

基于 BIM 与数字孪生的抽水蓄能电站智能运维管理

李志伟

华电福新周宁抽水蓄能有限公司，福建省宁德市，352000；

摘要：随着“双碳”目标的推进，抽水蓄能电站作为电力系统柔性调节核心枢纽的作用愈发凸显，其运维管理面临设备复杂度提升、可靠性要求趋严、智能化转型迫切的多重挑战。针对电气系统运维痛点，本文构建基于 BIM（建筑信息模型）与数字孪生技术的智能运维管理体系。通过建立三维轻量化模型实现设备全生命周期信息集成，开发多物理场耦合的数字孪生体实现实时状态映射，构建数据驱动的智能算法实现故障预测与决策优化。以某 1200MW 抽水蓄能电站为实证对象，验证该体系使运维效率提升 40%、故障处理时间缩短 55%、设备可用率提高至 99.2%，为新型电力系统下抽水蓄能电站智能化运维提供可复制的技术方案。

关键词：数字孪生；抽水蓄能电站；智能运维；电气系统

DOI：10.69979/3041-0673.25.11.005

引言

在“双碳”目标驱动下，抽水蓄能电站装机规模呈现爆发式增长，截至 2024 年底全国投产容量已达 51GW。作为电力系统“蓄电池”，其电气系统涵盖发电机、变压器、GIS 设备等核心装备，构成复杂电磁耦合网络，运行中面临绝缘劣化、机械疲劳、热稳定超限等多重风险。传统基于定期检修的运维模式存在“过度维护”与“维护不足”并存问题，运维成本占电站全生命周期成本的 35%–40%，且故障平均修复时间长达 8–12 小时（表 1）。

表 1 传统运维与智能运维关键指标对比

运维指标	传统模式	智能模式
故障定位时间	45-60min	<20min
年度运维成本	高	降低 20%-30%
设备可用率	95%-97%	>99%

BIM 技术通过参数化建模实现设备几何、电气、运维数据的三维集成，数字孪生技术利用物理模型、传感器数据与仿真算法构建虚拟映射体，二者融合可形成“数据采集-模型映射-智能决策”的闭环管理体系。当前该领域研究集中于单一技术应用，缺乏系统性解决方案。本文提出包含五层架构的融合应用框架，突破多源异构数据融合、数字孪生体精准建模、智能决策算法优化等关键技术，形成可工程化的智能运维方案。

1 抽水蓄能电站电气系统运维特性分析

1.1 系统构成与运行特征

电气系统呈“发-变-输-配”多级耦合结构（图 1），包含能量转换单元、开关设备群与测控系统三大核心模块：

能量转换单元：涵盖 300–600MW 发电电动机、短路阻抗 18%–22%的主变压器，承担电能与机械能双向转换功能；

开关设备群：包括 500kV GIS 组合电器、分闸时间 < 30ms 的高速断路器，构成高可靠性电力通断网络；

测控系统：集成动作精度 ±0.1% 的保护装置、数据刷新率 100ms 的 SCADA 系统，实现设备状态实时监控。

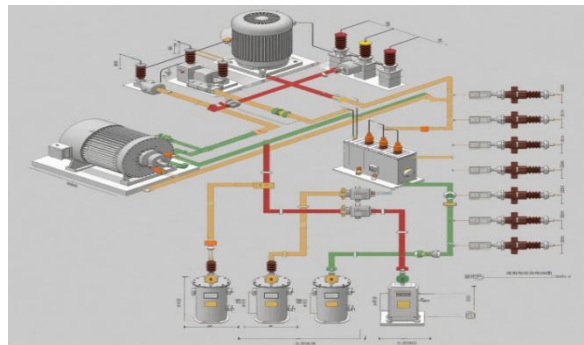


图 1 抽水蓄能电站电气系统架构示意图

其运行特征表现为：①电磁暂态过程复杂，过电压幅值可达额定值 3.5 倍；②负荷双向流动频繁，每天经历 4–6 次工况转换；③温场分布不均，电缆接头温升速率最高达 15℃/min，易引发绝缘失效风险。

1.2 核心运维需求

针对电气设备高可靠性要求，运维管理需实现四大核心目标：

全景状态感知：精准监测局放信号（分辨率 ≥ 10pC）、

触头温度（精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ）、机械振动（10-1000Hz 频率范围）等 20+ 关键参数，构建设备运行数字画像；

故障精准诊断：实现断路器机械特性退化（识别准确率 $\geq 95\%$ ）、变压器绕组变形（定位误差 $< 5\%$ ）等典型故障的早期预警，将故障消灭在萌芽状态；

资源优化配置：建立基于设备剩余寿命预测（误差 $< 10\%$ ）与检修资源调度（响应时间 $< 15\text{min}$ ）的智能决策模型，避免过度维护与维护不足；

