

基于 DBSCAN 算法与 GMM 理论的 铝合金板孔边疲劳裂纹萌生监测

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, 北京, 100095)

摘要 针对航空结构中多孔铝合金板在疲劳载荷作用下的孔边裂纹萌生监测问题, 以光纤传感系统为基础结合小波分解、含噪声的密度空间聚类以及高斯混合模型, 提出了一种孔边裂纹萌生监测方法。首先以光纤光栅传感系统采集循环加载条件下多孔铝合金板孔边裂纹萌生至结构断裂全程中孔边微应变并构建孔边微应变曲线。对孔边微应变曲线进行小波分解, 得到微应变曲线的低频分量与高频分量, 并以低频分量最小值及高频分量突变作为孔边裂纹萌生特征。在分析裂纹萌生时引入 DBSCAN 算法与 GMM 理论用于计算孔边裂纹萌生时的疲劳加载循环数并比较与分析得到多孔铝合金板孔边主裂纹的萌生位置以及孔边主裂纹萌生时的疲劳加载循环数。试验结果表明: 此监测方法能够准确定位出孔边主裂纹的萌生位置, 计算孔边主裂纹萌生时的疲劳加载循环数, 且疲劳加载循环数计算误差在 5% 以内。在未来可应用于全机地面疲劳试验、结构健康监测等多种场景。

关键词 多孔铝合金板; 光纤传感; 孔边裂纹; 裂纹萌生; DBSCAN 算法; GMM 理论

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.02.010

中图分类号 V219 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)02-0085-10

A Method of Fatigue Crack Initiation-Monitoring at Hole Edge of Aluminum Alloy Plate Based on DBSCAN Algorithm and GMM Theory

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

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract In view of hole edge crack initiation-monitoring of porous aluminum alloy plates in aviation structures under fatigue load, a method of hole edge crack initiation-monitoring is proposed based on the fiber optic sensing system in combination with wavelet decomposition, density based spatial clustering of applications with noise and Gaussian mixture model. Firstly, a fiber optic grating sensing system is used to collect the micro strain at the edge of a porous aluminum alloy plate during the entire process from crack initiation to structural fracture under cyclic loading conditions, and a micro strain curve at the edge of the hole is constructed. Wavelet decomposition on the micro strain curve at the hole edge is performed to obtain the low-frequency and high-frequency components of the micro strain curve, and the minimum value of the low-frequency component and the sudden change of the high-frequency component are taken as the

收稿日期: 2023-09-06

基金项目: 航空科学基金(20185644003)

作者简介: 于 翀(1997-), 男, 河北保定人, 硕士, 研究方向为结构健康监测技术。E-mail: 745938495@qq.com

通信作者: 宋 昊(1981-), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为光纤传感技术。E-mail: sh208@139.com

引用格式: 于翀, 宋昊, 刘春红, 等. 基于 DBSCAN 算法与 GMM 理论的铝合金板孔边疲劳裂纹萌生监测[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(2): 85-94. YU Chong, SONG Hao, LIU Chunhong, et al. A Method of Fatigue Crack Initiation-Monitoring at Hole Edge of Aluminum Alloy Plate Based on DBSCAN Algorithm and GMM Theory[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(2): 85-94.

characteristics of crack initiation at the hole edge. The crack initiation being analyzed, the number of fatigue loading cyclic number is calculated by DBSCAN algorithm and GMM theory when the crack at the hole edge is initiated, and the initiation position of the main crack at the hole edge of the porous aluminum alloy plate and the number of fatigue loading cyclic number are compared and analyzed when the main crack at the hole edge is initiated. The test results show that this monitoring method is capable of accurately locating the initiation position of the main crack at the hole edge, and calculating the fatigue loading cyclic number when the main crack at the hole edge initiates, and the calculation error of the fatigue loading cyclic number is within the range of 5%. In the future, the method can be applied to the ground fatigue test of a whole-aircraft, structural health monitoring and other scenarios.

Key words porous aluminum alloy plate; fiber optic sensing; cracks at the edge of the hole; crack initiation; DBSCAN algorithm; GMM theory

多孔铝合金板是构成飞机机身、机翼或蒙皮的重要结构。由于孔洞的存在,飞机含孔结构在传递载荷时会在孔附近出现应力集中,使结构在服役过程中出现疲劳裂纹^[1]。当结构中含有多个铆钉孔或螺栓孔时,单孔的孔边萌生主裂纹时会加速其他孔的孔边萌生裂纹,其他裂纹的萌生与扩展又会加速主裂纹的扩展,最终形成多部位损伤^[2]。当多个孔边裂纹连通时,多孔结构的强度迅速降低,结构功能失效^[3]。因此对飞机各部件中的多孔结构进行孔边裂纹萌生监测有助于提高飞行安全性,降低维护成本,避免灾难性的事故发生,辅助飞机多孔结构的设计与优化。

光纤光栅传感器体积小、重量轻、对微小损伤比较敏感、适用于电磁环境中,被广泛应用于航空航天结构裂纹监测^[4-8]。Mizutani 等将小直径光纤传感器嵌入到复合材料内部,通过光纤传感器反射谱宽度的变化,实现了对横向裂纹的监测^[9];SANS 等将嵌入式光纤光栅传感器埋入试样中,通过数值计算的方法得到了轴向应变曲线,识别出了裂纹尖端位置^[10];Bao 等以光纤光栅传感器为基础,运用频谱互相关分析方法和损伤因子对疲劳断裂进行综合分析,完成了孔边裂纹的监测^[11];He 等以光纤布拉格光栅传感器为基础,并融入了高阶扩展有限元法和传输矩阵法,根据高反射强度谱对裂纹扩展情况进行了监测和预报^[12];袁慎芳等在研究裂纹扩展问题时,以反射谱主峰的偏移量、面积、次峰峰值以及三峰峰值 3 个特征进行裂纹的识别,并利用人工神经网络建立其中的关系^[13];于翀等提取了光纤光栅应变传感器采集的孔边应变数据包络线及小波分解低频分量曲线并结合 BP 神经网络等损伤识别算法实现了对单孔铝合金板孔边角裂纹扩展长度的监测^[14-15]。张翰等则给出了基于横向布贴光纤光栅光谱信号分析的孔边裂纹监测技术^[16];张卫方等在孔边纵向与横向布置光纤光栅传感器并建立了光纤光栅传感器反射光谱图与裂纹之间的关系^[17]。综

