

# 基于数字孪生的变电站三维可视化运维管理研究

梁健华

珠海电力建设工程有限公司 519000

DOI: 10.12238/ems.v7i10.15749

**[摘要]** 在智能电网建设加速推进的背景下,传统变电站运维管理因效率低、响应慢等问题难以满足需求。数字孪生技术通过构建物理变电站的虚拟镜像,结合三维可视化技术,为运维管理提供了实时感知、智能分析与远程协作的新模式。本文系统阐述了数字孪生变电站三维可视化运维管理的技术架构,分析了其在设备状态监测、故障预测、智能巡检等场景的应用价值,并通过实际案例验证了该技术对提升运维效率、降低停电风险的显著效果。研究表明,数字孪生与三维可视化的融合可推动变电站运维向主动防御型转变,为电力行业数字化转型提供关键支撑。

**[关键词]** 数字孪生; 三维可视化; 变电站运维; 智能电网; 故障预测

## 一、引言

变电站是电力系统的核心枢纽,其运行稳定性直接关系到电网安全。传统运维模式依赖人工巡检与定期检修,存在响应滞后、隐患发现率低等问题。例如,某山区变电站因设备过热未及时处理导致全站停电,造成直接经济损失超百万元,并引发大面积用户供电中断,社会影响恶劣。随着物联网、大数据、人工智能等技术的快速发展,数字孪生技术通过构建物理实体的虚拟镜像,实现了对设备状态的实时映射与动态分析,为运维管理提供了全新解决方案。三维可视化技术则通过高精度建模与数据融合,将抽象的设备参数转化为直观的立体场景,显著提升了运维人员的决策效率。本文结合数字孪生与三维可视化技术,探讨其在变电站运维管理中的应用路径与实施效果,为电力行业数字化转型提供参考。

## 二、数字孪生变电站三维可视化技术架构

### 2.1 物理层

物理层是数据基础,需部署多类型传感器构建全息感知网络。以某500kV变电站为例,其传感器配置涵盖电气、环境、机械、视频四大类,可实时采集电压、电流、温度、湿度、振动、红外热成像等参数,并通过5G专网或光纤传输至边缘计算节点,实现毫秒级响应。例如,某试点项目通过部署激光点云扫描仪,以5cm精度构建变电站三维点云模型,为后续建模提供基础数据,建模效率较传统方法提升3倍。传感器数据的准确性直接影响数字孪生的可靠性,因此需定期进行校准与维护。例如,温度传感器可能因环境腐蚀或老化导致测量偏差,需通过与标准温度源对比进行修正;振动

传感器需根据设备运行频率范围调整灵敏度,避免信号失真。此外,传感器网络的覆盖范围需全面,避免出现监测盲区。对于高压设备区、电缆沟等隐蔽区域,可采用无线传感器或光纤传感技术实现数据采集。

### 2.2 虚拟层

虚拟层通过BIM+GIS技术构建变电站三维数字孪生体。建模流程包括点云处理、模型轻量化与数据融合。利用CloudCompare软件对激光扫描数据进行去噪、配准,生成高精度点云模型;通过LOD技术优化模型面数,确保Web端实时渲染帧率 $\geq 30\text{fps}$ ;将设备台账、运行参数、历史故障等结构化数据与三维模型绑定,实现“一设备一档案”管理,数据查询响应时间 $< 0.5\text{s}$ 。模型精度是虚拟层的核心指标,需根据运维需求进行分级建模。对于关键设备如变压器、GIS,需采用毫米级精度建模,以支持内部结构可视化与故障诊断;对于辅助设备如照明、消防,可采用厘米级精度建模,以平衡性能与成本。数据融合是虚拟层的难点,需解决多源异构数据的时空对齐问题。例如,电气参数与温度数据可能来自不同传感器,采样频率不一致,需通过插值算法实现时间同步;点云模型与BIM模型的空间坐标系可能不同,需通过ICP算法进行配准。

### 2.3 应用层

应用层集成机器学习算法与专家系统,提供实时状态监测、故障预测与健康管理(PHM)、智能巡检、应急演练沙盘四大核心功能。通过数字孪生模型动态模拟设备运行状态,当电流突变或温度超限时自动触发告警;基于LSTM神经网络

分析历史数据, 预测变压器剩余寿命, 提前预警潜在故障; 结合无人机与机器人路径规划算法, 自动生成巡检路线, 单次巡检时间从4小时缩短至40分钟; 模拟火灾、设备爆炸等场景, 通过VR技术训练运维人员应急处置能力, 培训周期缩短60%。应用层的智能化水平取决于算法的准确性与场景的适应性。例如, 故障预测算法需考虑设备类型、运行工况、环境因素等多维度特征, 避免过拟合或欠拟合; 智能巡检算法需根据设备优先级动态调整巡检频次, 避免资源浪费; 应急演练沙盘需支持多用户协同操作, 提升培训的真实性与互动性。

