

文章编号: 1674-8190(2023)03-187-12

# 基于光纤光栅与 BP 神经网络的孔边裂纹监测研究

于翀, 宋昊, 刘春红, 赵启迪, 付佳豪

(航空工业北京长城计量测试技术研究所 光纤传感技术研究部, 北京 100095)

**摘要:** 含孔金属结构的孔边裂纹监测对于保障飞行安全, 增强飞机结构可靠性具有重要意义。为实现对孔边裂纹扩展的监测, 进行含有孔边角裂纹的含孔铝合金板疲劳加载试验, 得到含孔铝合金板试验件的  $a-N$  曲线以及孔边裂纹扩展过程中光纤光栅应变传感器中心波长偏移量; 利用包络分析法、BP 神经网络等损伤识别算法对试验数据进行处理与分析; 建立能够以光纤光栅应变传感器中心波长偏移量识别孔边裂纹扩展的监测模型, 并通过试验对监测模型进行验证。结果表明: 本文建立的监测模型能够有效识别出孔边角裂纹的扩展与穿透, 对孔边角裂纹扩展长度监测的准确度达到了 97.2%, 未来可应用于全机地面疲劳试验、飞机结构健康监测等多种场景。

**关键词:** 孔边裂纹; 光纤光栅; 包络分析; BP 神经网络; 监测模型

**中图分类号:** V267; TP183; TN253

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.03.20

## Research on hole edge crack monitoring based on optical fiber gratings and BP neural network

YU Chong, SONG Hao, LIU Chunhong, ZHAO Qidi, FU Jiahao

(Department of Optical Fiber Sensing Technology, AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement Research, Beijing 100095, China)

**Abstract:** The hole edge crack monitoring of metal structures with holes is of great significance for ensuring flight safety and enhancing the reliability of aircraft structures. In order to monitor the crack growth at the hole edge, the fatigue loading test of porous aluminum alloy plate containing the corner crack at the hole edge is carried out, and the  $a-N$  curve of the test piece of porous aluminum alloy plate and the center wavelength offset of the optical fiber grating strain sensor during the crack growth at the hole edge are obtained. The damage identification algorithms such as envelope analysis method and BP neural network are used to process and analyze the test data. The monitoring model that can identify the crack growth at the hole edge with the center wavelength offset of the optical fiber grating strain sensor is established, and verified with test parts. The results show that the established monitoring model can effectively identify the propagation and penetration of the corner crack at the hole edge, and the accuracy of monitoring the propagation length of the corner crack at the hole edge has reached 97.2%, which can be applied to the ground fatigue test of the whole aircraft, aircraft structure health monitoring and other scenarios in the future.

**Key words:** hole edge crack; optical fiber grating; envelope analysis; BP neural network; monitoring model

收稿日期: 2022-11-15; 修回日期: 2022-12-20

通信作者: 于翀, 745938495@qq.com

引用格式: 于翀, 宋昊, 刘春红, 等. 基于光纤光栅与 BP 神经网络的孔边裂纹监测研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(3): 187-198.

YU Chong, SONG Hao, LIU Chunhong, et al. Research on hole edge crack monitoring based on optical fiber gratings and BP neural network[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(3): 187-198. (in Chinese)

## 0 引言

含孔金属结构是飞机的主要承力结构,这些含孔金属结构在服役过程中受力复杂,孔附近的集中载荷极易导致孔边裂纹的萌生,影响飞行安全<sup>[1-3]</sup>,据统计近80%的疲劳裂纹产生于飞机结构中的铆钉孔、螺栓孔区域。孔边裂纹监测作为飞机结构健康监测的重要组成部分得到了广泛关注<sup>[4]</sup>。

光纤光栅传感器相比于应变传感器、压电传感器等传统传感器具有精度高、体积小、重量轻的优点,已成为航空航天结构健康监测技术的研究重点<sup>[5-6]</sup>。由于光纤光栅传感器具有抗电磁干扰的特点,相比于其他电学传感器更适用于飞机复杂的电磁环境。利用光纤光栅传感器进行含孔金属结构孔边裂纹监测可减轻监测系统的重量,提高监测的准确性。J. Sagar等<sup>[7]</sup>利用光纤传感器接收裂纹萌生过程中产生的Lamb波,通过比较Lamb波到达不同传感器的时间差异,采用线性定位法确定了结构裂纹的萌生位置;D. C. Betz等<sup>[8]</sup>在监测钢板的裂纹时建立了基于光纤传感器与Lamb波的损伤监测系统,提出了一种将传感器信号与裂纹长度相关联的损伤指标;张翰等<sup>[9]</sup>提出了一种基于横向布贴光纤光栅光谱图像分析的孔边裂纹诊断方法,根据应力分布情况横向布置传感器感知裂纹尖端横向应力梯度的变化并反推传感器反射光谱的图像规律,通过反射谱次峰位置与裂纹扩展长度的关系对孔边裂纹进行监测;张卫方等<sup>[10]</sup>对上述方案进行改进,在纵向与横向均布置光纤光栅传感器以感知裂纹尖端的纵向和横向非均匀应变的变化,建立反射光谱图像与裂纹扩展之间的关系并进行孔边裂纹监测;Jin Xin等<sup>[11]</sup>利用均匀光纤光栅和切趾光纤光栅进行裂纹监测,从光栅反射谱的中心波长偏移、旁瓣与主瓣之比和信息熵中提取出了裂纹信息;王田天等<sup>[12]</sup>利用有限元模拟了裂纹扩展过程,并以传输矩阵法重构了光纤光栅的反射谱,通过中心波长、展宽、波峰数、反射谱面积、损伤谱与健康谱的重合面积、分形维数、相关系数7个损伤特征,建立诊断模型实现了对裂纹长度的监测。国内外的研究者开展了以光纤传感器为基础的孔边裂纹监测研究,但大多依靠多个损伤特征进行监测,过多的损伤特

征不仅对监测设备要求较高且增加了监测系统工作量,延长了运算时间<sup>[13]</sup>。

本文对含单孔铝合金板的孔边裂纹问题进行研究,以小波分析、极值插值法提取应变数据包络线;通过BP神经网络相关理论对应变数据包络线与疲劳扩展 $a-N$ 曲线之间的关系进行分析,建立孔边裂纹监测模型,并通过试验件对监测模型进行验证。

