

CFRP 层板缺陷红外热波雷达成像检测概率研究

龚金龙¹, 盖志刚¹, 解维浩¹, 刘恩晓¹, 禹定峰¹, 刘俊岩², 王 扬²

- (1. 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001;
2. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 建立了 Chirp 调制激光激励的红外热波雷达成像检测系统, 提出了基于分数阶傅里叶变换的 Chirp 锁相算法和基于希尔伯特变换时域积分的 HT 算法, 实现了对 CFRP 层板缺陷的检测; 合理设计了模拟缺陷的尺寸分布范围与缺陷判定准则, 采用 Hit/miss 法分析了信号提取算法对检测概率的影响; 给出了不同检测参数与判定阈值情况下, 相关算法、Chirp 锁相算法和 HT 算法提取结果的检测概率数据, 确定了红外热波雷达成像系统对 CFRP 层板缺陷的检测概率水平。

关键词: 检测概率; 热波雷达成像; CFRP 缺陷; 信号提取算法

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.1004005

Study on probability of detection for CFRP laminate defect using infrared thermal wave radar imaging

Gong Jinlong¹, Gai Zhigang¹, Xie Weihao¹, Liu Enxiao¹, Yu Dingfeng¹, Liu Junyan², Wang Yang²

- (1. Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao 266001, China;
2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: An infrared thermal wave radar imaging system was set up to detect the internal CFRP laminate defects. Two novel kinds of signal extraction algorithms named Chirp lock-in algorithm and HT algorithm based on Hilbert transform and Fractional Fourier transform were developed in order to obtain the characteristic information of thermal wave radar signal. The defect size distribution range and criteria of defect judgment were designed reasonably. The influence of signal extraction algorithms on the probability of detection was studied by means of Hit/miss analysis methodology. The POD curves obtained by the proposed algorithms at the designed testing parameters and thresholds were given. According to the probability analysis of detection, the probability level of CFRP laminate defects detection using infrared thermal wave radar imaging system were identified.

Key words: probability of detection; thermal wave radar imaging; CFRP defect; signal extraction algorithm

收稿日期: 2017-02-14; 修订日期: 2017-03-21

基金项目: 国家海洋局海洋公益性行业科研专项(201505031); 山东省自然科学基金(ZR2017BF030, ZR2015YL020); 山东省科学院青年基金项目(2014QN032, 2014QN036, 2015QN028); 青岛创业创新领军人才计划(13-CX-23, 13-CX-24)

作者简介: 龚金龙(1988-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事红外无损检测、高光谱遥感方面的研究。Email: gjl508891@163.com

0 引言

随着损伤容限设计理念与机械产品可靠性设计的迅速发展,对零部件内部缺陷的可靠检测与准确评估已成为无损检测领域迫切需要解决的关键问题。为实现对缺陷检测结果可靠度的定量评估,缺陷的检测概率(Probability of Detection, POD)引起了学者的广泛关注,该技术通过对含缺陷试样进行大量检测试验,运用统计学分析方法对缺陷的检测概率给出具有置信度和可靠度的结果^[1]。

无损检测 POD 研究始于 20 世纪 60 年代,美国 NASA^[2]、英国国家无损检测中心^[3]、加拿大核工业中心^[4]等研究机构对无损检测 POD 的统计学分析手段、数据处理方法,概率分布模型等开展了系统研究。国内对无损检测 POD 的研究起步较晚,程志虎等人^[5]对无损检测 POD 分析的相关概念作了全面系统阐述,对常规无损检测 POD 的定义进行了修正。冯辅周等^[6]对超声红外热像检测金属疲劳裂纹的检出概率估计方法开展了研究,在此基础上,张超省等^[7]采用多元线性回归模型和 Logistic 回归模型估算特定检测条件下的裂纹检出概率,并提出了检测条件的优化方法。

红外热波雷达成像(Infrared thermal-wave radar imaging)检测技术采用线性调频热流对被测对象进行加热,通过分析不同区域的信号特征差异实现内部缺陷的快速检测,该技术结合了脉冲法与锁相法的优势,在 CFRP 层板缺陷检测领域中表现出了一定优势^[8-9],但目前针对红外热波雷达成像检测 CFRP 层板缺陷的 POD 水平的研究还未见报道。

根据热波雷达信号的特点,提出了基于分数阶傅里叶变换与基于希尔伯特变换时域积分的新型信号提取算法,合理设计了模拟 CFRP 缺陷的尺寸分布范围,建立了基于热波雷达信号响应特征的 POD 分析模型与缺陷判定准则,采用 Hit/miss 法获得了不同检测参数下的 POD 曲线,对比分析了信号提取算法对 POD 结果的影响,确定了红外波雷达成像检测 CFRP 层板缺陷的检测概率水平。

