

正交励磁的损毁字符磁光成像复原

高飞^{1,2}, 李学勇^{1,2*}, 张硕^{1,2}, 路长厚^{1,2}¹山东大学机械工程学院高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061;²山东大学机械工程国家级实验教学示范中心, 山东 济南 250061

摘要 为了对机器设备损毁字符的标识码信息进行显现复原,提出一种正交励磁的损毁字符磁光成像复原识别方法。在研究钢材基体字符对磁场传导的影响机理的基础上,设计能分时正交励磁的环形电磁铁模型,并且通过仿真分析验证了该模型的正确性。采用局部直方图均衡化法对通过正交励磁获得的字符磁光图像进行增强,以突出字符的笔划特征;设计像素级显著值加权平均的融合算法,实现了正交励磁获得的所有方向上笔划特征的融合。设计实验系统,获得正交方向励磁的磁光图像,并对算法的效果进行实验测试。结果表明:局部直方图均衡化增强的磁光图像字符笔划对比度大,分辨率高,算法的增强效果理想;像素级显著值加权融合算法对字符磁光图像进行融合时,可以全方位、高效率提取字符图像的所有方向特征,且融合后图像清晰度高。所提正交励磁的损毁字符磁光成像复原方法能有效复原损毁严重、笔划复杂的字符。

关键词 磁光成像; 正交励磁; 局部直方图均衡化; 像素级显著值

中图分类号 TM271; TP391.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220483

Magneto-Optical Imaging Restoration Method for Damaged Characters with Orthogonal Excitation

Gao Fei^{1,2}, Li Xueyong^{1,2*}, Zhang Shuo^{1,2}, Lu Changhou^{1,2}¹Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China;²National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China

Abstract To recover the identification code information of damaged characters of mechanical equipment, this paper proposes a magneto-optical imaging restoration method for damaged characters with orthogonal excitation. Based on the study of the influence mechanism of steel matrix characters on magnetic field conduction, a ring electromagnet model with time-sharing orthogonal excitation is developed, and the effectiveness of the model is verified through simulation analysis. First, to enhance the magneto-optical images of characters obtained by orthogonal excitation, we employ the local histogram equalization method to highlight the stroke features of characters. Then, we design the fusion algorithm of pixel-level significant value weighted average to fuse the images. The experimental system was designed to obtain magneto-optical images with orthogonal directional excitation, and the effectiveness of the proposed algorithm was evaluated through experiments. The results show that the magneto-optical images enhanced by local histogram equalization have large contrast of character strokes and high resolution, verifying the effectiveness of the proposed algorithm. Furthermore, the pixel-level salient value weighted fusion algorithm can comprehensively and efficiently extract all directional features of the character images when fusing the magneto-optical images of damaged characters, and the fused images have high definition. Therefore, the proposed magneto-optical imaging restoration method for damaged characters with orthogonal excitation can effectively recover severely damaged characters with complex strokes.

Key words magneto-optical imaging; orthogonal excitation; local histogram equalization; pixel-level salient value

1 引言

机器设备等常通过在钢材基体上进行压刻、点阵

等方式加工字符来标识身份信息,而由于恶意打磨、锈蚀或过火等原因,这些字符无法被识别。基于法拉第磁光效应的磁光成像检测方法是一种安全准确获取材

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-02-06; 录用日期: 2022-02-16; 网络首发日期: 2022-02-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目

通信作者: *mechsd@163.com

料磁场分布信息的无损检测方法。相比超声成像法^[1]、涡流成像法^[2]等无损检测方法,磁光成像法具有高灵敏度、易小型化、高效率等特点。该方法不仅可以检测材料的缺陷,亦可用于对损毁字符的显现复原^[3],能较好复原损毁程度较轻的字符,但是对于笔划复杂、损毁严重的字符,该方法的复原效果不是很理想。

除了成像系统参数对显现复原效果有较大影响外,被测样件励磁后的磁感应强度(大小、方向)更是影响复原效果和分辨率的重要因素。根据磁光成像的检测原理,字符成型时材料内部因畸变产生内应力,应力影响材料的相对磁导率,导致被测样件表面磁感应强度发生变化。不同位置的磁感应强度变化越明显,则磁光成像的检测分辨率就越高,字符复原效果就越好。但根据磁力耦合模型^[4],只有当字符笔划与磁场传递方向垂直时,才能在笔划边缘处产生最大的磁感应强度变化率。而实际字符是由多个不同方向的笔划组成的,当字符笔划损毁严重时,只有特定方向的字符笔划才能显现,严重影响了复原效果。因此有必要研究新的励磁方式以提高设备的显现复原效果。

在已有的磁光成像技术研究中,国内外学者对其进行了优化。其中,文献[5-7]为了实时检测微小缺陷,率先对磁光/涡流成像进行了研究,并且对脉冲激励、图像采集处理等方面进行创新研究。文献[8]利用 A-V 公式对磁光成像进行数值计算,提供了一种低成本磁光成像系统参数方案。文献[9]对实验和仿真模型的磁光成像数据的检测概率进行研究,检测概率曲线优化了磁光成像检测系统的性能。不仅可对磁光成像系统中的硬件进行优化,文献[10-11]亦提出了一种基于模式识别的磁光图像增强方法,消除磁光图像中的干扰信息,明显提高了磁光成像的检测效果。文献[12-15]将磁光成像技术应用于对焊缝缺陷的检测,为了解决直流磁场下多方向缺陷不明显的问题,分别采用交流励磁与旋转磁场对被测焊件进行励磁,以动态的方式采集与融合多幅磁光图像,提升了焊接缺陷检测的准确性。并且为了实现对焊缝缺陷检测的智能化,用基于机器学习的方法对焊接缺陷类型进行分类与识别。

