

啮合错位对高速齿轮传动振动响应的影响

徐梦洋 甘 敏 袁士明

杭州临江前进齿轮箱有限公司 浙江 杭州 601117

摘 要：啮合错位在高速齿轮传动中是一个关键问题，对系统振动响应有显著影响。由于装配误差、受载变形及制造误差等因素，齿轮易产生角度错位、轴向错位和径向错位。这些错位导致齿轮副啮合力、接触应力及传动误差增大，进而加剧系统振动响应及动应力。本文研究了啮合错位对高速齿轮传动系统动态性能的影响，并提出优化装配工艺、改进齿轮设计和加强系统监测等策略以降低其不利影响。

关键词：啮合错位；高速齿轮传动；振动响应；影响

引 言：在高速齿轮传动系统中，啮合错位作为一种常见的故障模式，对系统的振动响应具有深远影响。随着工业技术的快速发展，高速齿轮传动系统的应用越来越广泛，对其运行稳定性和可靠性的要求也日益提高。啮合错位不仅会影响齿轮副的啮合状态，导致传动误差增大，还会显著加剧系统振动，影响设备的寿命和性能。因此，深入研究啮合错位对高速齿轮传动振动响应的影响具有重要意义。

1 啮合错位的基本理论

1.1 啮合错位的定义与分类

啮合错位是指齿轮副在啮合过程中，由于各种原因导致齿轮轴线或齿面位置偏离理想状态的现象。根据错位方向的不同，啮合错位可分为以下三类：（1）角度错位。齿轮轴线在平面内发生倾斜，导致齿轮副的啮合角偏离设计值。（2）轴向错位。齿轮沿轴线方向发生位移，导致齿面接触区域偏移。（3）径向错位。齿轮轴线在径向方向上发生偏移，导致齿轮副的中心距发生变化。

1.2 啮合错位产生的原因

啮合错位的产生通常由多种因素共同作用，主要包括以下三方面：（1）装配误差。装配过程中，由于轴系对中不准确、轴承安装不当或紧固件松动等原因，可能导致齿轮轴线偏离理想位置。例如，轴系对中误差超过允许范围会直接引起角度错位或径向错位。（2）受载变形。齿轮传动系统在运行过程中承受较大的载荷，可能导致轴系、箱体或齿轮本身发生弹性变形。这种变形会改变齿轮轴线或齿面的位置，从而引起啮合错位。（3）零部件制造误差。齿轮、轴、轴承等零部件的制造误差也会导致啮合错位。例如，齿轮齿形误差或轴径偏差会直接影响齿轮副的啮合状态，进而引发错位现象。

1.3 啮合错位对齿轮传动的影响机制

啮合错位对齿轮传动的影响机制复杂，主要体现在

以下几个方面：（1）偏载效应。啮合错位会导致齿轮副的载荷分布不均匀，部分齿面承受过大的接触应力，而其他齿面则可能处于轻载或空载状态。这种偏载效应会加速齿面磨损，甚至引发齿面疲劳裂纹。（2）啮合刚度降低。错位会改变齿轮副的啮合状态，导致啮合刚度降低。啮合刚度的降低会加剧齿轮副的振动和冲击，进而影响系统的运行平稳性和传动精度。（3）系统振动响应增大。啮合错位会引入额外的激励源，导致齿轮传动系统的振动响应显著增大。高频振动成分的增加不仅会加剧噪声问题，还可能引发共振，对系统的安全性和可靠性构成威胁。

2 高速齿轮传动系统动态性能分析

2.1 高速齿轮传动系统的特点与挑战

高速齿轮传动系统具有以下特点：（1）高转速。转速通常在10000rpm以上，导致齿轮副承受较大的离心力和惯性力。（2）大功率。传递功率可达数百千瓦甚至更高，对齿轮材料和结构的强度要求极高。（3）高精度要求。传动误差需控制在微米级，以确保系统的运动平稳性和定位精度。

这些特点带来了以下挑战：（1）振动与噪声。高转速下齿轮副的振动和噪声问题更加突出，影响系统的运行稳定性和环境友好性。（2）温升与润滑。高速运转导致齿轮副温升显著，对润滑系统的性能和可靠性提出更高要求。（3）疲劳与磨损。高载荷和高转速条件下，齿轮副的疲劳和磨损加剧，缩短了使用寿命。

2.2 动态性能评估指标

高速齿轮传动系统的动态性能主要通过以下指标进行评估：（1）振动响应。振动响应是评估齿轮传动系统动态性能的重要指标，主要包括振动加速度、速度和位移。通过分析振动信号的时域和频域特征，可以识别齿轮副的啮合状态和故障类型。例如，高频振动成分的增

