铝试件脉冲红外热无损检测的主分量分析

郭兴旺 其达拉图

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘 要：为了提高铝试件脉冲红外热像无损检测的缺陷探测能力，研究了主分量分析法在热像信号处理中的运用方法及效果.结合脉冲热像序列处理论述了主分量分析的数据准备、计算方法和处理效果.为了考查算法的有效性，对铝合金板进行了脉冲红外热像无损检测实验.结果表明，采用第2、第3主分量图像以及由前几个主分量重建的图像均有增强缺陷对比度和抑制加热不均的效应，从而提高了脉冲红外热无损检测的缺陷检测能力；此外，在检测铝板模拟腐蚀时，能使可探测的最小腐蚀率减小10%左右.

关 键 词：主分量分析；热成像；无损检验；铝

中图分类号：TN 219

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)11-1393-05

Principal component analysis used in pulsed thermographic NDT of aluminum specimens

Guo Xingwang Qidalatu

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To improve the defect detecting ability of pulsed infrared thermographic nondestructive testing (NDT) of aluminum specimens, the principal component analysis (PCA) method and its application in thermographic signal processing were studied. Some aspects of PCA, such as data preparation, algorithm and processing effects were discussed, based on the pulsed thermographic sequence processing. Experimental studies were carried out to evaluate the validity of the algorithm and detect the defects in an aluminum alloy plate. The results show that the second and third PCA images and a reconstructed image from the first few principal components have the ability to increase the defect contrast and reduce the effects of non-uniform heating, and the detection capability of pulsed thermographic NDT is enhanced. Besides, the minimum detectable corrosion rate decreases by approximately 10 percent by using PCA in detecting the imitative corrosion in the aluminum alloy plate.

Key words: principal component analysis; thermography; nondestructive examination; aluminum

红外热像无损检测(TNDT，Thermographic Nondestructive Testing)由于其非接触、检测面积大、快速等特点在无损检测领域中扮演着越来越重要的角色.现代红外技术和计算机信号处理技术的持续发展为利用TNDT技术探测金属材料的隐藏缺陷提供了有力的支持.按照热激励方式的不同，红外无损检测有脉冲加热法、阶跃加热法、调制加热法等.其中脉冲加热法由于兼有热激励速度快、检测时间短和系统结构简单等优点应用最为广泛.尤其在金属材料等高导热性材料的TNDT中，脉冲加热法是首选的方法.但脉冲加热法也有加热不均、噪声大、缺陷探测深度浅等缺点.为了提高脉冲TNDT的缺陷检测能力，已发展了众多降低噪声干扰、增强缺陷对比度的处理算法[1-2]，如：脉冲相位法[3]、多项式拟合法[4]、奇异值分解法[5]、主分量分析(PCA，Principal Com-

收稿日期：2008-11-06

基金项目：国家自然科学基金资助项目(60672101)；航天支撑技术基金资助项目；北京市教育委员会共建项目专项资助项目

作者简介：郭兴旺(1964—)，男，内蒙古呼和浩特人，副教授，xingwangguo@buaa.edu.cn.

ponent Analysis)等. PCA是一种通用的数据分析方法,然而在红外热像序列处理中的应用在最近几年才逐步受到重视[6-7]. 当运用于红外热像序列数据分析时,可以提取所关注的主要缺陷信息而减小噪声等次要信息的干扰.

为了提高铝合金试件脉冲TNDT的缺陷探测能力,本文研究了PCA在脉冲红外热像信号处理中的运用方法及效果. 结合脉冲热像序列处理论述了PCA的数据准备、计算步骤和影响因素. 以铝合金试件的脉冲TNDT为应用场合,考察了PCA的实际应用效果.

1 脉冲红外热无损检测试验

在NDT中,通常使用参考试件来检验检测方法的有效性和检测设备的技术性能. 在TNDT中,经常仿照超声波检测法,用典型的圆形平底孔试件做标准参考试件. 本文采用的铝合金(牌号2024)试件如图1所示,厚度为1.8 mm,背面预设了6个平底孔,可模拟腐蚀造成的材料缺损,所有缺陷直径大小为10 mm,第1行从左至右缺陷深度分别为1.2,1.4,1.6 mm,第2行从左至右缺陷深度分别为0.6,0.8,1.0 mm. 为了增强试件表面的光吸收率和红外发射率,在检测面涂一层很薄的黑漆.

