

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209846

碳纤维环氧织物复合材料受力位置识别方法

杨浩 杨玉娥 刘文涛 刘城
(济南大学机械工程学院 济南 250022)

摘要: 由于高速列车在运行过程中,车下设备舱底板由于受到不同程度异物撞击,使得复合材料性能下降影响列车运行安全,所以寻求一种可靠、准确的方法检测损伤位置显得尤为重要。由于复合材料受力变化会引起相关结构参数及模态特性变化,现拟用一种模态分析方法预测复合材料的受力位置,对模态参数(固有频率及相对振幅比)与受力位置之间的关系进行研究。通过模态分析软件 m+p SO Analyzer 建立复合材料对应的平面模型,对复合材料的振动特性进行测试分析,建立不同位置受力时,复合材料的固有频率及相对振幅比等高线图;进一步,通过固有频率确定受力位置到复合材料中心的距离;最后,结合相对振幅比确定复合材料的受力位置。结果表明,基于固有频率及振幅变化可以成功预测碳纤维环氧树脂复合材料试件的受力位置,并可以将误差控制在 5% 的范围内。

关键词: 复合材料;结构损伤;固有频率;相对振幅比

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430.25

Force position identification method of carbon fiber epoxy fabric composite

Yang Hao Yang Yu'e Liu Wentao Liu Cheng
(School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: During the operation of high-speed trains, due to the impact of different degrees of foreign bodies on the bottom plate of the equipment cabin under the train, the decline in the performance of composite materials affects the safety of train operation. Therefore, it is particularly important to find a reliable and accurate method to detect the damage location. Due to the change of structural parameters and modal characteristics of composite materials, a modal analysis method is proposed to predict the stress position of composite materials, and the relationship between modal parameters (natural frequency and relative amplitude ratio) and stress position is studied. The plane model of the composite was established by the modal analysis software m+p SO Analyzer, and the vibration characteristics of the composite were tested and analyzed. The contour maps of the natural frequency and relative amplitude ratio of the composite under different positions were established. Furthermore, the distance from the stress position to the center of the composite material is determined by the natural frequency; finally, the stress position of the composite was determined by combining the relative amplitude ratio. The results show that the force position of carbon fiber epoxy resin composite specimen can be successfully predicted based on the change of natural frequency and amplitude, and the error can be controlled within 5%.

Keywords: composite materials; structural damage; natural frequency; relative amplitude ratio

0 引言

由于碳纤维增强复合材料具有强度高,刚度大等一系列优点,并且能满足重量轻、寿命长和可靠性要求^[1]。因而,被广泛应用于航空航天、土木工程、海洋工程等领域,近年来其在轨道交通领域也得到适当的应用^[2-3]。

虽然复合材料具有许多优良的性能,但也存在某些不足之处。例如,抗外物冲击损伤的能力一直是复合材料的

一个缺陷,制约着复合材料的应用与发展。考虑高速列车在行驶过程中,难免会遇到砂石等特殊情况的撞击,导致高速列车设备舱底板会因此受到凹坑、裂纹等缺陷,从而导致底板性能的大幅降低,难以满足日常的应用要求^[4]。并且,这些损伤在外观上往往很难用肉眼识别,但当损伤发展到一定程度时,就会产生结构失效,进一步会导致设备损伤,发生重大交通事故,威胁人们生命安全。因此,寻求一种可靠的损伤检测方法对复合材料的受力位置进行早期识别,

