

# Optimization and Quality Control Strategy of Prefabricated Construction Technology for High-rise Building Steel Structure

Shiwei Wu

China Shipbuilding Haixin Construction Engineering (Beijing) Co., Ltd., Beijing, 100121, China

## Abstract

With the accelerated industrialization of construction, higher demands are placed on prefabricated steel structure construction technologies for high-rise buildings. In this context, the application of BIM-based digital collaborative design and modular pre-assembly process improvements has been proposed. This approach establishes a comprehensive quality control system covering all stages from design to production, transportation, and installation, effectively achieving closed-loop construction quality management. Such practices also provide essential references for advancing high-rise building prefabrication toward standardization and precision.

## Keywords

High-rise building; Steel structure; Prefabricated construction; Quality control

## 高层建筑钢结构装配式施工技术优化与质量控制策略

吴世伟

中船海鑫建设工程（北京）有限公司，中国·北京 100121

## 摘要

随着建筑工业化进程的不断加速，对高层建筑钢结构装配式施工技术提出了更高的要求。在高层建筑钢结构装配式施工中，提出基于BIM技术的数字化协同设计、模块化预拼装工艺改进，以此构建覆盖设计、生产、运输、安装的各阶段质量控制体系，能有效实现施工质量闭环管控，这也为高层建筑装配式施工向着标准化、精细化方向发展提供了必要的参考借鉴。

## 关键词

高层建筑；钢结构；装配式施工；质量控制

## 1 引言

在“双碳”目标背景下，传统高层建筑施工模式由于资源消耗大、污染排放高，已难以满足现代化高层建筑施工要求。而在以钢结构装配式施工的高层建筑中，通过整合数字化技术、工艺创新和质量管控等协同优化技术，不仅能提高施工效率、保障结构安全，还能推动建筑行业向着绿色低碳方向转型升级。

## 2 钢结构装配式施工技术优化策略

### 2.1 基于 BIM 的数字化协同设计

在高层建筑钢结构装配式施工技术优化时，基于 BIM 的协同设计是突破传统施工瓶颈的关键。为此，可通过三维模型集成技术。将结构、机电、管线等专业模型整合在统一

的平台中，以利用碰撞检测算法自动识别识别空间冲突，以做到提前修正设计缺陷而减少现场返工率的问题<sup>[1]</sup>。同时，结合 4D/5D-BIM 应用，能在三维模型基础上叠加时间维度和成本维度，基于这种动态模拟优化工序衔接的方式，不仅能实现钢结构吊装与机电安装的交叉作业，还能缩短关键路径工期。此外，依托 BIM 模型建立预制构件编码体系时，能为每个构件赋予全新的标识，并关联其几何参数、材料信息等数据，借助 RFID 技术，能实现全生命周期信息的追溯。该系统能支撑构件从工厂加工、物流运输到现场安装的精准管控，以确保误差的最小化，最终实现设计、生产、运维的数字化闭环管控目的。

### 2.2 模块化预拼装工艺改进

在对钢结构进行模块化拼装时，通过工厂化预拼装技术，能将高空作业转化为工厂地面组装，并利用高精度胎架和定位工装控制构建凭借误差，以此有效规避现场环境干扰，从而使拼装精确度达到毫秒级，如图 1 所示。而在同步

【作者简介】吴世伟（1984—），男，满族，中国辽宁葫芦岛人，本科，工程师，从事建筑施工管理研究。

构建标准化构件库时，可对钢、梁、柱、支撑等构件进行参数化分类与模数化设计，以更好地统一接口尺寸和螺栓孔位的布局，配合通用化节点设计，则能有效实现对不同项目构件的互换性与兼容性，以大幅度降低模具开发与加工成本<sup>[2]</sup>。

除此之外，引入激光扫描和三维测量技术，并通过高精度点云数据还能快速获取拼装体形的偏差，在结合逆向建模技术下生成修正方案，能为质量追溯和工艺优化提供数据支撑，并最终推动钢结构施工向工业化、精准化的方向转型升级。

表 1 BIM 模型建立预制构件参数表

构件编号	构件名称	几何参数	连接方式
PC-GJL-001	L1 型钢梁	长度: 12,000mm	高强螺栓 (M24 × 100, 10.9 级)
		截面: H600 × 300 × 12 × 20mm	
		重量: 2,850kg	
		重心坐标: (X=6000, Y=0, Z=300)	
PC-GJL-002	L2 型钢梁	长度: 9,500mm	套筒灌浆连接
		截面: H500 × 250 × 10 × 15mm	
		重量: 1,980kg	
		重心坐标: (X=4750, Y=0, Z=250)	
PC-GJL-003	L3 型钢梁	长度: 8,000mm	焊接连接 (E5015 焊条)
		截面: H400 × 200 × 8 × 12mm	
		重量: 1,250kg	
		重心坐标: (X=4000, Y=0, Z=200)	

