

基于多特征的水下防护设施撞击智能识别^{*}

徐万海, 李 航

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室 天津, 300072)

摘要 针对沉箱式水下防护设施服役期间落物撞击识别困难的问题, 基于有限元法与机器学习算法, 提出了一种结合信号特征提取的撞击位置与应力识别方法。首先, 利用有限元软件建立防护设施数值模型, 模拟落物撞击过程并提取应力响应信号; 其次, 提取应力信号的峰峰值、峭度值、裕度脉冲指数和信号作为典型特征值, 构建机器学习数据集; 然后, 选用神经网络、线性回归和支持向量回归(support vector regression, 简称 SVR)等算法进行训练, 并重点分析了不同特征值对识别精度的影响。结果表明: 选用应力积分作为特征值时的识别误差最小; 其中撞击位置的平均识别误差在 1.2 m 以内, 撞击应力的识别误差在 3.4% 以内; 应力积分是沉箱式水下防护设施撞击识别的最优特征值。

关键词 水下防护设施; 撞击识别; 特征提取; 机器学习

中图分类号 TE58; TH17

0 引言

沉箱式水下防护结构作为通航区水下生产系统的安全保护设施, 在服役期间常受到上方海域沉船、落物以及抛锚的撞击作用。当撞击载荷超过防护设施的屈服强度时, 防护结构会出现严重损伤变形, 进而危害水下生产系统安全。因此, 需要在服役期间监测作用在沉箱式水下防护设施的撞击载荷, 以此评估防护结构的完整性。

目前, 针对结构的撞击识别主要集中于研究撞击位置以及撞击应力大小。近年来, 结构监测领域开始广泛采用更为先进的机器学习算法和数据挖掘技术对海洋结构物进行健康管理。Maseras-Gutierrez 等^[1]应用 2 种不同网格类型的神经网络算法, 成功识别复合材料板的撞击位置和撞击应力。Sung 等^[2]利用神经网络算法对铝板和复合材料板进行了撞击定位, 对比了列文伯格-马夸尔特算法(Levenberg-Marquardt, 简称 LM)算法和正则化、早期停止等泛化方法的识别效果。周晚林等^[3]结合有限元与反向传播神经网络(back propagation neural network, 简称 BPNN), 利用双 BPNN 识别撞击位置, 利用 LM 算法识别撞击力。Leclerc 等^[4]提出将结构划分为不同区域, 在不同区域采用不同网格类型的神经网络算法, 并成功进行了撞击识别。高

媛^[5]通过改进 BPNN 算法对机翼复合板撞击位置进行识别, 并对比分析了 BPNN 算法和互相关函数算法的优劣。

与传统撞击识别方法相比, 利用机器学习进行撞击识别的优势在于其可通过从样本数据(即训练数据集)构建模型输入和输出数据之间的映射关系, 从而进行精准预测^[6]。因此, 利用机器学习算法对结构撞击载荷进行识别的首要工作是提取合适的数据特征值作为算法输入量, 以及对采集到的原始数据进行处理, 以提高撞击识别的精度。Gaul 等^[7]通过提取不同频率信号的波达时间, 借助优化方法成功识别了铝板的撞击位置。Coverley 等^[8]借助希尔伯特-黄变换, 获取了应力波的波达时间和波速等信息, 利用对遗传算法与撞击位置有关的适应度函数进行不断优化, 识别出最优的撞击位置。Jiao 等^[9]通过小波变换提取不同模态下的波达时间和波速, 识别撞击位置的单维度坐标。倪俊芳等^[10]利用 Morlet 小波函数进行小波变换, 提取不同传感器的波达时间, 在各向同性材料中实现了较为精确的损伤定位结果。Ciampa 等^[11]通过小波变换提取波达时间, 实现了撞击位置识别, 且识别精度较高。

采用机器学习算法进行撞击识别的方法大多采用波达时间作为输入^[12]。对于具有各向同性特点的

^{*} 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(A类)(52525110)

