

戴东利,杨汉青,杨翔,等.基于波动理论的结构损伤识别研究进展[J].地震工程学报,2022,44(5):1001-1008.DOI:10.20000/j.1000-0844.20210703002

DAI Dongli, YANG Hanqing, YANG Xiang, et al. Recent advances in structural damage identification based on wave theory: a review[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(5): 1001-1008. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20210703002

综述

基于波动理论的结构损伤识别研究进展

戴东利^{1,2}, 杨汉青³, 杨翔⁴, 何伟³

(1. 中铁十六局集团有限公司, 北京 100018; 2. 中铁十六局集团许昌工程有限公司, 河南 许昌 461002;
3. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450045; 4. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 目前人们对于结构的使用安全越来越重视,结构在日常使用或灾后的损伤识别检测也变得尤为重要。近年来国内外对于波在结构中的传播理论进行了深入研究,基于波动理论的结构损伤识别方法也取得了一定进展。文章首先介绍波在介质中的传播以及在各种类型结构中的传播规律和传播特性,其次从基于波传播理论的结构损伤识别、基于 Lamb 波的结构损伤识别、波动理论和神经网络相结合、波动理论与其他技术或算法的融合 4 个方面对国内外基于波动理论对结构损伤识别方法的研究成果进行综述。

关键词: 波动理论; 损伤识别; Lamb 波; 神经网络

中图分类号: TU317

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)05-1001-08

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20210703002

Recent advances in structural damage identification based on wave theory: a review

DAI Dongli^{1,2}, YANG Hanqing³, YANG Xiang⁴, HE Wei³

(1. China Railway 16th Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100018, China;

2. Xuchang Engineering Co., Ltd. of China Railway 16th Bureau Group Co., Ltd., Xuchang 461002, Henan, China;

3. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, Henan, China;

4. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: Nowadays, the use safety of structures has attracted more and more attention, and the damage identification and detection of structures in daily use or after disaster becomes particularly important. In recent years, in-depth research has been conducted on the theory of wave propagation in structures at home and abroad, and certain progress has been made in structural damage identification methods based on the wave theory. This article first introduced the propagation of waves in the medium, and the propagation laws and propagation characteristics in various structures. Then, this paper summarized the

收稿日期: 2021-07-03

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(182102310890); 河南省高等学校重点科研项目计划项目(19A560014); 中铁十六局集团科技研发项目(K2020-7B); 铁四院科技研究开发项目(2020K161)

第一作者简介: 戴东利(1979-), 男, 河北玉田人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事铁道工程、桥梁工程研究。E-mail: 55257033@qq.com。

通信作者: 杨汉青(1992-), 男, 河南商丘人, 硕士, 主要从事工程结构损伤识别研究。E-mail: 1340282173@qq.com。

research results of structural damage identification methods based on the wave theory at home and abroad from four aspects, i.e., the structural damage identification based on the theory of wave propagation, the structural damage identification based on Lamb wave, the combination of wave theory and neural network, and the integration of wave theory and other techniques or algorithms.

Keywords: wave theory; damage identification; Lamb wave; neural network

0 引言

目前大多数关于结构损伤识别方法的研究都是基于振动理论开展的。结构若发生损伤,其振动频率、模态振型等表征结构物理特性的参数会随之发生改变^[1]。由于结构的振动参数便于测量且所需成本低,并且随着人工智能技术的发展,基于振动特性的损伤识别方法与人工智能的结合愈发趋于高效和完善,因此得到了广泛的应用。

结构在介质中的振动随着介质中相邻质点之间相互作用和时间的推移会向各个方向进行传播,从而形成波动。目前基于波动法的损伤识别方法的研究较少,有研究表明相对于振动法来说,波动法对损伤更为敏感且能够反映出结构振动时真实的时间效应^[2]。波在介质中传播时,其波形、幅值、相位和传播时间等相关参数与其机械运动状态紧密相关,这些传播特性可以反映介质的内部性质。波动理论作为动力学研究方向的重要分支,因其便利性和易操作性被广泛应用于地球物理勘探、石油勘探监测和土木工程结构的无损监测中。近年来基于波动法的健康监测在土木工程领域得到了一定的应用。

1 波的分类及其在结构中的传播

结构中的质点受到扰动会离开平衡位置,质点间的相互作用力会使其恢复至平衡位置从而产生振动,临近质点会随之振动并依次将振动信息传播到下一个质点,由此形成波动。若介质为弹性介质则称为弹性波。

