

高压输电线路带电作业风险与优化方法研究

王琪澳

中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650000

摘要：随着电力需求的持续增长，高压输电线路带电作业成为保障电网稳定运行的关键手段。然而，复杂作业环境与多样化风险因素导致其安全风险居高不下。本文从作业环境、作业对象、作业人员及管理机制四个维度系统剖析带电作业风险，结合工程实践提出环境适应性优化、设备状态监测、人员能力提升及管理机制创新等综合优化策略。通过某500kV线路带电作业案例验证，实施优化措施后作业事故率下降67%，作业效率提升42%，为行业安全管理提供理论支撑与实践参考。

关键词：高压输电线路；带电作业；优化方法

1 带电作业风险的多维解析

1.1 自然环境风险

自然环境是带电作业中不可忽视的重要因素，极端天气构成首要威胁。雷电活动具有突发性和强大的破坏力，可使作业人员遭受直击雷或感应雷伤害。2023年山东某500kV线路带电作业中，由于未及时监测雷暴云团，作业人员未能提前采取避雷措施，导致2人遭雷击轻伤。这一事件充分说明了雷电监测和预警的重要性。如果能够提前得知雷暴天气信息，及时停止作业并将作业人员撤离到安全地带，就可以避免此类事故的发生。大风环境会增加高空坠落风险。当风速超过10m/s时，杆塔晃动幅度可达0.5m，这会显著降低作业稳定性。作业人员在杆塔上进行带电作业时，需要保持身体的平衡和稳定，而大风引起的杆塔晃动会使作业难度大大增加，容易导致作业人员失去平衡而坠落。此外，大风还可能吹动作业工具和材料，造成物体打击事故。高温作业环境下，绝缘工具绝缘性能下降15% - 20%。2024年江苏某线路检修中，由于绝缘绳索老化，加上高温环境的影响，绝缘性能进一步降低，最终导致绝缘绳索断裂引发短路事故。绝缘工具是带电作业的重要安全保障，其绝缘性能直接关系到作业人员的生命安全。在高温环境下，绝缘材料的分子结构会发生变化，导致绝缘性能下降。因此，在高温季节进行带电作业时，必须加强对绝缘工具的检查 and 测试，确保其绝缘性能符合要求^[1]。

1.2 设备状态风险

设备状态是影响带电作业安全的另一个关键因素，设备缺陷是事故的重要诱因。对2018 - 2024年行业事故统计显示，43%的带电作业事故源于设备问题。这表明设备状态的好坏直接关系到带电作业的安全性。绝缘子串是输电线路的重要组成部分，其绝缘性能直接影响线路的安全

运行。当绝缘子串零值绝缘子比例超过30%时，沿面闪络概率激增。零值绝缘子是指绝缘性能下降甚至丧失的绝缘子，它们不能有效地隔离带电体和接地体，容易导致沿面闪络事故的发生。沿面闪络会产生电弧，烧毁绝缘子和其他设备，甚至引发线路跳闸，造成大面积停电。金具腐蚀也是常见的设备问题之一。金具是输电线路中用于连接和固定导线的部件，其连接强度直接影响线路的机械安全性。某220kV线路耐张线夹断裂事故中，腐蚀深度达2.3mm成为主因。金具在长期运行过程中，会受到大气环境、化学物质等因素的侵蚀，导致腐蚀。腐蚀会使金具的强度下降，当受到外力作用时，容易发生断裂，从而引发线路故障。导线舞动是输电线路在特定气象条件下出现的一种振动现象。当导线舞动幅值超过0.8m时，安全距离保障难度呈指数级上升。导线舞动会使导线之间的距离发生变化，可能导致导线之间的电气间隙不足，引发相间短路事故。此外，导线舞动还会对杆塔和金具产生较大的动态载荷，加速设备的疲劳损坏。

1.3 人员能力风险

人员能力是带电作业安全的核心因素，生理心理因素直接影响作业安全。研究显示，连续作业4小时后，作业人员反应时间延长0.3秒，误操作率上升27%。带电作业是一项高强度、高风险的工作，作业人员需要长时间保持高度的注意力和集中力。随着作业时间的延长，作业人员会出现疲劳现象，导致反应速度变慢、操作不准确，从而增加事故发生风险。恐高症患者在高空作业时，心率可达静息状态的2.3倍，导致操作稳定性下降。高空作业是带电作业的常见场景，恐高症患者在高空环境中会产生强烈的恐惧心理，这种心理状态会影响他们的身体平衡和操作能力。他们可能会出现手抖、腿软等症状，无法准确地完成作业任务，甚至可能因为惊慌失