具有重要的意义。

近年来,国内外学者已经对材料损伤识别方法进行了大量研究,常俊杰等^[3]通过傅里叶变化实现了对铝板损伤进行定量检测,并把误差控制在一定范围之内。叶杨等^[6]基于主成分分析和支持向量机实现了对旋翼桨叶的疲劳损伤进行定位,并证实了该方法的可靠性。通过对结构简单的构件进行损伤检测,并使得到结果具有一定的准确性,进而展开了一系列对复合材料的损伤检测研究。吴杰等^[7]基于变分模态分解方法结合超声检测对复合材料内部缺陷实现检测,此方法避免的由于内部结构复杂而引起损伤识别困难的影响,可以对损伤进行精确定位。齐添添等^[8]通过提高声发射源的定位精度,降低了复合材料各向异性对定位结果的影响,从而提高了对复合材料损伤缺陷的检测精度。阳能军等^[9]通过对比 HHT 与小波变换对声发射信号的处理结果,得出采用 HHT 方法处理后的声发射信号更能表征复合材料不同损伤状况。Wei 等^[10]证实了非线性声共振方法对渐进疲劳损伤识别的有效性,并预测了材料的剩余使用寿命。Zhu 等^[11]证实基于振动的结构损伤识别方法相比其他方法而言,得到的数据更具有准确性和保真性。宫岛等^[12]研究了车下设备与车体之间的振动关系,并通过数值计算的方法验证了车下设备对车体振动特性的影响机理。朱洪艳等^[13]基于振动特性对直升机结构进行缺陷检测,证实了振动特性指标可以用于表征缺陷状况。Altunlik 等^[14]利用不同条件下的模态参数变化,对工程结构状态进行健康监测。杨鹏飞^[15]等应用振动特性对复合材料进行损伤定位,并证明了振动特性对实际损伤检测具有一定的指导意义。

上述文献分别通过不同检测方法对复合材料的裂纹、冲击和载荷等损伤状况进行了相关研究。但所述方法主要适用于针对具体位置损伤进行局部检测,对于整体结构的损伤检测存在不足。为满足对全局进行健康监测,及时准确的识别损伤位置,降低列车运行的风险系数。本文基于模态分析,通过碳纤维复合材料的固有频率及对应结点的振幅,对碳纤维复合材料板上的受力位置进行识别研究。

1 试 验

1.1 试验材料及测点分布

本文拟采用正方形复合材料平板试件来模拟列车设备舱底板,所用试件材料为 T700 环氧织物预浸料,此材料由中车青岛四方机车车辆股份有限公司提供,其为平纹组织,密度为 1.6 g/cm^3 ,重量为 400 g/m^2 ,纤维体积含量为 50%,单层厚度为 0.4 mm,每根经纱和纬纱都由 12 000 根单丝组成,采用环氧树脂作为基体。

本文采用的试件为边长 450 mm 的正方形,厚度为 3 mm;通过间隔 50 mm 划分网格;设横向为 x 轴,纵向为 y 轴,沿 x, y 轴分别依次划分为 8 个测点和 7 个方格,依次表示为测点 1~64(力锤敲击点)、方格 1~49(受力位置),

如图 1 所示。首先依次对各个测点(图 1 中白色虚线交点,共 64 个)进行逐次敲击,使被测物感应到脉冲激励信号,并通过被测物表面粘贴的加速度传感器(白色圆点,共 4 个,此位置可以通过反向激励来获取振动特性),位于复合板的 4 个角上。最后进行信号处理和参数识别获得试件的相关模态参数,得出无重物时复合材料的振动特性,以区分有重物施加会对复合材料振动特性产生影响。

