

工业齿轮箱断齿故障模拟试验及振动特征提取方法验证

魏凯

南京高精齿轮集团有限公司，江苏南京

DOI:10.62836/gse.v3i2.1276

摘要：工业齿轮箱是重载传动设备的核心部件，断齿是其最具破坏性的常见故障之一，准确提取断齿故障的振动特征是实现早期故障诊断的关键。本文首先分析了断齿故障的产生机理，明确了断齿位置、工况参数对齿轮箱振动响应的影响规律，在此基础上搭建了多工况断齿故障模拟试验平台，设计了不同工况下的断齿故障模拟试验方案，提出了融合时频分析与深度学习的断齿故障振动特征提取方法，通过对比试验验证了该方法的准确率与稳定性。

关键词：工业齿轮箱；断齿故障；故障模拟；振动特征提取

Simulation Test for Tooth Breakage Failure in Industrial Gearboxes and Verification of Vibration Characteristic Extraction Methods

Kai Wei

Nanjing High-Precision Gear Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu

Abstract: Industrial gearboxes are core components of heavy-duty transmission systems, where tooth breakage ranks among the most destructive common failures. Accurate extraction of vibration characteristics associated with tooth breakage is crucial for early fault diagnosis. This paper first analyzes the mechanisms underlying tooth breakage failures and elucidates how tooth position and operating parameters influence gearbox vibration responses. Building on these findings, a multi-condition simulation platform for tooth breakage failure testing was developed, along with tailored experimental protocols under various operating conditions. A vibration feature extraction method integrating time-frequency analysis and deep learning was proposed, whose accuracy and stability were validated through comparative experiments.

Keywords: industrial gearbox; tooth breakage fault; fault simulation; vibration characteristic extraction

1 工业齿轮箱断齿故障机理分析

1.1 齿轮啮合动力学模型构建与断齿受力分析

首先基于齿轮啮合的基本原理,结合工业齿轮箱实际传动参数,建立包含齿侧间隙、啮合刚度的齿轮啮合动力学模型,明确模型中各构件的运动方程与约束条件。在此基础上,引入断齿故障对齿轮啮合周期、啮合刚度的影响,将断齿导致的齿廓缺失等效为啮合刚度突变项,推导断齿状态下齿轮副的啮合受力变化规律,分析断齿截面的应力分布特征,明确断齿故障发生后,齿轮啮合过程中冲击力的产生机制与变化规律。

1.2 断齿位置对齿轮箱传动系统振动响应的影响机制

分别针对断齿位于齿轮齿根、齿中以及齿顶三种不同位置的情况,分析断齿引入的啮合刚度突变程度和冲击作用强度的差异,结合齿轮啮合动力学模型计算不同断齿位置下传动系统的振动响应输出,明确断齿位置与振动响应中冲击成分的幅值、出现频率之间的对应关系,阐明断齿位置通过改变啮合冲击力进而影响传动系统整体振动特性的作用机制。

1.3 不同载荷、转速下断齿故障的振动响应规律推导

分析齿轮传动过程中,输入载荷、工作转速对啮合刚度突变程度以及啮合冲击力大小的影响,结合齿轮啮合动力学模型分别计算不同载荷、不同转速条件下断齿齿轮的传动误差与振动响应输出,总结载荷、转速变化对断齿故障特征表现强度的影响规律,明确不同工况下断齿振动响应中故障特征的变化趋势。

2 断齿故障模拟试验平台与方案设计

2.1 试验用工业齿轮箱试件参数与人工断齿制备方案

选定常见工业闭式齿轮箱作为试验对象,记录试件的齿轮模数、齿数、压力角、齿宽、材料硬度

以及齿轮箱传动比、箱体结构尺寸等基础参数,保证试件参数符合工业实际应用场景。依据研究需求制备不同位置断齿的故障试件:分别在同一型号齿轮的齿根、齿中和齿顶位置通过线切割方式加工出全齿宽断齿缺陷,对断齿加工位置和断口尺寸进行精度检测,保证故障制备符合预设要求,同时保留完整的正常齿轮试件作为试验对照,确保后续试验对比的变量唯一性。

