

# 基于优化 Gabor 滤波器的铸坯表面缺陷检测 应用研究

徐建亮<sup>1</sup>, 毛建辉<sup>1</sup>, 方晓汾<sup>1,2</sup>

(1.衢州职业技术学院, 浙江 衢州 324000; 2.浙江大学, 杭州 310027)

**摘 要:** **目的** 提高金属铸坯表面缺陷检测精度。**方法** 由于金属铸坯表面上存在鱼鳞状构造, 其亮度和背景区域纹理特征不一致, 而且有缺陷和无缺陷的区域的灰度值极其相似, 使得缺陷非常难以准确检测出来。为解决上述问题, 以便更有效地检测表面缺陷, 通过详细分析金属铸坯表面缺陷特征, 将该类零件表面缺陷分为两种类型, 提出一种基于优化 Gabor 滤波器的金属表面缺陷检测算法, 该算法通过设计两种评价函数, 利用评价函数最大限度地提高无缺陷和缺陷区域之间的能量差, 以选取 Gabor 滤波器四个最佳参数, 同时使用双阈值滤波方法, 以减少由于噪声和伪缺陷引起的测量误差。**结果** 利用 3 种滤波算法对四十幅带有缺陷的图像进行试验, 实验表明该算法在角部裂纹、细裂纹和伪裂纹检测精度分别达到 92.50%、92.50%和 95.50%。**结论** Opt-Gabor 算法能根据已分类的两种不同类型的裂纹较为准确地检测出铸坯表面缺陷, 在测量精度上略优于其他几种算法。

**关键词:** 图像处理; 缺陷检测; Gabor 滤波; 滤波器; 灰度; 优化算法

**中图分类号:** TH161<sup>+</sup>.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)11-0202-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.11.031

## Application of the Billet Surface Defects Detection Based on Optimization of Gabor Filter

XU Jian-liang<sup>1</sup>, MAO Jian-hui<sup>1</sup>, FANG Xiao-fen<sup>1,2</sup>

(1.Quzhou College of Technology, Quzhou 324000, China; 2.Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the accuracy for detection of defects in surfaces of steel billets. Because of the presence of the scale-covered on the billet surface, its characteristics such as brightness and texture in the background region were inconsistent. Moreover, the similarities in the gray-levels of the defect and defect-free regions made it very difficult to accurately detect the defects. In order to solve the above-mentioned problems and to detect surface defects more effectively, a method (based on Opt-Gabor) for detection of defects in the surfaces of steel billets by analyzing the characteristics of the metal billet surface defects to classify such part surface defects into two types. In order to select the best four Gabor filter parameters, two

收稿日期: 2016-03-25; 修订日期: 2016-08-04

**Received:** 2016-03-25; **Revised:** 2016-08-04

**基金项目:** 衢州市科技计划项目 (2015Y017); 浙江省教育厅科研项目 (Y201432278)

**Fund:** Science and Technology Plan of Quzhou(2015Y017); Education Department of Zhejiang Province(Y201432278)

**作者简介:** 徐建亮 (1984—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事机械计算机辅助设计与图形学、机器视觉与模式识别研究。

**Biography:** XU Jian-liang(1984—), Male, Master, Lecturer, Research focus: mechanical cad and graphics, machine vision and pattern recognition.

evaluation functions were designed to maximize the use of the energy difference between defect-free and defect regions. Moreover, the dual-threshold filtering method was used to reduce the measurement errors caused by noise and pseudo defects. Forty images with defects were tested with three kinds of filtering algorithms. The experiment showed that the proposed method had a detection accuracy of 92.50%, 92.50% and 95.50% for corner cracks, thin cracks and pseudo crack respectively. Opt-Gabor algorithm can detect the billet surface defects in a more accurate way according to the two kinds of different cracks classified. With respect to measurement accuracy, Opt-Gabor algorithm is slightly superior to other algorithms.

**KEY WORDS:** image processing; defects detection; Gabor filter; gray scale; optimized algorithm

目前大多数缺陷检测技术或系统仍处于手动或者半自动水平。若采用手工方法检测废产品缺陷时,劳动强度大,且容易出错。此外,手动检查不能保证可靠性,且不同的检查员检查时导致检测精度不一致。为克服人工检测的上述局限性,基于涡流、激光、X 射线和视觉技术等方法的研究已在金属及非金属产品缺陷检测中得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。虽然上述方法在技术方面没有太多难点,但检测精度仍会受被检测工件表面性质的影响,如金属特征、照明、缺陷类型等,进而难以直接、高速和精确地检测表面高精度缺陷检测。国内外学者做了大量的相关研究,厉荣宣等<sup>[3]</sup>提出基于图像处理的轴类零件表面裂纹检测,通过计算裂纹连通域的圆形度和长宽比特征,判断零件表面图像中是否有裂纹存在。郭冕等<sup>[4]</sup>提出迭代阈值对齿轮的缺陷图像进行研究,解决阈值易受噪声干扰的问题。Li X 等<sup>[5]</sup>提出应用小波技术进行铸件内部缺陷的自动检测。黎明等<sup>[6]</sup>设计一种新的图像频域滤波器,用于增强缺陷纹理图像和抑制背景纹理对缺陷纹理检测的干扰,再通过图像分割的方法实现缺陷纹理和背景纹理的分离。陈龙等<sup>[7]</sup>提出一种新的轴承表面缺陷类型识别算法,对轴承表面缺陷图像和无缺陷图像进行图像匹配以定位缺陷区域,运用像素点的异或运算以精确提取缺陷区域。李锦卫等<sup>[8]</sup>提出基于灰度截留分割与十色模型的马铃薯表面缺陷检测方法,选择面积比率和十色比率作为缺陷判别特征,对分割出来的深色部位采用阈值法进行缺陷识别。其他学者<sup>[9]</sup>也基于机器视觉与图像处理方法对缺陷检测作了大量研究,但是对于表面覆盖沉积氧化物且缺陷类型多样的铸坯缺陷检测算法研究较少。

