

Standardization and informatization path of transmission line safety management

Chenhua Kong Bo Shi Jianwei Ren Jun Zhang Fuxiang Gong

State Grid Gansu Electric Power Company Lanzhou Power Supply Company, Lanzhou, Gansu, 730000, China

Abstract

this paper focuses on the field of transmission line safety management, combined with the practice of Lanzhou power supply company of Gansu Electric Power Company of State Grid, systematically analyzes the application value of all-round double button safety fall arrester and "ohm double wing" UAV contact electroscope and grounding device. Through the construction of standardized management framework and the integration of information technology, a trinity safety management optimization path of "equipment process personnel" is proposed. The results show that the two types of new equipment can reduce the risk of high-altitude operation, improve the efficiency of power inspection and grounding, and promote the transformation of transmission line safety management mode to intelligent and accurate. This paper provides theoretical support and practical reference for the safety management innovation of power grid enterprises.

Keywords

transmission line; Safety management; Standardization; Informatization; Fall arrester; UAV electroscope

输电线路安全管理的标准化与信息化路径

孔晨华 史博 任建伟 张军 龚福香

国网甘肃省电力公司兰州供电公司, 中国 · 甘肃 兰州 730000

摘 要

本文聚焦输电线路安全管理领域, 结合国网甘肃省电力公司兰州供电公司实践, 系统分析全方位双扣式安全防坠器与“欧姆双翼式”无人机接触式验电器及接地装置的应用价值。通过标准化管理框架构建与信息化技术融合, 提出“设备-流程-人员”三位一体的安全管理优化路径。研究结果表明, 两类新型装备可降低高空作业风险, 提升验电接地效率, 推动输电线路安全管理模式向智能化、精准化转型。本文为电网企业安全管理创新提供理论支撑与实践参考。

关键词

输电线路; 安全管理; 标准化; 信息化; 防坠器; 无人机验电器

1 引言

输电线路作为电网系统的“主动脉”, 其安全运行直接关系到电力供应的稳定性与可靠性。随着特高压、超高压线路的规模化建设, 传统安全管理模式面临高空作业风险高、设备检测效率低、数据整合能力弱等挑战。国家电网公司《输电专业标准化管理考核评价规范》明确要求, 需通过标准化流程重构与信息化技术赋能, 提升安全管理效能。在此背景下, 全方位双扣式安全防坠器与“欧姆双翼式”无人机接触式验电器及接地装置作为新型安全装备, 凭借其结构创新性与功能集成性, 成为破解传统管理痛点的关键工具^[1]。前者通过双扣锁止机制与高强度材料应用, 实现高空作业防

坠保护的“零失误”; 后者依托无人机平台与接触式验电技术, 构建“空中巡检-精准验电-智能接地”一体化作业链, 显著提升带电作业安全性。本文以国网甘肃省电力公司兰州供电公司研究对象, 结合 500kV、220kV 等电压等级线路的实际应用数据, 从标准化管理框架构建、信息化技术融合、装备效能评估三个维度, 系统探讨两类装备的推广价值与优化路径, 为电网企业安全管理数字化转型提供实践范式。

2 输电线路安全管理现状与挑战

2.1 传统管理模式的局限性

传统输电线路安全管理高度依赖人工操作与机械装置, 其局限性在风险防控、作业效率与数据整合三个维度尤为突出^[2]。高空作业风险防控能力不足是首要问题。现有防坠装置普遍采用单点锁止结构, 通过单一机械卡扣实现坠落制动, 但该设计对材料耐磨性、弹簧弹性系数及操作规范性要求极高。实际运行中, 因金属疲劳导致的卡扣松动、弹簧失

【作者简介】孔晨华 (1976-), 男, 中国山东曲阜人, 本科, 高级工程师, 特技技师, 从事电力企业安全管理、超特高压输电线路施工、建设、运维及检修研究。

