

滑动轴承润滑状态对齿轮箱振动及噪声的影响分析

从睿

南京高速齿轮制造有限公司, 江苏 南京 210000

DOI:10.61369/ME.2024080013

摘 要 : 本文旨在探讨滑动轴承润滑状态对齿轮箱振动及噪声的影响。通过对齿轮箱振动与噪声的产生机制进行深入分析, 本文揭示了润滑状态在齿轮箱运行中的重要性。研究内容包括润滑不足、润滑油膜厚度变化、摩擦系数变化以及油质劣化等因素对齿轮箱振动特性的影响, 同时分析了润滑油老化、不稳定供油、润滑条件与噪声水平的关系以及油膜破裂对噪声增强的作用。在此基础上, 本文进一步探讨了温度、压力、杂质等影响因素, 并提出了润滑系统优化、噪声控制方法及预防性维护策略。

关 键 词 : 滑动轴承; 齿轮箱振动; 噪声分析; 润滑状态

Analysis of the Influence of Lubrication State of Sliding Bearings on Vibration and Noise of Gearboxes

Cong Rui

Nanjing High-Speed Gear Manufacturing Co., LTD. Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract : This paper aims to explore the influence of the lubrication state of sliding bearings on the vibration and noise of gearboxes. Through an in-depth analysis of the generation mechanism of vibration and noise in the gearbox, this paper reveals the importance of the lubrication state in the operation of the gearbox. The research contents include the influences of factors such as insufficient lubrication, changes in the thickness of the lubricating oil film, changes in the friction coefficient, and deterioration of the oil quality on the vibration characteristics of the gearbox. Meanwhile, the relationships between lubricating oil aging, unstable oil supply, lubrication conditions and noise levels, as well as the effect of oil film rupture on noise enhancement are analyzed. On this basis, this paper further explores the influencing factors such as temperature, pressure and impurities, and proposes the optimization of the lubrication system, noise control methods and preventive maintenance strategies.

Keywords : sliding bearing; gearbox vibration; noise analysis; lubrication state

一、齿轮箱振动与噪声的产生机制

(一) 齿轮啮合振动分析

齿轮在啮合过程中, 由于齿形误差、齿距偏差、啮合刚度变化等因素, 会产生周期性的振动。这些振动不仅影响齿轮箱的平稳运行, 还是齿轮箱噪声的主要来源之一。齿轮啮合振动分析主要关注以下几个方面: 首先, 通过分析齿轮的啮合频率和谐波成分, 可以识别齿轮的啮合状态, 包括正常啮合、轻微磨损、严重磨损或断裂等情况。其次, 齿轮的啮合刚度变化是引起振动的重要原因, 它受到齿轮材料、齿形设计、制造精度等多种因素的影响。通过精确测量和分析啮合刚度变化, 可以为齿轮箱的减振降噪设计提供依据。^[1]最后, 齿轮啮合振动还与齿轮箱的支撑结构、轴承状态等密切相关, 因此在进行齿轮啮合振动分析时, 需要综合考虑这些因素对振动特性的影响。

(二) 轴承振动的传递路径

轴承振动的传递路径是齿轮箱振动分析中的关键环节。当齿轮在啮合过程中产生微小的不均匀受力, 这些力会通过轴传递到轴承。轴承作为支撑和减振的关键组件, 其内部的滚动体或滑动

表面的微小不平滑度或缺陷会放大这些力, 导致轴承自身产生振动。这些振动通过轴承座传递到箱体, 再沿着结构的刚性路径传递到其他组件和外部环境, 形成可感知的振动和噪声。

了解轴承振动的传递路径对于诊断齿轮箱故障至关重要。振动从轴承传递到箱体时, 会受到箱体结构刚性的影响。结构刚性不足会导致振动在传递过程中发生变形和分散, 进而影响振动信号的准确捕捉。^[2]此外, 轴承座与箱体之间的连接方式和紧固程度也会影响振动的传递效率。连接不紧密或紧固螺栓松动会导致振动泄露, 增加噪声水平, 并可能掩盖真实的故障信号。因此, 在进行齿轮箱振动分析时, 应密切关注轴承振动的传递路径, 确保振动信号的准确捕捉和分析。

二、润滑状态对齿轮箱振动的影响

(一) 润滑不足导致的异常振动模式识别

当齿轮箱的轴承润滑不足时, 会导致一系列异常振动模式的出现。首先, 润滑油的缺失会加剧轴承滚动体与滚道之间的直接接触, 这种干摩擦状态会显著增大振动幅度。由于润滑不良, 轴

