

2025

上海市建筑信息模型技术应用与发展报告

Shanghai BIM Technology Application & Development Report

案例集

Building
Information
Modeling



上海市住房和城乡建设管理委员会

Shanghai Municipal commission of Housing
Urban-Rural Development and Management

上海市第七届 BIM 技术应用创新大赛获奖项目案例介绍

上海建筑信息模型技术应用推广中心于 2025 年 2 月举办上海市第七届 BIM 技术应用创新大赛。本届大赛聚焦 BIM 技术的深入研究与应用，分设项目案例奖和特别创意奖等，旨在展示上海市 BIM 技术在工程建设各方面推广应用的优秀成果。其中项目案例奖注重成熟型 BIM 关键技术工程项目中的广泛应用，特别创意奖注重思维模式、高新技术、管理模式等方面的创新创意。

本次发展报告分别从三类奖项中选取了 17 个获奖项目案例(详见下表 1-1)，其中项目案例奖房建类 7 个、市政类 4 个、特别创意类 6 个，这不仅体现了全上海应用 BIM 技术的深度与广度，还深刻诠释了 BIM 技术在工程建设各阶段的巨大作用与潜力。希望这些案例能够成为行业标杆，发挥引领、示范作用，推动 BIM 更广泛的应用。

表 1-1 收录获奖项目清单

序号	奖项类别	项目名称	主申报单位	联合申报单位
1	项目案例奖 -房建类	国产 BIM 技术赋能金港智悦湾项目新型建造模式创新实践	上海现代建筑规划设计研究院有限公司	上海建工七建集团有限公司 北京构力科技有限公司
2		基于“BIM+”的世博文化公园双子山监测风险总控数字孪生平台	上海勘察设计研究院（集团）股份有限公司	上海地产（集团）有限公司 上海顺凯信息技术有限公司
3		柯桥未来医学中心绿色智慧医院全过程 BIM 应用	中国建筑第八工程局有限公司	绍兴柯桥未来之城医学项目建设有限公司
4		荣耀之环钢结构幕墙数字建造技术	上海市机械施工集团有限公司	上海临港新片区经济发展有限公司
5		上海博物馆东馆新建项目	上海建工四建集团有限公司	上海市机械施工集团有限公司 上海市建筑装饰工程集团有限公司 上海市安装工程集团有限公司 上海建科工程项目管理有限公司
6		上海市胸科医院心胸疾病临床医学中心项目	上海市胸科医院	上海建工四建集团有限公司 上海科瑞真诚建设项目管理有限公司
7		张园城市更新（东区 115-06、115-08 地块保护性综合改造）工程	上海静安城市更新建设发展有限公司	华东建筑设计研究院有限公司

序号	奖项类别	项目名称	主申报单位	联合申报单位
				华建数创（上海）科技有限公司
8	项目案例奖-市政类	北横通道东段工程（热河路东侧-双阳路）	上海公路投资建设发展有限公司	上海市城市建设设计研究总院（集团）有限公司 上海城建信息科技有限公司 上海建工集团股份有限公司 上海城建市政工程（集团）有限公司 上海市隧道工程轨道交通设计研究院
9		漕宝路快速路新建工程施工阶段 BIM 应用	上海黄浦江越江设施投资建设发展有限公司	上海建工集团股份有限公司 上海隧道工程有限公司 上海建磐科技有限公司
10		G15 嘉金段改扩建工程基于自研平台+AI 的 BIM 正向设计与应用	上海市市政工程设计研究总院（集团）有限公司	上海沪申高速公路建设发展有限公司
11		苏州轨道交通 11 号线工程	上海市隧道工程轨道交通设计研究院	苏州轨道交通大数据有限公司 苏州轨道交通市域一号线有限公司
12	特别创意奖	城市更新背景下建筑立面“修、改、留”的数字化路径探索与工具研发	上海建筑设计研究院有限公司	/
13		第十人民医院肿瘤精准诊疗中心项目全过程 BIM+应用“1+X”模式	上海市第十人民医院	上海科瑞真诚建设项目管理有限公司 上海申康卫生基建管理有限公司 同济大学复杂工程管理学院 上海经纬建筑规划设计研究院股份有限公司 上海建工二建集团有限公司
14		国家文物保护利用示范区优秀历史建筑群保护修缮与功能提升关键技术	上海市建筑装饰工程集团有限公司	/
15		建筑空间点云数据自动采集机器人研发与应用	中建东方装饰有限公司	同济大学卓越工程师学院
16		市政交通工程 BIM+CIM 场景融合应用创新方案	上海市隧道工程轨道交通设计研究院	/
17		基于 BIM5D 的碳排放管理平台	上海建工一建集团有限公司	/

国产 BIM 技术赋能金港智悦湾项目

新型建造模式创新实践

1. 项目概况

金港智悦湾项目位于上海浦东新区金桥，地块北侧为洲德路，西侧为春景路，南侧银涛路，东侧为润荷路。项目用地由 E11-02、E12-01、E15-01、E16-01 共 4 个地块组成，以研发建筑为主体，包括研发楼、厂房、配套设施以及地下室组成的综合建筑群落。总建筑面积 35.8 万平方米，建设用地面积 9.8 万平方米。致力于建设上海科技创新的先行示范区，临港新片区活力智慧的绿色标杆区。项目基地北侧为住宅、商业用地，空间由丰富的水景资源及水岸绿化环绕，东侧及西侧同为教育研发设计用地，交通便利，产城融合，合力发展。

华建现代院作为该项目的设计总包，承担设计阶段全专业 BIM 咨询服务。上海建工七建集团作为施工总承包，承担施工阶段 BIM 咨询工作。



图 1-1 项目效果图

2. BIM 技术应用概况

2.1 应用策略

本项目设计施工阶段，现代院数字化研究中心 BIM 团队通过国产 BIM 软件 PKPM-BIM 和轻量化的数字化平台、智能化建造核心技术，配合项目部建立了一套业务落地、技术领先的建筑工程全生命周期完整数字化建造解决方案，实现了前沿数字化技术与高端智能装备在装饰工程中的融合应用，辅助项目部开展装饰工程全生命期的动态可视化管理、信息共享以及决策支持，实现传统装饰产业的技术改造和升级，实现高性能工程产品的交付及工程全生命周期的增值和生态可持续建造。

2.2 组织建设

2.2.1 组织架构

金港智悦湾项目设计总包上海现代建筑规划设计研究院有限公司，施工总包上海建工七建集团有限公司，互相联合形成以项目经理和各参建单位组成的 BIM 咨询团队。包括设计技术部，BIM 设计工程师，BIM 施工实施工程师及深化工程技术工程师。

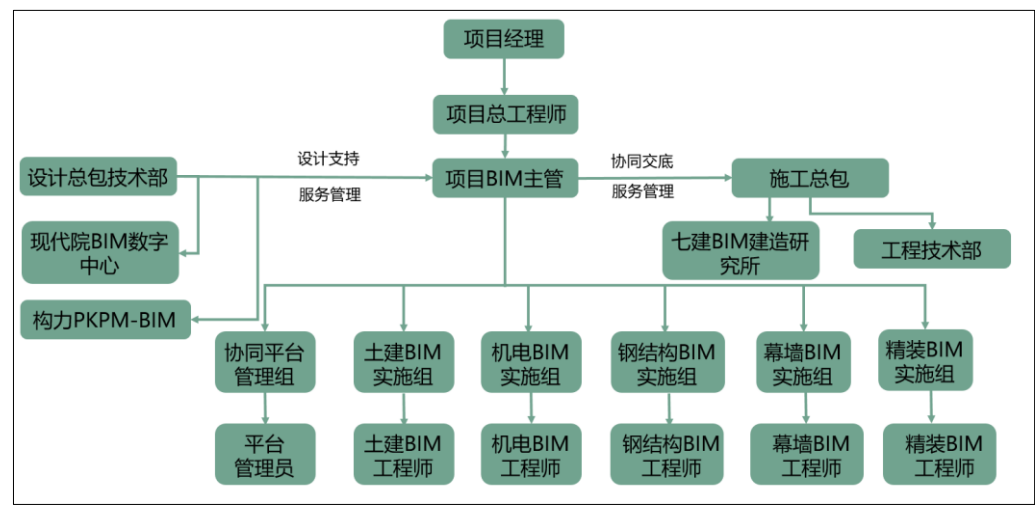


图 2-1 项目组织架构图



图 2-2 项目 BIM 团队介绍

华建集团与建工七建集团专业人才团队，技术与设计相辅相成，工程与 IT 人才跨界融合，共同保驾项目顺利落地。

2.2.2 BIM 管理体系总体思路

根据《上海市建筑信息模型技术应用指南》（2025 版）、《建筑信息模型施工应用标准》《建筑工程设计信息模型制图标准》《BIM 实施应用手册》、现代院《建筑信息模型（BIM）建模标准》编制形成《金港智悦湾项目 BIM 实施导则》，通过项目实际实施与应用，形成了一套从建立标准、模型维护、沟通机制到 BIM 交付的完善流程。



图 2-3 BIM 实施标准

2.2.3 BIM 应用环境

在项目天桥造型上采用 Rhino 实现建模模型与参数化融合，整体地下室模型采用 Revit2020 版本地上模型采用 PKPM-BIM 创建，尝试国产 BIM 相结合的方式建模。



图 2-4 BIM 应用环境

3. BIM 技术应用成果与特色

3.1 设计阶段

3.1.1 建筑外立面把控

一级界面：

主要为玻璃幕墙和铝板幕墙系统，设计利用色彩。变化凸显立面秩序性及层次性，通过隐藏幕墙竖框，杆件背置开启扇等处理方式，提升细节效果改善空间使用品质。利用色彩变化强化秩序性细节和层次感。

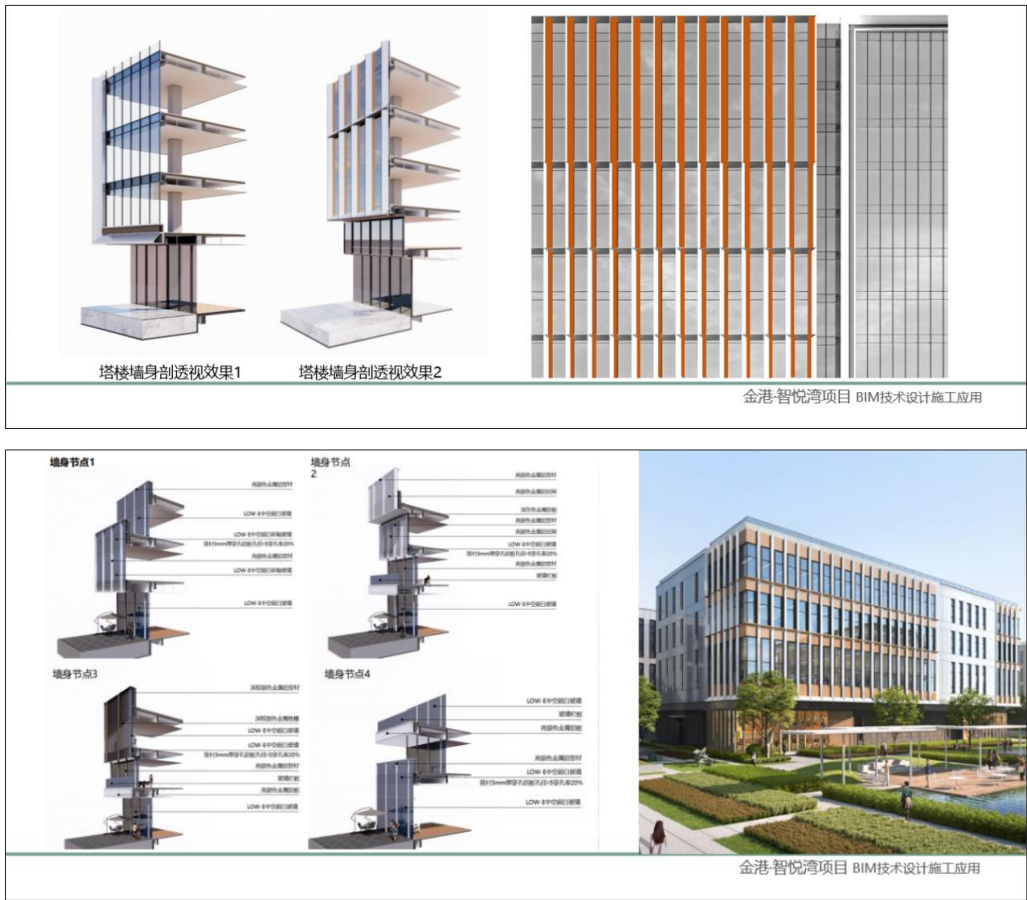


图 3-1 玻璃幕墙和铝板幕墙系统

二级界面：

主要为带一定铝板造型的窗墙系统，设计针对南北地块的南侧城市干道，分别进行色彩及细部等差异化处理。通过浅灰色调和格构造型及标准单元通过模型立面的划分实现，项目过程中通过多平台方案比对，选择最适宜的效果。

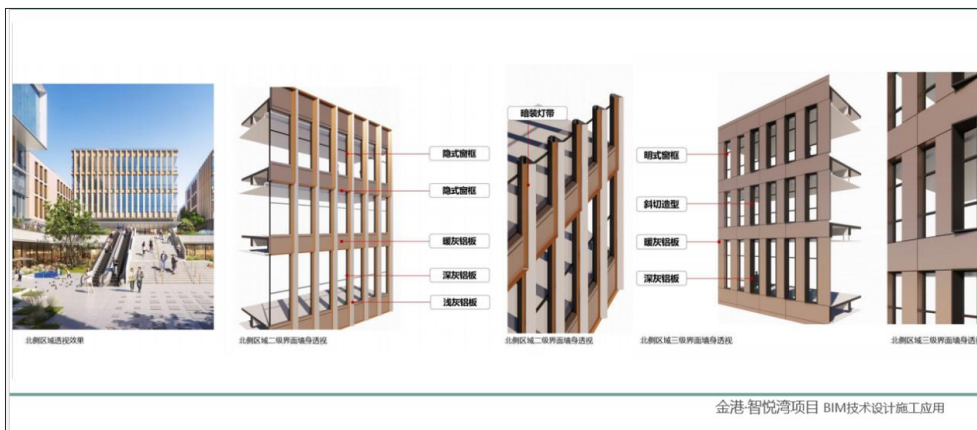


图 3-2 窗墙系统

3.1.2 天桥整体设计把控

天桥参数化设计：

结构形式采用上承式拉索拱桥，整体造型以金港之“鲸”宣传形象为出发点，结合悬浮飞碟的设计概念，打造极具标识性的过街步行系统。

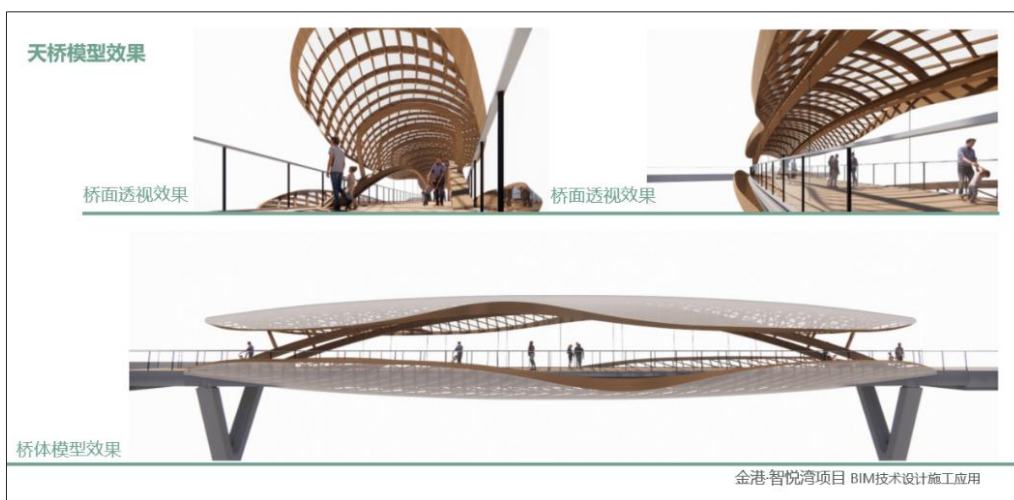


图 3-3 天桥参数化设计

3.1.3 BIM 设计碰撞检查

通过剖切建筑和结构专业的整合模型，检查建筑和结构的构件在平面、立面、剖面位置是否一致，消除建筑与结构间的不统一。形成问题跟踪检查报告，实时检测设计变化。

项目体量大，图纸版本繁多，各专业交叉。施工图设计阶段创建 BIM 模型，土建建模深化阶段，梳理协调解决土建深化问题 396 项，BIM 机电深化过程中提交机电报告 13 份，共发现并解决机电类设计问题 341 条么，与设计协调拉通，明确问题内容，及时闭合相关问题。

垃圾车位区域机电管线排布遵循小管让大管的基本原则：三根桥架及小风管利用梁窝翻弯，避让大风管；风管遇到成排的桥架、水管合理翻弯，避免碰撞。机电管线底标高 4300mm，满足垃圾车位 3900mm 净高需求。

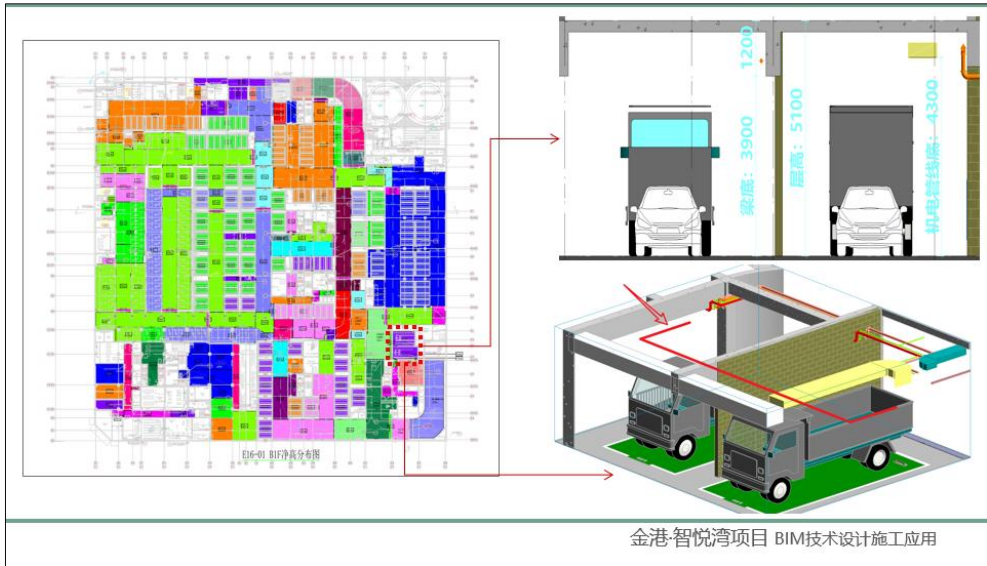


图 3-5 项目管综优化方案

机电深化：

暖通换热站区域，该区域层高 4500，主梁高 1000，梁底 3500；因风管高度影响，现净高控制在 2350 左右，满足净高要求。管线综合已考虑管道检修空间/保温空间/支架空间/人行空间等。

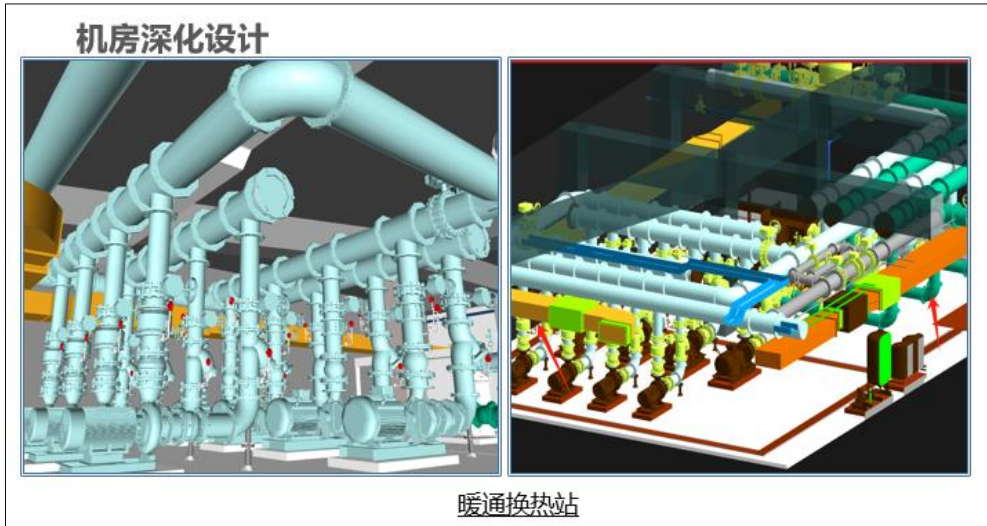


图 3-6 暖通换热站

生活水泵房，该区域层高 4500，主梁高 900，梁底 3600；现净高控制在 2900

左右，满足净高要求。管线综合已考虑管道检修空间/保温空间/支架空间/人行空间等。

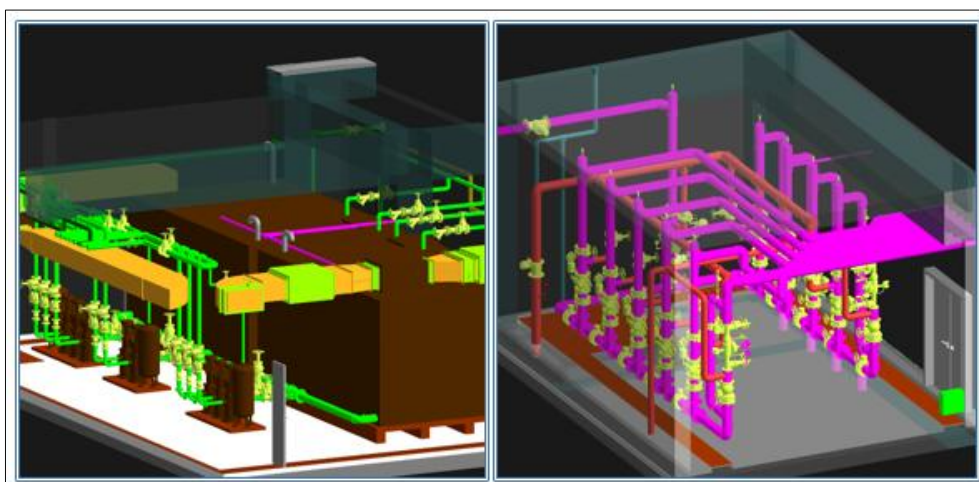


图 3-7 生活水泵房

3.2 施工阶段

3.2.1 场地布置

施工 BIM 团队，建立公司标准化族库，根据不同施工阶段的需求完成施工现场场地模型搭建工作，并优化场地布置方案。场地布置模型创建完成后，不仅要对施工现场起到可视化的作用，还需要利用 BIM 技术解决施工现场的实际工程问题。通过场地布置模型中录入的信息，利用 BIM 模拟性、协同性等特点完成二维场地布置中无法达成的效果，使现场布置方案更科学，从而提高施工质量，确保施工进度和现场人员安全，助力项目精细化履约。

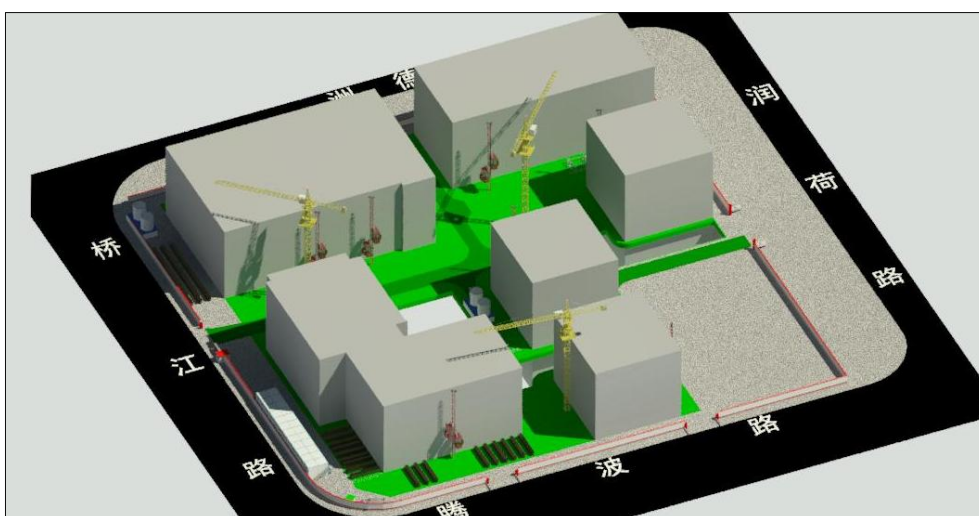


图 3-8 施工现场场地模型搭建

3.2.2 深化设计

通过 BIM 施工深化，辅助土建模型关键节点的深化工作，按现场施工实际需求进行复杂节点三维建模。

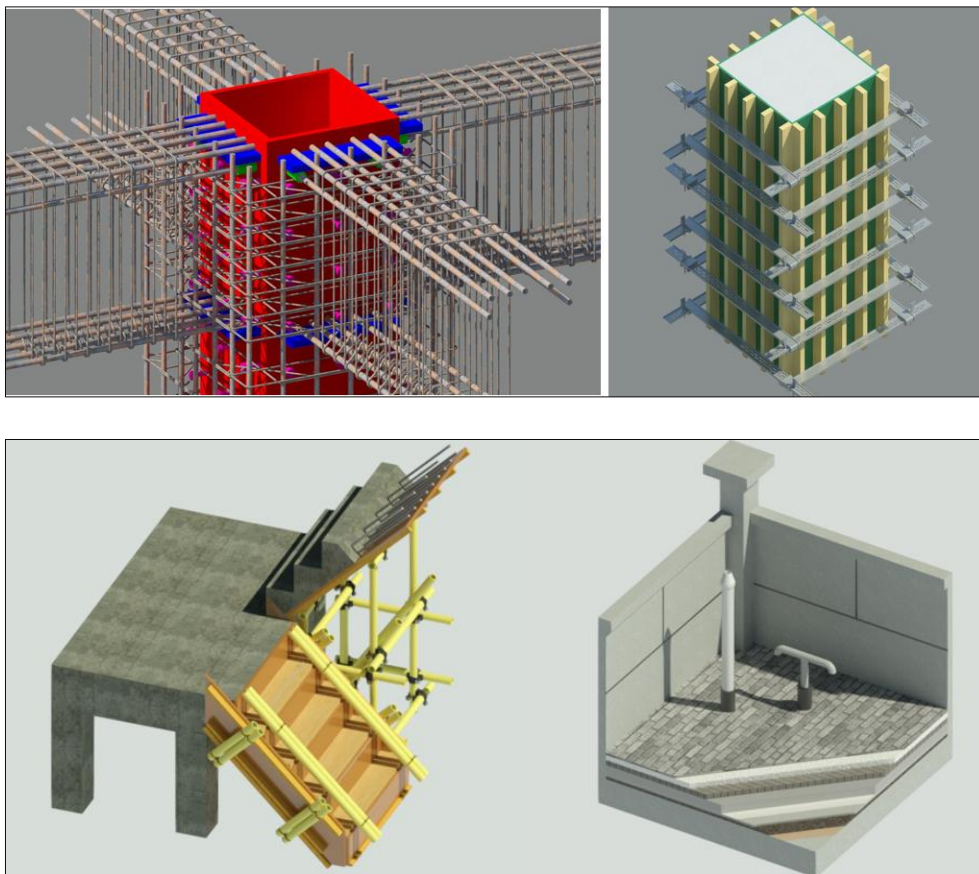


图 3-9 深化设计三维建模

通过 BIM 施工深化，辅助土建及装饰样板制作，可视化交底。

3.2.3 施工方案模拟

基于设计详细的施工方案，通过数字模型的施工顺序模拟，展现施工过程，用于项目吊装施工人员交底，并及时发现具体实施过程中可能遇到的问题。

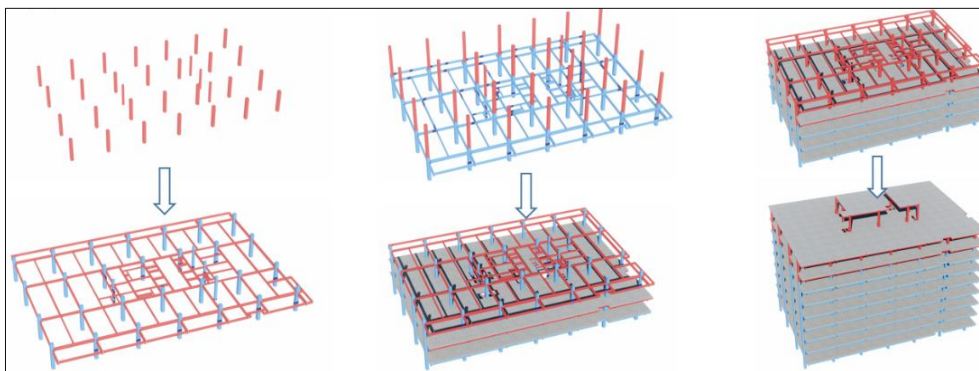


图 3-10 施工方案模拟

4. BIM 技术应用效益与测算方法

4.1 基于项目 BIM 智能联审

为贯彻落实《住房和城乡建设部等部门关于加快新型建筑工业化发展的若干意见》（建标规〔2020〕8号）、《关于进一步推进本市工程建设项目施工图设计文件审查改革工作的通知》（沪建建管联〔2021〕288号）《上海市全面推进建筑信息模型技术深化应用的实施意见》（沪住建规范联〔2023〕14号）等文件要求，在部分项目试点的基础上，自2024年2月1日起，在上海市工程建设项目审批管理系统（简称“市工程审批系统”）中，上线基于建筑信息模型（简称“BIM模型”）技术的智能辅助审查子系统，进一步提升施工图审查效率和勘察设计质量。

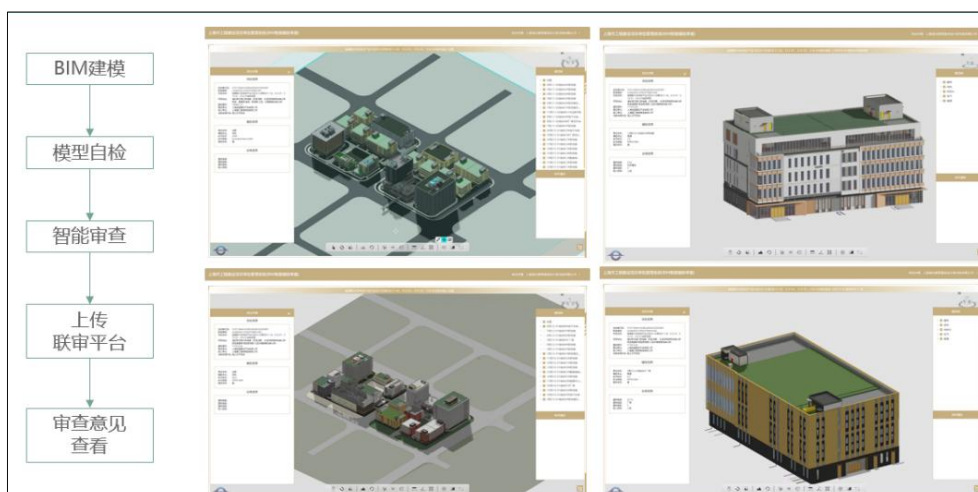


图 4-1 智能辅助审查子系统

4.2 轻量化平台

项目采用图模大师基于 PKPMbimbase 平台，可实现三维模型在平台中的漫游，三维动态观察，视点保存，集合管理等。在批注任务栏里可实现对模型进行标注，并在管理里对标注问题进行汇总查看一键跳转定位。

实现随时随地移动端 PC 端二维码扫描轻量化游览。

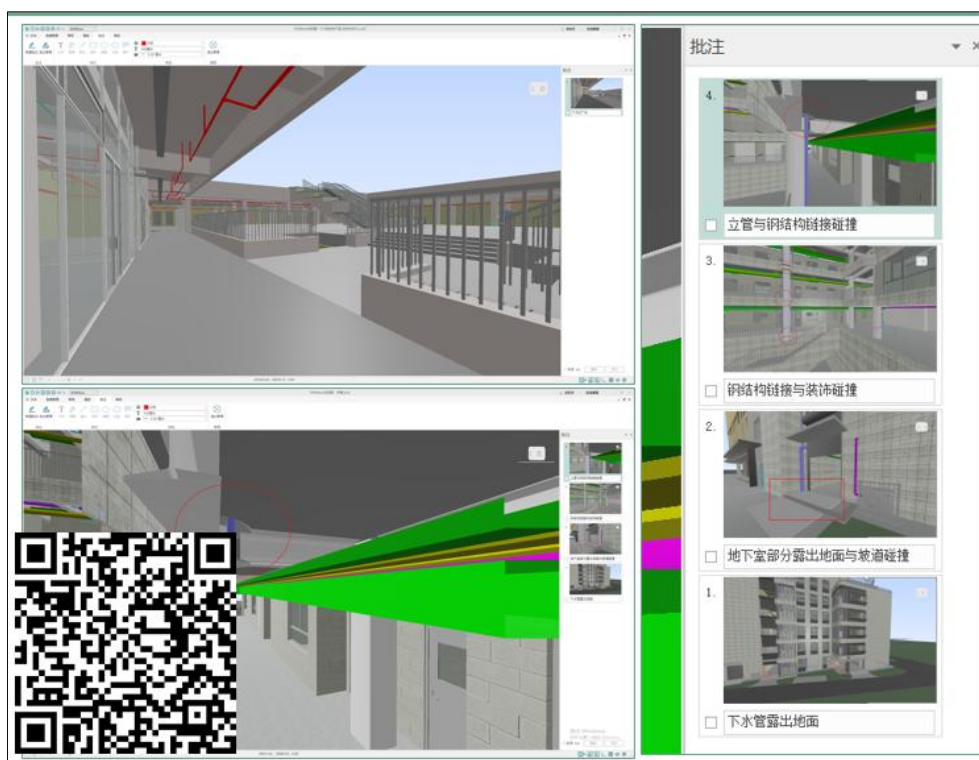


图 4-2 轻量化平台

4.3 装配式施工

装配式钢结构从深化设计、生产加工到进场安装全过程 BIM 应用，辅助施工。通过 BIM 技术三维深化预制构件，提供生产厂家加工，再经过结构试验，至构件加工完成形成各自的安装二维码精确定位到相应的位置。

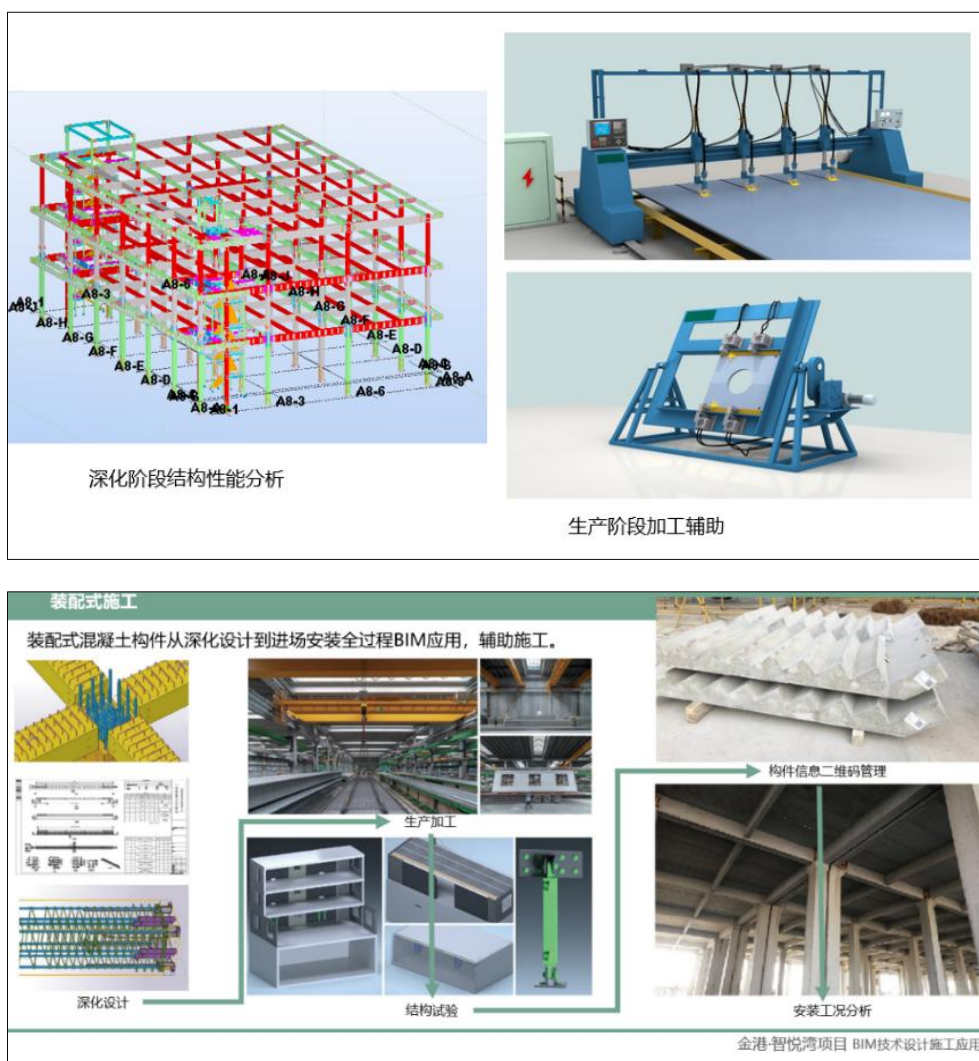


图 4-3 装配式钢结构

4.4 无人机拍摄

定期进行无人机航拍，记录施工过程，并辅助分析场地及周边环境的合理性，便于及时做出调整。

无人机倾斜摄影技术由数据采集系统、数据处理系统组成。无人机值守机场，具备无人机自动存储以及放飞回收、充电功能，可将无人机直接部署到作业现场，解决人工携带无人机通勤的问题。不工作时，无人机待机在自动机场内；工作时，机场舱门打开，升降平台上升至顶部，无人机自动起飞，按照既定巡检线路自动飞行。由于无人机值守机场具备远程执行飞行任务、自动采集、自动充电管理等功能，可实现每日执行多次任务、辅助工程现场的安全文明施工检查以及工程进度的实时更新。



图 4-4 工地现场照片

4.5 项目管理系统

上海建工七建集团作为该项目施工总包，积极探索应用移动互联、物联网、人工智能 AI、5G 通讯、大数据等新一代信息技术，完善智慧工地建设标准。



图 4-5 智慧工地平台

在施工过程中，扬尘治理系统和喷淋系统的联动可以实现自动化控制。当监测到扬尘超标时，系统会自动启动喷淋装置进行降尘。这种联动控制可以提高工作效率，减少人力物力的投入。通过实时监测施工现场的扬尘浓度和空气质量，可以及时发现问题并采取相应的措施，确保施工安全。同时，系统还可以根据监测数据对施工现场的环境状况进行评估，为施工管理提供科学依据。

塔吊数据检测系统：

项目部管理人员能通过后台查看现场每台塔吊的各项数据，如起重量、其中高度、幅度、回转度数、倾角、风速、力矩百分比等实时数据。如系统检测到数据超标，系统将发送报警信息至管理人员手机及电脑端平台。

塔吊可视化吊钩：

塔机吊钩可视化系统能实时以高清晰图像向塔机司机展现吊钩周围实时的视频图像信息，解决了施工现场塔机司机视觉盲区，远距离视觉模糊，人工语音引导易出差错等行业难题。同时降低了人力成本，提高了工作效率，是提升监管效果，减少安全事故。

建立企业级数据协同平台和管理机制，使参建方数据能够实现交互共享，为参建方提供一个高效、灵活和安全的协同工作环境。数据的集中管理，使项目数据的安全性得到了保证，资料整合的效率将会得到极大的提高，同时为项目后期的运营和维护提供了数据的支撑和保障。其具体作用为：数据的集中存储和管理，确保数据安全；数据访问权限的控制；数据的无缝共享和协同；数据的备份和恢复。



图 4-6 协同平台手机端

4.6 三维激光扫描仪技术

通过对比三维激光扫描仪得到的点云模型和设计的 BIM 模型，可以得到现实中建筑实际位置、几何形态与设计阶段的差异，为后续施工及后续建筑的健康监测提供数据支撑。

采用专业的三维激光扫描仪对现场进行三维扫描，将点云模型插入 REVIT 设计模型内，进行全方位对比，复核现场实际施工与设计模型是否存在偏差。经过对比分析，施工满足设计要求。

在结构施工完成后，通过三维激光扫描仪，获得整个点云模型，通过模型实时分析构件间距、尺寸，为下一步幕墙、机电安装等单位进场施工提供依据。

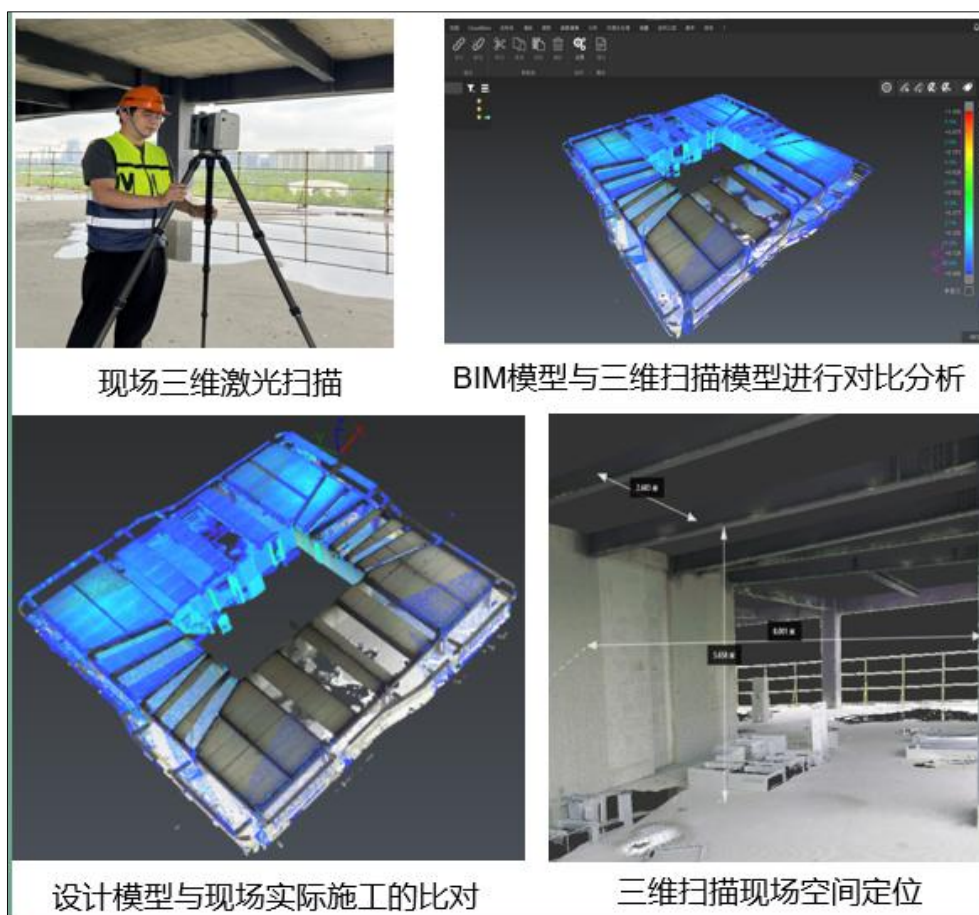


图 4-7 三维激光扫描

5. BIM 技术应用推广与思考

5.1 设计资源的复用

设计标准经验沉淀，从项目中提取项目配置管理信息，以及项目构件库，项

目使用的样板，形成企业资源库。用功能及流程，帮助企业做到项目标准统一，沉淀企业资源，达到设计资源的复用。设计资源包括：构件库、系统类型、管配件组合、样板文件等内容。

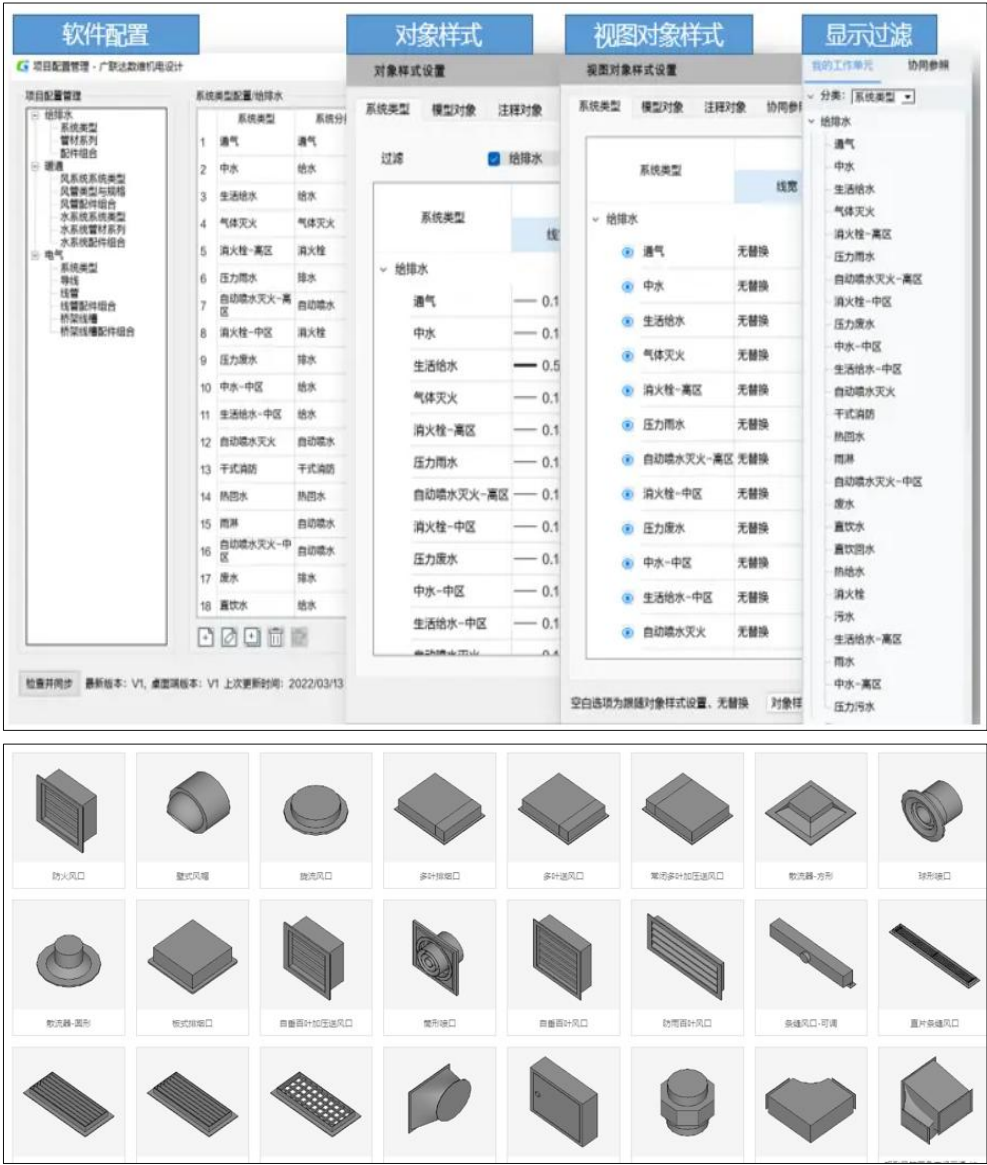


图 5-1 数字资源

5.2 AI 建模设计推广

通过大量工程图纸训练视觉识别深度学习模型（CNN）识别图纸，并结合几何算法和图纸解析规则定义进一步验证提升识别准确率，将图纸数字化，输出建筑信息数据，然后在 Revit 中加载数据生成 BIM 模型。



图 5-2 AI 建模

5.3 BIM 设计管理平台推广

图纸入库：

从初设到施工再到竣工图纸，将每个阶段图纸集成在平台中，形成线上图纸库。在施工过程中提供便利的查询途径，而在项目中后期又能利用平台追溯早期图纸版本。

模型管理：

上传项目模型原始模型并进行轻量化处理，搭配平台移动端 APP，使甲方、设计、施工管理人员可以现场查看模型，便于现场交底。



图 5-3 设计管理平台

5.4 BIM 图模一致性审查普及

配合施工图设计图纸同步将各专业 BIM 模型上传上海市 BIM 模型审查平台

进行审查，并根据审查意见修改模型；通过审查，本项目仅建筑，暖通和给排水专业 BIM 模型各有一条修改意见，结构和电气均全部满足审查要求，目前各专业模型均已修改好通过平台审查。



图 5-4 BIM 图模一致性审查

基于国产 BIMBase 平台 AI 智能审查技术，正向设计阶段，边设计，边审查，基于 BIM 模型智能检查强条规范，减少后期设计校核工作。在满足高效设计的同时，也满足上海 BIM 智能辅助审查政策。

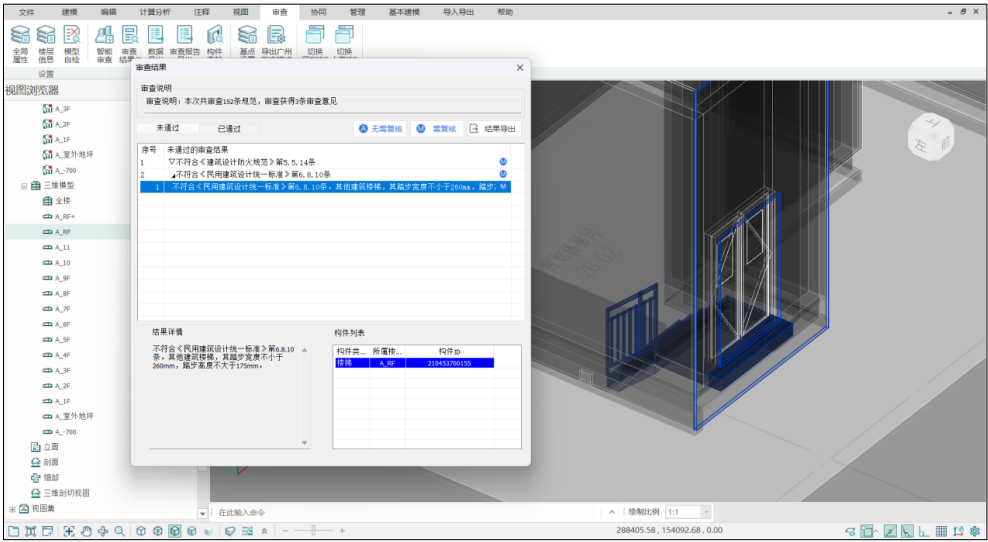


图 5-5 AI 智能审查

5.5 BIM 技术应用于发展的思考

时间成本的收益：

精准的虚拟仿真设计和标准化的设计表达，可以明确指出完整且正确的施工

方式方法，在很大程度上节省了时间成本。

投资成本的收益：

精准的虚拟仿真设计，有利于预测出精确的投资预算，加以施工工艺以及材料的严格把控，可以很好的控制投资成本。

可控的落地效果：

精细的设计模型，仿真的效果，准确的设计深化，有利于后期施工落地环节的把控，为项目的设计及施工质量，设计及施工效率，带来全方位的提升。

品牌提升：

依靠临港新片区的热度，推广了我们设计和落地的专业性与精细度，提升了品牌热度。

业主的信任：

精准的虚拟仿真设计策略使得我们的设计更加便于施工落地，让成本更加可控，获得了业主信赖。

为未来精准化设计提供经验：

经过本次设计策略与技术在项目中的实际应用，不仅证实了该方法在中小型项目中的实用与效率，而且为以后的设计提供了坚实的基础。

二、基于“BIM+”的世博文化公园双子山 监测风险总控数字孪生平台

1. 项目概况

双子山项目是世博文化公园最大的单体项目，位于公园南部，占地面积为 301675.2 平方米，建筑面积约 86000 平方米，双子山的主峰高度为 48 米。项目总建设用地面积 301675.6 平方米，新建绿地面积 248706.7 平方米，园路及铺装场地用地 33894.9 平方米，景观水体面积 18677 平方米（包括中心湖南部 17811 平方米和双子山山体瀑布溪流 866 平方米）。

山体表面体现自然、绿色风貌，山体内部采用的是空腔结构，主要以停车及相关配套和管理功能为主，其中，包括约 1500 个停车位，以及 35kV 变电站，在靠近山顶的位置还规划了空腔展览区。



图 1-1 双子山实景图

2. BIM 技术应用概况

2.1 应用策略

根据本项目多方监测数据管理、分析与可视化需求，构建“线上+线下”风险总控体系。采用物联网、AI 监测、城市信息模型平台等信息技术，融合双子山项目本体结构监测、周边环境监测、项目设计、勘察、物探、三维测绘等多源数

据,构建工程结构及环境运营风险总控数字孪生平台,形成“多方多源数据集成、风险实时发现、动态预警总览、风险闭环处置”的数据应用场景,为项目风险总体管控提供丰富、可靠、直观的数字化成果,以及基于三维可视化模型的多方无障碍的信息共享、传递和辅助决策的平台。

2.2 组织建设

2.2.1 组织架构

双子山项目 BIM 技术应用组织架构依托世博文化公园一体化运营服务管理平台,设立底座组、平台组和运维组三大核心团队,分别负责系统基础架构建设、CIM 平台开发集成及日常运行维护。通过多团队协同,实现数据标准化管理、多源信息融合与智能化运维保障,构建起高效、稳定、可持续的数字化支撑体系,助力项目全过程智慧管理与风险闭环管控。

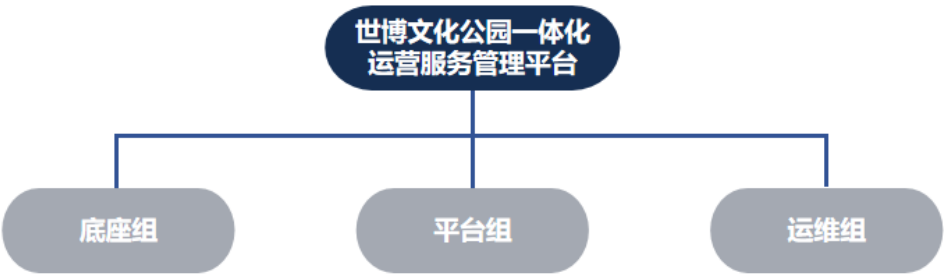


图 2-1 项目组织架构图

2.2.2 BIM 管理体系总体思路

上海世博文化公园双子山项目风险总控平台采用“三维数据底座+Web 平台+数据管控后台+数据大屏”总体架构,平台依托超融合 CIM 基础平台,具有稳定、安全、可靠的软硬件环境,可为工程全过程提供长期的数字化平台技术服务支撑。



图 2-2 BIM 应用体系

2.2.3 BIM 应用环境

双子山项目通过构建 BIM+GIS 数字底板，融合多源数据，解决了行业数据孤岛问题。结合数字孪生与 AI 技术，实现了山体健康监测与动态预警，支持实时风险防控。通过光纤传感器、红外监测等设备，系统可精准识别结构变化，提升了运维效率和响应速度，显著降低了人力成本。此外，BIM 与 GIS 的无缝衔接确保了建设期与运营期的有效衔接，实现了全生命周期的智能管理与精细化运维。



图 2-3 双子山风险总控平台



图 2-4 双子山风险总控平台现场演示

3. BIM 技术应用成果与特色

3.1 施工阶段

构建双子山“建设—运营”综合数字底板，赋能全生命周期健康管理体系。以 BIM+GIS 技术为核心，依托自主研发的 GeoTBSBIM 工具箱软件，成功搭建了融合区域地质、周边管线、结构、景观、倾斜摄影、监测的双子山多维数字底板。该底板实现了从建设期“数字移交”到运营期的无缝衔接，彻底解决了传统分散管理模式下的信息孤岛问题，确保运营交付的“最后一公里”畅通无阻。

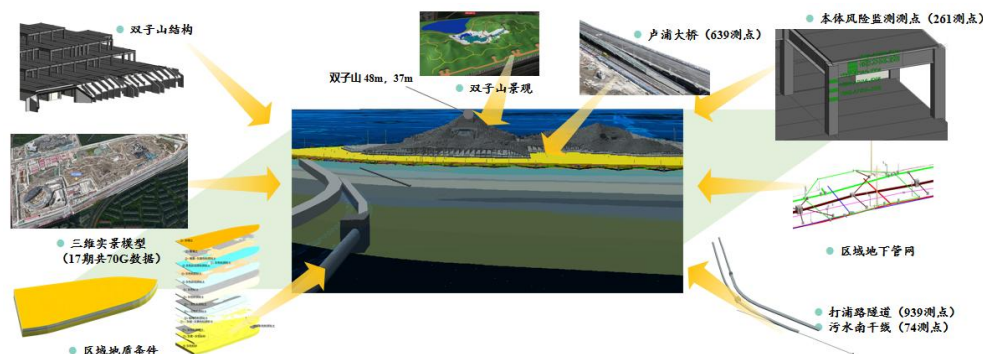


图 3-1 BIM 应用体系

平台整合了 8 大监测对象（山体、桥梁、隧道、管线等）的多源监测数据，涵盖 5 家监测单位及多种新型监测技术（如机器视觉、红外渗漏、光纤振动等），构建了覆盖结构安全、环境影响、运营监管的全方位闭环管理体系，为双子山的全生命周期健康管理提供了坚实的技术支撑。

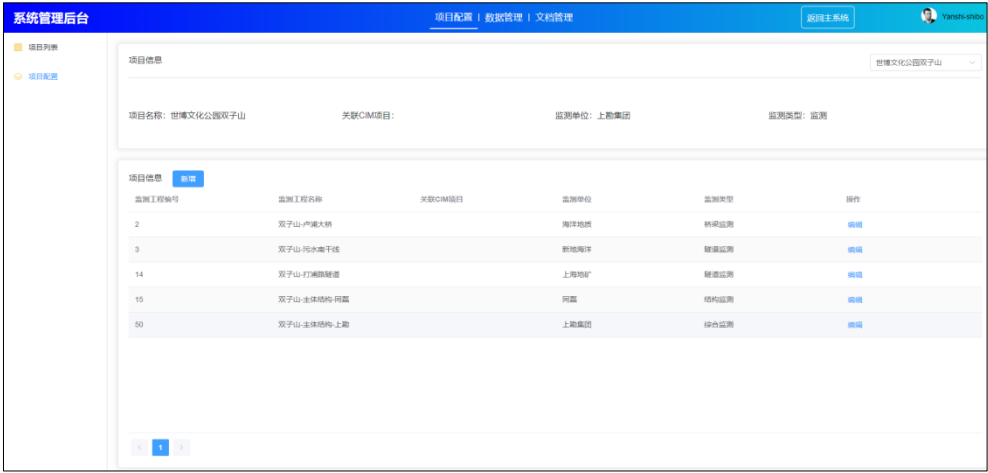


图 3-2 总控平台项目配置



图 3-3 总控平台测点管理



图 3-4 总控平台监测数据管理

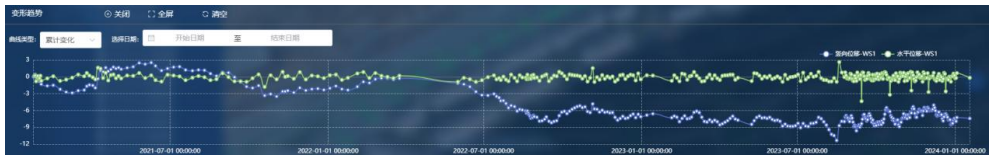


图 3-5 总控平台监测曲线查看

创新“数字孪生+人工智能”双驱动模式，实现人工山体动态预警与风险防控。通过在山体空腔、排水系统、景观设施及周边重要设施中部署光纤振动传感器、红外渗漏监测相机等物联网设备，实时采集结构形变、水土压力、植被健康等多维度数据，并与 BIM 模型动态映射，构建了数字孪生驱动的山体健康监测体系。

