

文章编号 1004-924X(2019)08-1863-07

## 磁光成像漏磁特征在焊接缺陷轮廓重构中的应用

高向东<sup>\*</sup>, 周晓虎, 李彦峰, 代欣欣, 张南峰

(广东工业大学 广东省焊接工程技术研究中心, 广东 广州 510006)

**摘要:** 为了实现焊接缺陷的检测与评估, 提出将交变磁场激励下磁光成像的漏磁特征应用于焊接缺陷的轮廓重构当中, 建立漏磁重构模型, 研究焊接缺陷的二维轮廓特征。首先根据交变磁场下的漏磁场的形成机理, 讨论漏磁场分量  $B_y$ ,  $B_z$  两种漏磁信号与缺陷轮廓存在的关系。再利用数值模拟方法获取数据, 训练其广义回归神经网络 (Generalized Regression Neural Network, GRNN) 来确定该模型并说明漏磁场信号可以实现缺陷轮廓重构。最后, 将磁光成像漏磁特征的数据应用于模型训练, 确定重构的可行性。试验结果表明, 应用磁光成像漏磁特征的图像数据与仿真获得的轮廓重构规律一致, 能够实现焊接缺陷二维轮廓重构。在一定范围内, 缺陷深度越大 (不小于 0.45 mm), 重构效果越好。

**关键词:** 漏磁场信号; 缺陷轮廓; 神经网络; 磁光成像

中图分类号: TG115 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20192708.1863

## Application of magneto-optical imaging magnetic flux leakage characteristics in contour reconstruction of welding defects

GAO Xiang-dong<sup>\*</sup>, ZHOU Xiao-hu, LI Yan-feng, DAI Xin-xin, ZHANG Nan-feng

(Guangdong Provincial Welding Engineering Technology Research Center,  
Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

<sup>\*</sup> Corresponding author, E-mail: gaoxd@gdut.edu.cn

**Abstract:** In this study, to detect and evaluate welding defects effectively, magnetic flux leakage characteristics of magneto-optic imaging under alternating magnetic field excitation are proposed for application in the contour reconstruction of welding defects. A magnetic flux leakage reconstruction model was also established to study the two-dimensional contour characteristics of welding defects. First, based on the formation mechanism of a leakage magnetic field under an alternating magnetic field, the relationship between the two leakage magnetic field component signals ( $B_y$  and  $B_z$ ) and the defect contour was discussed. Second, a generalized regression neural network was trained using numerical simulation data, to determine the model and to show that the leakage magnetic field signal can achieve defect contour reconstruction. Finally, the data derived from magneto optic imaging magnetic leakage characteristics were applied to the training of the model, to determine the feasibility of reconstruction. Experimental results show that the image data of the magnetic flux leakage characteristics are consistent with the contour reconstruction rule obtained through simulation, and a

收稿日期: 2018-11-07; 修订日期: 2019-01-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51675104); 广东省科技计划资助项目 (No. 2016A010102015); 广东省教育厅创新团队项目 (No. 2017KCXTD010)

two-dimensional contour reconstruction of welding defects can be realized. Within a specific range, the greater (no less than 0.45 mm) the depth of the defect, the better the reconstruction effect.

**Key words:** leakage magnetic field signal; defect contour; neural network; magneto-optical imaging

## 1 引言

焊接缺陷的检测方法主要包括:目视检测、超声检测、射线检测、渗透检测、磁粉检测、涡流检测和漏磁检测等方法,但都有其局限性<sup>[1]</sup>。如目视检测人员要求较高;射线检测辐射较大,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;涡流检测存在集肤效应而检测能力不足。漏磁检测方法操作简单,无需损坏工件而被广泛应用,尤其是在焊接缺陷、石油管道缺陷、储罐底板缺陷和钢丝绳缺陷方面的无损检测应用。