考虑到实际工业场景中断齿缺陷也存在断裂程度不同的情况,除上述不同位置全齿宽断齿外,可同步制备同位置下不同断裂深度的半齿宽断齿试件,丰富试验故障类型,覆盖更多实际断齿故障场景。制备完成后,将所有故障齿轮与正常齿轮分别完成装配,装配过程严格控制齿轮安装中心距、轴承游隙等装配精度参数,避免装配误差对后续试验结果产生干扰,保证每次试验仅存在断齿位置、断齿程度这两类预设变量差异。装配完成后标记所有试件的断齿位置与故障类型,便于试验过程中快速更换试件,减少试验操作带来的额外误差,为后续不同工况下的断齿故障模拟试验提供标准化的故障样本基础[1]。

2.2 试验台传感器布置与多通道振动信号采集系统搭建

本试验选择加速度传感器采集齿轮箱传动过程中的振动信号,这类传感器灵敏度高、频率响应范围宽,适合捕捉齿轮断齿故障引发的高频冲击振动,满足试验对故障细节信号的采集需求。根据齿轮箱振动机理,断齿产生的啮合冲击会沿传动链通过轴承座传递到齿轮箱箱体,因此将传感器布置在箱体不同位置的轴承座处,能够更直接获取故障相关振动信号,避免传动路径延长带来的信号衰减。具体布置方案为:在齿轮箱高速轴、低速轴的输入端和输出端轴承座外表面,分别安装一个压电式加速度传感器,共布置4个采集通道,实现传动系统不同位置振动信号的同步采集,保证能够全方位捕捉不同位置断齿产生的振动响应。传感器安装时采用磁力座固定方式,既保证安装牢固,又能够快速调整安装位置,适配不同试件更换后的采集需求,

同时在传感器与安装面之间涂抹少量耦合剂，减小接触阻抗对信号传递的影响，提升采集信号的稳定性与准确性。多通道振动信号采集系统由加速度传感器、信号调理器、数据采集卡和上位机构成，传感器采集到的原始模拟振动信号先经过信号调理器完成放大与滤波处理，再传输至数据采集卡转换为数字信号，最终传入上位机进行存储。采集前根据齿轮箱传动的最高啮合频率设定采样参数，设置采样频率为，单次采样时长为，保证能够完整包含齿轮多个旋转周期的振动信号，避免出现频率混叠问题，同时对多通道采集进行同步触发设置，保证所有通道信号采集的时间同步性，为后续多源振动信号的联合分析提供准确数据基础。

2.3 不同工况下断齿故障模拟试验流程设计

本次试验设置多种载荷与转速组合工况，分别对正常齿轮箱和预设断齿故障的齿轮箱开展重复测试，保证试验数据具有统计可靠性。正式试验开始前，先对试验台进行空载预运行，检查电机转动、齿轮传动是否存在异常异响，确认传感器信号输出正常，各设备连接稳定无松动，排除试验准备阶段的装配误差与设备故障。完成预运行检查后，首先设置电机至最低试验转速，待传动系统运行稳定后，按照预先设定的参数启动多通道数据采集，完成当前工况下的信号采集存储后，保持转速不变，逐级调整加载装置的载荷大小，每调整一次载荷并稳定运行分钟后，重复采集流程，直至完成当前转速下所有载荷工况的数据采集。随后调整电机至下一级试验转速，重复上述载荷调整与信号采集步骤，直至覆盖所有预设的转速与载荷组合工况。完成断齿故障齿轮箱的所有工况测试后，更换为同参数的正常无故障齿轮箱试件，保持传感器安装位置、采集参数完全不变，重复上述全部工况的试验流程，获取正常状态下的振动信号作为对比基准。每一组工况试验完成后，及时检查存储数据的完整性，对信号异常的测试组进行补测，避免因设备干扰造成数据缺失，最终整理得到不同状态、不同工况下的多组振动样本数据，为后续断齿故障特征提取方法的验证提供完备的试验数据支撑[2]。

