

基于 FGT-FBP 重构算法的焊接缺陷检测

周晓虎, 高向东, 杜亮亮, 王春草

(广东工业大学, 广东省焊接工程技术研究中心, 广州, 510006)

摘要: 针对焊接过程产生的缺陷, 提出一种磁光成像传感的模糊灰度变换和滤波反投影 (FGT-FBP) 重构检测方法。研究焊接缺陷的几何特征, 通过分析裂纹和未熔合两种不同焊接缺陷在交变磁场励磁下的磁光成像特征, 设计模糊规则, 对磁光图像进行模糊灰度变换, 增强磁光图像对比度, 使焊接缺陷形态趋势可视化, 实现描述磁光成像焊接缺陷细节的无参考型图像评估方法。对 FGT 处理的焊接缺陷磁光图进行旋转投影, 并经过快速傅里叶变换和改进的滤波器进行滤波去噪, 消除伪影后进行反投影变换实现焊接缺陷图像的重构。利用滤波反投影重构算法进行去噪, 可有效突出焊接缺陷特征。最后结合阈值分割和边缘检测实现焊接缺陷检测。结果表明, 该方法能较准确检测裂纹和未熔合两种焊接缺陷。

关键词: 焊接缺陷; 磁光成像; 模糊灰度变换; 滤波反投影

中图分类号: TG 115 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20190926002

0 序言

焊接缺陷主要包括裂纹、凹坑、未熔合和气泡等, 其中一些缺陷危害极大^[1-2]。目前国内外所研究的焊接缺陷检测方法主要包括目视检测^[3]、超声检测^[4]、射线检测^[5]、渗透检测、磁粉检测和涡流检测等^[6-7]。每种检测方法都有其局限, 例如目视法对检测人员要求较高; 射线法辐射对人体有害; 超声检测需要耦合剂; 而渗透和磁粉检测都要求工件表面足够光滑, 且有漏检现象等。基于法拉第电磁感应和磁光效应的磁光成像技术是一种可视化检测方法^[8-9]。通过对被测焊件励磁, 用磁光传感器检测缺陷处的磁场畸变, 获取磁光图像, 然后对磁光图像进行图像预处理、分割和识别等操作得到缺陷参数。但对于较小焊接缺陷, 磁场畸变相对微弱, 磁光成像模糊。

通过对不同焊接缺陷的磁光图像的灰度分布特征研究, 提出一种对磁光图像进行 FGT-FBP 的检测方法, 再利用 Otsu 方法进行最佳阈值分割和利用 Canny 算子边缘检测, 准确提取裂纹和未熔合缺陷的完整特征。

收稿日期: 2019-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675104); 广州市科技计划项目(200202020068); 广东省教育厅创新团队项目(2017KCXTD010).

1 试验方法

1.1 试验装置

试验装置包括 3 kW 激光 YAG 焊接机、三轴运动工作台和夹具、控制系统和保护气体(氩气)装置等。试验材料采用 150 mm × 50 mm × 1 mm 低碳钢板, 所用焊接缺陷样本工艺参数如表 1 所示。

表 1 激光焊接工艺试验参数
Table 1 Experimental parameters of laser welding

缺陷种类	峰值功率 P/kW	焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	脉宽 S/mm	气体流量 $q/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$
裂纹	1	2	10	15
未熔合	2.5	2.5	6	15

1.2 磁光传感器及其成像原理

磁光传感器原理如图 1 所示, 当一束 LED 光源发出后, 经过起偏器转化为线偏振光。经过反射镜反射穿过磁光介质, 再经磁光薄膜反射面反射至反射镜进行传导投射。由于被测焊件处于外加磁场当中, 无缺陷区域, 被测焊件将形成完整的磁路, 偏振光的偏振面不发生偏转。有焊接缺陷区域的磁场将发生畸变, 使光的传播方向上有垂直磁场存在, 偏振面发生偏转, 包含缺陷信息的线偏振光经过检偏器投影被 CMOS 相机接收, 磁场变化转化为光强的变化实时成像, 形成焊接缺陷磁光图^[7]。

