

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905602

基于超声局部谐振的板结构缺陷定量检测方法*

焦敬品, 李立, 马百义, 何存富, 吴斌

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124)

摘要:为提高板结构缺陷检测效能,提供一种基于宽带激励的超声局部谐振检测方法。利用最大类间方差法对宽带激励下的超声波场进行了分析处理,得到了缺陷的超声局部谐振频率,并将超声局部谐振频率下声场的空间分布用于板结构损伤检测成像;针对特定材料及厚度的各向同性板结构,通过均匀设计试验的方法,建立了缺陷尺寸与其超声局部谐振频率的关系模型。实验结果表明,所提超声局部谐振检测方法可以高效地实现各向同性及各向异性板结构损伤检测。利用回归分析模型还可实现缺陷几何参数的反演,且反演精度较高(半径反演误差最大为2 mm,厚度反演误差最大为0.6 mm)。该方法为板结构缺陷检测及定量分析提供了可行的技术方案。

关键词:超声波;局部谐振;局部谐振频率;均匀设计;无损检测;定量评价

中图分类号: TB553 TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Quantitative detection method of plate structure defects based on ultrasonic local resonance

Jiao Jingpin, Li Li, Ma Baiyi, He Cunfu, Wu Bin

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of plate structure defect detection, an ultrasonic local resonance detection method based on wideband excitation is developed in this paper. The maximum between-class variance method is used to analyze and process the ultrasonic field under broadband excitation, and the ultrasonic local resonance frequency of the defect is obtained. The acoustic field spatial distribution under ultrasonic local resonance frequency is used in the detection and imaging of the plate structure damage. Aiming at the isotropic plate structure with specific material and thickness, the relationship model of defect size and ultrasonic local resonance frequency is established by means of the uniform design test. The experiment results show that the developed ultrasonic local resonance detection method can effectively achieve the damage detection of isotropic and anisotropic plate structure. With the regression analysis model, the inversion of the geometric parameters of the defects can be achieved, and the inversion precision is high (the maximum radius inversion error is 2 mm, and the maximum thickness inversion error is 0.6 mm). This study provides a feasible technical scheme for the defect detection and quantitative analysis of plate structure.

Keywords: ultrasound; local resonance; local resonance frequency; uniform design; non-destructive testing; quantitative evaluation

0 引言

作为工业装备中一种常用的结构形式,板结构广泛应用于航空航天、石油、化工、机械制造等工业领域。在工作载荷及环境因素的作用下,板结构在服役过程中不可避免地会产生损伤,影响其安全运行^[1-3]。因此,有必

要开展板结构损伤检测技术研究。

作为五大常规无损检测技术之一,超声波技术广泛应用于各类工业构件的无损检测。在超声检测中,通常根据检测信号的波形特征和谐振特性进行损伤检测与识别。目前,基于波形特征的分析方法在超声检测中应用最为广泛^[4-8]。此类方法通过对检测信号的时域波形进行分析,利用提取的超声回波信号的幅值、

收稿日期:2019-09-10 Received Date:2019-09-10

* 基金项目:国家重点研发计划(2016YFF0203002)、国家自然科学基金(11572010,11772013)项目资助

传播时间及相位等特征参数,进行损伤检测与评价。由于这些参数直接从检测信号的时域波形中提取,使得其检测结果受噪声影响大。此外,由于检测信号波形复杂,难以从时域波形中准确提取出各类特征参数。基于谐振特性的分析方法主要利用检测信号谐振频率的幅值及偏移等变化,实现结构损伤检测或性能测量^[9-10]。该方法受噪声影响小,检测灵敏度较高。例如,Meo等^[11]将超声谐振检测方法应用于复合材料中分层缺陷的检测,并将不同激励幅值下基波谐振频率偏移量用于分层缺陷区域的表征。在谐振检测中,由于声波工作在驻波模式,使得该方法存在检测盲区,无法实现位于波节处的缺陷检测^[12]。此外,由于谐振频率的变化程度取决于缺陷与试件的相对尺寸,使得谐振检测主要适用于有限尺寸构件中损伤检测,对大尺寸构件中小缺陷的检测能力有限。

