

高速齿轮箱风阻损耗的数值预测模型构建及低损耗构型优化

王宁

南京高精齿轮集团有限公司，江苏南京

DOI:10.62836/gse.v3i2.1289

摘要：高速齿轮箱在风电、轨道交通、航空航天等高转速工况应用中，风阻损耗已成为总功率损耗的主要组成部分，直接影响传动系统的运行效率与服役稳定性。本文首先分析了齿轮啮合过程的空气流动特性与风阻生成机理，明确了齿轮参数、箱体结构、运行工况对风阻损耗的影响规律；在此基础上构建了适配齿轮啮合瞬态过程的计算流体动力学模型，通过实验修正完成了风阻损耗预测简化模型的拟合封装；最终以降低风阻损耗为目标，完成了齿轮参数、箱体内部结构与新型挡油板的多维度构型优化。

关键词：高速齿轮箱；风阻损耗；构型优化；数值预测模型

Construction of a Numerical Prediction Model for Wind Resistance Losses in High-Speed Gearboxes and Optimization of Low-Loss Configurations

Ning Wang

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

Abstract: In high-speed gearbox applications such as wind power generation, rail transit, and aerospace systems operating at elevated rotational speeds, aerodynamic drag loss has become the predominant component of total power loss, significantly impacting the operational efficiency and service stability of transmission systems. This study first analyzes the airflow characteristics during gear meshing and the mechanisms underlying aerodynamic drag generation, elucidating how gear parameters, housing structure, and operating conditions influence drag losses. Subsequently, a computational fluid dynamics model tailored to the transient gear meshing process was developed, with experimental refinements applied to optimize the simplified drag prediction model. Finally, multidimensional configuration optimizations were implemented for gear parameters, internal housing geometry, and a novel oil baffle design, all aimed at minimizing aerodynamic drag loss.

Keywords: high-speed gearbox; air resistance loss; configuration optimization; numerical prediction model

1 高速齿轮箱风阻损耗的物理机理与影响因素分析

1.1 齿轮啮合过程中空气流动特性与风阻生成机理

高速齿轮工作时轮齿随齿轮本体高速旋转，会带动箱体内的空气同步运动，形成绕齿轮的剪切流与啮合齿间隙间的挤压流动。当一对轮齿进入啮合状态时，相邻齿槽之间的封闭容积逐渐减小，间隙内的空气被快速挤压，从啮合间隙向两侧挤出形成挤压射流；而当轮齿退出啮合时，封闭容积逐渐增大，腔内压力降低形成局部负压，将周围空气重新吸入腔室。这种周期性的挤压与吸气作用，会不断扰动箱体内的空气流场，引发空气动能耗散与压力脉动，最终将齿轮旋转的机械能转化为空气的内能与流动动能，形成风阻损耗。同时，齿顶位置圆周线速度随转速升高快速增大，齿顶与周围空气间存在较大相对速度，会产生明显的粘性剪切阻力，齿面与空气间的粘性摩擦也会持续消耗机械能，这两部分共同构成了高速齿轮风阻损耗的核心来源。

1.2 齿轮参数对风阻损耗的影响规律分析

不同齿轮参数通过改变齿轮与空气的作用面积、相对运动速度以及啮合过程中空气的挤压抽吸强度，对风阻损耗产生显著影响。其中齿顶圆直径是影响风阻损耗最显著的参数之一，齿顶圆直径增大直接提升了齿顶位置的圆周线速度，同时扩大了齿轮与空气的接触作用面积，使得齿顶粘性剪切阻力和啮合过程的空气扰动强度同步上升，风阻损耗会随齿顶圆直径的增大呈近似幂函数形式增长。齿宽则主要改变齿轮与空气的接触面积以及啮合封闭容积的大小，齿宽增加会让齿面粘性摩擦损耗和单次啮合的空气挤压排量同步提升，风阻损耗通常随齿宽增大近似线性增加。模数变化会改变齿槽容积和齿顶厚度，模数增大的情况下，单个齿槽的容积更大，轮齿进入啮合时需要挤压排出的空气量更多，会强化啮合过程的压力脉动与空气扰动，进而提升风阻损耗，同时齿数的变化也会改变单位时间内轮齿进入、退出啮合的频率，频率越高，空气