1 红外热波雷达成像检测实验

1.1 检测系统与检测试样

红外热波雷达成像系统装置如图 1 所示,采用

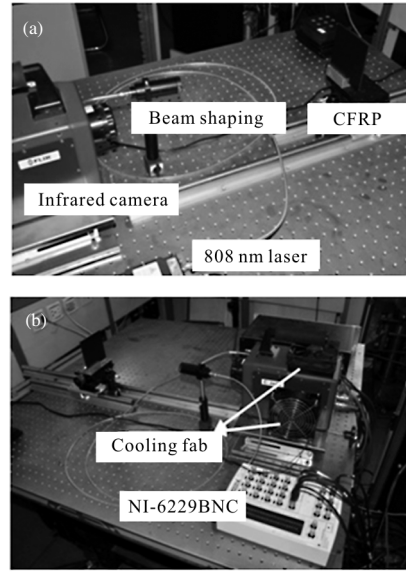


图 1 红外热波雷达成像 POD 检测系统

Fig.1 Infrared thermal wave radar imaging system for POD

808 nm 半导体激光作为激励热源,采用 NI 公司数据采集卡产生 Chirp 信号,控制激光功率按 Chirp 调制信号变化,加载到被测试样上表面的热流强度可表示为:

$$q(t) = q_{sc} + q_{dc}, t \in [0, T_s]$$

$$q_{sc} = \frac{q_0}{2} \quad (1)$$

$$q_{dc} = \frac{q_0}{2} \sin \left[2\pi \left(f_0 + \frac{f_c - f_0}{2T_s} t \right) t \right]$$

式中: $q(t)$ 为表面热流强度; q_0 为表面热流峰强度值; q_{sc} 与 q_{dc} 分别为表面热流静态分量与动态分量; f_0 、 f_c 与 T_s 分别为 Chirp 信号的初始频率、终止频率和扫描周期。

采用 FLIR SC7000 型红外相机采集热图序列,并基于 LABVIEW 环境开发红外热波雷达图像序列采集与处理软件系统,试样与红外相机的距离为 550 mm,红外相机的空间分辨率约为 0.3 mm/pixel。

采用平顶盲孔模拟材料内部层板缺陷,缺陷深度 H 为 0.5~2.5 mm,间隔约为 0.3 mm,缺陷直径 D 为 2~13 mm,间隔为 1 mm。每个检测试样共预制 9 个缺陷,直径相同,深度从 0.5 mm 逐渐增加至 2.5 mm,试样几何尺寸为 100 mm×100 mm×4 mm。模拟缺陷试样如图 2(a)所示,编号为 S1~S12,共 108 个模拟缺陷。由于存在加工误差,缺陷直径与深度实际尺寸分布如图 2(b)所示,缺陷的宽高比如图 2(c)所示,人

工 CFRP 缺陷试样见图 2 (d),CFRP 层板热物性参数见表 1。

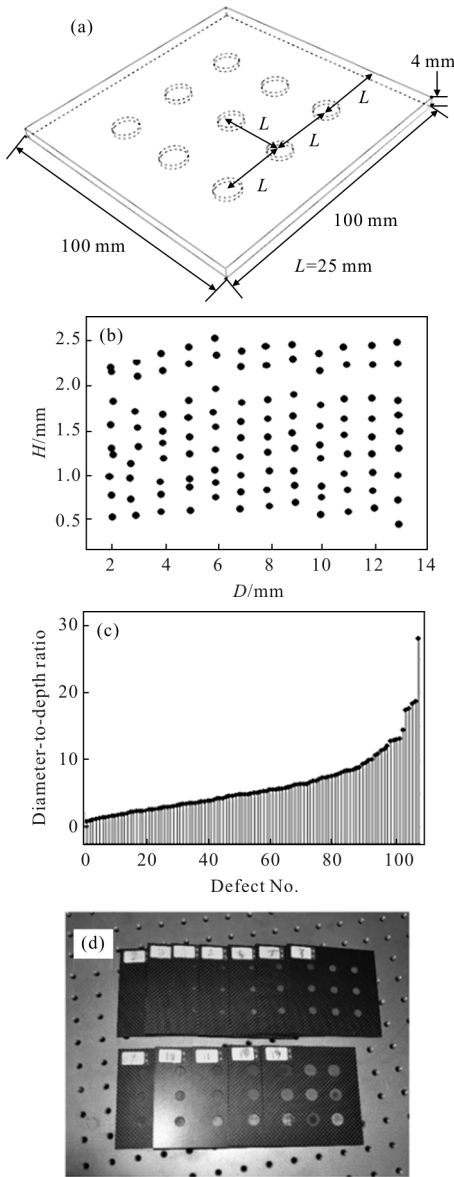


图 2 模拟缺陷试样及缺陷的几何尺寸

Fig.2 Artificial defect samples and geometric size

表 1 CFRP 层板热物性参数

Tab.1 Thermal physics parameters of CFRP

Thermal conductivity $k_{//}$ / $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	Thermal conductivity k_{\perp} / $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	Density ρ / $kg \cdot m^{-3}$	Specific heat capacity c / $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$
4.18	0.78	1 550	793