在医学超声领域,利用超声造影剂中气泡谐振增强生物组织的散射信号,可有效提高医学超声成像的清晰度和分辨率^[13-15]。基于相类似的原理,通过调控声源的激励特性,使缺陷在其自身固有频率下进行振动,产生局部谐振现象,这样声能便可以直接高效地传递并集中在缺陷处。利用缺陷处的局部声谐振可极大增强缺陷检测的效率和灵敏度,高的声能转换效率也使输入声能降到mW甚至 μW 。Rokhlin^[16]从理论上分析了声波与固体中缺陷相互作用产生谐振的条件。Sarens等^[17]和 Angelis等^[18]通过数值模拟,对复合材料中分层和平底孔的局部谐振特性进行了分析。Solodov等^[19]提出利用局部缺陷谐振(local defect resonance, LDR)来提高声波与缺陷的相互作用,可以有效地区分出缺陷与材料其他部位,并利用多种非接触方式,实现多种不同构件中平底孔、分层、脱黏等损伤检测及成像。同时,建立了板中平底孔缺陷的超声局部谐振频率与缺陷几何尺寸的简化模型,但该模型仅适用于较大缺陷谐振频率的估计。针对实际工程检测时,无法预先获知结构的缺陷状态的情况,Hettler等^[20]提出一种基于宽频激励的缺陷超声局部谐振频率估计方法,并通过仿真与实验验证了超声局部谐振方法对板中缺陷检测的有效性。

综上所述,超声局部谐振检测具有低能耗、高灵敏度的特点,对于板结构大范围损伤检测具有很大的优势,但目前该方法研究尚处于起步阶段,缺陷几何参数与超声局部谐振频率关系模型尚不清晰,在超声局部谐振频率的估计方法及应用方面还有待进一步研究。鉴于此,本文利用类间方差法对宽带激励下板结构声场分布进行分析处理,提出了一种板结构缺陷超声局部谐振频率测量方法。在此基础上,通过均匀设计试验^[21-22],建立超声局部谐振频率与缺陷几何尺寸的关系模型,并将其应用于板结构损伤检测及定量评价。

1 板结构损伤超声局部谐振检测方法

结构损伤超声局部谐振检测方法的原理为:缺陷的存在导致结构局部刚度降低,引起其局部谐振频率变化,该频率可看作缺陷特征频率;当超声波激励频率与缺陷特征频率相匹配时,声能会高效地传递并集中在缺陷处,使得缺陷附近振动幅值显著增强。

对于各向同性平板结构中的平底孔缺陷,如图1所示,其缺陷局部谐振频率的简化表达式为:

$$f_0 \approx \frac{1.6 h}{a^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad (1)$$

式中: E 、 ρ 、 ν 分别为待检测平板结构的弹性模量、密度和泊松比; a 为平底孔缺陷的半径; h 为缺陷处的剩余厚度。

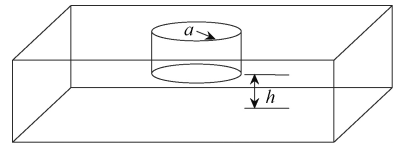


图1 平板中平底孔缺陷超声局部谐振简化模型
Fig.1 Simplified ultrasonic local resonance model for the defect of the flat bottom hole in a flat plate

由于实际检测中无法预先获知缺陷几何信息,难以估计缺陷局部谐振频率。因此,本文提出一种基于宽带激励的板结构缺陷超声局部谐振检测方法。图2所示为该方法的流程。

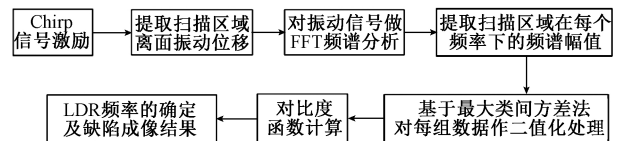


图2 基于宽带激励的缺陷超声局部谐振检测方法的流程
Fig.2 Flow chart of the defect ultrasonic local resonance detection method based on broadband excitation

对待检测构件施加宽频信号激励(如 Chirp 信号),通过空间扫描采集待检测结构不同空间位置的声波信号,并进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)得到其频谱。提取每一频率下检测构件声波响应的空间分布,利用最大类间方差法进行二值化处理,以类间方差达到最大时的阈值为最佳二值化分割阈值,将得到的前景区和背景区作为每组数据的假设缺陷区域与非缺陷区域。在此基础上,根据缺陷及非缺陷区域的频谱,进行对比度函数计算。对比度函数的表达式为:

$$g(f) = \frac{\text{mean}_{(x_d, y_d) \in \Omega_d} S(x_d, y_d, f)}{\text{mean}_{(x_i, y_i) \in \Omega_i} S(x_i, y_i, f)} \quad (2)$$

式中: $S(x, y, f)$ 为检测信号的频谱; Ω 为检测区域; Ω_d 为假设的缺陷区域; $\Omega \setminus \Omega_d$ 为假设的非缺陷区域。

