

装配式建筑结构体系的关键技术与发展趋势研究

方梁¹ 张洋²

1. 聚合电力工程设计(北京)股份有限公司 河南郑州 4500001

2. 河南利业施工图审查有限公司 河南郑州 4500002

摘要: 文章聚焦装配式建筑结构体系, 深入探讨其关键技术与发展趋势。关键技术涵盖创新设计、智能生产与高效装配三大领域: 创新设计依托模块化与BIM技术优化设计流程; 智能生产借助自动化设备与新型材料提升构件品质; 高效装配依靠精密设备与先进连接工艺保障施工精度。在发展趋势上, 结构体系向多样化创新发展, 以适应多元需求; 构件生产朝着智能化、绿色化转型, 实现降本增效与环保节能; 施工技术融合信息化, 达成全生命周期管理与智能决策。研究成果对推动装配式建筑技术革新与产业升级具有重要参考价值。

关键词: 装配式建筑; 结构体系; 关键技术

引言

在建筑工业化与绿色发展浪潮下, 装配式建筑凭借高效、环保、质量可控等优势成为行业转型核心方向。其结构体系的关键技术与发展趋势直接关乎建筑产业升级成效。本文聚焦装配式建筑结构体系, 深入剖析创新设计、智能生产、高效装配等关键技术, 同时展望结构体系多样化、生产智能化绿色化、施工信息化高效化等发展趋势, 为推动该领域技术革新与可持续发展提供理论支撑。

一、装配式建筑结构体系的关键技术

(一) 创新设计技术

创新设计技术作为装配式建筑结构体系的核心驱动力, 从多维度革新传统设计模式, 为高效建造奠定基础。在设计理念层面, 模块化设计理念突破常规, 将建筑整体解构为功能明确、尺寸规整的标准化模块单元, 每个模块犹如精密的工业产品, 可在工厂进行精准预制。这种设计方式不仅大幅减少了现场施工的复杂性, 还能通过规模化生产降低成本。例如, 在装配式住宅设计中, 厨房、卫生间等功能空间被设计成独立模块, 其内部的水电管线、装饰部件均可在工厂预装完成, 运输至现场后直接组装, 极大提升了施工效率。

技术应用方面, BIM技术的深度融入为装配式建筑设计带来了质的飞跃。通过构建三维协同设计平台, 建筑、结构、给排水、电气等多个专业的设计信息得以整合于同一数字模型之中。各专业设计师能够在虚拟环境下实时沟通、协同作业, 提前发现并解决设计冲突。比

如, 在复杂的商业综合体项目中, BIM技术可直观呈现机电管线与结构构件之间的碰撞问题, 避免施工阶段的拆改, 节省工期和成本。同时, 借助BIM模型的可视化特性, 设计方案能够以更直观的方式呈现给业主和施工方, 便于各方提出优化建议, 进一步提升设计精准度。连接节点设计是装配式建筑结构安全的关键环节。设计师需依据结构在不同工况下的受力特性, 如地震、风荷载等, 结合建筑功能需求, 审慎选择刚性或柔性连接方式。刚性连接能够保证节点在受力时如同现浇结构般协同工作, 适用于对整体性要求较高的框架结构; 而柔性连接则赋予节点一定的变形能力, 在地震作用下可有效吸收能量, 提升结构的抗震性能, 常用于装配式剪力墙结构。在实际设计中, 还需对节点构造进行精细化设计, 精确计算钢筋锚固长度、合理布置连接件, 通过有限元分析等手段模拟节点受力情况, 确保节点传力路径清晰、可靠, 为装配式建筑的结构安全保驾护航。

(二) 智能生产技术

智能生产技术依托自动化与智能化的深度融合, 重塑装配式建筑构件的生产模式。在构建自动化生产线时, 先进的搅拌、成型、养护设备实现了无缝集成, 形成一套高度协同的生产体系。以搅拌设备为例, 智能控制系统能够根据不同构件的需求, 精确计量水泥、砂石、外加剂等原材料, 误差可控制在极小范围; 成型环节采用高精度模具和自动化振捣设备, 确保构件尺寸精准、表面平整, 如生产预制叠合楼板时, 自动化设备可将楼板厚度误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内; 养护环节则通过智能温湿

度控制系统，为混凝土养护提供最佳环境，缩短养护周期，提高设备周转率，实现预制构件的规模化、标准化生产，满足大规模建筑项目的需求^[1]。

在质量把控方面，精准调控混凝土配合比是关键。生产企业运用大数据分析和智能算法，结合构件使用环境、性能要求等因素，优化混凝土配合比设计。通过对原材料的严格筛选和实时检测，如采用光谱分析仪快速检测砂石的含泥量、有害杂质含量，确保原材料质量达标。同时，对生产工艺参数进行全程监控，利用传感器实时采集搅拌时间、浇筑速度、养护温度等数据，并反馈至中央控制系统，一旦参数偏离设定范围，系统立即自动调整，保障构件强度、耐久性及外观质量。例如，生产预制清水混凝土构件时，通过精准控制生产参数，可使构件表面达到镜面效果，无需二次装饰。