1.1 弹性波的分类

弹性波可分为体波和导波。在无限空间中传播的波称为体波,体波又可分为横波和纵波。波的传播方向与质点振动方向相同的波为纵波,与质点振动方向垂直的波为横波,其中横波又可根据质点振动方向平行或垂直于传播面而分为水平剪切横波(SH波)和垂直剪切横波(SV波)。相对于体波,导波受到边界的影响,是在波导结构中传播的波,可分为Lamb波^[3]、Love波、Rayleigh波等。

在无边界各向同性弹性固体介质中,弹性波(体波)传播的波动方程为

$$\begin{aligned} \mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \mu \nabla^2 v + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ \mu \nabla^2 w + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ∇^2 为拉普拉斯算子, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$; λ 和 μ 为拉梅系数; ρ 是介质密度; u, v, w 是介质中的3个位移分量。

式(1)为弹性波在各向同性无限空间中分别沿3个方向传播的运动微分方程。在此基础上,通过考虑不同的边界条件,可以得到弹性波在各向同性半无限空间、有限空间等均匀介质和非均匀介质中的运动微分方程及其传播规律。

分别根据位移场的无旋和无源,由式(1)得到弹性介质中纵波和横波的传播速度 v_p 和 v_s :

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3)$$

二战后,世界各国对于自身的军事实力愈发重视,因此弹性波的研究得到了空前的发展。由于实际工程中介质并不全是各向同性的,因此各国学者逐渐对弹性波在弹塑性、黏弹性、黏塑性、非弹性、非线性及层合介质等复杂介质中的传播进行了研究,揭示了弹性波在其中的传播规律和特征^[4]。

1.2 波在杆和转轴等结构中的传播

杆状结构的应用非常广泛,例如只受拉压作用的等截面直杆和变截面杆,以及机械中经常使用到的转轴等构件。弹性波在杆状结构中传播规律的研究主要针对的是匀直杆、变截面杆以及转轴等结构。

2014年,GAN等^[5-6]对杆和转轴中弹性波的传播特性进行了研究,发现纵波在传播时存在阻带,而阻带内的波成分不能通过介质进行传播,如果这些频率的波成分对监测数据来说很重要,则会严重影响监测的准确性。同年,魏义敏^[7]对变截面杆和转轴中的弹性波做了详细的研究,充分考虑变截面杆的泊松效应和剪切变形,首次建立了变截面杆的纵

波运动方程,导出整个变截面阶梯杆受外部弹性力作用时的纵波传递矩阵,并且针对一些可能会对纵波的传播特性产生影响的因素进行了研究;结果显示剪切变形、泊松效应、杆两端截面面积比等因素都会对纵波的传播特性产生较大影响,而杆的截面形式对其无影响。

在实际中往往会由于多种因素导致结构中产生孔隙。2016年,童紫薇等^[8]建立了具有孔隙的弹性圆杆模型,根据波在孔隙介质中的传播理论得到频散曲线,分析了圆杆半径和孔隙等参数对导波的影响;结果表明孔隙的存在对波速和波的衰减均会产生较大的影响。

在弹性波传播的过程中,往往会发生几何弥散效应。2019年,杨洪升等^[9]使用 Rayleigh-Love 修正理论和 Laplace 积分变换对脉冲作用下杆中产生的弹性波进行分析并推导出了解析解,同时与有限元解进行对比,验证结果的可靠性并从本质上对几何弥散效应进行了解释。

尽管对于弹性波在杆结构中传播特性的研究已经趋于成熟,但是随着社会的发展,人们对各种新型杆状结构的研究仍会一直深入下去。

1.3 波在梁结构中的传播

对弹性波在梁结构中传播规律的研究主要是以 Euler-Bernoulli 梁和 Timoshenko 梁这两种最常见的梁模型为主。

1984年, Mace^[10] 分析了一个一维 Euler-Bernoulli 梁模型,对其设置了几种不同的不连续条件和边界条件,并充分考虑边界、外加激励、近场波动的相互作用,利用几何连续性和平衡条件推导了近场波入射时的反射和透射矩阵。Doyle 等^[11]通过对多种一维结构进行分析,推导了弹性波在这些结构中的波动方程。1998年, Kang 和 Tan^[12-13] 以轴向变形和旋转影响下的 Timoshenko 轴为模型,在多种边界条件下对弹性波在该模型中的反射和透射进行了深入的研究,推导了弹性波的运动方程以及反射和透射系数,并对轴向应变、转速和转动惯量等参数对它们的影响进行了研究和总结。