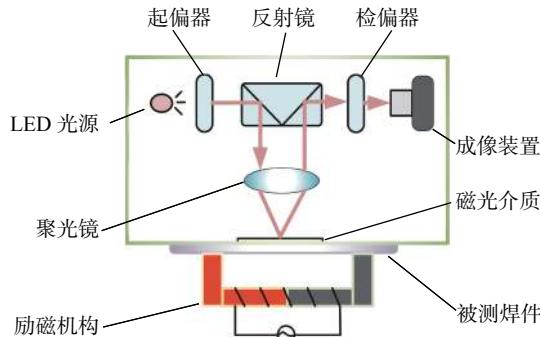


图 1 磁光传感器成像原理

Fig. 1 Principle of magneto-optical imaging

图 2 为焊接缺陷实物图及其磁光图。图 2a 和图 2c 分别为裂纹缺陷的实物图及磁光图，图 2b 和图 2d 分别为未熔合缺陷的实物图及磁光图。励磁电压为 140 V，采样频率为 75 Hz，图像大小为 400 pixel × 400 pixel。磁光传感器成像系统标定值为 102 pixel/mm，采集图像实际大小约为 4 mm × 4 mm。由于交变磁场随时间变化，依据励磁频率和采样频率得每三帧图像为一周期，均选取所采集图像的第一帧。对裂纹和未熔合缺陷磁光图分别进行直方图均衡化及中值滤波，结果分别如图 3 所示。虽然图像对比度得到增强，但缺陷区域仍然模糊不清且存在噪声。若进行阈值分割，则部分缺陷信息缺失。

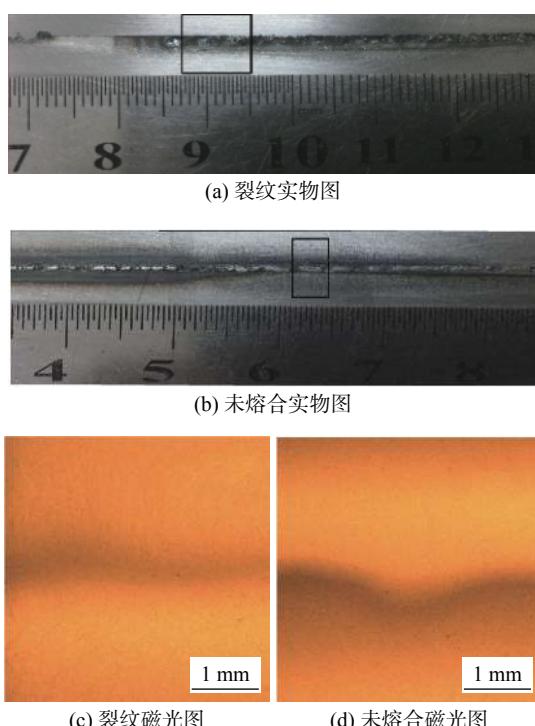


图 2 焊接缺陷实物图及其磁光图

Fig. 2 Physical diagram and magneto-optical image of weld defects. (a) real crack diagram; (b) unfused physical drawing; (c) crack magneto-optical diagram; (d) unfused magneto-optical diagram

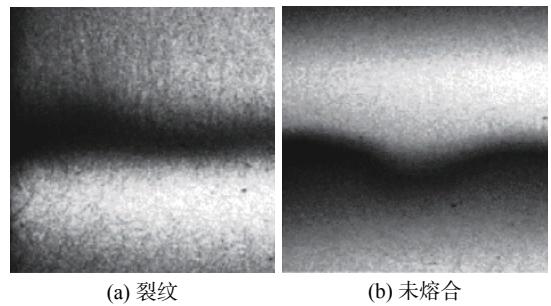


图 3 焊接缺陷预处理图

Fig. 3 Preprocessing diagram of weld defects. (a) crack; (b) unfused

2 模糊灰度变换

模糊集合理论能处理图像模糊不清等问题，可应用于图像灰度变换^[10]。对于缺陷图像，可以将其灰度值为集合 Q 设计模糊规则，规则表述为 IF 像素显示是暗/灰/亮，THEN 使它对应较暗/较灰/较亮。从而增强图像对比度，突出缺陷特征，依据规则拟合和整合其隶属度函数表征暗/灰/亮的概念。通过变换得到模糊集合 \bar{Q} ，具体可表示为^[11]

