

# 声发射检测技术在齿轮故障诊断中的研究与应用现状

苟东荣<sup>1,2,3</sup>, 沈功田<sup>2,3</sup>, 宋 凯<sup>1</sup>, 陈 尧<sup>1</sup>, 张君娇<sup>2,3</sup>

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063; 2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029; 3. 国家市场监督管理总局无损检测与评价重点实验室, 北京 100029)

**摘 要:** 归纳了常见的齿轮故障类型, 介绍了声发射技术的齿轮检测和监测原理, 综述了声发射技术在齿轮故障检测中的研究与应用, 包括机理研究、运行条件对声发射信号的影响以及声发射信号处理技术, 着重分析了各种信号处理方法在齿轮箱故障诊断中的研究情况, 并指出了声发射技术在齿轮故障诊断研究中的潜在问题和下一步研究方向, 以为同行提供参考。

**关键词:** 声发射; 齿轮; 故障诊断; 综述

**中图分类号:** TG115.28      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6656(2023)03-0029-06

## Research and application status of acoustic emission detection technology in gear fault diagnosis

GOU Dongrong<sup>1,2,3</sup>, SHEN Gongtian<sup>2,3</sup>, SONG Kai<sup>1</sup>, CHEN Yao<sup>1</sup>, ZHANG Junjiao<sup>2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China; 3. Key Laboratory of Nondestructive Testing and Evaluation for State Market Regulation, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The common gear fault types are summarized. The principle of acoustic emission technology for gear detection and monitoring is introduced. Research and application of acoustic emission technology in gear fault detection are reviewed, including the mechanism study, the influence of operating conditions on the acoustic emission signals and the acoustic emission signal processing technology. The research progress of various signal processing methods in gear fault diagnosis are especially analyzed. Potential problems and future research directions of acoustic emission technology in fault diagnosis research, which have reference significance for peer.

**Key words:** acoustic emission; gear; fault diagnosis; review

齿轮作为旋转机械的核心零件之一, 被广泛用于航空航天、风力发电、工程机械、游乐设施以及仪器仪表等多个领域, 常常工作在高载荷、周期运行的极端复杂工况中, 极易发生各种故障, 对旋转机械的正常运行和结构安全造成影响。由于齿轮安装精密, 拆卸不易, 因此需要采用快速有效的监测及检测

手段来判断齿轮运转状态, 确保齿轮的安全运行。

目前针对齿轮箱的监测手段主要有振动检测、油液监测、温度监测以及声发射检测等技术<sup>[1]</sup>。这些方法各有优缺点, 振动检测可采集大量的信息, 传感器安装方便, 但是不便排除低频干扰, 不易发现齿轮早期故障; 油液监测通过对齿轮箱的润滑油进行理化分析、污染测试来判断齿轮的磨损状态, 但是无法对脂状润滑油进行测试, 且无法进行实时监测; 温度监测具有滞后性, 无法进行故障预测。

声发射检测技术是一种成熟的技术手段, 作为实时、动态的无损检测技术<sup>[2]</sup>, 能够在旋转结构运转的时候实现检测, 具有实时性和连续监测的特点, 可以反映出声源动态响应特性, 及时发现齿轮早期故

收稿日期: 2022-07-21

基金项目: 十四五国家重点研发计划国家质量基础设施体系专项(2022YFF0609703)

作者简介: 苟东荣(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为检测声学及无损评价, goudongrong@163.com

通信作者: 张君娇(1987—), 女, 高级工程师, 研究方向为无损检测技术及标准化, zhangjj1000@163.com

障。将声发射检测技术应用于齿轮箱等设备的监测诊断,对减少停工和降低维护成本极其有效。

## 1 齿轮的故障类型

常见齿轮箱中的齿轮包括直齿轮、斜齿轮以及行星齿轮。这些齿轮发生故障的原因包括制造时产生的误差、装配不良、润滑不当以及长时间处于恶劣工况中<sup>[3]</sup>,产生的故障主要有断齿(占比约 41%)、点蚀(占比约 31%)、磨损(占比约 10%)、裂纹与划痕(占比约 10%)等类型<sup>[4]</sup>。