上,光纤传感损伤监测方法可以分为 3 类:光纤传感器埋入监测法、光纤传感多指标融合监测法、光谱图像判断监测法。光纤传感器埋入监测法能够针对结构内部损伤进行监测,具有监测准确、及时的特点,但对结构材料、加工工艺要求较高,甚至部分结构不允许埋入传感器;光纤传感多指标融合监测法可以在一定程度上减少误判的发生,但多指标分析对监测算法要求较高,降低监测效率,随着指标的增多,监测设备的体积、数量也会增加;光谱图像判断监测法可以通过光谱变化直接发现损伤,具有形象直观的特点,但对解调设备要求高,不仅增加了监测的成本,而且依靠图像分辨损伤极易导致误判发生。

针对上述光纤传感监测方法的不足,本文提出了基于 DBSCAN 算法与 GMM 理论的孔边裂纹萌生监测方法,以多孔铝合金板孔边张开型(I 型)裂纹为研究对象。以光纤传感系统采集的应变数据为基础,利用时频分析中典型的小波分解法进行数据处理以提取裂纹萌生特征,将含噪声的密度空间聚类算法与高斯混合模型理论相结合对高频分量进行聚类分析识别突变点位置,计算裂纹萌生时的疲劳加载循环数,实现了对多孔铝合金板孔边主裂纹萌生的监测。

1 基本理论

1.1 DBSCAN 算法

含噪声的密度空间聚类(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)算法是典型的基于密度的聚类算法。该算法不同于划分或层次聚类算法,它将具有足够高密度的区域划分为簇并进行聚类,可在空间数据库中发现任意形状的聚类而不受噪声的影响^[18]。

DBSCAN 算法在对试验数据进行聚类分析的同时可以发现与有效数据偏离程度较大的异常点,

但是对数据集中的异常点不敏感,也就无法准确识别出与有效数据偏离程度较小的异常值。除此以外,DBSCAN 算法对聚类参数的设置要求较高,不同的参数对聚类分析结果影响较大。

1.2 GMM 理论

高斯混合模型(Gaussian mixture model,GMM),是多个高斯分布函数的线性组合,能够用高斯概率密度函数精确地量化工物^[19]。高斯混合模型可以通过选择后验概率中的最大成分作为指定聚类以进行硬聚类分析,也可以使用高斯混合模型进行软聚类或模糊聚类分析,其概率分布模型,如式(1)所示。

$$P(x) = \sum_{k=1}^K W_k g(x | \mu_k, \Sigma_k) \quad (1)$$

式中: K 为高斯混合模型中组成成分的个数; g 为高斯分布密度; μ 为均值; Σ_k 为协方差矩阵; W 为高斯混合模型中组成成分的权重。

高斯混合模型可以对复杂的数据分布进行处理与分析并能够根据不同的数据分布自适应地调整簇的数量和大小,可以识别出偏离有效数据程度较小的异常值。

在采集的疲劳试验数据中,表征结构损伤的异常值具有离散性,主要表现为:突变点(异常值)可能偏离有效数据的程度较大,也可能偏离有效数据的程度较小,也可能两者兼有。使用单一的聚类算法对试验数据进行分析,往往无法得到较准确的监测结果。本文将 DBSCAN 算法与高斯混合模型理论相结合,在利用 DBSCAN 算法识别偏离有效数据程度较大的异常点的同时以高斯混合模型识别偏离有效数据程度较小的异常点,实现两者的优势互补,尽可能全面地识别出数据中的突变点。同时利用高斯混合模型可自适应调整簇的数量和大小的特点削弱参数设置对 DBSCAN 算法聚类分析结果的影响,提高监测算法的容错性。

2 疲劳加载试验

2.1 有限元仿真分析

以某型飞机实际多孔结构为参考,确定试验件材料为各向同性的 2A12 铝合金,其抗拉强度 R_m 为 560 MPa。根据孔径的不同共设计了 2 组试验件。A 组试验件长为 180 mm,宽为 72 mm,厚为 3 mm,孔直径为 6 mm。B 组试验件长为 180 mm,宽为 72 mm,厚为 3 mm,孔直径为 8 mm。为模拟多孔结构,在每件试验件中预制 3 个孔,孔距为 24 mm。含多孔铝合金板试验件实物如图 1 所示。

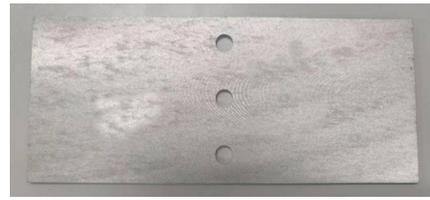


图 1 多孔铝合金板试验件实物图

首先通过 ANSYS 有限元分析软件对无裂纹的多孔铝合金板进行静力加载仿真,施加静力 $F = 25$ kN,其静力加载形式如图 2 所示,A 端施加静载荷,B 端固定,静力仿真最大主应变云图如图 3 所示。

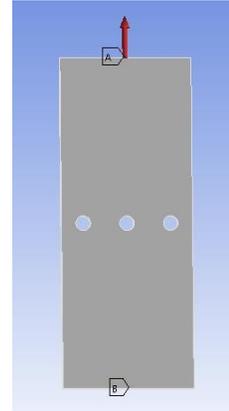


图 2 静力施加形式

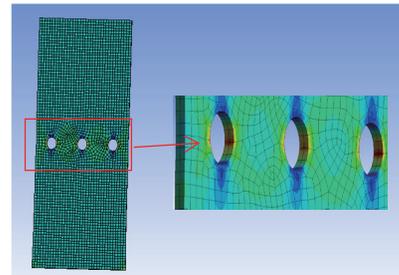


图 3 静力仿真最大主应变云图

图 3 中多孔铝合金板承受静载荷时在孔壁及圆孔边缘出现明显的应力集中效应且应力集中位置垂直于静力施加方向。在多孔铝合金服役期间,当其承受静载荷或疲劳载荷时圆孔附近的应力集中部位极易出现损伤。

对多孔铝合金板进行疲劳裂纹扩展仿真,疲劳载荷加载方向与静力加载方向一致,载荷形式为幅值 20 kN 的等幅疲劳载荷,疲劳裂纹扩展过程中孔边应变云图如图 4 所示。