但是检测过程中对缺陷几何尺寸的重新定义和评估还存在一定的困难。通过获取缺陷处漏磁场信号实现缺陷的评估方式包含:缺陷识别、缺陷分类、缺陷量化和缺陷重构 4 种形式,缺陷识别侧重于对缺陷有无的判断;缺陷分类则是在识别的基础上对缺陷的类型的划分和判断;缺陷量化主要对漏磁信号的分析量化;而缺陷重构是将传感器检测的漏磁信号通过反演练方法实现缺陷的二维或三维轮廓重构,对实际缺陷的分析和还原具有重要作用<sup>[2]</sup>。有学者提出用遗传算法优化径向神经网络算法建立漏磁场的关系模型实现二维缺陷重构<sup>[3]</sup>;或有学者利用缺陷处的畸变信息作为小波神经网络的输入对缺陷深度进行预测,进而获取实际缺陷的深度信息服务于缺陷轮廓的准确重构<sup>[4]</sup>;也有学者通过粒子滤波算法建立状态空间模型,将漏磁场信号的反演问题转化成目标跟踪预测问题来实现缺陷轮廓的重构<sup>[5]</sup>。以上方法都能凭借漏磁信号实现缺陷二维轮廓的重构,但基本都是获取恒定磁场下的漏磁场切向分量信号且仅依赖于理论仿真数据来实现重构,很少涉及法向分量。因此提出将交变磁场下的磁光成像漏磁特征(法向分量),应用于焊接缺陷的轮廓重构,首先通过模拟仿真方法验证法相分量可以通过重构算法实现缺陷重构,再利用磁光成像漏磁特征的图像数据实现焊接缺陷的轮廓重构。

## 2 磁光成像漏磁信号分析

磁光成像漏磁原理如图 1 所示,将交变磁场

发生器作用于焊件,通过改变电压或电流的方式将焊件磁化至近饱和状态,当焊件存在缺陷,缺陷处的磁导率会降低,磁阻相应增大,引起该处的磁通密度分布不均匀形成漏磁场,磁光传感器将这种畸变转化为光强度的变化,经过检偏器投影被 CMOS 相机接收形成磁光图并保存<sup>[9]</sup>。漏磁场分为水平切向分量  $B_x$ ,  $B_y$  和垂直法向分量  $B_z$ 。

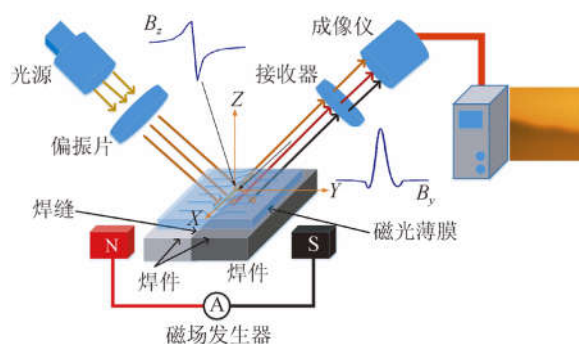


图 1 磁光成像漏磁检测原理

Fig. 1 Principle of magnetic flux leakage imaging for magneto-optical imaging

针对尺寸为  $2\text{ mm} \times 0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$  的缺陷,建立励磁电压为 25 V、频率为 50 Hz 的交变磁场下的漏磁场检测有限元模型,并提取缺陷处漏磁场信号  $B_y$  和  $B_z$ ,如图 2 所示,图中的采样距离表示提取信号线的长度,缺陷宽度中心位置的左侧为负,右侧为正,零表示为轮廓中心。从图 2 可看出切向分量在缺陷中心线处有极值,左右对称,形成峰值距离  $B_{yp}$  和横向距离  $d_y$ 。法向分量则在缺陷边缘处出现两个极值,因极性相反,形成峰峰差值  $B_{zp}$  和峰峰距离  $d_z$ 。与文献[7-8]中恒定磁场下的信号规律基本相同,两种信号均以峰值信息或距离信息等不同的形式反映着相同的缺陷的长度和宽度信息。而缺陷的二维轮廓重构的实质是缺陷深度信息的准确预测,则分别提取交变磁场下不同深度缺陷处的漏磁场分量,如图 3 所示,表示的是不同深度下的漏磁场信号,其中图 3(a)和图 3(b)可看出两种漏磁场分量的幅值均随着缺陷深度的增加而梯度增加。对比恒定磁场,交变磁场激励下的漏磁场信号具有相同特性,可以做出假设,磁场分量  $B_y$ ,  $B_z$  与缺陷深度轮廓存

