

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.12.002

基于 Gabor 小波的 TOFD 图像缺陷识别研究*

林乃昌^{1,2}, 杨晓翔^{1,3*}, 唐旭晟¹, 朱志彬^{2,3}

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108;

2. 厦门市特种设备检验检测院, 福建 厦门 361000; 3. 福州大学 化学化工学院, 福建 福州 350108)

摘要: 针对运用超声衍射时差法(TOFD)法对焊缝进行检测时,图像缺陷人工定性主要受检验人员经验和专业知识影响缺乏可靠性的问题,提出了一种TOFD图像缺陷自动定性的方法。该方法首先提取TOFD缺陷图像的Gabor小波特征,并依据这些特征,采用主成分分析技术(PCA)对Gabor特征进行降维,然后采用Fisher线性判别分析方法对其进行了判别分析,最后完成了缺陷的自动定性分析;同时,建立了一个实际系统,并在测试样本上进行了试验验证,试验在109幅人工试块缺陷及自然缺陷训练样本及25幅测试样本中进行,采用Gabor小波特征及原始图像像素特征所构建的缺陷分类器识别率比较。研究结果表明,基于Gabor小波特征的缺陷识别方法识别率达到72%,比原始图像特征的缺陷识别方法更优。

关键词: 超声衍射时差法; Gabor小波; Fisher; 线性判别分析; 主成分分析技术

中图分类号: TH878; TP391.41 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)12-1450-05

Defect recognition of TOFD image based on Gabor wavelet

LIN Nai-chang^{1,2}, YANG Xiao-xiang^{1,3}, TANG Xu-sheng¹, ZHU Zhi-bin^{2,3}

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Xiamen Inspection Institute of Special Equipments, Xiamen 361000, China;

3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at the problems of time of flight diffraction (TOFD) method which credibility of defect recognition influenced by personnel's experience and professional knowledge, an automatic recognition approach was proposed for TOFD image defects. Firstly, the Gabor wavelet of TOFD defects image characteristics was extracted, to reduce the dimension Gabor features, the principal component analysis (PCA) technique has been used based on these characteristics. Then, the Fisher linear discriminant analysis method was used to analysis, at last, the actual system and the test sample on the test verification has been established for testing. Experiment in the 109 training samples and 25 test samples which comes from artificials and natural defects, compared Gabor wavelet features with characteristics of the original image pixel defect classifier recognition rate in test. The results indicate that the rate of recognition based on Gabor wavelet feature is 72%, it has higher rate of recognition than the method based on the original image pixel.

Key words: time of flight diffraction (TOFD); Gabor wavelet; Fisher; linear discriminant analysis; principal component analysis (PCA)

0 引言

超声衍射时差法(TOFD)检测技术是在1977年,由Silk根据超声波衍射现象提出来,是一种适合于中

厚度焊缝中缺陷的无损检测方法^[1-3],与常规脉冲回波超声相比有可靠性好、定量精度高且可记录等优点,因此该方法在无损检测领域得到了广泛的运用。但TOFD检测对缺陷定性取决于检测人员的数据分析经验、所掌握的焊接知识和对生产情况、设备运行状况

收稿日期: 2013-08-21

基金项目: 福建省质量技术监督局资助项目(FJQI2012028)

作者简介: 林乃昌(1982-),男,福建长汀人,博士,工程师。主要从事无损检测及图像处理方面的研究。E-mail:nchlin@126.com

通信联系人: 杨晓翔,男,教授,博士生导师。E-mail:yangxx@fzu.edu.cn

的了解等相关经验知识,人为因素(检测人员的经验、知识水平和疲劳程度)对缺陷定性的结果影响较大,常出现错判、漏判,前后不一致等情况,降低了缺陷定性的可靠性。如何实现TOFD数据的自动处理识别,提高检测准确度和检测的自动化程度,是目前国内外无损检测领域的一个研究热点,有着非常广阔的商业运用前景。Kechida等^[4]采用小波分析和图像纹理分析技术提取纹理特征,采用模糊C均值聚类器对TOFD超声图像进行分析,实现对3种焊缝缺陷类型的位置和大小自动检测。Elineudo P.Moura等^[5]采用了连续小波变换和神经网络相结合的方法实现了未融合、未焊透和夹渣3种缺陷的自动分类。

