

高速齿轮箱动静件摩擦故障的诊断与处理

何俞霖¹ 贾俊豪² 丁树猛²

1. 杭州前进齿轮箱集团股份有限公司 浙江 杭州 310000

2. 杭州临江前进齿轮箱有限公司 浙江 杭州 310000

摘要: 高速齿轮箱动静件摩擦故障成因涵盖设计制造、装配、运行工况及润滑系统等方面。诊断技术包括信号采集、特征提取、识别定位。处理策略有应急处理、针对性修复及排除验证。预防保障措施包括优化设计与制造、强化运维管理、构建状态监测体系。通过这些措施可实现故障的精准诊断、有效处理与预防,保障设备稳定运行。

关键词: 高速齿轮箱; 动静件摩擦; 故障诊断; 处理策略

引言: 高速齿轮箱作为机械传动系统的核心部件,其运行稳定性直接关乎整体设备效能与安全性。然而,受设计与制造偏差、装配精度不足、运行工况劣化及润滑系统失效等多因素影响,动静件摩擦故障频发,引发局部磨损、振动异常甚至设备停机。精准诊断故障成因、高效处理故障并构建预防保障体系,成为提升齿轮箱可靠性的关键。本文系统剖析高速齿轮箱动静件摩擦故障的成因机制,阐述故障诊断中的信号采集、特征提取及识别定位技术,提出应急处理、针对性修复及验证策略,并从设计优化、运维管理及状态监测三方面构建预防保障体系。

1 高速齿轮箱动静件摩擦故障成因分析

高速齿轮箱动静件摩擦故障由多因素共同作用引发,明确成因对故障诊断与处理至关重要,主要涵盖设计与制造偏差、装配精度不足、运行工况劣化及润滑系统失效四类。(1)设计与制造偏差方面,动静件配合参数设计不合理,如间隙过小,高速运行时零件热膨胀致间隙消失引发摩擦;间隙过大则使零件振动加剧,长期运行局部磨损不均诱发故障。零件加工精度不达标,尺寸误差、形位公差超标,如齿轮齿面瓢曲、轴类零件弯曲,导致动静件接触面积异常、局部应力集中,加速磨损与摩擦。(2)装配精度不足是关键人为因素。轴承安装间隙调整不当、齿轮啮合中心距偏差大、轴系对中精度不达标,会使高速运行时动静件运动轨迹偏移,产生异常接触摩擦。装配残留杂质未彻底清除,运行中嵌入间隙,破坏配合面完整性,引发局部摩擦。(3)运行工况劣化中,长期过载运行使零件载荷超极限,致轴弯曲变形、齿轮齿面磨损,改变配合间隙引发摩擦;转速频繁波动加剧冲击载荷,破坏润滑膜稳定性;高温、高湿、多粉尘环境加速零件腐蚀、磨损,降低材料性能,间接诱发故障。(4)润滑系统失效是直接因素。润滑油

脂选型不当、老化变质、管路堵塞或泄漏,使配合面无法形成稳定润滑膜,产生干摩擦或边界摩擦。润滑系统混入污染物,破坏润滑效果,加剧磨损,最终引发摩擦故障^[1]。

2 高速齿轮箱动静件摩擦故障诊断技术

2.1 故障信号采集技术

故障信号采集是诊断工作的基础,需针对高速齿轮箱动静件摩擦故障的信号特征,选取合适的信号类型与采集设备,确保信号的完整性与有效性。常用的采集信号包括振动信号、温度信号、声学信号及油液分析信号。(1)振动信号采集采用加速度传感器,通过粘贴或磁吸方式固定在齿轮箱箱体、轴承座等关键部位,采集不同方向(径向、轴向、垂直方向)的振动数据。动静件摩擦会引发特征频率的振动信号,通过高速数据采集仪记录振动信号的时域与频域信息,为后续分析提供数据支撑。温度信号采集采用红外测温仪或内置温度传感器,实时监测齿轮箱箱体、轴承、润滑油等关键部位的温度变化,摩擦故障会导致局部温度异常升高,温度信号可作为故障预警的重要指标。(2)声学信号采集采用声传感器或麦克风,捕捉齿轮箱运行过程中的噪声信号。正常运行时齿轮箱噪声平稳,动静件摩擦会产生不规则的异常噪声,通过采集声学信号并进行频谱分析,可辅助判断故障是否存在。油液分析信号通过采集润滑油样本,利用光谱分析、铁谱分析等技术,检测油液中金属磨粒的含量、尺寸及形态,动静件摩擦会导致磨粒含量显著增加,且磨粒形态具有明显的摩擦特征,可实现故障的早期预警。

