

先进复合材料优化高性能机电传动装置轻量化设计

杨 帆

武汉船舶通信研究所（中国船舶集团有限公司第七二二研究所） 湖北 武汉 430000

摘 要：针对传统金属机电传动装置自重较大、能耗偏高、抗疲劳性能不足的问题，本文采用先进复合材料开展高性能机电传动装置轻量化优化设计。依托结构拓扑与尺寸优化方式，结合改进遗传算法完成多目标参数优化，对齿轮、传动轴等核心构件进行结构改进。经仿真验证，优化装置减重率达40.6%，传动效率与运行稳定性显著提升，各项性能满足工业工况标准，可为传动装置轻量化升级提供技术参考。

关键词：先进复合材料；优化高性能；机电传动装置；轻量化设计

引言：机电传动装置是各类工业设备的核心动力组件，传统金属传动结构难以适配高速、精密、长周期的复杂工况，存在转动惯量大、传动能耗高、易磨损失效等短板。先进复合材料具备轻质高强、耐磨抗疲劳的优良特性，是实现传动装置轻量化提质的关键材料。本文通过结构优化与算法迭代设计轻量化方案，平衡减重与结构性能，旨在解决传统设计的性能失衡问题，提升机电传动装置综合工作性能。

1 先进复合材料特性与机电传动装置理论基础

1.1 先进复合材料核心性能参数

（1）碳纤维、玻璃纤维等主流复合材料具备优异的综合力学性能，相较于常规材料，拥有高强度、高模量、低密度的突出优势，拉伸强度远高于普通钢材，同时自重更轻便，可适配精密传动构件的受力需求。（2）先进复合材料具备良好的耐磨、耐热、抗疲劳特性，特殊基体与纤维复合结构可降低摩擦损耗，高温环境下结构稳定性强，长期交变载荷作用下不易出现裂纹、形变等损伤，适配复杂连续工作工况。（3）与传统金属材料相比，复合材料传动性能优势显著，金属材料自重较大、易腐蚀、疲劳寿命有限，而复合材料传动构件惯性更小、运行稳定性更高，可有效降低传动能耗，提升设备续航与运行精度。

1.2 高性能机电传动装置工作机理

（1）齿轮、传动轴、轴承是机电传动核心构件，齿轮通过齿面啮合实现转速与扭矩转换，传动轴负责动力轴向传递，轴承可约束构件运动、降低转动摩擦，三者协同完成基础动力传动功能。（2）机电传动装置依托各构件配合实现载荷逐级传递，可根据工况自适应调节动力输出，具备传动效率高、动力输出平稳的特点，适配不同负载的工作需求。（3）复杂工况下，传动装置易出现磨损、断裂、卡顿等失效问题，载荷冲击、高温潮湿

环境、长期超负荷运行、构件配合精度偏差，是影响传动装置使用寿命与工作稳定性的主要因素^[1]。

1.3 轻量化设计核心理论与评价体系

（1）结构轻量化设计以保障构件强度、刚度和安全性为前提，遵循轻量化、可靠性、实用性设计准则，通过优化结构构型、选材实现减重提质。（2）多目标优化设计理论兼顾减重、增效、抗疲劳等多重需求，依托智能优化算法，平衡各项设计指标，规避单一优化的局限性。

（3）传动装置轻量化评价体系以减重率、传动效率、结构可靠性、疲劳寿命为核心指标，综合评估轻量化设计方案的可行性与实用性，为优化设计提供量化依据。

2 基于先进复合材料的高性能机电传动装置轻量化优化设计

2.1 传动装置轻量化设计需求与约束条件分析

（1）机电传动装置运行工况复杂，长期承受交变载荷、高速连续运转及变负载作用，性能指标约束严苛。设备额定转速3000r/min，额定承载扭矩85N·m，传动精度误差 $\leq 0.5\%$ ，疲劳循环使用寿命不低于107次。轻量化优化需严格满足各项工况标准，不得降低装置承载能力、传动稳定性与服役寿命。（2）复合材料替换传统金属构件存在装配与尺寸约束，装置整体安装基准、装配尺寸及配合间隙沿用原有标准，关键构件装配间隙误差控制在 $\pm 0.02\text{mm}$ 内。改造后的复合材料构件尺寸需适配整机空间，杜绝结构干涉、装配错位问题，保障设备结构通用性与装配兼容性。（3）本次设计以轻量化、高强度、高稳定性协同优化为核心，摒弃单一减重思路。在实现结构减重、减小转动惯量、降低运行能耗的同时，保证构件强度、刚度及抗疲劳性能，改善传统设计减重与性能失衡的问题，达成装置轻量化、高性能、高可靠性的一体化设计目标。

