

BIM技术在异形钢结构施工中的应用研究

杨磊¹, 袁立婷², 孙建宝²

(1. 青岛鲁邦晟泰工程管理有限公司, 山东 青岛 266109;

2. 中达工程管理咨询有限公司, 山东 青岛 266555)

摘要 异形钢结构因其造型复杂、节点多样, 在施工时会遇到精度控制、构件加工及现场协同等难题。本文探讨了BIM技术在异形钢结构施工全过程中的具体应用, 通过参数化建模实现深化设计, 借助数字化加工提升构件精准度, 利用可视化模拟优化施工方案, 并构建信息集成管控平台。实际工程案例验证显示, BIM技术能大幅提升施工精度、缩短施工工期并降低返工概率, 为异形钢结构施工提供有效的技术支持。

关键词 BIM技术; 异形钢结构; 参数化建模; 信息集成

中图分类号: TU758.11; TU17

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.008

0 引言

随着建筑形态向多样化和复杂化发展, 异形钢结构在大型公共建筑、场馆及地标性建筑中得到广泛应用。这类结构往往具备空间曲面造型、非标准节点连接和构件尺寸各异特征, 传统二维图纸难以确切呈现其空间关系, 造成施工过程中构件碰撞、安装误差累积等问题屡现。BIM技术以三维数字模型为载体, 集成几何信息、物理特性以及施工工艺参数, 能于虚拟环境中实现设计验证、加工指导及施工推演, 为异形钢结构施工难题提供了新途径。

1 BIM技术与异形钢结构概述

1.1 BIM技术体系与特点

BIM技术构建了涵盖设计、加工、施工及运维全生命周期的数字化体系。其核心要点是通过参数化建模建立三维信息模型, 该模型涵盖几何形状、材料属性以及构造关系, 促成多专业协同及数据共享。该技术具有可视化表达、信息集成、碰撞检测以及模拟解析等效能, 可将抽象的设计意图转变成直观的空间模型, 并助力施工方案动态优化^[1]。在异形钢结构领域, BIM技术能精准呈现复杂曲面、非标节点的空间定位关联, 利用参数驱动实现设计变更的迅速响应, 同时将模型数据直接传递给数控加工设备, 形成设计—加工—施工的闭环管理。

1.2 异形钢结构施工难点分析

异形钢结构施工面临三方面核心难题。在空间定位方面, 传统测量手段难以精确测准曲面构件的三维

坐标, 节点位置偏离易引安装失误, 构件制作环节, 品种多样且不重复, 依赖人工放样易造成累积误差, 焊接变形控制条件严格^[2]。现场施工阶段, 多工序交叉工作引发协调困境, 大型构件吊装路径规划复杂, 安装顺序不当可能会引发结构应力集中^[3]。这些难点本质是信息传递不畅以及精度控制能力欠缺, 需要建立贯穿全流程的数字化管控机制。

2 BIM技术在异形钢结构施工中的应用设计

2.1 参数化建模与深化设计

参数化建模是BIM技术应用于异形钢结构的前提条件。利用几何约束及参数关联, 可以对异形钢结构进行准确数字化呈现。以自由曲面网壳结构为例, 采用NURBS曲面建模方法, 由建筑造型控制点产生空间曲面, 再通过网格划分法决定杆件位置, 保证模型符合设计要求。在节点深化设计过程中, 建立节点板厚度 t 与杆件截面高度 h 的参数关联:

$$t = \frac{N_{max}}{f_y \cdot A_{eff}} \quad (1)$$

式(1)中: N_{max} 为杆件最大轴力, f_y 为钢材屈服强度, A_{eff} 为节点有效承压面积。通过参数化设计, 模型能够自动调整节点板尺寸, 确保连接强度满足受力要求。同时, 模型中集成了焊接等级、螺栓类型、坡口形式等施工工艺信息, 可以直接输出零件加工图、材料表、数控编程文件等, 避免人工绘图带来的误差。

碰撞检测是参数化建模重要扩展。在深化设计阶段, 将钢结构模型与其他如机电管线、幕墙结构以及装饰件等专业模型进行集成, 利用碰撞检测算法自动

作者简介: 杨磊 (1982-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

识别空间冲突,提前优化节点构造,防止日后现场返工。而对于一些较为复杂的节点,通过三维标注或者爆炸图等方式清晰呈现构件之间的组装关系,方便以后生产加工及安装。

2.2 构件数字化加工与预拼装

数字化加工是实现 BIM 模型数据到实物构件准确转化的重要步骤。利用 BIM 模型数据通过 IFC、STEP 等形式导出,传输至数控切割机、钻孔机以及机器人加工单元上,进行无图纸化加工。对于空间扭曲杆件等复杂构件,可从模型中读取三维控制点坐标以及切割角度等信息,编写相应的数控程序,精确控制切割轨迹以及坡口角度,加工精度可以达到 $\pm 1\text{ mm}$ 以上远远优于手工放样方法。而对于铸钢节点、相贯节点等复杂构件,则可以使用三维激光扫描仪对已经完成加工的产品进行全面检查。将扫描得到点云数据与原始 BIM 模型对比形成偏差色谱图,对超出公差部分进行返工,保证产品的形位精度符合安装需求。此外,对于大批量同类构件,可通过模型数据驱动柔性制造系统,实现多品种、小批量构件的自动化生产,提升加工效率与质量控制水平。

