

建筑电气系统中的数字孪生技术实现路径

吴骏浩

(浙江天功工程设计有限公司)

【摘要】为提升建筑电气系统运行管理的智能化水平,本研究围绕数字孪生技术在建筑电气领域的应用路径展开系统探究。通过构建以建模参数结构化表达、数据驱动感知机制与控制平台联动逻辑为核心的技术框架,成功构建适用于建筑电气系统的数字孪生实现方法。本研究采用架构解析与系统建模相结合的技术方法,提炼核心实现环节,并结合实际工程案例开展验证工作。研究表明,该应用路径能够有效提升建筑电气系统的状态可视化水平与动态响应能力,为建筑电气系统的智能运维与全生命周期管理提供了切实可行的技术支撑。

【关键词】建筑电气系统;数字孪生;数据驱动;系统建模

中图分类号:TU85

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2026.04.041

The Implementation Path of Digital Twin Technology in Building Electrical Systems

WU Jun-hao

(Zhejiang Tiangong Engineering Design Co., Ltd.)

【Abstract】To improve the intelligent level of operation and management for building electrical systems, this study systematically investigates the application paths of digital twin technology in the field of building electrical engineering. A technical framework centered on the structured expression of modeling parameters, a data-driven sensing mechanism, and the linkage logic of the control platform is established, forming a digital twin implementation scheme suitable for building electrical systems. Combining architecture analysis and system modeling, this study extracts key implementation links and verifies the proposed method with practical engineering cases. The results show that the application path can effectively improve the state visualization and dynamic response capability of building electrical systems, providing feasible technical support for the intelligent operation and maintenance as well as full-life-cycle management of building electrical systems.

【Keywords】building electrical system; digital twin; data-driven; system modeling

1 引言

在智慧建筑、绿色建筑等理念广泛践行的背景下,传统电气系统由于缺乏动态感知能力和智能响应机制,已难以满足高频次、高密度的运维管理需求。随着信息技术、物联网与人工智能的发展,数字孪生作为一种集建模、仿真、预测、控制于一体的复杂系统映射技术,为建筑电气系统的智能化管理提供了全新技术路径。

当前,数字孪生技术在制造、交通、能源等领域的应用已日趋成熟,但在建筑电气系统中仍面临着模型抽象难度大、数据链条不闭环、控制接口集成复杂等挑战。因此,开展适配建筑电气系统特征的数字孪生实现路径研究十分必要,需从系统构建、数据驱动、交互反馈等维度梳理核心关键环节。

本文围绕建筑电气系统数字孪生的构建过程,提出结构化建模、数据驱动感知、控制逻辑联动三

核心技术路径,并结合实际案例验证其可行性,以期建筑电气系统的智能感知与主动调控提供理论支撑和工程指导。

2 建筑电气系统中的数字孪生技术实现路径

2.1 建模参数的结构化表达

建模参数结构的完整性决定了数字孪生系统对物理建筑电气系统的映射精度。建筑电气系统涉及配电装置、控制单元、末端设备、布线系统及能耗计量装置等多维要素,其建模应优先实现对象逻辑清晰、层级清晰、属性明确^[1]。参数的表达结构需从空间、功能和行为三方面展开。空间维度的参数结构需明确建筑内部电气设备与空间分布的拓扑关系,涵盖配电回路与功能区域的映射关系、设备位置坐标及路径敷设逻辑等^[2]。功能维度要求表达电气子

系统运行过程中的电能转换、分配与控制逻辑,以参数形式刻画回路连接方式、断路器类型、电缆截面、电压等级及配电箱结构配置等内容。行为维度涉及设备运行状态、负载响应特征及电气事件的动态特性建模,需引入时间序列参数。建模过程需基于对象类划分与属性继承机制构建结构化模型库,保障模型具备扩展性与复用性。模型间的关联关系应采用节点逻辑映射与状态联动机制保持一致性。为保障模型与实际系统的一致性,建模过程中需预设状态容差范围与参数漂移识别机制,为后续动态校正及误差反馈闭环构建提供支撑。

2.2 实时感知的数据驱动机制

数据驱动机制是数字孪生系统动态响应的核心支撑,建筑电气系统的运行状态数据需实现高频采集、低延迟传输与稳定存储^[3]。感知系统应覆盖关键设备运行参数、电能质量、电压波动、负载状态、开关动作及故障特征等多元数据的全周期采集。感知节点的布设需依据系统功能单元与控制链条设定采样逻辑,采样频率需匹配设备动态响应特性。数据采集终端应具备自诊断、自适应采样与远程配置能力,保障不同工作场景下参数获取的稳定性。边缘计算单元承担初步数据处理任务,包括异常识别、信号降噪、值域校验与数据包整合,提升感知系统整体响应效率与数据可靠性,原理如图1。