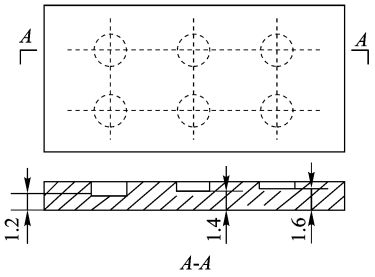

图1 平底孔试件结构示意图

试验采用单面法检测,加热方式为单脉冲加热. 试验装置由红外热像仪、闪光灯(2只)、计算机及应用软件等组成,试验装置的示意图如图2所示. 2只闪光灯布置在热像仪的左右两侧. 红外热像仪的空间分辨率为320×240像素,温度分辨力为0.1℃.

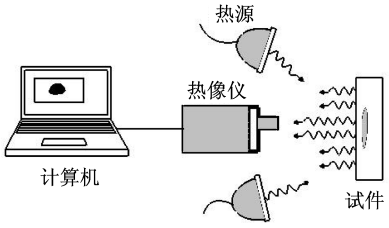

图2 脉冲红外热像无损检测试验装置示意图

检测时用2个闪光灯同时对铝合金试件进行加热,用热像仪记录试件的表面温度场,采样频率为60 Hz,每次连续采集的热像帧数通常为50～60帧,即信号记录时间大约为1 s. 热像信号采集和处理用自行开发的软件进行. 加热前采集环境温度,以便从加热后的温度值中减去,从而获得试件的过余温度.

2 热像序列PCA处理流程和算法

对红外热像序列进行PCA处理前,先对原始数据进行预处理,以减小部分干扰因素. 具体包括下面3步:

1) 剪取感兴趣区域. 红外热像视场内可能包含了检测对象以外或其它无需关注的区域,这些区域内的数据属于无用数据,而且还会对PCA分析带来一定的负面影响. 去除这些数据不仅减少了干扰因素而且还减小了PCA的数据运算量. 图3为原始热像序列中的一帧图像,视场内有所检试件以外的区域,假设方框内区域为用户感兴趣区域(ROI, Region of Interesting),经过剪取可以得到一组新的ROI图像序列.

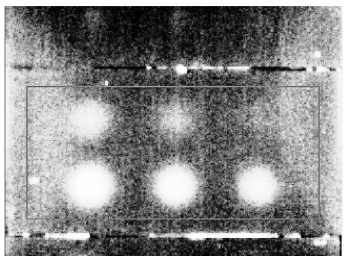

图3 ROI截取前的一帧图像

2) 选择时间窗口. 闪光及闪光前的热像序列对后续的PCA处理有负面影响,所以只截取降温段热像序列作为PCA处理对象.

3) 减背景. 从原始热像序列减去背景帧,从而获得试件的过余温度,这样可以适当减小环境因素和试件表面状态对检测效果的不良影响.

接下来就可以对预处理后的图像序列进行PCA处理. 处理算法如下:

1) 构造数据矩阵. 假设待处理的图像序列如图4所示,每帧大小为W像素×H像素,共N帧. 将图像序列的各帧数据按行拉直作为矩阵的一行,数据重排后构造一个$m\times n$的数据矩阵$\boldsymbol{A}$,其中行数$m=N$,列数$n=W\times H$,转化后的数据矩阵如图5所示. 若将图像序列(图4)中每个像素点在各帧图像中的值按时间顺序排列起来,构成一个向量,这个向量对应数据矩阵(图5)中的

一列.

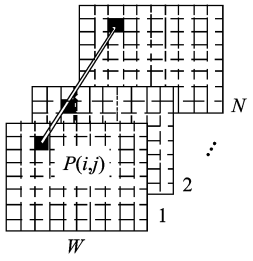

图 4　待处理图像序列

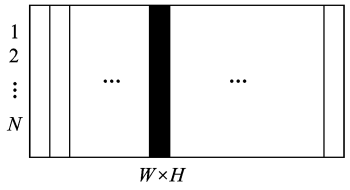

图 5　转化后的数据矩阵

设矩阵 $\boldsymbol{A}$ 是 $m\times n$ 的实矩阵,且 $\boldsymbol{A}$ 的秩 $\mathrm{rank}(\boldsymbol{A})=r$,其中 $r\leqslant\min(m,n)$,则存在 m 阶酉矩阵 $\boldsymbol{U}$ 和 n 阶酉矩阵 $\boldsymbol{V}$ 使得

$$\boldsymbol{A}_{m\times n}=\boldsymbol{U}_{m\times m}\boldsymbol{\Gamma}_{m\times n}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}_{n\times n} \tag{1}$$