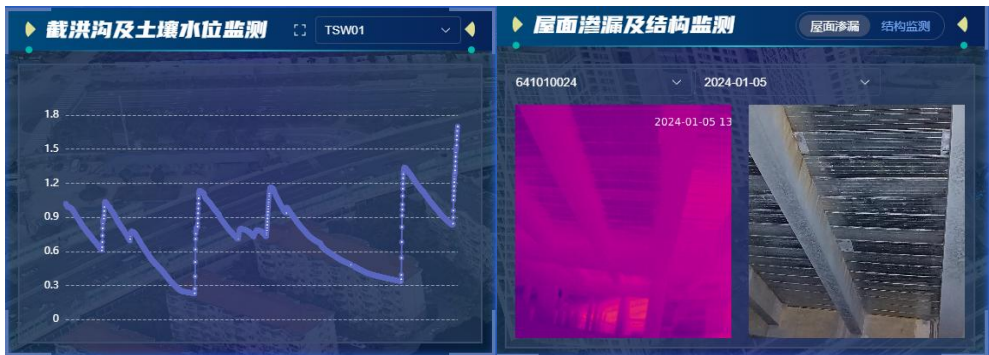


图 3-6 截洪沟及土壤水位监测集成

图 3-7 屋面渗漏监测集成



图 3-8 双子山结构振动监测集成

图 3-9 双子山表观形变监测集成

3.2 运维阶段

结合计算机视觉等 AI 算法，实现了树木倒伏、景石滑裂、山体渗水等风险的自动化识别与精准定位，并触发红/黄分级预警机制。通过建立“警报发起—响应—处置—核查—消警”的闭环风险处置流程，在日客流 5 万运营压力下保障了双子山安全运行，彰显了技术高可靠性与应急响应能力。

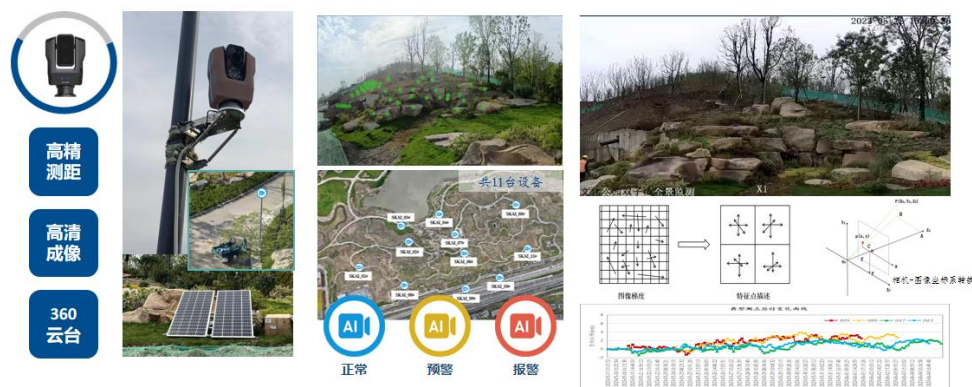


图 3-10 双子山 AI 相机应用

针对国内首座 40 米以上空腔仿自然山林，开创“被动响应”到“主动治理”的智慧运维新模式。针对软土地区大型人造空腔结构缺乏理论和实践基础的难题，通过 BIM 模型关联风险事件与运维工单，将传统的“人工巡检—上报—审批”流程升级为“AI 识别—风险预警—电子工单—闭环反馈”的数字化运维链路。

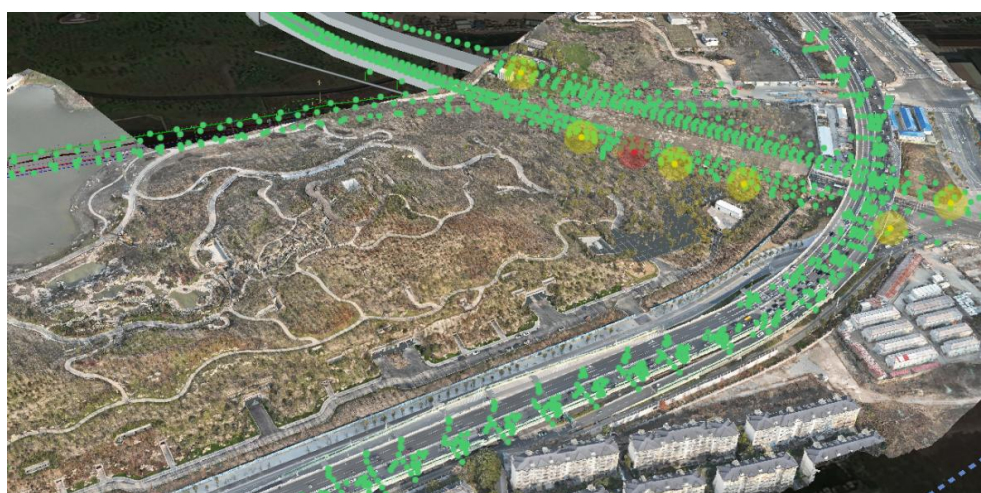


图 3-11 平台分级预警标签展示



图 3-12 平台风险总览及当前风险列表



图 3-13 风险事情闭环处置

4. BIM 技术应用效益

通过构建“BIM+GIS+IoT+AI+管理”融合的风险总控数字孪生平台，双子山项目实现了从建设到运营全过程的智能化、精细化管理，显著提升了风险防控能力与运维效率。平台统一多源监测数据标准，集成光纤、红外、水位、视频等多种传感设备，实现对结构安全、环境变化和运营状态的实时感知与动态预警。系统响应效率由传统的 4 小时压缩至 10 分钟内，人力成本降低 35%。平台成功识别并闭环处置 119 条风险事件，成功应对了上海 75 年来最强台风“贝碧嘉”等极端天气，在日客流 5 万运营压力下保障了“上海第二高峰”双子山安全运行，已沉淀超 900 万条监测数据，形成了强大的数据资产支撑。同时，该平台支撑下的智慧运维体系已获得 4 项发明专利，形成可复制、可推广的“智慧山体”新范式，有效推动生态建设与城市安全的深度融合。

5. BIM 技术应用推广与思考

双子山项目的实践表明，BIM 不再只是辅助设计的工具，而是贯穿工程全生命周期的核心数字引擎。在复杂、非标的城市山体工程中，通过与 GIS、物联网、AI 等技术深度融合，BIM 实现了从数据整合、风险监测到智慧运维的全面赋能。推广应用过程中应注重跨行业、跨专业的数据协同与标准统一，强化平台化建设与可视化交付能力。同时，BIM 价值的释放关键在于“建模”向“建智”的转变，需要从“模型管理”迈向“决策驱动”，持续探索技术与管理机制的深度融合路径，推动 BIM 从技术成果走向城市治理的系统工具。

三、柯桥未来医学中心绿色智慧医院全过程 BIM 应用

1. 项目概况

柯桥未来医学中心项目位于浙江省绍兴市柯桥区华舍街道，育才路以东，上方山大道以南区块。项目规划总用地面积约 353.5 亩，总建筑面积约 50 万平方米，其中地上建筑面积约 33.7 万平方米，地下建筑面积约 16.3 万平方米。主要功能区块包括临床医疗、医学研究、临床教学、世界医学博物馆四大部分，按照三级甲等大型综合医院标准设计，是集产、学、研、医一体的现代化世界一流的医疗综合体。



图 1-1 项目效果图

2. BIM 技术应用概况

2.1 应用策略

(1) 场地内现有高压线、热力管道、通信铁塔设施、龙王寺、茶亭江及其支流、考古用地等影响，场地布置管理难度大，项目决定采用 BIM 技术下的场地设计及布置方案；

(2) 项目涉及医疗专业，设计施工难度大，参与方众多，沟通难度大，项目决定采用医疗类专项协同设计及深化方案；

(3) 项目施工难度大，质量要求高，涉及大型钢结构施工等复杂施工工艺，项目决定采用 BIM 施工深化解决方案；

(4) 项目围绕建筑全生命周期，绿色标准高质高效实施，项目决定采用基于双碳理念的全过程绿色方案；

(5) 为有效整合信息，项目决定采用基于 BIM 技术的项目建设期信息协同管理平台。

2.2 组织建设

2.2.1 组织架构

本项目 BIM 工作组织架构分为业主层、保障层和执行层三个层次。业主层为业主、设计单位、监理单位、第三方 BIM 单位；保障层为局级、公司级 BIM 工作室；执行层中，项目经理为 BIM 组长，项目总工、商务经理为 BIM 小组副组长，BIM 工程师 3 人，其中设 BIM 负责人 1 名，其余工程、技术、质量、商务等人员为兼职 BIM 管理人员，组成项目部 BIM 团队。

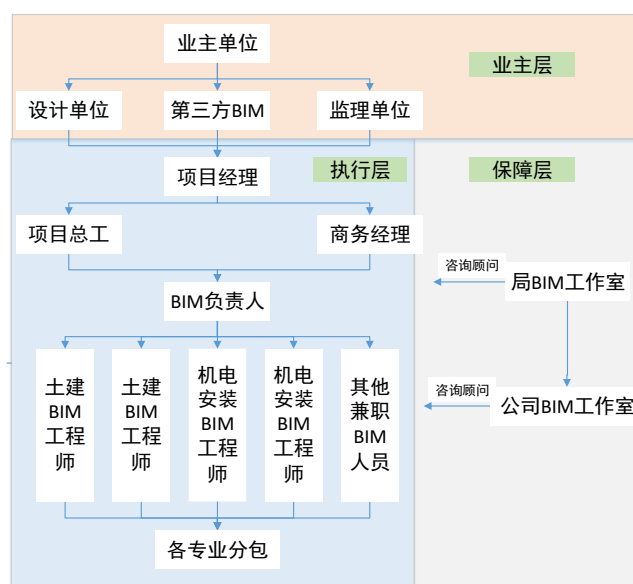


图 2-1 项目组织架构图

2.2.2 BIM 管理体系总体思路

本项目为全过程 BIM 应用，建立设计模型→施工模型→竣工模型的一模通用及版本的同步迭代，实现为项目建设期、运营期增值。

项目建设期建立基于 BIM 的项目管理平台、基于 BIM 的智慧工地平台。实现设计模型、设计审查、合规性审查、性能分析、管线综合优化、可视化仿真漫游等精细化设计；实现建设过程中在进度、质量、安全等方面的精准管理与控制；实现对项目各参与方在建造过程中的集成管控、多方协同、设计成果管理、工程

报验管理、数字化竣工移交。

项目运营期建立基于 BIM 的数字孪生智慧医院建筑可视一体化运维平台，为使用方提供可视化运营管理平台。

2.2.3 BIM 应用环境



图 2-2 软硬件环境

3. BIM 技术应用成果与特色

3.1 BIM 技术下的场地设计及布置方案

3.1.1 场地流线辅助设计

利用三维模型对设计图纸中的流线进行模拟优化，在进行流线模拟优化时可以通过调整设计的参数、调整场地布置等方法来改变三维模型梳理流线设计，帮助设计师以更直观的视角调整流线方案以及评估不同设计方案对流线的影响。



图 3-1 场地流线辅助设计

3.1.2 场地视域分析

通过建立三维地理空间场景，还原项目地周围的地形起伏及周边建筑形态，利用三维地理信息系统的可视域分析及天际线分析功能，分析特定视点的视域范围及可视情况，观察新建建筑物的轮廓特点，体现与周围已有建筑物的融合程度，帮助设计师在视域角度对方案进行调整。

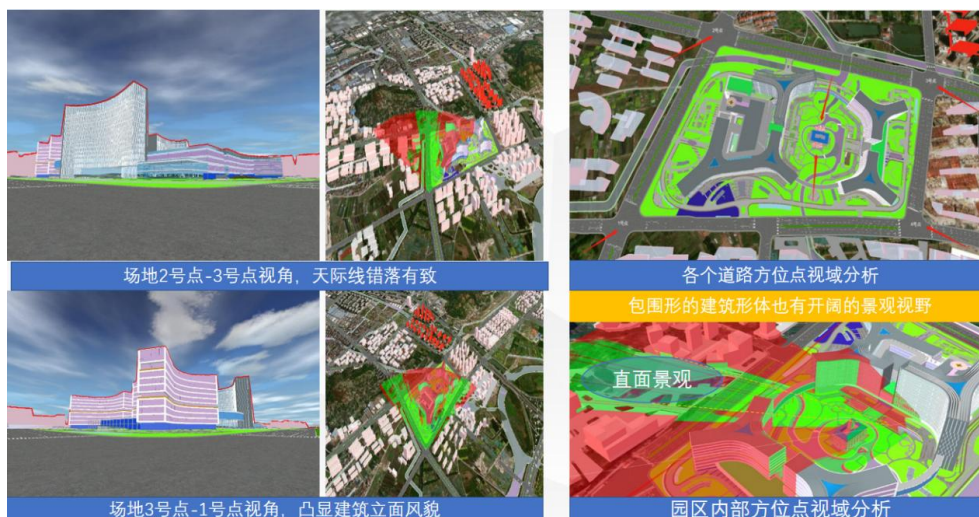


图 3-2 场地视域分析

3.1.3 倾斜摄影

利用倾斜摄影作为场地设计底图，实现在真实地形中做方案。利用倾斜摄影模型与 BIM 模型进行比对进行进度管控。



图 3-3 倾斜摄影应用

3.1.4 场布问题提前规避

场内现有高压线、热力管道、通信铁塔设施、龙王寺、茶亭江及其支流、考

古用地等影响，场地布置管理难度大。运用无人机倾斜摄影技术采集现场地貌信息，以工期进度为中心，进行场地布置动态建模，提高场地利用效率。

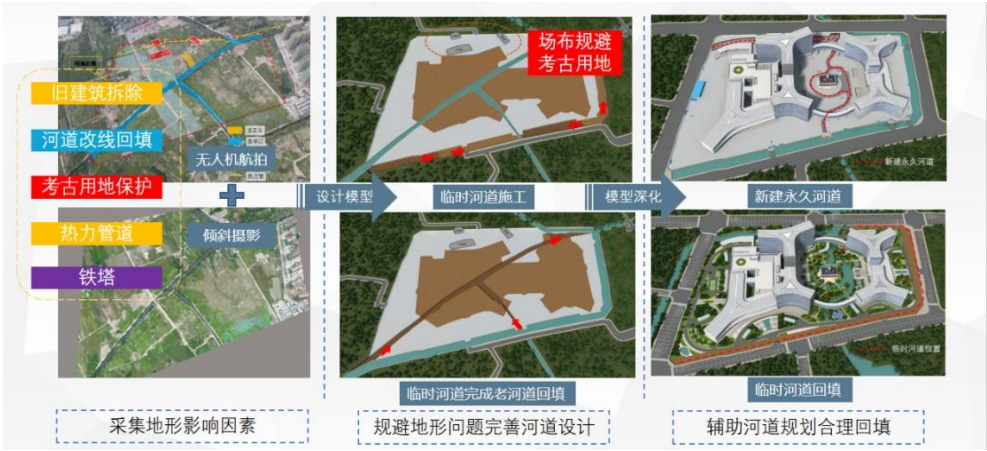


图 3-4 场布问题提前规避

3.1.5 基坑土方量分析

利用无人机对土方开挖前场地进行数据采集并建立三维倾斜摄影模型，利用自研 GIS 平台计算填挖三维面与模型图层或地形图层之间的填挖量，可对土方开挖量进行估算，从而合理优化施工现场资源配置；同时对每月采集的场地数据进行对比，可对比每月挖方量的实际情况，为项目成本分析、成本核算提供重要依据。

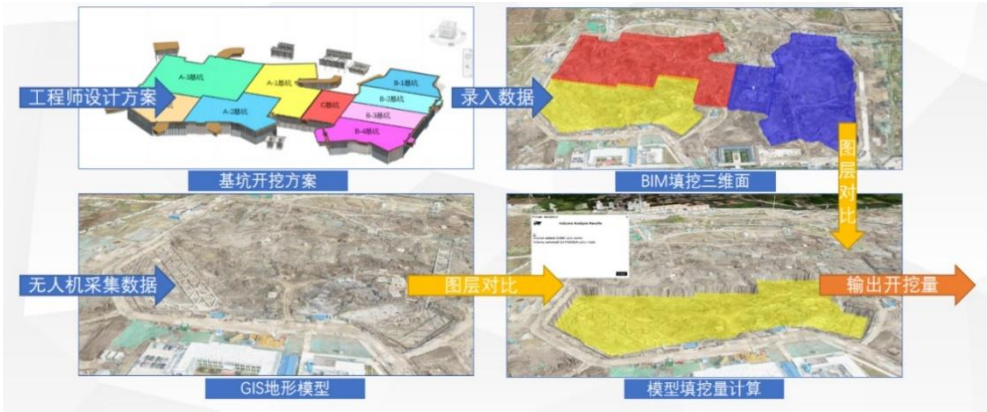


图 3-5 基坑土方量分析

3.2 医疗类专项协同设计及深化方案

3.2.1 医疗流程辅助设计

医疗规划围绕三个级别的流程规划展开，而 BIM 设计正好贴合这种工作方式，快速响应和分析医疗流程，BIM 设计模式下的设计团队，比传统医疗规划设

计团队的效率高 30%。

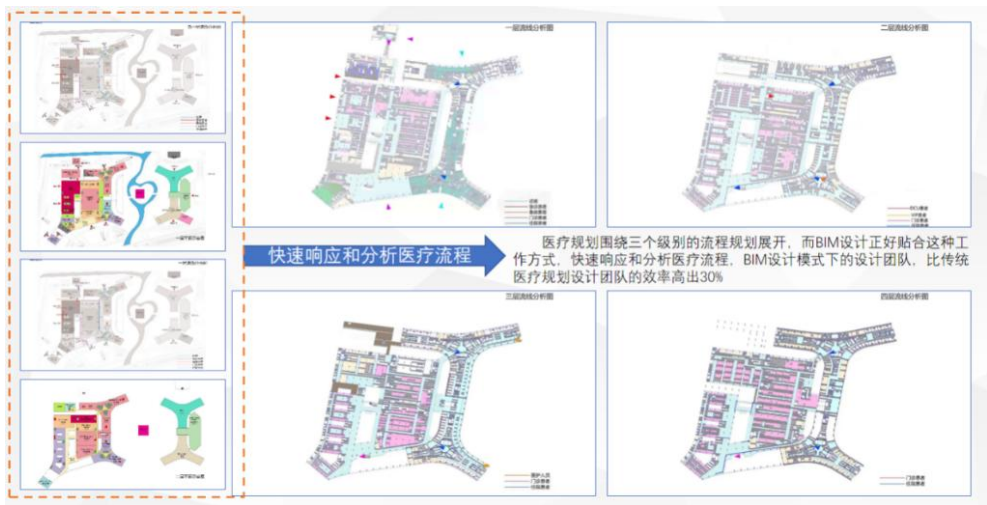


图 3-6 医疗流程辅助设计

3.2.2 医疗模块化设计

医院的组成具有明显的模块化特征，各类病房，诊室，手术，医技等，都有比较明确的要求，容易形成单元式集成式的房间单元，这些单元又是三级流程的核心，通过 BIM 可辅助医院模块化的设计生产，装配，运维。



图 3-7 医疗模块化设计

3.2.3 模块单元深化

由于医疗建筑的复杂性，各单元式集成式的房间单元都具有其对应的深化方案，便于设计师在综合考虑包含医疗专项在内的各专业情况下调整设计。

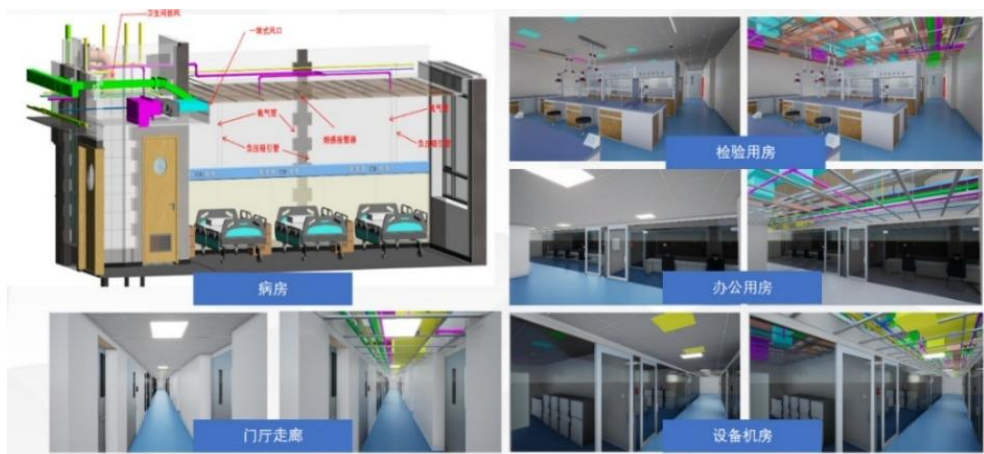


图 3-8 模块单元深化

3.2.4 AI 辅助风貌设计

接入生成式 AI 模拟，通过特定训练词生成 AI 设计，并采纳效果较好的部分。



图 3-9 AI 辅助风貌设计

3.2.5 气动物流管道空间分析优化

根据气动物流管道方案图，配合专项设计单位，在现有空间及其有限情况下，对气动物流管道进行方案优化，合理布局，避免施工过程中产生大面积拆改，为机电管线安装提供可靠依据。



图 3-12 问题核查报告

3.2.8 管线综合及净高分析

管线综合完成后，对地下部分及各楼层进行净高分析，并对业主重点位置进行重点验证分析是否满足净高要求，按不同区域及楼层共形成报告 6 份，重点分析部位 132 处，对于不满足净高要求的位置及时与设计师沟通，调整管线尺寸，并形成净高分析报告和净高分析平面图及剖面图，指导现场施工。

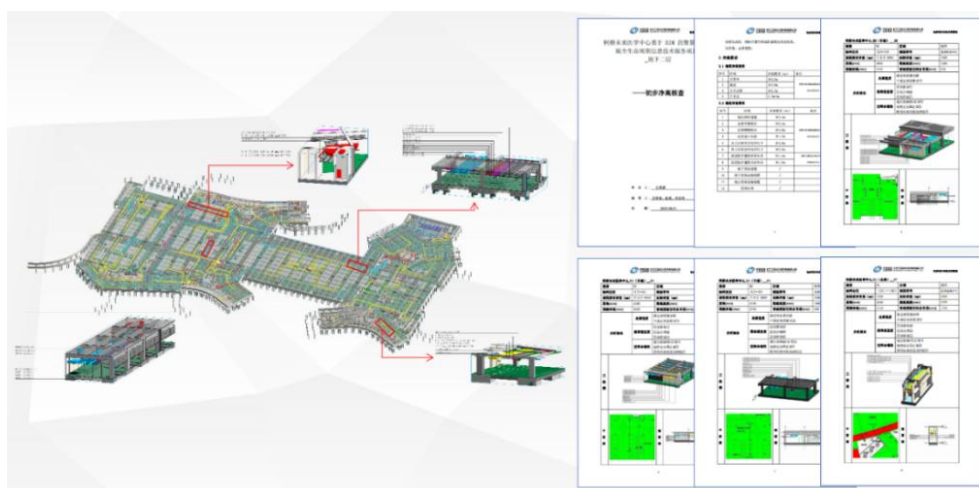


图 3-13 管线综合及净高分析

3.2.9 BIM 工程量统计

通过 BIM 模型，快速导出相关工程量，为现场施工、预算等提供数据支撑。

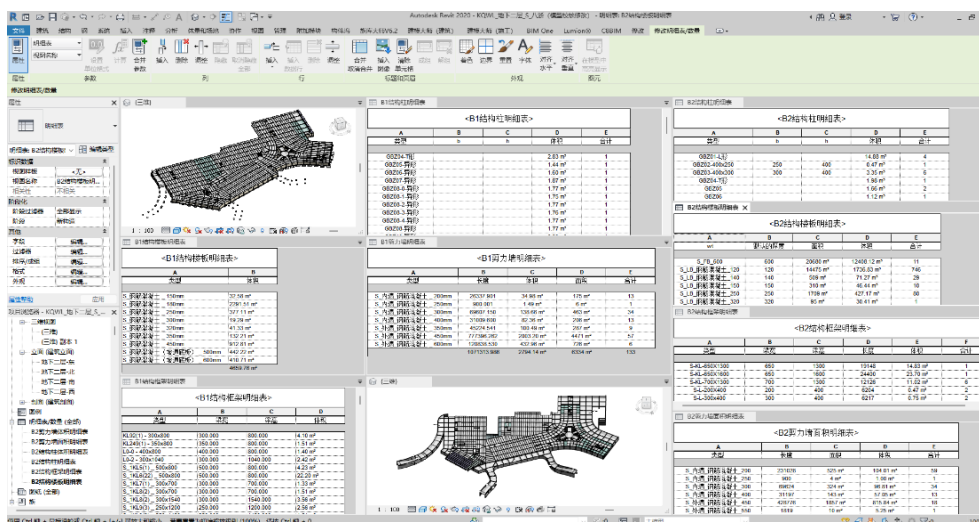


图 3-14 BIM 工程量统计

3.3 BIM 施工深化解决方案

3.3.1 综合支吊架深化

净高问题：B2 层高 4650mm（建筑面厚度为 150mm），此区域机械车位上方梁高均为 700mm，梁底净高为 3800mm，风管厚度 500mm，达不到机械车位 3600mm 的净高要求。

解决方案：优化上层立管位置及风管路由，避免风管从机械车位上方穿过。

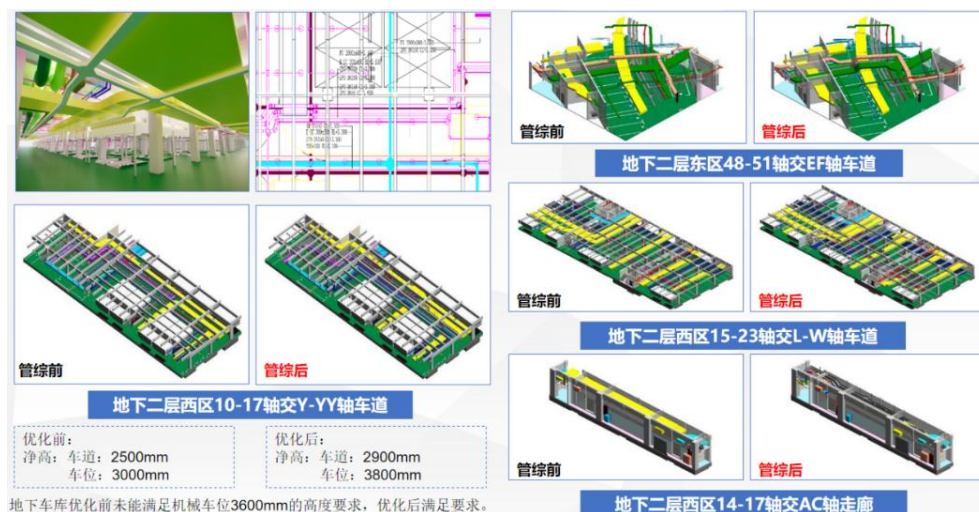


图 3-15 综合支吊架深化

3.3.2 模型辅助施工

施工过程中对比模型，辅助现场施工。

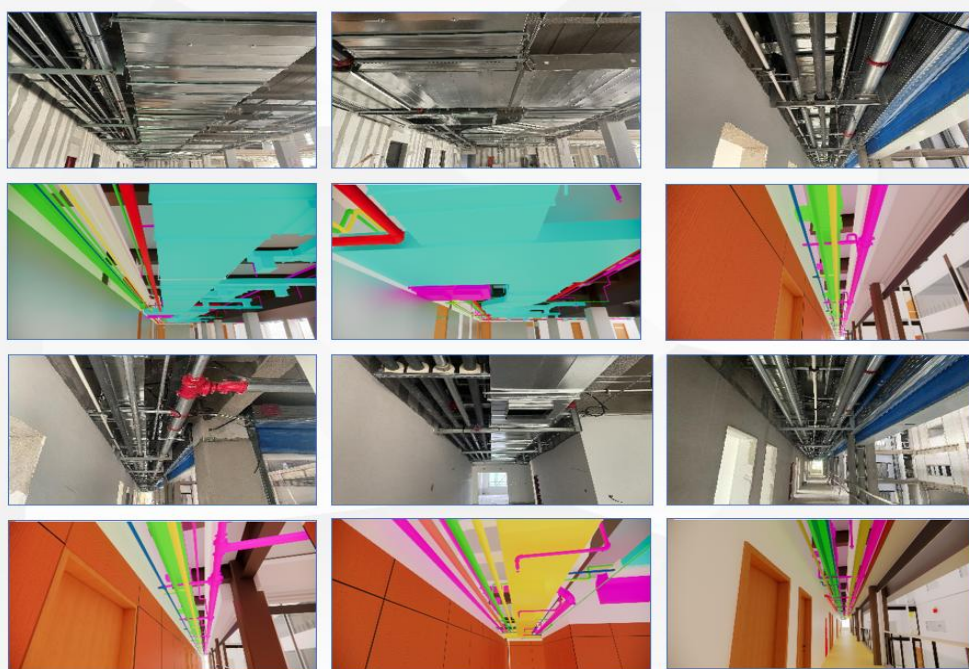


图 3-16 模型辅助施工

3.3.3 鹰眼 AI

结合全景图和 BIM 模型,为项目现场生成数字孪生空间,通过“实模对比”,直观清晰检查建设过程的任何不合理或者错误之处,指导现场施工,实现实模一致目标,减少变更修改,确保项目按计划进行,保证高质量的工程交付。

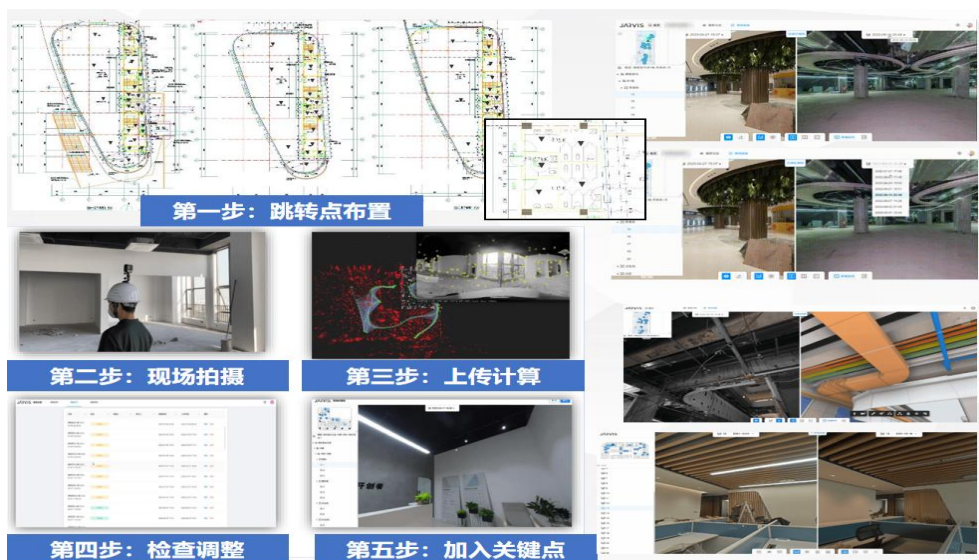


图 3-17 鹰眼 AI

3.3.4 BIM 精装深化

制定精装修深化流程,建立精装修模型,结合土建,机电安装模型,全方位考虑净高,机电点位布置。

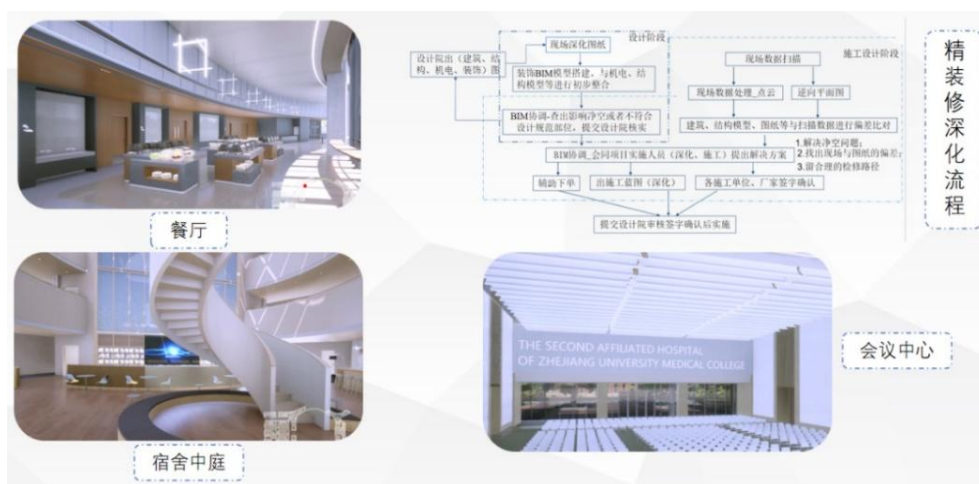


图 3-18 BIM 精装深化

3.3.5 BIM 施工模型深化

在设计阶段模型基础上，对模型进行施工深化，完成了桩基深化、基坑开挖及基坑支护模型深化、场地布置深化，并形成场地分析报告、基坑土方工程量分析报告、土方开挖比选报告、桩芯土工程量报告等，达到了施工过程的精细化管理。

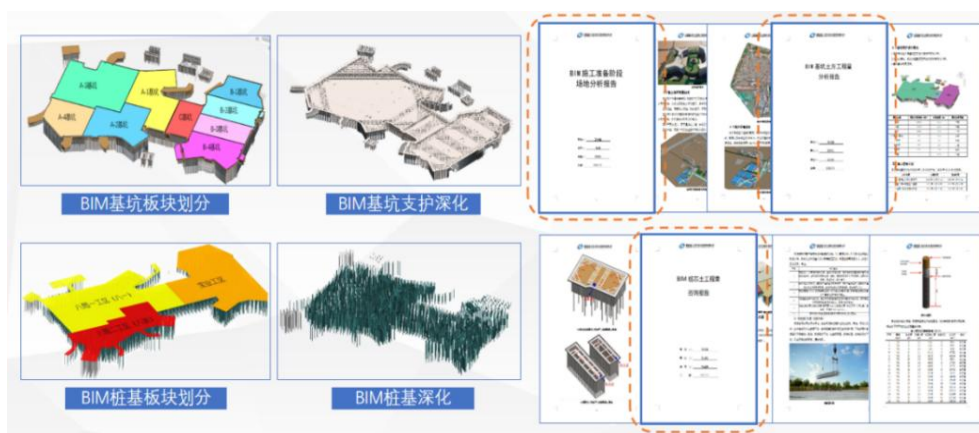


图 3-19 BIM 施工模型深化

3.3.6 BIM 钢结构深化

利用 BIM 技术根据钢结构连接节点、构造、加工和安装工艺细节进行深化，验证是否存在问题，并可根据深化节点生成加工详图，做到精细化生产及管理。

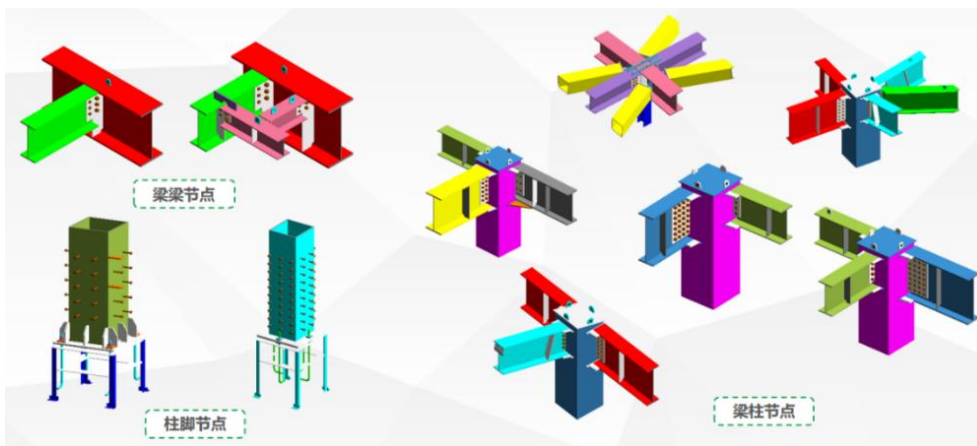


图 3-20 BIM 钢结构深化

3.3.7 钢结构吊装施工模拟

通过施工模拟，再度优化施工方案，为现场高质量、安全施工保驾护航。

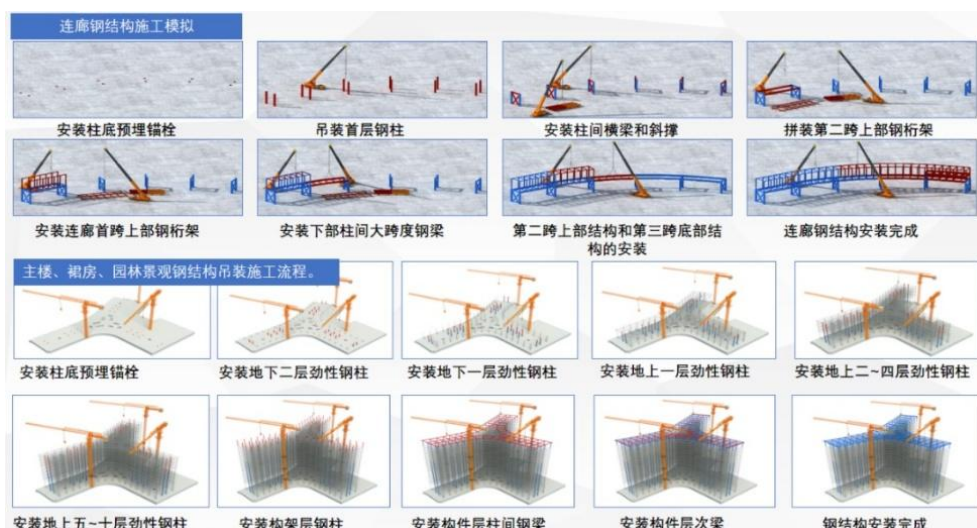


图 3-21 钢结构吊装施工模拟

3.3.8 砌体排砖优化

BIM 技术对二次结构进行合理排布，生成排布图，指导现场施工，导出砌体需用表，减少二次搬运。



图 3-22 砌体排砖优化

3.3.9 装配式 BIM 应用

运用 BIM 技术，并按照统一模数进行构件拆分，精简构件类型，提高装配水平，并在标准化设计基础上通过组合实现装配式建筑系列化和多样化。

节点优化：1) 支座分布规整区域采用标准节点做法；2) 弧形梁位置，增加现浇段，延长锚固筋，减少异形种类。

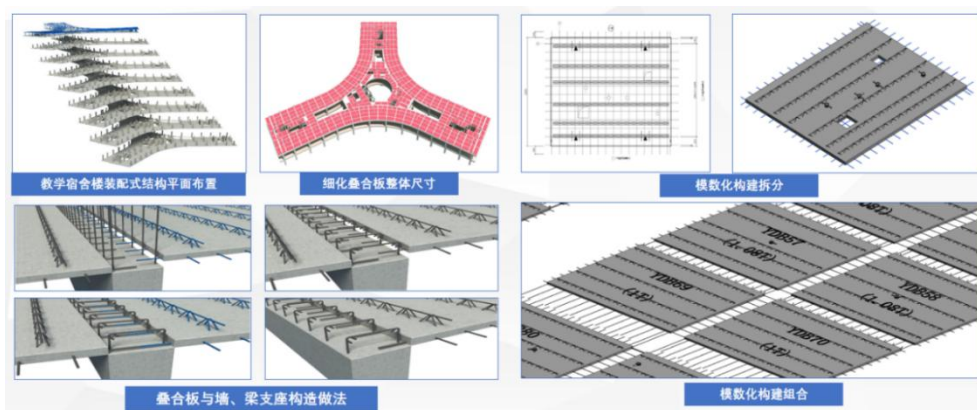


图 3-23 装配式 BIM 应用

3.3.10 直线加速器机房 BIM 应用

直线加速器区域竖向构件存在多处变截面，钢筋复杂节点较多，通过 BIM 技术钢筋可视化交底，辅助钢筋下料及绑扎。

直线加速器区域墙体厚度为 3.5m，顶板厚度为 1.5m，通过 BIM 技术模拟出符合力学计算的搭设方式，辅助方案编制。

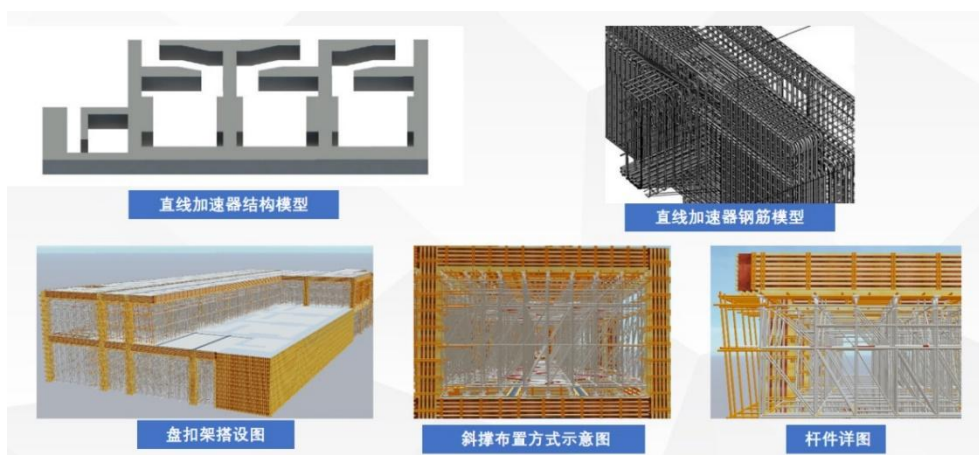


图 3-24 直线加速器机房 BIM 应用

3.3.11 三维可视化交底

利用 BIM 技术对楼体、塔吊等进行施工深化，并形成三维可视化技术交底文件及施工方案模拟动画，更好的对现场一线施工人员进行交底，提高交底效率，避免现场返工。

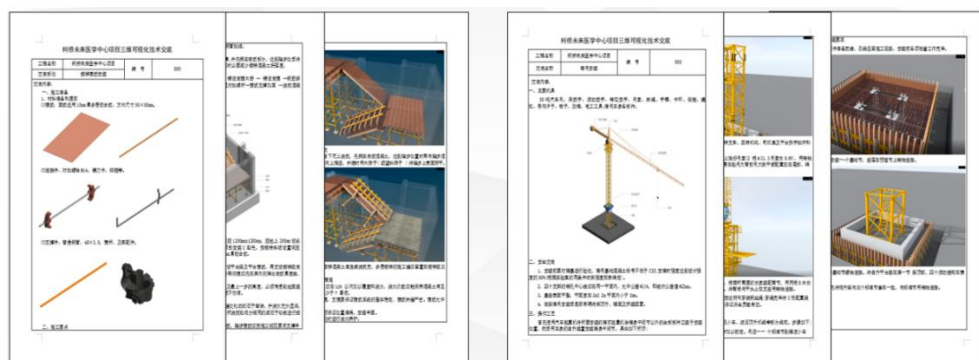


图 3-25 三维可视化交底

3.4 基于双碳理念的全过程绿色方案

3.4.1 设计阶段绿色建筑性能分析—室内采光及视野分析

根据《绿色建筑评价标准》，建筑采光需满足规范要求，项目采用绿建斯维采光分析软件建模，进行模型分析模拟计算，快速分析采光确认采光满足规范要求。

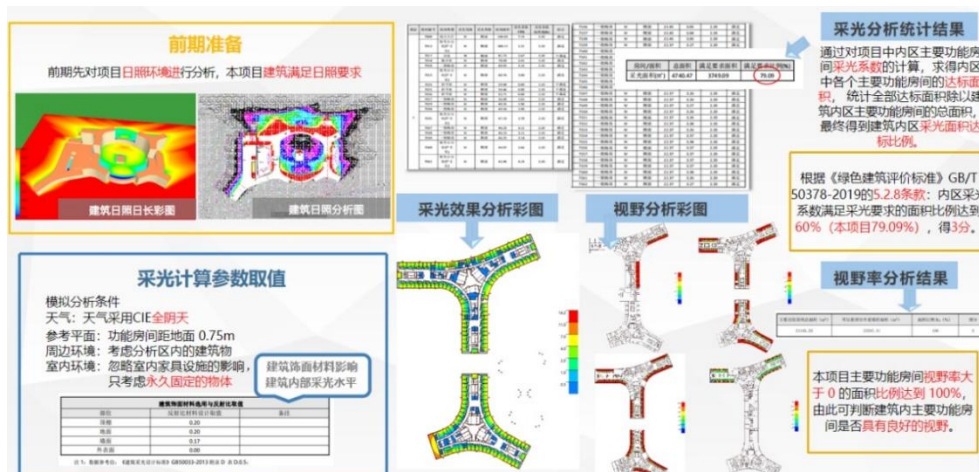


图 3-26 设计阶段绿色建筑性能分析—室内采光及视野分析

3.4.2 设计阶段绿色建筑性能分析—场地声环境模拟分析

项目采用斯维尔声环境 SEDU 分析软件,对场地内噪音进行计算,分析项目声环境是否满足国家《声环境质量标准》GB 3096-2008 的场地内环境噪声限值规定,以及是否满足《绿色建筑评价标准》。

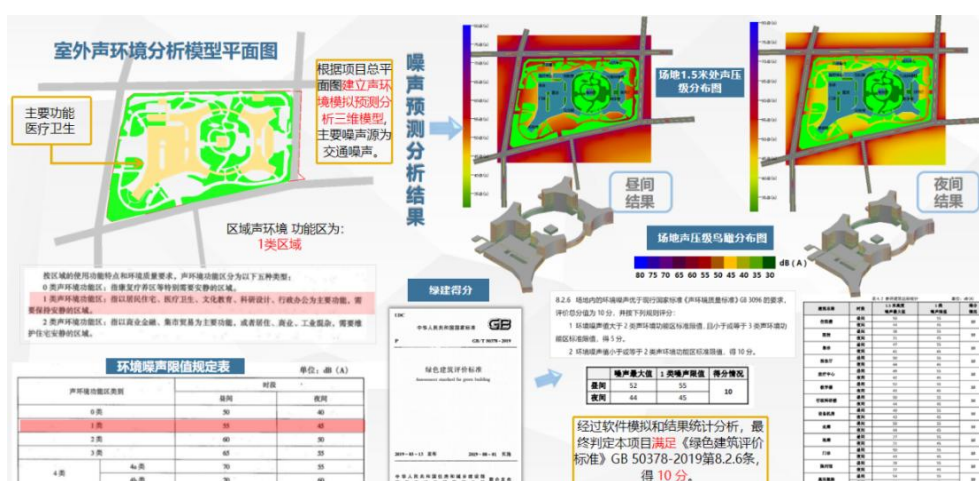
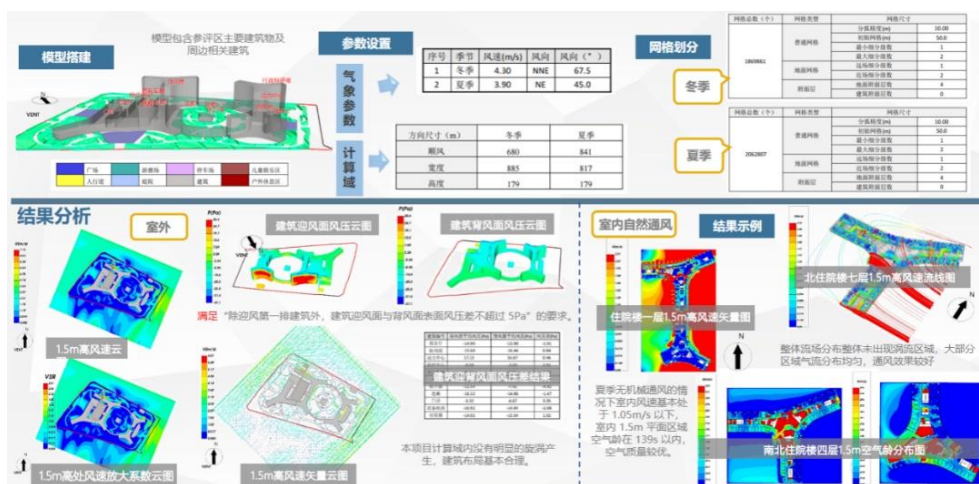


图 3-27 设计阶段绿色建筑性能分析—场地声环境模拟分析

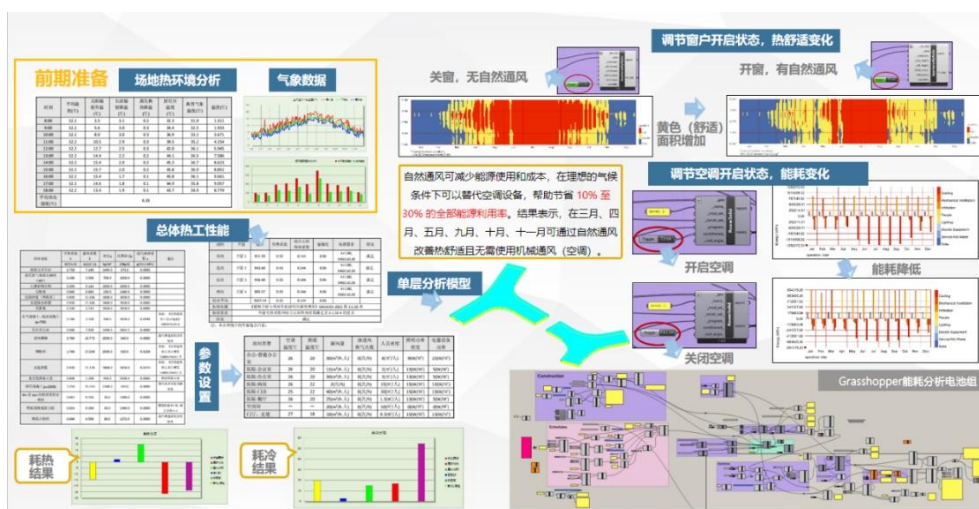
3.4.3 设计阶段绿色建筑性能分析-自然风环境模拟分析

根据国家《绿色建筑评价标准》，本项目场地内风环境需做到有利于室内行走、活动舒适和建筑的自然通风。通过建筑通风软件 **Vent** 对项目的室外风环境及室内自然通风进行仿真模拟，分析优化确保项目场地风环境满足绿建要求。



3.4.4 设计阶段绿色建筑性能分析—能耗分析与优化

采用 Grasshopper 及斯维尔能耗软件对本项目建筑能耗及热舒适进行了参数化模拟。我们一方面需要最大限度地保证与提高建筑环境的热舒适度，另一方面又要尽量减少建筑物的能源使用。



3.4.5 施工阶段绿色建造—绿色施工

利用智能设备采集工地现场的环境实时数据，通过智慧工地回传数据，生成一目了然的可视化页面，并可按月、周、日进行历史查询；配置各环境参数的告警阈值，为工地管理者及时决策提供依据。



图 3-30 施工阶段绿色建筑—绿色施工

3.5 基于 BIM 技术的项目建设期信息协同管理平台

打通平台间信息互通, 建立统一平台, 实现场景还原、实时掌控、辅助决策。



图 3-31 基于 BIM 技术的项目建设期信息协同管理平台

3.5.1 BIM 信息协同管理平台—平台功能

基于 BIM 信息协同管理平台可实现模型管理、质量管理、BIM 模型中危险源点位图、成果管理、进度管理、危险源辨识及分险评估导出、可视化项目管理流程、质量管理流程、数字化交付、项目日志集中管理、BIM+VR 技术应用等功能。



图 3-32 BIM 信息协同管理平台—平台功能

3.5.2 BIM 智慧工地指挥决策中心

建立智慧工地集成平台，实现场景还原、平台统一、实时掌控。



图 3-33 BIM 智慧工地指挥决策中心

3.5.3 BIM 智慧工地平台—人员管控

建立智慧工地实名数据库，实现人员管控。



图 3-34 BIM 智慧工地平台—人员管控

3.5.4 BIM 智慧工地平台—数字孪生

智慧工地平台采用数字孪生技术，能够创建项目现场作业环境的数字副本，这有助于管理者进行更精确的监控和决策。

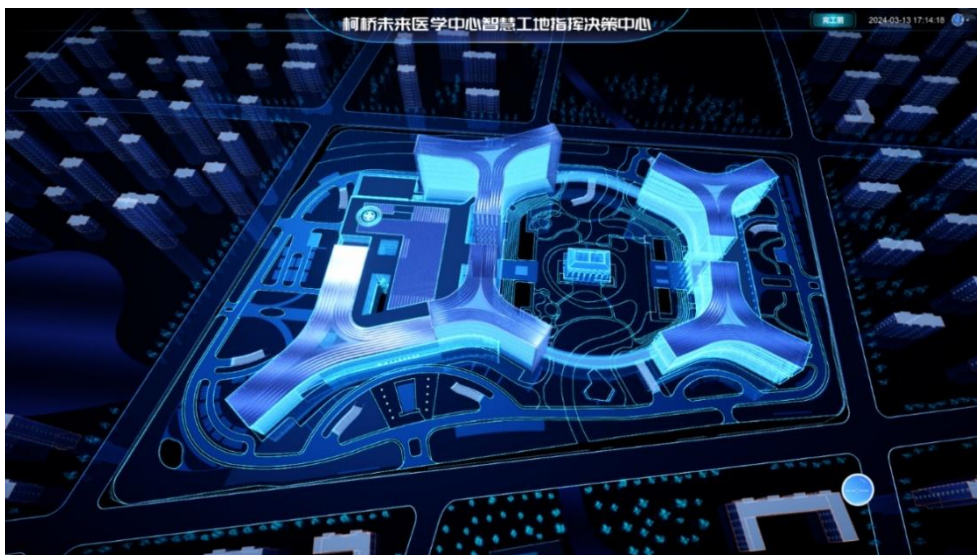


图 3-35 BIM 智慧工地平台—数字孪生

3.5.5 BIM 智慧工地平台—可视化对讲

平台支持作业过程的可视化管理，使管理者能够实时监控现场情况，并通过对讲系统与现场人员沟通。



图 3-36 BIM 智慧工地平台—可视化对讲

3.5.6 BIM 智慧工地平台—动态分析

管理数据的动态分析功能帮助项目管理者及时了解项目进展和潜在问题，从而做出快速响应。

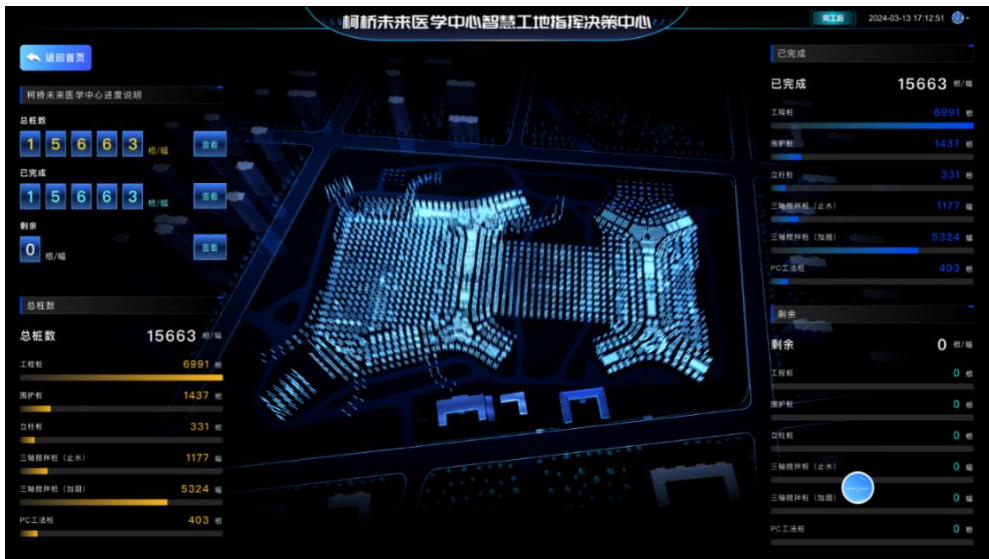


图 3-37 BIM 智慧工地平台—动态分析

3.5.7 BIM 智慧工地平台—施工安全

安全管理模块能够将项目协同管理平台内的问题实时展现在智慧工地大屏上，可以让管理者结合现场施工环境进一步对这些问题实施监控管制，并能实时查看问题处理的进展，形成安全问题闭环。



图 3-38 BIM 智慧工地平台—施工安全

3.5.8 BIM 智慧工地平台—视频监控

视频监控需要支持接入施工现场的监控摄像头，并支持将摄像头的位置与 BIM 模型进行绑定，支持在 BIM 模型下清楚地显示出每个摄像头的位置，单击摄像头图标即可显示实时视频信息，支持查询视频监控的历史画面。

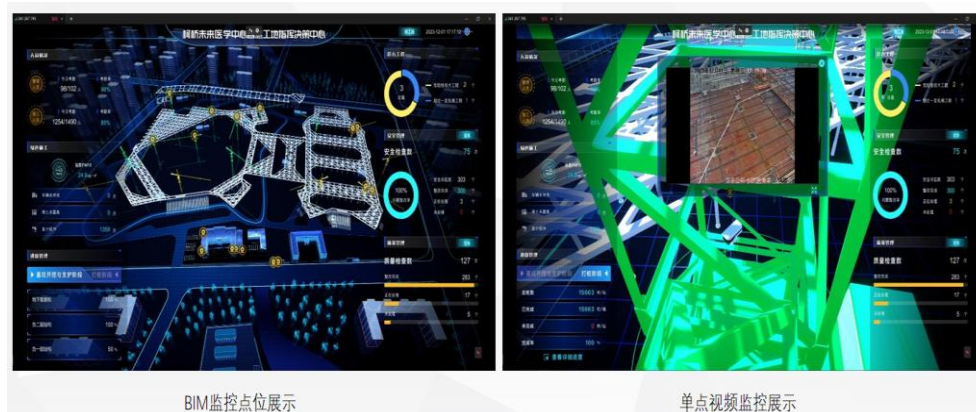


图 3-39 BIM 智慧工地平台—视频监控

3.5.9 BIM 智慧工地平台—智慧展厅

基于智慧工地集成平台，建立项目智慧工地展厅，便于向社会各界展示项目成果。



图 3-40 BIM 智慧工地平台—智慧展厅

4. BIM 技术应用效益与测算方法

(1) 节省费用

通过 BIM 设计及施工优化工作，过程优化项达 500 项以上，累计节省成本总计为 6000 万。

(2) 节省工期

通过 BIM 技术提高了项目与其他责任主体及各专业之间的协同工作效率，为项目节省工期总计 72 天。

(3) 高效协同、精益管理

自主研发 BIM 协同平台，各单位、各专业协同工作，高效管理。

（4）提升质量、保障安全

应用 BIM 协同管理平台进行项目质量管理、安全管理。达到质量目标 100% 合格，安全零事故发生。

5. BIM 技术应用推广与思考

（1）基于云的 BIM 高效管理与协作

平台的应用使得项目图纸模型能够集中归集，手机端 APP 便携查看，降低 BIM 技术应用推广的门槛，优化管理人员工作方法，即便不熟识 BIM 技术，也可发挥 BIM 数据价值

（2）BIM 深化多方协同

BIM 例会会同各参建方参与，综合各方意见与需求，深化协调会更关注重点，同时采用 BIM 平台协同深化，提高了互相提资的准确性及时性，深化周期缩短约 30 天。

（3）BIM 运维虚实结合

将运维需求前置施工阶段，功能需求纳入 BIM 深化之中，完成深化的 BIM 虚拟数据对接后期运维平台并与现场实际深化施工内容相结合，为业主 BIM 运维做到虚实结合。

（4）下一步工作展望

下一步项目部将继续探索 BIM 技术与实际工作的结合应用，避免走入盲目堆砌 BIM 技术的误区，结合项目发挥 BIM 数据优势，寻找可拓展的 BIM 应用，如机电安装一体化技术，智慧图纸 APP 等。

四、荣耀之环钢结构幕墙数字建造技术

1. 项目概况

荣耀之环的圆环外径 153 米，内径 115 米，宽度约为 16 米，支座之间最大跨度 120 米；圆环结构楼面梁顶标高 48.8 米，屋面梁顶标高 55.4 米，层高 6.6 米。总建筑面积约 6000 平方米。如图 1-1 所示，其地理位置位于上海临港新片区金融湾，拟于四栋高约 46 米的塔楼顶部新建该圆环形建筑，为满足外围视线无遮挡的建筑功能需求，本项目圆环结构具备重心偏置与刚度迥异等特征，形成了大跨度圆环结构的弯—剪—扭等复杂力流传递与非均性的形变姿态，这种独特的“C 型开口”结构设计为它的施工带来了最核心的工程难点。



图 1-1 荣耀之环项目效果图

2. BIM 技术应用概况

2.1 应用策略

荣耀之环主结构为超大直径、超大跨度空间钢结构，截面形式为重心偏置的开口 C 型截面，如图 2-1 所示，施工过程中易形成非稳定体系的状态。为提高钢结构施工精度，拟采用地面组拼+计算机整体提升工艺完成南北两跨钢结构施工，在该工况下，偏扭形态的非稳定状态产生风险将进一步增大，带来的技术难点包括协同模拟分析难度高、全过程的施工变形的控制精度要求高、应对大跨度钢结

构产生扭转的整体提升的技术难度大。通过采用多款有限元软件协同分析并相互验证，策划成套的超大直径高空偏扭圆环结构控形的数字模拟与建造技术，包括下述三项关键技术：一、基于 BIM 的钢结构幕墙一体化深化技术；二、基于自主研发的钢结构数字管控平台；三、新一代整体提升与姿态控制数字技术，从而实现了施工全过程的高精度控制和高效率管理。