在已有磁光成像的研究和优化中,考虑改进优化磁光成像中光学器件的同时,采用交变磁场/旋转磁场的方式来检测多方向的缺陷,虽此种方案有较好的检测效果,但是对励磁装置的供电要求较高,不易制成小型设备。本文为了解决复现损毁字符多方向缺陷的问题,提出了一种正交励磁的损毁字符磁光成像复原方法,对正交励磁采用直流供电的方案。针对正交励磁获得字符磁光图像的特点,首先采用局部直方图均衡化对字符特征进行增强,之后设计了一种基于像素级显著值的加权平均融合算法,实现对字符所有方向笔划的融合与识别。所提正交励磁的损毁字符磁光成像复原方法能明显提升磁光成像对损毁严重、笔划特征复杂字符的显现复原效果。

2 正交励磁的磁光成像原理

2.1 正交励磁的理论基础

字符在成型过程中,外力对钢板的作用使金属晶体在字符两侧堆垛,钢板通过产生内应力来平衡外力,应力方向垂直于字符。内应力与钢板的相对磁导率满足磁力耦合模型^[4],即铁磁材料的相对磁导率变化量

$\left| \frac{\Delta\mu}{\mu} \right|$ 与应力 $|\sigma|$ 的关系式为

$$\left| \frac{\Delta\mu}{\mu} \right| = - \frac{2\lambda_m}{|B_m|^2} |\sigma| \cdot \mu, \quad (1)$$

式中: B_m 为钢板内部的饱和磁感应强度, λ_m 为饱和磁致伸缩系数, B_m 、 λ_m 与钢板的属性相关; σ 为内应力。

由式(1)可知,钢板的磁导率相对变化率 $\left| \frac{\Delta\mu}{\mu} \right|$ 与应力 $|\sigma|$ 成比例关系。

磁感应强度变化量 ΔB 与磁导率变化量 $\Delta\mu$ 之间的关系为

$$\Delta B = \Delta\mu H. \quad (2)$$

建立如图1(a)所示的模型,字符笔划“1”为直线型笔划,其方向与 x 轴的夹角为 α ,钢板上加载磁场 H ,其方向与 x 轴的夹角为 β ,则内应力 σ 方向与磁场方向的夹角为 $\pi/2 - (\beta - \alpha)$ 。由式(1)可得沿 x 轴和 y 轴的相对磁导率变化量分别为

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta\mu_x}{\mu} \\ \frac{\Delta\mu_y}{\mu} \end{bmatrix} = \frac{2\lambda_m \mu |\sigma|}{|B_m|^2} \begin{bmatrix} \cos\beta \sin(\beta - \alpha) \\ \sin\beta \cos(\beta - \alpha) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),可得沿 x 轴和 y 轴的磁感应强度:

$$\begin{bmatrix} B_x^* \\ B_y^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\mu_x & 0 \\ 0 & \Delta\mu_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H \cos\beta \\ H \sin\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix} + \frac{2\lambda_m}{|B_m|^2} \mu^2 |\sigma| \|H\| \begin{bmatrix} \cos^2\beta \sin(\beta - \alpha) \\ \sin^2\beta \cos(\beta - \alpha) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: B_x 和 B_y 为没有内应力时沿着 x 轴和 y 轴的磁感应强度; H 为磁场强度。

根据式(4)得到字符笔划边缘的沿 x 轴和 y 轴的磁感应强度变化,如图1(b)和图1(c)所示。可见:沿着 x 轴的磁感应强度 B 有明显的阶跃变化,可用于边缘检测;而沿着 y 方向的磁感应强度 B 变化缓慢。当磁场与字符笔划相互方向平行($\alpha = \beta = 0$)时,此时 x 轴方向的磁感应强度变化量为0,无法检测到字符;当两者方向相互垂直($\beta - \alpha = \pi/2$)时, x 轴方向的磁场的磁感应强度变化量最大,阶跃变化最为明显。由此磁场传导规律可知,磁场对垂直方向上的字符笔划最为敏感,而字符既有水平、垂直,还有圆弧方向的笔划,明显

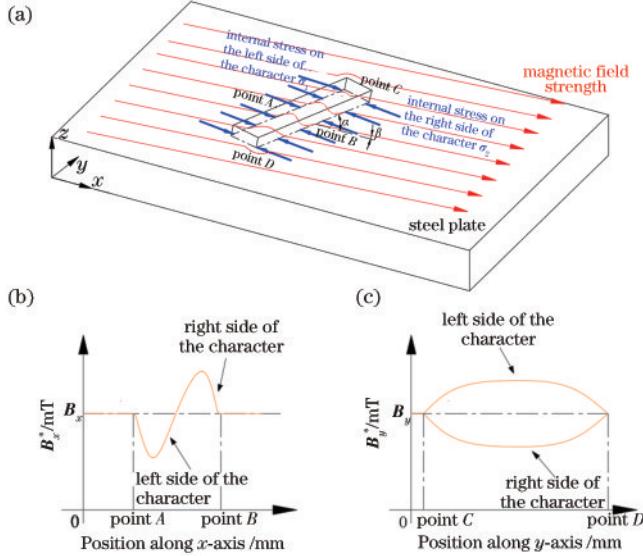


图 1 字符处磁场变化。(a) 字符磁力耦合模型; (b) x 轴方向; (c) y 轴方向
Fig. 1 Magnetic field change at characters. (a) Character magnetic coupling model; (b) x -axis direction; (c) y -axis direction

