

基于数字化移交的压缩空气储能电站数字孪生应用研究

刘文杰,陈丽雅,董 晨

(北京洛斯塔科技发展有限公司,北京市,100044)

摘要 本文以湖北应城300MW压缩空气储能电站为案例,探讨基于数字化移交的数字孪生技术在新型储能电站建设与运维中的应用。通过三维设计、信息化技术实现电站的数字化移交,并在基建阶段、运行阶段以及可视化培训和智能化运维等方面展开深入研究。实践表明,数字孪生技术能有效提高压缩空气储能电站的建设与运维效率,为电站的可持续发展提供有力支持。

关键词 BIM技术;数字化移交;数字孪生技术

中图分类号:TM61 文献标识码:B

文章编号:1008-0899(2026)06-0030-03

数字化移交作为一种有效的设计成果管理模式,在电网建设领域已取得一定应用成效,在提质增效方面发挥了重要作用^[1]。同时,数字化移交作为发电厂建设过程中连接可研、设计、基建及运行阶段的重要桥梁,通过三维设计成果构建数字孪生场景,实现实体电站与虚拟电站的时空映射与交互,为项目设计优化、高效建设和智能化运维提供了解决方案。湖北应城300MW压缩空气储能电站是国内首个大规模长时压缩空气储能工程化实践,数字技术应用贯穿于整个项目生命周期。本文在工程实践基础上,总结压缩空气储能电站数字化移交一般方法及其三维数字孪生应用经验,以期为后来者构建储能电站信息化平台提供参考。

1 压缩空气储能电站数字化移交

1.1 数字化移交实施流程

应城项目数字化移交工作由建设管理单位、设计单位和实施单位三方参与完成。在实践中,工程数字化服务商作为实施单位,是工作开展的核心角色。依据工程设计建造进程,移交实施流程可分为数据采集、模型构建、基础数据整合、业务数据融合

及应用推广等5个阶段。其中数据采集工作以收集设计图纸、设备属性、KKS编码、安装调试缺陷记录等施工阶段相关数据为主;模型构建阶段,结合设计单位BIM成果,补充厂区地理要素、环境要素,构建全电站数字孪生场景模型;基础数据整合阶段,将模型数据、KKS编码、参数、台账等数据成果按照统一标准进行规范化整理,并以KKS编码为核心将各类要素串联,形成统一的数据体系;业务数据融合阶段,重点将施工建设与生产运营实时数据同三维场景对接,实现实体电站与虚拟电站的实时交互;应用推广阶段,通过状态监测、危险感知预警、报警消息推送、运行态势仿真模拟等机制,将数字孪生电站应用于电站建设运维管理各环节。

1.2 储能电站三维设计及BIM构建

三维设计工作是数字化移交的基础,设备模型及属性信息构成BIM成果的核心要素。压缩空气储能电站三维设计工作包含主机设备设计、管线布局设计、建筑设计、特殊结构设计、地下储气工程设计、综合仿真分析等6大方面。BIM模型构建是整体设计工作的主线及难点所在,其中地下工程仿真建模是关键环节。

为满足现场管理的实用性需求及可视化精度要求,适应不同渲染引擎,BIM建模工作应符合以下标准:①按设计规格1:1全尺寸还原;②建模深度达到工艺零部件级别(LOD300及以上);③通过实景拍照方式采集纹理信息,采用精细化分区UV通道贴图;④地下洞穴工程以探测数据为基础,采用仿真

作者简介:刘文杰(1990~),男,湖北应城人,硕士,工程师,研究方向:电网工程数字化、GIS应用。

空腔建模方式呈现;⑤BIM完成度与工程建设进度保持同步;⑥各单位BIM数据传递采用统一标准格式。

1.3 数字孪生可视化技术路线

应城电站数字化移交既要满足轻量化开源三维解决方案的需求,同时,在轻量化访问需求之外,数字孪生系统作为示范工程项目的对外展示窗口和技术亮点,对视觉效果及表现力提出了更高要求。基于此,应城电站数字化移交采用了Three.js引擎和虚幻引擎(Unreal Engine)相结合的数字孪生可视化技术路线(如图1所示)。应城电站数字化移交平台采用Three.js引擎来支撑基础三维应用,该引擎提供简洁的API和丰富的功能拓展,具备快速开发和迭代能力。同时,该平台采用虚幻引擎作为大屏端系统三维底座框架,以提高整体可视化水准。虚幻引擎作为3D视觉引擎的代表,具备当今最为强大和高效的三维渲染能力^[2]。

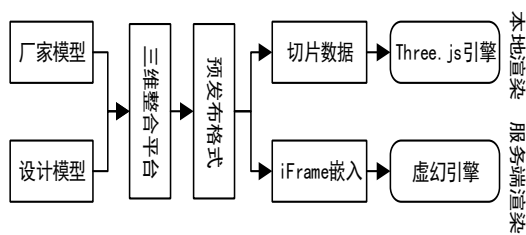


图1 应城电站数字化移交平台三维技术路线

2 压气储能电站数字孪生在运行阶段的应用

2.1 设备运行监测

运行态监测是数字孪生技术的典型应用场景,以数字孪生仿真技术为基础,在数字空间对物理设备实时运行状态进行呈现,并对历史状态进行记录^[3],可实现电站多维时空监测。通过建立虚实映射的设备数字化管控平台,实现对设备健康状态进行体系化、实时化、准确化管理,解决传统管理模式掌握不全面、问题发现滞后、信息不精准的问题^[4]。应城电站通过构建“监测-分析-决策”三层智能运维体系,实现设备状态精准预测与故障预警,提升运维效率,保障电站平稳运行,运行系统架构见图2。在运行参数采集方面,将设备运行数据,如温度、压力、振动等参数,实时传输至设备属性模块并对重点信息进行一级展示,故障响应速度由一般平均30min提升至18min以内。在实时数据分析方面,