1.2 信号提取算法

当 CFRP 层板受 Chirp 调制热流激励时, 表面温度的动态分量(热波雷达信号)具有线性调频信号

的特征,其瞬时幅值与相位随时间非平稳变化。热波雷达信号的非平稳信号模型可表示为:

$$T(t)=A(t)\sin\left[2\pi\left(f_0+\frac{f_e-f_0}{2T_s}t\right)t+\varphi(t)\right]+n(t) \quad t \in [0, T_s] \quad (2)$$

式中: $T(t)$ 是热波雷达信号; $A(t)$ 为热波雷达信号的瞬时幅值; $\varphi(t)$ 为热波雷达信号与 Chirp 调制信号的瞬时相位差; $n(t)$ 为检测噪声。

1.2.1 相关算法

相关算法是一种基于匹配滤波器原理的时域特征提取算法,通过计算被测信号与参考信号的互相关函数,获得被测信号与参考信号之间的延迟。在实际检测过程中,单个像素处的温度信号为离散时序序列 $T(n)$,其长度为 N ,则离散相关函数可表示为:

$$R(\tau)=\frac{1}{N}\sum_{n=1}^N T(n)q(n+\tau) \quad (3)$$

式中: $T(n)$ 、 $q(n)$ 分别为离散时序热波雷达信号与参考信号。热波雷达信号的相关延迟 τ_{cc} 与相关峰值 A_{cc} 为:

$$\begin{aligned} \tau_{cc} &= \tau_{R(\tau_{cc})=\max[R(\tau)]} \\ A_{cc} &= \max[R(\tau)] \end{aligned} \quad (4)$$

1.2.2 HT 算法

热波雷达信号满足本征模态函数的全部特征,可采用希尔伯特变换估计热波雷达信号的瞬时相位与瞬时幅值,文中提出一种基于希尔伯特变换瞬时特性时域积分的热波雷达信号特征提取算法。热波雷达信号 $T(n)$ 的希尔伯特变换 $H(n)$ 为:

$$H(n)=\frac{1}{\pi}\sum_1^N \frac{T(m)}{n-m} \quad (5)$$

则热波雷达信号的瞬时幅值 $A(t)$ 与瞬时相位 $\Phi(t)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} A(t) &= \sqrt{H(t)^2 + T(t)^2} \\ \Phi(t) &= \arctan[T(t)/H(t)] \end{aligned} \quad (6)$$

在单个扫描周期 T_s 内,热波雷达信号与 Chirp 调制信号之间的瞬时相位差为:

$$\varphi(t)=\arctan[H_T(t)/T_T(t)]-2\pi\left(f_0+\frac{f_e-f_0}{2T_s}t\right)t \quad (7)$$

为抑制噪声对特征信息的干扰,定义 HT 相位与 HT 幅值为扫描周期内瞬时相位差与瞬时幅值的积分均值,即:

$$\varphi_{HT}=\frac{1}{T_s}\int_0^{T_s}\varphi(t)dt$$

$$A_{HT} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} A(t) dt \quad (8)$$

式中： A_{HT} 、 φ_{HT} 分别为热波雷达信号的 HT 幅值与 HT 相位。

1.2.3 Chirp 锁相算法

分数阶傅里叶变换是一种有效的 Chirp 信号参数估计方法，热波雷达信号在特定阶次的分数阶傅里叶变换具有很好的时频聚集性，其计算过程可简化为热波雷达信号与双路 Chirp 信号（同相/正交 Chirp 信号）的积分，将该算法称为 Chirp 锁相算法。热波雷达信号的 Chirp 锁相相位与 Chirp 锁相幅值由公式(10)计算得到。

$$S_{Chirp-cos} = \frac{1}{N} \sum_1^N T(n) \sin \left[2\pi \left(f_0 + \frac{f_e - f_0}{2T_s} \frac{n}{f_s} \right) \frac{n}{f_s} \right]$$

$$S_{Chirp-sin} = \frac{1}{N} \sum_1^N T(n) \cos \left[2\pi \left(f_0 + \frac{f_e - f_0}{2T_s} \frac{n}{f_s} \right) \frac{n}{f_s} \right] \quad (9)$$

$$A_{Chirp-Li} = \sqrt{S_{Chirp-cos}^2 + S_{Chirp-sin}^2}$$

$$\varphi_{Chirp-Li} = \arctan \left(\frac{S_{Chirp-sin}}{S_{Chirp-cos}} \right) \quad (10)$$

式中： $A_{Chirp-Li}$ 、 $\varphi_{Chirp-Li}$ 为热波雷达信号的 Chirp 锁相幅值和 Chirp 锁相相位； f_s 为图像采样频率； N 为热波雷达信号长度， $N = T_s \times f_s$ 。