图 2-1 荣耀之环重心偏置开口的钢结构截面

2.2 组织建设

2.2.1 组织架构

项目级的数字化实施团队的组织架构，由建设方上海临港新片区经济发展有限公司全面领导，机施集团层面，成立了以总工程师为总指挥的数字化实施团队，并由数字测量团队、数字孪生团队、整体提升团队、管理平台团队、深化设计团队、项目经理部共六大分队组成。



图 2-2 项目实施团队的组织架构图

2.2.2 BIM 管理体系总体思路

数字化管理体系，采用以建设方：上海临港新片区经济发展有限公司为核心的，所有参建方全参与，通过数字化协同、基于 BIM、物联网、机器人等技术的深度应用，实现数字化技术的全程落地。

2.2.3 BIM 应用环境

数字化软件矩阵构成，包含了欧特克 BIM 软件，如 Revit、Navisworks、3DsMax、AutoCad；钢结构深化软件 Tekla；幕墙深化软件 Rhino 与参数化软件 GrassHopper；数字孪生底座使用实时 3D 内容开发平台 Unity 进行自主开发；点云采集分析使用徕卡测量系统软件 Infinity、REGISTER 360、Cyclone 3DR；虚拟预拼装的龙禹船舶系统软件 IN-ANALY、IN-ASSEM，以及移动端 IN-CHECK；自主研发的钢结构数字管理平台使用 PKPM 的 BIMBase 和用友 ERP 系统。

3. BIM 技术应用成果与特色

3.1 深化设计阶段：基于 BIM 的钢结构幕墙一体化深化技术

荣耀之环钢结构内圈为采用 Q460C 的倒三角桁架，外圈为 Q355B 的封边环梁，断面形式为 C 型重心偏置开口形式，总用钢量近一万吨。荣耀之环外环采用全玻璃幕墙系统，内环采用框架玻璃幕墙系统，屋面和檐口为蜂窝铝板幕墙、吊顶穿孔蜂窝铝板幕墙，如图 3-1 所示，总幕墙面积超两万平方米。

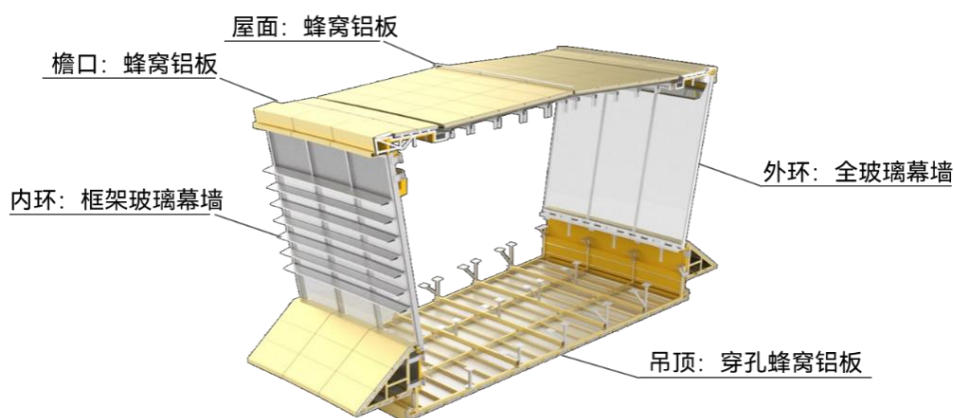


图 3-1 荣耀之环高空超大面积幕墙系统介绍

钢结构幕墙一体化深化技术，在设计维度上，在实现复杂曲面的精准表达的同时，可完成两个专业的协同深化，提前解决空间冲突。在制造维度上，通过模型的空间数据的提取，辅助数控加工，同时优化加工物料的管理。在施工维度上，

它为基于 BIM 模拟的方案优化、基于自动测量机器人的精度控制等提供数据基础。因此该技术的核心价值表现为提高精度、提升效率、加强质量。

荣耀之环的深化设计阶段，充分发挥钢结构幕墙一体化为核心价值，将两专业联动后的碰撞情况在深化阶段得到充分解决。如图所示，钢结构内圈顶部主钢梁牛腿，需要与钢梁一致做内倒斜切面，否则将产生钢结构的硬碰撞。如下图所示，外圈局部位位置钢梁非渐变外形，目前钢梁距离面板仅 50mm，在考虑钢梁表面防火涂料厚度，施工误差，以及幕墙安装厚度 250mm 后，将导致幕墙无法安装，故建议外圈钢梁采用渐变梁设计。

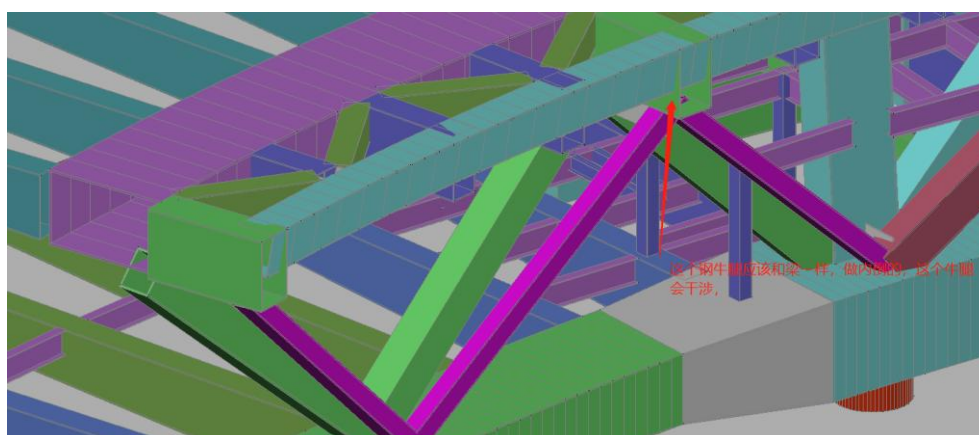


图 3-2 钢结构硬碰撞

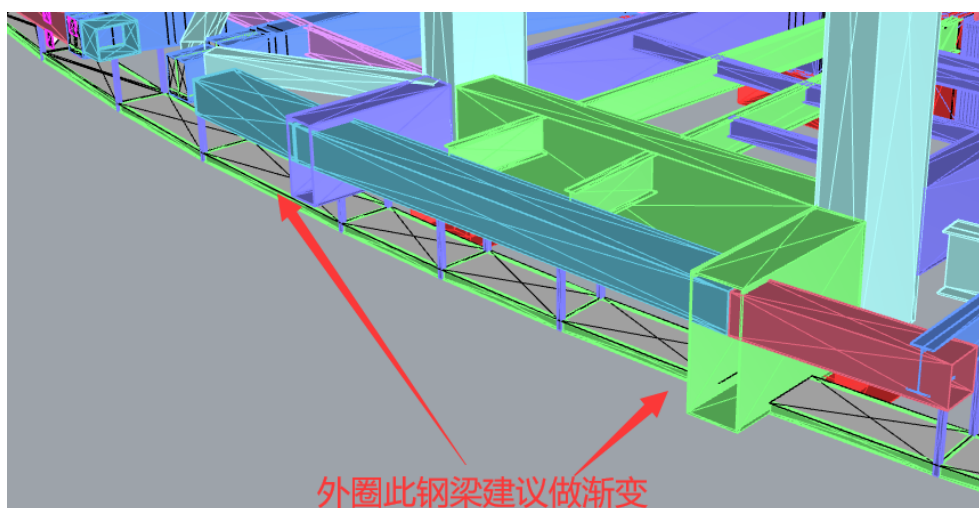


图 3-3 钢结构幕墙软碰撞

幕墙深化阶段，首先使用 Rhino 完成荣耀之环多个幕墙系统的表皮系统参数化模型的建立，并不断优化幕墙板块节点设计。通过 Grasshopper 编写数学表达式，从模型中批量提取工程量数据，同时完成幕墙材料类型自动分类，优化统计逻辑。当产生设计变更后，使用 Grasshopper 通过调整参数自动更新模型及关联

数据。最终生成加工图、料单及安装坐标表，如图 3-4 所示。

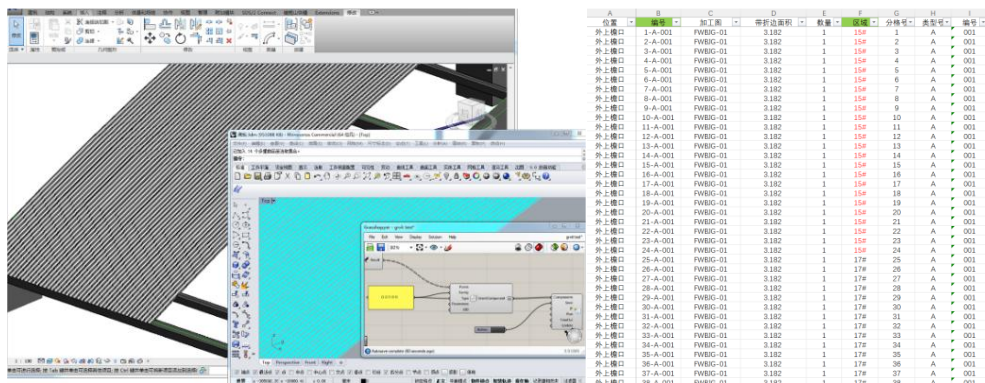


图 3-4 幕墙参数化设计

在基于 Rhino+Grasshopper 创建幕墙模型后，结合早前基于 Tekla 构建的钢结构模型，合模形成钢结构幕墙一体化的三维模型，涵盖荣耀之环的主体结构、幕墙面板、连接节点等细节，在结构优化设计通过荷载分析确认结构安全性后，进行基于 BIM 的施工模拟与工艺优化，针对荣耀之环的多系统幕墙，需要充分模拟幕墙单元吊装顺序、安装路径及施工进度，验证设备选型方案以及临时措施的可行性，同时用于工艺交底。如下图中的屋面铝板为例，详细描绘了共计 17 步的施工步骤。

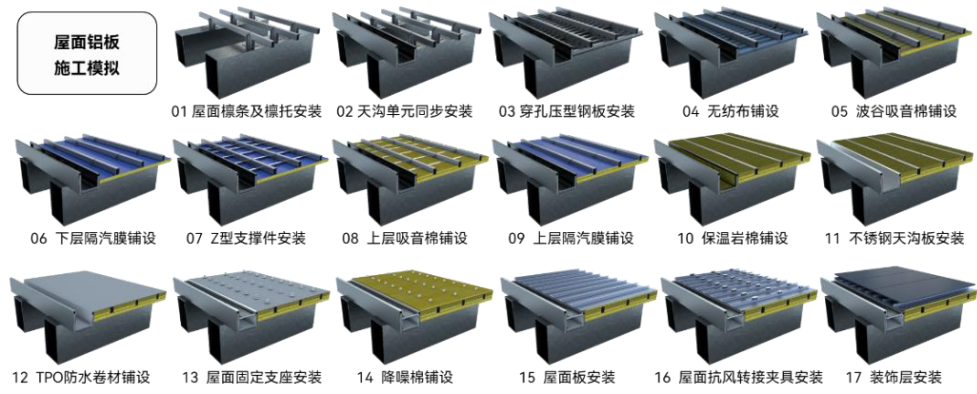


图 3-5 荣耀之环屋面蜂窝铝板幕墙施工模拟

3.2 施工准备阶段：基于自主研发的钢结构数字管控平台

荣耀之环项目为机施集团首次应用项目级的钢结构数字管控平台的工程项目，该系统贯穿了荣耀之环项目的深化设计、制造生产、施工安装各阶段，为项目部提供钢结构构件级的从深化设计到安装验收全过程管控服务。

钢结构数字管控平台的系统架构在设置上，包含了：①视图层：数字化业务平台客户端、移动端、与大屏展示；②功能层：项目总览、数据分析、质量管理、

进度管理、安全管理、资料管理、系统管理；③业务层：基础信息、材料管理、合同管理、工艺工序、构件进度、深化设计、预制加工、运输管理等功能。此外，通过 5G+智能传感器等基础设施层，以及基于钢结构幕墙深化 BIM 模型的多源数据层，通过各阶段等应用，实现设计、生产、施工的效率提升，成本优化、质量安全提高、并逐渐产生以管理数据为核心的决策支持和知识沉淀。

在数据交互层面，近一万吨钢结构包含了大量的实体构件，机施集团和建工钢构集团采用数据库通讯方式，即建工钢构的 ERP 管理系统，以“日”频率，将荣耀之环项目下所有构件信息准时打包发送到机施集团的钢结构数字管控平台内，通过数据自动分类，历史数据对比，更新系统内构件状态，如图 3-6 所示。

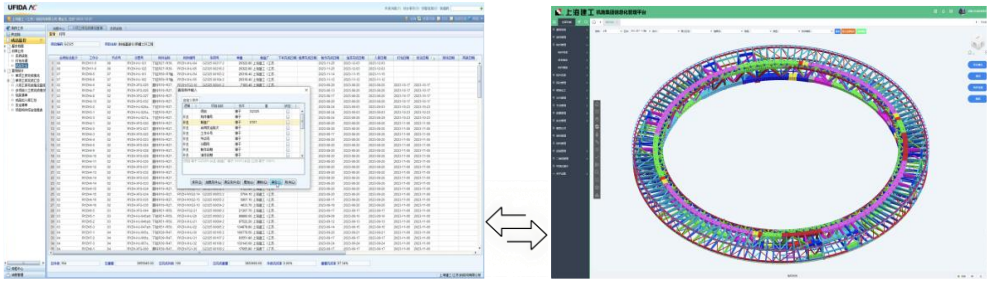


图 3-6 建工钢构 ERP 系统内的项目数据与钢结构数字管控平台保持通讯

平台对钢构件的管控共分为三个阶段，包含深化设计阶段：对深化模型、深化图、深化升版管理；构件加工阶段，对计算机放样、排版下料切割、矫平矫直、H 型钢组装、焊接矫正、腹板组装组合焊接、消应力处理、整体矫正、端面加工、监理验收（加工检验批）、除锈与油漆、编号与贴码、入库与发运管理；对施工安装阶段，对物流跟踪、进场验收、吊装到位、安装完成、安装验收（施工检验批）管理。上述三个阶段形成了钢结构数字管控平台基于工厂 ERP 系统的机施数字平台流程管控要点与逻辑。在平台的项目创建之前，需添加企业级的钢结构构件分类，用于匹配 Tekla 模型中的构件类别。

在平台中创建荣耀之环项目后，首先上传钢结构模型，通过二次开发，实现了基于 Tekla 插件的 BIM 模型与图纸的一键导出与更新，如图 3-7 所示，这样的操作简化了传统 BIM 管理平台首先需要完成 Tekla 模型导出再选择 Ifc 模型上传的繁琐流程，同时可以保持平台中的施工图与模型的图模一致性。

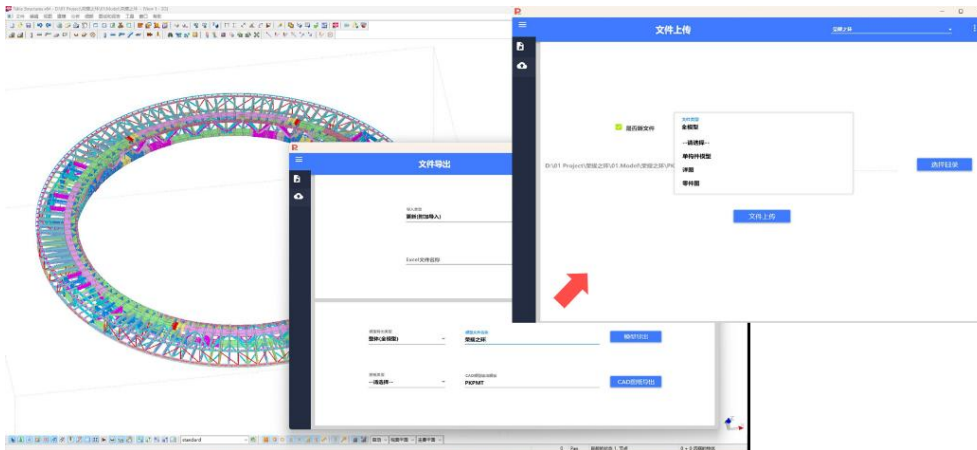


图 3-7 钢结构模型与图纸一键更新与上传

建工钢构的 ERP 管理系统，是将荣耀之环项目下所有构件的信息定时打包发送到机施集团的钢结构数字管控平台内，在平台内，设置了“加工状态推送记录”菜单页，用于记录更新后的钢构件的加工状态数据，如图 3-8 所示。这个菜单页的存在，使得平台用户可以了解工厂的 ERP 系统是否确实完成了数据推送。在系统开发测试阶段，曾发生由于网络通讯不畅数据推送不成功的情况存在。

序号	日期	构件编码	构件名称	生产状态	完成时间
1	2023-12-19	RJZH-SH-40	G2325-00129.2	生产	2023-12-19
2	2023-12-19	RJZH-SH-40	G2325-00129.2	生产	2023-12-19
3	2023-12-19	RJZH-SH-40	G2325-00129.2	生产	2023-12-19
4	2023-12-19	RJZH-SG-40	G2325-00130.2	生产	2023-12-19
5	2023-12-19	RJZH-SG-40	G2325-00130.2	生产	2023-12-19
6	2023-12-19	RJZH-SG-40	G2325-00130.2	生产	2023-12-19
7	2023-12-19	RJZH-SG-41	G2325-00131.2	生产	2023-12-19
8	2023-12-19	RJZH-SG-41	G2325-00131.2	生产	2023-12-19
9	2023-12-19	RJZH-SG-41	G2325-00131.2	生产	2023-12-19
10	2023-12-19	RJZH-SH-41	G2325-00132.2	生产	2023-12-19
11	2023-12-19	RJZH-SH-41	G2325-00132.2	生产	2023-12-19
12	2023-12-19	RJZH-SH-41	G2325-00132.2	生产	2023-12-19
13	2023-12-19	RJZH-SG-42	G2325-00133.2	生产	2023-12-19
14	2023-12-19	RJZH-SG-42	G2325-00133.2	生产	2023-12-19
15	2023-12-19	RJZH-SG-42	G2325-00133.2	生产	2023-12-19
16	2023-12-19	RJZH-SG-43	G2325-00134.2	生产	2023-12-19
17	2023-12-19	RJZH-SG-43	G2325-00134.2	生产	2023-12-19
18	2023-12-19	RJZH-SG-43	G2325-00134.2	生产	2023-12-19

图 3-8 平台收到工厂 ERP 的钢构加工数据推送并更新

工厂 ERP 的数据推送，截止于构件的发运状态，进场后需要依靠项目管理人员通过二维码实现现场“一物一码”管理。理想状态下，每个构件从设计深化、工厂加工、物流运输到现场安装均通过二维码实现实体与 BIM 模型的实时关联，但实际工况下，钢构件的加工只有进行到“除锈与油漆”阶段后，才会粘贴二维码。因而二维码更多服务于项目现场的管理，如图 3-9 所示，包括对钢构件材质、焊接记录、安装位置等数据的追溯。待安装完成并通过验收后，在钢结构数控平台上真正实现了构件级全流程追踪，以及全周期的数据贯通。基于平台的构件几

何属性与工程数据动态绑定的功能，对钢构件的相关质量报告，以及验收检验批文档形成双向关联。



图 3-9 基于平台移动端扫描采集施工时间数据

荣耀之环项目以钢构件的工序与时间为核心，实现生产准备阶段的数字管理。而 BIMBase 作为一个集成平台，具备将传感器数据、监测数据、分析结果等信息进行整合，实现如结构健康周期的钢结构全生命周期的管理。保障钢结构安全与可持续发展，将是平台开发与应用的重要发展方向。

3.3 现场施工阶段：新一代整体提升与姿态控制数字技术

机施集团研发的新一代整体提升与姿态控制数字技术，在原有的超大型钢结构整体提升计算机控制系统的基础上，开发的基于物联网的整体提升数据中心、基于 Unity3D 和倾斜摄影的整体提升数字孪生系统。

超大型钢结构整体提升计算机控制系统是一种基于液压同步控制技术的大型构件安装方法中核心控制系统，它由液压千斤顶集群和钢绞线承重系统组成形成液压提升执行系统。计算机控制系统通过运行自主开发的控制软件，负责多吊点同步逻辑、负载均衡及安全控制。多吊点同步控制算法采用负载均衡分配的原理，根据提升的整体构件的重量分布，动态调整各千斤顶出力，避免局部过载。传统超大型钢结构整体提升计算机控制系统存在一定的缺点，首先在提升使用一段时间后，需要使用全站仪对其进行高程上累计误差的纠偏。其次，系统对环境感知能力弱，而整体提升对风环境的要求较高，一般六级风以上不建议实施提升作业。最后，该系统的智能化程度不高，不仅缺乏实时数据分析和预测功能，相关数据过多不便于建设管理人员支管了解。

为了更高效更稳定地实现数字化提升的全要素控制，研发并应用了基于物联网的整体提升数据中心，如下图所示。硬件的通讯支持方面，使用 LoRa 无线数

传模块通过串口配置实现传感器数据接收。硬件的多传感器集成方面，使用多通道并行数据采集，可同时接入自动跟踪测量机器人、风速仪、超声波碰撞传感器等异构设备，通过配置传感器信号类型，实现统一数据流收集与分发，最终实现多源数据的无线融合与实时处理。数据采集方面，以自动测量机器人为例，采用的是基于徕卡 MS60 的钢结构空间姿态自动测量技术，硬件上通过徕卡 MS60 自动照准并跟踪构件上的 360° 棱镜，实现对坐标数据的高频采集，并实时同步数据于提升控制系统，实现数据交互与联动控制。不仅大幅度提高了现场测量数据的采集效率，保证了数据的可靠性，降低了人工计算与分析的工作强度，加强了钢构件提升过程的作业安全与姿态稳定，实现了构件“提升→悬停→测量→纠偏→调整→再提升”的全自动化。数据融合方面，包含了对液压数据、测量数据、防碰撞数据、环境数据等分散的多源数据映射到统一时空坐标系，提取关联特征，实现“变形—环境—障碍—设备”协同分析，支撑提升过程的动态纠偏与安全决策。整个融合过程包括：采集数据的降噪和去异常的预处理、基于时间同步和现场测量控制网的时空对齐，进行多源数据关键特征和规则挖掘的特征关联、保障协同控制和安全施工的决策输出，共四阶段。

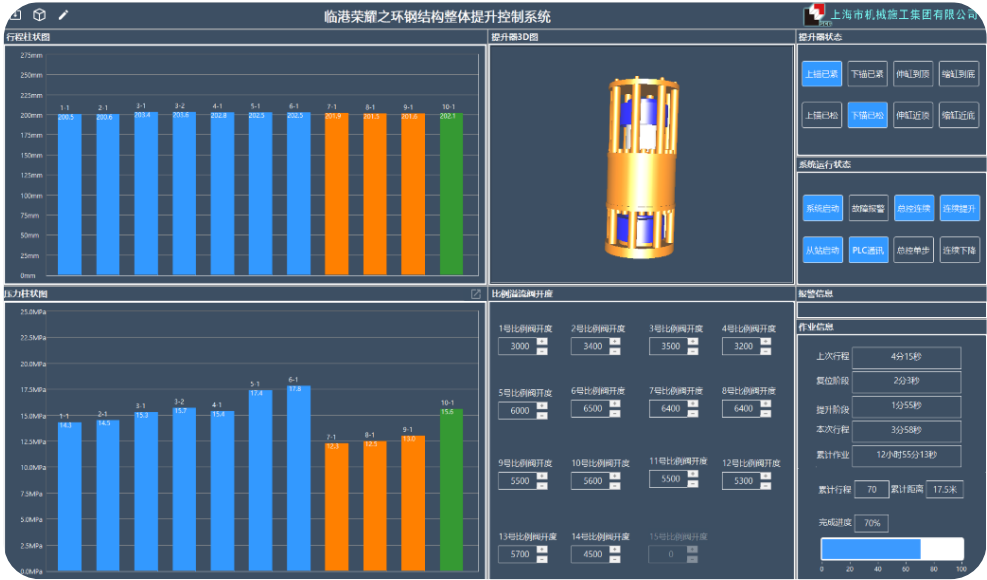


图 3-10 基于物联网的整体提升数据中心系统

在实现多传感器的数据融合的基础上，研发并应用了基于 Unity3D 和倾斜摄影的整体提升数字孪生系统。荣耀之环项目中，首先通过 BIM+GIS 构建真实的提升作业现场 3D 模型，通过数据中心实时导入现场提升数据，荣耀之环数字孪生系统的展示核心是 11 组提升油缸的工作状态，包含油缸型号、实时压力、上

下锚状态，以及油缸行程，最终呈现整个钢构件的运动状态，基于 Unity3D 的中具有物理属性的仿真展示，实现现场整体提升的数字表达。

在数字孪生场景下，可以通过分页，自定义镜头角度观察荣耀之环项目使用的 11 组提升油缸的工作状态，如图 3-11 所示。经调研，建设方存在查阅现场实际工作画面的需求，利用开发阶段接入的视频监控，即在数字孪生场景下，通过点击进入指定油缸场景后，可调出该油缸的视频监控，如图 3-12 所示。



图 3-11 数字孪生场景下 11 组提升油缸的状态观察



图 3-12 进入指定油缸场景可调出该油缸的视频监控

为进一步提升现场指挥与管理人员对构件空间姿态的把握，研发并应用了基于 AR 视觉的自动测量实时数据显示技术。荣耀之环项目中，通过将整体提升数据中心中的实时测量数据，以及距离终点的偏差值，实时分发至 AR 眼镜上，辅助构件就位指挥，如图 3-13 所示。



图 3-13 基于 AR 视觉的自动测量实时数据显示

整体提升的钢构件是通过散件运输进场，并在现场拼装胎架，进行散件的地面整体组拼工作。在散件形成整体的过程中，存在大量的多位置的焊接工作，通过应用无轨道全位置爬行焊接机器人，提高焊接质量，保证构件成型后的整体稳定性，如图 3-14 所示。通过视觉跟踪算法，智能识别焊缝位置，判断焊缝路径轨迹，实现沿焊缝的自主运动与跟踪，完成了提升段钢结构关键复杂大截面的自适应、全位置多道多层自动化焊接，高效完成焊接同时，焊缝成型美观、质量稳定。



图 3-14 无轨道全位置爬行焊接机器人

在整体提升构件的姿态控制模拟与分析上，主要采取了事前的虚拟预拼装技术，以及事后的高精度全站扫描技术。本项目使用的虚拟预拼装技术，和传统零应力的预拼装技术不同。本项目中，利用高精度全站仪对环结构提升段在预提升时构件悬停期间的接口点位坐标进行测量，此状态下提升段钢结构受到 11 组提升油缸的向上拉力，以及自身的重力影响。此时再将测量的数据导入 IN 系列软

件进行数据分析，搭载模拟。通过搭载模拟得到的各拼接接口测控点的误差值，快速以数据的形式展现构件的错位、偏差等情况，并为后续的嵌补段修整提供数据支持。具体预拼装模拟数据如图 3-15 所示。

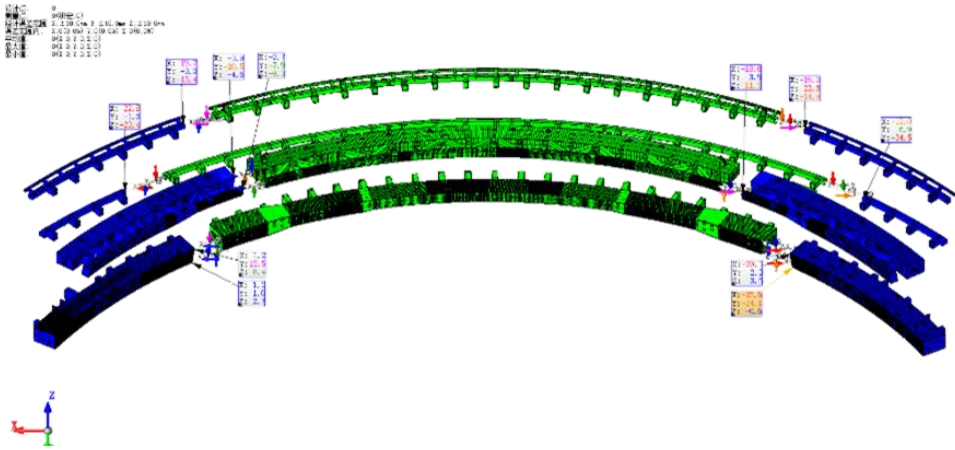


图 3-15 提升段钢结构悬停状态下采用虚拟预拼保证环向嵌补段安装

当整体提升完成，环向嵌补段安装，临时提升支撑装置全部拆除后，荣耀之环的环状钢结构成型。整体精度控制环节，通过应用集合全站仪和扫描仪的功能的 Leica MS60 全站扫描仪，以全站扫描技术原理，完成了以反射贴片为目标的基于自由设站的点云合成拼接，点云与模型的坐标系匹配采用了基于现场测量控制网的自动匹配，完全排除了人工干预和计算机拟合带来的计算误差，真实反应出环形钢结构现状。如图 3-16 所示，钢结构总体精度较好，尤其在 XY 平面方向上。在 Z 高程方向上，可以看到临时支撑拆除后，向下还是产生了项目预期范围的轻度沉降。

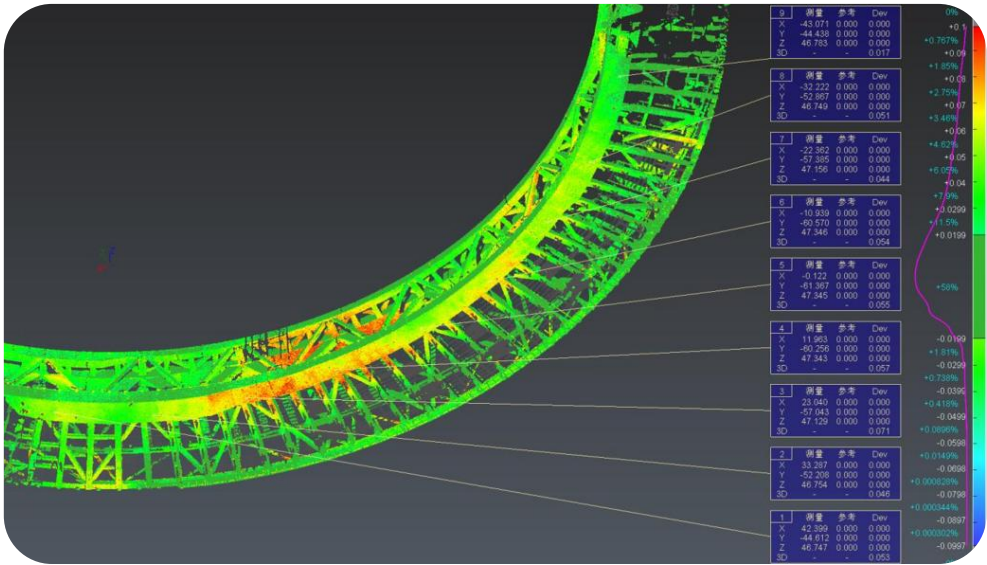


图 3-16 提升段与嵌补段完成后使用全站扫描的精度复核结果

上述钢结构整体精度数据在提交给幕墙深化团队，针对幕墙模型，尤其是节点布置上进行微调。内环幕墙金属板安装完成后，再次使用全站扫描技术校核幕墙质量，数据显示总体精度较高，如图 3-17 所示，现场数据与幕墙深化设计方案中空间位形的高度吻合，实现了幕墙的高质量建设。

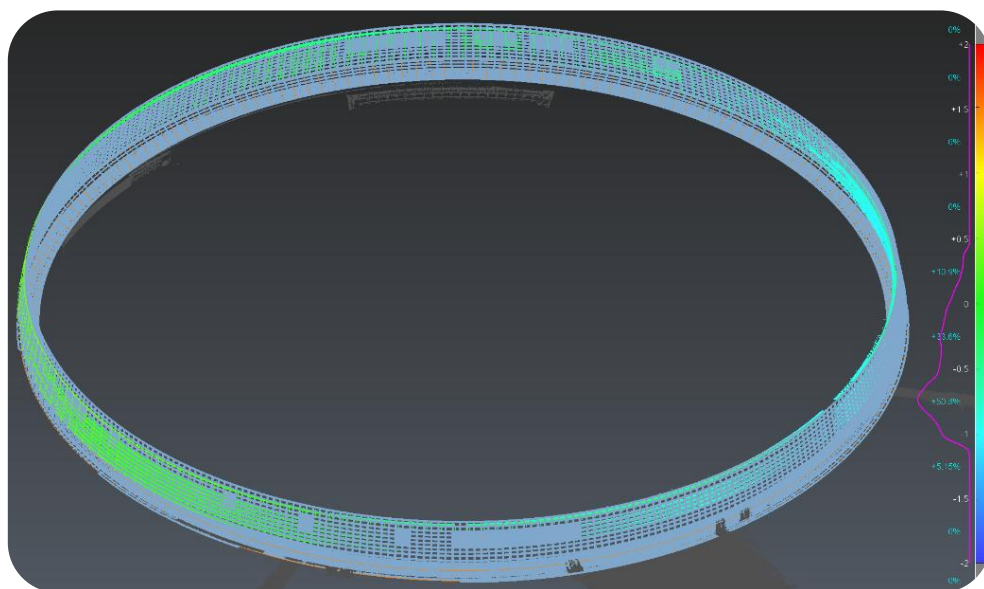


图 3-17 内环幕墙金属板后使用全站扫描的精度复核结果

4. BIM 技术应用效益与测算方法

荣耀之环钢结构幕墙数字建造技术的研究与应用，不仅帮助建设团队突破了大跨度异形结构建造技术壁垒，节约了大量结构材料和措施费用，同时形成的示范技术，可应用到其他类似建筑体系中，间接形成巨大经济效益。

荣耀之环的高质量建造，不仅打造了上海临港地区的新地标，提升了临港金融湾的整体形象，还为当地经济发展注入了新动力。作为技术含量高的标志性工程，它的落成对促进区域产业升级，带动相关产业链的发展具有重要意义。

5. BIM 技术应用推广与思考

针对荣耀之环的重心偏置开口截面钢桁架整体提升与姿态控制难题，在数字模拟与建造技术方面，研发并应用了基于 BIM 的钢结构幕墙一体化深化技术、基于自主研发的钢结构数字管控平台、新一代整体提升与姿态控制数字技术，解决了大跨度环状异形钢结构的安装难题，在本项目中践行了机施集团作为专业承包商的高精度、高安全性与高效率的核心价值，形成群塔支承超大直径圆环建筑

结构建造关键数字化技术成果,进一步推动大跨度钢结构幕墙一体化建造技术在行业内的发展和进步。

五、上海博物馆东馆新建项目

1. 项目概况

上海博物馆东馆位于浦东新区联洋社区，总建筑面积 113200 平方米（地上 6 层，地下 2 层），集展示陈列、公众服务、学术研究、库藏及办公功能于一体。作为“世界顶级的中国古代艺术博物馆”及上海重要文化地标，其主体结构包含多处大跨度桁架以满足展陈空间需求。核心亮点为 L2 至 L5 层的内庭区域，通过两组总重 360 吨、垂直高差 15 米的双曲螺旋钢坡道连接，采用旋转坡道结合单边悬索的创新结构形式。

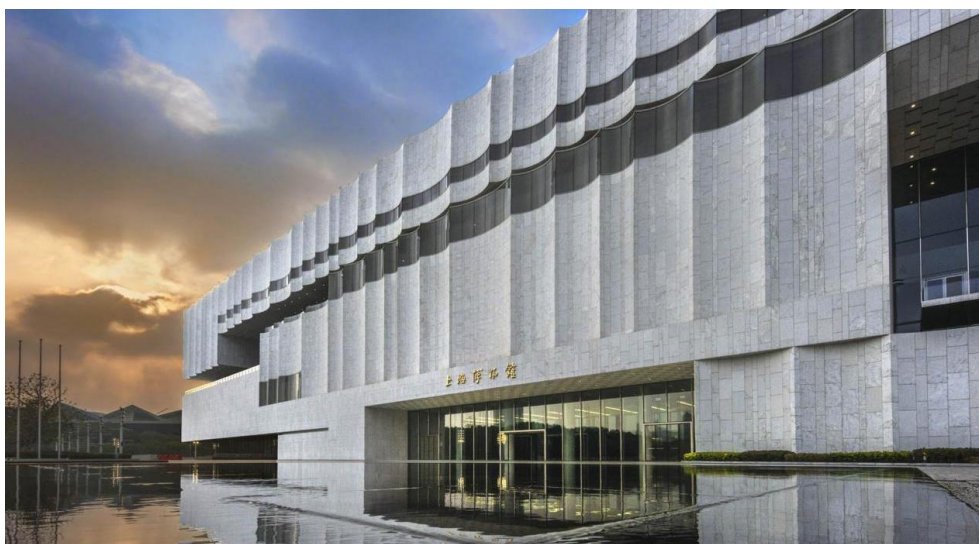


图 1-1 上海博物馆东馆实景图

2. BIM 技术应用概况

2.1 应用策略

2.1.1 BIM 赋能复杂结构精准施工

针对 24 米大跨度悬挑桁架及由 19 个复杂双曲分段构成的螺旋坡道（单边悬索结构），应用 BIM 结合全站仪实时跟踪构件坐标，确保高精度吊装与索节点对接，有效控制异形结构累积偏差。

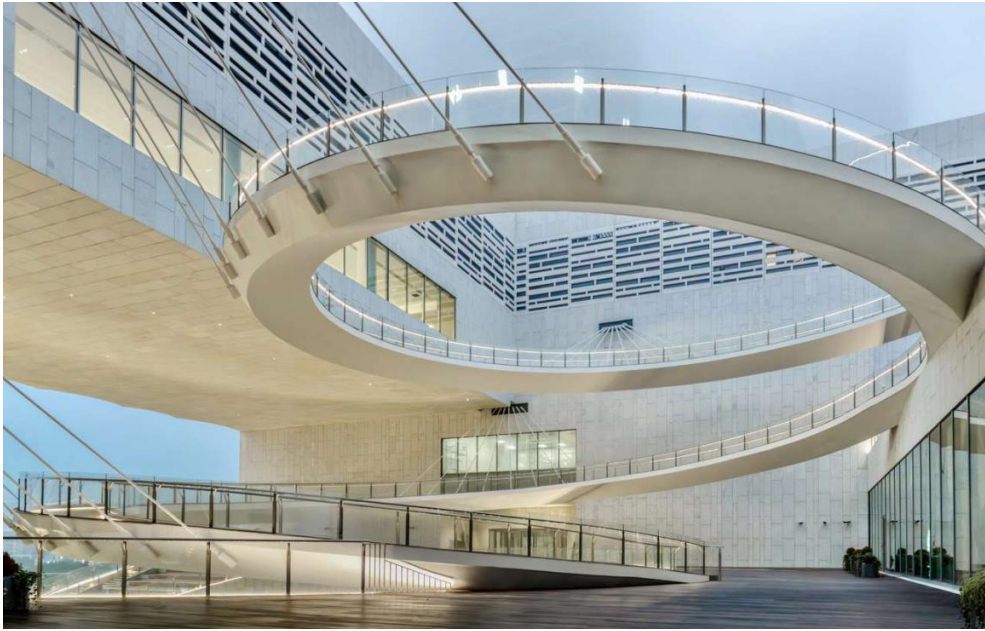


图 2-1 旋转坡道实景图

2.1.2 数字交付标准化

针对项目体量大、系统复杂的特点，深度融合建筑、结构、机电全专业模型与设备参数、测试记录等信息，构建标准化数字交付流程，实现交付规则流程化、交付结果标准化、交付资产可视化。

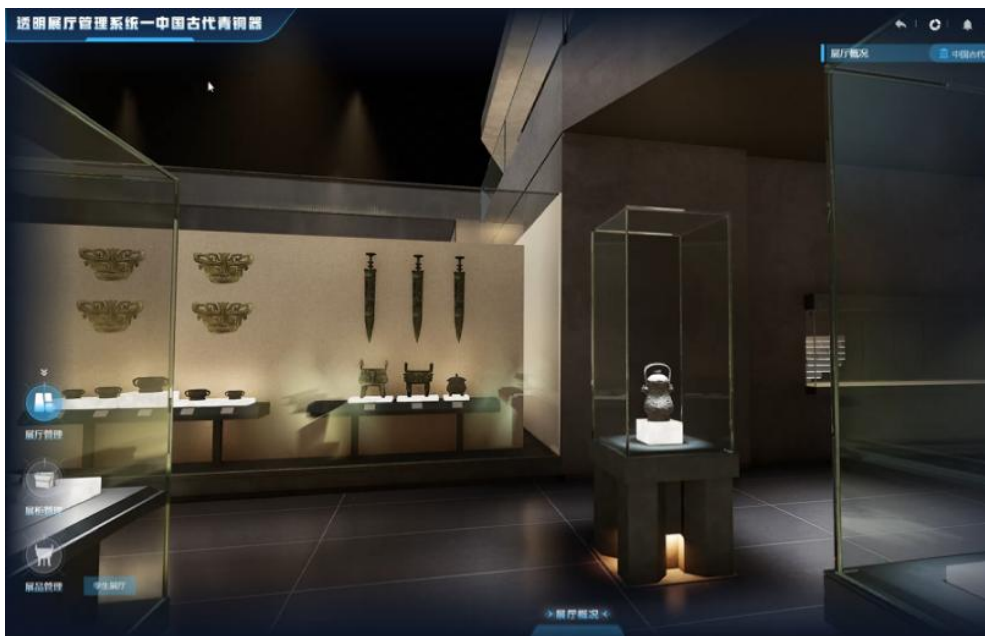


图 2-2 数字交付

2.1.3 打造“3M”智慧运维体系

构建涵盖藏品智慧保护(AIM)、场馆智慧运营(BIM)、观众智慧服务(CIM)

的智慧博物馆框架，保障文博安全，提升管理效能。



图 2-3 智慧上博“3M”系统

3. BIM 技术应用成果与特色

3.1 施工阶段

3.1.1 大跨度悬挑结构优化

针对悬挑桁架进行深化排布施工，运用 Tekla 深化建模与 ANSYS 多工况力学模拟，将悬挑桁架拆分为标准化单元，优化临时支撑体系点位与间距。

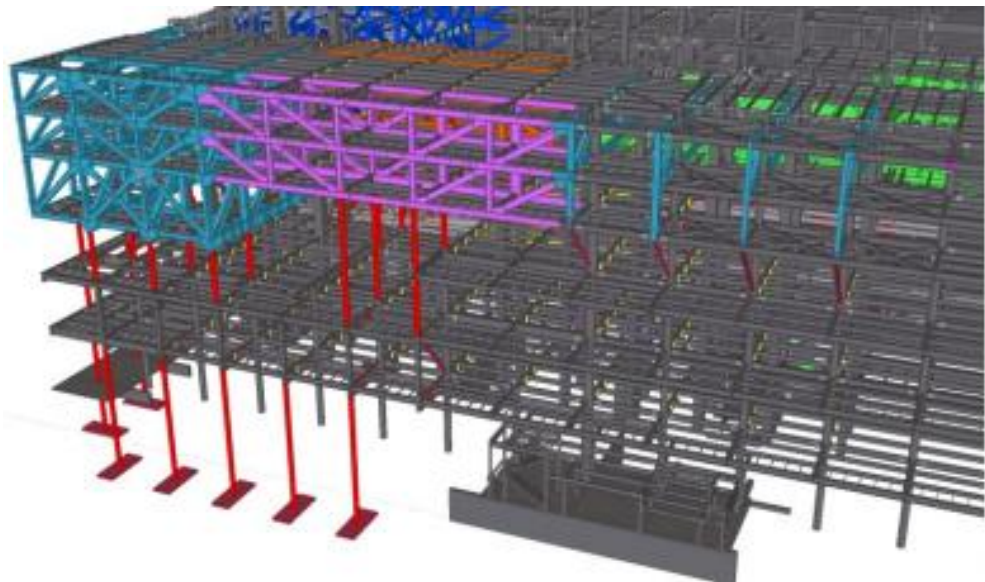


图 3-1 悬挑桁架临时支撑示意图

3.1.2 复杂旋转坡道预应力钢拉索施工应用

针对 19 个双曲弧形分段的双曲螺旋坡道，首先根据原设计的节点图纸，在 Rhino 中自动生成桥体模型数据，再导入 Tekla 内进行钢结构模型自动生成与拟合。基于 Tekla 模型优化，创新采用“双曲耳板+螺杆索头”混合节点：上吊点耳板经数控压弯分 8 区段匹配索向，现场调姿焊接；下吊点改用螺杆式索头与后置套筒组合，消除空间偏差。

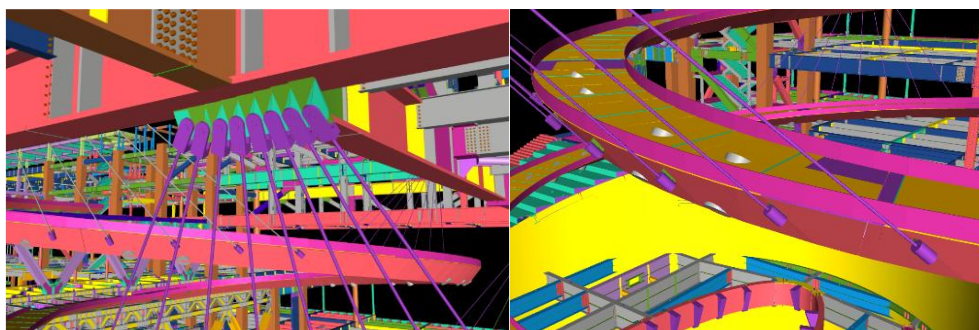


图 3-2 tekla 模型拉索深化设计

面对 32 根钢拉索张拉，采用 BIM 结合有限元分析支撑胎架设置位置及拉索张拉顺序，基于有限元施工模拟，将 32 根钢拉索分 4 批次阶梯张拉（10%→90%→100%→105%设计索力），拉锁张拉过程态索力偏差均在 10%以内。完成态的各拉锁索力偏差均在 5%内。

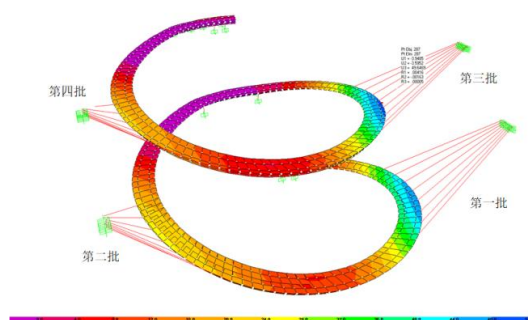


图 3-3 拉索张拉顺序



图 3-4 旋转坡道施工

3.2 移交阶段

3.2.1 实模一致性审核

针对模型与现场一致性问题，在工程建设阶段，采集吊顶内隐蔽工程管线与机房设备信息，并通过全景图像与 BIM 模型自动匹配，修改模型确保和现场一致。

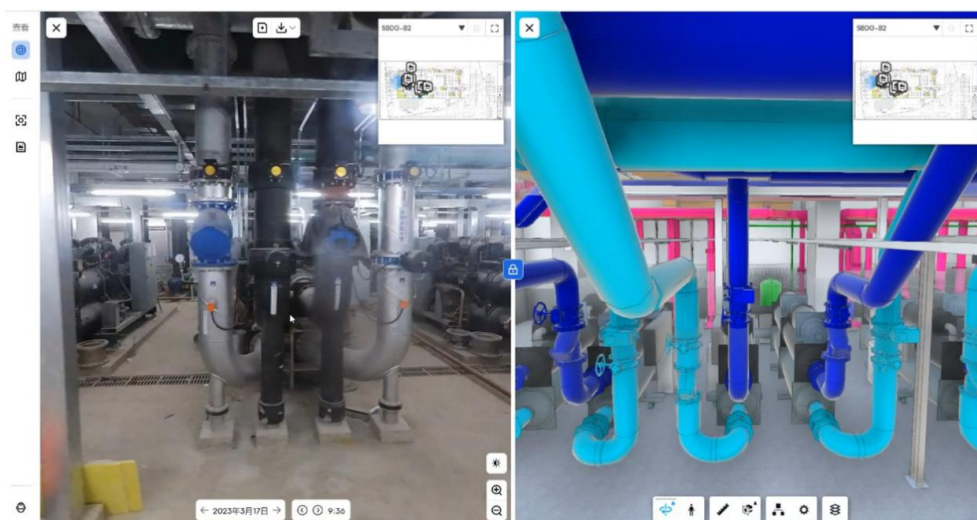


图 3-5 全景与模型自动匹配

3.2.2 交付流程标准化

基于 BIM 的现场承接查验,并对物业人员培训交底,做到交付流程标准化。物业人员可以通过 Pad 现场对设备的型号、参数、使用手册进行查验,调试远程设备运行命令确认功能是否实现。

3.2.3 基于 BIM 的数字交付

当竣工模型与现场一致以后,以房间为载体,集成摄像头、门禁、空气监测等上千个弱电点位及机电管线连接关系。通过自研的 6 大引擎,提供一个高质量的、附加数据的孪生模型底座。

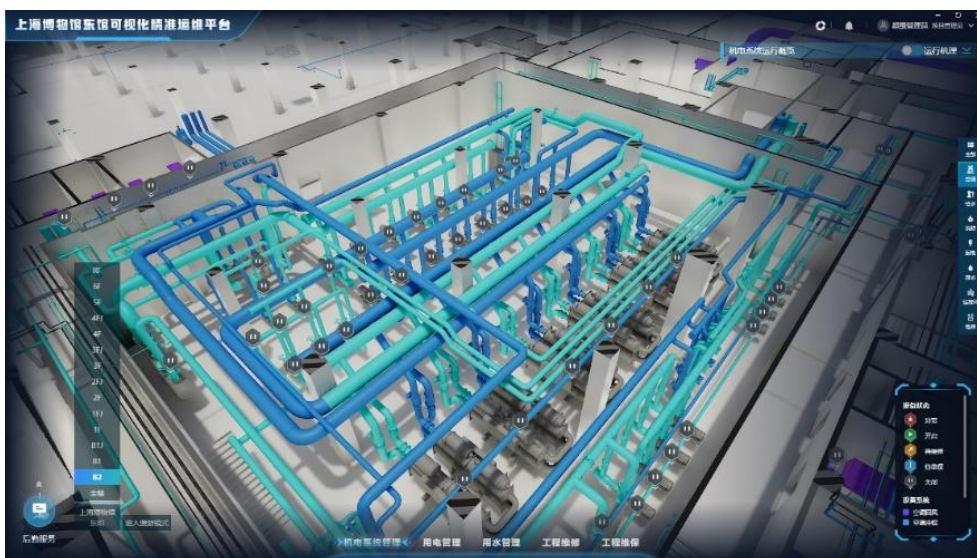


图 3-6 机电上下游逻辑关系提取

3.3 运维阶段

3.3.1 基于实时数据推演的藏品点交安全管控应用（AIM）

面对藏品恒温恒湿的微环境要求，本项目集成藏品数字档案信息，实现展厅数字孪生模型实时更新，并将藏品微环境需求变更情况通知相关部门，有效提升藏品微环境保护工作精细化程度。



图 3-7 集成各展柜微环境监测数据

3.3.2 机电精准运维（BIM）

通过轻量化 BIM 模型，业主能够在办公电脑、平板的超轻量三维视图中查看机电系统的 BIM 模型，查看系统逻辑结构、上下游关系。用户可以轻松获得涉及送排风系统的点位信息，包括位置、配置和状态等。



图 3-8 空调详情

同时通过集成 BA 智能化系统数据，在 BIM 模型中直观反映机组及过滤器状态、送风温湿度、CO2 及 CO 浓度的情况，方便后台管理人员全方位掌握机组的运行情况，同时对其性能进行评估。

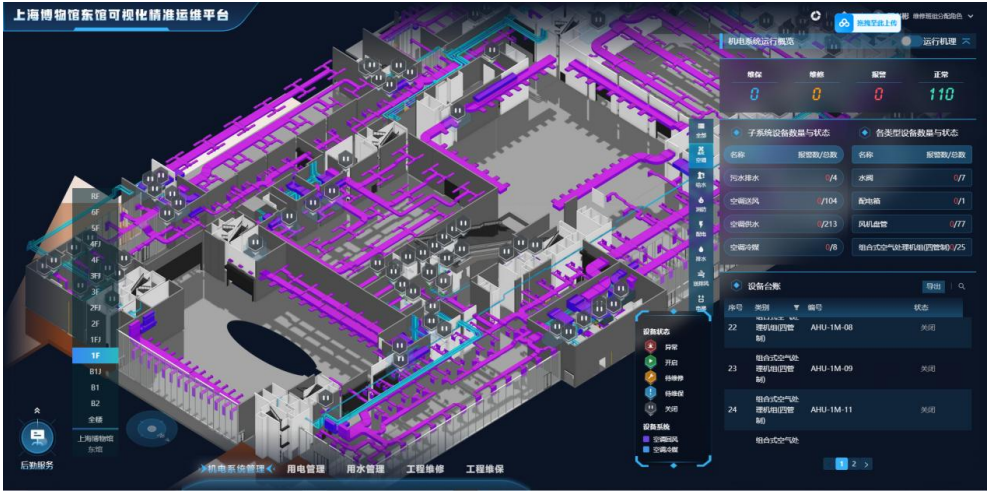


图 3-9 数据可视化

3.3.3 展厅环境管理（BIM）

通过实时接入展厅内的温度和湿度数据，进行实时监测和分析。系统会预设安全范围，预设的安全范围通常根据展厅内展品、参观者的舒适性和物品保护等因素来设定，确保在安全范围内维持良好的展厅环境。一旦温湿度超出预设的阈值，立即触发报警通知给维护人员。



图 3-10 环境监测页面

在远程查询展厅内的温度、湿度等环境参数之外，支持实时调整空调的设置。

文博单位可以根据实际需求，通过远程控制功能，调整空调的运行模式、温度设定、风速等参数，以满足不同场景下的舒适需求。为展厅管理人员提供了更加智能化和高效的空调管理方式。无需现场操作，可以远程实时监控和调整空调系统，大大减轻了维护人员的工作负担，提高了运维的效率。同时，该功能还可以通过数据记录和分析。



图 3-11 实时环境监测数据

3.3.4 场馆客流动态（CIM）

通过将展厅的三维模型与客流密度数据集成，实现对展厅内实时客流情况的监测与分析。以热力图的形式直观展示展厅内不同区域的客流密度分布，帮助管理者实时了解展厅的人群分布情况、发现人流高峰区域和拥堵点，预测人流流动趋势，以及评估展览观众吸引力和展览区域效果等。为展厅运营提供决策支持，优化展览安排。

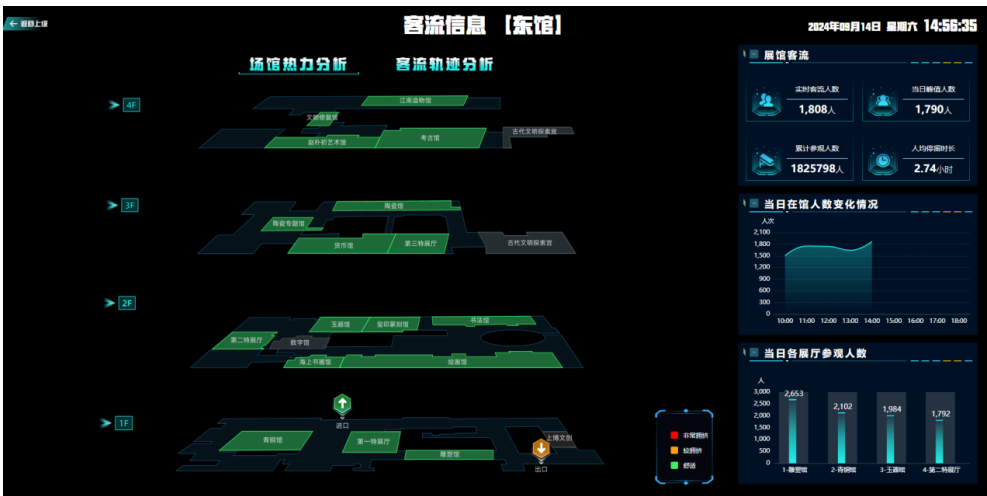


图 3-12 客流分析

4. BIM 技术应用效益与测算方法

辅助完成 638 台重点设备在线查验，解决 1379 项接管问题，储存 16 专业系统 2.16GB 设备资料，信息检索效率提升 50%；

设备应急报修工单同比减少 34%，重复报修下降 51.61%，故障排查周期缩短 20%，维保完成率达 100%（以工单系统闭合率为准）。

5. BIM 技术应用推广与思考

经济效益：大跨度钢桁架临时支撑体系减少用钢量 45 吨，直接节省 63 万元，叠加工期压缩、人工及场地成本优化，综合降本 149 万元；通过精细化的机电设备管控，同比降低单位面积能耗 7.15%。

科技效益：主导博物馆数字交付、运维模型规范，主编《建筑工程信息模型竣工档案归档标准》，CECS《博物馆展厅运维模型交付标准》，CECS《文化建筑工程数字交付标准》三部。形成多项专利、论文、软著科研成果。

社会效益：2024 年 12 月在上博东馆举办“全球顶尖博物馆 M20+大会”，对标世界顶级博物馆，为全球文博领域树立标杆，打造了“世界看中国的窗口”，向全球展现中国智能建造的卓越实力。



图 5-1 M20+全球顶尖博物馆大会

2025 年 4 月 25 日“第三届联合国教科文组织国际博物馆高级别论坛”，分享上海博物馆智慧化赋能场馆建设实践，为文化公建数字化树立典范。

六、上海市胸科医院心胸疾病临床医学中心项目

1. 项目概况

项目毗邻上海轨道交通 2 号线创新中路站，可达性强，为居民前来就医提供便利的交通环境。项目建成一所集医疗、科研、教学为一体的三级甲等专科医院。规划核定床位 600 张。立足于服务浦东、服务长三角，建成以胸部肿瘤学和心血管病学临床诊疗、临床研究转化医学基础研究为一体的精准医疗、智慧医疗、转化医学中心和人才培养高地。

项目用地 25523 平方米，涵盖医疗综合楼、宿舍楼、配套用房，总建筑面积 119953 平方米，地下建筑面积 39159 平方米，地上建筑面积 80794 平方米。地下 2 层，地上 18 层，建筑高度 80 米。



图 1-1 上海市胸科医院心胸疾病临床医学中心项目建成效果图

2. BIM 技术应用概况

2.1 应用重难点

(1) 施工环境：项目用地红线紧邻地铁，开挖和地下工程施工难度大；项目基地周边无道路，施工运输路线困难重重。

(2) 结构设计方案：项目地上结构采用钢框架+屈曲约束支撑结构，门厅设置大跨度悬挑梁，结构施工难度大，施工前 BIM 分析及管线综合压力大。

(3) 专业系统与功能：几乎全部系统机房设置于 B1 层，B1 层管线综合和

深化压力大；涉及核医学科，前期分析和应用压力大；涉及质子加速器机房，参建单位缺乏经验。

2.2 应用创新点

（1）BIM 应用目标：在扎实 BIM 基础应用的成果之上，对所有医疗区域功能分析、管线综合排布，统一净高要求，作为安装、装饰的基本工作要求。从设计、BIM 分析至安装深化、安装施工，均以管线综合深化的净高和排布为工作依据，管综成果落地。

（2）BIM 咨询应用亮点：在管线综合分析的过程中，对设计方案提出优化建议，并提供多种方案给设计，做到优化设计、协同设计；对机电设备、医疗设备的运输方案进行模拟分析等，并将所有预案延续到施工阶段，成功确保实施。

（3）BIM 工作基础原则：和众多参建方以 OpenBIM 的理念，交换数据格式，协同工作。

3. BIM 技术应用成果与特色

3.1 方案设计阶段

3.1.1 地下室交通模拟分析

在方案阶段即对各类来院药品车、垃圾被服车尺寸、吨位进行搜集，在方案模型下进行模拟，将运输通道净高要求及模拟情况反馈给设计，对运输通道结构进行调整，确保后期安装后净高仍满足运输车辆要求。图 3-1 为净高模拟情况。



