

红外脉冲相位热像检测效率提高方法

陶胜杰, 杨正伟, 田干, 张炜

(火箭军工程大学 602 教研室, 陕西 西安 710025)

摘要: 为提高脉冲相位热像法(PPT)温度序列相位的计算速度和检测效率,对传统的傅里叶变换(FFT)进行优化,提出了适用于PPT的相位快速计算方法,使运算速度提高了1.9~12.4倍。为确定相位算法中温度序列的最佳采样长度和频率分量,结合热扩散深度公式提出了最佳采样长度估算公式。对铝合金试件和钢材料试件进行了脉冲相位热波检测,当缺陷检测效果最佳时,热图序列最佳采样长度分别为1.1s和3.9s,基频相位差有最佳的缺陷分辨能力。结果表明:该算法显著提高了相位计算速度,量化的最佳采样长度估算公式能直接确定热图采样长度,减少了操作的主观性和参数设置的随机性,有效提高了脉冲相位热像检测效率。

关键词: 红外脉冲相位; 傅里叶变换; 最佳采样长度; 检测效率

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0504005

Method for improving detection efficiency using infrared pulse phase thermography

Tao Shengjie, Yang Zhengwei, Tian Gan, Zhang Wei

(602 Teaching Office of Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to improve the phase calculation speed and detection efficiency of Pulse Phase Thermography (PPT), a fast phase algorithm optimized from Fast Fourier Transform (FFT) was proposed, with which the calculation speed could be increased by 1.9–12.4 times. To solve the optimal sampling length of thermal image sequence and frequency ratio, the calculation method for optimal sampling length was proposed based on the heat diffusion formula. Experiment was carried out on aluminium and iron specimens. Results show that the optimal sampling length is 1.1 s and 3.9 s for aluminium and iron specimens respectively and the phase difference at fundamental frequency has the best capability to distinguish defects. The calculation speed is evidently improved by the proposed fast algorithm and the optimal sampling length can be directly calculated by the improved numerical formula. Operation subjectivity and random settings of parameters can be avoided and the detection efficiency of pulse phase thermography can be improved.

Key words: infrared pulse phase; FFT; optimal sampling length; detection efficiency

收稿日期:2015-09-20; 修订日期:2015-10-24

基金项目:国家自然科学基金(51275518, 51305447)

作者简介:陶胜杰(1982-),男,工程师,博士生,主要从事红外热波无损检测方面的研究。Email:taoshengjie@126.com

导师简介:张炜(1963-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事设备监测与故障诊断方面的研究。Email:zhangweihuaiyu@163.com

0 引言

红外热波检测技术作为一种新兴的无损检测技术具有检测速度快、观测面积大、检测结果直观、非接触等优势,在国内外得到广泛的发展和运用^[1-6]。红外热波检测方法可分为主动式与被动式。主动式包括脉冲热像法、超声热像法以及其他主动加热方法。红外脉冲热像法(PT)是最早、最成熟、应用最广泛的技术,该方法采用高能闪光灯热源进行激励,利用瞬时高能量热流脉冲在含有缺陷的材料内部传导的不均匀性引起的表面温度差异进行探伤和检测,通过单幅表面热图的温度分布差异来判定缺陷参数。脉冲相位热像法(Pulse Phase Thermography, PPT)是脉冲热像法的一种改进方法,它从连续多幅热图组成的温度序列中提取相位,通过相位差异来判定缺陷,结合了红外检测、信号处理等多方面的技术,既具有脉冲热像法的易用、快速的优点,又有抗干扰能力强、信号分析简单的优点,在一定程度上克服了单纯脉冲热像法中加热不均、检测对象表面发射率、表面形状对检测的影响等问题,改善了检测效果^[7-10]。

在脉冲相位热像法中,需要对检测部位热图内每个像素点的温度序列进行处理,提取出相位信息,处理过程运算量比较大,耗时较多。此外,由于各种检测对象的厚度和缺陷深度不同,需要处理的温度序列长度也各不相同,导致检测过程中存在较大的主观性和参数设置的随机性问题,严重影响检测效率。因此,文中针对脉冲相位热像法的相位提取问题,通过对传统的 FFT 进行优化提出适用于 PPT 的相位快速计算方法,确定最佳检测效果时的温度序列采样长度估算方法,以期提高脉冲相位热像法的检测效率。