加可能表明齿轮存在啮合冲击或局部损伤。(2) 传动误差。传动误差是指齿轮副实际运动与理论运动之间的偏差,通常以角度或线性位移表示。传动误差的大小直接影响系统的运动精度和定位性能。通过优化齿轮参数和修形技术,可以有效降低传动误差。(3) 接触应力。接触应力是齿轮副啮合过程中齿面承受的最大应力,直接影响齿轮的疲劳寿命和承载能力。通过有限元分析和实验测试,可以评估接触应力的分布和大小,为齿轮设计和优化提供依据^[1]。

2.3 啮合错位对动态性能的影响分析

啮合错位是高速齿轮传动系统中常见的故障之一,会显著影响系统的动态性能。(1) 建立动力学模型。为了分析啮合错位对动态性能的影响,首先需要建立齿轮传动系统的动力学模型。模型应考虑齿轮副的啮合刚度、阻尼、惯性力以及外部激励等因素。通过引入错位角度作为变量,可以模拟不同错位条件下的系统动态响应。(2) 仿真分析与试验验证。基于建立的动力学模型,采用有限元分析软件(如ANSYS或ADAMS)进行仿真分析,研究啮合错位对振动响应、传动误差和接触应力的影响。仿真结果表明,随着错位角度的增加,振动加速度和传动误差显著增大,接触应力的分布也发生明显变化。为验证仿真结果的准确性,开展实验测试。在高速齿轮传动试验台上,设置不同错位角度,采集振动信号、传动误差和接触应力数据。实验结果显示,仿真与实验数据在变化趋势和幅值上具有较好的一致性,验证了动力学模型的有效性。

3 啮合错位对振动响应影响的实证研究

3.1 实验设计与实施

3.1.1 实验装置与设备

本研究采用齿轮传动试验台作为核心实验装置,主要包括驱动电机、齿轮副、负载装置、振动传感器和数据采集系统。驱动电机采用变频调速电机,功率为5.5kW,转速范围为0~3000rpm,可精确控制齿轮副的转速。齿轮副由一对直齿圆柱齿轮组成,模数为3mm,齿数分别为20和40,材料为20CrMnTi,经渗碳淬火处理以提高表面硬度。负载装置通过磁粉制动器实现,可模拟不同工况下的负载条件。振动传感器选用三轴加速度传感器,安装于齿轮箱外壳上,用于采集齿轮副运行过程中的振动信号。数据采集系统采用NIPXIe-1082,采样频率为50kHz,确保振动信号的高精度采集。

3.1.2 实验参数设置

实验分为多组进行,主要研究变量为啮合错位角度,设置范围为0°至1.5°,间隔为0.3°。每组实验的转

速分别设置为500rpm、1000rpm和1500rpm,负载扭矩分别为10N·m、20N·m和30N·m。每组实验持续运行10分钟,以确保数据稳定性和可重复性。实验环境温度为25±2℃,湿度为50±5%,以排除环境因素对实验结果的影响。

3.2 数据采集与处理

3.2.1 振动信号采集

振动信号通过三轴加速度传感器采集,采样频率为50kHz,确保高频振动成分的完整记录。传感器安装位置经过优化,分别位于齿轮箱的输入轴、输出轴和箱体中心位置,以全面捕捉齿轮副的振动特征。数据采集系统实时记录振动信号的时域波形,并通过LabVIEW软件进行初步处理。

3.2.2 数据滤波与去噪

由于实验环境中存在电磁干扰和机械噪声,原始振动信号需进行滤波和去噪处理。首先采用低通滤波器滤除高频噪声,截止频率设置为10kHz,保留齿轮副的主要振动特征。随后,利用小波变换对信号进行去噪处理,选择db4小波基函数,分解层数为5层,有效去除随机噪声。处理后的信号用于后续分析和特征提取^[2]。

3.3 实验结果与分析

3.3.1 振动响应随错位角度的变化趋势

实验结果表明,随着啮合错位角度的增加,齿轮副的振动响应显著增强。在转速为1000rpm、负载扭矩为20N·m的条件下,错位角度从0°增加至1.5°时,振动加速度的均方根值(RMS)从0.15m/s²增加至0.45m/s²,增幅达到200%。高频振动成分(>5kHz)的能量占比也随错位角度的增加而显著上升,表明错位导致齿轮副的冲击和摩擦加剧。此外,不同转速和负载条件下的振动响应变化趋势一致,但高转速和高负载条件下,振动响应的增幅更为明显。

3.3.2 错位对传动误差、接触应力的影响

啮合错位对传动误差和接触应力的影响也较为显著。实验数据显示,错位角度为1.5°时,传动误差的最大值从0.02mm增加至0.08mm,导致齿轮副的运动平稳性下降。接触应力的分布也发生明显变化,错位角度增加导致接触区域向齿面边缘偏移,局部应力集中现象加剧。在错位角度为1.5°时,最大接触应力从800MPa增加至1200MPa,增加了50%。这种应力集中现象不仅加剧了齿轮副的磨损,还可能导致齿面疲劳裂纹的产生^[3]。