1.3 红外热波雷达成像检测结果

为便于实验结果的叙述讨论，Chirp 信号表示为如下形式：初始频率-终止频率-调制周期，如 0.1-0.01-100 表示 Chirp 信号的初始频率为 0.1 Hz，终止频率为 0.01 Hz，Chirp 调制周期为 100 s。检测实验参数见表 2。分别采用相关算法、Chirp 锁相算法与 HT 算法对热波雷达信号进行特征提取，图 3~5 分别给出了检测参数为 0.1-0.01-100 时各算法的相位(或延迟)特征图像。由图 3~5 可知，相关延迟、Chirp 锁相相位及 HT 相位特征图像可清晰判别直径较大的缺陷，但对于缺陷直径为 2 mm 左右的缺陷，在给定 Chirp 调制参数下均未能检出。由于延迟(相位)图像较幅值图像具有更高的缺陷信噪比与探

表 2 模拟缺陷试样的 POD 检测参数

Tab.2 POD detection parameters of simulated defect samples

Specimen No.	Modulated parameter	Heating area/mm ²	Laser power/W	Heating period	Sampling frequency/Hz
S1-S12	0.10-0.01-100, 0.05-0.01-100 0.10-0.05-20, 0.10-0.05-40	120×120	30	4	50

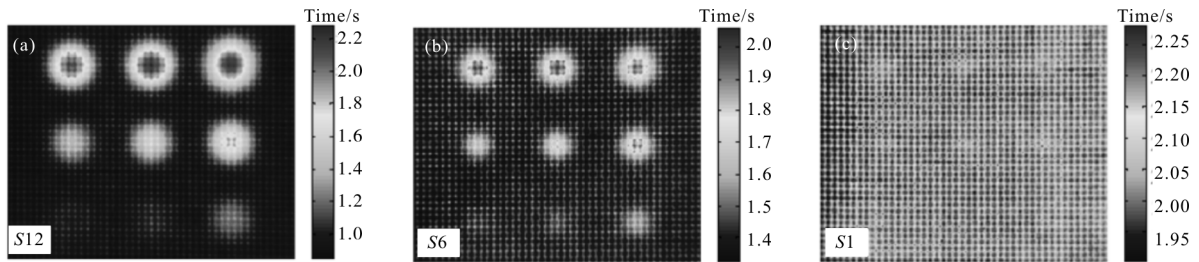


图 3 相关延迟特征图像

Fig.3 Characteristic images of cross-correlation delay

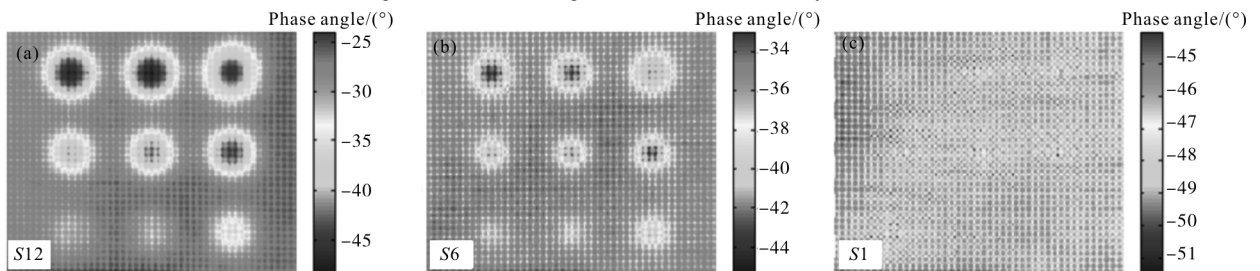


图 4 Chirp 锁相特征图像

Fig.4 Characteristic images of Chirp lock-in phase

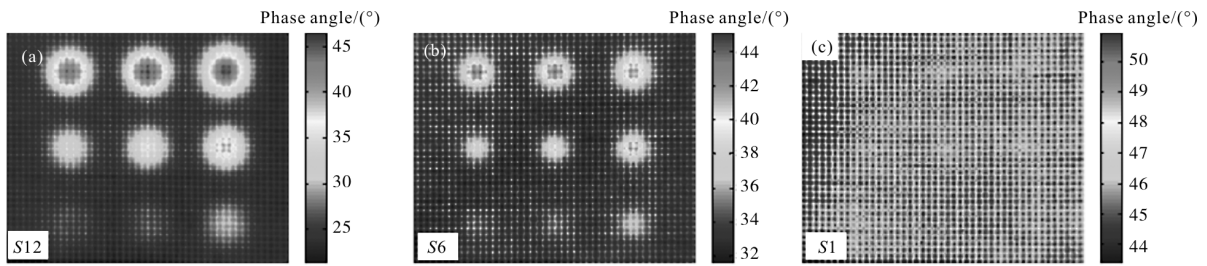


图 5 HT 相位特征图像

Fig.5 Characteristic images of HT phase

测能力，因此文中采用相关延迟、Chirp 锁相相位和 HT 相位图的特征数据进行检测概率分析。

2 检测概率估计方法

无损检测 POD 定义为在给定的检测系统、方法与工艺下，材料内部某特定尺寸缺陷能够被检测出的概率。由于检测过程中存在随机性与不确定性，一般假定其概率密度分布服从正态分布。为判定特征尺寸为 r 的缺陷是否被检出，需先设定检测阈值 $r_{\text{threshold}}$ ，当超过该阈值时，则认为缺陷被检出。目前，POD 分析中常用的数据记录方法主要有连续信号响应法与 Hit/miss 法。其中 Hit/miss 法多采用 log-odds 模型拟合 POD 曲线，信号响应法常采用对数正态分布模型拟合 POD 曲线。