由于缺陷与无缺陷区域的灰度等级差别极小,利用灰度级来区分缺陷非常困难,因此本文提出一种新缺陷检测算法——opt-Gabor。在空间域和频率

域中,Gabor 滤波器<sup>[11]</sup>的参数响应不同(Gabor 函数在空域和频域中的位置),即 Gabor 滤波器参数的选择与检测性能密切相关,Gabor 滤波器参数的选择在缺陷检测中起着至关重要的作用。因此,本文采用基于 Gabor 滤波器优化算法的新算法(Opt-Gabor),利用评价函数最大限度地提高无缺陷和缺陷区域之间的能量差,选取 Gabor 滤波器四个最佳参数。为进一步验证该算法的测量精度,本文将 Opt-Gabor、Gabor and Gaussian<sup>[8]</sup>和 log Gabor<sup>[12-13]</sup>滤波等三种优化算法对比。

## 1 表面缺陷分析

角部裂纹是在轧制过程中产生的,缺陷沿铸坯的圆形边缘发生,与相邻的背景像素相比,角部裂纹处表现出较低的灰度级。这些裂缝一般形状不一,但在水平方向约 3~6 像素,本文将其定义为“角裂纹”。第二种类型的裂纹发生在铸坯表面中部,这些裂缝非常细,通常是水平方向约 1~2 像素,并且具有较低的灰度级,本文将其定义为“细裂纹”。铸坯表面呈鱼鳞状斑纹,这是由于在生产过程中产生的氧化物沉积而形成,这也是无缺陷部分表面的灰度值剧烈变化的原因。此外,即使某些无缺陷区域同样具有较低的灰度值,但是由于零件表面的这种固有特征而表现为“伪裂纹”的存在。因此,本文设计一种优化的 Gabor 滤波器,来提高缺陷检测率和减少类似裂缝或伪缺陷的发生率。

### 1.1 Gabor 函数

Gabor 变换属于加窗傅里叶变换,1-D Gabor 函数最早由 Gabor 提出,后来 Daugman 将它扩展到 2-D<sup>[14]</sup>。一个二维 Gabor 滤波器包括实部和虚部两部分,二维 Gabor 函数的实部是用来检测坯表面缺陷。一般情况下,一个二维 Gabor 函数的实部有

四个参数  $f$ 、 $\theta$ 、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 。在这里,  $f$  表示 Gabor 函数的中心频率,  $\theta$  为方向角,  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  为 Gabor 函数的尺度因子, 决定了沿  $x$  和  $y$  轴的高斯包络, 定义二维 Gabor 函数  $g(x, y)$  的实部:

$$g(x, y) = e^{-\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{x}{\sigma_x} \right)^2 + \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right]} \cos(\omega x) \quad (1)$$

式中:  $(x, y) = (x' \cos \theta + y' \sin \theta, -x' \sin \theta + y' \cos \theta)$  表示空域坐标绕  $x$  轴逆时针旋转  $\theta$  角;  $\omega$  为二维角频率的矢量大小, 与频率满足关系  $\omega = 2\pi f$ 。

对于一个给定的输入图像  $I(x, y)$ , 通过卷积运算输出 Gabor 滤波器  $R(x, y)$ :

$$R(x, y) = g(x, y) * I(x, y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} g(m, n) I(x-m, y-n) \quad (2)$$

式中:  $*$  表示二维卷积;  $M$  和  $N$  为 Gabor 滤波器的掩模尺寸;  $R(x, y)$  为图像傅里叶变换后的实部。经滤波的局部能量定义为  $E(x, y)$ :

$$E(x, y) = R^2(x, y) \quad (3)$$

## 1.2 优化 Gabor 滤波原理

Gabor 滤波器里的四个参数在空间域和频域有不同的响应。此外, 随着 Gabor 滤波器的参数变化, 能量响应也发生改变, 因此参数的选择在缺陷检测中起着至关重要的作用。Gabor 滤波器的目标是使无缺陷区域内的缺陷之间的能量差最大化, 因此, 为快速实现这个目标, 本文提出两个评价函数, 使用平均能量的方法快速实现 Gabor 函数最优参数, 其函数为:

$$J_1 = \frac{\mu_f}{|\mu_d - \mu_f|}, \quad J_2 = \frac{\mu_d}{|\mu_d - \mu_f|} \quad (4)$$

