

锁相红外检测中相位检测方法

汪子君¹, 刘俊岩², 戴景民¹, 王 扬²

(1. 哈尔滨工业大学 自动检测与过程控制系统研究所, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 机械制造及自动化系, 哈尔滨 150001)

摘 要:介绍了调制加热阶段的一维热波导热方程。为了减少图像序列采集数量,针对相位法红外热成像检测提出了获取热波信号相位信息的方法,即相关检测算法。利用噪声信号与参考信号不相关的原理,有效地提取微弱被测信号。通过对同一组图像序列的处理,将其与4点平均算法比较,证实该算法采集信息少,具有较高检测精度。同时也验证了相位信息对样品表面非均匀性不敏感,使得相位法红外热像技术在无损检测中有广泛应用。

关键词:红外热成像检测;锁相;相关算法;相位检测

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2008)07-0418-04

Study of Phase Detection in Lock-in Thermography Nondestructive Testing

WANG Zi-Jun¹, LIU Jun-Yan², DAI Jing-Min¹, WANG Yang²

(1. Institute of Automatic Detecting and Process Control System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Department of Mechanical Engineering and Auto Mation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: One-dimensional heat conduction equation of thermal wave during modulated heating was described. A method, correlation algorithm, was promoted to detect phase information in lock-in thermography nondestructive testing in order to reduce sample images. Using the principle of the reference signal being uncorrelated to the measured signal, the latter could be extracted easily. Compared with averaging four-point algorithm, correlation algorithm was shown to have better precision and need less information. The experiment also confirmed that the phase was less affected by surface non-uniformity. So the phase thermography technique was expected to have wide applications in NDT field.

Keywords: Infrared imaging testing; Lock-in; Correlation algorithm; Phase detection

红外热成像检测作为一种非接触的检测手段,广泛应用于航空航天、机械、医疗、电力、建工和石化等领域,具有探测面积大、安全、适用于外场检测等特点^[1,2]。然而,利用样品表面温度分布的差异确定样品内部缺陷的方法存在一定局限性,表现在表面加热不均匀或定量检测缺陷深度等方面。锁相红外技术由德国斯图加特大学 Busse G 教授提出^[3],由于检测信号具有相位延迟且相位图所含信息比振幅图多的特点,被逐步发展起来。

北京航空材料研究院开发的 LOCK-IN 加热系统通过改变调制频率检测不同深度的缺陷^[4]。日本学者在检测钢和铝合金的缺陷中,采用了感应线圈方式,用调制电流作为激励,扩展了锁相技术检测金属材料的激励源^[5]。法国 CEDIP 公司研制了红外锁相热成像系统,并将该系统用于复合材料的无损检测和构件的应力分析中。笔者针对红外热图像序列的处理,提出采用相关算法提取热波相位信息,并将其与四点平均算法进行了比较。

1 传热学方程

当一束强度受到调制的光投射到不透明固体物质表面上时,一部分入射的能量会被该物体吸收而

收稿日期: 2007-06-19

基金项目: 黑龙江省重点攻关资助项目(GB06A512)

作者简介: 汪子君(1981—),女,博士研究生,主要研究红外热成像技术和红外无损检测。

转化为热能,并在物质中产生一周期变化的局部热流,形成周期的温度分布。热能以热波形式在样品中传播,该传播与样品的热学性质及热源调制频率有关。当遇到样品中有缺陷时,由于热不均匀性,热波将被散射或发射,热波返回样品表面时,改变了样品表面的温度分布。用红外热像仪记录下样品表面温度变化过程,与信号处理技术相结合,对视频序列图像进行处理,通过对热传导反问题进行求解,采用适当的反演算法,可以对样品一个或多个热学参数进行重构,进而对样品缺陷进行分析。

图1为含有缺陷的半无限大平板材料,忽略热流的横向扩散,只考虑厚度方向的热传递,时间 $t>0$ 时, $x=0$ 的边界受到周期热流 $q=I_0 e^{j\omega t}$ 注入,可描述成如下方程^[6]:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

初始条件为:

$$-k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \bigg|_{x=0} = I_0 e^{j\omega t} \quad (2)$$

式中 T 为温度漂移; ρ, c, k 分别为密度、比热容和热导率。在各向同性、均匀介质中的一维热波响应可以表示成深度 x 和时间 t 的函数:

$$T(x,t) = \frac{I_0}{k\sigma} \cdot e^{-\sigma x} \cdot e^{j\omega t} \quad (3)$$

式中 $\sigma = \sqrt{\frac{j\omega}{a}} = (1+j)\sqrt{\frac{\omega}{2a}} = \frac{1+j}{\mu}$; μ 为热扩散长度,也称阻尼系数, $\mu = \sqrt{\frac{2a}{\omega}}$; $a = \frac{k}{\rho c}$,为热扩散系数,