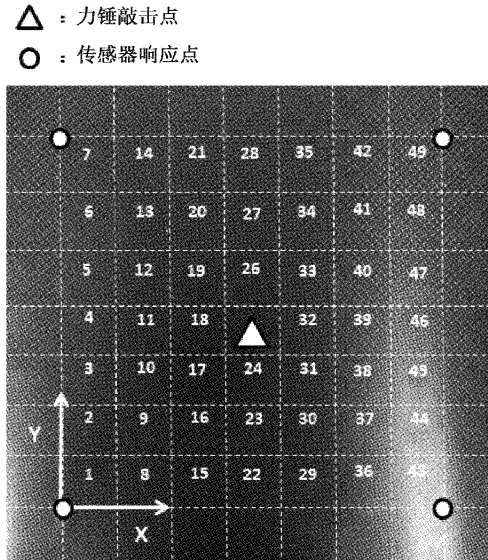


图 1 试验材料受力位置分布图

进一步通过不同位置施加重物,只对复合材料中心位置进行激励,以传感器获得的信号差异来区分重物位置。白色三角点为力锤敲击点,位于复合材料板中心,加速度传感器粘贴位置保持不变。在获取复合材料固有频率时,由于复合材料的固有频率数值是自身所固有的,不受敲击位置的影响,如果受力位置恰好位于敲击点时,可以更换敲击点;传感器的布置位置可以任意选取都会得到复合材料的固有频率值,由试验得振型浮动较大的位置,传感器接受的信号更强,固有频率更容易测得且更加清晰,所以优先选取振幅变动较大的位置布置传感器。获取复合材料振幅时,传感器布置位置的选取为了尽可能的满足各个传感器接受的信号只是受到复合材料振动特性的影响,以准确表征复合材料的受力位置。因此,设置传感器到力锤激励信号位置之间的距离相等,且能接收复合材料的全局状况。传感器的布置数量,是为了区分复合材料的受力方向,根据对角之间的幅值比变化可以识别受力方向,所以选择布置四个。

1.2 试验平台设计

本文基于锤击法完成模态测试,通过激励力锤对被测物体表面设置的测点进行逐个锤击,使被测物感应到脉冲激励信号,并通过被测物表面粘贴的加速度传感器采集振动信号,最后进行信号处理和参数识别获得试件的相关模态参数,得出无重物时复合材料的振动特性,以区分有重物施加会对复合材料振动特性产生影响。进一步通过在不同

位置施加重物,只对复合材料中心位置进行激励,以传感器获得的信号差异来区分重物位置。

本文采用自由边界条件进行测试,在实际测试中,采用橡胶软绳对试件进行悬挂来模拟自由边界条件,搭建的模态系统如图2所示,该系统主要包括激励力锤、加速度传感器、信号采集板卡、数据分析软件、试件及橡胶软绳。系统组件的具体参数如表1所示。

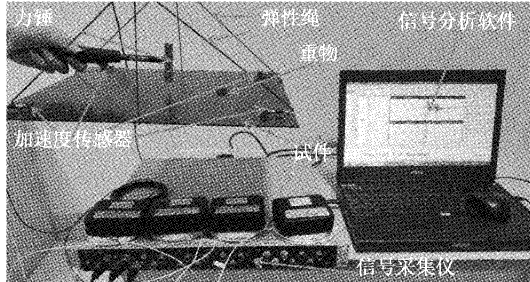


图2 锤击模态测试系统

表1 测试系统组件参数

名称	型号
信号采集仪	m+p vib runner VR3
信号分析软件	m+p SO Analyzer
力锤	DYTRAN 5800B4 (sensitivity: 2.25 N/mV)
加速度传感器	DYTRAN 3097A2 (sensitivity: 98.36 mV/g)

1.3 数据采集

在锤击法的模态试验中,可以通过连接激励力锤及加速度传感器的信号采集卡通道对测试数据进行采集。为了满足数据的测试更加符合试件后面的模态分析,对数据采集参数进行设置,其中包括通道参数、分析带宽、频率分辨率等。在试验过程中,某次采集的信号如图3所示,其中图3(a)为激励力时域信号,图3(b)为响应时域信号,图3(c)为响应频域信号,图3(d)为响应频幅信号,通过采

