DOI: 10.3901/JME.2021.08.107

基于声发射的活塞环-缸套摩擦润滑特征研究*

魏娜莎¹ 闫献国¹ 谷丰收² 陈 峙¹

(1. 太原科技大学机械工程学院 太原 030024;
2. 哈德斯菲尔德大学工程与效能中心 哈德斯菲尔德 HD13DH 英国)

摘要: 活塞环-缸套系统摩擦润滑过程产生的声发射信号是湮没在强背景噪声下的非稳态弱信号, 特征难以提取和分析。为了有效抑制强噪声, 提出一种基于信号物理特征的自适应阈值小波包降噪算法。根据小波包时频分析确定摩擦声发射的最佳特征提取频段, 构建基于活塞速度廓形曲线的自适应小波包阈值函数, 实现了对表征摩擦润滑的声发射信号的有效提取。将该算法用于分析发动机燃烧试验测得的声发射信号。使用三种不同润滑油(10W30、15W40 和旧机油)验证算法的有效性。结果表明, 该算法能有效地抑制由阀门开关、燃烧和喷油过程产生的大幅值的噪声。声发射特征值随着润滑油的黏度增大而增大, 含有颗粒物的旧机油的声发射特征值随着转速的增大而明显增大。为实现在线监测和诊断活塞环-缸套系统健康状态进而评估润滑油的品质提供了可行的方法。

关键词: 声发射; 小波包; 活塞环-缸套系统; 自适应阈值

中图分类号: TG156

Research on the Characteristics of Piston Ring-liner Friction Lubrication Based on Acoustic Emission

WEI Nasha¹ YAN Xianguo¹ GU Fengshou² CHEN Zhi¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024;
2. Center for Performance and Effectiveness, Huddersfield University, Huddersfield HD13DH, UK)

Abstract: The acoustic emission (AE) signal generated from the friction and lubrication process of the piston ring-cylinder liner system is an unsteady weak signal submerged under strong background noise, and it is difficult to extract and analyze this signal features. In order to effectively suppress strong noise, an adaptive threshold wavelet packet denoising algorithm based on signal physical characteristics is proposed. The optimal feature extraction frequency band of the frictional AE signal is determined according to the wavelet packet time-frequency analysis, and an adaptive wavelet packet threshold function is constructed based on the piston velocity profile curve to extract the AE signals characterising friction and lubrication effectively. The algorithm is used to analyse the AE signal measured in the engine combustion test. Three different lubricants (10W30, 15W40 and used engine oil) were compared to verify the effectiveness of this algorithm. The results show that this algorithm can effectively suppress the large noise generated from valve switching, combustion and fuel injection. The AE indicator increase with the oil viscosity, and the AE indicator of used oil containing particulates increases with the speed significantly. It provides a feasible method for online monitoring and diagnosing the health status of the piston ring-liner system, and also to evaluate the quality of lubricating oil.

Key words: acoustic emission; wavelet packet; piston ring-cylinder liner system; adaptive threshold

0 前言

在内燃机系统中, 润滑油具有降低组件摩擦、元件散热、清洁接触面颗粒污染和防止异常磨损等

重要作用。活塞-缸套系统作为内燃机的核心组件与内燃机效率息息相关。润滑油品质劣化或润滑等级不足会引起活塞-缸套系统的过度磨损严重缩减发动机寿命, 降低燃烧室的密封性, 引发窜气漏气导致环境污染和严重的动力系统故障。

润滑油黏度值、颗粒物含量、含水量和总酸度值是衡量润滑油品质的关键参数^[1]。油膜在高温高压下的工作环境下容易出现污染氧化、添加剂降解、

* 国家自然科学基金(51375326)、山西省自然科学基金青年基金(201901D211286)、山西省高等学校科技创新(2020L0350)、太原科技大学博士科研启动(20192017)和山西省自然科学基金青年基金(201701D221134)资助项目。20200812 收到初稿, 20210202 收到修改稿

接触表面残留颗粒物含量增高等局部油膜品质衰变,进而导致润滑油的黏度值增大颗粒物增多,加剧了活塞环与缸套表面的摩擦磨损。因此,对活塞缸套系统的摩擦润滑特性进行在线监测和诊断,成为保证动力系统稳定运行和确定最佳润滑油更换周期的迫切需求。