## 1 光纤光栅传感原理

光纤光栅传感系统由宽带光源、光纤传输线、光纤光栅传感器、光纤耦合器以及光纤解调仪组成,光纤光栅传感系统组成如图1所示。

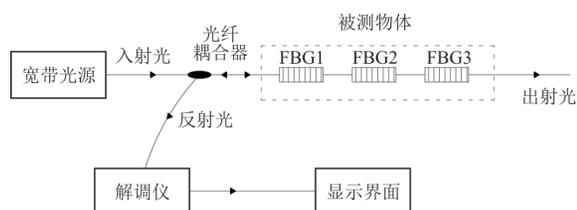


图1 光纤光栅传感系统组成

Fig. 1 Composition of optical fiber grating sensing system

宽带光源发出具有一定宽度的光通过光纤耦合器入射到光纤光栅应变传感器的光栅中。入射光受到光栅的波长选择性作用,符合条件的光发生反射,并再次经光纤耦合器进入光纤解调仪。被测物体表面的应变分布发生变化会导致反射光的中心波长发生变化,对反射光中心波长的偏移量进行分析可以得到应变分布的变化情况,光纤光栅传感原理如图2所示。

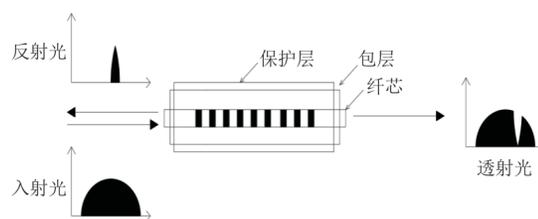


图2 光纤光栅传感原理<sup>[14]</sup>

Fig. 2 Optical fiber grating sensing principle<sup>[14]</sup>

## 2 含孔铝合金板疲劳加载试验

### 2.1 试验件参数

以含孔铝合金板模拟机身壁板等含孔结构进

行分析,试验板材料为 2A12 各向同性铝合金,板长为 180 mm,宽为 40 mm,厚为 3 mm,孔直径为 6 mm,预制孔边单侧角裂纹的长度与深度均为 0.5 mm,试验件示意图如图 3 所示,实物图如图 4 所示。

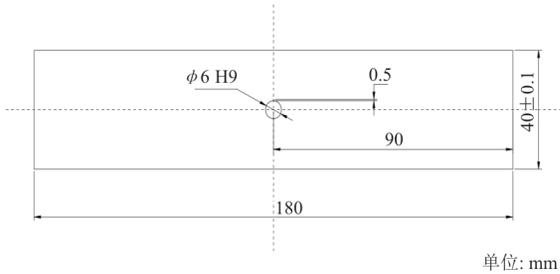


图 3 试验件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test piece



图 4 试验件实物图

Fig. 4 Physical drawing of test piece

## 2.2 试验系统搭建

疲劳加载试验系统由疲劳试验机、光纤光栅解调仪、光纤光栅应变传感器、光纤光栅采集软件组成,疲劳试验机如图 5 所示。



图 5 疲劳试验机

Fig. 5 Fatigue testing machine

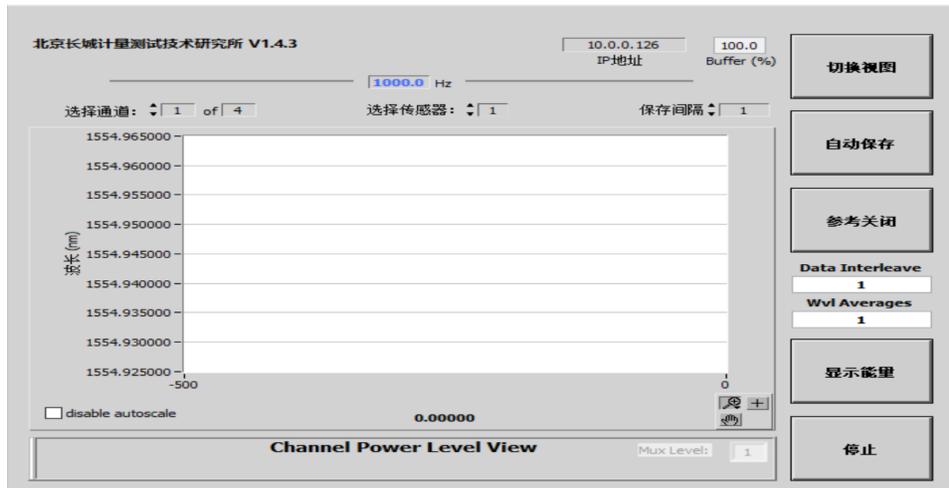
试验中所需的光纤光栅解调仪、光纤光栅应变传感器、光纤光栅采集软件均为航空工业北京长城计量测试技术研究所自研,光纤光栅传感系统如图 6 所示。



(a) 光纤光栅解调仪



(b) 光纤光栅应变传感器



(c) 光纤光栅采集软件

图 6 光纤光栅传感系统

Fig. 6 Fiber grating sensing system

### 2.3 光纤光栅传感器布设

在裂纹扩展过程中,裂纹尖端的应变场会随裂纹尖端位置的变化而变化,因此光纤光栅应变传感器主要布置在预制有裂纹的一侧,可得到变化明显的应变信号。同时在预试验中发现裂纹并不会完全沿金属板中线扩展,会发生向上或向下的偏移,因此光纤光栅应变传感器布设方向应垂直于预制裂纹方向。根据上述分析确定传感器布置方式如下:在无预制裂纹一侧距孔边 0.5 mm 处布置一支传感器即 FBG1,在孔边预制裂纹一侧沿载荷施加方向布置两支传感器,即 FBG2、FBG3,FBG2 距孔边 0.5 mm,FBG3 距孔边 6.5 mm。为与孔边传感器采集的数据形成对比并表征载荷变化情况,在孔正下方距孔 15 mm 处布置一支传感器,即 FBG4。光纤光栅应变传感器与预制的孔边单侧角裂纹位于试验件同一表面,其布设示意图如图 7 所示,布置实物图如图 8 所示。

