

数字孪生驱动的城市综合体建筑设计与全过程管理应用

文 / 刘建元 厦门大学设计研究院有限公司

摘要：随着城市综合体体量增大与功能复合程度提升，传统建筑设计与施工管理模式逐渐难以满足高效率、高协同的工程需求。数字孪生技术作为连接虚拟与现实的关键手段，正在重塑建筑行业的设计逻辑与建造体系。本文聚焦数字孪生在城市综合体建筑设计与全过程管理中的实际应用路径，剖析其在建筑方案生成、协同设计、智能建造、全周期数据资产管理等方面的技术机制与系统价值。通过典型项目实践验证，明确数字孪生对提升建筑效率、质量与协同能力的支撑效能，为建筑行业的数字化转型提供现实参考。

关键词：数字孪生；城市综合体；建筑设计；BIM平台；全过程管理

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.001

引言

在城市建设进入高密度、高效率、高复合阶段的背景下，建筑设计面临的不再只是结构与造型的表达问题，而是涉及多专业协同、建造精度控制与数据全生命周期流通的系统挑战。单一工具型的技术迭代已无法应对建筑场景的治理复杂性，必须依托更具系统性和融合力的数字平台。数字孪生的提出，恰好突破了设计、施工与运维割裂的传统模式，为建筑设计的“能用、管用、好用”提供了路径支撑。在这一逻辑下，平台架构、协同机制与实践集成成为建筑行业转型的关键锚点。

一、数字孪生赋能城市综合体建筑设计的技术逻辑

（一）云原生平台架构下的建模机制创新

城市综合体建筑设计中，传统C/S架构的建模软件常受限于本地计算资源、数据同步效率及协同机制的滞后，难以满足超大规模、跨专业并发设计任务的需求。在数字孪生赋能逻辑下，设计平台架构逐步转向云原生体系，通过微服务架构、容器编排与WebGL轻量渲染技术构建可扩展、高弹性的数据处理体系。系统基于FaaS (Function as a Service)逻辑，支持建筑信息模型(BIM)与城市信息模型(CIM)间的数据融合，实现多源异构数据的实时接入与解耦处理^[1]。

（二）智能生成与多专业协同的设计逻辑

数字孪生赋能建筑设计的核心，在于实现“人一机一数”三元协同的设计范式重塑。相较传统由设计师主导、数据滞后支撑的模式，智能生成机制借助参数化建模、规则驱动算法与AI设计辅助系统，推动设计从“经验式试错”转向“算法式迭代”。在城市综合体项目中，系统可基于场地特征、功能需求、交通组织等输入要素，自动生成多组方案雏形，并通过约束边界条件（如日照分析、容积率控制、流线组织）实现快速筛选与优化，大幅缩短初设周期并增强方案科学性。同时，协同机制不再依赖“结果导向”的数据导入导出，而是构建在BIM/CIM统一模型基础上的“过程协同”^[2]。

二、数字孪生驱动的城市综合体建筑设计与全过程管理应用路径

（一）“任务—图纸—进度”三维一体的过程管理体系

数字孪生平台以任务链为牵引、图纸数据为载体、进度模型为核心，构建三维一体的过程管理体系。在任务配置模块中，所有设计与施工任务以结构化节点链展现，每一节点均绑定对应图纸模型、施工资源与责任人，实现“从图纸中提取任务”的逆向关联。设计成果与施工图纸嵌入模型节点中，图纸变更后自动推送至任务池与进度模块，避免版本误用。进度控制环节，平台接入BIM 5D工期模拟引擎，将任务节点与实际施工进度绑定，实现按日、按专业、按构件的微尺度监控^[3]。平台支持“滞后预警+路径回溯”，一旦节点延误，系统自动分析影响路径并生成可视化调整方案，为管理层提供决策依据。

