

大跨度弧形管桁架数字化施工技术集成 与智能化监测应用研究

白尧尧

中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430081

DOI:10.61369/ETQM.2026020011

摘 要 : 针对大跨度弧形管桁架结构施工中构件加工精度控制难、拼装误差累积、提升同步性要求高、施工过程动态管控不足等技术瓶颈,以中原高铁港数字展贸城 16 个展厅钢结构工程为依托,开展数字化施工技术集成与智能化监测系统研究。构建“BIM 全流程协同 + 施工仿真优化 + 物联网动态管控”三位一体技术体系,通过 BIM 建模实现构件加工、拼装、提升的全流程数字化指导,利用施工仿真优化提升方案与焊接工艺参数,结合物联网传感器构建智能化监测网络,实现施工过程的实时感知、数据反馈与智能预警。工程实践表明,该数字化技术体系使构件加工尺寸误差 $\leq 1.5\text{mm}$,桁架拼装整体误差 $\leq 2.2\text{mm}$,提升同步性误差 $\leq 3.8\text{mm}$,焊缝一次合格率达 99.5%,较传统施工工艺工期缩短 8 天,直接经济效益提升 15.3%,为大跨度弧形管桁架结构施工提供了数字化、智能化的全新解决方案,推动超危大钢结构工程施工技术的升级迭代。

关 键 词 : 大跨度弧形管桁架; 数字化施工; BIM 技术; 施工仿真; 智能化监测; 物联网

Research on the Integration of Digital Construction Technology and Intelligent Monitoring Application for Large-Span Curved Pipe Truss Structures

Bai Yaoyao

China First Metallurgical Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430081

Abstract : Addressing technical challenges in the construction of large-span curved pipe truss structures, such as difficulties in controlling component processing accuracy, accumulation of assembly errors, high demands for synchronous lifting, and insufficient dynamic control during construction, this study leverages the steel structure project of 16 exhibition halls at the Central Plains High-Speed Rail Port Digital Exhibition and Trade City. It explores the integration of digital construction technology and intelligent monitoring systems. A three-dimensional technological framework of "BIM full-process collaboration + construction simulation optimization + IoT dynamic control" is established. Through BIM modeling, digital guidance is provided throughout the entire process of component processing, assembly, and lifting. Construction simulation is employed to optimize lifting plans and welding process parameters. An intelligent monitoring network is constructed using IoT sensors to enable real-time perception, data feedback, and intelligent early warning during construction. Engineering practice demonstrates that this digital technology system reduces component processing dimensional errors to $\leq 1.5\text{mm}$, overall truss assembly errors to $\leq 2.2\text{mm}$, and synchronous lifting errors to $\leq 3.8\text{mm}$. The first-pass weld qualification rate reaches 99.5%. Compared to traditional construction methods, the project duration is shortened by 8 days, and direct economic benefits increase by 15.3%. This study provides a novel digital and intelligent solution for the construction of large-span curved pipe truss structures, promoting the upgrading and iteration of construction technology for ultra-hazardous large-scale steel structures.

Keywords : large-span curved pipe truss; digital construction; BIM technology; construction simulation; intelligent monitoring; Internet of Things

引言

随着建筑工业化与数字化转型加速,大跨度弧形管桁架结构在大型公共建筑中的应用日益广泛,但此类结构具有构件体型复杂、空间曲面精度要求高、施工工序衔接紧密等特点,传统施工模式依赖经验决策,存在加工拼装误差累积、提升同步性控制滞后、施工过程

动态反馈不及时等问题，难以满足现代工程对精度、效率与安全的多重需求。中原高铁港数字展览城展厅钢结构工程包含164榀五弦弧形管桁架，总重32554t，最大跨度99.5m，单榀重量198.5t，施工面临“高精度、高效率、高安全”的三重挑战，传统施工技术已无法适配工程需求。当前国内外研究多集中于单一数字化技术的局部应用，缺乏对数字化技术的全流程集成与智能化监测的深度融合，导致技术应用碎片化。基于此，本文以中原高铁港项目为载体，构建覆盖“设计-加工-拼装-提升-焊接-监测”全流程的数字化施工技术体系，整合BIM、施工仿真、物联网等核心技术，通过智能化监测实现施工过程的动态管控，验证数字化技术的应用价值，为同类工程提供技术参考。