1 相位快速提取算法原理

在脉冲相位热像检测中,对材料表面施加脉冲热流后,采用热像仪记录一定时间内表面各点的温度变化情况,每个点不同时刻的温度值构成一个温度序列,理论上该序列包含各种频率热流的响应特性,可表示为:

$$T(t) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

式中: T 表示温度函数; f_i 为不同谐波的频率; φ_i 为相

应频率的相位; t 为时间。对公式(1)进行相应的运算即可求解出相位 φ_i 。

提取相位有多种运算方法。参考文献[7-13]采用四点相位法、相关算法和 FFT 等对温度序列进行相位提取。四点相位法虽然运算量很少,但只适合对正弦信号或者含恒定偏量的正弦信号提取相位,而且必须预先获知信号的周期,由于在一个周期内均匀获取四点,对噪声信号的抑制能力很弱。相关算法利用噪声信号与参考信号不相关的原理提取微弱信号,常用的参考信号为正弦和余弦信号,此时相关算法的实质与离散傅里叶变换(DFT)相同。FFT 作为 DFT 的一种快速算法,在分析单点定长时间序列内所有频率的幅值和相位时特别有效,在脉冲相位热像法的相位提取中应用较多^[4,10-14]。

对于红外脉冲热像法中单点的温度序列,若检测材料确定,往往只有一个特定频率的信号包含最丰富的相位信息,也即只有一个确定的采样长度能处理出对比度最好的相位差,此时的采样长度可以称为最佳采样长度。若用传统 FFT 对序列进行运算,就会提取所有频率的相位。假设热像仪帧率为 s ,采样长度为 N ,对温度序列进行离散傅里叶变换意味着以 N 点的时长作为基频热流的周期,则基频为:

$$f_1 = \frac{s}{N} \quad (2)$$

根据采样定理,当热像仪的帧频为 s 时,可以采集到最高频率 $s/2$ 的热流信号,则离散序列有效的最高倍频为 $s/2f_1 = N/2$,因此公式(1)量化后可得:

$$T(n) = \sum_{k=1}^{N/2} A_k \sin(2\pi k f_1 n / s + \varphi_k) \quad (3)$$

将公式(3)展开,应用正弦函数的正交特性可得倍频为 k 的热流信号的相位为:

$$\varphi_k = \arctan \left(\frac{\sum_{n=1}^N T(n) \cos(2\pi k n / N)}{\sum_{n=1}^N T(n) \sin(2\pi k n / N)} \right) \quad (4)$$

当对温度序列进行 FFT 变换时,相当于对公式(4)中的 k 从 $1 \sim N$ 均做了计算,从而使运算量增加数倍甚至更多,对热像图中的数十万个像素都进行 FFT 运算时,处理效率会明显降低。而实际中当材料属性和尺寸确定时, k 和 N 值也随之确定。如果能确定两者的数值,就可以用公式(4)只计算一个频率的相位

值,从而明显减少运算量。

在红外热像法中,不同频率的热流在材料内的传播深度可由下式得到^[12]:

$$\mu=C\sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad (5)$$

式中: μ 为热扩散深度; C 为修正系数; α 为热扩散系数; f 为热流谐波频率。由公式(5)可得到:

$$N=st=s \cdot \frac{\pi \mu^2}{\alpha C^2} \quad (6)$$

式中: t 为热扩散时间。可以看出,当热扩散系数 α 越大时,材料对脉冲热流的高频响应越敏感,积分长度 N 应该越短; μ 越大也即缺陷越深,材料对热流的低频响应越敏感, N 应该越长,而且随着 μ 的变化具有一致连续性。

