

# 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 500kVGIS 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。

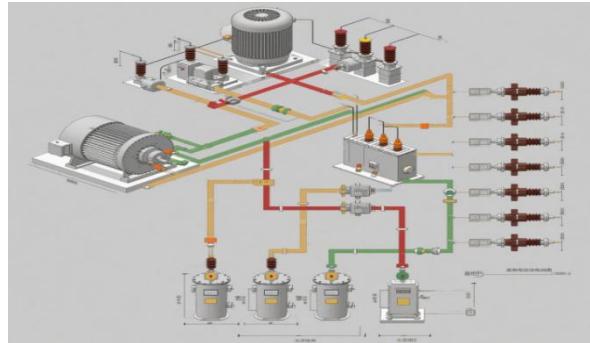


图 1 抽水蓄能电站电气系统架构示意图

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°C/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，形成设备全生命周期数据链。

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。

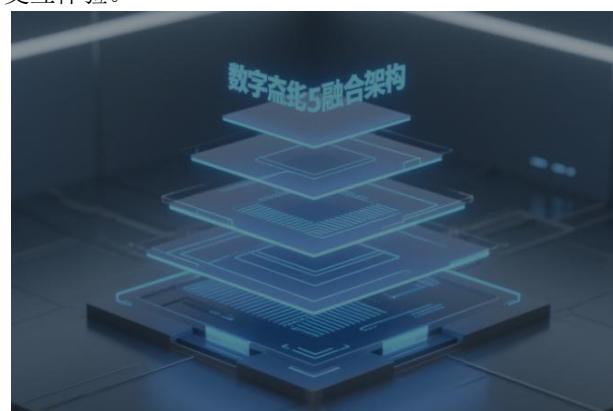


图 3 BIM-数字孪生五层融合架构图

## 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<10ms,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10μs,温升预测误差<2°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4×300MW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897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。

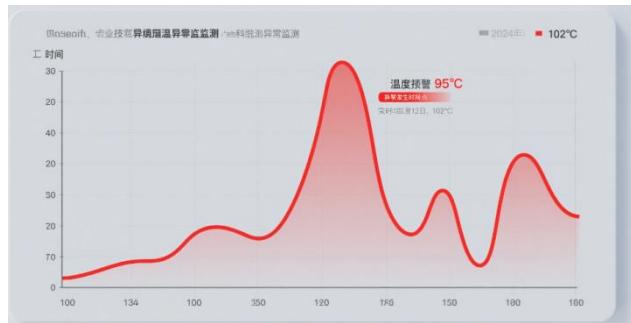


图5 变压器绕组温度异常监测曲线

## 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:

**技术融合创新:**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,满足高频率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].