红外热波雷达成像检测结果为缺陷特征图像，缺陷的响应特征在一些检测条件下无法满足线性分布。针对信号响应数据是非线性的无损检测方法，常采用 Hit/miss 法处理检测数据，首先对检测结果进行判定，将检测数据转换为 1 与 0 的二值化结果，其中 1 代表缺陷被检出，0 表示缺陷未检出。其概率密度函数服从二项分布模型，常采用 log-odds 与 log-normal 广义线性模型对二值化数据进行分析，上述模型与检测概率的关系可表示为^[10]：

$$\text{log-odds link: } f(r) = \log\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) \quad (11)$$

$$\text{log-normal link: } f(r) = \Phi^{-1}(p_i) \quad (12)$$

$$p_i = \text{POD}(r_i) \quad (13)$$

式中： $f(r)$ 为广义线性模型的连接函数，Hit/miss 法多采用如下形式：

$$f(r) = \beta_0 + \beta_1 \log(r) \quad (14)$$

$f(r)$ 与缺陷尺寸 r 不满足线性关系，而与 $\log(r)$ 成线性关系，则 $\text{POD}(r)$ 为：

$$\text{log-odds: } \text{POD}(r) = \frac{\exp[f(r)]}{1 + \exp[f(r)]} \quad (15)$$

$$\text{log-normal: } \text{POD}(r) = 1 - \Phi[-f(r)] \quad (16)$$

将检测概率为 90% 对应的缺陷特征尺寸 r_{90} 作为评价无损检测 POD 水平的指标之一， r_{90} 越小，表明无损检测系统及方法的探测能力越强。为表征检测过程中不确定性因素对无损检测 POD 的影响，将 95% 置信水平下检测概率为 90% 对应的缺陷特征尺寸 $r_{90/95}$ 作为评价指标之一。

3 CFRP 层板缺陷检测概率分析

3.1 缺陷判定准则

红外热波雷达成像检测得到的特征图像包含了缺陷信息，但无法直接给出缺陷尺寸，缺陷的响应数据及其检出状态需通过特征图像的数据处理得到。当特征图像中缺陷区域与无缺陷区域的对比度高于判定阈值时则可认为缺陷被检出，图 6 给出了缺陷

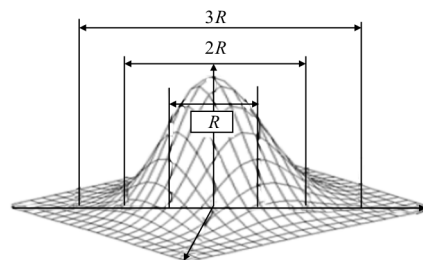
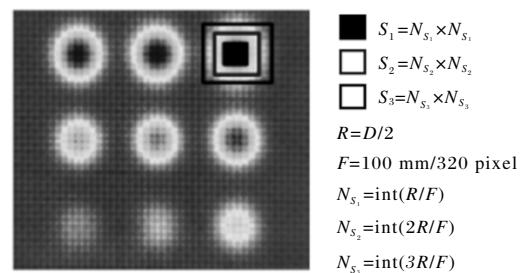


图 6 缺陷参考区域

Fig.6 Defect reference regions

参考区域与邻近无缺陷区域的示意图。

对于径深比为 r 的缺陷，其响应特征值 ΔC_r 由公式(17)进行计算：

$$\Delta C_r = \left| \overline{C_{S_1}} - \overline{C_{S_3-S_2}} \right|$$

$$\overline{C_{S_1}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{S_1}} \sum_{j=1}^{N_{S_1}} C_{S_1}(i,j)}{N_{S_1}^2}$$

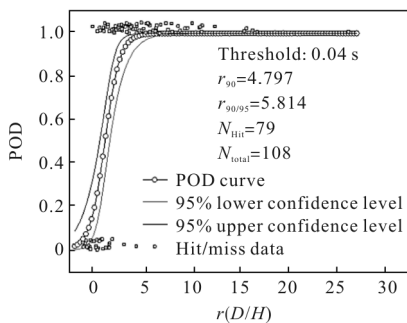
$$\overline{C_{S_3-S_2}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{S_3}} \sum_{j=1}^{N_{S_3}} C_{S_3}(i,j) - \sum_{m=1}^{N_{S_3}} \sum_{n=1}^{N_{S_3}} C_{S_2}(m,n)}{N_{S_3}^2 - N_{S_2}^2}$$

$$\sigma_{S_3-S_2} = \text{std} [C(x,y)_{x,y \in S_3-S_2}] \quad (17)$$

式中： $C(i,j)$ 为特征图像中 (i,j) 像素处的特征值； $\sigma_{S_3-S_2}$ 为特征图像中无缺陷区域的标准差。为保证判定结果的可信度，将缺陷判定阈值下限设置为无缺陷区域特征信息值标准差的 2 倍，以保证缺陷判定结果可信度不低于 95%。