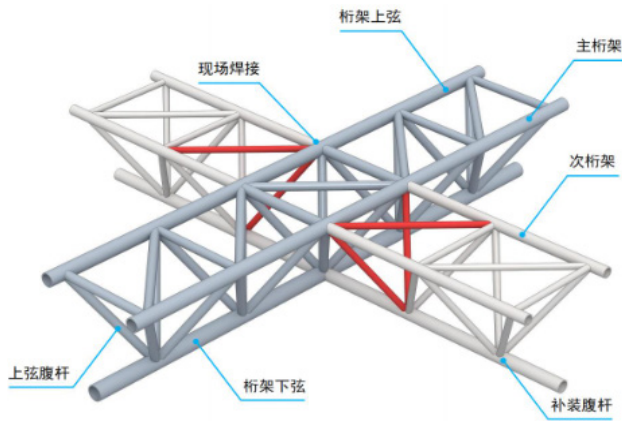


图 1 钢结构预拼装图

### 2.3 智能化安装与连接技术

在智能化安装中，可引入自动化焊接机器人和高精度定位系统，并利用激光导航、视觉识别以及力控技术等方式，可实现对焊接技术的自主规划与焊缝质量监测，以减少人工操作带来的误差。同时，为适应复杂节点的全位置焊接需求，还可在连接点创新方面，采用高强螺栓的方式，以扭矩 - 转角双控制技术确保预紧力的精准传递，同时配合电动扭矩扳手和物联网传感器的方式，能实现安装数据的自动记录。同时，无人机搭载高清摄像头与红外热成像仪开展高空巡检时，可快速识别构件变形、螺栓松动以及焊缝缺陷等问题，并结合 AI 图像是被算法，还可做到自动分类和预警，较人工检查效率提升 4 倍以上，为钢结构施工提供全流程、无死角的智能化管控手段。

### 2.4 施工过程动态调控

钢结构装配式施工的动态调控机制整合物联网、人工智能及数字孪生技术，构建以数据为核心的智能管控体系<sup>[2]</sup>。

物联网传感器网络实时采集关键构件的应力、应变与位移参数，依托边缘计算技术实现异常阈值的自动预警，例如，光纤光栅传感器监测钢柱轴力变化，可有效预判基础沉降或安装偏差风险。人工智能算法基于历史施工数据与实时工况，动态优化吊装机械路径规划及资源调度方案，通过遗传算法生成多机协同吊装的最优时序，使机械空转时间降低。数字孪生技术则通过高精度虚拟模型同步映射物理施工状态，在虚拟环境中预演复杂节点安装与大型构件翻身等高风险工序，结合有限元分析识别潜在碰撞或失稳问题，并将修正参数反馈至现场执行系统。三者协同作用形成“感知 + 分析 + 决策 + 执行”闭环控制机制，推动施工过程从被动响应转向主动预控，显著提升钢结构安装的安全性、效率及质量稳定性。

## 3 高层建筑钢结构装配式施工质量控制策略

### 3.1 全生命周期质量管理框架

高层建筑钢结构装配式施工的质量管理应建立全生命周期管控体系，涵盖设计、制造、运输及安装等全流程环节。设计阶段依托标准化审查机制保障构件模数协调性与节点连接规范性，结合 BIM 技术实施可施工性评估，预先识别空间冲突及吊装可行性问题，有效降低设计变更概率。制造阶段强化加工精度管控，通过数控机床与自动化生产线将构件尺寸公差控制在 ± 1mm 范围内，同步构建分级质量检验标准，对关键焊缝及高强螺栓连接等核心部位实施 100% 无损检测。运输环节依据构件几何形态与受力特性优化包装防护策略，采用专用胎架固定异形构件、加装防撞缓冲材料，并科学规划堆放顺序以抑制层间滑移，从而显著减少运输损伤率。安装阶段推行工序验收“三检制”，在吊装定位与节