2.2 复合材料传动构件结构优化建模

(1) 依托SolidWorks软件完成传动装置核心构件三维模型搭建,以传统金属齿轮、传动轴、轴承座结构为基础,保留核心装配与受力结构,简化冗余倒角、凸起等非关键结构。严格按照实际工程尺寸建模,保证模型尺寸精度与实物一致,为后续仿真优化与力学分析提供精准模型基础,有效降低建模误差对优化结果的影响。

(2) 结合碳纤维复合材料各向异性特性,开展铺层方式与厚度参数优化设计。对比 0° 、 45° 、 90° 三种常规铺层方案,优选交错对称铺层方式,有效改善结构应力分布不均问题。同时优化构件铺层厚度,将原均匀4.5mm铺层厚度调整为受力区域5.0mm、非受力区域3.5mm的差异化厚度参数,兼顾结构承载性能与轻量化效果^[2]。(3) 结合拓扑优化与尺寸优化方法构建复合优化模型,以构件应力、形变、质量为约束核心,去除结构冗余材料,重构构件力学传递路径。通过尺寸优化微调孔径、轴径、齿厚等关键参数,结合拓扑优化重塑结构形态,形成兼顾力学性能与减重效果的一体化优化模型。

2.3 多目标轻量化优化算法设计与求解

(1) 构建多目标优化目标函数,分别以最大化减重率、最大化结构承载能力、最小化传动误差为核心优化目标。以构件整体质量表征轻量化效果,以极限承载力表征结构承载能力,以动态传动偏差表征传动精度,建立多维度耦合目标函数,解决单一目标优化导致的性能失衡问题。(2) 对设计约束条件进行量化处理,设定结构最大形变不超过0.05mm,最大应力低于材料许用应力550MPa,传动误差 $\leq 0.5\%$,减重率 $\geq 35\%$ 。同时设置算法迭代次数120次、收敛精度0.001、种群数量80,通过参数精准设置保障算法求解效率与结果可靠性。(3) 采用改进遗传算法对优化模型进行迭代求解,通过多次迭代计算生成多组可行设计方案,剔除存在应力超标、形变过大、精度不足的劣解方案。结合工程实用性、结构稳定性与轻量化效果综合评分,筛选出综合性能最优的复合材料传动结构设计^[3]方案。

2.4 复合材料传动结构改进方案确定

(1) 传统45号钢金属结构自重较大、转动惯量大、高速运行能耗大,虽静态刚度优异,但长期交变工况下疲劳损耗快、振动噪声明显。优化后的复合材料结构在保证形变、强度、精度指标达标的前提下,大幅降低结构自重与转动惯量,阻尼性能更优,可有效抑制高速振动,抗疲劳与耐磨性能显著提升,综合传动性能优于传统金属结构。(2) 结合仿真迭代结果与装配约束要求,确定传动装置整体优化方案,整机保留原有传动布局与装配结构,将齿轮、传动轴、辅助支撑座等核心受力构

件替换为碳纤维复合材料结构,标准连接件沿用原有金属配件,在保障装配通用性的基础上实现整机轻量化升级。(3) 完成关键构件细节结构改进设计,对齿轮齿面进行圆弧过渡优化,降低啮合应力集中;对传动轴轴肩位置进行加厚铺层处理,提升交变载荷下的抗扭性能;优化构件衔接倒角与装配基准面,进一步提升结构装配精度与运行稳定性,最终形成性能均衡、适配性强的轻量化优化结构。

3 优化后机电传动装置性能仿真与验证分析

3.1 仿真分析方案与参数设置

(1) 本次仿真采用ANSYS有限元分析软件开展多工况性能模拟,结合复合材料各向异性力学特征,选用分层实体建模与网格离散化仿真方法,兼顾计算精度与运算效率。针对传动装置静态受力、动态运转、疲劳损耗等不同仿真场景,分别采用静力学分析、瞬态动力学分析与疲劳模块仿真,精准还原装置实际工作状态,规避常规仿真方法对复合材料结构仿真精度不足的问题。

(2) 仿真核心参数采用碳纤维复合材料实测力学参数,设定材料弹性模量135GPa、泊松比0.32、密度1.58g/cm³,拉伸强度不低于1600MPa。工况载荷参照设备额定工作标准,设置额定扭矩85N·m、极限载荷120N·m,工作转速区间0~3000r/min,同时模拟常温25℃常规工况与40~60℃高温连续工作工况,贴合设备复杂运行环境^[4]。(3) 本次仿真验证明确多维度评价标准,主要涵盖静态力学性能、动态传动性能、疲劳耐磨性能及轻量化性能四大维度。规定结构最大应力需低于材料许用应力、结构形变量不超过0.05mm,传动误差控制在0.5%以内,疲劳寿命需满足 10^7 次循环加载无损伤,以此作为优化结构性能合格的核心判定依据。