称式(1)为 $\boldsymbol{A}$ 的奇异值分解.式中,$\boldsymbol{\Gamma}_{m\times n}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Sigma} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0}\end{bmatrix}$,$\boldsymbol{\Sigma}$ 为 r 阶对角矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}=\mathrm{diag}(\sigma_1,\sigma_2,\cdots,\sigma_r)$,$\sigma_i=\sqrt{\lambda_i}\,(i=1,2,\cdots,r)$,$\lambda_i(\lambda_1\geqslant\lambda_2\geqslant\cdots\geqslant\lambda_r>0)$是 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$ 也是 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}$ 的非零特征值的全体;矩阵 $\boldsymbol{U}_{m\times m}=(\boldsymbol{U}_1,\boldsymbol{U}_2,\cdots,\boldsymbol{U}_m)$由 m 阶列向量 $\boldsymbol{U}_i=(u_{1i},u_{2i},\cdots,u_{mi})^{\mathrm{T}}\,(i=1,2,\cdots,m)$构成;矩阵$\boldsymbol{V}_{n\times n}=(\boldsymbol{V}_1,\boldsymbol{V}_2,\cdots,\boldsymbol{V}_n)$由 n 阶列向量 $\boldsymbol{V}_i=(v_{1i},v_{2i},\cdots,v_{ni})^{\mathrm{T}}(i=1,2,\cdots,n)$构成;$\boldsymbol{U}_i$ 和 $\boldsymbol{V}_i(i=1,2,\cdots,r)$分别是 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}$ 对应非零特征值 λ_i 的特征向量.

2) 构造协方差矩阵并计算特征值和特征向量.协方差矩阵 $\boldsymbol{C}$ 由下式获得:

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{\Gamma}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}\boldsymbol{\Gamma}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{\Lambda}=\boldsymbol{\Gamma}\boldsymbol{\Gamma}^{\mathrm{T}}=\mathrm{diag}(\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_m)$.

3) 选取主分量.从矩阵 $\boldsymbol{U}$ 中选取若干列向量(即主分量),构成矩阵 $\boldsymbol{P}$.例如,选取第 2、第 3 阶主分量,有

$$\boldsymbol{P}=[\boldsymbol{U}_2,\boldsymbol{U}_3] \tag{3}$$

由于前几阶主分量包含了信号的主要信息,占有主导地位,因此,通常选取前几阶主分量构成矩阵 $\boldsymbol{P}$.

4) 构造主分量图像.

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A} \tag{4}$$

其中,$\boldsymbol{P}$ 如式(3)所示;矩阵 $\boldsymbol{F}$ 的每一行对应一帧主分量图像数据.这样一来,原来多帧图像序列压缩成少数几帧主分量图像.主分量图像可用于缺陷识别,只是没有时间和缺陷深度方面的信息.

5) 重建图像序列.利用上面获得的矩阵 $\boldsymbol{P}$ 和 $\boldsymbol{F}$,按照式(5)可重建新的图像序列.

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{P}\boldsymbol{F} \tag{5}$$

由于矩阵 $\boldsymbol{R}$ 是由一部分主分量重建得到的,所以去除了原始图像数据中一些次要因素及噪声的干扰,有利于增强缺陷特征信息.

概括上面的处理步骤,红外图像序列的 PCA 处理流程如图 6 所示.

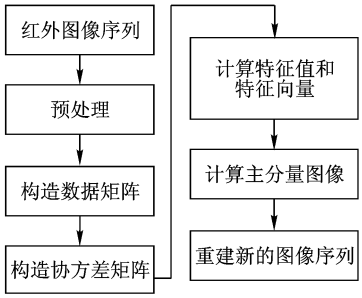

图 6　红外图像序列的 PCA 处理流程图

3　PCA 处理结果及分析

经过对原始热像序列有选择性的预处理,序列帧数由原来的 60 帧变成 32 帧,而图像大小由原来的 320 像素×240 像素变成了 280 像素×128 像素.这样一来,构造的数据矩阵行数等于 32,列数等于 280×128,而对应的协方差矩阵是一个 32×32 的方阵.通过计算特征值和特征向量可以获得相关主分量图像,并且可以重建一组新的图像序列.

图 7 为原始热像序列中对比度最好的一帧图像,而图 8 和图 9 分别是该帧图像上、下两组缺陷中心线上各点灰度值的分布曲线,其中列位数表示像素点的个数(最大等于图像宽度 280),而各像素点对应的灰度值的取值范围是0～255.

