

绿色建筑理念下的结构轻量化设计方法研究

姜秀君

摘要: 在“双碳”目标的驱动下,绿色建筑发展对结构设计的可持续性提出了更高的要求。基于此,本文聚焦于结构轻量化设计方法,通过整合材料科学、力学优化以及数字化技术,提出基于生命周期评价的多目标协同优化框架,以此构建参数化拓扑优化模型,能有效实现结构自重的降低。这种方法能有效平衡结构的安全性、经济效益及环境效益,为绿色建筑结构体系创新提供必要的理论支撑和技术路径。

关键词: 绿色建筑; 结构轻量化; 设计

传统结构设计以强度安全为核心导向,导致材料的冗余度较高,且资源能耗较大,这和绿色建筑“减量化、再利用以及资源化”的基本原则存在着矛盾性。而现有针对结构轻量化设计则聚焦于单一目标优化、缺乏对全生命周期环境的影响,因此,在绿色建筑全产业链视角下,系统探索结构轻量化的多维度设计,旨在建立兼顾安全性、经济性和生态性的结构优化理论体系,以更好地推动建筑行业向着低碳化、智能化的方向转型升级。

一、绿色建筑导向下结构轻量化设计多目标协同优化框架

(一) 目标维度

在绿色建筑导向下,结构轻量化设计的核心目标需突破传统且单一的安全导向,从而转向多维度协同优化。而在此基础上,结构安全性是基础目标,需满足抗震、抗风以及耐久性等规范要求,并通过有限元分析验证结构在极端工况下的应力分布与变形控制能力。但基于全生命周期碳排放则是绿色建筑的核心指标,需覆盖原材料生产、施工建造以及运营维护等全阶段,并采用生命周期评价方法来量化碳排放^[1]。对于全生命周期成本则需平衡初始投资与长期运维费用,例如,轻量化结构可增加材料单价,通过减少基础造价、缩短工期或降低能耗以实现综合成本优化的目的。当三者协同时,通过权重分配的方式,能有效寻找到安全性不降低、碳排放与成本双降的最优解,如通过拓扑优化以减少冗余材料,不但能有效降低自重,又能减少施工能耗。

(二) 约束条件

绿色建筑导向下结构轻量化的约束条件中,规范标准作为首要约束条件,包括对绿色建筑结构设计规范、绿色建筑评价标准以及消防安全等规定,才能有效确保优化结果的合法合规性。而材料性能约束则需充分考虑到轻质材料的力学性能与耐久性,以避免因材料缺陷而引发的结构失效问题,例如,在使用纤维增强复合材料时,必须验证与混凝土的粘结性能与长期老化效应。此外,施工可行性约束则需匹配现有施工技术水平,如轻量化结构的模块化设计需要符合装配式建筑吊装能力,拓扑优化生成的异形节点以满足可制造性的需求,并通过构建约束条件数据库,能在优化过程中自动筛选不可行方案,以提升设计效率。

(三) 优化算法

结构轻量化多目标协同优化伴随着复杂的算法求解,其中包括遗传算法、粒子群优化和多岛遗传算法。首先,在遗传算法中,可通过模拟自然选择机制,以编码化设计变量为个体,交叉、变异操作迭代生成最优解,以适用于离散变量优化,但容易陷入到局部最优中^[2]。其次,粒子群优化通过模拟鸟群觅食行为,并以粒子位置代表设计参数,速度更新引导搜索方向,具有收敛速度快且全局搜索能力强的特点,但需要合理设置惯性权重以平衡探索与开发能力。最后,多岛遗传算法则是将种群划分为多个子岛屿独立进化,并定期通过迁移操作交换信息的方式,既能保持种群多样性又能加速收敛。这种方式适用于高纬度复杂问题,并在实际应用中能有效结合算法优势,例如,可使用先进的MIGA进行全局粗搜索,并用PSO进行局部进修以提升效率。这些不同的优化算法,能为决策者提供最优的选择。

