基于奇异值分解的红外热图像序列处理

郭兴旺 高功臣 吕珍霞

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 在红外热像无损检测中直接获取的原始热像往往信噪比较低、温度对比度较差. 为了抑制各种噪声的不良影响,使红外热像无损检测所重构的数字图像有较高的缺陷对比度,从而提高缺陷探测能力,提出了采用奇异值分解法对红外数字图像序列进行处理和增强的方法,并进行了验证. 介绍了奇异值分解法的原理;用奇异值分解法对实验中采集的红外热像序列进行处理;以信噪比为指标对图像处理效果进行了定量评定. 研究表明奇异值分解法具有抽取红外热像序列中反映试件内部缺陷信息代数特征的能力,可消除加热不均效应、提高图像的信噪比,且缺陷在图像中所处的位置不影响奇异值分解法的使用效果. 因此奇异值分解法是红外热像无损检测中红外热图像序列处理的有效方法.

关 键 词: 图像处理; 奇异值分解; 无损检测

中图分类号: TN 219

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)08-0937-04

Infrared image sequence processing based on singular value decomposition

Guo Xingwang Gao Gongchen Lü Zhenxia

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The raw thermal images acquired in infrared thermographic nondestructive testing(IT NDT) usually have low signal-to-noise ratio(SNR) and temperature contrast. In order to restrain the bad effects of noise, singular value decomposition(SVD) technique was used in infrared image sequence processing to yield high defect contrast for digital images reconstructed in IT NDT and to improve the flaw detectivity, and its validity was illustrated by examples. The principle of SVD was introduced. The SVD method was used to process the infrared image sequences obtained in experiments. The image processing effect was quantitatively evaluated by SNR. The research indicates that SVD has the ability of extracting the algebra characteristics which reflect the underlying structural flaw in a sample. It can remove the uneven heating effect and increase the SNR of images, and the defect location in images doesn't affect the practical efficacy of SVD. Thus SVD is an effective method for IR digital image sequence processing in IT NDT.

Key words: image processing; singular value decomposition; nondestructive examination

近年来,红外热像无损检测技术在大面积板壳结构的无损检测方面得到了广泛应用,相应的红外数字图像序列的处理方法也得到了很大发展,除了传统的图像处理方法——点运算、滤波、数学形态学等,还有很多专用的实用方法,如脉冲热像法、调制热像法和脉冲相位法[1-2]等. 但是,脉冲热像法受光照不均影响较大,并且需要知道无缺陷区以便从中选一参考点来计算温度对比度;调制热像法检测速度较慢;脉冲相位法虽然改善了上述2种方法的缺点,但是在原始热像序列的信噪比较小时,其处理结果有时较差. 为此国际上积极探索新的红外无损检测数据处理方

收稿日期: 2005-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50175003); 航空科学基金资助项目(02G51050)

作者简介: 郭兴旺(1964-),男,内蒙古和林人,副教授, xingwangguo@buaa.edu.cn.

法[3-4]. 本文把奇异值分解(SVD, Singular Value Decomposition)法[5]移植到红外无损检测数据处理中,提出运用SVD法对红外热图像序列进行处理和增强,是一项有益的探索. SVD法不仅继承了前述3种方法的优点,如脉冲热像法的快速获取原始热像、调制热像法的对光照不均不敏感以及脉冲相位法的不需要无缺陷参考点,而且使处理后图像有缺陷区和无缺陷区的对比度得到大幅度的提高. 本文首先介绍了SVD法的原理,然后论述了采用SVD法对实验采集的红外数字图像序列进行处理的方法,最后以信噪比为指标对SVD法的使用效果进行了定量分析. 研究表明SVD法具有抽取红外热像序列中反映试件内部缺陷信息代数特征的能力;对缺陷在图像中所处的位置没有要求,因此在对大面积板壳结构检测时,允许任意划分被检测区域,实行分块检测.

1 奇异值分解法的基本理论

设矩阵 $\boldsymbol{A}$ 是 $m\times n$ 的实矩阵,且 $\boldsymbol{A}$ 的秩为 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[6]. 式中,$\boldsymbol{\Gamma}_{m\times n}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Sigma} & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}$,$\boldsymbol{\Sigma}$ 是 r 阶对角矩阵,$\boldsymbol{\Sigma}=\mathrm{diag}(\sigma_1,\sigma_2,\cdots,\sigma_r)$;$\boldsymbol{U}_{m\times m}=[\boldsymbol{U}_1,\boldsymbol{U}_2,\cdots,\boldsymbol{U}_m]$ 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;$\boldsymbol{V}_{n\times n}=[\boldsymbol{V}_1,\boldsymbol{V}_2,\cdots,\boldsymbol{V}_n]$ 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;$\sigma_i=\sqrt{\lambda_i}(i=1,2,\cdots,r)$ 是实矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的奇异值,其中 $\lambda_i(\lambda_1\geqslant\lambda_2\geqslant\cdots\geqslant\lambda_r>0)$ 是 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$ 并且也是 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}$ 的非零特征值的全体;$\boldsymbol{U}_i,\boldsymbol{V}_i(i=1,2,\cdots,r)$ 分别是 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}$ 对应于非零特征值 λ_i 的特征向量. 由此可将式(1)写成如下形式:

$$\boldsymbol{A}_{m\times n}=\sum_{i=1}^{r}\sigma_i\boldsymbol{U}_i\boldsymbol{V}_i^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