挤压吸气的周期性扰动越剧烈，风阻损耗也随之升高。此外齿轮的端面结构参数也会产生影响，如齿轮端面是否开设减重孔、减重孔的尺寸与排布，会改变端面与空气的摩擦面积，同时会干扰箱体内部的空气环流，不合理的开孔结构反而可能增大风阻损耗[1]。

1.3 箱体内腔结构对空气流场与风阻的作用机制

箱体内部的轮廓形状、空间布局直接决定了齿轮旋转带动的空气流动的通畅性，若箱体腔室与齿轮轮系的轮廓匹配度差，在齿轮周边会形成过多的狭窄间隙或死水区，加剧空气流动过程中的旋涡分离与能量耗散，进而提升整体风阻损耗。箱体内壁与齿轮端面、齿顶圆之间的间隙大小对风阻的影响尤为显著，间隙过小会限制空气的径向回流，增大齿轮端面与腔壁间的空气剪切摩擦，同时会强化啮合区排出高压空气的挤压效应，进一步提升风阻；适当增大间隙可缓解上述效应，但间隙过大也会改变箱体内整体空气环流的强度，反而可能增加无用的能量耗散。除了内腔基础轮廓，箱体内部额外设置的挡油板、导流筋等构件，也会改变空气流动路径，合理的导流结构可以梳理空气环流、减少无序旋涡的产生，从而降低风阻损耗，而设计不当的构件则会阻挡空气流动，增大流动阻力，提升风阻水平。

1.4 转速、润滑油粘度对风阻损耗的耦合影响

在高速齿轮箱的实际运行过程中，箱体内部并非完全干燥的空气环境，通常会混有部分雾化的润滑油，因此润滑油的粘度会直接影响箱内两相流体的整体粘性，进而改变流动过程中的摩擦阻力与能量耗散水平。一般来说，流体粘性越大，空气与润滑油混合介质流动过程受到的剪切摩擦阻力越高，风阻损耗也就会随润滑油粘度的升高而逐步上升。而转速作为影响风阻损耗的核心工况参数，其影响效果会与粘度产生明显的耦合作用：齿轮旋转转速越高，箱内流体的流动速度越快，相同粘度下粘性剪切产生的能量耗散增长速率会显著提升，同时高

转速会强化润滑油的雾化效果,进一步改变箱内混合介质的整体粘度水平。当转速较低时,润滑油粘度变化对风阻损耗的影响幅度相对有限,风阻损耗随粘度升高的增长趋势较为平缓;但随着转速不断提升,粘度变化带来的风阻差异会逐渐放大,高粘度条件下风阻损耗随转速升高的增长速率会明显高于低粘度条件,二者形成的耦合效应会共同决定高速齿轮箱最终的风阻损耗水平[2]。

2 高速齿轮箱风阻损耗数值预测模型构建

2.1 计算流体动力学(CFD)基础模型的建立

首先针对高速齿轮箱的实际结构进行合理化,忽略对内部流场影响极小的倒角、圆角、螺栓孔等细节结构,保留齿轮、箱体、转轴等核心构件的几何特征,明确划分箱内的空气域与润滑油域,采用多相流模型描述空气-润滑油混合介质的流动过程。随后确定模型的计算边界:将齿轮旋转壁面设置为运动边界,箱体壁面设置为无滑移固壁边界,根据齿轮箱实际的通气条件设置进出口边界条件,同时明确初始时刻箱内流场的速度、压力与相分布初始条件,为后续数值求解提供基础。完成几何建模与边界定义后,对计算域进行网格划分,针对齿轮啮合的间隙区域进行局部网格加密,保证流动剧烈区域的计算精度,同时平衡计算精度与计算资源消耗。