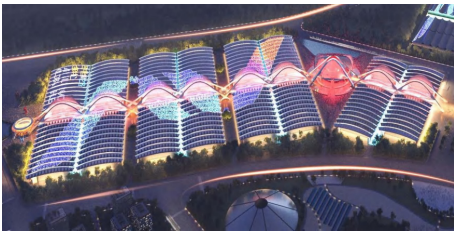


图1 项目效果图

一、数字化施工技术体系构建

（一）体系核心框架

数字化施工技术体系以“数字化驱动、智能化管控”为核心，构建“三层架构、全流程覆盖”的技术框架：

基础层：以BIM模型为核心数据载体，整合工程地质、构件参数、施工方案等多源数据，建立统一数字化协同平台。平台采用云服务器部署，支持多终端实时访问，数据传输延迟 $\leq 50\text{ms}$ ，确保多方协同高效；

应用层：涵盖BIM全流程应用、施工仿真优化、物联网协同管理三大核心模块，模块间通过API接口无缝对接，数据共享率达100%，避免信息孤岛；

管控层：通过智能化监测系统实现数据实时采集、分析、预警与决策，形成“数据采集-分析处理-反馈优化”闭环管控，系统响应时间 $\leq 30\text{s}$ ，异常数据预警准确率 $\geq 98\%$ 。该体系打破传统施工中设计与施工脱节问题，实现施工全过程的数字化协同与智能化调控，为大跨度弧形管桁架施工提供技术支撑。

（二）关键技术支持

1. BIM技术平台

采用Revit与Tekla Structures联合建模，构建精度达LOD500的全专业BIM模型，包含构件几何参数、材料属性、连接节点等全维度信息。建模流程简化为：导入设计图纸并修正错误→参数化批量建模弧形管桁架弦杆与腹杆→精细化建模复杂节点→整合多专业模型进行碰撞检测（精度达0.1mm）。通过BIM模型共识别出构件与节点干涉问题17处、施工机械与结构冲突9处，提前优化方案，节约工期约3天，同时关联Project进度计划形成4D施工模拟，优化资源配置。

2. 施工仿真技术

采用Midas Gen与ABAQUS软件构建施工仿真模型，针对桁架加工变形、拼装累积误差、提升同步性、焊接应力应变等关键工况进行模拟。仿真参数明确：材料参数按Q355B、Q460C钢标准设定，荷载参数包含结构自重、施工荷载（ 2.5kN/m^2 ）、风荷载（ 0.55kN/m^2 ）等，边界条件按实际施工约束设定。通过仿真优化构件分段加工参数、拼装顺序、提升吊点布置与焊接工艺参数，提前预判施工风险，仿真结果与实际施工误差 $\leq 3\%$ ，验证了模型可靠性。

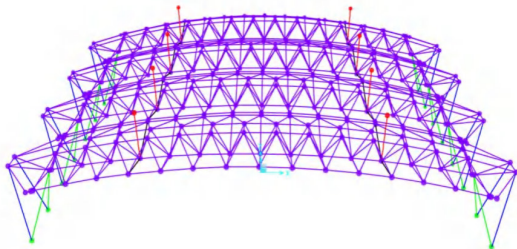


图2 四榀桁架的提升单元分析模型

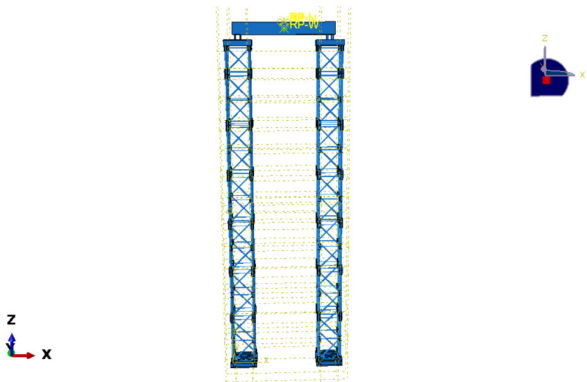


图3 ABAQUS计算模型

3. 物联网与智能化监测技术

整合应变、位移、倾角、环境四类传感器，构建物联网监测网络，实现构件应力、桁架位移等数据实时采集。硬件配置核心参数：应变传感器选用振弦式，测量范围 $\pm 1500\mu\epsilon$ ，精度 $\pm 0.1\%F.S$ ；位移传感器选用激光式，测量范围0~50m，精度 $\pm 0.01\text{mm}$ ；所有传感器通过LoRa无线通信技术接入网关，传输延迟 $\leq 1\text{s}$ ，数据采集频率 $\geq 1\text{次/分钟}$ 。结合边缘计算与云计算技术，建立数据处理平台，通过预设阈值与智能算法实现异常预警，为施工调整提供实时依据。