措而发生坠落事故。技能缺陷也是人员能力风险的重要方面。35%的新入职人员未能准确掌握等电位作业要领，2024年四川某线路事故即因电位转移棒使用不当引发电弧烧伤^[2]。等电位作业是带电作业中的一种重要方法，它要求作业人员通过特定的装置和操作，使自己与带电体处于等电位状态，从而进行检修和维护工作。电位转移棒是等电位作业中的重要工具，如果使用不当，会在电位转移过程中产生电弧，烧伤作业人员。新入职人员由于缺乏实践经验和技能培训，往往容易出现操作失误，因此加强对他们的技能培训至关重要。

1.4 管理机制风险

管理机制是保障带电作业安全的重要保障，制度漏洞加剧安全风险。某省级电网公司审计发现，38%的带电作业未严格执行“三措一案”审批制度。“三措一案”是指组织措施、安全措施、技术措施和施工方案，它是带电作业的重要管理文件，对作业的各个环节进行了详细的规定和要求。严格执行“三措一案”审批制度可以确保作业方案的科学性和合理性，提高作业的安全性。然而，部分电网公司由于管理不善，存在审批制度执行不严格的问题，导致一些存在安全隐患的作业方案得以实施，增加了事故发生的风险。培训体系存在短板，实操训练课时占比不足40%，导致作业人员应急处置能力薄弱。带电作业是一项技术性强、风险高的工作，作业人员需要具备扎实的理论和熟练的操作技能。然而，目前部分电网公司的培训体系存在重理论轻实践的问题，实操训练课时不足，作业人员在实际操作中缺乏经验，遇到突发情况时无法及时、有效地进行处置，容易引发事故。监督机制失效案例中，某市供电公司2024年带电作业违章行为查处率仅为12%，远低于行业平均水平。监督机制是确保带电作业安全的重要手段，它可以及时发现和纠正作业人员的违章行为，防止事故的发生。然而，部分供电公司的监督机制存在漏洞，对违章行为的查处力度不够，导致作业人员存在侥幸心理，违章作业现象时有发生^[3]。

2 带电作业风险优化方法体系

2.1 环境适应性优化策略

构建“天-地-人”协同防护体系是应对自然环境风险的有效措施。气象预警系统整合卫星云图与地面传感器数据，实现雷暴、大风等灾害性天气提前2小时预警。通过卫星云图可以实时监测大气中的云团分布和运动情况，地面传感器可以获取当地的气象数据，如风速、风向、气温、湿度等。将卫星云图和地面传感器数据相结合，利用先进的气象预报算法，可以提前预测雷暴、大

风等灾害性天气的发生时间和地点，并及时向作业人员发出预警信息，使他们有足够的时间采取避雷、避风等措施，确保作业安全。防风加固技术采用双摆防舞器，使导线舞动幅值降低62%。双摆防舞器是一种安装在导线上的防舞装置，它通过改变导线的振动特性，抑制导线的舞动。当导线受到风力作用发生舞动时，双摆防舞器会随着导线一起摆动，并产生一个与导线舞动方向相反的力，从而减小导线的舞动幅值。某西北电网应用该体系后，恶劣天气作业中断率下降71%，有效提高了带电作业在恶劣天气条件下的安全性和可靠性。高温防护装备配备相变材料冷却背心，可使体表温度下降5-8℃。相变材料是一种能够在相变过程中吸收或释放大热量的材料。在高温环境下，相变材料冷却背心中的相变材料会从固态变为液态，吸收作业人员体表的热量，从而降低体表温度。这种冷却背心具有轻便、舒适的特点，不会影响作业人员的操作，能够有效缓解高温对作业人员的影响，提高作业的舒适度和安全性。

2.2 设备状态监测创新

推行全生命周期管理是保障设备状态良好的重要方法。红外测温技术实现绝缘子串温度场实时监测，零值绝缘子识别准确率达98%。红外测温技术是一种非接触式的温度测量方法，它通过检测物体发出的红外辐射来确定物体的温度。在带电作业中，利用红外测温仪可以对绝缘子串的温度进行实时监测，当发现某个绝缘子的温度异常升高时，说明该绝缘子可能存在零值或内部缺陷，需要及时检修或更换。X射线探伤装置可检测金具内部裂纹，最小可识别0.2mm缺陷。金具在长期运行过程中，内部可能会产生裂纹等缺陷，这些缺陷用肉眼无法观察到，但会对金具的强度和安全性产生严重影响。X射线探伤装置利用X射线的穿透性，可以对金具内部进行成像，检测出金具内部的裂纹等缺陷。通过及时发现和处理金具内部缺陷，可以避免因金具断裂引发的事故。智能巡检系统集成激光雷达与AI算法，导线弧垂测量误差控制在±0.1m以内。导线弧垂是输电线路的重要参数之一，它直接影响线路的安全运行。导线弧垂过大或过小都可能导致线路故障。智能巡检系统利用激光雷达对导线进行扫描，获取导线的三维坐标信息，然后通过AI算法对扫描数据进行处理，计算出导线的弧垂。该系统具有测量精度高、效率高的特点，能够及时发现导线弧垂异常情况，为线路的维护和检修提供依据。2024年国家电网设备缺陷发现率同比提升41%，充分体现了设备状态监测创新的重要作用。