3.2 静态力学性能仿真分析

(1) 通过静力学仿真结果可得,优化后复合材料传动结构应力分布均匀,无明显应力集中缺陷。在额定85N·m扭矩载荷作用下,结构最大应力为425MPa,集中于齿轮啮合齿面与传动轴衔接位置,其余区域应力均低于300MPa,整体应力梯度合理;结构最大应变仅为0.032mm,形变程度极小,可满足精密传动装配要求。

(2) 结合仿真数据完成结构刚度与强度性能验证,优化后复合材料构件许用应力为550MPa,仿真最大应力425MPa,强度安全系数达1.29,满足工程安全标准。同时结构整体形变可控,刚度性能稳定,在额定与极限载荷下均未出现塑性变形、结构开裂等问题,结构静态承载性能达标。(3) 与传统45号钢金属结构进行静态性能对比,金属结构同等载荷下最大应力380MPa,最大形变

0.028mm, 静态刚度略优, 但差距不足0.04mm。而复合材料结构自重大幅降低, 且强度储备充足, 静态力学性能完全可替代传统金属结构, 满足传动装置静态承载工作要求。

3.3 动态传动性能仿真验证

(1) 在3000r/min高速运转工况下开展动态仿真, 优化后复合材料传动装置振动幅值稳定在0.015mm以内, 转速波动误差小于0.3%, 运转过程无卡顿、共振等异常现象。相较于金属结构, 复合材料阻尼特性更优, 可有效抑制高速运转产生的振动噪声, 动态运行稳定性显著提升。(2) 通过疲劳循环仿真测试, 在 10^7 次交变载荷循环工况下, 复合材料传动构件无裂纹扩展、表面磨损量仅为0.006mm, 磨损速率远低于传统金属构件。结构疲劳损伤度极低, 疲劳寿命满足长期连续工作要求, 耐磨与抗疲劳性能优势明显。(3) 动态性能测试结果显示, 优化后装置平均传动效率达97.8%, 较传统结构提升1.2%, 传动误差稳定在0.4%以内, 动力输出精准度更高。同时动态响应延迟缩短15%, 可快速适配载荷波动, 动态传动综合性能全面优于传统金属传动结构^[5]。

3.4 轻量化效果综合评估

(1) 通过整体质量量化核算, 优化后的复合材料传动装置整体质量为2.15kg, 传统金属传动装置质量为3.62kg, 整体减重1.47kg, 减重率达40.6%, 轻量化优化效果极为显著, 有效降低了传动系统整体自重与转动惯量。(2) 轻量化优化带来明显性能提升, 装置转动惯量降低38.2%, 空载运行能耗降低8.5%, 负载工况能耗降低6.3%。同时结构响应速度提升15%, 启停切换、载荷适

配更加灵敏, 有效改善了传统传动装置惯性大、响应滞后、能耗偏高的问题。(3) 综合仿真数据与工程应用标准评估, 本次优化方案结构兼容性强, 可适配原有装配体系与各类常规工况。复合材料优化结构在保证强度、刚度、传动精度达标的基础上, 实现大幅减重与降耗增效, 结构可靠性、稳定性均满足工业工程应用要求, 具备极高的工程推广与实际应用价值。

结束语

本文完成了先进复合材料机电传动装置的轻量化优化设计与性能验证, 通过构件结构改进与多目标优化, 在保障装置传动精度、结构强度与疲劳寿命的前提下, 实现显著减重降耗效果, 有效弥补传统金属传动结构的性能缺陷。后续可开展实物样机测试, 进一步优化结构参数与铺层方案, 持续提升结构适配性, 助力轻量化传动技术的工程普及应用。

参考文献

- [1]李逸轩.热塑性复合材料梯形细齿结构铺层设计与模压成型工艺协同优化研究[J].复合材料学报,2026,43(6):71-75.
- [2]王旦.复合材料 钢混合齿轮应用技术研究综述[J].航空动力学报,2025,40(3):202-204.
- [3]郑波.CFRP在航天伺服作动器轻量化设计中的应用探索[J].宇航材料工艺,2025,55(4):89-95.
- [4]童水光.齿轮传动系统动力学性能设计研究与应用进展[J].机械工程学报,2025,61(11):140-160.
- [5]张宇,程博.碳纤维复合材料直升机减速器壳体结构设计试验[J].机械传动,2024,48(7):56-61.