反映了物质中的热传递速率。由式(3)可知,热波相位与缺陷深度存在以下关系:

$$\phi(x) = \frac{2\pi x}{\lambda} = \frac{x}{\mu} \quad (4)$$

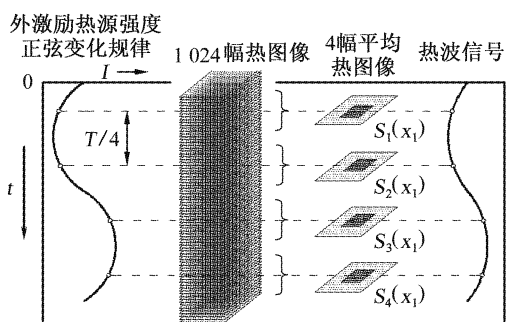


图1 热图序列及4幅平均热图

在相位图上不同灰度值对应不同相位,可由相位差异得到缺陷深度信息。类似于表面温度差 $\Delta T = T_d - T_{sa}$,可定义相位差 $\Delta\phi = \phi_d - \phi_{sa}$,其中 T_d

表示有损区域温度, T_{sa} 表示无损区域温度。

热波衰减较快,通常只能传播一个热波波长的范围,较低的调制频率可以探测更深的缺陷,因此可借助频率获知深度信息^[7]。

2 相位检测方法

2.1 4点平均算法

为了获取温度调制的幅值和相位信息,必须分析每个像素处的温度-时间图像。用红外热像仪检测试件表面辐射的变化,通过对一个调制周期内样品表面等时间间距的温度的4个测量数据,可以估计振幅 A 和相位 φ ^[8]:

$$A = \sqrt{[S_3(X_1) - S_1(X_1)]^2 + [S_4(X_1) - S_2(X_1)]^2} \quad (5)$$

$$\varphi = \arctan \frac{S_3(X_1) - S_1(X_1)}{S_4(X_1) - S_2(X_1)} \quad (6)$$

式中 X_1 为图像中的某一像素点。实际上所测得信号 S_M 为发自样品的辐射 S_T 和来自周围环境物体的反射 S_R 所组成,即热波信号受到物体辐射率 ϵ 和激励照度系数 i 的影响:

$$S_M = \epsilon i S_T + (1 - \epsilon) S_R \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)得:

$$A = \sqrt{\frac{[\epsilon i S_{3,T}(X_1) + (1 - \epsilon) S_{3,R}(X_1)] - [\epsilon i S_{1,T}(X_1) + (1 - \epsilon) S_{1,R}(X_1)]^2 + [\epsilon i S_{4,T}(X_1) + (1 - \epsilon) S_{4,R}(X_1)] - [\epsilon i S_{2,T}(X_1) + (1 - \epsilon) S_{2,R}(X_1)]^2}{2}} \quad (8)$$

通常辐射率 ϵ 和照度系数 i 随着在物体上的位置变化而变化,如果这些反射在测温中保持不变(如 $S_{2,R} = S_{1,R}$),那么 A 值与外部反射无关,即:

$$A = \epsilon i \sqrt{[S_{3,T}(X_1) - S_{1,T}(X_1)]^2 + [S_{4,T}(X_1) - S_{2,T}(X_1)]^2} \quad (9)$$

将式(7)代入式(6)得:

$$\varphi = \arctan \left[\frac{S_3(X_1) - S_1(X_1)}{S_4(X_1) - S_2(X_1)} \right] = \arctan \frac{S_{3,T}(X_1) - S_{1,T}(X_1)}{S_{4,T}(X_1) - S_{2,T}(X_1)} \quad (10)$$

由式(10)可知,锁相系统得到的相位图像与外部反射、非均匀照明及辐射率无关。以上公式不仅适用于对单个点的计算,也适用于整幅图像。为了消除噪声,可以将某点在时间序列中相邻的 n 个点平均到 $S_n(n=1,2,3,4)$ 中一点,如图1所示。

图1中 $S_i(x_1)(i=1,2,3,4)$ 对应图像中确定点 x_1 处的辐射信号。

2.2 相关算法

相关算法利用噪声信号与参考信号不相关的原理,有效地提取微弱被测信号,在锁相技术中应用较多^[9]。其原理为设被测信号为 $s(t, i, j) = U_s \cos(\omega t + \varphi)$, 参考信号为 $r(t) = U_r \cos(\omega t)$ 和 $r'(t) = U_r \cos(\omega t + 90^\circ)$, 输入信号为 $x(t, i, j) = s(t, i, j) + n(t, i, j)$ 。式中 $i = 1, 2, \dots, N_i; j = 1, 2, \dots, N_j$ 。 i, j 表示图像中像素点的位置, $n(t, i, j)$ 是噪声信号。对输入信号和参考信号经过采样得到长度为 N 的图像序列 $x(n, i, j)$ 和 $r(n)$ (第 n 幅图像的所有像素点为相同 $r(n)$ 值)。两路参考信号分别运算得到像素点 (i, j) 处的:

$$U_{01}(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n, i, j) r(n) = \frac{U_s U_r}{2} \cos \varphi \quad (11)$$

$$U_{02}(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n, i, j) r'(n) = \frac{U_s U_r}{2} \cos(\varphi + 90^\circ) \quad (12)$$

$$U = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r(n) r(n) = \frac{U_r^2}{2} \quad (13)$$