通常当用 FFT 对温度序列提取时,长度 N 取足够大且在处理过程中固定不变,随着倍频 k 的增加,各次谐波的积分长度依次为 $N, N/2, N/3, \dots$,离散性地缩短。由于 FFT 不预先估计信号频率,故不考虑取样长度 N 与最佳采样长度的准确关系,离散的各次谐波积分长度通常也会明显偏离最佳采样长度,从而错失最佳检测时间,降低检测效果。如果能用公式(6)估算出最佳采样长度,那么公式(4)积分长度始终为基频信号的整数倍,即使在很短的取样长度内也不会带来频率泄露引起的误差,避免频率离散性所引起的最佳检测时间的错失。而且公式(4)中取样长度 N 可以随着检测对象的参数连续变化,不必设定为 FFT 推荐的 2^n 或者其他合数,从而增加了热图序列采样长度的灵活性。

2 相位提取算法运算速度验证

在计算机上验证 FFT 算法和公式(4)的速度,计算机处理器为 FX4300,内存 4 G,Win XP 操作系统,Matlab R2012a 平台,变换数据长度为 10~2 400,对热图分辨率为 640×480 所有的像素进行处理,两种算法的耗时如图 1 所示。

从图中可以看出,当热图序列长度在 10~2 400 点范围内,公式(4)的计算耗时基本与序列长度成正比增加且耗时明显低于 FFT,而 FFT 算法在不同点的耗时存在突变。因为 FFT 的基本思想是把原始的序列分解成一系列短序列,利用计算因子所具有的对称性和周期性来删除重复计算,提高运算速度。当序

列长度为 2^n 时速度提升最明显,为其他数时通过因数分解将长序列分解成多个短序列,分解的程度不同,速度提升效果也不同。序列长度与分解程度无规律可循,所以 FFT 在不同的序列长度时运算耗时近似呈随机规律,会发生突变。

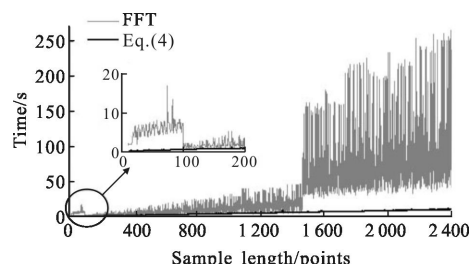


图 1 算法计算时间对比

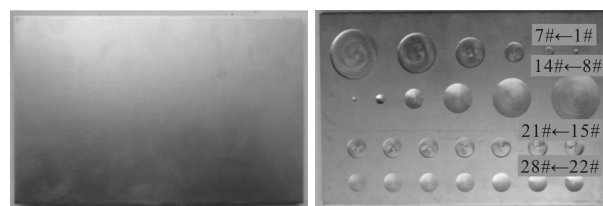
Fig.1 Comparison of computation time by different algorithms

通过准确计算,在 10~99 点、100~1462 点和 1 463~2 400 点 3 个区间段内公式(4)算法的平均速度是 FFT 算法的 13.4 倍、2.9 倍和 9.8 倍,相位提取效率明显提高。

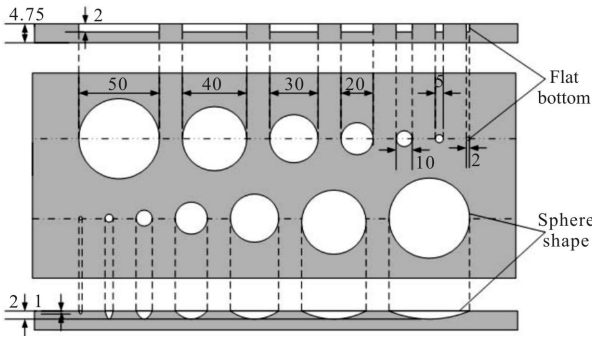
3 脉冲相位热像法试验

上述研究表明公式(4)中的 k 和 N 两个参数是实现相位快速提取的关键,下面通过试验来进行分析。试验使用两支高能氙气闪光灯,总能量 9 600 J,脉冲宽度 6 ms。红外热像仪型号为德国 InfraTec 公司生产的 Vhr680 非制冷型红外热像仪,工作波长为 7.5~14 μm ,提供 640×480 像素高分辨率图像,热灵敏度达到 0.03 $^{\circ}\text{C}$,最大采集频率为 50 Hz。