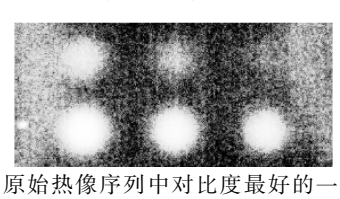

图 7　原始热像序列中对比度最好的一帧图像

从图 7 可以看出,上面一组缺陷中深度为 1.4 mm的缺陷(上中)比较模糊,而深度为 1.6 mm 的缺陷(上右)根本分辨不出来.图 8 很好的说明了这一现象,上面一组左边两个缺陷与背景存在一定的差别,而深度为 1.6 mm 的缺陷与背景基本没什么差别.下面一组缺陷的对比度比较

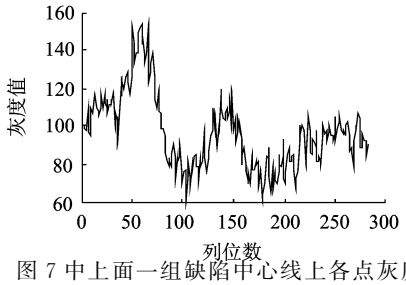

图 8 图 7 中上面一组缺陷中心线上各点灰度值分布

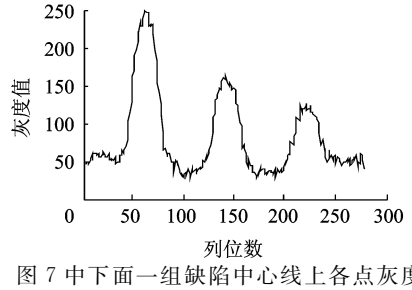

图 9 图 7 中下面一组缺陷中心线上各点灰度值分布

高,从图 9 可以看出缺陷和背景的差别很明显.

除此之外,图 7 左右两边比较白,说明受到了加热不均的影响,而这是脉冲红外检测中普遍存在的现象.

对上面获得的图像序列进行 PCA 处理后,就可以获得每个主分量对应的图像,简称主分量图.其中前几个主分量图包含了缺陷的主要信息,但不包括第 1 主分量图.第 1 主分量图(略)主要反映了热像场的总趋势,其缺陷对比度不高.图 10 和图 11 分别是第 2 和第 3 主分量图,而图 12 表示图 10 中上面一组缺陷中心线上各点的灰度值分布.

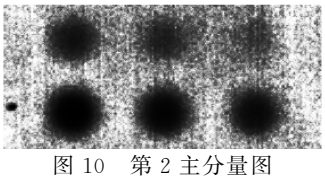
图 10 第 2 主分量图

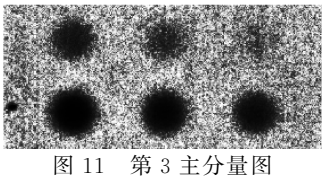
图 11 第 3 主分量图

从处理后的图像(图 10、图 11)可以看出深度为 1.4 mm 的缺陷变得清晰多了,而深度为 1.6 mm的缺陷也能分辨出来.图 12 进一步说明了这一点,深度为 1.6 mm 的缺陷与背景开始出现了差别.

关于加热不均,图 10 还是受到了一定的影响,而在图 11 中就几乎不存在这一现象了.经过

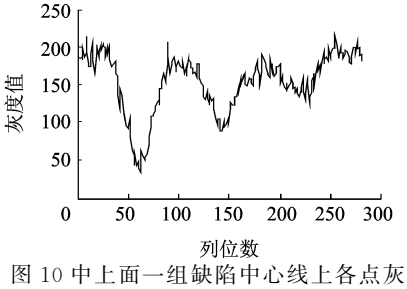

图 12 图 10 中上面一组缺陷中心线上各点灰度值分布

上面的 PCA 处理后,原来的多帧图像数据被压缩到只有 2 帧数据,而且缺陷对比度还得到了一定的提高.

确定好主分量后,还可以依照式(5)重建新的图像序列.图 13 是利用第 2 和第 3 主分量重建得到的图像序列中对比度最好的一帧图像,而图 14 表示该帧图像中上面一组缺陷中心线上各点灰度值的分布.

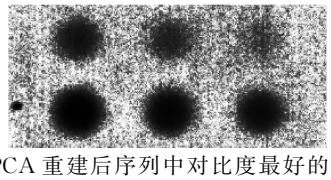
图 13 PCA 重建后序列中对比度最好的一帧图像

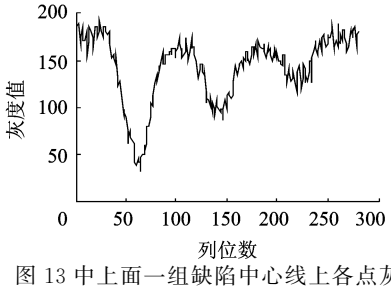

图 14 图 13 中上面一组缺陷中心线上各点灰度值分布

单纯的由主分量获得的图像,虽然有数据压缩、增强缺陷对比度甚至消除加热不均效应等优点,但是丢失了可用于分析缺陷深度的信息,所以只适合于缺陷及其形状识别.经过 PCA 重建获得的图像序列不仅有增强缺陷对比度、减小加热不均效应等优点,还保留了与缺陷深度有关的时序等方面的信息,有利于缺陷的完整识别.