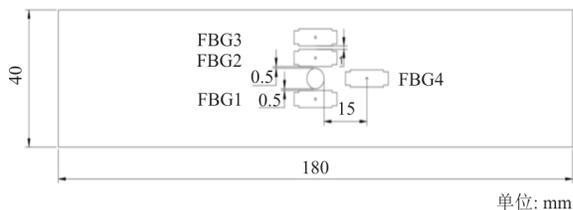


图 7 光纤光栅传感器布设示意图

Fig. 7 Schematic diagram of fiber grating sensor layout

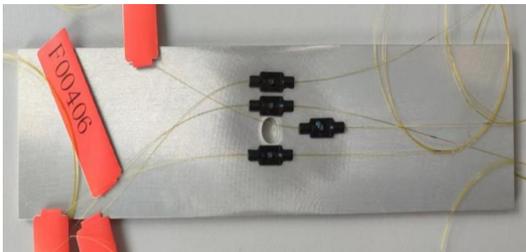


图 8 光纤光栅传感器布设实物图

Fig. 8 Physical layout diagram of fiber grating sensor

### 2.4 疲劳加载试验

选取两件含孔铝合金板进行静力加载试验,得到试验件的破坏载荷约为 52 kN;选取 3 件试验件进行疲劳预试验,确定疲劳载荷的峰值为破坏载荷的 30%,即对试验件施加的载荷峰值为 15.6 kN。同时为便于观察裂纹长度,以破坏载荷的 5% 即 2.6 kN 作为标识载荷的峰值,在标识载荷作用下裂纹几乎不发生扩展。疲劳加载试验在室温、大气环境下进行,取应力比  $R=0.1$ 。对含孔

铝合金板施加等幅载荷,每 1 000 次疲劳载荷加载后,以标识载荷进行 1 000 次加载,直到试验件断裂,疲劳加载试验如图 9 所示。

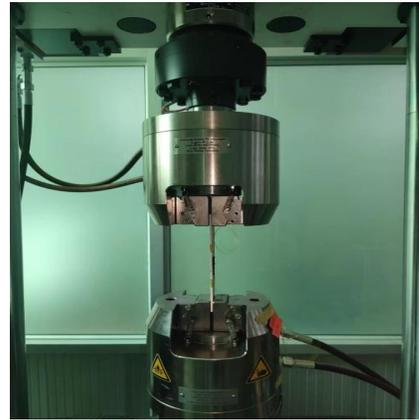


图 9 疲劳加载试验

Fig. 9 Fatigue loading test

试验件断裂后停止试验,利用 JX13C 型图像处理万能工具显微镜进行断口判读以确定裂纹在不同循环次数时的长度。JX13C 型图像处理万能工具显微镜采用 CCD 图像处理技术,对试验件断口进行拍照并将图片转化为数字信号显示;以其自带的平面测量软件对裂纹长度进行测量,取代传统显微镜的目视测量。以疲劳加载次数  $N$  为横坐标、试验件无传感器一侧表面孔边裂纹长度  $a$  为纵坐标,绘制  $a-N$  曲线如图 10 所示。由于试验件加工精度、试验中夹持位置重复性等因素,导致其裂纹扩展长度存在分散性。

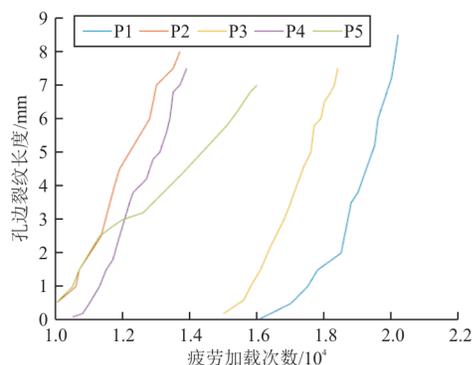


图 10 试验件无传感器一侧  $a-N$  曲线

Fig. 10  $a-N$  curve of the sensorless side of the test piece

## 3 监测模型构建

监测模型构建主要包括数据预处理剔除异常值,极值法、小波分解结合提取包络,BP 神经网络拟合构建监测模型等步骤,具体流程如图 11

所示。

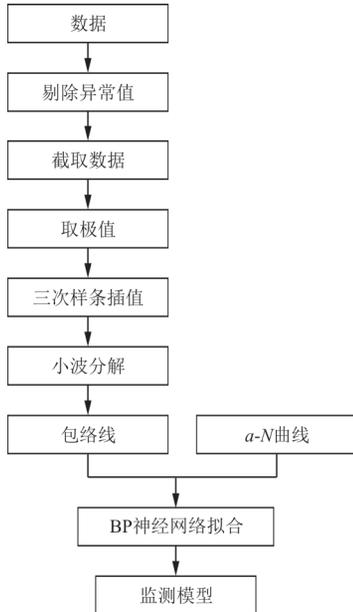
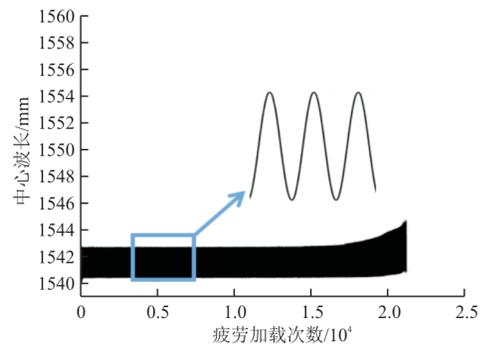