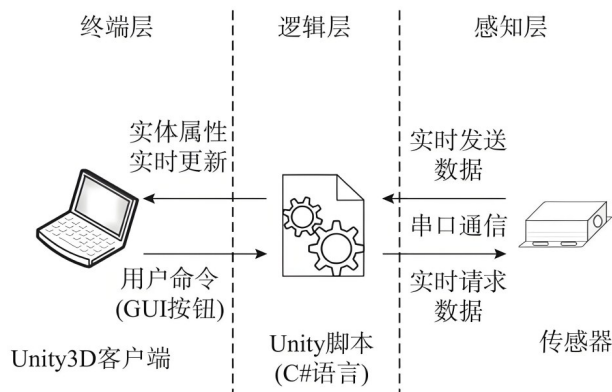


图1 实时数据驱动原理示意图

数据传输链路需构建多层协议架构,确保主干传输的带宽冗余与链路容错能力。基于多协议融合的通信结构可提升数据传输系统与控制平台的对接效率,构建可扩展的数据传输通道。数据接入平台需具备实时数据流、历史数据池与预测模型输入接口,以支持孪生模型状态的周期更新与趋势推演。

数据驱动机制的可靠性依赖于多源数据融合策

略与动态特征提取技术。对不同采样路径、不同采集精度及时间戳误差的数据样本进行对齐与统一处理,是构建孪生系统时态一致性的关键。结合时间窗滑动聚合、状态阈值触发与高频异常识别算法,系统可精准追踪建筑电气系统运行中的微小波动,支撑故障前兆判断与调控优化决策,实现模型状态的动态校正与调控逻辑的自适应演进,进而提升全周期运行稳定性与反馈准确性。

2.3 控制平台的联动执行逻辑

控制联动是数字孪生技术在建筑电气系统中实现反馈闭环的关键环节^[4]。平台控制逻辑需涵盖模型解析、指令生成、执行联动与状态反馈四个环节,各环节均需保障响应及时性与命令精准性。模型解析模块将孪生模型当前状态与目标状态进行差异计算,输出调控目标及响应规则。差异判定逻辑以特征参数变动为依据,其计算公式如下:

$$\Delta S_t = \|X - X_t\| \quad (1)$$

式(1)中: ΔS_t 为系统在时刻 t 的状态差异量, X 表示实测状态向量, X_t 表示孪生模型预测状态向量, $\|\cdot\|$ 表示向量范数。

调度命令需充分考虑控制对象的动态特性与物理约束条件,避免因频繁指令导致系统不稳定。指令生成环节以可执行控制逻辑为核心,形成多目标、分级别控制方案。该方案依据逻辑优先级区分各子系统控制命令的执行顺序,保障关键信号优先执行、低频状态缓行响应。生成模块应具备指令集缓存与冗余路径切换能力,应对网络延迟或控制路径中断造成的执行偏差。联动执行逻辑需精准适配建筑电气系统的设备控制接口与通信协议,形成无缝对接机制。控制信号下发后,设备端需具备状态确认与反馈功能,平台端实时接收设备反馈并同步更新孪生模型状态。反馈数据用于动态调整控制逻辑,确保平台控制过程形成完整闭环。状态校验机制在联动执行中承担调控准确性保障任务,平台需对比目标状态与设备实际状态的偏差,设定合理可容差区间,实现指令回溯与参数优化。控制平台还应具备多线程任务管理与资源调度能力,保障多点联动场景下的任务并发执行能力与响应速度。

3 应用案例

建筑电气系统的数字孪生技术的工程可行性、运维高适应性及动态响应性能,需在复杂大型建筑

场景中开展验证。上海体育场能效管理项目依托庞大的电气系统结构与高度集成的运维需求,成为数字孪生技术在建筑电气系统落地应用的典型样本。该项目以多维建模、高频感知、平台控制为实施路径,搭建起完整的孪生系统架构,有效提升建筑电气系统的可视化管理水平与运行智能化水平。