图 3-1 地下室车辆通行净高模拟

同时，在运输通道平面上，对车辆进行转角模拟，反馈模拟结果后，结构柱位设计方案得到优化调整。

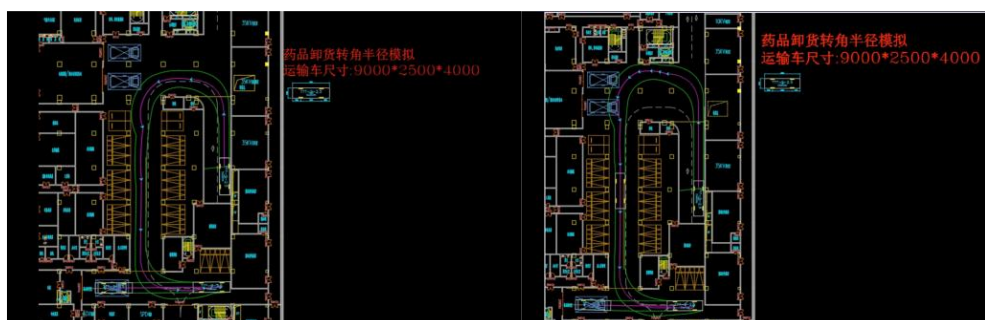


图 3-2 地下室车辆通行转角模拟

3.1.2 物流模拟分析

在方案模型的基础上，构建轨道物流系统模型，并模拟各站点情况，辅助医院进行站点位置选择，站点方案选择，房间开门方向调整等。

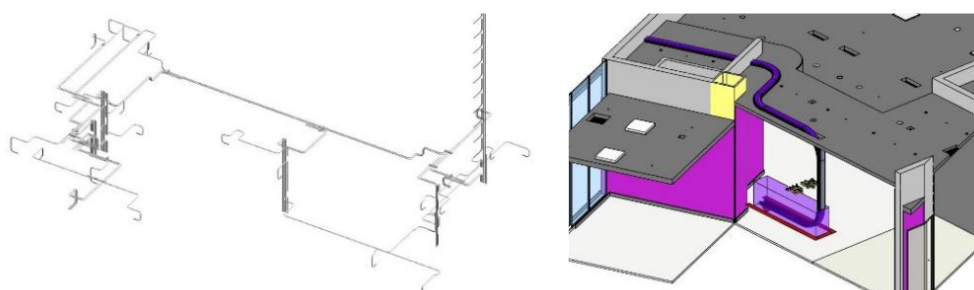


图 3-3 轨道物流系统模拟

由于 AGV 小车单价贵、运行效率难以验证，确定 AGV 小车采购数量是项目难题。在 revit 模型基础上，进行 IFC 格式转化，导入仿真模拟软件，根据不同的运送方案，对投放不同数量小车进行了参数化模拟。

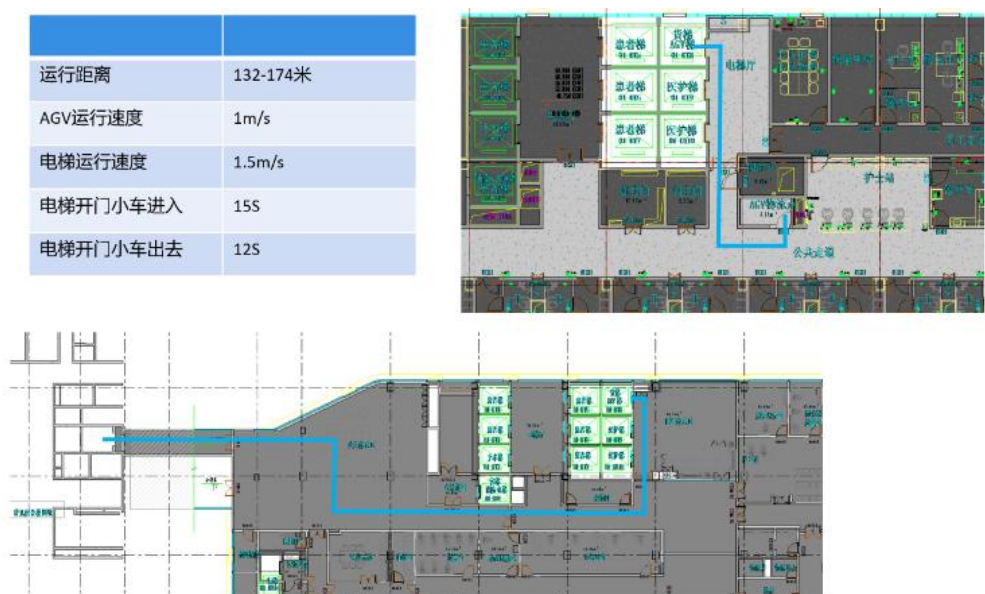


图 3-4 AGV 小车模拟参数及路线

模拟过程共涉及 2 个方案,4 条运输路径。根据参数化模拟输出的数据结果,小车数量 7 辆,送餐顺序为 6-11F,再 12-18F,发车间隔 2 分钟,总用时 29 分 52 秒。最为经济。

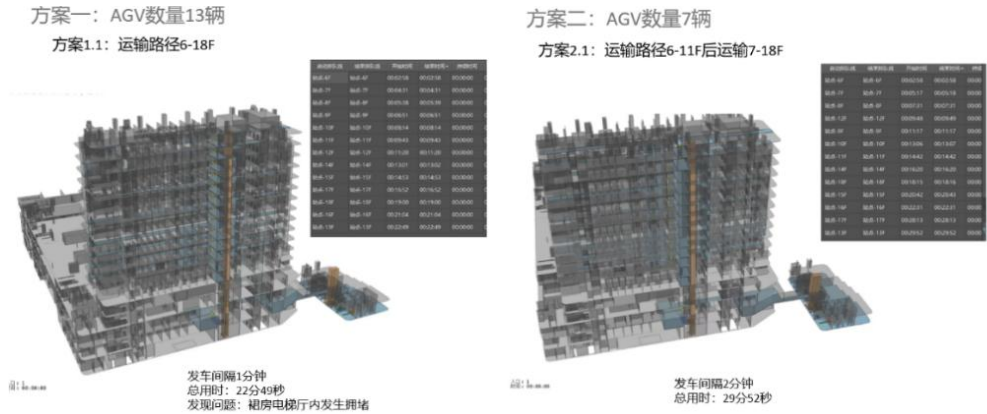


图 3-5 AGV 小车模拟界面及结果数据

3.1.3 设备运输路线模拟分析

在方案阶段,依据柴发、35KV 开关站、冷冻机组尺寸和重量,规划机电设备运输路线,将路线控制净高落实在方案上。利用积累的各类主流品牌 CT、PET-CT、PET-MRI、DSA 等设备的尺寸及荷载,规划医疗设备运输路线,以及医院竣工后的吊装方案,设置一些重点区域墙体后砌筑或易拆卸,确保各类路线在施工阶段、竣工阶段可行。

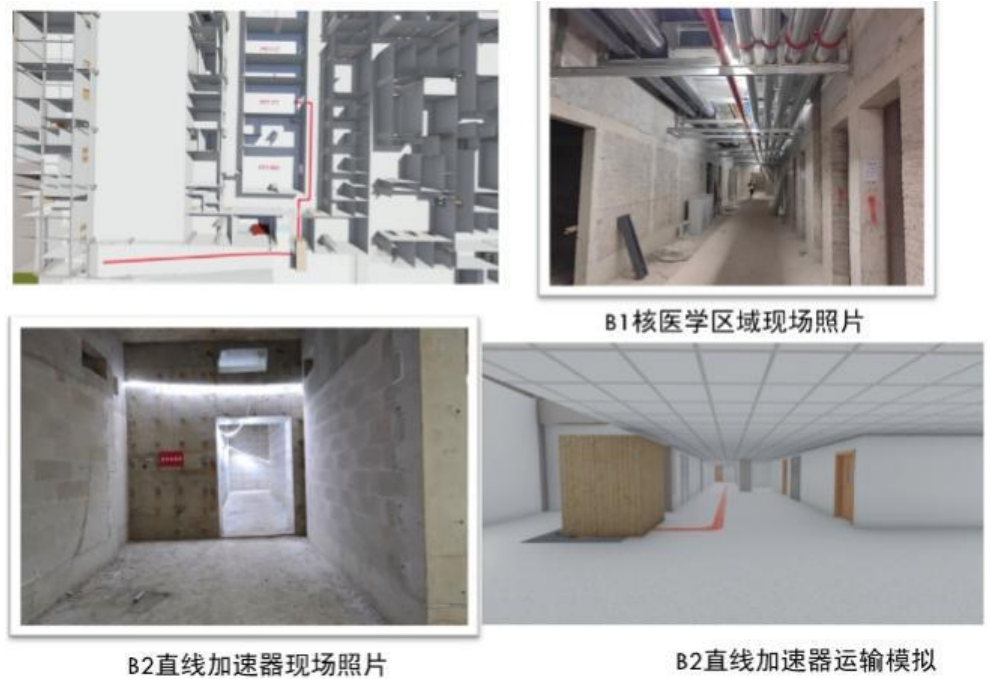


图 3-6 核医学科设备运输路线模拟

3.2 施工图设计阶段

3.2.1 净高分析

净高分析与控制是本项目应用重点。在地下工程施工开始前半年即开始模拟分析及优化。优化地下室多处净高不足 2 米位置，对结构进行调整。



地下室B1净高,优化净高不足2米走道3处。

图 3-7 地下室 B1 净高优化前后对比

在净高分析与优化过程中，发现双层机械车位大面积净高不足安装，以及考虑出墙管坡度和位置、施工机械行进路线等因素，对地下室顶板进行了多处调整，优化比例较大。图 3-8 为净高优化后的地下室结构图纸修改量对比。

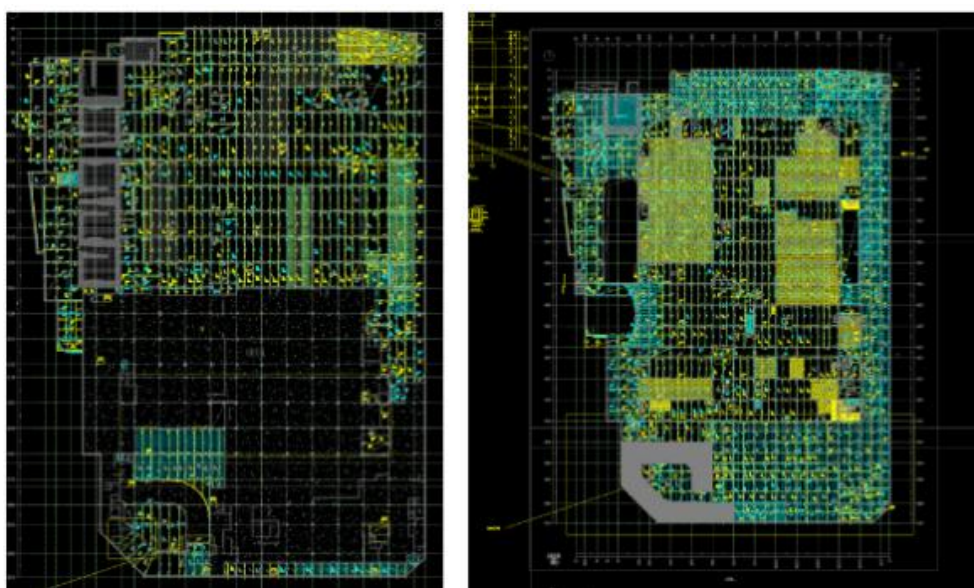


图 3-8 地下室净高优化后图纸修改量对比

3.2.2 钢结构 Tekla 应用

项目地上结构为钢结构+屈曲约束支撑结构，钢结构 BIM 应用采用 Tekla 软件，对钢结构节点、BRB 节点进行深化应用，并进行了堆场、运输、吊装和安装模拟。

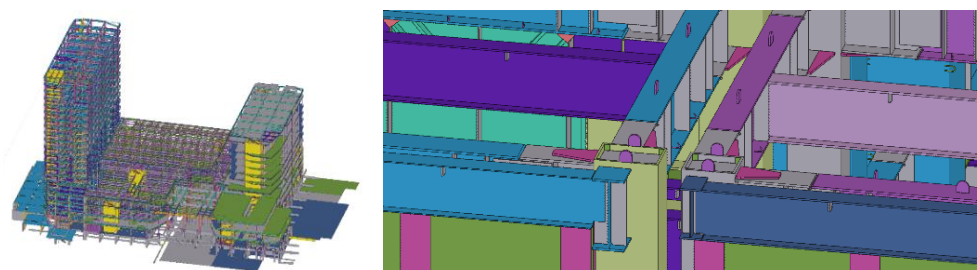


图 3-9 Tekla 模型

3.2.3 基于 OpenBIM 的室内精装正向设计

项目室内设计基于 OpenBIM 理念，将不同专业的模型基于 IFC 格式进行转换、传递并进行应用。

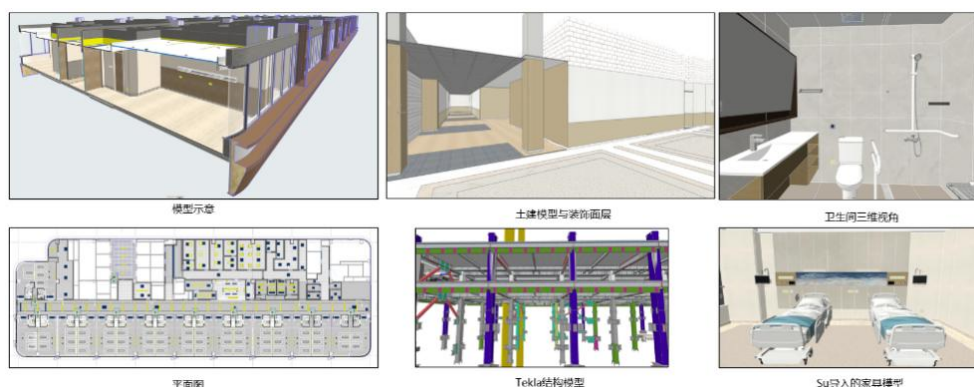


图 3-10 基于 OpenBIM 理念的各专业软件及集成

通过 Solibri 软件，将钢结构、机电、装饰、幕墙各单位的 BIM 深化模型，来自 Tekla、Revit、Archicad、Rhino 等各深化领域专业性 BIM 软件的 LOD350 模型，统一导出 IFC 格式，集成到 Solibri 中，进行各专业之间的碰撞检查。制定基于规则的模型检查，对项目进行建筑设计规范检查。

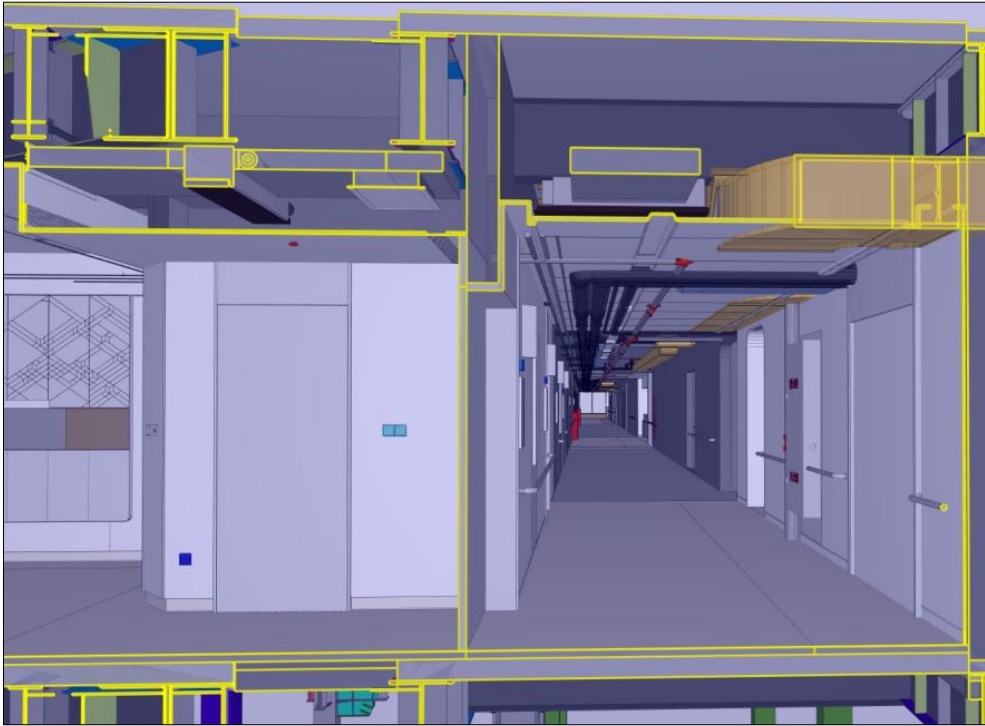


图 3-11 装饰设计碰撞解决

装饰方案确定后，通过装饰模型输出施工图纸和各类详图、清单，真正实现正向设计。

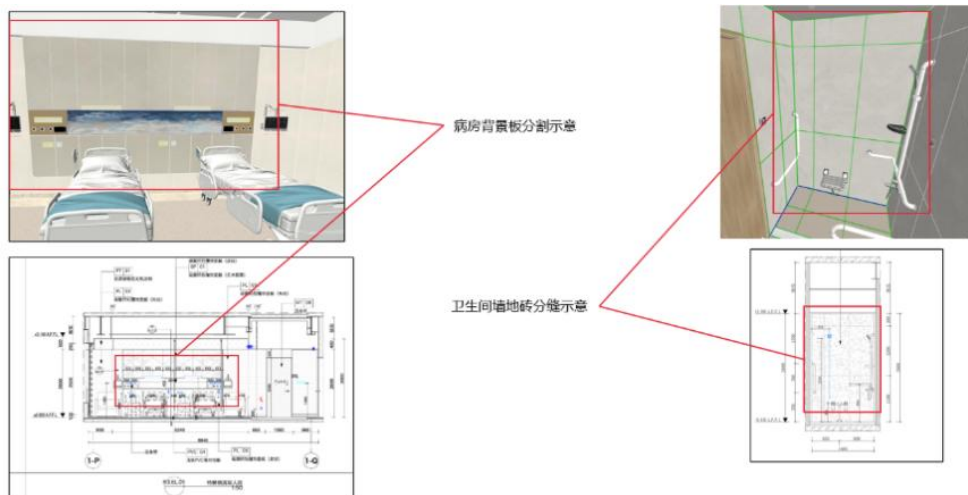


图 3-12 装饰方案出图

3.2.4 质子治疗室应用

质子治疗室应用是本项目的重难点，各参建单位均缺乏经验。先对质子治疗室的位置和荷载进行了模拟，确定了质子治疗室的位置，并对质子加速器的运输路线进行了规划和模拟，设定了连廊控制高度，路线荷载复核后，设计方案对顶板方案进行了调整。

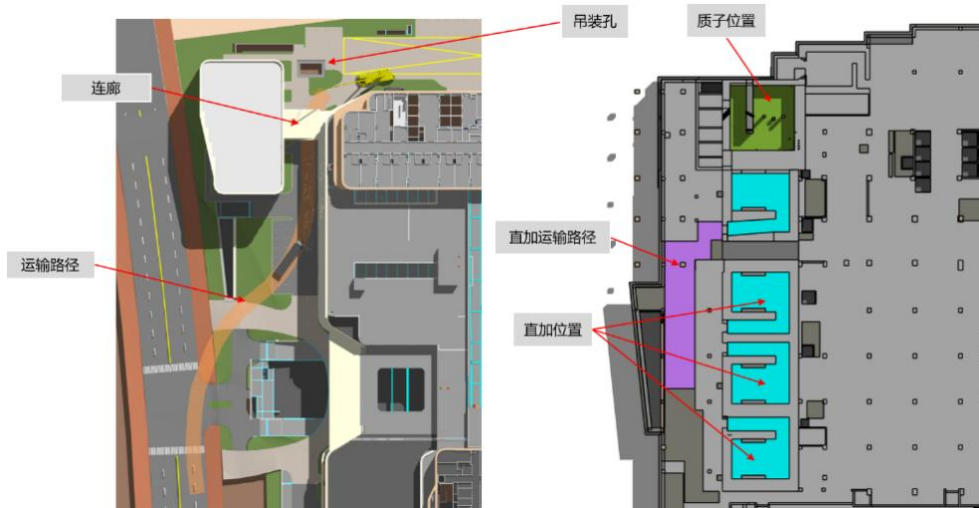


图 3-13 质子治疗室位置及荷载复核

质子治疗室上方吊装口形式特殊，经过模拟应用，选定吊装位置，车辆起吊点，并将成果传递至施工阶段。



图 3-14 质子加速器吊装路径模拟

3.3 施工阶段

3.3.1 钢结构吊装安装模拟（大跨度悬挑梁）

项目最大跨度及最大悬挑钢梁均位于医技楼门厅位置，最大跨度为 24.4m，总重约 20t。最大悬挑梁悬臂长 12.3m，重 6.5t，安装高度为 14 米。

由于大跨度截面尺寸较大，重量较重，且门厅入口位置为下沉广场，基本无大型起重设备吊装的站位空间。

应用 BIM 将 24 米跨度钢梁分成 3 段安装，通过在钢梁下方设置单管支撑，

从左至右依次安装。同时分段吊装能有效减少了在整体吊装过程中产生的扭曲变形。图 3-15 为安装步骤模拟，图 3-16 为现场顺利安装后的成果。

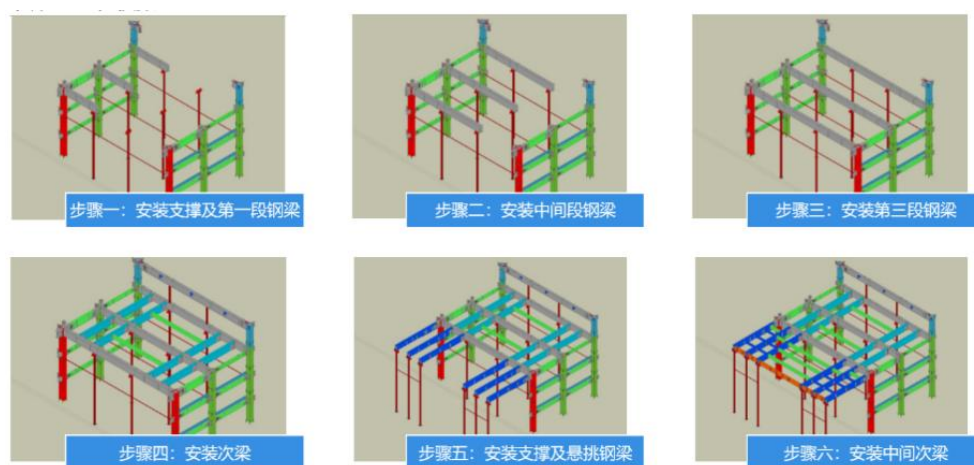


图 3-15 大跨度悬挑梁安装步骤模拟

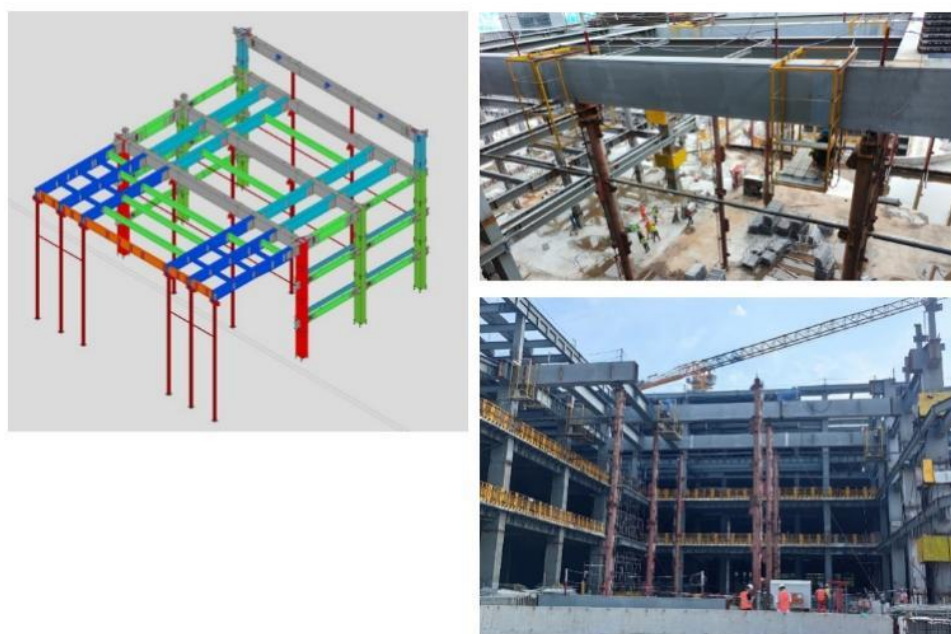


图 3-16 大跨度悬挑梁模拟与安装

3.3.2 二结构深化应用

传统 CAD 或者其他软件插件对于二结构图纸生成及二结构构件的排布往往效率低，例如墙体排砖方面细部做法不贴切现场实际。

项目插件采用解析法（利用编程软件计算砌体皮数及底槎高度），相较于其他插件不再需进行砖块的二次调整。

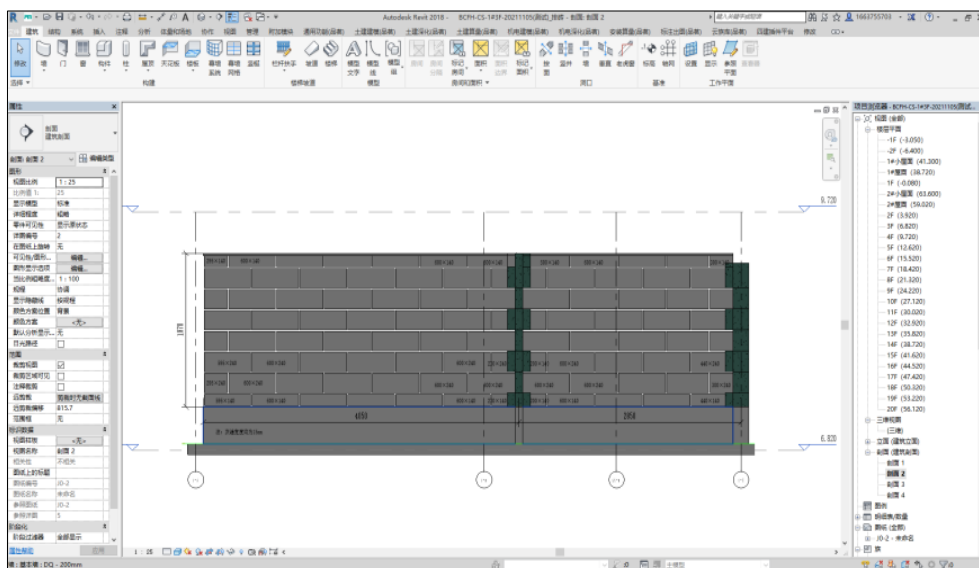


图 3-17 二结构深化插件

3.3.3 大管径主管深化应用

医院空调系统主管管径大且系统复杂，原设计方案将主管放置在 4F 吊顶下南北贯穿，安全性、安装均有隐患。经 BIM 模拟后，重新规划空调水管转换位置，由四层梁下设置调整为五层层流机房屋面设置。确定初步调整方案后，重新布置支墩，联合建筑、结构专业设计复核屋面受力情况。后设计采纳优化方案，进行调整。基于最新的调整方案，计算龙门架类型、尺寸进行预制支架，现场按照模型进行安装。

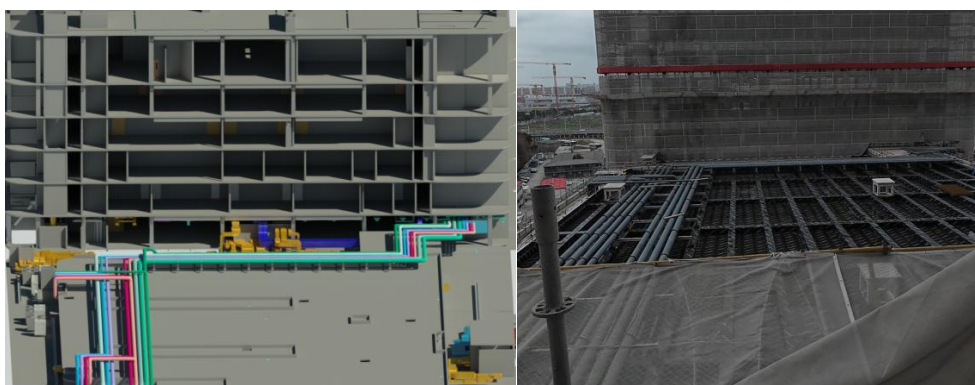


图 3-18 大管径主管模拟与安装

3.3.4 屋面深化应用

病房楼屋面设 7 台风冷热泵、太阳能板、众多管道设备，检修几乎无空间。BIM 模拟提出问题后，应用模型深化，并设置马道方案。图 3-19 为马道模拟方案。



图 3-19 屋面深化应用（马道）

医院屋面需设置超 3000 平方米光伏板，必须在屋面防水施工前确定位置、形式。开办方案尚不确定的情况下，应用 BIM 进行各类方案模拟。根据模拟的结果，将大部分光伏设置于门诊医技楼屋面，选择对后期影响最小的方案进行了屋面施工，且不影响后续架设光伏。

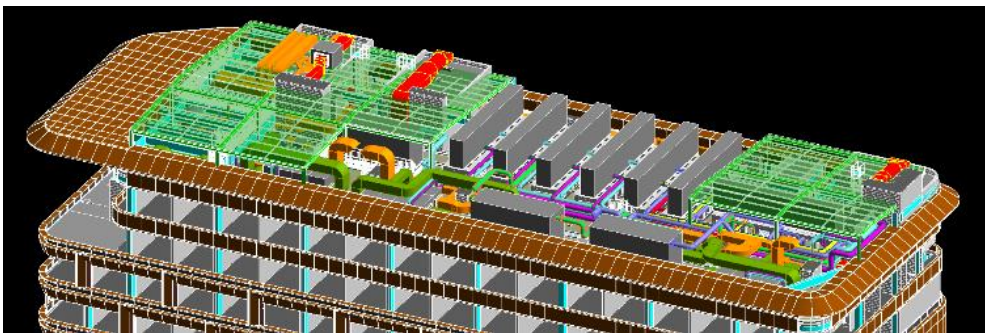


图 3-20 屋面深化应用（光伏）

3.3.5 质子加速器应用——管线精准预埋技术

质子加速器预埋需精准控制，施工压力巨大。首先建立质子治疗室模型，模型内包含钢筋、相关管线、标靶点（用作后期与点云模型的匹配定位）等。现场钢筋（特别是管线周边的钢筋）与管线按照模型定位实施。在封模前，根据加速器模型中的标靶点位置在现场定位并放置标靶点，然后架设仪器进行三维扫描，为扫描完整，需要 3-4 次的移机。将移机扫描的各块点云模型进行合并，形成完整的点云模型。将点云模型载入加速器治疗室模型，根据标靶点进行叠合，并采用 JRC3D 软件计算出平均配准误差，生成扫描报告。机电施工单位根据报告对管线进行现场纠偏，完成后再次进行扫描复核，直至所有管线满足要求，方可封闭模板。

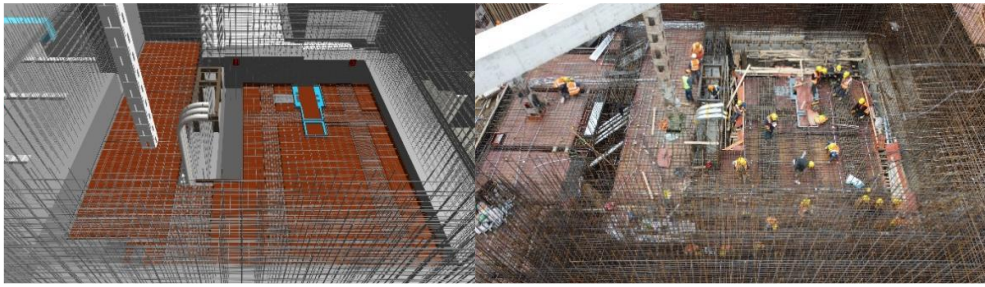


图 3-21 管线精准预埋技术

3.3.6 基于 revit 的屋面、机房设备巡检路线插件

屋面的通行条件较为复杂，存在许多遮挡物。当前屋面机电管综设计多依赖设计师人工检查模型，屋面设计很复杂，设计师检查工作量大且容易出错，把问题留到最终现场。项目总包开发屋面设备检修通道智能检查工具，在深化设计阶段快速发现后期检修问题。导入 BIM 模型后，对屋面检修路线规划。



图 3-22 巡检路线插件

3.3.7 CT 视角下的医院运维：AR 智能透视助手

项目在施工过程考虑后期医院运维阶段的 BIM 应用。经过多次探讨与规划，设计了一套 AR 智能透视助手。旨在医院后期运维时，通过 NFC 即可扫描看到吊顶内管线模型与实景，并查询管线路由与阀门，程序目前开发进行中。



图 3-23 AR 智能透视助手应用路径

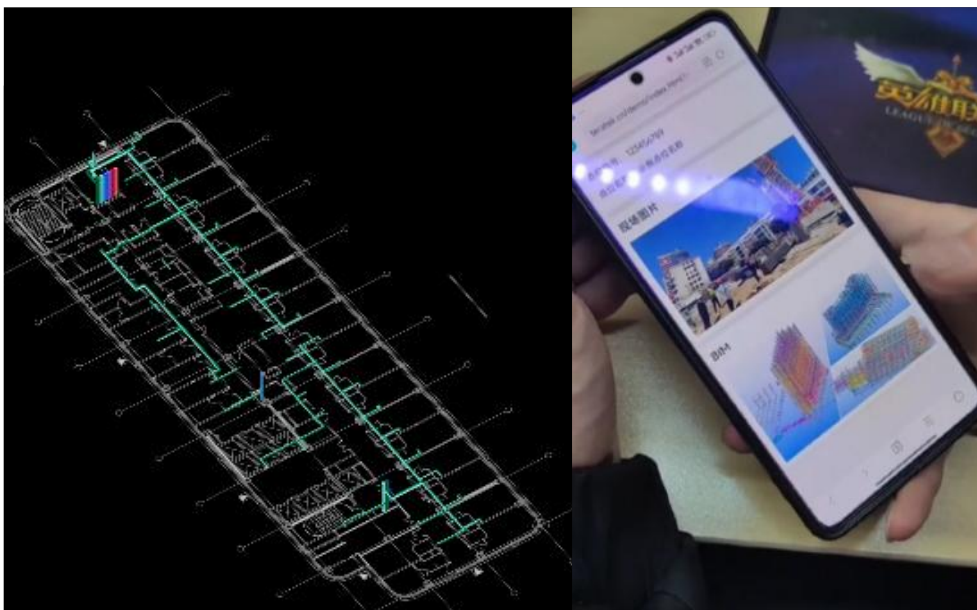


图 3-24 AR 智能透视助手部分界面

4. BIM 技术应用效益及测算方法

4.1 工期节约

(1) 地板深坑深化：节约工期 12 天，每处节约钢筋 120kg，混凝土共计节约 25.48 立方米，钢筋总体节约 2506kg，估算成本节约 11.28 万元。

(2) 基础底板混凝土浇筑：节约工期 12 天。

(3) 结构封顶：节约工期 15 天。

4.2 建立标准 BIM 应用模式

建立了一套标准 BIM 应用模式，各方按其职责参与应用 BIM。建立模型管理细则 1 份，平台应用制度 1 份，BIM 总体工作计划 1 份。形成 BIM 会议纪要 68 份，BIM 工作周报 55 份。

5. BIM 技术应用推广与思考

5.1 基于 OpenBIM 理念的深化应用模板

通过项目应用，建立了一套基于 OpenBIM 理念的室内正向设计应用模板，较之基于 OpenBIM 的数据交换应用更深一层次，将基于 IFC 格式的数据转换用于设计过程，减少设计过程各专业校核及流程中图纸反复修改时间，提高设计效率，并将最终效果在设计阶段进行了展现。

基于 OpenBIM 理念的室内正向设计应用,流程成熟流畅,可值得推广应用。

5.2 建立质子加速器 BIM 应用模板

通过本项目 BIM 应用,建立了一套质子加速器的 BIM 应用模板,对一些不确定因素较多、定位困难的医疗空间,提出了一套解决方案。可通过 BIM 的整体应用,模拟安装定位方案,经论证验证后,再出具定位信息,可减少安装过程的反复,实现管线预埋、设备安装、装饰面层施工等整体流程的精准定位与指导。

5.3 可拓展方向

项目提出并在开发实施的基于 BIM 的 AR 视角智能透视助手小程序,可进一步考虑其实际应用的拓展性,在后续医院的使用中,可拓展开发为医院轻量化三维运维助手,更加高效、便捷地实现运维工作,减少人工查找和审核时间,提高医院日常运维的效率。

七、张园城市更新

（东区 115-06、115-08 地块保护性综合改造）工程

1. 项目概况

张园城市更新（东区 115-06、115-08 地块保护性综合改造工程）项目总投资约人民币 706386 万元（含土地费用）总建筑面积 105173 平方米，其中地上新建建筑约 3588 平方米，地下新建三层地下室共约 72816 平方米，其余均为地上保留保护建筑修缮。张园地区所处的“南京西路两侧高端商业商务聚集带”将致力于打造以高端商业、商务为代表的产业体系。张园综合改造项目有利于保留上海独有的“中西结合”“里弄社区”特点，保存现有的城市肌理和历史风貌，将现代与传统较好的融合，使之成为上海里弄街区的保护更新标杆和上海未来城市更新的名片，并在其他历史风貌区更新中发挥成片、成带的规模效应，成为上海核心区历史文化风貌区有机更新与地下空间综合开发功能提升的新典范。

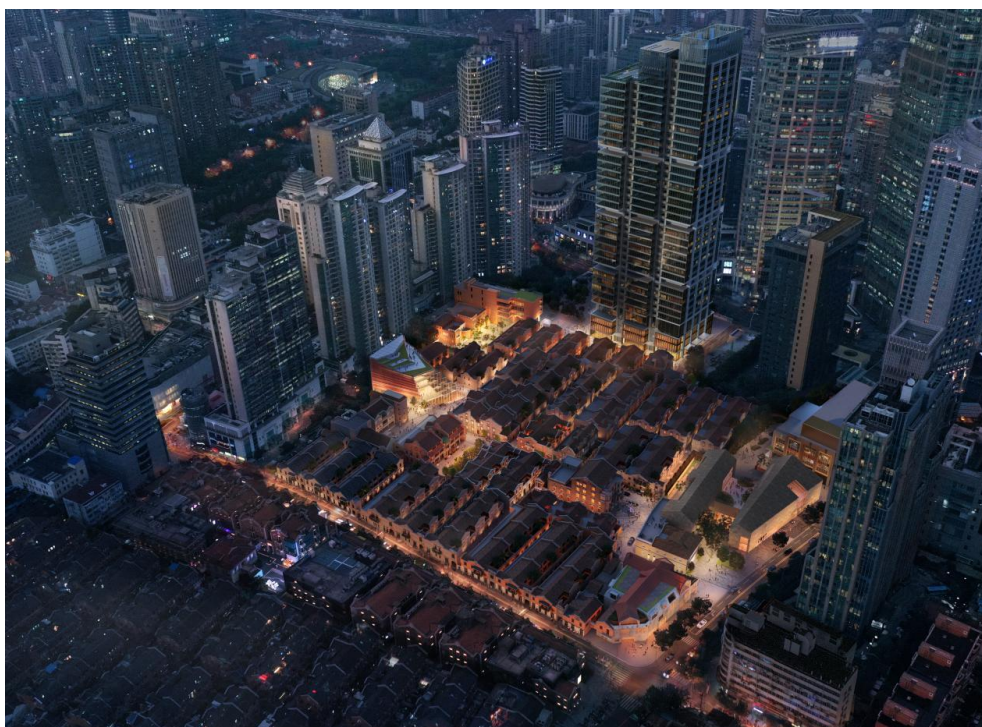


图 1-1 张园城市更新项目效果图

2. BIM 技术应用概况

2.1 应用策略

响应《上海市城市更新条例》中提到的“数字赋能、绿色低碳”等原则，通过数字化的手段，运用物联网、大数据、云计算、GIS 等技术手段搭建与项目有关的全维度数据，辅助张园有机更新，实现各阶段成果数字化交付、可视化质量协控，打造“地下张园、地上张园和线上张园”。

地下张园：扩展地下空间为历史建筑提供巨大的空间资源，实现地铁 2、12、13 号线枢纽型地下换乘。实现平方公里级中心城区历史风貌建筑群的更新及空间格局再生。地上张园：保留上海独有的“中西结合”“里弄社区”特点，整体保护现存石库门里弄建筑群。线上张园：通过数字化辅助历史风貌区有机更新，运用数字技术，能以“今”入“古”，让流转千年的古风古意联通历史和当下，实现社会效益和经济效益相统一。

2.2 组织建设

2.2.1 组织架构

设计单位为：华东建筑设计研究院有限公司、上海建筑设计研究院有限公司、上海明悦建筑设计事务所有限公司、同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司。

施工总包单位：上海建工二建集团有限公司、上海建工一建集团有限公司、上海静安建筑装饰实业股份有限公司。

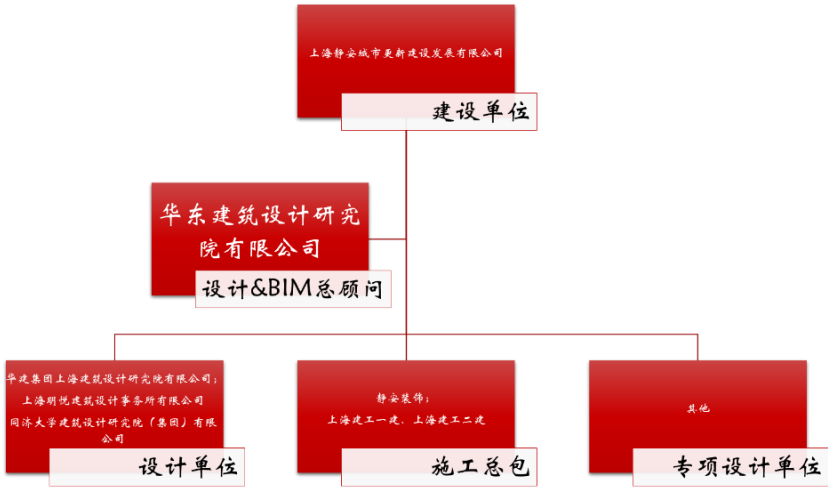


图 2-1 全过程 BIM 组织架构图

2.2.2 BIM 管理体系总体思路

项目 BIM 管理组织采用全生命周期设计方 BIM 总协调方主导实施的模式。BIM 总协调方为由 BIM 咨询顾问团队承担。BIM 总协调方在项目全过程中统筹 BIM 的管理，制定统一的 BIM 实施及技术标准，编制各阶段 BIM 应用计划，组织协调设计单位、施工单位、监理单位以及承包商等参与方实施，审核汇总与组织验收各参与方提交的 BIM 成果，对项目的 BIM 工作进行整体组织、规划、监督、管理与指导。

2.2.3 BIM 应用环境

张园项目作为上海城市更新的重要组成部分，通过 BIM 技术为未来智慧城市建设提供数字化基础。通过 BIM 技术的使用，实现了设计阶段的高效协同工作，确保了设计信息的准确性和完整性，从而提升了设计效率和质量。BIM 技术可帮助实现历史建筑的保护与现代化功能的无缝融合，确保历史遗产得到妥善保存的同时，也能满足现代化使用需求。

3. BIM 技术应用成果与特色

3.1 设计阶段

3.1.1 构件历史保护建筑门窗及专项族库

建立张园历史保护建筑门窗及专项族库，不仅为城市更新中的历史建筑修复和重建提供了重要技术支持，还促进了历史文化遗产的保护和传承。通过数字化手段，可以更高效地保存和利用这些珍贵的建筑元素，为张园的历史风貌保护和可持续发展奠定基础。



图 3-1 全专项族库

3.1.2 历史保护与现代功能的平衡、地下空间复杂度、多专业协同难度

张园项目设计阶段 BIM 方案的核心在于，通过建立高精度、信息化的建筑信息模型，整合历史建筑数字化测绘数据、新建及改造设计信息，重点解决复杂场地下的多专业协同设计、历史风貌保护与结构加固模拟、地下空间与管线综合优化等关键问题，并为后续施工深化、工程量精确统计及未来智慧运维提供统一、精准的数据基础。



图 3-2 BIM 模型统筹

3.1.3 既有建筑“一幢一档”数字化平台

既有建筑数字化底盘：有特色的融合一张图、实景还原和虚拟档案展馆，为智能规划和决策服务。它是将 GIS 作为基础平台，利用先进的信息化技术（包括 BIM、逆向建模、倾斜摄影、云计算等），所打造的企业级建筑信息集成平台。具有三维仿真、多数据源融合、大模型加载、数模分离等特点。

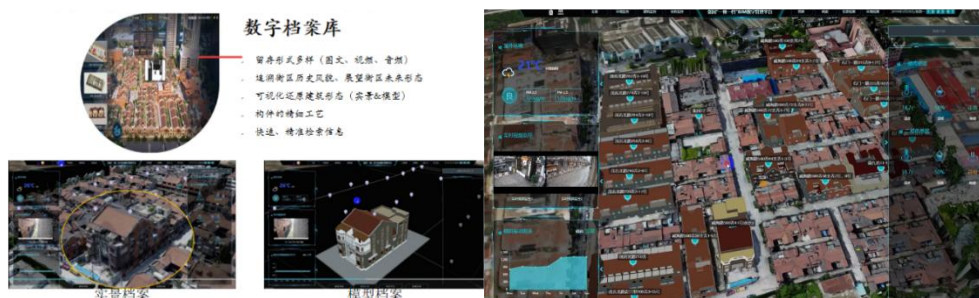


图 3-3 既有建筑数字化平台

4. BIM 技术应用效益与测算方法

将历史文化街区物质、非物质数据进行整合汇总，形成系统性数字资产，便于检索。通过全时动态监测和异常预警，实现对历史文化街区的全生命体征的掌握，对历保街区的运行状态做出实时诊断。

5. BIM 技术应用推广与思考

通过 BIM 技术实现历史建筑的毫米级逆向建模，为“修旧如故”提供数据支撑，可有效降低施工风险并节省成本；其推广面临异形构件建模成本高、传统施工方协同难及文保 BIM 标准缺失等挑战，未来需通过 AI 轻量化建模工具、制定历史建筑 BIM 标准及政策驱动，推动技术向中小文保项目下沉，构建“技术为骨、人文为魂”的可持续保护新模式。

八、北横通道东段工程（热河路东侧—双阳路）

1. 项目概况

北横通道是上海东西走向的第二条大动脉，同时也是上海市内环内“三横三纵”“井”字形通道的重要部分。依照通车目标，将工程划分为西段工程和东段工程。北横通道东段工程西起文安路高架接地点，东至双阳路，全长约 6.88km，地下道路规模为“双向 4 车道+两侧集散车道或停车带”，道路等级为城市主干路，主线设计时速为 60km/h，匝道设计车速为 40km/h。全线共设置 5 座工作井和 3 处出入口匝道，主线采用以盾构隧道为主的非开挖方案实施，隧道直径 15m，由西向东主要下穿轨道交通 10 号线、虹口港、新建路隧道、轨道交通 4 号线、轨道交通 18 号线、杨树浦港和内环高架等构建筑物，是目前穿越中心城区的最大直径双层盾构隧道。

本工程位于城市核心地带，隧道主线、匝道和地面道路等空间形态多样并存，辐射影响面广度深，建设周期长，参建单位多。同时，项目具有急曲线、近穿越、深开挖、多交叉、大跨越等工程难点。面对如此高难度的超大型市政工程，在工程建设中推进技术创新，全线全过程应用 BIM 技术，成功克服了仿真数据传递、曲线隧道中机电建模以及大规模模型交互展示等技术挑战，优化重大节点方案、未建先试、虚拟建造打造先进的数字化管理体系，为行业树立了数字化隧道的典范，并以数字化手段显著提升了城市基础设施的品质。



图 1-1 北横通道东段工程实景图

2. BIM 技术应用概况

2.1 应用策略

2.1.1 设计阶段

（1）方案设计阶段，通过将规划控制线、周边建筑、市政管线与工程本体一并叠合，精确判断设计控制线与用地范围，对隧道用地进行了深入分析并优化了工作井的布局，以确保选址方案的最优化。

（2）初步设计阶段，通过将 BIM 模型嵌入模拟驾驶仪，采集了不同驾驶的行为数据，并进行了科学的分析对比，从而获得关于隧道内行驶安全的真实评价，进一步强化了超长城市隧道的交通安全性。

（3）施工图设计阶段，针对隧道机电安装的痛点问题开展机电 BIM 设计充分发挥 BIM 的“所见即所得，未建先试”的特点，在三维环境开展专业间协调，不断细化管线排布、预留洞口和各类标识等元素，优化了设施布局，使空间更加集约化，提高施工效率和工程质量。

2.1.2 施工阶段

（1）施工进度和质量监控：每周更新进度计划，定期利用无人机、及现场感知设备，动态跟踪施工进度，结合智慧工地各类感知设备监控施工质量和安全。

（2）低影响施工环境监测：在隧道掘进施工中，将盾构机推进的各项参数、周边环境变形、沉降数据及时汇集，发现异常及时处理。智慧工地系统可对施工环境中的温湿度、粉尘浓度、噪音等数据进行实时采集，降低施工队环境影响。

（3）施工现场可视化管理：采集不同区段的视频影像数据，并在三维空间中定位，对现场进行可视化管理，提高施工管理效率。

2.1.3 运维阶段

（1）建立隧道全生命周期数据库：融合了隧道的设计、施工和未来运行维护数据，开展数字化竣工交付，为隧道运营提供了稳固的数字孪生基础。

（2）数据集成与预警：收集历史数据和实时监控数据指标，系统能够预测设备的状态，提前预警可能的风险、提前做出应对措施。

2.2 组织建设

2.2.1 组织架构

本工程采用业主主导、专业咨询、各方参与的定位模式，由 1 家 BIM 咨询单位承担数字化管理平台建设和咨询服务，3 家设计院承担各标段 BIM 设计工作，2 家施工总承包单位在继承设计阶段 BIM 成果基础上开展施工阶段 BIM 技术应用。同时，运维单位提前介入，业主各部门根据职责划分指导相应 BIM 工作的开展。

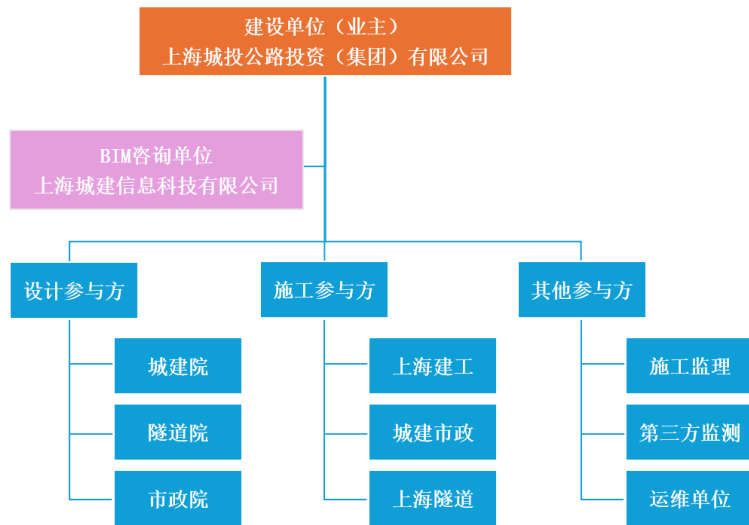


图 2-1 项目组织架构图

2.2.2 BIM 管理体系总体思路

在项目开展之初，由建设方牵头编制一系列 BIM 实施标准，实现各参建方在同一套标准体系基础上进行数据共享集成、协同交互。构建统一数字管理平台，协助工程建设的质量、进度、安全和投资管理，提升本工程精细化管理水平。

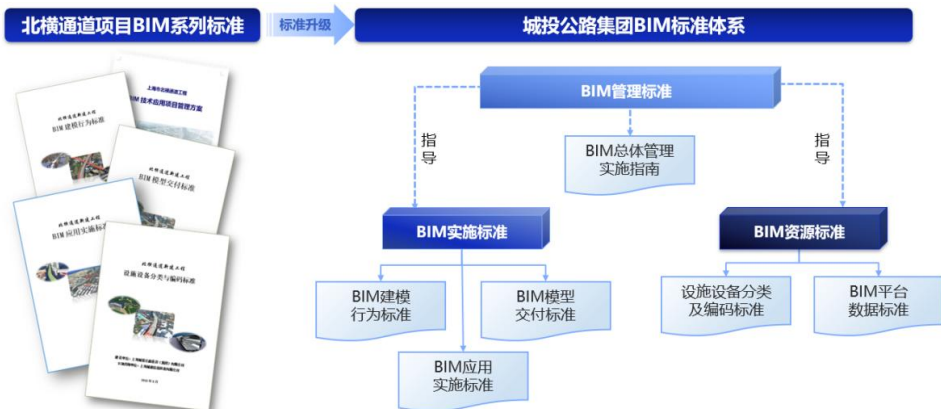


图 2-2 企业级 BIM 标准

通过三维设计方案比选，三维协同设计、三维交通模拟、可视化设计交底、数字化施工管理、数字化竣工移交、智慧化运营管理的 BIM 技术应用路线，逐级递进，分阶段完成 BIM 技术应用目标。

2.2.3 BIM 应用环境

（1）软件配置

从全生命期应用的角度考虑，本项目所选 BIM 软件需要满足建设各参与方各阶段工程应用需求，且参与方具有熟练应用的能力，在项目实施过程中能将各阶段模型及信息高效的传递。北横通道工程结构类型多、涉及专业广，通过对主流 BIM 应用软件调研分析，根据不同专业特点和应用需求，选择多种 BIM 软件进行组合使用的技术路线。项目模型主要以.rvt，.fbx 格式进行协调和共享。

本项目各参与方所使用的软件配置见下表。

表 2-1 软件配置

建模软件	应用软件
Autodesk Revit AutoCAD Civil 3D Autodesk Inventor CATIA 3dsMAX AutoCAD 路立得	Autodesk Navisworks BIM 协同管理平台 (自主研发)

（2）硬件配置

本项目各参与方所需的硬件配置见下表。

表 2-2 硬件配置

序号	硬件部署	业主单位	咨询单位	设计参与方	施工参与方	其他参与方
1	一级平台服务器（核心服务器）	●				
2	二级平台服务器		●	●	●	●
3	网络存储器	●	●	○	○	○
4	工作台式机	●	●	●	●	●
5	移动工作站	●	●	●	●	●
6	移动设备	●	●	○	○	○
7	无人机设备	○	●	●	●	●

注：表中“●”表示必备硬件部署，“○”表示可选硬件部署。

3. BIM 技术应用成果与特色

3.1 设计阶段

3.1.1 因地制宜，确定“最优方案”

隧道沿线环境控制因素众多且复杂，运用 BIM 技术将周边建筑、市政管线，规划红线等控制因素准确反映在模型中，精确判断设计控制线与用地范围。

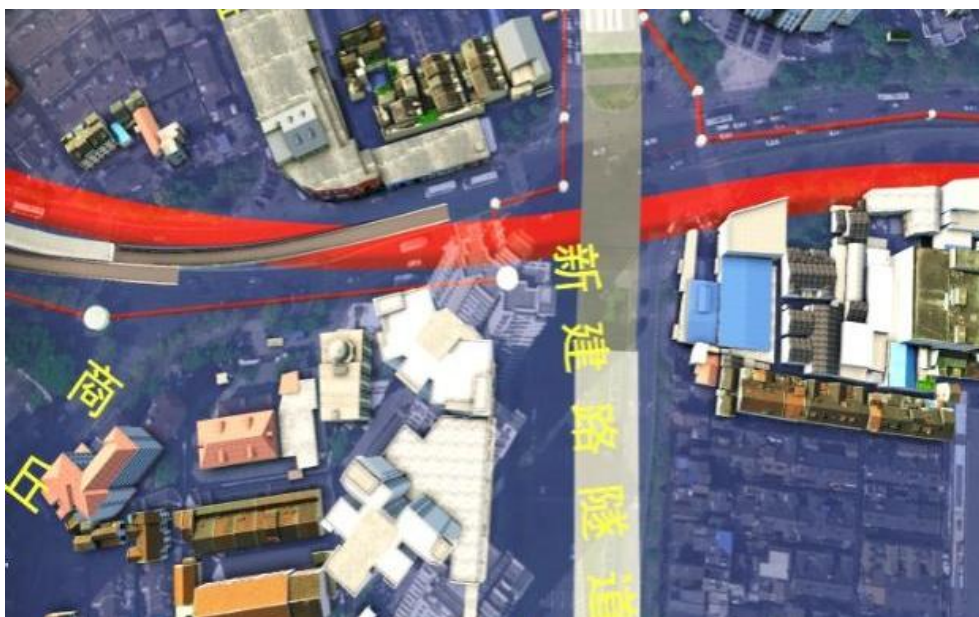


图 3-1 隧道用地分析

在工作井选址论证中，为减少对周边小区影响，提高容错能力，借助 BIM 技术优化工作井选址方案，高效全面地展示方案各个细节，辅助方案优化与稳定，以确保选址方案的最优化。

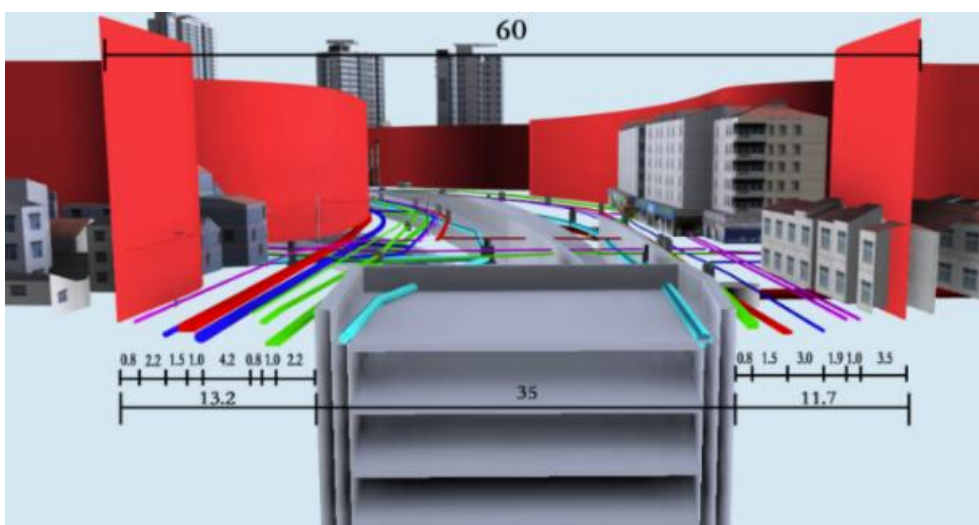


图 3-2 优化工作井布置

3.1.2 仿真评价，塑造“舒适体验”

通过隧道内部的漫游体验和驾驶仿真模拟，让设计人员和决策者能够在建设之前对隧道进行全面的可视化预览。将 BIM 模型嵌入模拟驾驶仪，采集不同驾驶者的行为数据，并进行了科学的分析对比，从而获得了关于隧道内行驶安全性的真实评价。这一科学论证进一步强化了超长城市隧道的交通安全性。



图 3-3 驾驶仿真模拟

3.1.3 机电正向设计，避免“错漏碰缺”

北横东段隧道对机电要求高，周期紧张。借助数字化手段，对隧道工作井、盾构隧道及匝道开展机电 BIM 设计，在三维环境中开展专业间协调，充分发挥 BIM 的“所见即所得，先行先试”的特点，对隧道机电整体品质提升提供技术支撑。

BIM 正向设计内容包括：土建模型全线完整体现结构纵坡；土建预留洞口通过模型进行核查，减少错漏发生；设计阶段对机电管线进行碰撞检查与调整，使管线走向更合理；借助 BIM 模型模拟了桥架及电缆敷设，优化电缆走向，降低桥架占积率；在 BIM 模型中对箱柜、逃生口包覆进行优化，确保样式的一致性；要求设备厂商提供 BIM 模型并整合到竣工模型中。

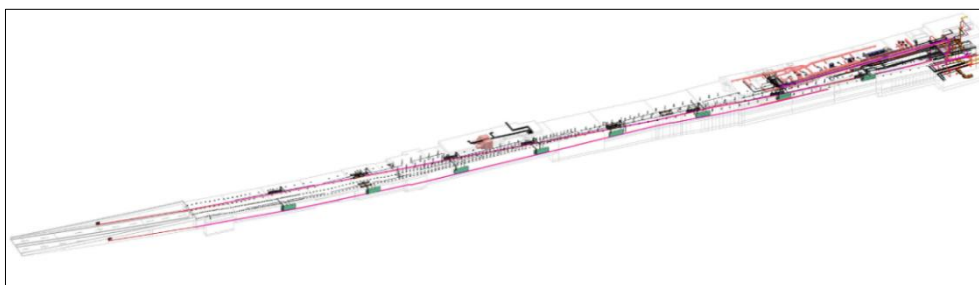


图 3-4 隧道机电 BIM 正向设计

对于特大型城市隧道完整的机电 BIM 正向设计在市政行业尚无先例，尤其

是电缆建模一直是机电 BIM 的难点与痛点。设计团队通过技术攻关，对电缆建模与表达方式进行了升级，通过 BIM 建模发现电缆设计中电缆较密集的问题，及时优化设计，使电缆更经济更合理。