2 对红外热图像序列的处理

用SVD法对红外数字图像序列进行处理前,需要对图像数据进行预处理. 用红外热像仪采集到的图像数据是随时间变化的温度场信号,温度场信号经过采样转换成为图像序列. 其中任意一帧图像像素都构成如式(3)所示的二维矩阵,图像序列的数据则构成一个三维矩阵. 式中 m 和 n 分别是每帧图像在列方向和行方向上的像素数.

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n}\\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn}\end{bmatrix} \tag{3}$$

对图像进行预处理的第1步是把图像序列由三维矩阵转化为二维矩阵. 对每帧图像数据从第1行元素开始,从左到右,从上到下,把每行数据依次排列起来,然后将得到的行向量再转置即得到所需的一维矩阵,如式(4):

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{F}}=[x_{11},x_{12},\cdots,x_{1n},\cdots,x_{m1},x_{m2},\cdots,x_{mn}]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

图像序列各帧图像经过转化后得到 t 个(假定所处理的图像序列共 t 帧)一维矩阵,将这些一维矩阵按行方向依次排列起来即构成新的二维矩阵 $\boldsymbol{Q}$,如式(5):

$$\boldsymbol{Q}=[\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{X}_2,\cdots,\boldsymbol{X}_t] \tag{5}$$

式中 $\boldsymbol{X}_i(i=1,2,\cdots,t)$ 为转化后的一维矩阵.

为了取得较好的处理结果,在进行奇异值分解之前应对所得的二维矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 进行标准化处理[7],具体方法如式(6):

$$\widetilde{Q}_{i,j}=\frac{Q_{i,j}-E_i}{D_i}$$
$$i=1,2,\cdots,m\times n,j=1,2,\cdots,t \tag{6}$$

式中

$$E_i=\frac{1}{t}\sum_{j=1}^{t}Q_{i,j}$$
$$i=1,2,\cdots,m\times n,j=1,2,\cdots,t \tag{7}$$
$$D_i^2=\frac{1}{t-1}\sum_{j=1}^{t}\left(Q_{i,j}-E_j\right)^2$$
$$i=1,2,\cdots,m\times n,j=1,2,\cdots,t \tag{8}$$

经过标准化处理后的图像数据,不仅除去了背景(直流)分量,而且使得信号的方差为1,对以后的处理有很大的帮助. 然后对所得的大小为 $mn\times t$ 的二维矩阵 $\widetilde{\boldsymbol{Q}}$ 进行奇异值分解即可得到

$$\widetilde{\boldsymbol{Q}}_{s\times t}=\boldsymbol{U}_{s\times s}\boldsymbol{\Gamma}_{s\times t}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}_{t\times t} \tag{9}$$

式中 $s=m\times n$. 此时得到的矩阵 $\boldsymbol{U}$ 为描述空间变量的经验正交基,其前2列所提供的数据已经充分描述了原数据的空间变量信息. 但在试验中,可以清楚地看到第1列向量为最优,因此取矩阵 $\boldsymbol{U}$ 的第1列向量,按照上述把图像像素的二维矩阵转化为一维矩阵的方法进行逆向操作,即可把这列向量转化为一帧图像——即为所求结果.

对图像质量的评定标准有很多,诸如用信噪比、Z标准以及D标准等[4],这些指标在一定程度上正确评定了图像的质量. 这里用信噪比对处理前后图像的质量进行评价,定义为

$$S = \left| \bar{T}_{\mathrm{d}} - \bar{T}_{\mathrm{nd}} \right| / S_{\mathrm{nd}} \qquad (10)$$

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

3　处理结果及分析

本文处理的红外数字图像序列是在对 CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic)试件进行脉冲加热方式的红外无损检测时,利用 AGEMA 900 热像仪系统以 15 Hz 的频率采集得到,其大小为 272 像素×136 像素×114 帧. 由于 SVD 法运算量过大,此处采用的数据是从上述图像序列中抽取的大小为 51 像素×51 像素×114 帧的一段数据.