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(q_i)}{q_i} \quad (1)$$

式中： $\mu_A(q_i)$ 为隶属度函数； q_i 为集合 Q 中的元素，也即为图像的灰度值； n 为像素数。以裂纹和未熔合两种缺陷磁光图为例，依据隶属度函数中心参数分别为 0.55, 0.45, 0.6 的隶属度函数进行模糊灰度变换。

图 4 是经过模糊灰度变换后的图像，相对于直方图均衡化处理保留了缺陷信息，同时消除干扰，突出焊接缺陷。其中图 4a 裂纹的形态趋势被可视化，图 4b 未熔合缺陷的凹凸被明显区分。灰度平均梯度 ($Aver_{gmg}$) 是一种能反映图像灰度变化与描述图像缺陷细节的无参考型图像评估方法。如表 2 所示，不同焊接缺陷磁光图像经过模糊灰度变换后的

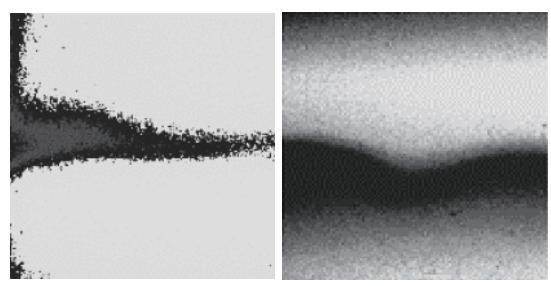


图 4 模糊灰度变换图

Fig. 4 Fuzzy gray scale transformation graph. (a) crack; (b) unfused

图像灰度平均梯度均大于直方图均衡化后的图像,充分说明模糊灰度变化能保留缺陷细节,增强图像对比度,具有区分并凸显缺陷特征的优势。

表 2 图像的灰度平均梯度

Table 2 Gray mean gradient of the image

类别	裂纹	未熔合
直方图均衡化	0.0377	0.0233
模糊灰度变换	0.0744	0.0235

$$F(x, y) = \int_0^{\pi} \left[\int_{-\infty}^{\infty} g(\rho, \theta) s(x \cos \theta + y \sin \theta - \rho) d\rho \right] d\theta \quad (2)$$

$$F(r, \varphi) = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_{-\alpha_m}^{\alpha_m} M(\alpha, \beta) s[r \cos(\beta + \alpha - \varphi) - h \sin \alpha] \cdot h \cos \alpha d\alpha d\beta \quad (3)$$

式中: h 表示射线源中心到原点 O 的距离; $g(\rho, \theta)$ 为所得投影; $s(x \cos \theta + y \sin \theta - \rho)$ 表示滤波函数的反傅里叶变换; $F(x, y)$ 为滤波反投影; φ 为转换过程中的夹角 $x = r \cos \varphi, y = r \sin \varphi, \rho = h \sin \alpha$.

对 FGT 处理的缺陷图以 0:0.5°:179.5° 为旋转角度进行 180° 投影获取投影数据,然后进行快速傅里叶变换,通过改进的滤波器进行滤波去噪,消除伪影后进行反投影变换实现缺陷图像的重构。图 5 分别为对应裂纹和未熔合缺陷的重构图像。

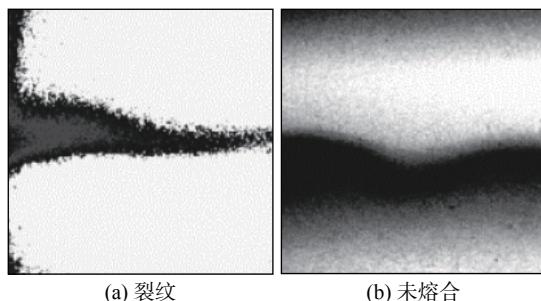


图 5 滤波反投影重构图

Fig. 5 Filtering back projection reconstruction image.
(a) crack; (b) unfused

图像信噪比(SNR)能够较好表征图像质量,以未处理的磁光灰度图像作为参考,得出处理后图像的信噪比如表 3 所示,对比可知 FGT-FBP 处理的图像信噪比明显提高,对比度增强。分别提取经过预处理、FGT 和 FGT-FBP 处理的裂纹和未熔合图像的 100 列灰度值如图 6 所示,其中图 6a 为裂纹的灰度分布图,可看出经过 FGT-FBP 处理的缺陷特征表征最清晰,边缘特征更陡峭。此外, A, B 两处的灰度振铃明显减弱,说明其灰度伪影减弱。相对于 FGT 处理图, X1, X2 两处可看出图像灰度带边缘被平滑,但边缘依然清晰。图 6b 为未熔合的灰