效,或作业人员未按规定“高挂低用”,均可能引发锁止功能失效。据行业事故统计,2020-2024年发生的输电线路高空坠落事故中,32%直接源于防坠器结构缺陷或误操作,暴露了传统装置在可靠性设计上的根本性短板。

验电接地作业效率低下是另一关键痛点。当前,输电线路停电检修前的验电与接地操作仍以人工攀爬为主,单基塔作业需耗时40-60分钟,且受地形限制显著。在山区、跨河等复杂环境中,作业人员需借助绳索、软梯等工具攀爬至导线位置,不仅体力消耗大,更因作业空间狭小、操作视角受限,导致验电接触不充分或接地线固定不稳,间接引发感应电伤人、设备误动作等次生风险。此外,人工操作效率受天气影响明显,雨雪、大风等恶劣天气下作业时间进一步延长,严重制约检修窗口期的利用率。

2.2 标准化与信息化融合的必要性

面对传统管理模式的局限性,标准化与信息化的深度融合成为破解难题的必由之路。政策层面,国家电网公司《输电线路标准化建设指南》明确提出,到2025年关键装备智能化覆盖率需达100%,并通过制定设备技术标准、作业流程规范与考核评价体系,推动安全管理向“规范统一、精益求精”方向升级。技术层面,物联网传感器可实现防坠器磨损状态、无人机验电数据等实时监测;大数据分析能挖掘设备缺陷规律、预测作业风险;5G通信技术则支撑地面指挥中心与高空作业人员的实时交互,为标准化流程执行提供技术保障^[1]。效益层面,标准化管理通过统一装备选型、操作规范与维护标准,可降低备品备件库存成本与培训成本;信息化技术通过自动化数据采集与智能决策支持,可缩短故障定位与处置时间,提升电网供电可靠性。三者协同,共同构建起“装备可靠、流程规范、数据驱动”的现代输电线路安全管理体系。

3 全方位双扣式安全防坠器的标准化应用

3.1 装备技术原理与结构创新

全方位双扣式安全防坠器的核心创新在于双扣锁止机制与高强度材料应用的协同设计。其制动系统采用内外锥体摩擦制动与碟形弹簧反作用力双重保障结构:当坠落速度超过安全阈值时,内置离心块在离心力作用下触发外锥体旋转,通过铜螺母轴向移动压紧碟形弹簧,使内外锥体表面产生高强度摩擦力,实现瞬间制动。该设计通过机械联动将动态冲击转化为静态摩擦,避免了单点锁止装置因局部磨损导致的制动失效风险。实验数据显示,其制动距离可控制在0.3m以内,制动冲击力峰值低于人体耐受极限,显著提升了坠落保护的安全性。在材料选择上,防坠器锥形壳体采用航空级7075-T6铝合金,该材料抗拉强度达450MPa,屈服强度390MPa,较传统碳钢材质重量减轻40%,同时具备优异的耐腐蚀性与抗疲劳性能。通过有限元分析优化壳体壁厚分布,在保证结构强度的前提下,将关键部位应力集中系数

降低至1.2以下,使装备使用寿命延长至8年,较传统产品提升2倍。此外,内部齿轮齿条传动系统采用40Cr合金钢渗碳淬火处理,表面硬度达HRC58-62,耐磨性提升3倍,确保长期使用后仍能保持精准传动。

3.2 标准化管理流程构建

为充分发挥装备性能,需通过标准化流程规范安装、维护与考核环节。安装规范方面,明确“高挂低用”原则,要求悬挂点承载力不低于22kN,并通过动态载荷测试验证;安全绳与锐物边缘间距需保持 $\geq 0.5\text{m}$,防止切割损伤;同时规定防坠器与安全带连接点需采用双锁止D型环,避免脱扣风险。维护标准上,建立“日检-周试-年检”三级制度:日检重点检查外壳完整性、锁止按钮灵活性;周试通过模拟坠落试验验证制动功能,要求制动时间 ≤ 0.5 秒;年检则委托专业机构进行无损检测与材料性能测试,更换达到寿命极限的弹簧与齿轮组件。考核机制将防坠器使用规范纳入班组安全绩效考核,违规操作扣分权重占比15%,并与个人奖金、评优资格挂钩,强化人员责任意识。

