

电力工程数字孪生应用系统架构设计

程正逢, 李红明, 罗壮强, 付江缺, 王 林

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430060)

摘要 随着电力工程向着大型化、智慧化、精细化的方向发展, 传统的管理和控制方式已无法适应工程建设全寿命周期下的管理要求。数字孪生作为物理世界和虚拟世界的桥梁纽带, 对于推动数字技术应用于电力工程建设具有重要意义。本文基于电力工程施工及运维现场的需求背景, 明晰数字孪生的概念及其核心特征, 梳理出电力工程数字孪生应用场景的核心需求, 在此基础上, 围绕数据管理、算力建设、建模仿真、业务融合四个方面, 提出针对性的应用系统架构方案, 搭建适配电力工程全流程的数字孪生应用场景, 助力电力工程建设行业的数字化转型进程, 强化工程建设管理能力及辅助决策能力。

关键词 电力工程; 数字孪生; 系统架构; 数据治理

基金项目: 中国电力工程顾问集团有限公司集中开发科研项目“基于BIM/GIM+GIS的数字孪生底座构建及应用关键技术研究”(项目编号: DG2-L01-2024)。

中图分类号: TP31; TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.006

0 引言

数字孪生技术借助虚拟仿真、数据投影、实时互动等核心功能, 实现电力工程实物与其数字孪生体的同频共振, 有效解决了当前电力工程建设管理中存在的信息断层、难以直观展示、决策延迟等难点问题。但目前, 针对电力工程场景的数字孪生技术应用仍存在数据管理混乱、算力分配不合理、模型与业务脱节等诸多不足, 导致数字孪生技术的优势未能充分发挥。因此, 有必要结合电力工程建设的实际情况, 规划合理有效的数字孪生应用体系框架, 规范数字孪生应用模式, 推动数字孪生与电力工程建设全链条的深度融合, 从而更好地服务于电力工程建设高质量发展。

1 数字孪生定义与核心特征

数字孪生是以集成感知采集、建模仿真、信息交互、决策优化等多种技术为一体的综合技术概念, 其本质是在物理实体全生命周期过程中, 建立涵盖其几何尺寸、物理特性、运行机理等方面的高度镜像化虚拟孪生体, 通过虚拟孪生体与物理实体之间的实时数据交互、信息反馈, 实现对物理实体全生命周期的监测评估、仿真预测及精确控制^[1]。

数字孪生具有四大核心特征: 一是多要素集成性, 可集成电力工程项目设计、建设、运维等多个阶段的数据信息资源, 消除各阶段之间的数据隔阂, 实现物

理空间与虚拟环境的协同工作; 二是高精度映射, 能够高度还原电力工程项目各类设备装置的物理性能、运行机制及原理规律, 为后续仿真模拟和决策分析提供精准参考; 三是实时即时性, 通过实时采集信息的快速传递, 实现虚拟孪生体与物理实体工作状态的同步更新, 精准捕捉物理实体的工作异变; 四是辅助决策性, 可利用虚拟孪生体开展多种工况条件下的仿真模拟实验, 验证不同控制方案的应用效果, 为电力工程项目精确施策提供指导。

2 电力工程数字孪生应用系统需求分析

2.1 数据采集与融合需求

电力建设数字孪生的应用需以海量、精确、及时的数据为支撑, 完整、准确、实时的数据采集及融合是搭建该系统的基本前提, 也是物理实体与孪生体之间精准映射的核心需求。在电力工程建设过程中, 存在设计图档、设备参数、施工信息、维护数据、环境信息等多种类型的数据, 这些数据来源于各管控环节的不同设备终端, 不仅数据格式、标准各异, 还存在信息重复、遗漏、错误等问题, 给电力工程数字孪生体模型建设带来了巨大挑战, 同时制约着整个系统的决策水平。因此, 系统需具备全方位的大数据采集与分析功能, 针对电力建设工程全过程的多种数据源, 通过传感器、物联网节点、数据端口等采集模式, 全面收

作者简介: 程正逢 (1969-), 男, 硕士研究生, 正高级工程师, 研究方向: 摄影测量, 地理信息系统、数字化。

集工程施工设备参数指标、施工进度、周边环境、潜在风险等动态信息，确保采集信息的全面性与及时性。

2.2 全流程可视化管控需求

电力工程项目施工周期长、管理节点多、涉及专业领域广，传统管理模式多采用人工巡查、纸质记录、点位分段监测等方式，无法实现对工程项目全过程的立体化管控，易出现管控死角和管理不到位的情况，难以第一时间发现并处置工程项目建设及后期运维过程中的各类问题。因此，电力工程数字孪生应用系统需具备全过程可视化管理功能，基于工程虚拟模型，实现从设计、施工到运维全过程的立体化呈现。在工程设计阶段，可通过工程虚拟孪生体直观呈现设计方案，清晰展示各类设备、结构的分布及连接关系，便于设计师排查设计缺陷、优化设计方案；在工程施工阶段，可实时映射施工进度、施工质量、施工现场安全状况，直观呈现施工工序进展、各类施工设备工作状态等信息，方便管理者实时掌握项目进展、及时调整施工方案。