2.2 湍流模型与旋转域动网格的参数适配

针对高速齿轮箱内齿轮旋转带动的强剪切、强瞬态气液两相流动特性,综合考虑计算精度与求解效率,选择适配性良好的湍流模型,明确模型中湍流耗散率、湍流黏度等核心参数的计算方式,准确捕捉齿轮啮合间隙附近的流线分离与湍流脉动特征。针对齿轮持续旋转带来的计算域位置动态变化问题,采用动网格技术描述旋转域的运动,设置网格更新方式与扩散系数,保证旋转过程中网格拓扑结构稳定,避免因网格畸变导致计算发散,同时保障近壁面区域网格对流动边界层的解析能力满足计算要求。

2.3 齿轮啮合瞬态流场的数值求解设置

首先根据齿轮啮合流场气液两相共存的特征,确定多相流模型与相界面捕捉方法,设定空气与润滑油的初始相分布,将齿轮旋转域、箱体静止域分别对应设置运动与静止边界条件,在进出口边界设置合适的压力与速度条件,完成固壁边界无滑移条件的设定。针对瞬态流动的计算需求,确定时间步长与总计算时长,结合齿轮单齿啮合周期调整时间步长大小,保证每步旋转角度满足瞬态流动的捕捉精度要求。最后设置残差收敛监控与关键截面的物理量监控,当计算残差降到设定阈值以下、监控物理量保持周期性稳定波动后,判定计算完成收敛[3]。

2.4 模型的实验验证与误差修正

搭建与数值模拟几何参数一致的齿轮箱实验台,采用扭矩传感器测量齿轮稳态旋转时的总转矩,通过扣除齿轮空载下的机械摩擦转矩提取得到风阻损耗的实验测量值。将数值模拟得到的风阻损耗计算结果与不同转速下的实验测量值进行对比,分析模型的预测误差来源,结合实验测量结果对湍流模型的经验系数与旋转域网格的扩散系数进行修正,最终使修正后模型的预测误差控制在允许范围以内,验证本文构建的高速齿轮箱风阻损耗数值预测模型的准确性与可靠性。

2.5 风阻损耗预测简化模型的拟合与封装

基于验证后的高精度数值模型,在不同齿轮参数、箱体结构和工况范围内开展多组数值模拟计算,得到覆盖设计区间的风阻损耗样本数据集。以齿轮转速、齿顶圆直径、齿宽、模数、箱体内腔空间大小为输入参数,以风阻损耗值为输出,采用响应面拟合方法构建风阻损耗的显式预测关系式,通过显著性检验剔除对风阻损耗影响程度极低的无关项,得到简化的预测模型表达式。最终将拟合得到的简化预测模型封装为可调用的计算模块,便于后续工程设计中快速预估高速齿轮箱的风阻损耗,省去全瞬态数值模拟的复杂计算过程,提升设计

分析效率[4]。

3 基于预测模型的高速齿轮箱低损耗构型优化

3.1 优化目标与约束条件的确定

针对高速齿轮箱开展低损耗构型优化，核心优化目标设定为在满足齿轮传动性能要求的前提下，最大化降低齿轮箱的风阻损耗，以此提升高速齿轮传动系统的整体传动效率，同时兼顾控制齿轮箱运行过程中的温升，降低长期运行的能耗水平。结合高速齿轮箱的实际工程应用场景，优化过程需要设置多维度的约束条件，保障优化后的构型不会影响齿轮箱的正常工作性能与使用寿命。

首先是传动性能约束，优化过程中齿轮的传动比需要严格保持与原设计一致，不得因参数调整改变传动系统的运动输出特性，同时齿轮的齿面接触强度、齿根弯曲强度需要满足设计标准的要求，保证齿轮在额定载荷下不会发生接触失效或断齿失效。齿轮的重合度也需要维持在合理区间，避免优化参数后齿轮啮合平稳性下降，引发额外的振动与噪声问题。

其次是结构空间约束，高速齿轮箱需要适配既定的安装空间要求，因此优化后齿轮的整体外径、箱体内部腔体的整体轮廓尺寸不能超出原设计给定的空间范围，保证齿轮箱能够顺利匹配现有安装平台，不需要对配套设备进行额外改造。此外，齿轮与箱体内部腔体、其他传动部件之间的安全间隙需要满足设计规范，避免齿轮旋转过程中与箱体或其他构件发生碰撞，保障运行安全。