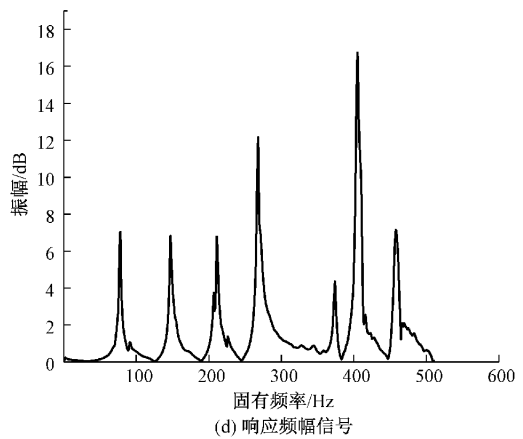
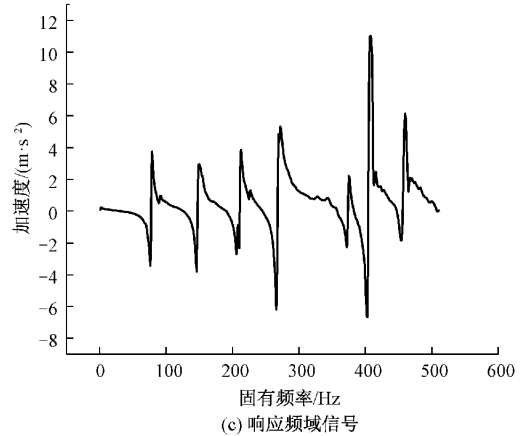
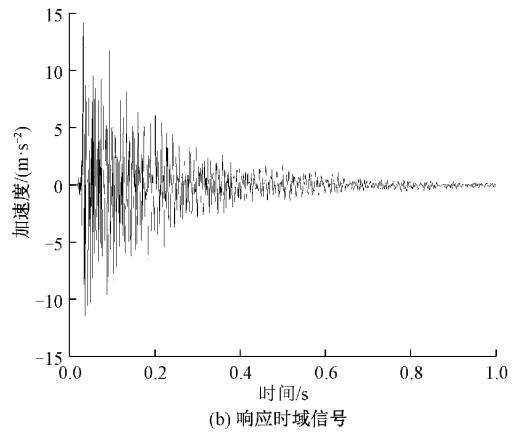
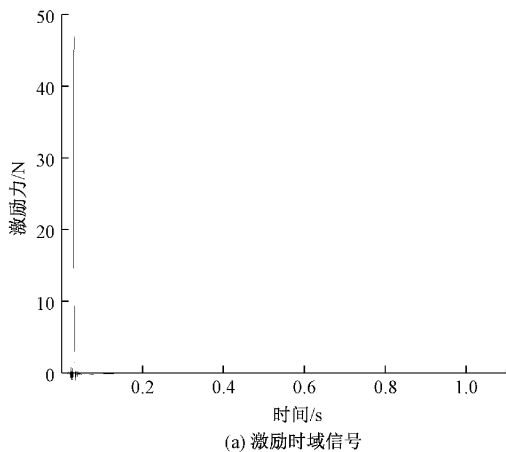


图3 采集信号

集信号可以得到各测试位置的固有频率及振幅。无重物施加时,复合材料本身所固有的第一阶振型如图4所示。

2 结果与讨论

受力位置的识别可以通过确定受力位置到某固定点的距离多少和受力位置在此固定点的哪个方向上两个方面相结合来进行判断。本文引入的固有频率和相对振幅比两个识别指标可以很好的表征受力位置到激励位置的距离和受力位置在激励位置的具体方位,即满足了对复合材料受力位

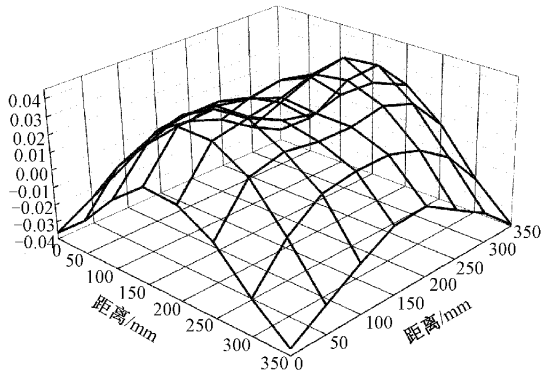


图 4 第一阶阵型

置进行有效识别的需求。下面将对具体识别过程进行说明：

通过对无重物时复合材料的振动特性进行分析，接下来对施加重物时复合材料的振动特性进行测试，以通过对比两者区别来区分受力对结构产生的影响。通过依次在 49 个方格内施加相同重物（边长 30 mm，质量 20 g 的铁块），分别提取重物在每个位置时，复合材料的第一阶固有频率，做出固有频率等高线图，如图 5 所示。

