

建筑结构设计优化与装配式技术创新协同发展研究

于锦华

中天建设集团有限公司 浙江 杭州 310020

【摘要】：建筑结构设计优化与装配式技术创新，是推动建筑业转型升级的两大核心动力。从本质上看，二者并非各自独立的技术路线，而是在目标层面高度耦合、在实施层面相互支撑的关系。本文重点分析了设计优化与装配式技术协同发展的几个关键机制。首先是标准化设计与多样化需求之间的平衡方面；其次是 BIM 技术驱动下的设计—生产—施工一体化协同方面；第三是连接节点优化对结构整体性能的提升方面。尤其是节点问题在装配式结构中一直是个常见问题，但近年来有不少研究给出了切实可行的改进方案。

【关键词】：建筑结构设计优化；装配式建筑；技术创新；协同发展；BIM 技术；绿色建造

DOI:10.12417/2811-0536.26.09.063

引言

结构设计优化说到底就是通过对受力体系、材料选用和构造细节进行合理调配，在保证安全的前提下，把经济性和功能性统一起来。而装配式建筑走的则是另一条路——它以标准化设计、工厂化生产和装配化施工为核心特征，可以说从根本上改变了传统建造方式。从政策层面来看，近几年国家出台了很多文件，要大力发展装配式建筑，推动整个行业转型升级。与此同时，BIM、人工智能辅助设计、高性能材料这些新技术的不断涌现，确实为结构设计优化与装配式技术的深度融合提供了技术支撑。不过，当前行业内仍然存在一些比较棘手的问题，比如设计与生产脱节、标准化程度不够、协同机制不完善等等，这些问题在很大程度上制约了二者协同效应的充分发挥。本文的主要工作，就是综述建筑结构设计优化与装配式技术创新协同发展的研究现状与关键问题，分析二者融合的内在机制与技术路径，并对未来的发展方向做出展望，希望能为推动我国建筑工业化与高质量发展提供一些参考。

1 建筑结构设计优化的理论框架与方法

1.1 结构设计优化的基本内涵

建筑结构设计优化，简单来说就是在满足安全性、适用性和耐久性这些基本要求的前提下，通过科学的方法对结构方案进行比选和调整，最终目标是让经济性达到最优，或者让综合性能做到最好。从优化层次来看，结构设计优化通常可以分成三个层面。第一个是概念设计阶段的宏观优化，主要包括结构体系选型、抗侧力体系布置这类大方向上的决策。第二个是构件

层面的优化，比如梁柱的截面尺寸、板厚、配筋这些参数怎么定，都需要仔细权衡。第三个是拓扑优化，它要解决的问题是在给定的设计空间里，找到最优的材料分布路径。这三个层面并不是彼此孤立的，而是相互关联、层层递进的关系，合在一起才构成了一个完整的结构优化体系。

1.2 结构体系选型与概念设计优化

结构体系选型，可以说是设计优化中的首要环节。不同的建筑功能、高度、抗震设防等级和地质条件，所对应的最优结构体系其实是不一样的。概念设计优化强调的是一种整体思维，就是通过合理的结构布置来减小内力峰值、均衡刚度分布，最终达到降低材料用量和施工难度的目的。在概念设计阶段，有三个层面是优化的关键考量因素：结构的规则性、传力路径的明确性，以及冗余度的设置。规则的结构平面和立面布置，可以有效避免应力集中和扭转效应，这样一来，很多不必要的构造加强措施就可以省掉。传力路径如果设计得合理，荷载就能以最短、最直接的途径传递到基础，材料浪费自然也就少了。另外，适当的结构冗余度能够提升结构在极端荷载作用下的安全储备，这一点在优化设计中同样不可忽视。

1.3 构件尺寸优化与材料利用效率

构件尺寸优化是结构设计优化中最常见且最易见效的层面。通过对梁、板、柱、墙等构件的截面尺寸进行精细化调整，可以在满足承载力与变形要求的前提下，显著降低混凝土和钢筋的用量。近年来，随着高性能材料的发展，构件尺寸优化的空间进一步扩大。采用高强钢筋和高强混凝土可以在同等承载力需求下

减小构件截面，既节省了材料，又减轻了结构自重，进而降低了基础荷载和地震作用。

2 装配式建筑技术创新进展

2.1 预制混凝土结构技术

预制混凝土（PC）结构是当前装配式建筑中应用最为广泛的技术体系。近年来，PC结构在构件连接技术、生产工艺和设计方法等方面取得了显著进展。在连接技术方面，钢筋套筒灌浆连接技术的成熟应用，使得预制构件的节点连接质量得到了有效保障，实现了“等同现浇”的抗震性能目标。在生产工艺方面，自动化流水线和智能养护系统的引入，让预制构件的生产效率和质量稳定性都有了大幅提升。以前靠人工操作，质量和效率都较难把控，现在情况改善了不少。高精度模具和数控加工技术的应用，使得构件尺寸精度可以控制在毫米级别，这就为现场的快速精准安装打下了比较好的基础。与此同时，夹心保温外墙板这类一体化预制技术也逐渐成熟了。这种技术把结构、保温和装饰功能集成到了一起，减少了现场的工序，建筑品质也得到了提升。从实际效果来看，这种集成化的思路是装配式建筑发展的一个重要方向。