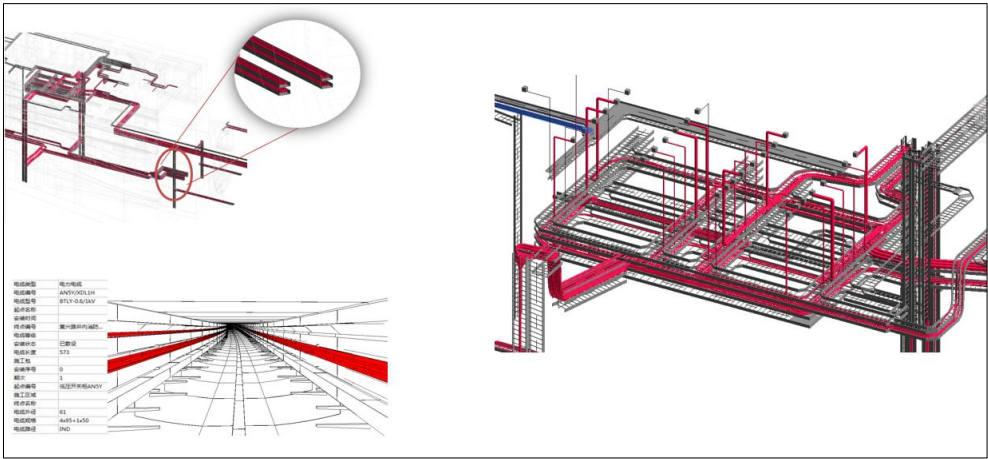


图 3-5 隧道电气 BIM 模型

3.1.4 未建先视，全面 BIM 推演

在东段隧道的设计基础上，进一步优化了结构、机电和内部装饰的统筹规划。通过跨专业的集成，实现了不同工程领域的协同工作，提高了施工效率和工程质量。通过不断细化预留洞口、电缆排布以及各类标识等元素，优化了设施布局，使空间更加集约化，并有效加速了工程进度。

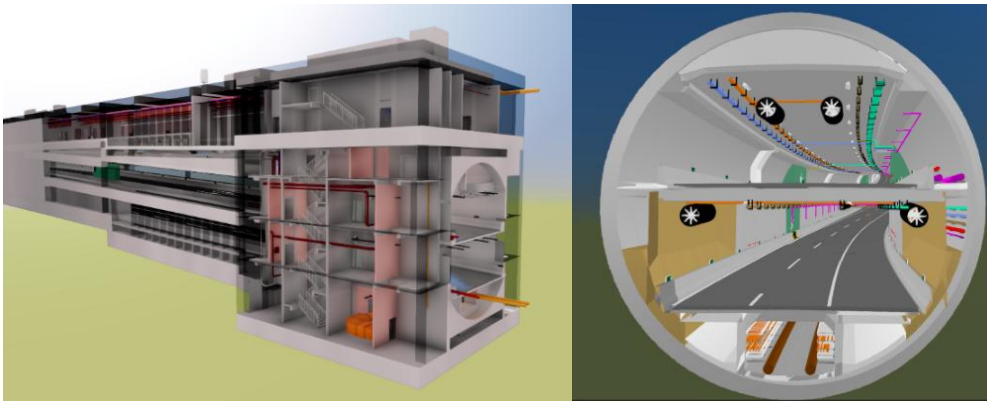


图 3-6 工作井及盾构段各专业集成

设计汇报时，直接基于模型浏览，全方位感受隧道建成后的样子，这对于方案比选、方案优化、方案决策提供了很好的支撑，能节约中间过程的沟通成本。



图 3-7 隧道内部漫游

3.2 施工阶段

以新型智慧建造理念为指引，坚持 BIM 模型为根本，用信息化平台为手段，施工应用为主线，务实落地为重点的原则；实现数据协同共享、提升精细化管理、节约施工成本、提高工程品质等目标。

3.2.1 施工场地布置

本项目施工场地位于中心主城区，附近建筑密集导致施工可用场地小，材料堆放区、材料加工区、临时设施及大型设备施工车辆进出管理等布置方面困难。通过创建场布模型，合理划分工作区域，提高场地利用率。



图 3-8 施工场布模型

3.2.2 施工阶段模型拆分

告别传统 CAD 绘制分区图，采用 BIM 模型进行分区排布，根据施工流水段对模型中的施工部位进行编码，每个分部位置都有对应、更优判断分区施工合理性、有利于施工计划。



图 3-9 施工模型拆分及编码

3.2.3 辅助关键节点盾构掘进

本项目盾构需穿越多个关键节点，包括侧穿历史保护建筑物虹口大楼、下穿虹口港桥、下穿新建路隧道、下穿地铁 10 号线等。通过建立 BIM 模型，整合地质信息、监测数据、盾构掘进参数、生产进度等信息，辅助盾构过境、风险处置方案制定，保障了盾构稳定掘进。

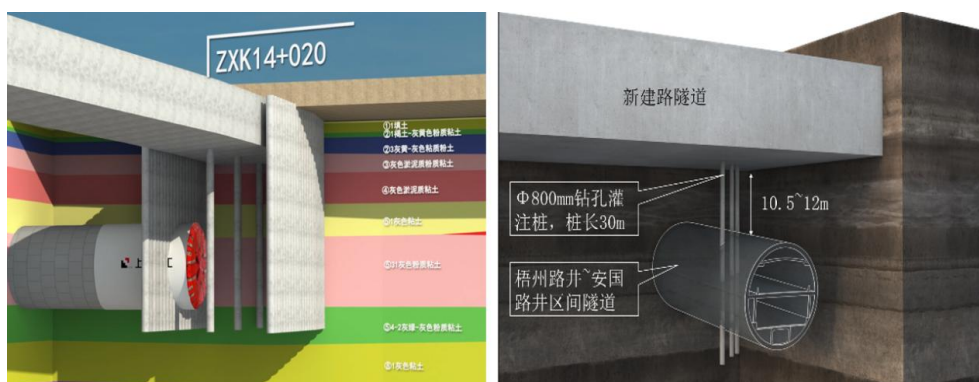


图 3-10 盾构掘进前拔桩方案制定

3.2.4 盾构管片全生命周期跟踪

施工过程中对盾构管片的生产和现场施工工序进行跟踪，每道工序分别上传对应资料，实现管片全生命周期跟踪，做到历史留痕，有证可查。通过 BIM 协同管理平台可直观查看当前管片当前的生产和施工状态，点击构件信息可查看每一管片的生产加工信息。

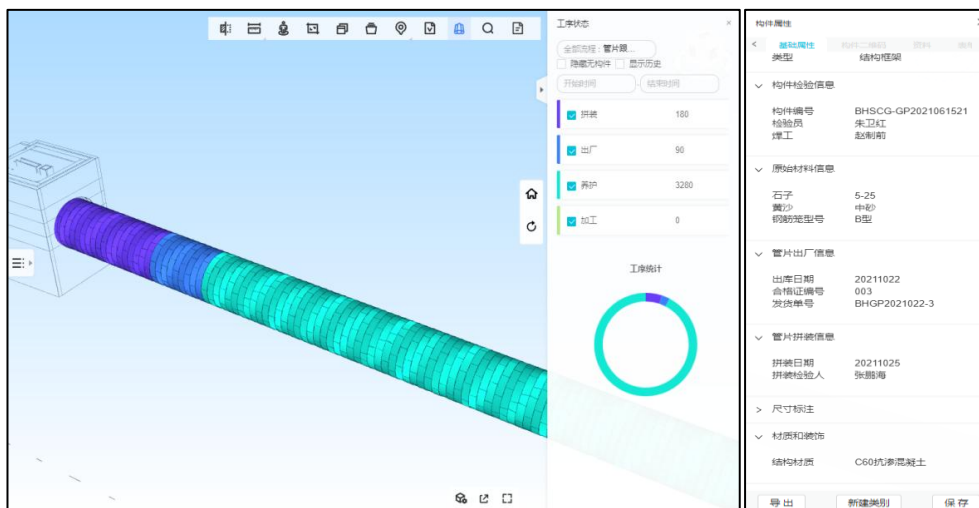


图 3-11 盾构管片信息查询

3.3.5 沉降监测

建立周边环境模型，将监控测点标注到真实位置。运用多种设备对其检测、地表沉降与变形等进行实时监测，生成偏差分析报告。保证施工的安全和周边建（构）筑物的稳定。

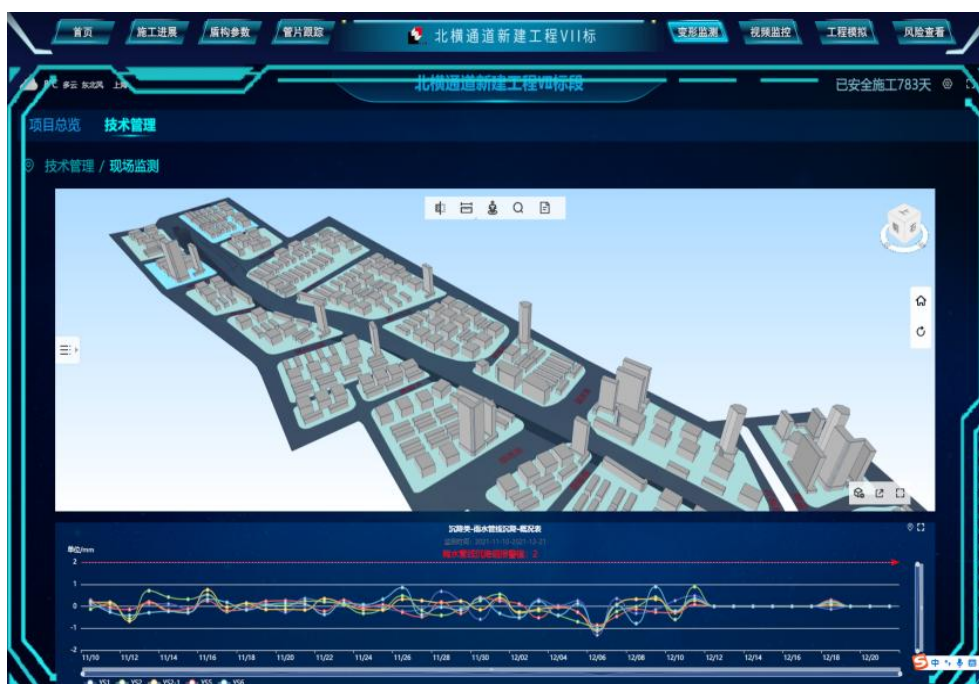


图 3-12 沉降监测

3.3 运维阶段

在施工 BIM 模型基础上，结合现场实际完工状态，深化形成竣工 BIM 模型，交付运维单位。模型材质贴近现场实际，补充了标识标线，标牌指示牌模型。



图 3-13 隧道竣工模型与实景对比

结合现场实际完工状态，深化形成竣工 BIM 模型，竣工模型中的设施设备模型均进行拆分并编码，数量与运维清单保持一致，位置与现场基本保持一致。运维人员可以通过设备名称、编码、模型实体查询与此设备关联的所有设计信息、材料信息、施工过程关键信息和竣工验收信息。



图 3-14 设备竣工模型与实景对比

3.4 BIM 全生命周期协同管理平台

本项目构建了 BIM 全生命周期协同管理平台，打造统一数据仓库，实现项目“规、建、运”全过程的动态监管。通过该平台，可提前识别规划冲突区域，有效降低工程建设中的安全和质量风险，并为日常维护和应急处置提供支持，大幅提高沟通与管理效率。



图 3-15 BIM 全生命周期协同管理平台系统框架

3.4.1 功能介绍

(1) 规划方案比选

将多个方案模型集成到平台中，可视化比较方案之间的异同和优劣，提高方案比选的直观程度，提高沟通效率；相较于传统的 PPT 和 CAD 汇报，这种三维可视化汇报方式大大提高了工程方案的总体沟通效率和准确率。

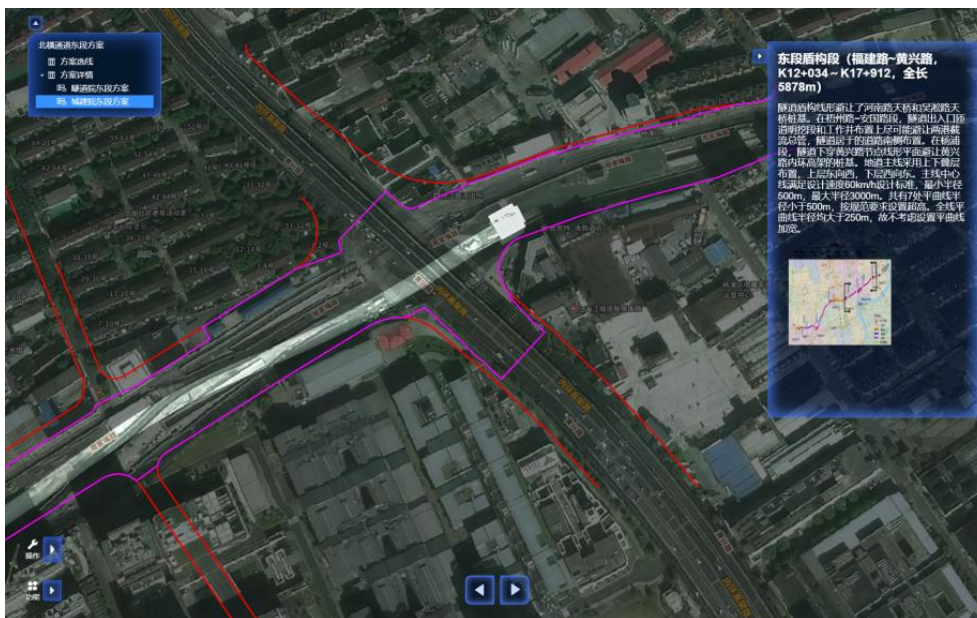


图 3-16 规划方案比选

(2) 图纸管理

将工程所有图纸按出图计划实时上传到平台中，实现了施工图出图全过程透明化管理，有效管控出图进度，杜绝图纸版本混乱等问题。

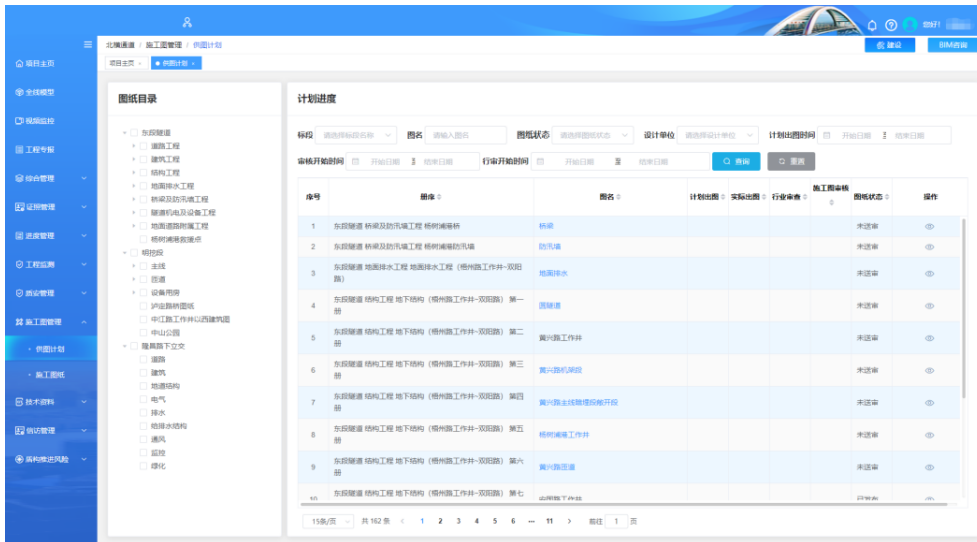


图 3-17 图纸管理

(3) 进度投资一体化管理

将 WBS 与 BIM 模型相关联，实现直观掌控实际进度，对计划进行跟踪，分析。根据实际进度的申报，追溯工程建设过程。从投资产值角度检验进度计划的预期履行达标程度，实现产值的实时统计和趋势预测。

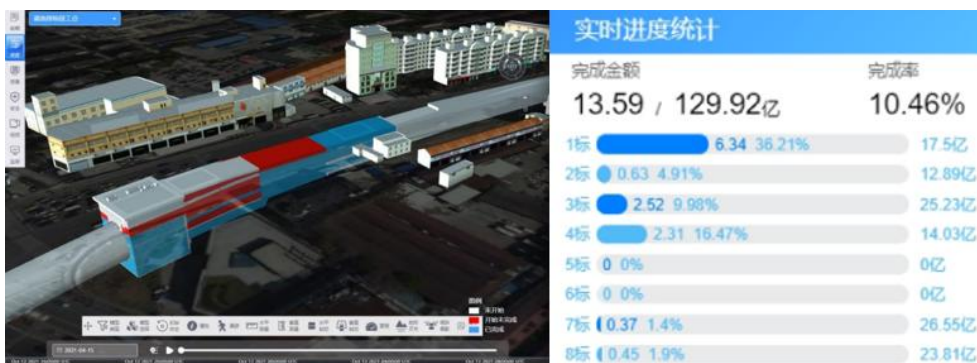


图 3-18 进度投资一体化管理

(4) 进度风险一体化管理

基于 BIM 模型，根据盾构掘进进度，自动、实时展示当前风险源位置。根据监测曲线可视化分析沉降趋势，异常时立即报警并提供应急预案。



图 3-19 进度风险一体化管理

(5) 数字资产管理

形成一整套以运营为导向的数字资产，通过平台打包数据的形式进行移交，实现工程实体和数字孪生体同步移交。

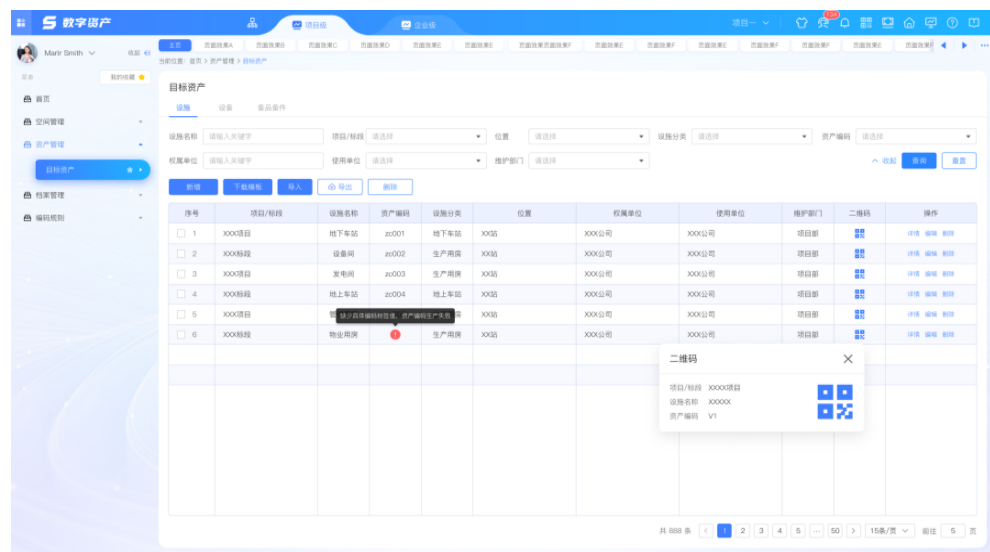


图 3-20 数字资产管理

(6) 运维管理

提供实时的现场数据和视频信息，指导应急措施的实施。模拟在发生火灾和事故时的应急疏散和救援过程，检验方案合理性，为实际操作提供依据。

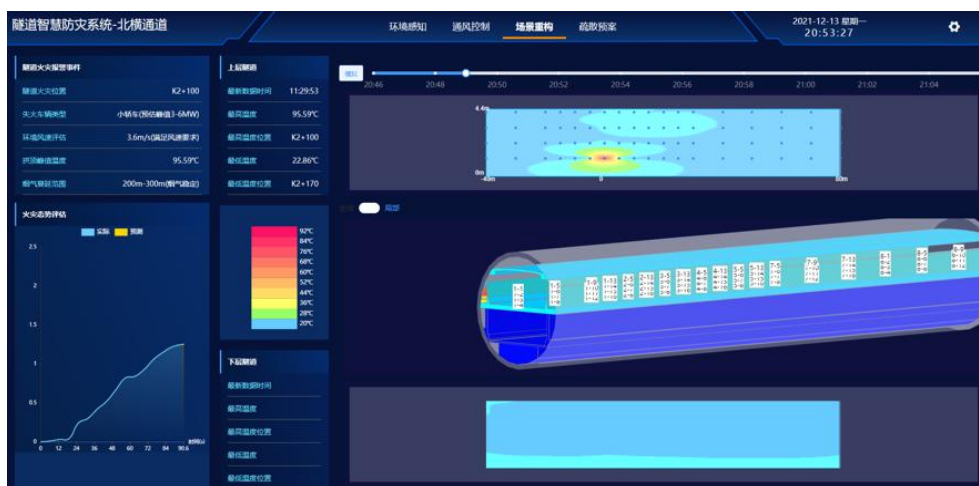


图 3-21 应急处置

3.4.2 技术创新

平台基于统一数据仓库，实现跨阶段、跨组织、跨专业信息共享和交互，服务工程全生命期的管理业务，较传统管理方式至少提升 20%以上管理效率，为城市道路工程带来管理创新。

(1) 多源异构数据融合

通过模型减面、模型复用、平滑组优化、分层分块加载与渲染、场景剔除、内存优化等方式，成功攻克了特长特大道路多源异构数据的融合难题，实现了数据压缩率超过 75%、模型加载速度超过 4M/s、毫米级精度转换以及二三维数据的自动拼接。

(2) 应急感知与联动处置

构建 Pattern 库及预测模型，进行多源聚合和融合分析，精准定位异常事件和车辆实时位置，识别车辆危险驾驶行为，实现车辆连续轨迹追踪及微观异常驾驶行为研判，支持自动生成 200 多种应急预案，三十三类、数千个设备的集中实时管控，联动控制小于 3s。

() 标准构建与实施

平台构建了完善的 BIM 实施标准体系，统一了全周期数据传递流程，并首次在特大型城市道路工程中实现了数字资产的同步移交。

4. BIM 技术应用效益与测算方法

北横通道工程作为上海市重大工程，尝试打造了一套数字化建设管理体系，

形成的 BIM 实施标准、管理制度和工程信息化实施经验。

通过数字化实践，在隧道设计中因地制宜，未建先视，全面 BIM 推演。在立交改造设计过程中优化设计 20 余处，缩短设计周期 30 余天。利用 BIM 技术提前发现图纸错误并及时纠正，通过三维动画等方式对重难点进行 BIM 汇报，显著提升沟通协调效率。

通过施工模拟和各项深化设计提出 120 余项优化建议，BIM 指导管线搬迁、预制构件加工安装等施工效果显著，土建工期缩短工期 40 天，累计节约成本约 800 万元。

研发针对特大型城市道路工程的基于 BIM 全生命周期协同管理平台，基于统一数据仓库，实现了跨阶段、跨组织、跨专业信息共享和交互，较传统管理方式提升了 20%以上管理效率。

通过发掘 BIM 技术在市政工程中的特有价值，为超大隧道工程建设提供了可复制、可推广的示范基础，以及管理创新的理念，为上海智慧城市建设贡献力量。

5. BIM 技术应用推广与思考

对于城市超大隧道工程建设而言，一套良好的数字化管理体系是开展数字化管理的基础，为超大隧道的建设提供可靠的技术支持、优化并规范过程管控、提升协同效率、辅助决策和创新、增强用户体验等方面提供技术保障。

对于企业而言，数字化体系建设不只是技术层面的升级，更是战略层面的关键举措，推动企业从传统模式向数字化管理模式化转型，对提升企业的竞争力、稳固市场地位有深远影响和很好的发展前景。

未来随着人工智能、大数据等技术的不断更新，超大隧道的设管理必定朝着更集约、更智能、更综合的方向发展。更先进的技术手段将促进管理体系的不断升级，为隧道全生命周期精细化管理提供保障，实现“智慧隧道”的目标。

九、漕宝路快速路新建工程施工阶段 BIM 应用

1. 项目概况

漕宝路快速路新建工程位于虹桥商务区南侧，是虹桥枢纽外围“一纵三横”快速集散系统的“南横通道”的重要组成。工程西起松江区嘉闵高架，经闵行区东止徐汇区桂平路，全长 7.18 公里。工程范畴含嘉闵立交节点、漕宝路地道、S20 立交节点、漕宝路高架、中环立交及漕宝路地面道路。整个项目分成三个标段，工程总投资约 95 亿元。

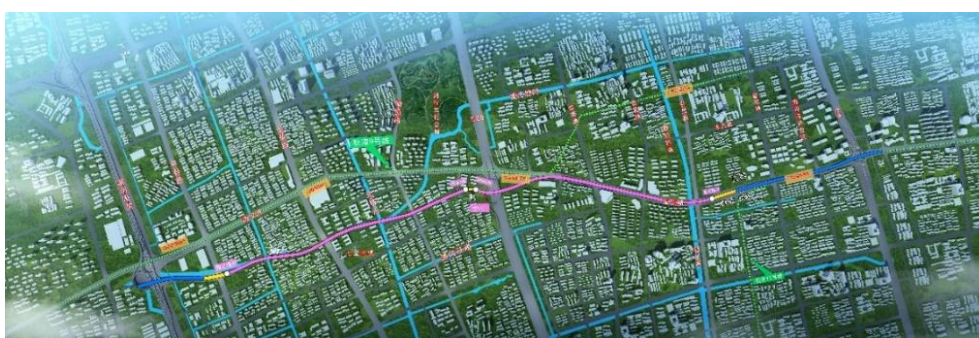


图 1-1 漕宝路快速路项目整体线路图

嘉闵立交节点主线桥梁跨越既有沪昆高铁、沪昆铁路节点，为主线 CBS、CBX 与 EN、NE、SE 等 3 条匝道的合流区域，与铁路夹角为 79° 。为全线控制性工程之一，采用异形钢箱梁整幅转体方案，桥梁设计为 95m+95mT 构钢箱梁，自东向西依次跨越机场联络线（在建）、沪昆高铁、沪昆铁路、及改线沪昆铁路（在建）7 条铁路。



图 1-2 漕宝路快速路新建工程 1 标嘉闵立交节点效果图

主线隧道盾构段分东、西两段，采用单孔双层形式，均为双向六车道，盾构段总长约 4.2 公里。盾构段自东向西共设置 4 座工作井，分别为合川路工作井、外环 2#工作井、外环 1#工作井、蒲汇塘工作井，其中合川路井至外环 2#井为东段隧道，长 2014 米。外环 1#井至蒲汇塘井为西段隧道，长 2190 米。盾构于合川路工作井始发，自东向西推进至外环 2#工作井接收，实现东段隧道贯通后拆解，转运至外环 1#工作井安装后二次始发，自东向西推进至蒲汇塘工作井接收，实现西段隧道贯通，至此，本工程完成全线隧道贯通。



图 1-3 漕宝路快速路新建工程 2 标地道效果图

中环立交节点包括 1.37km 主线高架段（万源路—桂果路），中环立交 4 根匝道（WS、WN、SW、NW），0.9km 中环线拼宽（东兰路—古龙路），4km 漕宝路（S20—桂平路）地面道路拓宽。



图 1-4 漕宝路快速路新建工程 3 标中环立交效果图

2. BIM 技术应用概况

2.1 应用策略

本项目聚焦工程施工周期内多维重难点，通过多源异构数据融合，以三维可视化手段为项目提供一个多方协同的工作环境，并在此基础上进行管线搬迁、交通导改、施工方案可行性研究、方案比选、现场安全施工数据测算以及专项施工方案技术交底等价值应用，提升沟通效率。并在此基础上以 BIM 模型作为承载信息数据的载体，结合 GIS 底图、倾斜摄影数据，为项目搭建一个“虚实结合”的数据环境，结合物联网、AI 算法分析等技术手段，实时采集施工现场结构应力应变数据，实现安全风险实时预警、风险解决的闭环处理。

2.2 组织建设

2.2.1 组织架构

本项目由建设单位牵头统筹全局，BIM 咨询单位主导项目实施工作，其下分设 BIM 项目实施与信息化平台研发两大业务板块。BIM 项目实施由项目负责人总体把关，技术负责人提供技术支持，BIM 技术人员与动画工程师具体执行，确保 BIM 技术在项目中的精准应用与成果展示；信息化平台研发则由研发总监领衔，研发经理与产品经理协同配合，带领研发人员构建高效稳定的信息化平台，为项目管理提供数字化支撑。

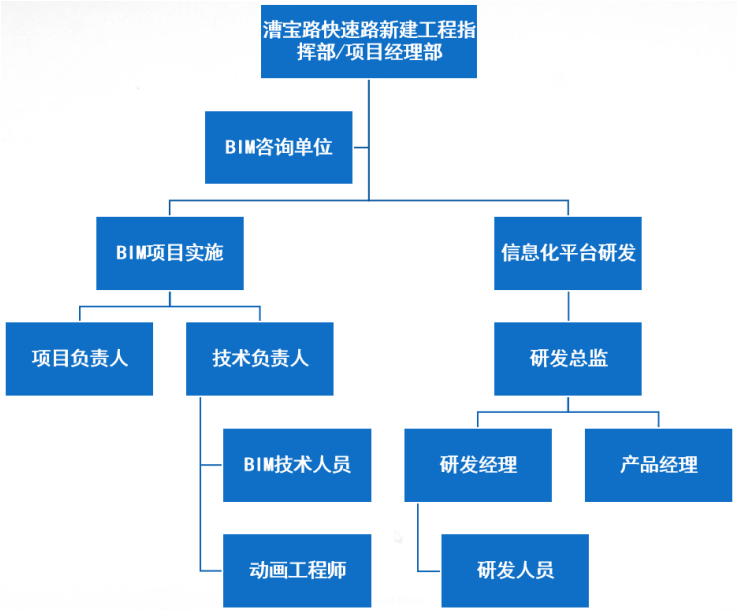


图 2-1 项目组织架构图

2.2.2 BIM 管理体系总体思路

为使得 BIM 数据最大化的价值传递，更好的服务项目安全生产，提升项目沟通效率，节约项目施工工期，减少返工及资源浪费，在项目前期，针对项目重难点策划对项目有价值的应用点，编制《漕宝路快速路新建工程 BIM 实施策划方案》，明确项目服务内容及服务目标，确保 BIM 技术实际落地于项目生产。同时编制《BIM 建模行为标准》，强化 BIM 建模过程的系统性和规范性，从文件命名、系统划分、专业划分、工作集、链接规则等多维度进行约束，实现 BIM 数据的标准化生产及 BIM 数据的价值传递。

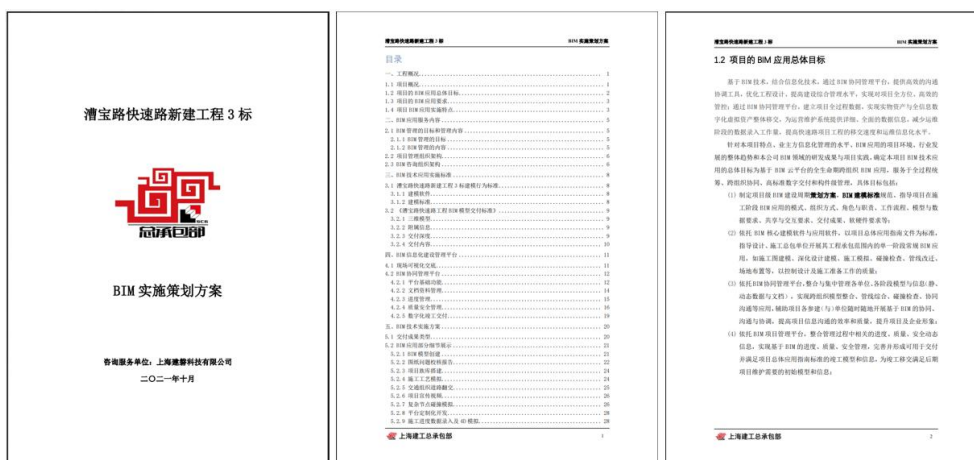


图 2-2 BIM 实施策划方案



图 2-3 BIM 建模行为标准

2.2.3 BIM 应用环境

本项目积极响应我国政府信创要求，在平台应用端自主开发了一款基于 BIM 的开放式数据集成与共享协同管理平台，该平台面向建筑业各领域政府主管部门、业主、咨询单位、设计院及施工单位等用户，为其创造一个全面整合项目各版本

模型、建设期静态数据、文档档案资料及影像资料的共享协同环境，并在此环境下开展可视化讨论、三维形象进度及数字化交付等基本应用，也可基于云平台提供本地化及二次开发实现扩展的功能需求。

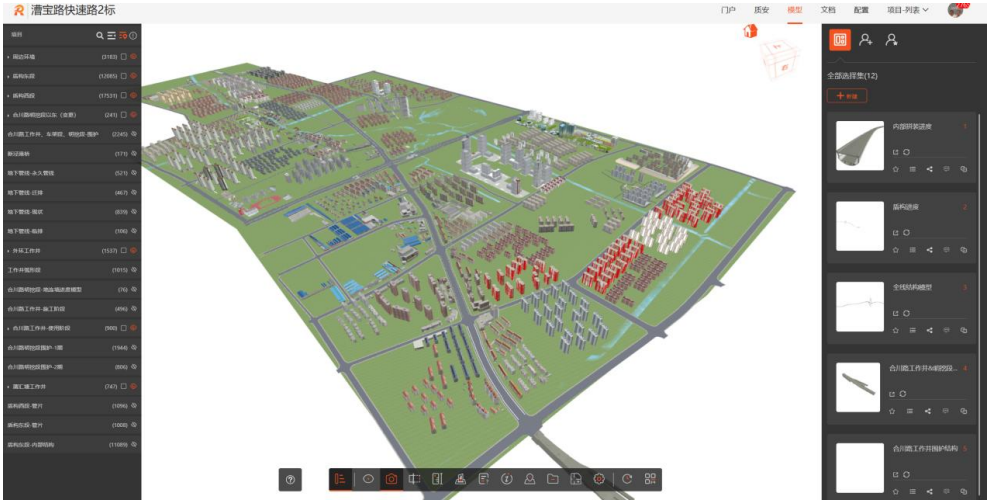


图 2-4 BIM 协同管理平台

3. BIM 技术应用成果与特色

3.1 模型创建

编写基于 Dynamo 的可视化编程建模程序包，将图纸中的特征数据整合进入 Excel 表格中，通过“节点—连线”的图形化界面将设计逻辑转化为可执行的算法流，将设计意图转化为可计算的几何与数据关系，使 BIM 建模技术从“图形驱动”向“数据驱动”的范式转变。通过数据驱动几何生成，建立了参数关联体系，使模型具备响应性，提升整体建模精确度及效率。

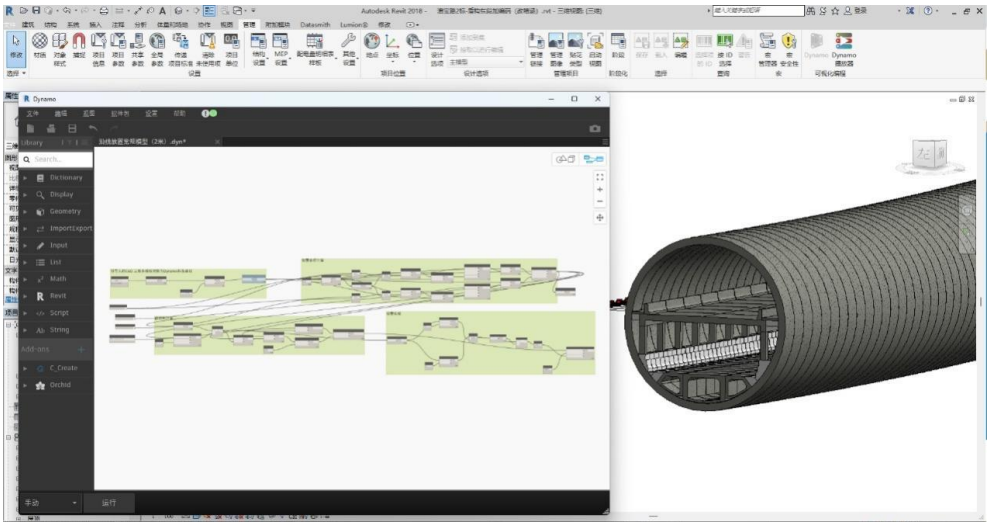


图 3-1 Dynamo 可视化编程程序

3.2 基于 BIM 模型的应用

3.2.1 地下管线搬迁

在项目管线搬迁前期，利用物探图对现状管线进行建模，同时将拟建建构物与现状地下管线进行合模处理，将合模成果用于现场管线搬迁方案讨论，实现了从传统经验驱动到数据驱动的智能化升级，提升沟通效率。搬迁前的管线排布通过三维可视化建模清晰呈现错综复杂的空间关系，精准定位碰撞点与施工难点，使隐蔽工程透明化；这一过程不仅将传统“试错式”搬迁转变为“预见式”改造，更以数字纽带串联起规划、施工、运维多方主体，使工程决策始终建立在全要素、全周期的科学分析基础上，实现管线搬迁方案确定性成效。

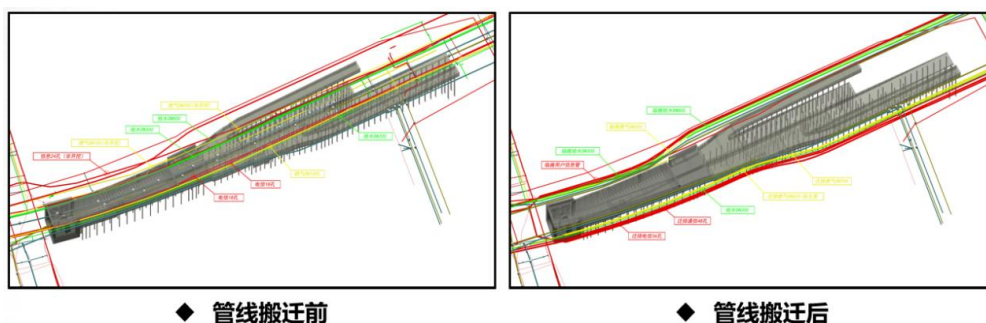


图 3-2 合川路工作井管线搬迁前后方案对比

3.2.2 道路翻交模拟汇报

在本项目中，通过 BIM 技术以三维可视化、动态模拟与数据协同的核心优势，彻底改变了传统二维图纸汇报的局限性，为交管部门提供了更高效、更直观的决策支持。通过 BIM 模型构建翻交方案中的交通导改路径、施工围挡范围、车道压缩影响等关键要素得以动态呈现，使交管部门能够全方位审视不同阶段的交通组织逻辑，精准评估施工对路网通行效率的影响。通过车流模拟数据量化评估绕行方案的合理性，这种“所见即所得”的沟通方式大幅降低了专业壁垒，为施工期间的动态交通管理提供了精准的数字底板，真正实现了从“被动应对”到“主动预控”的治理升级，提升汇报及协作效率。

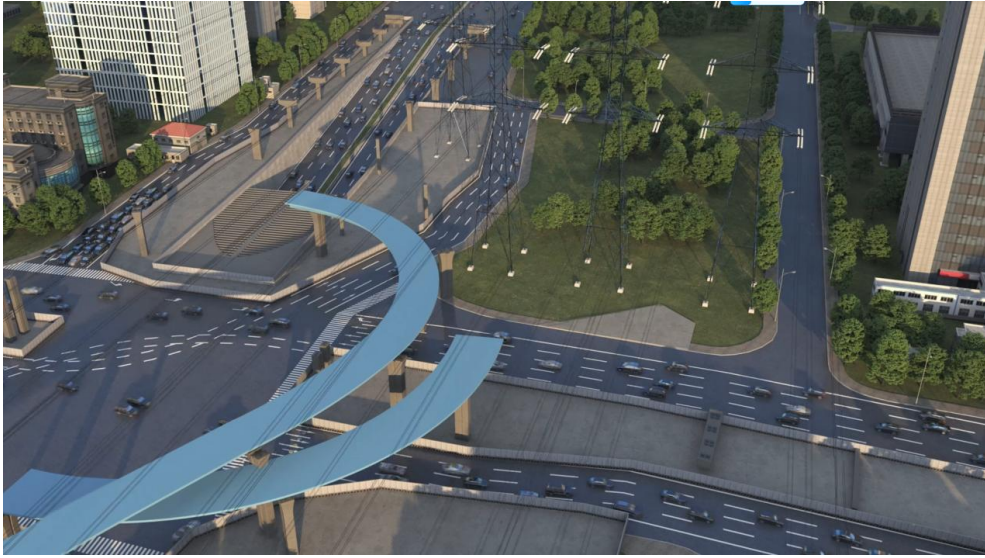


图 3-5 受限空间下吊装方案仿真模拟

3.2.5 BIM+GIS+倾斜摄影数据融合

外环区域周边环境复杂，“下穿上跨”是该项目的施工重难点，利用无人机扫描生成倾斜摄影数据，对现场环境进行最大程度的还原，叠加 BIM 模型、GIS 地理信息系统数据，可以直观看到新建工程与周边复杂环境的位置关系，解决工程建造过程中由于周边环境受限、边界条件不足等多重问题，解决工程建造过程中现实到虚拟的数字孪生问题，为实现建造过程的数字化、工业化、绿色化做出有益的探索和研究。



图 3-6 BIM+GIS+倾斜摄影数据融合

3.2.6 施工安全数据测算

本工程盾构直径 15.56m，属于超大直径盾构，隧道平面最小曲率半径为

R=500m，最大纵坡约 5%，盾构埋深从 9.8m 浅覆土至最大埋深 35m，穿越土层从④号土到⑦号土，土体性状差异巨大。在如此复杂的地层条件下，超大直径盾构要进行平面和纵断面的急曲线掘进，隧道轴线控制难度极大，管片易出现较大位移，进而发生上层车道板搭接长度不够、错台等现象，对隧道安全及行车安全带来影响。为此，通过 BIM 模型对实际施工数据进行还原，东段隧道最不利点为 922~927 环，该节点急曲线半径 R=500m，盾构纵坡 5%，为保证上层车道板搭接长度满足安全行车要求，利用 BIM 模型测算最小搭接长度，测算结果均大于等于 15cm。



图 3-7 上层车道板搭接长度测算

3.2.7 施工方案专项模拟及可视化技术交底

在合川路基坑开挖过程中，地下连续墙施工方案为本项目重要节点装箱施工方案。通过建立包含地质数据、设备参数的全要素三维模型，为连续墙施工提供了全流程的技术保障：针对 GXJ 接头这一关键工序，BIM 技术通过 4D 模拟精确规划接头箱安放时序，避免了传统施工中常见的相邻槽段混凝土绕流问题，将整个施工流程以三维可视化成果呈现在专业分包跟前，用于现场技术交底，这种数字化施工模式完美解决了地下连续墙施工中“看不见、控不准”的行业痛点，保障了地下连续墙专项施工的施工质量。

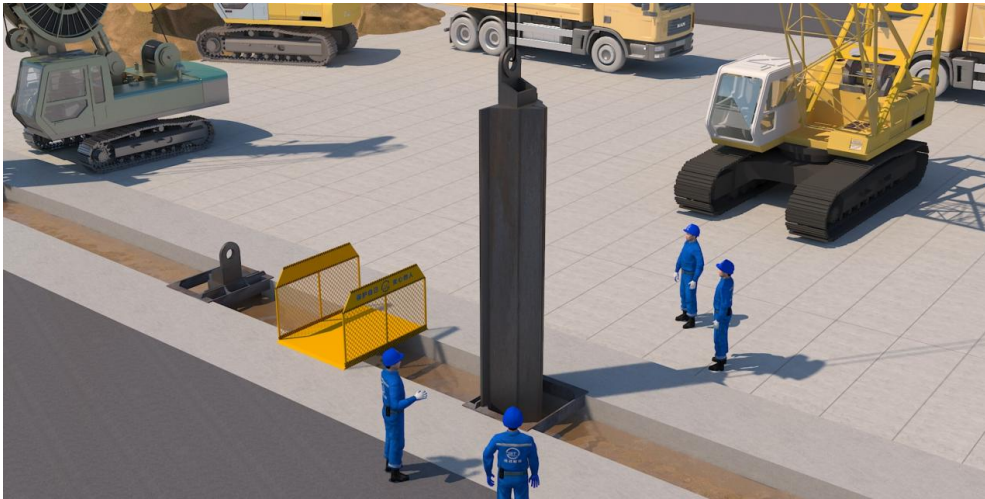


图 3-8 地下连续墙施工专项方案可视化技术交底

3.2.8 转体工况施工风险模拟

在本项目中，正式转体施工开始前，先后四次对 1 标特大异形极不对称钢箱梁转体过程进行工况模拟，检测出转体主桥在转动过程中与临时支架之间的碰撞，提前发现问题，并对转体方案不断进行优化调整，经与现场技术负责人不懈努力之下，在转体前将支架上方 50cm 的 H 型钢与 50cm 工字钢拆除，即可保证在转体过程中，主桥与支架不会产生碰撞。

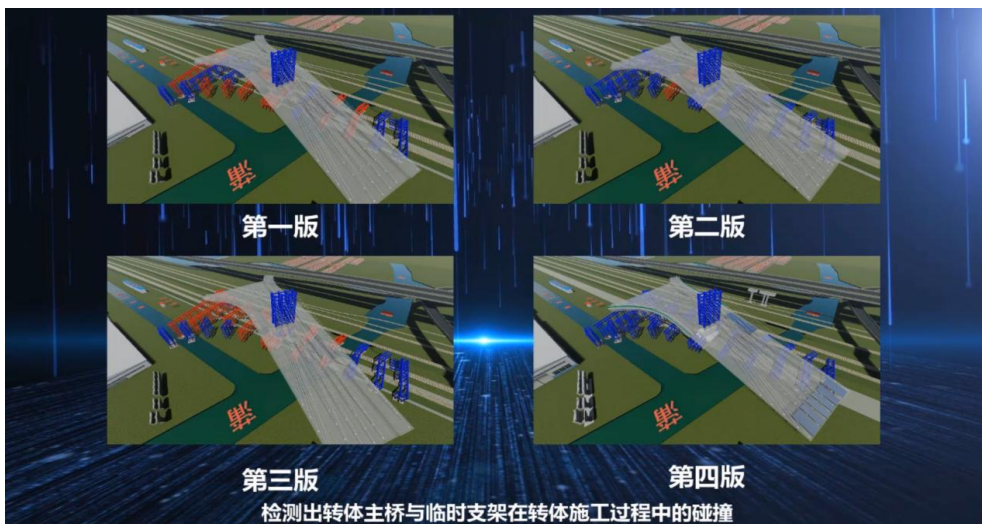


图 3-9 四版转体施工风险模拟

3.3 项目创新

3.3.1 BIM 协同管理平台

搭建基于 BIM 的开放式数据集成与共享协同管理平台，支持多源异构数据融合，同时联动手机端 app，构建了贯穿工程全生命周期的智能协作生态。平台

突破传统信息孤岛，通过多源异构数据融合引擎，并与进度计划、成本数据、物联网传感信息实时关联，形成多维度的数字孪生体。基于先进的轻量化处理技术，平台将超大体量 BIM 模型轻量化处理，同时保留几何精度与属性信息，支持 WebGL 与移动端流畅浏览，实现“万吨模型，触手可及”的敏捷管理。同时，可将该数据作为基础数据传递至其他数据平台，联动现场硬件设备，对现场进行精细化管理。

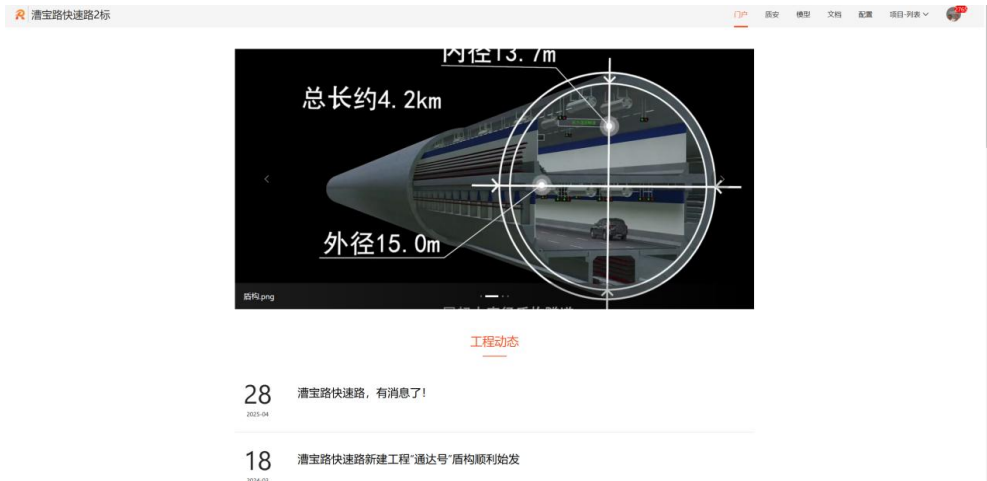


图 3-10 BIM 协同管理平台项目门户

3.3.2 4D 施工进度模拟

通过对三维 BIM 模型构件与时间维度深度绑定，构建了动态可视化的施工推演系统，改变了传统进度管理的被动模式。平台以 WBS 进度计划为基准，通过关联 BIM 构件与施工任务，生成逐日、逐工序的动态建造效果，将计划进度与实际进度进行对比，对施工延误状态进行纠偏，对于施工资源合理调配、施工进度保障具有重要作用。

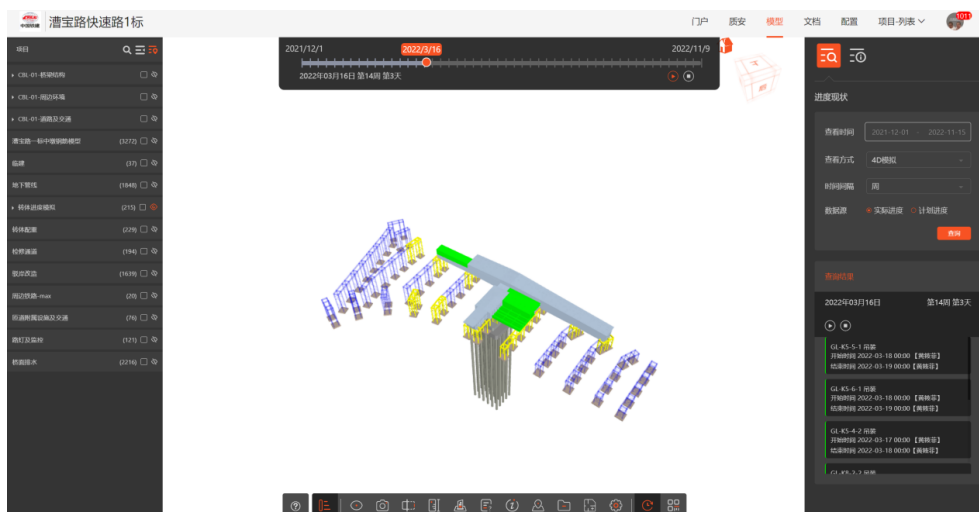


图 3-11 4D 施工进度模拟

3.3.3 进度周报数字看板

漕宝路高架近邻漕河泾经济开发区，且周边环境工况复杂，施工难度高，亟待解决问题日益增多。为保障项目整体进度，开发了一款用于现场人员填报进度的数字看板，以不同颜色对构件施工状态进行展示，管理人员周一上报本周计划，并根据现场每天进度，及时更新构件实时状态，后台自动统计该时间段现场施工进度情况，同时对施工延期构件进行附件添加及前置条件编辑，使现场负责人可以实时查看亟待解决问题，并及时推进该问题的处理进度，对需要领导协调的问题进行重点标记，在周进度汇报时展开问题讨论，提升沟通效率及现场吊装进度。



图 3-12 施工情况维护

4. BIM 技术应用效益与测算方法

（1）直接经济效益：

通过 BIM 直接应用辅助项目实际生产过程，规避施工风险及项目返工，提高汇报效率，粗略估计直接经济效益节约建安费 2000 余万，节能环保，避免资源浪费。

（2）间接经济效益：

通过 BIM 数据底座价值传递，节约重复劳动及冗余数据产生，间接经济效益约 150 余万。

（3）节约工期效益：

通过三维可视化协同工作，提高沟通及汇报效率，缩短决策周期，直接节约施工工期约 150 余天。

5. BIM 技术应用推广与思考

在数字经济与新质生产力加速融合的时代背景下，BIM 技术已成为推动建筑业高质量发展的核心引擎，其与国家“数字中国”“双碳”战略深度契合，正从单一建模工具向全生命周期数据资产平台跃迁。依托 BIM 的数字化底座属性，项目全要素信息得以在规划、设计、施工、运维阶段动态集成，形成可追溯、可复用的数据资产，为城市数字孪生构建提供精准“基因图谱”。与此同时，BIM 与物联网、5G、区块链等技术的融合，正推动实体建筑与虚拟镜像的实时映射，使数字孪生城市从“静态建模”迈向“动态感知”，为智慧城市治理提供决策支撑。然而，推广过程中仍面临标准不统一、数据孤岛、复合型人才短缺等挑战。未来，需以“新型基础设施建设”为契机，构建国家级 BIM 数据中台，完善跨平台数据交互标准，同时加强“BIM+AI”人才培养，推动技术从“工具革新”向“产业变革”升级，最终实现建筑业全要素数字化、全流程智能化、全产业协同化，为数字经济时代贡献“中国建造”的智慧方案。

十、G15 嘉金段改扩建工程

基于自研平台+AI 的 BIM 正向设计与应用

1. 项目概况

G15 公路嘉金段是国家高速公路沈海高速的重要组成部分；是上海市“一环十三射一纵一横多联”高速路网布局中的“一纵”，串联和带动上海西部城镇和产业发展的重要交通走廊；也是上海市对外货运主通道之一，重要的疏港通道。工程的建设在市域路网层面，可打通交通瓶颈，有效提升市域西部高快速路网整体服务水平，并为外环货运外移提供良好通道条件；在枢纽辐射层面，可加强虹桥国际开放枢纽对长三角交通辐射能力，支撑“一核两带”发展格局，提高枢纽集散和保障能力；在空间布局层面，可有力支撑嘉定、青浦、松江新城发展，优化市域空间格局，促进沿线产业经济发展。

G15 公路嘉金段(G1503 公路—S32 公路)北起 G15—G1503 立交以南约 890 米处与嘉浏段相衔接，南至 G15—S32 立交，沿线依次途径嘉定区、青浦区、闵行区、松江区，路线全长约 42.7km。高速系统主线改扩建规模为双向 6 拓 8，立交匝道结合流量、长度及可实施性等因素进行拓宽改造。S26—沪松公路抬升段，同步新改建地面二级公路，建设规模为双向 4—6 快 2 慢。工程线路长，沿线工况复杂，断面变化较多，根据敷设形式的不同，主要分为路基拓宽段、扩容抬升段和高架拼宽段三种断面形式。

工程为既有高速公路改扩建项目，项目情况复杂，各方面要求多，主要重难点包括以下几个方面：

(1) 工程边界条件复杂，建设范围有居民区、8 个改建立交、3 条铁路廊道（1 条在建）、5 条轨交（1 条在建）、超高压走廊等多个重要敏感点，限制条件多。

(2) 上海地区城镇化软土地质，施工难度大。

(3) 保通方案复杂，本次 G15 嘉金段改扩建需在不压缩车道、低影响交通的前提下进行，除主线交通的保通要求外，还需保证各立交匝道、各收费站的正常运营，交通组织难度极大，半幅保通半幅施工，过程中对运营高速行车保护要求极高。

(4) 外部协调工作巨大：多个共建区域，10 余家参建单位，协调工作量大。



图 1-1 G15 嘉金段改扩建工程效果图

2. BIM 技术应用概况

2.1 应用策略

2.1.1 应用目标

(1) 通过利用 BIM 的可视化特性，整合设计模型与周边重要敏感点，且与多款专业软件平台集成，为方案决策提供直观全面依据。

(2) 搭建协同设计平台让各专业设计师实时共享信息、解决冲突，结合二维一体化设计平台提升效率与质量。

(3) 借助参数化设计和精细化算量，提高结构利用率与预制拼装率，减少土方外运，践行智慧双碳目标。

2.1.2 技术路线

在方案设计环节，以自主研发的 BIM 设计工具为基础，融合三维地形数据开展建模工作，同步引入交通仿真与虚拟现实技术，实现方案的动态展示与多维度比选；进入详细设计环节后，各专业团队对模型进行深度优化，通过专业计算分析确保结构安全，最终形成二维图纸、工程量清单等成果。在这一过程中，通过搭建的 AI+协同设计管理平台，实现人员管理、进度管理、模型方案轻量化整合及版本管理、图纸管理、变更管理等功能，打破各专业信息壁垒，使设计师能实时共享数据。

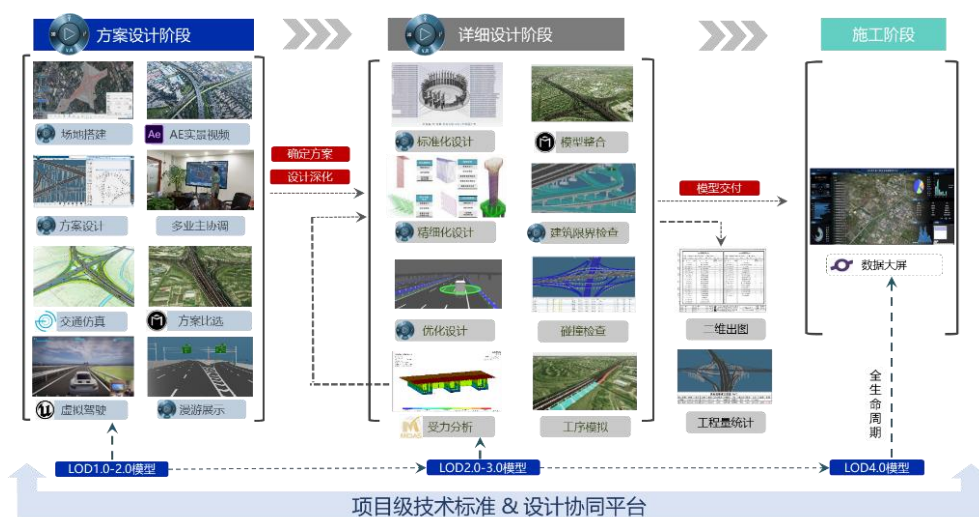


图 2-1 BIM 技术路线

2.2 组织建设

2.2.1 组织架构

为保障 BIM 技术在项目中的有效应用，成立了专门的 BIM 团队，由专业总师牵头，统筹协调各项工作。团队包括三维正向设计团队、BIM 技术应用团队、研发及技术支持团队。

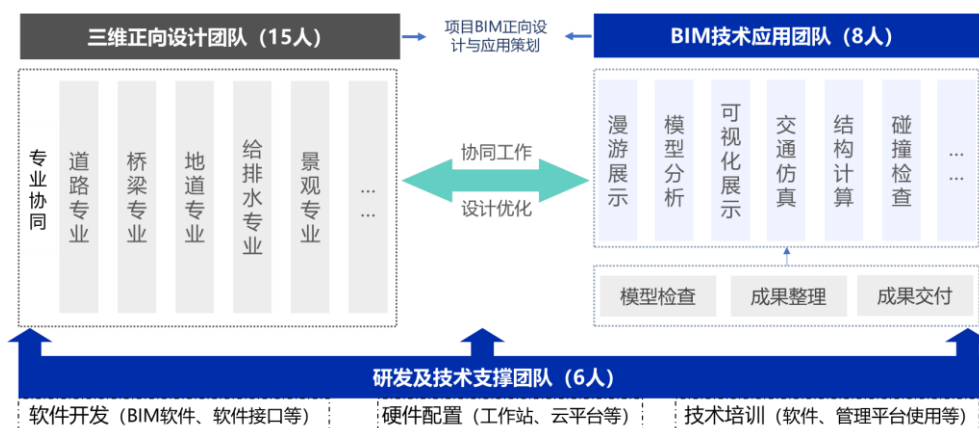


图 2-2 项目组织架构图

2.2.2 BIM 管理体系总体思路

为了达到可视化分析与决策、提升设计效率和质量、践行智慧双碳等目标，构建了涵盖方案设计、详细设计等各设计阶段的 BIM 管理体系。通过明确各参与方的职责与权限，建立健全信息共享与沟通机制，确保 BIM 模型信息的准确性、完整性和时效性。同时，加强对 BIM 应用过程的管控，制定标准化的工作流程和操作规范，提升 BIM 技术应用的规范性和有效性。

