

Research on the optimization technology of Building structure design

Jinrong Xiang

Hubei Tianjiao Shengda Construction Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 445000, China

Abstract

Traditional building structure design has bottlenecks such as low efficiency and resource waste. This study proposes an intelligent performance-driven optimization method. Variable density method and level set theory are used to establish the topology optimization framework, and the finite element simulation technology is combined to complete the rapid iteration of structure and morphology, and the lightweight goal is realized through the coordinated adjustment of material density gradient and geometric boundary. Genetic algorithm and parametric modeling tools are introduced to develop a geometry-material collaborative optimization strategy under multi-objective constraints to dynamically balance the seismic performance, wind resistance requirements and resource efficiency. The actual engineering case shows that after the frame-shear wall system, the number of redundant components is reduced, the material consumption decreases and the standard index meets; the large span truss node adopts the topology optimization scheme, the stress distribution tends to be uniform, the proportion of prefabricated components increases, and the construction process is simplified. The results show that the intelligent algorithm has engineering applicability in multi-objective optimization, but computing time consuming and cross-professional collaboration are still technical difficulties. In the future, the integrated application of AI lightweight model and BIM platform will be deepened to promote the automation and upgrade of the design process.

Keywords

building structure optimization; topology optimization; parametric modeling; multi-objective performance optimization

建筑结构设计优化技术研究

向金蓉

湖北天骄晟达建设工程有限公司, 中国·湖北 武汉 445000

摘要

传统建筑结构设计存在效率低、资源浪费等瓶颈,本研究提出一种智能化性能驱动优化方法。采用变密度法与水平集理论建立拓扑优化框架,结合有限元仿真技术完成结构形态快速迭代,通过材料密度梯度与几何边界协同调整实现轻量化目标。引入遗传算法与参数化建模工具,开发多目标约束下的几何-材料协同优化策略,动态平衡抗震性能、抗风需求与资源效率。实际工程案例显示,框架-剪力墙体系经优化后核心筒刚度提升,冗余构件数量减少,材料消耗下降且规范指标达标;大跨度桁架节点采用拓扑优化方案,应力分布趋于均匀,预制构件比例增加,施工流程简化。结果表明,智能算法在多目标优化中具备工程适用性,但计算耗时与跨专业协同仍是技术难点,后续将深化AI轻量化模型与BIM平台的集成应用,推动设计流程自动化升级。

关键词

建筑结构设计优化; 拓扑优化; 参数化建模; 多目标性能优化

1 引言

建筑结构设计优化是提升工程经济性与安全性的核心手段,但传统设计依赖经验迭代,存在效率低、资源冗余及多目标协同困难等问题。当前拓扑优化方法在复杂形态生成中易陷入局部最优,智能算法计算效率不足制约多约束场景应用,参数化建模与工程实践衔接仍需深化。本研究聚焦结构拓扑优化与智能算法融合,提出基于变密度法和水平集理

论的混合优化框架,集成有限元分析构建材料分布动态迭代模型;开发遗传算法与梯度下降法的混合优化策略,嵌入参数化建模工具实现几何形态与力学性能同步寻优。研究结合高层建筑与大跨度空间结构案例,验证优化方法在轻量化、抗震性能及施工可行性方面的提升效果,为智能驱动结构设计提供技术支撑。

2 建筑结构设计优化关键技术

2.1 结构拓扑与形态优化方法

结构拓扑与形态优化方法突破传统经验设计范式,基于材料分布与力学性能耦合机制实现轻量化与高承载协同目标^[1]。研究提出变密度法与水平集法的混合拓扑优化框架,

【作者简介】向金蓉(1992-),女,土家族,中国湖北人,本科,从事土木工程研究。

在有限元分析中引入材料密度场与隐式曲面双变量控制，优化流程中动态调整单元密度与几何边界，通过双变量交互迭代机制解决单一方法在复杂形态生成中的局部最优与数值不稳定问题。针对超高层建筑框架-剪力墙体系，建立考虑竖向刚度突变与水平荷载传递路径的拓扑优化模型，以材料密度梯度表征结构刚度分布特征，优化后关键区域剪力墙密度显著提升，冗余框架单元密度同步降低，实现传力路径清晰化与材料效率最大化协同目标。在大跨度空间桁架设计中，基于水平集法的形态优化生成非对称节点连接方案，结合几何曲率与应力场分布重构节点拓扑形态，有限元验证表明优化后最大主应力峰值明显下降，节点焊接长度大幅缩减，应力集中现象显著缓解，同时降低异形构件加工难度。进一步引入多尺度拓扑优化策略，在宏观尺度定义结构整体形态，微观尺度细化构件截面与连接节点拓扑，实现“整体-局部”协同优化。该方法通过数学建模与力学响应双重驱动，突破传统设计对对称性与经验公式的依赖，为复杂工程形态创新提供兼具理论严谨性与工程实用性的优化工具，推动结构设计从“经验试错”向“性能导向”范式转型。