收稿日期: 2024-07-31; 修回日期: 2024-09-17

结构而言,以波达时间作为特征值具有较好的精确度^[13-15]。然而,沉箱式水下防护设施是由钢板和混凝土制成的层合板,且会根据作业需求在结构开设不对称的孔位,不具备各向同性。在这种结构上,基于应力波频特点,应力波在各个方向的波速相差较大。此外,由于结构开有不对称孔位以及不同材料之间的差异,应力波会产生反射、折射等现象,造成应力波多重信号混叠,无法提取完整的波达时间,进而无法准确识别出撞击位置和撞击应力^[16]。

随着深度学习的发展,撞击识别领域已开始直接利用整个撞击过程的完整信号,将原始波形作为输入,由算法自动提取特征值,从而实现撞击识别^[17-21]。这导致撞击识别算法需要先自动提取合适的特征值,需要更长的训练时间和更高的识别难度才可保证所提取的特征值精度。特别是对于沉箱式水下防护设施而言,其结构尺寸较大,导致训练模型时间和难度均大大增加。基于上述难点,本研究选取在健康监测中广泛应用的特征值,研究在不同特征值条件下不同机器算法的识别效果,旨在获取最适用于撞击识别的数据特征值,为水下结构撞击智能识别提供技术指导。

1 特征值提取

1.1 Lamb波

沉箱式水下防护设施的撞击识别是通过监测撞击所引起防护设施内部的应力波响应来实现的。与海洋中其他结构物相比,沉箱式水下防护设施的厚度远小于其直径,属于薄板结构。当薄板结构遭受撞击时,其内部会产生Lamb波,因此可通过监测Lamb的信号判定撞击载荷信息。

Lamb波在沉箱式水下防护设施中的传播特性较为复杂,主要有频散、多模态、非稳态和位变等特性,在撞击识别中须重点关注的特性主要有频散和多模态。Lamb波的频散特性表现为Lamb波在薄板内传播时相速度随频率的不同会发生改变。无论板厚等参数如何变化,Lamb波的多模态特性均可根据质点振动的相位关系分为对称模式 S_n 和反对称模式 A_n ($n=0,1,\dots$,为模式阶数)。Lamb波的相速度与频率 f 和厚度 d 有关,且方程均存在无数解,这决定了Lamb波的频散和多模态特性。Lamb波模式如图1所示。

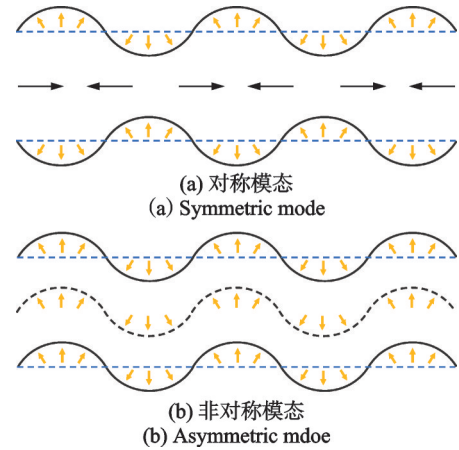


图1 Lamb波模式

Fig.1 Lamb wave mode

1.2 特征值选取

特征值的选取是决定沉箱式水下防护设施撞击识别精度的关键,因此需要深入分析所获得的Lamb波信号,提取信号典型特征用于撞击载荷识别。基于落锚撞击信号响应的特点分析可知,撞击响应信号具有典型的非平稳、非线性特征、持续时间短、能量高且幅值变化大,且呈规律性指数衰减。目前,所提取较多的特征值是Lamb波信号的波达时间,但该指标不适用于各向异性的结构。考虑到撞击响应信号的特点,以及沉箱式防护结构的各向异性,本研究选择提取在健康监测领域中被广泛应用的峰峰值、峭度值、裕度、脉冲指数和信号能量作为特征值。具体计算步骤如下。

1) 峰峰值。峰峰值定义为信号的最大值减去信号的最小值,可反映信号变化范围。峰峰值可表征撞击点到结构不同测点位置的Lamb传播情况以及结构变形的恢复过程,当撞击位置和撞击力变化时,峰峰值也产生显著变化。峰峰值的计算式为

$$PP = \max(x_i) - \min(x_i) \quad (1)$$

其中:PP为峰峰值; x_i 为Lamb波信号。

2) 峭度值。峭度值定义为四阶中心矩与均方根值的比值,反映信号分布特性的数值统计量。峭度值对于信号的冲击特性十分敏感。在撞击识别中,当撞击发生时,不同测点的峭度值相差十分明显,且对于撞击的变化也十分敏感。峭度值的计算式为

$$KU = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|x_i| - \mu)^4}{RMS} \quad (2)$$

