

DOI: 10.19666/j.rlfed.202206167

基于机器视觉的标准试片磁痕评价方法

邱张维佳, 王志强, 秦承鹏
(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 磁粉检测作为一种无损检测方法, 在电力行业有广泛应用, 其综合灵敏度由 A1 型标准试片检验, 然而标准试片磁痕的清晰度评价仍取决于检测人员的主观判断。为排除磁痕清晰度评价中人为主观因素, 提出一种基于机器视觉的标准试片磁痕清晰度评价方法。对获取的标准试片磁痕图像, 使用 Python 程序设计语言调用 OpenCV 函数库, 实现对磁痕图像的掩膜获取, 然后通过二值化提取磁痕以及计算磁痕与背景的直方图, 定量分析与评价磁痕图像的清晰度, 同时使用该方法确定了非磁性层厚度对磁粉检测综合灵敏度的影响。标准试片磁痕图像分析结果可知, 基于机器视觉的标准试片磁痕提取效果良好, 清晰度评价结果比传统人工评价更加客观可靠。

[关键词] 磁粉检测; 机器视觉; 磁痕图像; OpenCV; 标准试片

[引用本文格式] 邱张维佳, 王志强, 秦承鹏. 基于机器视觉的标准试片磁痕评价方法[J]. 热力发电, 2023, 52(1): 140-148. QIU Zhangweijia, WANG Zhiqiang, QIN Chengpeng. Research and application of magnetic trace evaluation method for standard test shims based on machine vision[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(1): 140-148.

Research and application of magnetic trace evaluation method for standard test shims based on machine vision

QIU Zhangweijia, WANG Zhiqiang, QIN Chengpeng
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: As a nondestructive testing method, magnetic particle testing is widely used in power industry. The comprehensive sensitivity of the magnetic particle detection can be tested by A1 standard shims. However, at present, the evaluation of the clarity of magnetic trace on standard shims still depends on subjective judgment of the tester. In order to eliminate the subjective factors in the evaluation, this paper proposes a standard magnetic trace evaluation method based on machine vision. Based on Python programming language and OpenCV function library, the initial obtained magnetic trace is processed by image correction, magnetic trace extraction, quantitative analysis and evaluation using computer program. On this basis, the influence of the thickness of non-magnetic layer on the comprehensive sensitivity of magnetic particle detection is investigated using this method. It is shown that the magnetic trace evaluation method based on machine vision is more objective and accurate than the conventional manual evaluation.

Key words: magnetic particle testing; machine vision; magnetic image; OpenCV; standard shim

磁粉检测是一种重要的无损检测方法^[1-2]。该方法利用铁磁性工件中缺陷与连续部分的磁导率差异, 对工件通磁后, 磁力线在缺陷处产生畸变, 如果缺陷位于表面或近表面, 则部分磁力线将逸出工件表面形成漏磁场, 漏磁场吸引铁磁性颗粒堆积在

缺陷附近形成磁痕显示^[3]。磁粉检测操作简单, 显示直观, 成本低廉, 对表面与近表面的缺陷检测灵敏度高, 在航空航天^[4-5]、承压设备^[6-7]、机动车辆^[8-9]、石油化工^[10-11]等各个领域都得到广泛应用。

磁粉检测的综合灵敏度受到检测设备^[12-14]、磁

收稿日期: 2022-06-29 网络首发日期: 2023-01-03

基金项目: 西安热工研究院有限公司自主科技项目(TN-21-TZK26)

Supported by: Independent Technology Project of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd.(TN-21-TZK26)

第一作者简介: 邱张维佳(1993), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为无损检测与电站材料分析, qiu Zhangweijia@tpri.com.cn。

悬液^[15-17]、工件表面粗糙度^[18-20]、磁化参数^[21-23]等多种因素的影响。标准 NB/T 47013.4—2015 中规定,对于连续磁化法,可选用 A1 型标准试片来检验系统的综合性能^[24-25]。然而,标准并未对合格的磁痕显示做出具体要求,即未说明磁痕显示为“清晰”和“模糊”的判断依据。目前,标准试片的清晰程度评价仍然取决于检测人员的主观判断。对于一个确定的磁痕,不同检测人员评价标准不同,可能产生误差。所以,基于主观判断得到的结果,其准确度有待商榷。

磁痕评价过程中引入机器视觉技术是一个可以保证评价结果相对客观的方向。机器视觉是通过摄像机、计算机来模拟人的视觉功能,能从客观图像中提取信息并进行处理,最终实现检测、测量和控制^[26]。相比于动物视觉,机器视觉具有高处理速度、高准确度及高稳定性等优点,能大幅提升生产效率^[27]。本文基于开源 OpenCV 函数库,提出一种使用机器视觉对 A1 型标准试片磁痕进行评价的方法,该方法可有效提取试片上的磁痕特征并进行定量评价,得出的结果更加客观准确。在此基础上,使用该方法评价了非磁性涂层对磁粉检测综合灵敏度的影响。