2.2.3 BIM 应用环境

(1) 软件环境

在软件方面，除自主研发的 BIM 设计软件外，还引入了多款专业分析软件和协同管理平台，形成了完整的 BIM 软件应用体系。同时，建立了研发项目设计管理平台，保障各参与方能够便捷地访问和使用 BIM 模型及相关信息，并进行项目 BIM 模型及应用、项目图纸、设计人员等管理。

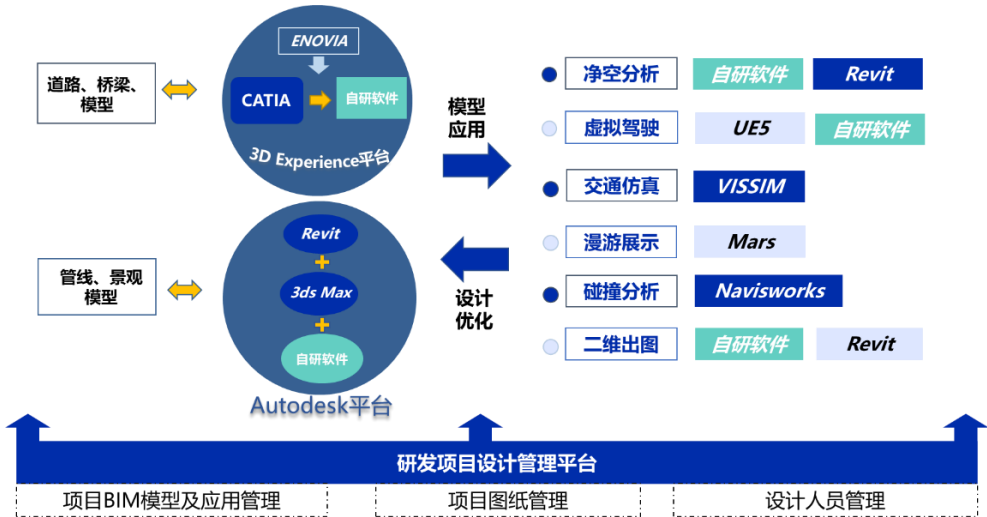


图 2-3 软件架构图

(2) 硬件环境

在硬件方面，本项目采用企业级虚拟云应用模式，我院在高性能服务器基础上搭建了企业私有云平台，发布了基于网络的虚拟化应用，涵盖 20 余种专业设计建模及计算分析软件。该模式优势显著：软件可实现线上部署与更新，许可在线分配，能根据不同专业及实际需求配置对应设计软件，无需在本地安装；环境配置在线保存，设计文件可实时协同交互，支持在多种场景下通过不同设备灵活访问，保持符合使用习惯的工作环境；依托云端计算能力，不消耗本地硬件资源，既减少了终端硬件投入，又能轻松加载大型模型并进行高效分析计算；同时实现硬件资源异地共享，可根据实时使用负载动态分配性能资源，保障了 BIM 应用的高效稳定。

3. BIM 技术应用成果与特色

3.1 BIM 协同设计

3.1.1 三维场地模型

基于自研的 RDBIM 软件，将地形高程点导入，生成兼顾场景又能方便计算处理的三维场地模型，它不仅能生动展示场地的地形地貌、周边环境等场景信息，还能精准满足后续设计过程中的各项计算需求，比如土方量计算等，为道路、桥梁等设计提供了精准且可靠的基础数据，让设计人员在开展后续工作时更有依据。同时还根据现状数据，基于自研软件，完成超高压电力线、高压燃气管、航油管道、原水管等现状管线，以及周边水系、道路的建模。



图 3-1 三维场地模型

3.1.2 道路设计

对于既有道路，通过基于 CATIA 平台自研的 RDBIM，识别并提取线形要素，拟合平面和纵断面线形，生成三维道路中心线，并在三维场景模型中进行实时交互的中心线三维设计，保证中心线拟合精度。

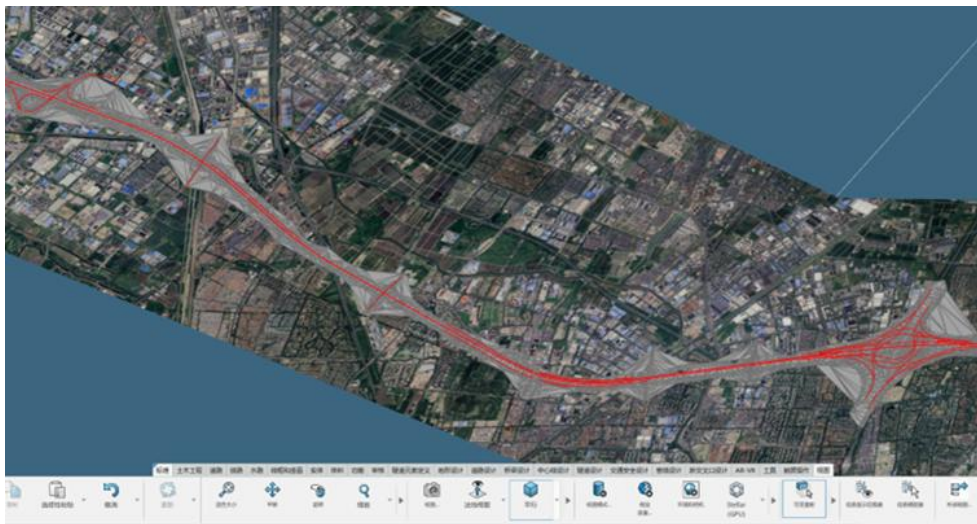


图 3-2 生成三维中心线

对于新建道路，设计人员基于构建好的三维场景模型，在 RDBIM 软件中进行实时交互设计，能够直观地看到道路线形与周边地形、建筑物的关系。软件内置了丰富的行业规范自查功能，在设计过程中会自动对照规范对道路的各项参数进行检查，自动校核平纵线形指标、挡墙高度等，帮助设计人员及时发现并修改问题，大大提升了设计的合规性，减少了后期因规范问题导致的返工。

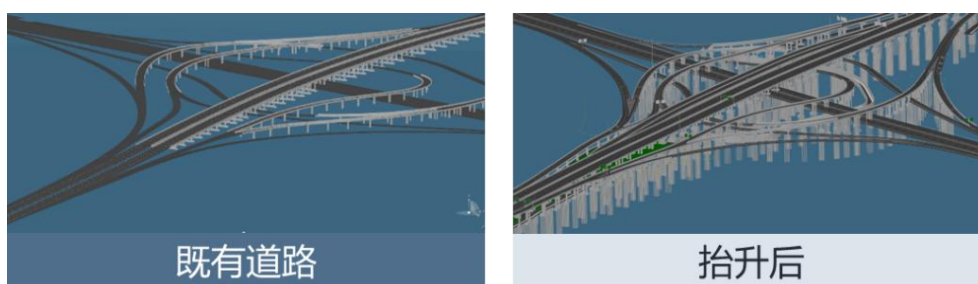


图 3-3 道路设计

3.1.3 桥梁设计

对于新建桥梁，利用研发的二三维一体化桥梁设计软件 BDBIM，打破了传统设计中二维图纸与三维模型分离的局面，通过一套设计数据同时驱动生成二维图纸和三维模型。这意味着设计人员在完成设计后，可以一键输出二维图纸和三维模型，避免了以往二维与三维不一致的问题，保证了设计数据的一致性与连贯性，也减少了因数据不同步而产生的错误。

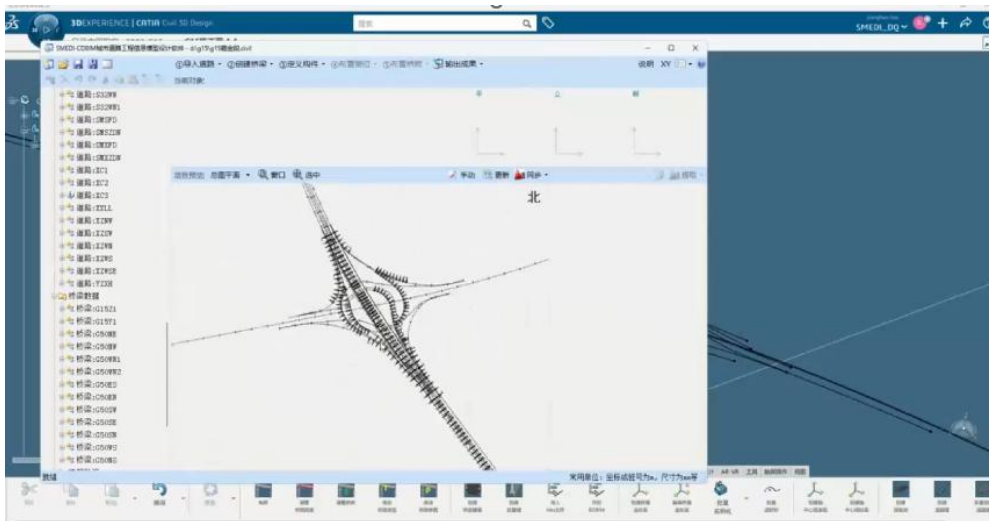


图 3-4 桥梁设计

对于既有桥梁，根据拟合中心线和采集数据，考虑现状周围因素，优化桥梁拼宽方案。通过外侧拼宽、外侧拓宽、中分带空隙特殊拼宽、主线与立交匝道分合流处局部改造等手段，与初期方案相比，全线进一步减少拆除桥梁 5 联 12 跨，合计 6840 m²，减少工程造价和资源浪费。

3.1.4 计算分析

依托协同设计平台的优势，设计数据实现了在各专业、各环节之间的无缝传递。系统能够自动抓取道路桥梁设计中的关键数据，如结构尺寸、材料属性等，并且内置集成了多本行业规范，设计人员只需启动验算功能，系统就能快速按照规范要求对构件结构进行验算，并直接输出详细的计算书，极大地提高了计算效率。



图 3-5 计算书输出

同时，通过开发的实体模型一键拆分功能，设计人员可以将需要进行应力分析的受力构件单独拆分出来，直接导入 ANSYS 等专业分析软件中进行精准的应力分析。根据分析结果，设计人员能够快速调整和迭代设计参数，无需重新建模，大幅提升了计算效率，缩短了设计周期。

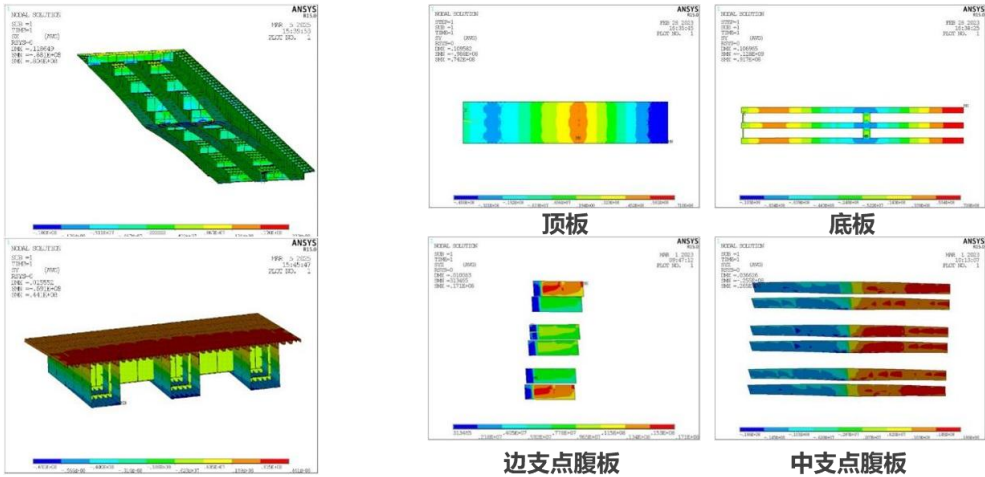


图 3-6 有限元计算分析

3.1.5 二维出图

BDBIM 调用设计数据完成桥梁出图，自动出表，自动标注，减少了重复劳动，也保证了图模一致。与传统的二维出图方式相比，极大地提高了出图效率，提高了出图质量。桥梁总图平面图、立面图、墩位参数表，出图率达到了 100%；桥墩构造图、预制梁划板图出图率达 87%。

3.1.6 管井设计

通过现状地形数据，通过基于 CATIA 自研的 RDBIM，完成超高压电力线、高压燃气管、航油管道、原水管等现状管线的快速建模。管线设计采用符合设计人员设计习惯的方式，完成设计后即可直接生成三维管线模型。

3.1.7 附属结构和交安设施

内置多种类型自主开发的标准结构模板，根据地形河道和道路数据，可以对挡墙、排水箱涵等结构进行快速参数化建模，精简冗余参数，高效、快速完成结构设计。

建立了附属设施构件库，涵盖行标《公路交通标志和标线设置规范》（JTGD82—2009）中的所有常规标牌，还包括护栏、路灯、声屏障、地面生态墙等多种附属设施。使用自研软件可以依托道路设计数据集成布设附属设施。



图 3-7 附属结构和交安设施

3.2 BIM 技术应用

3.2.1 漫游展示

基于 CATIA 软件，开发了一键输出漫游视频功能。设计完成后，设计人员可以根据需要选择合适的线路，以车行视角生成漫游视频，生动展示交通流向、道路沿线景观及建筑物分布等情况。这一功能让业主、施工单位及其他相关方能够更直观、清晰地理解设计方案，便于各方之间快速沟通交流，及时提出修改意见，有效提升了方案的理解度与认可度，减少了因沟通不畅导致的方案修改。

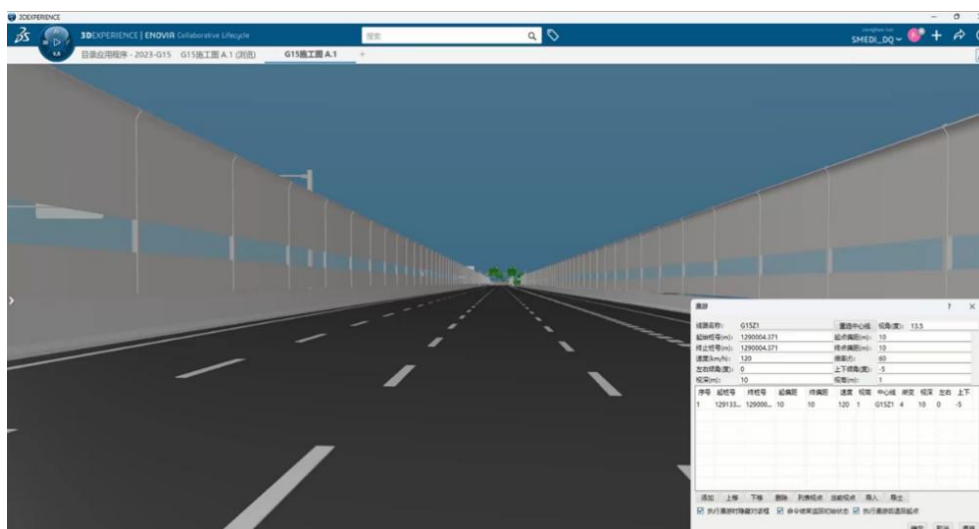


图 3-8 漫游展示

3.2.2 VISSIM 交通组织设计

通过自主开发的 VISSIM 交通仿真软件数据接口，实现了与 BIM 模型的无缝对接。接口能够精准读取 BIM 模型中的道路路线、交叉口设计等信息，并自

动生成车辆行驶路径，再将轻量化处理后的 BIM 模型导入 VISSIM 软件中，进行交通仿真。通过仿真可以直观地看到不同交通组织方案下的车辆行驶状况，如拥堵点、通行效率等，为交通组织优化提供了科学、可靠的依据，有助于制定出更合理的交通组织方案，提高道路的通行能力。



图 3-9 VISSIM 交通组织设计

3.2.3 保通方案设计

基于 BIM 模型对项目施工期间的保通方案进行模拟展示，极具实际意义。设计人员可以在模型中模拟施工区域的划分、施工顺序、临时保通道路的设置、交通流量等内容，直观地看到施工过程中对周边交通和居民出行的影响。通过模拟，能够合理规划施工工序，优化施工进度安排，避免因工序不合理导致的工期延误。同时，还能提前发现施工过程中可能出现的重复开挖、材料堆积等问题，减少重复开挖带来的资源浪费和材料浪费，降低施工成本，保障施工期间交通的顺畅和居民的正常出行。

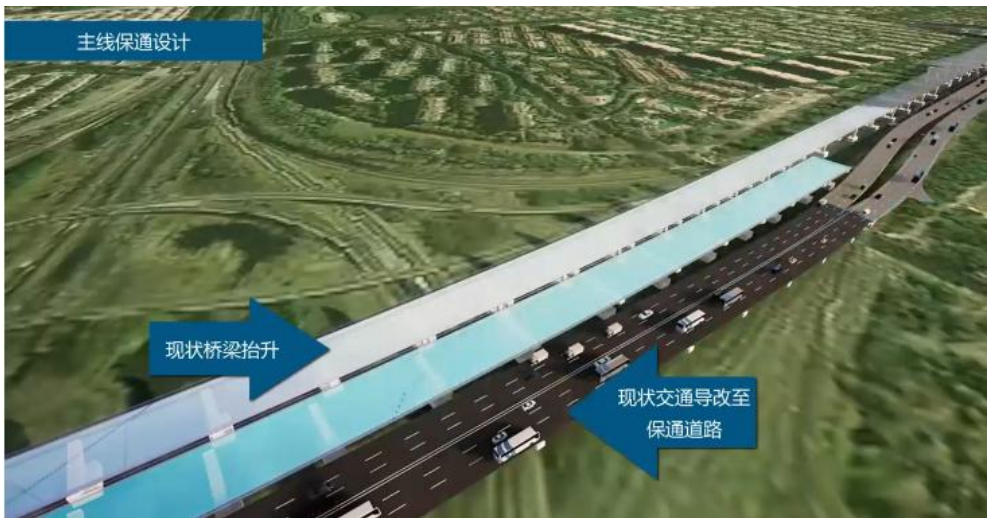


图 3-10 保通方案设计

3.2.4 碰撞检查

采用自主开发的专业检查工具，依托统一的设计平台对项目模型进行全面的干涉模拟。该工具能够在线实时检查道路限界是否满足要求、管线之间及管线与结构之间是否存在碰撞等干涉问题。一旦发现问题，会立即通知相关设计人员，设计人员可以在平台上即时进行沟通协调，共同修改完善设计方案，避免了这些问题在后期施工阶段才被发现，从而减少了施工返工和成本增加的风险。

3.2.5 三维防眩设计

自动抓取车道的平纵数据，精确模拟对向车灯在不同路况下的直射区域以及防眩板的遮蔽情况。通过模拟可以准确评估眩光对驾驶员视线的影响范围，进而根据评估结果优化纵坡变化段的防眩板高度。确保防眩板能够有效遮挡对向车灯的眩光，为驾驶员提供良好的视线条件，有效保障了行车安全。

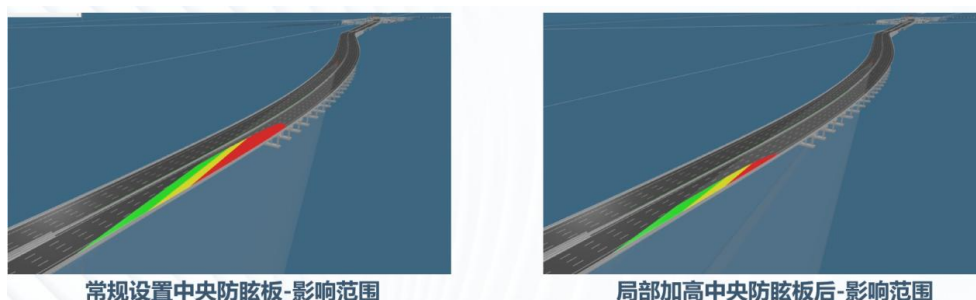


图 3-11 三维防眩设计

4. BIM 技术应用效益与测算方法

4.1 二三维一体化设计

由设计人员主导完成 BIM 设计，以数据同步驱动结构验算、二维出图和三维模型生成，大大提高了设计的效率，同时保证了图模一致，避免人为设计错误，提升设计质量。

本项目道路总图、桥梁总图出图率达 100%；桥墩构造图、预制梁划板图出图率达 87%；综合出图效率较传统 CAD 提升 30%以上。

4.2 BIM+UE5 虚拟驾驶应用

本项目所使用的自研虚拟驾驶系统对项目推进发挥了重要作用。它不仅能让设计者直观体验路线设计以及标志标线的布置情况，从而提出优化建议，还助力交安设计顺利通过评审。

市交警在使用该系统后，对设计成果和驾驶体验给予了高度认可，并期望这套系统能够应用于后续其他项目的阶段性汇报和评审流程中。

4.3 基于协同设计平台的三维参数化设计

协同设计平台使各专业设计师能在同一平台上实时合模和交流信息，提高设计效率与协同性。

以道路专业与桥梁专业协同对拼桥范围进行优化为例，道路结合现状控制性要素进行局部平纵线形调整，桥梁专业同时尝试使用外侧拼宽、外侧拓宽、中分带空隙特殊拼宽、主线与立交匝道分合流处局部改造等多种手段，最终进一步减少拆除桥梁 5 联 12 跨，合计 6840 m²，充分利用既有桥梁，减少资源浪费，节省工程造价约 3500 万元，实现环保、低碳的工程建设目标。

5. BIM 技术应用推广与思考

在本项目中，BIM 技术的成功应用得益于完善的组织架构、明确的管理思路和有有效的技术支持。通过搭建 AI+协同设计管理平台，打破了各专业间的信息壁垒。各专业设计师能够在同一模型上实时共享数据、交流思路，大幅提升了设计效率与协同性，确保项目按计划实施。同时，充分利用 BIM 的可视化特性，整合设计模型与周边重要敏感点，并与多款专业软件平台集成应用，为方案决策提供了直观全面的依据。设计团队能够快速迭代方案，助力选出最优设计方案，有效提高了决策的科学性与准确性。此外，通过本项目丰富了企业构件库，让 BIM 模型可沿用、可拓展，实现了资源共享。总结形成的项目正向设计流程及标准已通过我院专业委员会验收，将在后续路桥设计项目中进行进一步应用和推广。

展望未来，应进一步加强 BIM 技术标准的制定与完善，统一数据格式与接口规范，推动 BIM 模型信息的互联互通。持续探索 BIM 技术与其他新兴技术的融合应用，如 AI 技术。未来可进一步拓展应用场景，利用 AI 强大的数据分析、预测能力，对 BIM 模型中的海量数据进行深度挖掘，为项目决策提供更具前瞻性的建议，全面提升项目管理的智能化水平。

十一、苏州轨道交通 11 号线工程

1. 项目概况

苏州地铁 11 号线（Suzhou Metro Line 11），是中国江苏省苏州市第六条建成运营的地铁线路、是苏州首条市域轨道交通线路、也是苏州地铁线网中首条与上海地铁线网对接的地铁线路，是长江三角洲区域一体化发展基础设施互联互通的示范工程，于 2023 年 6 月 24 日 11 时开通初期运营。线路全长 41.25 千米；共设置 28 座地下车站；全线设一段一场，主变电所 2 座，新建祖冲之路控制中心 1 座。工程批复概算 299.34 亿元。



图 1-1 苏州轨道交通 11 号线线路图

2. BIM 技术应用概况

苏州轨道交通集团从 BIM 技术应用落地入手，研究线网级城市轨道交通全生命周期管理体系，以数据标准为基准，以大数据挖掘与分析、数据可视化分析为手段，以信息化、数字化为抓手，用数据赋能，打通轨道交通建设全生命周期业务。

苏州轨道交通集团通过学习行业先进经验以及通过五号线试点总结，完善了 BIM 总体规划，明确了“三步走”战略，制定了“以协同为核心、以平台为依托、以预制化施工为方向、以数字化交付、智慧化运营为目标” BIM 方针。通过构建

企业级 BIM 应用标准体系，从实践出发，完成了 BIM 设计协同管理平台、BIM 建设协同管理平台的搭建应用、探索运维阶段数字化、智能化应用。以一套标准、两大平台为依托，以数据为载体，将工程建设与信息化技术相融合，通过实现轨道交通工程全生命期业务与流程全覆盖，切实解决工程建设和竣工交付期间的难点与痛点，提升全生命期精细化管理水平，为未来智慧轨道交通发展与建设提供一种解决方案。

苏州轨道交通 11 号线作为苏州轨道交通三期建设(包含 6.7.8.11 四条线路)中第一条全生命期运用 BIM 技术指导建设的轨道交通线路，该项目落实“设计施工基于 BIM 深化出图设计审核会签；现场按 BIM 实施预制化、同步施工；监理凭 BIM 实施监理过程把控；业主依据 BIM 过程验收有据可依”，践行基于 BIM 的“设计、施工、监理单位、设备供应商一体化”管理模式。

本项目有以下六大亮点：

(1) 实践出一套具有苏州轨道交通特色的建设方高位指导，BIM 咨询单位技术支持，参建各方全员参与的 BIM 管理模式；

(2) 设计、施工、设备厂商跨地域、跨单位、跨专业的三维协同环境建设；

(3) 基于 BIM 技术预制化设计、工厂化生产、装配化施工的探索应用；

(4) 设计施工单专业术业有专攻、多专业协同配合冲突前置解决、数字应用百花齐放的 BIM 应用实施模式；

(5) 紧扣轨道交通行业前沿的 BIM+新技术探索；

(6) 基于 BIM 模型的线路级数字化归档探索。

3. BIM 技术应用成果与特色

3.1 特色一：建设方高位指导，BIM 咨询单位技术支持，参建各方全员参与的 BIM 管理模式

苏州轨道交通 11 号线工程通过引入上海市隧道工程轨道交通设计研究院作为 BIM 咨询单位，集团高层领导牵头，采用“建设方高位指导，BIM 咨询单位技术支持，参建各方全员参与”的 BIM 管理应用模式。



图 3-1 项目组织架构图

苏州市轨道交通 11 号线工程创造性的提出“设计 BIM 三维规范化设计+施工 BIM 工艺化深化”的 BIM 应用机制，旨在通过设计+施工深化两阶段应用，实现 BIM 成果融合设计的规划性与施工的工艺性，进一步提升 BIM 成果的落地性。

在项目策划阶段，立足顶层设计，会同 BIM 咨询单位通过编制 BIM 企业级标准，落实实施准则及要求；通过编制 BIM 应用总体实施方案，统筹各阶段、各单位 BIM 实施应用点；通过编制参建各方 BIM 招标技术要求，确定设计单位、施工单位、监理单位、设备供应商各方工作内容与职责，将相关的 BIM 技术要求落实进对应合同文件；通过制定总体实施计划，明确各阶段 BIM 应用节点；通过制定 BIM 管理办法，对参建各方落实协调、指导与监督。

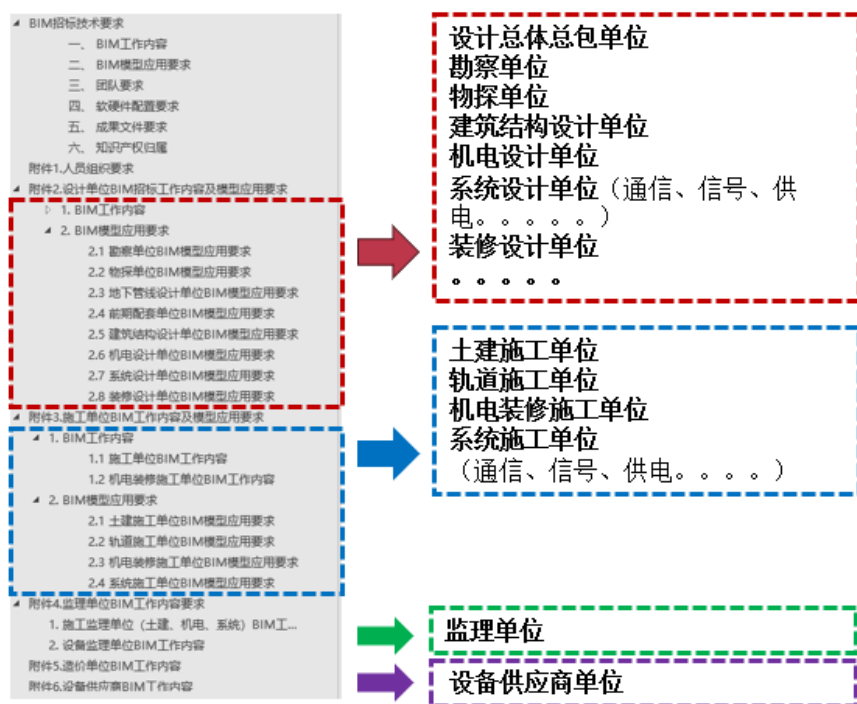


图 3-2 各专业招标 BIM 技术要求

集团领导要求做好 BIM 应用的“三道题”。经过系统梳理，企业标准中规定以及落地性强应用点为必答题；存在 BIM 应用价值点但投入成本较大为选择题；符合轨道交通前沿研究方向的作为提升题进行试点探索。

3.2 特色二：跨地域、跨单位、跨专业的三维协同数据环境建设

苏州轨道交通 11 号线生产端通过集团布置设计协同数据中台以实现数据集中管理；基于 revit server 的广域网协同技术实现设计、施工、厂商基于统一数据中台实现数据的远程创建、调用参考；通过对 revit server 的二次开发，设计分层权限架构访问机制保障数据的安全性。

在管理端通过设计、建设协同管理平台实现管理流程线上化，实现设计成果线上移交施工单位，施工深化成果线上提交设计单位审核会签；在移动端基于 BIMFACE 实现大体量模型在线轻量化浏览、审核、意见发布。

同时，苏州轨道交通 11 号线创建不同单位、不同专业之间的协同机制，以应用点为基础搭建协同场景；以车站分层、分区划分协同切片，确定各个协同切片实施主导单位，并明确对应协同配合单位、需配合工作内容，实现了协同的针对性。

BIM 设计协同管理平台突破了 BIM 模型跨区域、跨单位、跨专业协同融合、

异构数据集成、模型数据标准化管理等技术难关，搭建图元级协同设计环境，实现了在任何时间、任何地点对工程模型和文档的协同沟通和安全访问。



图 3-3 双平台助力苏州轨道交通 11 号线数字化协同

3.3 特色三：基于 BIM 数字化多专业“预制化设计、工厂化生产、装配化施工”的探索应用

苏州地铁 11 号线机电系统 BIM 施工深化阶段，开展各类机房工艺性深化、支吊架深化、墙体预留孔洞布置等深化应用。同时积极探索基于 BIM 方案的预制化下料、装配化施工应用研究，如图 3-4 所示。

(1) 苏州地铁 11 号线全线实现风管基于 BIM 方案预制化下料、现场无切割。

(2) 单站开展多专业基于 BIM 方案预制化下料研究，实现了风管、冷冻水机房泵组模块、消防泵房泵组模块、专用通信机房上走线桥架及支架、气瓶间内管线及支架、装饰装修墙面板材的预制化下料。

(3) 标准化模块化冷冻水机房研究，探索两座车站以一种泵组模块形式安装，思考“定制化预制”向“流水化预制”转变。以共青、江浦站试点，统一设计标准、施工工艺、进行管段标准化拆分，实现两座车站泵组模块大小统一，制定线路级冷冻水机房实施技术指导意见；管理上，全线机电设计单位为一家单位，集中采购水泵等设备，规避不同厂家产品带来尺寸的差异，探索“定制化预制”向“流水化预制”转变。

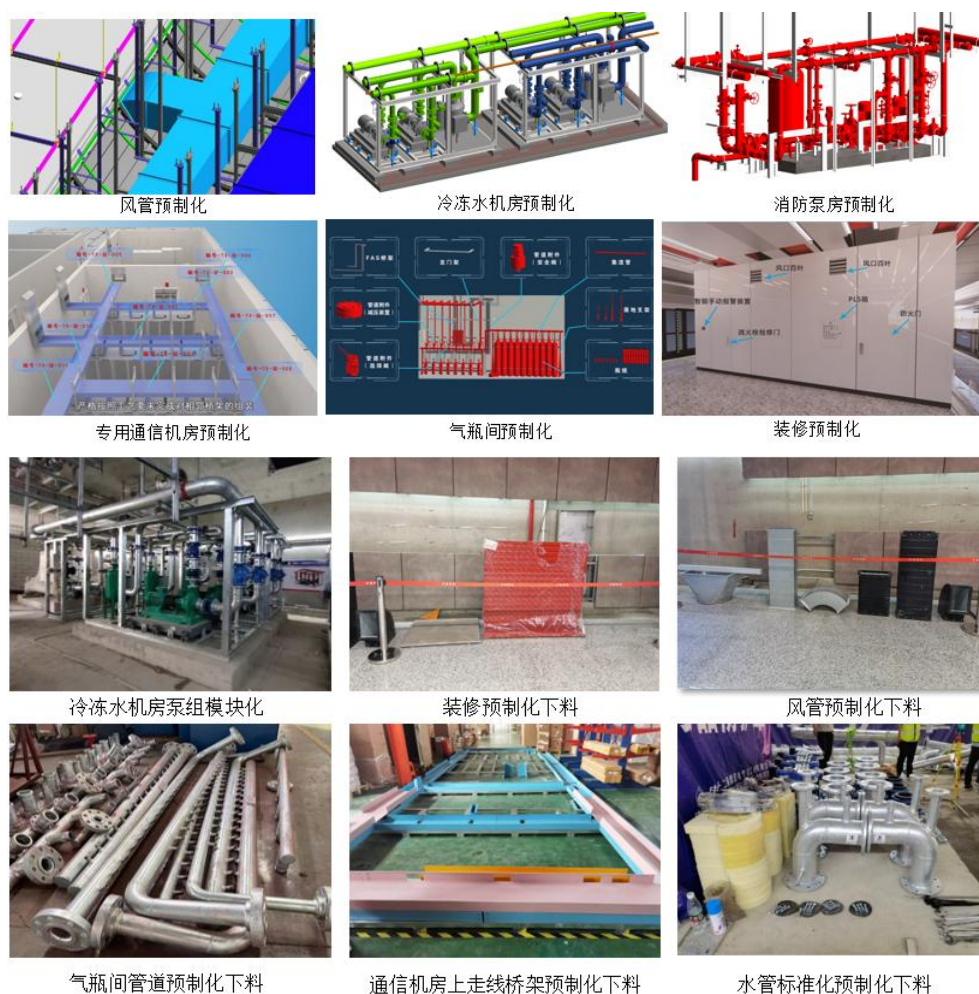


图 3-4 机电系统基于 BIM 多专业预制化应用效果图及现场下料图

3.4 特色四：设计施工“单专业术业有专攻、多专业协同配合冲突问题前置、数字应用百花齐放”的 BIM 应用实施模式

在设计阶段，基于 BIM 设计协同管理平台，实现多专业的协同设计，开展综合管线和多专业深化协同，以集成整合的思路优化站内空间排布，并开展预留孔洞复核应用。基于 BIM+VR（虚拟现实）技术，开展装修、机电管线深化及系统安装深化等多方案比选，实现全站多专业、多系统的均衡式布局。采用倾斜摄影及 GIS 技术，通过 BIM 模型与沿线周边环境的数据整合，辅助开展管线迁改应用和车站及出入口选址定位。在花桥站，通过三维客流仿真，规避大客流造成的拥堵问题，保障通车后与上海地铁 11 号线的流畅换乘体验。

在线收集设备厂商有关的设备模型、技术规格书、参数汇总表等 9 大类资料，保障企业级构件库数据质量，同时为后期运维提供关键数据。

施工深化阶段打破传统机电施工单位主导 BIM 应用工作的局面，通过前期

工作策划、细化通信、信号、供电、站台门、FAS、BAS、AFC 等各专业工作要求。各专业“术业有专攻”，发挥主观能动性，实现本专业内各自专业机房、特殊节点深化工作，实现全线各专业之间 BIM 应用的“百花齐放”。全过程基于 BIM 建设协同管理平台，实现施工深化阶段的在线协同及设计配合，及时规避深化时“各自为政”等配合不佳问题。搭配机电施工属地化管理等方式，开展机电与系统方案深化的协同配合与统筹考虑，前置解决不同专业间设计冲突碰撞等问题。针对深化重难点设备用房及特殊施工工序，基于 BIM 可视化开展三维校审和虚拟施工，进一步提升深化方案的准确性和落地性。

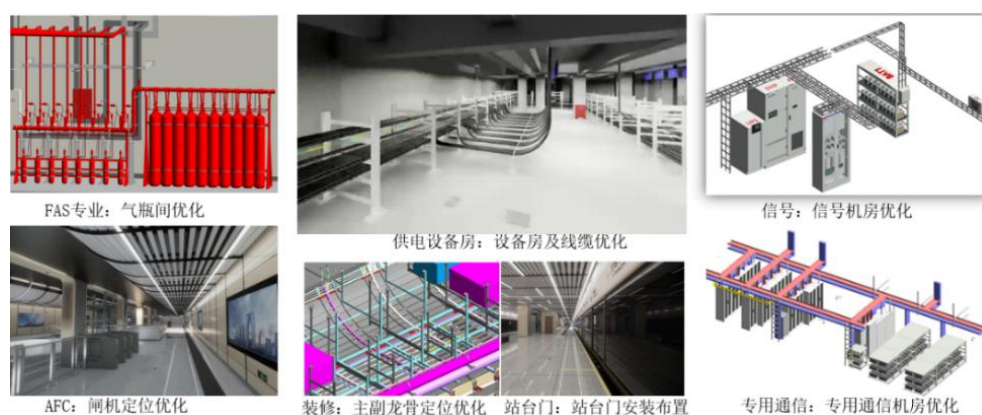


图 3-5 施工深化阶段各专业基于 BIM 多专业应用百花齐放

3.5 特色五：紧扣轨道交通行业前沿的 BIM+新技术探索

3.5.1 三维激光扫描技术

土建施工现场的偏差问题影响机电深化方案的稳定性，机电施工进场前，开展基于三维激光扫描技术的土建竣工实测实量。为了排除土建施工现场偏差对深化方案的影响，苏州 11 号线在白潭河站试点了三维扫描技术，首创基于点云模型的土建现场逆向建模与模型修正方式，并编制《基于三维激光扫描辅助的土建车站实测实量实施技术手册》大幅规避 BIM 模型与现场不一致。

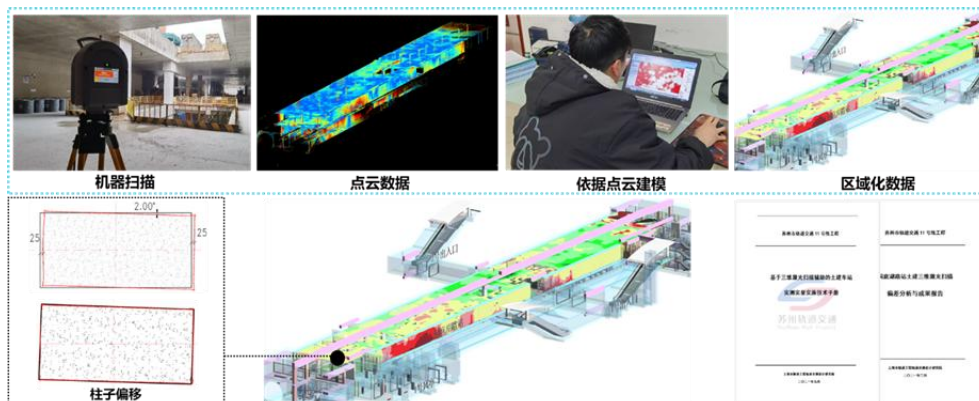


图 3-6 基于三维激光扫描技术的逆向建模

3.5.2 无人机技术

苏州轨道交通 11 号线通车前夕，市级领导关注各站市政路面恢复、各出入口与公交站接驳进度。通过采用传统无人机航拍以及自动巡检两种形式，每天采集全线进度数据，辅助市级领导现场工作调配。后续线路，将探索无人机自动巡检与图像智能分析的结合，开展区间进度、重型机械的巡检。



图 3-7 基于无人机技术的进度巡检

3.6 特色六：基于 BIM 模型的线路级数字化归档探索

“数据底座、数字资产”是数字化运营维保重要组成部分。苏州轨道交通 11 号线工程开展全线竣工模型的创建。落实基于 BIM 最小可维护单元、设备机柜、设备机房、车站、线路级交付，并开展模型与现场一致的复核。保证模型与现场一致性同时完成设施设备的编码，通过 BIM 建管协同管理平台实现了全线轻量

化数字化资产的收集。

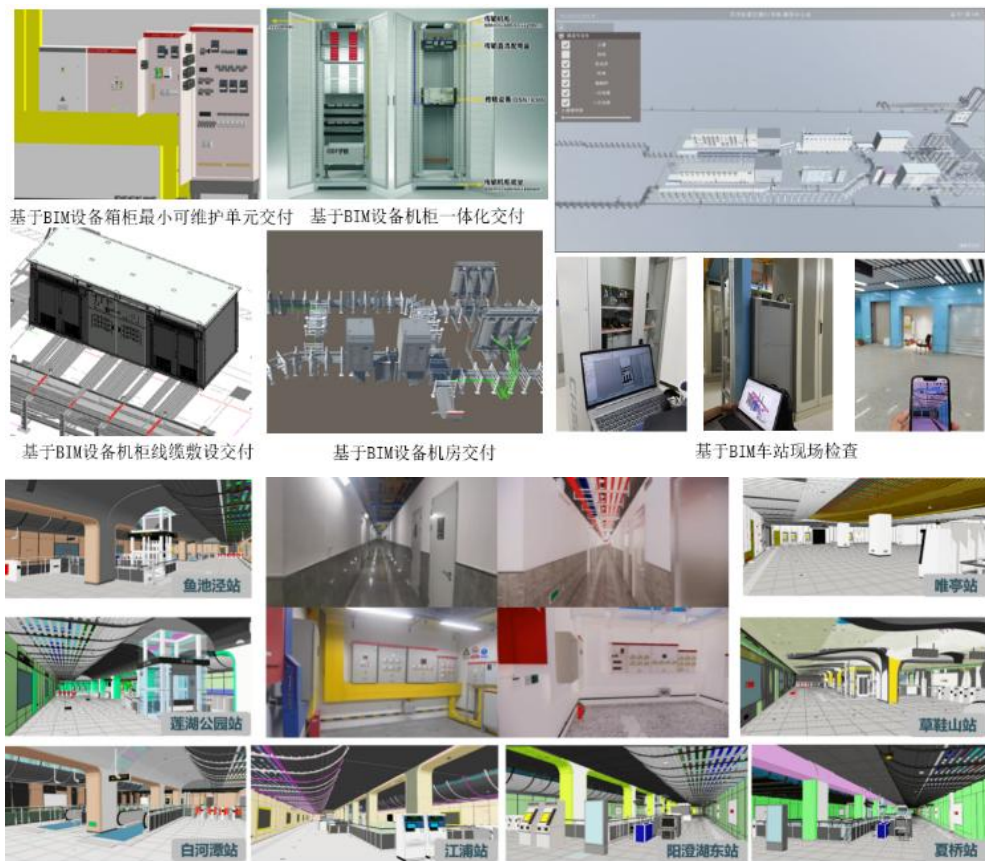


图 3-8 基于 BIM 的竣工模型创建、现场检查、基于 BIM 建设管理平台的轻量化收集

依据集团档案中心归档要求，试点结合电子签章，在 BIM 建设协同管理平台中实现了建设（975 类）管理表单电子化归档。通过研究总结，针对表单数字化归档，集团计划采用双轨制：1.对于无法形成线上数据流的管理表单，采用线下流程经扫描后归档。2.对于可以线上流程表单，采用“单轨制”。



图 3-9 基于 BIM 建设管理平台的电子化表单及签章试点应用

4. BIM 技术应用效益与测算方法

在苏州地铁 11 号线建设期的应用 BIM 技术，通过采用建设方高位指导、BIM 咨询单位技术支持、各参建方全员参与的模式，在设计、施工阶段引入 BIM 应用技术，通过在现场实践总结，在协同生产环境建设、现场实施、预制化施工、三维激光扫描应用等方面取得较好效果。

4.1 协同生产环境建设成效方面

2020 年 BIM 设计协同平台在国内第一次实现了 11 座城市、20 个专业、34 家设计单位、136 家施工及监理单位，1500 位参建人员的跨地域、跨单位，广域网协同办公。平台应用仅半年，各条线路通过平台流转设计文档 1502 份、模型 1214 个，图纸 986 张，线上流程 4400 条，运行账号 1566 个，协同工作时间达到 939600 小时，真正实现了 BIM 协同设计管理的落地应用。



图 4-1 协同设计平台流转文件、流程及账号数据统计

以单一设计流程为例，借助协同设计平台，设计跨单位提资节省时间约 24 小时，设计总体单位设计审核节省约 72 小时，业主设计审核节省约 24 小时，设计成果归档节省约一周左右，实现了设计管理效率的提升。

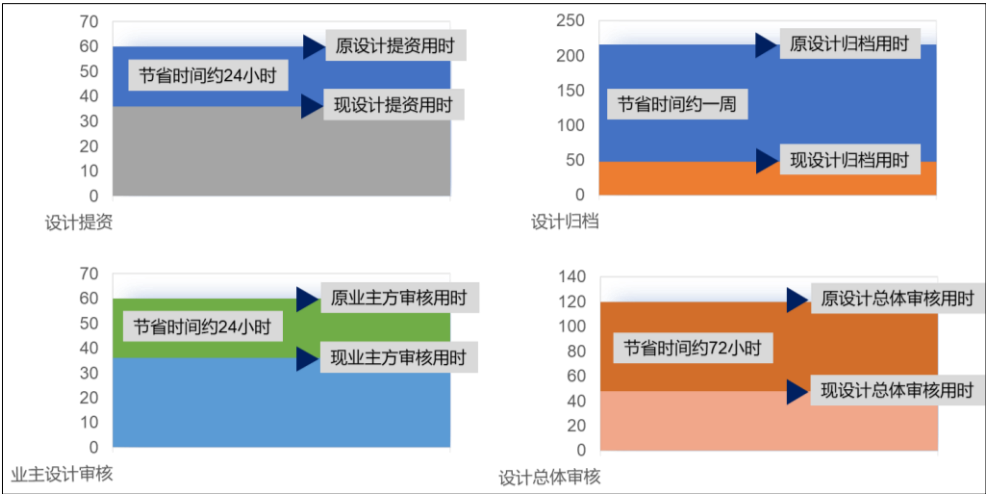


图 4-2 协同设计平台对设计管理效率的提升效果

借助建设协同管理平台的厂商族收集系统，采集施工机具、机电设备的全过程数据信息，形成了完整的产品设备履历，数据形成工程企业级数字资产库，给运维阶段的数据调用提供前提条件。

4.2 现场实施成效

苏州轨道交通 11 号线工程全线 28 座车站机电管线一次性施工成型，全线提前半年通车运营。现场实施过程中，要求现场基于 BIM 施工深化图纸实施，实现不同专业之间的“同步施工”；同时基于 BIM 深化方案，开展多专业“预制化下料、装配式施工”，极大的提升了现场的文明施工度，有效提升施工效率，节约现场施工周期。



图 4-3 现场机电支吊架与装修龙骨同步施工以及风管预制化下料装配化施工

4.3 预制化施工成效

预制化施工极大减少了传统“切、割、焊”工艺，现场绿色施工；工厂化预制，有效的提升了生产效率，降低了现场的材料损耗。苏州轨道交通 11 号线实现全线风管实现预制化下料；白马泾模块化冷冻水机房 6 小时完成施工，相对传统施工节省 35 天。通过施工单位评估，经现场统计，各专业预制化下料装配化施工在工期、人工节省数据如下表所示。

表 4-1 预制化施工成效

预制化内容	预制率	工期（天）装配/ 传统	人工（个）装配/ 传统
风管	95%	节省约 10 天	节省 4 人
冷冻水机房泵组模块及泵房内水管	95%	1/35	13/15
防泵房泵组模块及泵房内水管	95%	1.5/7	3/6
专用通信机房上走线桥架及预制支架	95%	0.5/7	4/8
气瓶间内管线支架	95%	2/5	3/9
装修墙面顶面	85%	节省约 10 天	

4.4 三维激光扫描技术成效

三维激光扫描，单站近 8 亿个测量数据点，2 人 6 小时完成测量，对比传统实测实量，节省约 6 天周期，节省 6 位人员。可极大缩短现场复核周期和人员投入。修正好的土建实测实量模型有效的提升了深化方案的稳定性，提前规避土建施工偏差带来的现场拆改问题。

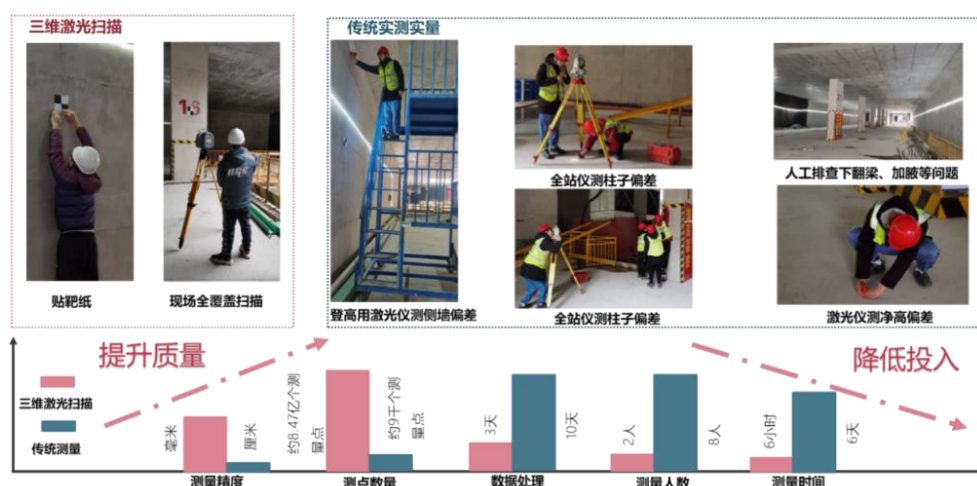


图 4-4 三维激光扫描与传统实测实量数据对比

5. BIM 技术应用推广与思考

苏州地铁 11 号线通过引入 BIM 技术，搭建广域网协同办公环境可针对性解决城市轨道交通跨单位、跨地域协同办公的需求，广域网的协同环境也是正向设计实施的基础条件。通过引入施工深化阶段有效的衔接设计与施工阶段 BIM 应用，推进各专业协同配合的“术业有专攻”模式有效提升 BIM 深化成果的专业性；采用施工 BIM 深化图册的形式保证了成果的有效传递；通过试点三维激光扫描技术、推广基于 BIM 的预制化施工，对现场建设质量、成本节约、效率提升均有促进作用。

后续建议：

(1) 放眼新线项目建设，回首老线改造工程

建设期坚持“设计阶段的三维数字化设计为主，施工深化阶段深化设计为补充”的方针，聚焦依托 BIM 三维模型解决工程问题点为核心。

施工深化阶段，加深设计单位与施工单位之间的协同力度，同时设计单位需加强对深化方案的技术支持与审核力度，达到深化方案融合设计规范与施工工艺

的目标。提升“BIM 施工深化图纸”的现场认可度，确保 BIM 深化方案在现场有据可依；加强“BIM 多级交底”力度，确保施工深化方案传递至一线实施班组。

施工阶段以预制化施工为导向，提升整体预制化率，探索标准化、模块化预制，实现“定制化预制”向“标准化预制”转变。

通过隧道轨行区三维数据采集车、无人机+基站、SLAM、机器狗等先进技术，形成一套“低空、地表、地下”多维度既有线空间数据采集技术路线及数据采集标准。并基于多源数据探索三维数字模型逆向建模技术，实现三维模型自动化快速建立，为老线改造提供空间数据基础。

（2）既有三维数据运维价值发掘，深度探索新兴技术应用融合

苏州轨道交通 11 号线完成 BIM 竣工数据模型移交运营，以运维需求为导向高质量完成线网级数字化交付，是实现 BIM 指导运维、轨道交通智慧运维的基础，从而实现数字资产的复用增值。同时推动 BIM 技术与 AI、物联网、云计算、大数据等新兴技术的深度融合。

十二、城市更新背景下建筑立面“修、改、留”的 数字化路径探索与工具研发

1. 项目概况

随着我国城市化进程的快速推进，建筑物的数量和使用年限大幅增加，其中大量建筑已经使用超过 20 年。由于早期规范和施工工艺的欠缺，这个时期的建筑在外围护构件、保温及防水等方面并不完善，加上长时间的风吹日晒和日常使用，建筑已出现了不同程度的老化，如外窗气密性降低、保温脱落、防水开裂等现象，改造和更新迫在眉睫。

本市计划到 2025 年完成 1200 万平方米既有公共建筑的改造，其中包括大量的石材立面建筑。这些石材立面在经历了几十年的风化和侵蚀后，仍然保持良好的质地和美观，因此在城市更新中具有重要的利用价值。为了让进入老龄化的建筑重换新生，高效、精细化地进行石材立面修缮与改造，本项目研发了既有建筑石材外立面状态评估与修缮改造再利用的创新技术，旨在为既有建筑石材立面改造过程中遇到的突出问题提供环保、低碳的更新方式、以节约绿色资源、延续历史记忆、修旧如旧，并将研发成果运用到实际项目中，通过技术成果转化形成可推广的城市更新产品，切实有效提升城市更新效率和质量。

2. BIM 技术应用概况

本项目旨在探讨既有建筑石材外立面的改造与再利用技术路线，重点关注立面改造过程中的各方需求与冲突，实现多方共享与协作。首先，我们将综合考虑建筑师对美观与历史记忆的追求，以及与周围环境的协调性。同时，业主希望和提高舒适度的前提下实现经济效益。此外，从社会责任的角度出发，我们积极响应政策号召，追求环保与低碳目标。

为实现这些目标，我们采用了一系列新技术与策略，强调立面设计中的利旧原则。研究围绕石材的坚固性和价值，注重施工方案的精细化，以确保其可操作性。最终，我们将抽象出四个关键环节：测、替、优、存，即数字化采集基础数据、新旧石材替换设计、优化石材切割方案、三维数字档案留存四个环节，形成一条较为完整的技术路线，以指导今后的立面改造实践。

3. BIM 技术应用成果与特色

3.1 测：既有建筑获取基础数据的关键技术创新——点云模型的石材数据结构化自动提取

既有建筑改造项目其改造工程，由于基础资料缺失以及大量现场与电子资料之间的信息冲突，导致项目难以评估，工程难度较大。面对此类问题，工程量难以评估的问题尤为突出，基于建筑信息建模（BIM）技术的数字成果有利于解决既有建筑的现状修缮评估难题。BIM 提供一个全面、精确的三维建筑模型，基于模型预判修缮工程量，帮助评估人员准确确定需要修缮范围和修缮策略，从而提高修缮评估的科学性和可靠性。同时作为施工和监督的依据，避免传统评估方法中因数据不全或不准确导致的成本超支。

目前从三维扫描点云数据到模型重建，仍然需要涉及大量的人工作业，包括点云数据处理、配准、人工测量、建模、校验。模型与数据的精准度往往受制于建模员的个人素质。

本项目通过融合多种三维激光扫描技术与点云算法开发，实现石材信息的数字化重建，并对数据进行结构化处理。基于三维激光扫描设备还原的建筑数字模型，结合空间属性、建筑高度、测量距离等要素分析，得到的高精度整合点云模型。基于图像识别自动化数据提取的点云算法，研发点云模型向设计模型数据转化的关键技术，将非结构化数据转换成结构化数据，通过结构化数据形成的 BIM 模型将省却大量人工建模时间，实现石材信息的自动化获取，提高数据采集的效率和精确度，大大降低人工成本。

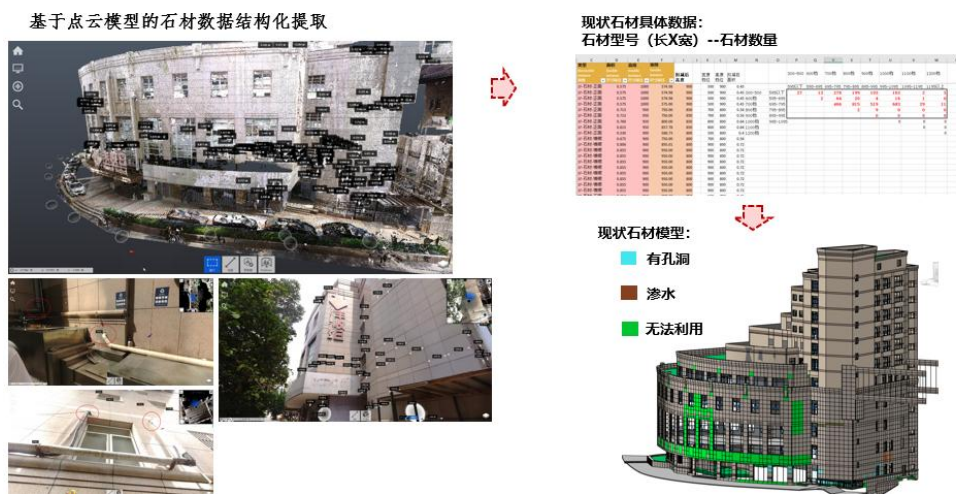


图 3-1 基于点云模型的石材数据结构化提取

3.2 替：既有建筑“新与旧”有效衔接的关键技术创新——智能切割匹配设计方案、实现最低损耗率

基于现状石材数据库，采用智能算法程序自动读取并处理现状石材数据，实现智能匹配与切割。基于现状石材数据库，通过参数化手段匹配设计模数，模型与数据联动参数化设计，提高工作效率，如图 3-2 所示。

为保证设计方案的科学性和合理性，以最低损耗率为目标，利用装箱算法不断循环，寻找损耗率最低的切割方案。这种创新方法提高了石材利用效率，减少了浪费，并且通过软件模拟和数据溯源，实现了石材编码与模型的绑定，提供了更高效的立面更新设计参考，如图 3-3、3-4 所示。并且，这项技术已申请获得软件著作权，如图 3-5 所示。

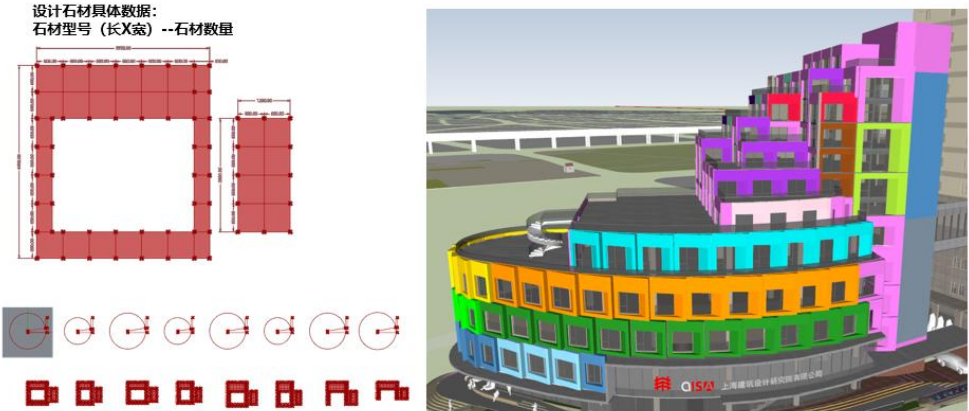
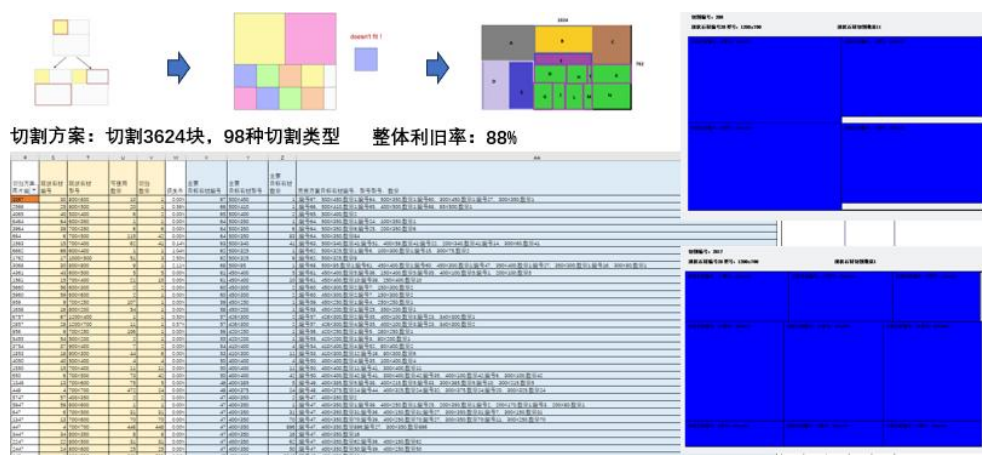


图 3-2 基于利旧石材数据模数的立面参数化设计



图 3-3 模型与数据联动



3.3 优：既有建筑实施精细化改造的关键技术创新——材料可视化追踪与管理

本项目强化了施工阶段承接设计成果的颗粒度,以促进建筑产业链的数据流通。通过石材编码与数据传递技术,可实现材料溯源,并且支持网页端对现状石材模型和设计石材模型的同步数据溯源和可视化操作。这一创新使得精细化项目管理成为可能,并且增强了施工阶段的透明度和可操作性,引领施工阶段精细化项目管理,如图 3-6 所示。

