

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.048

基于声发射的膜片联轴器裂纹自动检测技术

张宁,陈蔚芳,农苏,陈凯杰

(南京航空航天大学 机电学院,江苏南京,210016)

摘要:为研究膜片联轴器出现裂纹后的裂纹扩展寿命,基于声发射检测技术原理,进行膜片联轴器裂纹声发射试验;从采集的信号中识别出结构疲劳裂纹信息,提取疲劳裂纹声发射信号特征;对膜片联轴器疲劳裂纹进行识别,分析出裂纹扩展寿命阶段,试验工况下可实现无需停机的裂纹扩展检测。

关键词:膜片联轴器;裂纹扩展;声发射;自动检测

中图分类号:TH133.4 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)02-0254-06

Automatic Crack Detection Technology of Diaphragm Coupling Based on Acoustic Emission

ZHANG Ning, CHEN Weifang, NONG Su, CHEN Kaijie

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:In order to study the crack propagation life of the diaphragm coupling after cracking, the acoustic emission test of the diaphragm coupling is carried out based on the principle of acoustic emission detection technology. The fatigue crack information is identified from the collected signals, and the characteristics of fatigue crack acoustic emission signal are extracted. The fatigue crack of diaphragm coupling is identified, the life stage of crack growth is analyzed, and the crack growth detection can be realized without stopping under the test condition.

Keywords:diaphragm couplings; crack propagation; acoustic emission; automatic detection

0 引言

膜片联轴器作为传动系统的重要部件,其裂纹在疲劳载荷下的扩展将直接影响整体传动系统的工作状态。联轴器工作时由于不同轴等原因,它将承受复杂载荷的作用,且随着工作时间的增加,膜片将产生疲劳裂纹,从而最终导致膜片联轴器的失效。这会直接影响传动系统的正常工作,甚至造成安全事故。因此,有必要对膜片联轴器裂纹扩展状态进行检测,这有助于对传动系统安全稳定运转提供保障。

声发射现象由材料失效时释放应变能量、产生弹性波而引起^[1]。当外力加到物体时,其材料内部的缺陷导致物体出现瞬时应力集中,从而引起材料基体发生应变,应变能量在载荷影响下释放,这一过程会产生传递至物体表面的弹性波,形成声发射信号。声发射检测技术就是使用设备来完成声发射信号的接收、记录和分析,最终获取物体状态信息的过程^[2]。

声发射检测是一种新型无损监测技术,其通过监控材料内部缺陷引起的声学变化来进行质量

检测或系统反馈^[3]。国外将声发射技术应用于传动系统故障诊断方面较早,SEEMUANG等^[4]搭建了声发射轴裂纹在线检测系统,施加不平衡载荷以加速轴临界点处的裂纹萌生和扩展。试验结果表明:在轴临界点处,进入裂纹扩展阶段时声发射特征变化明显,可以识别出轴裂纹故障状态。HASE^[5]对推力球轴承裂纹萌生阶段进行了声发射信号和振动信号故障识别研究。当轴承内部产生裂纹时,装置检测到突变型声发射信号,该声发射信号的频率分量显示0.15~0.4 MHz之间的峰值,而振动信号没有捕捉到裂纹萌生阶段的信号变化,表明声发射技术能够更早检测出轴承在接触损伤后出现的起始裂纹。SHENG等^[6]将声发射技术应用于监测高速水刀岩石钻孔过程,并对不同类型岩石发出的声发射信号进行变分模态分解,通过对分解后得到的IMF分量进行频谱分析,实现了对不同岩石类型的识别。KHON等^[7]利用小波分析方法对由不同声发射源进行探究,研究结果显示声发射信号的能量随着金属板硬度的增长而上升,信号在时域和频域上的差异不显著时,可以通过能量特性来识别和分类不同的声发

第一作者简介:张宁(1997—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,研究方向为裂纹扩展仿真,2301414691@qq.com。