3 滤波反投影重构

由于模糊变换后的图像依然存在噪声、伪影以及边缘模糊等问题,所以考虑利用滤波反投影算法进行滤波去噪,改善图像质量^[12]。令 $M(\alpha, \beta)$ 为扇形射线束投影,其一条射线束可以表示为 $l(\rho, \theta)$,根据平行射线成像集合的卷积反投影式(2)可以推导变换得到滤波反投影的基本扇形重建式(3),即

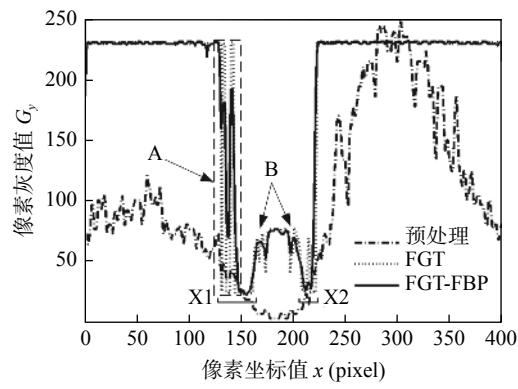
(2)

(3)

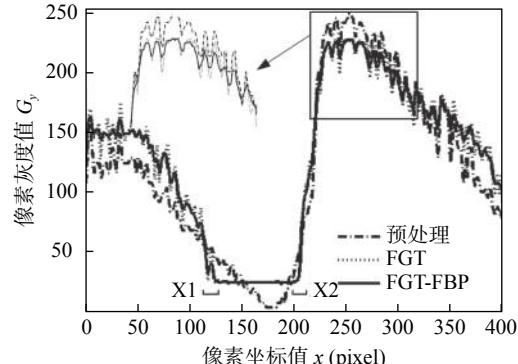
表 3 磁光图像的信噪比

Table 3 Signal to noise ratio of the magneto-optical image

处理类别	裂纹	未熔合
预处理	1.6507	2.1045
FGT	5.5381	2.8706
FGT-FBP	5.5392	2.8816



(a) 裂纹缺陷的第 100 列灰度分布



(b) 未熔合缺陷的第 100 列灰度分布图

Fig. 6 Grayscale distribution of column vectors. (a) crack; (b) unfused

度分布图,同样也能看出经过FGT-FBP的图像的缺陷特征最明显,且从标记的放大图可以看出灰度分布振铃相对减弱,图像伪影减少。FGT-FBP方法使图像中的缺陷凸显,区域面积更清晰。

4 试验结果与分析

经过FGT-FBP算法处理的两种缺陷图像的对比度明显增强,噪声和伪影相对减少。分别对图像进行Otsu最佳阈值分割,如图7所示。图7a为裂纹分割图,图7b为未熔合分割图。为充分说明该方法能够实现焊接缺陷的检测,分别对两种缺陷预处理后的阈值分割图像和经过FGT-FBP处理的阈值分割图像的第30列、第158列、第200列、第260列、第300列等处的列向量灰度特征随机提取进行分析讨论。图8为两种缺陷列向量灰度分布图,灰度值均被归一化。其中原始图像记为Y1,预处理的阈值分割图记为Y2,FGT-FBP的阈值分割图记为Y3。图8a中N1对应裂纹区域,预处理方法显示该缺陷的跨度0~250 pixel之间,FGT-FBP显示的跨度为120~240 pixel之间,对比原始图像的灰度特征可以看出FGT-FBP获取的缺陷较准确。图8b中N2为未熔合区域,其左侧两种方法的缺陷特征基本重合,但右侧预处理方法的灰度值波动较大,表征不准确。分析可见预处理方法提取的缺陷存在大小模糊和位置不准确等缺点,相反FGT-FBP在该方面有很大改进和完善。但仅以某一列的灰度特征分布并不能说明其有效性,因此分别对两种缺陷随机提取其五列灰度特征作均方误差计算,如图9所示。