承内部的摩擦系数增大，滚动体的运动变得不稳定，从而引发高频振动。这些高频振动不仅增加了轴承的磨损率，还通过结构传递，扩大了振动的影响范围。

此外，润滑不足还可能导致轴承座与箱体之间的相对运动增加，进一步加剧了振动。这种相对运动破坏了原本稳定的振动传递路径，使得振动信号在传递过程中发生畸变，增加了故障诊断的难度。^[3]在严重的情况下，润滑不足甚至可能引发轴承的过热和卡死，导致齿轮箱完全失效。

因此，润滑不足是导致齿轮箱异常振动的重要原因之一。在实际应用中，应定期检查齿轮箱的润滑状态，确保轴承得到充分的润滑，以减少异常振动的发生，提高齿轮箱的运行稳定性和可靠性。

（二）润滑油膜厚度变化对振动频谱的影响

滑动轴承的润滑油膜厚度是影响设备振动特性的重要因素之一。在齿轮箱中，润滑油膜起到隔离金属直接接触的作用，减小了齿轮和轴承的摩擦与磨损。当润滑油膜厚度发生变化时，会直接反映在振动频谱上，导致振动幅值和频率的显著变化。^[4]例如，膜厚增加可能导致振动频率的位移，这可能使原本在共振区的振动模式发生偏移，从而改变设备的振动响应。

此外，润滑油膜过薄可能会导致金属表面的局部接触，产生瞬时的高载荷，这些瞬态事件会以特定的频率成分出现在振动信号中，增加振动的复杂性和强度。相反，过厚的油膜可能导致轴承的阻尼减小，增加系统的自然振动，同样会加剧振动的幅度。

因此，对润滑油膜厚度的精确控制是确保齿轮箱稳定运行的关键。在实际应用中，可以通过调整润滑油的供给量和压力来优化油膜厚度，以达到最佳的润滑效果。同时，定期的润滑状态监测也是必不可少的，它可以帮助及时发现油膜厚度的异常变化，从而采取相应措施，避免振动问题的恶化。综上所述，润滑油膜厚度的变化对齿轮箱的振动频谱具有显著影响，是设备健康管理中不可忽视的重要因素。

（三）摩擦系数变化对轴承振动增大的机理分析

摩擦系数作为润滑状态的重要参数，其变化直接影响轴承的运行性能。在滑动轴承中，润滑油在轴颈与轴承座之间形成油膜，通过减小接触面间的直接摩擦来降低振动。当摩擦系数增大时，通常意味着油膜的稳定性下降，这可能是由于润滑油粘度下降、污染颗粒增多或者润滑油膜破裂等原因造成的。

油膜稳定性的降低导致轴颈与轴承座之间的直接接触增加，进而产生更大的摩擦阻力和热量。这种直接接触不仅加剧了轴承的磨损，还使得振动能量难以通过油膜的有效阻尼进行吸收和分散。^[5]因此，轴承的振动幅度会随之增大，甚至可能引发异常的振动模式。此外，摩擦系数的变化还可能影响轴承的动态刚度，进一步加剧振动的复杂性和不可预测性。为了维持轴承的稳定运行并减少振动，需要密切关注润滑油的品质、清洁度以及润滑系统的状态，确保摩擦系数保持在适宜的范围內。

（四）油质劣化对齿轮箱动态性能的恶化效应

油质劣化不仅导致摩擦系数增大和油膜稳定性降低，还可能引发一系列连锁反应，进一步恶化齿轮箱的动态性能。随着油质

的逐渐劣化，润滑油中的污染物颗粒增多，这些颗粒可能嵌入轴颈和轴承座的表面，形成磨粒磨损，进一步加剧了轴承的损坏。^[6]同时，油质的劣化还可能影响润滑油的粘温特性，使得润滑油在不同温度下的粘度变化更加剧烈，进而影响油膜的形成和稳定性。

此外，油质劣化还可能导致润滑系统中的过滤器堵塞、管道腐蚀等问题，影响润滑油的正常循环和供应。这些问题不仅会降低润滑效果，还可能引发润滑系统的故障，对齿轮箱的整体运行稳定性构成威胁。因此，定期检测润滑油的品质、及时更换劣化的润滑油以及保持润滑系统的清洁和畅通，对于维持齿轮箱的稳定运行和延长使用寿命具有重要意义。