在映射关系,能够通过重构算法实现缺陷轮廓重构。

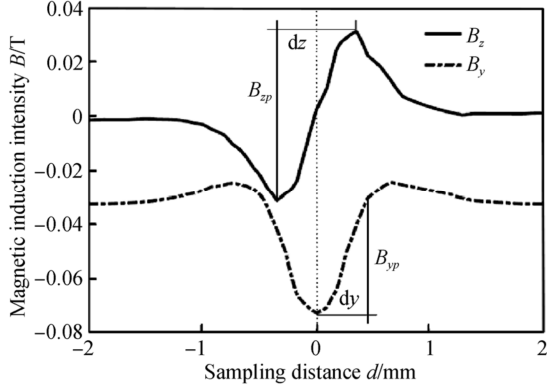
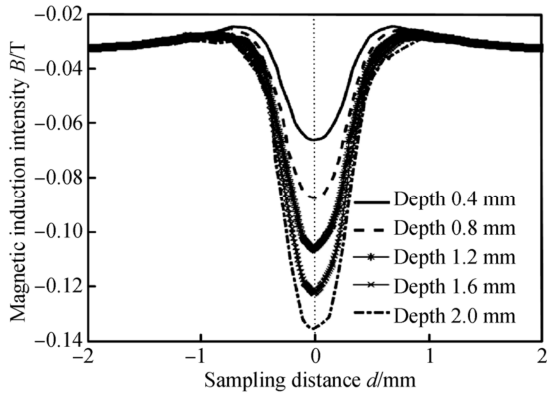


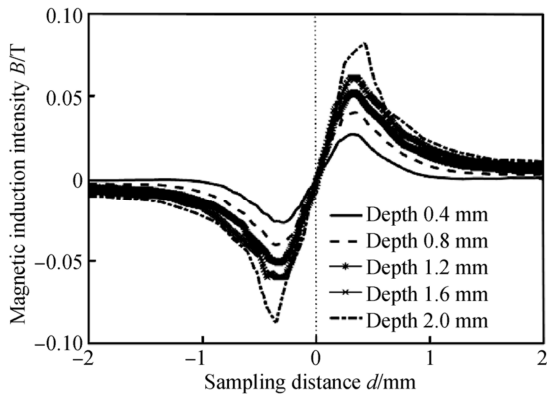
图 2 漏磁场信号图

Fig. 2 Diagram of leakage magnetic field signal



(a)水平切向分量  $B_y$

(a) Horizontal tangential component  $B_y$



(b)垂直法向分量  $B_z$

(b) Vertical normal component  $B_z$

图 3 不同深度下的漏磁信号图

Fig. 3 Diagram of leakage magnetic field signals at different depths

以上假设的论证过程的技术路线如图 4 所示,通过建立关系映射模型说明漏磁场信号能够

用于焊接缺陷二维轮廓重构当中,实现检测与评估。

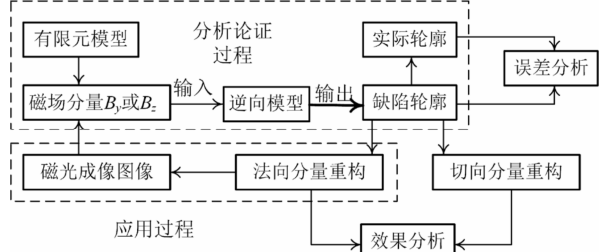


图 4 缺陷轮廓重构技术路线图

Fig. 4 Technical roadmap for defect reconstruction

### 3 GRNN 神经网络缺陷重构方法

#### 3.1 焊接缺陷重构模型

为简化研究模型,将焊接缺陷等效为规则矩形槽,后期以此基础对实际焊接缺陷做深入研究。设取矩形槽宽度方向截面建立模型,以  $x$  轴为采样序列,用  $X=(x_1, x_2, \dots, x_m)$  表示,以  $y$  轴为缺陷深度,每个采样点对应深度用  $Y=(y_1, y_2, \dots, y_m)$  表示,对应采样点的漏磁场用  $B$  或图像灰度值表示,则将模型表示:

$$y(i) = f(B_i), \quad (1)$$

式中  $f(B_i)$  为映射关系,  $i=1, 2, \dots, m$  为对应序列。

#### 3.2 GRNN 神经网络

广义回归神经网络 (Generalized Regression Neural Network, GRNN) 以径向基网络为基础,执行 Parzen 非参数估计,依据最大概率原则输出形成神经网络<sup>[10]</sup>。网络结构如图 5 所示,主要分为输入层、隐含层、求和层和输出层,其中漏磁信号  $B_i=(B_1, B_2, \dots, B_m)$  或图像灰度值为输入层信号,隐含层神经元数目等于实际训练样本数目,对应的传递函数用  $P_k$  表示,如公式(2),其中  $k=1, 2, \dots, s$ 。求和层神经元包含两种,一种是计算各隐含层神经元的代数和,另一种是计算隐含层神经元的加权和,分别对应的传递函数为公式(3)和(4)。输出层为缺陷的深度轮廓  $Y=(y_1, y_2, \dots, y_m)$ ,如公式(5),其中  $j=1, 2, \dots, m$ 。

$$P_k = \exp\left[-\frac{(B-B_i)^T(B-B_i)}{2\sigma^2}\right], \quad (2)$$

$$S_D = \sum_i^n p_k, \quad (3)$$

$$S_j = \sum_i^n y_{ij} p_k, \quad (4)$$

$$y_j = \frac{S_j}{S_D}, \quad (5)$$

其中:  $X$  为输入变量;  $X_i$  为第  $i$  个神经元对应的学习样本;  $S_D, S_j$  为传递函数;  $y_{ij}$  表示第  $i$  个输出样本中对应的第  $j$  个元素;  $\sigma$  为高斯函数的宽度系数。

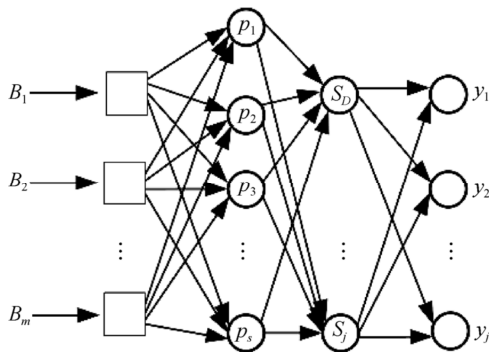


图 5 GRNN 神经网络结构图

Fig. 5 Structure diagram of GRNN neural network

## 4 试验数据获取与结果分析

### 4.1 试验数据获取

试验数据通过有限元仿真和磁光成像试验两种方法获得。仿真法:建立如图 6 所示的漏磁检测模型,涉及参数如表 1 所示,其中激励源的电压为 25 V,频率为 50 Hz,通过设置长为 1~3 mm、宽为 0.5~2 mm、深度为 0.5~3 mm 及变化梯度均为 0.5 mm 的 120 组不同矩形槽模拟缺陷并求解,每组缺陷随机选取 6 处不同位置,每处提高值均为 0.2 mm 的磁感应强度信号形成 720 组不同缺陷的漏磁场数据,每组数据 400 个样本点,形成仿真数据库。磁光成像法:用 TIG 焊机对 45 号钢板进行紧密对接焊,焊接电流为 110 A,并对表面刨光处理,在焊缝区域开矩形槽,实物如图 7 所示。应用激光共聚焦显微镜对所开槽进行精密测量,精度可达到 1  $\mu\text{m}$ ,获取的缺陷轮廓尺寸作为真实缺陷尺寸。交变磁场激励下的磁光成像试验获取的缺陷磁光图像,根据磁光成像原理,其对应的灰度信号代表漏磁信号的法向分量<sup>[11]</sup>。图像采样频率为 75 Hz,则每隔 13.3 ms 采取一张图像,图像大小为 400  $\times$  400 pixel。结合励磁频率为 50 Hz,则每 3 帧图像形成一个采样周期,每个缺陷对应 3 帧不同的图像,如图 8 所示为采集的

连续 3 帧图像。设置缺陷尺寸长(1 mm, 2 mm)、宽(0.5 mm)、深(0.2~1 mm, 增量为 0.2 mm)的 10 组不同缺陷样本,获取 30 幅不同图像,每幅图像提取 10 组信号,形成 300 组缺陷灰度信号的试验样本数据。