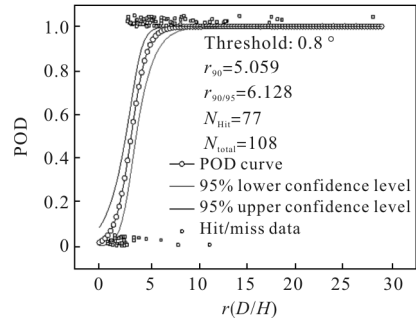
3.2 检测概率估计结果与讨论

图 7 为采用 Hit/miss 法获得的不同响应特征的 POD 曲线, Chirp 调制参数为 0.1-0.01-100, POD 模型为 log-odds。由图 7 可知, 在给定缺陷判定阈值情况下, 采用相关延迟特征所能检测出的缺陷数为 79, Chirp 锁相相位特征的缺陷检出数为 77, HT 相位特征的缺陷检出数为 76, 对于 POD 尺寸结果, 相关延迟特征的 $r_{90/95}$ 为 5.81, Chirp 锁相相位特征的 $r_{90/95}$ 为 6.13, HT 相位特征的 $r_{90/95}$ 为 5.10。虽然 HT 相位特征的缺陷检出率低于相关延迟与 Chirp 锁相相位特征, 但其 POD 尺寸要优于其他热波雷达信号特征提取算法。对于小径深比缺陷, HT 相位特征具有更高的缺陷检出数, 这表明 HT 相位特征对于小径深比缺陷具有更强的探测能力。



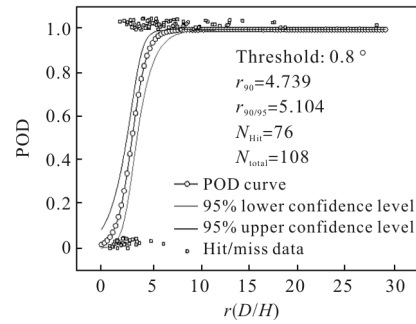
(a) 相关延迟

(a) Cross-correlation delay



(b) Chirp 锁相相位

(b) Chirp lock-in phase



(c) HT 相位

(c) HT phase

图 7 Hit/miss 方法计算得到的 POD 曲线

Fig.7 POD curves calculated by Hit/miss method

为综合评价红外热波雷达成像检测 CFRP 层板缺陷的探测能力, 定义缺陷检出率 a 为：

$$a = \frac{N_{\text{Hit}}}{N_{\text{total}}} \times 100\% \quad (18)$$

式中： N_{total} 为 CFRP 层板模拟缺陷总数, $N_{\text{total}}=108$ ； N_{Hit} 为 Hit/miss 数据中 1 的总数, 即缺陷检出总数。为综合考各因素对 POD 结果的影响, 对不同检测参数与缺陷判定阈值情况下, 由相关延迟、Chirp 锁相相位与 HT 相位特征计算得到的 POD 尺寸及缺陷检出率进行计算, 其结果见表 3~5。

表 3 为采用相关延迟特征计算得到的 POD 尺寸及缺陷检出率。由表 3 可知, 在相同阈值条件下, 采用 Chirp 调制参数 0.05-0.01-100 检测可获得较高的缺陷检出率, 当阈值为 0.12 s 时, 其他 Chirp 调制参数的缺陷检出率已低至 50%, 而 Chirp 调制参数 0.05-0.01-100 的检出率大于 64%。当采用较低调制频率(0.05~0.01 Hz)检测时, 其 POD 尺寸优于其他检测参数, 具有更高的无损检测 POD 水平。采用文中所搭建的红外热波雷达检测系统检测 CFRP

表 3 相关延迟特征的 POD 尺寸

Tab.3 POD sizes of cross-correlation delay

Threshold/s	0.1-0.01-100			0.1-0.05-20			0.1-0.05-40			0.05-0.01-100		
	r_{90}	$r_{90/95}$	a	r_{90}	$r_{90/95}$	a	r_{90}	$r_{90/95}$	a	r_{90}	$r_{90/95}$	a
0.04	4.80	5.81	73.2	6.49	7.98	63.0	6.20	7.56	63.9	4.36	5.58	81.5
0.06	5.39	6.33	63.9	6.27	7.39	57.4	6.27	7.39	57.4	4.74	5.81	75.0
0.08	6.12	7.21	58.3	6.60	7.64	50.0	6.75	7.93	51.9	5.69	7.02	69.4
0.10	6.63	7.79	52.8	6.60	7.64	50.0	6.60	7.64	50.0	6.15	7.57	65.7
0.12	6.63	7.96	51.9	7.15	8.33	46.3	6.73	7.76	47.2	6.24	7.67	64.8