声发射(Acoustic emission, AE)技术作为无损检测技术,能够灵敏监测材料因受力、变形或断裂而自发产生的应变能。因而声发射信号中隐含着有关声发射源特性的重要信息,包括故障位置、类型和变化趋势等^[2-3]。目前声发射技术已经广泛应用于评估发动机的燃烧过程^[4]、排气门的泄漏^[5]、喷油过程^[6]等。近几十年一些学者开始尝试使用声发射技术研究活塞-缸套组件的摩擦磨损和润滑过程^[7-8]。GU 等^[9]应用试验研究的方法证实了声发射信号及其均方根值与润滑油的黏度之间的关联性。这些研究成果表明声发射作为一项独特的非介入式测量技术对发动机的摩擦过程和早期磨损故障进行监测的可行性。

但是由于发动机机构复杂,信号干扰源多,导致实际测量的活塞环-缸套表面的声发射信号非常微弱故障特征难以提取。因此,本文采用小波包算法提取声发射信号特征值,分析活塞环-缸套系统的摩擦润滑特性,建立润滑油品质的声发射监测和故障诊断技术。

1 试验方案

为了验证实际工况下声发射信号特征分析方法的有效性,本文在立式单缸直接喷射柴油机(型号:QCH1125)试验台架上采集不同工况下缸体表面的声发射信号。测试系统和声发射信号采集系统原理如图 1 所示。试验通过改变涡流测功机(型号:DW 160)的励磁电流来控制发动机转速和负载。燃烧试验的测试工况如表 1 所示。

图 1 柴油机试验系统原理图

声发射信号的采样率为 800 kHz。选用上止点(Top dead center, TDC)位置传感器标识每个工作循环下采集的声发射信号,上止点位置传感器的安装位置如图 1 所示。在所有工况条件下,使用每种润滑油的声发射信号均重复测量两次,为了保证数据的可靠性采集了超过 100 个发动机工作循环的数据。分别采用两种不同黏度的新润滑油(10W30 和 15W40)和行驶里程 15 000 km 后更换的旧机油进行对比研究。发动机试验使用的润滑油黏度与测试工况如表 1 所示。

表 1 发动机试验使用的润滑油黏度与测试工况

润滑油 型号	转速/(r/min)	载荷 (N·m)	黏度-40 ℃ (Pa·s)	黏度-100 ℃ (Pa·s)
10W30	1 000, 1 200, 1 400, 1 600	10/40	0.076 5	0.009 9
15W40	1 000, 1 200, 1 400, 1 600	10/40	0.112 8	0.014 7
旧机油	1 000, 1 200, 1 400, 1 600	10/40	0.235 4	0.033 9

由于摩擦润滑引起的声发射信号非常微弱,信号的电压可能低至微伏数量级,因此使用前置放大器提高监测信号的幅值,本试验采用北京声华兴业科技有限公司的声发射信号采集系统,测试系统主要由声发射传感器(SR800)、前置放大器、声发射信号采集仪(SEAU2S-1016-08)和计算机组成,传感器和前置放大器的性能参数如表 2 所示。

表 2 声发射传感器与前置放大器性能参数

参数	传感器	前置放大器
工作温度/℃	-20~60	-20~60
接口类型	M5-KY	BNC
尺寸/mm	φ19×15	116×36×30
响应频率/kHz	50~800	10~2 000
灵敏度峰值/dB	>70	—
增益/dB	—	40
输出范围/V	—	±10

2 小波阈值降噪算法与小波包变换

2.1 小波阈值降噪与声发射信号特征提取

小波变换具有良好的时频域分析能力,能根据目标信号和背景噪声在时域和频域上实现较好的降噪处理,广泛应用于声发射信号的监测和诊断中。基于小波变换的常用降噪算法主要有时频域降噪法、小波模极大值降噪法、小波熵值降噪法和小波阈值降噪法等^[10]。其中,小波阈值的降噪方法因其计算简便且降噪效果较好被广泛用于识别故障特征。但是阈值降噪过程中小波基、分解层数和阈值函数的选择没有统一的方法和标准。实际工程问题中,往往根据经验选择最优的小波基,对于强背景