2.3 高保真仿真与决策支持需求

高保真仿真与决策支持是电力工程数字孪生应用系统的核心功能诉求，更是发挥数字孪生技术价值、提升电力工程管理水平的重要手段。在电力工程项目建设及运维过程中，存在设计优化、施工工艺、设备维修、应急管理等多种决策需求，这些决策直接关系到工程建设质量、后期运行的安全性、稳定性及经济效益，均需通过精细、准确的仿真模拟进行论证研究。因此，系统需具备高精度仿真功能，以虚拟孪生体和优质数据资源为基础，精准模拟电力工程各类设备的运行机理、结构承载能力和环境适应性能，仿真不同运行条件、不同管控措施下工程项目的运行状态，实现“仿真即实景”的效果^[2]。

3 电力工程数字孪生应用系统架构设计策略

3.1 多模态时空数据一体化治理

为解决电力工程施工数字孪生应用中存在的数据杂乱、格式多样、质量参差不齐等问题，保障虚拟孪生体模型的准确性及系统的可靠运行，需建立多模态时空数据一体化治理体系，对数据采集、清洗转换、存储管理、服务提供等环节进行全流程、标准化治理。在数据获取阶段，基于电力工程全生命周期视角，明确不同类别数据的采集范围、采集周期及采集要求，打通传感器、物联网终端、设计软件、施工管理系统、运维平台等多个数据采集源头，实现几何数据、物理属性数据、工作状态数据、环境数据、管理流程数据等多模态数据的全覆盖采集。其中，几何数据主要采

集工程设施的尺寸、形状及位置关系等信息；物理特性数据主要采集设备设施的材料种类、物理性质、型号等指标；工作状态数据主要采集设备的电压、电流、温度等实时参数，确保获取的数据能够满足虚拟孪生体构建与系统运行的全部需求^[3]。

此外，在数据整理过程中，采用层次化、类目化的治理方法，针对不同类型、不同形态的异构数据，开展针对性的清洗、转化与融合工作，统一数据编码、数据格式及数据标准，剔除数据冗余、矛盾与错误，确保数据的准确性与完整性，将数据误差严格控制在±0.5%以内。在时空数据处理中，可引入时空索引机制，关联数据的时间属性与空间属性，制定100 ms级别的数据同步频率，实现数据在时间与空间上的精准对齐，确保数字孪生体能够真实反映物理实体在不同时间段、不同位置的状态变化。在数据存储环节，应根据不同类型数据的特点及用途，设计混合式数据库架构：采用关系型数据库存储结构化的业务数据、设备参数等信息；采用非关系型数据库存储非结构化的设计蓝图、视频图像、设施维护日志等数据；采用时序数据库存储海量实时的设备运行状态时序数据，确保时序数据存入速率不低于10万条/秒。

3.2 云边端协同算力调度部署

在电力工程数字孪生应用场景中，虚拟孪生体建模、实时数据传输、高保真仿真、全过程可视化等环节均需大量算力支撑，且各环节对算力的需求差异显著。边缘侧侧重实时数据采集、本地即时处理及快速反馈；云端侧重海量数据存储、大规模仿真运算及全局性决策计算。单点算力布局无法满足系统多样化的算力需求，因此，需建立云边端协同算力调度架构，明确云边端各级职能分工，实现算力资源的优化配置。在边缘侧，部署轻量化算力节点，承担电力工程施工现场数据的实时采集、本地初步处理及简单分析任务，可快速对现场采集的数据进行分类、编码与分析，及时捕捉设备运行异常并发出报警，有效减轻数据向云端传输的压力，提升系统实时反馈速度。同时，应承担本地简单虚拟孪生体渲染与交互任务，保障一线管理者能够实时监控现场情况。

在云端，需部署大规模算力集群，承担海量数据存储、深度解析、大规模仿真运算及全局决策优化等核心任务，确保集群总算力不低于512TOPS。云端需完成高精度数字孪生体模型的构建、渲染与更新，实现整个电力工程建设过程的全方位三维可视化展示及复杂场景仿真模拟，满足管理人员全局把控与决策优化的需求。此外，需设置智能化算力调度策略，实时监测云端与边缘侧各算力节点的负载状态，当单个节点

负载超过80%时,自动启动算力调度流程,根据系统运行状态及算力需求,灵活分配算力资源;当边缘侧算力不足时,云端快速下发算力予以支援;当云端算力富余时,将响应时效性要求较低的任务下放至边缘侧处理,提升算力利用率。

