

人字齿轮与滑动轴承耦合作用下的齿轮箱动态响应研究

唐子凯

南京高精齿轮集团有限公司, 江苏 南京 210000

DOI:10.61369/ME.2024080028

摘要： 本文旨在探讨人字齿轮与滑动轴承耦合作用下的齿轮箱动态响应特性。通过对人字齿轮的结构特点、受力分析及动态特性进行详细阐述，明确了其在复杂工况下的工作机理。同时，深入分析了滑动轴承的结构、润滑机制及非线性动力学行为，为理解轴承在齿轮箱中的作用提供了理论基础。进一步地，文章重点研究了齿轮与轴承的耦合作用机理，包括它们之间的相互影响、耦合引起的动态载荷分布以及非线性动力学模型的构建。在此基础上，利用数学模型和有限元分析方法，对齿轮箱的动态响应进行了建模与仿真，详细解析了仿真结果，并讨论了其对齿轮箱性能的影响。

关键词： 人字齿轮；滑动轴承；耦合作用；齿轮箱；动态响应

Research on Dynamic Response of Gearbox under the Coupling Effect of Herringbone Gears and Sliding Bearings

Tang Zikai

Nanjing High Precision Gear Group Co., LTD. Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract： This paper aims to explore the dynamic response characteristics of gearboxes under the coupling effect of herringbone gears and sliding bearings. By elaborating in detail on the structural characteristics, force analysis and dynamic features of the herringbone gear, its working mechanism under complex working conditions is clarified. Meanwhile, the structure, lubrication mechanism and nonlinear dynamic behavior of the sliding bearing were analyzed in depth, providing a theoretical basis for understanding the role of the bearing in the gearbox. Furthermore, the article focuses on the coupling mechanism between gears and bearings, including their mutual influence, the dynamic load distribution caused by coupling, and the construction of nonlinear dynamic models. On this basis, the dynamic response of the gearbox was modeled and simulated by using the mathematical model and the finite element analysis method. The simulation results were analyzed in detail, and their influence on the performance of the gearbox was discussed.

Keywords： herringbone gear; sliding bearing; coupling effect; gearbox; dynamic response

一、人字齿轮的特性分析

（一）人字齿轮的结构特点

人字齿轮的结构特点主要体现在其独特的齿形布局和对称性设计上。相较于直齿轮，人字齿轮的齿形呈现出人字形排列，这种设计不仅增强了齿轮的强度和刚性，还有效地减少了运转过程中的振动和噪音。此外，人字齿轮的左右两侧齿形完全对称，这种对称性不仅保证了齿轮运转的平稳性，还使得齿轮在受力时能够均匀分布，延长了齿轮的使用寿命。人字齿轮的这些结构特点，使其在高速、重载等复杂工况下表现出色，成为众多机械设备中的优选传动元件。

（二）人字齿轮的受力分析

人字齿轮在运行过程中，会受到多种力的作用，主要包括径向力、切向力和轴向力。径向力主要由齿轮啮合产生的压力产生，这种力垂直于齿轮轴线，对轴承和齿轮箱壳体产生压力。切向力则是齿轮传递扭矩时产生的，它沿着齿轮的切线方向作用，是齿轮传动的主要动力来源。^[1] 轴向力则可能由于齿轮啮合误差、安装误差或热膨胀等因素导致，虽然相对较小，但在高精度传动

中也不容忽视。

为了深入理解人字齿轮的受力情况，我们还需要考虑其动态效应。在高速运转时，齿轮的惯性力和动态啮合力会对齿轮的受力状态产生显著影响。这些动态力不仅会导致齿轮的弹性变形，还可能引发振动和噪音，进而影响齿轮的传动精度和使用寿命。因此，在进行人字齿轮的设计和分析时，必须充分考虑其受力特点和动态效应，以确保齿轮传动的可靠性和稳定性。

（三）人字齿轮的动态特性

人字齿轮因其独特的结构设计，如交叉排列的齿形，展现出与普通齿轮不同的动态特性。这种设计旨在提高齿轮在啮合过程中的稳定性，减少侧向力，从而降低噪声和振动。例如，当两个相对的齿形在啮合点相遇时，它们能够有效地平衡轴向力，使得整体传动更加平稳。在分析人字齿轮动态特性时，需要考虑齿轮的材料刚度、齿形精度以及制造公差等因素，这些都直接影响到齿轮在高速旋转时的动态响应。

