

高速重载齿轮箱齿轮-箱体耦合系统的轻量化设计及疲劳寿命评估

李宁波

南京高精齿轮集团有限公司，江苏南京

DOI:10.62836/gse.v3i2.1271

摘要：高速重载齿轮箱是风电、轨道交通等高端装备的核心传动部件，在极端运行工况下，其重量控制与疲劳可靠性是装备性能提升的关键设计矛盾。本文以齿轮-箱体耦合系统为研究对象，构建包含齿轮结构参数与箱体拓扑变量的多目标轻量化设计模型，以结构强度、动态特性为约束，实现质量最小化与传动效率最大化的协同优化。进一步分析轻量化设计对耦合系统载荷传递规律、关键部位应力分布的影响，分别针对齿轮与箱体建立耦合效应下的疲劳寿命评估方法，对比不同方案的轻量化效果与疲劳寿命表现。

关键词：高速重载齿轮箱；齿轮-箱体耦合；多目标轻量化；疲劳寿命评估

Lightweight Design and Fatigue Life Assessment of the Gear-Box Body Coupling System in High-Speed Heavy-Load Gearboxes

Ningbo Li

Nanjing High-Speed & Accurate Gear Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu

Abstract: High-speed, heavy-load gearboxes serve as core transmission components in advanced equipment such as wind power systems and rail transit systems. Under extreme operating conditions, weight control and fatigue reliability represent critical design challenges for enhancing equipment performance. This study focuses on the gear-box coupling system by developing a multi-objective lightweight design model that incorporates both gear structural parameters and box topology variables. Constraining the model with structural strength and dynamic characteristics, it achieves synergistic optimization of mass minimization and transmission efficiency maximization. The paper further analyzes how lightweight design affects load transfer patterns and stress distribution in critical areas of the coupled system, establishes fatigue life assessment methods for both gears and the gearbox under coupling effects, and compares the lightweight performance and fatigue life characteristics across different design approaches.

Keywords: high-speed heavy-load gearbox; gear-box coupling; multi-objective lightweight design; fatigue life assessment

1 耦合系统的多目标轻量化设计模型构建

1.1 设计变量选取：齿轮参数与箱体拓扑变量的确定

在高速重载齿轮箱的齿轮-箱体耦合系统中，设计变量的选取直接决定轻量化设计的优化空间与最终效果，需同时覆盖齿轮核心结构参数与箱体拓扑优化的设计变量两类对象。针对齿轮部分，选取模数、齿宽、变位系数作为核心设计变量：模数影响齿轮的承载能力与整体结构尺寸，齿宽直接关联齿轮质量与接触应力分布，变位系数可在不改变中心距的前提下调整齿面接触强度，三者均对齿轮质量与传动性能有显著影响，且属于设计过程中可调整的参数。针对箱体部分，采用变密度拓扑优化方法描述结构，选取网格单元相对密度作为拓扑设计变量，通过变量取值表征单元材料的保留或去除状态，以此实现箱体内部材料分布的优化调整，在满足性能要求的前提下去除冗余材料，实现轻量化目标，同时保证变量设置能够适配后续耦合模型的计算与优化流程。

后续还需对两类设计变量的取值范围进行限定：结合高速重载齿轮箱的设计标准与给定的中心距、传动比要求，确定齿轮模数、齿宽、变位系数的可行区间；同时根据箱体的安装边界、壁厚基础要求，明确拓扑变量的取值约束，保证所有设计变量的取值均符合工程设计的基本要求，为后续多目标优化模型的构建提供清晰的可行设计空间。

1.2 约束条件设定：动态特性、结构强度与制造工艺限制

开展轻量化设计时，不能仅以降低质量为目标，必须保证齿轮箱在服役过程中满足各项性能要求与生产要求，因此需要从动态特性、结构强度以及制造工艺三个维度明确约束条件。

首先是动态特性约束，为避免耦合系统工作过程中发生共振引发结构失效，需要约束系统的低阶固有频率，使其偏离齿轮箱的工作激励频率范围，防止共振现象发生，保障系统运行的稳定性。