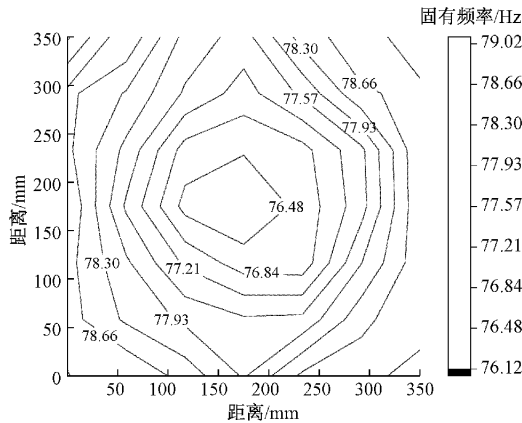


图 5 固有频率等高线

从图 5 中可以看出，固有频率沿中心向四周逐渐增加，在复合材料板中心位置施加重物得到的固有频率最低，值为 76.48 Hz，在边缘处施加重物得到的固有频率最高，值为 78.66 Hz，通过此方法可以判断重物施加位置距复合材料中心的距离，但在相同固有频率下无法对重物施加位置的方向进行判断，即无法用单一指标（固有频率）来识别重物施加的具体位置。因此，又引入了另一指标相对振幅比。

进一步，保持加速度传感器设置位置不变，设置四个角（测点 1,8,64,57）位置的加速度传感器分别为加速度传感器 1,2,3,4；为了进一步得到重物施加位置的准确位置，分别提取重物在每个位置时（共 49 个）加速度传感器所采集到的振幅值，并用加速度传感器 1,2 采集的振幅值除以加速度传感器 3,4 采集的振幅值，得到在不同位置施加重物的相对振幅比；用 49 个位置的此比值做出振幅比(1/3)等高线图和振幅比(2/4)等高线图，如图 6、7 所示。

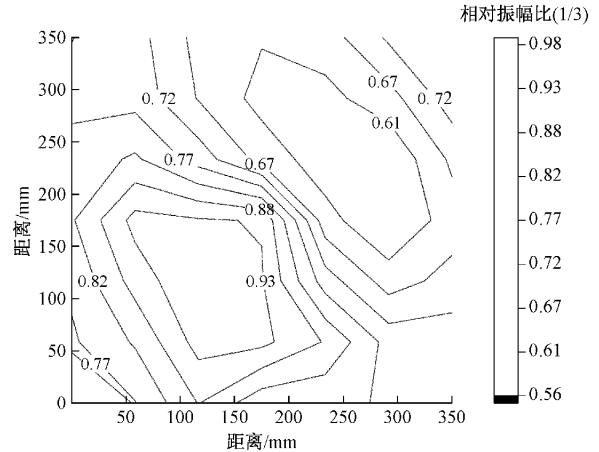


图 6 相对振幅比(1/3)等高线图

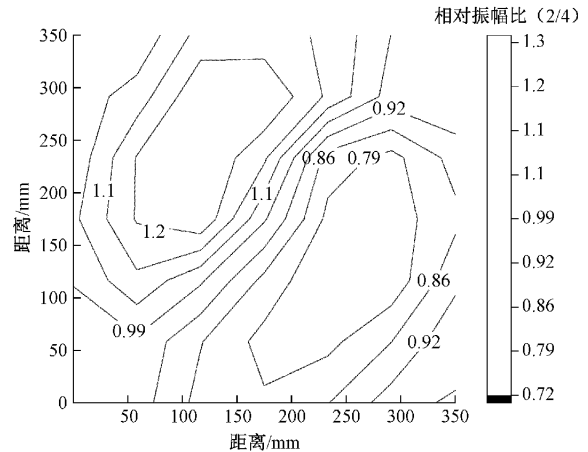


图 7 相对振幅比(2/4)等高线图

从图 6 可以看出，振幅比以主对角线为分界，左下角相对数值较大，右上角相对数值较小，呈环形变化，且沿副对角线近似对称；从图 7 可以看出振幅比的变化规律与图 6 相似，振幅比以副对角线为分界，左上角相对数值较大，右下角相对数值较小，呈环形变化，且沿主对角线近似对称。

由此可得，可以在基于固有频率判断出重物施加位置距复合材料板中心距离的基础上，根据重物施加位置不同所产生的振幅不同，判断出重物在同一固有频率上的方向，进而判断出重物施加的位置。