C Shekhar等^[6]还采用了人工神经网络、模糊规则、模糊神经网络3种不同的方法构建缺陷类别识别器,实验结果表明,采用模糊神经网络效果最佳。我国对TOFD超声检测技术应用比较晚,研究工作主要集中在超声图像的去噪重构上,如彭伟等^[7]采用经验模态分解方法对TOFD检测回波进行重构,从而提高降低原始TOFD的噪声干扰;迟大钊等^[8]提出一种灰度极值检测与合成孔径聚焦相合的D扫描图像增强算法,有效增强了检测目标,然后采用二维信息熵局部阈值分割的方法对TOFD图像进行二值化处理,从而实现自动提取出缺陷的位置。

本研究提出一种TOFD图像缺陷自动定性的方法,首先提取TOFD缺陷图像的Gabor小波特征,并依据这些特征,采用主成分分析技术对Gabor特征进行降维,然后采用Fisher线性判别分析方法对其进行判别分析,最后完成缺陷的自动定性分析,建立一个实际系统并在测试样本上进行试验验证。

1 TOFD图像典型缺陷定性图谱分析

在实际拼板对接焊缝检测中,主要存在以下缺陷:裂纹、未融合、气孔、夹渣等^[9]。它们的TOFD图像如图1所示。

由图1可知:

(1) 对于气孔缺陷,在TOFD显示图上,缺陷形状为近似的圆球状,边缘比较清晰,但亮度并不高;

(2) 对于夹渣缺陷,TOFD显示图上,缺陷形状往往很不规则,边缘不大清晰,总体亮度并不高,与底色反差并不大,但在个别很小的部位会出现亮度比较高的点;

(3) 对于裂纹缺陷,TOFD显示图上,缺陷形状为条状,大部分情况下有一定弯曲并与焊道方向成一定角度,边缘清晰,而且亮度比较高,与底色反差比较大;

(4) 对于未融合缺陷,在TOFD显示图上,缺陷形

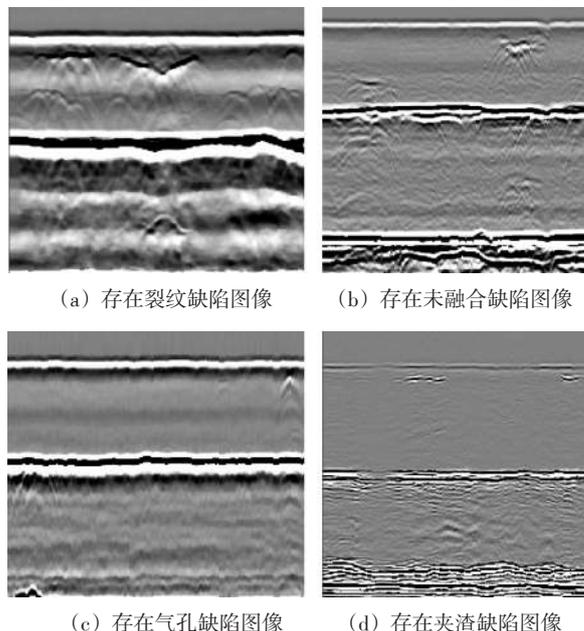


图1 TOFD图像典型缺陷图像

状为条状,缺陷有一定的高度,出现上下两个端点,下端点的相位与上端点的相反,上端点的相位与底面回波的相位是相同的。有时会断断续续地出现,大部分情况下比较平直并与焊道方向平行,边缘清晰,而且亮度比较高,与底色反差比较大。

由此可见,TOFD图像各种典型缺陷的图像表征各不相同,这使得自动定性分析成为可能。

2 缺陷自动定性分析算法构建

2.1 基于Gabor小波的TOFD缺陷特征提取

图像特征提取是图像识别的关键步骤,图像特征提取的效果如何直接决定着图像识别的效果,如何从原始图像中提取具有较强表示能力的图像特征是智能图像处理的一个研究热点。近年来,二维Gabor小波变换成为图像的多尺度表示和分析的有力工具,这主要是因为Gabor变换所采用的核(Kernels)与哺乳动物视觉皮层简单细胞二维感受野剖面(Profile)非常相似,具有优良的空间局部性和方向选择性,能够捕捉图像局部区域内多个方向的空间频率(尺度)和局部性结构特征。这样,Gabor变换可以看作一个对方向和尺度敏感的有方向性的显微镜^[10]。同时,二维Gabor小波变换对图像的边缘特征有较强的响应。二维Gabor小波变换的这些响应特性十分有利于TOFD缺陷图像局部特征的鲁棒表示。

