

微间隙焊缝磁光成像小波多尺度融合检测

高向东¹, 黄冠雄¹, 萧振林², 陈晓辉²

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006; 2. 广州番禺高勋染整设备制造有限公司, 广州 511400)

摘 要: 针对微间隙(小于0.1 mm)对接焊缝, 通过对焊件施加感应磁场, 并利用法拉第旋光原理构成的磁光传感器, 获取焊缝磁光图像. 为了获取焊缝的准确位置, 研究一种焊缝磁光图像的小波多尺度信息融合边缘检测方法. 对焊缝磁光图像进行3层小波分解, 获得包含焊缝边缘信息的小波高频图像. 根据各尺度高频信息包含的细节丰富度, 融合各尺度高频图像, 然后用小波模局部极大值对融合图像进行边缘检测, 得到抗噪性和连续性好、定位精度高的焊缝边缘, 最后进行焊缝跟踪试验. 结果表明, 磁光图像小波多尺度信息融合是一种有效的焊缝边缘提取方法, 适用于磁光成像传感的微间隙焊缝跟踪图像处理过程.

关键词: 磁光成像; 微间隙焊缝; 边缘检测; 小波变换; 信息融合

中图分类号: TG 409 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)04-0001-04

0 序 言

随着激光焊接技术日趋广泛的应用, 对激光焊接的质量也提出了更高的要求, 其中精确的焊缝识别和跟踪是保证激光焊接质量的关键^[1,2]. 基于磁光成像传感的焊缝识别是一种精确检测焊缝位置的新方法^[3]. 由磁场感应器在焊件中激励出感应磁场, 磁场分布将在焊缝间隙处发生改变, 磁光传感器在该磁场的作用下产生焊缝磁光图像. 该方法主要用于检测紧密对接、无坡口、间隙小于0.1 mm的微间隙焊缝.

焊缝边缘是焊缝磁光图像的最主要特征, 获取准确的焊缝边缘信息是焊缝磁光图像处理的关键步骤. 传统的边缘提取算法的优点是计算量小、实现简单, 但由于磁光传感器对工业现场的电、磁等干扰非常敏感, 导致获取的焊缝磁光图像的边缘复杂性大大增加, 使这些方法检测到的焊缝边缘往往比较粗糙, 抗噪性能和焊缝边缘定位精度有待进一步提高.

小波变换具有良好的时频分析和多尺度分析能力, 而图像边缘可以看作二维信号的突变点, 与突变信号相对应的小波分解系数在子带中显著地保留,

而噪声会迅速减少, 这是小波应用于边缘提取的理论依据. 结合焊缝磁光图像的实际情况, 提出一种基于小波分析多尺度融合的边缘检测方法, 提取焊缝磁光图像的边缘特征, 并与传统的边缘检测算法进行分析比较, 最后进行焊缝跟踪试验, 试验结果表明根据该方法提取的边缘获得的焊缝位置准确, 焊缝跟踪效果理想.

1 焊缝磁光成像及试验系统

1.1 法拉第磁光旋转效应

如图1所示, 当一束线偏振光在介质中传播时, 若在平行于光的传播方向上外加磁场, 则光的振动方向将发生偏转, 偏转角度 η 与磁感应强度 B 和光穿越介质的长度 D 的乘积成正比, 即

$$\eta = VBD \quad (1)$$

式中: 系数 V 为介质材料的费尔德(Verdet)常数.

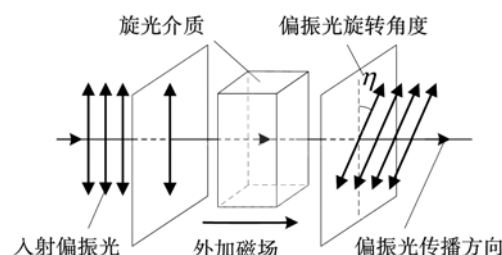


图1 法拉第磁光效应原理

Fig. 1 Schematic of Faraday magneto-optical effect

收稿日期: 2014-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175095); 广东省协同创新与平台环境建设专项资助项目(2015B090901013); 广东省重大科技专项资助项目(2014B090921008); 广州市科学研究专项资助项目(1563000554); 佛山市科技创新专项资助项目(2014AG10015)

