

齿轮箱润滑计算流体动力学研究现状及趋势

杨树峰¹ 税剑锋¹ 李志胜²

(1 中原工学院 机电学院, 郑州 450007)

(2 郑机所(郑州)传动科技有限公司, 郑州 450052)

摘要: 齿轮箱润滑系统是机械传动系统不可或缺的部分, 面对高速、高负载等工况时, 如若润滑措施不当, 极易发生润滑不良问题, 直接影响齿轮传动系统的效率。因此, 采用计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 对齿轮箱润滑技术进行研究有重要的意义。在分析总结国内外研究成果的基础上, 介绍了齿轮箱润滑模型的研究进展, 分别从CFD方法及网格处理技术、湍流模型、考虑振动及温度影响、试验研究等方面描述了齿轮箱润滑技术的研究现状, 探讨了齿轮箱润滑技术的未来发展方向。旨在为后期全面研究齿轮箱润滑体系, 改善齿轮传动系统寿命、提高齿轮传动系统综合性能提供参考。

关键词: 齿轮箱; 润滑; 机械传动系统; 计算流体动力学

中图分类号: TH161 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.XXXX.XX.001

0 引言

齿轮传动系统作为现代机械设备中的核心部件, 广泛应用于航空航天^[1]、轨道交通^[2]、船舶^[3]等高端装备中, 在高速、高负载等极端工况下, 润滑失效易导致系统性能下降甚至发生严重故障, 齿轮箱的润滑系统作为其关键支撑环节, 对于降低摩擦磨损、提升传动效率及延长服役寿命具有重要作用。《中国制造2025》中提出: 提升齿轮传动效率, 降低摩擦损耗, 推动润滑技术与智能制造的深度融合。同时, 《2030年前碳达峰行动方案》也指出: 润滑技术的创新与升级不仅是提升工业设备能效的关键手段, 更是实现工业领域碳达峰、碳中和目标的重要支撑^[4]。随着工业设备对效率和可靠性的要求不断提高, 优化齿轮箱润滑系统已成为减少摩擦、磨损和能量损失的关键手段^[5]。然而, 传统的润滑设计方法主要依赖经验算式, 缺乏对润滑效率的系统性优化, 难以满足现代工业的需求。

近年来, 随着计算机技术的快速发展, 计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 在齿轮箱润滑研究中得到了广泛应用, 为润滑系统的设计和优化提供了强大的工具。CFD不仅能够模拟润滑

油的流场行为, 还可以分析齿轮箱内的温度分布、功率损失以及润滑剂的分布特性。在高速齿轮箱中, 润滑油的飞溅、喷射和分布对齿轮的润滑效果和能量损失有着显著影响。借助CFD技术, 研究人员能够更深入地掌握润滑系统的动态行为, 提出更有效的优化方案。尽管CFD技术在齿轮箱润滑研究中展现出了巨大的潜力, 但在仿真精度、计算效率等方面仍面临诸多挑战。

本文通过对齿轮箱润滑CFD研究进行综述, 归纳了当前不同的齿轮箱润滑研究模型, 梳理了各类CFD方法以及网格处理技术, 总结了不同湍流模型的应用场景, 并介绍了在振动及温度因素影响下的润滑情况, 探讨了试验工作对CFD分析的验证; 最后总结并展望了齿轮箱润滑CFD研究的未来发展趋势。

1 齿轮箱润滑模型研究进展

齿轮箱系统模型的复杂程度是影响齿轮箱润滑CFD研究的关键因素, 不仅直接影响仿真计算效率, 还与CFD方法的选择及网格划分密切相关。在齿轮类型方面, 研究者不仅仅局限于常规的渐开线直齿轮, 亦对渐开线斜齿轮、弧齿锥齿轮和人字齿轮等

收稿日期: 2025-05-09 修回日期: 2025-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075561); 河南省高等学校重点科研项目服务产业发展专项计划(25CY043)

作者简介: 杨树峰, 男, 1986年生, 山西晋中人, 博士研究生, 高级实验师; 主要研究方向为机械设计、齿轮传动技术; yangshufeng8610@163.com。

通信作者: 李志胜, 男, 1976年生, 山西太谷人, 硕士研究生, 高级工程师; 主要研究方向为齿轮传动技术; lizhisheng528@126.com。

引用格式: 杨树峰, 税剑锋, 李志胜. 齿轮箱润滑计算流体动力学研究现状及趋势 [J]. 机械传动, XXXX, XX (XX): 1-10.

YANG Shufeng, SHUI Jianfeng, LI Zhisheng. Research status and trends of computational fluid dynamics technology for gearbox lubrication [J]. Journal of Mechanical Transmission, XXXX, XX (XX): 1-10.

若干齿轮类型的润滑情况展开研究。

1.1 齿轮箱传动系统

在齿轮箱传动系统润滑技术研究方面, 主要可划分为定轴轮系润滑和周转轮系润滑两种类型。在定轴轮系中, 齿轮轴线相对固定、啮合点位置变化较小, 润滑条件相对稳定。而在周转轮系中, 齿轮不仅自转, 还绕中心轴周转, 其啮合点位置随时间变化, 润滑条件更加复杂。本节将分别就定轴轮系润滑和周转轮系润滑的研究现状进行阐述。

1.1.1 定轴轮系的润滑研究

单级定轴轮系的齿轮传动系统(图1)因其结构简单且求解难度低, 首先成为众多学者重点关注的对象。刘娇^[6]以单级齿轮副为研究核心, 系统研究了齿宽、润滑油运动黏度、密度、油量、齿轮螺旋角及转速等参数对齿轮箱内润滑油飞溅情况的影响规律^[6]。罗攀等^[7]对单级齿轮箱飞溅润滑内部流场进行数值分析, 并进一步分析了其内部温度情况, 研究发现, 部分齿轮和轴承温度偏高。王志坚等^[8]探究了齿轮箱内部的流场分布和润滑状态, 通过数值仿真分析发现, 随着齿轮转速增加, 齿轮啮合处的流量以及轴承的稳态供油量先增加后趋于平稳。

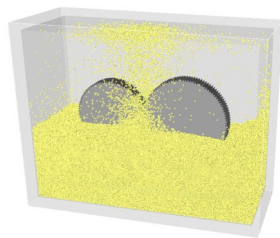


图1 单级直齿齿轮副

Fig. 1 Single-stage spur gear set

相较于单级定轴传动, 针对结构复杂的多级定轴齿轮传动系统(图2), 谢迟新等^[9]以轨道车辆二级传动齿轮箱为对象, 在不同输入转速、初始润滑油量和环境温度条件下对齿轮箱内部流场特性进行模拟, 发现搅油损失与转速及初始润滑油量呈正相关, 与环境温度呈负相关。