单方向励磁时只有部分笔划较为敏感,这大大降低了磁光成像技术的检测效果,尤其是对损毁严重、微弱残留信息的检测有较大影响。因此,本文提出了一种正交励磁的磁光成像励磁方式,对提高损毁字符磁光显现复原效果具有重要的意义。

2.2 磁光成像技术原理

铁磁材料中磁场分布不均匀,不均匀的磁场包含了字符信息,磁光成像技术通过法拉第磁致旋光效应将磁信号转变为偏振光光强信号。字符处晶体发生滑移,滑移的晶体会产生内应力,导致笔划一侧的磁感应强度增强为 $B + B_1$,另一侧的磁感应强度减小为 $B - B_2$ 。LED 面光源射出的自然光经过检偏器时转变为线偏振光,线偏振光在经过磁光介质时发生角度偏转,偏转角度与磁光介质中磁感应强度成正比,因此偏振光包含了磁场信息。线偏振光经过反射后透过检偏器入射到相机中。由于起偏器和检偏器之间存在夹角,线偏振光只有在检偏器上的投影部分才能通过检偏器。若磁光介质初始未加磁场,线偏振光振幅在检偏器上的投影可描述为

$$l = E \cos \varphi, \quad (5)$$

式中: E 是原来线偏振的振幅; φ 是检偏器与起偏器之间的夹角。

当刻有字符的钢板被磁化时,由于笔划处两侧磁感应强度的大小不同,所以图 2 中 1)、2) 和 3) 处线偏振光在检偏器上的投影不同,具体表现为

$$l_i = E \cos(\varphi - \theta_i). \quad (6)$$

光强可表示为

$$I_i = l_i^2 = E^2 \cos^2(\varphi - \theta_i). \quad (7)$$

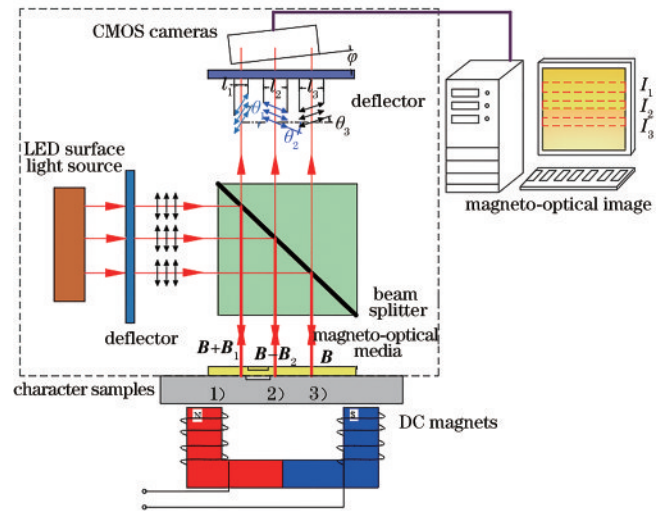


图 2 磁光成像原理

Fig. 2 Principle of magneto-optical imaging

式(6)和式(7)中, l_i, I_i, θ_i ($i = 1, 2, 3$) 分别对应 1)、2) 和 3) 处的投影和光强。图 2 显示了磁光成像的对应光强,图像中越亮之处对应的 I 越大,该处的磁感应强度越大,故有 $I_2 < I_3 < I_1$ 。通过磁光图像的亮度差异来反映字符信息。

3 正交励磁的电磁铁模型

3.1 正交励磁的电磁铁理论模型

磁光成像技术对损毁字符进行检测时,为实现对字符载体正交两个方向的励磁,设计了如图 3 所示的正交励磁电磁铁理论模型。环形铁芯上设计了 4 个均匀分布的凸出磁极,磁极间绕制了 4 组相同的载流线圈,线圈用直流电驱动。通过电子开关控制 4 个绕组的电流方向,使其分时工作在水平励磁和垂直励磁两种正交状态。铁芯内磁场流动分别如图 3 所示。水平励磁时外部磁场由 N_x 引出, S_x 引入,沿着 x 方向进行流动;垂直励磁时外部磁场由 N_y 引出, S_y 引入,沿着 y 方向进行流动。其中 N_x 表示 x 方向上的北磁极, S_x 表示 x 方向上的南磁极。