作者简介: 姜秀君(1985—)男,汉族,新疆石河子市,大学本科,中级职称,研究方向:建筑结构设计。

二、绿色建筑导向下结构轻量化关键技术路径

(一) 材料-结构一体化设计

对于绿色建筑导向下结构轻量化的设计，基于“材料-结构一体化设计”时，可贯穿轻质材料开发、性能量化与结构适配的全链条。为此，需构建轻质材料力学性能参数库，并系统整合再生混凝土、纤维增强复合材料以及高强度钢等新型轻质材料的力学性能参数，以涵盖密度、弹性模量等关键性指标。而数据库则需基于标准化试验与长期环境暴露测试数据，确保参数的可靠性，并纳入到材料成本、施工工艺要求等经济性信息，以此为设计阶段提供多维度的决策依据。而在此基础上，构建材料性能和结构形成的匹配关系模型，并通过机器学习或参数分析方法，以揭示材料性能和结构拓扑、受力模式的内在关联性。例如，高强轻质材料适用于大跨度空间结构的受拉区域，而具有优异能量耗散能力材料则被用于抗震节点设计中^[3]。对于模型，可结合有限元仿真与多目标优化算法，在动态调整材料分布式结构形式下，以满足安全性、舒适性和功能性需求，可有效实现结构自重最小化与全生命周期碳排放、成本的综合性，并最终形成“材料选型+结构优化+性能验证”的闭环设计体系。

(二) 参数化拓扑优化技术

在绿色建筑导向下的结构轻量化参数化拓扑优化技术中，可通过数字化手段以实现材料高效分布和结构性能的跃升，其核心在于结合有限元分析的拓扑优化流程和敏感性分析进行加载模拟，以实现从设计到验证的完整闭环。而基于有限元分析的拓扑优化流程以结构性能为导向时，通过参数化建模能将设计域离散为有限元网络，并将其定义为可优化区域。然后，采用变密度法或水平集法等数学方法，以材料密度或者边界轮廓为设计变量，可构建拓扑优化的数学模型，并结合有限元求解器迭代计算结构在单工况或者多工况下的应力、应变分布等生成材料分布云，最终实现“材料按需分配”的轻量化设计。为了确保优化结果的鲁棒性，还需通过敏感性分析量化设计变量对目标函数的影响程度，以识别关键参数并优化其取值范围。此外，采用多工况加载模拟覆盖结构全生命周期，还有可能遭遇到极端的工况，并通过加权组合或者极限值分析的方式，以确保优化结构在复杂环境下的安全性与耐久性，并最终形成兼顾绿色性能和工程可行性的轻量化结构方案。

(三) 数字化建造与性能验证

绿色建筑理念驱动下的结构轻量化技术体系构建，

亟需突破传统设计与施工模式的制约。在这一背景下，数字化建造与结构性能验证的协同机制成为关键突破点。BIM技术作为核心数字化平台，实现了轻量化结构全要素信息的系统集成，包括几何构型参数、材料力学特性及拓扑优化成果等多维数据的动态关联。基于此，设计阶段可开展三维可视化模拟分析，精准评估结构性能表现，并自动生成涵盖材料消耗量、碳排放指标及施工工艺复杂度的多维度评估报告。BIM平台与有限元分析软件的深度耦合，建立了结构性能的实时验证机制，设计变更信息可即时反馈至模型系统，确保轻量化结构在实现减重目标的同时，严格满足抗震、抗风等结构安全规范要求^[4]。而新型建造技术的应用为轻量化结构的实施提供了有效路径，3D打印技术凭借其逐层沉积制造的特性，可直接成型高性能混凝土或金属粉末构成的复杂拓扑构型，显著降低传统加工工艺中的材料损耗与模具成本。装配式施工则通过模块化设计理念，将轻量化结构分解为标准化构件，在工厂环境中完成预制加工后进行现场装配，不仅有效缩短施工周期，降低现场作业能耗，还可通过构件的标准化复用提升资源利用效率。二者有机结合，形成了“设计+制造+施工”全链条的数字化协同体系，为轻量化结构从理论模型向绿色建筑实体的转化提供了技术支撑，有效解决了传统建筑结构在材料使用、施工工艺及环境影响等方面的瓶颈问题。这一技术路径的实施，不仅推动了建筑行业向低碳、高效方向转型，也为实现建筑全生命周期的可持续发展目标奠定了坚实基础。

三、绿色建筑导向下结构轻量化设计全生命周期评价方法

(一) 评价范围

生命周期评价作为量化轻量化结构环境影响的系统性方法论，其评价边界必须严格覆盖从原材料获取至最终处置的全生命周期。在原材料获取阶段，需对再生混凝土、纤维增强复合材料及铝合金等轻质材料的开采、加工与运输过程中的能源消耗与碳排放进行系统性量化，同时对其再生潜力与单位材料的资源消耗密度进行科学评估^[5]。施工阶段的环境影响分析应涵盖构件预制、现场装配及施工机械运行等环节的能源消耗与废弃物产出，其中3D打印技术虽能有效降低模板使用导致材料浪费，但其设备运行能耗亦需纳入环境影响评估体系。结构使用阶段需对建筑运行能耗、维护频率及材料更换成本进行综合分析，轻量化设计通过降低结构自重可有效

