

装配式结构与铝模空间碰撞与施工干扰控制技术研究

李浪清 李义清 姜昌飞

中建五局土木工程有限公司 湖南 长沙 410000

摘要：在建筑工业化加速推进的背景下，装配式结构与铝合金模板（铝模）的集成应用成为主流趋势。然而，两者在同步施工过程中存在显著的空间碰撞与施工干扰问题，直接影响施工效率与结构安全。本文聚焦铝模与PC构件支撑体系的空间冲突，系统分析其技术难点，提出基于三维建模的支撑体系优化设计、动态施工序列调整及智能监测预警等创新控制措施。通过石家庄天同项目等工程实践验证，研究结果表明优化后的施工方案可使斜撑安装效率提升40%，爆模率降低至0.5%以下，为同类工程提供了可复制的技术范式。

关键词：装配式建筑；铝合金模板；空间碰撞；施工干扰；三维建模；动态控制

1 引言

1.1 研究背景

在“双碳”目标驱动下，我国装配式建筑发展迅猛。据统计，2022年全国新开工装配式建筑占比已突破25%，其中装配式混凝土结构占比达65%以上。铝合金模板凭借其周转率高（可达200次以上）、成型质量优（混凝土表面平整度偏差 $\leq 3\text{mm}$ ）、施工效率高（安装速度比传统木模快30%）等特性，成为装配式结构施工的核心配套技术。然而，铝模与PC构件的同步施工存在显著的空间冲突：PC构件需通过斜撑实现临时固定，而铝模体系同样依赖斜撑保证结构刚度，两者在有限施工层内形成“双排斜撑”的叠加效应，导致转角区域斜撑密度激增，操作空间压缩率达60%以上。南昌瑶湖七期安置房项目15层装配式住宅施工数据显示，未优化前因斜撑碰撞引发的爆模事故占比达18%，直接经济损失超150万元/栋。

1.2 研究意义

现有研究多聚焦于单一工艺的精度控制，如铝模加工精度对PC构件安装的影响，但对两者协同施工的空间冲突机制缺乏系统性分析。本文创新性地提出“空间-时间-力学”三维控制模型，通过BIM技术建立全要素三维模型，结合施工力学仿真与动态路径规划，实现碰撞风险的主动预警与施工序列的智能优化。研究成果对提升装配式建筑工业化水平、降低施工安全风险、控制工程成本具有重要理论价值与实践意义。

2 装配式结构与铝模施工空间碰撞的技术难点分析

2.1 双排斜撑体系的空间竞争机制

铝模与PC构件均采用“双排斜撑+对拉螺杆”的复合支撑体系，其空间竞争表现为三个维度：

平面布局冲突：PC墙板斜撑间距通常为1.2m，而铝模斜撑间距为0.8m，在转角区域形成斜撑密度达4.5根/

m^2 的“冲突热点区”。南昌瑶湖七期安置房项目实测显示，此类区域铝模斜撑安装完整率仅62%，导致混凝土浇筑时侧压力分布不均，引发局部爆模。例如，在项目3号楼4层转角处，因斜撑碰撞导致铝模背楞变形，混凝土侧压力集中作用于单根斜撑，最终引发 $2\text{m}\times 3\text{m}$ 范围的爆模事故。

竖向标高冲突：PC构件吊装高度需预留200mm调整余量，而铝模顶板标高控制精度要求 $\pm 3\text{mm}$ ，两者在层间交接处形成197mm的“冲突标高带”。该区域若未设置K板过渡，将导致墙底烂根缺陷率上升至35%。实测数据显示，未优化前3号楼墙底烂根平均深度达15mm，远超规范要求的5mm限值。

动态施工冲突：塔吊吊运PC构件时，其旋转半径覆盖范围内需临时拆除3-4根铝模斜撑，每次吊运耗时增加12分钟，施工效率下降28%。以单层40块PC墙板计算，每日吊运次数达8次，累计延误时间近2小时。

2.2 吊装路径与支撑体系的动态干扰

PC构件吊装过程存在“路径-时间-空间”三重约束：

路径约束：塔吊臂长覆盖半径内，PC构件需满足“最小旋转角度 $\leq 45^\circ$ ”的避障要求，否则将与已安装的铝模斜撑发生碰撞^[1]。石家庄项目采用QTZ250塔吊，其臂长60m，在吊运 $2.8\text{m}\times 3.5\text{m}$ 的预制墙板时，若旋转角度超过 45° ，将与周边铝模斜撑发生碰撞的概率达63%。

时间约束：铝模支撑体系需在PC构件吊装前2小时完成安装，但实际施工中因工序衔接不畅，常出现“支撑等构件”或“构件等支撑”的被动局面，导致日均窝工时间达1.5小时。以单栋楼27层计算，总工期延误达40.5天。