据安培定律,线圈上磁动势等于磁回路中各磁压降之和,得到每组线圈加载电流和匝数。

$$IN = \sum \phi_i R_i \times 10^{-8} + H_c l_c, \quad (8)$$

式中: I 为线圈电流; N 为线圈匝数; ϕ_i 为被励磁材料中

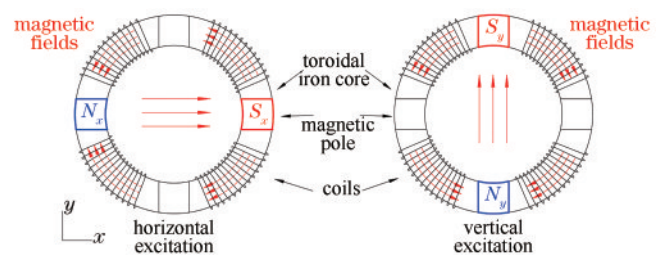


图 3 铁芯内磁场分布

Fig. 3 Magnetic field distribution in the iron core

的磁通; R_i 是磁阻; H_c 为铁芯磁场强度; l_c 为铁芯的长度。

其中半环铁芯部分的磁压降为磁场强度和铁芯长度之积, 磁场强度可根据所要求的磁场强度查表得 H_c , 铁芯部分有效长度为内外圆形的平均周长的 1/2, 即为

$$l_c = \frac{\pi}{4}(D + d), \quad (9)$$

式中: D 为圆环的外径; d 为圆环的内径。

在不考虑漏磁的情况下, 回路中铁芯外部磁通与内部相等, 则

$$\phi_{out} = \phi_{in} = 2BS. \quad (10)$$

铁芯外部磁路的磁阻为

$$R = \frac{l_{eq}}{\mu_0 A_{eq}}, \quad (11)$$

式中: l_{eq} 为磁路铁芯外部等效长度; A_{eq} 为等效的横截

面积; μ_0 为磁导率。

3.2 有限元仿真与分析

为了验证正交励磁的电磁铁理论模型的正确性, 在 Ansys-Maxwell 上建立如图 4(a) 所示的三维有限元模型, 环形电磁铁置于方形 Q235 钢板的上表面。环形电磁铁采用电工纯铁 DT2 作为铁芯材料, 铁芯上缠绕了 4 组相同漆包铜线圈, 经过式 (8)~(11) 的计算, 漆包线的直径为 0.71 mm, 每组线圈的匝数为 60, 加载直流电流大小为 5 A。计算场加载纽曼边界, 材料内部加载自然边界。为了模拟真实的工作环境, 有限元模型的计算场设置为空气。分别控制 4 组线圈的电流方向, 得到如图 4(c) 和图 4(d) 所示的水平 and 垂直两个方向的励磁仿真结果。图 4(b) 显示了在不同励磁方向下分别沿着图 4(c) 和图 4(d) 中线 l_x 和 l_y 方向的磁感应强度变化情况, 其中横坐标 0 mm 对应着两个圆环的中心位置。

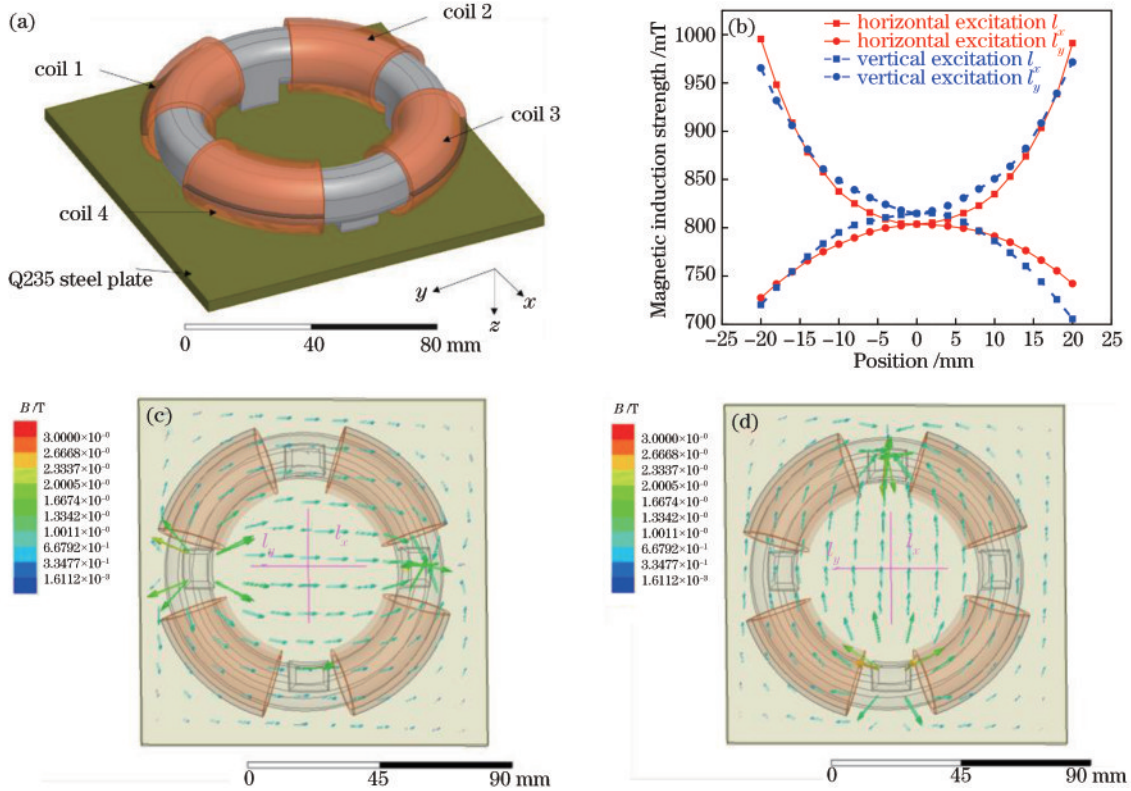


图 4 仿真结果。(a) 三维有限元仿真模型; (b) 磁感应强度场曲线; (c) 水平励磁; (d) 垂直励磁

Fig. 4 Results of simulation. (a) Three-dimensional finite element model; (b) plot of magnetic induction field; (c) horizontal excitation; (d) vertical excitation