2.2 故障特征提取方法

故障特征提取是从采集的原始信号中分离出与摩擦故障相关的特征信息,消除背景噪声干扰,为故障识别提供可靠依据。常用的特征提取方法包括时域分析、频

域分析及时频域联合分析。(1)时域分析主要针对振动信号与温度信号,通过计算信号的峰值、有效值、峭度、峰值因子、温度变化率等指标,判断信号的异常程度。动静件摩擦故障发生时,振动信号的峰值与峭度会显著增大,温度信号的变化率会明显提升,通过时域指标的阈值判断,可实现故障的初步筛查。频域分析通过傅里叶变换将时域信号转换为频域信号,提取特征频率成分。动静件摩擦会产生特定的频率峰值,如齿轮啮合频率的边频带、轴承特征频率的异常谐波等,通过频域分析可精准捕捉这些特征频率,实现故障的初步定位。

(2)时频域联合分析(如小波变换、短时傅里叶变换)适用于非平稳信号的特征提取,可同时反映信号的时域与频域信息。高速齿轮箱运行过程中,摩擦故障信号多为非平稳信号,传统时域与频域分析易丢失关键信息,通过小波变换可将信号分解为不同尺度的分量,提取不同频段的故障特征,有效区分摩擦故障与其他故障(如齿轮断齿、轴承剥落)的信号差异,提升特征提取的准确性。

2.3 故障识别与定位技术

故障识别与定位是诊断工作的核心,通过整合提取的故障特征,结合故障模式库,实现故障类型的判断与故障位置的精准定位。常用的技术方法包括基于规则的识别方法、机器学习识别方法及多源信息融合定位方法。(1)基于规则的识别方法通过构建故障特征与故障类型的对应规则库,将提取的特征指标与规则库进行匹配,实现故障识别。例如,当振动信号中出现特定摩擦特征频率、温度超过阈值且油液中磨粒含量显著增加时,可判定为动静件摩擦故障。该方法操作简单、响应速度快,适用于简单工况下的故障识别。机器学习识别方法通过训练神经网络、支持向量机等模型,利用大量故障样本数据优化模型参数,实现故障特征的自动识别与分类。该方法具有较强的泛化能力,可有效处理多故障耦合场景下的识别问题,提升识别准确率。(2)故障定位通过多源信息融合技术实现,结合不同传感器采集的信号特征(如不同部位的振动信号、温度分布),利用数据融合算法整合各维度信息,判断故障发生的具体位置。例如,通过对比齿轮箱输入端、输出端及中间轴部位的振动特征频率,可确定摩擦故障发生的轴系位置;结合温度分布数据,可进一步精准定位到具体的轴承或齿轮副。同时,通过故障严重程度评估模型,基于特征指标的量化值,可判断故障处于早期、中期还是晚期,为后续处理策略的制定提供依据^[2]。

3 高速齿轮箱动静件摩擦故障处理策略

3.1 应急处理措施

应急处理的核心目标是阻止故障进一步恶化,保障设备及人员安全,主要适用于故障早期或突发故障场景。(1)当通过诊断发现动静件摩擦故障早期特征时,应立即采取降载、降速运行措施,减少动静件间的冲击载荷与相对摩擦速度,降低故障发展速度。同时,加强对温度、振动等信号的实时监测,密切关注故障发展趋势。(2)若故障发展较快,出现温度急剧升高、振动异常剧烈等情况,应立即停机,避免故障扩大引发二次损伤。停机后,对齿轮箱进行初步检查,清除表面杂质,检查润滑系统是否存在泄漏、堵塞等问题,若发现润滑失效,应及时更换润滑油脂、清理润滑管路。对于因异物进入引发的轻微摩擦故障,可通过清理异物、检查配合面磨损情况,采取临时处理措施后恢复运行,并持续监测故障是否复发。

3.2 针对性修复技术

针对性修复技术根据故障成因与故障位置,采用精准的修复手段恢复零件性能与动静件配合精度,主要包括机械加工修复、表面强化修复及零件更换三种方式。(1)对于因配合间隙过小、零件轻微变形引发的摩擦故障,可采用机械加工修复技术,通过研磨、磨削等方式修正零件尺寸与形位公差,调整动静件配合间隙至设计范围。例如,对磨损的轴套进行磨削加工,恢复其内径尺寸,确保与轴的配合精度;对轻微弯曲的轴类零件进行校直处理,消除变形影响。(2)对于零件表面磨损、划痕等局部损伤,可采用表面强化修复技术,如激光熔覆、等离子喷涂、电镀等,在零件表面形成耐磨、耐腐蚀的涂层,恢复配合面完整性与表面硬度。例如,对齿轮齿面的摩擦划痕采用激光熔覆技术修复,确保齿面精度与承载能力。对于磨损严重、无法修复的零件(如齿轮断齿、轴承滚珠破损),应采用零件更换方式,更换符合设计要求的新零件,确保装配后动静件配合精度达标。更换过程中,需严格遵循装配工艺要求,避免因装配不当再次引发摩擦故障。