3.3 孪生体建模与仿真引擎优化

高保真虚拟孪生体是电力工程数字孪生应用系统发挥作用的基础,而仿真引擎的性能直接决定仿真精度与速度。因此,需重点推进孪生体建模优化与仿真引擎升级,建立适配电力工程项目需求的高精度建模与快速仿真机制。在孪生体建模方面,应当采用分层建模、协同建模的思路,结合电力工程项目的结构特性与管理需求,分层构建虚拟孪生体,从整体项目到单个零部件,逐步细化模型颗粒度,确保虚拟孪生体能够真实映射物理实体的空间形态、物质特性、动态行为及交互关系。在建模过程中,需充分利用电力工程设计图纸、设备信息、现场记录等各类数据资源,综合运用参数化建模、三维激光扫描建模等多种建模技术,提升建模效率与质量^[4]。

在此基础上,还应构建虚拟孪生体与物理实体的对比校验体系,通过对比物理实体运行状态的实测数据与虚拟孪生体的仿真数据,将建模仿真误差控制在±1%以内,及时排查建模过程中的问题并修正建模参数,提升虚拟孪生体的还原度。此外,还需建立虚拟孪生体动态更新机制,根据电力工程项目建设进展、设备维护情况及相关数据变动,制定5分钟级的动态更新间隔,实时更新虚拟孪生体的几何形态、物理参数,确保虚拟孪生体与物理实体运行状态保持一致。在仿真引擎优化的过程中,应结合电力工程仿真需求,对仿真引擎进行个性化改进,优化仿真算法,将仿真时间间隔提升至毫秒级别,增强仿真计算的准确性与速度;支持多物理场仿真、多场景并联仿真,能够真实模拟电力工程设施的运行模式、结构承重、故障演变过程等。

3.4 工程全流程业务闭环集成

随着数字孪生技术与电力工程建设的深度融合,仅实现建模仿真与数据可视化已无法满足工程全流程管理需求。在实践中,需推进数字孪生应用系统与电力工程建设全流程业务的闭环集成,将数字孪生技术嵌入各业务流程与环节,全面提升电力工程管理水平。基于电力工程设计、施工、运维、安全管理等全流程业务需求,明确系统与各业务节点的集成关键点,打破各业务系统之间的壁垒,实现数字孪生应用系统与工程设计系统、施工管理系统、运维管理系统、安全监控系统等各类业务系统的高效交互,保证业务数据

互通、流程衔接顺畅。在设计环节,应将数字孪生建模与工程设计流程深度融合,设计完成后,直接将设计成果导入虚拟孪生体,通过虚拟孪生体开展方案仿真校验,排查设计缺陷并优化设计方案,确保设计方案合理可行。

在实际施工过程中,需将虚拟孪生体全面融入项目施工管理流程,通过虚拟孪生体动态反映施工进度、施工质量及施工现场安全状况;结合施工实测数据与设计方案数据、计划数据的对比分析,及时掌握施工过程中偏差与问题,快速调整优化施工方案与方法,保障工程质量与施工进度。同时,应将施工全过程数据实时上传至系统平台,丰富完善数字孪生体,实现施工全过程的可追溯、可管控。在运维时,可将虚拟孪生体深度嵌入运维管理流程,借助虚拟孪生体对设备运行状态进行实时监控,通过在线仿真模拟推演设备运行趋势,据此制定科学合理的运维方案,实现设备预知检修,降低故障发生率;当设备出现故障时,可通过虚拟孪生体开展故障仿真模拟分析,排查故障原因,制定最优处置方案并应用于现场故障解决,提升运维效率与效果^[5]。

4 结束语

数字孪生技术为电力工程建设数字化转型提供了全新的技术路径,能够有效破解传统电力工程建设管理面临的各类难题,提升工程建设管理的精准化、精细化与科学化水平。未来,可针对具体电力工程建设场景,进一步细化总体架构设计内容,完善相关技术应用,积极解决架构落地过程中的各类具体问题,实现电力工程建设全过程与数字孪生长成性、动态性、交互性的深度对接融合,充分发挥数字孪生技术的价值优势,为新形势下电力工程建设高质量发展提供更加强有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 徐开浪. 电力工程全生命周期技术应用及成本控制[J]. 中国招标, 2025(S2):106-107.
- [2] 戴杰. 电力工程低压配电系统安装调试要点及质量管控措施研究[J]. 电力设备管理, 2025(19):205-207.
- [3] 孙伟. 基于数字孪生的电力工程二次设备运行状态自动监测技术[J]. 电力设备管理, 2025(18):213-215.
- [4] 韩斌, 高文成, 常建. 数字孪生技术在电力工程设备全生命周期管理中的应用[J]. 自动化应用, 2025, 66(18):83-85.
- [5] 孙楠. 基于数字孪生的新能源电力工程二次设备运行状态自动监测方法[J]. 自动化应用, 2024, 65(14):50-51, 55.