弹性波在结构中传播时由于各种因素必然会产生衰减。2005年, Mei 等^[14] 以一维 Timoshenko 梁结构为模型,在考虑不连续处平动和转动的耦合效应的同时,充分考虑了波的衰减的影响,推导出了该一维梁结构在各种不连续条件下的传播、反射和透射矩阵的表达式。2019年,姜迎春等^[15] 以冲击荷载下的 Timoshenko 梁为模型,应用非结构化格子法

的思想,提出了一种关于 Timoshenko 梁中弹性波传播的新方法,并与之前的文献进行对比,验证了其可靠性。关于弹性波在直梁中传播的研究较多,成果相对丰富,对于曲梁的研究则相对较少。Lee 等^[16] 研究了等曲率曲梁中的波动规律,考虑了功率的影响,推导出位移、内力和传播矩阵,并提出一种基于波传播时的反射、透射的系统波动分析方法,用于分析波在具有弯曲梁单元波导结构中的传播。

无论是直梁还是曲梁,波在匀质结构中传播特性的研究已经取得了一定进展。随着复合材料的发展与应用,众多学者逐渐将弹性波在复合材料中的传播特性作为研究重点,展开进一步研究。

1989年, Farris 等^[17] 以一个层合梁结构为理论模型,研究了弹性波在纵向层合梁中的传播规律,结果显示分层处应力和位移的分布与连续处相差很大,且波速也会由于整体刚度的下降而减小,并对一个分层铝梁进行实验,验证了此结论。

2014年, Meng^[18] 研究了弹性波在含吸声涂层的圆柱形分层结构中的传播,以二维结构为理论模型推导了吸声涂层的反射、透射矩阵以及反射、透射系数,并与有限元解以及实验数据进行对比验证,最后由声波在该复合材料中传播特性的变化,证实了该模型用于研究含有吸声涂层的复合材料声学性能的可行性。

2016年,冯勇明等^[19] 研究了复合材料 Timoshenko 梁结构中弹性波的传播,考虑了分层表面完全张开和闭合这两种极端情况,推导出单向复合梁结构的反射、透射矩阵和反射、透射系数,并对其模态转换进行分析,最后与有限元模型试验得到的结果进行了对比验证。

随着多种新型材料的不断涌现和应用,对于弹性波传播特性的研究也在不断地深入,为梁结构的损伤识别研究打下了基础。目前国内外对于弹性波在各种结构中传播规律的研究已经相对成熟。在此基础上,越来越多的学者开始研究波在损伤结构中的传播,通过分析传播规律的变化来判定损伤,并在工程实际中显出了较好的应用前景。

1.4 波在板壳结构中的传播

板壳结构是土木工程中重要的受力构件,对于弹性波在板壳结构中传播特性的研究一直受到人们的关注。

2018年,冯春雨^[20] 采用传递矩阵法对单层和多层板结构中平面波的传播特性进行研究,得到反射、透射系数与入射角、板厚、频率等参数之间的关系曲

线,随后通过分析薄板在脉冲作用下的能量分布曲线与频散曲线之间的关系,发现二者的变化具有同步性。研究结果为层状薄板的无损检测提供了参考,不足之处在于,整个研究仅在单导波下进行,未分析多导波下结构的位移模式。

工程中最常用的板为钢筋混凝土板。2019年,门进杰等^[21-22]对不同材料和参数的钢筋混凝土板中弹性波的传播特性进行研究,使用声发射技术在多种不同的钢筋混凝土板中激发弹性波,通过传感器分析弹性波的波速、振幅与板参数之间的关系。研究表明板厚、龄期、强度等参数均会对波速、振幅、波的衰减等特性产生较大影响,例如:随着混凝土强度等级的提高,波的衰减降低的同时波速增大;随着龄期的增加,波速增大的同时衰减降低。结果还指出由于波衰减的影响,检测时应传感器的布置做进一步的优化以提高精度。

由于板的结构形式较为特殊,板中的弹性波会因频散而产生不同模式,对于其传播特性的研究可以为板的损伤检测提供理论依据。

2 基于波传播理论的结构损伤识别

应力波在结构中传播时,会在介质内具有明显波阻抗的部位(端部、损伤等介质属性发生变化的地方)发生反射和透射。根据波速和应力波到达监测点的时间和相位等参数的变化,可以对结构中的损伤情况进行识别。