1 OpenCV 函数库

OpenCV(open source computer vision)是由 Inter 开发的开源函数库,可用于快速处理图像,解决计算机视觉问题。OpenCV 使用 C/C++ 语言编写,具有 C++、Python、Java 等语言接口,可以跨平台运行在 Linux、Windows、Android 等操作系统上,具备强大的矩阵和数学运算能力。基于开源的性质,经过二十多年的扩充与发展,目前已包含机器视觉领域数千种优化后的算法和函数,在人脸识别^[28-29]、运动跟踪^[30]、图像分割^[31-32]、汽车工程^[33-34]等领域都有广泛应用。本文采用 Python 接口的 Python-OpenCV 实现标准试片磁痕评价方法的应用。

2 磁痕提取及定量评价原理

当选用黑色磁悬液,使用磁轭法以及 A1 型标准试片来评价磁粉检测的综合灵敏度时,铁磁性颗粒会聚集于试片的缺陷附近形成磁痕,检测人员根据磁痕显示的清晰程度来评价综合灵敏度。客观上讲,实际磁痕面积越大,综合灵敏度越高。因此,将可视的磁痕转化为可计算的量是本文的核心问题。

基于机器视觉实现对标准试片磁痕的定量分析与评价,必须经过以下 3 个环节:

1) 图像修正 即对初始磁痕图像的预处理。现场检测人员通过拍照的方式获取初始磁痕图像,当一张图像上存在多个磁痕时,需要对磁痕进行剪裁。此外,由于拍摄角度原因,检测人员可能无法从试片正上方获取磁痕显示,或磁痕图像相对镜头有一定倾斜,因此需对导入的图像进行透视变换修正。

2) 磁痕提取 当使用黑色磁悬液时,整个磁痕图像都可看作一幅灰度图。理想状态下,背景为白色,磁痕为黑色,仅需对黑色部分进行定量分析即可。然而实际磁痕图像背景被铁磁性颗粒布满,磁痕也并非纯黑色。将由缺陷引起的磁痕显示从布满黑色铁磁性颗粒的背景图像中提取出来,使提取后的图像中仅保留清晰的磁痕图像,去除无关因素,是整个提取过程中的难点。

3) 定量分析与评价 磁痕提取后获得的依然是一幅灰度图,为进行定量分析,需要将图像中信息转化为可计算的量,本文称此量为“磁痕强度”最后,建立磁痕强度与磁痕清晰度之间的关系。

磁痕提取及定量评价算法流程如图 1 所示。

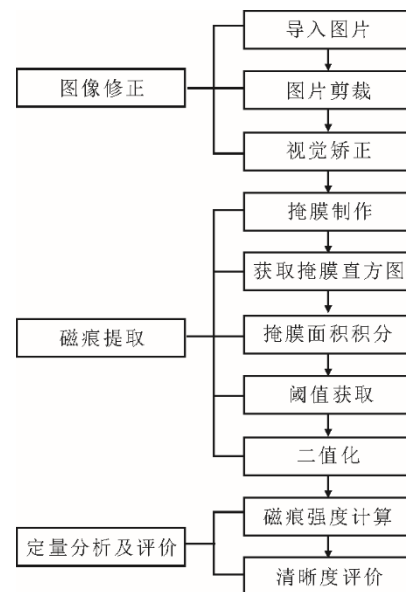


图 1 磁痕提取及定量评价算法流程
Fig.1 The flow of magnetic trace extraction and quantitative evaluation algorithm

3 基于 Python-OpenCV 的标准试片磁痕评价算法实现

图 2 为磁痕初始图像,将 A1:30/100 (左), A1:60/100 (右) 标准试片使用非磁性薄膜贴附于试

板表面，选用黑色磁悬液及磁轭法检测。此时薄膜与反差剂整体厚度约为 31.2 μm 。由图 2 可见，右侧 A1:60/100 试片磁痕非常清晰，而左侧 A1:30/100 试片磁痕清晰程度相对较低。这是由于 A1:30/100 深宽比较小所致。