其中:KU为峭度值; μ 为信号均值;RMS为信号均方根值; N 为数据点数量。

3) 裕度。裕度为峰值绝对值与方根幅值的比值,体现信号的冲击特性。当水下防护设施发生撞击后,

由于各个测点距离撞击点的距离不同,各测点测得的 Lamb 波的裕度也不同。特别是当撞击力发生变化时,信号的裕度也会发生剧烈变化。裕度的计算式为

$$CL=\frac{\max(|x_i|)}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^n\sqrt{|x_i|}}$$

(3)

其中:CL 为裕度值。

4) 脉冲指数。脉冲指数为信号的峰值与均值的比值,体现了信号的突变。在撞击识别中,信号的脉冲指数表记录了结构在发生撞击瞬间的内部 Lamb 波变化过程,可表征撞击力的大小。此外,结构在不同位置受到撞击后,其信号响应存在差异,因此可通过比较各测点的脉冲指数大小,来识别撞击发生的位置。脉冲指数定义为

$$I=\frac{\max(x_i)}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^nx_i}$$

(4)

其中:I 为脉冲值。

5) 信号能量。信号能量是基于信号时间历程的积分概念,定义为信号强度的绝对值在持续时间上的定积分,表示结构在碰撞全过程中某一测点位置处的能量输入。由于沉箱式水下防护设施开有一定数量的非对称孔,不同位置测点测得的能量大小不同。因此,可依据测点所得的信号能量分析出撞击位置以及撞击力大小。信号能量定义为

$$P=\int_T|x_i|dt$$

(5)

其中:P 为信号能量。

1.3 有限元数值模拟

本研究重点关注不同特征值对沉箱式水下防护设施撞击识别的影响,选用渤海通航区某水下生产系统防护设施作为原型,建立与实际工程相匹配的数据样本集。

采用 Abaqus 软件对渤海通航区某水下生产系统防护设施进行建模计算。模型主要由钢圆筒、顶盖、落锚、孔盖和土体 5 部分组成。其中钢圆筒为钢制结构,直径为 28 m,高为 18 m,壁厚为 22 mm;顶盖为钢-混凝土-钢复合结构,直径为 31 m,高为 0.5 m,有 10 个非对称正方形开孔,顶盖钢板厚度为 22 mm;孔盖长宽为 4.0 m,高为 0.2 m,钢板厚度为 20 mm;土体模型直径为 62 m,高为 50 m,可有效避免由于土体较小而产生的边界效应。由于海底不同深度的土质材料属性差距较大,故将结构周围土体沿纵向分为 4 层。所有土体基本参数如表 1 所示。选取的钢结构为 Q235 钢,塑性模型选取 Johnson-Cook 本构模型,Q235 钢材料属性如表 2 所示。

表 1 土体基本参数

Tab.1 Main parameters of soil

土层深度/m	有效密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
0~1.2	750	5	0.35	14.5	16.2
1.2~18.1	850	8	0.3	20.5	25.0
18.1~38	860	14	0.22	0.6	34.0
>38	950	15	0.25	18	30.4

表 2 Q235 钢材料属性

Tab.2 Q235 steel material properties

参数	数值	参数	数值
密度/(kg·m ⁻³)	7 850	应变率敏感系数 <i>c</i>	0.021
弹性模量/GPa	210	初始失效参数 <i>d₁</i>	0.101
泊松比	0.3	应力三轴度相关损伤参数 <i>d₂</i>	1.682
初始屈服应力 <i>a</i> /MPa	366.42	应力三轴度相关损伤参数 <i>d₃</i>	-2.353
应变硬化常数 <i>b</i> /MPa	728.27	应变率相关失效参数 <i>d₄</i>	-0.099
应变硬化指数 <i>k₁</i>	0.33	破坏位移/mm	6
材料模型参考应变率/s ⁻¹	1	失效模型参考应变率/s ⁻¹	0.001