## 2 齿轮故障的声发射检测原理

材料表面和内部结构变化,会快速释放应变能产生弹性波,发生声响,称为声发射<sup>[2]</sup>。齿轮声发射检测原理(见图 1),齿轮运转及故障产生的声发射信号通过机械结构传播到齿轮箱表面被声发射传感器接收,再经过一系列的信号处理技术,最终得到齿轮的运行状态。

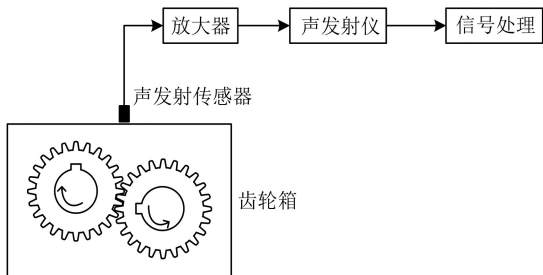


图 1 齿轮声发射检测原理示意

从微观来看,齿轮是金属材料,金属材料中声发射的来源跟晶体有关,晶体中的塑性变形、断裂、相变和磁效应都会产生声发射。在无故障齿轮的传动过程中,声发射往往由齿轮表面粗糙接触带来的弹性变形引起。在故障状态下,裂纹会因齿轮传动的应力变化而产生声发射信号;表面的点蚀、磨损等会改变齿轮表面粗糙度和接触时的受力状态,从而产生与无故障状态下不同的声发射信号。齿轮传动时的粗糙接触是齿轮啮合产生的,经过长期试验,研究人员将粗糙接触分为滑动接触和滚动接触,连续型声发射信号一般由滑动接触产生,而滚动接触是产生突发型声发射信号的原因<sup>[5-7]</sup>。

## 3 齿轮故障声发射检测研究现状

### 3.1 齿轮运行参数对声发射信号的影响

齿轮的运行常常伴随着载荷、转速、环境温度以及润滑状态的变化,对于这些因素如何影响声发射

信号,许多学者进行了大量研究。

TAN 等<sup>[7]</sup>探讨了部分弹流润滑下直齿圆柱齿轮的声发射与载荷、速度和粗糙度之间的关系。通过试验观察到:在等温条件下,负载对声发射 RMS (有效值电压)值的影响极小,而齿轮转速对声发射 RMS 值有显著影响,RMS 值随转速增大而增大。根据弹性流体力学理论,速度的增加会导致润滑膜更厚(从而减少粗糙接触),TAN 等将观察到的试验现象归因于粗糙接触的较高应变率,认为在低速范围下提高转速时增加的声发射 RMS 值大于在高速范围内提高转速时增加的 RMS 值,甚至可能在某个时候,声发射水平会降低,因为在更高速度下的润滑膜效应对 RMS 值的影响将大于较高应变率的粗糙接触对 RMS 值的影响。

在 TAN 的其他研究<sup>[5]</sup>中,对有故障齿轮的变速箱进行了声发射测量试验,以探究温度、油膜厚度和声发射 RMS 值之间的关系。试验观察到幅值最大的声发射脉冲并不总是由故障齿啮合产生。试验认为温度会改变润滑剂粘度,从而改变润滑膜厚度。试验还观察到在润滑油温度达到平衡之前,声发射 RMS 值在几个小时内变化很大。分析发现存在两个相反的效应,即:一方面随着温度的升高,润滑膜厚度减小,从而出现更多的粗糙接触;另一方面,啮合表面由于磨损而接触时,其粗糙度会降低。试验还发现当润滑剂温度不变时,外加载荷对声发射 RMS 值的影响不大。