由结果明显可知, 钢板内部磁场主要分布在铁芯圆环的中心区域, 且两种励磁情况下中心区域的磁场方向相互正交。水平励磁时, 钢板内磁感应强度沿着 l_x 先减小后增大, 沿着 l_y 先增大后减小, 方向沿着 x 轴方向, 位置 0 mm 处磁感应强度为 800 mT; 垂直励磁时, 钢板内磁感应强度沿着 l_x 先增大后减小, 沿着 l_y 先减小后增大, 方向沿着 y 轴方向, 位置 0 mm 处磁感应强度为 812 mT。两种励磁情况下磁感应强度分布情

况相同, 变化趋势基本吻合, 且中心区域的大小相等。说明该电磁铁模型能够磁化产生大小相等、方向正交的两组磁场, 验证了理论模型的正确性。

4 损毁字符磁光图像的融合算法

为了获得各方向笔划效果均理想的字符, 便于字符识别, 首先需要对正交两个励磁方向得到的磁光图像进行增强, 突出字符笔划特征; 然后将其融合, 使字

符具备所有方向的笔划特征。

4.1 损毁字符磁光图像增强

字符磁光图像背景区域同时存在较亮与较暗区域,过渡较为平缓,但字符笔划处的亮暗局部区域过渡则较为陡峭。对于这种通过灰度值突变来反映特征的图像,常采用拉伸图像对比度的方法来增强。直方图均衡化法(HE)常用来对全局对比度进行拉伸,但牺牲了局部细节特征^[16];限制对比度的自适应直方图均衡(CLAHE)能有效抑制背景对比度的拉伸,但目标区域的对比度拉伸亦受影响^[17];亮度保留对比度增强算法(BPDHE)同时具有增强对比度和保持亮度的特点^[18];局部直方图均衡化(LHE)是基于HE改进而来的,其能明显拉伸图像局部对比度,细节特征突出效果明显^[19]。

考虑到字符磁光图像的特点,本文采用局部的直方图均衡化法来提高字符笔划的分辨率。在LHE增强时,首先用高斯滤波来去除噪声,然后用 32×32 的小窗口对图像进行扫描,对每个窗口的中心像素值进行增强,以此得到增强的图像,具体步骤如下。

计算矩形窗口中灰度值为 r 的像素点数量的概率分布 p_w :

$$p_w(r) = \frac{n}{W^2}, \quad (12)$$

式中: n 为灰度级为 r 的像素在窗口中的数量; W 为窗口的大小,取32。

计算矩形窗口中灰度值为 $[0, r]$ 的像素点数量的累积概率分布:

$$q_w(r) = \sum_{i=0}^k p_w(i). \quad (13)$$

对窗口中的中心像素进行变换,得到变换之后的像素灰度值:

$$T[f(m, n)] = (L - 1) \cdot q_w[f(m, n)], \quad (14)$$

式中: $f(m, n)$ 为中心像素灰度值; L 为灰度级。

4.2 损毁字符磁光图像融合

增强后的字符磁光图像中笔划特征是以灰度亮暗区域的急剧变换呈现的,为了较好提取所有方向上的字符笔划特征,本文用像素级显著值作为测度,通过加权平均方法对字符笔划进行融合。相比平均加和小波变换的图像融合算法,该方法具有字符笔划保留效果好、鲁棒性高的特点。字符磁光图像经过增强预处理之后,首先用引导滤波对图像进行降噪处理^[20],在保留边缘特征的情况下,该算法能减弱图像增强预处理时产生的背景噪声,然后采用该算法进行融合。该方法能快速融合磁光图像中有效的字符信息。已知像素级显著值定义为一个像素点与其他所有像素点的对比度, I_p 表示像素点 p 的图像灰度值,则像素点 p 的显著值 $V(p)$ 为

$$V(p) = |I_p - I_1| + |I_p - I_2| + \dots + |I_p - I_N|, \quad (15)$$

式中: $I_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 为其他所有像素点的灰度值;

N 表示像素的总个数。若两个像素具有相同的像素值,则它们与 I_p 差值相等,计算公式为

$$V(p) = \sum_{j=0}^{L-1} M_j |I_p - I_j|, \quad (16)$$

式中: M_j 为像素灰度值为 j 的所有像素点的个数; L 为灰度级,取256。 $V(p)$ 被标准化为 $[0, 1]$ 。

那么融合图的像素灰度值为

$$B_F = W_b B_1 + (1 - W_b) B_2, \quad (17)$$

式中: B_1 、 B_2 分别表示水平励磁、垂直励磁获得磁光图像中的对应像素点的灰度值。

其中权重 W_b 被定义为

$$W_b = 0.5 + \frac{V_1 - V_2}{2}, \quad (18)$$

式中: V_1 和 V_2 分别表示正交励磁的两幅图像中对应像素点的显著值。如果在某些对应像素点处显著值 $V_1 = V_2$,权重 W_b 将变为平均权重;如果显著值 $V_1 > V_2$,那么权重 W_b 就会大于0.5。那么融合图像 B_F 就会融合更多来自水平励磁获得的磁光图像 B_1 的信息。

5 实验与结果

5.1 正交励磁的磁光成像实验系统

根据所述的理论模型,设计制造了正交励磁电磁铁,并且搭建了损毁字符磁光成像显现复原实验系统,如图5所示。其中光源、起偏器、分光器、磁光膜片与检偏器共同组成磁光图像采集部分,由直流稳压电源为正交励磁电磁铁供电;显示终端实现对CMOS相机的控制以及对磁光图像的增强与融合。实验对象为 $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的Q235钢板,其上通过字模压刻印有字符,字符大小为 $8 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,字符压刻深度为1.2 mm。通过磨床对字符进行磨削处理,磨削深度为1.3 mm。选择两块钢板,其中一块压刻有“E”、“F”两个字符,另一块压刻有“H”、“D”两个字符,钢板上经过磨削后,字符完全无法识别,用实验系统对损毁字符进行复原,得到表1所示的结果。