其次是结构强度约束，对于齿轮需要分别满足齿面接触应力不超过材料许用接触应力、轮齿弯曲应力不超过材料许用弯曲应力的要求，对于箱体则需要约束其最大等效应力，不超过箱体材料的许用应力，保证各部件都具备足够的承载能力，满足服役强度要求。

最后是制造工艺约束，需要结合实际生产加工能力设置约束，针对齿轮部分，需要约束齿宽系数、模数的取值范围符合齿轮加工的通用标准，变位系数的选取也要避免发生根切、齿顶变尖等加工缺陷；针对箱体拓扑优化结果，需要约束材料保留区域的最小尺寸满足铸造或焊接工艺要求，避免出现无法加工的细小结构，保证优化方案具备可制造性[1]。

1.3 轻量化目标函数：质量最小化与传动效率最大化构建

在高速重载齿轮箱的轻量化设计中，减小系统整体质量是核心优化目标之一。耦合系统的质量主要来源于齿轮结构与箱体结构，通过合理调整齿轮参数、对箱体进行拓扑优化去除非承载区域的冗余材料，可以在满足各项约束的前提下实现系统减重，同时降低系统转动惯量，改善系统的动态响应特性，符合设备轻量化、节能化的设计需求。除减重目标外，传动效率是反映齿轮箱工作性能的关键指标，高速重载工况下齿轮啮合的功率损失会直接影响设备的能源利用率，还会因摩擦生热加剧齿面磨损，降低齿轮服役寿命，因此将传动效率最大化也作为优化目标，通过优化齿轮参数改善啮合状态，降低啮合过程中的摩擦功率损失，实现齿轮箱轻量化与高性能的协同优化，最终构建得到同时包含质量最小化与传动效率最大化的多目标优化函数，为后续的优化求解提供目标指引。

1.4 多目标优化算法的选取与适配改进

由于本优化问题同时包含离散型齿轮参数与连续型箱体拓扑设计变量，且存在多个相互冲突的优化目标，传统单目标优化算法无法得到满足多目标需求的帕累托解集，因此选择适应性更强的启发式

多目标优化算法作为基础求解框架。在此基础上，针对传统算法存在的收敛速度慢、易陷入局部最优解的问题，引入自适应交叉变异策略调整算法迭代过程中的参数更新规则，同时结合轻量化设计问题的约束特征，对非可行解的筛选机制进行改进，提升算法对可行解集的搜索效率，最终得到适配本研究问题的改进型多目标优化算法，为快速稳定求解得到满足设计要求的帕累托最优方案提供算法支撑[2]。

2 轻量化设计方案的疲劳寿命影响因素分析

2.1 轻量化后耦合系统的动态载荷传递规律变化

针对高速重载齿轮箱齿轮-箱体耦合系统的轻量化设计，齿轮参数调整与箱体拓扑优化都会改变原有结构的质量分布与刚度特性，进而对系统内部的动态载荷传递路径和载荷分配比例产生影响。基于改进后的轻量化设计方案，建立耦合系统的动力学分析模型，提取不同工况下齿轮啮合接触面、箱体支撑部位、传动轴连接位置的动态载荷与应力响应数据，对比分析轻量化前后系统各关键部位的载荷传递效率与载荷波动特征，明确结构参数变化引发载荷传递规律改变的内在机制，梳理得到对系统疲劳寿命产生关键影响的载荷变化特征，为后续开展各部位疲劳损伤分析提供基础依据。

2.2 齿轮齿面接触疲劳与轮齿弯曲疲劳的载荷修正

基于轻量化后动态载荷传递规律的变化结果，原有齿轮疲劳分析所采用的额定载荷与载荷修正系数不再适用，需要结合提取到的啮合面动态载荷响应，对齿面接触疲劳与轮齿弯曲疲劳的计算载荷进行修正。首先针对齿面接触疲劳，根据不同啮合位置实时载荷的波动特征，修正接触疲劳计算中的动载荷系数与载荷分布系数，得到符合轻量化后实际受力状态的当量接触载荷；其次针对轮齿弯曲疲劳，结合齿根位置动态应力的变化范围，对不同啮合工况下的弯曲载荷进行修正，明确齿根位置实际承受的交变载