HAMZAH 等<sup>[9]</sup>在特定油膜厚度对直齿轮和斜齿轮声发射的影响的研究中,试验观察到 RMS 值随着特定薄膜厚度的增大而减小,其对此的解释是薄膜厚度增大会导致粗糙接触减少。在相同的试验条件下,正齿轮的比膜厚值高于斜齿轮的。两种齿轮的比膜厚值都随着转速的增大而增大,但斜齿轮比膜厚值的增大量小于直齿轮的。关于负载的影响,对正齿轮和斜齿轮的试验表明,随着负载的增加,声发射 RMS 值持续增大。他们将这些结果归因于弹性流体动力润滑条件下载荷对润滑油膜厚度的影响,较高的载荷会产生较薄的润滑膜,从而产生更多的粗糙接触和声发射活动。

在对行星齿轮的相关研究中,VICUÑA 等<sup>[10]</sup>介绍了温度、负载和转速对无故障行星齿轮声发射的影响,通过试验发现声发射 RMS 值随着温度升高而变化很大;转速对行星齿轮声发射的影响很大,在较低转速下,载荷对声发射的影响可能很大;在较

高的转速下, 负载影响被转速影响所掩盖。NOVOA 等<sup>[11]</sup>发现低转速下的声发射活性不仅受载荷的影响, 还受润滑剂粘度的影响, 在相同的载荷和转速条件下, 当行星齿轮箱中含有较低粘度的润滑剂时, 声发射活性增加, 因为低粘度的润滑剂生成的润滑膜较薄; 还发现在高速范围内增加转速比低速下增加转速对声发射的影响更大。

综上所述, 转速、润滑油粘度、负载和温度等运行条件会通过改变润滑油膜厚度和粗糙接触率影响声发射的产生, 但是对具体如何影响的结论却不一定一致, 这可能是因为试验条件的不一致, 齿轮类型、表面粗糙度等因素都会对采集到的声发射信号产生影响。

### 3.2 齿轮故障声发射理论模型

齿轮的运行环境十分复杂, 导致声发射的产生涉及到多种物理机制的共同作用, 而数学模型有助于人们理解齿轮传动时声发射的产生机理, 不少专家进行了相关的理论研究。

BARANOV 等<sup>[12]</sup>基于随机函数的偏差理论建立了固体滑动摩擦作用下声发射特性的理论模型, 该模型以计算声发射脉冲幅度分布、参数和计数率的数学关系式描述了声发射显示在摩擦学试验中的主要行为。FAN 等<sup>[13]</sup>建立了基于材料弹性粗糙接触的声发射与滑动摩擦关系的理论模型, 利用该模型可以从声发射测量中估算出粗糙表面所承受的接触载荷, 从而评价机械的润滑状况。

SHARMA 等<sup>[14-15]</sup>在前人的研究基础上, 基于凹凸体随机分布理论、赫兹接触、弹流理论、转速以及负载区载荷分布建立了边界润滑下的渐开线直齿圆柱齿轮声发射模型, 该模型以数学表达式的方式将声发射 RMS 值与齿轮表面粗糙度、载荷等参数建立联系; 随后又在该模型基础上提出了正齿轮点蚀时的声发射数学模型, 建立了缺陷尺寸与齿轮啮合时产生的声发射 RMS 值之间的关系, 且通过试验验证了模型的可靠性。

SHARMA 等<sup>[16]</sup>以线弹性断裂力学为基础, 建立了预测直齿圆柱齿轮裂纹扩展声发射的数学模型。该模型将直齿圆柱齿轮裂纹扩展产生的声发射 RMS 值与裂纹扩展长度、裂纹增量面积、裂纹长度和应力强度联系起来, 用试验数据对数学模型进行了验证。试验结果和建立的模型均表明裂纹长度的改变会导致直齿圆柱齿轮声发射 RMS 值的变化, 且遵循相同的趋势。

### 3.3 齿轮故障声发射信号处理与分析

在齿轮箱的故障诊断研究中, 常常会用到各种方法对声发射信号进行处理与分析, 主要包括参数分析、波形分析、模式识别以及其他分析方法。

#### 3.3.1 参数分析方法

参数分析方法通过波形特征参数表征声发射信号, 再对其进行统计分析, 实现对故障的诊断。声发射主要的特征参数定义示意如图 2 所示, 其主要包括幅值、能量、有效电压值以及振铃计数等。参数分析法简洁快速, 是近几十年来使用最广泛的经典分析方法, 但是容易丢失细节信息。

