

电力工程智能运维体系构建

王文强

中国能源建设集团科技发展有限公司 天津 300000

摘要: 电力工程智能运维体系通过集成物联网、大数据、人工智能等前沿技术,构建“状态感知-数据融合-智能分析-决策优化”的闭环运维新模式。该体系突破传统运维局限,提升故障识别效率、降低成本、加快响应速度并强化风险管控。其架构设计注重模块化、可扩展性、安全性与实时性,关键技术涵盖数据驱动决策、数字孪生、智能算法优化等。面对挑战,需提升数据质量、增强算法可解释性、促进跨部门协同并推动政策与生态创新。

关键词: 电力工程;智能运维;体系构建

引言:随着电力工程的快速发展与电网规模的不断扩大,传统运维模式已难以满足高效、精准、安全的运维需求。在此背景下,电力工程智能运维体系应运而生,其通过融合物联网、大数据、人工智能等先进技术,实现对设备状态的实时监测、故障预警与智能决策。智能运维体系的构建,不仅有助于提高电力系统的可靠性与稳定性,还能降低运维成本,推动电力行业向智能化、数字化转型,具有重要的现实意义与应用价值。

1 电力工程智能运维体系理论基础

1.1 智能运维的核心概念

(1) 定义与内涵:指融合物联网、大数据、人工智能等技术,构建“状态感知-数据融合-智能分析-决策优化”的闭环运维模式。通过实时采集设备运行参数,经算法模型分析实现故障预警与寿命预测,核心是从“经验依赖”转向“数据驱动”,支撑“预知维修”与“精准运维”。(2) 与传统运维的对比分析:效率上,突破人工巡检局限,某系统使故障识别效率提升3倍;成本上,可降低人工成本30%-50%,减少过度运维支出;响应速度上,将故障响应从“小时级”压缩至“分钟级”,如医院停电响应从45分钟缩至90秒;风险管控上,实现早期异常识别,避免传统模式“隐患难防”问题。

1.2 关键技术支撑

(1) 数据采集与感知技术:部署振动、红外等200+类传感器,结合边缘计算实现毫秒级数据采集与预处理,如安庆电厂通过物联网终端自动采集检修数据,解决传统数据不准确问题。(2) 数据分析与挖掘技术:依托大数据平台整合多源数据,通过LSTM、CNN等算法实现健康度预测与故障诊断,某模型可提前7天预警设备故障。(3) 智能决策与控制技术:构建数字孪生模型映射设备状态,结合专家系统生成最优方案,安庆电厂通过故障数字孪生机制实现精准诊断。(4) 通信与安全技术:以5G实现低

时延传输,通过区块链构建设备身份标识,结合国密算法保障数据安全,支撑跨系统数据互通^[1]。

2 电力工程智能运维体系架构设计

2.1 总体架构设计原则

(1) 模块化:按功能将体系拆解为独立模块,如数据采集模块、分析模块等,模块间通过标准化接口衔接,便于单独升级或替换,降低系统维护复杂度,例如可独立更新AI中台的算法库而不影响其他层级运行。(2) 可扩展性:架构预留接口与资源冗余,支持接入新设备(如新型传感器)、拓展新功能(如碳足迹监测),适配电力系统规模扩大与业务需求变化,满足未来新能源场站大量接入的运维需求。(3) 安全性:从数据传输(加密协议)、存储(权限管理)到应用(漏洞防护)全流程设防,结合区块链技术确保数据不可篡改,抵御网络攻击,保障电网运维数据与控制指令安全。(4) 实时性:优化传输链路(如5G专网)与数据处理流程,减少数据延迟,确保设备异常信号、故障预警等信息实时反馈,支持毫秒级运维决策,避免故障扩大。

2.2 分层架构设计

(1) 感知层:部署振动传感器、红外热像仪、智能电表等设备,实时监测变压器、线路等核心设备的温度、振动、绝缘状态,同时采集风速、湿度等环境数据,实现设备状态与环境信息的全面感知,为后续分析提供基础数据。(2) 传输层:采用5G、光纤、LoRa等通信技术,遵循IEC61850等电力行业标准协议,将感知层采集的数据标准化传输,解决不同设备数据格式不兼容问题,确保数据高效、稳定传输至平台层,同时保障偏远场站数据的可靠互通。(3) 平台层:包含数据中台与AI中台:数据中台负责数据存储(分布式数据库)、清洗(剔除异常值)、融合(整合多源数据),形成标准化数据集;AI中台搭建算法库(含随机森林、LSTM等算法),提供模型