### 三、数字孪生三维可视化运维管理应用场景

#### 3.1 设备状态全息感知与异常诊断

数字孪生技术通过多参数关联分析、虚拟拆解与透视、知识图谱辅助决策等方式, 显著提升了设备状态感知能力。某变电站通过融合电流、温度、振动数据, 发现某断路器触头松动隐患, 较传统方法提前3个月预警; 运维人员可在虚拟场景中“拆解”设备, 查看内部触点磨损情况, 避免现场停机检查; 构建设备故障知识库, 当系统检测到异常时, 自动推荐类似案例与处置方案, 故障处理时间缩短40%。多参数关联分析是设备状态感知的核心方法, 需建立设备正常运行时的参数基准模型。

#### 3.2 故障预测与预防性维护

数字孪生支持从“定期检修”向“状态检修”转型。以变压器为例, 通过部署油色谱传感器、局部放电监测仪等设备, 实时采集溶解气体、放电脉冲等特征量; 利用历史故障数据训练随机森林模型, 识别故障早期征兆; 当模型预测故障概率超过阈值时, 自动生成检修工单, 并推荐备件清单与操作步骤, 维护成本降低40%。某试点项目应用该技术后, 变压器非计划停运次数减少70%, 设备寿命延长20%。故障预测的准确性取决于数据质量与算法选择。数据质量需通过传感器校准、异常值处理、数据补全等手段保障; 算法选择需结合设备特性与故障模式, 例如, 对于机械故障可采用振动信号分析, 对于电气故障可采用油色谱分析。预防性维护需建立设备健康指数(HI)评价体系, 将多维度参数综合为一个量化指标, 指导维护策略制定。

#### 3.3 远程协作与智能巡检

数字孪生突破地理限制, 支持跨区域协同运维。偏远地

区变电站出现故障时, 现场人员通过AR眼镜将设备画面传输至运维中心, 专家可在虚拟模型上标注故障点并指导操作, 故障处理时间缩短50%; 部署轨道式巡检机器人, 搭载红外热成像仪与超声局放检测仪, 可自主完成90%的日常巡检任务, 巡检数据准确率 $\geq 98\%$ ; 通过分析历史巡检数据, 动态调整巡检频次与路线, 巡检效率提升3倍。远程协作需解决低带宽条件下的实时通信问题, 例如, 采用H.265编码技术压缩视频流, 通过WebRTC协议实现低延迟传输; 智能巡检需结合SLAM(同步定位与地图构建)技术实现机器人自主导航, 避免碰撞与迷路; 巡检数据需通过区块链存证, 确保数据的不可篡改与可追溯性。

#### 3.4 人员安全管控与培训

三维可视化技术显著提升人员安全水平。在高压设备区设置虚拟围栏, 当人员进入危险区域时, 系统通过声光报警并锁定设备操作权限, 人员违规操作次数下降95%; 新员工可在虚拟场景中模拟开关操作、事故处理等场景, 培训周期从3个月缩短至1个月, 操作失误率降低90%; 基于BIM模型构建逃生路径算法, 火灾发生时自动规划最优撤离路线, 并通过AR导航引导人员疏散, 逃生时间缩短40%。人员安全管控需结合UWB(超宽带)定位技术实现人员实时追踪, 定位精度 $\leq 30\text{cm}$ ; 培训场景需支持交互式操作, 例如, 通过手柄或手势识别技术模拟设备操作; 逃生路径算法需考虑烟雾扩散、设备阻挡等动态因素, 通过CFD(计算流体力学)模拟优化路径规划。

### 四、案例分析: 某220kV变电站数字孪生改造实践

#### 4.1 项目背景

某220kV变电站建于2010年, 传统运维模式存在数据孤岛、巡检覆盖率低、应急响应慢等问题。设备台账、运行数据、巡检记录分散在多个系统, 信息整合需人工操作, 耗时2小时/次; 人工巡检受时间、天气限制, 关键设备巡检覆盖率不足60%, 隐性故障发现率 $< 30\%$ ; 故障发生后, 需现场排查原因并协调专家支持, 平均故障处理时间达4小时, 难以满足智能电网要求。

#### 4.2 改造方案

项目采用“端-边-云”架构实施改造。端侧部署120个智能传感器, 覆盖主变、GIS、开关柜等关键设备; 边缘侧部署2台边缘计算节点, 实现数据本地预处理与实时分析; 云