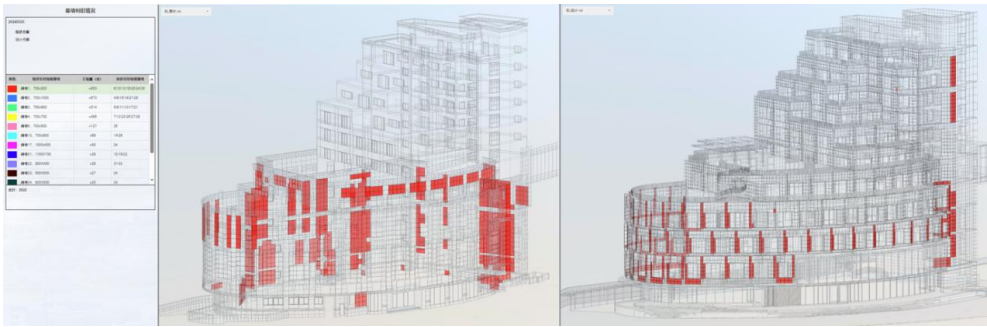


图 3-6 网页端对现状石材模型、设计石材模型同步数据溯源

3.4 存：既有建筑数字资产留存的关键技术创新——“纸电混合”三维数字档案

三维数字档案的创建与管理是确保既有建筑改造信息共享与协作的关键环节，旨在有效留存过程档案与结果档案，以促进各方的协同工作，提升项目管理效率。

过程留档是保证信息透明和沟通顺畅的重要手段。在项目初期，通过激光扫描和摄影测量技术获取现有建筑的三维数据，不仅可用于后续的设计与改造，还能作为施工过程中的参考依据。项目实施过程中，利用 BIM 协作平台，实时记录设计问题、设计意见以及设计变更等信息，并与模型进行关联，以数字化方式存储在云端平台上，确保所有相关人员能够随时访问，如图 3-7 所示。对于仍需保留一些关键的纸质文件，如会议纪要、审批文档等，将在项目结束后进行数字化处理，并与电子档案整合，形成完整的过程留档。



图 3-7 协同平台过程留档记录

结果留档主要集中在项目完成后的成果展示与总结，包括竣工模型、竣工影像（图 3-8）、施工报告与评估文档等。这些数据包含所有的改造信息（图 3-9），能够与后期的维护和管理相结合，并与三维模型相链接，方便未来的查询与使用。



图 3-8 竣工模型与竣工全景影像比对

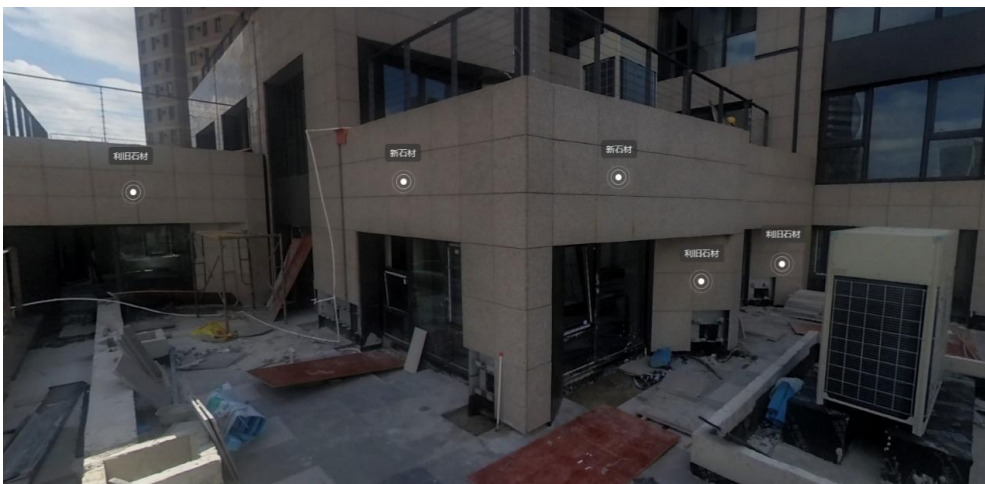


图 3-9 竣工全景影像信息

通过实施上述“纸电混合”的三维数字档案技术方案，我们能够实现项目过程与结果的全面留档，促进信息的高效共享与协作。这不仅提升了项目管理的透明度和可追溯性，还为未来的建筑改造项目提供了宝贵的经验积累和技术支持。

4. BIM 技术应用效益及测算方法

（1）技术成果：形成一套既有建筑立面利旧智能设计与精细化管理系统。完成石材立面保留与改造的关键技术产品研发。开发并推广基于点云模型的石材数据提取与分析技术。提供既有建筑石材立面修缮改造数字化管理工具和数据溯源解决方案。

（2）社会效益：提高利旧资源在既有建筑立面改造中的利用率，实现资源的优化利用和环境保护。

通过石材立面改造，保留和传承建筑记忆，恢复城市风貌。

节约资源，减少浪费，保护生态环境。

提升城市更新项目的精细化管理能力、设计施工质量和效率。

（3）经济效益：全面提升既有建筑立面改造的整体效率和质量。

降低石材采购和加工成本。

就地切割，减少材料运输成本。

创造新的市场机会，带动相关行业的发展。

5. BIM 技术应用推广与思考

BIM 技术可针对城市更新、历史建筑修复等市场需求，促进既有建筑的有效改造和再利用。它支持绿色建筑和生态城市的发展，推动数字化技术在建筑行业的应用，提升行业整体水平。未来，应进一步加强 BIM 技术的推广，使其在更多建筑项目中发挥作用，为建筑行业的可持续发展提供有力支持，同时不断积累经验，完善技术体系，以适应不断变化的市场需求和行业发展趋势。

十三、第十人民医院肿瘤精准诊疗中心项目

全过程 BIM+应用 “1+X” 模式

1. 项目概况

第十人民医院肿瘤精准诊疗中心项目位于上海市静安区延长中路 301 号第十人民医院院内。本项目是医院“十四五”基建规划重点项目、2025 年上海市重大工程。项目以“同济大学癌症中心”建设为基础，秉持“全程照护、精准医学、疗愈促进、韧性适应”的设计理念，打造集临床诊疗、基础研究以及转化应用为一体的肿瘤精准诊疗大楼。

项目通过拆除院内既有部分老旧建筑后新建，总建筑面积约 10.3 万平方米、总投资约 12.9 亿元，包括肿瘤精准诊疗中心大楼和院区连廊两个部分，其中大楼地下 3 层、建筑面积 2.2 万平方米，地上 23 层、建筑面积 7.8 万平方米，总高度约 99 米，设置床位 400 张，于 2024 年 12 月 28 日开工建设，计划于 2028 年竣工验收。

项目基于肿瘤中心的功能定位，从院区融合、周边协调的角度出发，以“守望光塔”为隐喻进行整体立面设计，代表守望相助，传达热情、关怀和可靠的理念，致力于打造令人信任的诊疗中心大楼，以及区域地标建筑，如图 1 所示。在充分分析医院周边环境和场地条件的基础上，统筹考虑“规划退界、建筑间距、消防救援、日照采光”等因素，以实现场地利用的最大化。以整体规划、可持续发展、绿色生态为原则进行设计，项目的建设有利于整合医疗资源，优化功能布局，彰显学科品牌，为打造以肿瘤中心为特色的大型、综合型和研究型医院奠定基础。通过合理安排功能布局，为肿瘤患者营造温馨、舒适的诊疗环境，凸显人性化的公共空间。



图 1-1 第十人民医院肿瘤精准诊疗中心项目效果图

2. BIM 技术应用概况

2.1 应用策略

本项目在 BIM 传统应用基础上，根据医院建设项目全生命周期管理特点，结合肿瘤医学中心医疗特色与现有项目场地紧凑、流线交织、新建与拆除共存、周边环境复杂等特点，构建全周期整体规划、专题创新的“1+X”BIM 应用模式。

“1”代表 BIM 基础应用，基于上海市住建委、中国医院协会、上海申康中心等规范、指南文件中的 BIM 应用，包括各阶段基础建模、管线综合、净高分析、施工模拟、仿真漫游等一般性 BIM 常规应用点。

“X”代表针对项目特色和功能需求的 BIM 专题应用，结合项目复杂性及建设目标，为解决设计、现场、创优中面临实际问题所进行的医院全生命周期碳排放预测、交通组织、医疗工艺流程仿真等创新专题应用。

通过构建 BIM 基础框架叠加专题应用创新，聚焦于解决项目建设中复杂医疗工艺流程与有限建筑空间的矛盾、特殊医技设备需求与传统建造标准的矛盾、持续功能需求与建筑布局固化的矛盾等，形成可复制、可推广的医院建筑全生命周期 BIM 建设解决方案。

2.2 组织建设

2.2.1 组织架构

结合项目实际情况，本项目采用以业主方主导和驱动，BIM 咨询单位总体组织与协调，各核心参建单位协同的融合应用模式，项目组织架构如图 2-1 所示。在项目成立初期通过招标及合约方式明确主要单位、专业的工作界面及要求，以项目筹建办为核心，BIM 全过程咨询统筹，设计、总包以及监理核心参建单位团队协同的深度融合，借助协同云平台集成各参建单位为一体，创新与务实相结合，建设全生命周期绿色智慧医院。

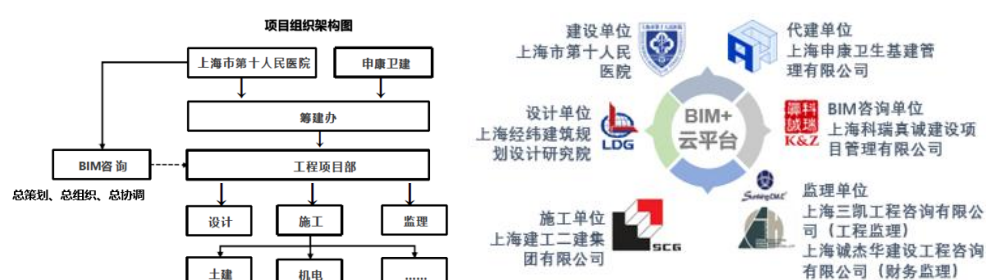


图 2-1 项目组织架构图

2.2.2 BIM 管理体系总体思路

BIM 技术的应用是建筑信息化、数字化集成的过程，建筑信息模型深度应当满足 BIM 应用过程的要求为准，针对项目中不同阶段使用的 BIM 模型，确保满足各个阶段各应用点的深度要求。本项目主要依据《上海市建筑信息模型技术应用指南》（2017 版）、《建筑信息模型施工应用标准》《医院建设工程全生命周期 BIM 应用指南》（2024 版），《上海市住房与城乡建设管理委员会关于在本市试行 BIM 智能辅助审查的通知》沪建建管（2023）668 号文等相关国家、地区、行业标准规范，通过项目实际应用，形成了一套从建立标准、模型维护、沟通机制到数字化交付的完善流程。并结合业主针对项目特定需求所提要求，以满足项目推进需求，解决工程实际问题。

2.2.3 BIM 应用环境

根据类似医院项目中基于 BIM 技术的运用形成一整套具有 BIM 产品的通用性且基于项目工程管理信息化需求的应用平台。本项目全过程信息化管理平台应用环境如图 2-2 所示。



图 2-2 项目全过程信息化管理平台

经过认真比选，本项目基础模型应用环境主要选用 REVIT 系列软件作为基础建模软件并配合其他相关专业应用软件如 SU、Tekla、PKPM、红瓦等，以确保项目达到基本应用标准。考虑项目专题应用需求，在绿色低碳分析、交通流线、医疗工艺仿真等创意应用，创新性结合虚实数据融合的医院全生命周期碳排放预测方法、基于智能体仿真的医院交通流线组织仿真技术、基于人群仿真的医疗工艺流程设计与优化等专业方法与技术。

3. BIM 技术应用成果与特色

根据医院建设项目生命全周期管理特点，结合肿瘤医学中心医疗特色与现有场地条件，制定了本项目 BIM 应用实施目标，结合项目场地紧凑、流线复杂等特色，在设计、施工、竣工移交运维阶段共规划了 58 个（细分 83 个）BIM 技术应用点。如图 3-1 所示。



图 3-1 全过程 BIM+应用“1+X”模式总体实施内容

此次案例报告选取项目部分典型常规性应用点，以及三大重点特色创意专题应用，进行展开说明。

(1) 场地摸排及绿化搬迁模拟分析

通过现状场地调研及摸排、更新场地现状模型，结合绿化搬迁方案，进行碰撞分析。如图 3-2 所示，提前发现绿化移栽与地下管线问题，避免开挖移栽时与既有管线碰撞，为后续施工阶段围挡、施工临时场地空间分析做好铺垫为既有院内管线搬迁、改造打好基础。

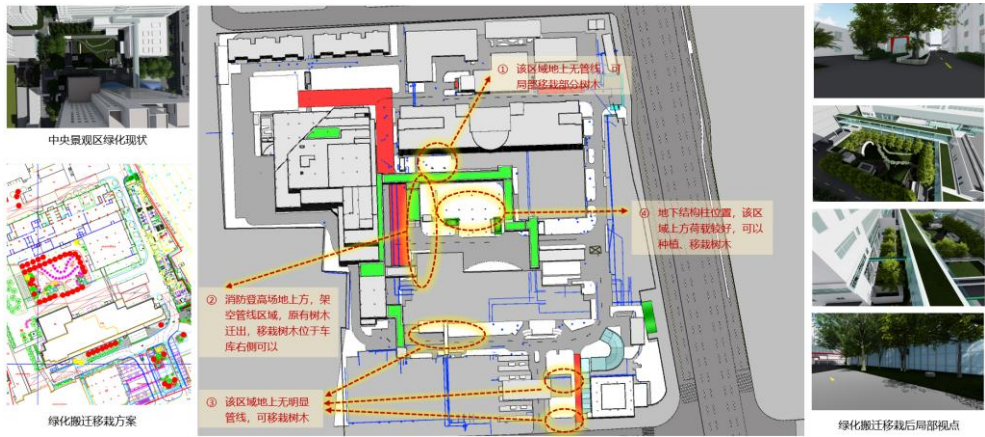


图 3-2 场地摸排及绿化搬迁模拟分析

(2) 消防扑救覆盖范围模拟

针对项目建筑消防登高场地扑救方案，经与消防核查单位沟通调研，选择国内主流消防车尺寸，进行登高吊车旋转半径覆盖范围模拟，确保满足规范要求的消防安全性。如图 3-3 所示，以建筑图纸所设置消防扑救面 A 为例，通过 BIM 模型建立不同类型登高吊车对建筑进行扑救模拟。

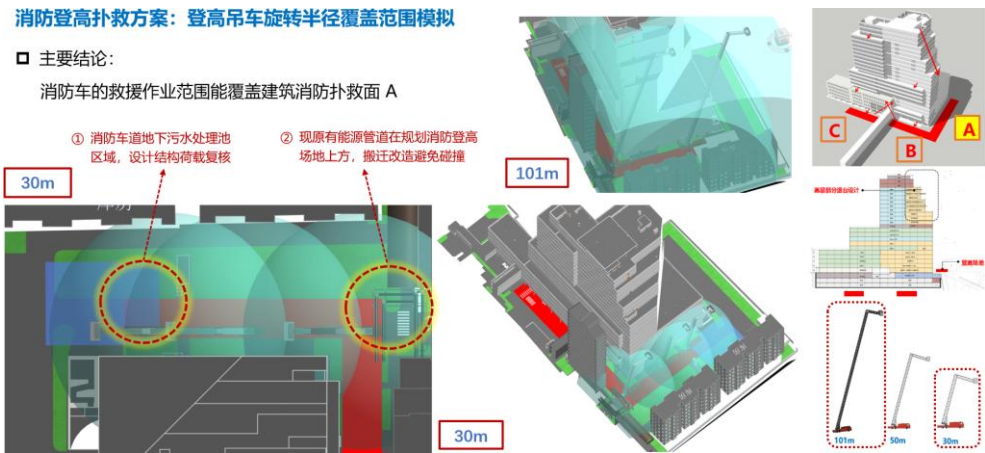


图 3-3 项目主要消防登高扑救场地及不同类型消防登高吊车模拟

通过模拟发现 101m 登高平台消防车结合 30m 登高消防车可对项目进行扑救，消防车的救援左右范围能够覆盖建筑消防扑救面 A。并针对消防车道所在区域与地下污水处理池区域重合，提醒设计复核结构荷载；原有建筑能源管道在规划消防登高场地上，建议搬迁改造以避免上覆管线碰撞，以确保满足规范要求。

（3）大型医疗设备场地分析

建筑平面布局中地下放射、放疗科，也往往会设有停车库、电缆、钢柱等，通过模拟发现受影响的移动铁磁性物体，如机械车库、钢柱在受干扰范围内（0.5mT），从而优化设计平面布局。如图 3-4 所示。

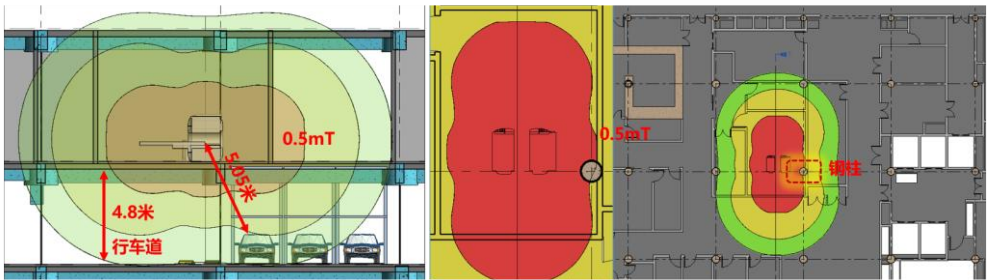


图 3-4 大型医疗设备场地放射性辐射屏蔽范围分析（B1F MRI）

（4）典型医疗空间 BIM 效果模拟

结合设计建筑平面施工图纸，提前与医疗工艺设计团队、科室进行沟通，通过模型表达室内点位布置、三级医疗样板间科室空间感模拟。如图 3-5 所示。



图 3-5 典型医疗空间 BIM 效果模拟（标准诊室）

3.1 特色亮点：绿色低碳 BIM 专题应用

本项目秉承绿色可持续的发展理念，将绿色生态理念贯穿到整个方案推演过程中，切实提高建筑品质，既为医护、病患提供高品质的室内外环境，也为医院运行的低能耗打下基础。项目以“绿色二星”为基本设计要求，主动式策略为主、被动式为辅，对标“绿色三星”标准，并局部尝试 WELL 绿色评价体系，打造高品质、高舒适、低能耗的绿色建筑。通过全过程的可持续设计切实改善建筑室内外环境品质，提升周边生态环境品质，提供建筑能效，实现高效、舒适、节能运行。

BIM 技术结合设计、施工及运维管理全过程应用主要体现在设计阶段的建筑性能分析和协同医疗流程设计，施工建造阶段的节地与室外资源、节能与能源利用、节水与水资源利用、节材与材料资源利用、室内环境质量（建筑“四节一环保”）、施工管理以及运维管理等三大方面。本项目绿色低碳 BIM 专题应用整体框架如图 3-6 所示。BIM 技术在绿色建筑中，结合设计、施工及运维管理全过程应用进行规划。

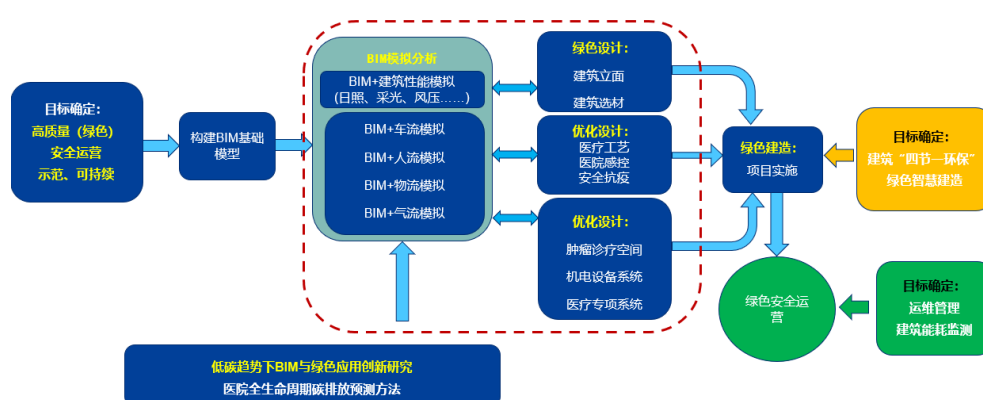


图 3-6 绿色低碳 BIM 应用整体框架

虚实数据融合的医院全生命周期碳排放预测方法：

当前建筑全生命周期碳排放测算方法未考虑医疗卫生领域建筑的特殊性。与此同时，医院 24 小时运行且大型医疗设备繁多，使其建筑能耗问题突出，为公共建筑平均能耗水平的 2 倍以上，节能需求迫切，需要针对医院建筑开发针对性的碳排放模型。而医疗建筑全生命周期时间跨度长和数据来源获取等难点，使得绝大部分计算需要采用虚实结合的方式才能测算。

（1）时间维度数据测算的虚实融合：基于现有数据，通过引入动态调节因

素等方式预测将来时间节点的碳排放量。

(2) 数据来源维度的虚实融合：通过实际数据的计算（如耗能、工程量等）和未来数据的模拟测算（例如更新改造或者不同方案的预计耗能）

本项目使用了虚实数据融合的酒店全生命周期碳排放预测方法进行研究实践，整体计算思路与流程，如同 3-7 所示。

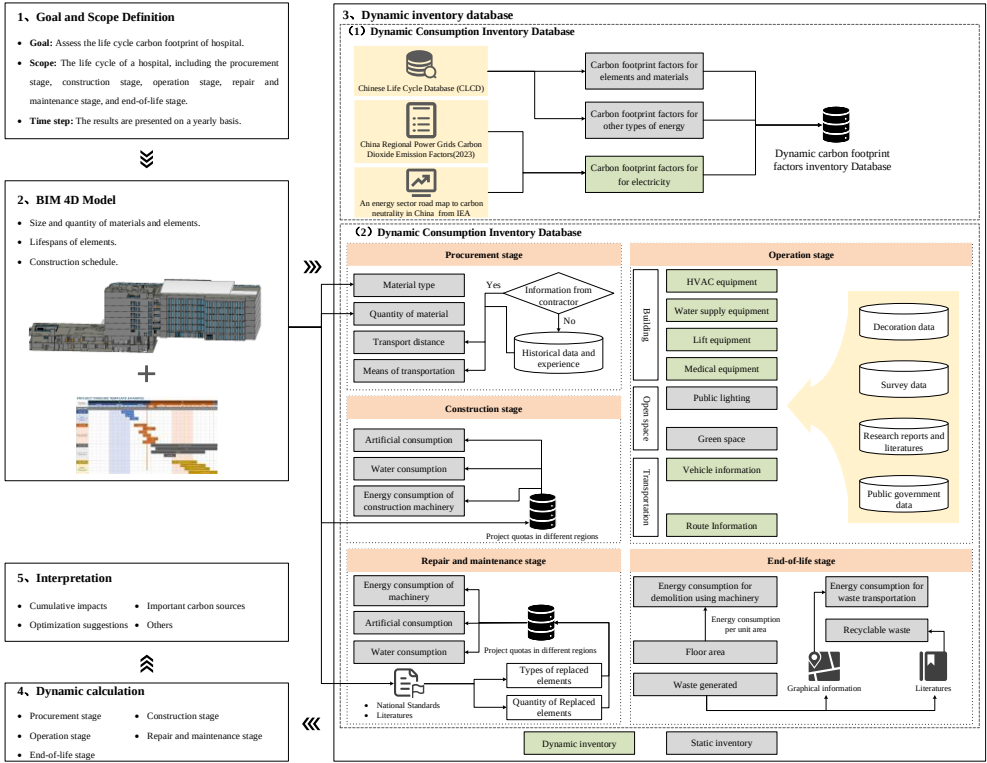


图 3-7 整体计算思路与流程

以项目临近急诊楼建筑为案例进行计算测试，全生命周期碳足迹构成：碳足迹可分为隐含碳（28.99%）、运营碳（65.2%）和拆除碳（5.9%）。隐含碳主要来自生产阶段（25.7%），凸显建筑材料的高碳排放。运营阶段是运营碳主要来源，占比达 61.3%，其中维护更新阶段仅占 3.8%，如图 3-8 所示。

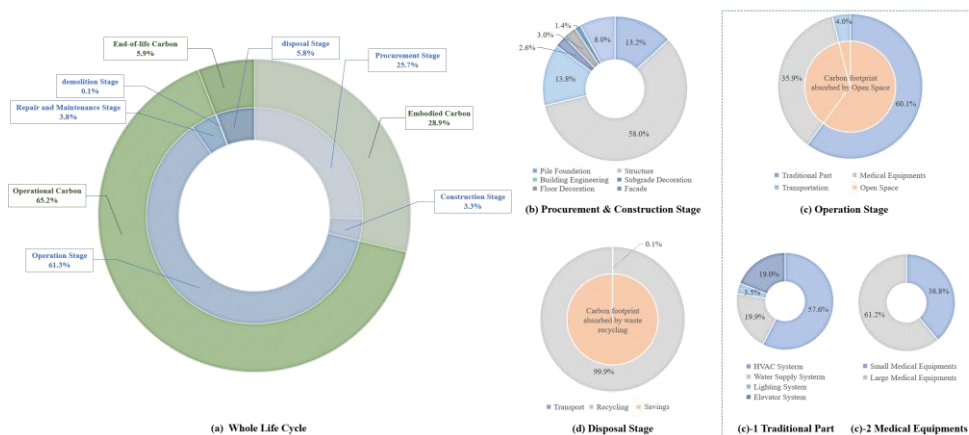


图 3-8 虚实数据融合医院全生命周期碳排放预测方法计算结果

运营阶段碳排放是全生命周期的主体，因此降低该阶段的能源消耗是碳减排的核心任务应特别关注能源效率提升和节能技术的应用。

3.2 特色亮点：交通流线组织仿真专题应用

基于人群仿真的医院交通流线组织仿真实施框架如图 3-9 所示。

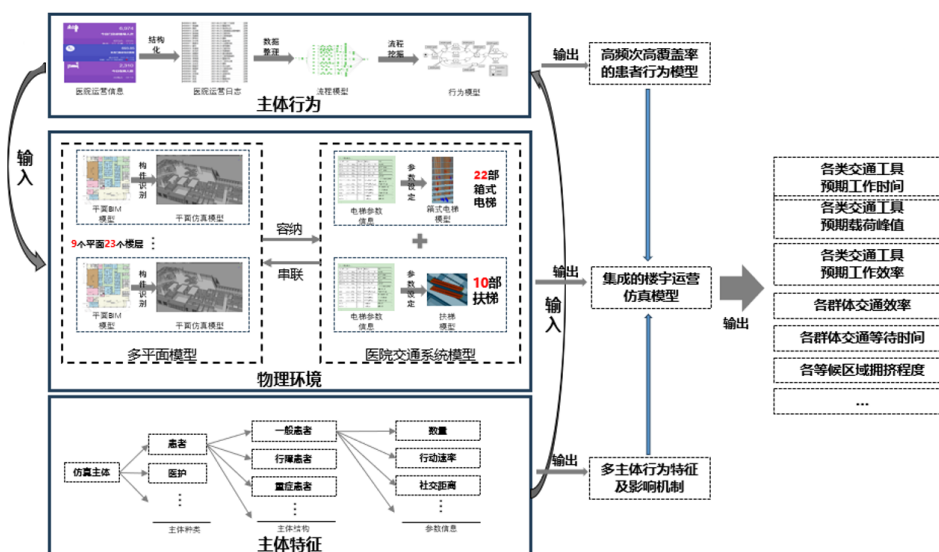


图 3-9 基于人群仿真的医院交通流线组织仿真实施框架

基于 BIM 的可视化和参数化特性，在 Revit 软件平台上构建医院的院区场地建筑 BIM 模型，如图 3-10，院内现有停车位区域分布模型，如图 3-11，进行简单渲染后，以 ifc 的格式导入 massmotion 软件，然后将院区所有的交通道路以及相关信息，如车的数量、在各条道路各个转角的速度变化、车辆在多条道路的走向选择、新规划的院内交通模式。

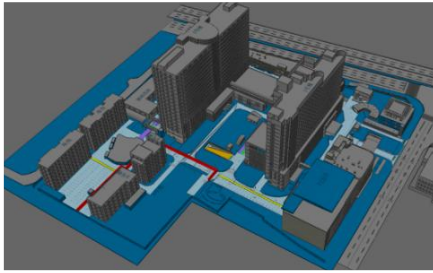


图 3-10 院区建筑场地 BIM 模型

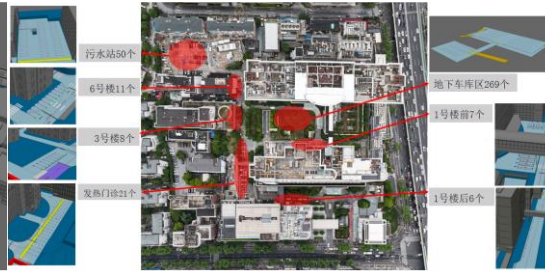


图 3-11 院内现有停车位分布模型（372 个）

通过交通模拟研究，可优化交通流线，并将交通模拟成果分析各阶段主要拥堵点，用于指导院区交通管理。如图 3-12 所示，结合日常出入口管理，预设出入口处等待开放闸/缴费的时间为延长路出入口 5min，共和新路出入口 3min，建好模型，创建 2000 个车辆按照流线进行车辆流线模拟，模拟结束后有 1960 辆车完成模拟，还有 340（包含初始值 300）辆车仍停留在模型中，模拟发现如图 3-10 所示，延长中路的门口将会存在车辆拥堵的风险。



(a) 交通组织密度图

(b) 拥堵节点（延长路）

图 3-12 前期拆除阶段 BIM 交通流线组织仿真模拟

从而基于 BIM 模拟分析，提前采取相应交通管理措施，优化施工阶段交通流线布局，确保施工工作顺利进行，为新建肿瘤精准诊疗中心项目的建设奠定良好基础。

3.3 特色亮点：医疗工艺流程仿真专题应用

基于人群仿真的医疗工艺设计与优化，针对项目设计阶段平面布局 2F 一站式服务中心医疗工艺流程线模拟。图 3-13 中所示初始无等待区设置时，挂号/收费

窗口，人流密集度大量集中于连通门诊楼连廊、自动扶梯区域及排队区域，带来不便经分析，建议在挂号/收费窗口处设置分块等待区来缓解人流压力。

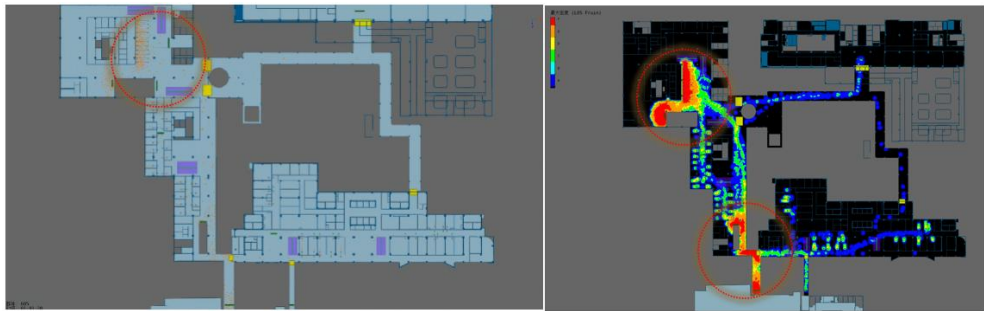


图 3-13 2F 一站式服务中心人群仿真模拟动态模型及最大密度图（优化前）

图 3-14 中所示更改有等待区设置后（浅红色位置），原连廊连通处、自动扶梯以及挂号排队处人流密集区域明显减少，主要人流集中在设置的等待区中，对于建筑内其他流线的交叉影响降低，设计在后续图纸更新中已优化该区域布局。

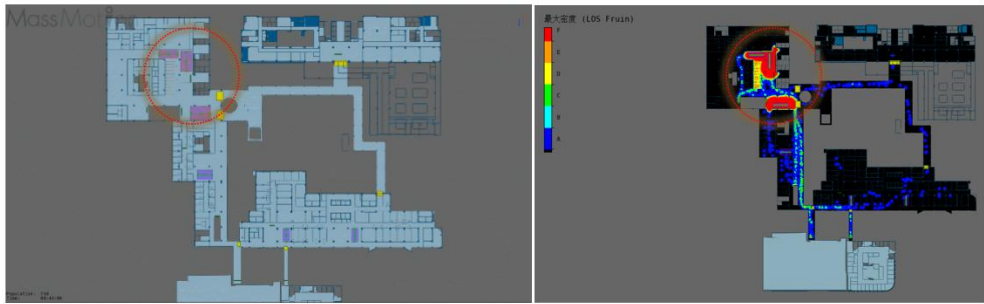


图 3-14 2F 一站式服务中心人群仿真模拟动态模型及最大密度图（优化后）

4. BIM 技术应用效益与测算方法

4.1 设计管理精细化

利用 BIM 的三维可视化和数字化技术，以及人流、物流和工艺模拟分析技术，通过方案论证集成会议，运用动线漫游、设施设备虚拟运行展示和渲染效果模拟的方式、结合医疗工艺流程特点，并充分吸收医院管理方、各科室专业人员、后勤运维团队、代建方、设计方和设备供货方等相关单位的意见和建议，优化设计成果，实现价值工程和多方案可视化比较，进一步提高医院决策方案的科学性，减少后期重大变更，充分体现全生命周期和最终用户需求的建设理念。同时以技术的手段检查设计质量，整合各系统因子，避免因人为因素导致的各种错漏碰缺，为后续施工过程的顺利开展，控进度控质量控投资保驾护航。

4.2 施工管理精益化

通过设计阶段 BIM 模型的传承应用，坚持先模拟后施工的原则，从施工组织设计开始提前预演各类施工方案，最大化发挥 BIM 的模拟分析和虚拟建造作用，避免现场的返工和窝工。梳理各阶段施工组织中的风险防控点并研究应对预案，提升现场的安全管理；针对 MRI、CT 等大型医疗设备，提前规划安装路径，确保施工合理性；进一步落实医疗三级流程，将需求明确并落实到钢结构构件的制作和预留预埋，确保后续的实际应用；全过程施工模型、专项施工方案进行可视化模拟和交底，避免现场的安装混乱而导致的质量问题；对分部分项工程进行阶段性的工程量计算，以精确过程的造价控制等。

4.3 平台应用信息化

医院建筑全生命周期过程中，既涉及设计、施工、监理、造价等工程各参建单位，又涉及到医疗系统、医疗设备、手术室等医疗特有设计、施工及供应单位，也涉及到后勤、基建/总务、安保、各科室、医院决策和管理层等医院各职能部门，还涉及到发改、交通、规划、消防等政府审批部门，有效的基于 BIM 的项目管理协同平台的应用，使得各参建单位基于同一个项目管理平台，实现信息集成共享、各专业协同工作。信息平台以 BIM 三维模型作为信息载体，可视化展现各阶段变化；利用移动互联网技术和智能终端设备，实现现场数据信息采集；利用云计算和云存储技术实现项目各参建方协同工作，将各参与方的信息有效集成起来，进行信息数据的交换和传递，实现工程项目信息的集成与共享。为精细化的项目管理提供技术保障。

4.4 院区模型资产数字化

院区的数字化模型资产是后续智慧医院运维管理的基础。工程竣工后，将 BIM 模型进行运维化处理直至其能表达实际建筑的正确信息，并删除施工过程中输入的冗余信息，根据运维需求保存需要的建筑设备等信息，形成运维模型。在后续运维阶段，可以利用模型与医院将来基于 BIM 的智慧运维平台相结合，实现定位建筑设施设备构件、数据交换、决策建议、日常检查维护支持、建立和升级数字资产管理、空间分析及管理、设施设备运行监控、危机管理、能源控制与监测、BAS 或其他系统的智能化集成等。

5. BIM 技术应用推广与思考

（1）**提升医疗设计效率质量**，借助 BIM 可视化与协同设计，优化复杂医疗功能区域布局，减少设计冲突，确保医疗流程高效合理，提升设计精度与施工质量。

（2）**助力绿色低碳医院建设**，通过能耗分析与环境模拟，优化医院建筑采光、通风和能源使用效率，提升患者舒适度，体现人本理念，助力打造绿色低碳的医疗建筑。

（3）**强化医院韧性适应能力**，优化医院交通动线，增强医院对多场景需求适应性，构建安全高效的医院韧性体系。

（4）**驱动医院智慧运维管理**，集成建筑、设备、医气等海量信息，融合大数据人工智能技术，驱动医院建筑与设施智慧运维管理，降低运营成本，保障医疗环境安全。

十四、国家文物保护利用示范区优秀历史建筑群 保护修缮与功能提升关键技术

1. 项目概况

杨浦滨江见证了上海工业的百年发展历程，是中国近代工业的发祥地。被称为“中国近代工业文明长廊”，也曾被联合国教科文组织称为“世界上仅存的工业锈带”。2020年9月，上海杨浦生活秀带国家文物保护利用示范区入选首批国家文物保护利用示范区创建名单。2021年国家文物局审核通过《将“工业锈带”建设成为“生活秀带”——上海杨浦生活秀带国家文物保护利用示范区建设实施方案（2021—2023年）》，该实施方案提出明确要求：要将“工业锈带”建设成为“生活秀带”，围绕杨浦滨江优秀历史建筑群保留历史风貌，提升综合功能的需求开展优秀历史建筑群的保护修缮、结构加固以及室内装饰功能提升综合技术的研究，实现通过历史建筑绿色更新成就人民美好生活的愿景。

项目杨树浦路670号原为英商怡和纱厂，位于国家文物保护利用示范区内，坐落于杨浦区滨江历史产业建筑群落，北临杨树浦路，南临黄浦江，东至现杨浦自来水厂扩建厂区（原正螺旋织厂），西至上海船厂修船分厂地块（瑞容船厂），地块面积48768平方米。基地内有6处挂牌的“上海市优秀历史建筑”，其中厂房、英老板住宅、废纺（坊）车间、大仓库的保护级别为三类，空压站、仓库保护级别为四类。杨树浦路670号作为“工业锈带”的重要组成，拥有上海市最大体量清水墙建筑，保留有上海市较早期的工业建筑群，其屹立在黄浦江沿岸见证着民族工业的风风雨雨。修缮后也将继续展现新时代工业遗产的美好新生。



图 1-1 杨树浦路 670 号效果图



图 1-2 杨树浦路 670 号实景图

2. BIM 技术应用概况

2.1 应用策略

本项目中，严格遵循“修旧如故”的修缮团队，为解决项目原始图纸缺失、结构复杂、花式排砖损耗大等问题，项目团队通过研发和集成应用传统工艺、数字化技术、智能化装备等，配合项目部建立了一套覆盖数字化勘察、数字化深化、数字化加工、数字化修缮的可落地、技术领先的优秀历史建筑群全要素数智化保护技术体系，包括无接触式数字化全局勘测、AI 智能劣化识别、你想建模及孪生迭代技术、多轴数控加工等多个应用阶段及应用维度，实现了前沿数字化技术与高端智能装备在历史建筑保护中的融合应用，实现历史建筑保护行业创新发展。

2.2 组织建设

2.2.1 组织架构

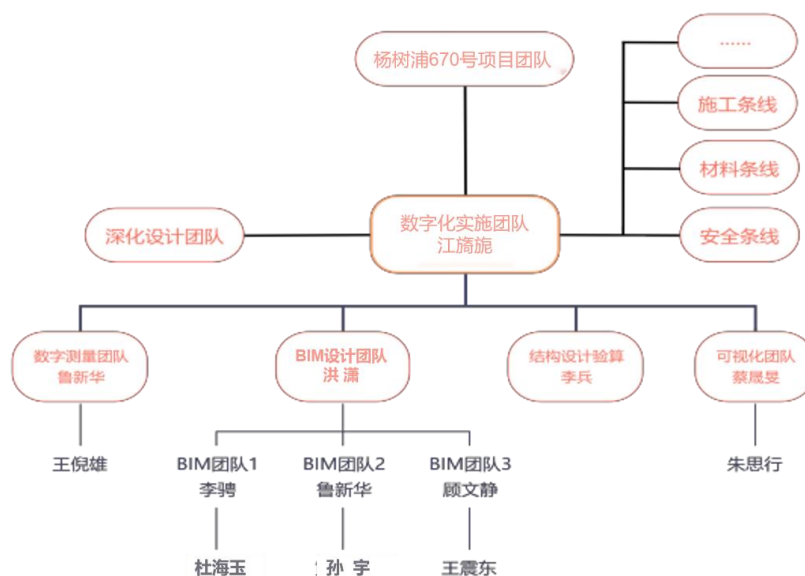


图 2-1 项目组织架构图

2.2.2 BIM 管理体系总体思路

依据《上海市建筑信息模型技术应用指南》（2017 版）、《建筑信息模型施工应用标准》《建筑工程设计信息模型制图标准》《BIM 实施应用手册》，通过项目实际应用，形成了一套从建立标准、模型维护、沟通机制到数字化交付的完善流程。

2.2.3 BIM 应用环境

在三维扫描测量、BIM 设计、参数化建模、数控加工、施工模拟、智能施工、数字管理全过程应用数字化和智能化建造技术，针对性解决成都科幻馆项目重难点问题。如图 2-2 所示，除常规硬件配置，本项目根据科幻馆特色，配备了全站仪、三维扫描仪、go pro 等设备，同时在软件上，也使用了参数化软件和自主研发插件系统用于细部深化。



图 2-2 BIM 软硬件应用环境

3. BIM 技术应用成果与特色

3.1 数字化勘察

在 BIM 建模之前，需采集片区内 6 栋历史建筑的精确信息以保证模型建立的准确性，因此在 BIM 工作开展初期，项目重点研究无损勘察技术，保证数据高效搜集，并为后期模型搭建提供数据支撑。通过基于无人机倾斜摄影的外立面全局勘察和基于三维激光扫描的高精度数字化测绘技术，实现了对历史建筑全貌和细节的高效、精准记录。此外，有限元模拟技术用于确保复合木作整体结构安全性，图像识别技术用于清水砖墙劣化的实时监测，进一步提升了数字化勘察的全面性和准确性。

3.1.1 基于无人机倾斜摄影的外立面全局勘察技术

杨树浦路 670 项目建筑外立面勘测作业的重难点包括周期长、效率低、场地要求高、人力物力投入大、数据成果单一等问题。传统方法要求在建筑外部搭设脚手架进行人工测量，而文物保护建筑外立面损伤具有多样性、隐蔽性、随机性特点，前期病理诊断不准确可能对最终修缮效果产生不利影响，甚至对历史建筑造成不可逆破坏。

针对此类问题，项目数字建造团队决定研究应用倾斜摄影技术，实现了外立面高精度三维快速实景重构以带来更直观、更立体的实际劣化勘察结果展示的同时还提取了高分辨率正射影像数据以供后续图像识别训练使用。为企业的多维度信息化及数字化发展提供了新的思路。



图 3-1 BIM 倾斜模型示意图



图 3-2 正射影像示意图

3.1.2 基于三维激光扫描的高精度数字化测绘技术

面对历史建筑修缮复原工程中多遇的历史建筑图纸保存丢失或不完整的问题,为了确保在修缮过程中能够获得高精度的数字模型,团队采用三维激光扫描,以无损、非接触的方式获取历史建筑的真实几何信息,为后续的建模和分析提供了可靠的基础。该种测绘方法不仅能够弥补历史建筑图纸的缺失,且能够为复原工作提供更为精确和全面的数据支持,为历史建筑的保护和传承提供了有力的技术支持。

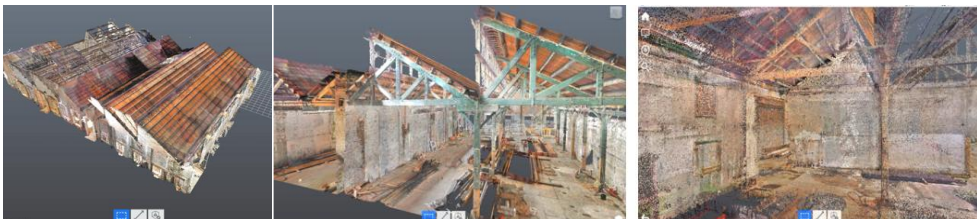


图 3-3 项目点云模型示意图

3.1.3 基于图像识别的清水砖墙劣化分析技术

针对项目量大面广的清水砖墙外立面裂化情况勘探分析工作,项目数字建造团队联和研发训练了基于计算机视觉与图像学习的清水砖墙外立面劣化程度

AI 智能识别大模型，通过在项目中所获取的海量砖面典型劣化影像进行标注与计算机图像学习模型训练，实现对无人机外立面正射影像进行批量的智能目标识别，快速显示各区域砖面裂化程度提升 34% 的勘察效率，消除人为主观判断影响，此外依据所识别砖面劣化程度不同可进一步匹配砖粉修补、砖片镶贴与整砖镶砌三种对应修缮方式，高效辅助完成初期清水砖墙外立面修缮方案制定。



图 3-4 清水砖墙劣化识别训练样本&劣化识别应用示意图

3.2 数字化设计

基于前期多源数据的搜集，建立项目 BIM 模型，并结合模型围绕历史建筑修缮开展全方位应用：将修缮全过程的木作构件信息实时同步进基于多源异构数据融合的逆向建模模型，实现 BIM 模型的孪生迭代应用。通过有限元数值仿真模拟，验证修缮结构的承载性能。对于清水砖墙外立面上复杂化花式，采用 GH 电池组中的遗传算法计算最优排布，确保数字设计的深化效率和材料的最大利用。

3.2.1 基于多源异构数据融合的逆向建模及孪生迭代技术

项目数字建造团队借助无人机倾斜摄影技术采集外立面全局数据，并使用架站式三维激光扫描仪获取修缮区域内的高精度点云数据。将两者数据进行巧妙融合，通过逆向复建技术重构出历史建筑的三维信息模型。同时，团队将重构模型与史料图纸相结合，拆解明晰了木作的各部分结构、榫卯接头以及拼接关系，实现了对历史建筑结构和外观的高度还原。

此外，团队将历史建筑的模型信息与修缮全周期中的建筑信息相互同步。使得建筑信息能够在修缮过程中实时更新，并随着实际修缮情况的变化不断迭代。通过数字技术的融合应用，不仅实现了对历史建筑的精准复原，更为其后续修缮与管理工作提供了可持续的数字支持。

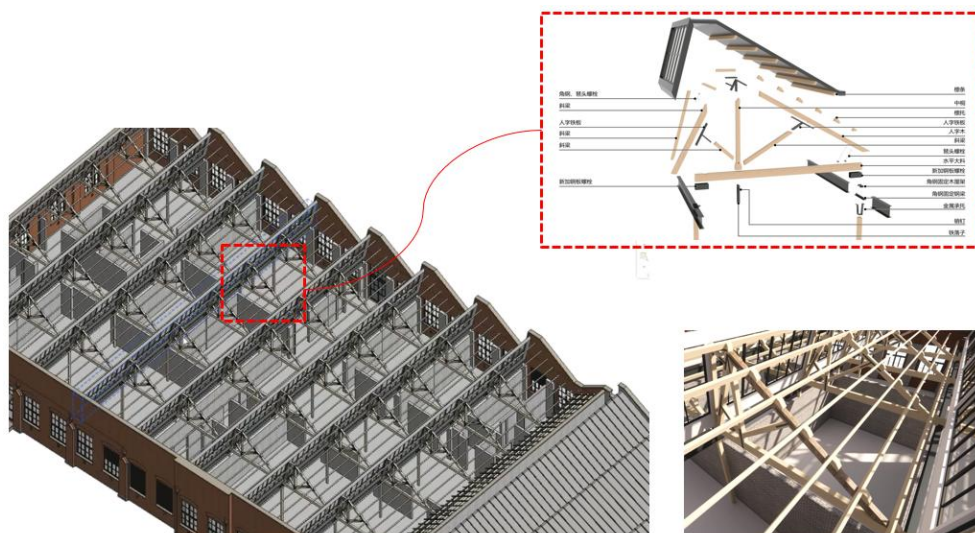


图 3-5 基于多源异构数据融合的逆向模型及孪生模型材料迭代示意图

3.2.2 基于多参数优化算法的人工智能辅助深化设计技术

针对历史建筑清水砖墙外立面复杂花式砖块排版的问题，项目数字建造团队采用 Grasshopper 编程的方法，通过定义适应度函数，量化每种排布方式的优劣，使遗传算法能够迭代搜索最优解。同时，结合 Grasshopper 内置的参数化设计能力，有效地控制切割角度，实现了最佳加工切割方案的自动推导。这种基于 Grasshopper 编程和遗传算法的方法极大的提高了排版效率，并为复杂建筑表皮设计提供了智能化和创新性的解决方案。

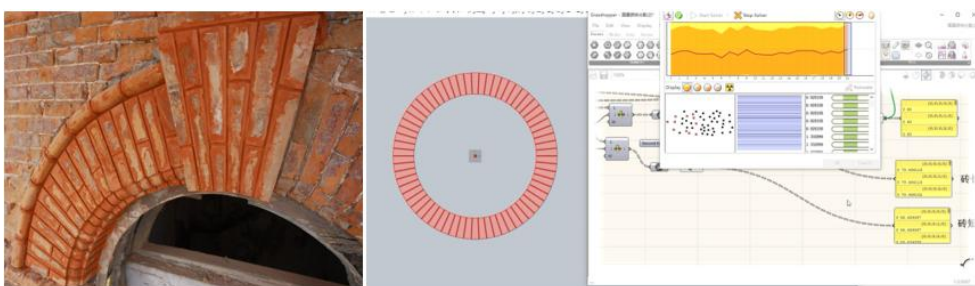


图 3-6 基于 Grasshopper 电池组生成花式排版示意图

3.2.3 基于数值仿真模拟的历史建筑结构安全性复核技术

为保障历史建筑木作修缮安全，基于 BIM 模型项目数字建造团队运用 ABAQUS 软件进行受力仿真模拟，以评估木作体系的结构安全性。模拟前，团队对木材进行树种材质分析、资料查询和取样试验获取了该木材的应力应变本构关系。同时，对复刻的孪生模型进行简化处理，设定受力情况、接触条件和网络划分，以进行准确的受力仿真模拟评估。

分析结果显示，木作结构连接处应力较为集中，所受应力较大，但总体仍在安全可控范围内。根据此计算报告，团队对项目中的木作危险部位进行了局部包夹钢板的加固处理，进一步提高项目的安全性和可靠性。

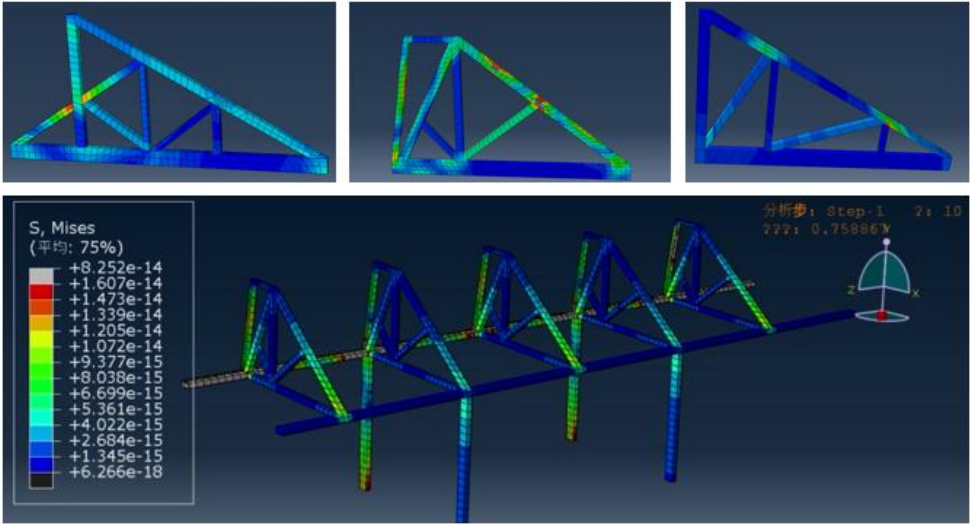


图 3-7 木作体系受力分析应力云图

3.3 数字化修缮加工

在修缮施工阶段，应用 BIM 相关数据，进一步辅助现场施工：通过对重点空间的工艺模拟，实现工艺可视化辅助现场施工；基于 BIM 模型建立协同管理平台，实现方案的可视化交底和查看；基于前期数据，采用基于多轴数控雕刻的复杂构件工业级精密加工技术，主要应用于花式砖块的加工切割，提高了数字化加工的精度和效率。

3.3.1 高拟真工艺仿真模拟技术

针对木作复原修缮工作的高度复杂性和细致性要求，项目数字建造团队对榫卯结构的特性进行深入研究并充分考虑其安装顺序和所需空间，采用基于孪生模型制作出的仿真工艺模拟来指导施工。高拟真工艺仿真模拟能够直观的展现木作复原修缮的全过程，确保修缮工作的顺利进行，避免返工或安装顺序错误导致无法顺利插接的情况发生。

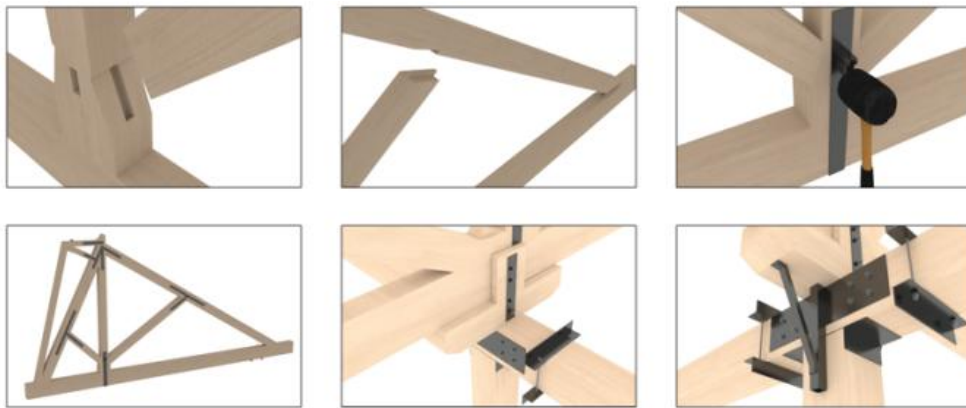


图 3-8 高拟真工艺仿真模拟示意图

3.3.2 基于多源异构融合的重点空间数字化辅助修缮施工技术

针对项目修缮施工中，各种信息分散，难以进行有效整合、不同专业人员之间的信息沟通困难、施工决策缺乏数据支持等问题，将施工方案录入 BIM 模型，构建研发历史建筑多维智慧协同管理平台，开发应用管理小程序，将历史建筑的模型信息与修缮全周期中的建筑信息相互同步。使得建筑信息能够在修缮过程中实时更新，并随着实际修缮情况的变化不断更新，实现施工高效交底，增加团队协作配合。通过数字技术的融合应用，不仅实现了对历史建筑的精准复原，更为其修缮与管理工作提供了可持续的数字支持。

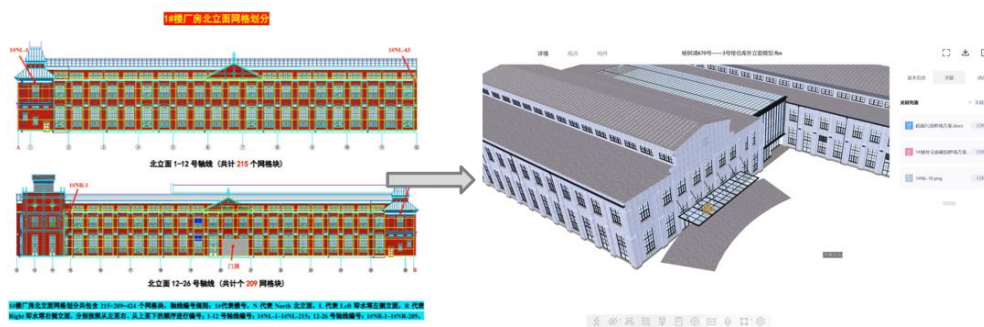


图 3-9 线上协同管理平台



图 3-10 协同管理小程序

3.3.3 基于智能数控雕刻的异形砖批量化工业级精密加工技术

针对清水墙复杂花饰修缮往往需要对大批量异型砖块进行加工切割，传统人工切割加工方式效率低、难度大、精度差、成本高等问题，项目团队结合模型数据采用基于智能数控雕刻的异形砖批量化工业级精密加工技术，实现全项目约 400 块异型砖块精细化加工生产、加工过程统一批量标准化，与传统工人使用加工台相比，减少材料损耗约 150%，较少工地环境污染约 200%，提升工作效率约 130%。



图 3-11 智能雕刻机器人

3.3.4 基于 BIM 的智慧运维管理体系

针对历史建筑保护修缮项目数据信息错综复杂管理难度大、修缮及维护信息传续和流转效率低、利用率差及管理粗放等问题，建立历史建筑保护修缮全过程信息化数据库，基于 BIM 数据创新研发历史建筑修缮多维智慧工地管理平台，为项目综合管控提供数据支撑，辅助科学决策，以数字创新赋能历史建筑精细化保护修缮；通过现场 AI 隐患识别监控技术，及时弥补人为管控盲区，保证施工现场的动态安全；通过现场奔云闸机人脸识别，有效管理现场施工及其他人员；对重点保护部位修缮工艺，建立全过程视频图像记录数据库，为后续建筑的运维管理提供依据。

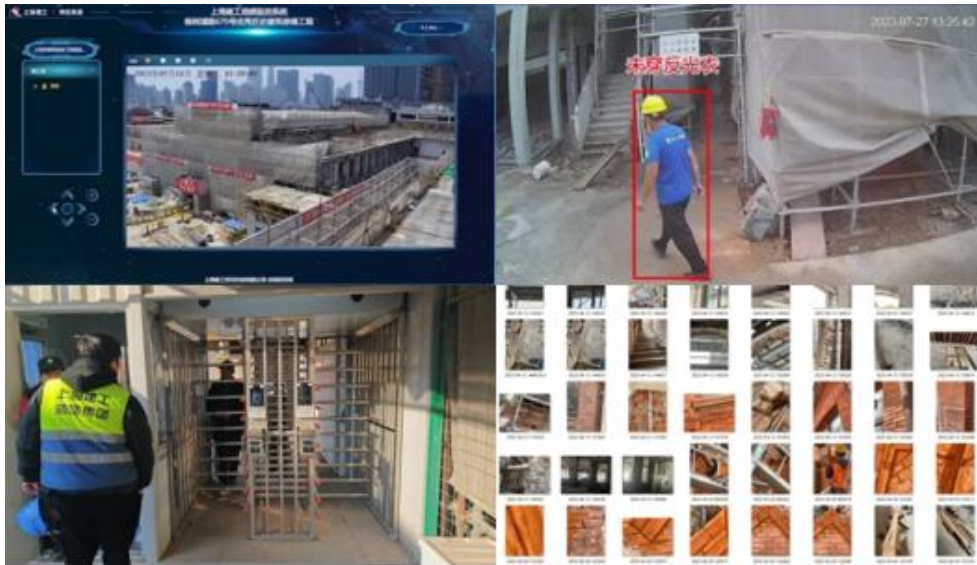


图 3-12 智慧工地管理平台

4. BIM 技术应用效益与测算方法

从遗失信息重塑及高还原度孪生模型构建、全过程数字智能化技术应用及可视化效果呈现和智能装备集成运用三个方面，以杨树浦路 670 号历史产业集群落作为实践案例，将历史建筑修缮与当代数字化技术相结合，建立和初步实践拥有数字资产库、修缮数字化、表达可视化、智能修缮设备、感知分析与决策功能的优秀历史建筑数字化技术应用体系，为历史建筑保护、更新方式提供了新的思路与创想。项目合同额为 15658.42 万元经商务测算达纲后技术成果预计带来年新增产值约 1320 万元，新增利润（新增产值*8%）86.4 万元，新增税收（新增产值*3.15%）34.02 万元。项目应用累计缩短设计施工工期 30 天以上，以每天工期成本 15 万元计节约工期成本 450 万元以上，技术应用预计节约工程材料及安装成本 150 万以上，共计可节约成本 600 万元以上，经济效益显著，产业化前景广阔。

5. BIM 技术应用推广与思考

杨树浦路 670 号项目以 BIM 技术为核心引擎，开创了片区内优秀历史建筑群“数字修旧”的新范式：通过高精度点云逆向建模（误差 $\leq 3\text{mm}$ ）、遗传算法参数化设计（降低砖材损耗 20%）、数字孪生施工闭环，攻克了图纸缺失、工艺断层、本体保护三大难题；构建“扫描—建模—仿真—交付”全流程标准体系，实现修缮痕迹可溯、可逆、可迭代；为城市片区历史建筑群保护提供可复用的技