射源。

国内在声发射技术在裂纹检测领域中,近几年涌现出了大量的研究成果。张超^[8]以高压涡轮盘为对象,使用裂纹仿真软件 FRANC3D,建立了偏心孔裂纹模型,计算了应力强度因子 K 、 J 积分,分析了裂纹扩展模型、扩展方向以及失效判据,获得了裂纹扩展方向,并利用荧光检测和渗透检测获得裂纹扩展特征。结果表明裂纹扩展方向和长度变化与仿真分析相符合。墨馨遥等^[9]使用扩展有限元法对 AZ31 镁合金仿真,在交替载荷作用下,当裂纹受到拉力时表现为张开型,而在交变压力和剪切力的作用下,疲劳裂纹通常呈现为滑移型;在拉应力作用下,疲劳裂纹的扩展更为显著。李婷等^[10]在风电机组变桨轴承上开展声发射裂纹监测试验,先后在时域、频域及时频域对有裂纹声发射数据和无裂纹声发射数据进行对比,发现时频域基于 STFT 分析方法可以有效地发现裂纹,并有较高的实用价值。朱永凯等^[11]针对风机叶片,采用声发射传感器阵列方法搭建检测系统,进行叶片损伤试验,实现了损坏的大小和位置确定。李德发^[12]建立了滚振试验台,将声发射传感器安置在箱体靠近轴承一侧,获取轴承在运行过程中的信号,分析了轴承损伤与声发射特征值的关系。结果表明声发射信号可以敏感分辨轴承故障状态。沈国清等^[13]设计了用于风力发电机叶片监测的声发射传感装置和滑环装置,实现了传感器与位于静止设备的连接,解决了长期监测叶片的健康状态问题。郭民臣等^[14]搭建转子试验台,采用声发射技术获得转子碰摩故障信号,经过小波去噪后获取频谱图,经试验验证,较好地实现了故障信号的去噪与特征提取,实现了轮机轴承的碰摩故障诊断。

国内外对膜片联轴器裂纹扩展过程的仿真研究较少,对其裂纹扩展的声发射信号特征研究则更缺乏。因此本文针对膜片联轴器进行裂纹扩展声发射信号特征方面展开研究。

1 声发射信号检测

声发射源头产生的弹性波经过介质的传播到达传感器处,传播过程会存在衰减,但传感器会将传过来的信号进行声—电转换,此时前置放大器就会放大电信号,以便于对信号进行特性化的处理,显示出记录信号相应的特征信息,从而对该信号进行分析得出结论。声发射检测原理如图 1 所示。

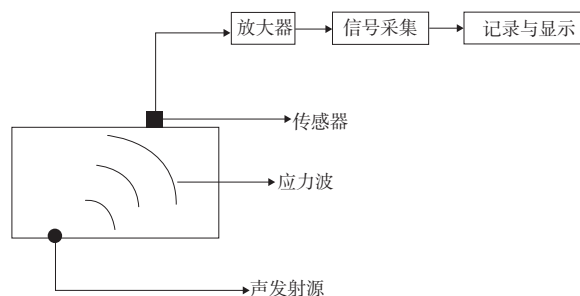


图1 声发射检测原理图

金属材料裂纹发生的频率段主要集中在 80~400 kHz,需要灵敏的声发射采集仪器进行信号采集,还需高采样率的采集设备对信号进行采样。金属材料具有声发射不可逆特点^[15],声发射检测技术可通过固定位置的传感器获得设备材料缺陷信号。本文建立裂纹声发射检测平台,进行膜片联轴器裂纹试验,分析采集信号,实现裂纹自动检测。

本文使用的裂纹声发射信号采集系统如图 2 所示,包括声发射传感器、前置放大器、数据采集卡以及工控机。声发射传感器拾取联轴器在运转过程中,物体中裂纹扩展、弹塑性变形等产生的弹性波成为声发射信号,被声发射传感器采集,经过前置放大器信号放大环节,将声发射信号提高到一定程度,经过数据采集卡进入到工控机中,最后通过计算机控制平台进行存储和特征处理。