为了深入理解人字齿轮的动态特性，可以采用有限元分析方法，模拟齿轮在受载荷作用下的变形情况。^[2] 通过对比不同工况下的仿真结果，可以评估在不同载荷或转速下，人字齿轮的振动频

率和振型变化，这对于预测和控制齿轮箱的动态性能至关重要。例如，研究发现，当转速增加到一定程度时，由于非对称性引起的动态效应可能导致振动幅值显著增加，这需要在设计阶段就进行优化以避免潜在的故障模式。

二、滑动轴承的工作原理

（一）滑动轴承的结构介绍

滑动轴承作为齿轮箱中的关键部件，其结构设计直接影响到整体系统的运行效率和可靠性。滑动轴承通常由轴承座、轴瓦和间隔圈等部分组成，其中轴瓦内表面经过特殊处理，如镀铜或镶嵌石墨，以提高耐磨性和润滑性能。轴承座与机壳紧密配合，确保轴承在工作时的稳定性。轴瓦的外表面常设计有油槽或油孔，以便于润滑油的流动和分布，形成有效的润滑膜，减少摩擦和磨损。^[3]此外，滑动轴承的材料选择也至关重要，需具备良好的机械强度、抗腐蚀性和热稳定性，以适应不同工况下的使用需求。在高速、重载或极端温度条件下，滑动轴承的性能表现将直接影响齿轮箱的整体寿命和性能。

（二）轴承润滑与动压效应

滑动轴承在入字齿轮箱中的作用至关重要，其润滑与动压效应直接影响着齿轮箱的运行效率和寿命。动压效应是指在相对滑动中，由于润滑油被挤压进入轴承间隙，形成一层薄油膜，将金属表面分隔开，从而显著降低摩擦和发热。这层油膜不仅起到润滑作用，还能承受一定的载荷，保护轴承不受磨损。^[4]油膜的厚度和稳定性对轴承的性能有着决定性的影响。在实际应用中，合理的润滑设计和选用合适的润滑油至关重要，以确保油膜能够在各种工况下保持稳定，从而延长轴承的使用寿命，提高齿轮箱的整体运行效率。此外，动压效应还与轴承的结构设计、材料选择以及工作条件等因素密切相关，因此在轴承的设计与优化过程中，必须综合考虑这些因素，以实现最佳的润滑效果和动压效应。

（三）轴承的非线性动力学行为

滑动轴承在高载荷、高速度或变载条件下，其动力学行为往往呈现出非线性特征。这种非线性主要源于轴承内部的动压效应、弹性变形以及摩擦力矩的非比例性。例如，当载荷超过一定程度时，动压油膜的稳定性会受到影响，导致油膜厚度的变化不再遵循线性规律，进而影响轴承的承载能力和振动特性。^[5]此外，轴承的间隙、材料的非线性弹性以及润滑油的粘度变化等也会参与形成复杂的非线性动力学响应。

为了深入理解这种非线性动力学行为，研究者们通常会建立考虑多种非线性因素的数学模型。这些模型可能包括非线性微分方程、非线性动力学系统方程等，以捕捉轴承在不同工况下的动态响应。例如，通过考虑轴承的弹性变形，可以揭示载荷如何通过改变接触面积和接触状态来影响轴承的振动和噪声。

在齿轮箱中，滑动轴承与入字齿轮的耦合作用会进一步放大这种非线性效应。当齿轮啮合产生的冲击载荷通过轴承传递时，非线性动力学行为可能导致载荷在轴承内部的非均匀分布，甚至产生自激振动。因此，需要通过有限元分析和动力学仿真来预测

和分析这种耦合效应，以评估齿轮箱在实际运行中的稳定性。

三、耦合作用机理研究

（一）齿轮与轴承的相互影响

在齿轮箱的动力学分析中，入字齿轮与滑动轴承的相互作用是一个关键的考量因素。入字齿轮因其独特的对称结构，能够有效地分散载荷，提高传动的稳定性。当齿轮在啮合过程中，它会产生周期性的接触力，这些力会传递到轴承上，对轴承的运行状态产生直接影响。