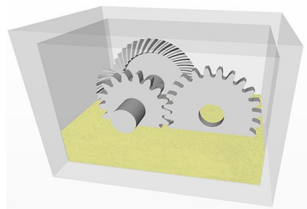


图2 二级直齿锥齿齿轮副

Fig. 2 Two-stage straight-toothed bevel gear set

1.1.2 周转轮系的润滑研究

周转轮系的润滑研究主要集中在行星齿轮传动。

行星齿轮传动在飞溅润滑工况下, 其箱体内部的润滑介质流场十分复杂。师陆冰等^[10-11]对单级行星轮系的飞溅润滑过程进行仿真分析, 探讨了不同输入转速、油位高度和油温对润滑油液流场特性、轮齿啮合区润滑效果以及各旋转部件搅油损耗功率的影响; 搭建行星轮系飞溅润滑试验台, 进一步验证了仿真结果的可靠性。结果表明, 油液粒子的速度和压力随输入转速和油位升高而增加, 转速和油位过低会导致粒子分布不均; 啮合区内的粒子数随转速、油温升高和油位降低而减少, 太阳轮啮合区润滑风险较高; 搅油损耗功率随转速呈指数上升, 油位和油温影响较小, 行星轮搅油功率损失最大。

针对多级行星轮系的研究相对较少, 这主要是由于行星轮系结构复杂、零部件众多, 运动形式多样, 导致建立多级行星轮系飞溅润滑油-气两相CFD计算模型面临较大挑战。唐沛等^[12]建立了飞溅润滑油-气两相流模型, 采用计算流体力学软件与自定义函数, 对两级行星齿轮进行了联合仿真。结果发现, 在多级行星齿轮传动中, 高速级行星轮的搅油损失远高于低速级; 同一级内, 行星轮的搅油损失最大, 太阳轮则可忽略; 搅油损失随转速和浸油深度增加而持续上升, 无明显极值。因此, 在结构和工况固定的前提下, 应在保证润滑的基础上尽量减小浸油深度, 以降低搅油损失。

本节归纳了定轴轮系与周转轮系在润滑方面的研究进展。对于结构较为简单的单级定轴齿轮系统, 研究主要集中在齿轮结构参数及润滑介质特性对内部流场与温升的影响, 而在多级定轴系统中, 则进一步探讨了输入转速、油量与环境温度对搅油损失的影响规律。相较之下, 周转轮系由于其结构复杂, 尤其是行星齿轮的运动特性使其润滑行为更加复杂, 现有研究均为围绕输入参数对润滑效果及搅油功率损耗的影响展开, 借助试验平台验证了仿真结果的准确性。尽管多级行星轮系的研究相对较少, 但已有成果表明, 高速级行星轮为主要的能量损失源, 搅油损耗则随转速和浸油深度增加而上升。

1.2 若干齿轮传动类型的润滑研究

齿轮箱作为动力传递部件, 其可靠性与效率高度依赖于有效的润滑。不同类型的齿轮, 包括直齿轮、斜齿轮、弧齿锥齿轮和人字齿轮等, 因其独特的几何构型、啮合动力学及承载特性, 对润滑油的性能和润滑方法提出了具有显著差异性的要求。本节将深入剖析若干齿轮传动类型的润滑特性, 阐述润滑研究中的关键技术和难点。

1.2.1 渐开线直齿轮传动的润滑研究

在各类齿轮中，渐开线直齿轮因应用广泛而研究最为深入，LIU等^[13]系统分析了转速对其润滑性能的影响，并进一步探讨了润滑不足条件下负载、速度和温度对摩擦因数的影响^[14]，揭示载荷、速度、温度的多变量耦合规律，突破了传统等温模型的局限性。基于真实运行工况，PEI等^[15]提出在考虑外部载荷和表面粗糙度条件下的直齿轮润滑可靠性分析方法，通过建立齿轮随机动力学模型和弹性流体动力润滑可靠性模型，采用随机动力学模型进行求解，发现齿根和单啮合区润滑失效的概率高于齿顶。

1.2.2 渐开线斜齿轮传动的润滑研究

MO等^[16]对渐开线斜齿轮模型进行了研究，建立了齿腹喷射和齿背喷射的仿真模型，利用CFD软件进行仿真，获取了两种喷油模型在齿轮啮合过程中啮合点处的油体积分数和压力，分析了齿轮速度和喷雾速度对油体积分数和压力的影响。对比发现，喷雾速度大于2.7倍的节线速度时，齿背喷射方式更好；反之，齿腹喷射润滑效果更优。

1.2.3 弧齿锥齿轮传动的润滑研究

孙凯等^[17]针对弧齿锥齿轮减速器，运用动网格技术对双齿轮浸油飞溅润滑内部流场进行数值仿真，揭示了齿轮啮合过程中流场分布、压力变化及转速的影响规律。陆凤霞等^[18]以直升机弧齿锥齿轮为对象，结合动网格技术和多相流模型，分析浸油深度、输入转速对润滑效果的影响，探讨了内部流场以及导油管结构，研究结果为中减润滑系统提供了量化依据，但其模型需进一步融合多物理场因素以适应复杂工程需求。邵帅等^[19]则以动车组弧齿锥齿轮箱为对象，研究了转速、油量对润滑特性的影响；在此基础上，通过对箱体结构进行优化设计并对比润滑效果，发现消除箱体凸台、扩大与输出齿轮的距离可以显著改善润滑情况。

1.2.4 人字齿轮传动的润滑研究

王琳等^[20]对喷油润滑方式的行星人字齿轮齿轮箱进行数值仿真分析，指出油液在齿轮轴方向上不同截面位置处的润滑油流场分布明显不同，齿轮箱中间截面位置处分布的油液量最多，并且在太阳轮、行星轮与喷油口之间的区域出现了局部涡流现象，齿轮转速和喷油速度对齿轮箱内的油液分布均有较大影响。

综上，不同齿轮类型的润滑研究表明，润滑性能受载荷、转速、温度及润滑方式等因素耦合影响。针对渐开线直齿轮和斜齿轮，采用CFD技术，揭示了油深与齿轮速度匹配的重要性；在弧齿锥齿轮研究中，则强调了流场分布与结构设计的关系；而人字齿