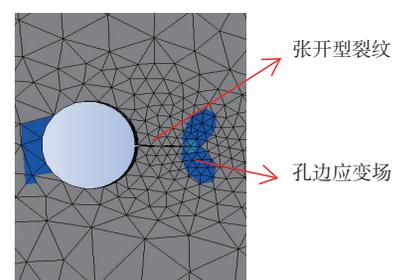


图 4 疲劳裂纹扩展过程中孔边应变云图

随着孔边裂纹的扩展,裂纹尖端的应变场呈“蝶形”且应变中心随裂纹尖端位置的改变而改变。图 3 与图 4 表明:在多孔铝合金板未萌生裂纹时孔边应变主要受孔边集中载荷的影响,在疲劳加载过程中不会产生较大变化;当孔边萌生裂纹并不断扩展时,孔边应变场的应变中心随裂纹尖端移动,孔边应变出现明显变化且在无孔边裂纹的一侧也会出现应变场。随着裂纹的延伸并不断靠近孔边的光纤光栅应变传感器,光纤光栅应变传感器采集的应变数据出现明显变化,可以实现裂纹监测。

2.2 光纤光栅传感器布局设计

根据 2.1 节有限元仿真分析及飞机实际多孔结构及其工作场景,设计了多孔铝合金板孔边主裂纹萌生监测光纤光栅应变传感器布局。

为模拟飞机机身、机翼壁板的孔边被铆钉头部覆盖的情况,在距孔①与孔③边缘 1 mm 处各粘贴一支光纤光栅应变传感器即 FBG1 与 FBG5,采集孔边裂纹萌生、扩展过程中孔边应变数据。

由于孔①左侧与孔③右侧的板材横截面积较小,所以在预实验中孔边裂纹多萌生于孔①左侧与孔③右侧。所以在孔②两侧,距孔②中心 12 mm 处各粘贴一支光纤光栅应变传感器即 FBG2、FBG4 作为辅助判断传感器。以 FBG2 为例:FBG2 距孔①中心与孔②中心均为 12 mm,当孔①左侧最先萌生裂纹时 FBG1 的数据最先发生变化,随着裂纹进一步扩展,FBG2 的数据也将发生变化,从而辅助裂纹萌生判断。当孔②左侧最先萌生裂纹时,虽然 FBG2 距离孔②较远,但由于孔①与孔③未萌生裂纹,FBG1 与 FBG5 的数据不会出现明显变化,所以通过对 FBG2 数据的分析也可以实现对孔②孔边裂纹萌生的监测。在实现孔边裂纹萌生监测的同时,尽可能的减轻监测系统的重量,降低监测成本。

在孔②左侧且距孔②中心 15 mm 处粘贴一支光纤光栅应变传感器作为参考传感器即 FBG3,其采集的数据表征疲劳载荷的变化情况并与其他光纤光栅应变传感器采集的数据形成对比。光纤光栅应变传感器布局如图 5 所示,光纤光栅应变传感器布设实物图如图 6 所示。

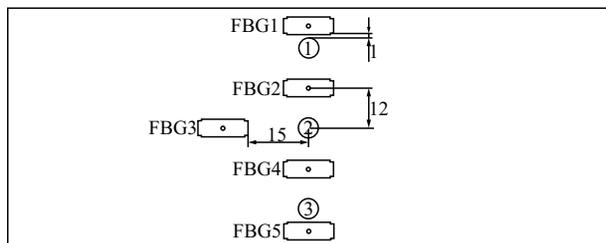


图 5 光纤光栅应变传感器布局示意图

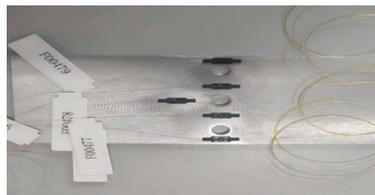


图 6 光纤光栅传感器布设实物图

2.3 疲劳加载试验系统

多孔铝合金板疲劳加载试验系统包括光纤光栅应变传感器、LFV-100 kN 疲劳试验机、光纤光栅解调仪、个人计算机以及光纤光栅应变采集软件。

首先通过静力拉伸试验得到 A 组试验件的破坏载荷为 90 kN, B 组试验件的破坏载荷为 84 kN。通过疲劳预试验并结合多孔铝合金板实际工况确定疲劳载荷水平为 30%, 即 A 组试验件施加的疲劳载荷大小为 27 kN, B 组试验件施加的疲劳载荷大小为 25 kN, 疲劳载荷形式为等幅疲劳载荷。

在试验过程中通过着色法观察孔边主裂纹的萌生并记录主裂纹的萌生位置及萌生时的疲劳加载循环数;在试验件圆孔内壁滴加红色墨水,在试验中利用放大镜观察试验件圆孔边缘裂纹长度,当孔边裂纹扩展至 0.1~0.15 mm 时记录此时的疲劳加载循环数。

A 组试验件孔边主裂纹萌生位置及萌生时的疲劳加载循环数如表 1 所示, B 组试验件孔边主裂纹萌生位置及萌生时的疲劳加载循环数如表 2 所示。

表 1 A 组试验结果

A 组	萌生位置	裂纹萌生疲劳加载循环数/次
DA1	孔③右侧	16 154
DA2	孔①左侧	20 000
DA3	孔②左侧	20 000
DA4	孔③右侧	33 700
DA5	孔①左侧	17 000

表 2 B 组试验结果

B 组	萌生位置	裂纹萌生疲劳加载循环数/次
DB1	孔③右侧	23 500
DB2	孔③右侧	22 000
DB3	孔①左侧	31 000
DB4	孔②右侧	19 100
DB5	孔③右侧	22 000

对于多孔铝合金板,孔①左侧与孔③右侧的受力面积小于孔②两侧的受力面积,在铝合金板承受循环载荷时距板材边缘较近孔的孔边应变略微大于孔②两侧的应变,铝合金板两侧孔的孔边易先开始萌生孔边主裂纹。同时由于疲劳加载试验所用的多孔铝合金板可能在冶金、制造、加工过程中存在缺陷,孔边裂纹的萌生位置存在随机性且不同铝合金板的孔边主裂纹萌生时的疲劳加载循环数存在分散性。

3 孔边主裂纹萌生监测

基于 DBSCAN 算法与 GMM 理论的孔边裂纹萌生监测方法主要包括中心波长数据预处理、孔边微应变提取、小波分解、DBSCAN 算法突变点提取、GMM 理论突变点提取、突变点融合与筛选、疲劳加载循环数比较与孔边主裂纹萌生位置判断等步骤,其流程如图 7 所示。