二、关键环节数字化施工技术应用

（一）BIM全流程协同应用

1. 数字化设计优化

基于BIM模型对弧形管桁架弦杆、腹杆节点进行参数化设计，通过参数驱动实现尺寸快速调整。针对弧形曲面精度要求，采

用最小二乘法优化弦杆轴线曲率,拟合误差 $\leq 0.5\text{mm/m}$;对复杂节点生成三维详图,规避二维图纸表达盲区。同时利用 BIM 模型模拟施工方案,对比确定“工厂分段加工+现场原位拼装+液压同步提升”的最优方案,减少设计变更3次,节约设计成本约12万元。

2. 构件加工数字化指导

将 BIM 模型中的构件加工数据(管材下料长度、坡口角度等)导出为 DXF 与 CSV 格式,直接传输至数控设备,实现自动化加工。加工过程中采用激光扫描仪实时扫描(精度 $\pm 0.1\text{mm}$),将数据与 BIM 模型对比生成偏差分析报告,实时修正偏差。针对关键构件建立质量追溯体系,每个构件赋予唯一二维码,包含加工设备、操作人员等信息,最终构件加工尺寸误差 $\leq 1.5\text{mm}$,合格率100%。

3. 现场拼装数字化定位

拼装前基于 BIM 模型生成胎架搭设三维坐标数据(X、Y、Z坐标精度 $\pm 0.1\text{mm}$),通过全站仪(NTS-332R4,精度2秒)精准放样,确保胎架标高误差 $\leq \pm 0.8\text{mm}$ 。拼装过程中采用激光扫描仪(扫描速度100万点/秒)对分段拼装成果进行三维扫描,与 BIM 模型对比生成偏差分析报告,累计修正拼装偏差23处,使桁架整体拼装误差 $\leq 2.2\text{mm}$,远超传统工艺精度标准。

(二) 施工仿真优化技术应用

1. 提升同步性仿真优化

建立多吊点同步提升仿真模型,模拟不同提升速度、吊点反力分配下的结构变形与同步性误差,确定最优提升速度为5m/h。通过仿真优化吊点布置(每个展厅8个吊点,位于桁架反弯点处)、提升分级加载方案(20%、40%、60%、80%、90%、95%、100%)与同步控制策略(油压均衡+位移同步双控),将提升同步性误差控制在 $\leq 3.8\text{mm}$,避免结构塑性变形,同时制定不同步提升应急预案。

2. 焊接工艺仿真优化

针对 Q355B、Q460C 高强度钢焊接,建立温度场与应力场仿真模型,模拟不同焊接参数下的变形与残余应力分布,确定最优参数:Q355B 钢电流280A、电压32V、焊速400mm/min;Q460C 钢电流300A、电压33V、焊速380mm/min。通过仿真优化焊接顺序(中间向两侧对称焊接)、预热温度($\geq 85^\circ\text{C}$)、层间温度($60\sim 210^\circ\text{C}$),将焊接残余应力降低22%,焊接变形控制在 $\leq L/1800$ (L为桁架跨度),避免焊接裂纹产生。

(三) 物联网智能化监测系统构建

1. 监测系统硬件配置

根据施工关键环节,布置各类传感器共计320个,核心布置方案:应力监测在桁架弦杆关键节点布置120个应变传感器,预警值 $\leq 120\text{MPa}$;位移监测在上下弦杆布置80个位移传感器,预警值 $\leq 18\text{mm}$;同步性监测在每个提升吊点布置40个倾角与位移传感器,预警值 $\leq 4\text{mm}$;环境监测布置80个温湿度、风力传感器,温度 $\geq 38^\circ\text{C}$ 或风力 ≥ 6 级触发预警。所有传感器通过 LoRa 无线通信接入网关,网关与云平台通过4G/5G网络连接,确保数据传输稳定。

2. 监测系统软件平台

开发大跨度桁架施工智能化监测平台,集成四大功能模块:实时可视化(BIM模型关联监测数据,三维可视化展示,数据更新频率 ≥ 1 次/分钟);数据分析(采用移动平均法与阈值分析法