在沉箱式水下防护设施模型的各部分建立完成后,按照实际位置进行装配,得到沉箱式水下防护设施模型。在实际工程中,钢圆筒与土体土线交界处距离钢圆筒顶盖之间有一定距离。因此,顶盖并不与土体接触。在有限元模拟时,为最大程度贴近实际工程,将钢圆筒上部的顶盖在土体上方进行建模,使顶盖不与土体接触。沉箱式整体模型与网格划分如图 2 所示。

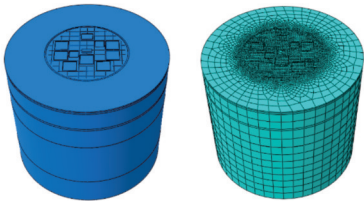


图2 整体模型与网格划分

Fig.2 Model and grid division

为模拟实际情况,在进行有限元计算时,根据沉箱式水下防护设施所处通航区内船只配备锚信息,选取霍尔锚(13.74、11.13 t)、斯贝克锚(11.48 t)以及 AC-14 锚(18.38、10.20、7.88 t)作为落锚模拟撞击沉箱式水下防护设施,用于模拟结构在服役期间所遭受的撞击。

根据挪威船级社 DNV-RP-F107 规范^[22],静水

的物体在水中自由下落一段时间后,速度会达到定值,落物在水中最大下落速度为

$$v_m=\sqrt{2mg\frac{1-\rho_w/\rho_{\text{anchor}}}{A\rho_wC_D}}$$

(6)

其中: v_m 为落物最大下落速度; m 为落物质量; g 为重力加速度; ρ_w 为海水密度; ρ_{anchor} 为落物密度; A 为落物在坠落方向的横截面积; C_D 为阻力系数。

锚重-速度的有限元工况如表 3 所示。

表 3 锚重-速度的有限元工况

Tab.3 Finite element condition of anchor weight-speed

锚种类	锚重/t	撞击速度/(m·s ⁻¹)
霍尔锚	13.74	6.94
霍尔锚	11.13	6.71
斯贝克锚	11.48	7.53
AC-14 锚	18.38	7.75
AC-14 锚	10.20	7.04
AC-14 锚	7.88	6.74

为降低其他因素对撞击识别的影响,在按实际情况设置锚重和撞击速度后,采用 2 m×2 m 的方形网格将圆形顶盖表面区域划分为若干特殊节点位置,并将每个节点作为一个撞击位置纳入撞击工况。使撞击点遍布顶盖,从而针对性地在各节点位置进行撞击,并从相应测点获取数据,以便分析不同撞击位置下顶盖的损伤情况。针对开孔之间的应力敏感区域,适当采用间距为 1 m 的特殊节点位置。同时,将落物撞在孔盖的情况也纳入有限元工况。对于较小的孔盖,将每个孔盖的中心点作为特殊节点位置;对于尺寸较大的孔盖,在每个孔盖内选取 4 个撞击位置,总计 140 个撞击位置。针对位于应力敏感区域的撞击位置工况进行重点关注,即图 3 所示的有限元撞击位置工况中的红色区域。基于上述所得撞击位置工况,覆盖顶盖表面所有位置,有效提升样本集的复杂程度,进而提升构建的撞击识别模型的准确性。

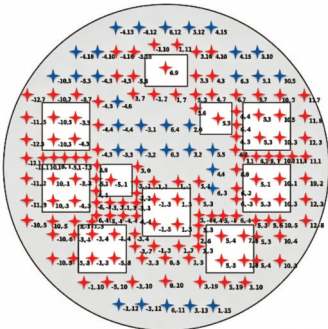


图 3 有限元撞击位置工况

Fig.3 Finite element condition of impact positions

1.4 数据获取

为模拟实际工况下对沉箱式水下防护设施的撞击识别,根据实际工程中测点位置提取撞击前后应力数据。鉴于开孔处会发生应力集中现象,在同等级别的撞击载荷下,开孔区域易产生高应力。此外,在开孔密集区域中,孔与孔之间易发生撞击失稳,产生危险应力,进而导致顶盖发生损伤。因此,根据大量数值模拟结果,对高应力及危险应力区域进行划分筛选,须充分考虑顶盖表面孔结构周边的应力集中现象,划分出应力敏感区。在实际工程中,为避免落锚撞击导致测量传感器发生损坏,一般选择将传感器置于沉箱式防护结构顶盖下方。同时,为有效获取上板撞击信息,将传感器安装于隔板的正下方。因此,本研究基于实际工程中图 4 所示的实验测点布置,在每次落锚撞击的模拟结果中,提取 18 个测点的应力数据,并按照式(1)~(5)对数据进行特征提取,组建训练撞击识别模型的数据集。