3.3 应用成效分析

兰州供电公司自2022年全面推广全方位双扣式安全防坠器以来,高空作业安全水平显著提升。风险防控层面,2023年高空坠落事故率降至0.02次/万公里,较应用前下降86.7%,且未发生因防坠器故障导致的事故,低于行业平均水平。成本优化方面,单基塔运维成本从年均1200元降至850元,降幅29.2%,主要得益于装备寿命延长导致的更换频率降低;同时,因防坠器故障引发的线路停运时间减少,2023年累计减少停电时长120小时,多供电量280万千瓦时,间接经济效益显著。此外,通过标准化培训与考核,作业人员规范操作率提升至98%,形成“装备可靠-流程规范-人员合规”的良性循环。

4 “欧姆双翼式”无人机接触式验电器及接地装置的信息化实践

输电线路验电接地是停电检修的核心安全环节,传统人工攀爬验电方式存在效率低、风险高、数据滞后等问题,尤其在山区、跨河等复杂地形中,作业难度与安全风险成倍增加。“欧姆双翼式”无人机接触式验电器及接地装置通过机械结构创新与信息化技术融合,实现了验电接地作业的智能化升级,为电网运维安全提供了技术支撑。以下从技术原理、管理流程与应用成效三方面展开分析。

4.1 装备技术原理与功能集成

“欧姆双翼式”装备的核心创新在于接触式验电模块、无人机平台设计与智能接地装置的协同集成。其验电模块采用“电磁吸附-电路闭合”双确认机制:无人机机械臂搭载的探针与导线接触后,电磁铁通电吸附触针,形成闭合电路,同时指示灯亮起并触发蜂鸣器,通过声光双重信号确认带电状态,避免因环境干扰导致的误判。该设计较传统感应

式验电器具有更高的抗干扰能力，尤其在多回路并行或交叉跨越线路中，可精准识别目标导线带电状态。无人机平台采用六旋翼布局，搭载高精度 IMU 惯性导航系统与 RTK 定位模块，可在风速 $\leq 10\text{m/s}$ 的条件下实现 $\pm 0.1\text{m}$ 的悬停精度。机械臂采用轻量化碳纤维材质，集成功力反馈传感器，可自动调整操作力度，避免损伤导线绝缘层。智能接地装置则创新性地集成压力传感器与无线通信模块：当接地线夹紧导线时，压力传感器实时监测夹持力（阈值设定为 $50\text{--}100\text{N}$ ），确保接触可靠；同时，接地电阻值通过 LoRa 无线模块每 5 秒上传至管理平台，超限（ $> 10\Omega$ ）时自动报警，替代传统人工巡检测量，提升数据时效性。

4.2 信息化管理流程构建

为充分发挥装备性能，需通过信息化流程规范作业环节。作业流程标准化方面，制定“无人机巡检-验电确认-接地操作-数据回传”四步法：无人机首先通过高清摄像头识别导线位置与缺陷，机械臂自动调整姿态完成验电；确认停电后，自动切换接地夹头，完成接地操作；最后将验电结果、接地电阻值、操作视频等数据回传至管理平台。该流程使单基塔作业时间从传统人工模式的 45 分钟缩短至 12 分钟，效率提升 73%。数据共享平台开发输电线路智能运维系统，集成 PMS 设备台账、验电记录、缺陷图像、接地电阻等数据，通过大数据分析建立“设备状态-作业风险”关联模型。例如，系统可自动识别频繁接地的杆塔，提示加强巡检；或根据接地电阻历史数据预测绝缘子劣化趋势，实现风险前置管控。远程指挥机制依托 5G 网络实现地面指挥中心与无人机的实时交互：指挥端可远程调整无人机飞行路径、机械臂操作参数，并接收第一视角视频流，在复杂作业中提供实时指导，应急响应速度较传统模式提升 50%。

