

# 基于数字孪生的电力建设全过程管控创新

于 洋

华电郑州机械设计研究院有限公司 河南郑州 450046

**摘要：**随着“双碳”目标的推进和新型电力系统建设的加速，电力建设项目规模日益庞大、技术复杂度显著提升，传统管控模式在信息协同、风险预警、进度质量控制等方面面临严峻挑战。本文提出“基于数字孪生的电力建设全过程管控创新”理念，构建以数字孪生技术为核心，融合BIM、物联网、大数据与人工智能的多维协同管控体系。通过建立贯穿“规划—设计—施工—调试—移交”全生命周期的虚拟映射系统，实现物理工程与数字模型的实时交互与动态优化。创新性提出“孪生驱动、闭环反馈、智能决策”的管控范式，突破传统“事后纠偏”模式，实现事前模拟推演、事中动态调控、事后复盘优化的全流程智能管控。研究设计了包含数据底座、孪生引擎、业务应用层的三层架构模型，并以某500kV智能变电站建设项目为案例进行验证。结果表明，该模式可提升项目进度可控性30%以上，降低变更成本25%，显著提高安全质量管控效率。本研究为电力建设数字化转型提供了理论支撑与实践路径，具有重要的推广价值和应用前景。

**关键词：**数字孪生；电力建设；全过程管控；智能决策

## 一、数字孪生技术内涵及其在电力建设中的适用性分析

在电力建设领域，项目全生命周期涵盖规划可研、勘察设计、招标采购、施工建设、调试运行至竣工移交等多个阶段，各环节涉及多方主体协同，具有进度波动性强、质量要求高、安全风险密集、设计变更频繁以及文档管理复杂等特点。传统管理模式难以应对日益增长的信息量与协同需求，亟需技术革新。数字孪生与电力建设具备天然的契合性，BIM模型为电力设施提供了精确的三维信息载体，支持设备属性、施工逻辑与空间关系的集成表达，成为构建孪生体的基础平台。项目从设计初期即建立可演化的数字模型，伴随建设进程持续注入施工进度、监测数据与质量记录，实现时间维度上的连续性与状态可追溯。

## 二、基于数字孪生的全过程管控体系架构设计

### 1. 总体架构：三层四流模型

基于数字孪生的电力建设全过程管控体系采用“三层架构”设计，形成从数据采集到智能应用的完整技术闭环。底层为数据感知层，通过部署塔吊运行监控装置、环境质量传感器、人员定位标签、智能安全帽、移动巡检终端及无人机航拍系统，实现对施工现场人、机、料、法、环等要素的全面感知与实时数据采集。这些设备以有线或无线方式接入边缘计算节点，完成原始数据的预

处理与初步分析，确保信息的低延迟传输与高可靠性。中间层为孪生引擎层，作为系统核心中枢，承担多源异构数据的融合与建模任务。该层集成BIM三维模型、GIS地理空间数据、项目进度计划（P6）、成本预算、合同条款、安全规范文档以及实时采集的现场数据，构建统一的数据湖架构。基于数据驱动机制，系统可自动识别模型状态变化，利用增量更新算法动态调整孪生体几何形态与属性信息，实现“模型即系统”的持续演化能力。引擎内嵌仿真模块，支持4D进度模拟（时间+三维）、5D成本关联分析、结构受力有限元计算及施工风险概率预测，能够在虚拟空间中对施工方案进行预演与优化。顶层为业务应用层，面向项目管理实际需求开发功能模块，涵盖智慧工地综合管理、进度与成本联动控制、质量缺陷自动识别、安全隐患智能预警、设计变更影响评估与多方案决策支持等场景，为各参建方提供可视化、可交互、可操作的数字化工作平台。

### 2. “四流融合”机制

在三层架构基础上，系统构建“四流融合”的协同管理机制，推动电力建设全过程的系统性变革。信息流实现跨组织、跨阶段的数据贯通，设计单位的BIM成果、施工单位的进度日报、监理单位的验收记录、业主方的投资控制数据均统一接入孪生平台，消除传统模式下因系统孤立导致的信息滞后与失真，确保所有参与者基于