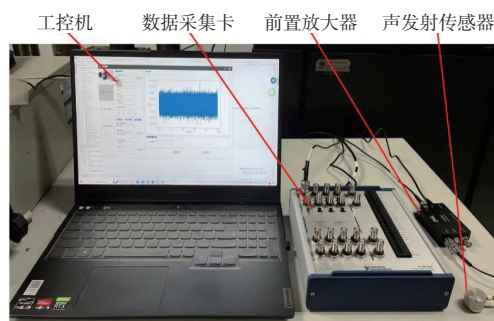


图2 声发射信号采集系统构成

声发射传感器采用 PXR15 宽频段传感器,频率带宽为 100~400 kHz,谐振频率为 150 kHz,灵敏度峰值大于 67 dB,适用于金属材料类的裂纹声发射检测,符合膜片联轴器裂纹检测需求。前置放大器为某公司的 PXPA6 型信号放大器,拥有 20 dB、40 dB、60 dB 3 个挡位,可以根据需要对信号进行 3 个级别的放大。数据采集卡为 NI-6366 数据采集卡,支持 8 路同步模拟信号输入,单通道最大采样率可达 2 MS/s,可满足声发射信号采集

要求。工控机上为了便于声发射信号采集,基于NI-6366 数据采集卡开发了声发射信号采集软件界面,如图3所示。声发射信号采集软件可调用NI 驱动实现采集卡参数设置、信号采集、信号波形显示及信号数据存储等功能,可以在信号采集过程中实时显示频域或时域信号,查看信号变化情况。

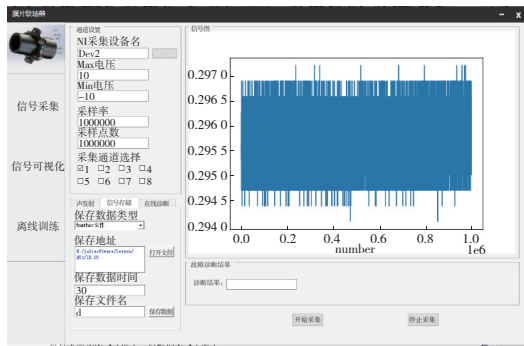


图3 声发射信号采集软件界面

为研究膜片联轴器疲劳裂纹扩展时的声发射特性,对膜片联轴器进行扭转疲劳裂纹扩展试验,采集疲劳裂纹扩展的声发射信号,寻找裂纹萌生和裂纹扩展时的声发射信号变化规律。膜片联轴器裂纹扩展试验设备如图4所示,由扭转疲劳试验机、声发射采集系统和图像采集系统组成。扭转疲劳试验机用于施加扭转循环载荷,使得膜片联轴器发生裂纹萌生、裂纹扩展和裂纹断裂过程;图像采集系统由图像显示工作站、CoaPress 接口工业面阵相机组成,用于裂纹扩展试验中,实时观察和记录膜片裂纹扩展过程;声发射采集系统用于采集膜片联轴器疲劳裂纹扩展时的声发射信号。

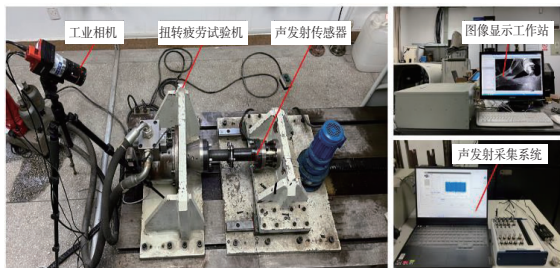


图4 膜片联轴器疲劳裂纹扩展试验

2 小波阈值降噪

小波阈值降噪法为应用最广泛的降噪方式,利用小波变换分解信号得到小波系数,数值较大的小波系数包含了信号的有用信息。噪声在经过小波变换后,在小波域仍然表现为很强的随机性,对应的系数很小,而有效信号对应的系数很大。

利用阈值函数删去小幅值的小波系数,经过小波逆变换重构小波系数,就可以得到去噪后的声发射信号。小波阈值降噪法的流程如图5所示。

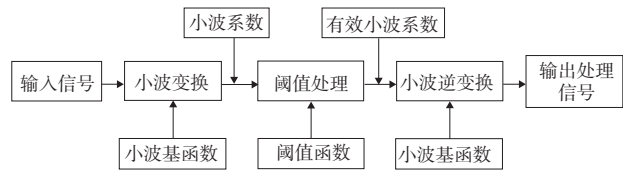


图5 小波阈值法降噪流程

阈值通常由硬阈值函数和软阈值函数设定,设 λ 为阈值, $w_{j,k}$ 表示小波变换系数, $\hat{w}_{j,k}$ 为阈值处理后的小波系数。硬阈值法通过将取模后小于设定阈值 λ 的小波系数取为零,对于大于设定阈值的小波系数保持原样,适合于突变信号部分的噪声剔除。硬阈值函数表达式为