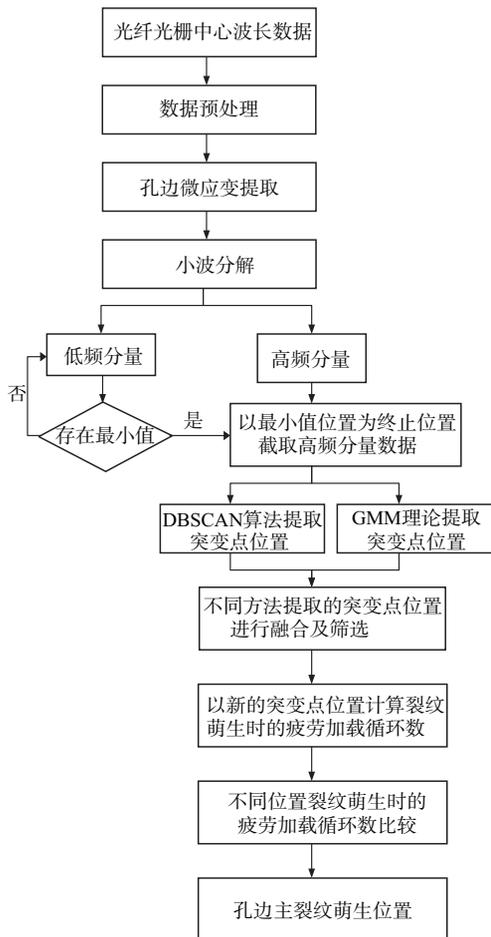
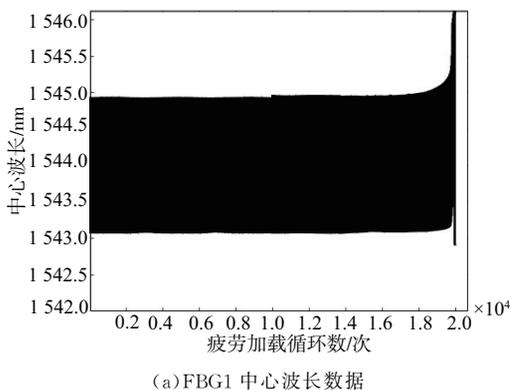


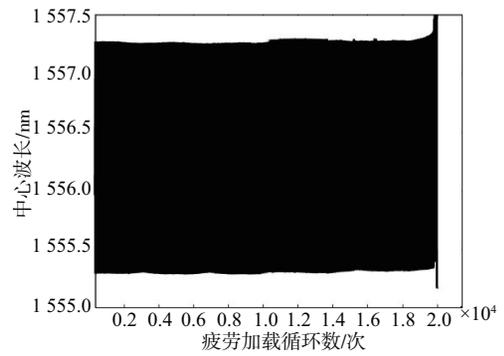
图 7 孔边裂纹监测流程图

3.1 中心波长数据处理与分析

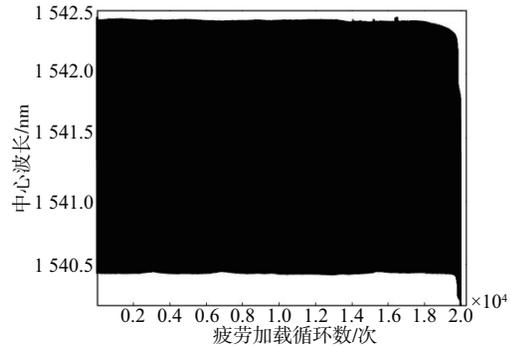
以试验件 A1 的疲劳加载试验数据为例,首先对其中心波长数据进行预处理,得到如图 8 所示的中心波长数据。



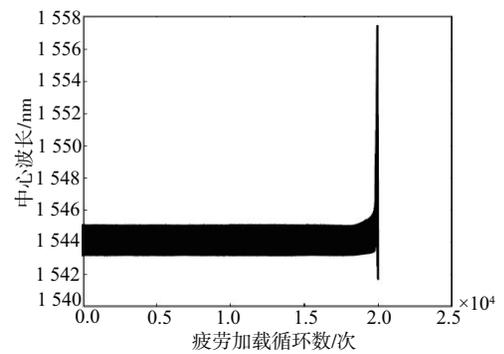
(a)FBG1 中心波长数据



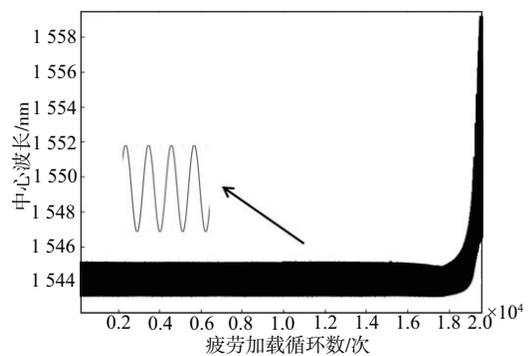
(b)FBG2 中心波长数据



(c)FBG3 中心波长数据



(d)FBG4 中心波长数据



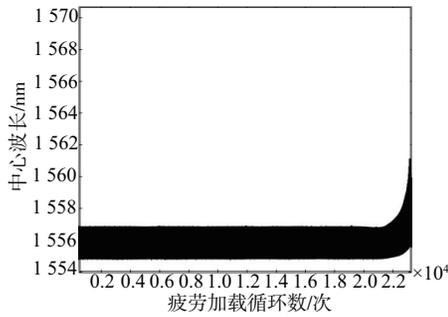
(e)FBG5 中心波长数据

图 8 试验件 A1 中心波长数据

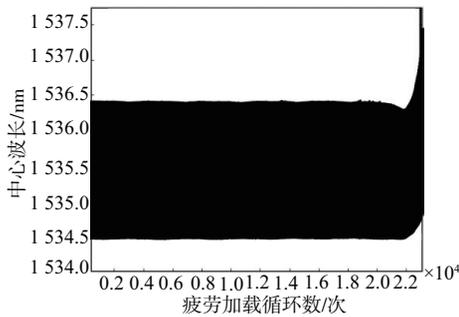
图 8 中光纤光栅应变传感器 FBG1、FBG2、FBG3、FBG4、FBG5 的中心波长在试验件无裂纹时没有明显变化;当孔③右侧出现裂纹时,FBG5 的中心波长数据波形开始降低,随后开始升高;当中心波长升高到一定数值时短时间内趋于稳定,随后迅速降低。同时孔①和孔②在孔③右侧萌生裂纹后才出