求解式(11)~(13)可得:

$$U_r = \sqrt{2U} \quad (14)$$

$$\varphi(i, j) = \arctan \frac{U_{02}(i, j)}{U_{01}(i, j)} \quad (15)$$

$$U_s(i, j) = \frac{2}{U_r} \sqrt{U_{01}^2(i, j) + U_{02}^2(i, j)} \quad (16)$$

3 实验与结果分析

利用 JADE III 红外热像仪对预埋缺陷的金属平板进行实验观察。调制信号频率 $f = 0.12 \text{ Hz}$, 采样频率 $f_s = 37 \text{ Hz}$, 则采集一个周期至少需要 308 幅热图。实验采集 1 110 幅热图, 320×240 像素。图 2 为部分红外热图序列, 可见热图几乎相同, 只有

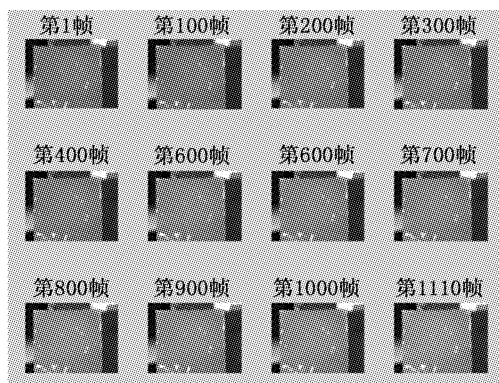
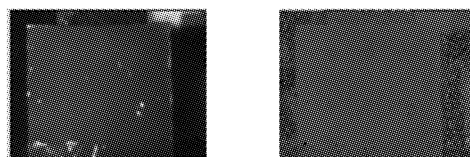


图2 红外热图序列

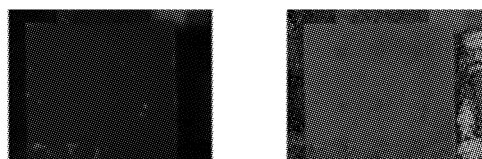
光照不均匀的差别, 不能判断是否含有缺陷。

由于加热时间过长达达到热平衡会导致较小缺陷不易观察, 故截取信号第一个调制周期内的 310 幅热图计算热波信号的相位。图 3 为用 4 点平均算法得到的振幅和相位图。从图中可以确定样品中含有缺陷, 但不能得到缺陷大小和深度信息。图 4 为经过相关算法得到的振幅和相位图。相位图中缺陷信息较明显, 缺陷形状亦可分辨, 非均匀样品表面在相位图中不明显。通过缺陷所占像素点数可以获得缺陷尺寸信息^[10], 通过改变调制频率可得到深度信息。



(a) 振幅图 (b) 相位图

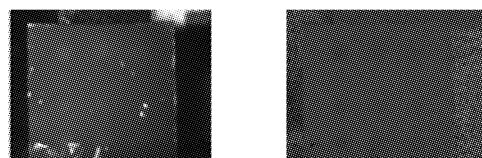
图3 4点平均算法



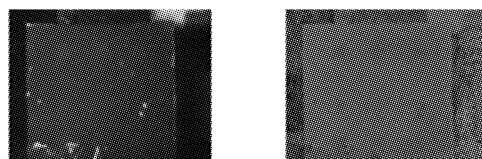
(a) 振幅图 (b) 相位图

图4 相关算法

由于 4 点平均算法需要采集至少一个周期信号序列, 而为了达到一定探测深度, 则要求调制信号频率低、周期长, 故采集图像数量大, 计算时间长。如上采用 310 幅热图进行计算, 两种算法分别用时 367 s 和 376 s。若采用相关算法, 可减少采集图像数量。图 5 所示为 100 幅和 200 幅热图经过计算得到的振幅和相位图, 运算时间分别为 105 s 和 207 s。