轮传动中，油液分布不均及局部涡流需引起特别关注。

2 齿轮箱润滑CFD研究现状

齿轮箱润滑CFD研究对提升润滑效率、降低摩擦损耗和改善散热性能等方面有着至关重要的影响。图3所示为齿轮箱润滑CFD研究所涉及的相关领域。

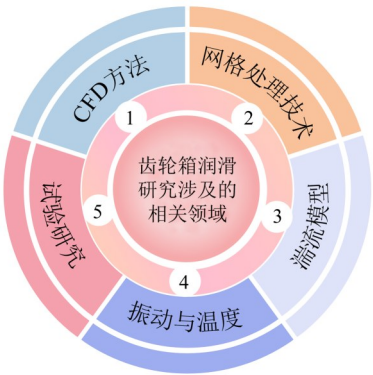


图3 齿轮箱润滑研究涉及的相关领域

Fig. 3 Relevant areas of the gearbox lubrication research

2.1 CFD方法及网格处理技术

齿轮箱润滑中的CFD方法及网格处理技术选择至关重要，对计算效率与仿真结果准确性起决定性作用。针对不同流动特性，采用CFD方法与网格处理技术进行协同优化，以准确捕捉油膜行为与飞溅细节，是实现齿轮箱润滑系统设计与性能提升的关键基础。本节将对齿轮箱润滑的不同CFD方法与不同网格处理技术的差异化特性进行分析与归纳。

2.1.1 CFD方法

CFD方法根据其数值求解原理和适用场景的不同，主要包括有限体积法(Finite Volume Method, FVM)、有限元法(Finite Element Method, FEM)、格子玻尔兹曼方法(Lattice Boltzmann Method, LBM)、光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)，其具体原理及优势如表1所示。

LIU等^[21-22]建立了基于FVM的数值仿真模型，利

表1 CFD方法的原理及优势

Tab. 1 Principles and advantages of CFD methods

方法	原理	优势
FVM	将计算域划分为离散的控制体积,对质量、动量和能量守恒方程进行积分求解	严格保证守恒性,适用于复杂几何和工程问题
FEM	基于变分原理,将偏微分方程转化为弱形式,通过插值函数进行求解	适用于多物理场耦合问题
LBM	基于分子动力学理论,模拟流体粒子的碰撞和迁移行为	适用于多相流、复杂边界流动
SPH	无网格方法,通过粒子间的相互作用模拟流体行为	适用于自由表面流动、大变形问题

用FZG齿轮效率试验台(图4)研究单级齿轮箱内部的润滑油分布和搅动损失,将仿真结果与搅动损失测量值和高速摄像机记录进行对比。结果表明,仿真与试验数据具有高度一致性,CFD仿真能够以极高的精度可视化油液流动行为。在混合润滑接触磨合期下,ALBERS等^[23]基于FEM建立数学模型,研究了表面粗糙度对摩擦和磨损行为的影响,在此基础上,评估了不同制造工艺对磨损行为的影响。ATENCIO等^[24]采用高速成像与力矩检测技术,研究了齿轮箱内部润滑情况,考察了3种不同的油位,并与LBM方法所得的CFD仿真结果进行对比,结果表明,搅油力矩损失明显受润滑油高度和齿轮配置的影响。JI等^[25]采用无网格的SPH法与PIV技术,在3种油位和雷诺数下进行9组模拟,并定性研究了齿轮旋转诱发气泡的数量及尺寸变化,对照试验结果发现,该方法很好地捕捉到了流动结构、飞溅和回流区域。

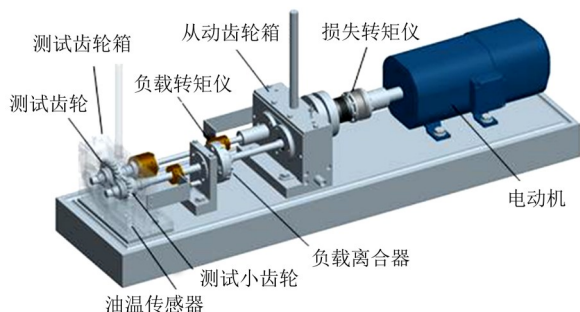


图4 FZG齿轮效率试验台^[21]

Fig. 4 FZG gear efficiency test bench^[21]

2.1.2 网格处理技术

在齿轮箱润滑仿真分析过程中,合理选择网格处理方式,可以大大提升润滑CFD仿真的精度与效率。目前,齿轮箱润滑的网格处理技术主要包括局部重新划分网格、重叠网格、多重参考系、滑移网格等^[26]。

选择合适的网格处理方法对进一步仿真分析非常重要,研究人员将受齿轮旋转和网格化影响的区域重新划分网格域^[27],可避免不良的单元质量和齿面之间非常小的间隙中的数值奇异性。PATEL等^[28]采用重叠网格方法,实现多个部分独立定义和移动,从而可方便地处理齿轮间的相对运动以及流体与齿轮的相互作用。LU等^[29]采用多重参考系技术,模拟齿轮和轴承的旋转运动,在准确模拟高速旋转下流场特性的前提下,避免了动态网格的复杂性。SANTRA等^[30]采用滑移网格技术,根据旋转自动重新配置空间啮合,以旋转轴为中心划分齿轮周围的空间,从而模拟齿轮的运动。

综上,对于齿轮润滑特性增强、动态油膜形成等问题,推荐使用重叠网格或滑移网格;而稳态分

析、多重参考系是较为高效的选择;对齿面局部微观问题,尽管计算成本更高,建议采用局部重新划分网格。

2.2 湍流模型

在齿轮箱润滑中,绝大部分流动都属于湍流,其特性十分复杂,通过合理选择湍流模型,可显著提升齿轮润滑CFD仿真的精度。CFD中常见模拟湍流流动的方法有雷诺平均方程模拟(Reynold-Averaged NaviersStokes equations, RANS)、大涡模拟(large Eddy Simulation, LES)和直接数值模拟(Direct Numerical Simulation, DNS),这些模型在模拟齿轮箱润滑的流场特性等方面各有优点。本节主要针对湍流模型的应用场景作以阐述。

2.2.1 RANS模拟

RANS是润滑中应用最广泛的湍流模拟方法,即为通过对流动的统计平均以简化计算。RANS分为涡黏模型和雷诺应力模型。涡黏模型结构简单,求解效率高,在方程数量、计算成本远低于雷诺应力模型,而且涡黏模型的稳定性更高,但雷诺应力模型在强旋转、弯曲、分离等复杂流动具有更高的预测精度,能模拟湍流的各向异性。

涡黏模型拥有丰富的模型族,其中, $k-\varepsilon$ 模型计算稳定,适用于高雷诺数流动。CHEN等^[31]使用Fluent软件中RNG $k-\varepsilon$ 模型来模拟齿轮箱内的湍流,研究了不同润滑油量和齿轮转速下的润滑特性,根据仿真结果,获得了最佳的润滑油量。MUZZIOLI等^[32]采用双方程可实现的 $k-\varepsilon$ 模型来描述油流动的湍流行为,分析了不同喷嘴配置对润滑效率的影响。PENG等^[33]建立齿轮箱飞溅润滑的数值模型,引入RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,研究了流体高剪切速率和流线弯曲对润滑带来的影响。而 $k-\omega$ 模型在近壁区和分离流中表现更优。KORSUKOVA等^[34]使用标准 $k-\omega$ 湍流模型进行模拟,研究了齿轮箱中的流体流动和热量分布。KELLER等^[35]在部分湍流模拟中选择了具有SST $k-\omega$ 湍流公式的非定常雷诺平均模拟,其中的SST模型结合了 $k-\varepsilon$ 与 $k-\omega$ 优点,提高了对分离流动和逆压梯度的模拟能力。