噪声下的弱信号提取其降噪效果并不理想。

发动机缸体上测得的声发射信号是一种非稳态信号, 包含复杂的频域成分。此外发动机结构复杂, 实际测量的声发射信号不仅包含进排气阀门的开关噪声和燃烧噪声, 还包含喷油等噪声, 并且这些噪声具有高幅值、宽频带的特征。因此, 往往导致活塞环-缸套表面摩擦引起的声发射信号湮没在强噪声中。WEI 等^[11]提出了一种基于离散小波的声发动机摩擦发射表征方法, 通过理论和试验验证了活塞冲程中部的声发射信号不仅与活塞环-缸套间的粘滞摩擦力相关还与活塞的速度相关。但是由于离散小波在中高频带频率分辨率的局限性, 所以表征摩擦的声发射信号的时频特性尚不明确。为了在中高频带范上获得更精细的频率分辨率, 本文采用小波包频谱分析, 确定摩擦声发射的特征频带, 实现对弱声发射信号特征的准确提取。

2.2 小波包变换

小波包算法是由 WICKERHAUSER 等^[12]提出的, 作为小波算法的进一步应用小波包算法通过一对正交镜像滤波器实现了对信号更精细的分解, 其数学描述可总结为

$$\begin{cases} W_{2n}^j(t_w) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2N-1} h(k) W_n^j(2t_w - k) \\ W_{2n+1}^j(t_w) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2N-1} g(k) W_n^j(2t_w - k) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $n=1, 2, \dots, N$; $k=1, 2, \dots, 2N-1$; $W_0^0(t_w)$ 是尺度函数 $f(t_w)$, $W_1^0(t_w)$ 是小波函数; j 表示小波基分解的层数; $h(k)$ 为尺度函数对应的低通滤波器系数; $g(k)$ 为尺度函数对应的高通滤波器系数。正交小波分解过程通常使用高通和低通滤波器将系数分成两部分。因此, 这为第 j 级的每个节点提供了比离散小波变换更精细的分析, 例如将包含复杂频率分量的节点在频域上进行更精细的间隔划分。

为了有效分离表征摩擦润滑特征的声发射弱信号, 要求使用的信号处理方法具有更精细的局部分析能力。小波包变换能将频率空间划分为多个部分, 并可以准确地对非平稳信号进行时频定位。目前小波包算法已广泛用于发动机^[13]、齿轮^[14]和轴承^[15]的状态监测和故障诊断。

3 非稳态弱声发射信号自适应阈值小波包降噪算法

3.1 小波包时频分析与特征频带选取

活塞速度是决定活塞环-缸套系统摩擦过程的

主要因素, 活塞冲程中部的声发射信号与活塞环-缸套间的黏滞摩擦力密切相关^[11]。根据角域下发动机缸体表面一个工作循环的原始声发射信号(图 2)可知, 发动机的四个工作冲程(吸气冲程, 压缩冲程, 燃烧冲程和排气冲程)中部都有较为连续和集中的小幅值声发射信号, 其幅值变化趋势与活塞速度曲线密切相关。如图 2 所示, 每个冲程都存在大幅值干扰信号, 对应其曲轴转角位置可知, 这些噪声源分别由进排气阀的打开和关闭、燃烧过程和燃油喷射过程产生。

图 2 发动机缸体表面的声发射信号与活塞速度曲线

为了明确各个冲程大幅值声噪声信号与摩擦声发射的频域特性差异, 使用小波包变换对原始声发射信号进行时频分析。选取与声发射原始信号波形相近的多贝西小波进行小波包变换, 通过调试选取较高的分解层级以便在中部频带得到更精细的频域特征。由于选用的多贝西小波基的系数越高计算速度越慢考虑到为了实现监测的实时性, 本文选取 db9 作为小波基分解层级为 8 级。

