

# 机械设备轻量化设计与结构强度优化分析

王 晨

杭州华新机电工程有限公司 浙江 杭州 310030

**摘要:** 在机械设备追求高效节能与高性能发展的背景下, 本文首先阐述了材料选择、拓扑、尺寸、形状等轻量化设计方法及结构强度优化的概念目标与各类方法; 接着深入分析了轻量化设计与结构强度优化既相互矛盾又有机统一的关系, 提出建立综合优化模型、分层优化、基于可靠性优化等协同优化策略; 最后指出协同优化面临多学科耦合分析复杂等关键技术问题, 虽然应用前景广阔, 但存在诸多挑战, 需深入研究与创新解决。

**关键词:** 机械设备; 轻量化设计; 结构强度优化

引言: 在机械设备向高效节能与高性能发展的进程中, 轻量化设计与结构强度优化是提升装备竞争力的关键。前者通过材料、拓扑、尺寸、形状优化降重, 后者聚焦提升承载与可靠性, 二者既有矛盾又需协同平衡。本文系统梳理两类设计的方法体系, 深入剖析其内在协同机制, 针对性提出多目标综合优化策略, 并探讨多学科耦合分析等关键技术挑战, 旨在为机械设备实现高性能化发展提供兼具理论深度与实践指导价值的系统性解决方案。

## 1 机械设备轻量化设计方法

### 1.1 材料选择轻量化

材料选择轻量化是实现机械设备减重的关键路径, 轻质高强材料应用是直接有效途径。碳纤维复合材料兼具低密度、高强度、高模量及耐腐蚀特性, 在航空航天领域通过制造机翼、机身等部件显著降低飞机重量并提升燃油经济性; 铝合金凭借良好力学性能与低密度优势, 在汽车制造中用于发动机缸体、车身框架等部件生产, 有效减轻汽车自重。材料选择需综合权衡性能参数与工程约束, 除密度和强度外, 成本、加工性能、耐腐蚀性及疲劳寿命均为核心考量因素<sup>[1]</sup>。钛合金虽具备高强度与耐腐蚀性, 但高成本与加工难度限制其应用范围, 需结合设备功能需求、使用环境及全生命周期成本进行决策。材料优化遵循“强度达标—密度最小—成本最优”的递进原则, 优先满足结构承载能力要求, 其次通过密度参数控制惯性质量, 最终在可行材料体系中选择经济性最佳方案。针对不同工况需差异化选材, 如振动环境需关注材料阻尼特性, 腐蚀介质需强化耐蚀性评估, 高频载荷需验证疲劳抗力。现代轻量化设计已形成多目标协同优化方法, 通过材料性能数据库与仿真分析技术, 实现性能、重量与成本的三维匹配, 为装备轻量化提供系统性解决方案, 推动航空航天、交通运输等领域向高效节

能方向持续发展。

### 1.2 拓扑优化设计

(1) 拓扑优化基本原理, 拓扑优化设计是基于数学与力学原理的结构优化方法, 其核心原理是在限定设计空间内通过调整材料分布, 使结构在满足强度、刚度等约束条件下实现重量最小化或性能最大化目标。该方法突破传统经验设计框架, 可在概念设计阶段生成创新型结构拓扑, 为复杂装备轻量化提供理论支撑。(2) 拓扑优化在机械设备中的应用流程, 首先明确设计域与边界条件, 界定需优化结构范围及其所受载荷类型、约束位置等关键参数; 其次选择优化算法与目标函数, 常用变密度法等数值方法构建材料密度与结构性能的映射关系, 以质量最小化或刚度最大化作为优化目标; 随后依托计算机辅助工程软件进行迭代计算, 通过有限元分析求解材料最优分布方案, 生成具有非均匀密度特征的概念结构; 最终对优化结果进行工程化处理, 包括几何重构、工艺性评估及性能验证, 针对制造约束和实际工况进行参数修正, 确保优化结构满足可制造性、可靠性和经济性要求<sup>[2]</sup>。现代拓扑优化已形成多学科协同优化体系, 结合增材制造等先进工艺, 实现从概念设计到实体制造的无缝衔接, 在航空航天承力构件、新能源汽车车身框架等领域显著提升结构效率, 推动装备向轻量化、高性能方向持续发展。

### 1.3 尺寸优化设计

尺寸优化参数选取需基于结构力学特性与设计需求, 聚焦对强度、刚度、稳定性等关键性能指标影响显著的几何量, 如板壳厚度、杆件直径、孔径位置等, 通过参数敏感性分析筛选主导变量, 排除对性能影响微弱的次要参数, 确保优化变量集既覆盖主要设计自由度又避免过度复杂化。优化算法选择直接影响求解效率与结果质量, 数学规划法通过构建目标函数与约束条件的显式数