在缺陷局部谐振频率下, 缺陷处会出现谐振, 表现为高幅值特征。因此, 对比度函数取极大值对应频率即为所求缺陷局部谐振频率 f_{LDR} 。利用该频率下信号频谱空间分布 $S(x_i, y_i, f_{LDR})$ 可以实现缺陷的检测及定位。

2 基于超声局部谐振的缺陷检测数值仿真

在 Abaqus 有限元软件中建立含缺陷板结构检测模型, 如图 3 所示。其中板的材料设定为有机玻璃, 尺寸为 $80 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。缺陷为平底孔缺陷, 其中心位于 $(50 \text{ mm}, 25 \text{ mm})$ 处。通过改变缺陷半径和剩余厚度, 对不同尺寸缺陷的超声局部谐振现象进行数值仿真。以 P 点 $(15 \text{ mm}, 45 \text{ mm})$ 为中心, 半径为 5 mm 的圆形区域沿离面方向施加激励。激励信号为带宽 $0 \sim 50 \text{ kHz}$ 的 Chirp 信号, 激励时长为 0.001 s 。

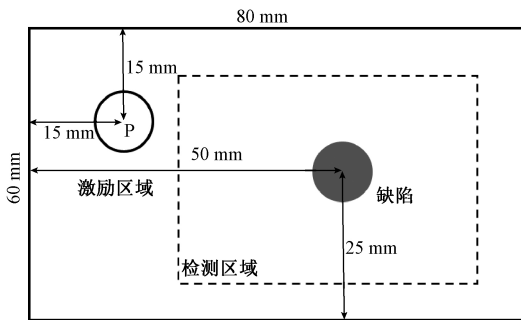


图 3 待检测板结构仿真模型

Fig.3 The simulation model of the plate structure to be tested

仿真中设置接收节点集监测离面位移信号, 监测区域为 $45 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ (见图 3 中虚框), 其中心与缺陷中心重合。图 4 所示为缺陷处的典型监测信号。从频谱图中可以看出, 在 19.51 kHz 和 41.10 kHz 处出现谐振峰。提取各监测点在这两个频率下的频谱幅值, 得到一阶及二阶局部谐振频率下的幅值分布如图 5 所示。可以看出, 在其局部谐振频率下, 缺陷位置处的振动幅值明显高于其他位置的振动幅值。利用局部谐振频率下的幅值空间分布, 可以实现缺陷的检测及定位。

3 基于超声局部谐振的缺陷检测实验及定量分析

由第 2 节的数值仿真可知, 在待测板结构材料确定的情况下, 平底孔缺陷的超声局部谐振频率主要取决于几何尺寸, 因此, 缺陷的 LDR 频率可用于几何尺寸定量表征。通过均匀设计试验方法, 本节通过实验建立具