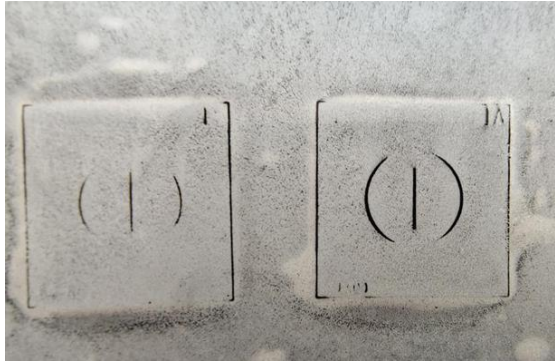


图 2 磁痕初始图像
Fig.2 The initial magnetic trace display

3.1 图像修正

图像修正时，首先对图像中感兴趣的磁痕进行切片，随后通过选取试片的 4 个顶点对切片进行透射变换，图 3 为图像修正算法流程及代码。

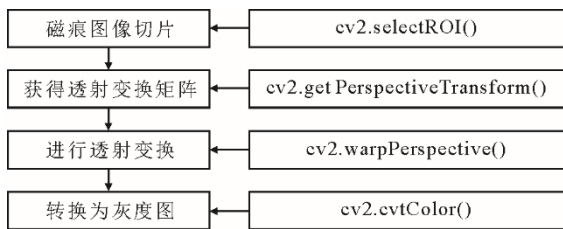
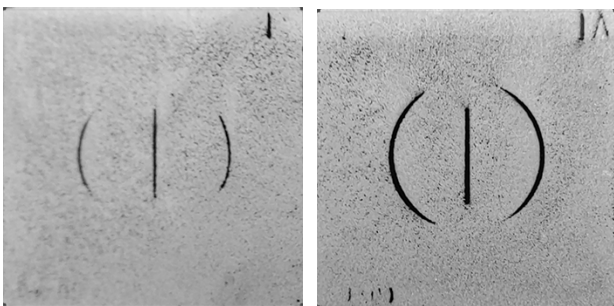


图 3 图像修正算法流程及代码
Fig.3 The flow chart and code of image correction algorithm

经图像修正后的 A1:30/100 与 A1:60/100 磁痕显示如图 4 所示，其尺寸为 600 px×600 px。由图 4 可见，A1:30/100 试片磁痕的倾斜被修正。



a) A1: 30/100 b) A1: 60/100

图 4 经图像修正后的磁痕显示
Fig.4 The magnetic mark image after correction

3.2 磁痕提取

3.2.1 掩膜的获取与应用

从图 4 可以看出，选用黑色磁悬液及磁轭法检测得到的磁痕由一条竖线与两侧圆弧组成，其灰度值明显低于周围背景（纯黑色灰度值为 0，纯白色灰度值为 255）。为了对磁痕与背景分别进行统计分析，引入辅助图（图 5），辅助图像素点为 600 px×600 px（实际无框线，框线仅为展示图像边缘），包括位于中心的纯红色圆环与竖线条，线条宽度及圆环宽度均为 50 px。将该辅助图与预处理后的磁痕叠加在一起，辅助图红色部分可框选磁痕及其周边像素，而背景落入白色部分。

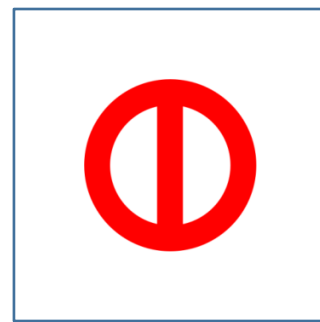


图 5 辅助图
Fig.5 Auxiliary diagram

在 Python-OpenCV 中，获取图像特定的部分可使用掩膜，其函数原型为 cv2.bitwise_and()，掩膜算法流程及代码如图 6 所示。

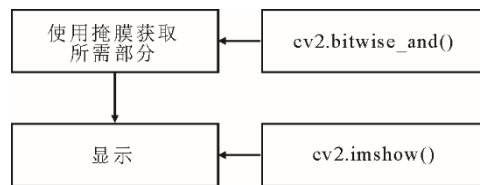


图 6 掩膜算法流程及代码
Fig.6 The code and flow chart of mask algorithm

使用该函数时，掩膜白色区域对需要处理的像素进行保留，而黑色区域对无需处理的像素进行剔除。图 7 为掩膜应用于磁痕时处理效果。基于图 5 的辅助，分别设置磁痕掩膜与背景掩膜（图 7a)和图 7b)，磁痕掩膜即将辅助图中白色背景设为黑色，红色部分设为白色。背景掩膜即将辅助图中红色部分设为黑色，其余部分随机抽取坐标设为白色，保证白色坐标数量与磁痕掩膜白色坐标数量相同。由对图 4 使用掩膜后（图 7c)—图 7f) 可见，掩膜为磁痕与背景提供了一个坐标参考范围。