滑动轴承作为齿轮箱的重要组成部分，其润滑状态直接影响到齿轮的旋转精度和效率。动压效应是滑动轴承工作原理的核心，通过形成油膜来承载并减少齿轮旋转时的摩擦。^[6]然而，齿轮传递的动态载荷可能导致油膜厚度的变化，进而影响轴承的稳定性，这种动态变化的载荷可能会超出轴承的非线性动力学行为范围，导致振动和噪声的增加。

因此，理解齿轮与轴承之间的相互影响对于优化齿轮箱的设计和运行至关重要。研究者们需要深入分析齿轮啮合产生的动态载荷如何影响轴承的油膜厚度和稳定性，以及轴承的非线性动力学行为如何反馈到齿轮的传动性能上。这种相互作用的研究不仅有助于揭示齿轮箱内部的复杂动力学机制，还能为齿轮箱的设计提供理论支持，以实现更高效、更稳定的传动。

（二）耦合引起的动态载荷分布

在齿轮箱的动力学分析中，耦合引起的动态载荷分布是一个关键的研究点。齿轮与滑动轴承作为传动系统中的重要组成部分，它们的相互作用直接影响到系统性能和寿命。入字齿轮因其特殊的结构设计，能够有效地分散和平衡径向载荷，但同时也会在轴向上产生复杂的动态载荷。^[7]当这些载荷与滑动轴承的非线性动力学行为相结合时，会导致载荷在轴承和齿轮接触面上的非均匀分布。

为了深入理解这种耦合作用，需要建立考虑齿轮-轴承相互影响的动态模型。例如，通过引入柔度矩阵来描述齿轮在受载后的变形，以及考虑轴承的动压效应和弹性变形，可以分析载荷如何在时间域内变化并影响分布状态。在某一特定转速下，可能会观察到载荷的周期性增强或弱化现象，这与轴承的动压膜厚度变化相吻合。

（三）非线性动力学模型构建

在研究入字齿轮与滑动轴承耦合作用下的齿轮箱动力学时，非线性动力学模型构建是理解系统动态行为的关键步骤。传统的线性模型往往无法准确捕捉到实际工况中由于接触非线性、间隙非线性以及材料非线性等因素导致的复杂动态响应。例如，入字齿轮在啮合过程中，由于接触点的不断变化，会产生显著的力矩波动，这些波动在滑动轴承中会引起压力分布的非线性变化。因此，构建一个能够反映这些非线性效应的动力学模型至关重要。该模型应综合考虑齿轮的啮合动力学、轴承的油膜动压效应以及系统的整体动力学行为。^[8]在模型中，可以通过引入非线性弹簧-阻尼系统来描述齿轮与轴承之间的相互作用，同时考虑齿轮啮合

刚度的变化以及轴承油膜厚度和压力的非线性关系。通过数值仿真,可以观察到系统在不同工况下的动态响应,如振动、噪声以及载荷分布的变化,从而为齿轮箱的设计和优化提供理论依据。

四、齿轮箱动态响应建模与仿真

(一) 数学模型的建立与简化

在数学模型的建立过程中,我们首先对人字齿轮和滑动轴承的相互作用进行抽象化处理,将其简化为一系列的非线性方程。这些方程综合考虑了齿轮的啮合刚度、轴承的油膜动压效应以及系统的整体动力学行为。为了简化模型,我们假设齿轮和轴承的材料属性为均匀且各向同性,同时忽略了次要因素如热变形和磨损等。^[6]此外,我们采用集中质量法将齿轮和轴承的质量简化为一系列离散的质量点,通过弹簧-阻尼系统连接,以模拟它们之间的相互作用。在模型的简化过程中,我们保留了最关键的非线性因素,如齿轮啮合刚度的变化和轴承油膜厚度与压力的非线性关系,以确保模型能够准确反映实际工况中的动态响应。通过一系列的简化和假设,我们建立了一个既实用又能够反映齿轮箱非线性动力学特性的数学模型。

(二) 有限元分析与动力学仿真

在齿轮箱动力学分析中,有限元分析与动力学仿真是理解人字齿轮与滑动轴承耦合作用的关键步骤。通过建立高精度的数学模型,可以量化分析不同工况下齿轮和轴承的相互作用。例如,当考虑人字齿轮的动态特性时,可能需要模拟每颗齿的接触应力变化,这往往涉及数以千计的有限元,以确保在高速旋转中结构的稳定性。