式中:  $\mu_f$  为无缺陷的图像平均能量;  $\mu_d$  为缺陷图像的平均能量;  $\mu$  平均能量为:

$$\mu = \frac{1}{P \times Q} \sum_{x=0}^Q \sum_{y=0}^P E(x, y) \quad (5)$$

其中  $P \times Q$  表示图像像素尺寸。当评价函数  $J_1$  和  $J_2$  取最小值时, 是缺陷和无缺陷区域之间的能量差最大化, 此时 Gabor 滤波器参数值最优, 即随着能量差值的增大, 评价函数值减小。若通过函数优化 Gabor 滤波器, 则高能量处为缺陷区域; 若通过函数优化 Gabor 滤波器, 则低能量处为缺陷区域。

为获得最优值的 Gabor 滤波器的参数区分缺

陷和无缺陷的区域, 基于  $J_1$  和  $J_2$ , 缺陷检测的最优模型可归结为:

$$\begin{aligned} & \min \{ \text{costfunction } J_1 \text{ or } J_2 \} \\ & \text{s.t} \\ & \sigma_{x-\min} \leq \sigma_x \leq \sigma_{x-\max} \\ & \sigma_{y-\min} \leq \sigma_y \leq \sigma_{y-\max} \\ & \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max} \\ & f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

## 1.3 Gabor 滤波参数分析

由于角部裂纹和细裂缝特征各不相同, 本文利用单变量多单元半全局极值搜索算法<sup>[15]</sup>获取评价函数最小值以实现 Gabor 滤波器的优化, 从而增加和无缺陷区域的缺陷能量差。

$f$ 、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  不是强制性约束, 为简化计算, Gabor 滤波器的大小限制为  $15 \times 15$ 。因此,  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  取值  $[0.001, 999]$ ,  $f$  取值  $[0.001, 1]$ , 取值  $[0, \pi]$ 。基于单变量多单元半全局极值搜索算法的最优 Gabor 滤波器参数值参数如表 1 所示。

表 1 基于单变量动态编码搜索算法的最优 Gabor 滤波器参数值

Tab.1 Value of optimal parameters of gabor filter based on the single variable Dynamic Encoding Algorithm for Searching (DEAS)

Parameters	$f$	$\theta/\text{rad}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$
Corner cracks	0.179	2.378	1.999	5.996
Thin cracks	0.766	1.576	2.279	4.812
Pseudo crack	1.233	1.142	2.534	4.215

## 2 缺陷检测

### 2.1 双阈值法

为抑制不构成缺陷的信息部分, 对过滤后的图像进行阈值化处理, 此操作可进一步降低伪缺陷的检测概率, 减少误检率。首先采用高阈值检测许多露出裂口、断续的缺陷和不完整的缺陷, 但是高阈值处理的图像会包含极少数“伪缺陷”; 另一方面, 通过使用一个低阈值, 所有缺陷都可以被精确地检测出来, 但是, 低阈值可导致噪声<sup>[16-17]</sup>被误检测为缺陷。因此, 基于以上因素, 本文采用双阈值法, 以最大限度地发挥这两种类型的阈值优点, 提高缺陷检测的精度, 减少误差。

为选择最佳的阈值,一个无缺陷的图像(参考) $R'(x,y)$ ,从这个图像中,可获得高低阈值:

$$T_{\text{high}}=\alpha\times R'(x,y)$$
$$T_{\text{low}}=\beta\times R'(x,y)$$

(7)

式中:  $\alpha,\beta$  分别为通过实验选定的高低阈值的权重因子。

2.2 滤波窗口

获得用于二值图像进行滤波的滤波器的大小为:

$$\text{if } \text{lenght}\{L_{\text{double}}(n)\}<T_{\text{size}} \text{ then } L_{\text{double}}(n)=0$$

(8)

基于优化 Gabor 滤波算法的表面缺陷检测算法流程如图 1 所示,在 Gabor 滤波之后,利用双阈值法获取二值图像,经滤波最终得到缺陷检测结果图。

3 实验分析

通过实验将该算法应用于生产过程中的带有表面缺陷的零件检测中,以评估该算法在零件表面缺陷检测的检测精度,将该算法应用于实际生产的零件表面缺陷检测。通过一个 8 位分辨率 CCD 相机获得的图像大小为 300pixel×540pixel 图像,通过实验对缺陷检测算法进行评估,图 2—4 分别基于 Opt-Gabor、Gabor and Gaussian、log Gabor 滤波算法的含有角裂纹实验结果,图 5—7 分别基于 Opt-Gabor、Gabor and Gaussian、log Gabor 滤波算法的含有细裂纹实验结果,图 8—10 分别基于 Opt-Gabor、Gabor and Gaussian、log Gabor 滤波算法的含有伪裂纹实验结果。