试验使用了铝合金试件和钢材料试件。铝合金试件尺寸为 299 mm×193 mm×4.75 mm,背面加工有 4 行模拟缺陷,每行 7 个,共 28 个。试件及其结构尺寸如图 2 所示,单位为 mm。15#~24# 缺陷的大小相同,深度从 2.75 mm 递增至 4.25 mm,试验选取这 7 点和试件中心点的温度序列进行处理。

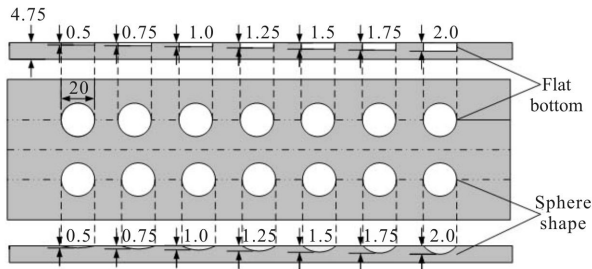


(a) 试件正面 (b) 试件背面
(a) Front of specimen (b) Back of specimen



(c) 上半部分结构尺寸

(c) Structural dimension of upper part



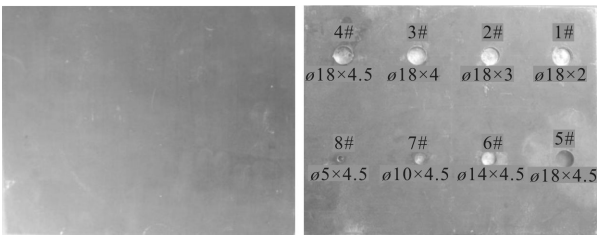
(d) 下半部分结构尺寸

(d) Structural dimension of lower part

图 2 铝合金试件

Fig.2 Aluminum alloy specimen

钢材料试件尺寸为 282 mm×222 mm×5.0 mm, 背面加工有两行圆柱形坑洞模拟缺陷, 每行 4 个, 共 8 个。试件及其结构尺寸如图 3 所示, 单位为 mm。1#~4# 缺陷的大小相同, 深度从 3.0 mm 递减至 0.5 mm, 试验选取这 4 点和试件中心点的温度序列进行处理。



(a) 试件正面

(b) 试件背面

(a) Front of specimen

(b) Back of specimen

图 3 钢材料试件

Fig.3 Steel material specimen

由于热像仪采集到的温度信号含有明显的噪声, 幅值可达 0.3 °C, 为了减小噪声的影响, 将每个像素点周围 7×7 范围内像素温度取平均值作为该点的温度^[9]。铝合金的热扩散率很大, 对其试验时设置热像仪的采样频率为 50 Hz, 而对钢材料试件, 由于其

热扩散系数约为铝的 1/6, 由公式(6)可得, 为了使采样长度能够稳定在一定范围内, 应适当降低热像仪的采集频率 s , 设置为 16.67 Hz。

4 试验结果分析

用公式(4)对脉冲闪光后所选中的缺陷中心和试件中心点的温度序列进行处理, 并进行多次空域滤波, 取变换周期 $k=1$, 对铝合金试件温度序列 10~140 帧长度的响应信号提取相位, 得到的相位如表 1 所示。