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}, & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (1)$$

软阈值法通过将大于阈值的小波系数都减去 λ ,这样即可消去在 $\pm\lambda$ 处的不连续,使得信号连续性更好,但是会导致重构信号的均方差增大。软阈值函数表达式为

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(w_{j,k}) \cdot (|w_{j,k}| - \lambda), & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

本文选取半软阈值分析,为保证降噪效果的稳定性和使信号保留有效信息,阈值 λ 根据目前较为广泛的固定阈值准则,选取通用阈值 λ :

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln N} \quad (3)$$

式中: N 为信号的长度; σ 为噪声的标准差;通常根据小波系数进行估测:

$$\sigma = \frac{\text{median}(|d_k|)}{0.6745} \quad (4)$$

式中: d_k 为尺度是1的小波系数; $\text{median}()$ 为中值函数。小波基函数的不同,会带给同一信号不同的分解结果。小波基函数的选取原则有正交性、对称性、紧支性和正则性等。目前,小波基函数中被广泛应用的有Harr小波,Morlet小波,Daubechies小波,Coifles小波,Mexican Hat小波,Meyer小波和Symlets小波等;比较适合于声发射信号的小波基主要有Daubechies小波,Symlets小波和Coifles小波。有大量研究表明,对于声发射信号,采用Sym6小波基函数降噪效果最佳。

分解层数过少时,有效信息与噪声仍处于混杂状态,得到的小波包系数幅值相近,无法通过阈值降噪算法去除;层数过多则导致去噪后信号的

信噪比下降。

为了验证小波阈值降噪方法对声发射信号降噪的有效性,借鉴机械结构金属损伤仿真模型构造了声发射仿真信号,其计算公式表达如下:

$$y(t) = \sum_{i=1}^3 A_i e^{-a_i t} \sin(2\pi f_i t) + r(t) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

从式(5)中可以看出,仿真信号 $y(t)$ 由 3 个分信号和 $r(t)$ 四部分组成。式中: A_i 为第 i 个信号的幅值 ($A_i = 2, 1.5, 3$); a_i 为第 i 个信号的衰减系数 ($a_i = 15, 10, 12$); f_i 是第 i 个信号的频率 ($f_i = 40\ 000, 80\ 000, 120\ 000$); $r(t)$ 为 1 dB 强度的高斯白噪声,用于模拟裂纹扩展时声发射信号中的背景噪声。

通常将信噪比 (SNR) 和方均根误差 (RSME) 用于评判降噪效果,信噪比可以描述信号质量的好坏,方均根误差可以表示数据的总体变化趋势和变化程度的大小。信噪比越大并且方均根误差较小,则表示降噪效果越好。设 $s(n)$ 为原始信号, $f(n)$ 为降噪后信号,由此得到信噪比和方均根误差的分别为式(6)和式(7)所示。

$$\text{SNR} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{n=1}^n s^2(n)}{\sum_{n=1}^n [s(n) - f(n)]^2} \right) \quad (6)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n [s(n) - f(n)]^2}{n}} \quad (7)$$

使用小波阈值降噪算法,对含噪声发射仿真信号进行信号降噪。选用软硬折中的阈值函数进行不同小波基函数和小波阈值下的降噪对比。根据查阅声发射信号的相关文献,选用常用的 db6 小波, sym8 小波和 coif5 小波中进行分析。采用常用的小波分解层数为 5 层,比较不同小波基函数去噪后的信噪比和方均根误差,各小波基函数去噪信噪比 (SNR) 和方均根误差 (RMSE) 如表 1 所示。

