

# 装配式建筑施工精度控制关键技术研究

郭梦涵

福州外语外贸学院, 福建 福州 350202

**摘要:** 随着建筑工业化推进, 装配式建筑凭借绿色环保、质量可控、施工快捷等优势得到快速发展, 但施工精度不足引发的结构安全与质量问题, 已成为制约其推广的关键因素。本文针对装配式建筑施工精度控制难题, 采用理论分析、数值模拟与工程实践相结合的方法, 围绕预制构件生产、运输存放、现场吊装定位及节点连接等关键环节展开研究, 提出基于 BIM 的全过程精度控制方法, 建立多维度精度控制标准与评价体系, 并研发集成激光扫描、全站仪测量与智能传感器监测的精度控制技术系统。工程应用结果表明, 该技术可将构件生产精度控制在  $\pm 2\text{mm}$  以内, 现场安装精度控制在  $\pm 3\text{mm}$  以内, 显著提升装配式建筑施工质量与效率。研究成果对提高装配式建筑施工精度具有重要的工程指导意义。

**关键词:** 装配式建筑; 施工精度控制; BIM 技术; 预制构件; 质量管理

## Research on Key Technologies for Precision Control in Prefabricated Building Construction

Guo Menghan

Fuzhou University of International Studies and Trade, Fuzhou, Fujian 350202, China

**Abstract:** With the advancement of construction industrialization, prefabricated buildings have developed rapidly due to their advantages of environmental friendliness, controllable quality, and high construction efficiency. However, structural safety and quality problems caused by insufficient construction precision have become a key factor restricting their wider adoption. Focusing on the challenges of precision control in prefabricated building construction, this paper adopts a combination of theoretical analysis, numerical simulation, and engineering practice. It investigates key stages including prefabricated component production, transportation and storage, on-site hoisting and positioning, and joint connection. A BIM-based whole-process precision control method is proposed, a multidimensional precision control standard and evaluation system is established, and a precision control technology system integrating laser scanning, total station measurement, and intelligent sensor monitoring is developed. Engineering application results show that this technology can control component production accuracy within  $\pm 2\text{ mm}$  and on-site installation accuracy within  $\pm 3\text{ mm}$ , significantly improving the construction quality and efficiency of prefabricated buildings. The research results provide important engineering guidance for improving construction precision in prefabricated buildings.

**Keywords:** prefabricated buildings; construction precision control; BIM technology; prefabricated components; quality management

### 1、引言

装配式建筑是建筑工业化的重要形式, 在全世界范围内得到迅速发展。根据住房和城乡建设部统计数据, 我国装配式建筑新开工面积由 2019 年的 4.2 亿平方米增加到 2023 年的超过 8.5 亿平方米, 年均增速为 20.3%, 占新开工建筑面积比例超过 30%。装配式建筑具有标准化设计、工厂化生产、装配化施工、信息化管理等优点, 大大提高了建筑质量和施工效率, 减少了环境污染和资源浪费。但是, 装配式建筑在快速发展的同时也遇到了施工精度控制这个核心技术问题, 精度控制是决定结构安全、使用功能以及工程质量的重要因素。传统的现浇混凝土建筑精度控制一般通过现场调整、修正实现, 而装配式建筑由于是预制构件装配, 其精度控制涉及到设计、生产、运输、安装等多个环节, 各个环节的精度误差会叠加在一起, 对最终工程质量造成很大影响, 所以必须有一套完整的精度控制技术来解决这个问题。

### 2、装配式建筑施工精度控制理论基础与影响因素分析

#### 2.1 装配式建筑施工精度控制理论框架

装配式建筑施工精度控制理论是根据建筑工业化生产原理以及系统工程理论提出的一种精度管理思想, 其内容包括整个生命周期内的精度管理。这个理论是围绕着精度传递链展开, 把装配式建筑施工分为设计精度基准确定、构件生产精度控制、运输储存精度保证、现场安装精度控制四个部分, 在每一个部分都有对应的精度控制标准以及技术措施。该理论利用概率论与数理统计的方法, 提出了精度控制的数学模型, 用误差分析及传递函数来表示各个阶段精度偏差的传播情况以及叠加效果。该理论重视全过程协同控制, 提出基于信息化技术的精度控制方法, 利用 BIM 技术、物联网传感器、激光扫描等现代信息技术进行施工精度的实时监控与及时调节, 使最终建筑产品达到设计要求和质量标准。