同一数据源开展工作。业务流将项目管理中的关键流程数字化嵌入平台，如设计变更审批、隐蔽工程验收、工程量计量、安全交底签认等环节，通过 workflow 引擎自动触发任务、推送提醒、归档记录，形成线上闭环操作，提升流程执行效率与合规性。价值流聚焦项目经济性管控，依托孪生模型中的成本数据库与资源计划，实现工程量自动核算、成本偏差实时预警、材料使用优化建议等功能，辅助管理者动态调整资源配置，降低浪费，提升投资效益。决策流依托人工智能算法对历史数据与实时状态进行深度分析，生成施工路径优化、风险优先级排序、工期压缩方案等智能建议，支持管理层在复杂环境下做出科学判断。四流之间相互关联、动态耦合，信息流为业务、价值与决策提供基础支撑，业务流产生新的数据反哺信息流，价值流与决策流则提升整体管理效能，形成自洽循环的智能管控生态。

### 三、某500kV智能变电站项目应用实践

某500kV智能变电站项目位于华东地区某省会城市，是支撑区域电网升级和新能源消纳的关键基础设施，总投资约12亿元，建设周期18个月。项目地处城市建成区，周边高层建筑密集，施工空间受限，大型设备运输与吊装组织难度大。地下管网系统错综复杂，涵盖市政给排水、燃气、电力及通信等多种管线，部分资料缺失或与现场不符，基坑开挖与电缆沟施工面临较高安全风险。同时，项目执行需满足严格的环保标准，对扬尘、噪声、振动等污染源实施全过程管控，避免对周边居民造成影响。作为智能变电站，其自动化、数字化水平高，二次系统接线复杂，设备安装与调试精度要求严苛，传统管理模式难以应对多专业协同、高精度施工与高效决策的综合需求。在此背景下，项目全面引入数字孪生技术，构建覆盖全生命周期的智能管控平台，以提升建设质量、保障安全、控制成本并实现高效协同。

为支撑数字孪生应用，项目建立了全站BIM+GIS一体化模型，集成土建、电气、结构、暖通等各专业设计成果，涵盖1.2万余个设备与构件，实现空间关系、技术参数与施工逻辑的精准表达。部署200余个物联网传感器，覆盖塔吊运行状态、基坑位移与沉降、主变区域温湿度及人员定位等关键点位，实现施工现场人、机、环的实时监测。平台对接进度管理(P6)、成本核算、安全巡检、质量验收、物资管理等12类业务系统，打通设计、施工、监理、业主多方数据链路，形成统一的数据中枢。通过边缘计算与云平台协同，实现数据采集、传

输、融合与可视化分析，为项目管理提供动态、精准的决策支持。

实际应用中，数字孪生平台显著提升了项目管控水平。基于4D进度模拟与现场数据比对，实际进度偏差控制在 $\pm 3\%$ 以内，优于行业平均的 $\pm 8\%$ ，有效保障了工期目标。通过AI视频识别与环境监测联动，实现违章行为自动预警，安全事故发生率同比下降60%。设计阶段通过虚拟碰撞检测与方案优化，施工阶段变更减少35%，累计节约成本约3800万元。竣工模型完整集成设备参数、试验报告、隐蔽工程影像等信息，竣工资料数字化率达到100%，移交效率提升50%，为后续运维奠定坚实基础。

项目实践表明，数据标准的统一是系统集成的前提，项目初期即制定BIM建模与数据交换规范，确保各参建方模型可共享、可集成。高效的多方协同机制是平台发挥作用的保障，通过建立联合工作组与线上审批流程，实现信息实时共享与业务闭环。数字孪生系统的价值需通过持续迭代优化释放，项目过程中根据反馈不断调整模型精度、优化算法逻辑、完善功能模块，确保系统始终贴合实际管理需求，为同类工程提供了可复制、可推广的数字化建设范例。

### 四、全过程管控流程重构与关键技术创新

依托数字孪生技术，电力建设项目的管理流程实现系统性重塑，贯穿规划、施工、调试至移交的各个阶段。在规划设计环节，构建初期高精度数字孪生体，开展变电站选址合理性分析、输电线路路径优化及环境影响模拟，支持多方案的技术经济综合比选。提出“设计即孪生”理念，确保BIM模型从项目启动阶段即具备完整的属性信息和可扩展性，为后续建设与运维提供可靠的数据基础。