图 1 算法流程  
Fig.1 Algorithm flow chart

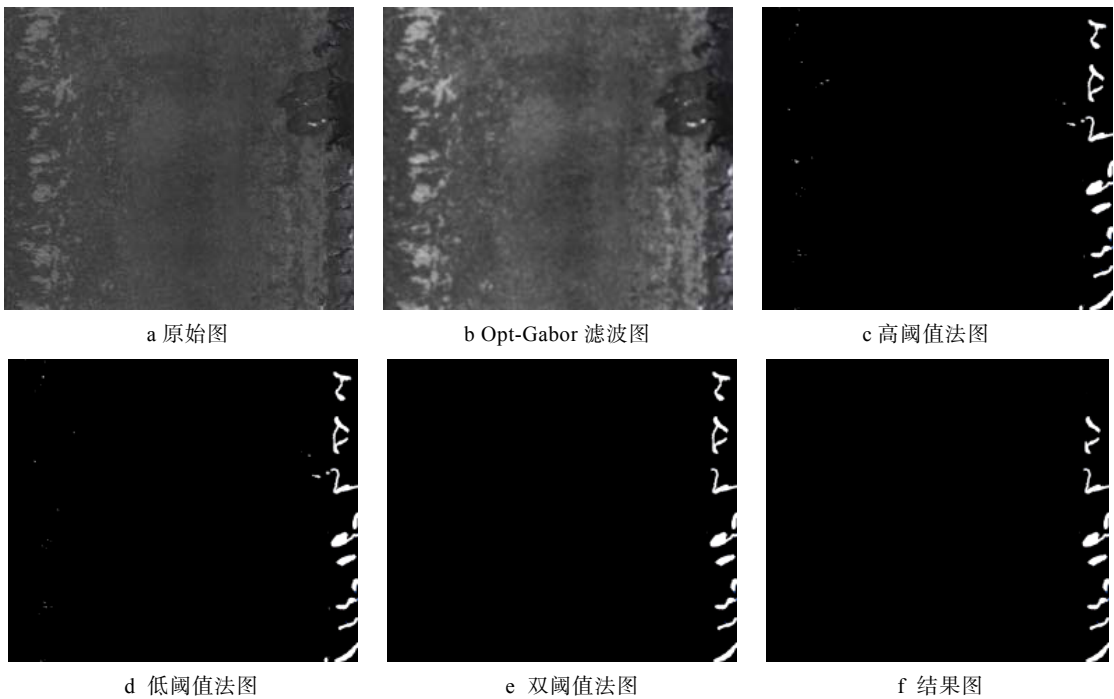
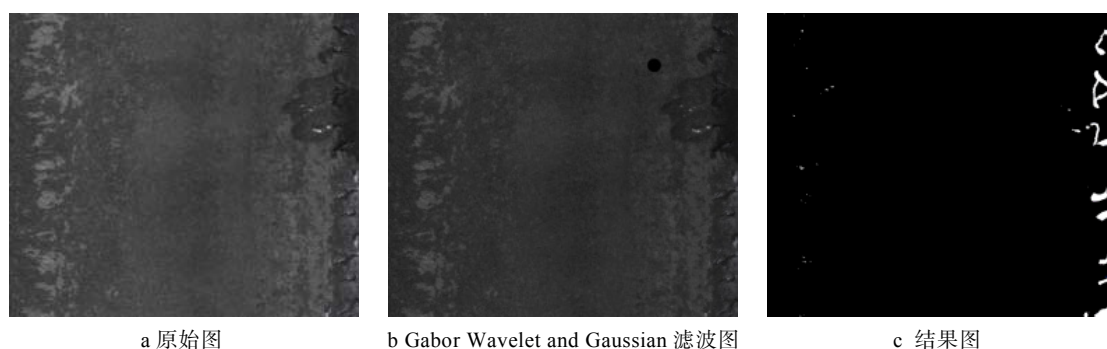


图 2 基于 Opt-Gabor 滤波的角裂纹处理图

Fig.2 Results of application of optimization of Gabor filter for corner cracks: a) original image, b)image filtered by Opt- Gabor filter, c) binary image with high threshold,d)binary image with low threshold, e)binary image with double threshold, f) result image



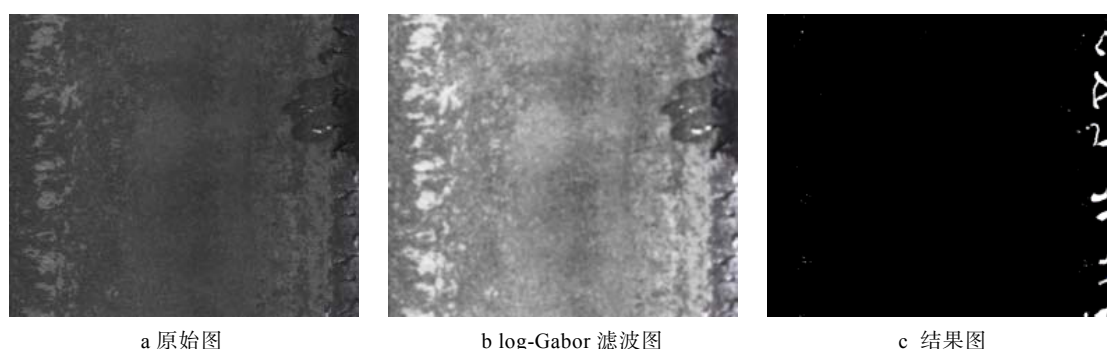
a 原始图

b Gabor Wavelet and Gaussian 滤波图

c 结果图

图 3 基于 Gabor and Gaussian 滤波的角裂纹处理图

Fig.3 Results of application of the Gabor Wavelet and Gaussian Filter for corner cracks: a) original image, b) image filtered by Gabor Wavelet Filter and Gaussian Filter ,c) result image



