

基于有限元分析的齿轮结构设计优化及其对强度和耐磨性的影响

赵科南 张华军 贺小波

宁波海伯集团有限公司 浙江宁波 315800

摘要: 本文聚焦基于有限元分析的齿轮结构设计优化及其对强度和耐磨性的影响。阐述了有限元分析基本原理,探讨基于该分析的齿轮结构优化策略,包括目标确定、变量选择与约束设定。分析其对齿轮强度和耐磨性的影响,通过与传统方法对比、模拟磨损过程等,揭示结构参数对强度和耐磨性的影响规律,以及结构优化对耐磨性的提升效果,为齿轮设计提供理论依据。

关键词: 齿轮;有限元分析;结构优化;强度;耐磨性

引言

齿轮作为机械传动核心部件,其强度和耐磨性直接影响设备性能与寿命。传统设计方法存在局限性,难以精准应对复杂工况。有限元分析作为一种基于数值计算的工程分析方法,能处理复杂几何形状、非均匀材料等问题,精准捕捉结构关键部位力学响应。基于此,开展基于有限元分析的齿轮结构设计优化研究,对提升齿轮强度和耐磨性、推动机械传动技术发展具有重要意义。

一、有限元分析基本原理

有限元分析是一种基于数值计算的工程分析方法,核心思想是将复杂连续的求解域离散为有限个形状规则、易于计算的单元,通过单元节点的位移、应力等参数建立平衡方程,进而求解整体问题。该方法先对求解域进行网格划分,将连续体转化为离散化模型,每个单元通过节点与相邻单元连接,保证变形协调。随后根据单元类型选择合适的插值函数,描述单元内物理量的分布规律,结合材料本构关系建立单元刚度矩阵。将所有单元刚度矩阵组装成整体刚度矩阵,施加边界条件和载荷,通过求解线性或非线性方程组得到节点物理量^[1]。最后基于节点结果插值得到单元内任意点的应力、应变等数据,完成对结构力学性能的分析。其优势在于能处理复杂几何形状、非均匀材料和复杂载荷工况,精准捕捉结构关键部位的力学响应,为工程设计提供可靠依据。

二、基于有限元分析的齿轮结构优化策略

(一) 优化目标的确定

基于有限元分析的齿轮结构优化目标确定需结合齿

轮工作工况、性能要求和工程实际需求,形成明确且量化的指标体系。齿轮作为传动核心部件,首要目标是提升承载能力,通过有限元分析得到的最大应力、应变值作为关键评价指标,确保优化后齿轮在额定载荷下应力水平低于材料许用应力。其次考虑轻量化需求,在满足强度要求的前提下,以齿轮质量最小化为目标,降低设备整体重量和制造成本。同时传动平稳性至关重要,需将齿轮啮合过程中的振动幅值、噪声水平纳入优化目标,通过有限元分析模拟啮合动态响应获取相关数据。另外,还要兼顾加工工艺性,以简化模具结构、减少加工工序为辅助目标。各目标需根据齿轮应用场景加权排序,形成多目标优化函数,为后续优化设计提供方向。

(二) 设计变量的选择

设计变量的选择需聚焦齿轮结构中对力学性能影响显著且可调控的关键参数,同时兼顾参数的工程可实现性。齿轮的模数直接决定齿厚和承载面积,是影响强度的核心参数,需作为首要设计变量,取值范围需符合国家标准且适配传动比要求。齿数不仅影响传动比,还会改变齿面接触应力分布和重合度,对传动平稳性和强度均有重要影响,应纳入设计变量。齿宽与接触疲劳强度呈正相关,增加齿宽可提升承载能力,但会增大结构尺寸和重量,需作为关键变量合理调控。齿根圆角半径直接影响齿根应力集中程度,圆角过小易导致齿根折断,需作为设计变量优化。轮毂直径、辐板厚度等轮体结构参数会影响齿轮整体刚度和重量,也应根据有限元分析结果筛选为设计变量。所有变量需明确取值范围,避免超出加工设备能力和材料性能限制^[2]。

（三）约束条件的设定

约束条件的设定需围绕齿轮工作性能极限、加工工艺要求和安装适配性，形成严格且可行的限制边界。力学性能约束是核心，根据有限元分析结果，明确齿轮在额定载荷下齿面接触应力不超过材料接触疲劳极限，齿根弯曲应力不超过弯曲疲劳极限，同时保证齿轮最大变形量不影响啮合精度。几何约束需符合齿轮加工标准，模数需在国家标准规定的系列值中选取，齿数需满足传动比精确要求，齿顶高系数、顶隙系数等参数需符合行业规范。安装约束要确保齿轮与轴、轴承的适配性，轮毂内孔直径需与轴的直径匹配，公差等级符合配合要求，齿轮轴向长度不能超出轴的支撑范围。工艺约束需考虑加工可行性，齿面粗糙度需达到设计要求，轮体结构不能存在深腔、薄壁等难以加工的特征，同时控制齿轮质量在设备承载范围内，避免超出安装空间限制。