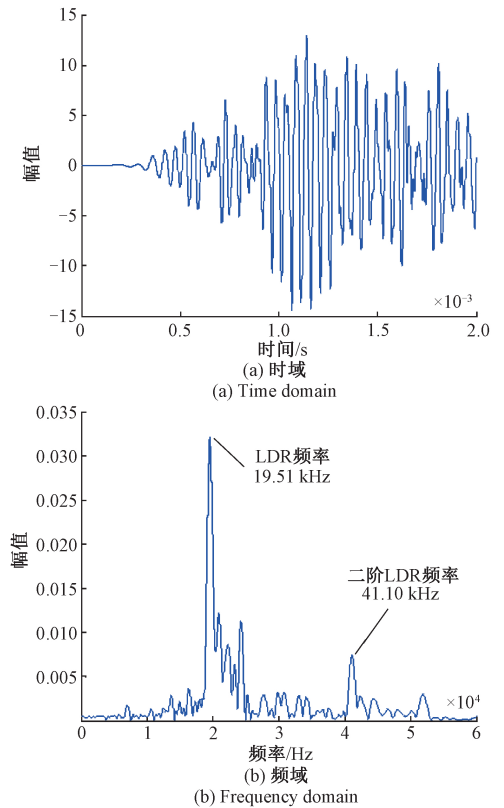


图 4 典型监测信号

Fig.4 Typical monitoring signals

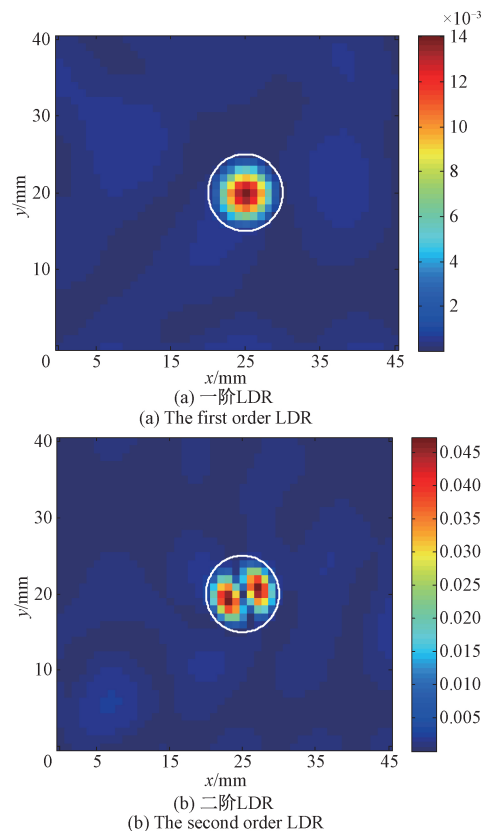


图 5 LDR 模式图

Fig.5 LDR patterns

有普适性的缺陷局部谐振频率与其几何尺寸的定量模型。

3.1 均匀设计试验

以厚度 5 mm 的有机玻璃板为例,其上加工有一系列不同尺寸(半径 a 和剩余厚度 h)的平底孔缺陷。根据前期超声局部谐振频率检测实验经验,确定缺陷几何参数变化范围及步长如表 1 所示。以缺陷半径和剩余厚度作为试验因素进行均匀设计,得到两因素水平均匀设计试验表如表 2 所示。评价指标如表 3 所示。根据表 3 中偏差值可知,两因素水平 11 时均匀性较好。

表 1 参数变化范围及步长

Table 1 The range and step size of the parameters

几何参数	变化范围	单位步长
半径 a /mm	5.0~10.0	0.5
剩余厚度 h /mm	0.6~2.6	0.2

表 2 缺陷几何参数均匀设计试验表

Table 2 Uniform design test table for the geometric parameters of the defect

水平因素	半径	剩余板厚	水平因素	半径	剩余板厚
	a /mm	h /mm		a /mm	h /mm
1	6.0	0.8	7	2.6	2.6
2	5.5	2.4	8	2.0	2.0
3	7.0	1.6	9	1.0	1.0
4	9.0	1.8	10	2.2	2.2
5	8.5	0.6	11	1.4	1.4
6	10.0	1.2			

表 3 均匀设计试验表评价指标

Table 3 The evaluation indexes of the uniform design test table

中心化	L2-偏差	修正偏差	对称化偏差	可卷偏差	条件数	D-优良性	A-优良性
0.049	70.037	90.053	0.151	60.075	91.056	10.000	10.018

3.2 实验系统及典型结果

利用图 6 所示的检测系统进行超声局部谐振检测实验。该系统主要包括信号发生器、功率放大器、压电片、麦克风、采集卡、运动控制系统及计算机等。由信号发生器产生宽带激励信号(Chirp 信号),经过功率放大器施加在压电片上。压电片产生的宽带振动信号会在板结构中传播,利用麦克风对板结构中不同空间位置的声波信号进行采集。实验中压电片选为低频段压电蜂鸣片。麦克风型号为 MP21,其频响范围为 20~20 000 Hz。实验中,

麦克风与待测板间的提高距离约为 1~2 mm。麦克风的扫描区域为 40 mm×40 mm,扫描间隔为 2 mm。激励信号参数设置与第 2 节仿真中一致。

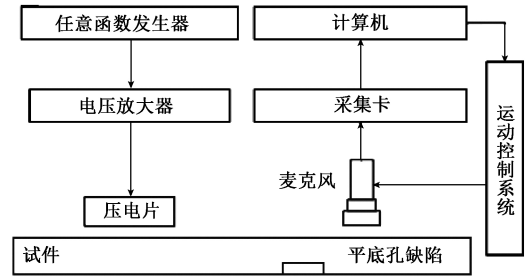
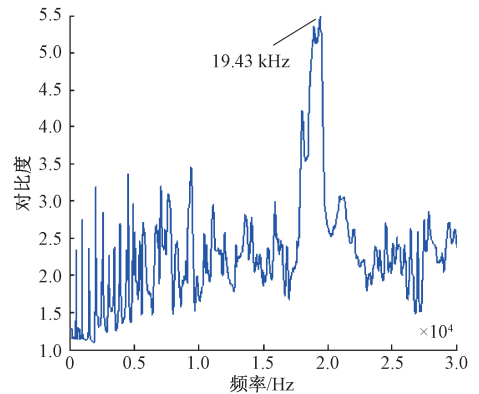