COKLJAT等^[36]采用雷诺应力模型模拟多相流湍流,结果表明,若流动存在显著的各向异性或复杂效应,雷诺应力模型比涡黏模型的使用效果更好。

2.2.2 LES模拟

LES是介于RANS与DNS之间的湍流模型,可直接解析大尺度涡和对小尺度涡进行建模。相较于RANS模拟,LES能捕捉瞬态涡流结构,具有更高的模拟精度,这也导致其计算成本增加,并且对网格

划分提出了更高的要求^[37]。

BOTTONE 等^[38]对比了 LES 与 RANS 在模拟发动机齿轮箱润滑上的性能表现, 结果发现, LES 可以更准确地描述箱内流动结构, 并能够捕捉到循环间的变化。RAPOSO 等^[39]采用 Fluent 对旋流器内部的流场进行数值模拟, 对比大涡模拟和雷诺应力模型, 结果发现, 在预测切向湍流波动方面, LES 模型明显优于雷诺应力模型。ZHENG 等^[40]建立了基于 LES 的齿轮润滑传热模型, 分析了润滑过程中的流动与传热特性。研究发现, 齿轮高速运转产生的强剪切效应在大齿轮表面易形成涡旋, 增强了流体混合程度, 从而提升了散热的均匀性。

2.2.3 DNS 模拟

直接数值模拟是湍流模拟中精度最高的方法, 可直接求解所有湍流尺度的运动。其核心是完全解析 Navier-Stokes 方程, 捕捉从最大涡到最小涡的全部动力学过程。但此方法对网格要求极端严苛, 难以处理复杂几何问题, 计算成本极高, 在齿轮箱润滑领域应用较少^[41]。

综上所述, 齿轮箱润滑中流动多为湍流, 合理选择湍流模型是提升 CFD 精度的关键。RANS 方法因效率高、稳定性好被广泛应用。其中, $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 模型适用于不同流场特性; LES 具备更高精度, 能捕捉瞬态涡结构, 适用于高复杂流动模拟; DNS 精度最高, 但计算代价巨大, 实际应用受限。不同模型在准确性与计算成本间需综合权衡后进行选择。

2.3 考虑振动及温度影响的齿轮箱润滑研究

振动及温度是齿轮箱润滑中不可忽视的因素。齿轮振动会破坏油膜, 增大摩擦和磨损; 温度会影响润滑油黏度, 导致油膜变薄, 还会影响润滑油流动性, 进而影响润滑效果。因此, 研究齿轮箱振动及温度对润滑油的影响可以改善传动系统的润滑状况, 确保其在各种工况下均能保持良好性能。本节主要对考虑振动及温度影响的齿轮箱润滑研究进行阐述。

2.3.1 振动对齿轮箱润滑影响的研究

众多学者围绕齿轮传动的摩擦与润滑方面开展了大量的研究, 希望通过进一步优化齿轮的润滑方法及理论, 降低齿轮的振动。徐凯等^[42]为研究振动对润滑带来的影响, 搭建了振动检测试验台(图5), 通过分析试验数据, 发现纳米添加剂润滑油可在短时间内降低齿轮在不同工况下的振动及噪声值; 在此基础上, 对比了不同载荷和转速下的齿轮降振效果, 发现转速更具敏感性。菅光霄等^[43-45]建立了摩擦动力学模型并进行数值求解, 分析了振动下齿轮的润滑特性, 研究了振动影响下的变位齿轮系统及行

星齿轮副的润滑情况。结果表明, 振动不仅会导致润滑油膜厚度产生波动变化, 增大局部油膜破裂的风险, 还可能诱发边界润滑甚至局部干摩擦现象, 降低润滑性能和齿轮系统的稳定性。孙秀全等^[46]则在考虑润滑的情况下, 研究了齿轮磨损对振动的影响规律, 发现齿轮磨损会导致齿轮振动的增加。LIU 等^[47]对不同振动方向下的齿轮箱进行 CFD 仿真, 定量比较了不同运行参数对润滑和效率的影响。结果发现, 振动下轴承的搅动损失和供油量高于静止状态, 同时, 横向振动对齿轮箱润滑状况与效率的影响最大。



图5 振动检测试验台^[42]

Fig. 5 Vibration test rig^[42]

综上所述, 振动条件下齿轮传动系统的润滑研究正处于快速发展阶段, 已逐渐成为机械传动领域的重要研究方向。振动对润滑性能的影响不仅取决于润滑剂类型、油膜厚度、齿轮材料与结构等内在因素, 还受到振动频率与方向、载荷、转速、温度等外在工况的显著影响。目前, 试验测量与数值模拟方法已广泛应用于该领域研究, 为深入揭示振动诱发的油膜扰动、边界润滑行为及磨损机制提供了有力支撑。

2.3.2 温度对齿轮箱润滑影响的研究

随着数值传热学的研究^[48], 温度已经是润滑中不可忽视的研究因素, LONG 等^[49]建立了基于有限元的齿轮温度数值模型, 得到了齿轮形状、转速和外加载荷以及润滑条件对高速齿轮表面温度的影响。WANG 等^[50]建立了有限元模型, 分别模拟了齿轮啮合和冷却过程中的温度, 发现齿轮温度在啮合初期升高, 至节圆处降至最低, 随后再次上升, 并在喷油冷却后迅速趋于稳定。LI 等^[51]对齿轮表面的非稳态温度场进行分析, 得到了齿轮表面任意啮合力矩和任意位置的连续温度分布情况。鲍和云等^[52]对齿轮箱进行了稳态温度场仿真, 如图6所示, 得到了流场内部油气、压力、速度分布情况, 并分析了齿速、

油深及油黏度对齿轮温度场的影响。潘昱等^[53]采用控制变量法分析了润滑油、工况、齿轮参数对齿面温度及对流换热的影响规律,并搭建试验机(图7)与仿真结果进行对比验证,结果表明,齿轮温度随载荷增加而升高的趋势与仿真计算结果一致,且高重合度齿轮的温度高于普通重合度齿轮。

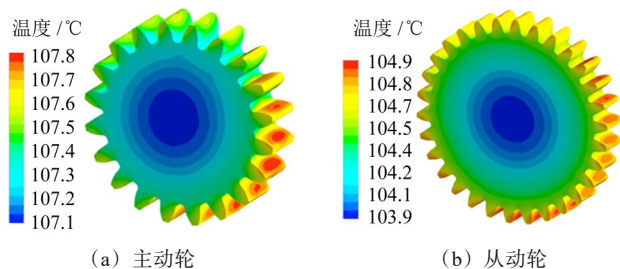


图6 主动轮、从动轮稳态温度场^[52]