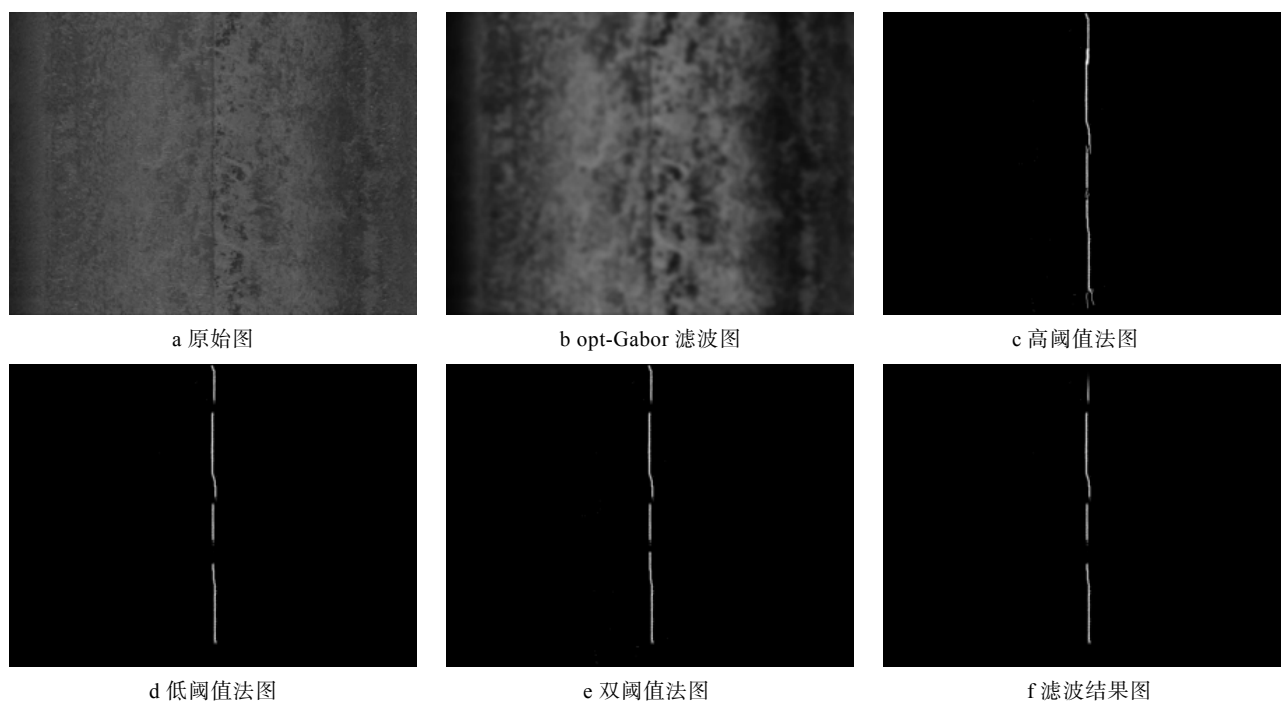
a 原始图

b log-Gabor 滤波图

c 结果图

图 4 基于 log Gabor 滤波的角裂纹处理图

Fig.4 Results of application of the log Gabor Filter for corner cracks: a) original image ,b) image filtered by log Gabor filter,c) Segmented image



a 原始图

b opt-Gabor 滤波图

c 高阈值法图

d 低阈值法图

e 双阈值法图

f 滤波结果图

图 5 基于 Opt-Gabor 滤波的细裂纹处理图

Fig.5 Results of application of optimization of Gabor filter for thin cracks: a) original image, b) image filtered by optimized Gabor filter, c) binary image with high threshold, d) binary image with low threshold, e) binary image with double threshold, f) result image