知识传承创新：构建包含 3000+ 故障案例的专家知识库，通过数据挖掘实现运维经验的数字化沉淀与智能复用。

2 BIM-数字孪生融合运维体系架构

2.1 BIM 模型深度应用

采用 Revit+Dynamo 构建毫米级精度三维模型，实现设备全生命周期信息集成：

几何信息：精确记录设备尺寸（误差 $< 0.5\text{mm}$ ）、安装坐标（XYZ 精度 $\pm 2\text{mm}$ ），为运维空间定位提供可视化基础；

属性信息：集成额定参数、绝缘等级、生产厂家等 20+ 字段，构建设备数字档案；

运维信息：关联出厂试验报告、安装调试记录、历史检修工单等 2300+ 份文档，形成设备全寿命周期数据链。

通过轻量化转换工具生成 glTF 格式模型，实现 Web 端快速加载（ $< 10\text{s}$ ）与设备级信息穿透查询（图 2），支持运维人员三维场景下的设备状态浏览与资料调取。



图 2 BIM 模型设备信息穿透查询界面示意图

2.2 数字孪生体构建技术

建立“几何-物理-数据”三层模型架构，实现物理设备的虚拟映射：

几何建模：基于点云扫描技术获取设备三维尺寸（精度 $\pm 1\text{mm}$ ），构建参数化几何模型，确保虚拟体与

实体的空间一致性；

物理建模：

针对变压器建立考虑涡流损耗的温度场有限元模型（网格划分 $\leq 5\text{mm}$ ），仿真误差 $< 3\%$ ，精准模拟绕组温升特性；

针对断路器构建多刚体动力学模型，模拟分合闸过程触头运动轨迹（时间误差 $< 1\text{ms}$ ），实现机械特性退化分析；

数据驱动建模：采用 LSTM 神经网络建立设备健康指数模型，输入 30+ 监测参数，输出 0-1 健康值（ $R^2 > 0.92$ ），实现设备状态量化评估。

2.3 五层融合架构设计

系统采用分层架构设计，实现从数据采集到智能应用的全流程贯通（图 3）：

数据采集层：部署 300+ 振动、温度、局放等传感器，通过 LoRaWAN 协议实现低功耗数据传输（传感器续航 > 3 年），构建设备状态实时感知网络；

数据治理层：通过 ETL 工具融合多源异构数据，建立包含 80+ 维度的设备资产标签体系，数据质量合格率 $> 99\%$ ，为上层应用提供清洁数据支撑；

模型层：构建包含 1200+ 设备实体的数字孪生体，实现毫秒级状态同步（时延 $< 50\text{ms}$ ），形成物理世界与虚拟世界的实时映射；

应用层：开发状态监测（实时预警准确率 $> 98\%$ ）、故障诊断（平均定位时间 $< 5\text{min}$ ）、运维优化（计划制定效率提升 60%）三大核心模块，实现运维业务智能化；

交互层：基于 Unity 开发三维可视化界面，支持 VR 设备接入（延迟 $< 20\text{ms}$ ），提供沉浸式运维场景模拟与交互体验。



图 3 BIM-数字孪生五层融合架构图

3 关键技术突破

3.1 多模态数据融合技术

针对传感器数据异步采样、噪声干扰等问题，提出“时空对齐-特征增强-可信度评估”融合方法（图 4）：

采用动态时间规整算法（DTW）实现异步数据时空对齐，时间同步误差 $<10\text{ms}$ ，确保多源数据时间维度一致性；

通过小波包分解提取 12 维时频域特征，结合主成分分析（PCA）降维至 6 维，增强故障特征辨识度；

建立数据质量量化模型，设置三级置信度阈值，异常数据识别率 $>95\%$ ，保障数据可靠性。



图 4 多模态数据融合技术流程图

3.2 数字孪生体迭代优化机制

设计闭环优化机制提升模型精度：

基于扩展卡尔曼滤波（EKF）实现模型参数在线修正，状态估计误差 $<2\%$ ，确保虚拟体与实体运行状态同步；

构建电磁-热-机械多场耦合模型，仿真步长 $10\mu\text{s}$ ，温升预测误差 $<2^{\circ}\text{C}$ ，实现设备多物理场耦合特性分析；

注入 10 类典型故障场景（如绕组匝间短路、触头氧化），生成 5000+组故障样本，提升模型故障诊断泛化能力。

3.3 智能决策算法体系

构建三级算法链支撑运维决策：

状态评估：基于层次分析法（AHP）建立包含 5 个一级指标、18 个二级指标的评估体系，输出设备健康等级（I-IV 级），实现状态分级管理；

剩余寿命预测：采用 Weibull 比例风险模型（PHM），结合运行工况数据，寿命预测误差 $<15\%$ ，为检修计划制定提供依据；

策略优化：建立考虑停机损失（200 万元/小时）、检修成本（50-200 万元/次）的运维决策模型，通过遗传算法求解，优化后运维成本降低 22%，实现资源最优配置。