2.2 智能算法与参数化建模技术

智能算法与参数化建模技术重构结构优化设计流程，解决多变量、非线性约束下的高效寻优难题。研究开发遗传算法-梯度下降法的混合优化引擎，用了遗传算法全局搜索能力生成初始种群，结合梯度下降法对高适应度个体进行局部精细化调整，通过种群进化与梯度方向修正的协同机制，突破单一算法在复杂解空间中的早熟收敛与计算效率瓶颈^[2]。在 Grasshopper 参数化平台中，构建几何参数（如构件截面、节点角度）与力学性能（位移、应力）的实时反馈机制，将结构形态调整过程映射为参数空间内的动态优化路径，实现“几何-力学”双向驱动设计。以某大跨体育馆网壳为例，参数化模型驱动杆件长度与节点坐标自适应调整，混合优化引擎筛选出抗风性能最优的曲面构型，风振响应幅值显著降低且动力稳定性达标。进一步引入神经网络代理模型，通过深度学习拟合有限元计算结果，构建高维力学响应面替代传统数值仿真，优化迭代周期大幅缩短，设计效率提升与工程快速决策需求精准匹配。研究拓展多学科耦合优化框架，在参数化模型中集成建筑功能约束（如空间净高、设备管线布局），使结构形态优化兼顾建筑美学与机电协同需求。该方法通过智能算法驱动参数化建模，实现从“人工试错”到“数

据驱动”的设计范式跨越，为复杂工程提供兼具创新性与可行性的优化解决方案。

2.3 多目标性能驱动优化设计

多目标性能驱动优化设计突破传统单目标局限，构建安全、经济、可建造性协同机制。基于 Pareto 前沿的分层优化策略被提出，将抗震性能、经济指标、施工可行性整合至统一数学框架，利用 NSGA-II 算法筛选非支配解集，实现多维目标协同寻优^[3]。高层建筑案例中，改进方案兼顾混凝土用量控制与刚度强化需求，层间位移角满足规范限值，构件标准化率提升简化施工流程。大跨度桁架结构案例建立应力集中系数、节点制造成本、安装容错性多目标模型，优化后节点应力梯度趋于平缓，预制构件比例增加加快施工进度，装配精度得到有效控制。动态权重调整算法被引入，其核心逻辑在于依据设计阶段自动分配目标优先级：方案阶段侧重安全与经济平衡，施工阶段强化可建造约束。该算法通过权重因子动态映射工程需求，实现高层建筑基础成本压缩与抗震性能双达标，大跨节点疲劳寿命延长与加工费用下降同步完成。此方法突破静态模型缺陷，构建多专业协同的弹性决策体系，推动结构优化从局部改进转向全局整合，支撑复杂工程全生命周期效能升级。

3 优化技术工程应用与验证

3.1 高层建筑结构轻量化优化案例

某体育馆大跨双层网壳工程验证了拓扑优化与智能算法的协同应用效果。项目采用变密度法和水平集法相结合的优化方法，对网壳曲面形态和荷载传递路径进行重构^[4]。通过材料密度梯度调整杆件轴向刚度分布，强化高应力区域杆件承载能力，弱化低效区域材料配置，构建高效的空力学传递体系（表 1）。结合遗传算法与梯度下降法的组合优化策略，对杆件截面尺寸和节点连接形式进行参数化调整，在减少用钢量的同时满足抗风性能要求，确保结构挠度控制在规范允许范围内。

优化后网壳结构基频显著提高，风振响应幅值稳定在人体舒适度标准内（表 1），实现轻量化、安全性、舒适性的多目标平衡。施工阶段，标准化杆件比例提升至 88%（原 65%），复杂曲面构件数量减少降低加工误差风险，现场焊接作业量从 2,400 延米缩减至 1,500 延米，工期由 14 个月压缩至 11 个月。

表 1 优化前后关键参数对比

参数	优化前	优化后	规范限值	数据来源
用钢量 (吨)	1,250	980	-	BIM 模型材料统计
最大挠度 (mm)	86	62	75	ANSYS 静力分析
基频 (Hz)	1.2	1.8	-	模态分析
风振加速度 (m/s ²)	0.25	0.15	≤0.15	风洞试验 + 瞬态动力学计算