处理数据);预警推送(数据超阈值时通过平台、短信、微信多渠道推送,响应时间 ≤ 30 秒);数据管理(自动存储监测数据,存储时间 ≥ 5 年,支持查询导出)。平台界面简洁直观,支持手机端与电脑端同步使用。

三、工程验证与应用效果

(一) 工程概况

中原高铁港数字展贸城展厅钢结构工程位于河南省郑州市航空港区,包含16个展厅,采用五弦弧形管桁架+铰接钢管柱+背拉索结构形式,总建筑面积488866 m^2 ,钢结构总重32554t,共计164榀屋面桁架,最大跨度99.5m,单榀桁架尺寸104.5 $\times 17 \times (4.2\sim 5.7)\text{m}$,重量198.5t,计划工期100天。工程地质条件为粉质黏土、粉土,地基承载力特征值130kPa,地下水位埋深3.5m,施工周期覆盖夏季高温与雨季,需应对高温焊接变形、雨季地基沉降等问题。

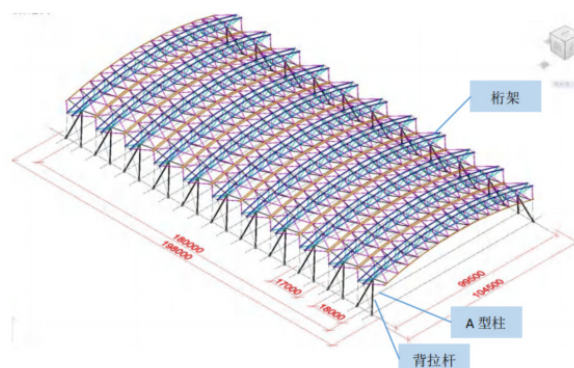


图4 单个标准展厅钢桁架主结构模型图



图5(a) 单个标准展厅横向立面图

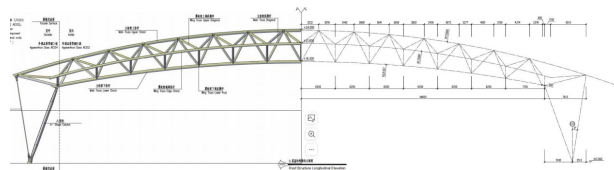


图5(b) 单个标准展厅纵向立面图

(二) 数字化施工技术应用过程

1. 前期准备阶段

构建 LOD500 的 BIM 全专业模型,完成碰撞检测与设计优化;通过施工仿真确定桁架分块提升方案(标准展厅4+4+3榀、中型展厅3+3+3榀、小型展厅3+3榀)、吊点布置与焊接工艺参数;完成智能化监测系统的传感器安装与平台调试,确保数据采集正常。

2. 加工: 基于 BIM 导出的数字化加工数据,实现164榀桁架

构件自动化加工,加工尺寸误差 $\leq 1.5\text{mm}$,合格率100%;

现场拼装:通过 BIM 定位与激光扫描比对,桁架拼装整体误差 $\leq 2.2\text{mm}$,较传统工艺精度提升51.1%;

液压提升:采用仿真优化后的同步控制策略,提升同步性误

差≤3.8mm，结构变形符合设计要求；

焊接施工：应用优化后的焊接工艺，焊缝一次合格率达99.5%，较传统工艺提升3.1个百分点；

过程监测：智能化监测平台实时反馈数据，累计发出预警12次，均及时采取调整措施，未发生安全质量事故；

季节性施工：结合环境监测数据，高温避开正午焊接与测量，雨季加强胎架沉降监测，大风≥6级停止吊装。

3.应用效果统计

表1基于中原高铁港展厅大跨度弧形管桁架工程（总重32554t、最大跨度99.5m），量化对比数字化与传统施工工艺核心指标。数字化技术优势显著：构件加工尺寸误差≤1.5mm（传统≤3.0mm）、桁架拼装误差≤2.24mm（传统≤4.5mm），适配弧形结构高精度需求；提升同步性误差≤3.84mm（传统≤6.0mm），符合GB51162-2016规范，避免结构受力不均；焊缝合格率99.5%（传统96.4%），工期缩短8%，直接效益提升15.3%，安全事故发生率为0。