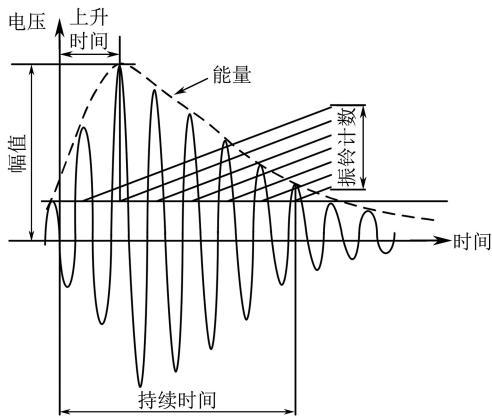


图 2 声发射参数定义示意

石鹏飞<sup>[17]</sup>以撞击数描述齿轮接触疲劳状态, 通过接触疲劳试验机采集了疲劳裂纹扩展时的声发射信号并进行分析, 发现撞击数与齿轮疲劳裂纹的扩展存在规律, 得到了在载荷幅度不变时齿轮接触疲劳裂纹扩展阶段的扩展速率不变的结论。

QU 等<sup>[18]</sup>使用了一种基于外差的技术来解调声发射信号并将其转换到较低的频率范围, 即通过基于外差技术的硬件设备采集声发射信号, 再进行时间同步平均(TSA)处理。通过声发射 TSA 信号计算的 RMS 值和峰度可以清楚地观察到故障齿轮信号和健康齿轮信号的明显区别。根据试验得出结论, 峰度是故障齿轮的良好状态指标, 峰度值不受速度的影响, 因此可以用于变速下的齿轮检测故障。

FERRANDO 等<sup>[19]</sup>将声发射技术应用于风电机组齿轮箱的健康诊断中, 研究了运行条件对风电机组齿轮箱声发射产生的影响。通过试验发现, RMS 值、信息熵和峰值随着功率输出的增加而增加; RMS 值和计数与负载的增加直接相关; 信息熵对功率输出最敏感, 均方根也随扭矩的增加呈现出类似的趋势。

有学者将声发射技术应用到游乐设备减速器的



健康监测中,通过对采集的大摆锤减速机信号进行参数分析,发现幅值达到饱和,能量和计数的声发射特征不明显,而 RMS 值能反映大摆锤减速机的运行规律。但是其未进一步对故障情况下的声发射信号进行研究。

### 3.3.2 波形分析方法

波形分析法是指通过分析所采集的声发射信号原始波形,得到其中所包含的信息,以此达到故障诊断的目的。目前常用的波形分析法主要有小波分析、频谱分析、时频分析以及模态分析,这些方法在齿轮故障识别时常会组合使用。

GU 等<sup>[20-21]</sup>提出了一种基于离散小波变换的包络分析的声发射信号处理方法,且通过测试的齿轮箱声发射信号验证了该方法的有效性。GAO 等<sup>[21]</sup>开发了比传统小波方法去噪能力更强的冗余第二代小波变换方法,并成功应用于低速重载齿轮的声发射故障诊断中。LI 等<sup>[22]</sup>利用蚁群优化算法对小波变换的参数进行优化,实现了对齿轮故障的定位,成功在齿轮箱中确定了损坏齿轮的位置。姚俊<sup>[4]</sup>将小波变换应用到齿轮箱断齿故障诊断中,对断齿前后信号能量谱系数的变化情况进行重构,再对重构信号作频谱分析,可以识别出断齿故障。安海博等<sup>[23]</sup>通过建立 RV 减速器在不同旋转角度下的声发射信号衰减模型,再结合小波变换对声发射信号进行分析,得到不同频段的时频分量特征,从而建立减速器声发射信号在不同磨损状态下的演化趋势模型。