虚拟预拼装是数字化加工的有效辅助手段。在数字环境中,根据现场实际安装顺序对构件进行虚拟拼装,检查各杆件尺寸是否一致、节点孔位是否吻合、安装间隙以及焊缝坡口是否对中等问题。对于大跨度桁架类结构,通过有限元软件进行预拼装状态下结构变形,计算预起拱值:

$$\delta = \frac{5qL^4}{384EI} \quad (2)$$

式(2)中: q 为均布荷载, L 为跨度, E 为弹性模量, I 为截面惯性矩。依据计算结果确定构件预制尺寸,在加工过程中进行预先补偿施工中产生的弹性变形,从而达到保证结构合龙精度的目的。虚拟预拼装可以及时发现加工中存在的问题,还可节省实际预拼装所占用的空间以及所需的时间和人力等资源,显著降低施工成本。

2.3 施工过程可视化模拟

施工过程可视化模拟是 BIM 技术应用于施工组织优化的重要手段。基于 BIM 建立 4D 施工模拟,将时间纳入三维建筑信息模型中,实现异形钢结构从基础施工至主体安装整个过程的直观展示。在模拟过程中包含塔吊运行轨迹、构件吊装角度、高空作业平台布置、临时支撑布置以及拆除顺序等内容,通过对施工过程进行模拟可清楚了解不同的施工顺序对于结构安全性和施工进度影响。同时,采用碰撞检查功能提前识

别和解决施工期间可能发生的各种问题,如构件吊装路线与已有构件发生冲突、大型设备旋转范围与临时支撑相碰等问题,从而防止施工过程中出现停工或者返工的情况发生。

对于较为复杂的节点以及危险性较大的工序,可以编制安装动画或工艺示意图,具体说明螺栓拧紧顺序、焊接工艺流程、吊装平衡措施等内容,作为技术交底的可视化工具,提升作业人员对施工工艺的理解与掌握程度^[4]。此外,施工模拟还可以用来进行临时支撑设计及调整,在有限元软件中施加外荷载,模拟卸载过程中的内力变化以及位移情况,从而得出合适的卸载方式以及卸载数量,保证建筑物在拆除临时支撑之后能顺利进入正常的使用状况。

2.4 现场协同与信息集成管控

现场协同与信息集成管控是 BIM 技术应用于施工全生命周期管理的基础。搭建基于 BIM 施工管理系统,在其中整合进度管理、质量管理、安全管理、材料管理等功能模块,使施工管理信息化、可视化。现场施工人员用移动设备(平板电脑、智能手机等)查看 BIM 模型,检查构件安装位置、焊接参数、螺栓扭矩以及验收标准等信息,完成施工指导的数字化传递,代替原来的纸质图纸与经验判断。质量管理模块记录各重要部位实际测量值并自动生成偏差热力图,将超标部分高亮显示,方便相关人员发现问题及时处理。

在测量控制上,将全站仪、激光跟踪仪等测量仪器所获取的数据导入到 BIM 模型中,与设计坐标进行比较分析,在三维空间内查看实际安装位置与目标位置之间的差异,以便在现场调整^[5]。物料管理系统根据施工进度计划,在 BIM 模型中提取出需要的构件数量、尺寸大小以及安装顺序,对构件进行有序地存放以及有序地运输,避免二次搬运和现场堆积。利用云计算平台信息共享功能,所有参与者包括设计人员、生产厂家、施工单位、监理单位等均可及时了解到模型变化情况,设计变更也可立即传达到生产厂及施工工地,从而降低由于时间延误导致的信息错漏问题发生概率。二维码跟踪系统对每一个构件都有一个唯一的编号,通过扫二维码可以查找该构件对应的 BIM 模型信息、加工情况、检测结果以及安装位置等全部内容,实现整个过程可追查。具体 BIM 技术应用流程见图 1。