二维Gabor小波变换是用一组滤波器函数与给定信号的卷积来逼近一个信号。二维Gabor滤波器的函数是一个复函数,其实部和虚部分别可以表示为:

$$\operatorname{Re}(\psi(\vec{z})) = \frac{\|\vec{k}\|^2}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\|\vec{k}\|^2 \|\vec{z}\|^2}{2\sigma^2}\right) \left[\cos(\vec{k}\vec{z}) - \exp\left(-\frac{\sigma^2}{2}\right) \right] \quad (1)$$

$$\operatorname{Im}(\psi(\vec{z})) = \frac{\|\vec{k}\|^2}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\|\vec{k}\|^2 \|\vec{z}\|^2}{2\sigma^2}\right) \left[\sin(\vec{k}\vec{z}) \right] \quad (2)$$

二维 Gabor 小波变换描述了图像 $I(\vec{x})$ 上给定一点 \vec{x} 附近区域的灰度特征,这可以用一个卷积来定义:

$$J(\vec{x}) = \int I(\vec{x}') \psi(\vec{x} - \vec{x}') d^2 \vec{x}' \quad (3)$$

实际运算时,该卷积过程必须既要在空间域内(图像位置 \vec{x} ,比如逐像素)进行采样,也要对小波函数即频域(由 \vec{k} 控制的高斯窗宽、振荡的方向和波长)进行采样。小波函数采样最常用的采样方法是令:

$$\vec{k} = k_v e^{i\phi_\mu} \quad (4)$$

其中:

$$k_v = k_{\max}/f^\nu, \phi_\mu = \mu\pi/8 \quad (5)$$

式中: f —— 一个限定频域中核函数距离的间隔因子,通常取 $f = \sqrt{2}$ 。

最终的采样则通过设定 5 个不同的尺度 $\nu \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ 和 8 个不同的方向 $\mu \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ 来完成,另外两个参数的取值通常为 $\sigma = 2\pi$, $k_{\max} = \pi/2$ 。具体参见文献[11],本研究不再赘述。

通过上述方法在每个图像位置计算得到的 40 个幅值特征反映了以该图像位置为中心的局部区域频域内的能量分布特征,这 40 个幅值特征级联起来通常被称为一个 Jet^[10],简称为 J ,即图像位置 $p(x, y)$ 处的 Jet 为:

$$J_{p(x,y)} = (J_{00,p(x,y)}, J_{10,p(x,y)}, \dots, J_{40,p(x,y)}) \quad (6)$$

进一步将所有像素位置的 Jet 级联起来,就得到了输入图像 I 的 Gabor 特征表示:

$$\mathfrak{R}_I = \{J_{p(x,y)} | (x, y) \in I\} \quad (7)$$

2.2 基于 Gabor 特征的子空间判别分析

当在每一像素位置提取的 Gabor 特征个数为 40 时(8 个方向、5 个频率),Gabor 特征的维数是原始图像维数的 40 倍。为了解决 Gabor 特征维数过高的问题,一种简单而有效的方法是均匀分布稀疏采样,对 TOFD 图像上每个采样像素点提取 Gabor 特征,形成 Gabor 特征表示,然后进一步进行特征提取和分类。假如对一幅 100×100 大小的 TOFD 缺陷图像,按 5 个像素间隔进行采样,将得到 $19 \times 19 \times 40 = 14\ 440$ 维的 Gabor 特征。这比原始 Gabor 特征空间维数($100 \times 100 \times 40 = 400\ 000$)已经有了很大的降低,但对于分类器设计而言,仍然是高维的,容易带来维数灾难问题。

因此,本研究进一步尝试了对 Gabor 特征进行最优的线性判别分析的方法:即首先采用主成分分析技术对 Gabor 特征进行降维,然后采用 Fisher 线性判别分析方法对其进行判别分析。

该算法基本思想:把所有的训练集中的图像先提取 Gabor 小波特征并组成数据矩阵,然后投影到一个大小是 $P \times P$ 的正交基上(P 为所有的训练图像的个数,正交基可以通过 PCA 训练得到)。这个投影产生了一个维数小的多的满秩矩阵(因为训练图像个数一般小于图像的维数),节省了后面计算 LDA 的时间。由 PCA 的思想可知,这个投影保留了原始图像矩阵的足够信息,因此不会影响 LDA 的计算精度。

子空间分析的计算过程如下:

(1) 给定一个图像训练集 X ,先将图像进行分类,将属于同一类的图像归为一类,记为 X_i ;

(2) 计算平均值。计算每一类的类内平均图像(m_i)和所有训练图像的总平均图像(m);