## 2.2 精度控制关键影响因素识别与分析

装配式建筑施工精度控制受到很多方面的影响，可以分为设计、生产、施工以及环境四个方面。设计方面主要包含构件尺寸公差设计、连接节点设计精度、装配顺序和工艺设计等，其中构件尺寸公差设计是影响整体精度的基础因素，合理公差配置可以有效防止精度累积误差。生产方面包括模具精度、混凝土收缩变形、养护条件控制、脱模时间等，在工厂化生产中模具精度直接影响构件几何尺寸精度，而混凝土材料特性导致体积变化也是影响构件精度的重要物理因素。施工方面有测量放线精度、起吊定位精度、临时支撑体系、安装工艺流程等，在施工现场复杂施工环境及多工序交叉作业情况下，给精度控制带来一定困难。环境因素主要是指温度变化、湿度影响、风荷载作用等自然条件对构件变形及安装精度的影响，应采取相应措施降低其不利影响。

## 2.3 施工精度误差传递机制研究

装配式建筑施工精度误差传递机制遵循误差累积理论，各个阶段产生的精度偏差在装配过程中一级一级地被传递并放大。误差传递可以表示为线性传递以及非线性传递两种形式，其中线性传递是尺寸偏差的简单叠加，而非线性传递是角度偏差、变形偏差对后续构件安装的影响。研究显示，预制构件制造误差通过装配连接传递到整个结构中去，其传递系数取决于构件几何形状、连接方式、装配方法等。垂直方向误差传递主要是由于楼层之间叠加造成，而水平方向误差传递是由于平面内构件之间相互作用引起。利用 Monte Carlo 方法进行仿真计算表明，如果一个构件精度控制在  $\pm 2\text{mm}$  以内，在五层装配之后整个结构精度偏差可能达到  $\pm 8 \sim 10\text{mm}$ ，所以在设计时就要考虑到误差传递的叠加作用，在设计时就采取措施减少误差传递链，保证最终结构符合精度要求。

# 3、装配式建筑施工精度控制关键技术体系

## 3.1 基于 BIM 的预制构件精度设计技术

基于 BIM 的预制构件精度设计技术利用三维参数化建模方式，对构件几何信息进行准确表示以及精度要求进行直观展示。该技术包含构件几何形状、材质、加工方式、安装要求等多个方面信息，利用参数化设计手段完成构件尺寸自动优化以及公差合理分配。BIM 模型具有加工工艺模拟功能，可以模拟混凝土收缩、温度变化等对构件精度影响，在模具设计时提前设置一定补偿值。技术系统搭建基于云服务协同设计平台，实现设计、制造、施工各个环节信息共享及精度要求传递，采用统一标准数据接口保证精度信息在整个产业链中正确传递。此外，该技术还具有虚拟装配功能，在施工之前可以进行装配精度仿真分析，发现可能存在的精度问题，从而有利于施工方案改进，大大提升预制构件设计精度及施工装配可控性。