2002年,罗松南等^[23]对弹性波在具有损伤的混凝土中的传播特性进行研究,建立了波在损伤介质中传播的波动方程并求得基本解,通过研究不同的损伤位置和损伤程度对首波到时和波幅的影响,并借助反分析理论确定了混凝土的损伤程度和位置。

2005年,王丹生等^[24]基于波传播理论对裂纹梁结构的机械阻抗特性进行分析,提出一种基于机械阻抗特性曲线对结构进行损伤识别的方法。他采用弯曲弹簧模型来模拟由裂纹引起的波传播的不连续性,由此推导出在简谐力作用下具有裂纹的简支梁弯曲波动解,随后结合裂纹梁第一阶谐振频率和固有频率对裂纹损伤进行了有效识别。

2016年,裴强等^[25]基于弹性应力波在固体介质中的传播理论分别推导了一维管道模型在稳态正弦激励和瞬态半正弦激励下的振动解析解,随后进行数值模拟,通过损伤处的回波到达时间识别出损伤位置,结果表明回波时间与损伤程度无关。

在弹性波的多个传播特性中,马占雄^[26]提出了

以剪切波速为指标,通过分析不同时段波速的变化来判别结构中损伤的方法。他首先推导了 Timoshenko 梁模型的波动方程,采用波动法求解结构在地震作用下的动力响应,随后推导出剪切梁脉冲响应函数公式,最后以剪切波速为指标成功识别了结构的损伤。

2018年,龙关旭等^[27]首先通过对试验梁进行静力与动力试验,获得了梁体破坏前后的应变分布及裂缝特征的变化,随后对不同阶段弹性波在梁内的传播情况进行分析,研究了冲击弹性波的传播规律与裂缝之间的关系,最后利用冲击弹性波成功识别了结构的损伤位置及损伤程度。

可以看出,基于波传播理论的结构损伤识别基本都是根据波在结构中传播特征的变化或结构响应的变化来进行的。现有研究表明,单一采用波传播理论识别结构损伤位置的效果较好,但仅能定性识别损伤程度。

3 基于 Lamb 波的结构损伤识别研究

Lamb 波的概念是由英国应用数学家 Horace Lamb^[3]于 1917 年首次提出的,并将其定义为:在平行无边界的板结构中横波和纵波耦合而成的一种特殊形式的应力波。Lamb 波在波导内根据质点振动方式的不同可以分为对称(S)和反对称(A)两种模式,如图 1、2 所示。由于 Lamb 波在板中的传播可

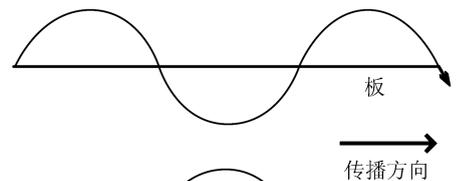


图 1 对称模式

Fig.1 Symmetric mode

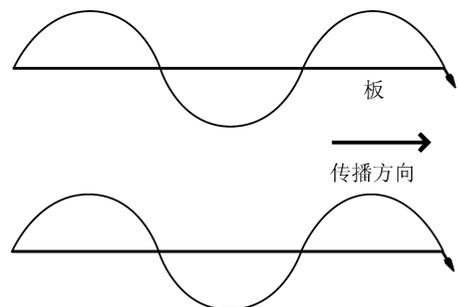


图 2 反对称模式

Fig.2 Antisymmetric mode

以沿整个壁厚方向进行,传播距离较长且能量衰减小,对损伤反应灵敏,因此其常用于板结构的检测。按照传播时板结构表面质点的振动相对于板中心是否对称,将 Lamb 波分为对称型和反对称型,建立了这种波的理论基础,提出了薄板结构中弹性波的应力波动方程(Rayleigh-Lamb 方程)。

Firestone 和 Ling 在 1951 年开创了基于 Lamb 波的损伤检测技术^[28],首次使用 Lamb 波探测薄板的损伤。在理论发展的同时,为了理解 Lamb 波的基本原理,Worlton^[29]在 1961 年做了深入的实验研究,结果显示材料的损伤监测可以利用板结构的频散曲线进行分析,证明了 Lamb 波用于结构损伤监测的可行性。