学模型,将尺寸优化转化为带约束的极值问题,利用梯度信息或线性/非线性规划技术快速收敛至理论最优解,适用于单目标、连续变量的确定性优化场景;遗传算法则通过模拟生物进化机制,采用编码化设计变量、适应度评价、选择交叉变异等操作,在离散或多峰解空间中全局搜索最优解,尤其擅长处理多目标、非线性、多模态的复杂优化问题。模型构建需系统整合目标函数、约束条件与设计变量,目标函数通常定义为结构重量、刚度、频率等性能指标的量化表达式,约束条件涵盖强度准则、几何限制、工艺规范等边界要求,设计变量通过参数化建模与有限元分析实现性能响应映射,最终形成可求解的数学规划模型或智能算法输入框架,为尺寸优化提供理论支撑与计算基础。

#### 1.4 形状优化设计

(1) 形状优化对结构性能的影响,形状优化设计通过调整结构外形实现性能提升,其核心在于利用形状与力学性能的映射关系,在满足功能需求的前提下实现结构效率最大化。结构形状直接影响力分布、刚度分布及动态特性,合理设计可显著改善结构承载能力:流线型外形可降低流体阻力,异形截面可提升抗弯刚度,曲面过渡可减少应力集中,整体轻量化设计可降低惯性载荷。(2) 形状优化设计与技巧,参数化形状优化通过定义关键几何参数构建形状描述模型,将优化问题转化为参数空间内的数值求解,适用于规则结构或可参数化表达的复杂外形;非参数化形状优化直接操作节点坐标或几何边界,通过移动网格、自由变形等技术实现形状连续变化,更适用于自由曲面或拓扑复杂结构<sup>[3]</sup>。实际设计中常采用混合策略:对主导性能的关键区域使用参数化方法确保设计可控性,对局部细节采用非参数化方法实现精细调整。设计技巧方面,仿生学原理提供重要灵感来源,如蜂巢结构的高强度轻质特性、鸟类骨骼的中空结构、植物叶片的筋脉分布等自然形态,均可通过抽象化转化为工程优化方向;同时需结合制造工艺约束,将可加工性、装配精度等实际因素纳入优化目标,通过多学科协同实现形状优化从理论解到工程应用的转化,最终形成兼顾性能、成本与可靠性的最优结构方案。

## 2 机械设备结构强度优化

### 2.1 结构强度优化的基本概念与目标

结构强度优化以提升结构综合性能为核心,通过系统性调整结构形态参数实现性能与资源的最佳平衡。其本质是在功能需求与使用约束框架内,对结构形状、尺寸、拓扑布局等设计变量进行优化配置,使结构在既定载荷条件下达到强度、刚度、稳定性的协同最优。优化

目标呈现多维度特征:首要任务是确保结构安全性,通过控制应力水平、变形量及失稳临界载荷满足规范要求;同时追求轻量化设计,通过材料高效分布降低结构自重,减少惯性载荷与支撑需求;经济性目标则聚焦制造成本控制,通过简化结构形式、减少材料用量或选用性价比更高的材料实现降本增效。优化过程需统筹考虑静动态载荷特性、材料非线性行为及制造工艺约束,建立包含强度准则、刚度条件、稳定性判据的多目标函数体系。现代优化方法通过参数化建模与数值仿真技术,将结构响应与优化变量关联,采用数学规划或智能算法搜索最优解,最终形成在安全裕度、重量指标、成本参数间达成最优妥协的结构方案,为装备高性能化与轻量化发展提供关键技术支撑。

### 2.2 拓扑优化方法

拓扑优化是一种基于有限元分析的结构优化技术,它通过在设计空间内不断迭代调整材料的分布密度,达成结构拓扑形式的创新设计。此方法以连续体离散化作为前提,把设计域划分成有限单元网格,以单元密度作为优化变量来构建材料分布模型,借助数学规划或者智能算法,求解出在满足强度、刚度等约束条件下的最优拓扑构型。其关键优势在于能够突破传统经验设计的框架,在概念设计阶段就能生成非直观的创新结构,通过去除多余材料实现结构轻量化,同时提高整体的力学性能<sup>[4]</sup>。在优化过程中,需要建立多物理场耦合分析模型,全面考虑静动态载荷、材料非线性以及制造工艺的约束条件,将结构性能指标转化为可以量化的目标函数,再通过灵敏度分析确定关键的优化区域。现代拓扑优化已经形成了变密度法、水平集法、进化结构优化等多种方法体系,结合增材制造等先进工艺,能够实现从概念设计到实体制造的无缝对接,在航空航天承力构件、新能源汽车车身框架等领域有显著提升结构效率,推动装备朝着轻量化、高性能的方向不断发展。