图 11 数据分析流程图

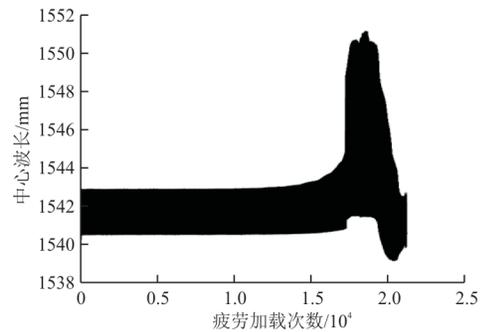
Fig. 11 Data analysis flow chart

### 3.1 截取数据

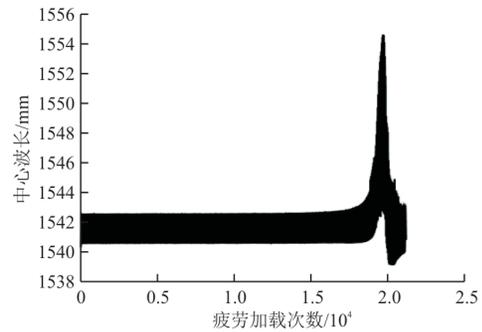
由图 10 可知,试验件 P1 在 20 000 次循环后断裂,比其他试验件能获得更多的数据且裂纹数据较详细,以试验件 P1 为例对监测模型的构建过程进行说明。试验件 P1 的波形数据如图 12 所示,图 12(a)中框选部分为波形数据局部放大图,加载的疲劳载荷为等幅疲劳载荷,因此曲线内部为相应的正弦曲线。FBG1 一侧无预制裂纹,试验件即将断裂时其波形发生变化;FBG2 距离孔较近且有预制裂纹,对预制裂纹初期扩展比较敏感,裂纹穿过 FBG2 后光栅断裂,此后采集的数据中存在较多异常;FBG3 没有 FBG2 对裂纹初始扩展敏感,但后期的数据变化明显,包含大部分裂纹扩展信息;FBG4 表征载荷变化情况,其数据仅在试验件即将断裂时产生变化,因此选择 FBG2 与 FBG3 采集的数据进行分析更加合适。在图 12(c)与图 12(d)中,当预制裂纹未扩展时,波形较平稳。而当裂纹开始扩展并不断靠近光纤光栅应变传感器时,光纤光栅应变传感器感受到的应变不断增大,光纤光栅的中心波长偏移量增加。当裂纹尖端扩展到传感器附近时,光纤光栅的中心波长偏移量短时间内趋于稳定,此时传感器感受的应变达到最大。当裂纹穿过传感器时,光栅断裂,光纤光栅应变传感器损坏,其中心波长偏移量迅速减小。



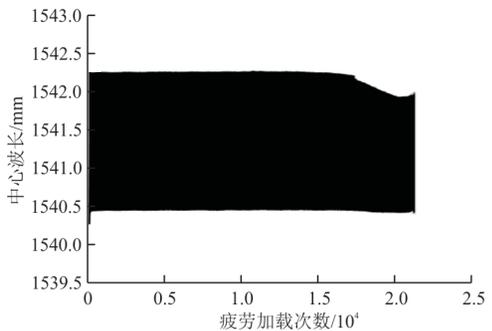
(a) FBG1 数据



(b) FBG2 数据



(c) FBG3 数据



(d) FBG4 数据

图 12 传感器 1~4 所采集到的波形数据

Fig. 12 Waveform data collected by sensors 1~4

### 3.2 预制角裂纹扩展判断

在进行裂纹扩展长度监测之前需要对预制角裂纹的扩展进行判断。本文根据试验数据特点提

出一种基于中心波长数据低频分量的孔边裂纹扩展判断方法。通过分析可知FBG2采集的数据可反映裂纹初步扩展的信息,因此对P1试验件中FBG2采集的数据进行小波分解,并将数据范围映射到(1,2)内,得到的低频信号如图13所示。

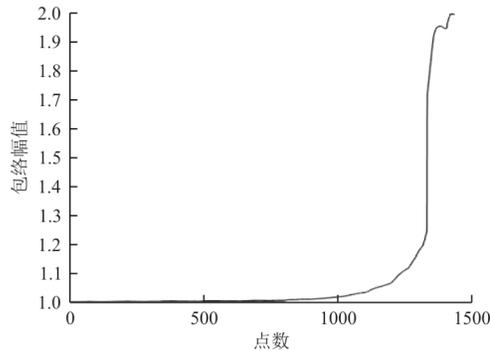


图 13 低频信号

Fig. 13 Low frequency signal

对裂纹扩展前后低频信号的变化进行分析、对比,引入孔边裂纹扩展判断因子 $\xi$ 以及孔边裂纹扩展判断阈值 $N$ 作为裂纹扩展的判断依据。孔边裂纹扩展判断因子通过式(1)计算得出:

$$\xi = \frac{y_i - m}{m} \quad (1)$$

式中: $y_i$ 为低频信号中第 $i$ 个点的幅值大小; $m$ 为低频信号中第1个点到第 $0.2i$ 个数据点的平均值。

孔边裂纹扩展判断阈值 $N$ 通过对试验数据的分析总结得出,根据试验数据及式(1)对各试验件孔边裂纹扩展时对应的孔边裂纹扩展判断因子 $\xi$ 进行计算,得到试验件裂纹扩展判断因子 $\xi$ 如表1所示。

表 1 试验件裂纹扩展判断因子  
Table 1 Judgment factors of crack propagation of test pieces

试验件	裂纹扩展时的疲劳加载次数	FBG2判断因子
P1	9 500	0.003 5
P2	5 500	0.003 6
P3	11 500	0.004 6
P4	7 300	0.003 2
P5	8 500	0.003 8

根据表1结果,确定FBG2孔边裂纹扩展判断阈值 $N$ 为0.003,当裂纹扩展判断因子 $\xi$ 大于裂纹扩展判断阈值 $N$ 时,认为预制裂纹开始扩展,判断结果如表2所示。

表 2 试验件裂纹扩展判断结果

Table 2 Judgment results of crack propagation of test pieces

试验件	试验中的疲劳加载次数	计算出的疲劳加载次数	误差
P1	9 500	8 528	972
P2	5 500	4 634	866
P3	11 500	9 698	1 802
P4	7 300	7 026	274
P5	8 500	8 300	200

从表2可以看出:裂纹扩展时的疲劳加载次数小于试验记录的疲劳加载次数,最大误差1 800次,最小误差200次,在孔边裂纹监测过程中,可以及时发现裂纹的扩展情况。

### 3.3 包络提取

包络分析是常用的故障诊断方法,在齿轮箱、轴承等旋转机械的故障诊断中应用广泛<sup>[15-16]</sup>,本文以FBG2的波形数据为例对包络提取方法进行详细介绍。

#### 3.3.1 数据截取

图12(b)中,当疲劳加载次数达到18 000次左右,FBG2采集的数据开始出现剧烈变化,同时裂纹在18 000次加载后也清晰可见。因此可对18 000次加载内的数据进行分析,去除变化过于剧烈的数据,并以箱线图法去除异常值,得到的截取数据如图14所示,其中包含0~17 000次加载的全部数据,能够反映孔边裂纹从初始扩展到肉眼可见的全过程。

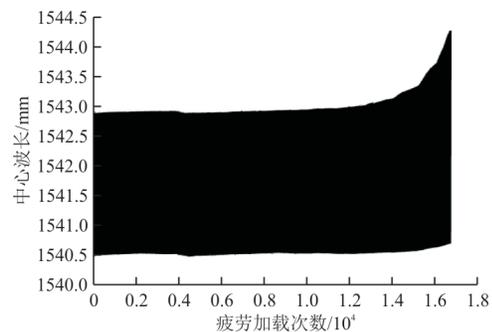


图 14 截取数据

Fig. 14 Intercept data

#### 3.3.2 极值法取包络

希尔伯特变换、小波变换等包络提取法在提取含有正弦波形的信号包络时需要去除信号中的直流分量,而光纤光栅应变传感器采集的数据量较大、内部波形不规则,信号中的直流分量无法完