1.2 磁光传感成像原理

图2为磁光传感成像原理。由单色高功率发光二极管发出的光经起偏器变为线偏振光,通过磁光介质并被光反射面反射。由于光反射面下方焊缝处的垂直磁场分量发生变化,线偏振光的偏振方向在磁光效应的作用下发生一定角度的偏转,包含了焊缝信息的线偏振光经检偏器检偏后被成像装置接收,形成焊缝磁光图像。

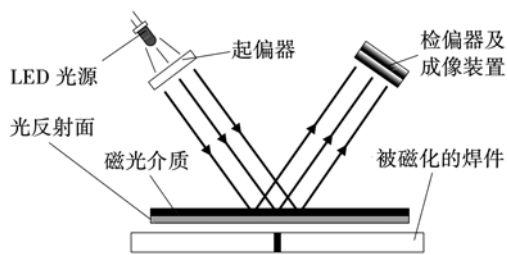


图2 磁光传感成像原理

Fig. 2 Schematic of magneto-optical imaging device

1.3 试验系统

图3为激光焊接试验系统。磁场发生器位于焊件下方,用于磁化焊件。磁光传感器位于焊缝上方约5 mm处,用于采集焊缝磁光图像并存储到计算机中。

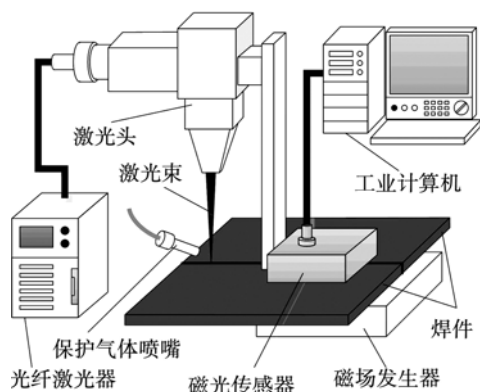


图3 试验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

2 小波变换多尺度融合边缘检测

2.1 小波变换边缘检测原理

在小波多分辨率分析中,定义尺度函数 $\psi(t)$ 和小波函数 $\varphi(t)$ 分别具有低通滤波和高通滤波的特性。多尺度小波边缘检测的过程首先利用一个二阶可导平滑函数对图像进行平滑,选择平滑函数的一阶导数作为小波函数 $\varphi(t)$,然后由小波变换系数的

模极大值进行边缘检测^[4]。

如果二维函数 $\theta(x, y)$ 的积分非零,且满足

$$\theta(x, y) = O\left(\frac{1}{(x^2 + 1)(y^2 + 1)}\right) \quad (2)$$

式中: O 表示算法复杂度,则称 $\theta(x, y)$ 为二维平滑函数。

由于高斯函数无论在时域还是频域都是最优函数,所以采用二维高斯函数作为平滑函数,即

$$\theta(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

式中: σ 的取值范围为0.8~1.25。 σ 变化幅度较小,对抗噪性和定位精度的影响也较小,取 $\sigma = 1$ 。令

$$\theta_s(x, y) = \frac{1}{s^2} \theta\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \quad (4)$$

式中:若小波分解级数为 j ,则 $s = 2^j$ 表示小波变换的尺度^[4]。平滑函数 $\theta_s(x, y)$ 分别对 x, y 求一阶偏导数,则两小波函数为

$$\varphi_s^{(1)}(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x} = \frac{1}{s^2} \varphi_s^{(1)}\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \quad (5)$$

$$\varphi_s^{(2)}(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y} = \frac{1}{s^2} \varphi_s^{(2)}\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \quad (6)$$

设信号函数 $f(x, y) \in L^2(R^2)$, L 表示线性空间,则在尺度 $s = 2^j$ 时,信号 $f(x, y)$ 的小波变换在水平方向和垂直方向的两个高频分量可以定义为

$$W_s^{(1)}f(x, y) = f(x, y) * \varphi_s^{(1)}(x, y) \quad (7)$$

$$W_s^{(2)}f(x, y) = f(x, y) * \varphi_s^{(2)}(x, y) \quad (8)$$

式中:符号“*”表示卷积。

由于梯度矢量的模(梯度幅值)正比于小波变换的模^[4],因此梯度幅值可由式(9)计算,即

$$\text{Mod}_s f(x, y) = \sqrt{|W_s^{(1)}f(x, y)|^2 + |W_s^{(2)}f(x, y)|^2} \quad (9)$$