（二）跨专业协同设计的版本一致性与信息互通

数字孪生平台通过“统一模型空间+专业分图管理+信息交互引擎”，实现多专业设计的版本一致性与信息互通。在统一空间中，各专业基于统一坐标系建模，系统实时校验构件定位与属性，避免“错层”“漏管”等问题；分图机制则保证“模块独立+集成交付”，后台自动执行模型合并、差异识别与冲突检查。平台内嵌IFC格式解析与语义识别功能，可提取构件参数和性能指标，通过云标签与多视图实现数据共享。消息订阅机制使相关责任方在构件修改时获得即时提醒，并可通过“设计联席室”进行在线协作^[4]。这一机制确保跨专业并行建模与实时协调，避免了传统依赖人工会审导致的滞后。

（三）图纸对比与变更追踪机制中的智能比对算法

平台基于图纸版本管理系统，嵌入构件级智能比对算法，形成“构件级识别—变更标签化—更新可视化”的机制，实现全过程的变更可溯与闭环控制。比对算法通过唯一ID与语义属性深度匹配，可识别新增、删除构

件与参数调整，并以高亮颜色在模型中标注差异，自动生成变更清单，便于快速定位影响区域。用户可调用历史版本，生成“变更轨迹图”，追溯设计演化过程并支持责任认定^[5]。系统还引入“变更触发工单”，关键构件修改时自动生成预警任务，确保施工现场同步响应。平台同时联通施工图、竣工图与运维图，形成跨阶段的全周期版本链条，保证数据一致性与完整性。

(四) 多端协同与移动轻量化数据接入机制

平台在架构中嵌入多端适配机制，构建“PC端深度建模+平板端交互协同+移动端现场响应”的三端联动模式。基于 WebGL 与轻量 BIM 引擎，系统实现大体量模型压缩传输与边渲染边加载，使现场人员可在移动终端快速调取构件信息与节点数据，无需依赖高性能设备。数据接入层采用“云边协同”，保障模型在云端统一存储与版本同步，同时通过边缘节点部署提升弱网环境下的实时性。平台支持语音识别、二维码/定位扫描、离线缓存等方式，提高信息录入与反馈效率。针对不同角色，系统提供差异化权限与任务接口：项目经理可在 Pad 端调度进度，监理人员可实时标记偏差，施工工人则获取分步工艺指导与安全提示，实现“角色可视、数据可控、操作可感”的作业支撑环境^[6]。

三、数字孪生驱动的城市综合体建筑设计与全过程管理实践案例分析

(一) 项目简介

厦门大学海韵园二期(一期)项目位于厦门市思明区，为厦门大学拓展教学科研空间、优化校园功能布局的重点建设工程。项目总建筑面积 169250 平方米，包含德旺商学院大楼 A 栋 (38870 平方米)、B 栋 (14930 平方米)、电影学院大楼 (30000 平方米)、综合文体中心 (20400 平方米) 及门卫用房等单体，地下建筑面积达 65000 平方米，地下共五层，地上最高九层，檐口高度达 36 米，最大单体建筑面积为 103870 平方米。项目采用“设计—施工总承包 (EPC)”模式推进，作为厦门市首批智能建造试点工程，项目在全过程中深度融合数字孪生、BIM 协同、智慧工地与集成检测等新一代建造技术，打造了智能感知—动态联动—数据沉淀的全生命周期数字建造闭环。

(二) 项目设计阶段：BIM 建模与性能仿真同步集成

厦门大学海韵园二期(一期)项目在设计阶段面临超大体量与多专业交叉协同的双重挑战，项目团队基于“设计即建造”的理念，全面引入 BIM 一体化建模机制，涵盖建筑、结构、给排水、暖通、电气等 12 个专业，并实现与“智建平台”的实时对接，构建全过程数据贯