全去除,无法得到较理想的包络线<sup>[17-23]</sup>。本文以极值插值法为基础,提取截取数据的峰值与谷值并计算光纤光栅传感器感受的微应变,随后进行插值得到的应变数据包络线如图 15 所示,可以看出:包络线内部依然为正弦曲线且含有较多毛刺。

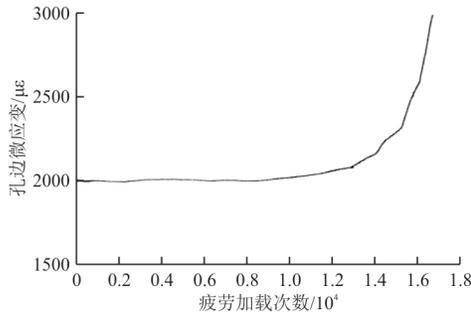


图 15 应变数据包络线  
Fig. 15 Envelope of strain data

采用小波分解对图 15 所示的应变数据包络线进行平滑处理,提取小波分解第一层分解的低频信息并进行指数函数曲线拟合,为方便后续分析将数据范围映射到(1,2)内,得到的应变变化包络线如图 16 所示。

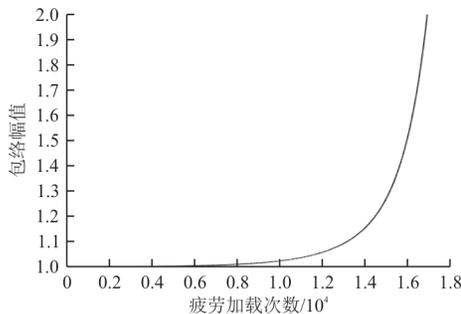


图 16 应变变化包络线  
Fig. 16 Envelop of strain variation

以同样的包络提取流程对试验件 P1 中 FBG3 采集中心波长数据进行分析,FBG3 孔边应变变化包络线如图 17 所示。

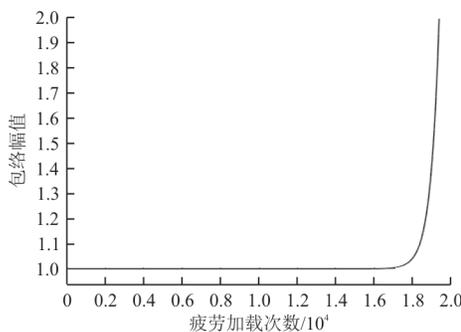


图 17 FBG3 孔边应变变化包络线  
Fig. 17 Strain change envelope of FBG3 hole

对比图 16 与图 17 的应变数据包络线,FBG2 的应变数据包络线在 8 500 次加载时出现明显变化,反映了预制裂纹的初试扩展阶段;由于 FBG3 距孔边较远,因此其应变数据包络线在 17 000 次加载前比较平稳,在 17 000 次加载时出现明显变化,反映了裂纹穿透 FBG2 后的扩展阶段。

### 3.4 角裂纹穿透判断

对比图 16 与图 17 的应变数据包络线,FBG2 的应变数据包络线在 8 500 次加载时出现明显变化,反映了预制裂纹的初始扩展阶段;由于 FBG3 距孔边较远,因此其应变数据包络线在 17 000 次加载前比较平稳,在 17 000 次加载时出现明显变化,反映了裂纹穿过 FBG2 后的扩展阶段,此时裂纹已经穿透试验件的壁厚。综上,FBG2 的孔边应变变化包络线可用于孔边裂纹穿透的判断,根据裂纹扩展判断方法相应地提出一种基于孔边应变变化包络线的孔边裂纹穿透判断方法。相应地引入孔边裂纹穿透判断因子  $\delta$  以及孔边裂纹穿透判断阈值  $Q$  作为裂纹穿透的判断依据,通过分析对比得到孔边裂纹穿透判断阈值  $Q=0.15$ 。

当计算得出的孔边裂纹穿透判断因子  $\delta$  大于孔边裂纹穿透判断阈值  $Q$  时,认为孔边预制裂纹穿透了单孔板,裂纹穿透判断结果如表 3 所示。

表 3 试验件裂纹穿透判断结果

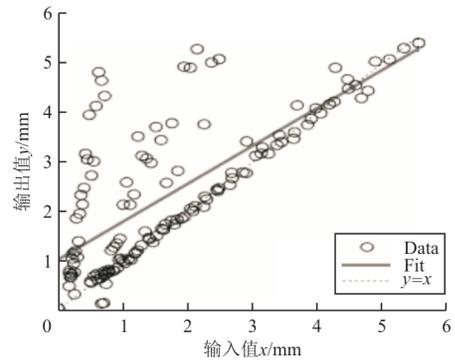
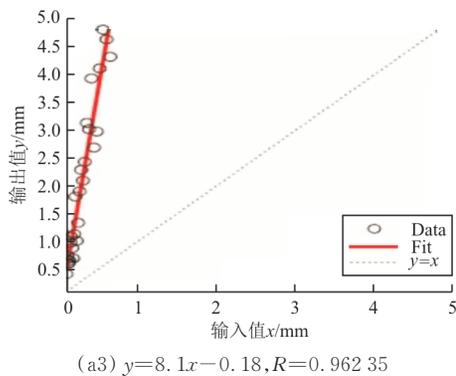
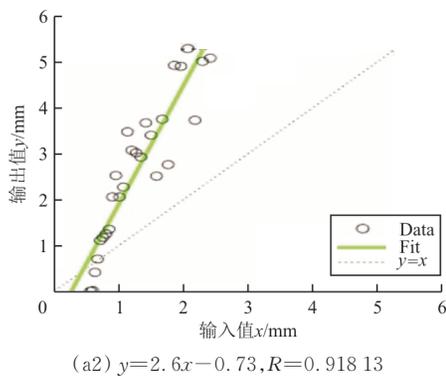
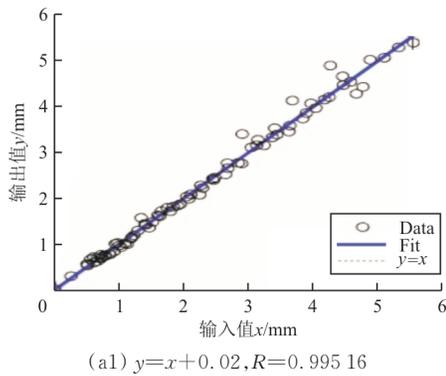
Table 3 Judgment results of crack penetration of test pieces