表 1 各小波函数降噪效果

小波函数	SNR	RMSE
sym8	13.135	0.205
db6	11.822	0.212
Coif5	11.503	0.217

从表 1 可以看出,通过选用小波基函数对仿真信号进行降噪处理, sym8 小波基函数的去噪效果都优于 db6 和 coif5 小波基函数,计算得到的信噪比更高,方均根误差越小,由此选用 sym8 小波基函数用于声发射信号降噪。比较不同分解层数去噪后的信噪比 (SNR) 和方均根误差 (RMSE),不同分解层数的信噪比和方均根误差如表 2 所示。

表 2 sym8 不同分解层数的降噪效果

小波函数	分解层数	SNR	RMSE
sym8	8	11.785	0.215
	7	12.010	0.206
	6	12.092	0.204
	5	12.135	0.205
	4	12.653	0.193
	3	11.774	0.211

从表 2 可以看出,使用 sym8 小波基函数进行降噪处理,不同的分解层数对降噪效果影响较小,但可以发现分解层数为 4 时的小波阈值降噪效果要稍微好于其他分解层数。计算得到的信噪比最高,方均根误差最小。

根据以上信号降噪处理可知,使用小波阈值降噪算法对含噪信号进行处理时,选用软硬折中阈值函数, sym8 小波基,分解层数为 4 层的小波阈值降噪算法对含噪信号降噪处理,能起到很好的降噪效果。

3 试验结果

本文用 2 mm 初始裂纹膜片联轴器,施加 1 800 Nm 正弦循环转矩载荷,加载频率为 4 Hz。获得的全过程声发射信号,经过小波阈值降噪后将时域、频域特征值与时间变化进行斯皮尔曼相关系数计算,获得相关系数值。表 3 中,方均根值、时域标准差、峭度值与频域平均幅值的相关系数分别为 0.910、0.909、0.908 和 0.937,这 4 个特征值与时间呈现很强的单调关系,频域平均幅值与时间相关性最高。因此,可以用声发射信号中的方均根值、时域标准差、峭度值与频域平均幅值来判断识别膜片联轴器裂纹扩展情况。时域、频域特征相关系数情况如表 3 所示。

表 3 时域、频域特征相关系数表

时域/ 频域 特征	时域 最大值	时域 平均值	时域 最小值	时域 标准差	峰峰 值	时域 平均 幅值	方均 根	歪度 值	峭度 值	波形 指标	脉冲 指标	歪度 指标	峰值 指标	裕度 指标	峭度 指标	方根 幅值	频域 平均 幅值	频域 方差	频域 峰值	方均根 频率	频域 标准差
相关 系数	0.334	0.884	-0.287	0.909	0.386	0.884	0.91	0.644	0.908	-0.713	-0.126	0.899	-0.01	-0.201	-0.678	0.852	0.937	0.327	0.358	-0.545	0.443