现裂纹,所以光纤光栅应变传感器 FBG5 的波形数据出现大幅变化时的疲劳加载循环数小于 FBG1、FBG2、FBG4 的波形数据出现变化时的疲劳加载循环数。光纤光栅应变传感器 FBG3 作为参考传感器,表征疲劳载荷变化情况,试验中施加等幅疲劳载荷,所以其波形无较大起伏。在试验后期,多条孔边裂纹进一步扩展并逐渐连通,导致试验件原本的承载结构发生变化,裂纹面增大,承载面变小,光纤光栅应变传感器 FBG3 感受到的应变也发生变化。

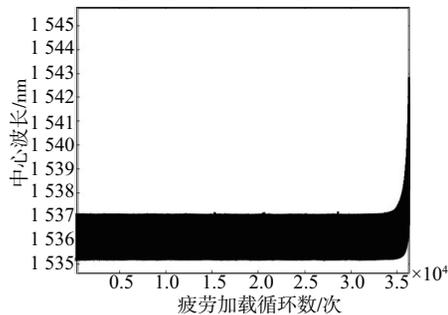
由于在裂纹萌生并扩展过程中光纤光栅应变传感器 FBG5 的数据波形出现了先降低后升高的变化趋势,所以考虑以这一变化趋势作为判断孔边裂纹萌生的依据。图 9 为 A 组其他试验中靠近主裂纹的传感器的中心波长数据,其中心波长均为先降低后升高的变化趋势。



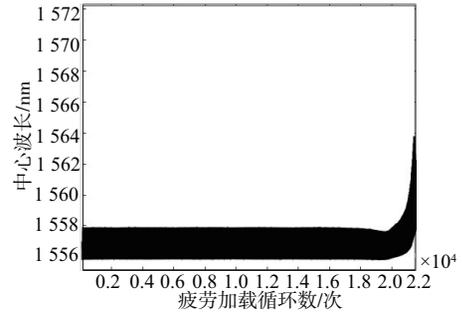
(a) A2 试验件



(b) A3 试验件



(c) A4 试验件



(d) A5 试验件

图 9 靠近主裂纹的传感器采集的中心波长数据

3.2 孔边应变计算

3.2.1 孔边应变计算公式

光纤光栅应变传感器采集的数据以中心波长的形式表征孔边角裂纹萌生、扩展过程中孔边应变的变化情况。式(2)可对中心波长进行换算,得到裂纹萌生、扩展过程中孔边微应变 ϵ 。

$$\epsilon = \frac{\Delta\lambda}{\lambda(1-P)} \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为中心波长偏移量,可通过波形数据的波峰与波谷之差计算得到; λ 为初始中心波长; P 为光纤光栅有效弹光系数,根据标定结果,取 $P=0.22$ 。

3.2.2 中心波长偏移量计算

计算中心波长偏移量,首先要提取中心波长数据的峰值与谷值。本文以极值法为基础提取峰值与谷值并将峰值、谷值曲线进行相减后进行插值得到中心波长偏移量 $\Delta\lambda$ 。根据式(2)对试验件 A1 中 FBG5 采集的中心波长数据进行应变计算,得到如图 10 所示的孔边微应变曲线。

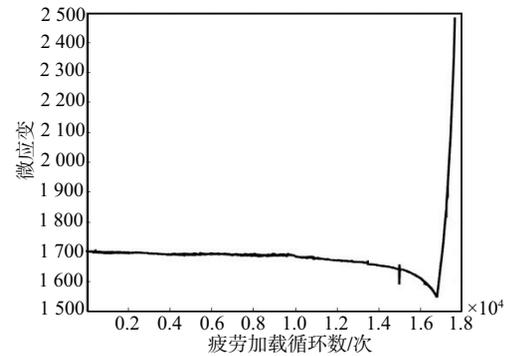


图 10 FBG5 孔边微应变曲线

图 10 中孔边微应变曲线在试验初期无明显变化,随着疲劳加载循环数的增多,孔边微应变出现先降低后增大的变化。孔边疲劳裂纹的萌生是金属材料在循环载荷的作用下产生滑移带并滑移的结果,发生于材料表面晶粒内部,涉及微观结构变化,利用传感器进行监测裂纹萌生过程往往很难实现。所以本文通过判断结构有无裂纹扩展进而分析裂纹的萌生。

为对孔边应变先减小后增大的变化趋势进行分

析,建立如图 11 所示的孔边张开型裂纹模型:一个含圆孔的无限大板,孔直径为 $2a$,其孔边单侧裂纹长度为 L ,无限大板承受单向拉伸载荷作用,在无穷远处的均匀应力为 σ ,取位于裂纹尖端附近且随裂纹尖端移动而移动的 P 点,P 点与裂纹尖端的距离为 r ,与 x 轴夹角为 θ 。

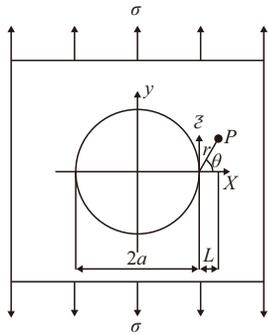


图 11 孔边裂纹模型

根据应力强度因子手册,I 型裂纹尖端应力强度因子 K_I 为:

$$K_I = F \left(\frac{L}{a} \right) \sigma \sqrt{\pi L} \quad (3)$$

式中: F 为形状系数。

根据叠加原理对孔边裂纹模型进行分解,构建如图 12 所示的张开型裂纹模型:一个承受单向拉伸载荷且含中心裂纹的无限大板,无穷远处的均匀应力为 σ ,其中心裂纹长度为 $2L$,此时的中心裂纹为张开型(I 型)裂纹,取位于裂纹尖端附近且随裂纹尖端移动而移动的 m 点, m 点与裂纹尖端的距离为 r ,与 x 轴夹角为 θ ,裂纹尖端应变场如式(4)所示^[20]:

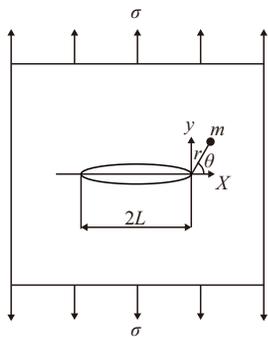


图 12 张开型裂纹模型

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{K}{E \sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left((1-u) - (1+u) \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \epsilon_y = \frac{K}{E \sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left((1-u) + (1+u) \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \gamma_{xy} = \frac{K}{2G \sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ϵ_x 、 ϵ_y 、 τ_{xy} 为裂纹尖端各应变分量; E 为弹性