通的设计底座。为保障建筑运行性能在前期得到预测与优化，设计环节同步集成能耗仿真模块，借助 Revit 与 Green Building Studio 完成围护系统热工性能、通风换气效率与日照遮阳分析，支撑建筑节能目标前置化。在协同机制上，设计团队形成“模型创建—多方审查—差错修正—版本定稿”的闭环流程，模型冲突率控制在 2% 以内。通过集中建模、共享审查平台与构件级版本管理，初审周期较传统流程缩短约 40%，图纸出错率下降至 1.4%，显著提升了设计阶段的协同效率与下游建造可控性。

(三) 项目施工阶段：结构、机电一体化集成建造路径

在厦门大学海韵园二期(一期)项目的施工阶段，项目团队将结构施工与机电安装全过程纳入数字孪生平台统一管理，实现了由 BIM 模型驱动的多专业集成建造路径。施工前，团队基于深化设计模型完成钢筋排布、模板定位及机电预埋的施工模拟，平台通过碰撞检测模块提前发现并修正 76% 的潜在冲突点，显著减少现场返工率。以砌体工程为例，施工工序按照“施工辅助线放样—混凝土导墙浇筑—第一层砌墙砌筑—构造柱浇筑施工—全面施工—圈梁上部砌体施工”的标准流程执行 (见图 1)，并在平台中生成三维动态交底动画，实现施工班组对工序的直观理解与精准执行。对于机电系统，平台基于 4D 施工模拟生成“预设路径+进度计划”模型，结合二维码构件标识技术，在现场实现材料信息与安装位置的快速匹配，减少人工寻址与错误安装的风险。

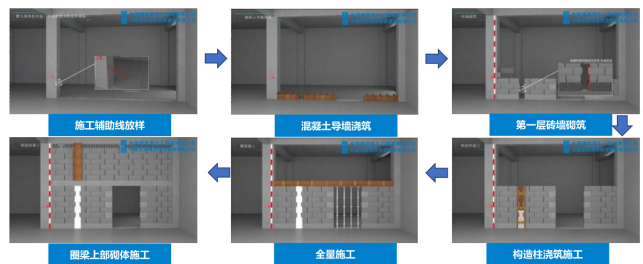


图 1 砌体结构标准化施工流程图

(四) 全过程建造管理：数字孪生平台的实景联动与动态校核

在厦门大学海韵园二期(一期)项目中，数字孪生平台贯穿设计、施工、运维全链条，实现了“虚实同步、实时校核”的动态管理模式 (见图 2)。施工阶段，平台通过无人机航拍、固定摄像头与移动端采集设备，将现场实时影像与 BIM 模型进行空间坐标匹配，实现施工状态的可视化监控。系统内嵌的 AI 比对算法可在数秒内识别现场实景与模型间的构件偏差，当偏差超出 ±15mm 阈值时，自动生成预警并推送至责任班组，大幅缩短了问题发现与处理的时间。截至目前 (2025 年 8 月)，平

台动态管理数据显示，主体结构已全部完成，砌体及二次结构施工正按计划推进，机电工程进入安装高峰，外立面施工已覆盖多个立面单元（见表1）。这一“实景—模型”双向校核机制，使关键节点偏差平均控制在±1天以内，计划执行率保持在97%以上，为项目在后续精装修及交付阶段奠定了稳定的进度基础。

表1 截至2025年8月的关键节点进度跟踪表

节点名称	计划完成日期	实际完成 / 当前状态	偏差（天）	预警等级
主体结构封顶	2025-06-30	已完成	0	低
二次结构施工完成	2025-09-15	施工中（完成约65%）	-	中
机电系统安装完成	2025-10-30	安装中（完成约40%）	-	中
外立面幕墙安装完成	2025-11-20	进行中（完成约25%）	-	中
精装修启动	2025-12-05	未启动	-	高