试验件	试验中的疲劳加载次数	计算出的疲劳加载次数	误差
P1	14 000	13 740	260
P2	10 000	9 827	173
P3	14 800	14 632	168
P4	10 300	10 055	245
P5	10 500	9 500	1 000

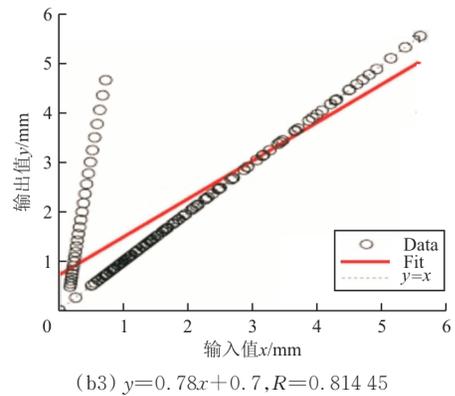
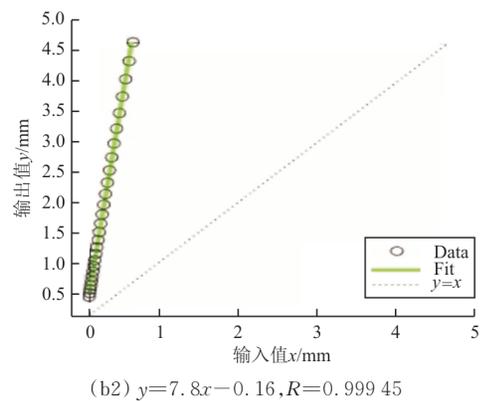
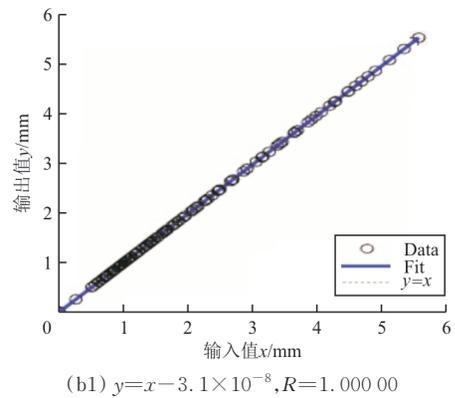
### 3.5 BP 神经网络训练

将各试验件的  $a-N$  曲线与其包络线进行对比,发现两者有大致相同的变化趋势,因此监测模型可以通过计算  $a-N$  曲线与包络线之间的映射关系进行构建。BP 神经网络是目前应用最广泛的神经网络,可通过输入集与相应的输出集训练出一个网络实现函数逼近<sup>[24-27]</sup>。以所有试验件 FBG2 的应变数据包络线作为 BP 神经网络的输入集合,

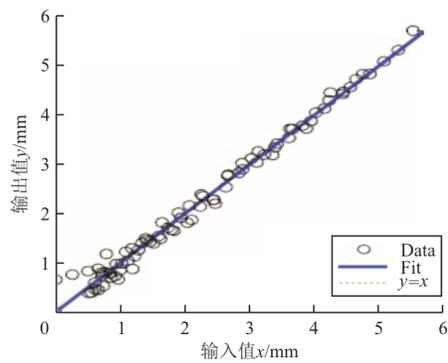
以所有  $a-N$  曲线作为 BP 神经网络的输出集合进行隐藏层训练。在隐藏层训练时考虑了三种训练方法:莱文贝格—马夸特法、贝叶斯正则化法与量化共轭梯度法。以回归系数  $R$  作为训练结果的评价指标,三种训练方法的训练结果回归系数  $R$  如图 18 所示,其中横坐标为原始输入值,纵坐标为神经网络输出值,二者相关程度以回归系数  $R$  值表示。 $R$  值越接近 1 时,表明训练效果越好,根据  $R$  值的对比,选择贝叶斯正则化方法作为 BP 神经网络隐含层的训练方法,并且在训练时设定输入集的 80% 为训练集,10% 为验证集,10% 为测试集,验证集与测试集从输入集中随机选择且不参与训练。设置训练次数为 1 000 次,从中选择最优训练结果。



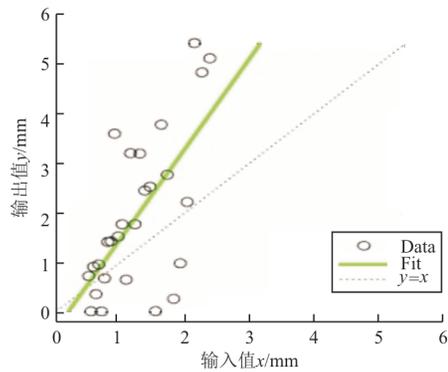
(a) 莱文贝格—马夸特方法



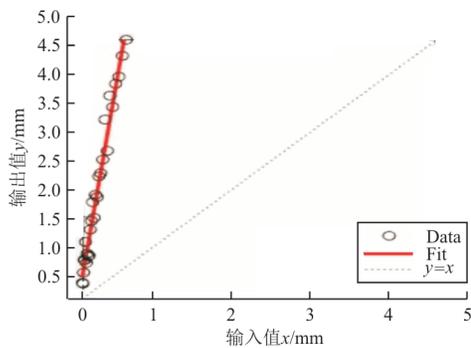
(b) 贝叶斯正则化法



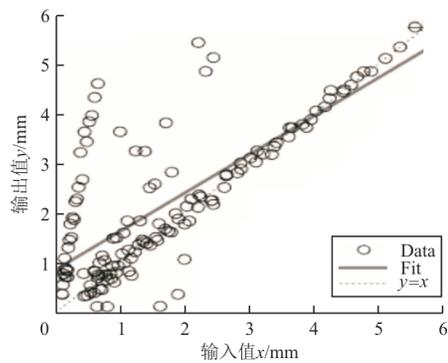
(c1)  $y=0.99x+0.015, R=0.99342$



(c2)  $y=1.8x-0.41, R=0.64973$



(c3)  $y=7.8x-0.13, R=0.98817$



(c4)  $y=0.77x+0.85, R=0.74567$

(c) 量化共轭梯度法

图 18 三种训练方法的训练结果回归系数  
Fig. 18 Regression coefficient of training results of three training methods