图 3 为高转速和低转速下基于小波包变换声发射特征值时频分析图。根据图 3 时频分析结果可知, 中部频率范围内存在多个窄频带存在半连续的弱声发射特征值集中呈现于四个冲程中部位置。这与活塞速度最大值的角域位置相同, 验证了这些特征值与活塞环摩擦润滑过程的关联性。这种半连续的弱声发射特征主要集中呈现在 $0 \sim 200$ kHz 的几个窄频带上。其中 $0 \sim 40$ kHz 频带虽然在各个冲程都具有密集的声发射信号, 但其中明显混杂着高幅值不规律的突发声发射信号。这些高幅值的突发信号使 $0 \sim 40$ kHz 频带的信号未呈现出幅值连续集中于冲程中部这一特征。这可能是由于发动机表面可测得的声发射源较多, 来自其他组件(如阀门, 轴承, 燃油泵等)之间碰撞、间隙接触等过程而产生的突发性声发射干扰源。因此本文排除 $0 \sim 40$ kHz 频带, 在 $40 \sim 190$ kHz 频带范围内依次选取四个($40 \sim$

图 3 基于小波包变换的声发射特征值时频分析

60 kHz, 70~90 kHz 和 140~160 kHz 和 170~190 kHz)冲程中部具有连续声发射值的特征频带进行进一步降噪分析。

3.2 小波包能量谱分析

小波包分析具有良好的局部特性, 并且每一层级分解后的小波包系数其信号能量在整体上保持不变^[15]。因此选择合适的分解级研究全频段上信号的能量特征分布, 是常用的基于小波包信号特征识别方法。第 j 层小波包系数的能量谱为各个频段小波系数能量的归一化计算结果, 计算公式如下

$$E_{jkd} = \frac{|x_{jkd}|^2}{\sum_{d=0}^{2^j-1} |x_{jkd}|^2} \quad (2)$$

式中, x_{jkd} 为第 j 层级 d 个频段节点的小波包系数。

图 4 为采用式(2)得到使用三种润滑油的小波包能量谱。其中图 2a~2d 分别对应: 转速 1 200 r/min、载荷 10 N·m, 转速 1 200 r/min、载荷 40 N·m, 转

图 4 使用三种润滑油的声发射-小波包能量谱分析

速 1 800 r/min、载荷 10 N·m, 转速 1 800 r/min、载荷 40 N·m 工况下三种润滑油的能量谱。

图 3 小波包时频分析虽然显示了分解层数为 8 时冲程中部呈现出集中的声发射信号, 但是图 4 中小波基为 db9 分解层级为 8 级的能量谱分析中, 三种润滑油的能量的特征值在固定频段上并未呈现出统一的规律。主要原因可能由于冲击类型的

声发射信号往往具有较高的能量。阀门开关和组件碰撞等强噪声信号具有大幅值和宽频特性,单纯通过小波包不同分解层级和频带的能量特征值不能有效地剔除这些噪声,因此选取适合的降噪方法与小波包分析相结合成为在强噪声背景下提取弱信号的关键。

3.3 阈值的选取

传统阈值降噪方法的计算主要依据噪声强度与信号长度来构造合适的阈值函数,目前常用的阈值主要有硬阈值函数和软阈值函数以及基于上两种函数改进的阈值函数等^[16]。

但是监测旋转机械系统所获得的信号具有时变、非平稳和非线性的特点,实际测量的发动机声发射信号包由多个未知激励源混叠而成难以分离。使用传统阈值降噪方法研究上述问题存在以下困难^[17]:一方面通过数学建模对原始信号进行仿真其研究难度较大研究周期较长,不符合工程实际需求;另一方面采用含噪声的模拟信号代替实测信号往往导致理论分析与实际应用结果存在较大差异。

本文根据时频分析结果设计了基于信号物理特征的新阈值降噪方法。由于活塞环缸套间的摩擦声发射信号与活塞速度密切相关,利用活塞速度廓形曲线与摩擦声发射信号的关联性构造了基于小波包的阈值函数 $Y_{jk} (j=1,2,\dots,J, k=1,2,\dots,K)$

$$y_{jk} = \begin{cases} 0 & |x_{jk}| > \lambda_i \\ x_{jk} & |x_{jk}| \leq \lambda_i \end{cases} \quad (3)$$