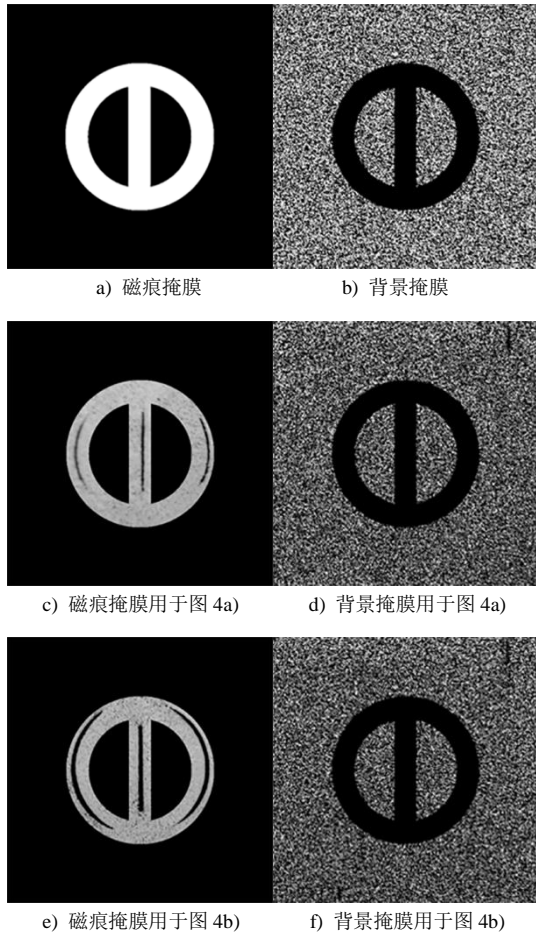


图 7 掩膜应用于磁痕时处理效果
Fig.7 The effect of mask applied to magnetic marks

3.2.2 二值化阈值

本文采用二值化提取磁痕：在磁痕掩膜范围内，设定一个灰度阈值，然后遍历所有像素点，当某个像素点的灰度值低于灰度阈值时（颜色较深），将该点灰度值设为 0（纯黑）；而像素点灰度值高于阈值时（颜色较浅），将其灰度值设为 255（纯白）；在背景掩膜范围内，像素灰度值全部设为 255（纯白）。整个图像呈现只有黑和白的视觉效果。将黑色部分记为磁痕，白色部分记为背景。

图 8 展示了对图 4 采用不同灰度阈值进行二值化后结果（磁痕掩膜黑色坐标范围内的像素点已设为白色），图 8a)、图 8c)、图 8e)为图 4a)的结果，图 8b)、图 8d)、图 8f)为图 4b)的结果。从图 8a)可以看出，当灰度阈值为 60 时，二值化无法将实际磁痕完整提取出来。而当灰度阈值为 140 时（图 8c），磁痕提取效果较好。随着灰度阈值上升，磁痕掩膜中属于“背景”部分的像素点也参与进来，被记为磁痕的像素点变多。当阈值达到 180 时（图 8e），磁痕掩膜范围内大部分像素被记为磁痕。因此，对

于 A1:30/100 试片的磁痕图像，当灰度阈值在 140 左右时，提取效果较好，在保留实际磁痕的同时，较大程度排除了无关像素。

对于图 4b)试片磁痕类似，当灰度阈值为 10 时（图 8b），无法获得完整磁痕显示。阈值为 100 左右时提取效果较好（图 8d）。随着阈值上升至 160（图 8f），与实际磁痕无关的像素点也被纳入磁痕的范围。