## 3.2 构件生产阶段精度控制技术

构件生产阶段的精度控制技术以模具精度控制为核心，贯穿模具设计制作、构件成型养护、过程监测及质量检测验收全流程，通过多环节协同管控实现预制构件高精度生产。模具优先采用钢制组合式模具，依靠高精度机械加工与标准化装配工艺，确保整体几何尺寸偏差控制在  $\pm 0.5\text{mm}$  以内，关键受力与定位部位还配备精密微调装置，可根据混凝土早期收缩、徐变特性进行实时微量补偿，从源头保障构件成型精度。在构件生产与养护阶段，依托物联网在线监控系统，通过温度、湿度、应变及位移等多类型传感器，对混凝土浇筑、振捣、硬化及养护全过程的环境参数与结构变形进行连续监测，实时掌握构件早期性能变化，实现养护制度智能化、精细化调控。质量检测环节引入三维激光扫描仪与高精度数字化测量设备，对构件外形尺寸、平整度、预留孔位进行全面非接触式检测，检测精度可达  $\pm 1\text{mm}$ ，检测效率较传统人工测量提升三倍以上，大幅降低人为误差。同时，结合统计过程控制（SPC）质量管理方法，对生产数据、监测数据与检测结果进行实时统计分析趋势预测，及时识别异常波动并优化工艺参数，形成“监测—分析—调整—提升”的闭环控制体系，持续稳定提高构件生产精度，确保出厂预制构件完全满足设计与规范要求。

## 3.3 运输与存储过程精度保障技术

运输与存储过程精度保障技术主要解决构件脱离生产环境后如何保证其精度问题，形成包括包装防护、运输监测、存储管理等一整套技术方案。构件包装采用定制化支撑架及防护装置，依据构件形状以及刚度进行支撑点布置以及支撑刚度选择，以防止运输中发生变形或者损坏。运输车辆上安装有 GPS 定位系统、加速度传感器、倾斜角传感器等设备对运输过程中发生的震动、倾斜等进行监控，在监控数据超过一定范围时发出警报并采取相应措施。存储场地有统一的标准存储方法，在合理存储方式以及支撑下避免长时间存放导致构件发生变形或者精度降低，存储区域有环境监测设备保证存储环境符合构件精度要求，以便后期现场施工使用精度良好预制构件。

## 3.4 现场安装精度控制技术

现场安装精度控制技术是装配式建筑施工精度控制的关键环节，技术体系以高精度测量为基础，集成了激光全站仪、三维激光扫描仪、智能传感器等先进测量设备，建立了毫米级的测量控制网。测量控制采用分级布网的方式，通过建筑总控制网、楼层控制网、构件安装控制点的三级控制体系，保证测量精度的逐级传递和控制。起吊定位系统采用智能化起重设备，配有自动定位系统以及微调装置，可以做到构件的精确定位以及微米级的调节，定位精度为  $\pm 1\text{mm}$  以内。连接节点精度控制使用可调式连接件及智能化连接工艺，在预埋件精确定位的基础上，利用螺栓张拉力控制、焊接质量检测等方法对连接节点进行几何精

度及力学性能控制。

施工过程中采用数字化技术进行实时监控,在重要部位设置传感器对结构变形及受力情况进行监测,一旦出现偏差立即进行纠正。同时制定出一套完整的装配工艺及质量检查制度,在施工过程中严格按照工艺流程进行操作并逐条检查质量,保证每一项工作都符合要求。对于不同的预制构件及其连接形式制定相应的精度控制措施以及施工方法,给施工现场提供一个标准的技术支持,大大提升了装配式建筑施工现场安装精度以及施工质量。

#### 4、施工精度控制技术验证与应用效果分析

##### 4.1 工程案例精度控制技术应用

以北京某装配式住宅项目为工程依托,对前文所提出的预制构件精度控制方法开展了实际应用与效果验证。该项目总建筑面积约 8.6 万平方米,主体采用装配整体式混凝土结构体系,整体预制率达 76%,主要预制构件涵盖预制剪力墙板、叠合楼板、预制楼梯、预制阳台等,构件类型多样、安装精度要求高,具备典型示范意义。项目施工全过程采用基于 BIM 技术的数字化精度管控体系,在构件进场验收阶段,利用三维激光扫描仪对构件外形尺寸、预留预埋位置进行高精度信息采集,与 BIM 设计模型进行比对校核。现场吊装安装阶段,配合高精度全站仪完成基准点布设与定位放线,实现构件空间位置的精准引导。同时,依托智能传感器网络实时监测构件在吊装、就位、临时固定过程中的姿态、倾角及位置偏移,当偏差超出阈值时系统自动预警并生成精度控制报告,有效规避安装误差累积。