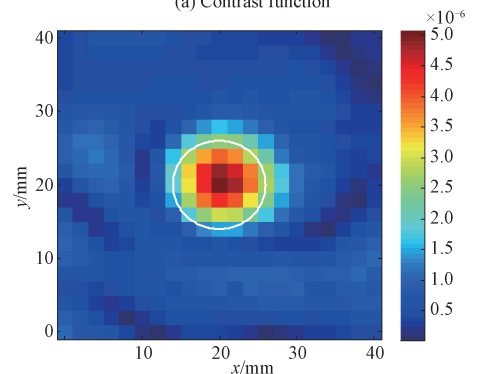
图 6 超声局部谐振检测系统

Fig.6 Ultrasonic local resonance detection system

根据表 2 中的均匀设计试验方案,对不同尺寸平底孔缺陷进行仿真及检测实验研究,并按照图 2 所示的流程进行处理。根据扫描范围内的对比度函数,确定缺陷的局部谐振频率并进行成像。图 7 所示为缺陷半径为 6 mm,剩余厚度为 0.8 mm 时的实验结果。由图 7 的对比度函数分布,可以计算出其局部谐振频率为 19.43 kHz,而由局部谐振频率下超声波的幅值分布可实现缺陷检测。



(a) 对比度函数
(a) Contrast function



(b) 局部谐振频率下的幅值分布
(b) Amplitude distribution under LDR frequency

图 7 宽带激励下超声局部谐振检测结果

Fig.7 The result of ultrasonic local resonance detection under broadband excitation

表 4 所示为不同试验水平下超声局部谐振检测结果。可以看出, 超声局部谐振频率与缺陷尺寸密切相关, 3 种方式得到的超声局部谐振频率一致性与缺陷几何尺寸密切相关。具体而言, 有限元仿真结果与实验结果的一致性更好。缺陷剩余厚度较大时, 简化理论模型得到的超声局部谐振频率与实验结果误差很大, 此时简化理论模型不适用于小尺寸缺陷表征。

表 4 不同试验水平下超声局部谐振检测结果对比

Table 4 Comparison of ultrasonic local resonance test results under different test levels

编号	半径 a/mm	剩余厚度 h/mm	LDR 频率/kHz		
			理论值	仿真值	实验值
1	6.0	0.8	24.339	20.877	19.43
2	5.5	2.4	86.896	46.627	41.01
3	7.0	1.6	35.763	26.550	21.64
4	9.0	1.8	24.339	19.414	18.60
5	8.5	0.6	9.096	8.7364	7.49
6	10.0	1.2	13.143	11.767	9.52
7	8.0	2.6	44.494	29.822	29.11
8	6.5	2.0	51.846	33.282	27.90
9	7.5	1.0	19.471	17.068	14.70
10	9.5	2.2	26.699	20.140	17.61

3.3 LDR 的回归模型及应用

为建立普适性的超声谐振频率与缺陷尺寸的关系模型, 本节对表 4 所示试验结果进行回归分析, 确定回归模型为:

$$f(h, a) = x_1 h + x_2 a + x_3 h^2 + x_4 a^{-1} + x_5 a^{-2} + x_6 h a + x_7 h a^{-1} + x_8 h a^{-2} + x_9 h^2 a + x_{10} h^2 a^{-1} + x_{11} h^2 a^{-2} \quad (3)$$

式中: $f(h, a)$ 为缺陷的超声局部谐振频率; a, h 分别为缺陷半径和剩余厚度; x_1, \dots, x_{11} 为模型的回归系数。利用 SPSS 软件对式(3)进行逐步回归, 表 5 所示为回归结果检验指标。

表 5 回归模型检验指标

Table 5 Regression model test indexes

回归模型	R	R^2	调整 R^2	F	显著性水平
仿真	1.0	0.999	0.999	1 694.3	0.000
实验	0.996	0.992	0.972	50.563	0.004

表 5 中, R 为相关系数, R^2 为决定系数, F 表示 F 检验的显著性水平。由于 R 和 R^2 的值接近于 1, F 检验的显著性水平远大于 0.05, 逐步回归模型可有效拟合缺陷超声局部谐振频率与尺寸参数间的映射关系。基于仿真

和实验结果, 得到超声局部谐振频率与平底孔缺陷几何尺寸关系模型如式(4)和(5)所示。

$$f(h, a) = 7\,799 - 616\,201.9a + 848.7ha^{-2} + 23\,786\,551.0h^2a^{-1} - 263\,241.3h^2a^{-2} \quad (4)$$

$$f(h, a) = -32\,290 + 2\,255\,246.3a + 331\,280\,368.3ah + 10\,115\,760\,684.5h^2 - 871\,130\,098\,490.4ah^2 + 41\,053.2ha^{-1} + 1.1a^{-2} - 156\,457.7h^2a^{-2} \quad (5)$$