(3) 中心化类内的图像。每个类内的图像减去自己类内的平均图像,得到每个类的差: $\forall x \in X_i, X_i \in X, \hat{x} = x - m_i$;

(4) 中心化类间的平均图像。每一个类内平均图像减去总平均图像,即: $\hat{m}_i = m_i - m$;

(5) 创建数据矩阵。把所有的图像按次序排列成一个数据矩阵;

(6) 求解数据矩阵的正交向量。可以通过奇异值分解或者求解数据矩阵的协方差矩阵的办法得到正交基,也就是采用 PCA 方法得到一个子空间,记为 W_{pca} ;

(7) 投影所有的中心化的图像到子空间,得到图像在子空间上的投影向量: $\hat{x} = W_{\text{pca}}^T \hat{m}_i$;

(8) 投影所有的中心化后类内的平均图像到子空间,即: $\hat{m}_i = W_{\text{pca}}^T \hat{m}_i$;

(9) 计算类内散布矩阵。第 i^{th} 类的一个散布矩阵 S_i 就是这个中心化的图像在子空间投影的协方差矩阵 $S_i = \sum_{x \in X_i} \hat{x} \hat{x}^T$,而类内的散布矩阵 S_w 就是所有图像类的散布矩阵之和 $S_w = \sum_{i=1}^C S_i$ (其中, C 为图像类的个数);

(10) 计算类间散布矩阵。类间散布矩阵 S_b 是所有类内平均图像在子空间投影的加权协方差矩阵之和,权值是每一类的图像个数 $S_b = \sum_{i=1}^C N_i \hat{m}_i \hat{m}_i^T$ (其中, N_i 是类内的个数);

(11) 求解广义的特征值。求解类内散布矩阵 S_w 和类间散布矩阵 S_b 的广义特征值 V 和特征向量 $A S_B V = \lambda S_w V$;

(12) 保留前 $C - 1$ 个特征向量。按照特征值的大小对特征向量进行从大到小排序,保留最大的前 $C - 1$ 个特征向量,组合成最佳分类空间 W_{fld} ;

(13) 组合 PAC 和 LDA 方法得到的投影子空间

W_{pca} 和 W_{fld} , 得到最优的投影子空间 $W_{opt}^T = W_{fld}^T W_{pca}^T$ 。

在得到最优的子空间之后, 就可以用这个子空间进行TOFD缺陷图像的降维和分类识别了。识别的时候, 把TOFD缺陷图像减去总体平均TOFD缺陷图像, 然后投影到最优的TOFD缺陷子空间:

$$z = W_{opt}^T = W_{fld}^T W_{pca}^T (x - m) \quad (8)$$

由式(8), 得到的TOFD缺陷图像在子空间的投影 z , 是一个 $C-1$ 维的向量, 然后对这个向量运用各种距离准则进行缺陷定性分析。

2.3 相似度准则及分类准则

按照本研究的方法, TOFD缺陷图像的特征提取后将生成特征向量, 这样TOFD缺陷特征匹配问题就转换成采用一定的距离准则来衡量两张TOFD缺陷图像的相似度问题(待分类图像与标准缺陷图像之间的相似度)。本研究采用了协方差距离(Covariance Distance)作为相似度准则, 其定义如下:

$$D_{corr}(X, Y) = \frac{-X^T Y}{\|X\| \|Y\|} \quad (9)$$

式中: X, Y 一要比的两张TOFD缺陷图像的特征向量。

本研究采用最邻近决策规则作为分类准则。

3 实验结果

3.1 测试数据集

由人工试块缺陷和自然缺陷采集到TOFD图像134幅(包括42个裂纹、34个未熔合、37个气孔、21个夹渣), 标准化图像使其大小为 50×50 , 将它们组成一个矩阵 X , 矩阵维数为 134×2500 。对矩阵 X 标准化, 得到矩阵 T , 维数与 X 相同。使用其中的109幅作为训练样本, 另外25幅(包括7个裂纹、6个未熔合、7个气孔、5个夹渣)作为测试样本。

3.2 实验结果

为了验证Gabor小波在识别中的作用, 本研究采用了两种图像特征: 一种是原始图像特征(未经处理直接用于训练的缺陷特征), 另一种为Gabor小波特征。然后分别采用子空间判别分析法构建缺陷分类器, 并在相同的测试样本上进行测试, 测试结果如表1所示。

