

[智能监测]

基于智能监测技术的输电线路运维策略优化研究

文/龙红波¹ 尼玛² 罗福星² 万泽润² 尹李健¹

1. 河南诚尔泽电力科技有限公司; 2. 国网西藏电力有限公司

随着电力系统规模的扩大与运行环境的复杂化，输电线路运维面临更高挑战。传统运维模式在应对极端天气、复杂地形及高负荷运行时，效率低、响应慢等问题愈发突出，难以满足现代电网对安全稳定运行的严苛需求。智能监测技术的发展为运维策略优化提供了新路径，通过实时感知线路状态、精准分析数据，可显著提升运维效率与可靠性。深入探讨智能监测技术运维策略优化方向，为电力企业提供切实可行的参考方案，助力推动电网运维向智能化、高效化发展。

输电线路是电力系统的核心组成部分，其安全稳定运行直接关系到电力供应的连续性与可靠性，是保障社会生产生活正常运转的重要基础。传统依赖人工巡检的运维模式，在面对这些新情况时已显滞后，难以实现对线路状态的全面掌控和及时响应。智能监测技术借助先进的传感器、通信与数据分析手段，能够实现对线路运行状态的实时、精准监测，为运维策略的优化奠定坚实的数据基础。研究基于智能监测技术的输电线路运维策略优化，对于提升电网运维水平、保障电力系统安全稳定运行具有重要的现实意义和应用价值。

输电线路运维现状及问题分析

1. 传统运维模式概述

传统输电线路运维以定期巡检、预防性试验与故障检修为核心构成。定期巡检按照固定的时间周期，组织运维人员通过徒步、车辆搭载或直升机巡航等多种方式对输电线路进行实地检查，主要依靠运维人员的肉眼观察，并辅以望远镜、红外测温仪等简单检测工具来发现问题。

2. 传统运维模式存在的问题

巡检效率低下：人工巡检受限于人员体力、交通条件以及自然环境等多种因素，巡检速度相对缓慢，单日巡检里程有限，难以实现对输电线路的全域无死角覆盖。对于山区、林区和沼泽等地形复杂的区域，巡检人员不仅行进困难，还可能面临野生动物侵袭、迷路等安全风险，难以满足快速发现线路隐患的实际需求。

故障发现滞后：传统巡检主要依靠人工肉眼观察，对于一些细微的设备缺陷以及早期的故障隐患往往难以察觉。这些隐性问题的初期可能不会影响线路正常运行，但随着时间推移会逐渐恶化，最终引发严重故障，导致故障发现不及时，延误最佳维修时机，大幅增加故障发生的风险。

运维成本高昂：定期巡检与预防性试验需要投入大量的人力、物力和财力。人力成本在总支出中占比很大，除了基本工资，野外巡检人员还需支付高温、高寒等特殊环境的津贴，这些专项费用每年都有明显增长。同时，由于作业强度大，人员流动较为频繁，重新招聘与培训产生的隐性成本也不容忽视^[1]。物力成本的构成同样复杂，高准确度检

测设备需要定期校准，这部分费用是一笔不小的开支，若是进口设备，还需承担额外的相关费用。

基于智能监测技术的输电线路运维策略优化

1. 运维决策优化

基于实时监测数据的故障预警：智能监测系统通过遍布线路的传感器实时采集导线温度、接头电阻、绝缘子泄漏电流和杆塔倾斜度等运行数据传输至监控中心的大数据平台。平台运用大数据分析 with 人工智能算法对数据进行实时分析和动态建模，当某项数据超出预设的安全阈值时，系统自动触发故障预警机制向运维管理人员发出信息。运维人员可根据预警信息的紧急程度，及时采取相应的解决措施，将故障消灭在萌芽状态，避免故障发生或扩大。

状态评估与预测性维护：利用智能监测系统积累的海量历史运行数据和实时采集的状态数据，结合设备出厂参数、设计寿命和运行环境特征，构建输电线路设备的状态评估模型。通过对设备的各项监测指标进行加权分析和综合评估，量化设备的健康指数，精准判断设备处于健康状态、亚健康状态还是故障状态。对处于亚健康状态的设备，提前制定个性化的维护计划，实施预防性维护，最大限度降低突发故障风险，保障线路的绝缘性能和机械强度始终处于安全水平。

优化运维资源配置：依据智能监测系统提供的线路实时运行状态数据和故障风险评估结果，将输电线路划分为不同的风险等级区域，并针对不同风险等级制定差异化的运维方案。对运行状态稳定、故障风险低的低风险区线路，适当延长巡检周期，减少巡检人员和设备的投入，仅保留必要的在线监测；对故障风险高的高风险区线路，增加巡检频次，配备经验丰富的专业技术人员和先进的检测设备，在保证运维质量的前提下，有效降低运维成本。

2. 巡检策略优化

智能巡检技术应用：融合无人机巡检、机器人巡检与传统人工巡检三种方式，构建多元化、立体化的巡检体系。无人机巡检依托其灵活机动特点，适用于山区、跨江河和森林等地形复杂区域的输电线路巡检，通过搭载各种设备快速完成对线路的全景扫描和精细拍摄，单次飞行可覆盖数十公里线路，大幅提升巡检效率。机器人巡检则分为地