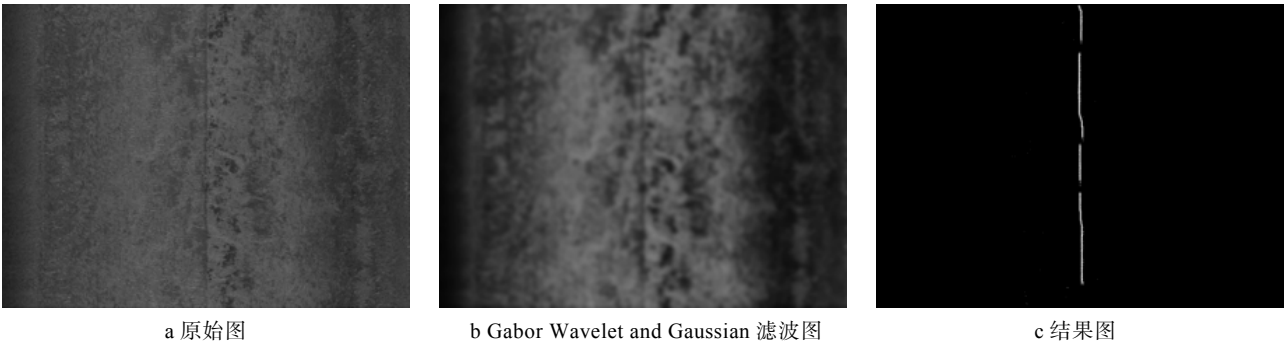


图 6 基于 Gabor and Gaussian 滤波的细裂纹处理图  
Fig.6 Results of application of the Gabor Wavelet and Gaussian Filter for thin cracks: a) original image, b) image filtered by Gabor Wavelet Filter and Gaussian Filter, c) result image

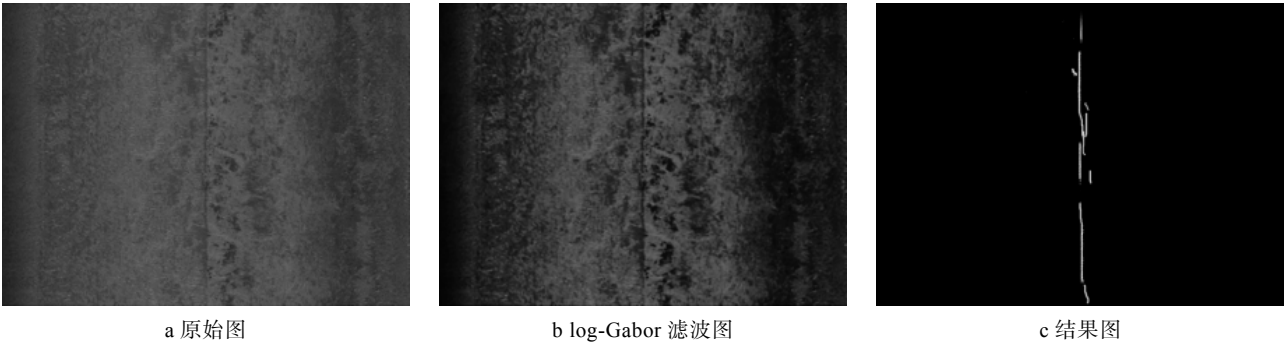


图 7 基于 log Gabor 滤波的细裂纹处理图  
Fig.7 Results of application of the log Gabor Filter for thin cracks: a) original image, b) image filtered by log Gabor filter, c) result image

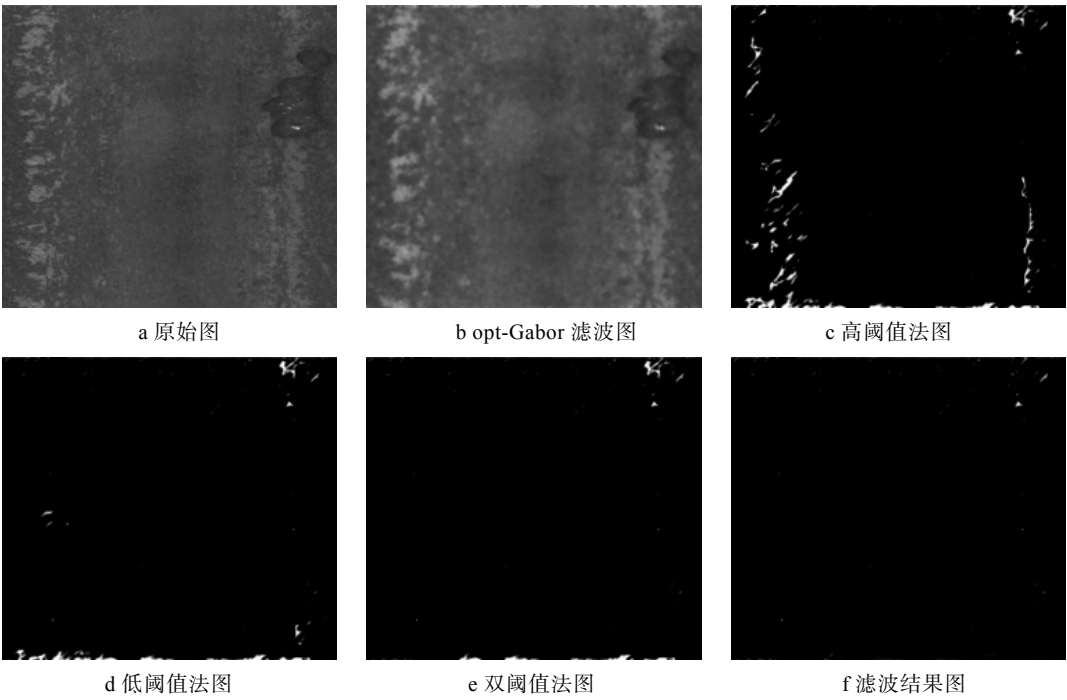


图 8 基于 Opt-Gabor filter 伪裂纹结果图  
Fig.8 Results of application of Opt- Gabor filter for pseudo-defects: a) original image , b) image filtered by optimized Gabor filter, c) binary image with high threshold , d) binary image with low threshold, e) binary image with double threshold, f) result image