梯度矢量与水平方向的夹角(梯度幅角)可由式(10)计算,即

$$\text{Ang}_s f(x, y) = \arctan\left(\frac{W_s^{(1)}f(x, y)}{W_s^{(2)}f(x, y)}\right) \quad (10)$$

为了便于阈值的选取,将梯度幅值归一化。梯度幅值归一化计算为^[5]

$$\text{Mod}_s f(x, y) = \frac{\text{Mod}_s f(x, y)}{\max(\text{Mod}_s f(x, y))} \quad (11)$$

式中: $\max(\text{Mod}_s f(x, y))$ 为 $\text{Mod}_s f(x, y)$ 的最大值。

在尺度 s 上,沿幅角方向求得的梯度矢量模局部极大值的点即为图像的灰度信息突变点。用单阈值方法对这些突变点进行筛选,得到焊缝图像边缘点。即设定阈值 T ,扫描所有检测出的突变点(梯度模局部极大值点),如果该点的梯度幅值 $\text{Mod}_s f(x, y) > T$,则标记该点为焊缝边缘特征点,并置为1;如

果该点的梯度幅值 $\text{Mod}_s f(x, y) \leq T$, 则标记该点为非边缘特征点, 并置为 0。

2.2 多尺度边缘融合

焊缝磁光图像的边缘信息包含在小波分解后多个尺度的高频分量中, 因此要很好提取出焊缝图像边缘就需要在多个尺度下进行检测。在小尺度下, 图像的边缘细节信息较为丰富, 边缘定位精度较高, 但易受到噪声的干扰; 在大尺度下, 图像的边缘稳定, 抗噪性好, 但定位精度不足; 因此解决的方法是融合各个尺度下的高频边缘信息, 发挥各个尺度的优势^[6], 最后得到较精确的单像素宽的焊缝边缘。

设在尺度 $s = 2^j$ 下得到焊缝图像水平和垂直方向上的高频小波系数为 $W_{2^j}^{(1)}$ 和 $W_{2^j}^{(2)}$, 则多尺度融合后两个方向的高频小波分量计算规则为

$$W^{(1)} = \sum_{j=1}^J \alpha_{2^j} W_{2^j}^{(1)} \quad (12)$$

$$W^{(2)} = \sum_{j=1}^J \alpha_{2^j} W_{2^j}^{(2)} \quad (13)$$

式中: J 表示小波分解的总层数; α_{2^j} 表示尺度 2^j 上的小波系数的融合加权因子, 且有 $\sum_{j=1}^J \alpha_{2^j} = 1$ 。再使用小波模极大值的方法对融合后的高频图像进行检测, 即可得到抗噪性好, 定位精度高的焊缝边缘。

3 试验与结果分析

3.1 焊缝磁光图像边缘提取

图 4a 为焊件实物照片, 图 4b 为对应的焊缝磁光图像, 图像分辨率为 512 像素 \times 512 像素。试验中首先对原图像进行 3 层小波分解, 即 $J = 3, s = 2^3$, 得到各个尺度下焊缝磁光图像水平方向和垂直方向上的小波高频图像。分解得到的高频图像每个像素的值表示在该位置处的小波系数的大小, 将所有小波系数的值进行如下的归一化处理, 即

$$H_s(i, j) = \frac{H_s(i, j)}{\max(H_s)} \quad (14)$$

式中: H_s 表示尺度 s 下水平或垂直方向的小波分解高频图像。

用多尺度融合方法对多个尺度上水平和垂直方向上的高频图像分别进行融合, 经过多次试验, 设置各个尺度的融合加权因子为 $\alpha_2^1 = 0.1, \alpha_2^2 = 0.2, \alpha_2^3 = 0.7$ 时, 融合效果较为理想。最后用小波模极大值边缘检测方法对融合后的焊缝高频图像进行边缘提取, 分割阈值 $T = 0.1$ 。对阈值分割后的图像去除小面积块, 最终提取出来的焊缝边缘如图 5f 所示。为了验证此方法对于焊缝磁光图像边缘提取的效果, 对原始焊缝磁光图像中值滤波后, 分别用几种传统