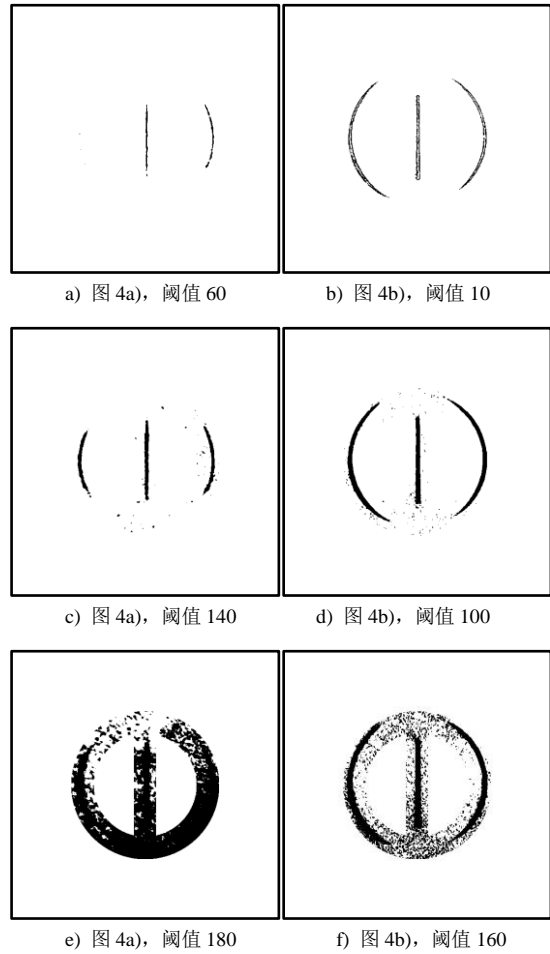


图 8 不同灰度阈值下二值化后结果
Fig.8 The binarization results with different gray thresholds

以上分析表明：对于不同图像，合适的灰度阈值是不同的。过低的阈值无法提取出完整的磁痕，而过高的阈值会将与磁痕无关的背景像素也纳入磁痕范围。如何选取合适的灰度阈值成为提取磁痕的关键问题。

对于同一磁痕显示图像，人为选取灰度阈值具有较大的主观性，也可能带来误差。因此灰度阈值的大小应由图像本身决定。可以通过对磁痕掩膜与背景掩膜内的像素分别进行统计分析来确定灰度阈值，直方图计算是一种有效的确定灰度阈值方法。

3.2.3 磁痕与背景的直方图计算

图像直方图将像素按灰度值进行统计，可以清晰地展示图像中各个灰度值下的像素数量，图9为直方图计算流程及代码。

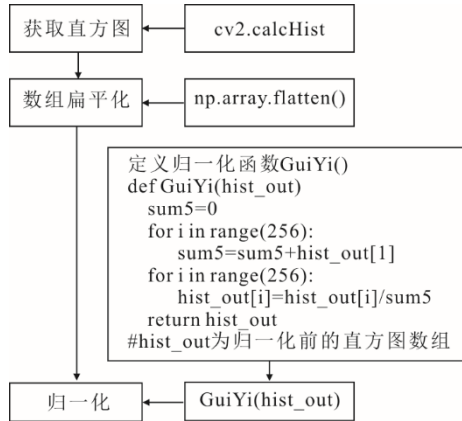


图9 直方图计算流程及代码

Fig.9 The code and flow chart of histogram calculation

3.2.1 节中已经使用掩膜将磁痕与背景分离，所以仅需分别对磁痕掩膜与背景掩膜内的像素进行直方图统计，即可得到磁痕与背景像素灰度值分布。图10展示了图4的直方图曲线，其中横坐标为图像的灰度值，纵坐标为具有该灰度值的像素数量（已归一化，曲线与横轴面积积分为1）。

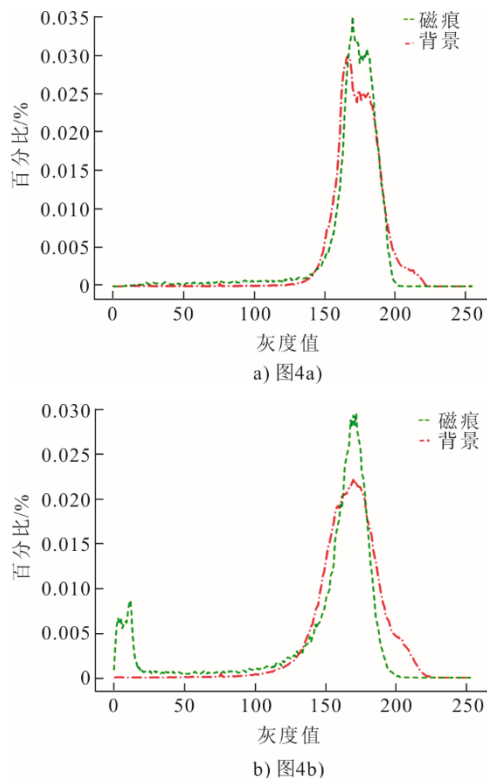


图10 图4的磁痕图像直方图

Fig.10 The histogram of magnetic trace image in Fig.4

从图10a)可以看到，图4a)磁痕直方图（绿色线）与背景直方图（红色线）均呈“单峰”状。仔细观察可以发现，当灰度值较低时（约0~100），相比于背景直方图，磁痕直方图中相同灰度值所占的像素个数较高，这是由于磁痕掩膜范围内存在黑色磁痕所致。这对于图4b)的磁痕图像更为明显，因为磁痕掩膜内的磁痕非常清晰，图10b)磁痕直方图在灰度值0~25之间具有大量像素点，曲线上形成了一个相对低矮的峰。

通过以上分析可知，相较于背景直方图，磁痕直方图在低灰度值范围内具有更多像素点。因此，磁痕清晰程度可由磁痕直方图和背景直方图在低灰度值范围内像素点数量差来表征。磁痕清晰程度越高，像素点数量差就越大。