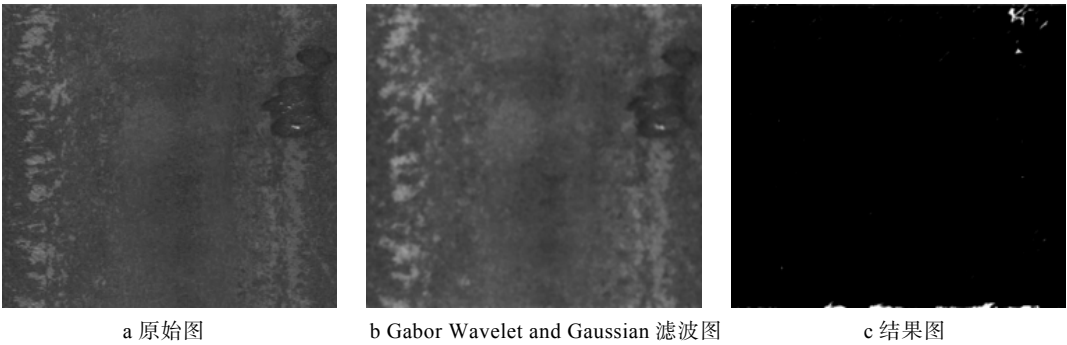


图 9 基于 Gabor and Gaussian 滤波的伪裂纹处理图

Fig.9 Results of application of the Gabor Wavelet and Gaussian Filter for pseudo-defects: a) original image, b) image filtered by Gabor Wavelet Filter and Gaussian Filter, c) result image

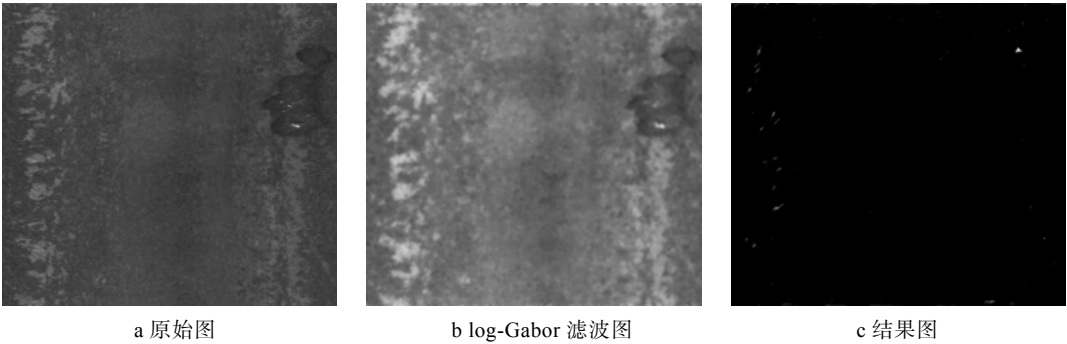


图 10 基于 log Gabor 滤波的伪裂纹处理图

Fig.10 results of application of the log Gabor Filter for pseudo-defects: a) original image, b) image filtered by logGabor filter, c) result image

为进一步论证算法的有效性,利用以上 4 种滤波算法对 40 幅带有缺陷的图像进行试验,结果表明,该算法在角部裂纹、细裂纹和伪裂纹检测精度

分别达到 92.50%、92.50%和 95.50%。检出率略高于 Gabor Wavelet and Gaussian 和 log-Gabor 滤波算法,其对比实验结果统计数据如表 2 所示。

表 2 基于 Gabor Wavelet and Gaussian、log-Gabor 和 Opt-Gabor 滤波算法实验结果分析  
Tab.2 Experimental results analysis with the Gabor Wavelet and Gaussian, log-Gabor and Opt-Gabor algorithm

Filtering algorithms	Defect	Right	Wrong	Accuracy/%
Gabor Wavelet and Gaussian algorithm	Corner cracks	34	6	85.50
	Thin cracks	35	5	87.50
	Pseudo cracks	37	3	92.50
log-Gabor algorithm	Corner cracks	36	4	90.00
	Thin cracks	36	4	90.00
	Pseudo cracks	35	5	87.50
Opt-Gaboralgorithm ( proposed)	Corner cracks	37	3	92.50
	Thin cracks	37	3	92.50
	Pseudo cracks	38	2	95.50

#### 4 结论

通过对金属铸坯表面缺陷进行研究,将其分为两种缺陷类型。为方便分析,定义缺陷类型为角裂

纹、细裂纹和伪裂纹,通过获取 Gabor 滤波函数两组最优参数,同时使用双阈值滤波方法,以减少由于噪声和类似伪缺陷引起的检测误差。最终通过实验对比分析,针对同一批实验对象,基于 Opt-Gabor 滤波检测算法对角裂纹、细裂纹和伪裂纹的检测成

功率略优于 Gabor and Gaussian 和 log Gabor 滤波检测算法, 实验显示该算法对于此类缺陷, 尤其对于区分伪裂纹有非常高的识别率, 证明该算法的有效性和可行性。