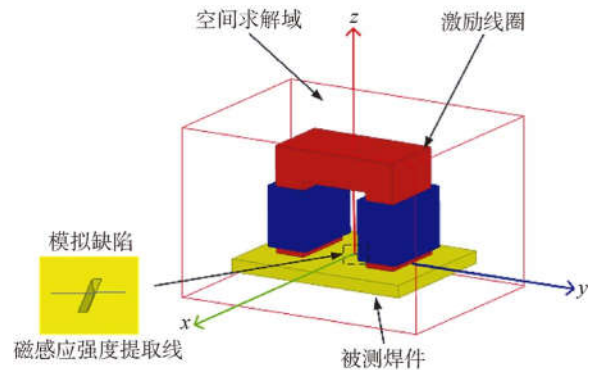


图 6 焊接缺陷检测有限元模型

Fig. 6 Finite element model for welding defect detection

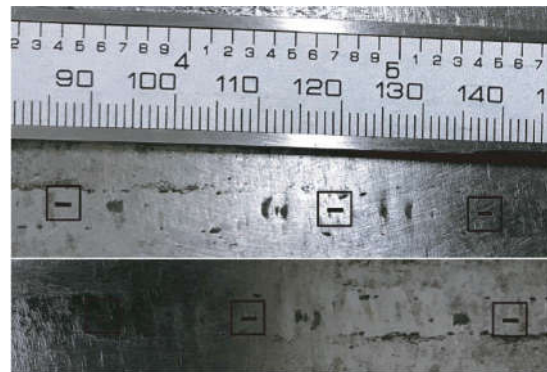


图 7 焊接缺陷实物图

Fig. 7 Physical drawing of weld defects

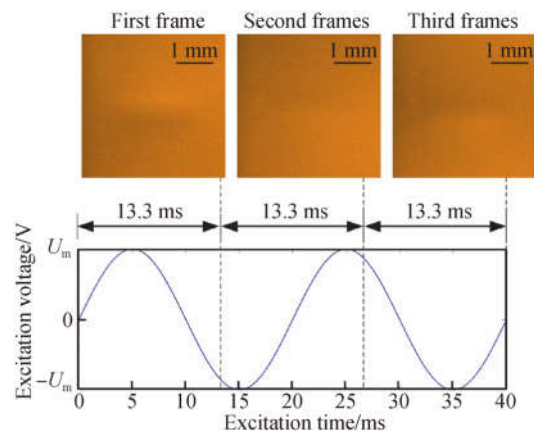


图 8 连续 3 帧磁光图像

Fig. 8 Three frames of magneto-optical images

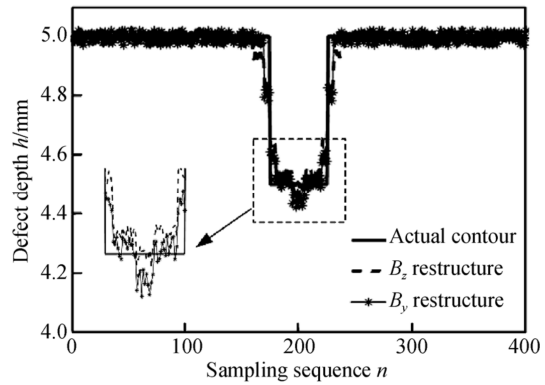
表 1 有限元仿真模型参数表

Tab. 1 Parameters of finite element simulation model

模型	材料	相对磁导率 $\mu$	相对电导率 $\sigma/(s \cdot m^{-1})$	质量密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$
磁轭	硅钢片	8 500	2 000 000	7 650
线圈	铜	0.999 991	58 000 000	8 933
缺陷样本	45 号钢	670	33 000 000	7 850