面巡检机器人和带电巡检机器人，主要适用于变电站、城市密集区等特殊环境。传统人工巡检作为补充，主要负责对智能设备发现的疑似缺陷进行现场核实和处理，三种巡检方式协同配合，提升巡检覆盖面与效率。

巡检路径规划与优化：结合地理信息系统（GIS）构建输电线路的三维数字模型，将线路的杆塔位置、导线走向、周边地形地貌和气象条件等信息融入模型中。运用智能优化算法，根据线路的设备分布密度、历史故障发生频率和当前风险等级等因素，自动规划最优的巡检路线^[2]。同时，系统可依据智能监测系统实时传输的线路状态数据，动态调整巡检路径，如当某段线路发出故障预警时，自动将该区域纳入优先巡检范围，提高巡检的针对性和有效性。

3. 故障处理策略优化

快速故障定位与诊断：智能监测系统在输电线路发生故障时，通过分布在线路不同位置的电流互感器、电压互感器等电气量传感器，采集故障瞬间产生的电流、电压行波信号和暂态量数据。利用行波故障定位原理，分析行波在输电线路中的传播速度和时间差，精确计算出故障点的位置，定位准确度可达 $\pm 30\text{ m}$ 。同时，结合人工智能算法快速判断故障类型，为故障处理提供准确依据。

制定个性化故障处理方案：根据实际因素，由智能决策系统初步生成多种故障处理备选方案。组织运维专家对备选方案进行评估和优化，综合考虑实际问题，选择最优的故障处理方案。对于不同类型的故障，采用差异化的处理方法，如对于导线断股故障，若断股比例较小，可采用带电修补的方式；若断股严重，则需安排停电更换导线等，确保故障处理过程安全可控。

故障处理过程实时监控与反馈：在故障处理过程中，通过智能设备等，对处理现场的作业情况进行实时监控，监控中心可实时观看现场视频画面，掌握故障处理进度、人员操作规范程度和设备状态变化。现场运维人员通过便携式终端将处理过程中遇到的新问题、设备实际状况等信息及时反馈给监控中心，专家团队根据反馈信息远程指导现场作业，对故障处理方案进行动态调整和优化，确保故障处理工作高效、安全地完成，缩短故障恢复时间^[3]。

智能监测技术应用面临的挑战

1. 技术成熟度不足

部分传感器在极端环境下的稳定性有待提升，如在-40℃以下的严寒地区，锂电池供电的传感器续航能力会下降很多；在强电磁干扰的变电站附近，无线通信模块的数据传输丢包率高达15%。数据融合算法也存在短板，不同类型传感器的监测数据之间的关联性分析并不准确，难以形成全面的状态评估。更关键的是，现有算法难以精准挖掘不同监测数据之间的内在关联，使得对设备或线路的状态评估往往停留在局部层面，无法形成全面、系统的判断，这在复杂故障诊断时尤为明显，容易出现误判或漏判。

2. 成本投入压力大

智能监测系统的初始建设成本较高，一套覆盖100 km线路的系统投入近几百万元，对于部分经济欠发达地区的电力企业而言，一次性投入压力较大。后期维护成本也不容忽视，传感器的年均故障率约8%，更换和校准费用也非常高；通信网络的流量费用和平台升级费用每年也是不小的开支；系统平台需要根据技术发展不断升级优化，相关的研发与维护费用也成为企业长期的财务负担。

3. 人才队伍建设滞后

现有运维人员多擅长传统巡检和手工操作，缺乏数据分析、智能设备运维等技能，仅1/3的人员能熟练使用大数据平台和无人机巡检系统。高校和职业院校的相关专业设置滞后，人才培养速度跟不上技术发展需求，导致既懂电力系统又掌握信息技术的复合型人才缺口较大^[4]。企业内部的培训机制也不够完善，现有培训多以理论讲解为主，缺乏实际操作训练，员工在面对复杂的智能设备与系统时，技能提升缓慢，难以满足实际工作中对复合型人才的需求。

4. 数据安全风险凸显

智能监测系统的广泛应用使得数据安全问题日益突出。系统连接的设备数量庞大且分布广泛，部分野外部署的传感器防护措施薄弱，容易成为网络攻击的突破口，一旦遭受恶意入侵，可能导致监测数据被篡改或窃取，甚至影响电力系统的正常运行。数据治理机制也会存在不完善的问题，对于安全风险的影响更大。电力监测数据包含大量敏感信息，但许多企业尚未建立完善的数据分级管理与加密制度，数据存储与传输过程中存在泄露风险。

应对挑战的对策建议

1. 加强技术研发与创新

加大对极端环境传感器的研发投入，开发耐寒、抗电磁干扰的新型传感器，提升设备稳定性；攻关数据融合算法，引入深度学习技术提高多源数据关联分析的准确率，目标将关联分析准确率提升至90%以上。同时，推动产学研合作，建立联合实验室，加速技术成果转化，缩短从实验室到工程应用的周期。