2004 年,周晚林等^[30]对损伤的复合材料板结构进行研究,从板中 Lamb 波的频散方程出发,针对表面粘贴压电元件的层合板智能结构建立了包含 Lamb 波谐振模式的压电阻抗计算模型。研究结果表明复合材料结构的损伤情况对 Lamb 波的频散特性和压电阻抗谱中各种特征信息的变化有显著的影响。

为了探究 Lamb 波的两模态中哪种对损伤更为敏感,2005 年刘曾华等^[31]利用斜探头分别激励出 S1 和 A1 导波,对钢板中的隐藏腐蚀缺陷进行检测,并通过傅里叶变换分别对两种模态的频散程度和衰减情况进行分析,研究结果表明 S1 导波对隐蔽的缺陷更加敏感。

由于 Lamb 波在任意频率下都会激发两种模态,这就导致 Lamb 波信号在叠加后变得复杂,而在实际工程中由于各种外界因素的影响,难以获得解决此问题所需要的准确基准信号。为解决此问题,2020 年周凯等^[32]提出了一种单一模态 Lamb 波的损伤检测方法,并提出一种改进的计算方法减小了误差。他在薄铝板中激励出单一的 A0 模态的 Lamb 波,由反射回波模态及其传播时间判断结构中是否存在损伤并计算出损伤位置,最后改进了计算方法,将识别误差控制在 3% 以内,但是并没有对损伤程度进行识别。

Lamb 波是板结构中特有的一种弹性波,通过其传播特性的变化能够与板中的损伤情况建立对应关系。板结构作为工程中重要的受力构件,在使用过程中也相对容易产生内部损伤或外部裂缝。目前基于 Lamb 波对板状结构损伤识别的研究已经取得了一定的进展,在损伤位置的识别上达到了很高的精度,但仍然存在较大的优化和进步空间。

4 波动理论与神经网络的结合

自 1943 年 McCulloch 等^[33]提出神经网络的概念后,经过多年的发展,逐渐出现了很多与神经网络相结合的识别结构损伤的方法。

1994 年,Bork 等^[34]将超声 Lamb 波和神经网络结合,通过对神经网络进行训练,使其能够准确识别和定位损伤,结果显示相对于传统的基于振动信息的结构损伤识别方法来说,弹性波对细小的损伤更为敏感。2002 年,Liu 等^[35]将超声波与 BP 神经网络和计算力学结合,提出了一种反分析方法,即通过超声波模拟建立神经网络,能有效识别薄板中的裂纹损伤,研究结果表明在更复杂的问题中该方法具有很好的应用前景。

2013 年,Liu 等^[36]提出了一种利用 Lamb 波和神经网络对具有钉孔的金属薄板中的裂纹进行检测的方法。他们首先通过小波变换得到能量比变化特征,随后分析裂纹特征与能量比变化特征之间的关系,最后利用数值仿真得到神经网络所需样本,进而识别出真实结构的裂纹位置,证明了利用该方法开发嵌入式实时智能诊断系统的可行性。

2019 年,边刘阳^[37]采用理论推导和数值模拟相结合的方法,研究了平板中 Lamb 波 S0 和 A0 模态的波动形式及其与损伤区域的相互作用,编写了铝板中 Lamb 波的频散曲线程序,提出了改进的 rapid 算法以解决损伤成像分辨率不足的问题,最后将超声 Lamb 波与神经网络相结合成功预测了损伤位置。

大量的研究表明将神经网络与超声波等波动理论相结合能够高效且精确地识别结构的损伤,在结构损伤识别领域具有一定的应用前景。但是其需要大量的样本,相对来说增加了工作负担,且基于波动理论与神经网络技术相结合的损伤程度识别目前还少见文献报道,有待进一步研究。

5 波动理论与其他技术或算法的融合

近几十年以来,随着计算机的高速发展,基于各种平台的高效算法大量出现。越来越多的学者将智能算法与结构损伤识别方法相结合,并取得了较好的成果。

2014 年,刘增华等^[38]将压电传感器激励出的单一的 S0 和 A0 模态的 Lamb 波与椭圆成像算法和数据融合方法相结合,对监测信号进行成像,成功地监测到了板中的缺陷并实现了二维成像定位,验证