LI 等<sup>[24]</sup>提出了一种基于经验模态分解的旋转机械健康监测方法,以提高故障诊断的敏感性,通过在经验模态分解(EMD)中加入阈值去噪技术,提高声发射信号的信噪比,再提取多个特征融合成单个压缩特征,基于统计方法,将压缩特征用于故障检测。郭福平等<sup>[25]</sup>将 EMD 结合 Hilbert 变换方法应用到齿轮磨损的故障诊断中,通过 EMD 得到经验模态分解图、边际谱、时频谱,之后利用 Hilbert 变换进行分析。朱静等<sup>[26]</sup>提出一种基于改进的集合经验模态分解(EEMD)和声发射技术的行星齿轮箱断齿故障诊断方法,该方法结合 EEMD 分解高频到低频的特点以及模糊熵对本征模式函数(IMF)分量的筛选,能够有效提取行星齿轮断齿故障特征频率,且能去除噪声的干扰。

FERRANDO 等<sup>[19]</sup>采用 Hilbert 变换提取风力发电齿轮箱声发射信号,并计算快速傅立叶变换(FFT)提取声发射包络的特征频率,发现采集的信

号包络谱由齿轮啮合频率和主频带等调制频率构成,但少数信号中还存在两倍于齿轮啮合频率的调制频率,他们将其归因于突发强风或阵风带来的齿轮箱负载突变,但未对故障齿轮的声发射信号进行分析。

### 3.3.3 模式识别

模式识别是根据故障特征,利用计算机将样本划分到特定的故障中,从而实现故障诊断的技术。常用的方法包括神经网络、K-最近邻算法(KNN)以及支持向量机(SVM)等算法。

YOON 等<sup>[27]</sup>利用硬件的外差法采集了不同故障的行星齿轮声发射信号,利用 EMD 分析声发射信号,从信号的波形、包络和能量算子的本征模式函数计算多个统计特征,再将这些特征输入神经网络进行故障诊断。

HE 等<sup>[28]</sup>使用希尔伯特-黄变换(基于经验模态分解)从声发射信号中提取故障特征。该研究从与齿轮啮合频率最相关的 IMF 分量中计算 RMS 值、峰度和峰值振幅等特征,用以训练用于故障检测的 K-最近邻算法(KNN);并且通过对具有断齿故障的分扭矩齿轮箱的测试,验证了该方法可用于齿轮故障诊断。

耿开贺等<sup>[29]</sup>利用小波阈值降噪法对不同运行条件下的齿轮声发射信号进行预处理,将时域、频域特征参数作为 BP 神经网络的输入以实现不同工况下声发射信号的识别,发现小扭矩、低转速下的声发射信号识别率高于大扭矩、高转速下的,在高能量频段信号中提取的特征参数具有更高的识别率。

于洋等<sup>[30]</sup>提出了一种基于遗传算法优化的支持向量机齿轮故障诊断方法。该方法采用了遗传算法进行参数寻优,从而提高支持向量机对故障的识别率,且采集磨损的齿轮声发射信号进行训练,优化后诊断方法的识别率比优化前的提高了 10%。

LI 等<sup>[31]</sup>利用原始声发射信号,采用增广卷积稀疏自动编码器方法进行齿轮点蚀故障诊断,该方法直接从原始声发射信号中自动提取故障特征,而不需要对声发射信号进行时域和频域转换。

### 3.3.4 其他方法

VICUÑA 等<sup>[33]</sup>提出了一种减少声发射数据并保留原始声发射信息的方法,该方法将原始声发射信号中存在的声发射脉冲包络成三角形,所构造的信号被称为“三角信号”,其已成功应用于行星齿轮箱的故障诊断中。

有学者针对因噪声基底幅度有显著变化难以获得合适阈值的问题,提出了一种浮动阈值方法解决了声发射的齿轮箱背景噪声太大的问题,该方法将信号平均值与3倍标准差之和作为阈值,超出阈值的所有数据都被挑选出来进行详细分析,能成功识别出裂纹的产生和扩展。