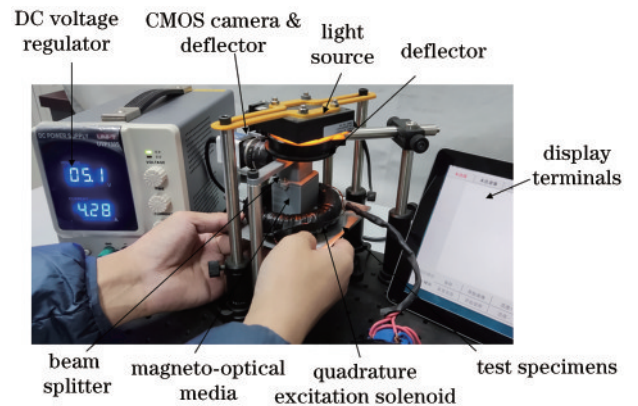


图5 损毁字符磁光成像显现复原系统

Fig. 5 Magneto-optical imaging recovery system for damaged characters

表 1 不同字符的磁光成像显现复原结果

Table 1 Results of magneto-optical imaging appearances for different characters

Before grinding	After grinding	Character	Horizontal excitation	Vertical excitation
		“E”		
		“F”		
		“H”		
		“D”		

由表 1 明显可知,“E”、“F”、“H”、“D”字符笔划分辨率较低、对比度低,笔划特征不明显。在水平励磁情况下,磁光成像技术无法复原水平方向的字符笔划,而在垂直励磁情况下,其无法复原垂直方向的字符特征,导致单幅磁光图像中字符笔划不完整,进而影响对字符的复原和识别。

5.2 损毁字符磁光图像增强效果

在进行融合之前,首先对字符图像进行增强,以增强字符的笔划特征。图 6 是分别采用 LHE、BPDHE 和 CLAHE 得到的字符“F”的增强图像。从图 6 可以看出,LHE 增强的字符笔划特征相对背景最为明显。

为了进一步分析,选取三种算法得到的水平励磁增强图像中第 220 行 100 个像素画灰度值曲线图,得到图 7(a);选取垂直励磁增强图像中第 140 列 100 个像素画灰度值曲线图,得到图 7(b)。

由图 7 可知,相对于 BPDHE 和 CLAHE 处理的图像灰度值曲线,LHE 得到的曲线存在明显的峰值和谷值,灰度值梯度最大,字符笔划对比度大,特征突出明显,说明该算法对磁光图像增强效果最好。虽然 LHE 会在一定程度上放大背景噪声,但该噪声并不影响对字符笔划的判断,因此本文采用局部直方图均衡化法对图像进行增强,实现融合之前的预处理。

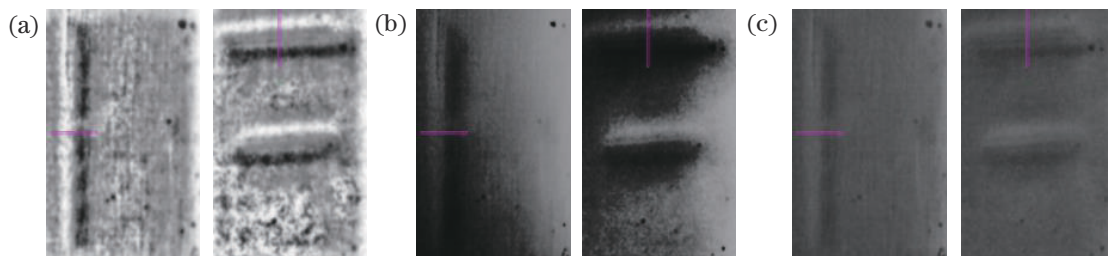


图 6 不同算法的增强结果。(a) LHE; (b) BPDHE; (c) CLAHE

Fig. 6 Enhancement result of different algorithms. (a) LHE; (b) BPDHE; (c) CLAHE

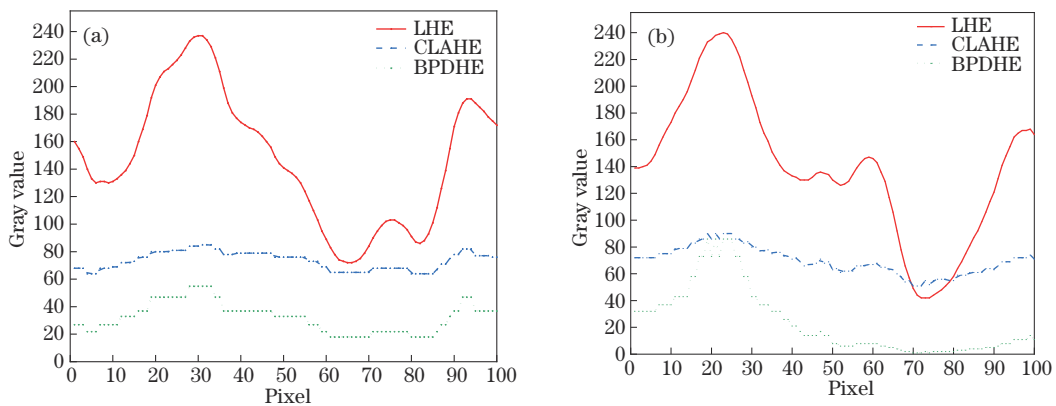


图 7 不同算法处理的灰度曲线。(a) 水平励磁第 220 行像素的灰度值曲线;(b) 垂直励磁第 140 列像素的灰度值曲线

Fig. 7 Grayscale curve obtained by different algorithms. (a) Grayscale value of horizontal excitation 220th row pixel; (b) grayscale value of vertical excitation 140th column pixel