了该方法的识别能力和精度。

2015年,何存富等^[39]对具有0.8 mm缺陷的薄板进行检测,将超声 Lamb 波与时间反转方法相结合,引入了多通道 Lamb 波时间反转方法,使与缺陷相关的多个 Lamb 波模态信号汇聚在同一时间,从而实现了能量聚焦,增大了缺陷回波信号,通过对比有、无损伤薄板的波包群速度的时间差,高效准确地实现了损伤的定位。

2016年,Zima等^[40]建立了一种新的基于椭圆的二元损伤成像算法和导波方法的裂纹板结构诊断系统,对嵌入式压电换能器结构的缺陷程度进行了深入的分析。数值模拟和实验结果表明,其提出的诊断系统在评估损伤程度的增长中具有很大的应用潜力。

2017年,Masurkar等^[41]提出了一种新的损伤定位算法,首先利用连续小波变换提取出 Lamb 波在结构中的飞行时间,随后使用该算法优化定位损伤区域,并通过三种不同类型的损伤进行验证。结果显示,应用该算法定位得到的损伤区域与实际损伤位置非常吻合。

虽然超声导波在结构损伤识别中已有一定的应用,但是对于较长的管道等大型结构来说,还存在很多超声导波无法确定的盲区。2020年,张磊^[42]对方钢梁进行理论、仿真和试验研究,通过分析特定区域的拓展时域区间以及反射波的时频曲线,提出了一种将时频分析与人工智能结合的算法,有效地对盲区进行了损伤识别。目前国内外对结构盲区的损伤识别研究较少且精度不高,有待进一步的研究。

在人工智能时代,结构损伤识别与机器学习的方法相结合就显得尤为重要。相较于传统的损伤识别方法,与智能算法结合可以极大地节约成本,提高检测的效率和准确度,做到实时监测,从而更加高效和精确地对结构的损伤进行识别。

6 结语

本文首先对介质中传播的弹性波进行分类,综述了弹性波在一些简单结构中的传播规律和传播机理的研究成果,随后分别从基于波传播理论的结构损伤识别、基于 Lamb 波的结构损伤识别、波动理论与神经网络的结合、波动理论与其他技术或智能算法的结合 4 个方面对结构损伤识别方法在国内外的研究进展进行了综述。

基于波动理论的损伤识别方法是研究中的难点,且现有的大多数研究针对的是带有损伤的薄板

等较小尺寸的结构,对于高层建筑、大跨度桥梁等大型结构,使用波动理论对其进行损伤识别的研究成果较少,尚有广阔的研究空间和研究价值。随着人工智能技术和深度学习的发展,基于波动理论对结构进行损伤识别的研究具有良好的发展前景和应用价值。

目前国内外对结构损伤识别的研究日趋完善,但仍然存在一些问题:

(1) 对于非线性介质组成的复杂结构的研究较少,实际应用有限,因此考虑结构非线性的损伤识别具有一定的研究价值。

(2) 数据的测量精度有待提高,测量误差对结构损伤识别结果精度的影响有待进一步研究。

(3) 获取数据所需的传感器的数量和布置对于损伤识别结果的影响有待进一步研究,由此开展的传感器优化也是下一步研究的重点。

参考文献(References)

- [1] 韩大建,王文东.基于振动的结构损伤识别方法的近期研究进展[J].华南理工大学学报(自然科学版),2003,31(1):91-96.
HAN Dajian, WANG Wendong. Overview of vibration-based damage identification methods[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2003, 31(1): 91-96.
- [2] 高峰,孙常新,赵冯兵.地下结构波动法与振动法的对比[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2012,31(4):764-768.
GAO Feng, SUN Changxin, ZHAO Fengbing. Contrast of wave and vibration methods for underground structure[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2012, 31(4): 764-768.
- [3] LAMB H. On waves in an elastic plate[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1917, 93(648): 114-128.
- [4] 余同希,苏先榭,王晓东.弹塑性波的研究现状与趋势[J].力学进展,1992,22(3):347-357.
YU Tongxi, SU Xianxue, WANG Xiaodong. The present situation and the tendency of the research on elastoplastic waves[J]. Advances in Mechanics, 1992, 22(3): 347-357.
- [5] GAN C B, WEI Y M, YANG S X. Longitudinal wave propagation in a multi-step rod with variable cross-section[J]. Journal of Vibration and Control, 2016, 22(3): 837-852.
- [6] GAN C B, WEI Y M, YANG S X. Longitudinal wave propagation in a rod with variable cross-section[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(2): 434-445.
- [7] 魏义敏.变截面杆与转轴中弹性波的运动方程及其传播特性[D].杭州:浙江大学,2014.
WEI Yimin. Equations of motion and propagation characteristics of elastic waves propagating in rods and rotating shafts with variable cross-sections[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