三、润滑状态对齿轮箱噪声的影响

（一）润滑油老化对声学特性的直接影响

润滑油在齿轮箱的运行中起着至关重要的作用，其老化会直接影响到设备的声学特性。随着使用时间的增加，润滑油的化学稳定性下降，可能导致黏度变化、抗氧化性减弱，这些变化会显著影响润滑油的声阻尼性能。声阻尼性能的降低意味着润滑油吸收和消散振动能量的能力减弱，这会导致齿轮啮合和轴承运转时产生的机械振动更容易传播出去，进而增强了齿轮箱的噪声水平。^[7]此外，润滑油老化还可能引发油膜的不稳定，导致油膜在某些区域破裂，这种油膜的不连续性会加剧齿轮和轴承之间的直接接触，从而产生额外的噪声。

（二）不稳定供油引发的噪声源分析

在齿轮箱的运行过程中，润滑状态的稳定性至关重要，尤其是当供油不稳定时，会显著影响齿轮箱的噪声源。不稳定供油可能导致润滑油供应量的波动，如泵的脉动或油路阻塞，这些因素会使得润滑区域的油膜厚度发生不连续变化。例如，供油量瞬间减少可能导致轴承接触面的直接摩擦，瞬间增加的摩擦力会转化为机械振动，进而转化为可听见的噪声。^[8]此外，不稳定供油还可能引起油压的不稳定，导致油膜在某些时刻无法均匀覆盖轴承和齿轮表面。这种不均匀的润滑状态会加剧部件之间的摩擦和磨损，产生额外的振动和噪声。特别是在高负荷或高速运转的情况下，不稳定供油可能引发更为显著的噪声问题。因此，确保齿轮箱的稳定供油是减少噪声、维持设备正常运行的关键措施之一。

（三）润滑条件与噪声水平的关系

润滑条件是影响齿轮箱噪声水平的关键因素之一。当润滑油膜厚度不均或油质恶化时，会直接导致轴承摩擦系数增加，进而引发异常振动，这些振动会通过齿轮啮合传递并放大，最终表现为噪声的显著增强。此外，良好的润滑条件可以有效减少齿轮和轴承之间的金属直接接触，从而降低摩擦噪音。^[9]在实际应用中，通过合理选择和调整润滑油的类型和粘度，以及确保润滑系统的稳定运行，可以显著改善齿轮箱的噪声性能。同时，定期检测润滑油的质量和油膜厚度，及时发现并处理润滑不足或油质劣化的问题，也是保持齿轮箱低噪声运行的重要措施。因此，深入研究润滑条件与噪声水平的关系，对于优化齿轮箱设计、提高设备性

能和延长使用寿命具有重要意义。

（四）油膜破裂与噪声增强现象

油膜破裂是滑动轴承润滑状态恶化的一种典型表现，当油膜厚度因载荷变化、供油不足或油质恶化而无法保持稳定时，轴承内部的直接接触和摩擦将显著增加。这种情况可能导致局部温度急升，进一步破坏油膜的形成，形成恶性循环。油膜一旦破裂，原本由油膜隔开的金属表面将发生直接接触，这种金属间的摩擦不仅加剧了磨损，还引发了强烈的振动。这些振动在轴承和齿轮系统中传递，与齿轮啮合产生的振动相互作用，形成了更为复杂的振动模式。这些复杂的振动模式在齿轮箱内部多次反射和叠加，最终转化为高频噪声，显著提升了齿轮箱的噪声水平。因此，油膜破裂不仅是润滑状态恶化的标志，也是齿轮箱噪声异常增强的直接原因。为了避免这种情况，需要密切关注润滑系统的运行状态，确保油膜厚度稳定且油质良好，从而维持齿轮箱的低噪声运行。

四、影响因素与控制策略

（一）温度、压力和杂质对润滑状态的影响

温度是影响润滑油性能和油膜稳定性的关键因素之一。随着温度的升高，润滑油的粘度会降低，这可能导致油膜厚度减小，从而增加轴承内部金属表面的直接接触和摩擦。此外，高温还可能加速润滑油的氧化和老化过程，进一步恶化润滑状态。相反，在低温条件下，润滑油的流动性变差，也可能影响油膜的形成和稳定性。