表 1 铝合金缺陷单周期谐波相位

Tab.1 Phase of single period harmonic for aluminum alloy specimen

Sam-pling length	Defect depth/mm							
	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4.25	4.75 (normal)
10	18.147	18.095	18.077	18.078	18.085	18.100	18.122	18.126
20	9.232	9.179	9.155	9.116	9.107	9.115	9.114	9.102
30	6.276	6.224	6.186	6.146	6.126	6.127	6.108	6.084
40	4.796	4.745	4.697	4.660	4.632	4.626	4.604	4.573
50	3.903	3.851	3.800	3.758	3.733	3.722	3.697	3.664
60	3.299	3.246	3.194	3.151	3.130	3.115	3.089	3.055
70	2.865	2.814	2.761	2.718	2.702	2.683	2.658	2.624
80	2.534	2.488	2.433	2.393	2.378	2.358	2.334	2.300
90	2.272	2.230	2.173	2.138	2.123	2.103	2.082	2.047
100	2.059	2.021	1.964	1.932	1.917	1.897	1.878	1.844
110	1.881	1.849	1.790	1.763	1.747	1.728	1.711	1.678
120	1.732	1.705	1.646	1.623	1.607	1.589	1.573	1.540
130	1.607	1.582	1.526	1.504	1.489	1.472	1.457	1.425
140	1.500	1.477	1.423	1.403	1.389	1.373	1.359	1.328

从表 1 中可以看出, 不同采样长度的温度响应相位明显不同, 相同采样长度下不同深度缺陷处的相位也不同, 但相位差很小, 为突出这一差异, 以无缺陷处的相位为基准, 将缺陷处的相位与该相位进行相减, 得出相位差如图 4 所示。

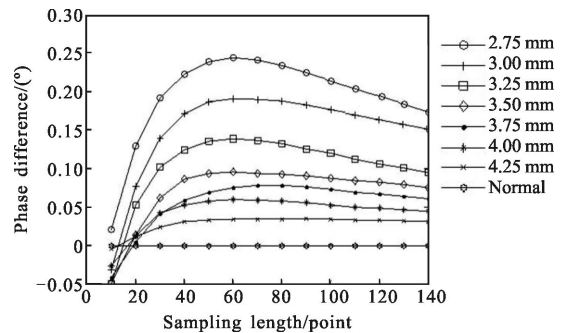


图 4 铝合金缺陷单周期谐波相位差

Fig.4 Phase difference of single frequency for aluminum alloy specimen

从图中可以看出,采样数较小时,各缺陷处的相位差不明显,甚至交叉在一起。随着采样长度的增加,相位逐渐分离扩大,采样数在 40~70 时各缺陷的相位差明显,最容易区分缺陷。随着采样点的继续增加,相位逐渐集中,缺陷分辨能力降低。可见,选取 40~70 点是合适的采样长度,换算至时间即对脉冲后 0.8~1.4 s 内的热图序列提取相位效果最好。如取 60 点作为采样长度,当 $k=1$ 时对应的热流谐波频率为 $50 \text{ Hz}/60=0.833 \text{ Hz}$,以此频率为基频, $k=1, 2, 3, 4, 6, 12$ 时的相位差如图 5 所示。由图可得,当采样长度一定时,基频谐波的相位差最大,最易区分缺陷,随着频率倍数的增加,相位差快速减小,从 3 倍频开始部分相位就已经交叉在一起,不能区分缺陷。因此当采样长度一定时,提取基频信号的相位差有最好的缺陷分辨能力。

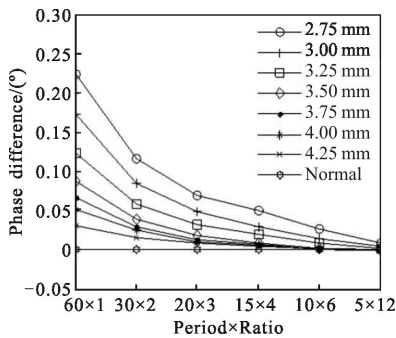
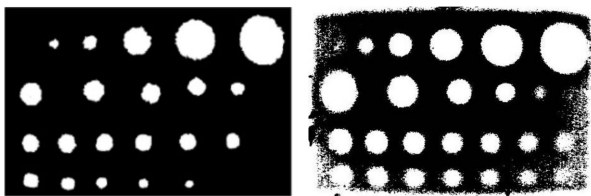