张宇等<sup>[33]</sup>提出了一种根据行星齿轮中声发射信号的衰减特性进行故障定位的方法。该方法利用行星齿轮结构和声发射传播的衰减特性,建立故障源定位方程组,通过求解方程组得到故障源位置,最后通过试验验证了该方法的有效性。

## 4 结论

从齿轮的故障类型、声发射检测技术原理出发,阐述了声发射检测技术在齿轮故障诊断中的研究现状,主要得出以下结论。

(1) 在分析运行条件对声发射信号的影响时,润滑条件、温度、载荷和转速等运行条件会以不同的方式影响声发射信号,在某些研究中不同的研究人员得出了不一样的结论,这些分析是否需要考虑更多因素(如齿轮表面条件、齿轮结构以及声发射传感器采集点的选择)还需要进一步的研究。

(2) 理论研究有利于理解齿轮传动产生声发射的物理机制,但是这方面的研究很少,目前只有直齿轮建立的数学模型,关于斜齿轮、行星齿轮等其他齿轮产生的声发射数学模型还未出现。

(3) 近十年来,齿轮箱齿轮的声发射信号处理与分析技术得到快速发展,尤其体现在波形分析和模式识别方面。这些信号处理与分析技术常通过分析得到某齿轮无故障和有故障的声发射信号,得到不同故障类型与状态下的频率、熵、能量和峭度等特征值对齿轮进行故障诊断研究。其中,参数分析法简洁快捷,适合齿轮箱现场快速诊断;波形分析方法中小波分析和模态分析被用于去除背景噪声、故障诊断、故障定位以及损伤程度的量化等研究。

(4) 模式识别对齿轮的故障诊断,是建立在参数分析或波形分析基础上的,其通过预先采集齿轮典型故障信号,利用参数分析或者波形分析得到特征参量,随后通过特征参数建立特征集作为样本建立模型,实现齿轮箱齿轮快速故障诊断,故需要大量试验获取齿轮的典型声发射信号。另外,未来需要进一步研究探索,更加快速智能的齿轮故障诊断方法。

(5) 结合齿轮运行参数对声发射信号的影响和

声发射信号处理进行研究时,齿轮运行条件和自身的表面和结构条件对声发射有很大影响,这些影响因素会同时影响声发射信号,导致齿轮故障诊断模型不具有通用性,具有通用性的故障诊断方法也是未来的重点研究方向。

## 参考文献:

[1] FARIS, ELASHA. A comparative study of the effectiveness of vibration and acoustic emission in diagnosing a defective bearing in a planetary gearbox [J]. *Applied Acoustics*, 2017, 115: 181-195.

[2] 沈功田. 声发射检测技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

[3] 苏莫寒. 基于声发射技术的齿轮故障识别[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.

[4] 姚俊. 基于声发射技术的齿轮断齿检测研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.

[5] TAN C. Identification of the acoustic emission source during a comparative study on diagnosis of a spur gearbox[J]. *Tribol. Int.* 2005, 38(5): 469-480.

[6] TAN C, MBA D. Correlation between acoustic emission activity and asperity contact during meshing of spur gears under partial elastohydrodynamic lubrication[J]. *Tribology Letters*, 2005, 20(1): 63-67.

[7] TAN C, MBA D. Experimentally established correlation between acoustic emission activity, load, speed, and asperity contact of spur gears under partial elastohydrodynamic lubrication[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2005, 219(6): 401-409.

[8] RAJA HAMZAH R I, AL-BALUSHI K R, MBA D. Observations of acoustic emission under conditions of varying specific film thickness for meshing spur and helical gears [J]. *Journal of Tribology*, 2008, 130(2): 319-320.

[9] HAMZAH R, MBA D. The influence of operating condition on acoustic emission (AE) generation during meshing of helical and spur gear [J]. *Tribology International*, 2009, 42(1): 3-14.

[10] VICUÑA C M. Effects of operating conditions on the Acoustic Emissions (AE) from planetary gearboxes [J]. *Applied Acoustics*, 2014, 77: 150-158.