3.3 故障排除验证技术

故障排除验证是确保处理效果的关键环节,通过一系列测试手段验证故障是否彻底排除,设备运行状态是否恢复正常。验证内容主要包括静态检测与动态试运行检测。(1)静态检测通过测量动静件配合间隙、轴系对中精度、零件尺寸精度等指标,判断修复后设备的静态性能是否符合设计要求。例如,采用塞尺测量轴承间隙,利用激光对中仪检测轴系对中情况,确保各静态指标达标。(2)动态试运行检测通过模拟设备正常运行

工况,采集振动、温度、声学、油液等信号,与正常运行状态下的信号基准值进行对比,判断故障是否彻底排除。试运行过程中,逐步提升转速与载荷,分阶段监测信号变化,若各信号指标均稳定在正常范围内,且无异常摩擦噪声、温度异常升高等现象,说明故障已彻底排除。若试运行过程中发现信号异常,需重新分析故障原因,调整处理方案,直至验证合格。

4 高速齿轮箱动静件摩擦故障预防保障措施

4.1 设计与制造优化措施

设计阶段应优化动静件配合参数,结合高速运行工况下的热膨胀系数,合理确定配合间隙,避免因热膨胀导致间隙消失。同时,选用高强度、耐磨、耐高温的材料(如高强度合金钢、陶瓷涂层材料)制作关键动静件,提升零件抗磨损能力。优化齿轮齿形、轴承结构等设计,降低运行过程中的冲击载荷与摩擦损耗。制造阶段应提升零件加工精度,严格控制尺寸误差与形位公差,确保动静件配合面的平整度与光洁度。加强制造过程中的质量检测,采用精密测量仪器(如三坐标测量仪)对零件关键尺寸进行检测,避免不合格零件流入装配环节。同时,优化装配工艺,制定标准化的装配流程,明确各装配环节的精度要求与检测方法,确保装配质量^[3]。

4.2 运维管理强化措施

运维管理强化的核心是规范日常运维流程,及时发现并处理潜在隐患。建立完善的润滑管理体系,根据设备运行工况选用合适的润滑油脂,制定定期换油计划,定期检查润滑系统的运行状态,确保润滑管路通畅、无泄漏,避免润滑失效。加强设备日常巡检,定期清理齿轮箱表面及周边环境的杂质、粉尘,避免异物进入设备内部。规范设备运行工况,避免长期过载、转速频繁波动等恶劣运行状态,根据设备设计要求设定运行参数上限,防止因工况劣化引发摩擦故障。建立设备运维档案,记录设备运行时间、维护内容、故障处理情况等信息,为后续运维决策提供数据支撑。定期对设备进行解

体检查,及时发现并处理早期磨损、变形等潜在隐患。

4.3 状态监测体系构建措施

构建全生命周期状态监测体系,实现设备运行状态的实时监控与早期预警。合理布置传感器位置,在齿轮箱关键部位(如轴承座、箱体、轴端)安装振动、温度传感器,在润滑系统设置油液监测传感器,实现多维度信号的实时采集。搭建远程监测平台,将采集的信号实时传输至监控中心,通过数据处理与分析算法,实现故障特征的自动识别与预警。建立故障预警阈值体系,根据设备正常运行状态下的信号特征,设定各监测指标的预警阈值与报警阈值,当信号指标超出预警阈值时,及时发出预警提示,提醒运维人员排查潜在隐患;当超出报警阈值时,自动触发停机保护机制,避免故障扩大。定期对监测体系进行校准与维护,确保传感器精度与数据传输可靠性,提升预警的准确性与及时性。

结束语

高速齿轮箱动静件摩擦故障的成因复杂多样,涵盖设计、制造、装配、运行及润滑等多方面。诊断上,需综合运用信号采集、特征提取、识别定位等技术精准判断故障。处理时,应急措施防恶化,针对性修复恢复性能,验证确保效果。预防上,从设计制造优化、运维管理强化到状态监测体系构建,多管齐下。只有全面、系统地把控故障成因,精准诊断与处理,并落实预防保障措施,才能有效降低高速齿轮箱动静件摩擦故障发生率,保障设备稳定可靠运行,提升工业生产效率与安全性,推动相关行业高质量发展。

参考文献

- [1]樊明渊,毕崇伟,赵宇,等.基于振动监测系统的风机齿轮箱故障诊断案例分析[J].现代制造技术与装备,2025,61(08):127-129.
- [2]杜石存,刘怀柏,王猛.基于先进算法的风电场风机齿轮箱故障检测研究[J].电力设备管理,2025,(13):155-157.
- [3]胡元坤,郭盼盼.一种风机齿轮箱故障智能诊断方法[J].中国新技术新产品,2024,(13):62-64.