- [8] 童紫薇,韩庆邦,姜学平,等.被孔隙介质约束的弹性杆中的导波[J].应用声学,2016,35(5):384-394.
TONG Ziwei, HAN Qingbang, JIANG Xueping, et al. Guided waves in a solid rod surrounded by porous media[J]. Applied Acoustics, 2016, 35(5):384-394.
- [9] 杨洪升,李玉龙,周风华.梯形应力脉冲在弹性杆中的传播过程和几何弥散[J].力学学报,2019,51(6):1820-1829.
YANG Hongsheng, LI Yulong, ZHOU Fenghua. The propagation process and the geometric dispersion of a trapezoidal stress pulse in an elastic rod[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(6):1820-1829.
- [10] MACE B R. Wave reflection and transmission in beams[J]. Journal of Sound and Vibration, 1984, 97(2):237-246.
- [11] DOYLE J F. Wave propagation in structures; spectral analysis using fast discrete Fourier transform[M]. 2th ed. New York: Springer, 1997.
- [12] KANG B, TAN C A. Elastic wave motions in an axially strained, infinitely long rotating Timoshenko shaft[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 213(3):467-482.
- [13] TAN C A, KANG B. Wave reflection and transmission in an axially strained, rotating Timoshenko shaft [J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 213(3):483-510.
- [14] MEI C, MACE B R. Wave reflection and transmission in Timoshenko beams and wave analysis of Timoshenko beam structures[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2005, 127(4):382-394.
- [15] 姜迎春,白义奎,刘铁林,等.一种模拟冲击荷载作用下非均匀 Timoshenko 梁弯曲波传播的数值方法[J].科学技术与工程, 2019, 19(8):210-216.
JIANG Yingchun, BAI Yikui, LIU Tielin, et al. A numerical method for simulating flexural wave propagation in non-uniform Timoshenko beam under impact loading [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(8):210-216.
- [16] LEE S K, MACE B R, BRENNAN M J. Wave propagation, reflection and transmission in curved beams [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 306(3-5):636-656.
- [17] FARRIS T N, DOYLE J F. Wave propagation in a split Timoshenko beam[J]. Journal of Sound and Vibration, 1989, 130(1):137-147.
- [18] MENG T. Simplified model for predicting acoustic performance of an underwater sound absorption coating[J]. Journal of Vibration and Control, 2014, 20(3):339-354.
- [19] 冯勇明,周丽,杨建元,等.复合材料梁结构应力波传播特性研究[J].振动与冲击,2016,35(6):20-28,63.
FENG Yongming, ZHOU Li, YANG Jianyuan, et al. Wave reflection and transmission in composite beams[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(6):20-28, 63.
- [20] 冯春雨.平面层状固体介质中的声传播特性研究[D].北京:中国石油大学(北京),2018.
FENG Chunyu. Study on acoustic propagation characteristics in planar layered solid media[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [21] 门进杰,郭昌灵,王应生,等.钢筋混凝土板声发射波传播特性试验研究[J].振动与冲击,2019,38(1):243-250,270.
MEN Jinjie, GUO Changling, WANG Yingsheng, et al. Tests for AE wave propagation characteristics in RC slabs[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(1):243-250, 270.
- [22] 门进杰,王凯,史庆轩,等.带钢梁钢筋混凝土组合楼板声发射波传播特性试验研究[J].工程抗震与加固改造,2017,39(增刊1):58-62.
MEN Jinjie, WANG Kai, SHI Qingxuan, et al. Experimental study on acoustic emission propagation characteristics of reinforced concrete composite slab with steel beam [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39 (Suppl01):58-62.
- [23] 罗松南,程红梅.波在局部损伤混凝土介质中的传播[J].湖南大学学报(自然科学版),2002,29(2):20-23,57.
LUO Songnan, CHENG Hongmei. Propagation of waves in concrete media with local damage[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2002, 29(2):20-23, 57.
- [24] 王丹生,朱宏平.基于波传播和阻抗特性的裂纹梁损伤识别[J].振动、测试与诊断,2005,25(3):186-189.
WANG Dansheng, ZHU Hongping. Beam crack identification based on wave propagation and impedance method[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2005, 25(3):186-189.
- [25] 裴强,王延武,郭少霞,等.基于波动法的城市地下管线动态损伤识别[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(4):667-674.
PEI Qiang, WANG Yanwu, GUO Shaoxia, et al. Underground pipeline damage identification based on the fluctuations theory [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University Natural Science, 2016, 32(4):667-674.
- [26] 马占雄.基于波动理论的结构损伤识别[D].重庆:重庆大学,2017.
MA Zhanxiong. Wave theory based structure damage detection[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [27] 龙关旭,王涛,高贵杰,等.基于冲击弹性波的钢筋混凝土梁损伤识别[J].山东农业大学学报(自然科学版),2018,49(2):230-234.
LONG Guanxu, WANG Tao, GAO Guijie, et al. Damage identification for reinforced concrete beam based on impact elastic wave[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2018, 49(2):230-234.
- [28] FIRESTONE F A, LING D S. Method and means for generating and utilizing vibrational waves in plates; US6713484A [P]. 1951-01-02.
- [29] WORLTON D C. Experimental confirmation of Lamb waves at megacycle frequencies [J]. Journal of Applied Physics, 1961, 32(6):967-971.
- [30] 周晚林,王鑫伟. Lamb 波理论及层合板冲击损伤的实验研究[J].实验力学,2004,19(2):211-216.
ZHOU Wanlin, WANG Xinwei. Lamb wave theory and experimental study on impact damage in laminated plate[J]. Journal