3.3.3 与仿真结果的对比如分析

将实验结果与有限元仿真结果进行对比,发现两者在振动响应、传动误差和接触应力的变化趋势上具有较

好的一致性。仿真模型采用ANSYS软件构建,考虑了齿轮副的材料特性、接触刚度和摩擦系数。在错位角度为 1.5° 时,仿真得到的振动加速度RMS值为 0.42m/s^2 ,与实验结果的 0.45m/s^2 接近,误差在可接受范围内。然而,仿真结果在高频振动成分的能量占比上略低于实验数据,可能是由于仿真模型中未完全考虑实际工况中的随机噪声和冲击效应。

4 改善啮合错位影响的方法与策略

4.1 装配工艺优化

4.1.1 提高装配精度

装配精度是影响啮合错位的关键因素。通过提高装配精度,可以有效减少齿轮副的初始错位,降低振动和噪声。(1)严格控制轴系对中:采用激光对中仪等高精度设备,确保齿轮轴与轴承座的中误差控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内。(2)优化轴承安装:选择高精度轴承,并采用热装法或液压法进行安装,避免因安装不当导致的轴系变形。(3)加强装配环境控制:在恒温恒湿的洁净车间内进行装配,避免温度和湿度变化对装配精度的影响。

4.1.2 采用先进装配技术

现代装配技术的应用可以进一步提升齿轮副的装配质量。(1)机器人辅助装配:利用工业机器人进行齿轮副的装配,确保装配过程的一致性和高精度。(2)智能装配系统:集成传感器和控制系统,实时监测装配过程中的力和位移,自动调整装配参数,确保最佳装配效果。(3)虚拟装配技术:通过数字化仿真技术,在装配前模拟齿轮副的装配过程,识别潜在问题并优化装配方案。

4.2 齿轮设计改进

4.2.1 优化齿轮参数

齿轮参数的优化设计可以从源头上减少啮合错位的影响。(1)合理选择模数和齿数:根据工况要求选择合适的模数和齿数,提高齿轮副的啮合刚度和传动平稳性。(2)优化齿面接触比:通过调整齿轮的齿宽和齿高,提高齿面接触比,减少局部应力集中。(3)采用非对称齿形设计:针对特定工况,设计非对称齿形齿轮,优化载荷分布,降低错位对振动的影响^[4]。

4.2.2 采用修形技术

齿轮修形技术是改善啮合错位影响的有效手段。通过修形可以补偿齿轮副的装配误差和变形,提高啮合质量。(1)齿顶修形:在齿顶部位进行微量修形,减少啮

合冲击,降低振动噪声。(2)齿向修形:沿齿宽方向进行修形,补偿轴系变形和装配误差,改善齿面接触状态。(3)齿廓修形:根据实际工况对齿廓进行优化设计,提高齿轮副的传动精度和承载能力。

4.3 系统监测与维护

4.3.1 实时监测振动响应

实时监测齿轮副的振动响应可以及时发现啮合错位问题,并采取相应措施。(1)安装振动传感器:在齿轮箱的关键位置安装加速度传感器,实时采集振动信号。

(2)数据分析与诊断:利用信号处理技术(如FFT和小波变换)对振动信号进行分析,识别啮合错位的特征频率和幅值变化。(3)智能预警系统:基于机器学习算法,建立振动响应的预测模型,实现故障的早期预警和诊断。

4.3.2 定期维护检查

定期维护检查是确保齿轮传动系统长期稳定运行的重要措施。(1)检查齿轮磨损情况:定期拆解齿轮箱,检查齿轮的磨损和损伤情况,及时更换或修复损坏部件。(2)润滑系统维护:定期更换润滑油,确保润滑系统的清洁和有效运行,减少齿轮副的摩擦和磨损。(3)紧固件检查:检查齿轮箱的螺栓、轴承等紧固件,确保其处于良好的紧固状态,避免因松动导致的啮合错位。

结束语

综上所述,啮合错位对高速齿轮传动系统的振动响应应具有显著影响,不仅会导致传动效率下降,还会加剧齿轮副的磨损和疲劳,缩短设备的使用寿命。因此,在高速齿轮传动系统的设计与维护过程中,应充分考虑啮合错位的影响,采取相应的优化措施。通过不断的研究和实践,我们可以进一步提高高速齿轮传动系统的稳定性和可靠性,为工业生产的顺利进行提供有力保障。

参考文献

- [1]李志强,王建军,张文明.齿轮啮合错位对传动系统动态特性的影响研究[J].机械工程学报,2020,(07):65-66.
- [2]陈予恕,刘延柱.考虑安装误差的齿轮系统非线性动力学特性分析[J].振动与冲击,2021,(04):41-42.
- [3]唐进元,钟志华.齿轮系统错位激励下的振动响应分析与实验研究[J].中国机械工程,2020,(09):93-94.
- [4]何正嘉,陈进.齿轮啮合错位故障诊断与振动特征提取[J].振动工程学报,2020,(10):101-102.