2. 优化成本管理方案

采用“分步建设、逐步推广”的策略，优先在故障高发区和重要线路部署智能监测系统，再逐步扩展至全网，降低一次性投入压力。探索“建设—运营—维护”一体化服务模式，由第三方企业投资建设系统，电力企业按服务年限付费，年均费用可控制在初始投入的10%以内，减轻财务负担。此外，通过规模化采购降低设备成本，联合多家电力企业集中招标，可使传感器采购价格降低15%~20%。

3. 健全人才培养机制

与高校合作开设“智能输电运维”专业方向，增设大数据分析、人工智能和无人机应用等课程，每年培养500~1 000名专业人才。建立企业内部“师带徒”培养体系，选拔技术骨干担任导师，通过实操训练提升员工技能^[5]，计划三年内使复合型人才占比提升50%。定期组织跨企业交流培训，邀请行业专家和厂商技术人员授课，分享先进经验和动态，拓宽员工视野。

4. 构建数据安全防护体系

建立全生命周期的数据安全管理制度，从数据采集、传输、存储到应用的每个环节都设置适当的安全防护措施。为野外部署的传感器加装物理防护外壳和加密芯片，防止设备被恶意篡改或非法接入。在数据传输过程中，采用端到端加密技术，确保数据在传输途中不被窃取或篡改。对于数据存储，实施分级存储策略，将敏感数据存储在安全级别的服务器中，并定期进行数据备份和容灾演练，保障数据的完整性和可用性。

完善数据安全管理制度，成立专门的数据安全管理部门，负责制定数据安全规范和应急预案。定期对员工进行数据安全培训，提高员工的数据安全意识，

(下转第82页)

良好的绝缘性能，满足126 kV母线的使用要求。



图7 试验照片

结束语

126 kV GIS用母线端头屏蔽结构的设计改进，并利用Ansys软件对优化后的结构进行电场仿真计算。计算结果表明，更改后的屏蔽罩满足使用要求。

通过绝缘试验，进一步验证优化后结构的合理性。此外，通过结构优化，126 kV GIS用母线端头屏蔽结构更为简单，生产成本和装配成本都大大降低，实现零件循环利用，起到节能增效的作用。EA

(收稿日期：2024-11-14)

参考文献

- [1] 曹旺华. 浅谈母线故障事故的分析与处理[J]. 中国电机技术版, 2012(2): 17-19.
- [2] 李彦彰, 陈梦, 刘亚男, 等. 气体绝缘母线动态热路模型的研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(12): 184-189.
- [3] 范广伟, 樊楚夫, 黄实, 等. 气体绝缘隔离开关开合母线转换电流试验的分析[J]. 高压电器, 2017, 53(4): 215-219.
- [4] 韩明明, 李清泉, 刘洪顺, 等. 气体绝缘变电站母线结构参数对外壳暂态过电压影响分析[J]. 电工技术报, 2015, 30(22): 239-246.
- [5] 易洋. 开关柜母线的设计与仿真计算[J]. 价值工程, 2017, 21(72): 170-172.
- [6] 武海晶, 王延飞. 550 kV母线电场分析及结构优化[J]. 山东电力高等专科学校报, 2023, 26(6): 16-19.
- [7] 张杭, 郝学东. 一种电流互感器内部结构改进设计[J]. 电气时代, 2020(3): 58-60.
- [8] 李禾, 王闯, 刘鹏, 等. 1 000 kV特高压交流变电站铝管母线末端屏蔽方式研究[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2562-2568.

(上接第76页)

避免因人为操作失误导致的数据泄露。也要加强与网络安全企业的合作，引入先进的入侵检测系统和安全态势感知平台，实时地对系统的安全状态进行监测。

结束语

基于智能监测技术的输电线路运维策略优化，是电力行业向智能化转型的必然趋势。通过构建“感知—分析—决策—执行”的闭环运维体系，实现从被动抢修到主动预防的转变，显著提升线路可靠性、运维效率和管理水平。未来，随着5G、物联网和数字孪生等技术的发展，输电线路运维将向“全域感知、智能决策、自主执行”方向演进。电力企业应抓住技术变革机遇，持续推进运维策略优化，为构建安全、高效和绿色的现代电力系统提供坚实保障。EA

(收稿日期：2025-07-18)

参考文献

- [1] 田智多. 基于智能电网技术的输电线路状态监测及故障诊断[J]. 大众用电, 2025, 40(4): 65-66.
- [2] 刘嘉维, 周雪丽. 基于物联网技术的输电线路智能监测系统设计与实现[J]. 电子技术, 2025, 54(2): 356-357.
- [3] 施陆, 张谕辰. 智能输电线路中的在线监测技术分析[J]. 集成电路应用, 2025, 42(2): 226-227.
- [4] 郑琛, 陈斌, 姚茜嫒, 等. 基于物联网技术的输电线路监测与智能预警系统设计[J]. 电气时代, 2025, (1): 99-101+124.
- [5] 黄少强. 智能电网输电线路中的在线监测技术[J]. 光源与照明, 2024(11): 75-77.