上海体育场作为国内大型多功能体育建筑,具备完整且复杂的供配电体系与高强度负载调度需求,在日常赛事运营、高峰照明负荷、电气应急保障等环节,均对系统运行状态与响应时效提出严苛要求。该项目在建筑电气系统管理中引入数字孪生技术,围绕建模参数结构化表达、数据驱动机制构建及控制平台联动逻辑三大路径推进工程部署。模型构建阶段依托建筑BIM电气模型与参数映射逻辑,以主供电路径为骨干,明确设备间的层级从属关系与三维空间坐标,搭建电缆敷设方案、电压等级、电流容量、负载结构等多元参数字段体系,保障孪生系统逻辑节点与物理系统运行状态高度一致。

行为参数设计环节,结合断路器动作规律、负荷响应曲线、运行时序控制等行为变量构建状态函数,为后续状态动态调整与事件预测搭建关联模型。数据采集层共部署35kV综保设备25套、智能电力仪表574组、运行状态检测节点117个,覆盖主变压器、分区配电箱、末端照明控制回路及部分备用电源切换路径;全部节点采样间隔设为5s,核心控制节点压缩至3s,数据经边缘计算设备预处理后上传至控制中心平台,统一基于MQTT与Modbus通信协议完成标准转化,保障数据链时延控制在200ms以内;平台端实现10ms级刷新率与滚动数据缓存功能,支持异常追踪与状态趋势分析。运行控制逻辑方面,平台基于孪生模型中设备实际状态与设定运行阈值的偏差自动生成调控任务,调控命令经调度层逻辑模块拆解为设备动作指令,分层分级下发至目标控制对象;控制完成后的状态需实时上传反馈,并同步更新模型映射字段。在系统运行波动剧烈或突发故障响应场景中,平台可快速完成逻辑判断与策略切换,实现备用电源上线、回路压负、负载切换等动作联动。

系统部署一年后形成完整的运行数据闭环,经实测,单日照明系统运行功率峰值由178.6kW下降至152.9kW,日平均照明能耗由224.5kWh减少至196.4kWh,主变压器负载电流波动从23.5A缩小至15.1A,母线平均电压偏移由11.4V降低至4.6V;年

内故障事件总计179起,其中自动响应处置164起、手动干预15起,平台故障响应平均时延压缩至6.2s,非计划性断电次数控制为2次,低于系统设定最大值6次,具体如表1所示。

表1 上海某体育场数字孪生系统接入前后关键运行参数对比

指标项	接入前数值	接入后数值	差值(单位)
日平均照明能耗/kWh	224.5	196.4	-28.1
峰值照明功率/kW	178.6	152.9	-25.7
平均照明功率/kW	154.2	138.4	-15.8
主变压器负载波动/A	23.5	15.1	-8.4
母线电压偏移/V	11.4	4.6	-6.8
故障响应平均时延/s	15.9	6.2	-9.7
年内非计划断电次数/次	6	2	-4

(数据来源:https://www.sohu.com/a/892797765_121132725)

在连续大型活动周期内,控制平台累计完成自动调节任务280次,其中动态压负操作47次、备用系统联动34次,全部实现动态闭环管控。实际运行成效如表1所示,各项指标的优化变化均印证孪生系统实现了对建筑电气系统多维度状态的精细感知、对故障事件的高效干预及对能耗结构的科学优化。

本项目验证了以结构化建模、时序数据驱动与控制逻辑联动为核心的数字孪生技术路径,可在实际大型公共建筑场景中落地实施,同时对建筑电气系统的运行状态感知能力、能源调度效率及风险防控水平实现系统性提升。

4 结语

数字孪生技术在建筑电气系统中的集成应用,有效提升了系统的建模精度、运行监测能力与控制响应效率;依托结构化参数表达、高频数据驱动与平台联动控制的技术路径,能够推动建筑电气系统从静态管理向动态调度的转型升级。实际工程验证结果表明,该技术路线具备良好的工程适配性与可复制性,为建筑电气系统智能化运维提供了技术支撑。

参考文献

[1] 邱秀君. 智能化技术在建筑电气工程中的运用[J]. 建筑科学, 2025, 41 (3): 190.
[2] 陈博雅. 建筑电气设计智能化技术的应用分析[J]. 科技资讯, 2025, 23 (4): 96-98.
[3] 韩浩学, 王进林, 谢斌. 建筑电气系统在绿色建筑中的节能应用研究[J]. 新疆钢铁, 2025 (1): 69-71.
[4] 黄闽汉. 节能技术在建筑电气设计中运用分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025 (5): 64-66.