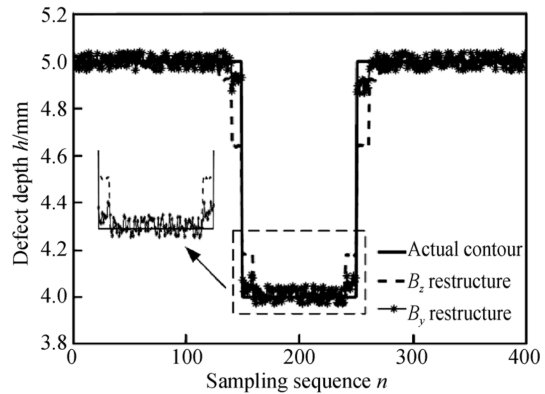
4.2 结果与分析

通过仿真获得数据库进行神经网络训练,随机选择缺陷尺寸分别为  $3\text{ mm} \times 0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ ,  $3\text{ mm} \times 1.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$  和  $2\text{ mm} \times 1.0\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$  的 3 组缺陷作为测试样本,缺陷重构结果如图 9 所示。图中  $B_z$  重构表示通过漏磁场法向分量获得的缺陷轮廓,  $B_y$  重构是通过漏磁场切向分量获得的缺陷轮廓,缺陷深度表示以工件上表面(5.0 mm 处)为基准向下凹陷的尺寸,采样序列  $n$  表示提取的信号点数。由图 9(a)~图 9(c)可看出应用两种漏磁场分量都能通过 GRNN 神经网络实现焊接缺陷二维轮廓重构,将图中的轮廓放大处理,再结合表 2 的两种漏磁信号获得重构均方根误差(为增加对比性,均方根误差只计算缺陷区域),可看出切向分量获得的缺陷轮廓明显比法向分量好。因此得出应用漏磁场的两种分量能通过重构方法实现缺陷轮廓重构,只是重构效果不同。说明漏磁场的法向分量实现缺陷轮廓的可行性。



(b)缺陷尺寸为  $3\text{ mm} \times 0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$  重构图

(b)Reconstruction of defect size  $3\text{ mm} \times 0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$



(c)缺陷尺寸为  $2\text{ mm} \times 1.0\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$  重构图

(c)Reconstruction of defect size  $2\text{ mm} \times 1.0\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$

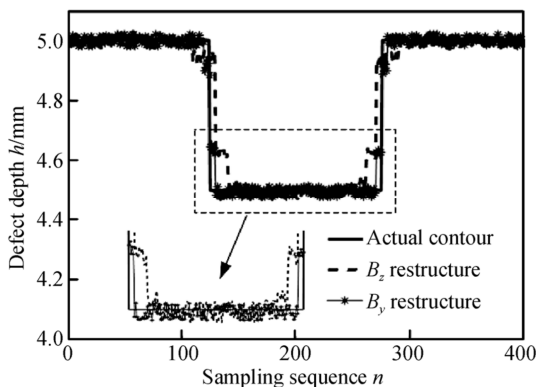
图 9 仿真法的缺陷轮廓重构图

Fig. 9 Reconstruction of defect contour by simulation

表 2 缺陷重构的均方根误差对比表

Tab. 2 Root mean square error comparison table for defect reconstruction

缺陷尺寸/mm	切向分量( $B_y$ )	法向分量( $B_z$ )
$3 \times 0.5 \times 0.5$	0.050 4	0.070 9
$3 \times 1.5 \times 0.5$	0.036 5	0.051 4
$2 \times 1.0 \times 1.0$	0.061 4	0.072 3



(a)缺陷尺寸为  $3\text{ mm} \times 1.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$  重构图

(a)Reconstruction of defect size  $3\text{ mm} \times 1.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$

同时对比两组缺陷得出缺陷的大小尺寸不同,缺陷重构效果也不同。为进一步说明,将仿真数据进行交叉组合,训练多个网络,然后进行分别测试,得到结果如图 10 所示,图中的采样序列  $N$  为所提取缺陷的组数,可以看出当缺陷的长度和深度一定时,随着缺陷宽度增加,两种漏磁场分量获得的重构均方根误差减小;当缺陷的长度和宽度一定时,随着缺陷深度的增加,两种漏磁分量获

得的重构均方根误差增大,说明缺陷重构精度受实际缺陷尺寸大小的影响。同时  $B_y$  分量的重构误差均小于  $B_z$  分量的重构误差,再次说明其  $B_y$  分量的重构效果较好。