表 4 Chirp 锁相相位特征的 POD 尺寸

Tab.4 POD sizes of Chirp lock-in phase

Threshold/(°)	0.1-0.01-100			0.1-0.05-20			0.1-0.05-40			0.05-0.01-100		
	r_{90}	$r_{90/95}$	a	r_{90}	$r_{90/95}$	a	r_{90}	$r_{90/95}$	a	r_{90}	$r_{90/95}$	a
0.8	5.06	6.13	71.3	6.11	7.51	65.7	6.10	7.53	66.7	5.50	6.69	68.5
1.2	5.51	6.50	63.9	6.41	7.75	61.1	6.45	7.86	62.0	6.81	8.50	63.0
1.6	5.85	6.84	59.3	6.16	7.26	58.3	6.16	7.26	58.3	8.23	10.4	54.6
2.0	6.79	8.11	55.6	6.40	7.53	55.6	6.40	7.53	55.6	8.49	10.6	50.0
2.4	7.40	8.84	50.0	6.28	7.20	50.9	6.28	7.20	50.9	9.56	12.0	44.4

表 5 HT 相位特征的 POD 尺寸

Tab.5 POD sizes of HT phase

Threshold/(°)	0.1-0.01-100			0.1-0.05-20			0.1-0.05-40			0.05-0.01-100		
	r_{90}	$r_{90/95}$	a	r_{90}	$r_{90/95}$	a	r_{90}	$r_{90/95}$	a	r_{90}	$r_{90/95}$	a
0.8	4.38	5.10	70.4	6.11	7.51	65.7	6.10	7.53	66.7	5.83	7.24	69.4
1.2	5.60	6.60	63.0	6.33	7.64	61.1	6.49	7.86	62.0	6.24	7.67	64.8
1.6	6.10	7.31	56.5	6.12	7.26	58.3	6.16	7.26	58.3	6.77	8.20	58.3
2.0	6.29	7.88	52.8	6.33	7.37	53.7	6.46	7.59	54.6	7.84	9.64	52.8
2.4	6.92	8.05	48.2	6.60	7.64	50.0	6.60	7.64	50.0	8.85	11.1	48.2

层板缺陷时, 相关延迟特征得到的最佳 POD 尺寸 $r_{90/95}$ 为 5.58, 缺陷检出率为 81.5%。

表 4 为采用 Chirp 相位特征计算得到的 POD 尺寸及缺陷检出率。由表 4 可知, 当 Chirp 参数为 0.1-0.01-100 时, Chirp 锁相相位特征的 POD 尺寸与缺陷检出率均优于其他检测参数。当 Chirp 调制参数为 0.1-0.05-20 与 0.1-0.05-40 时, POD 尺寸较大, 但缺陷检出率处于较高水平, 在缺陷判定阈值为 2.4° 时, 缺陷检出率大于 50%。相比相关延迟特征的 POD 计算结果, 当 Chirp 参数为 0.05-0.01-100 时, Chirp 锁相相位特征不具有最佳缺陷检出率, 随缺陷判定阈值增大, POD 尺寸急剧增大, 缺陷判定阈值为 2.4° 时, $r_{90/95}$ 为 12, 显著大于其他检测

参数, 表明采用 Chirp 锁相相位特征进行缺陷判定时, 不宜采用较低的调制频率(0.05~0.01 Hz)。采用较高频率扫描范围(0.1~0.05 Hz)检测时, POD 尺寸对缺陷判定阈值变化不敏感, 其 $r_{90/95}$ 稳持在 7.2~7.9。在给定的 Chirp 调制参数下, Chirp 锁相相位特征的 $r_{90/95}$ 最小值为 6.13, 缺陷检出率最高为 71.3%。

表 5 为采用 HT 相位特征计算得到的 POD 尺寸及缺陷检出率。由表 5 可知, 缺陷判定阈值为 0.8° 时, Chirp 调制参数为 0.1-0.01-100 时的 POD 尺寸最小, 缺陷检出率最高。但缺陷判定阈值为 0.8° 时, HT 相位特征的缺陷检出率为 70.4%, 略低于此水平下相关延迟与 Chirp 锁相相位特征的缺陷检出率, 而 $r_{90/95}$ 为 5.10, 低于相关延迟特征的最小 POD 尺

寸($r_{90/95}=5.58$)与 Chirp 锁相相位特征的 POD 尺寸($r_{90/95}=6.13$),其原因是对于径深比 $4 < r < 10$ 区间内的缺陷,Chirp 锁相相位特征与相关延迟特征的 Hit/miss 数据中存在较多未检出缺陷,而 HT 相位特征则能够检出更多的缺陷,使得 HT 相位特征的 POD 尺寸优于其他热波雷达信号特征提取算法的 POD 尺寸。

图 8 给出了不同 Chirp 调制参数下,相关延迟、Chirp 锁相相位与 HT 相位特征得到的最佳 POD 尺寸。由图 8 可知,当 Chirp 调制参数 0.1-0.01-100 时,HT 相位特征的 $r_{90/95}$ 最小,表明在合适的 Chirp 调制参数下,HT 相位特征提取算法可获得更小的 POD 尺寸,具有更高的缺陷探测能力与检测概率水平。