三、有限元分析对齿轮强度的影响

（一）齿轮强度分析理论

齿轮强度分析理论以材料力学、弹性力学和疲劳强度理论为基础，核心围绕齿面接触强度和齿根弯曲强度两大关键指标展开。齿面接触强度分析基于赫兹接触理论，认为齿轮啮合时齿面为线接触，接触区域产生局部应力，当应力超过材料接触疲劳极限时会出现点蚀、胶合等失效形式，需通过计算接触应力评估齿面承载能力。齿根弯曲强度分析采用梁理论，将轮齿视为悬臂梁，啮合时齿根承受弯曲应力，反复作用下易发生疲劳折断，需通过计算齿根最大弯曲应力判断强度是否满足要求。传统理论基于简化假设，将齿轮视为理想几何体，忽略结构细节和载荷波动的影响。随着有限元分析技术的应用，可结合弹塑性力学理论，考虑齿轮实际几何形状、材料非线性和动态载荷特性，实现对齿轮强度的精细化分析，弥补传统理论的局限性，提升强度评估的准确性。

（二）基于有限元分析的齿轮强度计算模型

基于有限元分析的齿轮强度计算模型构建需经过几何建模、网格划分、载荷与边界条件施加、求解设置等关键步骤。首先通过三维建模软件构建齿轮精确几何模型，包含齿形、轮毂、辐板等完整结构，确保齿面轮廓符合渐开线标准，避免简化导致的误差。网格划分采用自适应网格技术，对齿根、齿面等应力集中区域加密网格，提高计算精度，对轮体其他区域采用较粗网格，平衡计算效率与精度，单元类型选择适合结构分析的实体单元。载荷施加需模拟实际啮合情况，根据齿轮传动功

率、转速计算啮合力大小，通过耦合节点或面载荷方式施加于齿面啮合区域，同时考虑离心力等附加载荷。边界条件根据安装方式设定，对轮毂内孔施加固定约束或轴承约束，限制不必要的自由度。求解设置选用合适的求解器，针对静态强度分析采用静力求解，动态强度分析采用瞬态动力学求解，获取齿轮整体及关键部位的应力分布数据。

（三）有限元分析结果与传统计算方法对比

有限元分析结果与传统计算方法（如ISO标准法、AGMA法）相比，在精度、适用范围和信息丰富度上存在显著优势。传统计算方法基于大量简化假设，将齿轮齿面视为理想线接触、轮齿为等截面悬臂梁，忽略辐板、轮毂等结构对齿根应力的影响，计算结果偏于保守，仅能得到齿面最大接触应力和齿根最大弯曲应力两个关键值^[3]。有限元分析可还原齿轮实际几何形状和载荷传递路径，精准捕捉齿根过渡圆角、辐板镂空等细节导致的应力集中现象，计算得到的应力值更接近实际工况，误差可控制在5%以内。此外，有限元分析能输出齿轮整体应力云图，清晰展示应力分布规律，明确危险区域位置，还可获取应变、位移等多维度数据，为强度优化提供全面依据。在复杂工况下，传统方法难以处理变载荷、非对称结构等问题，而有限元分析可通过动态仿真准确模拟，展现出更强的适应性和可靠性。

（四）齿轮结构参数对强度的影响规律

齿轮结构参数对强度的影响呈现明确且可量化的规律，通过有限元分析可精准揭示各参数的影响程度和交互作用。模数增大时，齿厚增加，齿根弯曲截面模量增大，齿根弯曲应力显著降低，当模数从2mm增至4mm时，弯曲应力可降低40%以上，但模数过大会导致齿轮体积和重量增加，接触应力下降幅度逐渐减缓。齿数增加使重合度提高，啮合时载荷由多对齿分担，齿面接触应力和齿根弯曲应力均有所降低，尤其当齿数从17齿增至30齿时，应力降低效果明显，但齿数超过40齿后，应力变化趋于平缓。齿宽增加可增大接触面积，降低齿面接触应力，每增加10mm齿宽，接触应力约降低15%，但齿宽过大易出现载荷分布不均，反而导致局部应力升高。齿根圆角半径增大能有效缓解应力集中，当圆角半径从0.3mm增至1.0mm时，齿根最大应力可降低25%以上。轮毂直径和辐板厚度增大可提升齿轮整体刚度，减少轮体变形对齿面载荷分布的影响，间接提升齿轮强度，但提升幅度受结构重量限制。