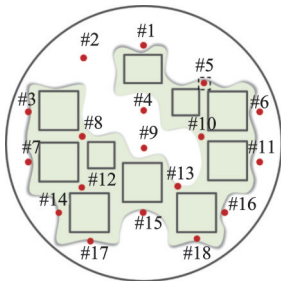


图 4 实验测点布置

Fig.4 Layout of measuring points

整个顶盖区域按照是否开孔以及形状可以划分为开孔区域、半开孔区域、边界位置和非开孔区域。对多开孔薄板结构而言,开孔、半开孔区域和边界区域会对 Lamb 波的传递产生影响,进而影响识别精度。因此,为获取不同特征值对撞击识别效果影响的一般规律,本研究在沉箱式水下防护设施的顶盖上选取 9 个位置进行撞击,分别涵盖顶盖上开孔区域,非开口区域以及边界位置,分析不同特征值对撞击识别效果的影响,撞击位置如图 5 所示。

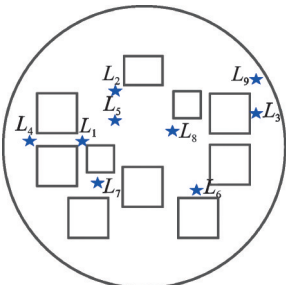


图 5 撞击位置

Fig.5 Layout of impact positions

2 不同特征值撞击识别结果分析

在数据预测中,撞击识别属于数据回归预测问题。选取在撞击识别中应用较为广泛的线性回归、SVR和神经网络拟合3种算法,分析不同特征值对撞击识别效果的影响。

2.1 特征值对撞击位置识别的影响

不同特征值撞击位置识别如图6所示。采用峭度值和信号能量作为特征值输入,撞击识别位置的识别效果整体好于其他特征值。与其他特征值相比,以峭度值和信号能量作为特征值输入撞击位置识别模型的识别误差较小,且误差在整个结构上分布均匀;而其他3个特征值的识别效果较差,误差分布较为离散,仅在结构特定区域识别效果较好。适用效果较佳的范围位于圆心区域以及无开孔区域,在开孔区域适用效果较差。

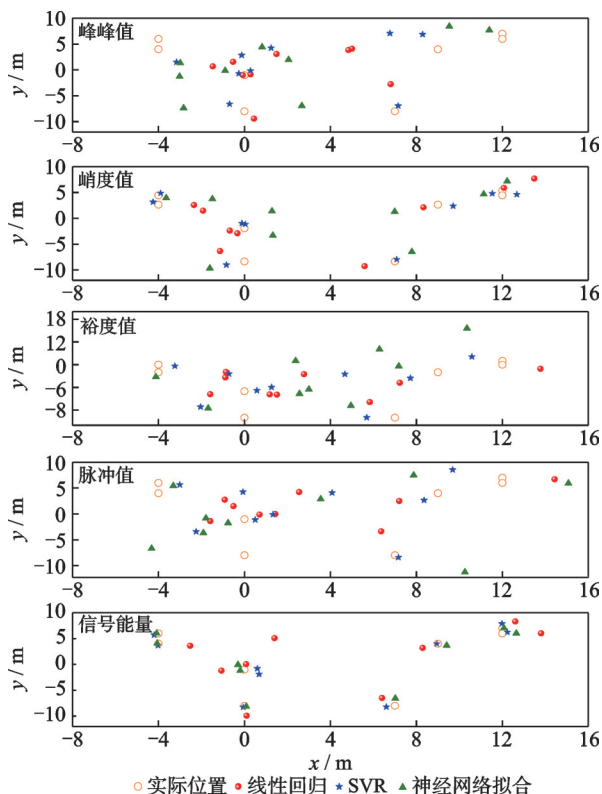


Fig.6 Impact position assessment based on different eigen-values

撞击位置识别误差如图7所示。在神经网络拟合、线性回归和SVR中,SVR作为撞击识别模型的效果较好;但当以信号能量作为特征值输入时,神经网络拟合的效果最佳。综合图6与图7可知,在撞击位置识别中,采用峭度值与信号能量作为输入特征