为了进一步验证结果的准确性，分别对每个方格重复进行重物施加测试，测试结果均显示只存在唯一解，而且位置与实物放置位置相同。下面以方格 28 放置重物为例进行具体解释说明。

在方格 28 位置施加重物的情况下，某次试验测得固有频率为 77.41 Hz（由图 8、9 中的实线表示），加速度传感器 1,3 的相对振幅比(1/3)为 0.617 01（由图 8、9 中的虚线表示），加速度传感器 2,4 的相对振幅比(2/4)为 1.151 76（由图 9 中的细点画线表示）。

做出固有频率等高线图与振幅比(1/3)等高线图重合

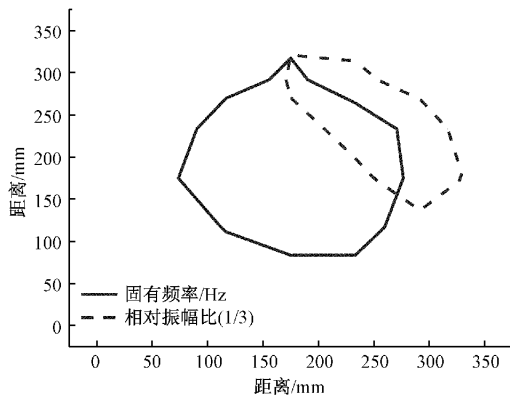


图8 重物位置识别图

图,如图8所示。由图中可以看出,两个等高线图产生了两个交点,进而可以把重物施加位置缩小到这两个点的位置,但无法判断哪一点。为了准确表示具体为哪一点,下面加入了振幅比(2/4)等高线图,如图9所示。由图可知,三个等高线图交于唯一一点,此等高线图可以识别重物施加位置,而且从图中可以看出重叠位置就是实际重物施加的位置。

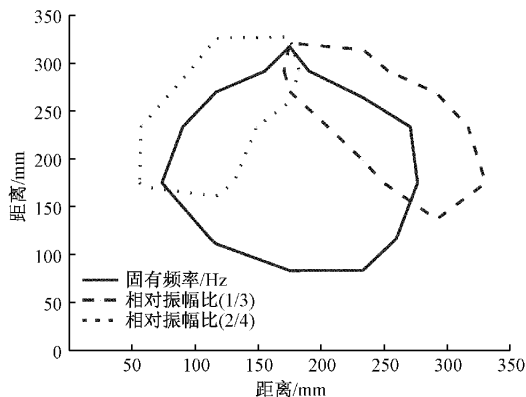


图9 重物位置识别图

通过对多组随机数据的进行测试,得到试验测点位置图,如图10所示,虚线交点为重物放置点,黑色圆点为识别

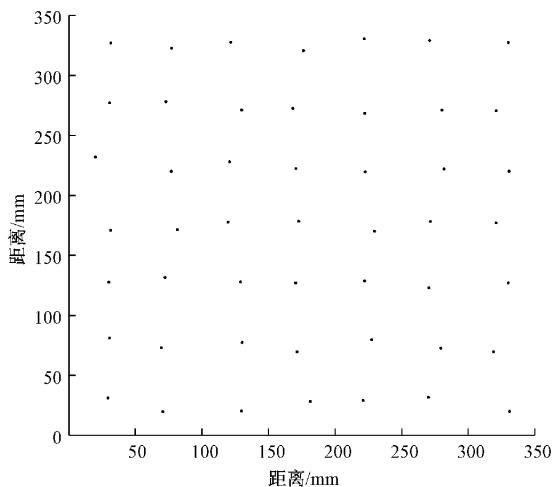


图10 实测受力位置图

点,通过对图10中的识别点与实际重物放置点进行误差分析,得出识别位置在以实际重物放置位置为圆心,半径为5 mm的圆形范围内,即偏差控制在5%以内,满足了对复合材料受力位置检测的准确性。