训练、部署功能，为应用层提供智能分析能力。(4)应用层。基于平台层支撑，开发故障预测（提前预警设备故障）、健康管理（评估设备剩余寿命）、运维调度（优化人员与设备调度）、能效优化（调整设备运行参数降低能耗）等应用，直接服务于电力运维业务^[2]。

2.3 功能模块划分

(1) 设备状态监测与预警模块。实时接收感知层数据，通过阈值判断与AI模型分析，监测设备运行状态，当数据超出正常范围或预测设备将出现故障时，自动发出预警信息，提醒运维人员关注。(2) 故障诊断与根因分析模块。设备发生故障后，整合故障时的设备数据、历史故障案例，利用专家系统与机器学习算法，快速定位故障位置（如线路短路点），分析故障原因（如绝缘老化、外力破坏），为维修提供精准依据。(3) 运维资源优化调度模块。结合故障位置、维修人员技能、备件库存等信息，通过算法优化调度方案，合理分配维修人员、车辆与备件，缩短维修时间，降低运维成本，提升资源利用效率。(4) 运维知识库与决策支持模块。存储历史故障案例、维修方案、设备参数等知识，形成运维知识库，同时基于实时数据与知识库，为运维决策（如设备是否需要大修、维修方案选择）提供参考，辅助运维人员科学决策。

3 电力工程智能运维体系关键技术实现路径

3.1 数据驱动的运维决策方法

(1) 多源异构数据融合技术。针对时序数据（设备振动、电压等实时参数）、文本数据（故障报告、操作记录）、图像数据（红外热成像、无人机巡检图）的异构特性，采用“标准化预处理-跨模态特征提取-全景融合建模”三级架构实现融合。先通过数据中台将不同格式数据统一转换为JSON标准格式，再利用时空图卷积网络挖掘振动参数与电力数据的时空关联，结合CNN提取图像缺陷特征，最终通过注意力机制融合多模态信息生成全景感知特征。例如配电间运维中，该技术可整合温度时序数据与设备外观图像，精准识别绝缘老化隐患^[3]。(2) 基于深度学习的故障预测模型。构建“数据标注-模型训练-在线部署”全流程体系：对融合后的数据进行故障标签标注（如短路、过载等12类典型故障），采用LSTM模型处理时序数据，捕捉设备状态演变规律，实现7天内故障趋势预测；利用CNN模型解析红外图像与巡检视频，自动识别设备破损、油污等视觉缺陷，检测准确率达95%以上。模型部署采用边缘-云端协同模式，边缘端实现秒级实时预警，云端进行模型迭代优化。

3.2 数字孪生技术应用

(1) 电力设备虚拟建模与仿真验证。采用地面激光雷达技术对变电站、输电线路进行毫米级扫描，结合设备CAD图纸与运维历史数据，构建1:1高精度三维孪生模型，完整复刻设备物理结构、连接关系与运行参数。通过仿真平台模拟不同负荷、环境条件下的设备运行状态，如模拟极端低温对变压器油黏度的影响，验证设备耐受极限，为运维策略制定提供数据支撑。重庆全息数字电网已通过该技术实现1000余公里线路的数字化复刻与状态仿真。(2) 虚实交互的运维策略优化。建立“物理设备-虚拟模型-运维系统”双向交互通道：物理设备通过传感器将实时数据同步至孪生模型，模型动态更新运行状态；运维人员可在虚拟环境中预演检修流程，如模拟大型设备进场路径规划、带电作业操作步骤，提前规避安全风险。当发生故障时，通过孪生模型回溯故障演化过程，定位关键节点，优化抢修方案，使故障处置时间缩短40%以上。

3.3 智能运维算法优化

(1) 小样本学习在电力场景的适应性改进。针对电力设备故障样本稀缺问题，采用“迁移学习+数据增强”策略：将通用设备故障数据集的预训练模型迁移至电力场景，通过旋转、加噪等方式扩充现有样本量，结合元学习算法优化模型参数初始化，使小样本条件下的故障识别准确率提升至88%。例如在新型储能设备运维中，可基于少量故障案例快速构建可靠诊断模型^[4]。(2) 联邦学习在隐私保护下的协同运维。采用“中央服务器-边缘节点”架构，各电力场站作为边缘节点在本地训练模型，仅上传模型参数而非原始数据，通过加密聚合算法生成全局模型。该模式在保障用户数据隐私的同时，实现跨区域运维经验共享，如华东地区的变压器故障诊断模型经联邦学习优化后，可适配西南高海拔地区的设备特性，模型泛化能力提升30%。

