至较高水平。进一步观察电表箱、开关柜、电缆沟、吊顶夹层、水泥封包等封闭 / 隐蔽构型，可见狭小腔体与遮蔽结构使热像、可见光巡检与接触式测温难以覆盖，私拉乱接、表前 / 表后短接、电缆穿刺窃电、互感器作弊等隐蔽窃电行为往往停留在不可视区。需重点关注的是，带电检测在现场面临电场强度大、空间狭窄与金属边缘锐利等叠加风险，传统探棒与贴附式传感器的进退路径受限，作业安全裕度与误触发风险很难同时兼顾。由此推导，依靠人工视觉与单点仪表读数来进行窃电判定时，受人员经验差异、光照反射与环境噪声影响，误判与漏判概率被放大，窃电识别具有明显的不稳定性，且难以形成合法有效证据。本研究立足这些痛点，强调非侵入、可视化、可取证、智能判别能力在新型反窃电与用电检查体系中的必要性^[1]。

3 绝缘内窥镜非侵入式反窃电与用电检查技术体系构建

3.1 绝缘防护系统设计

面向电表箱、开关柜、环网柜、电缆沟、隐蔽夹层内部带电狭小空间，绝缘内窥镜的防护系统被设计为多层绝缘与电场应力均衡的组合结构，以在受限空间中提供稳定的耐受裕度。探头外层选用疏水耐磨硅橡胶或氟橡胶覆层，配合 PEEK 或 ETFE 增强护套，并在金属过渡部位布置薄层半导体涂覆，借此把尖端电场分布拉平。前端光学窗采用高硬度蓝宝石并进行防反射与亲水处理，窗体与护套之间设置倒角与环形护缘，把表面爬电路径延长并削弱边缘效应。结合室内中等污秽等级，外表面设计爬电比值不低于 16 mm per kV，金属棱边统一圆角处理到 R 不小于 0.5 mm，以压低局部场强。操作杆采用玻纤增强环氧绝缘管与复合法兰的分段式结构，对应 10 kV 保持最小空气间隙不低于 0.35 m，对应 35 kV 不低于 0.60 m，同时在杆体外表设置细密螺旋筋纹以抑制污秽沿面流动。杆体内设置电缆应力锚固与拉力释放结构，目标承载拉力达到 100 N 级，避免长期弯曲导致的绝缘疲劳。面向潮湿和粉尘环境，整机采纳双道 O 形圈与迷宫式密封加灌封胶的组合方案，密封目标对标 IP67 等级，并在壳体设置微型透气阀以抑制内腔凝露。为适配带电反窃电稽查作业，探头外覆抗跟踪材料的同时增设可更换绝缘防擦护套，配合半导体层引出的等势环把漏散电荷引导分布，从而在不牺牲视场的前提下提高作业安全裕度。材料选型还兼顾

抗跟踪指数不低于 CTI 600、阻燃等级按 UL 94 V-0 目标以及 -20 ℃至 80 ℃的耐温范围，以覆盖配电室、用户侧、电缆通道等常见稽查环境工况。

3.2 高清成像与柔性探测模块开发

面向隐蔽窃电空间的可视化需求，本研究把高清光学成像单元与柔性探测杆进行一体化设计，形成可在带电狭小隐蔽空间可靠运行的成像链路。成像单元选用百万像素级电荷耦合器件，目标分辨率设定为 1.6 MP，像元尺寸 4.5 μm，动态范围 70 dB，帧率 30 fps，以在低照度与强反射并存的柜内 / 夹层 / 电缆沟环境获得细节表达。镜头采用 110° 视场的低畸变广角结构并配置线偏振片与消光涂层，F2.8 光学通光配合 20 mm 至 300 mm 大景深，把窃电接线、短接痕迹、破缆点、接头异常、绝缘破损纳入可辨尺度。照明采用环形冷光源，色温 6500 K，显色指数不低于 80，亮度分级至 80 lm 量级，并在镜前叠加微型扩散器以提高照度均匀性。柔性探测杆运用拉索传动与中性轴导向的关节化机构，前端在两互相正交平面各实现 180° 转角，再叠加轴向旋转得到 360° 全向观察，最小弯曲半径控制在 35 mm 以适配柜体拐角、夹层弯折、电缆沟转角。杆体长度提供 0.5 m 至 5 m 的分段拼接选型，模块以绝缘卡接快速更换，外径控制在 6–10 mm 级以穿越电表箱缝隙、微创孔、电缆管孔等微小入口。为降低电磁耦合与噪声干扰，信号链路把图像在探头端完成数字化，经光电混合缆送至处理端进行时域去噪、炫光抑制与几何畸变校正，并把标准视频流与姿态元数据汇聚到上位机，为后续窃电点智能识别算法提供结构化输入^[2]。

3.3 图像智能分析算法研究

鉴于反窃电现场存在低照度、强反射与遮挡交织的现实情境，本研究把内窥镜视频流与姿态元数据作为联合输入，构建基于 YOLOv5 的窃电与缺陷识别算法框架。数据侧，围绕私拉乱接、短接窃电、破缆取电、互感器作弊、接点烧蚀、绝缘破损、异物窃电等可视征兆，采集并清洗 1000 + 张典型样本，按 7:2:1 划分训练、验证与留出集合，同时制定像素级可读的标注规范，要求框注覆盖窃电点 / 缺陷主体并标注发生部位与属性。训练阶段叠加 Mosaic 与 MixUp、色彩抖动与高光区域随机遮蔽，把强反射与炫光伪影纳入分布；为应对尺度跨度与狭窄视场，重整先验锚框、引入轻量注意力模块，并把软标签用于过渡类样本的表征。推理侧，设计两级判定策略，先在全帧完成候选框提取，再结合探头姿态与结构先验对电表箱、CT 回路、电缆终端、隐蔽夹层等重点区域进行 ROI 重评估，借此抑制误检漂移。损失项设置遵循分类与回归的联合优化思路，配套难例挖掘以缓解类别不均衡；后处理阶段运用时域一致性过滤与跨帧数据关联，把同一窃电点 / 缺陷在连续帧内进行轨迹合并与置信度重估。