进入施工阶段后，通过4D进度模拟（三维空间+时间）与现场实际进度数据的动态比对，实现对施工节奏的精细化监控，并结合机器学习算法预测潜在延误风险，提前发出预警并推荐纠偏措施。在质量管控方面，引入AR/VR技术对关键工序进行沉浸式交底，确保施工人员准确理解工艺要求；混凝土浇筑、电缆接头制作等重点作业环节的质量检测数据实时关联至对应构件模型，形成全过程可追溯的“工程质量数字档案”。安全管理体系深度融合AI视频识别能力，自动识别未佩戴安全帽、高空作业无防护等违章行为，同时融合风速、温湿度、噪声等环境监测参数，触发分级分类的安全告警机制，提

升现场本质安全水平。物料需求计划基于孪生模型精确提取工程量，联动实时库存与物流信息，优化资源配置与运输路径，减少材料浪费与二次搬运。

在此基础上，建立贯穿全周期的“状态感知—智能研判—策略生成—任务执行—经验归集”动态调控体系，打破传统管理模式中信息滞后、响应迟缓的瓶颈，推动项目管理由被动处置向主动干预、前瞻调控转变。该机制强调持续的状态感知、智能的风险预判、科学的策略生成、高效的指令执行以及经验的知识沉淀，实现管理闭环的持续迭代升级。

### 五、实施挑战与对策建议

数字孪生在电力建设领域的深度应用仍面临多重现实挑战。行业内部信息系统长期独立运行，设计、施工、监理与业主单位间存在明显的信息孤岛，不同软件平台间接口协议不统一，导致模型与数据难以高效集成，严重制约孪生系统的协同效能。项目初期需投入大量资金用于传感器部署、平台开发、系统集成与网络基础设施建设，较高的初始成本使部分企业望而却步，尤其对中小型电力建设单位形成门槛。专业技术人才储备不足问题突出，既掌握电力工程专业知识，又精通BIM建模、物联网技术、数据分析与项目管理的复合型人才极为稀缺，直接影响系统的实施质量与运维能力。与此同时，传统管理模式惯性较强，部分管理人员对数字化工具接受度低，组织流程固化，缺乏跨部门协作机制，导致新技术难以真正融入日常管理流程，形成制度性阻力。为应对上述问题，应加快制定统一的行业级BIM建模标准与数据交换规范，推动主流软件平台间的互操作性，建立开放共享的数据生态。推广“平台+模块”的轻量化部署模式，支持按需选配功能组件，降低企业初期投入压力，提升系统灵活性与可扩展性。加强产教融合，依托高校、职业院校与企业联合培养具备电力工程背景与数字技术能力的复合型人才队伍，开展常态化技能培训与认证。在管理机制上，建立数字化转型专项激励政策，将数字孪生应用成效纳入项目考核与评优体系，鼓励试

点示范项目建设，通过标杆引领逐步打破传统路径依赖，推动电力建设管理模式向智能化、协同化方向持续演进。

### 结束语

本文系统探讨了基于数字孪生的电力建设全过程管控创新路径，构建了涵盖“数据—模型—应用—决策”的完整技术体系与管理框架。研究突破了传统管控模式的局限，提出了“孪生驱动、闭环反馈、智能决策”的新范式，实现了从“静态管理”向“动态优化”、从“局部协同”向“全局统筹”的根本转变。通过在500kV智能变电站项目的实践验证，充分证明了该模式在提升项目进度可控性、保障施工安全、降低建设成本、提高移交质量等方面的显著成效。本研究的创新不仅体现在技术集成层面，更在于对电力建设管理流程的深度重构。通过数字孪生平台，实现了设计、施工、监理、业主等多方主体的高效协同，推动了项目管理向精细化、智能化、可视化方向发展。同时，所形成的数字资产为后续运维提供了坚实基础，真正实现了“建设为运维服务”的理念。未来，随着5G、边缘计算、大模型等技术的成熟，数字孪生将在电力建设中发挥更大作用。建议行业加快标准体系建设，推动平台互联互通，培育专业服务生态，全面释放数字孪生的潜力。本研究成果可为电力、交通、市政等大型基础设施建设提供有益借鉴，对推动我国工程建设领域数字化转型具有重要的理论价值与现实意义。

### 参考文献

- [1]徐建江,尹习双,刘金飞,钟桂良.基于数字孪生的风电建设智能协同管控技术研究及应用[J].太阳能学报,2024(6).
- [2]马如栋,李万辉,王飞.基于数字孪生的建筑电力设备全生命周期健康管理[J].电脑采购,2024(49).
- [3]朱绍祺,胡亚泽.基于数字孪生的电力物联网关键技术分析[J].数字技术与应用,2024,42(8):207-209.