模量; G 为剪切模量; u 为泊松比; r 为裂纹尖端 m 点距离裂纹尖端的距离; θ 为原点到 m 点的连线与 x 轴的夹角。

当裂纹尖端 m 点位置固定时, r 、 θ 为常数,对于铝合金材料 E 、 G 、 u 为常数,所以式(4)可写为:

$$\begin{cases} \epsilon_x = AK \\ \epsilon_y = BK \\ \gamma_{xy} = CK \end{cases} \quad (5)$$

式中: A 、 B 、 C 为常数,所以孔边应变与 I 型裂纹尖端应力强度因子 K_I 有关。

根据文献[21~22]在孔边裂纹扩展过程中,远处均匀载荷、圆孔集中载荷都会对应应力强度因子产生影响。在裂纹较小时,裂纹主要在应力集中区域扩展,集中载荷对裂纹应力强度因子起主导作用,随着微小裂纹的扩展,裂纹尖端位置与峰值应力点的间距增加,局部增高的应力值迅速衰减,所以集中载荷作用下的应力强度因子是随着裂纹的增大而减小。当裂纹扩展一定长度,集中载荷对裂纹尖端应力强度因子的影响降低,远处均匀载荷开始起主要作用,应力强度因子随裂纹的扩展而增大。所以孔边裂纹尖端的应力强度因子随着裂纹扩展先减小后增大。根据式(5)当裂纹开始扩展时应变曲线呈现出先降低后增大的趋势。当光纤光栅应变传感器采集到的应变曲线出现这一趋势时,可以判定孔边裂纹已经开始扩展,对应的孔萌生了孔边裂纹。

同时在图 10 中,孔边微应变降低到最小值之前应变曲线出现突变,对 A 组其他几件试验件进行分析,发现其他几件试验件的孔边微应变曲线在降低到最小值前均存在突变。对应变曲线突变位置进行换算,得到其对应的疲劳加载循环数后,发现换算得到的疲劳加载循环数与试验中观察到主裂纹萌生时疲劳加载循环数大致相同,所以孔边微应变曲线的突变可作为判断孔边裂纹萌生的依据之一。同时孔边裂纹萌生后,随着裂纹扩展孔边微应变曲线出现明显的降低趋势,微裂纹达到一定的长度后,应变曲线达到最小值,随后孔边微应变增大。应变曲线的这一变化趋势也可作为判断孔边主裂纹萌生的依据。

3.3 应变曲线小波分解

综合上述分析,以孔边微应变曲线最小值及突变判断孔边裂纹是否萌生并计算裂纹萌生时的疲劳加载循环数。曲线变化趋势信息包含于应变曲线低频分量中,突变信息包含于应变曲线高频分量中,所以利用小波分解法对应变曲线的变化趋势特征信息与突变特征信息进行分离^[23-24]。经 3 层小波分解并归一化处理后的低频分量如图 13 所示,高频分量如图 14 所示。

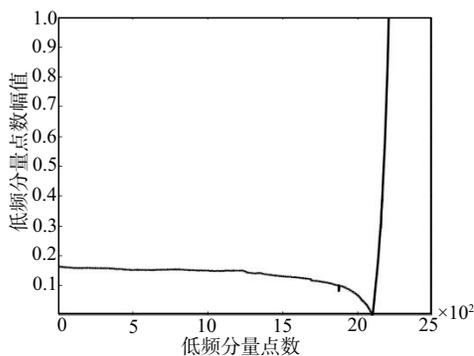


图 13 应变曲线低频分量

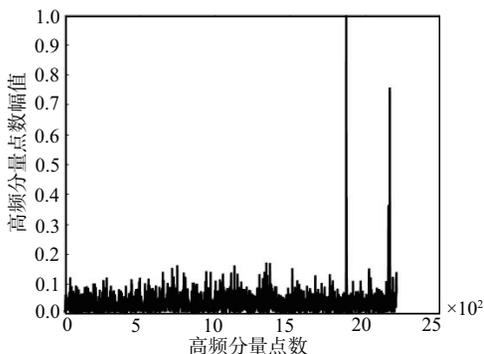


图 14 应变曲线高频分量

由于小波分解是一种时频分析法,会改变原始数据横坐标并降低数据量^[25-26],所以图 13 与图 14 中的横坐标数小于图 10 中的横坐标数。在图 13 中,应变曲线的低频分量反映了应变曲线的变化趋势,在第 2 100 个采样点处存在最小值,反映了孔边应变先减小后升高的变化趋势。图 14 中,高频分量反映了应变曲线的细节部分,在第 1 873 个采样点处出现幅值较大的高频分量,对应应变曲线的突变点。在 2 250 个采样点处存在次高频信号,对应应变曲线达到最小值后开始升高的变化趋势,所以低频分量最小值与高频分量最大值可作为孔边主裂纹萌生的特征。

以应变曲线的低频分量最小值位置为终止位置对高频分量数据进行提取,得到的高频数据如图 15 所示。

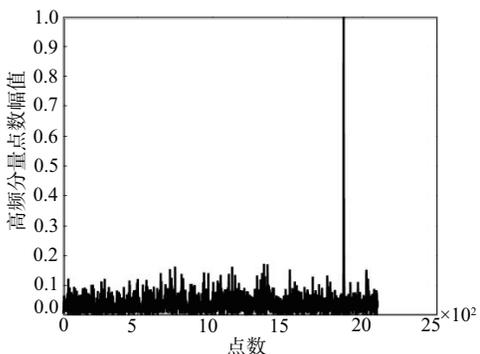


图 15 高频数据

3.4 DBSCAN 与 GMM 融合提取突变点

图 15 中幅值较大的高频信号代表图 10 中裂纹

萌生时出现的突变,将图 15 中的高频信号以图 16 所示的离散点进行表示。

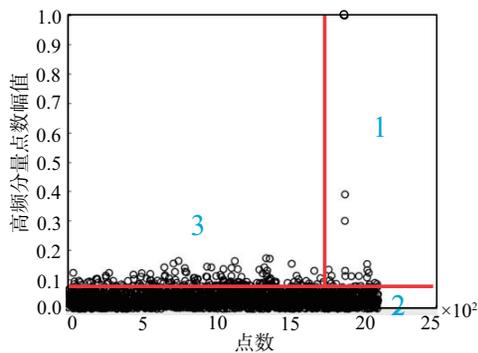


图 16 高频信号离散点

图 16 中的离散点可以为 3 个部分:①表征裂纹萌生的大幅值离散点、②较集中的循环加载数据离散点、③外部扰动导致的较大幅值离散点。实现对孔边裂纹萌生的监测,就需要从高频信号离散点中提取幅值较大的离散点并与由外部扰动导致的离散点进行区分。所以本文将含噪声的密度空间聚类算法与高斯混合模型相结合,通过两种聚类分析法分别提取幅值较大的离散点得到 2 个数据集合并取交集。随后将交集集中的离散点位置与低频分量最小值位置进行比较,当二者距离满足要求时判定为可表征裂纹萌生的大幅值离散点,计算裂纹萌生时的疲劳加载循环数,由含噪声的密度空间聚类算法提取的大幅值离散点如图 17 所示,由高斯混合模型提取的大幅值离散点如图 18 所示。