(a) 100 幅热图振幅图 (b) 100 幅热图相位图



(c) 200 幅热图振幅图 (d) 200 幅热图相位图

图5 不同数量热图计算所得振幅和相位图

4 结论

(1) 由相位表达式可知,相位不受光强不均匀、光吸收的局部变化或热辐射系数的影响,故相位法红外热成像对光照和表面发射率的要求较低。

(2) 4个采样点的数据对热波信号振幅和相位的计算已经足够,但是采集多点可以减少计算振幅和相位的噪声,如有条件可对一个调制周期内所测多个点进行处理。

(3) 相位检测较振幅检测在同等条件下更为清晰,故可在热像仪精度确定的条件下提高测量精度,为精确测量缺陷提供可能性。

(4) 与4点平均算法得到的相位相比较,相关算法计算相位需要热图数目较少,时间较短,样品内部不致形成热平衡,有利于提取缺陷边缘信息。

两种提取锁相红外检测热图序列相位信息的方法均可用硬件电路来实现,以提高运算速度,达到数据采集与处理同步完成,并可实时显示信号相位或振幅信息。

参考文献:

- [1] 王 迅,金万平,张存林,等. 红外热波无损检测技术及其发展[J]. 无损检测,2004,26(10):497—501.
- [2] Meola C, Carlomagno G M. Recent advances in the

(上接第417页)

弱造成棒材检测困难。B扫描是一种最简单的超声成像系统,然而,对于结构较复杂或较弱小的缺陷,容易造成漏检。通过棒材 SAFT 所成图像,缺陷图像得到增强,使缺陷信号更加清晰。当探头直径 D 大于缺陷尺寸 a 时,缺陷所成像尺寸近似为 $D+a$,当探头直径 D 小于缺陷尺寸 a 时,缺陷图像尺寸能接近真实数据^[12]。

参考文献:

- [1] 徐西刚,施克仁,陈以方,等. 相控阵超声无损检测系统的研制[J]. 无损检测,2004,26(3):116—119.
- [2] 张 凡. 三维合成孔径聚焦成像的研究[D]. 硕士论文,中国科学院声学研究所,1998.
- [3] Schmitz V, Chakhlov S, Muller W. Experiences with synthetic aperture focusing technique in the field[J]. Ultrasonics,2000,38(8):731—738.
- [4] 杨辰龙,周晓军,吴瑞明. 棒材缺陷超声自动检测系统的研制[J]. 机床与液压,2005,(9):112—113,184.
- [5] 沈建中. 无损检测的几个热点问题和技术[J]. 无损检

use of infrared thermography[J]. Measurement Science and Technology,2004,(15):27—58.

- [3] Wu D, Salerno A, Schbnbach B, et al. Phase-sensitive modulation thermography and its applications for NDE[J]. Proc SPIE,1997,(3056):176—183.
- [4] 张建合,郭广平. 国内外飞速发展的热像无损检测技术[J]. 无损探伤,2005,29(1):1—4.
- [5] Takahide Sakagami, Shiro Kubo, Yasuhiro Teshima. Fatigue crack identification using near-tip singular temperature field measured by lock-in thermography[J]. Proc SPIE,2000,4020:37—46.
- [6] Datong Wu, Antonio Salerno, Bernd Schönbach, et al. Phase sensitive modulation thermography and its applications for NDE[J]. SPIE,1997,3056:176—183.
- [7] Weimin Bai, Brian S Wong. Non-destructive evaluation of aircraft structure using lock-in thermography[J]. Proc SPIE,2000,3994:37—46.
- [8] 刘 波,李艳红,张小川,等. 锁相红外热成像技术在无损检测领域的应用[J]. 无损探伤,2006,30(3):12—15.
- [9] 白奉天,罗飞路,张玉华. 软正交矢量型 LIA 在微弱信号检测中的应用[J]. 现代电子技术,2003,(9):18—20.
- [10] 薛书文,宗明成,丁铁英,等. 利用红外热成像技术检测金属内部近表缺陷[J]. 红外与毫米波学报,1998,17(6):424—428.
- [11] 沈建中. 超声成像技术及其在无损检测中的应用[J]. 无损检测,1994,16(7):202—206.
- [12] Moholkar V S, Huitema M, Rkvel S. Characterization of an ultrasonic system using wavelet transforms[J]. Chemical Engineering Science,2002,57(4):617.
- [8] 胡 智,刘伟成,等. 小直径棒材超声检测方法研究[J]. 南昌航空工业学院学报,2001,15(3):16—18.
- [9] 孙宝申,沈建中. 合成孔径聚焦超声成像(一)[J]. 应用声学,1993,12(3):43—48.
- [10] 王邓志,罗 斌,等. 合成孔径聚焦超声成像系统研究[J]. 东北电力技术,2002,23(12):42—45.
- [11] Boonsang, S Zainal, J Dewhurst, R J. Synthetic aperture focusing techniques in time and frequency domains for photoacoustic imaging[J]. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring,2004,46(4):196—199.
- [12] Schickert, Martin, Krause, et al. Ultrasonic imaging of concrete elements using reconstruction by synthetic aperture focusing technique[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2003,15(3):235—246.