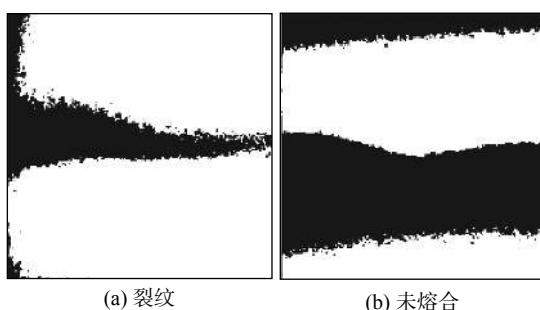
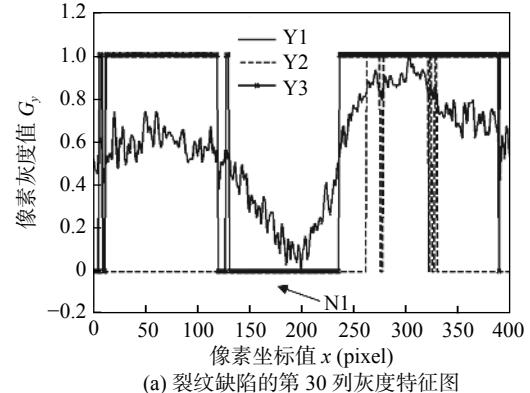


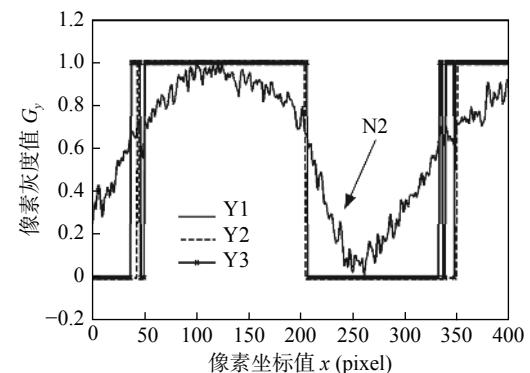
图7 FGT-FBP的阈值分割图

Fig. 7 FGT-FBP threshold segmentation graph. (a) crack; (b) unfused

图9中均方误差值较大的原因是参考对象为原始图像,但仍有表征意义。对于裂纹,FGT-FBP的均方误差均小于预处理方法的均方误差,说明FGT-



(a) 裂纹缺陷的第30列灰度特征图



(b) 未熔合缺陷的第158列灰度特征图

图8 列向量灰度分布图

Fig. 8 Grayscale distribution of column vectors. (a) crack; (b) unfused

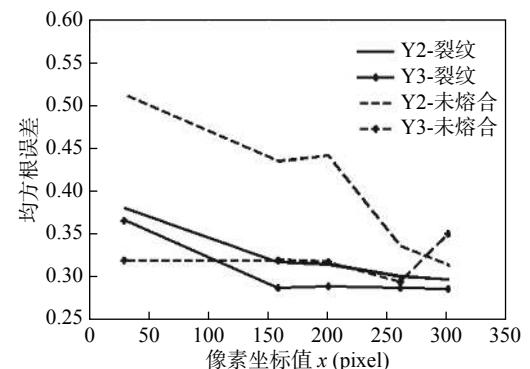


图9 列向量的灰度均方根误差图

Fig. 9 Grayscale mean square errors of column vector

FBP获取的缺陷误差范围较小,缺陷信息较准确。对于未熔合,FGT-FBP的第300列灰度均方根误差大于预处理方法,原因主要是未熔合缺陷的横向跨度窄,第300列不包含在缺陷区域。在其缺陷区域内,如第200列、第260列FGT-FBP的均方误差均小于预处理方法的均方误差,说明FGT-FBP能够获取焊接缺陷。最后对阈值分割图利用Canny算子边缘提取。如图10所示,相对于图10a的预处理方法,图10b所提取的缺陷边缘清晰,噪声较少,几何特征完整,能够满足焊接缺陷检测的要求。