图 5 铝合金缺陷倍频谐波相位差

Fig.5 Phase difference of different frequency ratios for aluminum alloy specimen

图 6(a)为采用 PSO-FCM(粒子群优化-模糊聚类)分割方法处理后的效果,图 6(b)为采用公式(8)计算得到的整个试件相位灰度图。对比发现,PPT 方法



(a) PSO-FCM 分割方法 (b) PPT 方法
(a) PSO-FCM result (b) PPT result

图 6 铝合金试件处理结果

Fig.6 Result of aluminum alloy specimen

能够识别试件下半部分所有的 14 个圆柱形和球形缺陷,即使右下侧最深的 21# 和 28# 两个缺陷也清晰

可见,而 PSO-FCM 却有 3 个不可见。另外从直观上看,PPT 方法对缺陷形状的识别效果也要明显优于 PSO-FCM 方法。

用相同的方法对钢材料所选的缺陷中心点和试件中心点的温度序列进行处理,取变换周期 $k=1$,对温度序列 10~130 帧长度的信号提取相位,将缺陷处的相位与无缺陷处的相位作差,得出的相位差如图 7 所示。

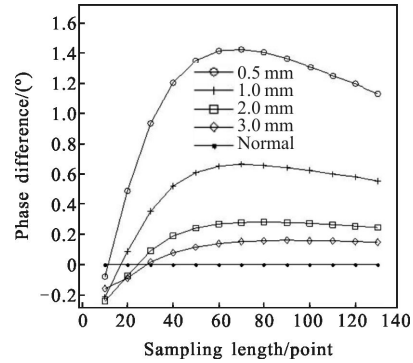


图 7 钢材料缺陷单周期谐波相位差

Fig.7 Phase difference of single frequency for steel material specimen

从图中可以看出,钢材料的相位差与铝合金的相位差具有相似的变化趋势。采样数在 50~80 时各缺陷的相位差明显,最容易区分缺陷。可见,选取 50~80 点是合适的采样长度,由于热像仪的采集频率为 16.67 Hz ,换算至时间即脉冲后对 3~4.8 s 内的热图序列提取相位效果最好。

取 60 点作为采样长度,当 $k=1, 2, 3, 4, 6, 12$ 时的相位差如图 8 所示。由图可得,当采样长度一定时,随着频率倍数的增加,相位差快速减小,缺陷识别能力下降。对于钢材料试件,同样是提取基频信号的相位差有最好的缺陷分辨能力。

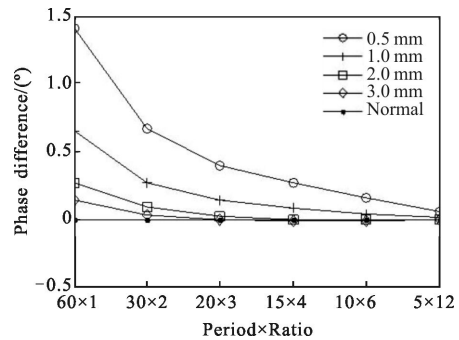


图 8 钢材料缺陷倍频谐波相位差

Fig.8 Phase difference of different frequency ratios for steel material specimen

图 9 为经 PPT 处理后的钢材材料试件相位图,由于缺陷较浅,所有缺陷均容易处理出来。

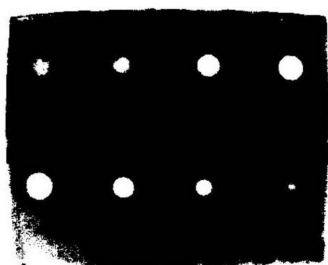


图 9 钢材材料试件处理结果

Fig.9 Result of steel material specimen

将铝合金试件取样时长均值 1.1 s、钢材材料试件取样时长均值 3.9 s 代入公式(6),求解 C 分别为 1.25、1.36。用最小二乘法将两次试验参数代入公式(6)求 C 的广义解为 $C=1.31$,则公式(6)可表示为:

$$N=1.83 \frac{s\mu^2}{\alpha} \quad (7)$$

式中: s 为热像仪采集频率; α 为材料热扩散系数; μ 为材料基体厚度。

以上试验中发现基频信号处理后的相位识别缺陷能力最强,即 $k=1$,公式(4)进而可表示为:

$$\varphi_k = \arctan \left(\frac{\sum_{n=1}^N T(n) \cos(2\pi n/N)}{\sum_{n=1}^N T(n) \sin(2\pi n/N)} \right) \quad (8)$$