相应地对 FBG3 对应数据的隐藏层进行训练, 最终得到的孔边裂纹监测模型如图 19 所示。

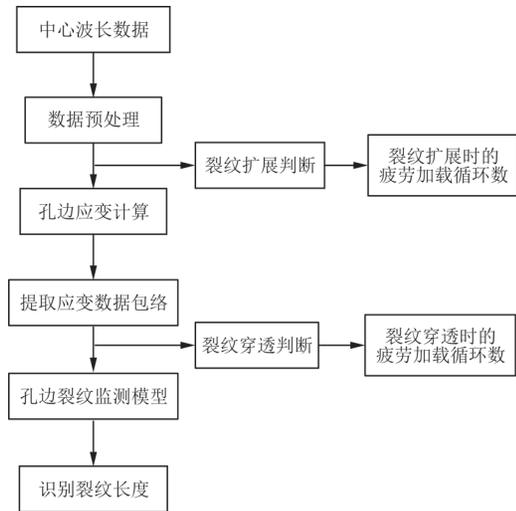
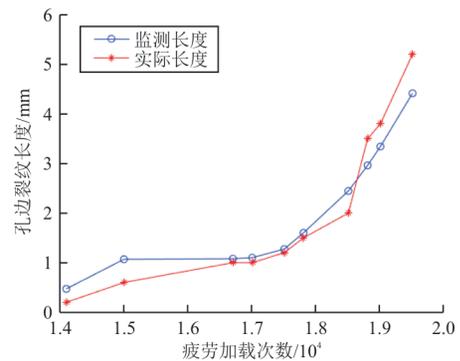


图 19 孔边裂纹监测模型

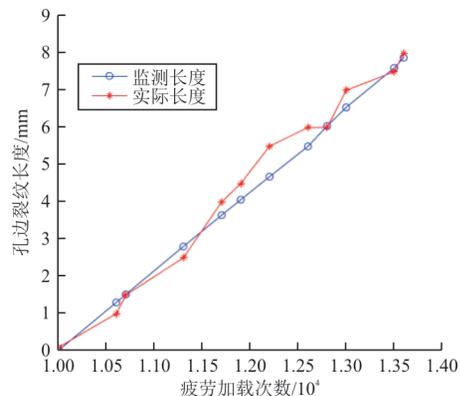
Fig. 19 Monitoring model of hole edge crack

### 3.6 监测模型验证

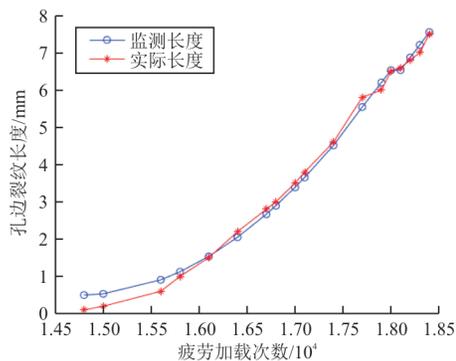
将 P1~P5 试验件的 FBG2、FBG3 数据包络线分别输入到孔边裂纹监测模型中, 经监测模型计算得到的裂纹长度监测结果如图 20 所示。



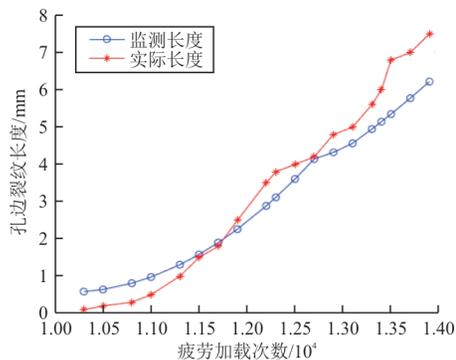
(a) P1 监测结果



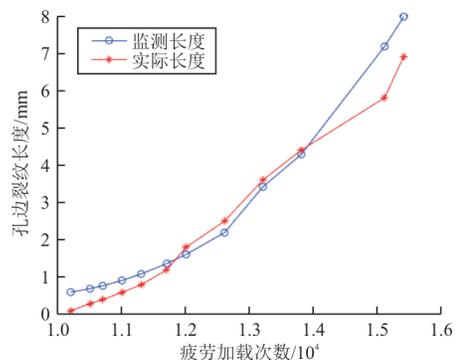
(b) P2 监测结果



(c) P3 监测结果



(d) P4 监测结果



(e) P5 监测结果

图 20 裂纹长度监测结果

Fig. 20 Monitoring results of crack length

通过基于BP神经网络的孔边裂纹扩展长度监测方法计算出孔边裂纹长度与试验记录的孔边裂纹误差长度之间的最小误差0.01 mm,最大误差1.4 mm,平均误差0.36 mm。误差小于1 mm以内为有效监测,监测准确度达到了97.2%。