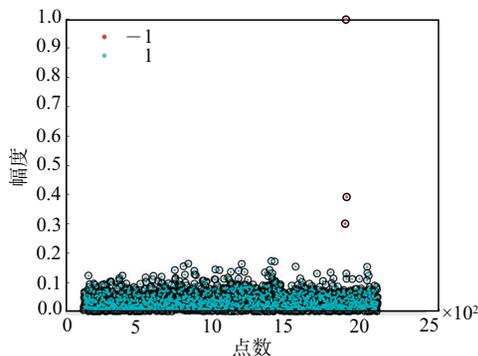


图 17 含噪声的密度空间聚类算法提取的大幅值离散点

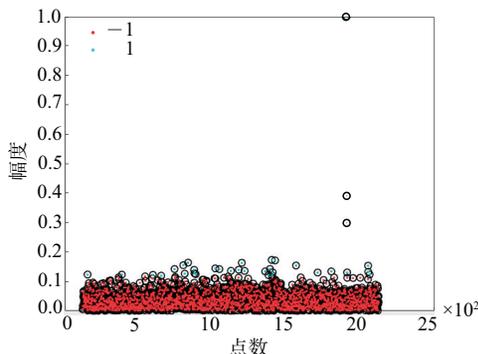


图 18 高斯混合模型提取的大幅值离散点

含噪声的密度空间聚类算法将离散点分为了

-1 与 1 两类,其中-1 类代表数量较少的大幅值离散点,高斯混合模型也将离散点分为了 1 与 2 两类,其中 2 代表数量较少的大幅值离散点,但此方法也将部分由外部扰动引起的大幅值离散点归为了“2 类”。DBSCAN 算法提取的大幅值离散点较少但幅值明显大于其他离散点^[27-29],GMM 理论提取的离散点较全面,所以将两种方法融合使用以在削弱外部扰动对裂纹萌生监测影响的同时尽可能的提取到较全面的离散点^[30-32]。以两者提取结果的交集与低频分量最小值位置进行比较以获得突变点位置并计算裂纹萌生时的疲劳加载循环数。

3.5 裂纹萌生疲劳加载循环数的计算及位置判断

在得到表征裂纹萌生的大幅值离散点及其位置 T_1 后,计算裂纹萌生时的疲劳加载循环数,计算式为:

$$N = \frac{N_1 T_1}{x_1} \quad (6)$$

式中: N 为裂纹萌生时的疲劳加载循环数; N_1 为低频分量最小值对应的疲劳加载循环数; x_1 为低频分量最小值位置; T_1 为表征裂纹萌生的大幅值离散点及其位置。

当应变曲线存在最小值时,说明裂纹已经萌生,计算裂纹萌生时的疲劳加载循环数后与其他传感器计算的裂纹萌生时的疲劳加载循环数进行比较,数值较小者判定为主裂纹附近的传感器即得到主裂纹萌生的位置。

3.6 孔边主裂纹萌生监测结果及讨论

利用本文所提出的基于 DBSCAN 算法与 GMM 理论的孔边裂纹萌生监测方法对疲劳加载试验中得到的孔边应变数据进行处理,得到的孔边主裂纹萌生位置监测结果如表 3 与表 4 所示。

表 3 A 组监测结果

A 组	萌生位置	计算得到的裂纹萌生的 疲劳加载循环数/次	监测误差
A1	孔③右侧	15 724	2.7%
A2	孔①左侧	20 885	4.4%
A3	孔②左侧	20 823	4.1%
A4	孔③右侧	35 252	4.6%
A5	孔①左侧	17 253	1.5%

表 4 B 组监测结果

B 组	萌生位置	计算得到的裂纹萌生的 疲劳加载循环数/次	监测误差
B1	孔③右侧	24 336	3.6%
B2	孔③右侧	22 757	3.4%
B3	孔①左侧	32 500	4.8%
B4	孔②右侧	20 000	4.7%
B5	孔③右侧	21 000	4.5%

本文提出的多孔铝合金板孔边主裂纹萌生监测方法对试验件孔边主裂纹萌生位置的监测比较准确。同时通过此方法计算得到的主裂纹萌生时的疲劳加载循环数与试验过程中记录的主裂纹萌生时的疲劳加载循环数之间的误差不大于 5%。此外,试验过程中主裂纹萌生时的疲劳加载循环数是在裂纹扩展至 0.1~0.15 mm 时所记录,所以此孔边裂纹萌生监测方法可实现对 0.1 mm 及以上孔边裂纹的监测。

通过进一步分析发现监测过程中对主裂纹萌生时的疲劳加载循环数的计算误差主要由以下两方面原因导致:

1)在裂纹萌生初期阶段裂纹极其微小,通过着色法观察裂纹无法及时发现裂纹的萌生,所以在裂纹萌生疲劳加载循环数的记录过程中引入了人为误差。

2)在监测算法设计方面,主裂纹萌生后应变曲线才会出现下降趋势,其低频分量最小值与高频分量最大值也在裂纹萌生后出现,所以根据此裂纹萌生特征识别出的疲劳加载循环数与实际的疲劳加载循环数存在偏差。

4 结论

提出的基于 DBSCAN 算法与 GMM 理论的孔边裂纹萌生监测方法能够对多孔铝合金板的孔边主裂纹萌生位置进行准确定位,最小可识别 0.1 mm 的孔边裂纹,计算得到的孔边主裂纹萌生时的疲劳加载循环数与试验过程中主裂纹萌生时的疲劳加载循环数误差小于 5%,监测精度能够达到实际工程应用的要求。