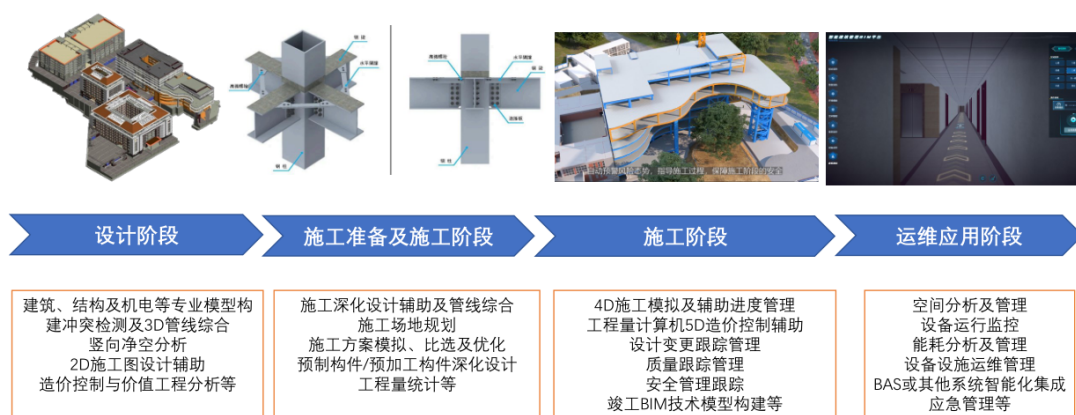


图2 厦门大学海韵园二期项目全过程数字孪生应用示意图

（五）成效分析：数字孪生平台在项目实施中的综合效益

在厦门大学海韵园二期（一期）项目的实施过程中，数字孪生平台的应用已在经济效益、工期优化、管理效能及人才培养等方面产生了显著成效。在经济与工期效益方面，平台累计反馈与解决设计、施工问题130项，减少设计变更带来的材料及人工损失约80万元；施工过程的精细化管理与工序优化节约直接经济成本约305万元，优化管线263余处，使机电安装阶段的返工率显著下降，整体节约工期约30天，综合经济效益初步测算达到260万元以上。在管理效能方面，平台实现了施工现场的实时信息汇总与可视化展示，使问题发现与处置效率提升约25%-30%，关键节点执行率稳定在高位，并有效保障了施工计划的可控性。项目同时发挥了技术辐射作用，为参建单位培养了一批具备BIM建模、智慧管理与数据分析能力的复合型技术骨干，并在执行过程中积累了可推广的数字化管理经验。

结语

数字孪生技术在城市综合体建设中的深度应用，不仅重构了设计、建造与管理的协同逻辑，也推动了建筑行业从经验驱动向数据驱动、从被动响应向主动优化的转型。在实践中，其价值已从单点的技术提升延伸至全链条的组织重塑与效能放大，为解决超大体量、多专业耦合与全周期治理的系统性难题提供了可验证路径。随

着算力基础、感知网络与人工智能算法的持续演进，数字孪生有望进一步实现跨项目、跨区域的智能互联与资源调度，形成覆盖规划、建设、运维全生态的数字化治理格局。

参考文献

[1] 刘黎黎. 建筑工程管理中项目管理理念的应用[J]. 中国住宅设施, 2025, (04): 205-207.

[2] 李炎地, 潘溢滔, 徐黎祺. 基于数字孪生的高层悬挂钢结构体系智能化施工研究[J]. 建筑施工, 2024, 46(11): 1922-1926.

[3] 屈莹. 超大智慧地下空间在城市综合体中的设计与影响[J]. 山西建筑, 2024, 50(08): 40-43.

[4] 丁旭. 从“十四五规划”等政策文件和若干城市设计案例谈新时期城市设计的创新性[J]. 城市发展研究, 2023, 30(08): 26-31.

[5] 尚可, 张宇琳, 张飞舟. 基于数字孪生技术的智慧停车场总体架构[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(08): 2029-2038.

[6] 曲慧娟. 生态新区智慧化顶层设计及智慧应用场景规划的实施研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2021, 38(02): 69-74.

作者简介：刘建元，1981年6月，男，满族，吉林梅河口人，本科，高级工程师，国家一级注册建筑师，研究方向：建筑设计。