值的效果最为理想。其中,选用神经网络拟合作为撞击识别模型时,对信号能量的识别效果略优于峭度值。出现上述现象的原因可能是:峭度值对撞击发生后信号所展现的冲击特性十分敏感,而撞击信号的冲击性特性不受结构材料分层和开孔的影响。当结构发生撞击时,撞击所产生的冲击特性会随着应力波传递到各测点,从各测点提取的峭度中可以敏锐捕捉信号中的冲击变化信息,进而重构出撞击位置。在撞击后,水下沉箱设施具有非各向同性的特点,不同位置撞击后能量传递和耗散的形式与速度存在差异。能量在开孔位置耗散较快,在非开孔区域耗散较慢。因此,通过提取各测点的信号能量,可重构撞击后的能量场,进而确定撞击位置。综合3种撞击识别算法下不同的特征值结果,应力积分(即信号能量)在3种算法下的平均撞击位置识别误差在1.11 m,位于1.2 m以内,为所有特征值中的最小值。

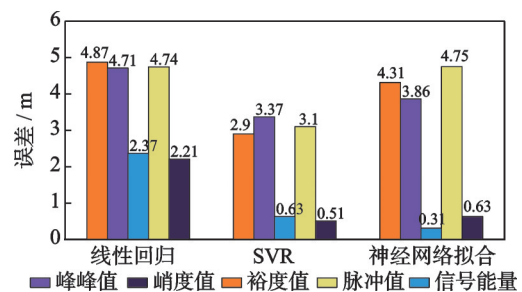


图7 撞击位置识别误差

Fig.7 Errors in damage position assessment

2.2 特征值对撞击应力识别的影响

不同特征值撞击应力识别结果如图8所示。选取峭度值和信号能量作为特征值输入识别的应力与真实的撞击应力较为接近。与其他特征值相比,采用峭度值和信号能量作为特征值输入的识别撞击应力在结构各个位置的识别值与真实结果均较为接近。而其他3个特征值的识别效果较差,仅在位于圆心区域以及无开孔区域识别的应力较为精准,在开孔区域适用效果较差。

图9为撞击应力识别误差。综合分析图8、图9可知,在神经网络拟合、线性回归和SVR中,在以峭度值和信号能量作为特征值输入的条件下,选用SVR和神经网络拟合的效果较好。与峭度值相比,选用信号能量作为输入,以神经网络拟合作为撞击应力识别模型的识别效果最佳,这可能是由于峭度值可反映撞击产生应力波的冲击变化。结构发生撞击后,随着应力波传递到各个测点,利用峭度值的数值大小重构各个位置的结构冲击位移变化幅度,进

而重构各个位置的应力分布,从而计算出产生冲击的撞击应力大小。由于撞击后的结构具有非均匀性,应力波传递到结构各个位置的衰减不同,因而所传递的能量也不同。相较于峭度值通过应力冲击特性重构的应力场,采用应力波信号能量先重构能量场、进而重构应力场的方法更为准确和简便。因此,以信号能量作为输入来识别撞击应力的效果较好。综合3种撞击识别算法下不同特征值的撞击应力识别结果来看,应力积分(即信号能量)在3种算法下的平均撞击 y 应力识别误差最小,为3.33%(在3.4%以内),是所有特征值中的最小值。

