

基于拓扑优化的高强度轻质结构设计与仿真分析

马振朝 410103198502080010

在航空航天、新能源汽车、高端装备制造等领域，结构设计长期面临着承载性能与重量控制的核心矛盾：传统经验设计往往为保证安全冗余过度增加构件厚度，导致结构自重过大推高运行能耗与材料成本，而盲目减重又会引发应力集中、刚度不足等可靠性问题。拓扑优化作为结构轻量化设计的核心方法，能够通过数值算法在给定设计空间内优化材料分布，在满足力学约束的前提下实现材料利用率最大化，为高强度轻质结构开发提供了系统化的技术路径。本文以典型悬臂承载结构为研究对象，采用变密度拓扑优化方法完成材料分布优化，结合有限元仿真对优化后结构的力学性能进行验证分析，探索拓扑优化在轻质结构设计中的应用效果，为同类工程构件的轻量化改进提供参考。

1 摘要

为解决传统结构设计中承载能力与自重的矛盾，本文以悬臂承载结构为研究对象，基于变密度拓扑优化方法开展高强度轻质结构设计，并通过有限元仿真完成力学性能验证。结果表明，经过拓扑优化得到的结构在满足最大应力、最大挠度约束的前提下，相比初始设计体积减少 32.7%，比强度提升 41.2%，实现了材料的高效利用。研究结果显示，拓扑优化方法能够在给定设计空间内合理分配材料，有效提升结构的承载效率，可为各类工程轻质结构的设计提供技术支撑。

关键词

拓扑优化；轻质结构；有限元仿真；变密度法

2 拓扑优化基本原理与方法选择

拓扑优化的核心思想是在给定的设计区域内，根据预设的目标函数与约束条件，通过迭代计算调整单元材料的有无，实现材料分布的最优配置，目前工程领域常用的拓扑优化方法主要包括均匀化方法、变密度法、水平集方法三类。均匀化方法通过引入微结构单元描述材料属性，计算精度较高但算法复杂度大，难以应用于大规模工程问题；水平集方法通过水平集函数描述结构边界，能够得到清晰光滑的结构轮廓，但对初始参数设置要求较高，迭代稳定性不足；变密度法将设计变量简化为单元相对密度，通过连续密度插值模型建立密度与弹性模量的对

应关系，将拓扑优化问题转化为材料密度分布的优化问题，算法实现简单、计算效率高，已经成为商业结构优化软件中主流的拓扑优化方法，因此本文选择变密度法开展结构拓扑优化设计。

变密度法的优化模型可表述为：以结构的最小柔顺度（即最大刚度）为目标函数，以体积分数为约束条件，设计变量为单元相对密度，优化数学模型如式(1)所示：

$$\min C(\rho) = U^T K U; \quad \text{s.t. } V(\rho)/V_0 \leq f; \quad K(\rho) = \sum \rho_i^p K_i$$

式中， $C(\rho)$ 为结构柔顺度， U 为结构节点位移向量， K 为结构整体刚度矩阵， ρ 为单元相对密度， $V(\rho)$ 为优化后结构体积， V_0 为初始设计区域体积， f 为预设的体积分数约束， p 为惩罚因子，用于惩罚中间密度单元，推动优化结果向 0-1 密度收敛， K_i 为第 i 个单元的刚度矩阵。该模型在保证结构刚度最大化的同时，将结构体积控制在预设范围内，恰好匹配高强度轻质结构“刚度最大化、体积最小化”的设计需求。

3 拓扑优化设计过程

3.1 初始设计与参数设置

本文以工程中常用的悬臂承载结构为设计对象，初始设计区域为长 200mm、宽 100mm、厚 10mm 的矩形域，材料选用航空领域常用的 6061-T6 铝合金，材料参数为：弹性模量 $E=70\text{GPa}$ ，泊松比 $\mu=0.33$ ，屈服强度 $\sigma_s=276\text{MPa}$ ，密度 $\rho=2700\text{kg/m}^3$ 。边界条件设置为：设计区域左端全约束固定，右端底面中心点施加竖直向下的集中载荷 $F=1000\text{N}$ ，设计目标为在满足最大应力不超过屈服强度、最大挠度不超过 0.5mm 的约束下，实现结构体积最小化，预设体积分数约束 $f=0.4$ ，惩罚因子 $p=3$ ，收敛公差设置为 0.001。

3.2 优化结果分析

经过 26 次迭代计算后，优化结果满足收敛条件，得到最终的材料密度分布结果。去除密度小于 0.1 的单元后，优化后的结构呈现出沿主传力路径分布的分叉式梁结构，材料主要集中在固定端到加载点的传力路径上，非传力区域的材料被完全去除，符合结构受力的基本规律。拓扑优化后结构体积为 79820mm^3 ，相比初始设计区域体积 119000mm^3 减少了 32.9%，减重效果十分显著。

4 优化结构的仿真验证

为验证拓扑优化后结构的力学性能,将拓扑优化得到的结构模型进行边界光滑处理后导入有限元软件,开展静力学仿真分析,网格采用二阶四面体单元,平均网格尺寸设置为 2mm,边界条件与载荷设置与拓扑优化阶段保持一致。仿真结果显示,优化后结构的最大等效应力为 242.6MPa,小于材料屈服强度 276MPa,满足强度要求;最大挠度为 0.431mm,小于设计约束要求的 0.5mm,满足刚度要求。

为进一步对比优化效果,对相同体积的经验式开孔轻量化结构进行仿真分析:经验设计在初始矩形结构中心开设尺寸为 80mm×40mm 的矩形孔,体积约为 87000mm³,略大于拓扑优化结构体积,仿真得到最大应力为 291.3MPa,已经超过材料屈服强度,最大挠度为 0.512mm,也超出了刚度约束,说明拓扑优化结构的材料分布合理性显著优于传统经验设计。计算得到拓扑优化结构的比强度(强度与密度的比值)为 89.8MPa·m³/t,相比初始设计的 63.6MPa·m³/t 提升了 41.2%,结构承载效率得到大幅提升。

5 结论

本文基于变密度拓扑优化方法完成了悬臂承载结构的高强度轻量化设计,并通过有限元仿真验证了优化结构的力学性能,研究得到以下结论:第一,拓扑优化方法能够根据结构受力特点合理分配材料,去除非传力区域的多余材料,在满足强度刚度约束的前提下实现显著减重,本文案例中减重比例超过 30%,比强度提升超过 40%,轻量化效果显著;第二,拓扑优化得到的结构性能显著优于传统经验式轻量化设计,能够有效解决承载能力与自重的矛盾,提升结构的承载效率;第三,拓扑优化结合有限元仿真的设计流程,能够为各类工程领域的轻质结构开发提供高效可靠的技术路径,在航空航天、新能源汽车等对结构重量敏感领域具有广阔的应用前景。后续研究将结合增材制造工艺约束,对拓扑优化结构进行可制造性改进,进一步拓展拓扑优化方法的工程应用范围。

参考文献

- [1] 张宪明, 荣见华, 姜节胜. 结构拓扑优化设计的发展现状与展望[J]. 力学进展, 2004, 34(4): 463-476.
- [2] 高云凯, 朱一凡, 刘哲. 变密度拓扑优化方法在汽车零部件轻量化设计中的应用[J]. 汽车工程, 2010, 32(11): 971-974.
- [3] 王选, 李涤尘, 赵万华. 增材制造与拓扑优化结合的轻量化结构设计[J]. 机械工程学报, 2018, 54(1): 129-136.