图 8 所示为基于实验和仿真结果得到回归模型与理论模型对比。可以看出, 仿真与实验回归模型结果吻合较好, 但理论模型与二者相差较大。当平底孔半径 a 越小、剩余厚度 h 越大时, 理论模型误差较大。此时, 理论模型不适用于超声局部谐振频率估算。

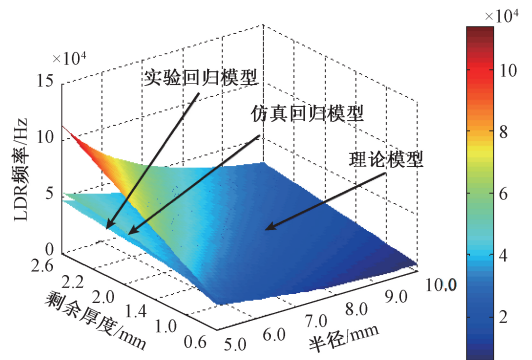


图 8 回归模型比较

Fig.8 Regression model comparison

式(5)建立了 5 mm 厚有机玻璃板中平底孔缺陷几何尺寸与超声局部谐振频率的关系模型。该模型具有 LDR 频率预测及缺陷几何参数反演两方面作用, 下面通过实例进行说明。

首先, 在已知缺陷几何尺寸的情况下, 利用式(5)进行超声局部谐振频率预测。表 6 所示为 5 mm 厚有机玻璃板中不同尺寸平底孔缺陷的超声局部谐振频率的典型预测结果, 并给出了与理论模型及检测实验测量结果对比。可以看出, 利用回归模型可以准确实现平底孔缺陷谐振频率估计, 估计误差较小(小于 2 kHz)。

另一方面, 基于局部谐振频率下的幅值空间分布, 可进行缺陷几何参数的反演。参数反演的基本思路为: 利用最大类间方差法, 对局部谐振频率下的声场分布进行二值化阈值分割。基于二值化图像中缺陷等效面积, 计算出缺陷等效半径。将得到的缺陷等效半径及超声局部谐振频率代入式(5), 反演出缺陷剩余厚度。图 9 所示为典型缺陷的几何参数反演结果。

利用式(5)所示的回归模型对有机玻璃板中 4 个缺陷的几何参数进行了反演, 结果如表 7 所示。可以看出, 利用回归模型可以很好实现板中平底孔缺陷几何参数的

表6 实验回归分析预测
Table 6 The regression analysis prediction in the experiment

编号	半径 a/mm	剩余厚度 h/mm	LDR 频率/kHz		LDR 频率误差/kHz	
			理论值	预测值	实验-理论	实验-回归
1	5.0	1.0	43.81	33.88	10.87	0.94
2	7.0	1.0	22.35	15.73	4.75	1.87
3	7.0	2.0	44.70	26.39	16.72	1.59
4	9.0	2.0	27.04	18.52	8.52	1.11

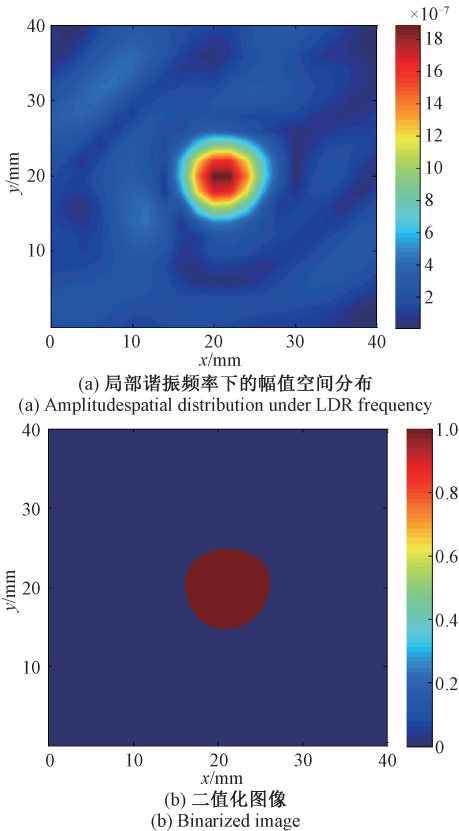


图9 典型缺陷的几何参数反演结果

Fig.9 Inversion results of the geometric parameters for typical defect

表7 参数反演结果
Table 7 Parameter inversion result

编号	实际半径 a/mm	预测半径 a/mm	实际剩余厚度 h/mm	预测剩余厚度 h/mm
1	5.0	5.05	1.0	0.98
2	7.0	7.75	1.0	1.50
3	7.0	6.39	2.0	1.83
4	9.0	7.01	2.0	1.39