式中, X_{jk} 为小波包分解系数(J 为小波包分解层数, K 为工作循环数)。

由图 3 可知声发射信号的幅值随发动机转速的增大而增大,采用固定阈值不能准确去除不同转速下的大幅值噪声,因此引入不同转速下的活塞速度廓形曲线设计了具有自适应特性阈值

$$\lambda_i = c^i E \bar{X}_{rms}^n \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

式中, c^i 为迭代系数, $c^i = c^{i+1} - \varepsilon$; E 为膨胀系数防止阈值过低引起的小波系数过扼杀现象; $\bar{X}_{rms}^n$ 为第 n 个转速下四个冲程中部小波包系数方均根值的均值;通过迭代缩小 c^i 直到与活塞速度的相关距离 d_i 达到最小值

$$d_i(\hat{x}_i, v_n) = 1 - \frac{(\hat{x}_i - \bar{x}_i)(v_n - \bar{v}_n)^T}{\sqrt{(\hat{x}_i - \bar{x}_i)(\hat{x}_i - \bar{x}_i)^T} \sqrt{(v_n - \bar{v}_n)(v_n - \bar{v}_n)^T}} \quad (5)$$

$$\hat{x}_i(c^i) = c^i \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_j^2(t)_k} \quad (6)$$

式中, $\bar{x}_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \hat{x}_{it} (t=1,2,\dots,T)$, T 为同一工况下每个工作循环的采样点数; v_n 活塞速度曲线函数。

3.4 降噪算法流程

根据小波包分解结果选取四个频带范围对小信号进行降噪处理,选择 Daubechies 小波基函数 db9,为了得到更精细的角域-频域分析结果,本文设计了基于速度曲线廓形的自适应阈值函数对强声发射信号进行降噪。降噪算法流程的具体步骤如下。

(1) 使用分解层级为 8 级, db9 小波基进行小波包频谱分析。

(2) 根据目标频带的频率范围对频谱序列进行排序。

(3) 计算目标频带内的所有序列小波包系数 $x_{jk} = \sum_{t=1}^T x_j(t)_k$, 根据小波包系数 x_{jk} 以及对应工况下的活塞速度 v_n 。

(4) 根据式(5)选取迭代系数 c^i 对应的 d_i 值,判断是否 $d_i - d_{i-1} \geq 0$, 否则减小迭代系数 c^i , 重复步骤(4)。

(5) 根据迭代系数 c^i 计算对应阈值 λ_i , 得到自适应阈值降噪后的小波系数 Y_{jk} 。

(6) 根据小波包系数 Y_{jk} 重构得到新的信号 Z_j 并计算声发射指针参数 $\bar{Z}_j = \sum_{t=1}^T Z_j(t)_k$ 。并在角域上

选择冲程中部指针参数的方均根值作为判断摩擦润滑声发射的特征值。

4 基于自适应阈值的小波包分解的声发射信号摩擦学特征分离

4.1 摩擦声发射-小波包最佳频带选取

根据降噪算法计算第 2.2 节四个中不同频带的小波包系数 x_j 。根据图 2 可知,排气冲程没有大幅值的阀门开关干扰信号,因此,选取排气冲程角域范围的部分小波包系数的 RMS 均值为诊断摩擦润滑特性的最佳频带。

图 5 是使用 15W40 润滑油时排气冲程不同转速下四个目标频带的小波包系数 RMS 均值,频带 40~60 kHz 的声发射 RMS 值明显高于其他三个频带,并随着转速的增加而增大。因此,40~60 kHz 的频带可作为最佳目标频带进行分析。

图 5 排气冲程不同转速下不同频带范围的小波包分解系数的方根值

4.2 试验结果分析

根据第 2.4 节中的自适应小波包阈值算法流程, 选取频带 40~60 kHz 内的小波系数, 根据不同工况的参数计算自适应阈值, 如图 6 所示。重构阈值降噪后的小波系数并求平均值得到声发射特征号 $\bar{Z}_j$ 。为了有效选取与摩擦声发射相关的特征值, 分别在角域上截取吸气冲程、压缩冲程、燃烧冲程和排气冲程中部的信号 $\bar{Z}_j$ 作为声发射指针, 该指针的角度的选择范围如图 2 中曲轴转角坐标轴上的四段粗实线所示。