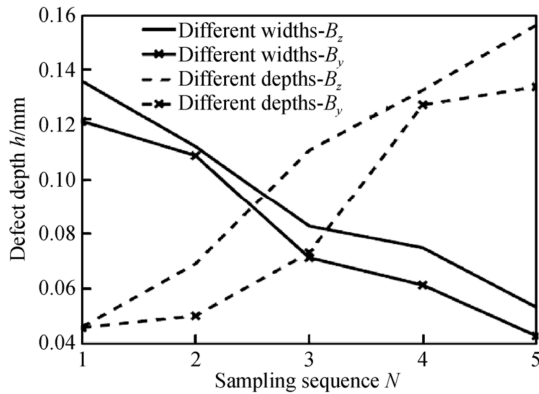
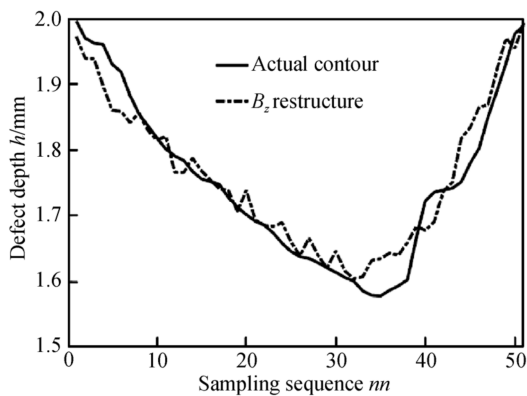


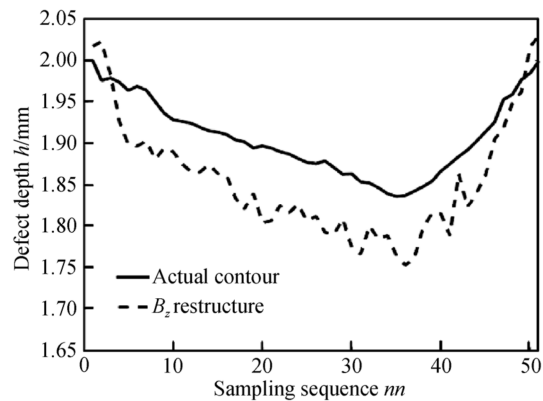
图 10 重构图形的均方根误差图

Fig. 10 Root mean square error of reconstructed graph



(a)深度为 0~0.45 mm 的重构图

(a)Refactoring with depth of 0—0.45 mm



(b)深度为 0~0.15 mm 的重构图

(b)Refactoring with depth of 0—0.15 mm

图 11 磁光法的缺陷轮廓重构图

Fig. 11 Reconstruction of defect profile by magneto-optic method

## 5 结 论

通过研究交变磁场激励下的漏磁场信号特征,提出将交变磁场激励下磁光成像的漏磁特征应用于焊接缺陷的轮廓重构当中。依托数值模拟方法和 GRNN 神经网络重构算法确定漏磁信号与焊接缺陷信息的关系模型,确定漏磁场分量  $B_y$

利用磁光成像获取的 10 组缺陷数据随机选取 8 组进行神经网络训练,确定磁光图像灰度(漏磁场)与实际缺陷轮廓的映射关系,其余 2 组缺陷数据用来测试,重构得到缺陷轮廓,然后与激光共聚焦显微镜获取的实际缺陷轮廓对比,如图 11 所示。其中缺陷深度表示以工件上表面(2.0 mm 处)为基准向下凹陷的尺寸,采样序列  $nm$  为所提取的信号点数,从图 11(a)看出磁光成像漏磁特征应用于焊接缺陷轮廓重构中是可行性的,且误差是在允许范围之内。而图 11(b)的缺陷深度最大仅有 0.17 mm,缺陷尺寸较小,缺陷重构误差较大,失去其缺陷的基本轮廓。也说明磁光成像法得出的结论与仿真方法结论一致,缺陷重构效果跟缺陷本身的尺寸大小有关,缺陷较小时,漏磁信号微弱,重构效果较差。利用磁光试验样本交叉验证得出,在一定范围内时,缺陷深度越大(不小于 0.45 mm),重构效果较好。

和  $B_z$  均可以实现焊接缺陷的二维轮廓重构,但  $B_y$  分量的重构效果较  $B_z$  分量的好。依据以上结果,将磁光成像漏磁场特征(法向分量  $B_z$ )应用于缺陷二维轮廓重构中,试验结果说明磁光法与数值模拟方法的规律基本一致,重构效果受缺陷尺寸大小影响,在一定范围内,缺陷深度越大(不小于 0.45 mm),漏磁信号越强,重构效果越好。

## 参考文献:

[1] 高向东,蓝重洲,陈子琴,等. 焊接缺陷磁光成像动

态检测与识别 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1135-1141.