由表1可知, 采用Gabor小波特征所构建的缺陷分类器的各种缺陷的识别正确率会高于采用原始图像

像素特征, 从而实现缺陷的有效分类。

3.3 实验结果分析

Gabor函数可以在频域不同尺度、不同方向上提取相关的特征, 所以非常适于作为焊缝各种缺陷的特征描述。本次实验中4种不同缺陷的5个尺度, 8个方向(每行是同一尺度, 每列是同一方向)的Gabor特征能量图谱如图2~5所示。

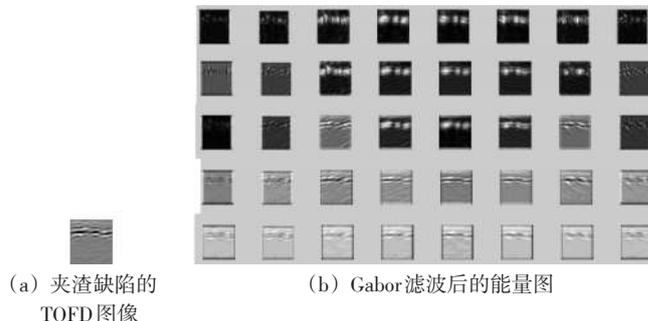


图2 夹渣缺陷的TOFD图像及Gabor特征能量图

从图2中可以看出, 小尺度的Gabor特征突出了夹渣缺陷个别很小的部位会出现亮度比较高的点这一特性;

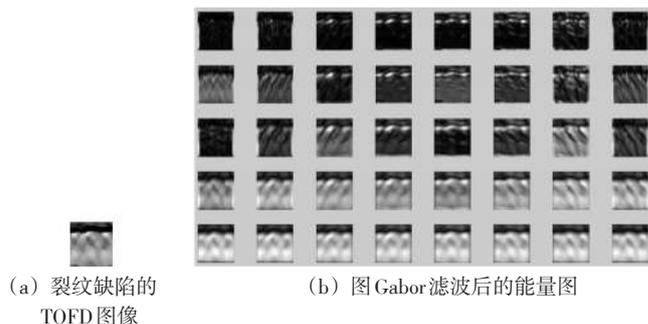


图3 裂纹缺陷的TOFD图像及Gabor特征能量图

从图3中可以看出, 不同方向的Gabor滤波器增强了裂纹缺陷呈多个抛物线形状的这一特性;

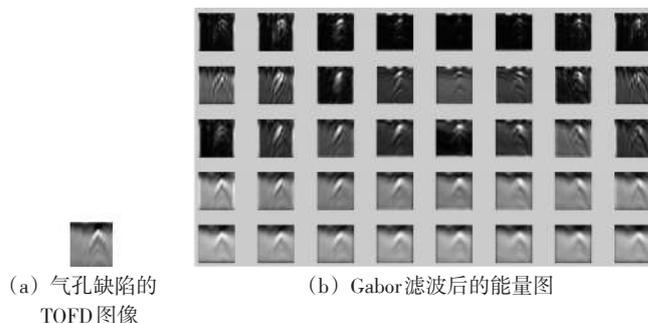


图4 气孔缺陷的TOFD图像及Gabor特征能量图

表1 两种特征的识别结果

不同特征	预测结果								识别正确率 /(%)
	裂纹		未熔合		气孔		夹渣		
	预测数	正确识别数	预测数	正确识别数	预测数	正确识别数	预测数	正确识别数	
原始图像像素特征	7	6	6	2	7	3	5	1	48%
Gabor特征	7	6	6	2	7	6	5	4	72%

从图4中可以看出,气孔的缺陷形状为近似的圆球状这一特性经过Gabor滤波器同样得到增强。

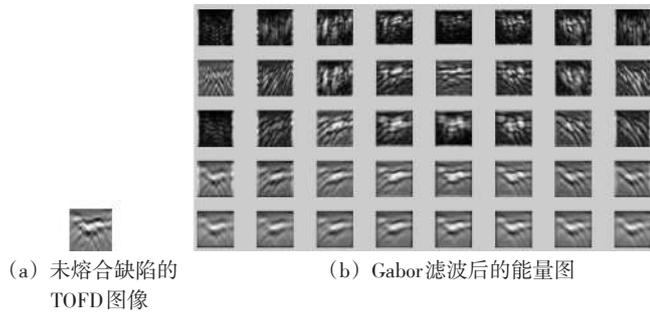


图5 未融合缺陷的TOFD图像及Gabor特征能量图

从图5中可以看出,未融合缺陷的条状特征可大尺度的Gabor滤波器作用下得到增强;