（三）高效装配技术

在装配式建筑施工中，高效装配技术的实施离不开高精度起重设备与专业吊装工艺的紧密配合。起重设备的选型需综合考虑预制构件的重量、尺寸、安装高度及现场施工条件，选用适配的塔式起重机、汽车起重机等设备。以超高层装配式建筑为例，常采用动臂式塔式起重机，其起升高度和起重量大，能够满足高层构件吊装需求。在吊装过程中，严格控制吊点位置与吊索角度是确保构件平稳吊运的关键，技术人员会根据构件的重心分布，运用力学计算软件精确确定吊点，采用对称分布或特殊的吊装工装，使构件在吊运过程中保持平衡，避免因受力不均导致构件损坏。同时，专业的吊装工艺要求操作人员严格遵循操作规程，通过缓慢起吊、匀速运行、精准落钩等操作，确保构件能够平稳、准确地吊运至安装位置。

可靠的连接技术是保障装配式建筑结构整体性的重中之重。套筒灌浆连接技术在装配式混凝土结构中应用广泛，其原理是将钢筋插入预埋于预制构件中的灌浆套筒内，然后注入高强无收缩灌浆料，使钢筋与套筒形成可靠连接。施工时，需严格控制套筒的质量和灌浆料的性能，确保灌浆饱满度，通过压力监测和可视化检查手段，保证每一个套筒灌浆连接的质量。螺栓连接则在装配式钢结构中发挥着重要作用，高强度螺栓通过施加预紧力，使连接件紧密贴合，依靠摩擦力传递荷载。在安装过程中，需严格控制螺栓的拧紧力矩，采用扭矩扳手等专用工具，按照规定的顺序和力矩值进行紧固，确保连接节点的可靠性，使各个构件拼接后形成稳固的整体

结构，共同承担荷载。

二、装配式建筑结构体系的发展趋势

（一）结构体系多样化与创新

未来，装配式建筑结构体系的多样化发展将紧密围绕不同地区的环境特点和用户需求展开。在气候寒冷的东北地区，装配式建筑需着重考虑保温性能，除了现有的结构体系，可能会创新发展出具有高效保温层的复合结构体系，在预制构件生产时，将保温材料与结构层一体成型，减少冷桥现象，提升建筑的节能效果；在多地震的西南地区，结构体系需要具备更强的抗震性能，这将促使研发团队探索新型耗能减震结构体系，通过在节点处设置特殊的减震装置，或者优化结构布局，提高建筑在地震中的安全性^[2]。

除了现有的混凝土结构、钢结构、木结构外，新型结构体系将不断涌现。钢混组合结构凭借钢材的高强度和混凝土的良好耐久性，能够充分发挥两者优势，在高层建筑和大跨度桥梁建设中具有广阔应用前景。其通过合理设计钢梁与混凝土板的连接方式，使两者协同工作，既能减轻结构自重，又能提高承载能力和抗变形能力。竹木混合结构则以其绿色环保、生态美观的特点，适用于生态旅游建筑和低层住宅。将竹材与木材或其他材料相结合，利用竹材的高强度和韧性，弥补木材在某些性能上的不足，同时降低成本，打造具有地域特色和自然风格的建筑。

（二）构件生产智能化与绿色化

在构件生产领域，绿色化发展已成为核心趋势之一。未来将持续聚焦绿色、环保、节能型材料的研发与应用，从源头降低建筑全生命周期对环境的影响。高强度钢筋凭借其优异的力学性能，在满足同等承载需求下可减少钢材用量，降低资源消耗与碳排放；高耐久性混凝土通过添加矿物掺合料、优化配合比等方式，提升混凝土的抗渗性、抗冻性与抗侵蚀能力，延长构件使用寿命，减少后期维护与更换需求；高性能钢结构采用新型防腐、防火涂层材料，在保障结构安全的同时，降低对环境有害的防护处理频次。此外，新型生态材料如再生骨料混凝土、植物纤维复合材料也将逐步应用于预制构件生产，这些材料利用工业废料、废弃植物等作为原料，既实现资源循环利用，又减少对天然原材料的依赖^[3]。