减少基础能耗，但其长期耐久性与结构性能稳定性必须通过长期监测数据进行验证。拆除与回收阶段的评估重点在于结构解体难度、材料可回收率及回收处理过程的能源消耗，装配式轻量化结构因模块化设计而具备较高的拆解便利性，但需建立完善材料分类回收体系以实现资源的高效循环利用。通过整合全生命周期各阶段的环境影响数据，可实现对轻量化结构环境效益的全面、客观评估，为建筑行业绿色低碳转型提供科学决策依据，有效支撑建筑全生命周期可持续发展目标的实现。

（二）核算模型

碳排放核算体系的构建需依托生命周期评价方法，以政府间气候变化专门委员会推荐的核算框架为基准，通过将各生命周期阶段的活动水平数据与对应的排放因子进行乘积运算，实现全生命周期碳排放总量的系统性量化。数据采集过程应严格遵循权威性与区域适应性原则，原材料生产环节的数据可源自行业基准数据库或企业实测数据。施工阶段的能耗数据应通过现场实测或施工模拟软件获取，运维阶段的能耗分析需整合建筑能耗模拟与实际运行监测数据，拆除回收阶段的数据则依据同类工程案例或回收企业技术报告进行系统性采集。为提升核算精度，必须针对轻量化结构的特性建立专项数据采集机制，尤其对新型轻质材料的碳排放因子，应通过生命周期实验测定获取，避免直接套用传统材料排放因子导致的系统性偏差，从而确保碳排放核算结果的科学性与区域适用性。

（三）经济性分析

轻量化设计的经济性评估需基于全生命周期成本框架，实现初始投资与长期运维成本的动态平衡。初始投资构成包括轻质材料采购成本、新型施工技术的附加费用，以及结构减重所引致的基础工程造价节约。长期运维成本则涵盖结构健康监测、定期维护、材料更换及运行能耗等要素。尽管轻质材料的单位成本较高可能推高初始投资，但结构自重的降低可显著减少基础维护频次，并通过优化围护结构热工性能降低空调系统运行能耗，从而在全生命周期内实现净收益。经济性分析应采用动

态评价方法，如净现值与内部收益率，将未来各阶段运维成本折现至基准时点，与初始投资进行量化比对^[6]。例如，某办公建筑项目通过拓扑优化技术实现混凝土用量减少，虽材料成本增加，但因基础工程造价降低及运维能耗下降，其全生命周期成本较传统结构降低。这也充分证实了轻量化设计的经济可行性，类似这种案例验证了结构轻量化在提升建筑全生命周期经济效能方面的显著价值，为同类工程提供了可复制的经济性评估范式。

结束语

结构轻量化设计在绿色建筑的可行性中，采用参数化拓扑优化与高性能轻质材料组合策略，能有效保障结构安全的前提下，以显著降低资源消耗与碳排放量。同时，在该过程中，还应构建完善的标准规划，以推动轻量化结构体系在装配式建筑、超高层建筑等领域的规模化应用，以此为全球气候治理贡献建筑领域提供必要的参考借鉴，以更进一步实现“双碳”目标的要求。

参考文献

- [1] 刘春红. 装配式轻量化工业建筑钢结构设计应用[J]. 城市建设, 2025, (15): 46-48.
- [2] 李桥. 高差地形下绿色建筑结构轻量化与节能协同设计[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(13): 47-49.
- [3] 刘洋, 林心渝, 王骏达, 等. 模块建筑生态化木结构及轻量化铝结构研究进展[J]. 绿色建筑, 2024, (06): 56-62.
- [4] 詹素虹, 郭太军, 刘国强. 装配式市政隧道结构轻量化、标准化设计研究[J]. 城市道桥与防洪, 2024, (05): 273-278+28-29.
- [5] 陈明, 黄岸, 李经纬. 装配式建筑预制构件模具轻量化研究[J]. 建设机械技术与管理, 2022, 35(02): 82-84+88.
- [6] 杨显龙, 冯伟, 熊新红, 等. 基于变密度法的建筑机器人结构拓扑与能耗优化研究[J]. 起重运输机械, 2022, (14): 40-45.