反演,且半径及剩余厚度估计值与实际几何尺寸吻合较好。

4 讨论

在上述研究中,以有机玻璃板中平底孔缺陷检测为例,开展了宽带激励下板结构损伤超声局部谐振检测方法研究。下面通过各向异性板检测实验,来进一步说明超声局部谐振检测方法的有效性和适应性。

利用图6所示的检测系统对碳纤维复合材料(carbon fibre reinforced plastics, CFRP)复合板进行了缺陷检测实验。其中,板厚为8.0 mm,其上加工有若干平底孔缺陷,平底孔缺陷的半径均为10.0 mm。其检测过程及信号处理方法与3.2节完全相同。图10所示为平底孔剩余厚度为2.0 mm时的典型检测结果。

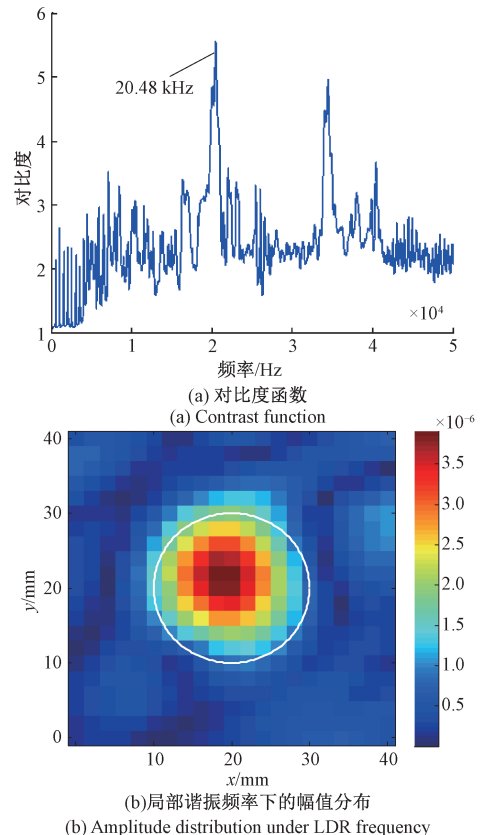


图10 CFRP板的超声局部谐振检测结果

Fig.10 Ultrasonic local resonance detection result of CFRP plate

从对比度函数分布中可以看出,该缺陷局部谐振频率为 20.48 kHz。基于局部谐振频率下不同空间位置处超声波幅值分布可以实现缺陷检测。因此,超声局部谐振检测方法可用于各向异性板中缺陷检测。

5 结 论

通过数值仿真及检测实验,本文进行了板结构损伤超声局部谐振检测方法研究,得出以下主要结论:

1) 提出了一种基于宽带激励的板结构超声局部谐振检测方法。利用最大类间方差法对宽带激励下超声波场进行了分析处理,得到了缺陷的超声局部谐振频率及超声局部谐振频率下声场的空间分布。

2) 针对特定材料及厚度的各向同性板结构,通过均匀设计试验的方法,建立了缺陷尺寸与其超声局部谐振频率的关系模型。

3) 检测实验表明,所提的超声局部谐振检测方法可有效实现板结构损伤检测,且可用于各向异性板结构损伤检测;利用回归分析模型,还可实现缺陷几何参数的反演,且反演精度较高(半径反演误差最大为 2 mm,厚度反演误差最大为 0.6 mm)。

本文研究工作为板结构缺陷检测及定量分析提供了可行的技术方案。

参考文献

- [1] COLOMBI P, FAVA G, SONZOGNI L. Fatigue crack growth in CFRP-strengthened steel plates[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 72(1):87-96.
- [2] SAHOO P K, GUJAR S, MANJUPRASAD M. Fatigue life prediction of composite airframe panel[C]. *Advances in Structural Integrity*, 2018:77-91.
- [3] 杨理践,邢燕好,张佳,等. 基于电磁超声导波的铝板裂纹缺陷检测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(4):150-160.
YANG L J, XING Y H, ZHANG J, et al. Crack defect detection of aluminum plate based on electromagnetic ultrasonic guided wave [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(4):150-160.
- [4] 张刚,吴瑕. 基于 Hilbert 的单边带调制随机共振的微弱信号检测[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019,33(2):10-17.
ZHANG G, WU X. Weak signal detection based on Hilbert' s single sideband modulated stochastic resonance[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(2):10-17.
- [5] HUNTER A, DRINKWATER B, WILCOX P. The

wavenumber algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2008, 55(11):2450-2462.