图 6 一个工作循环的自适应阈值

根据表 1 中三种润滑油的实测黏度可知, 旧机油的实测动黏度高于两种新润滑油, 一方面由于活塞缸套间的黏滞摩擦力高于两种新润滑油, 另一方面由于旧机油中含有的颗粒物与活塞环缸套表面的微凸体发生碰撞, 所以在高速声发射特征值明显增大并高于 15W40。图 7 和图 8 分别为三种润滑油在不同工况下四个冲程中部的摩擦声发射特征值。每个冲程的声发射特征值随发动机转速而显著增加。旧机油的声发射值明显高于两种新润滑油。高载荷低速下旧机油的声发射值与 15W40 的差异不明显, 高转速下旧机油的声发射值在略高于其他

两种润滑油, 主要原因可能是低速高载下, 油膜表面承受的压力增大, 油膜厚度减小而导致的黏滞摩擦力减小。

图 7 低载荷下不同转速下各个冲程的声发射特征值

图 8 高载荷下不同转速下各个冲程的声发射特征值

对于两种新润滑油: 低载荷下使用 15W40 的特征值略高于 10W30, 高载荷下排气冲程使用 15W40 的特征值略高于 10W30, 其他冲程两种新润滑油的差异并不明显。两种新润滑油的差异较小, 主要原

因是由于高温下 10W30 和 15W40 的油膜温度较高时, 黏度值之间的差异减小(如表 1 所示 100 °C 两种润滑油的动黏度的差值明显小于 40 °C 的差值(把差异值直接列出来), 导致黏滞摩擦力值减小。因此, 两种润滑油油在高温下的声发射值比较接近。

根据上述试验结果可知, 基于小波包的自适应降噪算法能够有效提取燃烧试验中表征摩擦与润滑的声发射特征值。

5 结论

(1) 根据活塞环-缸套系统摩擦润滑声发射信号与活塞速度的关联性结合小波包变换的时频分析结果选取了四个特征频带(40~60 kHz, 70~90 kHz 和 140~160 kHz 和 170~190 kHz), 运用自适应阈值降噪的小波包算法确定了 40~60 kHz 为最佳特频带, 实现了对阀门开关、燃烧和喷油过程产生的强噪声的有效抑制。

(2) 在柴油机试验台架上分别测试使用三种润滑油(15W40, 10W30 和行驶 15 000 km 后更换的旧机油)的声发射信号, 并使用自适应阈值降噪的小波包算法提取摩擦润滑声发射特征值。结果表明声发射特征值随着润滑油的黏度增大而增大, 含有颗粒物的旧机油的声发射特征值随着转速的增大而明显增大。

(3) 该算法成功提取了强噪声背景下的非稳态弱信号。基于该算法实现了应用非介入式监测技术评估关键组件表面摩擦润滑状态, 下一步将研究依据声发射特征值与润滑油颗粒物含量和油膜动黏度的关联性进行润滑油品质进行定量评价。

参 考 文 献

- [1] EDISTASO, AMIRANTE R, CALÒ G, et al. Predicting lubricant oil induced pre-ignition phenomena in modern gasoline engines: The reduced GasLube reaction mechanism[J]. Fuel, 2020, 281: 118709.
- [2] 李学军, 廖传军, 褚福磊. 适于声发射信号故障特征提取的小波函数[J]. 机械工程学报, 2008, 38(3): 177-181. LI Xuejun, LIAO Chuanjun, CHU Fulei. Wavelet function suitable for fault feature extraction of acoustic emission signal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 38(3): 177-181.
- [3] 邓艾东, 赵力, 包永强. 基于模糊熵的转子碰摩声发射信号的识别[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 71-75. DENG Aidong, ZHAO Li, BAO Yongqiang. Recognition of rub-impact acoustic emission signal based on fuzzy