3 面向断齿故障的振动特征提取方法设计

3.1 原始振动信号的降噪预处理方法设计

受齿轮箱内部传动组件耦合振动、采集电路电磁干扰以及现场环境噪声影响，试验采集得到的原始振动信号中往往混有大量无关噪声，故障特征信息容易被噪声掩盖，难以直接用于故障特征提取，因此需要首先对原始信号进行降噪预处理。针对振动信号中非平稳噪声与故障冲击特征混叠的特点，采用自适应噪声完备集合经验模态分解方法对原始信号进行分解，将原始信号从高频到低频逐层分解为若干个本征模态分量，再依据各分量与原始信号的相关系数筛选出包含主要故障信息的有效分量，剔除掉包含冗余噪声的无效分量，最后对筛选得到的有效分量进行重构，完成原始信号的降噪处理，达到分离故障冲击特征与背景噪声的目的，为后续故障特征提取提供高质量的信号基础。

3.2 融合时频分析与深度学习的断齿故障特征提取方案

首先对完成降噪重构后的振动信号进行时频变换，得到信号在时间域和频率域的联合分布信息，清晰展现不同时段内信号频率成分的变化规律，捕捉断齿故障引发的非平稳冲击特征在不同时频尺度下的分布。随后将得到的时频图转换为二维灰度图像输入深度卷积神经网络，利用卷积神经网络的自动特征提取能力，通过多层卷积、池化操作自动挖掘时频图像中隐含的故障敏感特征，逐层从原始时频信息中提取出从边缘轮廓到抽象语义的多层故障特征，无需手动设计特征提取规则，就能自动区分正常齿轮啮合特征与断齿故障冲击特征的差异，最终输出可用于故障分类识别的高代表性故障特征[3]。

3.3 提取特征的可分性与有效性评价指标构建

针对深度卷积神经网络自动提取得到的多层故障特征，构建多维度评价指标对其可分性与有效性进行量化评估。首先引入类内散度与类间散度的

比值作为可分性指标,衡量正常齿轮特征与断齿故障特征之间的分布差异,类间差异越大、同类特征聚集程度越高,该指标数值越优,说明提取特征的故障区分能力越强。其次引入特征信息熵指标,量化特征所包含的故障信息量占比,熵值越低代表特征包含的冗余信息越少,故障敏感信息的集中度越高。最后结合后续故障分类任务的识别精度,综合评判提取特征对断齿故障的表征能力,为特征提取方案的性能判定提供量化依据[4]。

4 振动特征提取方法的试验结果验证与分析

4.1 不同工况下正常齿轮与断齿齿轮的振动信号对比

基于搭建的多通道振动信号采集系统,分别采集低、中、高三种载荷与转速组合工况下,正常齿轮和人工制备断齿齿轮的原始振动信号,并对时域波形进行初步对比分析。可以观察到,在所有试验工况下,断齿齿轮的振动信号时域幅值均明显高于正常齿轮,且随着载荷增大、转速提升,二者的幅值差距会进一步扩大。正常齿轮的振动信号波形规律性较强,波动幅度稳定,符合齿轮正常啮合的周期振动特征;而断齿齿轮由于啮合过程中存在局部刚度突变与周期性冲击,时域波形会出现明显的周期性脉冲峰值,且信号波动的无序性显著提升。进一步对信号做频域转换后分析发现,正常齿轮的频率成分主要集中在齿轮啮合频率及其倍频处,边频带成分较少且幅值较低;断齿故障会引发明显的幅值调制效应,导致啮合频率周围产生丰富的故障边频带,同时在低频段会出现明显的断齿冲击特征频率分量,且该分量的幅值会随载荷增加逐渐升高。整体来看,不同工况下正常齿轮与断齿齿轮的振动信号存在可区分的特征差异,为后续提取故障特征实现故障识别提供了基础[5]。