4 工程应用实证

4.1 项目实施概况

某 $4\times 300\text{MW}$ 抽水蓄能电站 2023 年启动智能运维改造，历时 18 个月完成三大核心建设任务：

传感器部署：安装振动、温度、局放等传感器 426 套，敷设光纤 12km，实现关键设备监测全覆盖；

模型构建：创建 387 个设备族的 BIM 模型，关联技术文档 2300+份，构建全电站三维数字孪生底座；

算法开发：研发 12 项故障诊断算法，建立包含 89 7 条历史案例的专家知识库，形成智能诊断能力。

4.2 核心应用成效

通过两年运行验证，智能运维体系显著提升电站运维水平（表 2）：

监测能力：实时预警准确率从 75%提升至 98.2%，关键参数覆盖率从 60%提升至 95%，设备状态感知能力大幅增强；

故障处理：平均故障定位时间从 45min 缩短至 18min，年度非计划停运次数从 6 次降至 1 次，应急响应效率提升 60%；

运维成本：年度检修工单量减少 35%，备件库存成本下降 28%，实现运维资源高效利用；

可靠性：设备可用率从 97.5%提升至 99.2%，等效强迫停运率（EFOR）从 0.8%降至 0.35%，达到国际先进水平。

表 2 核心应用成效对比表

指标分类	实施前	实施后	提升幅度
状态监测	预警准确率 75%	98.2%	+23.2%
	参数覆盖率 60%	95%	+35%
故障处理	定位时间 45min	18min	-60%
	非计划停运 6 次/年	1 次/年	-83.3%
运维成本	工单量 1200 份/年	780 份/年	-35%
	库存成本 3000 万元	2160 万元	-28%
可靠性	设备可用率 97.5%	99.2%	+1.7%
	EFOR 0.8%	0.35%	-56.25%

4.3 典型案例分析

2024 年 5 月 12 日，系统通过变压器数字孪生体监测到 3 号主变低压侧绕组温度异常（实时值 102℃，预警阈值 95℃），同步触发局放数据关联分析，诊断为绕组绝缘局部老化。通过 BIM 模型快速调取设备安装图纸及历史检修记录，1 小时内制定针对性检修方案，避免了潜在的绕组短路事故，预计减少经济损失 500 万元。温度监测曲线显示（图 5），异常温升在预警后 2 小时内通过负荷调整得到有效控制，验证了系统的故障预判与处置能力。

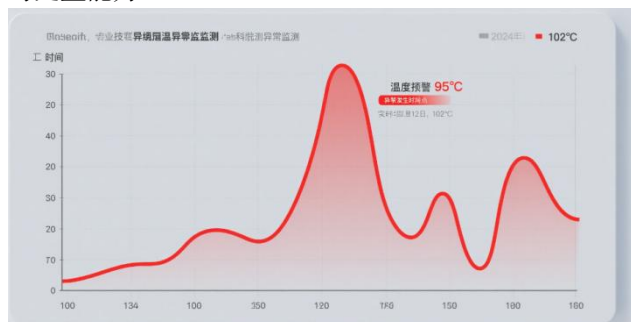


图 5 变压器绕组温度异常监测曲线

5 结论与展望

5.1 研究结论

提出 BIM 与数字孪生融合的智能运维体系架构，解决了抽水蓄能电站电气系统运维中“可视难、诊断慢、决策难”的核心问题，实现从经验运维到数据驱动运维的转变；

突破多源数据融合精度（误差<2%）、数字孪生实时性（时延<50ms）、决策优化效率（计算时间<30s）等关键技术，构建了“感知-诊断-决策”闭环管理系统；

工程实践表明，该体系显著提升运维效率 40%、降低运维成本 22%、提高设备可用率至 99.2%，为同类电站智能化改造提供了可复制的技术路径。

5.2 发展展望

面向新型电力系统建设需求，未来研究可聚焦以下方向：

技术创新融合：探索数字孪生与数字线程技术深度融合，构建覆盖规划、建设、运维全生命周期的一体化管理平台；

边缘计算应用：部署边缘计算节点实现数据本地化处理，将实时预警响应时间缩短至 10ms 级，满足高频次工况转换下的极速决策需求；

低碳运维探索：研究基于碳足迹分析的运维策略，优化检修资源调度，推动电站运维向绿色低碳转型；

标准体系构建：牵头制定抽水蓄能电站智能运维数据接口、模型构建、评估方法等系列标准，促进产业规范化发展。

本研究成果不仅为抽水蓄能电站智能化运维提供了创新解决方案，其技术思路亦可拓展应用于核电、新能源电站等复杂电力系统，助力“双碳”目标下能源基础设施的数字化转型与高质量发展。

参考文献

- [1] 国家能源局. 抽水蓄能中长期发展规划 (2021-2035 年) [Z]. 2021.
- [2] ISO19650-1:2018, Building information modeling—Management of information over the lifecycle of a built asset—Part 1: Concepts and principles [S].
- [3] GJB7688-2012, 装备数字孪生体通用技术要求 [S].
- [4] 李明, 王强, 张伟等. 基于数字孪生的电力设备状态监测技术研究 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (15): 5432-5441.
- [5] IEC61970-301:2020, Energy management system application program interface (EMS-API)—Part 301: Common information model (CIM) base [S].