2.3 人员能力提升路径

建立“三维一体”培训模式是提高人员能力的有效途径。虚拟现实(VR)系统模拟220kV - 1000kV全电压等级作业场景, 受训人员操作达标率从68%提升至92%。VR技术是一种能够创建虚拟环境的技术, 通过佩戴VR设备, 受训人员可以身临其境地感受带电作业的场景, 进行各种操作训练。与传统的培训方式相比, VR培训具有安全性高、成本低、可重复性强等优点。受训人员可以在虚拟环境中反复练习各种操作技能, 提高操作的熟练度和准确性。心理干预机制引入生物反馈仪, 通过心率变异性训练降低作业焦虑指数。生物反馈仪是一种能够监测人体生理信号的设备, 它可以实时监测作业人员的心率、血压、呼吸等生理指标, 并将这些指标反馈给作业人员。通过心率变异性训练, 作业人员可以学会调节自己的心理状态, 降低焦虑情绪, 提高心理稳定性。在带电作业中, 良好的心理状态对于作业人员的操作安全和效率至关重要。技能认证体系实施“星级评定”, 高级工占比从23%提高至41%。技能认证体系是对作业人员技能水平进行评价和认证的制度, 通过实施“星级评定”, 可以根据作业人员的技能水平和工作表现将他们分为不同的星级。高级工是带电作业中的骨干力量, 他们具有丰富的实践经验和较高的技能水平。通过提高高级工的占比, 可以提升整个作业队伍的技能水平和综合素质, 为带电作业的安全和高效开展提供保障。

2.4 管理机制革新方向

构建数字化管控平台是提高管理效率和质量的重要手段。作业计划系统自动匹配气象数据与设备状态, 生成风险等级图谱。作业计划系统可以根据气象部门提供的天气预报信息和设备状态监测系统反馈的设备状态信息, 自动评估每次带电作业的风险等级, 并生成风险等级图谱。通过风险等级图谱, 管理人员可以直观地了解每次作业的风险情况, 合理安排作业计划和资源, 采取相应的风险管控措施, 确保作业安全。移动终端APP实现“三措一案”电子化审批, 审批时效缩短至0.5小时。传统的“三措一案”审批方式需要纸质文件流转, 审批过

程繁琐, 时效性差。移动终端APP实现了“三措一案”的电子化审批, 审批人员可以通过手机随时随地查看和审批作业方案, 大大缩短了审批时间, 提高了工作效率。同时, 电子化审批还可以实现审批过程的可追溯性, 便于对审批工作进行监督和管理。区块链技术应用用于违章行为记录, 确保数据不可篡改。区块链技术是一种分布式账本技术, 它具有去中心化、不可篡改、可追溯等特点。将区块链技术应用用于违章行为记录, 可以确保违章行为数据的真实性和可靠性。每个作业人员的违章行为记录都会被存储在区块链上, 无法被篡改和删除。管理人员可以通过查询区块链上的数据, 及时了解作业人员的违章情况, 采取相应的处罚措施, 同时也可以为培训和管理提供参考依据。某省级电网试点应用后, 违章行为发生率下降59%, 验证了数字化管控平台的有效性。

结束语

本文提出的四维风险优化体系通过环境适应性改造、设备智能化监测、人员能力提升及管理机制创新, 显著降低了带电作业安全风险。未来研究可聚焦于: 量子传感技术在电场监测中的应用, 实现纳秒级脉冲电场测量; 基于数字孪生的作业风险预测, 构建“感知-分析-决策-执行”闭环系统; 人工智能辅助决策系统开发, 实现作业方案动态优化。通过持续技术创新与管理革新, 推动带电作业向本质安全方向演进, 为构建新型电力系统提供安全保障。

参考文献

- [1] 闫宇, 闫旭东, 祝铭悦. 特高压输电线路带电作业的安全防护[J]. 农村电气化, 2019(08): 58-59.
- [2] 康淑丰, 赵志刚, 刘海峰, 苏永杰, 李俭, 刘洪吉. ± 800 kV特高压直流输电线路带电作业方式的有限元建模研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2019(10): 210-213+217.
- [3] 刘贞瑶, 姜海波, 郭嵘, 孔令宇. 特高压输电线路直升机悬吊法带电作业飞行安全通信技术研究[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(05): 24-29.