对采集到的运行数据进行综合分析,精准识别异常状态,生成预警信息,并反馈至对应三维场景位置。故障预测与诊断方面,依据异常数据分析结果,结合历史数据库及LSTM故障预测模型,判别设备故障类型,给出维修解决方案并提前制订维修保养计划。自平台投入使用以来,设备故障预测准确率由传统方式的63%提升至89%。

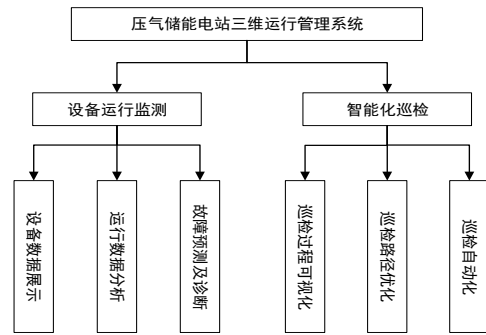


图2 应城储能电站三维运行管理系统架构

2.2 智能化巡检

基于数字孪生驱动的智能巡检三阶优化模型,通过巡检路径策略优化、巡检过程可视化、运维执行远程化大幅提高了巡检效率。即根据设备在厂区空间的分布及状态信息,制定合理的巡检路线及时间策略,以最大程度减少单次巡检时间;通过厂区定点监控及巡检设备、UWB设备将巡检人员的位置及检查结果照片及视频等状态信息实时传输至三维场景,立体呈现巡检过程;借助地面巡检机器人或无人机,在三维系统远端操控设备巡检动作,减少运维人员危险区域作业时间,进一步实现运维任务的自动派单、执行和反馈^[5]。传统人工巡检与数字孪生平台巡检关键指标对比见表1。

表1 巡检模式关键指标对比

评价维度	传统人工巡检	数字孪生平台巡检	技术实现路径
定位精度	±2m	±0.3m	UWB+SLAM定位
数据完整性	68%	99.2%	边缘数据补传机制
应急响应速度	>15min	<90s	知识图谱驱动自决策

3 压气储能电站数字孪生在可视化培训中的应用

3.1 生产工艺模拟

通过模拟电站运行过程中的水循环、空气循

环、电能内能转化等物质能量流动转化路径,实现压气储能和膨胀释能2个生产工艺环节的三维动态还原,为运行仿真打下基础。

钻井工艺和注气排卤工艺。应城电厂所用盐穴在地下深度500~700m处,注采井与排卤井均采用三开段定向钻井及套管固井技术。电厂数字孪生系统中地质层、生产井、盐腔等地下工程要素与地上工程同样按1:1还原,辅助工艺流程再现。

3.2 可视化培训

基于情景认知理论构建沉浸式培训系统,系统架构如图3所示。利用数字孪生技术,实现电站运维人员设备操作远程虚拟可视化培训,同时满足技术人员沉浸式学习和应急响应演练需求,显著增强培训效果。经线上培训后,运维人员考核一次通过率从72%提升至91%。

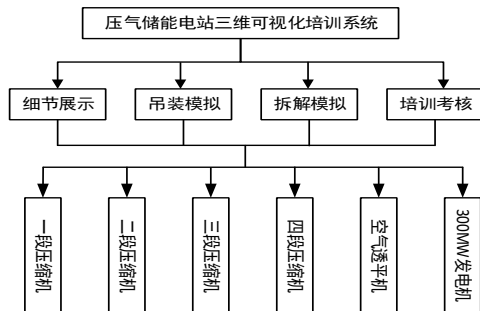


图3 应城储能电站三维可视化培训系统架构

在设备细节展示方面,基于精细化三维模型,展示压缩机、透平机、发电机等重要设备细节及属性参数,满足施工人员及设备维护人员在到货安装前后随时掌握设备信息的需求。设备吊装模拟模块,在三维场景中分解还原施工阶段大型主机设备真实吊装过程,辅助设计人员进行三维技术交底,

加快施工过程。设备拆解模拟模块,逆向模拟设备组装步骤,实现设备零部件一键拆解,结合技术文档帮助运维检修人员快速学习设备维修知识点。培训考核管理模块,通过知识点演练、三维作业考试等方式,实现线上业务培训考核评估一站式服务,相比传统线下教学考试方式效率大幅提升。

4 结语

本文通过梳理压缩空气储能电站建设过程三维设计移交方法,并在湖北应城项目实践基础上总结基于数字化移交的压缩空气储能数字孪生电站应用路径,得出以下结论:①与工程建设同步的渐进式数字化移交相比传统竣工移交显著提高了设计成果利用价值;②数字孪生技术应用于工程管理系统能有效提高压缩空气储能电站的建设与运维效率;③本文所探讨的三维数字化移交方法及数字孪生技术尚局限于智能化运维、可视化培训等领域,应用前景及深度仍有进一步探索和挖掘空间。

参考文献

- [1] 司海青,冯杰婷,何思宇,等.输变电工程数字化移交发展现状[J].电力勘测设计.2023(08):18-24.
- [2] 王刚,马锦.虚幻引擎中多源地理数据坐标整合研究与应用[J].资源信息与工程.2022,37(01):72-76.
- [3] 梁志开,江志明,李甘,等.基于数字孪生技术的水利机电设备智慧运维管理平台研究[J].水利水电快报.2023,44(09):116-122.
- [4] 纪传波,李少林,刘光彪,等.基于数字孪生的水利水电工程巡检系统建设研究[C].中国陕西西安:2024.
- [5] 陈人楷,方晓明,李仕彦.基于深度强化学习的电力巡检机器人网络自动化监测系统[J].自动化与仪表,2024,39(09):70-73.