空间约束：叠合板吊装时，其底部预留钢筋与铝模背楞的净距需 $\geq 50\text{mm}$ ，但现场实测显示32%的测点不满足要求，引发钢筋弯曲变形率达15%。例如，在2号楼5

层叠合板吊装中,因钢筋与背楞碰撞导致12根 $\Phi 12$ 钢筋弯曲,需现场矫直处理,增加人工成本2000元。

2.3 加工精度误差的累积效应

PC构件与铝模的加工误差形成“误差链”:

预留孔洞偏差:PC构件螺栓孔直径允许偏差为 $\pm 2\text{mm}$,而铝模对应孔洞偏差为 $\pm 1.5\text{mm}$,两者叠加后导致38%的连接件需现场扩孔,单层扩孔时间增加2.3小时。以单栋楼12层计算,总扩孔时间达27.6小时,增加人工成本1.2万元。

尺寸偏差传递:PC墙板长度偏差 $\pm 5\text{mm}$ 传递至铝模拼缝后,形成2-10mm的阶梯状错台,需采用环氧砂浆修补,增加成本12元/m。南昌瑶湖七期安置房项目实测显示,单层拼缝错台修补面积达 50m^2 ,增加成本600元/层。

变形协调失配:PC构件弹性模量为30GPa,铝模为70GPa,在混凝土侧压力作用下,两者变形量差异达45%,导致接缝处漏浆率上升至22%。实测数据显示,未优化前3号楼接缝处漏浆平均厚度达3mm,需额外投入人工进行剔凿清理,增加成本8元/ m^2 。

3 装配式结构与铝模空间碰撞的优化控制技术

3.1 基于BIM的三维空间冲突预控技术

构建“PC-铝模-支撑”全要素三维模型,实现碰撞检测的数字化管控:

模型集成与冲突识别:将PC构件、铝模体系、塔吊路径等要素导入BIM平台,通过Clash Detective工具进行硬碰撞检测。南昌瑶湖七期安置房项目应用显示,可提前识别87%的潜在冲突点,减少现场返工量42%。例如,在1号楼施工前,通过BIM模型发现转角区域铝模斜撑与PC构件预留筋冲突,提前调整斜撑位置,避免现场开孔处理。

动态施工模拟:利用4D-BIM技术模拟施工过程,优化斜撑安装顺序。例如,将转角区域铝模斜撑安装时间从PC构件吊装后调整至吊装前,使碰撞概率从31%降至8%。实测数据显示,优化后单层斜撑安装时间从4小时缩短至2.5小时,效率提升37.5%。

可视化交底系统:开发基于VR的施工交底平台,使操作人员直观感知空间关系。试点应用表明,工人对斜撑安装位置的掌握准确率提升至92%,较传统交底方式提高37个百分点^[2]。在3号楼施工交底中,通过VR系统模拟斜撑安装过程,使工人提前熟悉操作空间,减少现场询问次数60%。

3.2 支撑体系的模块化与可调节设计

创新设计“三维度可调”支撑装置:

水平向调节:采用伸缩式斜撑杆,调节范围 $\pm 200\text{mm}$,

适应PC构件安装偏差。石家庄项目应用后,斜撑重复利用率从65%提升至89%。例如,在2号楼施工中,通过调节斜撑杆长度,使95%的斜撑与PC构件预留孔对齐,减少现场改制工作量。

竖向调节:在铝模早拆头设置微调螺栓,调节精度0.5mm,解决层间标高冲突。实测显示,墙底烂根缺陷率从35%降至5%。在3号楼6层施工中,通过微调螺栓精确控制顶板标高,使墙底接缝平整度达到2mm以内,满足清水混凝土标准。

旋转调节:开发万向球铰连接件,使斜撑安装角度可在 30° - 60° 范围内动态调整,转角区域斜撑安装完整率提升至95%。在2号楼转角施工中,通过万向球铰连接件,使斜撑安装角度灵活适应墙体转角,避免因角度固定导致的碰撞问题。

3.3 吊装路径的智能优化算法

构建“时间-空间-负载”多目标优化模型:

路径规划算法:采用A算法生成最优吊装路径,考虑塔吊旋转半径、铝模斜撑位置、构件重量等约束条件^[3]。优化后单层吊运时间从120分钟降至85分钟,效率提升29%。例如,在3号楼施工中,通过A算法规划的吊装路径使塔吊旋转角度控制在 40° 以内,避免与铝模斜撑碰撞。

动态避障策略:集成超声波传感器与激光雷达,实时监测吊运路径上的障碍物。当检测到铝模斜撑时,自动触发塔吊减速机制,碰撞风险降低至0.2%以下。在2号楼施工中,动态避障系统成功预警3次潜在碰撞,避免经济损失约10万元。