最后是制造工艺约束，优化得到的齿轮参数与内部腔体结构需要满足现有加工制造的工艺要求，不会过度提升加工难度与制造成本，保障优化方案具备工程落地的可行性。

3.2 齿轮参数（齿顶圆直径、齿宽、模数）的多参数优化

基于前文明确的风阻损耗影响规律，以齿顶圆直径、齿宽、模数三个核心参数为设计变量，结合前文提出的优化约束与目标，建立多参数优化的目

标函数。在优化过程中，利用已封装完成的简化预测模型直接计算不同参数组合下的风阻损耗值，避免了逐一开展全瞬态CFD仿真的巨大计算量，快速完成多参数样本点的目标响应计算。同时同步校验每个参数组合对应的齿轮弯曲强度、接触强度，筛选出同时满足力学承载要求、空间尺寸约束的候选参数组合，最终得到在约束范围内风阻损耗最低的齿轮参数组合方案[5]。

3.3 箱体内部腔体导流结构的构型优化设计

基于箱体内部腔体结构对空气流场与风阻的作用机制，以导流板的安装位置、开口角度、轮廓尺寸为设计变量，以降低箱体内部涡流耗散、减少齿轮转动风阻为目标建立优化模型。利用已封装的风阻损耗预测模型计算不同导流结构构型下的箱内风阻，结合箱体安装空间约束与加工工艺要求，筛选出能够有效疏导箱内空气流动、抑制无用涡流生成的导流结构方案，最终得到在约束范围内风阻损耗最低的内部腔体导流构型。

3.4 新型低风阻齿轮挡油板结构的优化设计

以挡油板与齿轮齿顶的间距、迎风侧轮廓形状、通气孔排布为设计变量，以阻断润滑油不必要甩溅、同时降低空气绕流阻力为目标建立优化模型，依托已封装的风阻损耗预测模型快速计算不同挡油板结构下的箱内风阻大小，结合箱体内部安装空间限制以及润滑需求约束，筛选出既能够满足挡油要求，又可以有效降低气流绕流阻力的挡油板参数方案，最终得到风阻损耗更低的新式挡油板构型。

3.5 基于响应面法/遗传算法的优化流程实现

整合上述各设计变量与优化目标，搭建以风阻损耗最小化为目标的多参数优化框架，引入响应面法建立设计变量与目标函数之间的近似响应关系，结合遗传算法开展全局寻优计算，在箱体结构整体安装尺寸、齿轮传动性能要求、加工可行性等多约束条件下，搜索得到所有优化变量的最优参数组合，完成高速齿轮箱整体低风阻构型的确定。

4 结语

本文围绕高速齿轮箱风阻损耗问题,系统梳理了风阻生成的物理机理,明确了齿轮参数、内腔结构、运行工况等关键影响因素,构建了精度可靠、计算高效的风阻损耗数值预测简化模型,先后完成齿轮参数、内腔导流结构、挡油板构型的多环节优化,最终通过响应面法结合遗传算法得到全局最优的低风阻整体构型,实现了风阻损耗的有效降低。研究成果可为高速齿轮箱的低损耗设计提供明确的方法支撑与技术参考,助力提升传动系统的运行效率。

参考文献

- [1] 莫帅,党合玉,邹振兴,等.高速弧齿圆柱齿轮风阻功率损失研究[J].机械传动,2022(04):1-6.
- [2] 黄嘉铭,宋爱平,于晨伟,等.椭圆弧齿线圆柱齿轮传动速度波动的影响因素分析[J].机械传动,2023(01):108-116.
- [3] 苏圆圆.高速重载条件下机械齿轮的磨损机理探讨[J].太原城市职业技术学院学报,2025(09):37-39.
- [4] 曾雪莲.齿轮传动的摩擦与磨损控制[J].内燃机与配件,2024(20):18-20.
- [5] 刘炆,胡绍东,宁少甫.高速重载齿轮振动与磨损的可靠性分析[J].工程机械,2023(07):56-61+10