Fig. 6 Steady temperature field of driving and driven gears^[52]

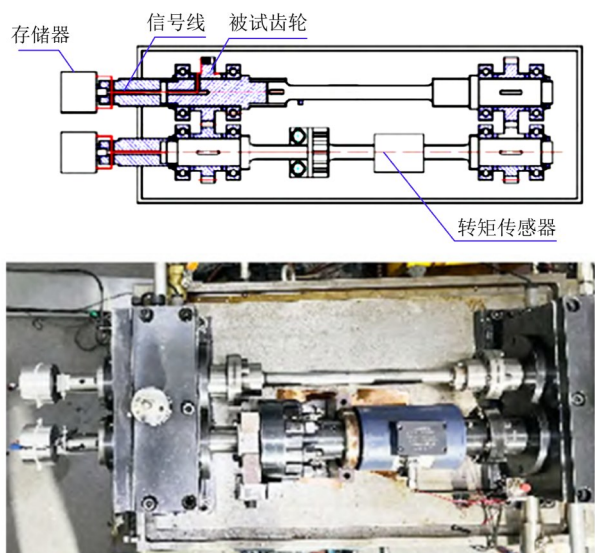


图7 CL-100型齿轮试验机^[53]

Fig. 7 CL-100 gear testing machine^[53]

综上,齿轮的温度变化对润滑性能具有显著影响,数值模拟可有效预测齿面温度分布及其变化规律。随着转速、载荷等参数变化,齿面温度呈现阶段性波动。同时,油黏度及喷油冷却方式等外部因素也对温度控制效果起关键作用。此外,温度场模拟结果需结合试验验证,进一步提升仿真的准确性。值得注意的是,不同齿轮结构参数在高温工况下对系统稳定性影响不同,温度控制应与齿轮设计参数协同参与优化。

2.4 齿轮箱润滑的试验研究

在齿轮箱润滑研究中,试验与仿真的结合正成为提升研究可靠性和工程适用性的关键手段。尽管仿真在分析复杂流动和预测润滑性能方面具有成本低、重复性强等优势,但其准确性依赖于合理的物理模型与边界条件。因此,试验验证不仅可用于评

估仿真可信度,更是模型校准与优化的核心。目前的试验主要通过润滑油流动特性与功率损耗来评估齿轮箱润滑CFD性能。本节将重点对润滑油流动特性与齿轮箱润滑功率损耗的研究现状进行阐述。

2.4.1 润滑油流动特性的试验研究

为确保齿轮箱的运行可靠性,设计中通常采用保守的润滑策略,然而,过量供油会使大量油液持续参与运转,增大空载功率损耗。若能在齿轮箱设计初期阶段准确掌握油流动情况,将有助于优化润滑方案,从而有效提升传动效率。

在油流动可视化方面,LI等^[54]结合流体仿真软件与高分辨率成像系统,利用脉冲铜蒸气激光和强白光光源进行试验观察,结果表明,仿真预测与试验可视化结果高度一致,有效验证了仿真模型的准确性。MASTRONE等^[55]使用粒子图像测速仪(Particle Image Velocimetry, PIV)(图9)获得的油流动数据结果与仿真结果进行对比,发现数值方法能够准确再现油液分布、涡结构以及再循环区域等复杂细部流动特征。在微量供油条件下,QIAN等^[56]利用荧光显微镜和光学干涉仪研究润滑油流动,获得接触区域的油池形状和中心油膜厚度,揭示了润滑状态的过渡过程,对深入理解微量供油工况下的润滑特性具有重要意义。YIN等^[57]对直升机减速器进行数值模拟,采用高速摄像和油量测量的方法采集内部流场情况,并搭建测试台验证了模型的可行性,研究表明,油位、转速和飞行姿态对润滑油流动均有显著影响。

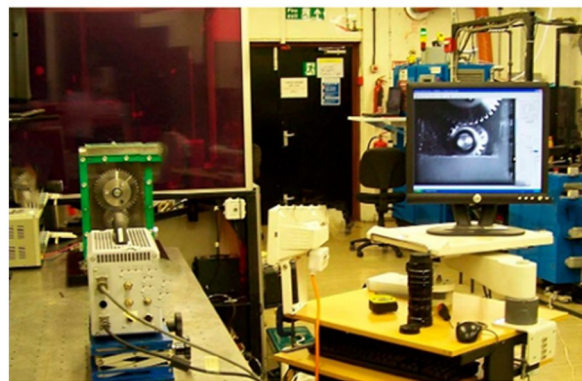


图8 高分辨率成像试验台^[54]

Fig. 8 High-resolution imaging test bed^[54]

综上,采用高分辨率成像、PIV测速、荧光显微技术等手段对润滑油流动过程进行可视化研究,能有效揭示其内部流场结构及润滑状态变化规律。仿真结果与试验观察吻合,验证了数值模拟方法的准确性与适用性。同时,不同工况下,如转速、油位、供油方式及姿态变化,均对润滑油的分布、流动路径产生显著影响。可视化技术与仿真手段的结合,有助于深入

理解润滑行为, 为润滑系统优化设计提供依据。

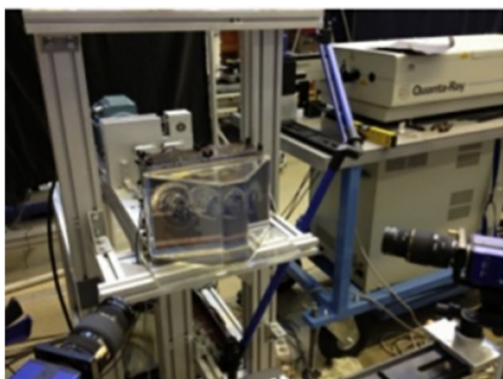


图9 PIV装置^[55]

Fig. 9 PIV device^[55]

2.4.2 齿轮箱润滑的功率损耗试验研究

在齿轮箱润滑过程中, 功率损耗作为影响系统性能的重要参数, 不仅关系到整体传动效率的高低, 还直接影响齿轮箱内部的温升水平和热平衡状态。因此, 合理控制功率损耗对于提升齿轮箱综合性能具有重要意义。