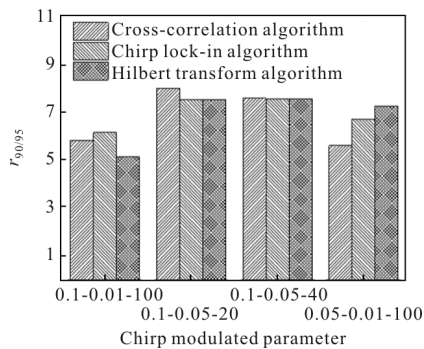


图 8 不同信号提取算法的最佳 POD 尺寸
Fig.8 Optimal POD size of different signal extraction algorithms

图 9 为相关延迟、Chirp 锁相相位与 HT 相位特征的缺陷检出率。由图 9 可知,在给定 Chirp 调制参数下,所搭建的红外热波雷达成像检测系统对

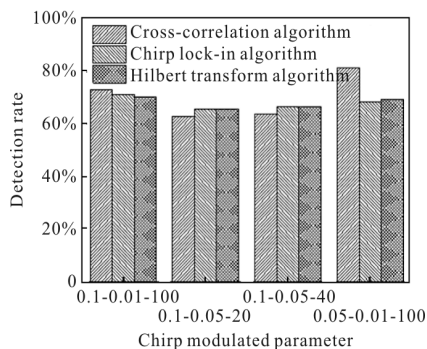


图 9 不同信号提取算法的最佳缺陷检出率
Fig.9 Optimal defect detection rate of different signal extraction algorithms

CFRP 层板缺陷的检出率均大于 62%,当 Chirp 调制参数为 0.05-0.01-100 时,相关延迟特征的缺陷检出率最高为 81.5%。

4 结 论

文中对红外热波雷达成像检测 CFRP 模拟缺陷的检测概率水平进行了研究,分别采用相关算法、Chirp 锁相算法与 HT 算法提取热波雷达信号的特征信息。采用 Hit/miss 方法对检测结果的 POD 水平进行了估计,依据检测图像的特征设计了合理的缺陷判定准则,获得了不同缺陷判定阈值、信号提取算法及 Chirp 调制参数下的 POD 尺寸数据。分析结果表明:当 Chirp 调制参数为 0.1-0.01-100 时,采用 HT 相位特征获得了较小的 POD 尺寸($r_{90/95}=5.1$),采用 Chirp 调制参数 0.05-0.01-100 检测时,相关延迟特征具有较高的缺陷检出率(81.5%)。

参考文献:

- [1] Ma Guanbing, Zhang Jun, Li Ming, et al. Review on the reliability of non-destructive testing technology [J]. *Electric Power*, 2012, 45(6): 64-69. (in Chinese)
马官兵,张俊,李明,等.无损检测可靠性的研究进展[J].中国电力,2012,45(6):64-69.
- [2] George A G. Probability of detection POD curves derivation, application and limitations [R]. London: Health and Safety Executive, 2006.
- [3] Burch S F. Computer modeling for the predication of the probability of detection of ultrasonic corrosion mapping [J]. *Insight*, 2005, 47(12): 761-764.
- [4] Dag H. Reliability gains from combing eddy current and ultrasonic testing [J]. *NDT & E International*, 2000, 33(6): 351-362.
- [5] Cheng Zhihu, Wang Yizhi, Chen Baizhen. Analysis and correction of conventional NDT reliability conception [J]. *NDT*, 1999, 21(1): 2-13. (in Chinese)
程志虎,王怡之,陈柏真.常规无损检测可靠性概念的分析与修正[J].无损检测,1999,21(1):2-13.
- [6] Feng Fuzhou, Zhang Chaosheng, Song Aibin, et al. Probability of detection model for fatigue crack in ultrasonic infrared imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0304005. (in Chinese)
冯辅周,张超省,宋爱斌,等.超声红外热像检测中疲劳裂

- 纹的检出概率模型研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0304005.
- [7] Zhang Chaosheng, Song Aibin, Feng Fuzhou, et al. Research on optimization method of test conditions in sonic infrared imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0204005. (in Chinese)
张超省, 宋爱斌, 冯辅周, 等. 超声红外热像检测条件的优化方法研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 0204005.
- [8] Liu Junyan, Liu Xun, Wang Yang. Technology of linear frequency modulation infrared thermal-wave imaging for nondestructive testing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1416–1422. (in Chinese)
- 刘俊岩, 刘勋, 王扬. 线性调频激励的红外热波成像检测技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1416–1422.
- [9] Gong Jinlong, Liu Junyan, Qin Lei, et al. Investigation of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheet with subsurface defects inspection using thermal-wave radar imaging (TWRI) based on the multi-transform technique[J]. *NDT & E International*, 2014, 62(2): 130–136.
- [10] Liu Junyan, Liu Yang, Wang Fei, et al. Study on probability of detection (POD) determination using lock-in thermography for nondestructive inspection (NDI) of CFRP composite materials [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 71(2): 448–456.