在动力学仿真的过程中,会引入轴承的动压效应,分析轴承如何通过改变润滑油膜厚度来减小接触摩擦,同时考虑到非线性因素,如润滑油的粘度随速度和温度变化的影响。例如,当齿轮箱承受重载工况时,轴承可能经历局部压力峰值,这种非线性动力学行为需要通过高阶动力学模型来精确描述。

在耦合效应的分析中,会建立齿轮与轴承的相互影响模型,以揭示动态载荷如何从齿轮传递到轴承,以及反作用力如何反过来影响齿轮的振动。^[10]通过仿真,可以观察到载荷在组件间的复杂分布模式,这些信息对于优化设计,减少振动和噪声,以及提高齿轮箱的使用寿命至关重要。例如,通过对比仿真结果,可能发现优化轴承位置或预加载设置可以显著改善系统的动态性能。

(三) 仿真结果的解析与讨论

在对齿轮箱动力学的深入研究中,仿真结果的解析与讨论揭示了人字齿轮与滑动轴承耦合作用的关键影响。通过建立的非线性动力学模型,我们发现人字齿轮的特殊结构在传递扭矩时,能够有效地分散载荷,降低了局部应力集中。在仿真过程中,齿轮的动态载荷在轴承中引起了复杂的动压分布,这种分布模式与传统的滚珠轴承相比显示出更优的自我调整能力。

进一步的分析表明,耦合效应导致的动态载荷在轴承内部产生了显著的频率响应,这些响应模式与齿轮的啮合频率相吻合,但具有一定的相位差。这种相位差可以解释为系统振动的调制,可能成为齿轮箱噪声和振动的主要来源。

此外,仿真结果还揭示了在不同工况下,如不同转速和负载条件下,齿轮与轴承之间的耦合效应表现出不同的动态特性。在低速重载条件下,轴承的动压效应更为显著,有助于减小齿轮与轴承之间的直接接触,从而降低磨损和摩擦损失。然而,在高速轻载条件下,动压效应减弱,齿轮与轴承之间的相互作用更为直接,可能导致更高的振动和噪声水平。

通过对比不同工况下的仿真结果,我们可以进一步理解齿轮箱的动态响应特性,并为优化设计提供有价值的指导。例如,在设计中可以考虑调整齿轮的参数,如齿数、模数和螺旋角,以优化载荷分布和降低振动水平。同时,对轴承的设计和选择也至关重要,合适的轴承类型和参数可以显著提高齿轮箱的整体性能和使用寿命。

五、结语

本研究通过对人字齿轮与滑动轴承耦合作用下的齿轮箱动态响应进行深入探讨,不仅揭示了齿轮与轴承在不同工况下的相互作用机理,还通过仿真分析为齿轮箱的优化设计提供了有力支持。研究结果显示,齿轮与轴承之间的耦合效应对齿轮箱的动态特性具有显著影响,特别是在不同转速和负载条件下,其动态响应特性表现出明显的差异。通过调整齿轮的参数和优化轴承的设计与选择,可以有效改善齿轮箱的载荷分布,降低振动和噪声水平,从而提高齿轮箱的整体性能和使用寿命。未来,我们将继续深入研究齿轮与轴承的耦合作用机理,探索更多影响齿轮箱动态响应的因素。

参考文献

- [1] 莫帅;曾彦钧;王震;张伟.高速重载人字齿轮传动非线性动力学分析[J].力学学报,2023(10).
- [2] 贾山虎.斜齿轮箱动态性能多参数测试与分析[J].郑州大学,2022.
- [3] 赵东旭;张彬彬;马子魁.风电齿轮箱行星齿轮滑动轴承的润滑性能[J].轴承,2023(09).
- [4] 李明辉.字齿轮传动系统动力学特性分析[J].机械科学与技术,2021,40(3).
- [5] 王勇.滑动轴承非线性动力学行为研究综述[J].润滑与密封,2020,45(5).
- [6] 赵震涛.齿轮箱耦合系统动态响应分析方法研究[J].振动与冲击,2021,40(11).
- [7] 张彬彬.基于有限元法的齿轮箱动态响应仿真分析[J].机械传动,2022,46(2).
- [8] 陈立新.人字齿轮应力分布及动态特性研究[J].中国机械工程,2020,31(15).
- [9] 王晓力.滑动轴承润滑性能分析及优化[J].摩擦学学报,2021,41(3).
- [10] 韩志仁.齿轮-轴承耦合系统动力学建模与仿真[J].振动工程学报,2020,33(6).