如图 6 所示,声发射信号中的方均根值、峭度值与频域平均幅值,除峭度值外,其余 2 个特征值幅值出现突变转折较为明显。

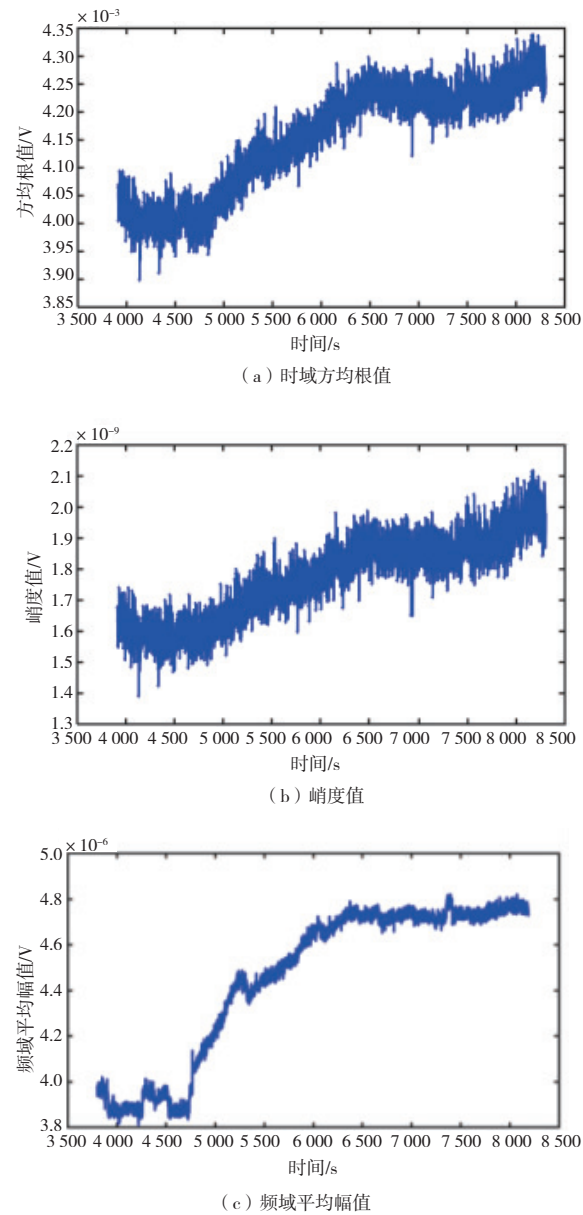


图 6 膜片联轴器声发射信号特征

如图 7 所示,加载 7 448 次时,对应声发射信号的 0~4 800 s 区间,为无裂纹扩展区间,时域方均根值在 3.95×10^{-3} V 至 4.10×10^{-3} V 波动。加载 30 095 次时,裂纹扩展长度明显超过预制裂纹,此

计数对应声发射信号的 4 800 s~7 500 s 段,为裂纹萌生区间,方均根幅值从 4.10×10^{-3} V 增加到 4.30×10^{-3} V。加载 32 476 次时,裂纹扩展接近膜片束腰段完全断裂,对应声发射信号的 7 500~8 500 s 段,为裂纹快速扩展区间,方均根幅值保持在 4.30×10^{-3} V 波动。加载次数对应声发射信号的无裂纹扩展、裂纹萌生、裂纹快速扩展区间,与裂纹实际扩展保持一致。因此方均根值、时域标准差与频域平均幅值可用来表征膜片联轴器的裂纹扩展阶段。