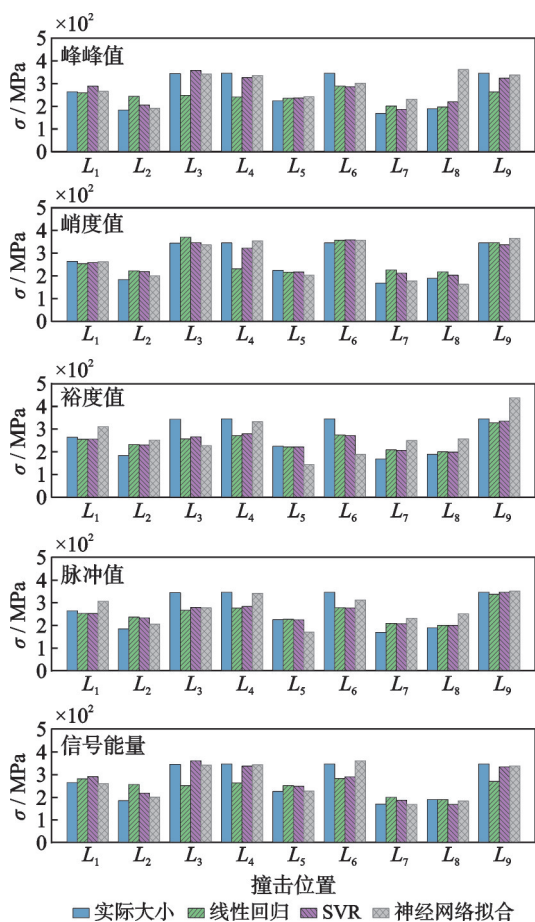


图8 不同特征值撞击应力识别结果

Fig.8 Impact stress assessment based on different eigenvalues

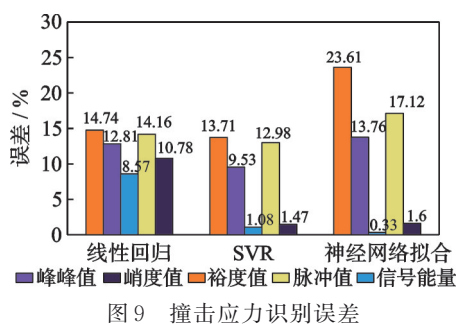


图9 撞击应力识别误差

Fig.9 Errors in damage stress assessment

3 结 论

1) 选取了峰峰值、峭度值、裕度值、脉冲值和信号能量作为特征值,采用线性回归、SVR和神经网络拟合进行撞击识别,分析了不同特征值的选取对于撞击位置识别和撞击应力识别的影响。

2) 以峭度值和信号能量作为撞击识别特征值输入的撞击识别效果最好。其中,在撞击位置识别方面,以峭度值为特征值的效果略优于以信号能量为特征值的效果;但当采用神经网络拟合作为识别模型时,信号能量的效果优于峭度值,且两者的撞击位置识别效果整体上较为接近。在撞击应力识别方面,以信号能量为特征值的识别结果较为精准,精度略优于峭度值。

3) 以峭度值和信号能量作为撞击识别的特征值输入的撞击识别效果一致且最好。其中,利用SVR方法训练撞击位置识别模型的准确度较高,且以峭度值作为特征值输入效果最佳;而采用神经网络拟合方法训练撞击应力识别模型则较为精准,且以信号能量作为输入的效果最佳。

4) 本研究重点关注某一项特征值对于撞击识别的影响,未探究不同特征值组合形成的特征向量对于撞击识别效果的影响,后续考虑将多维特征向量作为输入,分析特征向量对于撞击识别准确度的影响规律。

参 考 文 献

- [1] MASERAS-GUTIERREZ M A, STASZEWSKI W J, FOUND M S, et al. Detection of impacts in composite materials using piezoceramic sensors and neural networks[C]//Smart Structures and Materials 1998: Smart Structures and Integrated Systems. San Diego, CA, United States: SPIE, 1998, 3329: 491-497.
- [2] SUNG D U, OH J H, KIM C G, et al. Impact monitoring of smart composite laminates using neural network and wavelet analysis[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2000, 11(3): 180-190.
- [3] 周晚林,王鑫伟,胡自力. 压电智能结构荷载识别方法的研究[J]. 力学学报, 2004, 36(4): 491-495.
ZHOU Wanlin, WANG Xinwei, HU Zili. On load identification for piezoelectric smart structures[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2004, 36(4): 491-495.(in Chinese)
- [4] LECLERC J R, WORDEN K, STASZEWSKI W J, et al. Impact detection in an aircraft composite panel—a neural-network approach[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 299(3): 672-682.