齿轮箱润滑过程中的功率损耗主要来源于风阻损耗和搅油损耗。CONCLI等^[58]研究了单齿轮在全浸润滑下的风阻损失, 分析了转速、齿顶圆直径和螺旋角的影响, 通过试验验证, 发现单齿旋转产生的风阻损耗与测量值显示出良好的一致性。LI等^[59]建立了喷油润滑下齿轮风阻功率损耗试验台, 提出了风动转矩的测量方法; 结合正交试验与CFD数值模拟, 揭示了润滑参数影响机制; 建立基于雷诺数的无量纲风动力矩预测模型, 试验与仿真结果高度吻合, 为齿轮风动损失计算及减阻设计提供了指导。李晏等^[60]对齿轮进行搅油损失分析并搭建试验台验证(图10), 分析了不同油深、齿速和齿宽条件下的搅油损失情况。结果表明, 齿速和油深对搅油的损失影响较大, 而齿宽影响不太明显, 试验和仿真结果非常契合。HANDSCHUH等^[61]在风阻和搅动下进行测量, 发现齿轮尺寸越大, 搅动引起的功率损失越明显; 齿形变化对风阻损耗影响显著。因此, 齿轮设计需综合考虑润滑能耗因素, 以优化系统效率。

综上, 风阻损耗受转速、齿轮尺寸及螺旋角等因素影响, 而搅油损耗则受齿速和油深影响显著, 齿宽作用相对较小。研究还发现, 齿轮尺寸增大会加剧搅油损失, 而齿形变化对风阻损耗影响明显。因此, 在齿轮箱润滑研究中应综合考虑结构参数与润滑工况, 以实现能耗优化。

3 齿轮箱润滑CFD研究的展望

伴随着CFD技术的进步和工业制造水平的发展,

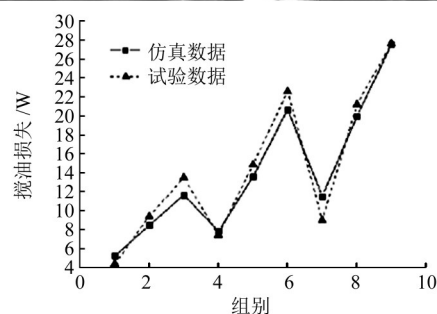


图10 搅油试验台架与仿真试验结果对比^[60]

Fig. 10 Comparison of oil churning test rig and simulation test results^[60]

齿轮润滑系统的设计和优化得到了显著提升, 齿轮传动系统正朝着高速、高负荷、高精度方向不断突破, 更是对润滑技术提出了前所未有的挑战。结合目前齿轮箱润滑CFD仿真技术的发展现状^[62], 应该从以下几方面加大研究力度:

1) 目前研究的齿轮箱润滑模型主要聚焦于结构相对简单的一级、两级定轴或周转齿轮传动系统, 随着工业领域对高效率、高负载齿轮传动装置需求的不断增长, 齿轮箱内部结构愈发复杂; 同时, CFD技术的快速发展又为复杂多级复合齿轮传动系统的数值仿真提供了可行性。因此, 未来的研究趋势应逐步拓展至多级传动系统, 甚至更复杂的多级复合轮系齿轮传动结构, 以更好地满足工程实际的高性能需求。

2) 在湍流模型选择上依赖经验, 复杂流动易误判, 传统的RANS模型在大尺度流动仿真中计算效率高, 但无法有效捕捉细节涡流和高剪切流动, 而LES模型虽精度高, 却对计算资源要求过高, 难以广泛应用。未来应发展AI算法, 根据流场特征推荐最优模型, 开发动态混合模型, 在仿真中自动切换RANS与LES区域, 近齿面用LES解析涡结构, 远场用RANS提升效率, 从而在保障仿真精度的同时优化计算资源。

3) 现有齿轮箱润滑CFD仿真多关注单一物理场, 但齿轮润滑涉及流体流动、温度、固体力学与振动等多个物理现象, 它们之间相互作用, 共同决定了润滑的稳定性和效率。因此, 传统的单一物理

场仿真方法难以全面反映齿轮润滑的复杂性,未来应大力发展流-固-热-振耦合仿真技术,精确模拟齿轮润滑中的多场交互效应,为齿轮润滑系统设计提供更全面的理论支持,缩短产品研发周期。

4) 当前齿轮箱润滑研究以数值仿真为主,试验验证相对不足,影响了模型的可信度与适用性。单一仿真难以准确反映复杂实际工况,需加强仿真与试验的协同。此外,润滑过程中的功率损耗对齿轮系统效率影响显著,相关研究应深入挖掘,进而全面提升齿轮传动系统的性能。

4 结语

随着齿轮传动系统发展,齿轮箱润滑研究将深度融合人工智能、绿色材料与多物理场耦合技术,致力于构建自适应、低能耗、长寿命的智能润滑体系,在提升机械传动效率的同时,推动制造业向可持续发展迈出关键的一步。这一领域的突破不仅关乎机械设备性能的跃升,更是实现“双碳”目标与智能制造愿景的重要基石。