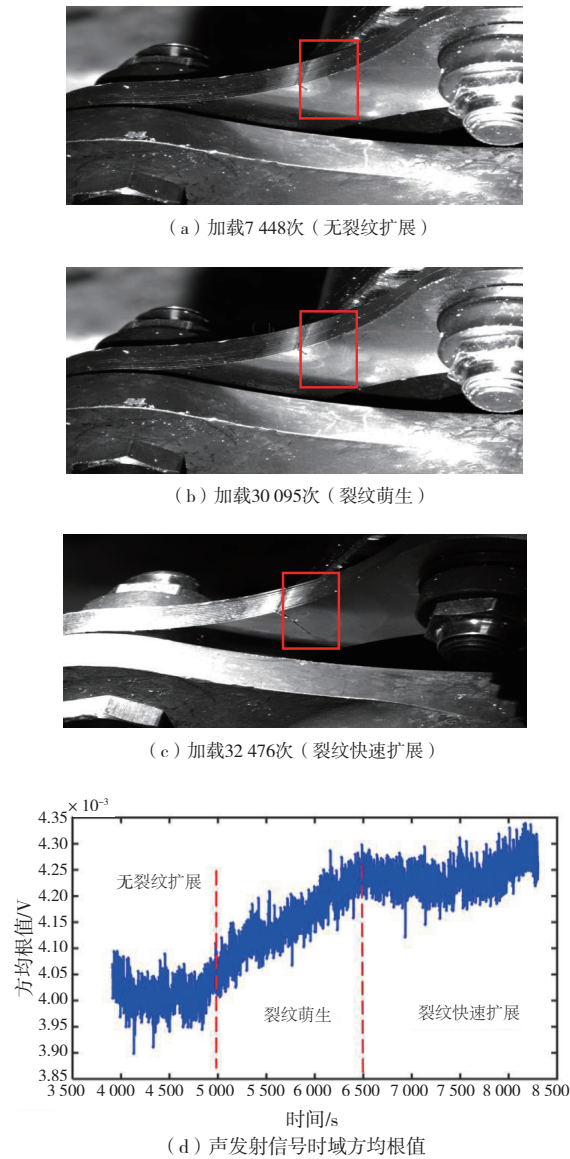


图 7 膜片联轴器裂纹扩展图

4 结语

本文搭建了声发射信号采集系统,进行了膜片联轴器裂纹扩展声发射信号采集试验;研究了声发射信号特征指标提取,对裂纹声发射信号敏感特征进行筛选。本文得出:裂纹扩展声发射信号中的方均根值、时域标准差与频域平均幅值同时间变化相关系数最高,在不同区间,这3个特征值突变转折明显,可用来判断识别膜片联轴器裂纹扩展情况。根据声发射信号将膜片联轴器状态划分为无裂纹扩展、裂纹萌生、裂纹快速扩展区间,试验中裂纹扩展情况符合该划分,实现了裂纹自动检测。

参考文献:

- [1] 赵洪波. 声发射检测技术的研究现状及发展方向[J]. 电子世界,2014(3):193-194.
- [2] 邵月. 滚动轴承声发射信号传播特性研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2020.
- [3] 田畅. 基于 LabVIEW 的声发射监测系统研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2020.
- [4] SEEMUANG N, LIM J, KAEWKONGKA T. Shaft crack monitoring by using acoustic emission technique [C]// 2018 2nd International Conference on Engineering Innovation (ICEI). Bangkok, Thailand: IEEE, 2018: 30-34.
- [5] HASE A L. Early detection and identification of fatigue damage in thrust ball bearings by an acoustic emission technique[J]. Lubricants, 2020, 8(3): 37.
- [6] SHENG M, TIAN S C, ZHANG B, et al. Frequency analysis of multi-sources acoustic emission from high-velocity waterjet rock drilling and its indicator to drilling efficiency[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 115: 137-144.
- [7] KHON H, BASHKOV O V. The study of acoustic emission waves generated from different types of sources [J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 19: 2243-2247.
- [8] 张超. 某高压涡轮盘疲劳裂纹萌生及扩展特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.
- [9] 墨馨遥, 薛凤梅, 刘毅, 等. 基于 XFEM 的复杂应力状态下疲劳裂纹扩展分析[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(1): 177-182.
- [10] 李婷, 付德义, 薛扬. 基于 AE 与 STFT 的变桨轴承裂纹诊断研究[J]. 振动·测试与诊断, 2021, 41(2): 299-303, 412.
- [11] 朱永凯, 潘仁前, 陈盛票, 等. 基于声发射传感器阵列的风机叶片结构健康监测方法[J]. 无损检测, 2010, 32(10): 753-756, 761.
- [12] 李德发. 基于声发射的动车组轴箱轴承损伤检测机理及其状态感知[D]. 北京:北京交通大学,2021.
- [13] 沈国清, 姜磊, 王元, 等. 一种风力发电机叶片在线状态监测系统:CN116792265A[P]. 2023-09-22.
- [14] 郭民臣, 梅勇, 马英, 等. 基于 LabVIEW 的声发射信号小波降噪方法研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(6): 450-453.
- [15] 杨启新. 分析声发射技术在金属材料检测中的应用[J]. 科技资讯, 2023, 21(11): 71-74.
- [12] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1): 5.
- [13] 劳永春. 液冷式锂离子电池热管理系统设计及优化研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2021.
- [14] KONG D P, PENG R Q, PING P, et al. A novel battery thermal management system coupling with PCM and optimized controllable liquid cooling for different ambient temperatures [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 204: 112280.
- [15] ZHANG F R, YI M F, WANG P W, et al. Optimization design for improving thermal performance of T-type air-cooled lithium-ion battery pack [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 44: 103464.
- [16] FAN X, MENG C, YANG Y W, et al. Numerical optimization of the cooling effect of a bionic fishbone channel liquid cooling plate for a large prismatic lithium-ion battery pack with high discharge rate [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108239.
- [17] 黄司露, 陈昊, 师欣媛, 等. 基于相变材料与液冷的锂离子电池复合热管理系统研究[J/OL]. 电气工程学报, 2025, 1-8[2025-2-20].

收稿日期:2024-03-05

收稿日期:2025-03-28

(上接第 144 页)