从以上分析可得:当滤波器方向与图中纹理方向越吻合时,输出图像的能量越大,这也证实了Gabor滤波器的性质。因此,采用Gabor小波特征所构建的缺陷分类器的各种缺陷的识别正确率高于采用原始图像像素特征,这与实验结果相符。

4 TOFD图像缺陷自动检测及定性系统开发

根据上述的算法,本研究开发实现了TOFD图像缺陷自动检测及定性系统。系统采用Visual C++ 2008软件作为开发平台。该应用系统主要由TOFD图像输入模块、缺陷检测模块、缺陷分类模块等3个部分组成,可实现数据读入、缺陷特征提取和缺陷智能定性分类等功能。

系统的缺陷自动分类示例如图6所示。

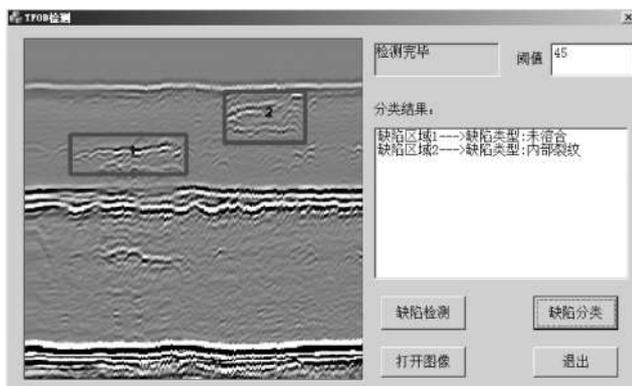


图6 缺陷自动分类示例

5 结束语

本研究提出了一种利用Gabor小波特征进行TOFD缺陷图像特征描述,并采用子空间判别分析的方法。该方法可实现TOFD缺陷图像的自动定性分析。使用该算法和最邻近决策规则作为分类准则构建了一个应用系统,并对一个TOFD图像数据库进行了识别比较实验和分析,得到了较高的分类正确率。

由实验结果和理论分析可知,该基于Gabor小波特征的缺陷识别方法准确有效,适用于TOFD的智能分类识别。

参考文献(References):

- [1] KECHIDA A, DRAI R, GUESSOUM A. Texture analysis for flaw detection in ultrasonic images[J]. *Journal of Non-destructive Evaluation*, 2012, 31(2): 108-116.
- [2] 盛朝阳, 刚 铁, 迟大钊. 基于分水岭方法的超声TOFD检测图像分割[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(8): 35-40.
- [3] 林乃昌. 基于变型波的超声TOFD近表面检测新方法[J]. *机电工程*, 2013, 30(8): 967-970.
- [4] KECHIDA A, DRAI R, BENAMMAR A. Image Processing and Wavelets Transform for Sizing of Weld Defects using Ultrasonic TOFD images[C]. *Acoustics 08 Paris*: 609-614.
- [5] MOURA E P, SILVA R R, SIQUEIRA M H S, et al. Pattern recognition of weld defects in preprocessed tofd signals using linear classifiers [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2004, 23(4): 163-172.
- [6] SHITOLE C N, ZAHRAN O, AL-NUAIMY W. Combining fuzzy logic and neural networks in classification of weld defects using ultrasonic time-of-flight diffraction[J]. *Insight*, 2007(49): 79-82.
- [7] 彭 伟, 卢 超, 徐 薇. 超声TOFD检测回波信号的时间识别[J]. *无损探伤*, 2008, 32(6): 5-8.
- [8] 迟大钊. 基于超声TOFD法的焊缝缺陷表征研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 2007.
- [9] 盛朝阳. 超声TOFD检测信号采集及缺陷识别方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 2007.
- [10] LEE T S. Image representation using 2d gabor wavelets[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18(10): 959-971.
- [11] WISKOTT L, FELLOUS J, KRUGER N, et al. Face recognition by elastic bunch graph matching[J]. *IEEE Trans. PAMI*, 1997, 19(7): 775-669.

[编辑:罗向阳]

本文引用格式:

林乃昌, 杨晓翔, 唐旭晟, 等. 基于Gabor小波的TOFD图像缺陷识别研究[J]. *机电工程*, 2013, 30(12): 1450-1454.

LIN Nai-chang, YANG Xiao-xiang, TANG Xu-sheng, et al. Defect recognition of TOFD image based on Gabor wavelet[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2013, 30(12): 1450-1454.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>