5.3 损毁字符磁光图像融合效果

5.3.1 实验结果主观分析

字符“E”、“F”、“H”、“D”在两个方向上的磁光图像经过局部直方图均衡化法增强后得到如图 8 所示的增强图像。为了测试基于像素级显著值的加权平均融合算法的性能,选择平均加权和小波变换的融合算法进行对照。

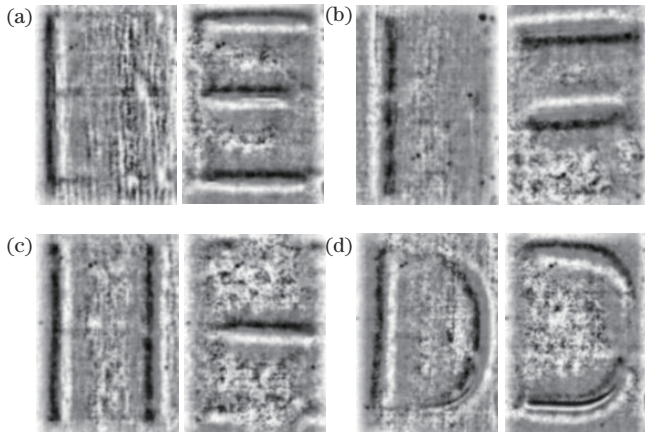


图 8 损毁字符的磁光成像结果。(a)字符“E”;(b)字符“F”;(c)字符“H”;(d)字符“D”

Fig. 8 Magneto-optical imaging result of damaged characters. (a) Character E; (b) character F; (c) character H; (d) character D

对字符磁光图像进行融合时,首先用引导滤波来消除预处理时引入的部分背景噪声。之后采用所提方法、平均加权和小波变换图像融合算法对字符磁光图像进行融合,得到如图 9 所示的结果。从视觉效果来看:平均加权方法得到的融合图像清晰度不够;小波变化融合了过多的细节,减弱字符的识别效果;所提方法能克服以上的缺陷,得到的笔划特征完整且明显,清晰度较高,故所提方法的效果最好。

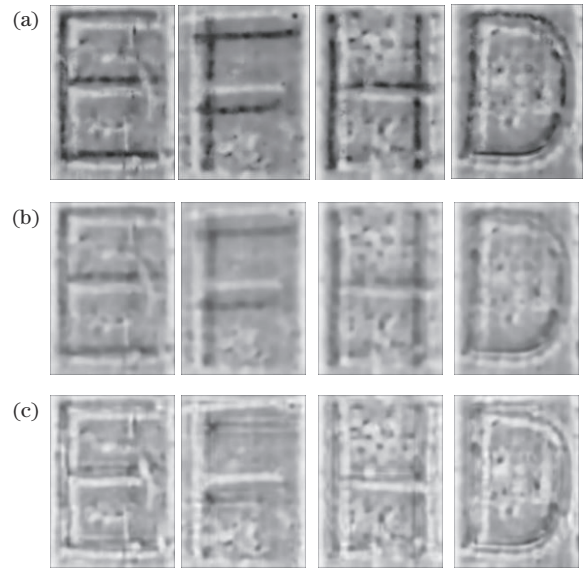


图 9 不同融合算法的结果。(a)所提方法;(b)平均加权;(c)小波变换

Fig. 9 Result of different fusion algorithms. (a) Proposed method; (b) average weighting; (c) wavelet transform

5.3.2 实验结果客观分析

为了更好地对融合图像进行评价,选择信息熵、方差作为评价标准^[21]。信息熵反映图像所包含信息量的多少,融合效果越好,图像的细节越丰富,包含的信息越多;方差反映了图像灰度值相对于灰度平均值的离散程度,融合图像灰度值越分散,说明融合效果越好。三种融合算法的信息熵、方差统计结果如表 2 所示。

由表 2 可知,相比于平均加权和小波变换两种方法,所提方法获得损毁字符“E”、“F”、“H”、“D”磁光图像的融合图像信息熵和方差较大,说明了其包含的信息量较大,图像灰度值离散程度较大,字符笔划特征明显。这证明所提方法的融合图像效果最佳,适用于对字符的磁光图像进行融合,实现对损毁字符的完整显现。

表 2 三种融合算法客观评价结果

Table 2 Objective evaluation result of the three fusion algorithms

Fusion character	Information entropy			Variance		
	Proposed method	Average weighting	Wavelet transform	Proposed method	Average weighting	Wavelet transform
“E”	7.1993	6.9471	6.9449	1387.0	933.18	1011.40
“F”	7.0772	6.8333	6.8460	1246.4	820.89	900.48
“H”	7.2358	6.9729	6.9172	1509.4	968.98	898.36
“D”	7.1766	6.9479	6.9603	1323.0	926.28	978.92

6 结 论

研究分析了字符笔划对磁场传导的影响机理,为正交励磁提供了理论依据;提出一种能分时正交励磁的电磁铁模型,并通过 Ansys-Maxwell 有限元方法仿真了不同励磁状态下字符笔画对磁场传导的影响规