在进行其他脉冲相位热像法检测试验时,首先用公式(7)估算最佳采样长度 N ,再用公式(8)快速计算出相位,可以避免过长的热图采集量和过大的相位计算运算量,在保证最佳检测效果的前提下有效提高检测效率。为了抑制温度噪声同时避免过长的采集时间,应调整热像仪的采集频率,使采样总长度在 50~300 范围内。

5 方法验证

以平底楔形槽试件进行试验来验证最佳采样长度(公式(8))的有效性。试件为钢材材料,背面如图 10 所示,长度单位为 mm。外形尺寸为 280 mm×220 mm,厚 5.8 mm,从左到右依次铣有 1#~5# 大小相等、深度从 1.0 mm 平均递增至 5.0 mm 的 5 个平底楔形槽。试验设备和操作过程与上文相同。

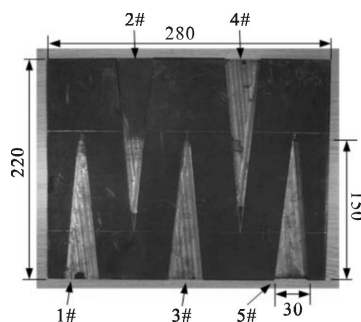


图 10 平底楔形槽试件

Fig.10 Specimen with flat-bottomed wedge-shaped grooves

试验过程中共采集 20 s 的红外热图。为便于比较,图 11(a)显示了脉冲热像法(PT)中效果最好的一帧温度图,图 11(b)~(f)为采用公式(8)分别对 2~6 s 序列长度计算得到的相位图。

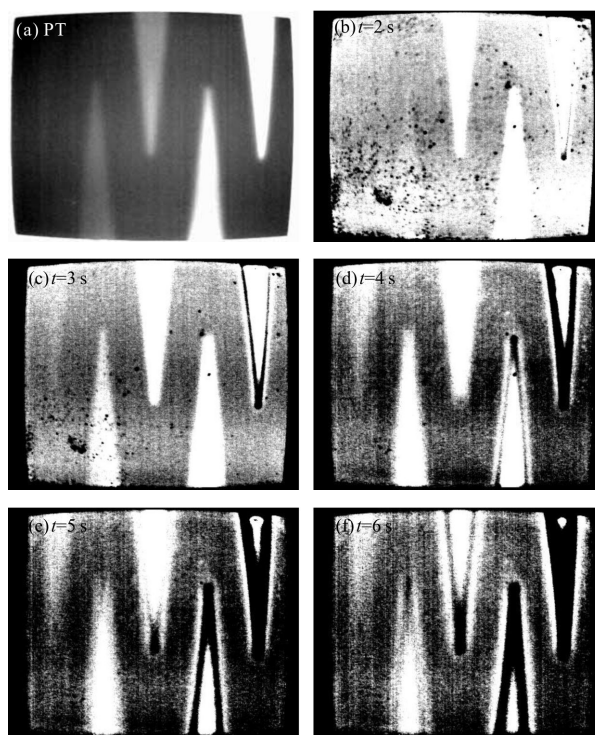


图 11 不同序列长度的相位图

Fig.11 Phase images of different sequence lengths

图中从左至右依次为 1#~5# 楔形槽,相应的位置深度(从试件上表面到槽底面的距离)由深至浅。可以看出,脉冲热像法对靠近表层的 3#~5# 槽检测效果较好,位置较深的 2# 槽略有模糊,最深的 1# 槽根本无法检测出。而脉冲相位法中随着采样序列长度的不同,检测效果有明显差异。在 2 s 的序列长度时,3#~5# 槽检测可以检测出,2# 槽隐约可见,1# 槽

不能检测出;在3 s长度时,2#槽轮廓清晰,1#槽开始显现;大致在4 s和5 s长度时,1#槽有最清晰的轮廓,在6 s长度时所有缺陷开始变模糊。需要指出,3#~5#缺陷在图11(c)~(f)中呈现黑白交替的轮廓边缘,这与傅里叶变换的固有相位算法有关,限于篇幅此处不再详细分析。从试验中还可以看出,PPT比PT在检测深处的缺陷时有优势,但需要确定合适的温度序列长度。