术样板，也证明了 BIM 不仅是技术工具，更是文明传承的桥梁。未来，针对传统 BIM 软硬件成本高，阻碍中小修缮项目应用，应加快低成本轻量化工具链开发，让这一范式惠及更多同类型历史建筑，促进历史建筑的保护和传承。

十五、建筑空间点云数据自动采集机器人研发与应用

1. 项目概况

随着建筑装饰行业迈向全面数字化转型的关键时期，高精度、高效率的空间信息获取已成为制约 BIM 技术深度应用与施工效率提升的核心瓶颈。传统三维激光扫描依赖人工操作，具有作业效率低下、数据精度受人为因素波动大、复杂或危险环境下数据采集困难、作业安全性差等突出难题，难以满足大型、异形、动态化施工现场对海量点云数据实时、精准、安全获取的迫切需求。

为此，我们团队创新性研发了建筑空间点云数据自动采集机器人，该机器人集成了高精度激光扫描系统、智能自主导航定位模块、多传感器融合感知系统及云端协同控制平台，能够自主规划路径、适应复杂环境、全天候高效运行，实现建筑空间点云数据的全自动、高精度、高密度、高效率采集，显著降低人工依赖与安全风险，为后续的 BIM 逆向建模、深化设计优化、精准放线定位及数字化施工管理提供坚实、可靠、高效的数据基石，强力推动建筑装饰行业数字化、智能化建造水平的跃升。



图 1-1 空地一体化智能建造数据采集系统技术架构

2. BIM 技术应用概况

2.1 应用策略

传统三维激光扫描依赖人工操作，在大型、异形等复杂施工现场作业效率低下、数据精度受人为因素影响难以快速、安全、全面地获取高精度点云数据，制约 BIM 深度应用。针对该痛点，本项目核心策略是应用建筑空间点云数据自动采集机器人进行全自动空间信息采集。机器人集成高精度激光扫描系统、智能自主导航定位模块及多传感器融合感知系统，能够自主规划路径、适应复杂环境、全天候高效运行，实现点云数据的全自动、高精度、高密度、高效率采集，显著降低人工依赖与安全风险，为 BIM 应用提供坚实、可靠、高效的基础数据基石。

机器人具备强环境适应性与安全性，将其部署于人工难以到达或不适宜长时间停留的高危、复杂环境进行点云采集，通过多传感器融合感知实时避障与定位，安全完整获取关键区域点云数据，消除现场扫描盲区，保障作业人员安全。此外，依托机器人的自主导航与长续航能力，结合云端协同控制平台，能够实现大范围、多区域的无缝衔接自动化扫描。扫描过程中机器人通过自主规划最优全局路径，分区域高效完成扫描任务，并通过云端平台自动拼接生成高精度全场点云模型，极大提升大型项目数据采集效率与全局精度。

传统扫描流程中，多台设备协同或与现场其他作业协调困难，易造成冲突或数据不同步。对此，我们公司通过机器人的云端协同控制平台，实现多台机器人的任务分配、路径协调与数据同步。平台可智能调度机器人集群在复杂工地环境中高效、协同作业，避免冲突，并确保采集的点云数据时空基准统一，为协同设计与施工提供一致的数据基础。

2.2 应用流程

建筑空间点云数据自动采集机器人的应用流程为：仿生机器人自主导航规划、避障以及跨层作业→多源传感器实时检校→建筑复杂空间实时无缝定位和快速建图→生成高精度的点云文件→构建出逼真的 3D 高斯场景→墙体建造质量观感性检测、复杂场景高精度表面病害检测。



自动避障

导航规划

攀爬运动

图 2-1 仿生机器人自主导航规划、避障以及跨层作业

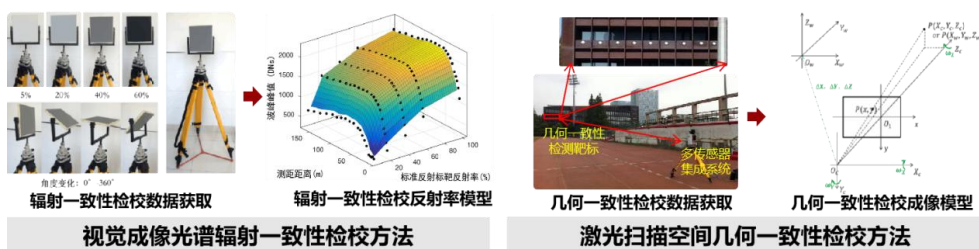


图 2-2 多源传感器实时检校

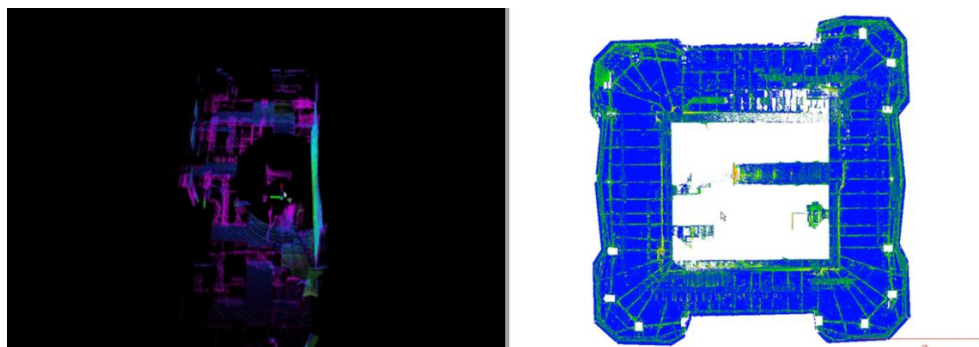


图 2-3 建筑复杂空间实时无缝定位和快速建图

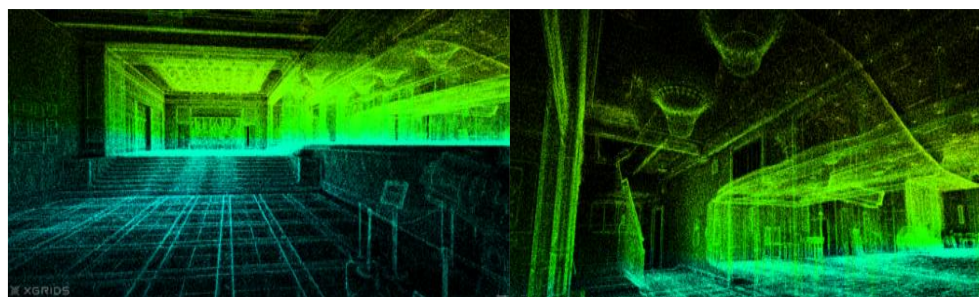


图 2-4 生成高精度的点云文件

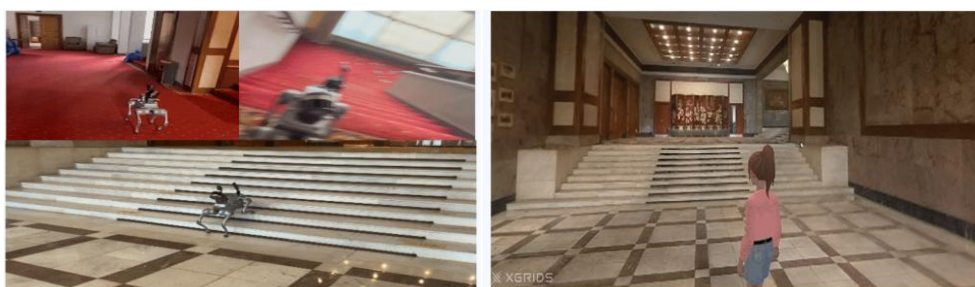


图 2-5 构建出逼真的 3D 高斯场景

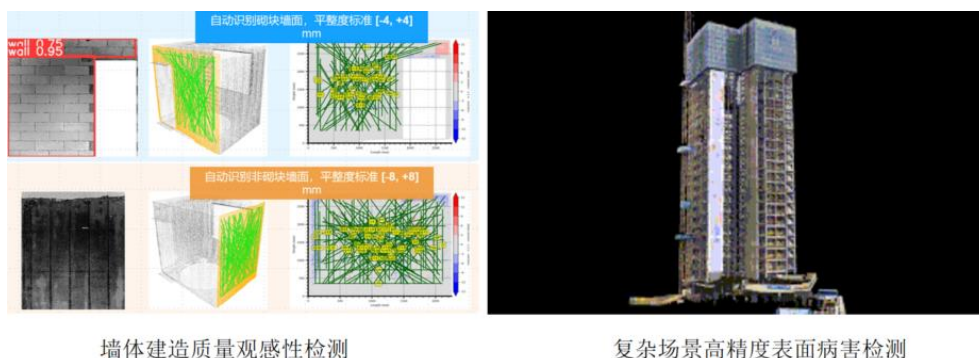


图 2-6 墙体建造质量观感性检测、复杂场景高精度表面病害检测

3. BIM 技术应用成果与特色

3.1 空地协同的一体化自组网高机动综合观测装备

空地协同的一体化自组网高机动综合观测装备,是针对高复杂精益建造监测需求而研发的先进综合监测装备网络,由地面四足仿生机器狗搭载的多任务集群、低空无人机遥感集成观测平台和无线自组网通信三个模块组成。通过集成多种高精度监测设备和智能化协同网络,实现了对建筑工地高效精准化监测。该技术相比传统监测技术,实现了对复杂异形建筑部件的识别精度、装配精度和检测效率的全面提高,优化人力成本约 90%。

本装备采用了多类高精度观测设备,包括高精度结构光相机、多色 RGB 相机、实时双目相机、旋转式激光雷达、移动机械激光雷达以及低空无人机遥感等。多设备集成能够满足不同场景下的监测需求,如立面构件的厘米级装配精度和内部装饰的毫米级检测精度。此外,装备还配备了固态激光雷达和无线自组网通信技术,确保数据采集的实时性和传输的稳定性。自组网通讯装置通过部署自组网基站和流动站,能够保证观测基础设施的快速搭建和长时间连续作业,灵活的组网方式能够适应复杂多变的施工环境,支持多任务集群作业,辅助地面仿生机器

狗和多自由度机械臂平台的协同工作。

为了应对高复杂度精益建造施工的需求和实现空、地协同装备的一体化控制，本设备内置了实时快速建模平台和测绘自动整平功能，能够快速生成高精度三维模型，为施工决策提供数据支持。此外，技术还强调了对十类以上建筑部件（如门、窗、柱、梁等）的室内外识别能力，识别准确率不低于 95%，显著提升了施工质量和效率。为现代建筑施工提供了一套高效、精准的监测解决方案，有助于推动建筑行业向智能化和精益化方向发展。

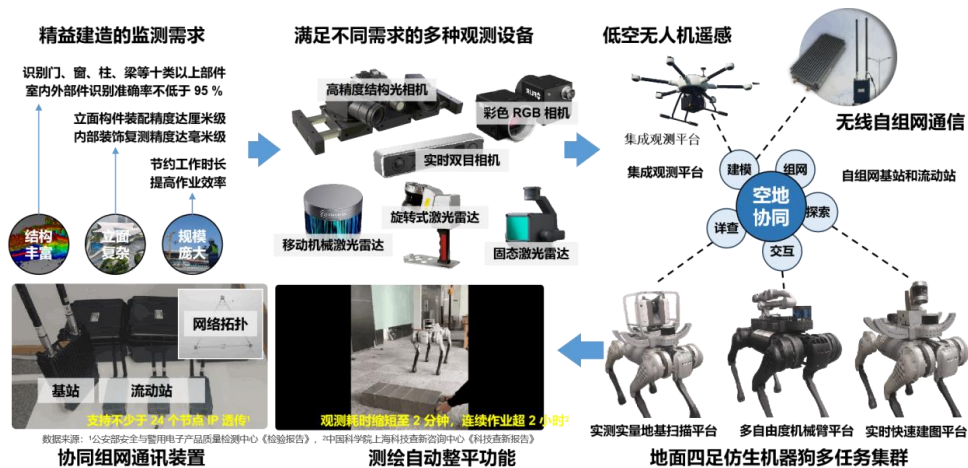


图 3-1 空地协同的一体化自组网高机动综合观测装备体系结构

3.2 跨模态观测的多源传感器一致性检校技术体系

多源传感器一致性检校技术突破了跨模态观测数据误差较大，关联建模困难的技术难题，提出了一套完整的辐射与几何一致性检校方法，显著提升了多传感器数据的协同性和可靠性。本技术核心在于发明了辐射与几何动态检校装置，生成跨模态数据关联模型的一致性评价方法，形成整套跨模态一致性评价体系和国家标准，解决了视觉传感器、激光传感器以及多传感器集成设备在数据采集过程中的一致性问 题，为跨模态观测提供了高精度的数据基础。

在技术方面，通过获取视觉成像光谱辐射和三维激光扫描数据，建立辐射反射率模型和优化几何算法，确保不同传感器在相同观测条件下成像数据的一致性，基于此提出了辐射、几何一致性检校方法，显著提高了点云数据的空间配准精度和自动化水平。在标准化方面，形成了辐射与几何一致性的评价体系，并推动建立无人机低空遥感监测的多传感器一致性检测技术标准，为行业提供了统一的检校规范。

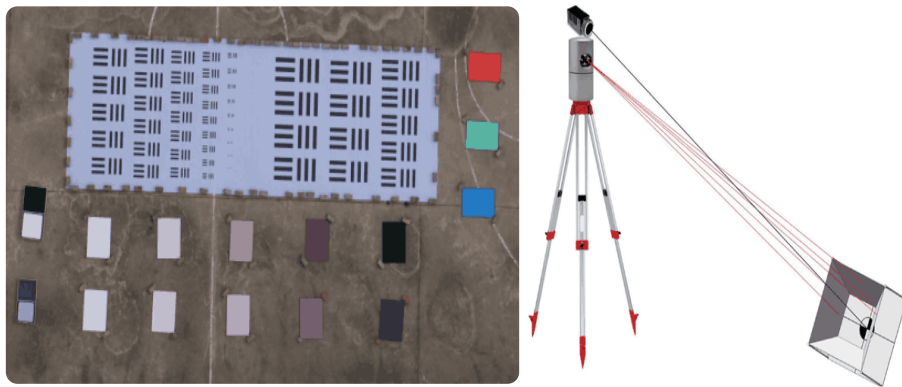


图 3-2 一致性检校装置

内容		衡量指标	数值范围	一致性程度	计算依据
辐射一致性	激光雷达 辐射一致性	反射率中误差	$m_1 \leq 3\%$	优	公式(2)
			$3\% < m_1 \leq 5\%$	良	
	$5\% < m_1 \leq 10\%$	一般			
	光学遥感传感器 辐射一致性	稳定性	$RSD \leq 1\%$	优	公式(3)、公式(4)、 公式(5)
			$1\% < RSD \leq 3\%$	良	
		$3\% < RSD \leq 5\%$	一般		
		重复性	$s(x) \leq 0.5\%$	优	公式(6)
			$0.5\% < s(x) \leq 1\%$	良	
		$1\% < s(x) \leq 3\%$	一般		
	多传感器 辐射一致性	反射率相关性	$r_1 \geq 99\%$	优	公式(7)
			$95\% \leq r_1 < 99\%$	良	
		$90\% \leq r_1 < 95\%$	一般		
反射率相对中误差		$M_1 \leq 3\%$	优	公式(8)	
	$3\% < M_1 \leq 5\%$	良			
$5\% < M_1 \leq 10\%$	一般				
几何一致性	激光雷达 几何一致性	测距相对中误差	$m_1 \leq 1\%$	优	公式(9)、公式(10)、 公式(11)
			$1\% < m_1 \leq 3\%$	良	
	$3\% < m_1 \leq 5\%$	一般			
	光学遥感传感器 几何一致性	平均重投影误差/μm	$M_1 \leq 0.3$	优	公式(16)、公式(17)、 公式(18)、公式(19)
			$0.3 < M_1 \leq 0.5$	良	
			$0.5 < M_1 \leq 1.0$	一般	
	多传感器 几何一致性	平均标定误差/μm	$P_m \leq 0.5$	优	公式(20)
			$0.5 < P_m \leq 1.0$	良	
			$1.0 < P_m \leq 2.0$	一般	
	注：“+”为较低单指标一致性程度所评估的一致性检测结果。				

GB

中华人民共和国国家标准

GB/T 41450—2022

无人机低空遥感监测的多传感器一致性
检测技术规范

Technical specification of multi-sensor consistency testing for unmanned aerial
vehicle(UAV)/borne low altitude remote sensing monitoring

2022-04-15 发布2022-04-15 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

图 3-3 形成几何一致性评价方法并建立了国家标准

3.3 复杂建造场景主动无缝定位与自主观测控制技术

针对建筑施工现场复杂多变的环境挑战,通过融合高精度定位、运动规划导航与自主观测控制,实现了机器人在室内外复杂场景下的动态避障与无缝测量,缩小了传统测量扫描中的数据偏差,显著提升了工程建造过程的智能化水平和自动化设备应用水平。

在观测控制方面,依托团队研发的四足机器人平台、多源传感器和 slam 技术能够实现无缝定位和建图,发挥机器人高灵活性和自主避障优势适应现场复杂环境,在台阶、异形幕墙、跨楼层等复杂场景中实现厘米级定位精度。工程建造过程中还通过集成地理基准、独立工作基站和动态基准桥接,克服了传统定位方法在室内外过渡区域信号丢失或基准不一致的问题。

针对异形幕墙等高难度观测目标,在机器人平台上创新性提出机械臂交互式

路径规划方法,通过实时环境感知与动态路径优化,实现高精度扫描与数据采集。此外,团队自研的机器人的稳定行走控制模型,确保其在振动、湿滑等不稳定环境下的可靠性,结合施工设备的协同控制,形成了一套完整的智能化自主观测技术系统。



图 3-4 四足机器人平台

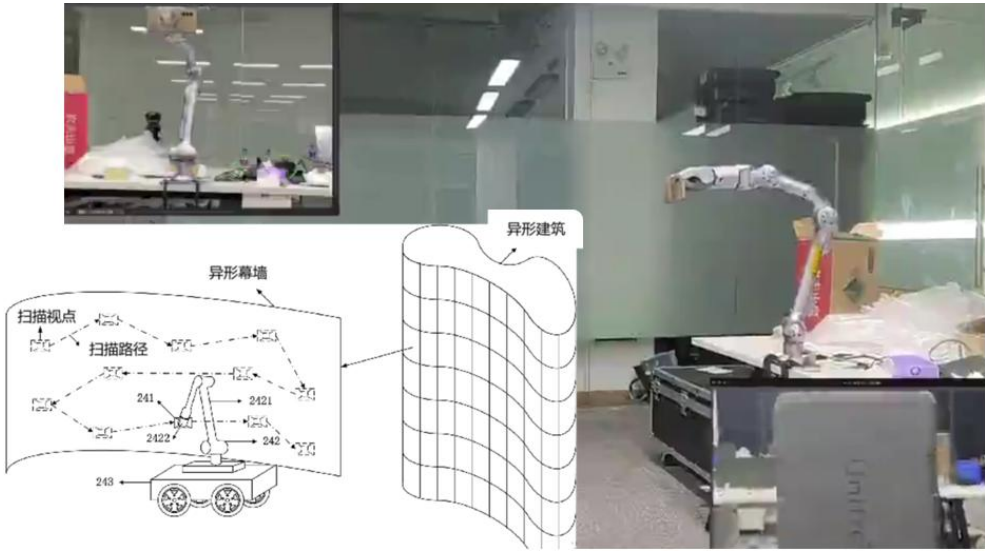


图 3-5 机械臂交互式自主观测系统

3.4 采集数据后处理优化与跟踪技术

本技术针对建筑信息模型（BIM）应用中采集的海量多源数据（如构件状态数据、施工进度数据、质量检测数据、现场扫描点云数据等），进行智能化后处理,实现模型的动态优化与构件状态的高精度跟踪。核心技术在于通过后处理算法融合建造语义信息、施加建筑拓扑约束以及执行多维度构件关联分析,攻克了基于动态采集数据进行大规模建筑模型实时优化与跟踪的技术瓶颈,显著提升了工程建造效率与施工管控水平。

本技术核心突破有三点：一是基于语义数据的局部模型优化：利用采集的施工语义标签（如“承重墙”“隔墙”）及关联参数,通过后处理算法驱动 BIM 模型进行精准的局部动态调整,解决了传统模型难以自动响应现场语义化需求的问题。

题；二是基于拓扑约束的全局一致性优化：将采集的建筑构件空间关系数据转化为拓扑约束，嵌入后处理优化算法，对模型进行全局最优估计，有效避免局部调整引发的冲突，确保模型整体一致性；三是多源数据融合的构件全生命周期跟踪：对采集的构件“尺寸”“类型”“位置”等多维状态数据进行实时融合与后处理分析，动态更新 BIM 模型中的构件状态，精准跟踪施工进度与质量，并通过拓扑约束维护设计、施工、运维各阶段模型数据的一致性与连贯性，彻底解决因施工变更导致的模型版本混乱问题。

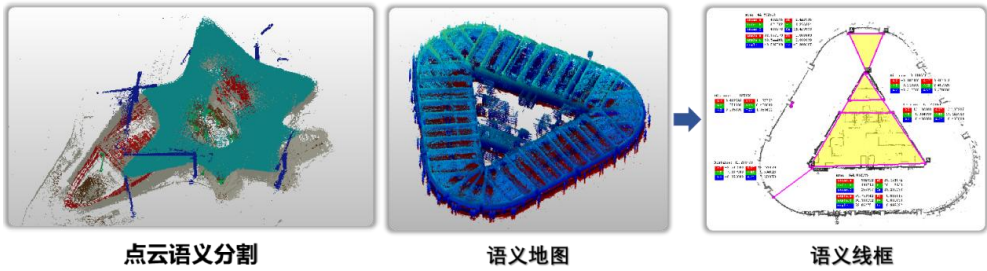


图 3-6 采集数据智能后处理优化

4. BIM 技术应用效益与测算方法

4.1 应用实例 1：异形异构建筑的智能建造—世界科幻大会主场馆

成都科幻馆，位于四川省成都市郫都区菁蓉湖畔德源街道静园西路，是第 81 届世界科幻大会的主场馆，世界科幻公园组成部分。成都科学馆占地面积约 92000 平方米，总建筑面积 5.96 万平方米，主体建筑有三层，建筑首层围绕中庭设置了剧场、主题展区及博物馆三大主题空间。其中，剧场可容纳 3500 人，建筑二层和三层则为大会论坛沙龙区，地下一层主要是时空隧道、停车场、设备用房。场馆建筑设计整合了“星云、三星堆金箔面具、古蜀之眼”等四川文化元素，外观似“星云状”，振翅欲飞。

由于场馆规模宏大且包含形态独特的“星云状”异形曲面（GRG），采用传统人工三维激光扫描方式面临严峻挑战，复杂空间结构易产生观测死角导致几何数据不完整，在主体结构初成、存在高空或局限区域环境下作业存在显著安全隐患。对此，项目创新性引入搭载高精度激光的扫描系统、具备自主路线规划机器狗平台作为核心解决方案，实现了建筑空间点云数据的自动化高效采集。机器狗凭借优异的灵活性和通过性，可在复杂施工环境中自主作业，深入设备夹层、弧形结构底部等关键区域进行全覆盖无遗漏扫描，仅耗时 65 分钟即完成 7 万平米

室内空间的超高密度（2451pts/m²）、高精度（3cm）点云数据采集，测量效率较传统方式提升 7.5 倍，测量工期缩短 20 天，采集到的完整精确点云数据不仅解决了设计碰撞难题，更为基于点云的异形构件参数化优化下单（节约成本 260 万元）及精准 BIM 放线奠定了坚实基础，达成项目累计成本节约 360 万元，工期节约 100 工日。

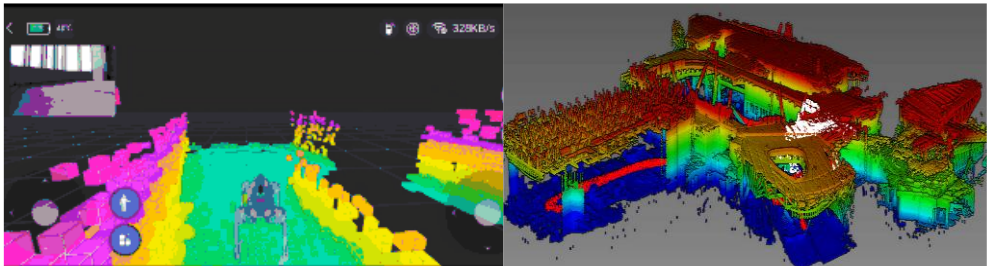


图 4-1 机器狗扫描路线规划及点云数据收集

4.2 应用实例 2：超高层建筑的智能建造—成都世纪空间大厦双子塔

成都世纪空间大厦双子塔，作为矗立于成都城市天际线的标志性超高层建筑，其双塔结构各高达 243.9 米，集高端办公、商业、酒店等多功能于一体。该项目以其宏伟的体量、复杂的垂直交通组织以及严苛的建造质量与安全要求，成为探索智能建造技术在超高层建筑领域创新应用的理想载体。

在成都世纪空间大厦这座高度达 243.9 米的双子塔超高层建造过程中，人工作业风险极高、垂直运输协调复杂、传统方法对大面积墙面及高空立面建造质量与病害检测覆盖不全且效率低下。为解决这些难题，项目深度应用了智能建造技术群，包括利用基于高精度点云和 BIM 的室内导航系统优化复杂环境内人员与设备定位及路径规划、提升垂直物流效率与安全性、部署具备 AI 视觉识别能力的自动检测装置对室内墙体完成面进行快速质量自动化检测与评估，首次采用建筑立面无人机自主巡检系统，其搭载的高清摄像与激光雷达能够实现高楼层幕墙和外立面的自动化、高频次、无接触安全巡检，精准记录表观状态。此后，我们团队利用融合深度学习的复杂场景高精度表面病害智能检测技术，对海量影像与点云数据进行智能分析，高效识别裂缝、空鼓、渗漏等细微缺陷。项目依托一系列智能建造技术的集成应用，构件安装效率提升约 30%，相关工期缩短 25 天；室内墙体观感质检效率较人工提升 8 倍，确保关键空间零返工；高空立面巡检全覆盖周期从人工的数周缩短约 80%，高空作业安全风险彻底消除；累计节约工期逾 60 天，工程经济效益显著，成为超高层项目精益建造与安全管理的典范。



图 4-2 建筑高度 243.9m 的双子塔

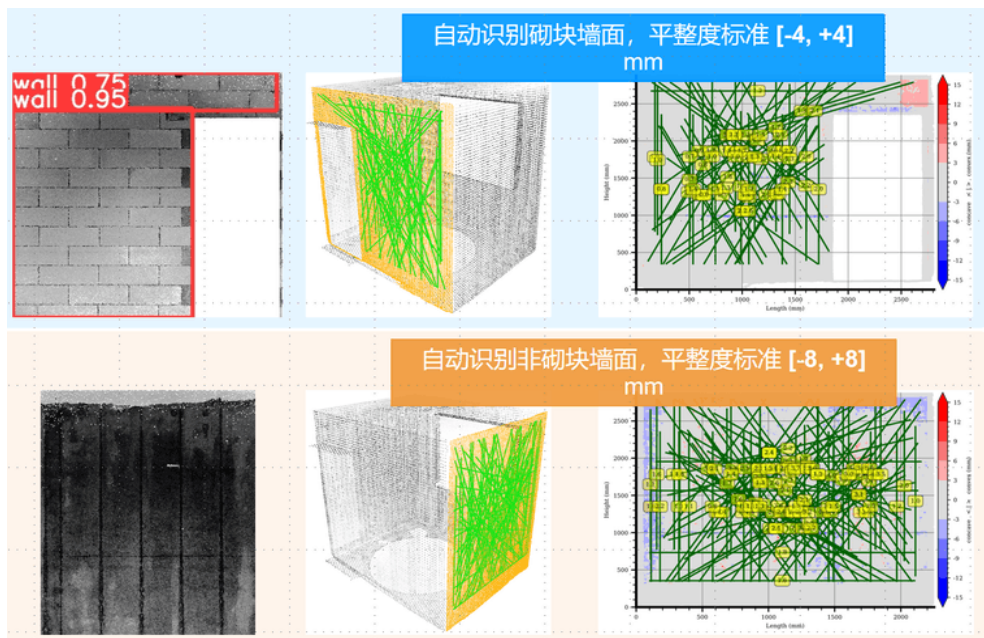


图 4-3 墙体建造质量观感性检测



图 4-4 建筑立面无人机自主巡检及表面病害检测

4.3 应用实例 3：超高层建筑的智能建造—上海张江科学之门双子塔

上海张江科学之门双子塔作为上海在建的最高双子塔建筑(高度达 320 米),是响应《上海市张江科学城发展“十四五”规划》的核心地标项目,集高端科研、商务办公、国际配套于一体,以双塔对称布局形成城市门户意象,其超高层体量与复杂功能对智能建造技术提出挑战。

面对超高层施工中高空作业安全风险高、多专业协同难、质量检测效率低等核心痛点,项目深度融合“跨层自主观测机器人、多层 AI 快速建图(5 分钟/单层)、高精度病害智能识别”等核心技术,凭借低空遥感无人机与机器人集群协同,实现建筑立面全自动巡检与室内跨楼层无死角数据采集;基于 AI 的多层快速建模技术大幅压缩现场测绘周期;结合深度学习对幕墙、混凝土表面病害进行毫米级识别。项目技术创新应用成效显著,高空巡检效率较人工提升 5 倍以上,累计规避 300 余项高危作业;质量检测效率提速 80%,返工率下降 95%;数据采集与建模工期缩短约 35 天,为项目节约直接成本超 120 万元。相关技术获中国激光雷达青年科学家奖及智能建造优秀论文奖,树立起超高层智慧建造行业新标杆。

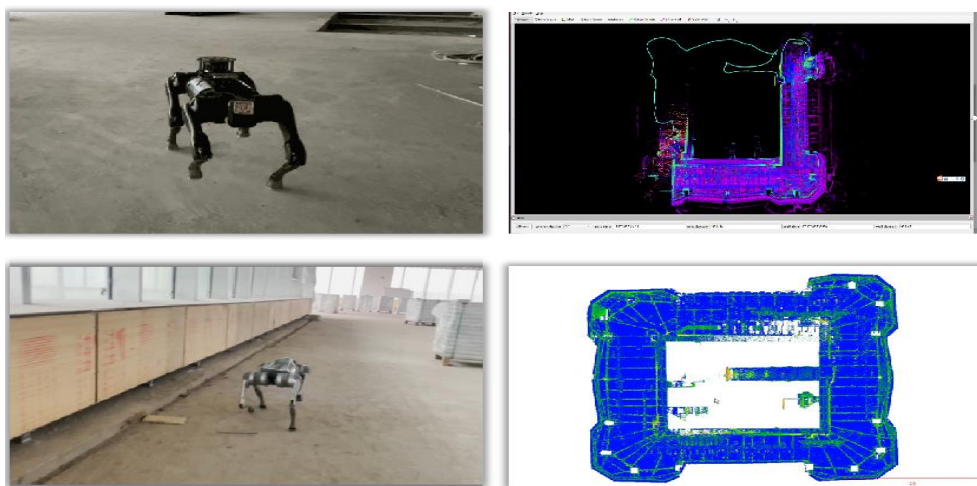


图 4-5 机器人跨层自主观测及多层快速建图

4.4 应用实例 4：超大异形构筑物的智能建造—西安 CCBD “生命之树”

西安 CCBD “生命之树”作为全球首例大型仿生树状艺术构筑物,以约 60 米挑高承载 60 个叶片平台及 480 片完全定制化的双曲异形叶片,每片均为独立规格的异形曲面结构(图注 480 种规格),将自然形态转化为建筑语言。然而叶片曲面误差需低于 2mm 的超高加工精度与几何自由性导致传统建模难以深化;

480 种独立构件叠加结构拓扑复杂性，使 BIM 设计面临参数化联动、碰撞检测与数字化预拼装的极限压力。

我们团队采用“点云逆向驱动智能建造”技术链，基于多装备协同观测实现全构件 10 万点/m²高密点云覆盖，通过点云逆向建模重建叶片数字孪生体；结合 AI 误差分析算法实时比对设计模型与点云数据，动态优化 480 片叶片的参数化拆分与数控加工路径，攻克异形曲面“设计—加工—安装”数据贯通难题。最终叶片加工合格率从 75%跃升至 99.8%，安装累计偏差控制于 2mm 内；BIM 深化效率提升 10 倍；总工期缩短 60 天，节约成本超 500 万元，相关技术成果获中国建筑工程创新一等奖及钢结构数字化建造专利，为异形建筑智能建造领域提供新方案。

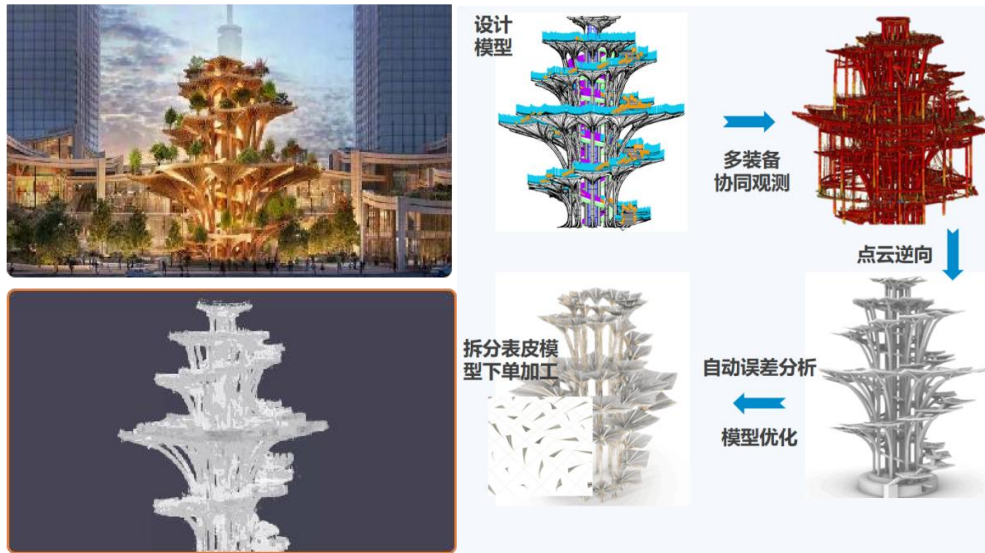


图 4-6 生命之树多装备观测点云逆向 BIM 模型

5. BIM 技术应用推广与思考

在测量阶段，我们通过空地协同自组网观测机器人集群彻底革新传统测绘模式。机器人搭载的多自由度机能平台，集成了旋转式激光雷达+高精度结构光相机+实时双目相机的跨模态观测逻辑，结合天线自组网通信实现多设备协同作业；基于强化学习越障算法与复杂场景无缝定位技术，在超高楼层、狭窄管廊等危险区域自主完成厘米甚至毫米级点云采集，单次作业覆盖面积大幅度提升。达成数据获取效率跨越式突破，人力成本高度优化的目标，为 BIM 应用提供全域高精度空间信息基底。

在设计阶段，我们通过跨模态传感器一致性检校方法确保多源点云几何精度

误差 $\leq 2\text{mm}$ ，辐射偏差 $\leq 5\%$ ；依托点云数据逆向建模，实现异形复杂建造体构件精准下单加工；融合建造语义、拓扑约束和多维度构件跟踪，达成大规模建筑构件的高精度建模与全生命周期管理。

在施工阶段，我们形成“监测—引导—管控”三位一体闭环，实现毫米级质量复测。通过四足机器人搭载机械臂交互扫描装置，对幕墙节点、机电管线进行毫米级装修精度自动检测，实时生成偏差热力图与 Excel 整改清单。在智能施工执行阶段，我们基于 BIM 模型驱动智能放样机器人，打造工业节点标准化施工流程，实现施工误差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 内。

未来，我司将打通“机器人采集→点云大模型分割→参数化设计→云端下单→智能工厂柔性生产→工业机器人施工”全数字链条标准化流程，形成设计—制造—施工一体化（IDM）模式，不断完善开发数字建造操作系统，集成实时双目视觉质检、物料区块链溯源、碳排放 AI 核算模块，在建筑装饰领域打造“无人化智建工厂”，推动行业数智化转型升级。

十六、市政交通工程 BIM+CIM 场景融合应用创新方案

1. 项目概况

目前 BIM 技术在工程领域应用广泛，在设计、施工和运维阶段发挥了重要的作用，如辅助设计方案展示、设计方案比选、交通模拟、管线综合、控制因素分析等应用都较成熟。但是 BIM 应用也存在平台数据不互通、协同不足、标准规范不统一、BIM 与 GIS 和 CIM 结合有限的问题。

本项目基于目前主流的 BIM 软件及常用的数据格式，应用一款具有集成多源数据、与各种 CIM 平台开放互通、为工程项目提供基础设施的多专业综合设计系统。用于工程项目在基础设施项目设计以及施工过程中，数据集成、优化设计、项目展示汇报的多功能平台，并在多个市政工程项目开展应用。



图 1-1 望海路快速化改造工程



图 1-2 滨海大道交通综合改造工程



图 1-3 南光高速北延工程

2. BIM 技术应用概况

2.1 应用策略

目前行业主流 BIM 数据格式为 .rvt 和 .dgn 格式，要进行 BIM+CIM 数据场景融合，平台不仅需要兼容更多数据格式，同时需要与工程使用场景结合做应用支撑。基于目前主流的 BIM 软件及常用的数据格式，设计一款具有集成多源数据、与各种 CIM 平台开放互通、为工程项目提供基础设施的多专业综合设计系统，用于工程项目在基础设施项目方案及施工图设计以及施工过程中，数据集成、优化设计、项目展示汇报的多功能平台。

平台功能定位于设计数据集成共享、辅助项目可视化展示汇报；集成项目管理系统，辅助项目进行建管运一体化管理；数据互联互通，与不同 CIM 平台接口开放，能够进行高效数据传递。在决策层面提升项目展示汇报质量，提高项目数字化交付效率，助力设计院数字化转型，实现数字设计院在管理层面提升市政项目多专业协同的效率和质量，降低项目管理成本，实现项目的数字化管理；在操作层面提升项目数据集成和三维可视化工具的质量和效率。

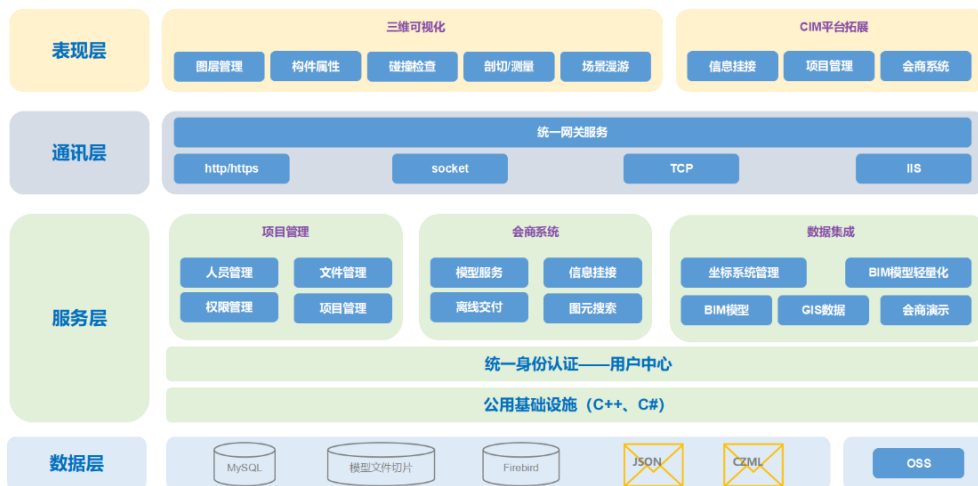


图 2-1 平台架构

2.2 应用方案

2.2.1 渲染技术实现方案

3D Tile 是一种共享开源的规范，它可以在桌面端，WEB 端以及移动端实现大规模三维地理空间内容的三维可视化，集成融合，交互和分析。3D Tiles 是基于 gltf（高效的流媒体和渲染的开放标准）构建的，用于通过流媒体高效的渲染 3D 模型和场景。

平台基于 3D Tile 格式规范构建三维场景，借助浏览器 WebGL 技术，基于 Cesium 三维引擎渲染场景。

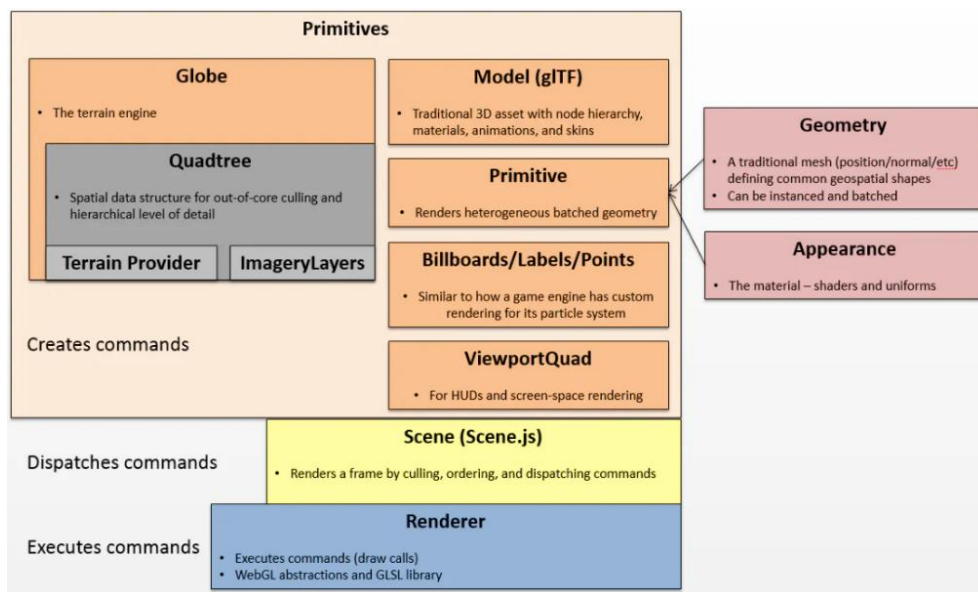


图 2-2 渲染引擎

2.2.2 多源数据融合技术

工程行业常用的数据格式包括倾斜摄影、激光点云、地址勘察数据、规划矢量图形数据、通用的 3D 模型数据如 IFC、OBJ；专业 BIM 模型数据如 Revit 模型数据、Bentley 模型数据、3DMAX 模型数据、SU 模型数据、广联达数维模型数据等。开发主流软件格式转换插件，将主流 BIM 软件模型格式转换成标准 HIM 格式数据，在平台进行集成。

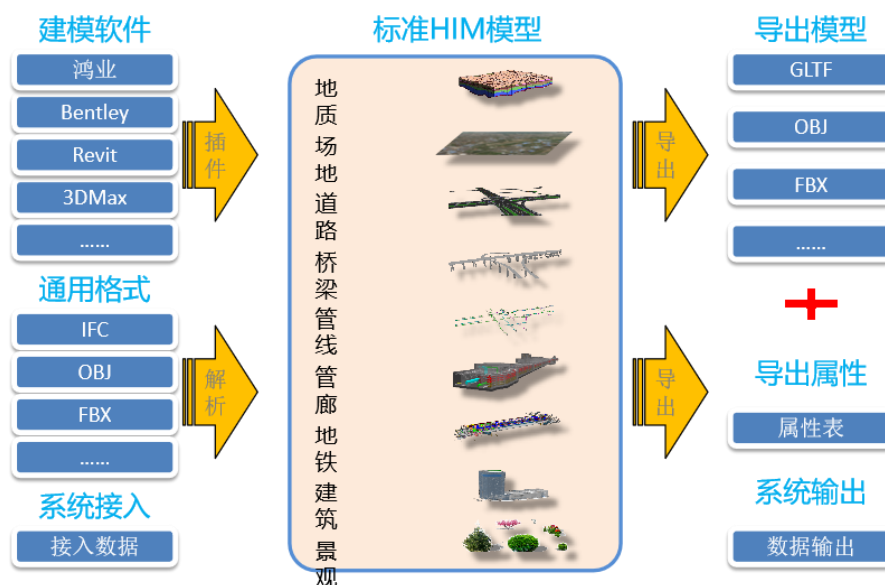


图 2-3 多源数据融合

2.2.3 平台接口开放

平台开发引入 WebGL.js 及 cesium 相关文件。WebGL (Web Graphics Library) 是一种基于 OpenGL ES 2.0 的 JavaScript API，用于在浏览器中渲染高性能 2D/3D 图形。基于 HTML5 Canvas，在 Chrome、Firefox、Edge、Safari 等现代浏览器中可直接运行。可以实现不同数据源的 Web 端展示。Cesium.js 是一个开源的 WebGL 库，专门用于 3D 地理空间可视化，支持全球地图、卫星影像、地形数据、BIM-GIS 融合等功能，实现 BIM+CIM 的融合应用场景。

3. BIM 技术应用成果与特色

3.1 项目级平台应用

项目区位分析：集成项目 BIM 数据，使用平台标注工具，进行项目起终点标注、项目线路标注、周边区位标注。通过可视化平台直观展示项目区位和路线。

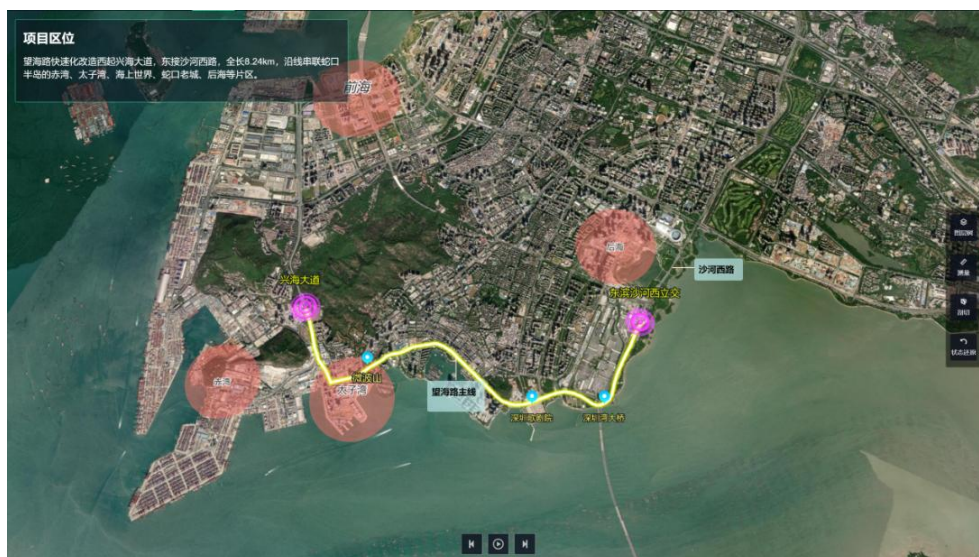


图 3-1 项目区位分析

项目路网功能分析：平台融合项目现状路网、规划路网数据，分析现状路网问题，结合规划路网，分析项目必要性，辅助项目进行功能分析和项目决策。

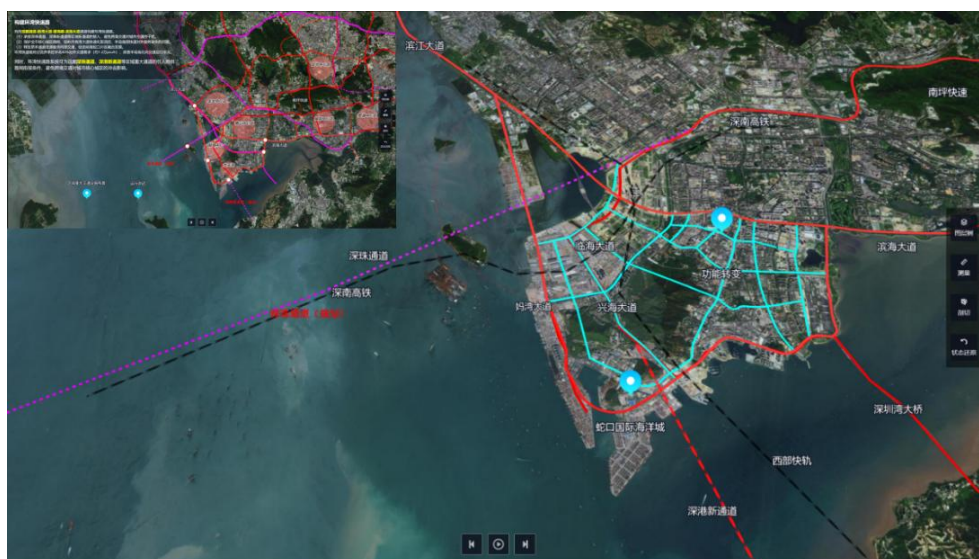


图 3-2 项目路网分析

交通组织分析：集成项目 BIM 模型，沿线建筑构筑物模型、周边路网等数据，辅助项目进行交通组织分析。通过可视化展示方式，同时外接视频形式，分析重要路口和交通节点的方案，直观反映项目与周边基础设施的相对关系。对重要节点进行交通疏解仿真分析，确定疏解方案可行。



图 3-3 项目交通组织分析

方案比选：上传多个方案 BIM 模型，通过图层开关，控制不同方案显隐关系，利用平台进行多方案的比选与展示。

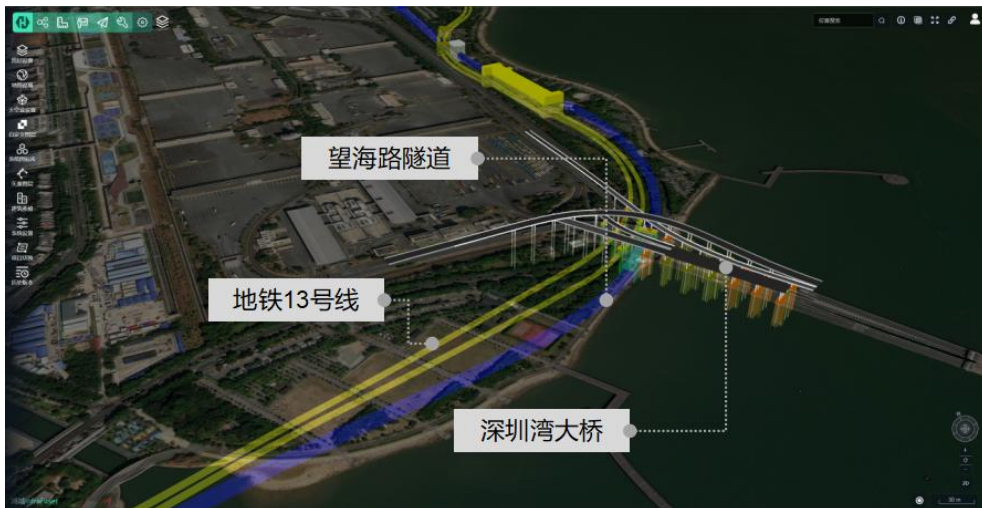


图 3-4 望海路隧道 地铁 13 号线分跨深圳湾大桥方案

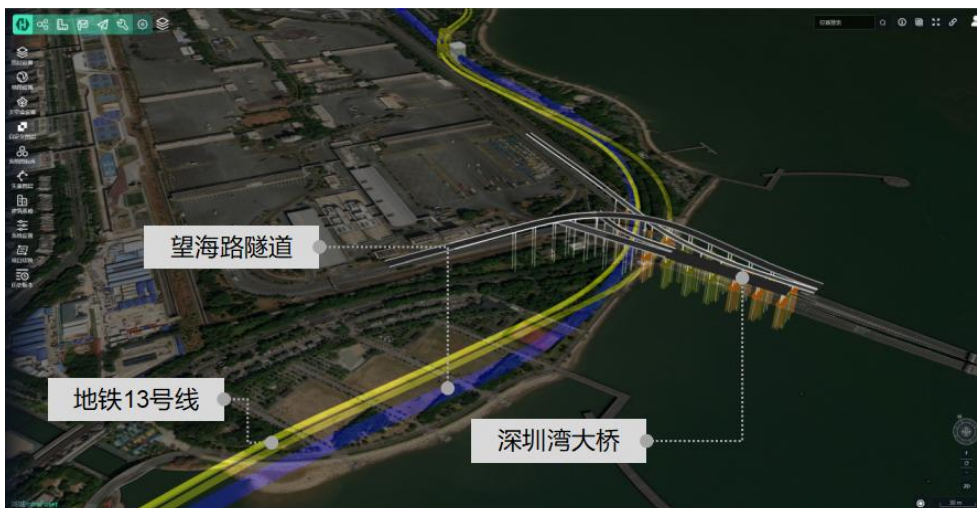


图 3-5 望海路隧道 地铁 13 号线上跨深圳湾大桥方案

3.2 CIM 平台应用案例

基于平台底座，拓展开区域级平台，集成多专业模型以及现状环境，根据项目需要，可自由设定界面风格、菜单布局、图表样式，通过中控屏界面可以统览片区情况，获得片区数据指标等信息。平台具有开放接口，可以与其他业务系统进行数据交换，软件提供相应的接口和服务，方便地进行系统数据对接。



图 3-6 望海路快速化改造工程 CIM 应用试点

4. BIM 技术应用效益与测算方法

4.1 多源数据融合，提高数据处理工作效率 80%

在望海路快速化改造工程、滨海大道综合交通改造工程、春风隧道工程等项

目采用 BIM 平台进行数据集成。平台提供 Bentley 和 Revit 软件插件，内置倾斜摄影转换格式工具，同时提供 CAD 等矢量图形转换插件，相比于其他渲染平台如 Lumion、Fuzor 等极大地减少了模型和数据处理时间。且 BIM 平台自带正射影像图，减少了传统渲染展示的地图处理工作。通过与传统渲染平台数据处理时间效率对比，使用本平台进行项目数据融合提高工作效率约 80%。

4.2 辅助项目汇报展示，提升沟通效率 50%

在望海路快速化改造项目实施过程中基于平台进行日常项目沟通和方案汇报，特别是在项目前期技术方案沟通过程中，告别传统的图纸展示形式，平台集成了倾斜摄影、项目 BIM 模型、勘察 BIM 模型，结合平台标注工具制作故事汇，大大提高了项目沟通效率。

项目前期需要汇报的场景多，采用 BIM 方式进行汇报展示如规划符合性分析、地质分析、方案比选、景观方案展示等，极大地提高了沟通效率，相对于传统的图纸展示，会议参与人能迅速了解项目概况及项目方案情况。通过与传统演示项目技术方案的方式相比，采用 BIM 平台进行项目方案演示节约了沟通时间约 50%，大大提高了项目沟通效率。

4.3 系统开放接口，提升 CIM 平台对接效率 100%

目前 BIM 成果交付往往将 BIM 模型和应用成果拷贝存储，采用线下交付的方式。使用 BIM 平台后，在项目实施过程中不断更新平台模型和应用成果，项目验收后实现平台化交付。对于有 CIM 交付需求的项目，通过平台接口可以对接 CIM 平台数据交付。

5. BIM 技术应用推广与思考

目前，BIM 模型主要依赖于 Revit、Bentley 等专业建模软件，这些软件虽然功能强大，但对非专业人员来说操作复杂，学习成本高。此外，不同专业的模型往往独立创建，缺乏统一的协同平台，导致信息割裂，难以实现真正的数据互通。这种局限性使得 BIM 技术在实际项目中的应用往往停留在“建模”层面，而未能充分发挥其价值。推动 BIM 平台化是打破专业壁垒和部门壁垒的关键，好的 BIM 平台在项目实施阶段能够发挥巨大作用。

CIM 虽然可以看做是 BIM 技术在城市级别的延展，主要用于智慧城市建设，

涉及基础设施、交通、市政管理、应急指挥等领域。但是目前 CIM 应用存在数据采集成本高、数据整合难度大、功能需求不清晰、物联网实时数据更新滞后等问题。

未来我司将在 BIM 和 CIM 领域继续探索，结合可视化、AI 算法、智能化等，通过实践创新不断落地 CIM 平台设计和建设，推动行业数字化转型。

十七、基于 BIM5D 的碳排放管理平台

1. 项目概况

成都交子公园金融商务区 G08 地块项目是上海建工一建集团 EPC 总承包的商业办公综合体项目，总建筑面积约 12 万平方米。项目以“双碳”目标为导向，依托自主开发的基于 BIM5D 的碳排放管理平台，实现建筑全生命周期碳排精准管控。平台整合设计、施工、运维三阶段数据，通过物联网传感器实时采集能耗信息，结合 GB/T51366 标准自动计算碳排放量，为全国首个覆盖全流程的数字化碳管理示范项目。



图 1-1 项目效果图

2. BIM 技术应用概况

2.1 应用策略

全周期覆盖：平台贯穿设计→施工→运维三阶段，实现碳排放动态追踪。

实时计算引擎：内置碳排放因子库（涵盖建材、能源等 12 类数据），自动匹配 BIM 模型构件数据，实时输出碳排总量。

动态预警机制：对比设计值与实际施工碳排放量，触发超标预警并推荐优化方案。



图 2-1 应用策略

2.2 组织建设

2.2.1 组织架构

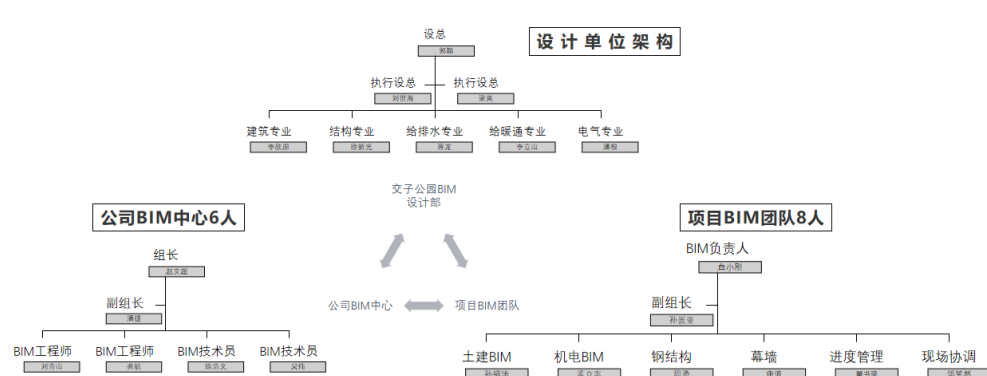


图 2-2 组织架构

2.2.2 BIM 管理体系总体思路

以“一模到底、数据驱动”为核心；

统一数据标准：基于 IFC 格式整合 BIM 模型与碳排数据库；

跨模块协同：碳排管理、低碳设计等五大模块数据互通；

闭环管控：设计碳目标→施工监控→运维反馈的 PDCA 循环。

2.2.3 BIM 应用环境

表 2-1 BIM 应用环境

类别	配置说明
硬件	云端服务器集群+现场物联网终端（智能电表、水表、CO ₂ 传感器）
软件	Revit 建模平台+自主开发碳管理平台+移动端 APP
协同机制	每日数据同步会审，模型与碳排数据双向校验

降低至设计值。

工艺优化：低碳工艺库调用定型化围挡、新能源运输车等 6 项技术，减少碳排放 24539tCO₂e；雨水回收系统降低自来水消耗量 37%。



图 3-3 预警案例

3.3 运维阶段

数据延续应用：移交运维的 BIM 模型包含建材碳排数据，为设备更换提供碳成本评估依据；

局限说明：当前运维数据采集依赖人工录入，自动化程度待提升。

4. BIM 技术应用效益与测算方法

效益成果

表 4-1 效益成果

指标	数值	测算依据
碳排管理效率提升	60%-80%	对比传统手工核算工时
碳排放减少量	24, 539tCO ₂ e	平台监测值+第三方核查
施工成本降低	8.5%	能源及材料浪费减少

测算方法

碳排计算：总碳排放=Σ（材料用量×碳排放因子）+能源消耗×电/碳转换系数；
因子库依据《GB/T51366—2019 建筑碳排放计算标准》动态更新。

经济效益：节能工艺降低柴油消耗量，按当期能源价格折算成本。

5. BIM 技术应用推广与思考

（1）推广价值

行业应用：已在卡地亚花园城等 3 个项目复制，平均碳排降低 18%；

标准化输出：形成《建筑碳排管理平台操作指南》，获上海市数字城市建设科技进步专项一等奖。

（2）改进方向

数据完整性：扩大碳排放因子库覆盖范围（新增装饰材料、设备等）；

轻量化部署：开发 SaaS 版平台降低中小企业使用成本；

智慧运维：探索 AI 预测设备维护碳排路径。

（3）关键思考

“双碳”目标下，BIM 与碳管理的深度集成需突破数据孤岛，未来应构建行业级碳排数据库，推动设计—施工—运维数据链贯通。