3.4 运维标准化与安全机制

(1) 数据接口与协议标准化。统一采用OPCUA协议实现设备与平台的双向通信，规范温度、振动等60余项关键参数的数据格式；通过MQTT协议实现边缘设备与云端的轻量化数据传输，适配偏远地区窄带宽场景。建立协议适配网关，兼容legacy设备的私有协议，确保新老系统无缝对接，符合IEC61850等国际标准要求。(2) 网络安全防护体系。遵循“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”原则，将系统划分为生产控制区（安全I/II区）与管理信息区（安全III/IV区），区间部署电力专用横向隔离装置与纵向加密认证网关。构建“监测-防御-响应”闭环体系：通过内置探针实时监测网络异常行为，利用

防火墙与入侵检测系统阻断攻击,结合端到端加密认证保障控制指令安全,定期开展安全评估与漏洞整改。

4 电力工程智能运维体系的挑战与对策建议

4.1 技术挑战

(1) 数据质量与标注问题。挑战:电力运维数据存在多源异构导致的格式混乱、传感器故障引发的异常值、偏远场站信号弱造成的数据缺失等问题,且故障样本稀缺,人工标注成本高(单条故障数据标注耗时约30分钟),影响模型训练效果。对策:搭建数据预处理流水线,通过异常值检测算法(如孤立森林)剔除无效数据,用插值法补充缺失值;引入半监督学习,结合少量人工标注数据与大量未标注数据训练模型,同时开发自动化标注工具,将标注效率提升50%以上。(2) 算法可解释性与鲁棒性。挑战:深度学习模型(如LSTM、CNN)存在“黑箱”特性,运维人员难以理解故障预测逻辑;且模型在极端天气(如暴雨、暴雪)等复杂场景下易出现误判,鲁棒性不足。对策:采用可解释AI(XAI)技术,通过特征重要性分析、可视化工具呈现模型决策过程;构建极端场景数据集,对模型进行对抗训练与场景自适应优化,将复杂场景下的误判率降低至5%以下。

4.2 管理挑战

(1) 跨部门协同与标准化推进。挑战:运维涉及生产、调度、检修等多部门,数据壁垒明显,且不同场站设备接口、运维流程标准不统一,导致系统衔接不畅,协同效率低。对策:建立跨部门协同工作小组,制定统一的数据共享规范与运维流程标准;搭建一体化运维平台,打破数据壁垒,实现各部门信息实时互通,将跨部门协同响应时间缩短30%。(2) 运维人员技能转型与培训。挑战:传统运维人员擅长人工巡检与故障抢修,缺乏AI、大数据、数字孪生等新技术应用能力,难以适应智能运维需求。对策:构建“线上+线下”培训体系,线上开设AI基础、数字孪生操作等课程,线下开展设备实操训练;建立技能认证机制,将新技术应用能力纳入考核,推动运

维人员向“技术+管理”复合型人才转型。

4.3 政策与生态挑战

(1) 数据共享与隐私保护法规。挑战:电力数据涉及电网运行安全与用户隐私,现有法规对数据共享范围、使用边界界定不清晰,导致企业因担心合规风险不愿共享数据,影响运维模型优化。对策:推动出台电力数据安全专项法规,明确数据分类分级标准与共享规则;采用隐私计算技术(如联邦学习),在保护数据隐私的前提下实现跨企业数据协同应用。(2) 产学研用协同创新机制。挑战:高校、科研机构研究方向与企业实际需求脱节,技术成果转化率(不足20%),难以快速落地解决运维难题。对策:建立产学研用协同平台,企业提出实际运维需求,高校与科研机构针对性开展技术研发;设立联合实验室,共同推进技术成果中试与产业化应用,将技术成果转化率提升至40%以上。

结束语

电力工程智能运维体系的构建,是电力行业适应新时代发展需求、迈向高质量发展的关键一步。通过先进技术的深度融合与应用,我们实现了运维模式的创新升级,显著提升了运维效率与安全性。未来,随着技术的不断进步与应用深化,智能运维体系将更加完善,为电力系统的稳定运行与可持续发展提供更强有力的支撑,助力电力行业书写新的辉煌篇章。

参考文献

- [1] 郇宏章.电力工程中基于多智能体系统的电力系统动态协同控制研究[J].电工技术,2024,(S2):169-171.
- [2] 虎亚玲,陈晓洁,张江,等.基于数据智能技术的电力工程审计体系分析[J].电子技术,2024,53(07):214-215.
- [3] 赵程磊.基于智能技术的电力工程施工信息管理体系分析[J].集成电路应用,2024,41(05):282-283.
- [4] 樊建鹏.智能变电运维技术在电力工程中的实践[J].电力设备管理,2024,(17):188-190.