首先对大小为 51 像素×51 像素×46 帧的图像序列进行处理,其结果见图 1,图像中间的圆形区域是缺陷区,其它部分为无缺陷区. 为了更好地说明处理后的效果,取处理前图像序列中最佳的一帧图像(第 25 帧)和处理后的图像做比较. 处理前图像序列中第 25 帧图像的信噪比在整个图像序列中最大,$S_{25}=4.914$,而处理后的图像的信噪比 $S=6.928$. 图 1a 中可见,处理前图像的缺陷区和无缺陷区比较模糊,经过奇异值分解法处理后图像的缺陷区和无缺陷区则比较清晰(图 1b),图 1c 可更清晰地看到这一点. 上述仅仅是定性分析,下面将从 4 个方面对奇异值分解法在红外热图像序列处理方面的应用效果做定量分析.



a　原图像　　b　处理后的图像　c　处理后图像的反像

图 1　原图像序列中第 25 帧图像及其处理后的结果

3.1　对加热不均效应的消除

在红外热像无损检测中,对被测物体进行热激励的设备一般为高能闪光灯等可见光源,容易产生加热不均的现象,如图 1a 中的无缺陷区,左上角的温度显然高于右下角的,但在处理后的图 1b 和图 1c 中则不存在这种情况. 为了直观地看到这种效果,对大小为 51 像素×51 像素×46 帧的图像序列进行 SVD 处理后,用式(6)~式(8)分别对原热像序列中第 25 帧图像数据和处理后的图像数据标准化,使其处于同一数量级,然后分别取第 25 行(中间行)的数据做出如图 2 所示的曲线. 图 2 中,中间的波峰是缺陷区,两侧的波谷是无缺陷区. 在无缺陷区,处理前图像像素值的波动很大,而且左右两侧数据相差很大,这是加热不均所造成的. 处理后的图像像素值在这一区域波动大大减小,左右两侧数据差别变小,说明此时图像加热不均的现象已经消除. 在缺陷区,处理后图像的峰值增大,使得处理后图像的波峰和波谷之差大于处理前的,从而使得处理后图像的信噪比得以提高.

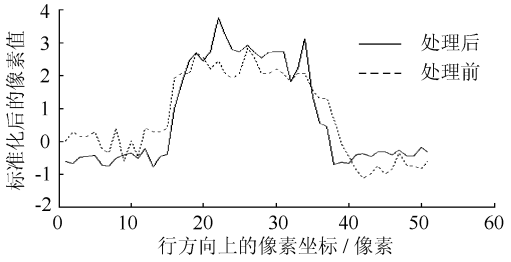


图 2　处理前后图像信号在通过缺陷区中心的波形比较

3.2　对帧数不同的图像序列的处理

此处所用图像大小为 51 像素×51 像素,为了找到能得到最佳处理效果的图像序列的帧数,此处按照最小帧数为 20 帧、步长为 10 帧,逐渐增加处理图像序列的帧数. 具体处理结果见表 1. 处理后图像序列的帧数和信噪比之间的关系如图 3 所示. 可见,随着所处理图像序列帧数的增加,处理后图像的信噪比不断增大,当达到一定的帧数后,信噪比增速变缓. 但是随着所处理图像序列帧数的增加,运算时间也在增加,因此在实际应用中要根据需要选用合适的图像序列帧数.

表 1　处理后图像的信噪比

序号	帧数/帧	信噪比 S	序号	帧数/帧	信噪比 S
1	20	1.602	6	70	8.481
2	30	4.275	7	80	8.774
3	40	6.118	8	90	8.939
4	50	7.305	9	100	9.085
5	60	7.928	10	107	9.130

3.3　对大小变化的图像序列的处理

所处理的图像序列帧数为 46 帧,图像大小从 33 像素×33 像素变化到 59 像素×59 像素,每次在行列方向上对称扩大 2 像素. 此时信噪比的计算采用固定区域,变化的区域不参与计算. 作 SVD 处理后图像的信噪比列于表 2. 可见,随着所处理图像大小的增加,图像的信噪比不断增加. 图 4 清晰地展现了图像大小和处理后图像信噪比之间的关系. 由表 2 及图 4 可知,当图像序列帧数一定

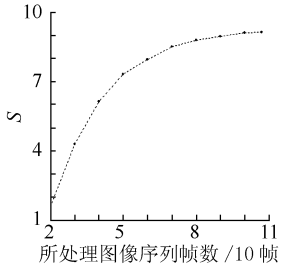


图 3　图像序列的帧数与处理后图像信噪比的关系

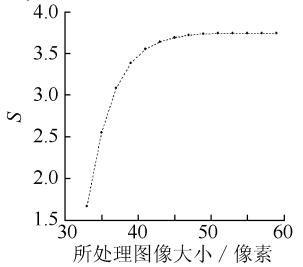


图 4　图像大小与处理后图像信噪比的关系

时,随着图像大小的增加,处理后图像的信噪比先快速增大,而当图像大小达到一定程度后,处理后图像信噪比的增加速度变缓,而且信噪比的大小有微小的波动. 因此,在用 SVD 法对红外热图像序列进行处理时,要根据实际需要选择合适的图像大小.