荷幅值与均值，为后续齿轮部位的疲劳寿命计算提供更贴合实际受力状态的载荷输入[3]。

2.3 箱体焊接/铸造部位的应力集中与疲劳载荷谱构建

针对轻量化后箱体结构参数改变引发的应力分布变化，结合耦合系统动态响应分析得到的各特征节点应力时间历程，逐一识别焊接接头、铸造转角等易产生应力集中的关键部位，明确应力集中系数随动态载荷变化的规律。基于应力雨流计数法统计关键部位不同载荷区间的应力循环次数，对应力幅值与均值进行修正，构建符合轻量化后箱体实际受力工况的连续疲劳载荷谱，为后续箱体关键部位的疲劳寿命预测提供准确的载荷输入。

3 耦合系统的多部位疲劳寿命评估

3.1 基于线性累积损伤理论的齿轮疲劳寿命计算

结合前文修正得到的齿轮接触与弯曲部位实际交变载荷，结合材料的S-N曲线分别计算齿面接触疲劳和轮齿弯曲疲劳在单工况循环下的疲劳损伤量。线性累积损伤理论假设不同载荷水平下的疲劳损伤相互独立且可叠加，当总损伤量达到临界阈值时即判定发生疲劳失效，该方法适配齿轮长期承受变载荷啮合的工作特征，计算逻辑简洁且贴合工程应用场景。首先分别针对齿面接触和齿根弯曲，将实际工作载荷区间按载荷大小划分为若干等级，分别对应不同等级应力下的循环次数，结合材料S-N曲线得到各应力等级下发生疲劳破坏所需的极限循环次数，进而计算每个载荷等级对应的单位循环损伤量。再将各载荷等级的损伤量乘以对应循环次数后累加，分别得到齿面接触总损伤与齿根弯曲总损伤，结合总损伤临界值分别计算得到接触疲劳寿命与弯曲疲劳寿命。由于本计算采用了经动态特性修正后的实际载荷，相较于传统采用额定静载荷的计算方法，所得寿命结果更符合高速重载工况下轻量化齿轮的实际受力状态，能够避免因忽略动载荷波动导致的寿命预估偏保守或偏危险的问题，为后续轻量化方案的可行性判定提供准确的齿轮部位寿命数据[4]。

3.2 基于断裂力学的箱体关键部位疲劳寿命预测

针对箱体这类铸造或焊接结构，疲劳裂纹往往起源于铸造缺陷、焊接热影响区或截面突变等应力集中部位，更适配采用断裂力学开展寿命预测。首先结合轻量化设计后齿轮-箱体耦合系统的动态仿真结果，提取箱体应力最大的关键承载部位，确定危险应力集中区域。随后针对该危险区域构建含初始缺陷的箱体局部有限元模型，初始缺陷尺寸可结合箱体制造工艺的无损检测标准设定。通过仿真计算得到不同载荷等级下缺陷尖端的应力强度因子，结合箱体材料的裂纹扩展速率公式，计算每个载荷循环下的裂纹扩展长度。按照载荷等级依次迭代计算裂纹从初始缺陷尺寸扩展到临界失稳尺寸的总循环次数，最终得到箱体关键部位的剩余疲劳寿命。该方法充分考虑了箱体实际制造过程中不可避免的初始缺陷对疲劳寿命的影响，弥补了传统基于名义应力法预测箱体寿命未考虑缺陷影响的不足，所得结果更符合箱体的实际疲劳失效规律，能够准确判断轻量化后箱体关键部位是否满足设计寿命要求，为高速重载齿轮箱轻量化方案的安全性验证提供关键依据。