端构建数字孪生平台,集成三维可视化引擎与AI分析模块,平台响应时间<1s。传感器选型需考虑设备特性与监测需求,例如,主变需部署油色谱传感器、局部放电传感器、温度传感器;GIS需部署SF6气体压力传感器、微水传感器、局部放电传感器。边缘计算节点需具备足够的计算能力与存储容量,以支持实时数据分析与模型推理。数字孪生平台需采用微服务架构,实现功能的模块化与可扩展性。

### 4.3 实施效果

改造后实现运维效率、经济性、安全性与决策科学性的全面提升。单次巡检时间从4小时缩短至1小时,故障定位时间从15分钟降至2分钟,年巡检成本降低50%;年维护成本降低35%,因故障导致的停电损失减少80%,设备寿命延长15%;人员违规操作次数下降95%,近3年未发生人身伤害事故;基于数字孪生的负荷预测准确率达92%,支撑电网调度优化,减少设备过载风险。运维效率提升得益于智能巡检与远程协作的普及;经济性提升得益于预防性维护与故障预测的精准化;安全性提升得益于人员安全管控与培训的强化;决策科学性提升得益于数据驱动的运维策略制定。

## 五、挑战与对策

### 5.1 数据安全与隐私保护

数字孪生涉及大量设备敏感数据,需采取加密传输、访问控制、联邦学习等措施保障安全。采用国密SM4算法对数据传输过程加密;基于RBAC模型严格限制数据访问权限;在保护数据隐私的前提下,实现多变电站模型联合训练,避免敏感信息泄露。数据安全需建立全生命周期防护体系,包括数据采集、传输、存储、使用、销毁等环节。例如,数据采集需通过安全认证的传感器;数据传输需采用VPN或专线;数据存储需采用加密存储与备份;数据使用需通过脱敏处理;数据销毁需通过物理销毁或多次覆盖写入。

### 5.2 技术成熟度与标准化

当前数字孪生技术仍面临模型精度、互操作性、长期稳定性等问题。需结合CT扫描与逆向工程技术提升复杂设备建模精度;推动标准落地,统一不同厂商设备数据格式;通过实验验证传感器在高温、强电磁环境下的可靠性。模型精度需通过实验对比验证,例如,将数字孪生模型预测结果与实际设备运行数据对比,计算误差率;互操作性需通过标准化

接口实现,例如,采用OPC UA协议实现设备数据互通;长期稳定性需通过老化试验验证,例如,将传感器置于高温高湿环境中持续运行1000小时,观察性能衰减情况。

### 5.3 人员技能转型

数字孪生对运维人员提出更高要求,需通过分层培训、实战演练、激励机制等方式推动技能升级。针对不同岗位设计差异化课程;在虚拟场景中模拟极端故障,提升应急处置能力;将数字孪生应用能力纳入绩效考核,激发学习积极性。分层培训需根据岗位需求设计课程,例如,运维操作岗需掌握设备状态监测与故障处理技能;数据分析岗需掌握机器学习算法与数据挖掘技能;管理岗需掌握运维策略制定与决策支持技能。实战演练需结合真实案例设计场景,例如,模拟变压器套管爆炸事故,训练运维人员应急响应流程。

## 六、结论

数字孪生与三维可视化技术的融合,为变电站运维管理带来了革命性变革。通过构建物理实体的虚拟镜像,实现了设备状态全息感知、故障智能预测与远程协同运维,显著提升了电网运行的可靠性与经济性。某220kV变电站改造案例表明,该技术可使运维效率提升3倍,维护成本降低35%,停电损失减少80%,为电力行业数字化转型提供了可复制的实践路径。未来研究可进一步探索多能互补场景应用、量子计算赋能、数字孪生与元宇宙融合等方向。将数字孪生扩展至风光储一体化电站,支撑新型电力系统建设;利用量子算法提升故障预测模型训练效率,解决大规模数据计算瓶颈;构建沉浸式电力运维元宇宙,实现全球专家实时协作,推动运维模式向“全球化、智能化”升级。随着技术的持续演进,数字孪生将成为智能电网的核心基础设施,为“双碳”目标实现与能源革命提供关键支撑。

### [参考文献]

- [1]数维图团队.基于数字孪生技术的智慧变电站Web3D可视化系统[R].数维图内部技术文档,2022.
- [2]智汇云舟团队.数字孪生技术在电力系统中的应用现状[J].《电力系统自动化》,2022.
- [3]王伟.数字孪生技术在变电站三维实景建模中的应用[J].《电力建设》,2024.