3.2.4 “1%面积法”确定灰度阈值

磁痕直方图以背景直方图为基线，高于基线的部分为实际磁痕。背景掩膜内不包含磁痕，而磁痕掩膜内却包含部分背景像素。由于实际磁痕像素的灰度值远低于背景像素平均灰度值，因此仅需将阈值稍微设置高些即可包括磁痕像素，然而过高的阈值会将过多的背景像素计入磁痕像素中。为将这些背景像素排除，本文提出“1%面积法”来确定灰度阈值，即：对归一化后的背景直方图从0进行面积积分，当积分值 $\geq 1\%$ 时，将此时的灰度值记为灰度阈值。

该方法也可理解为：当背景直方图曲线从0开始的积分值达到1%时，如果将此刻的灰度值记为灰度阈值，意味着占背景像素总数量1%的像素被计入磁痕范围。如果将该灰度阈值应用于磁痕掩膜内的像素并二值化，则被计入磁痕的包含磁痕像素以及1%的背景像素。1%面积法确定灰度阈值流程及代码如图11所示。

使用1%面积法后，被计入磁痕范围的像素包含所有的实际磁痕像素以及约1%的背景像素。下面将对这1%的背景像素进行处理，首先遍历磁痕直方图中的像素点，将像素坐标按灰度值进行分组。对于灰度值 i ，其坐标列表为 $list(i)$ 为 $[[x_1^i, y_1^i], [x_2^i, y_2^i], [x_3^i, y_3^i] \cdots]$ ，随后将坐标顺序打乱。如果灰度值 i 下磁痕像素数量 $hist_in[i]$ 大于背景像素数量 $hist_out[i]$ ，则将 $hist_in[i]-hist_out[i]$ 赋值给 $hist_in[i]$ ，否则对 $hist_in[i]$ 赋值为0。随后只保留 $list(n)$ 中前 $hist_in[i]$ 个坐标。这样的作用相当于在磁痕掩膜内对灰度值 i 随机去除掉 $hist_out[i]$ 个像素坐标。图12为背景处理流程及代码。

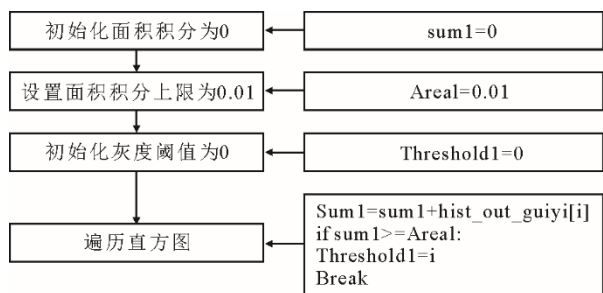


图 11 1%面积法确定灰度阈值流程及代码
Fig.11 The code and flow chart of determining gray scale threshold using 1% area method

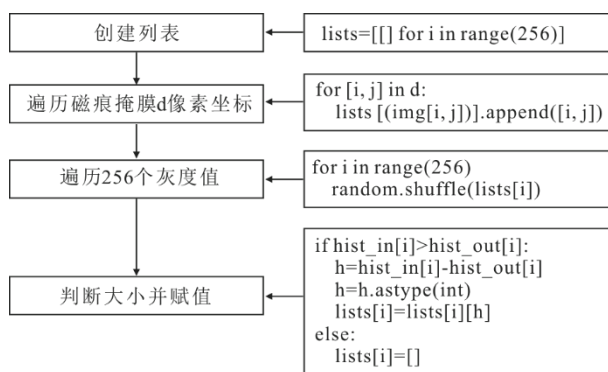
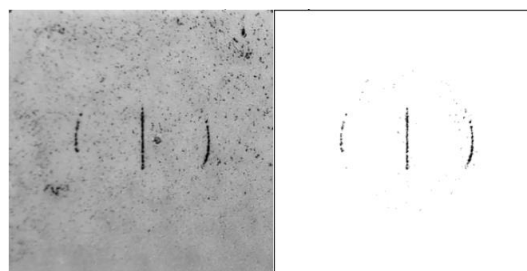
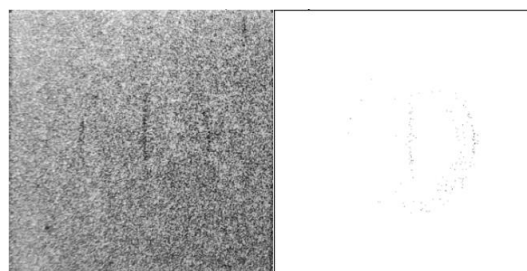