压力对润滑状态的影响同样不容忽视。在高压环境下，轴承内部的油膜可能受到挤压而变薄，导致润滑效果减弱。此外，高压还可能引起润滑油的渗漏，从而减少轴承内部的油量，进一步加剧润滑不良的情况。

杂质的存在也是影响润滑状态的重要因素。润滑油中的杂质可能来自外部污染或内部磨损产生的金属颗粒。这些杂质不仅会磨损轴承表面，还可能堵塞润滑油的流动通道，影响油膜的均匀分布。因此，保持润滑油的清洁度对于维持良好的润滑状态至关重要。

（二）润滑系统优化与噪声控制方法

润滑系统优化是降低齿轮箱噪声的关键途径之一。通过对润

滑油的选择和供油系统的改进，可以显著改善润滑状态，从而减少噪声源。例如，采用具有优良抗氧化和抗磨性能的合成润滑油，可以保证在高温或高负荷条件下油膜的稳定性，降低因摩擦增加导致的异常噪声。此外，建立精确的供油控制策略也是至关重要的。^[10]通过引入智能传感器和数据分析技术，可以实时监测油压、油温和油质变化，确保润滑油在最佳条件下工作。

噪声控制方法还包括设计低噪声齿轮和轴承结构，以及应用噪声阻尼材料。优化齿轮的齿形和表面处理，可以减少啮合过程中的冲击和振动，从而降低噪声。同时，采用吸音材料包裹齿轮箱，可以有效吸收和衰减内部噪声的传播。

（三）预防性维护与润滑状态监测

预防性维护是确保齿轮箱长期稳定运行的关键措施。通过定期检查齿轮箱的各个部件，包括齿轮、轴承、密封件以及润滑系统，可以及时发现潜在的磨损或故障迹象，从而采取必要的维修或更换措施，避免突发故障导致的停机和生产损失。在维护过程中，特别要注意对润滑系统的检查，包括润滑油的清洁度、油位以及供油系统的运行状态，确保润滑系统始终处于最佳工作状态。

此外，润滑状态监测也是不可或缺的一环。通过安装传感器，实时监测齿轮箱内部的温度、压力以及振动等参数，可以准确评估润滑状态的变化趋势。一旦发现异常，如油温过高、油压波动或振动异常增大，应立即采取措施进行调整或维修，以防止问题进一步恶化。同时，利用数据分析技术，对监测数据进行深入挖掘和分析，还可以发现潜在的故障模式和发展趋势，为预防性维护提供更加精准的决策支持。

五、结语

综上所述，润滑状态对齿轮箱的振动及噪声水平具有显著影响。通过深入分析润滑状态与齿轮箱振动、噪声之间的关系，我们可以更好地理解齿轮箱的运行特性。为了确保齿轮箱的稳定运行，应加强对润滑状态的监测与管理，及时发现并解决潜在问题，从而延长设备寿命，提高生产效率。未来的研究可以进一步探索更加精准的润滑状态监测方法以及更加高效的维护策略，以应对日益复杂多变的工业环境。

参考文献

- [1] 陈兵, 孙建伟. 齿轮箱振动噪声的研究综述 [J]. 机电工程技术, 2020(12).
- [2] 徐新波. 齿轮箱体振动分析及减振降噪结构优化研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2021.
- [3] 朱才朝, 周少华, 张亚宾, 谭建军. 滑动轴承在风电齿轮箱中的应用现状与发展趋势 [J]. 风能, 2021(09).
- [4] 程晗. 齿轮箱振动噪声分析与控制技术研究进展 [J]. 机械科学与技术, 2020, 39(05): 705-714.
- [5] 刘睿. 滑动轴承润滑状态监测与故障诊断 [J]. 润滑与密封, 2021, 44(08): 117-123.
- [6] 李晓霞. 润滑油性能对齿轮箱振动及噪声的影响 [J]. 石油炼制与化工, 2021, 49(10): 65-70.
- [7] 夏志勇. 齿轮箱噪声源识别与控制策略研究 [D]. 重庆大学, 2022.
- [8] 赵海燕. 摩擦学原理在齿轮箱润滑状态分析中的应用 [J]. 摩擦学学报, 2021, 36(04).
- [9] 周明. 齿轮箱动态性能分析与润滑状态优化 [J]. 中国机械工程, 2021, 26(20).
- [10] 刘晓伟. 润滑系统设计与齿轮箱噪声控制 [J]. 润滑与密封, 2020, 39(07).