3.2 大跨度空间结构受力性能提升案例

某体育馆大跨双层网壳工程验证了拓扑优化与智能算法的协同作用。研究采用变密度法与水平集法构建混合拓扑优化框架,重构网壳曲面形态与荷载传递路径。通过材料密度梯度动态调控杆件轴向刚度分布,高应力区域杆件密度强化,冗余区域密度弱化,形成高效空间传力体系。结合遗传算法与梯度下降法的混合优化策略,对杆件截面与节点形式进行参数化调整,在控制用钢量的同时嵌入抗风性能约束,实现挠度限值严格达标。

优化后结构基频显著提升,风振响应幅值稳定在人体舒适度标准范围内。节点连接优化基于应力场分布重构拓扑形态,采用铸钢节点替代传统焊接节点,最大主应力峰值明显下降,疲劳寿命延长至满足50年设计基准期风振循环荷载需求。施工阶段引入BIM技术对优化节点进行预制加工与拼装模拟,标准化杆件比例大幅提高,安装误差显著缩小,现场焊接作业量缩减,工期合理压缩。极端荷载分析表明,优化方案在峰值风速下最大应力低于规范限值,局部屈曲系数达标,结构稳定性有效增强。

3.3 优化方案经济性与安全性对比分析

优化方案经济性与安全性对比分析揭示多目标性能驱动优化的综合价值。针对高层建筑案例,对比传统经验设计与优化方案:优化后混凝土与钢筋用量分布更趋合理,建材资源利用率优化降低直接成本;结构刚度提升使抗震设防烈度需求下降,基础尺寸缩减降低土建造价;构件标准化率提高推动模板重复使用率上升,施工效率提升间接减少人力与机械投入^[5]。安全性维度,优化方案层间位移角限值富余度提升,结构塑性铰分布均匀化,抗震冗余度增强,罕遇地震下连续倒塌风险可控。大跨度空间结构案例中,优化后节点应力集中现象显著缓解,疲劳寿命延长降低运维成本;结构整体稳定性增强使极端风荷载下动力失稳概率下降,保险费用同步优化。

经济性量化模型基于全生命周期成本理论,涵盖设计迭代、施工损耗、运维维护等阶段,优化方案总成本显著降低,投资回报周期压缩。安全性评估结合可靠度理论与风险概率分析,优化后结构安全冗余系数提高,灾害链式破坏路

径被有效阻断。研究建立“经济-安全”双目标量化评价体系,引入成本-效益比与风险损失函数,将经济性增益与安全性提升映射为统一决策指标。工程验证表明,高层建筑案例单位面积造价下降且结构损伤容限提升,大跨空间结构全寿命周期维护频率降低且失效概率达标。该体系突破传统单目标评价局限,为业主、设计与施工方提供跨阶段协同决策工具,推动结构优化技术从理论方法向工程实践的高效转化,赋能行业绿色化、智能化转型升级。

4 结论

建筑结构设计优化技术研究证实,基于变密度法与水平集法的混合拓扑优化框架能够有效解决复杂结构形态生成中的局部最优问题,材料密度梯度与几何边界动态调整策略实现轻量化与高刚度协同目标;遗传算法-梯度下降法混合引擎结合神经网络代理模型,突破多变量非线性优化效率瓶颈,参数化建模技术驱动几何-力学实时反馈机制,显著提升大跨空间结构抗风与抗震性能;多目标分层优化策略与动态权重调整算法建立“经济-安全-可建造性”多维协同机制,工程案例验证高层建筑混凝土用量减少且抗震冗余度提升,大跨节点应力集中缓解且施工效率优化。研究揭示智能算法与拓扑优化融合可降低全生命周期成本并提升结构可靠性,但算法计算效率与多学科耦合设计仍待突破,未来需深化AI-BIM集成技术以实现全流程自动化与可持续性优化。

参考文献

- [1] 张鹏阳,丁雨淋,郝蕊,等.全局线形特征与局部结构特征约束的隧道激光雷达点云逆向参数化建模方法[J].测绘工程,2025,34(02):24-31.
- [2] 陈云,周澳华,高聚堡,等.基于多工况拓扑优化的挤压铸造悬置托臂轻量化设计[J/OL].特种铸造及有色合金,1-12[2025-03-18].
- [3] 胡昌德.高层建筑结构设计中抗震性能优化的关键技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(07):86-88.
- [4] 王应远,袁玉佳,费凌.基于遗传算法的重型齿轮性能优化设计[J].机械研究与应用,2025,38(01):123-127.
- [5] 邓又殷.建筑外墙材料的性能评价与优化研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(18):172-174.