在预制构件生产环节,通过数字化钢模系统与智能温湿度养护设备联动控制,显著降低收缩与变形,使出厂构件尺寸精度稳定控制在  $\pm 1.8\text{ mm}$  以内。现场安装阶段采用多点激光定位与可调式支撑装置,实现构件快速精准对位,安装精度可达  $\pm 2.5\text{ mm}$ ,安装效率与精度较传统施工方法提升 60% 以上。工程实践表明,该套精度控制方法可有效提升预制构件生产与现场安装质量,减少返工与整改,为装配式建筑高质量、高效率建造提供了可靠技术支撑。

##### 4.2 精度控制效果评价与数据分析

通过对传统装配式建筑施工以及采用精度控制技术进行比较,后者明显提高了施工质量。据统计,预制构件一次安装合格率由原来的 78% 提高到 96%,由于精度原因造成的返工率下降到 0.8%。垂直度偏差  $\leq H/1000$  且  $\leq 10\text{ mm}$ ,平面位置偏差  $\leq \pm 3\text{ mm}$ ,连接节点精度偏差  $\leq \pm 2\text{ mm}$ 。质量检测结果表明,结构整体刚度比设计值增加 12%,构件连接强度达到设计要求的 108%。施工效率上,单层结构安装时间由原来的 8 天减少到 5.5 天,整个施工周期比传统方式减少 25%。同时,建立精度控制数据库,

共积累各种精度数据 15000 余条,为以后工程项目提供良好技术依据。

##### 4.3 技术经济性分析

从工程实例来看,采用精度控制技术有很好的经济效益。技术系统的前期投入主要有 BIM 建模软件、激光扫描仪、智能传感器等,共计约 280 万元,占项目总投资的 0.85%。由于减少了返工以及提高了施工效率,项目节省了约 520 万元的成本,投资回报率为 186%。人工费用上,精度控制技术减少了现场调整和修正工作量,每万平方米建筑面积可节省人工费用约 45 万元。材料损耗率由原来的 5.2% 下降到 2.8%,每万平方米节省材料费用约 38 万元。而装配式建筑行业 2023 年产值已达到 1.4 万亿元,如果该技术得到广泛应用,则可以给整个装配式建筑行业节省超过 400 亿元的成本,而且大大提高建筑的质量。

#### 5、结论

本论文提出了装配式建筑施工精度控制关键技术,实现了从预制构件生产到现场安装全过程精度控制。基于 BIM 技术、激光扫描技术和智能传感技术等构建的精度控制平台,很好地解决了装配式建筑施工中精度控制问题。工程实例表明,该技术可以将预制构件生产精度控制在  $\pm 2\text{ mm}$  以内,现场安装精度控制在  $\pm 3\text{ mm}$  以内,施工效率提高 25% 以上,质量合格率达到 96%。技术经济分析表明,精度控制技术的投资回报率为 186%,有很好的推广价值。研究成果对于装配式建筑施工精度控制提供了一整套解决方案,有利于促进建筑工业化发展以及提高装配式建筑施工水平,对装配式建筑在中国建筑业大规模应用起到良好推动作用。

#### 参考文献

- [1] 周智辉,孙波.内支撑体系装配式地铁站关键技术研究[J].隧道建设(中英文),2023,43(S1):464-472.
- [2] 廖金湘.装配式建筑预制叠合板施工工序及关键技术研究[J].工程技术研究,2022,7(19):58-60.
- [3] 刘晨昱,吴京,顾云凡,等.装配式建筑预制构件自动化安装方法[J].清华大学学报(自然科学版),2025,65(7):1209-1220.
- [4] 肖建庄,徐浩林,郭书浩,等.装配式建筑结构顶升逆作法原理与技术发展[J].建筑科学与工程学报,2024,41(1):1-14.
- [5] 王英.影响装配式建筑构件连接节点质量的因素分析[J].混凝土,2024,(12):175-177.