点连接等关键工序设置停工检查点，辅以临时支撑加固及防护膜覆盖等成品保护措施，避免后续施工对已安装构件造成二次损伤，最终实现质量风险的全流程动态闭环管控。

### 3.2 质量风险识别与防控

高层建筑钢结构装配式施工的质量控制体系应构建系统化的风险识别与主动防控机制。针对焊接缺陷、节点松动及构件变形等核心风险要素，采用失效模式与影响分析技术对风险严重度、发生频率及探测难度进行量化评估。例如，焊接缺陷可能由电流波动或操作失误引发裂纹，其风险优先级通过风险优先数计算确定，进而明确需优先管控的关键工序<sup>[1]</sup>。节点松动风险则与螺栓预紧力不足或连接副匹配性偏差密切相关，需重点监测扭矩系数及摩擦面处理工艺质量。基于风险评估结果，引入防错设计理念，在施工环节实施强制性防控措施，集成智能扭矩扳手与物联网传感器，实时监测并记录螺栓预紧力，超限时自动锁定。焊接工序配置电流电压双参数闭环控制系统，参数异常时即时断电，构件堆放区域设置限位装置与防倾覆支撑结构，有效抑制变形超标。通过风险预判与过程强制纠偏机制，实现质量隐患的早期消除，推动质量控制模式由事后检验向事前预防的实质性转变。

### 3.3 质量追溯与动态纠偏机制

高层建筑钢结构装配式施工的质量控制体系应建立质量追溯与动态纠偏机制。采用 RFID 技术为每个构件分配唯一数字标识，关联原材料批次、加工参数及检测报告等全链路信息，并依托区块链技术实现全链条数据的加密存储与不可篡改共享，确保从工厂制造至现场安装的全过程操作可追溯、可验证。施工阶段，物联网传感器实时采集焊接电流、螺栓扭矩与构件应力等关键参数，基于边缘计算技术进行偏差量化分析，触发预警机制并推送至管理平台，构建“数据采集-异常识别-指令下发-现场调整”的闭环控制流程。例如，激光定位系统检测到钢柱安装垂直度超标时，系统自动生成纠偏方案并指导机械臂实施精准微调。针对质量问题，实施分级响应机制，依据缺陷严重程度划分响应等级，明确整改责任人及完成时限，通过移动终端应用实时上传整改影像与验收记录，构建覆盖问题发现、原因分析至整改闭

合的全过程跟踪档案，确保质量风险彻底消除，推动施工质量向精细化、动态化管理转型。

### 3.4 标准化与规范化管理

高层建筑钢结构装配式施工的质量控制体系应以标准化与规范化管理为核心基础。构建覆盖全流程的施工工艺标准体系与操作规程，明确焊接、螺栓连接及构件吊装等关键工序的技术参数与操作流程，例如高强螺栓拧紧工艺须分初拧与终拧两步实施，扭矩偏差严格控制在  $\pm 5\%$  范围内<sup>[5]</sup>。同步实施人员技能培训与持证上岗制度，针对焊工、起重工等特种作业人员开展理论与实操融合的培训模式，经考核合格后授予岗位资质证书，并建立定期复审机制以动态更新技能等级，有效规避无证操作引发的质量风险。引入独立第三方检测机构，依据国家及行业标准对原材料、焊缝质量与螺栓连接等关键环节实施独立检验，出具权威检测报告作为验收依据。验收阶段严格执行“三检制”，对隐蔽工程与分项工程实施分阶段验收，未通过第三方检测或验收不合格的工序严禁进入后续施工环节。通过外部监督与内部管控的双重机制，实现施工质量的全程可追溯与精准可控管理。

## 4 结语

将人工智能算法优化融入到高层建筑钢结构装配式施工工序规划中，通过探索新型连接节点与轻量化材料应用，能实现对超高层建筑、异形结构等复杂场景的质量改善，最终助力建筑行业实现高质量发展与“双碳”目标的有效实现。

### 参考文献

- [1] 师晓晖. 钢筋桁架楼承板施工质量控制体系与应用研究——以装配式钢结构建筑为例[J]. 中国品牌与防伪, 2025, (10): 168-170.
- [2] 汪杨. 装配式钢结构建筑防腐涂装施工中的质量控制分析[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(15): 69-71.
- [3] 黄桂祥. 装配式钢结构建筑施工安装技术及质量控制[J]. 建筑机械化, 2025, 46(01): 91-94.
- [4] 孔飞. 装配式公共建筑主体钢结构施工关键技术与质量控制研究[J]. 工程与建设, 2022, 36(04): 1063-1068.
- [5] 李晓明, 汪爱园, 罗明文, 等. 超高层大跨度复杂曲面网壳塔冠施工关键技术[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(23): 89-94.