2.2 钢结构装配式技术

钢结构装配式建筑凭借轻质高强、施工速度快、抗震性能好这些优势，在公共建筑、工业厂房和超高层建筑中的应用已经相当广泛了。从技术创新的角度来看，主要集中在两个方向：一个是连接节点优化，另一个是防火防腐处理。连接节点方面，高强螺栓连接、自锁式连接和栓焊混合连接等新型节点形式的研发，实现了构件的快速精准安装。相比之下，传统的焊接节点质量容易受到人为因素的影响，这个问题在工程实践中比较常见，而新型节点正好解决了这个问题。再来看材料应用方面，耐候钢和高强钢的推广使用，不仅减小了构件截面尺寸、减轻了结构自重，还提升了结构的耐久性和可回收性，可以说是一举多得。钢-混凝土组合结构技术也逐渐成熟，这种技术充分发挥了钢材抗拉和混凝土抗压各自的优势，在高层建筑中表现出了不错的力学性能和经济性，实际用下来效果比较好。

2.3 混合结构与新型结构体系

混合结构体系的核心思路，就是把不同材料的优势整合到一起，这也是装配式建筑技术创新的一个重要方向。具体来说，钢-混凝土混合结构在核心筒采用现浇混凝土、外围框架采用钢结构，这样一来，刚度和效率之间就找到了一个不错的平衡点。木-混凝土混

合结构则是利用了木材轻质和低碳的特点，在低层和多层建筑中展现出独特的生态价值，尤其在一些对环保要求比较高的项目里，优势比较明显。

在新型结构体系方面，新型装配式空腹夹层板结构是一个比较值得关注的进展。这套体系是由中国工程院马克俭院士团队研发的，它的思路是在井字梁结构的基础上做进一步的拓展，最终形成了一种多层大跨度装配式正交斜放混凝土空腹夹层板柱结构体系。从构成上看，主要由横向的空腹夹层板楼盖和竖向的框架支撑结构两部分组成。2025年，这项技术在国内首次成功应用于实体工程，算是从理论走向了实践。与传统结构相比，新型装配式空腹夹层板结构的优势还是比较明显的：自重轻、跨度大、空间利用率高、施工速度快，可以降低20%以上的材料消耗与碳排放。在工业厂房、仓库、体育馆这类大跨度建筑中，这套体系会有较大的应用前景。

3 设计优化与装配式技术协同发展的关键机制

3.1 标准化设计与多样化需求的平衡

标准化可以说是装配式建筑降低成本、提升效率的核心前提，这一点在业内基本已经形成了共识。但另一方面，多样化又是满足市场个性化需求时绕不开的要求。所以，如何在标准化和多样化之间取得平衡，就成了设计优化与装配式技术协同发展中首先要面对的问题。“少规格、多组合”的设计原则，为解决这个矛盾提供了一个比较有效的思路。具体来说，就是通过模数协调技术，把建筑空间、构件尺寸和接口进行统一规划，然后用有限的标准化构件去组合出丰富多样的建筑形态。构件种类不多，但搭配方式可以很灵活。在结构设计层面，优化工作主要聚焦在两个方向上：一个是构件类型的归并，另一个是模数网络的统一。构件规格种类减少，模具的周转率就能得到提升，生产成本自然也会下降。与此同时，合理的拆分设计也很关键——在保证结构整体性的前提下，要让构件的重量和尺寸能够适应运输和吊装的条件。总的来说，这种标准化与灵活性兼顾的设计策略，既发挥了装配式建筑的工业化优势，又给建筑设计留出了足够的设计空间。

3.2 BIM技术驱动的一体化协同设计

BIM技术是实现结构设计优化与装配式技术创新协同发展的核心技术平台。传统的设计-生产-施工模式中各环节信息割裂，设计变更往往导致生产返工和现场调整，造成资源浪费和工期延误。BIM技术通过建立统一的信息模型，实现了建筑、结构、机电、装