律,验证了所提模型的正确性。根据磁光图像中字符笔划特征亮暗区域过渡的特点,首先采用局部直方图均衡化来增强字符磁光图像,以提高字符笔划的分辨率;最后用像素级显著值加权平均算法对磁光图像的字符笔划进行融合。设计了实验系统,得到不同方向励磁的磁光图像,可见,字符笔划的分辨率与励磁方向

有显著的相关性。采用设计的图像融合算法对正交方向的磁光图像进行融合实验,结果表明:局部直方图均衡化算法能明显突出字符特征;像素级显著值加权平均融合算法获得的图像信息熵大、分辨率高。所提正交励磁的损毁字符磁光成像复原方法可以显著提高成像分辨率和复原效果。

参 考 文 献

- [1] 詹超, 彭笑永, 李阳. 基于激光超声可视化的厚壁管内壁缺陷无损检测[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 0628004.
Zhan C, Peng X Y, Li Y. Nondestructive testing cracks on inner surface of thick pipes by laser ultrasonic visualization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 0628004.
- [2] 程军, 杨继全, 裘进浩, 等. 基于涡流成像的碳纤维增强树脂基复合材料细观结构可视化[J]. 复合材料学报, 2018, 35(8): 2074-2083.
Cheng J, Yang J Q, Qiu J H, et al. Visualization of meso-structure of carbon fiber reinforced polymer based on eddy current imaging[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(8): 2074-2083.
- [3] 谢朝阳, 李学勇, 高飞, 等. 损毁字符的磁光成像复原识别[J]. 光学精密工程, 2021, 29(4): 832-842.
Xie C Y, Li X Y, Gao F, et al. Magneto-optical imaging restoration and recognition technology for damaged characters[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(4): 832-842.
- [4] 王社良, 王威, 苏三庆, 等. 铁磁材料相对磁导率变化与应力关系的磁力学模型[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(3): 288-291, 305.
Wang S L, Wang W, Su S Q, et al. A magneto-mechanical model on differential permeability and stress of ferromagnetic material[J]. Journal of Xi'an University of Science & Technology, 2005, 25(3): 288-291, 305.
- [5] Fitzpatrick G L, Thome D K, Skaugset R L, et al. Novel eddy current field modulation of magneto-optic garnet films for real-time imaging of fatigue cracks and hidden corrosion[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 2001: 210-222.
- [6] 况淑青, 周肇飞, 李文华, 等. 亚表面缺陷的磁光/涡流成像检测技术研究[J]. 中国仪器仪表, 2005(10): 79-82.
Kuang S Q, Zhou Z F, Li W H, et al. Study on the magneto-optic/eddy current imaging technology for subsurface micro-defects[J]. China Instrumentation, 2005(10): 79-82.
- [7] 况淑青. 亚表面缺陷的磁光涡流成像检测技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
Kuang S Q. Study on the magneto-optic/eddy current imaging technology for subsurface micro-defects[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [8] Zeng Z, Liu X, Deng Y, et al. A parametric study of magneto-optic imaging using finite-element analysis applied to aircraft rivet site inspection[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(11): 3737-3744.
- [9] Deng Y M, Liu X, Udpa 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] Cheng Y H, Tian L L, Yin C, et al. A magnetic domain spots filtering method with self-adapting threshold value selecting for crack detection based on the MOI[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 86(2): 741-750.
- [11] Tian L L, Cheng Y H, Yin C, et al. Design of the MOI method based on the artificial neural network for crack detection[J]. Neurocomputing, 2017, 226: 80-89.
- [12] 李彦峰, 高向东, 季玉坤, 等. 交变/旋转磁场下焊接缺陷磁光成像检测与分类[J]. 光学精密工程, 2020, 28(5): 1046-1054.
Li Y F, Gao X D, Ji Y K, et al. Detection and classification of welding defects by magneto-optical imaging under alternating/rotating magnetic field[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(5): 1046-1054.
- [13] Li Y F, Gao X D, Zhang Y X, et al. Detection model of invisible weld defects by magneto-optical imaging at rotating magnetic field directions[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 121: 105772.
- [14] Gao X D, Li Y F, Zhou X H, et al. Multidirectional magneto-optical imaging system for weld defects inspection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 124: 105812.
- [15] 季玉坤, 高向东, 刘倩雯, 等. 焊接缺陷磁光成像卷积神经网络识别方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 107-113.
Ji Y K, Gao X D, Liu Q W, et al. Weld defect recognition method with magneto-optical imaging based on convolutional neural network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 107-113.
- [16] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 2版. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
Gonzalez. Digital image processing[M]. 2nd ed. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015.
- [17] 张发军, 彭文刚, 虞成俊, 等. 对比度受限下直方图均衡化处理的木板纹路图像增强算法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(21): 8629-8636.
Zhang F J, Peng W G, Yu C J, et al. Algorithm for image enhancement of wood texture based on contrast-limited adaptive histogram equalization[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(21): 8629-8636.
- [18] Garud H, Sheet D, Suveer A, et al. Brightness preserving contrast enhancement in digital pathology[C]// 2011 International Conference on Image Information Processing, November 3-5, 2011, Shimla, India. New York: IEEE Press, 2011.
- [19] Rao B S. Dynamic Histogram Equalization for contrast enhancement for digital images[J]. Applied Soft Computing, 2020, 89: 106114.
- [20] Shi Z L, Chen Y L, Gavves E, et al. Unsharp mask guided filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 7472-7485.
- [21] 才溪. 多尺度图像融合理论与方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
Cai X. Theory and method of multi-scale image fusion[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.