图 12 背景处理流程及代码
Fig.12 The code and flow chart of background processing

处理后的 lists[i]即为磁痕坐标列表。遍历 600 px × 600 px 的全白图像，如果坐标属于 lists[i]，则将该坐标赋值为 0（纯黑），即实现二值化，得到最终磁痕提取图像。图 13 与图 14 分别展示了非磁性层厚度对 A1:30/100 与 A1:60/100 磁痕显示的影响以及相应的磁痕提取结果。由图 13 和图 14 可见，随着厚度的增加，A1:30/100 与 A1:60/100 磁痕显示逐渐变得模糊。对于 A1:30/100 试片，非磁性层厚度达 (148.2 ± 6.7) μm 时即难以分辨磁痕（图 13c）；对于 A1:60/100 试片，非磁性层厚度达 (263.8 ± 1.4) μm 时难以分辨磁痕（图 14f）。此外，无论是对于背景较为干净，黑色颗粒噪声点较少的图像，还是由于磁悬液不均导致的黑色颗粒噪声点较多的图像，提取效果均良好。



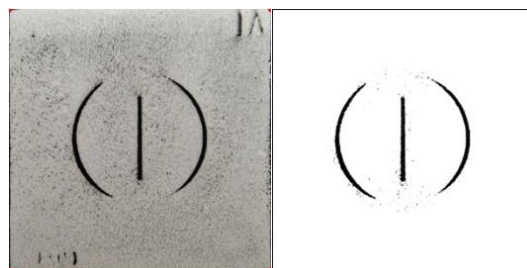
b) (70.8 ± 3.3) μm



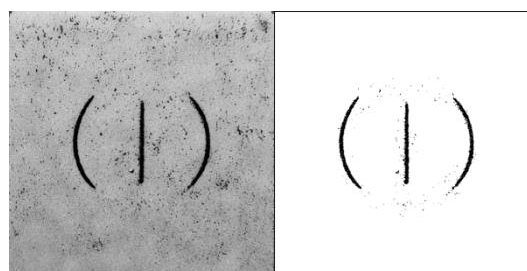
c) (148.2 ± 6.7) μm

图 13 非磁性层厚度对 A1:30/100 磁痕显示的影响及磁痕提取结果

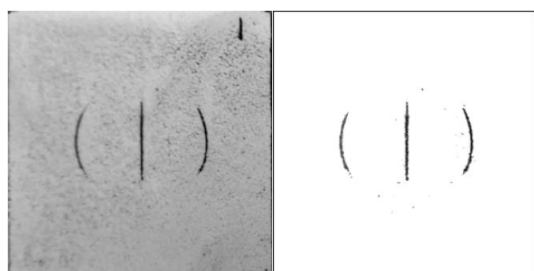
Fig.13 Influence of non-magnetic layer thickness on A1:30/100 magnetic trace display and the corresponding magnetic trace extraction results