智能化升级则为构件生产带来了革命性变革。生产过程中，机器人将承担更多精细化、重复性工作。例如，钢筋加工机器人能够自动完成钢筋的调直、切断、

弯曲与焊接，精度可达毫米级，且生产效率是人工的数倍；喷涂机器人可根据构件表面形状和工艺要求，智能调整喷涂角度与涂料用量，确保涂层均匀，减少涂料浪费。自动化生产线实现了从原材料输送、构件成型到养护脱模的全流程自动化控制，通过智能调度系统，可根据订单需求灵活调整生产节奏，提高设备利用率。3D打印技术更是突破传统生产限制，不仅能够快速生产具有复杂曲面、镂空结构等特殊造型的预制构件，满足建筑设计的个性化创意需求，还能通过分层打印的方式，优化构件内部结构，实现轻量化设计，降低材料消耗。智能化生产系统的深度应用，实现了对生产过程的全流程精准管控。借助物联网技术，生产线上的各类设备、传感器与中央控制系统实时联网，采集温度、湿度、压力、振动等生产参数，构建数字化生产模型。一旦某个环节出现参数异常，系统立即自动预警并触发应急调整机制，如混凝土搅拌过程中实时监测坍落度，若数值偏离设定范围，系统自动调整用水量和外加剂用量。

（三）施工技术信息化与高效化

在高效化施工层面，新型设备与工艺的迭代升级成为提升施工效率的关键抓手。新型起重设备正朝着智能化、大型化方向发展，例如采用液压自升式塔式起重机，其搭载智能负载敏感系统，可根据吊装重量自动调节提升速度与扭矩，减少能耗的同时提升作业效率；结合无人机辅助定位技术，在复杂场地环境下，能快速确定最佳吊装路径，避免障碍物干扰。快速连接技术持续创新，如装配式混凝土结构中的“干式连接”技术，通过预埋件与机械连接件组合，替代传统灌浆工艺，将单个节点连接时间从数小时缩短至数十分钟；装配式钢结构领域的“磁吸式快速连接”方案，利用高强磁铁辅助定位，配合自动拧紧设备，实现螺栓连接的快速精准安装，大幅压缩现场作业时间^[4]。

信息化技术的深度融入，则为装配式建筑施工构建起全流程数字化管理体系。物联网技术通过在预制构件植入RFID芯片或传感器，实时追踪构件生产进度、运输轨迹与存放状态。例如，在运输途中，温湿度传感器可监测构件存储环境，若出现异常立即预警；在施工现场，通过蓝牙定位标签实现构件的精准定位与快速查找。大数据分析技术则成为质量管控的“智慧大脑”，将施工过程中产生的海量数据，如构件尺寸偏差、连接节点强度测试结果、设备运行参数等进行整合分析，建立质量风

险预测模型。一旦发现数据异常趋势，系统自动生成质量改进方案，如通过分析多个项目中套筒灌浆饱满度数据，优化灌浆工艺参数与设备设置。人工智能技术进一步推动施工管理向智能化迈进。在施工进度管理方面，AI算法基于历史项目数据与实时施工情况，动态调整施工计划，优化资源配置，如自动协调多台起重机的作业顺序与时间，避免交叉干扰；在安全管理领域，借助计算机视觉技术与AI识别算法，实时监控施工现场人员行为与设备状态，自动识别未佩戴安全帽、违规操作等危险行为，并即时发出警报。此外，人工智能还可模拟不同施工方案的实施效果，为管理者提供决策支持，例如通过虚拟建造技术对比不同吊装方案的效率与安全性，从而选择最优施工路径，实现施工过程的智能优化与科学决策。

结语

装配式建筑结构体系的技术革新与产业升级，是建筑行业突破传统模式、实现可持续发展的必然路径。关键技术层面，创新设计以模块化与BIM协同提升效率，智能生产通过自动化设备与绿色材料把控质量，高效装配凭借精密工艺与快速连接确保施工精度，形成了覆盖设计、生产、施工的完整技术链条。展望未来，结构体系的多样化创新将适配多元场景需求，构件生产的智能化与绿色化将推动低碳转型，施工技术的信息化与高效化将实现全流程智能管控。尽管当前面临技术标准统一、建造成本优化等挑战，但随着政策支持深化与技术迭代加速，装配式建筑必将以更高效、更环保、更智能的形态，成为新型建筑工业化的核心载体。

参考文献

- [1]高俊,赵波,宋永超,等.装配式建筑结构体系设计要点及发展趋势分析[J].工程建设与设计,2024,(19):14-16.
- [2]程江勇.装配式建筑结构体系设计要点及发展趋势分析[J].智能建筑与智慧城市,2023,(07):87-89.
- [3]肖从真,许杰峰,姜波,等.新型装配式混凝土建筑结构体系、设计方法与自主BIM应用技术[J].建设科技,2023,(11):101-103.
- [4]唐宏.PEC结构体系在装配式建筑工程中的应用分析[J].科学技术创新,2022,(32):125-128.