[11] NOVOA A B, VICUÑA C M. New aspects concerning the generation of acoustic emissions in spur gears, the influence of operating conditions and gear defects in planetary gearboxes[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2016,

58(1): 18-27.

[12] BARANOV V M, KUDRYAVTSEV E M, SARYCHEV G A. Modelling of the parameters of acoustic emission under sliding friction of solids[J]. Wear, 1997, 202(2): 125-133.

[13] FAN Y, GU F, BALL A. Modelling acoustic emissions generated by sliding friction [J]. Wear, 2010, 268(5/6): 811-815.

[14] SHARMA R B, PAREY A, TANDON N. Modelling of acoustic emission generated in involute spur gear pair[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 393: 353-373.

[15] SHARMA R B, PAREY A. Modelling of acoustic emission generated due to pitting on spur gear[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 86: 1-20.

[16] SHARMA R B, PAREY A. Modelling of acoustic emission generated by crack propagation in spur gear [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 182: 215-228.

[17] 石鹏飞. 齿轮接触疲劳的声发射研究[J]. 工程与试验, 2013, 53(1): 34-37, 56.

[18] QU Y, HE D, YOON J, et al. Gearbox tooth cut fault diagnostics using acoustic emission and vibration sensors—a comparative study[J]. Sensors, 2014, 14 (1): 1372-1393.

[19] FERRANDO CHACON J L, ANDICOBERRY E A, KAPPATOS V, et al. An experimental study on the applicability of acoustic emission for wind turbine gearbox health diagnosis [J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2016, 35(1): 64-76.

[20] GU D S, AN Y S, CHOI B K. Detection of faults in gearboxes using acoustic emission signal[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(5): 1279-1286.

[21] GAO L, ZAI F, SU S, et al. Study and application of acoustic emission testing in fault diagnosis of low-speed heavy-duty gears[J]. Sensors, 2011, 11(1): 599-611.

[22] LI R, SEÇKINER S U, HE D, et al. Gear fault location detection for split torque gearbox using AE sensors[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 2012, 42(6): 1308-1317.

[23] 安海博, 梁伟, 张吟龙. 机器人 RV 减速器声发射信号传播机理分析及实验研究[J]. 机器人, 2020, 42(5): 557-567.

[24] LI R, HE D. Rotational machine health monitoring and fault detection using EMD-based acoustic emission feature quantification [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(4): 990-1001.

[25] 郭福平, 李谷乔. 基于 HHT 的齿轮故障声发射实验研究[J]. 化工机械, 2017, 44(4): 390-393, 425.

[26] 朱静, 邓艾东, 李晶, 等. 基于改进 EEMD 和声发射技术的行星齿轮箱故障诊断研究[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(增刊 2): 657-660.

[27] YOON J, HE D. Planetary gearbox fault diagnostic method using acoustic emission sensors [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2015, 9(8): 936-944.

[28] HE D, LI R, BECHHOEFER E. Split torque type gearbox fault detection using acoustic emission and vibration sensors[C]//2010 International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). Chicago: IEEE, 2010: 62-66.

[29] 耿开贺, 贺敬良, 王康, 等. 基于声发射信号模式的齿轮特征识别研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(16): 192-196, 208.

[30] 于洋, 白瑞, 杨平. 基于遗传算法优化的支持向量机在齿轮故障声发射检测中的应用[J]. 机械传动, 2018, 42(01): 163-166, 175.

[31] LI X, LI J, HE D, et al. Gear pitting fault diagnosis using raw acoustic emission signal based on deep learning[J]. Maintenance and Reliability 2019, 21 (3): 403-410.

[32] VICUÑA C M, HÖWELER C. A method for reduction of acoustic emission (AE) data with application in machine failure detection and diagnosis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 97: 44-58.

[33] 张宇, 卢文秀, 褚福磊. 基于声发射衰减特性的故障行星轮定位研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(3): 14-19.

欢迎网上投稿      欢迎订阅      欢迎刊登广告