### 2.3 形状优化方法

形状优化聚焦结构边界形态调整,通过改变外形尺寸或几何轮廓实现力学性能提升。其核心在于建立形状参数与结构响应的映射关系,以应力集中系数、刚度分布、疲劳寿命等力学指标为优化目标,运用数学规划或智能算法对边界形状进行迭代修正。优化过程通常与有限元分析深度耦合:首先通过参数化建模将结构边界转化为可调设计变量,随后基于有限元计算获取应力应变场分布,再通过伴随法或直接微分法计算目标函数对形状参数的灵敏度,最终采用梯度下降法或遗传算法等优化策略搜索最优形状。该方法可有效改善结构力学特性,

通过消除应力集中、均衡载荷传递路径、提升抗疲劳性能等方式增强结构可靠性。现代形状优化已形成参数化与非参数化两大技术路线,前者适用于规则结构的高效优化,后者可处理自由曲面等复杂形态,结合增材制造工艺可实现仿生结构等创新设计,在航空航天、汽车工程等领域显著提升结构效率与使用寿命。

#### 2.4 尺寸优化方法

尺寸优化聚焦结构几何参数的调整,通过优化杆件截面积、板件厚度、孔径尺寸等关键变量,实现结构在强度、刚度等约束条件下的轻量化或低成本目标。该方法以参数化建模为基础,将尺寸变量与结构性能建立显式关联,通过数学规划或智能算法求解最优解。优化过程通常包含三个核心步骤:首先基于设计需求确定优化变量范围,筛选对性能影响显著的尺寸参数;其次构建包含目标函数与约束条件的数学模型,目标函数多为结构重量、制造成本或材料用量,约束条件涵盖应力极限、变形量、稳定性等力学准则;最后采用梯度下降法、序列二次规划或遗传算法等求解技术,在可行域内搜索满足约束的最优尺寸组合。尺寸优化具有实施便捷、计算效率高的特点,尤其适用于初步设计阶段的快速迭代优化。现代优化技术通过结合灵敏度分析,可精准识别关键尺寸参数,减小变量维度,提升优化效率,在航空航天、汽车工程及土木建筑等领域广泛应用,有效实现了结构性能提升与资源消耗降低的双重目标。

### 3 机械设备轻量化设计与结构强度优化的协同

轻量化设计与结构强度优化相互矛盾又统一,轻量化设计减结构质量或降强度,结构强度优化增承载能力或增重量,实际设计需找平衡实现协同优化。协同优化策略有建立综合优化模型,将轻量化与结构强度优化目标统一,综合重量、强度、刚度、疲劳寿命等约束,采用多目标优化算法求解优化方案;采用分层优化,先拓扑优化确定基本拓扑形式初步轻量化,再形状与尺寸优化调整结构,保证强度下进一步减重;基于可靠性优化,考虑载荷变化、材料性能波动等不确定性,确保结构规定寿命内可靠且轻量化<sup>[5]</sup>。协同优化关键技术问题有多学科耦

合分析,涉及多学科要准确预测结构不同工况力学性能,需建立高效准确模型,解决数据传递与协同仿真;优化算法选择与改进,协同优化多目标、多约束、非线性,要选择合适算法并改进提高效率与收敛性的更好方案;试验验证与修正,数值模拟需试验验证可靠性,因实际工况复杂,试验与模拟结果有差异,要根据试验修正模型与方案。协同优化在机械设备领域应用前景广,可提升性能、降低能耗、减少污染,推动产业绿色可持续发展,但也面临挑战,多学科耦合分析复杂,优化算法高效可靠难,试验验证成本周期长,需深入研究与技术创新解决,通过不断探索优化策略、突破关键技术,能更好实现轻量化与结构强度协同,为机械设备发展提供有力支撑。

#### 结束语

综上所述,机械设备轻量化设计与结构强度优化是推动装备高性能化发展的核心命题,二者既存在质量与强度的天然矛盾,又通过协同优化形成性能提升的统一路径。通过材料选型、拓扑优化、尺寸调整与形状重构的多维度创新,结合多学科耦合分析技术与智能优化算法,可实现结构效率的显著提升。未来随着增材制造、人工智能等技术的深度融合,协同优化将突破现有技术瓶颈,在提升装备性能的同时降低全生命周期成本,为航空航天、新能源交通等领域的绿色可持续发展提供关键技术支撑。

#### 参考文献:

- [1]叶芳.基于拓扑优化的机械结构轻量化设计[J].南方农机,2025,56(21):148-150+154.
- [2]魏让丽,李玲,郑朝荣,雷鸣.基于集成优化的塔机臂架结构轻量化设计分析[J].低温建筑技术,2025,47(1):57-61.
- [3]刘涛.基于先进机械设计的轻量化汽车车身结构研究与优化[J].汽车维修技师,2025(2):115-116.
- [4]孟凡超.起重机械结构优化设计与强度分析[J].模具制造,2025,25(6):210-212.
- [5]陈娟,姜雪燕.探测器机械结构静力学分析与轻量化设计[J].山东工业技术,2024(1):48-53.