4 绝缘内窥镜技术在反窃电与用电检查中的工程应用与效果评估

4.1 典型反窃电与用电检查应用案例

本文选取了线损异常、零火不平衡及用电量突增等异常用户类型，在居民小区、专变台区、电缆线路等场景中开展非接触式防窃查违工作。现场准备过程中，在电力信息采集系统及线损数据中完成户级定位的同时，以表前/表后、ct二次回路、隐蔽夹层、电缆沟、水泥封包五个目标区为稽查区域，在运维调度允许的前提下确定带电接近范围及工作路线。设备就位时，检查电表箱缝隙、检修孔、微创孔状态，安装绝缘过渡套与等势环组件，把金属边缘的局部场强进行均衡处理，再把柔性探测杆与上位机连接完成通信自检与姿态校准。探头插入环节，操作人员依靠玻纤绝缘操作杆维持规定安全距离，从缝隙、预留孔、 $\phi 8-12\text{mm}$ 微创孔缓进探头，柔性关节按中性轴导向完成连续绕弯，从而把镜面对准窃电可疑点。图像采集过程中，成像单元固定在低噪声模式运行，环形冷光源分级开启以抑制金属反射，线偏振片角度按反射强度做微调，视频流与姿态数据同步回传，上位机同时执行

时域去噪与畸变校正，形成可直接作为稽查证据的结构化帧序列^[3]。

4.2 技术效果对比评估

为验证反窃电与用电检查实效，将传统人工稽查与绝缘内窥镜体系置于统一评估口径对比，指标围绕窃电/缺陷识别率、单户检测时间、稽查成本、隐蔽点覆盖率、取证有效性展开。结果表明：绝缘内窥镜把窃电与缺陷识别率从75%提高到95%，单户/单设备检测时间由2h缩短到0.5h，稽查成本指数从1.00降低到0.60，隐蔽窃电点可达覆盖率由60%提升至90%，重复检测一致性由85%升至97%，实现高清拍照/录像固定证据，满足稽查合法性要求。这种跨指标的协同改善，源于多层绝缘与电场应力均衡结构所提供的带电非侵入作业条件，叠加广角高清成像与柔性关节构建的全视角可视场，以及融合姿态元数据的两级识别策略对窃电点的精准判定能力。作业方式从停电拆柜、破坏装潢转向不停电、非破坏、可视化取证，显著降低供电中断风险、财物损坏纠纷与二次偏差，支撑反窃电稽查模式由被动排查向主动精准取证转型。

指标	传统人工检查	绝缘内窥镜检查	改善幅度
窃电/缺陷识别率	75%	95%	+20 pp
单设备/单户检测时间	2 h	0.5 h	-75%
稽查/运维成本指数	1.00	0.60	-40%
隐蔽窃电点覆盖率	60%	90%	+30 pp
重复检测一致性	85%	97%	+12 pp
停电/破坏依赖	需要停电/拆柜	无需停电/非破坏	作业方式优化
取证效力	人工记录，证据弱	高清影音，合法有效	取证能力升级

5 结语

本文针对反窃电稽查及用电检查中存在隐蔽处不可视、停电检测影响供用电、窃电取证难等问题，提出了绝缘内窥镜非介入可视化的关键技术，并进行了验证，从绝缘防护、成像探测到智能识别形成闭环。多层绝缘与等势控制为带电非侵入稽查提供安全裕度，广角高清成像与柔性关节显著提升顶棚、夹层、表箱、电缆沟等隐蔽窃电盲区覆盖，结合姿态元数据的两级识别策略有效抑制反射与遮挡带来的窃电点误检。工程应用结果显示，该体系在不停电、非破坏条件下实现反窃电效率、识别准确率、取证合法性、作业安全性的同步提升，支撑用电检查模式由停电解体向在线精准稽查转型，降低停电风险、财物损坏与窃电漏判率。在可落地性与标准化层面，模块化杆体、IP67密封、高清取证与边缘

部署满足现场快速接入、即时取证需求，适配国网反窃电、线损治理、设备巡检全场景。后续将扩大窃电样库，开展增量学习与多模态融合，完善标准化作业与培训体系，进一步提升复杂环境下窃电点检出稳定性与工程推广价值。

参考文献

- [1] 冯顺晨, 宋文晔, 卢伟. 带电检测技术在变电运维中的应用[J]. 科技与创新, 2025,(22):201-203+210.
- [2] 任丹丹, 卢怡欣, 刘静, 楚佳慧, 张紫璇, 王爽. 利用快速多光谱内窥光学系统可视化解析活体动物组织形态与生理特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2025,45(06):1527-1533.
- [3] 张向成. 基于红外线带电检测技术的变电运维策略[J]. 光源与照明, 2025,(05):125-127.
- [4] 杨海马, 胡祥磊, 刘瑾, 张大伟, 路千. 便携式超细电子内镜成像系统设计[J]. 电子测量与仪器学报.