本次实验中从原始热像可以看到的最深缺陷是深度为 1.4 mm(腐蚀深度为 0.4 mm)的缺陷,经过 PCA 处理后,可以看到的最深缺陷是深度为 1.6 mm(腐蚀深度为 0.2 mm)的缺陷.由此可见,在此次检测铝板模拟腐蚀实验中采用 PCA 能使可探测的最小腐蚀率减小 10%左右.

4 图像的信噪比

为了评价 PCA 处理效果,本文选取了信噪比

作为评定标准,其定义为

$$S=|\overline{T}_{d}-\overline{T}_{nd}|/\sigma_{nd} \quad (6)$$

式中,$\overline{T}_{d}$ 和 $\overline{T}_{nd}$ 分别是有缺陷区和无缺陷区像素值的平均值;σ_{nd} 是无缺陷区像素值的标准差.

计算上面各幅图像的信噪比,结果如表 1 所示.可见主分量图和 PCA 重建后图像的信噪比均比原始热像有所提高.

表 1　图像的信噪比

图　像	S
图 7 原始热像序列中对比度最好的一帧图像	4.15
图 10 第 2 主分量图	6.25
图 11 第 3 主分量图	5.56
图 13 PCA 重建后序列中对比度最好的一帧图像	6.20

5　结　论

1) 经过 PCA 处理,原来的图像序列压缩成少数几帧主分量图,而且图像对比度也得到了一定的提高.除此之外,部分图像还消除了加热不均的影响.

2) 挑选主分量作主分量图时,一般选择前几个主分量,但不包括第 1 主分量.第 1 主分量主要反映热像场信号的平均变化趋势,对应的主分量图缺陷对比度不高.第 2、第 3 主分量能够反映缺陷引起的非均匀场(如温度场)特征信息,对应的主分量图有较高的缺陷对比度(信噪比).

3) 用 PCA 重建图像序列不仅可以增强缺陷对比度、减小加热不均的影响,而且还可以保留与时间和缺陷深度有关的信息,有利于缺陷的完整识别.但哪些主分量主导着缺陷深度信息,还有待于进一步探讨.

4) PCA 应用于 1.8 mm 厚铝合金板的腐蚀检测时,能使可探测的最小腐蚀率减小 10% 左右.

5) 一般在 PCA 处理前,有必要对原始图像序列进行预处理,如剪取感兴趣区域、选择时间窗口、减背景等.恰当的预处理是提高 PCA 应用效率和效果的简便手段.

参考文献(References)

[1] Vavilov V. Evaluating the efficiency of data processing algorithms in transient thermal NDT[C]//Burleigh D, Cramer K, Peacock G. Proc SPIE Thermosense XXVI. Bellingham, WA:SPIE,2004:336－347

[2] Ibarra-Castanedo C, Gonz lez D, Galmiche F, et al. Discrete signal transforms as a tool for processing and analyzing pulsed thermographic data[C]//Miles J J, Peacock G R, Knettel K M. Proc SPIE Thermosense XXVIII. Bellingham, WA:SPIE,2006:620514.1－620514.12

[3] Maldague X, Galmiche, F, Ziadi A. Advances in pulsed phase thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2002,43:175－181

[4] 郭兴旺,邵威,郭广平,等.红外无损检测加热不均时的图像处理方法[J].北京航空航天大学学报,2005,31(11):1204－1207
Guo Xingwang, Shao Wei, Guo Guangping, et al. Image processing algorithms for uneven heating in infrared thermographic NDT[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2005,31(11):1204－1207(in Chinese)

[5] 郭兴旺,高功臣,吕珍霞.基于奇异值分解的红外热图像序列处理[J].北京航空航天大学学报,2006,32(8):937－940
Guo Xingwang, Gao Gongchen, Lü Zhenxia. Infrared image sequence processing based on singular value decomposition [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2006,32(8):937－940(in Chinese)

[6] Rajic N. Principal component thermography for flaw contrst enchancement and flaw depth characterization in composite structures[J]. Composite Structures,2002,58: 521－528

[7] Marinettia S, Finessob L, Marsilioa E. Matrix factorization methods: Application to thermal NDT/E[J]. NDT & E International, 2006, 39: 611－616

(编　辑:文丽芳)