3 结 论

本研究基于试件模态振动特性,通过试验测试分析发现,复合材料的固有频率会随受力位置的变化而变化,呈现由材料中心向四周逐渐变大,中心位置受力时,复合材料的固有频率达到最低。对角位置的相对振幅比也会随受力位置的变化而变化,振幅比以对角线为分界,左侧部分相对数值较大,右侧部分相对数值较小,呈环形变化。在用重物(边长30 mm,质量20 g的铁块)模拟复合材料受重物施加试验中,利用固有频率和相对振幅比的规律,可以成功确定复合材料的受力位置。本文的研究结果对复合材料损伤识别提供了新的检测方法,对所有材料具有普适性,避免了因复合材料各向异性及结构复杂而无法准确定位识别的不足,具有较强的指导意义和参考价值。另一方面本文为不规则形状构件的损伤研究提供了研究思路。

参考文献

- [1] 邢丽英,冯志海,包建文,等.碳纤维及树脂基复合材料产业发展面临的机遇与挑战[J].复合材料学报,2020,37(11):2700-2706.
- [2] 杨智勇,张博明,解永杰,等.碳纤维复合材料空间反射镜制造技术研究进展[J].复合材料学报,2017,34(1):1-11.
- [3] 缪炳荣,张卫华,池茂儒,等.下一代高速列车关键技术特征分析及展望[J].铁道学报,2019,41(3):58-70.
- [4] 严实,郭留雨,赵金阳,等.三维五向编织复合材料低速冲击及冲击后压缩性能实验研究[J].材料工程,2017,45(12):65-70.
- [5] 常俊杰,万陶磊,钟海鹰.短空间二维傅里叶变换对铝板的损伤定量研究[J].电子测量与仪器学报,2020,34(6):102-108,DOI:10.13382/j.jemi.B1902797.
- [6] 叶杨,徐志伟,陈仁文,等.基于KPCA和SVM的直升机旋翼桨叶损伤源定位[J].电子测量与仪器学报,2020,34(4):118-123,DOI:10.13382/j.jemi.B1902566.
- [7] 吴杰,王召巴,陈友兴.基于变分模态分解的玻纤复合材料内部缺陷特征提取方法[J].国外电子测量技术,2021,40(1):15-20,DOI:10.19652/j.cnki.femt.2002268.
- [8] 齐添添,陈尧,李昕,等.基于时间反转的玻璃钢复合板材声发射源定位方法[J].仪器仪表学报,2020,41(6):208-217,DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2006125.
- [9] 阳能军,王新刚,王蒙.HHT在复合材料损伤声发射信号处理中的应用[J].电子测量技术,2011,34(8):45-47,DOI:10.19651/j.cnki.emt.2011.08.011.
- [10] WEI Q, ZHU L, ZHU J, et al. Characterization of

- impact fatigue damage in CFRP composites using nonlinear acoustic resonance method [J]. Composite Structures, 2020;112804.
- [11] ZHU X, CAO M, OSTACHOWICZ W, et al. Damage identification in bridges by processing dynamic responses to moving loads: Features and evaluation [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19 (3), DOI: 10.3390/s19030463.
- [12] 宫岛,周劲松,杜帅妹,等. 高速动车组车下设备对车体振动传递与模态频率的影响机理研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(18):126-133.
- [13] 朱洪艳,吴宝昌,林长亮,等. 直升机复合材料结构基于振动健康监测的研究进展 [J]. 材料导报, 2020, 34(S1):581-584.
- [14] ALTUNIK A C, KARAHASAN O, GEN A F, et al. Modal parameter identification of RC frame under undamaged, damaged, repaired and strengthened conditions[J]. Measurement, 2018, 124: 260-276.
- [15] 杨鹏飞,宁宁,詹绍正,等. 基于振动特性的含冲击损伤复合材料检测的有限元模拟[J]. 无损检测, 2015, 37(5):25-29.

作者简介

杨玉娥(通信作者),副教授,博士,主要研究方向为传感器技术,无损检测技术及健康监测等。

E-mail:me_yangye@ujn.edu.cn

杨浩,硕士,主要研究方向为无损检测技术。

E-mail:1481431309@qq.com

刘文涛,讲师,博士,主要研究方向为无损检测技术。

E-mail:363894546@qq.com

刘城,硕士,主要研究方向为无损检测技术。

E-mail:1014983518@qq.com