3.3 考虑耦合效应的系统整体剩余疲劳寿命评估方法

不同于齿轮和箱体部位单独的寿命评估，耦合效应下系统整体寿命需要考虑多部位损伤的相互影响，轻量化设计改变了原系统的结构刚度与质量分布，会进一步放大耦合作用对整体寿命的影响。当齿轮或箱体某一关键部位率先出现裂纹扩展后，系统的载荷传递路径会发生改变，原本的动态响应特征随之变化，未发生损伤的部位承受的实际载荷也会偏离初始设计状态，若单独计算各部位寿命后直接整合，会明显偏离系统的实际失效进程。因此，评估过程需要以齿轮-箱体耦合动力学模型为基础，同步迭代更新齿轮与箱体的损伤扩展状态：在每个计算步长内，先根据当前系统的结构状态重新计算动态载荷，修正齿轮和箱体部位的裂纹扩展速率，

再更新各关键部位的损伤程度与裂纹尺寸，直到某一部位的损伤或裂纹尺寸达到临界失效阈值，此时对应的总载荷循环次数即为耦合系统的整体剩余疲劳寿命。该方法将齿轮与箱体的损伤演化纳入系统动态响应的更新过程，充分体现了高速重载工况下齿轮与箱体结构的力学耦合关系，修正了单独评估各部位寿命带来的误差，能够更准确反映轻量化后整个齿轮箱系统的实际剩余寿命水平，为整体方案的安全性判定提供更可靠的支撑[5]。

3.4 不同轻量化方案的疲劳寿命结果对比分析

不同的轻量化设计方案对齿轮箱系统疲劳寿命的影响存在明显差异。拓扑优化后的箱体轻量化方案，在去除多余材料的同时，保留了主要传力路径，应力分布相对均匀，关键部位的应力集中增幅较小，对系统整体疲劳寿命的负面影响也更弱，能够在降低总质量的同时维持较好的疲劳安全裕度。尺寸参数优化的齿轮轻量化方案，如果参数调整幅度过大，会直接改变轮齿的受力状态，加剧啮合过程中的动态载荷波动，进而加快齿面接触疲劳和轮齿弯曲疲劳的损伤扩展速度，容易导致齿轮部位提前达到失效阈值，拉低整个系统的剩余寿命。

同时采用齿轮参数优化与箱体拓扑优化的组合轻量化方案，对疲劳寿命的影响则取决于优化目标的权重分配。若过于侧重质量最小化目标，会过度削弱关键承载区域的结构刚度，改变系统原本的动态特性，引发更显著的载荷重分布，最终导致整体剩余寿命降幅超出可接受范围。若在优化过程中适当兼顾结构力学性能要求，控制减重幅度，就可以在实现轻量化目标的同时，让系统剩余疲劳寿命维持在安全标准之内，满足高速重载工况的使用要求。通过对比可以发现，兼顾减重效果与结构力学性能的组合方案，更符合工程应用的实际需求，能更好平衡轻量化设计与疲劳安全性之间的关系。

4 结语

针对高速重载齿轮箱齿轮-箱体耦合系统，不同轻量化方案对系统剩余疲劳寿命的影响存在显著差异，单一参数优化易因调整偏差引发生命性能劣

化,合理权重分配的组合优化方案可实现轻量化与寿命安全的平衡。本次研究厘清了不同轻量化策略下耦合系统的疲劳损伤演化规律,建立了兼顾减重效果与疲劳安全性的评估框架,可为高速重载齿轮箱的轻量化工程设计提供理论支撑,后续可进一步探索动态载荷下全寿命周期的优化方法,提升设计方案的工况适配性。

参考文献

- [1] 王黎钦,朱恩明,古乐.风电齿轮箱齿轮-箱体耦合系统动态特性与疲劳寿命分析[J].机械工程学报,2024,58(03):189-199.
- [2] 张宏伟.高速重载齿轮箱轻量化设计研究进展[J].中国机械工程,2023,34(12):1415-1427.
- [3] 刘更,杨明彪,韩琳.齿轮-轴承-箱体耦合系统疲劳寿命预测方法研究[J].航空学报,2022,43(8):320-332.
- [4] 陈雪峰,郭杏林.拓扑优化方法在机械结构轻量化设计中的应用[J].力学进展,2023,51(04):789-812.
- [5] 李朝峰.耦合系统动态响应分析与结构优化设计研究[J].机械工程学报,2023,57(11):112-123.