由上可见,大致在4 s和5 s温度长度时有最好的缺陷检测效果。通过公式(7)计算出的最佳温度长度为5.05 s,与试验结果基本一致,初步验证了通过热扩散长度来估算最佳温度序列长度是可行的,可以避免PPT中采样长度选取的随机性和主观性。

试验中相位图的像素数为471×351,用FFT计算4 s和5 s序列长度相位分别耗时约4.45 s和5.79 s,而用公式(8)计算分别耗时约0.76 s和0.97 s,相位提取速度提高了数倍。

6 结论

文中提出了脉冲相位热像法中的相位快速提取方法,该方法与快速傅里叶变化算法相比,运算速度提高了1.9~12.4倍,显著减少了运算量,提高了相位提取效率。

通过对两种典型金属材料——铝合金和钢材料试件进行试验,得出最佳检测效果时两者的热图序列检测长度,结合热扩散深度公式求解了通用的最佳采样长度估算公式;在热图序列最佳长度一定时,基频热流信号的相位差有最好的缺陷分辨能力;通过试验验证了最佳采样长度估算公式的有效性。检测其他金属材料以及非金属材料缺陷时,量化的最佳采样长度估算公式能直接确定需要采集的热图序列长度,减少了操作的主观性和参数调整的随机性;优化的快速相位提取算法能显著减少运算量,有效提高脉冲相位热像法的检测效率。

参考文献:

[1] Montanini R, Freni F. Non-destructive evaluation of thick glass fiber-reinforced composites by means of optically excited lock-in thermography [J]. *Composites: Part A*, 2012 (43): 2075–2082.

[2] Feng Chi, Hua Xiang. Applications of the infrared thermal wave technology in thermal barrier coating testing [J].

Applied Science and Technology, 2015, 42 (1): 15–18. (in Chinese)

- [3] Tang Qingju, Wang Yang, Liu Junyan, et al. Detecting of defects in heat-resistant alloy coating structure plates using pulsed infrared thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1685–1690. (in Chinese)
- [4] Zhang Jinyu, Meng Xiangbing, Yang Zhengwei, et al. Numerical simulation and analysis of lock-in thermography for thickness measurement of coating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 6–11. (in Chinese)
- [5] Li Yin, Zhang Wei, Yang Zhengwei, et al. Low-velocity impact damage characterization of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) using infrared thermography [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76: 91–102.
- [6] Tao Shengjie, Yang Zhengwei, Zhang Wei, et al. Research on measurement of coating thickness based on thermal image time characteristic [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1810–1816. (in Chinese)
- [7] Masashi Ishikawa, Hiroshi Hata, Yoshio Habuka, et al. Detecting deeper defects using pulse phase thermography [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 57: 42–49.
- [8] Waugh Rachael C, Dulieu-Barton Janice M, Quinn Simon. Defect detection using pulse phase thermography—repeatability and reliability of data [J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 569–570: 1164–1169.
- [9] Henrik Schmutzler, Marko Alder, Nils Kosmann, et al. Degradation monitoring of impact damaged carbon fibre reinforced polymers under fatigue loading with pulse phase thermography [J]. *Composites: Part B*, 2014, 59: 221–229.
- [10] Bu Chiwu, Tang Qingju, Liu Junyan, et al. Inspection on CFRP sheet with subsurface defects using pulsed thermographic technique [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 65: 117–121.
- [11] Waugh R C, Dulieu-Barton J M, Quinn S. Modelling and evaluation of pulsed and pulse phase thermography through application of composite and metallic case studies [J]. *NDT & E International*, 2014, 66: 52–66.
- [12] Yu Jiajie, Wu Naiming, Zeng Zhi, et al. FRP depth measurement based on pulsed phase thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1893–1898. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] Yuxia Duan, Stefanie Huebner, Ulf Hassler, et al. Quantitative evaluation of optical lock-in and pulsed thermography for aluminum foam material [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60: 275–280.