但数字化技术需前期投入BIM建模、仿真软件及传感器设备，对人员技术要求高；传统工艺设备投入低、操作门槛低，适合小跨度简单结构。综上，数字化技术更适配超危大弧形管桁架工程，传统工艺在小型项目仍具经济性。

表1 应用效果统计表

评价指标	数字化施工技术	传统施工工艺	提升幅度
构件加工尺寸误差（mm）	≤1.5	≤3.0	50%
桁架拼装整体误差（mm）	≤2.2	≤4.5	51.1%
提升同步性误差（mm）	≤3.8	≤6.0	36.7%
焊缝一次合格率（%）	99.5	96.4	3.1个百分点
工期（天）	92	100	8%
直接经济效益（万元）	158	137	15.3%
安全事故发生率（%）	0	0.8	100%
材料损耗率（%）	1.2	3.5	65.7%

（三）关键技术创新点

1.构建了“BIM+施工仿真+物联网”三位一体的数字化施工技术体系，实现大跨度弧形管桁架施工全流程数字化驱动，数据共享率达100%；

2.开发了基于BIM的构件加工-拼装-提升全流程数字化指导方法，通过参数化建模、激光扫描比对等手段，有效控制误差累积，拼装精度提升51.1%；

3.建立了多参数协同的智能化监测系统，整合多类传感器，实现施工过程实时感知、智能预警与动态调整，预警准确率≥98%；

4.提出了基于施工仿真的焊接工艺与提升方案优化方法，焊接残余应力降低22%，提升同步性误差控制在≤3.8mm。

四、结论与展望

（一）结论

1.以中原高铁港项目为依托构建的数字化施工技术体系，整合BIM、施工仿真、物联网等核心技术，有效解决了传统施工中精度控制难、同步性差、动态管控不足等问题；

2.工程实践验证，该技术体系使构件加工精度、拼装精度、提升同步性显著提升，焊缝一次合格率提高3.1个百分点，工期缩短8天，直接经济效益提升15.3%，安全事故发生率为0，具备可行性与实用性；

3.该技术体系为大跨度弧形管桁架结构施工提供了数字化、智能化的全新解决方案，对推动超危大钢结构工程施工技术升级具有重要意义。

（二）展望

未来可进一步深化数字化技术与施工技术的融合：引入数字孪生技术构建施工过程虚拟映射，实现全生命周期数字化管控；结合AI算法优化施工参数，实现施工方案自主决策；拓展BIM模型在运维阶段的应用，构建“施工-运维”一体化数字化平台；研发专用传感器与监测设备，提高监测数据精度与稳定性。

参考文献

[1] 李建伟, 张敏. 大跨度钢结构数字化施工技术研究进展 [J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(3): 78-86.
[2] 王浩, 刘静. BIM技术在弧形管桁架施工中的全流程应用 [J]. 施工技术, 2022, 51(12): 56-60.
[3] GB50205-2020, 钢结构工程施工质量验收标准 [S].
[4] 陈明, 赵磊. 大跨度桁架施工仿真优化与同步提升技术 [J]. 土木工程学报, 2021, 54(8): 98-106.
[5] GB51162-2016, 重型结构和设备整体提升技术规范 [S].
[6] 刘强, 王丽. 物联网技术在钢结构施工监测中的应用 [J]. 建筑技术, 2023, 54(5): 598-602.
[7] GB50661-2011, 钢结构焊接规范 [S].
[8] 张国栋, 陈晨. BIM与施工仿真协同的大跨度桁架施工优化 [J]. 钢结构, 2022, 37(6): 89-94.
[9] GB50026-2020, 工程测量标准 [S].
[10] 李娜, 张伟. 大跨度钢结构智能化监测系统设计与应用 [J]. 建筑科学, 2023, 39(7): 102-108.
[11] 王建华, 刘敏. 大跨度管桁架钢结构拼装精度控制技术 [J]. 施工技术, 2023, 52(7): 68-72.
[12] 刘军, 陈晨. 高强度厚板焊接质量控制技术研究 [J]. 钢结构, 2022, 37(9): 102-106.
[13] GB11345-2013, 钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果分级 [S].
[14] JGJ80-2016, 建筑施工高处作业安全技术规范 [S].
[15] 张志强, 王丽. 大跨度钢结构施工过程监测技术研究 [J]. 建筑科学, 2022, 38(8): 65-71.