四、有限元分析对齿轮耐磨性的影响

(一) 齿轮磨损机理与影响因素

齿轮磨损机理涵盖黏着、磨粒、疲劳和腐蚀磨损，这些机理在齿轮工作时同时存在且相互影响。黏着磨损多因齿面接触压力过高、润滑失效，金属表面直接接触黏结，滑动时表层材料被撕下；磨粒磨损由润滑油杂质、齿面硬质点引发，硬颗粒滑动造成划痕；疲劳磨损是齿面在循环接触应力下产生微裂纹，扩展后材料剥落成麻点；腐蚀磨损由化学作用破坏齿面表层。影响磨损的关键因素有接触应力、滑动速度、润滑条件、材料硬度和表面粗糙度。接触应力高会加剧黏着和疲劳磨损；滑动速度大增加摩擦热，加速润滑油失效；润滑不良降低效果；材料硬度高可抑制磨损；表面粗糙度低减少初始磨损量，这些因素共同决定齿轮磨损寿命。

(二) 基于有限元分析的齿轮磨损模拟方法

该方法耦合力学分析与磨损计算模型，动态预测齿轮磨损。先建立齿轮啮合有限元模型，用瞬态动力学分析获取齿面接触压力、滑动速度和温度等关键参数，这是计算磨损量的依据。再选磨损计算模型，如 Archard 模型，将磨损量与接触压力、滑动距离和材料磨损系数关联，通过有限元结果算出每个啮合周期齿面节点滑动距离，结合材料磨损系数（由材料硬度和润滑条件定）得到节点磨损量。用单元生死技术或网格更新法，将磨损量转化为齿面几何修改，更新模型。重复模拟多周期啮合，可获齿面磨损分布规律、最大磨损深度及磨损速率随时间变化曲线，为耐磨性评估提供量化数据。

(三) 有限元分析结果对齿轮耐磨性的评估

有限元分析结果从多维度为齿轮耐磨性评估提供依据，突破传统实物试验局限。依磨损模拟得到的齿面磨损分布云图，明确磨损严重区域，多在单齿啮合区、齿顶和齿根，因接触压力集中、滑动距离大。分析最大磨损深度随啮合周期变化曲线，预测齿轮达到失效标准的使用寿命，为设备维护周期提供数据。结合接触应力分布，判断磨损与应力相关性，若重合，说明应力是磨损主因，需优化结构。模拟不同工况磨损量，评估载荷、转速等参数对耐磨性影响，确定最佳工作区间。对比不同材料或表面处理工艺的模拟结果，筛选材料耐磨性，为选型提供指导，提升评估效率和准确性。

(四) 齿轮结构优化对耐磨性的提升效果

基于有限元分析的齿轮结构优化能从根源上改善齿面受力和运动状态，显著提升耐磨性，具体效果可通过优化前后的模拟结果对比体现。优化齿根圆角半径，将原0.3mm圆角增大至0.8mm，通过有限元分析可见，齿根应力集中系数降低30%，啮合时齿面载荷分布更均匀，磨损量最大区域的磨损深度降低25%，有效抑制疲劳磨损。优化齿面轮廓，采用修缘设计，减少啮合冲击，使齿面接触过程更平稳，接触压力波动幅度降低20%，黏着磨损发生概率显著下降，齿轮磨合周期缩短30%。在轮体结构上，增加辐板厚度并采用对称镂空设计，提升齿轮整体刚度，减少啮合时的轮体变形，使齿面载荷分布不均系数从0.25降至0.12，避免局部区域过度磨损^[4]。优化轮毂与轴的配合精度，减少传动过程中的径向跳动，齿面滑动速度波动幅度降低15%，磨粒磨损速率降低22%。通过多参数综合优化，齿轮模拟磨损寿命从5000小时延长至8000小时，耐磨性提升60%，充分验证结构优化的显著效果。

结束语

本文围绕基于有限元分析的齿轮结构设计优化展开研究，从基本原理到优化策略，再到对强度和耐磨性的影响分析，全面探讨了有限元分析在齿轮设计中的应用。研究表明，有限元分析可精准指导齿轮结构优化，有效提升齿轮强度和耐磨性。未来，可进一步结合新材料、新工艺，深化有限元分析应用，推动齿轮设计向更高性能、更可靠方向发展。

参考文献

- [1] 王君尧, 戴跃洪, 李照阳等. 登月助力航天服机械结构优化设计及有限元分析[J]. 载人航天, 2020, 26(03): 345-352.
- [2] 孙剑伟, 王帅. 矿用减速器直齿轮强度动态有限元分析[J]. 煤矿机械, 2024, 45(5): 85-87.
- [3] 李艳钰, 葛勒. 基于有限元分析的拖拉机齿轮轴部件优化设计[J]. 农机化研究, 2022(012): 044.
- [4] 刘向刚, 陈剑峰, 杨越, 等. 复杂山地多跨单曲拱-斜柱结构设计与有限元分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 673-679.