4.3 应用成效分析

兰州供电公司自 2023 年试点应用“欧姆双翼式”装备以来，取得显著成效。效率提升层面，复杂地形验电接地覆盖率从 65% 提升至 100%，单日作业量从 8 基塔增至 25 基塔，人力投入减少 60%。精准度优化方面，机械臂操作误差率低于 0.5%，较人工操作显著降低；接地电阻监测准确率达 99.2%，因接地不良导致的事故隐患减少 80%。此外，通过数据共享平台，缺陷发现率提升 40%，故障定位时间缩短至 15 分钟以内，供电可靠性指标（SAIDI）同比下降 22%。

5 标准化与信息化融合的协同效应

标准化与信息化的深度融合，通过技术规范与数据智能的协同作用，重构了电网运维管理模式，实现了从“经验驱动”到“数据驱动”、从“人工管控”到“智能协同”的跨越。其协同效应主要体现在管理效能提升、人员能力升级与持续优化机制三方面。

5.1 管理效能提升路径

标准化与信息化融合推动管理流程再造。一方面，装备标准化为信息化管理提供了标准化数据接口，使机械作业数据可直接接入管理系统，消除人工录入误差；另一方面，流程信息化倒逼装备标准化升级，确保各环节数据兼容。例如，防坠器“日检-周试-年检”维护制度与系统自动提醒功能结合，使设备健康状态实时可查，故障响应时间缩短 60%。同时，基于大数据分析的设备健康度评估模型，通过整合验电记录、接地电阻、巡检图像等数据，可预测绝缘子劣化、防坠器弹簧疲劳等潜在故障，风险预控能力提升 40%。

5.2 人员能力升级策略

标准化与信息化融合对人员能力提出新要求，需通过培训与考核机制实现技能迭代。技能培训方面，开展“装备操作+数据分析”复合型培训，如防坠器结构原理与维护标准、无人机飞行规范与图像识别、运维系统数据录入与风险评估等课程，使一线人员具备“机械操作-数据解读-决策支持”全链条能力。绩效考核方面，将装备使用规范、数据录入准确率等指标纳入考核体系，并与奖金、晋升挂钩，激励员工主动参与管理创新。例如，兰州供电公司通过上述策略，使一线人员复合型技能达标率从 65% 提升至 92%，人为操作失误率下降 75%。

5.3 持续优化方向

标准化与信息化融合需持续迭代以适应技术发展。装备迭代层面，研发轻量化防坠器、AI 识别验电器，进一步降低作业强度与风险；系统集成层面，推动运维系统与 PMS、ERP 等平台对接，实现设备台账、工单流转、物资管理等全业务数据贯通，打破信息孤岛，提升决策效率。例如，通过系统集成，兰州供电公司物资调配周期从 3 天缩短至 8 小时，运维成本降低 18%。

6 结论

本文通过分析全方位双扣式安全防坠器与“欧姆双翼式”无人机接触式验电器及接地装置的应用实践，验证了标准化管理框架与信息化技术融合对输电线路安全管理的提升作用。研究结果表明，两类装备可显著降低高空作业风险、提升验电接地效率，推动管理模式向智能化、精准化转型。未来，需持续优化装备性能、深化数据应用，为电网企业高质量发展提供安全保障。

参考文献

- [1] 齐东亮.输电线路防雷[C]//第三届(2012)全国架空输电线路技术研讨会论文集. 2012:2122-2124.
- [2] 高腾,宋福根.输电线路树闪故障分析[J].电气开关,2023,61(3):24-27.
- [3] 唐茂林,王超,陈刚.输电线路管理信息系统设计[J].电力自动化设备,2004,24(10):58-61.