提出的孔边主裂纹萌生监测方法以孔边裂纹萌生、扩展过程中孔边应变、应力强度因子等理论为基础,以曲线变化趋势、突变为主要识别特征,不涉及具体材料参数,所以此方法适用于不同孔径、不同孔个数、不同金属板的孔边主裂纹萌生监测,同时聚类分析提取数据突变点的算法可应用于其他突变检测问题。

以光纤光栅应变传感器采集的孔边应变数据为基础,结合智能损伤识别算法实现对孔边主裂纹萌生的监测,与现有的光纤传感器埋入监测法、光纤传感多指标融合监测法、光谱图像判断监测法相比,本文提出的裂纹监测方法为表面粘贴监测法不需要埋入结构内部,易于实现;使用的指标数量少,能够提高监测效率;不需要光谱分析,对解调设备要求低,降低了监测成本。

参考文献

[1] 王春净,许永春,赵常振.某型飞机 35CrMnSiA 紧固

- 螺钉断裂失效分析[J]. 空军工程大学学报, 2022, 23(5):108-111.
- [2] 赵晋芳, 谢里阳, 刘建中. 共线多孔边对称裂纹板的应力强度因子计算[J]. 机械设计与制造, 2010(12): 12-14.
- [3] 李政鸿, 徐武, 张晓晶, 等. 多孔多裂纹平板的疲劳裂纹扩展试验与分析方法[J]. 航空学报, 2018, 39(7): 154-162.
- [4] 谢帅, 张海涛, 霍幸莉, 等. 基于连杆应变测量的起落架舱门结构健康监测[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(3):50-54.
- [5] 吴奇, 兰伍霖, 张含琦, 等. 光纤光栅在超声结构健康监测中的应用与展望[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(4):627-635,820.
- [6] 韩冰. 基于光纤光栅传感器的弓网状态监测方案及其验证试验[J]. 计测技术, 2020, 40(1):27-31.
- [7] 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. [知网]
- [8] 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.
- [9] MIZUTANI T, OKABE Y, TAKEDA N. Quantitative-Evaluation of Transverse Cracks in Carbon Fiber Reinforced Plastic Quasi-Isotropic Laminates with Embedded Small-Diameter Fiber Bragg Grating Sensors [J]. Smart Material Structures, 2003, 12(6): 898-903.
- [10] SANSI, STUTZ S, RENART J, et al. Crack Tip Identification with Long FBG Sensors in Mixed-Mode Delamination [J]. Composite Structures, 2012, 94(9): 2879-2887.
- [11] BAO P Y, YUAN M, DONG S P, et al. Fiber Bragg Grating Sensor Fatigue Crack Real-Time Monitoring Based on Spectrum Cross-Correlation Analysis [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(1): 43-57.
- [12] HE J J, YANG J S, WANG Y X, et al. Probabilistic Model Updating for Sizing of Hole-Edge Crack Using Fiber Bragg Grating Sensors and the High-Order Extended Finite Element Method [J]. Sensors, 2016, 16(11): 1956.
- [13] 袁慎芳, 金鑫, 邱雷, 等. 基于 FBG 反射谱特征的修补结构裂纹扩展监测[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(3): 724-729.
- [14] 于翀, 宋昊, 刘春红, 等. 基于光纤光栅的孔边裂纹监测研究[C]//第十届中国航空学会青年科技论坛论文集/第十届中国航空学会青年科技论坛. 北京: 中国航空学会, 2022:597-602.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 张卫方, 李英武, 任飞飞, 等. 一种光纤应变花和智能涂层集成传感器的实现方法: CN107478170B [P]. 2019-06-28.
- [18] ZHANG Y, CHENG Z H, LIAN G Y, et al. Research on WPD and DBSCAN-L-ISOMAP for Circuit Fault Feature Extraction [J]. Open Physics, 2023, 21(1): 254.
- [19] KAPLAN A D, BLAIR B, GLENN A, et al. Automated Integration Gate Selection for Gaussian Mixture Model Pulse Shape Discrimination [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2023, 1055: 168486.
- [20] 酃正能, 张纪奎. 飞机结构疲劳和损伤容限设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- [21] 张伟, 吕胜利, 姚磊江. 含接触的多孔多裂纹结构应力强度因子分析[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(7): 950-952, 956.
- [22] 黄其青, 邹彩凤, 殷之平. 含接触问题多孔连接结构的多裂纹裂尖应力强度因子研究[J]. 机械强度, 2005, 27(5): 661-665.
- [23] 彭珍瑞, 曹明明, 刘满东. 基于加速度频响函数小波分解的模型修正方法[J]. 航空学报, 2020, 41(7): 181-191.
- [24] 谢锋, 谢寿生. 基于小波分析的航空发动机旋转失速检测方法[J]. 航空动力学报, 2006, 21(4): 754-758.
- [25] 陈龙, 史文库, 陈志勇, 等. 基于小波-VMD 联合降噪的传动系扭振信号分析[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(04):703-709,825.
- [26] 祝小彦, 王永杰, 张钰淇, 等. 基于自适应最优 Morlet 小波的滚动轴承故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(5):1021-1029,1085.
- [27] 王国林, 于映. 改进的 DBSCAN 算法在室内多扩展目标跟踪中的研究[J/OL]. 电子设计工程, (2023-05-10) [2023-07-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1477.tn.20230509.1714.002.html>.
- [28] GHAMKHAR H, JALILI G M, MOHAJERI S H, MOSLEHI I, et al. An Unsupervised Method to Exploit Low-Resolution Water Meter Data for Detecting End-Users with Abnormal Consumption: Employing the DBSCAN and Time Series Complexity [J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 94(8):104516.
- [29] LIU Y T, ZHANG L, LI P J, et al. Laser Radar Data Registration Algorithm Based on DBSCAN Clustering [J]. Electronics, 2023, 12(6): 1373.
- [30] ZHOU N, MA H, CHEN J C, et al. Equivalent Modeling of LVRT Characteristics for Centralized DFIG Wind Farms Based on PSO and DBSCAN [J]. Energies, 2023, 16(6): 2551.
- [31] ZOU X Y, ZHAO C H. Step-Wise Segment Partition Based Stationary Subspace Analysis and Gaussian Mixture Model for Nonstationary Process Performance Assessment [J]. Information Sciences, 2023, 639: 118988.
- [32] JIA T T, TAYLOR Z A, CHEN X J. Density-Adaptive Registration of Pointclouds Based on Dirichlet Process Gaussian Mixture Models [J]. Physical and Engineering Sciences in Medicine, 2023, 46(2): 719-734.

(编辑: 韩茜)