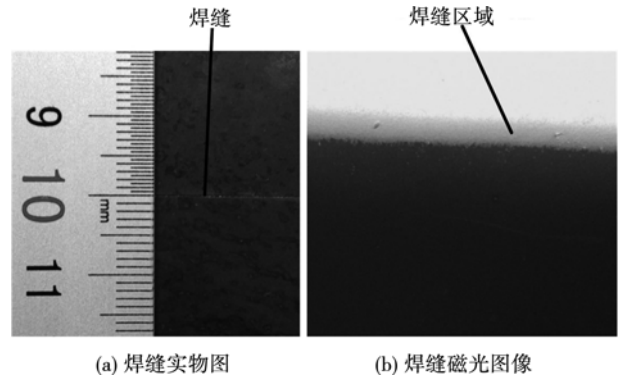


图4 焊件实物图与焊缝磁光图像

Fig. 4 Photo of weldment and magneto-optical image of weld joint

的边缘检测算子进行边缘检测试验与比较, 检测结果如图 5a ~ 图 5e 所示。

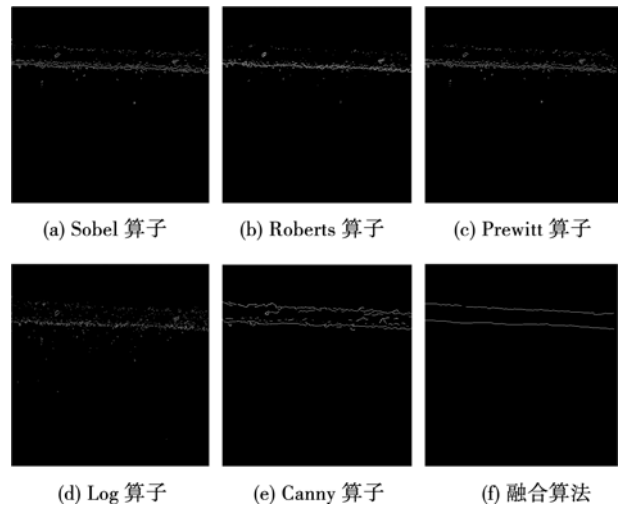


图5 焊缝边缘提取结果

Fig. 5 Result of weld joint edge detection

表 1 中 4 连通点比例和 8 连通点比例是 4 连通点和 8 连通点分别占边缘点总数的比例, 是表征边缘曲线连通性与平滑度的参数。连通点比例越高, 则边缘连通性与平滑度越好。综合考虑焊缝边缘图像的主观视觉效果和数据分析可以看出, 融合算法

表1 焊缝边缘连通性比较

Table 1 Comparison of connectivity of weld edges

	融合 算法 $F(\%)$	Canny 算子 $C(\%)$	Prewitt 算子 $P(\%)$	Sobel 算子 $S(\%)$	Roberts 算子 $R(\%)$	Log 算子 $L(\%)$
4 连通点 比例	99.3	99.3	95.2	94.8	94.0	76.1
8 连通点 比例	94.6	92.5	70.0	69.7	76.0	42.3

提取的边缘优于其它算子的结果,边缘平滑度和连续性好,检测效果良好。

3.2 焊缝跟踪试验及误差分析

为了进一步验证所提出方法的有效性,进行了焊缝跟踪的测量试验和误差统计分析。焊件尺寸为 $185\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 90\text{ mm}$, 焊缝间隙小于 0.1 mm , 磁光传感器采样速度为 25 幅/s , 焊缝跟踪速度为 4 mm/s , 图像标定为 102 像素/mm 。图 6 为焊缝位置实际值与跟踪值, 右下角为方框所选区域局部放大图。实际焊缝路径根据磁光传感器与自带摄像头相对坐标关系给出。图 7 为焊缝跟踪误差的绝对值, 表 2 为跟踪误差统计结果。