- [5] 高媛. 基于 ARM 的航空结构冲击载荷监测系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [6] 温嘉琦, 汤雷, 姜波, 等. 基于机器学习的围岩监测指标效力评估[J]. 振动、测试与诊断, 2024, 44(6): 1226-1233.
- WEN Jiaqi, TANG Lei, JIANG Bo, et al. Effectiveness evaluation of surrounding rock monitoring indicators based on machine learning[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(6): 1226-1233.(in Chinese)
- [7] GAUL L, HURLEBAUS S. Identification of the impact location on a plate using wavelets[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1998, 12(6): 783-795.
- [8] COVERLEY P T, STASZEWSKI W J. Impact damage location in composite structures using optimized sensor triangulation procedure[J]. Smart Materials and Structures, 2003, 12(5): 795.
- [9] JIAO J P, HE C F, WU B, et al. Application of wavelet transform on modal acoustic emission source location in thin plates with one sensor[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2004, 81(5): 427-431.
- [10] 倪俊芳, 奚立峰, 钱志良, 等. 基于 Morlet 小波结构健康监测中的时间延迟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(6): 1094-1098.
- NI Junfang, XI Lifeng, QIAN Zhiliang, et al. Time delay based on morlet wavelet in structural health monitoring[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008, 38(6): 1094-1098.(in Chinese)
- [11] CIAMPA F, MEO M. Acoustic emission source localization and velocity determination of the fundamental mode A0 using wavelet analysis and a newton-based optimization technique[J]. Smart Materials & Structures, 2012, 19(4): 045027.
- [12] 者娜, 刘才学, 杨泰波, 等. VMD 和随机森林在反应堆金属撞击信号识别中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(5): 102-107.
- ZHE Na, LIU Caixue, YANG Taibo, et al. Application of VMD and random forest in reactor metal impact signal recognition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(5): 102-107.(in Chinese)
- [13] 温金山, 洪德明, 朱健健, 等. 基于机电阻抗法的复合材料层压板低速撞击损伤监测[J]. 传感技术学报, 2023, 36(3): 355-361.
- WEN Jinshan, HONG Deming, ZHU Jianjian, et al. Monitoring composite laminate damage caused by low-velocity impact using electromechanical impedance[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(3): 355-361.(in Chinese)
- [14] 王威, 陶传义, 朱悦青, 等. 光纤光栅传感器阵列在撞击定位监测中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 76-82.
- WANG Wei, TAO Chuanyi, ZHU Yueqing, et al. Application of fiber bragg grating sensor array in impact location monitoring[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 76-82.(in Chinese)
- [15] 陶冶, 张帅. 基于叶片应变测量的航空发动机风扇外物撞击监测识别[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 1286-1291.
- TAO Ye, ZHANG Shuai. Foreign object impact monitoring and identification of aero engine fan based on blade strain measurement[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(3): 1286-1291.(in Chinese)
- [16] 朱春丽, 李书兆, 沈晓鹏, 等. 基于能量重心定位的水下防护薄板结构撞击识别方法[J]. 船舶工程, 2021, 43(7): 153-159.
- ZHU Chunli, LI Shuzhao, SHEN Xiaopeng, et al. Impact identification method of thin-plate structure for sub-sea protection based on energy barycentre positioning [J]. Ship Engineering, 2021, 43(7): 153-159.(in Chinese)
- [17] WANG Z J, TIAN G Y, MEO M, et al. Image processing based quantitative damage evaluation in composites with long pulse thermography[J]. NDT & E International, 2018, 99: 93-104.
- [18] SU C H, JIANG M S, LV S S, et al. Improved damage localization and quantification of CFRP using lamb waves and convolution neural network[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(14): 5784-5791.
- [19] TABIAN I, FU H L, KHODAEI Z S. A convolutional neural network for impact detection and characterization of complex composite structures[J]. Sensors, 2019, 19(22): 4933.
- [20] ZHANG S Y, LI C M, YE W J. Damage localization in plate-like structures using time-varying feature and one-dimensional convolutional neural network[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 147: 107107.
- [21] HESSER D F, KOCUR G K, MARKERT B. Active source localization in wave guides based on machine learning[J]. Ultrasonics, 2020, 106: 106144.
- [22] Det Norske Veritas. DNV-RP-F107 Risk assessment of pipeline protection[S]. Høvik: DNV, 2010.



第一作者简介:徐万海,男,1981年7月生,博士、教授。主要研究方向为海洋结构安全监测。曾发表《Intelligent evaluation of impact damage for subsea protective facilities with asymmetric openings》(《Ocean Engineering》2023, Vol.278)等论文。
E-mail: xuwanhai@tju.edu.cn