## 4 结 论

1) 针对含孔金属结构的孔边裂纹问题,本文建立了孔边裂纹监测模型,此模型能够判断孔边

角裂纹的扩展与穿透,并通过光纤光栅应变传感器中心波长偏移量识别出含单孔铝合金板孔边裂纹的扩展长度,监测准确度达到了97.2%。

2) 孔边裂纹监测模型弥补了光谱图像监测法在设备、成本、系统重量等方面的不足,可应用于结构健康监测、地面疲劳试验等多种场景。

3) 本文所涉及的极值法取包络适用于大数据量、内部不规则波形的包络提取,对数据形式无特殊要求,可移植性较强。

虽然此监测模型在一定程度上实现了孔边裂纹扩展长度的监测,但是在监测准确性、训练集数量等方面依然存在不足。

## 参 考 文 献

- [1] 郑参谋. 某型飞机耳片结构疲劳断口分析[J]. 科技创新导报, 2016, 13(14): 1-3.  
ZHENG Canmou. Fatigue fracture analysis of a type of lug structure [J] Science and Technology Innovation Guide, 2016, 13(14): 1-3. (in Chinese)
- [2] 方旭, 薛景锋, 宋昊, 等. 飞机结构健康监测系统数据处理及在线应用[J]. 计测技术, 2019, 39(6): 1-7.  
FANG Xu, XUE Jingfeng, SONG Hao, et al. Data processing and online application of aircraft structure health monitoring system [J]. Measurement Technology, 2019, 39(6): 1-7. (in Chinese)
- [3] 邸军. 某机型耳片不同结构疲劳性能研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.  
DI Jun. Study on fatigue performance of different structures of ear piece of a certain model [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019. (in Chinese)
- [4] 景博, 黄崧琳, 王生龙, 等. 军用飞机PHM系统一体化设计架构分析[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 64-73.  
JING Bo, HUANG Songlin, WANG Shenglong, et al. Analysis on integrated design of military aircraft PHM system [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 64-73. (in Chinese)
- [5] 王昭哈, 燕群, 陈永辉, 等. 航空发动机典型材料超高周疲劳试验技术研究综述[J/OL]. 航空工程进展: 1-11[2022-11-15].  
WANG Zhaohan, YAN Qun, CHEN Yonghui, et al. A review of the research on the VHCF test technology for aero-engine typical materials [J/OL]. Advances in Aeronautical Science and Engineering: 1-11[2022-11-15]. (in Chinese)
- [6] 于翀, 宋昊. 航空结构件孔边裂纹监测技术研究综述[J]. 航空科学技术, 2021, 32(12): 1-17.  
YU Chong, SONG Hao. Summary of research on hole edge

- crack monitoring technology of aviation structure[J]. Aviation Science and Technology, 2021, 32(12): 1-17. (in Chinese)
- [7] SAGAR J, NING Yimiao, WU Bintao, et al. Cold crack monitoring and localization in welding using fiber Bragg grating sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(11): 9228-9236.
- [8] BETZ D C, STASZEWSKI W J, THURSBY G, et al. Multi-functional fibre Bragg grating sensors for fatigue crack detection in metallic structures[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2006, 220(5): 453-461.
- [9] 张翰, 金博, 张萌. 一种基于横向布贴光纤光栅光谱图像分析的孔边裂纹诊断方法: CN106767475B[P]. 2019-10-18.  
ZHANG Han, JIN Bo, ZHANG Meng. A hole edge crack diagnosis method based on spectral image analysis of transversely pasted fiber Bragg grating: CN106767475B [P]. 2019-10-18. (in Chinese)
- [10] 张卫方, 金博, 张萌, 等. 一种基于两种布贴方式下光纤光栅光谱图像分析的孔边裂纹诊断方法: CN106840869B[P]. 2019-08-23.  
ZHANG Weifang, JIN Bo, ZHANG Meng, et al. A hole edge crack diagnosis method based on spectral image analysis of fiber Bragg grating under two distribution modes: CN106840869B[P]. 2019-08-23. (in Chinese)
- [11] JIN Xin, YUAN Shenfang, CHEN Jian. On crack propagation monitoring by using reflection spectra of AFBG and UFBG sensors[J]. Sensors & Actuators: Physical, 2018, 285: 491-500.
- [12] 王田天, 王钦民, 阳劲松, 等. 基于光纤布拉格光栅的孔边疲劳裂纹监测研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(5): 1614-1625.  
WANG Tiantian, WANG Qinmin, YANG Jinsong, et al. Research on hole edge fatigue crack monitoring based on fiber Bragg grating[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2022, 53(5): 1614-1625. (in Chinese)
- [13] 郑丁午. 航天器金属结构冲击与疲劳裂纹扩展分布式光纤监测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.  
ZHENG Dingwu. Research on distributed optical fiber monitoring of impact and fatigue crack propagation of spacecraft metal structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [14] 王莉, 申雅峰. 基于FPGA的光纤传感解调数据处理系统[J]. 计测技术, 2022, 42(2): 79-84.  
WANG Li, SHEN Yafeng. Data processing system of optical fiber sensing demodulation based on FPGA[J]. Measurement Technology, 2022, 42(2): 79-84. (in Chinese)
- [15] MANNIA F B, JOAN R C, JUDIN G. Post-processing algorithms for distributed optical fiber sensing in structural health monitoring applications[J]. Structural Health Monitoring, 2020, 20(2): 1-10.
- [16] 别锋锋, 郭越, 谷晟, 等. 改进型ESMD在齿轮箱轴承故障诊断中的应用[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2021, 33(3): 32-41.  
BIE Fengfeng, GUO Yue, GU Sheng, et al. Application of improved ESMD in gear box bearing fault diagnosis [J]. Journal of Changzhou University (Natural Science Edition), 2021, 33(3): 32-41. (in Chinese)
- [17] 王萍. 基于改进的小波阈值去噪及其在齿轮故障诊断中的应用[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.  
WANG Ping. Denoising based on improved wavelet threshold and its application in gear fault diagnosis[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015. (in Chinese)
- [18] 许昕, 潘宏侠. 改进的EMD在齿轮箱故障诊断中的应用研究[J]. 机械传动, 2014, 38(10): 4-8.  
XU Xin, PAN Hongxia. Research on the application of improved EMD in gearbox fault diagnosis [J]. Mechanical Transmission, 2014, 38(10): 4-8. (in Chinese)
- [19] 石万. 基于EMD和小波变换的结构损伤识别方法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.  
SHI Wan. Research on structural damage identification method based on EMD and wavelet transform [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019. (in Chinese)
- [20] 常竞, 温翔. 基于改进EMD的滚动轴承故障增长特征提取和损伤评估技术[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(5): 1474-1477, 1481.  
CHANG Jing, WEN Xiang. Fault growth feature extraction and damage assessment technology of rolling bearings based on improved EMD [J]. Computer Application Research, 2019, 36(5): 1474-1477, 1481. (in Chinese)
- [21] 罗大双. EMD理论研究及其在裂纹损伤检测中的应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.  
LUO Dashuang. Theoretical research of EMD and its application in crack damage detection[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [22] 朱兵, 潘宏侠. 齿轮故障信号的线性插值局域均值分解方法[J]. 自动化仪表, 2010, 31(7): 12-14, 18.  
ZHU Bing, PAN Hongxia. Linear interpolation local mean de composition method for gear fault signal[J]. Automation Instrument, 2010, 31(7): 12-14, 18. (in Chinese)
- [23] 刘彬, 戴桂平, 林洪彬. 一种改进的基于小波变换的包络提取算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2006(1): 34-37.  
LIU Bin, DAI Guiping, LIN Hongbin. Research on an improved envelope extraction algorithm based on wavelet transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006(1): 34-37. (in Chinese)
- [24] 刘洋. 基于卷积神经网络的风电机滚动轴承故障诊断研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.