- of Experimental Mechanics, 2004, 19(2): 211-216.
- [31] 刘增华, 何存富, 吴斌, 等. 利用兰姆波对板状结构中隐蔽腐蚀缺陷的检测[J]. 实验力学, 2005, 20(2): 166-170.
LIU Zenghua, HE Cunfu, WU Bin, et al. Hidden corrosion detection in plate-like structure using Lamb waves[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(2): 166-170.
- [32] 周凯, 徐新生, 武湛君. 基于压电传感器的单一模态 Lamb 波损伤检测[J]. 压电与声光, 2020, 42(1): 38-41.
ZHOU Kai, XU Xincheng, WU Zhanjun. Damage detection with single mode Lamb wave based on piezoelectric transducers[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2020, 42(1): 38-41.
- [33] MCCULLOCH W S, PITTS W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity[J]. Bulletin of Mathematical Biology, 1990, 52(1-2): 99-115.
- [34] BORK, UWE. Non-destructive evaluation of adhered metal joints using ultrasonic Lamb waves and artificial neural networks[J]. NDT & E International, 1997, 30(5): 329.
- [35] LIU S W, HUANG J H, SUNG J C, et al. Detection of cracks using neural networks and computational mechanics[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 191(25-26): 2831-2845.
- [36] LIU S D, DU C L, MOU J Q, et al. Diagnosis of structural cracks using wavelet transform and neural networks[J]. NDT & E International, 2013, 54: 9-18.
- [37] 边刘阳. 基于超声 Lamb 波的平板损伤识别和定位研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
BIAN Liuyang. Research on damage detection and localization in plates based on ultrasonic Lamb wave[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [38] 刘增华, 徐营赞, 何存富, 等. 板状结构中基于 Lamb 波单模态的缺陷成像试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 232-238.
LIU Zenghua, XU Yingzan, HE Cunfu, et al. Experimental study on defect imaging based on single Lamb wave mode in plate-like structures[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(4): 232-238.
- [39] 何存富, 周文楨, 刘增华, 等. 基于多通道时间反转 Lamb 波的铝板小缺陷检测[J]. 实验力学, 2015, 30(6): 683-689.
HE Cunfu, ZHOU Wenzhen, LIU Zenghua, et al. Small-sized defect detection in aluminum plate based on time reversal Lamb waves[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(6): 683-689.
- [40] ZIMA B, RUCKA M. Guided waves for monitoring of plate structures with linear cracks of variable length[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2016, 16(3): 387-396.
- [41] MASURKAR F A, YELVE N P. Optimizing location of damage within an enclosed area defined by an algorithm based on the Lamb wave response data[J]. Applied Acoustics, 2017, 120: 98-110.
- [42] 张磊. 方钢低频长距离超声导波检测盲区关键技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
ZHANG Lei. Research on the key technology of blind zone detection with low-frequency long distance ultrasonic guided wave in square steel bar[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.