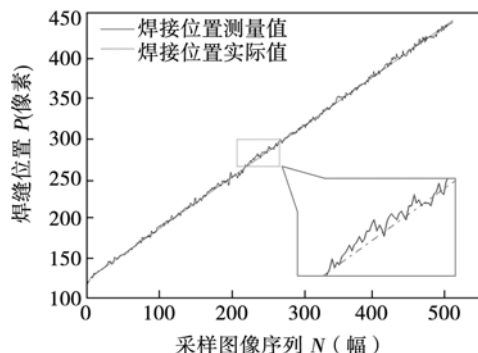


图 6 焊缝中心位置跟踪值与实际值

Fig. 6 Tracking value and actual value of weld joint

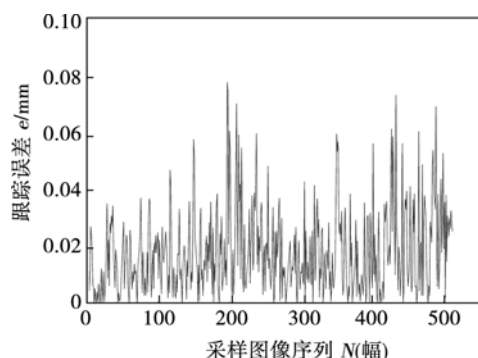


图 7 焊缝位置跟踪误差

Fig. 7 Errors of tracking value of weld joint

表 2 焊缝跟踪误差统计

Table 2 Statistics of tracking error of weld joint

标准误差	最大误差	最小误差	平均误差	均方根误差
E_{STD}/mm	E_{MAX}/mm	E_{MIN}/mm	E_{AVE}/mm	E_{RMSE}/mm
0.015	0.078	0.001	0.018	0.024

从图 6 可以看出, 焊缝跟踪曲线与实际焊缝曲

线基本重合, 说明用所提出的方法能较精确地定位焊缝位置。同时由图 7 及表 2 中的误差统计分析可以看出, 根据融合算法提取的焊缝位置跟踪误差小, 进行焊缝跟踪的精度高。

4 结 论

(1) 基于小波多尺度融合的边缘检测方法是针对微间隙焊缝磁光图像的一种有效的焊缝边缘检测方法, 其抗噪性能好, 定位准确。

(2) 利用该方法对焊缝磁光图像进行边缘检测, 检测出的焊缝边缘图像连续、清晰, 提取出来的焊缝中心位置跟踪定位精度高, 适用于磁光成像传感的微间隙焊缝跟踪图像处理过程。

参考文献:

- [1] Gao Xiangdong, Zhong Xungao, You Deyong, *et al.* Kalman filtering compensated by radial basis function neural network for seam tracking of laser welding[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(5): 1916–1923.
- [2] 邹怡蓉, 都 东, 曾锦乐, 等. 基于多视觉特征获取与信息融合的焊道识别方法[J]. 焊接学报, 2013, 34(5): 33–36.
Zou Yirong, Du Dong, Zeng Jinle, *et al.* Visual method for weld seam recognition based on multi-feature extraction and information fusion[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(5): 33–36.
- [3] 高向东, 甄任贺. 微间隙焊缝磁光成像检测方法[J]. 焊接学报, 2014, 35(4): 11–14.
Gao Xiangdong, Zhen Renhe. A method to detect micro weld joint based on magneto-optical imaging[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(4): 11–14.
- [4] Niya J M, Aghagolzadeh A. Wavelet-based edge detection using directional wavelet transform[J]. Wseas Transactions on Signal Processing, 2006, 2(2): 74–79.
- [5] 曾接贤, 邢小军. 小波变换三阈值多尺度融合边缘检测算法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(6): 177–180.
Zeng Jiexian, Xing Xiaojun. Improved wavelet-based 3 thresholds and multi-scale integration edge detection algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(6): 177–180.
- [6] 连 静, 王 珂. 基于多尺度融合技术的图像边缘检测[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(5): 853–858.
Lian Jing, Wang Ke. Image edge detection based on multi-scale fusion technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(5): 853–858.

作者简介: 高向东, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为焊接自动控制。发表论文 190 余篇。Email: gaoxid666@126.com