- [6] VELICHKO A, WILCOX P D. Reversible back-propagation imaging algorithm for postprocessing of ultrasonic array data [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2009, 56(11):2492-2503.
- [7] 张慧,刘玉振,于露,等. 复合板缺陷的空耦 Lamb 波扫描仿真与成像研究[J]. *仪器仪表学报*, 2019,40(1):153-160.
ZHANG H, LIU Y ZH, YU L, et al. Simulation and imaging of air-coupled Lamb wave scanning for defects detection of composite plates [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(1):153-160.
- [8] 何存富,郑明方,吕炎,等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(8):1713-1735.
HE C F, ZHENG M F, LYU Y, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(8):1713-1735.
- [9] WANG CH, DUAN N Y, WU ZH Q, et al. Method for detecting multi-modal vibration characteristics of landmines[J]. *Instrumentation*, 2018, 5(4):39-45.
- [10] MAIER S, KIM J Y, FORSTENHÄUSLER M, et al. Noncontact nonlinear resonance ultrasound spectroscopy (NRUS) for small metallic specimens [J]. *NDT&E International*, 2018, 98(1):37-44.
- [11] MEO M, VIGNJEVIC R, MARENGO G. The response of honeycomb sandwich panels under low-velocity impact loading [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2005, 47(9):1301-1325.
- [12] CIAMPA F, SCARSELLI G, MEO M. A novel nonlinear damage resonance intermodulation effect for structural health monitoring [C]. *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2017*:10170.
- [13] CHONG W K, PAPADOPOULOU V, DAYTON P A. Imaging with ultrasound contrast agents: current status and future [J]. *Abdominal Radiology*, 2018, 43(4):762-772.
- [14] YANG H, CAI W, XU L, et al. Nanobubble-affibody: novel ultrasound contrast agents for targeted molecular ultrasound imaging of tumor [J]. *Biomaterials*, 2015,

- 37(1):279-288.
- [15] SLOUN R J G V, SOLOMON O, ELDAR Y C, et al. Sparsity-driven super-resolution in clinical contrast-enhanced ultrasound[C]. IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2017, doi: 10.1109/ULTSYM.2017.8092945.
- [16] ROKHLIN S I. Resonance phenomena of Lamb waves scattering by a finite crack in a solid layer[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1981, 69 (4): 922-928.
- [17] SARENS B, VERSTRAETEN B, GLORIEUX C, et al. Investigation of contact acoustic nonlinearity in delaminations by shearographic imaging, laser doppler vibrometric scanning and finite difference modeling[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2010, 57(6):1383-95.
- [18] ANGELIS G D, MEO M, ALMOND D P, et al. A new technique to detect defect size and depth in composite structures using digital shearography and unconstrained optimization[J]. NDT & E International, 2012, 45(1): 91-96.
- [19] SOLODOV I, BAI J, BUSSE G. Resonant ultrasound spectroscopy of defects: Case study of flat-bottomed holes[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(1): 1-7.
- [20] HETTLER J, TABATABAEIPOUR M, DELRUE S, et al. Detection and characterization of local defect resonances arising from delaminations and flat bottom holes[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2017, 36(2):1-10.
- [21] LACROIX R A, PALSSON B O, FEIST A M. A model for designing adaptive laboratory evolution experiments[J]. Applied & Environmental Microbiology, 2017, 83(8): 1-14.

- [22] 常予,焦敬品,李光海,等. 基于均匀设计的磁混频硬度检测激励参数优化[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3):30-38.

CHANG Y, JIAO J P, LI G H, et al. Excitation parameter optimization for magnetic mixing frequency hardness measurement based on uniform design [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 30-38.

作者简介



焦敬品(通信作者),分别在1995年和1998年于燕山大学获得学士学位和硕士学位,2005年于北京工业大学获得博士学位,现为北京工业大学教授、博士生导师,主要研究方向为现代测控技术与方法、无损检测新技术、现代信号分析与处理技术、新型传感器技术。

E-mail:jiaojp@bjut.edu.cn

Jiao Jingpin (Corresponding author) received her B. Sc. and M. Sc. degrees both from Yanshan University in 1995 and 1998, respectively, and received Ph. D. degree from Beijing University of Technology in 2005. Now she is a professor and Ph. D. supervisor in Beijing University of Technology. Her main research interests include modern measurement & control technology and methods, new nondestructive testing technology, modern signal analysis and processing technology, and advanced sensor technology.



李立,2013年于安徽建筑大学获取学士学位,现为北京工业大学博士研究生,主要研究方向为现代测控技术与方法。

E-mail:lili2017@emails.bjut.edu.cn

Li Li received his B. Sc. Degree from Anhui Jianzhu University in 2013. Now, he is a Ph. D. candidate in Beijing University of Technology. His main research interest is modern measurement & control technology and method.