参 考 文 献

- [1] 周铸,黄江涛,黄勇,等. CFD技术在航空工程领域的应用、挑战与发展[J]. 航空学报,2017,38(3):020891.
ZHOU Zhu, HUANG Jiangtao, HUANG Yong, et al. CFD technology in aeronautic engineering field: applications, challenges and development[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(3):020891.
- [2] 张念. 我国铁路轮轨润滑技术的发展[J]. 中国铁路,2009(9):38-43.
ZHANG Nian. Development of railway wheel/rail lubrication technology in China[J]. Chinese Railways, 2009(9):38-43.
- [3] 邹高武. 基于MPS的船舶减速器能耗研究与仿真分析[D]. 上海:上海海洋大学,2022:1-6.
ZOU Gaowu. Research and simulation analysis on energy consumption of ship reducer based on MPS[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022:1-6.
- [4] WOYDT M. The importance of tribology for reducing CO₂ emissions and for sustainability[J]. Wear, 2021, 474:203768.
- [5] LIU H L, LIU H J, ZHU C C, et al. Effects of lubrication on gear performance: a review[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 145:103701.
- [6] 刘骄. 齿轮副搅油损失仿真分析及试验研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2019:51-53.
LIU Jiao. Simulation analysis and experimental study on oil stirring loss of gear pair[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2019:51-53.
- [7] 罗攀,张博,吴文敏,等. 齿轮飞溅润滑与温度场仿真分析研究[J]. 汽车技术,2019(9):42-48.
LUO Pan, ZHANG Bo, WU Wenmin, et al. Simulation study on gear splash lubrication and temperature field[J]. Automobile Technology, 2019(9):42-48.
- [8] 王志坚,郭力维,周朝晖,等. 地铁齿轮箱飞溅润滑流场分析及导油结构的优化[J]. 铁道科学与工程学报,2025,22(5):2268-2279.
WANG Zhijian, GUO Liwei, ZHOU Chaohui, et al. Analysis and optimization of flow field of splash lubrication of subway gearbox[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(5):2268-2279.
- [9] 谢迟新,刘桓龙,贾瑞河,等. 基于MPS方法的二级齿轮箱飞溅润滑特性研究[J]. 中国机械工程,2021,32(15):1827-1835.
XIE Chixin, LIU Huanlong, JIA Ruihe, et al. Research on splash lubrication characteristics of two-stage gearboxes based on MPS method[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(15):1827-1835.
- [10] 师陆冰,陈慧潇,颜世钊,等. 基于MPS法的行星轮系飞溅润滑特性研究[J]. 机械传动,2023,47(10):1-9.
SHI Lubing, CHEN Huixiao, YAN Shidang, et al. Research on splash lubrication characteristics of the planetary gear train based on the MPS method[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47(10):1-9.
- [11] 陈慧潇,师陆冰,职彦锋,等. 行星轮系周转运动过程中的润滑油液分布与搅油损耗研究[J]. 机械传动,2024,48(9):10-17.
CHEN Huixiao, SHI Lubing, ZHI Yanfeng, et al. Study on the oil distribution and churning loss in the rotation of a planetary gear train[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2024, 48(9):10-17.
- [12] 唐沛,王乐,任少英,等. 基于CFD方法的轮毂电驱动行星齿轮搅油功率损失仿真与分析[J]. 机械传动,2023,47(11):123-128.
TANG Pei, WANG Le, REN Shaoying, et al. Simulation and analysis of oil churning power loss in electric drive planetary gears based on the CFD method[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47(11):123-128.
- [13] LIU H J, MAO K, ZHU C C, et al. Spur gear lubrication analysis with dynamic loads[J]. Tribology Transactions, 2013, 56(1):41-48.
- [14] LIU H J, ZHU C C, SUN Z D, et al. Coefficient of friction of a starved lubricated spur gear pair[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(5):2171-2177.
- [15] PEI J X, HAN X, TAO Y R, et al. Lubrication reliability analysis of spur gear systems based on random dynamics[J]. Tribology International, 2021, 153:106606.
- [16] MO S, ZOU Z X, FENG Z Y, et al. Research on lubrication characteristics of asymmetric helical gear based on CFD method[J]. Lubrication Science, 2020, 32(6):309-320.
- [17] 孙凯,刘少军,胡小舟. 基于动网格的中减速器飞溅润滑内部流场分析[J]. 润滑与密封,2017,42(8):131-134.
SUN Kai, LIU Shaojun, HU Xiaozhou. Analysis on internal flow field of middle reducer splash lubrication based on dynamic mesh[J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(8):131-134.
- [18] 陆凤霞,王孟,王春雷,等. 直升机中减飞溅润滑流场分析与优化方法[J]. 航空学报,2020,41(11):123659.
LU Fengxia, WANG Meng, WANG Chunlei, et al. Analysis and optimization method for flow field of intermediate gearbox splash lubrication in helicopters[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(11):123659.
- [19] 邵帅,张开林,姚远,等. 动车组锥齿轮箱飞溅润滑特性及箱体

- 结构改进[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(5): 1060-1071.
- SHAO Shuai, ZHANG Kailin, YAO Yuan, et al. Splash lubrication characteristics and structure improvement of spiral bevel gearbox for electrical multiple unit[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(5): 1060-1071.
- [20] 王琳, 杜泽恺, 郑志振, 等. 基于SPH法的星形人字齿轮箱油气两相流动和参数影响分析[J]. 机械传动, 2023, 47(2): 116-123.
- WANG Lin, DU Zekai, ZHENG Zhizhen, et al. Analysis of oil-gas two-phase flow and parameter influence of star herringbone gearboxes based on the SPH method[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47(2): 116-123.
- [21] LIU H, JURKSCHAT T, LOHNER T, et al. Determination of oil distribution and churning power loss of gearboxes by finite volume CFD method[J]. Tribology International, 2017, 109: 346-354.
- [22] LIU H, JURKSCHAT T, LOHNER T, et al. Detailed investigations on the oil flow in dip-lubricated gearboxes by the finite volume CFD method[J]. Lubricants, 2018, 6(2): 47.
- [23] ALBERS A, REICHERT S. On the influence of surface roughness on the wear behavior in the running-in phase in mixed-lubricated contacts with the finite element method[J]. Wear, 2017, 376: 1185-1193.
- [24] ATENCIO B N, YAO H-D, CHERNORAY V. Experiments and lattice-Boltzmann simulation of flow in a vertically aligned gearbox [J]. Journal of Tribology, 2023, 145(11): 114103.
- [25] JI Z, STANIC M, HARTONO E A, et al. Numerical simulations of oil flow inside a gearbox by Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method[J]. Tribology International, 2018, 127: 47-58.
- [26] MACCIONI L, CONCLI F. Computational fluid dynamics applied to lubricated mechanical components: review of the approaches to simulate gears, bearings, and pumps[J]. Applied Sciences, 2020, 10(24): 8810.
- [27] LIU H, LINK F, LOHNER T, et al. Computational fluid dynamics simulation of geared transmissions with injection lubrication[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(21/22): 7412-7422.
- [28] PATEL H, ANTO M. Oil splash simulation in final drive with over-set mesh[C]//SAE Technical Paper Series. SAE International, 2019: 2-4.
- [29] LU F X, WANG M, PAN W B, et al. CFD-based investigation of lubrication and temperature characteristics of an intermediate gearbox with splash lubrication[J]. Applied Sciences, 2021, 11(1): 352.
- [30] SANTRA T S, RAJU K, DESHMUKH R, et al. Prediction of oil flow inside tractor transmission for splash type lubrication[C]//SAE Technical Paper Series. SAE International, 2019: 2-5.
- [31] CHEN L Q, MA P P, TIAN J L, et al. Prediction and optimization of lubrication performance for a transfer case based on computational fluid dynamics[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2019, 13(1): 1013-1023.
- [32] MUZZIOLI G, PAINI G, DENTI F, et al. A lumped parameter and CFD combined approach for the lubrication analysis of a helical gear transmission[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2385(1): 012034.
- [33] 彭钱磊, 桂良进, 范子杰. 基于齿面移动法的齿轮飞溅润滑性能数值分析与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 51-56.
- PENG Qianlei, GUI Liangjin, FAN Zijie. Gear splash lubrication numerical simulation and validation based on teeth-face-moving method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 51-56.
- [34] KORSUKOVA E, MORVAN H. Preliminary CFD simulations of lubrication and heat transfer in a gearbox[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2017, 50886: V05BT22A014.
- [35] KELLER M C, KROMER C, CORDES L, et al. CFD study of oil-jet gear interaction flow phenomena in spur gears[J]. The Aeronautical Journal, 2020, 124(1279): 1301-1317.
- [36] COKLJAT D, SLACK M, VASQUEZ S A, et al. Reynolds-stress model for eulerian multiphase[J]. Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal, 2006, 6(1/2/3): 168.
- [37] DURANY J, PEREIRA-PÉREZ J, VARAS F. About the Constantinescu turbulent model in hydrodynamic lubrication: a comparison with 3-D LES models [J]. Tribology International, 2015, 83: 33-41.
- [38] BOTTONE F, KRONENBURG A, GOSMAN D, et al. Large eddy simulation of diesel engine in-cylinder flow[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2012, 88(1): 233-253.
- [39] RAPOSO G M, NIECKELE A O. Flow analysis of a hydrocyclone designed to high oil content application[C]//Volume 1: Symposia, Parts A, B and C. ASMEDC, 2009: 2231-2236.
- [40] ZHENG G A, XU P, LI L. Investigate on the fluid dynamics and heat transfer behavior in an automobile gearbox based on the LBM-LES model[J]. Lubricants, 2025, 13(3): 117.
- [41] SCARDOVELLI R, ZALESKI S. Direct numerical simulation of free-surface and interfacial flow[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31: 567-603.
- [42] 徐恺, 程旭东, 吴明远, 等. 纳米润滑添加剂对斜齿圆柱齿轮振动及噪声特性的试验分析[J]. 机械传动, 2019, 43(2): 107-111.
- XU Kai, CHENG Xudong, WU Mingyuan, et al. Experimental analysis of vibration and noise characteristic of helical gear with nanolubricant additive [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(2): 107-111.
- [43] 菅光霄, 王优强, 于晓, 等. 振动与接触冲击耦合作用下的齿轮弹流润滑研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(21): 226-232.
- JIAN Guangxiao, WANG Youqiang, YU Xiao, et al. Elasto-hydrodynamic lubrication of gears under coupling of vibration and contact impact [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(21): 226-232.
- [44] JIAN G X, WANG Y Q, ZHANG P, et al. Thermal elastohydrodynamic lubrication of modified gear system considering vibration [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(11): 3350-3363.
- [45] JIAN G X, WANG Y Q, ZHANG P, et al. Analysis of lubrication performance for internal meshing gear pair considering vibration [J]. Journal of Central South University, 2021, 28(1): 126-139.
- [46] 孙秀全, 王铁, 张瑞亮, 等. 斜齿轮渐进性磨损对齿轮振动特性的影响分析[J]. 机械传动, 2021, 45(1): 17-22.
- SUN Xiuquan, WANG Tie, ZHANG Ruiliang, et al. Analysis of the influence of progressive wear of helical gear on gear vibration characteristic [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(1): 17-22.