# 参考文献:

- [1] 申龙. 磷化冷轧基板表面黑变缺陷研究[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 141—145.  
SHEN Long. Study on Blackening Defect on Surface of Cold-rolled Steel Sheet for Phosphating[J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 141—145.
- [2] 杨景伟, 赵永岗, 孙杰, 等. 铝合金铬酸阳极氧化后表面缺陷分析[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 72—74.  
YANG Jin-wei, ZHAO Yong-gang, SUN Jie, et al. Defect Analysis of the Aluminum Alloy Substrate after Chromic Acid Anodizing[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 72—74.
- [3] 厉荣宣, 沈希忠, 张树行. 基于图像处理的轴类零件表面裂纹检测[J]. 图学学报, 2015, 36(1): 62—67.  
LI Rong-xuan, SHEN Xi-zhong, ZHANG Shu-hang. Surface Crack Detection of Shaft Components Based on Image Processing[J]. Journal of Graphics, 2015, 36(1): 62—67.
- [4] 郭冕, 陈洪芳. 基于 EEMD 和 BP 神经网络的齿轮缺陷检测[J]. 机电工程, 2013(6): 678—682.  
GUO Mian, CHEN Hong-fang. Gear Defect Detection Based on EEMD Method and BP Neural Network[J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2013(6): 678—682.
- [5] LI X, TSO S K, GUAN X P. Improving a Automatic Detection of Defects in Castings by Applying Wavelet Technique[J]. IEEE Trans Ind Electron 2006, 53(6): 1927—1934.
- [6] 黎明, 马聪, 杨小芹. 机械加工零件表面纹理缺陷检测[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(3): 318—323.  
LI Ming, MA Cong, YANG Xiao-qin. Detection of Texture Defects for Machined Surface[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(3): 318—323.
- [7] 陈龙, 侯普华. 轴承表面缺陷类型识别算法[J]. 计算机应用研究, 2015, (5): 1549—1553.  
CHEN Long, HOU Pu-hua. Recognition Algorithm on Bearing Surface Defect Type[J]. Application Research of Computers, 2015, (5): 1549—1553.
- [8] 李锦卫, 廖桂平, 金晶, 等. 基于灰度截留分割与十色模型的马铃薯表面缺陷检测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 236—242.  
LI Jin-wei, LIAO Gui-ping, JIN Jing, et al. Method of Potato External Defects Detection Based on Fast Gray Intercept Threshold Segmentation Algorithm and Ten-color Model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(10): 236—242.
- [9] BENMOUSSAT M, SPINLER K, GUILLAUME M. Surface Defect Detection of Metal Parts: Use of Multimodal Illuminations and Hyperspectral Imaging Algorithms[C]. Imaging Systems and Techniques (IST), 2012: 228—233.
- [10] 陈阳. 拓扑梯度耦合 FCMC 的全自动图像修复优化算法[J]. 包装工程, 2014, 35(21): 96—103.  
CHEN Yang. The Automatic Image Inpainting Optimization Algorithm Based on Topological Gradient Coupled FCMC[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(21): 96—103.
- [11] SIVABALAN KN, GNANADURAI DRD. Efficient Defect Detection Algorithm for Gray Level Digital Images Using Gabor Wavelet Filter and Gaussian Filter[J]. International Journal of Engineering Science and Technology, 2011, 3(4): 32—40.
- [12] TOLBA S, ATWAN Ahmad, AMANNEDDINE N, MUTAWA A M, KHAN H A. Defect Detection in Flat Surface Products Using Log-gabor Filters[J]. International Journal of Hybrid Intelligent Systems, 2010, 7(3): 187—201.
- [13] KANAGA L, AKSHMI K. Frequency Domain Enhancement Algorithm Based on Log-gabor Filter in FFT Domain, European Journal of Scientific[J]. 2012, 74(4): 563—573.
- [14] RAHEJA J L, KUMAR S, CHAUDHARY A. Fabric Defect Detection Based on GLCM and Gabor Filter: A Comparison[J]. Optik-international Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(23): 6469—6474.
- [15] 郭晓军, 胡云安, 张雷. 单变量多单元半全局极值搜索算法仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(8): 1901—1905.  
GUO Xiao-jun, HU Yun-an, ZHANG Lei. Research on Single-parameter Multi-unit Semi-global Extremum Seeking Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(8): 1901—1905.
- [16] 黄文生, 陈功, 成旭, 等. 稀疏分解算法在薄膜缺陷去噪中的应用[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 123—128.  
HUANG Wen-sheng, CHEN Gong, CHENG Xu, et al. Application of Sparse Decomposition Algorithm in Denoising of Film Defects[J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 123—128.
- [17] 韩英莉. 一种改进全变差正则化的 Shearlet 自适应带钢图像去噪算法[J]. 表面技术, 2014, 43(6): 105—110.  
HAN Ying-li. A Modified Total Variation Regularization Shearlet Adaptive Algorithm for Steel Strip Image Denoising[J]. Surface Technology, 2014, 43(6): 105—110.