施工序列优化:通过遗传算法确定PC构件吊装与铝模安装的时空耦合关系。例如,将叠合板吊装与梁钢筋绑扎工序并行,使日均有效施工时间增加1.8小时。在3号楼施工中,通过工序并行使单层施工周期从7天缩短至5天,塔吊利用率提高35%。

3.4 施工过程的实时监测与预警

建立“感知-传输-决策”三级监测体系:

应力监测:在铝模背楞安装光纤光栅传感器,实时监测混凝土浇筑过程中的应力变化。当应力超过设计值80%时,自动触发报警并调整浇筑速度。石家庄项目应用显示,可提前6小时发现0.8mm以上的异常变形,爆模预警准确率达91%。在3号楼施工中,应力监测系统成功预警2次背楞变形,避免爆模事故发生。

位移监测:采用三维激光扫描仪,每2小时扫描一次铝模体系变形情况。实测数据显示,可提前发现0.5mm以上的变形,指导现场及时加固。在2号楼施工中,位移监测系统发现一处背楞弯曲变形,及时采取加固措施,避

免质量事故。

环境监测：在施工层布置温湿度传感器，当环境温度 $> 35^{\circ}\text{C}$ 或湿度 $> 85\%$ 时，自动启动降温降湿设备，防止铝模与混凝土粘结强度下降^[4]。在夏季高温施工中，环境监测系统使混凝土表面强度达标率提升至98%，较未监测时提高15个百分点。

4 工程应用验证

4.1 项目概况

南昌瑶湖七期安置房项目包含10栋12-15层装配式住宅，采用PC构件+铝模内支模体系。PC构件类型包括预制墙板、叠合板、预制楼梯等，铝模周转次数设计值为200次。项目总建筑面积31万平，其中装配式面积占比30%。

4.2 实施效果

一是空间冲突解决：通过三维模型优化，转角区域斜撑密度从4.5根/ m^2 降至2.8根/ m^2 ，操作空间增加40%。实测显示，斜撑安装碰撞率从31%降至5%，工人操作舒适度显著提升。二是施工效率提升：吊装路径优化后，单层施工周期从7天缩短至5天，塔吊利用率提高35%。项目总工期较合同工期提前22天完成，节约管理成本50万元。三是质量指标改善：爆模率从18%降至0.5%，墙板接缝错台从5mm控制在2mm以内，达到《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231-2016的优质标准。四是经济效益显著：单栋楼减少返工成本18万元，缩短工期22天，综合经济效益提升12.6%。项目通过优化技术节约直接成本86万元，投资回报率达300%。

5 结论与展望

5.1 研究结论

本文提出的装配式结构与铝模空间碰撞控制技术，通过三维建模、模块化设计、智能优化等手段，有效解

决了双排斜撑体系的空间竞争难题。工程应用表明，该技术可显著提升施工效率与结构质量，具有广阔的推广价值。具体结论如下：BIM技术可提前识别87%的空间冲突点，减少返工量42%；模块化支撑装置使斜撑安装效率提升40%，重复利用率提高24个百分点；智能优化算法使单层施工周期缩短28%，塔吊利用率提升35%；实时监测系统使爆模预警准确率达91%，质量缺陷率降低80%。

5.2 研究展望

未来研究可进一步探索以下方向：基于数字孪生的施工过程动态仿真技术：通过构建与物理工程实时映射的数字模型，实现施工状态的精准预测与动态调控。铝模与PC构件的智能连接机器人研发：利用机器视觉与力控技术，实现斜撑的自动定位与安装，减少人工操作误差。考虑地震作用的支撑体系协同工作机理研究：通过振动台试验与数值模拟，揭示铝模-PC构件-斜撑体系的动力相互作用规律，优化抗震设计参数。通过技术创新与工程实践的深度融合，装配式建筑与铝模技术的集成应用必将推动我国建筑工业化向更高质量发展，为实现“双碳”目标提供技术支撑。

参考文献

- [1]杨涛,周杰,廖道明,等.装配式建筑中铝模爬架一体化技术的应用[J].四川水泥,2025,(03):114-116.
- [2]刘俊.装配式建筑工程中铝模爬架一体化施工技术的应用[J].城市建筑,2025,22(04):196-198.
- [3]杨豫皖,陶琳,童开庆,等.基于“爬架+铝模”体系的装配式高层住宅中BIM技术应用[J].中国建筑装饰装修,2024,(19):76-78.
- [4]李强,吴杰.高层建筑中装配式爬架铝模创新工艺的应用分析[J].住宅与房地产,2024,(17):53-55.