- [47] LIU Y, ZHANG K L, SHAO S, et al. Influence of vibration on the lubrication effect of a splash-lubricated gearbox[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2024, 25(4): 324-339.
- [48] 陶文铨. 计算传热学的近代进展[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 362-363.
- TAO Wenquan. Modern progress of computational heat transfer [M]. Beijing: Science Press, 2000: 362-363.
- [49] LONG H, LORD A A, GETHIN D T, et al. Operating temperatures of oil-lubricated medium-speed gears: numerical models and experimental results[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2003, 217(2): 87-106.
- [50] WANG Y Z, NIU W T, CHEN Y Y, et al. Convection heat transfer and temperature analysis of oil jet lubricated spur gears[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2016, 68(6): 624-631.
- [51] LI W, TIAN J Y. Unsteady-state temperature field and sensitivity analysis of gear transmission[J]. Tribology International, 2017, 116: 229-243.
- [52] 鲍和云, 范永, 朱如鹏, 等. 齿轮箱浸油润滑流场及温度场仿真分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(8): 1840-1847.
- BAO Heyun, FAN Yong, ZHU Rupeng, et al. Simulation analysis of flow field and temperature field of oil-immersion lubrication gearbox[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(8): 1840-1847.
- [53] 潘昱, 杨曼, 鲍和云, 等. 高重合度直齿圆柱齿轮温度场分析及试验验证[J]. 机械传动, 2024, 48(7): 101-113.
- PAN Yu, YANG Man, BAO Heyun, et al. Temperature field analysis and experimental test of spur gears with high contact degree[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2024, 48(7): 101-113.
- [54] LI L, VERSTEEG H K, HARGRAVE G K, et al. Numerical investigation on fluid flow of gear lubrication[J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2009, 1(1): 1056-1062.
- [55] MASTRONE M N, HARTONO E A, CHERNORAY V, et al. Oil distribution and churning losses of gearboxes: experimental and numerical analysis[J]. Tribology International, 2020, 151: 106496.
- [56] QIAN S H, GUO D, LIU S H, et al. Experimental investigation of lubricant flow properties under micro oil supply condition[J]. Journal of Tribology, 2012, 134(4): 041501.
- [57] YIN M, CHEN X, DAI Y, et al. Numerical and experimental investigation of oil-guiding splash lubrication in light helicopter's reducers[J]. Aerospace, 2021, 8(11): 345.
- [58] CONCLI F, GORLA C, DELLA TORRE A, et al. Windage power losses of ordinary gears: different CFD approaches aimed to the reduction of the computational effort[J]. Lubricants, 2014, 2(4): 162-176.
- [59] LI L L, WANG S M. Experimental study and numerical analysis on windage power loss characteristics of aviation spiral bevel gear with oil injection lubrication[J]. Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 2023, 69(5/6): 235-247.
- [60] 李晏, 皮彪, 王叶枫, 等. 基于移动粒子半隐式法的齿轮搅油损失分析与试验验证[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 368-372.
- LI Yan, PI Biao, WANG Yefeng, et al. Analysis and validation of churning loss of helical gear based on moving particle semi-implicit method[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(3): 368-372.
- [61] HANDSCHUH M, GUNER A, KAHRAMAN A. An experimental investigation of windage and oil churning power losses of gears and discs[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2023, 237(1): 163-177.
- [62] 林亨耀. 先进润滑技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2023: 311-313.
- LIN Hengyao. Advanced lubrication technology and application [M]. Beijing: China Machine Press, 2023: 311-313.

Research status and trends of computational fluid dynamics technology for gearbox lubrication

YANG Shufeng¹ SHUI Jianfeng¹ LI Zhisheng²

(1. School of Mechatronic Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

(2. ZRIME Gearing Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The gearbox lubrication system is an indispensable component of mechanical transmission systems. Under high-speed and heavy-load conditions, improper lubrication can easily lead to lubrication failure, which directly compromises the efficiency of gear transmission systems. Therefore, it is of great significance to investigate gearbox lubrication technologies using computational fluid dynamics (CFD). Based on a thorough analysis and synthesis of research efforts both domestically and internationally, this paper reviews the development of lubrication modeling in gearboxes. The current research status is discussed from several key perspectives, including CFD methods and mesh generation techniques, turbulence modeling, the influence of vibration and temperature, and experimental investigations. Furthermore, potential directions for future research in gearbox lubrication are explored. This study aims to provide a valuable reference for future comprehensive investigations into gearbox lubrication systems, with the goal of improving the service life and overall performance of gear transmission systems.

Key words: Gearbox; lubrication; Mechanical transmission systems; Computational fluid dynamics