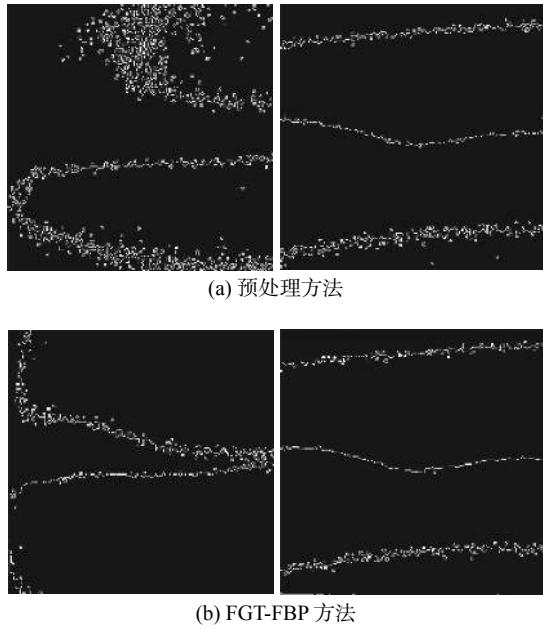


图 10 Canny 算子边缘检测图

Fig. 10 Edge detection graph of Canny algorithm. (a) pre-treatment method ; (b) FGT-FBP method

5 结论

(1) FGT-FBP 重构算法能够增强磁光图像对比度, 去除噪声, 保留焊接缺陷的细节, 弥补图像预处理操作的信息缺失, 突出裂纹和未熔合缺陷的几何和边缘特征.

(2) FGT-FBP 结合阈值分割和边缘提取检测方法, 能够准确提取裂纹和未熔合缺陷的几何特征.

参考文献

- [1] Zhang Y X, You D Y, Gao X D, et al. Welding defects detection based on deep learning with multiple optical sensors during disk laser welding of thick plates[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 51: 87 – 94.
- [2] Chen Y Q, Gao X D, Xiao Z L, et al. Experimental study of weld position detection based on keyhole infrared image during high power fiber laser welding[J]. China Welding, 2015, 24(3): 45 – 51.
- [3] Wang J J, Fu P L, Gao R X. Machine vision intelligence for

product defect inspection based on deep learning and Hough transform[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 51: 52 – 60.

- [4] Bernieri A, Ferrigno L, Laracca M, et al. Ultrasonic NDT on aluminum bars: an experimental performance comparison of excitation and processing techniques[J]. Measurement, 2018, 128: 393 – 402.
- [5] Ai Y, Jiang P, Wang C, et al. Investigation of the humping formation in the high power and high speed laser welding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 107: 102 – 111.
- [6] Li E, Kang Y, Tang J. A new micro magnetic bridge probe in magnetic flux leakage for detecting micro-cracks[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2018, 37(3): 46:1 – 9.
- [7] Gao X D, Lan C Z, You D Y, et al. Weldment nondestructive testing using magneto-optical imaging induced by alternating magnetic field[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2017, 36(3): 55:1 – 11.
- [8] Gao X D, Ma N J, Du L L. Magneto-optical imaging characteristics of weld defects under alternating magnetic field excitation[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 9972 – 9983.
- [9] Deng Y, Liu X, Udpal L. Magneto-optic imaging for aircraft skins inspection: a probability of detection study of simulated and experimental image data[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2012, 61(4): 901 – 908.
- [10] 刘习文, 陈显明, 刘超英. 基于拉东变换和模糊增强的结构光焊缝跟踪图像处理 [J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 19 – 22.
Liu Xiwen, Chen Xianming, Liu Chaoying. Image processing in welding seam tracking with structure light based on radon transform and fuzzy-enhancement[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(2): 19 – 22.
- [11] Pal S K, King R A. Image enhancement using smoothing with fuzzy sets[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 2007, 11(7): 494 – 501.
- [12] Qu H Y, Xu F, Hu X F, et al. A novel denoising method based on Radon transform and filtered back-projection reconstruction algorithm[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2012, 50(4): 593 – 598.

第一作者简介:周晓虎, 1992 年出生, 硕士; 主要研究方向为无损检测; Email: gaoxh666@126.com.

通信作者简介:高向东, 教授, 博士研究生导师; Email: gaoxd666@126.com.

(编辑: 郑红)