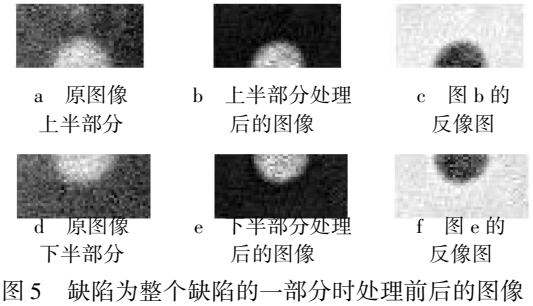
表 2 图像信噪比随图像大小的变化

序号	图像边长/像素	S	序号	图像边长/像素	S
1	33	1.668	8	47	3.719
2	35	2.547	9	49	3.732
3	37	3.082	10	51	3.738
4	39	3.382	11	53	3.742
5	41	3.548	12	55	3.742
6	43	3.640	13	57	3.742
7	45	3.691	14	59	3.740

3.4 对包含部分缺陷的图像序列的处理

在上述处理中,整个缺陷位于图像内,当缺陷仅有一部分位于图像中时,也可以用 SVD 法进行处理. 下面举例说明这个问题.

此处所用图像是将 51 像素×51 像素×46 帧的图像序列中的图像分为上下 2 部分:上半部分大小为 26 像素×51 像素,如图 5a 所示;下半部分大小 25 像素×51 像素,如图 5d 所示. 由 SVD 法处理后的结果如图 5b 和图 5e 所示,可知,缺陷在图像中所处的位置不影响对缺陷的检出. 在实际检测中,缺陷可能大到完全覆盖所采集的图像,此时缺陷将无法检测到,但总可以找到这样的图像序列——图像中的缺陷为整个缺陷的一部分,由上述讨论可知,此时便可检测出缺陷.



a 原图像上半部分　b 上半部分处理后的图像　c 图 b 的反像图

d 原图像下半部分　e 下半部分处理后的图像　f 图 e 的反像图

图 5 缺陷为整个缺陷的一部分时处理前后的图像

(图 a,图 d 取原始热像第 25 帧)

4 结 论

①SVD 法具有抽取红外热像序列中反映试件内部缺陷信息代数特征的能力,所重构的数字图像有很高的缺陷对比度,因此 SVD 法可显著地提高 IT NDT 的缺陷探测能力;②SVD 法可消除加热不均效应;③图像大小一定时,随着所处理的热图像序列帧数的不断增加,SVD 处理后图像的信噪比先快速增加,而当帧数达到一定大小后,处理后图像的信噪比增速变缓;④图像序列的帧数一定时,随着所处理图像像素的增加,SVD 处理后图像的信噪比先快速增加,而当像素数达到一定数目后,处理后图像的信噪比增速变缓,并且有微小的波动;⑤当待检缺陷区域有一部分超出所采集的热图像边界时,仍可对包含部分缺陷的图像序列进行 SVD 处理,此时 SVD 法的使用效果仍然很好,因此利用 SVD 法可进行分块检测. 但是,SVD 法在处理图像序列时的计算量很大,因此其运算速度以及能够处理的图像大小有待于进一步研究.

致谢 感谢北京航空材料研究院郭广平和杨党纲在研究工作中给予的帮助.

参考文献 (References)

[1] 郭兴旺,刘颖韬,郭广平,等. 脉冲相位法及其在复合材料无损检测中的应用[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(10):1049-1053
Guo Xingwang, Liu Yingtao, Guo Guangping, et al. Pulsed phase thermography and its application in the NDT of composite materials[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2005,31(10):1049-1053(in Chinese)

[2] Bison P G,Bressan C,Cavaccini G,et al. NDE of composite materials by thermal method and shearography[C]//Wurzbach R N, Burleigh D D. Proc SPIE. Bellingham, WA: SPIE, 1997, 3056:220-229

[3] Zalameda J N, Rajic N, Winfree W P. A comparison of image processing algorithms for thermal nondestructive evaluation [C]//Cramer K E, Maldague X P. Proc SPIE. Bellingham, WA:SPIE, 2003,5073:374-385

[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] Andrews H C, Patterson C L. Singular value decompositions and digital image processing[J]. IEEE Trans Acoust Speech Signal Process,1976,ASSP-24(1): 26-53

[6] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:341-400
Zhang Xianda. Matrix analysis and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004:341-400(in Chinese)

[7] 韩於羹. 应用数理统计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002:337
Han Yugeng. Application mathematical statistic[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2002: 337(in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)