- entropy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(3): 71-75.
- [4] CAVINA N, BUSINARO A, ROJO N, et al. Combustion and Intake/exhaust systems diagnosis based on acoustic emissions of a GDI TC engine[J]. Energy Procedia, 2016, 101: 677-684.
- [5] 张舒, 余永华, 胡磊, 等. 柴油机气阀漏气故障声发射诊断特征参数[J]. 内燃机学报, 2016, 34(4): 379-383. ZHANG Shu, XU Yonghua, HU Lei, et al. Parameter for valve leakage diagnosing fault for diesel engines based on acoustic emission[J]. Transactions of Csice, 2016, 34(4): 379-383.
- [6] GILL J D, REUBEN R L, STEEL J. A study of small HSDI diesel engine fuel injection equipment faults using acoustic emission[J]. Journal of Acoustic Emission, 2000, 18: 1-6.
- [7] EL-GHAMRY M H, REUBEN R L, STEEL J A. The development of automated pattern recognition and statistical feature isolation techniques for the diagnosis of reciprocating machinery faults using acoustic emission[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2003, 17(4): 805-823.
- [8] 张来斌, 杨占才, 王朝晖, 等. 声发射技术用于诊断发动机活塞与缸套间磨损故障的实验研究[J]. 石油大学学报, 2001, 25(5): 60-63. ZHANG Laibin, YANG Zhancan, WANG Chaohui, et al. Experimental study on engine piston-liner wear fault diagnosis by acoustic emission technology[J]. Journal of the University of Petroleum, 2001, 25(5): 60-63.
- [9] ELAMIN F, GU F, BALL A. Diesel engine lubricating oil condition and performance monitoring using acoustic emission measurements[C/CD]/24th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostics Engineering Management (COMADEM 2011), May 30th - June 1st 2011, Stavanger, Norway.
- [10] 马骏, 吴开志, 李新民, 等. 时空域相关自适应小波包声发射信号降噪方法[J]. 南昌航空大学学报, 2018, 32(1): 90-96. MA Jun, WU Kaizhi, LI Xinmin, et al. Time-spatial correlation based adaptive wavelet packet method of acoustic emission signal de-noising[J]. Journal of Nanchang Hangkong University, 2018, 32(1): 90-96.
- [11] WEI N, GU F, WANG T, et al. Characterization of acoustic emissions for the frictional effect in engines using wavelets based multi-resolution analysis[C]/2015 21st International Conference on Automation and Computing (ICAC). IEEE, 2015: 1-6.
- [12] GÓMEZ M J, CASTEJÓN C, GARCÍA-PRADA J C. Review of recent advances in the application of the wavelet transform to diagnose cracked rotors[J]. Algorithms, 2016, 9(1): 19-32.
- [13] WANG X, LIU C, BI F, et al. Fault diagnosis of diesel engine based on adaptive wavelet packets and EEMD-fractal dimension[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 41(1-2): 581-597.
- [14] 罗荣, 田福庆, 冯昌林, 等. 冗余小波包改进及其在齿轮箱故障诊断中应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(15): 82-88. LUO Rong, TIAN Fuqing, FENG Changlin, et al. Improved redundant wavelet packet decomposition and its application in gearbox fault diagnosis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(15): 82-88.
- [15] 李宏坤, 赵长生, 周帅, 等. 基于小波包-坐标变换的滚动轴承故障特征增强方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(19): 74-80. LI Hongkun, ZHAO Changsheng, ZHOU Shuai, et al. Fault feature enhancement method for rolling bearing based on wavelet packet-coordinate transformation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(19): 74-80.
- [16] 曹衍龙, 程实, 杨将新, 等. 基于小波包的松动件质量估计方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22): 1-5. CAO Yanlong, CHENG Shi, YANG Jiangxin, et al. Method for mass estimation of loose parts based on wavelet packet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(22): 1-5.
- [17] 刘奎, 张冬梅, 于光, 等. 空气耦合超声信号的小波阈值滤波试验研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(20): 61-66. LIU Kui, ZHANG Dongmei, YU Guang, et al. Wavelet threshold denoising experiments of air-coupled ultrasonic signal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(20): 61-66.

作者简介: 魏娜莎, 女, 1982 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为机械系统状态监测与故障诊断。

E-mail: weinasha@hotmail.com

闫献国(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为先进制造技术。

E-mail: yan_xg2008@126.com