4.2 本文提取方法与传统特征提取方法的结果对比

首先分别采用本文提出的方法和几种传统特征提取方法,对采集到的不同工况下的振动信号进

行特征提取,再通过统一的分类器完成故障识别区分,对比不同方法提取特征的聚类效果。可以观察到,传统特征提取方法大多仅能利用单一维度的信号信息,对时频维度的故障特征挖掘不足,当工况变化时,提取到的特征容易发生偏移,正常齿轮与断齿齿轮的特征区分度较低,不同状态的特征样本分布存在较多重叠区域,无法清晰划分类别边界。本文提出的提取方法融合了时频分析的信号拆解能力与深度学习的特征挖掘能力,能够有效过滤无关噪声的干扰,精准捕捉到断齿故障引发的细微特征变化,提取得到的特征保留了更丰富的故障特异性信息。从特征分布结果来看,正常齿轮和断齿齿轮提取出的特征聚类效果更清晰,同类特征聚集性更强,不同类别特征之间边界明显,几乎没有交叉重叠的样本,体现出更优的类间可分性,证明本文方法相比传统方法,对工业齿轮箱断齿故障的特征提取能力更强。

4.3 断齿故障特征提取方法的准确率与稳定性验证

我们选取不同载荷转速的多组试验样本,分别用本文方法和几种常见传统方法完成特征提取与故障分类识别。在重复多次试验过程中,本文方法始终能够保持较高的故障识别表现,不会因为工况的小幅变动出现识别结果大幅波动的情况,也极少出现错分漏分的样本。传统方法在固定工况下尚且能得到尚可的识别结果,一旦工况发生改变,识别准确率就会出现明显下滑,错分的样本数量明显增加。本文提取方法对不同工况下采集到的信号都能稳定完成有效特征的捕捉提取,不需要针对新的工况重新调整提取参数,也不需要额外开展大量样本的重新训练,在各类工况组合下都能维持稳定可靠的识别效果,不会因为工况变动出现特征提取失效的问题。整体来看本文方法在故障识别准确率上显著优于对比的传统方法,同时在不同工况变动的测试条件下,识别结果的波动更小,具备更优的稳定性和泛化能力,可以适配工业现场复杂多变的实际工作条件,满足工业齿轮箱断齿故障检测的实际应用需求。

5 结语

本文针对工业齿轮箱断齿故障检测中传统方法易受工况变动影响、稳定性不足的问题，提出了融合时频分析与深度学习的振动特征提取方法，通过多工况断齿故障模拟试验完成了方法有效性验证。试验结果表明，相较于传统特征提取方法，本文方法无需针对新工况调整参数与重新训练，可稳定捕捉不同工况下的断齿故障有效特征，在识别准确率和稳定性上均有显著提升，具备更好的泛化能力，能够适配工业现场复杂多变的工作条件，可为工业齿轮箱的断齿故障检测提供可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 张宏韬,王黎钦.风电齿轮箱齿轮故障诊断技术研究进展[J].机械工程学报,2022,58(23):19-36.
- [2] 李响,陈雪峰.数据驱动的齿轮故障诊断方法研究综述[J].中国机械工程,2023,32(11):1281-1296.
- [3] 王树新.工业齿轮箱故障诊断的时频分析方法研究现状与展望[J].机械设计,2024,38(05):1-10.
- [4] 刘混举.齿轮箱故障诊断技术的研究现状与发展趋势[J].振动工程学报,2023,34(6):1121-1132.
- [5] 周东华,叶昊.基于深度学习的故障诊断与预测技术研究进展[J].自动化学报,2022,48(8):1853-1875.