3 案例应用与效果分析

3.1 工程概况

某文化中心主体结构采用异形钢框架支撑双曲面屋盖体系,总用钢量约 8 500 吨。屋盖由 1 200 余根

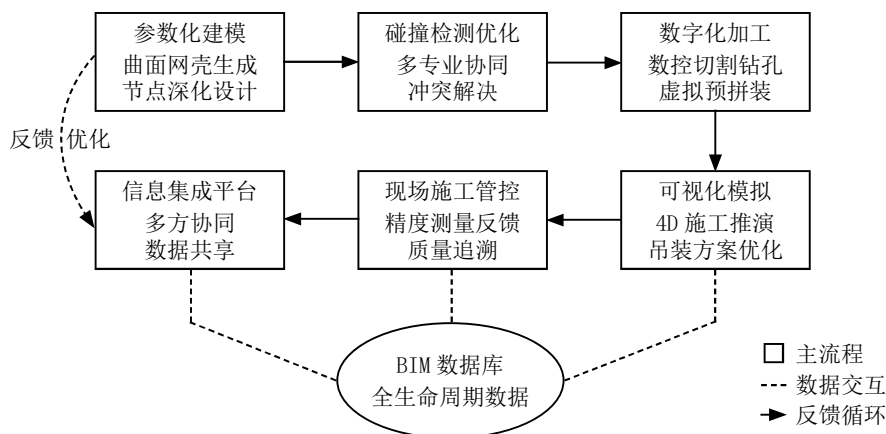


图 1 BIM 技术应用流程图

空间扭曲杆件组成，节点形式包括铸钢节点、焊接球节点及相贯节点三种类型，最大单根杆件长度 18.6 m 且无两根完全相同。建筑造型呈扭转曲面，屋面最大高差 23 m，施工精度要求杆件安装偏差不超过 5 mm，节点位置偏差不超过 3 mm。传统施工方法难以满足精度控制与进度要求，项目团队决定全面应用 BIM 技术进行施工管控。

3.2 BIM 实施流程与技术要点

项目实施分为三个阶段展开。模型构建阶段，基于建筑设计曲面建立精细化钢结构模型，包含 2 300 个节点与 12 000 个螺栓孔信息，完成机电管线综合碰撞检测，解决 176 处空间冲突。深化设计阶段，参数化生成 1 200 份构件加工图，铸钢节点通过 3D 打印制作实体模型验证浇筑工艺，虚拟预拼装发现并修正 23 处杆件长度偏差。施工阶段，利用模型规划 8 台塔吊的作业范围，模拟确定 386 个吊装批次的最优顺序，现场采用全站仪跟踪测量系统，实时采集节点坐标并与 BIM 模型对比，偏差超过 2 mm 时立即调整。建立构件二维码追溯系统，扫码关联模型信息实现精准定位安装。

3.3 应用效果评估

BIM 技术应用取得显著成效。在精度控制方面，钢结构整体安装偏差把控在 ±2.8 mm 以内，节点位置偏差均值为 1.7 mm，较常规办法提升 60%。在工期管理方面，通过优化吊装方案降低构件二次倒运，屋盖钢结构施工的计划周期由计划的 150 天压缩至 118 天。质量把控环节，构件返工率从传统方式的 3.2% 降低到 0.6%，焊缝初次合格率升至 97.3%，成本效益分析显示，即便增加 BIM 建模与软件方面投入，但通过减少返工次数、优化材料采购流程及压缩工期，综合成本降低。BIM 技术与传统施工方法关键指标对比见表 1。

表 1 BIM 技术与传统施工方法关键指标对比表

评估指标	传统施工方法	BIM 技术应用	改善幅度
构件安装偏差（mm）	±7.2	±2.8	61.10%
施工工期（天）	150	118	21.30%
构件返工率（%）	3.2	0.6	81.30%
焊缝一次合格率（%）	89.5	97.3	8.70%

4 结束语

BIM 技术为异形钢结构施工提供了从深化设计至现场管控全流程数字化解决方案。参数化建模实现复杂构件的精确呈现与迅速调整，数字化加工消除人工放样误差，利用可视化模拟改进施工组织方案，信息集成平台保障多方协同效率。工程实践证明，该技术体系能够将构件安装精度提至毫米级，施工周期缩短超 20%，显著降低返工成本。未来应深化 BIM 与物联网、人工智能技术整合，发展基于实时监测数据的施工动态调控方法，构建异形钢结构智能建造体系。

参考文献：

[1] 范晨旭,杨龙.BIM 与 AI 融合技术在绿色建筑施工管理中的应用[J]. 石材,2026(01):164-166.
[2] 刘廷,胡林,吴笛,等.基于 BIM 的智慧建造技术在航站楼修建中的融合应用[J]. 土木建筑工程信息技术,2025,17(S1):1-5.
[3] 罗冬进.钢结构安装技术应用与质量控制措施[J]. 中国建筑金属结构,2025,24(24):67-69.
[4] 王大平,贾栋亮,季力,等.陶土饰面砖施工技术在异形钢结构中的应用[J]. 建筑技术,2025,56(21):2639-2642.
[5] 李鑫涛.BIM 技术在异形网架钢结构体育场馆施工中的应用:以雄安体育中心项目为例[J]. 工程建设与设计,2025(13):145-147.