GAO X D, LAN CH ZH, CHEN Z Q, et al.. Dy-

- dynamic detection and recognition of welded defects based on magneto-optical imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5):1135-1141. (in Chinese)
- [2] 彭丽莎, 黄松岭, 赵伟, 等. 漏磁检测中的缺陷重构方法 [J]. *电测与仪表*, 2015, 52(13):1-6.  
PENG L, HUANG S L, ZHAO W, *et al.*. Defect reconstruction method in magnetic flux leakage detection [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52(13):1-6. (in Chinese)
- [3] 韩文花, 阙沛文. 基于遗传优化算法的二维漏磁缺陷重构 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2006, 30(1):138-141.  
HAN W H, QUE P W. Reconstruction of two dimensional magnetic flux leakage defect based on genetic algorithm [J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2006, 30(1):138-141. (in Chinese)
- [4] RAVAN M, SADAGHI S H H, MOINI R. Using a wavelet network for reconstruction of fatigue crack depth profile from AC field measurement signals [J]. *Ndt & E International*, 2007, 40(7):537-544.
- [5] YUAN X C, WANG C L, ZUO X Z, *et al.*. A method of 2D defect profile reconstruction from magnetic flux leakage signals based on improved particle filter [J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2011, 53(3):152-155.
- [6] BETTA G, FERRIGNO L, LARACCA M, *et al.*. Fast 2D crack profile reconstruction by image processing for eddy-current testing[C]. *Metrology for Aerospace. IEEE*, 2015:341-345.
- [7] 寒清平. 基于漏磁检测的油管缺陷量化研究 [D]. 成都:西南石油大学, 2015.  
JIAN Q P. *Quantification of Tubing Defects Based on Magnetic Flux Leakage Detection* [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015. (in Chinese)
- [8] 王鹤. 漏磁检测信号分析与缺陷评价实验研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2014.  
WANG H. *Experimental Study on Signal Analysis and Defect Evaluation of Magnetic Leakage Detection* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [9] 廖肖晓, 周绍骑, 白金春. 三轴交流漏磁检测矩形缺陷信号特征分析 [J]. *重庆理工大学学报*, 2016, 30(9):106-112.  
LIAO X X, ZHOU SH Q, BAI J CH. Signal analysis of tri-axial ac-mfl inspection for therectangular defect [J]. *Journal of Chongqing University of Technology*, 2016, 30(9):106-112. (in Chinese)
- [10] 张腊梅, 陈泽茜, 邹斌. 基于 3D 卷积神经网络的 PolSAR 图像精细分类 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(7):17-24.  
ZHANG L M, CHEN J Q, ZOU B. Fine classification of polarimetric SAR images based on 3D convolutional neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7):17-24. (in Chinese)
- [11] 程玉华, 周肇飞, 尹伯彪. 磁光/涡流实时成像检测系统的研究 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5):797-801.  
CHEN Y H, ZHOU ZH F, YIN B B. Study on magneto optical/eddy current image system for real-time testing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):797-801. (in Chinese)
- [12] GAO X D, CHEN Y Q, YOU D Y, *et al.*. Detection of micro gap weld joint by using magneto-optical imaging and Kalman filtering compensated with RBF neural network [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2017, 84:570-583.
- [13] 陈琦, 徐熙平, 姜肇国, 等. 基于光场相机的深度面光场计算重构 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(3):708-714.  
CHEN Q, XU X P, JIANG ZH G, *et al.*. Light field computational reconstruction from focal planes based on field camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(3):708-714. (in Chinese)

#### 作者简介:



高向东(1963—),男,河南郑州人,教授,博士生导师,1988年于中南大学获得硕士学位,1998年于华南理工大学获得博士学位,主要从事焊接自动控制的研究。E-mail: gaoxd@gdut.edu.cn



周晓虎(1992—),男,河南信阳人,硕士研究生,2016年于中原工学院信息商务学院获学士学位,主要从事焊接缺陷无损检测的研究。E-mail: zhouxh0917@126.com