修等多专业的协同设计,使各参与方在同一平台上实时共享数据,有效避免了设计冲突。在装配式建筑中,BIM技术的价值尤为突出。设计阶段,通过参数化建模和碰撞检查,可以提前发现构件之间的干涉问题,优化构件拆分方案。生产阶段,BIM模型直接对接数控加工设备,实现“设计即制造”的自动化生产。施工阶段,基于BIM的4D施工模拟可以精确安排构件进场和吊装顺序,实现现场零等待安装。说到底,这种全生命周期的数字化协同,使设计优化的成果能够无缝传递到生产和施工环节,真正实现了设计优化与装配式技术的深度融合。BIM与人工智能的融合代表了协同设计的未来方向。AI技术可基于大量历史项目数据,自动识别设计冲突模式并提出优化建议。深度学习算法在结构构件自动布置、配筋方案优化和预制构件拆分等方面展现出不小的潜力。此外,BIM与GIS技术的融合,使装配式建筑的规划设计能更好地融入城市空间环境,为项目选址、构件运输路线规划和施工现场布置提供了更全面的决策支持。

3.3 连接节点优化与结构整体性能提升

连接节点是装配式建筑的关键部位,也是结构设计优化的重点对象。装配式结构的整体性能在很大程度上取决于节点连接的可靠性。近年来,针对连接节点的优化研究取得了丰硕成果。在力学性能方面,通过有限元分析和试验验证,优化了套筒灌浆连接、螺栓连接和预应力连接等节点形式的构造细节,使其力学性能接近甚至达到现浇节点的水平。在施工便利性方面,节点优化注重减少现场作业难度。采用可拆卸螺栓连接替代焊接,既保证了连接质量,又便于构件的拆装和更换。在抗震性能方面,通过在节点区域设置耗能装置或合理设计塑性铰区,使装配式结构在地

震作用下能够实现可控的塑性变形,有效耗散地震能量。这些节点优化成果,使得装配式建筑在高烈度地震区的应用成为可能,拓展了装配式技术的适用范围。可恢复功能节点,是近年来国际地震工程领域的一个研究热点,关注度一直比较高。该技术通过采用预应力筋结合耗能钢筋或可更换耗能元件,让结构在经历设计地震之后,不仅主体结构能够保持弹性,而且残余变形也非常小。震后只需要把耗能元件换掉,结构就能恢复使用功能。日本有一栋12层的装配式建筑采用了自复位预应力节点设计,在E-Defense振动台上做了试验。输入的地震波相当于1995年阪神地震的水平,结果结构的残余层间位移角只有0.15%,主体结构也没有出现明显损伤,充分验证了可恢复功能节点的优越性能。从实际意义来看,这些节点优化的成果,使得装配式建筑在高烈度地震区的应用成为了可能,在一定程度上拓展了装配式技术的适用范围。

4 结语

本文从结构设计优化的理论框架出发,梳理了装配式建筑在预制混凝土结构、钢结构和混合结构领域的技术创新进展,并重点分析了二者协同发展的几个关键机制,包括标准化设计与多样化需求的平衡、BIM技术驱动的一体化协同,以及连接节点优化等问题。从研究结果来看,结构设计优化与装配式技术的深度融合,确实能够有效提升建筑品质、缩短建设周期、降低全生命周期成本。这是实现建筑业高质量发展的一条有效路径。值得一提的是,当前以BIM、人工智能和物联网为代表的数字化技术,正在加速重塑建筑业的生产方式。这些技术手段的不断成熟,为结构设计优化与装配式技术的协同发展提供了前所未有的技术条件,未来的发展空间非常大。

参考文献:

- [1] 周秉坤.装配式混凝土建筑结构设计与应用研究[C]//广西网络安全和信息化联合会.第一届工程技术管理智能化转型学术交流会会议论文集(下册).[出版者不详],2026:421-422.
- [2] 蔡冬.装配式建筑结构标准化设计与模块化施工协同优化路径[C]//广西网络安全和信息化联合会.第十四届工程技术管理与数字化转型学术交流会论文集(上册).[出版者不详],2025:249-251.
- [3] 李城,陈凯文.基于BIM技术的装配式建筑协同设计与设计优化研究[J].智能建筑与智慧城市,2025,(S1):69-71.
- [4] 杨向楠,冀文欢.基于BIM技术的装配式建筑结构设计优化研究[J].住宅产业,2025,(3):66-68.
- [5] 郑颢.基于BIM技术的装配式建筑结构设计优化研究[J].住宅产业,2024,(6):94-96.
- [6] 王自胜,王凤臣,叶正可.装配式建筑的结构设计优化与性能评估[J].建筑机械化,2024,45(3):117-120.
- [7] 高新艳.建筑结构设计优化措施与技术探讨[J].太原学院学报(自然科学版),2024,42(1):24-29.
- [8] 刘晨.装配式结构设计应用与优化策略探究[J].中国建筑金属结构,2022,(6):68-70.