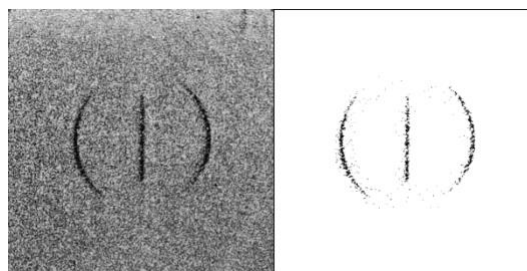
a) (31.2 ± 3.1) μm



b) (70.8 ± 3.3) μm



a) (31.2 ± 3.1) μm



c) (148.2 ± 6.7) μm

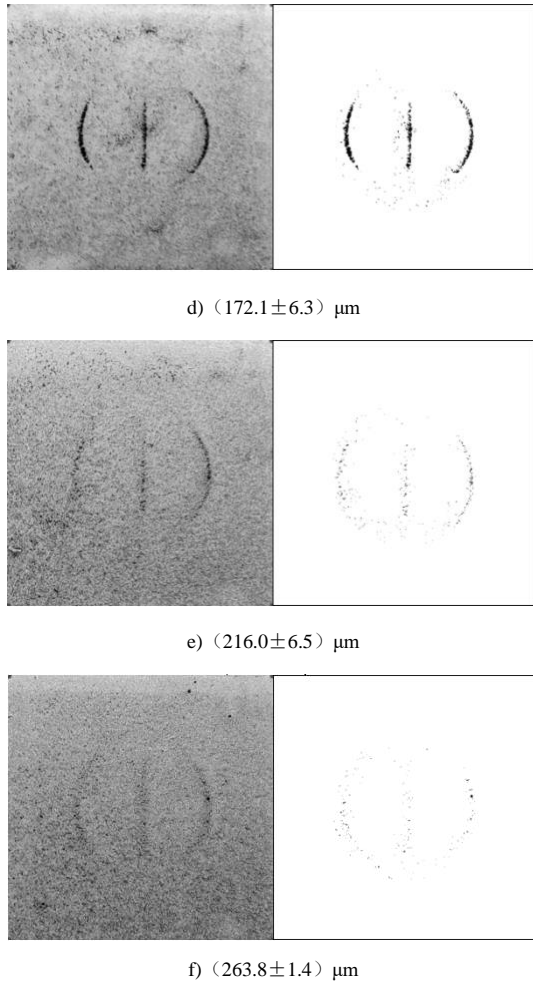


图 14 非磁性层厚度对 A1:60/100 磁痕显示的影响以及磁痕提取结果

Fig.14 Influence of non-magnetic layer thickness on A1:60/100 magnetic trace display and the corresponding magnetic trace extraction results

3.3 定量分析与评价

提取磁痕后,需要将磁痕图像转化为可计算的磁痕强度 I ,磁痕强度可以客观地反映磁痕的清晰程度。磁痕越清晰,磁痕强度 I 的值越高,因此, I 应与磁痕的像素数量和色彩等级灰度值成正相关。其次,由于不同磁痕图像的面积可能不同,为排除面积大小的影响, I 应与图像的面积成负相关。对于磁粉检测,大多数情况是以白色反差剂为底,带有颜色的磁悬液形成的磁痕为可视对象。对于灰度图,灰度等级的区间为 0~255。因此在计算磁痕强度时,将黑色像素的色彩等级设为最高的 255。计算公式为:

$$I = \frac{H \cdot n_H}{S} = \frac{255 \times n}{600 \times 600} \quad (1)$$

式中: I 为磁痕强度; H 为色彩等级; n_H 为该色彩等级所拥有的像素数量; S 为磁痕图像的面积; n 为

黑色像素数量。

因此,磁痕强度 I 为各个色彩等级 H 与该色彩等级拥有的像素数量乘积与磁痕图像面积 S 的比值。根据磁痕强度 I 评价磁痕清晰度,磁痕清晰度的评价方法为: $0 \leq I < 1$, 模糊; $1 \leq I < 2$, 可见; $2 \leq I < 3$, 较清晰; $I \geq 3$, 清晰。图 15 为磁痕强度计算结果及其清晰度评价。

由图 15 可以看出,随着非磁性层厚度的增加, A1:30/100 试片与 A1:60/100 试片的清晰度评价均下降。对于 A1:30/100 试片,非磁性层厚度为 31.2 μm 时,清晰度评价为“较清晰”;厚度分别增至 70.8 μm 和 148.2 μm 时,清晰度评价降至“较清晰”及“模糊”。对于 A1:60/100 试片,当非磁性层厚度为 31.2 μm 与 70.8 μm 时,清晰度评价为“清晰”;厚度为 148.2 μm 与 172.1 μm 时,清晰度评价为“较清晰”;而当非磁性层厚度大于 200.0 μm 时,试片清晰度评价为“模糊”。综上,该方法可有效提取标准试片上的磁痕特征,得出的磁痕评价结果相较于人工判断更加客观。

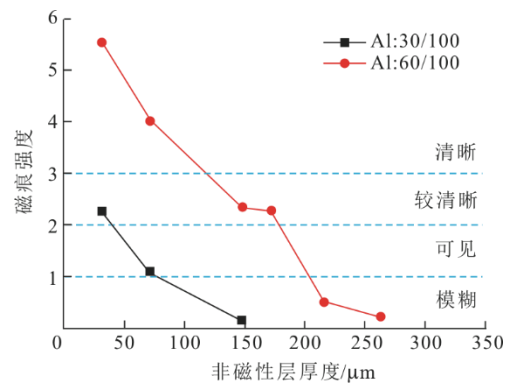


图 15 磁痕强度计算结果及其清晰度评价

Fig.15 Calculation results of magnetic mark intensity and its clarity evaluation

4 结 论

本文针对目前标准试片磁痕清晰度评价流程中人员主观因素较多的问题。提出了一种基于机器视觉与 OpenCV 的标准试片磁痕评价方法。该方法通过图像修正、磁痕提取、定量分析与评价 3 个步骤,探究了非磁性层厚度对磁粉检测综合灵敏度的影响。结果表明,磁痕提取效果良好,随着非磁性层厚度增加, A1:30/100 与 A1:60/100 试片的磁痕强度与磁痕清晰度均下降。由于 A1:30/100 缺陷深宽较小,当非磁性层厚度升至 148.2 μm 时清晰度降至“模糊”;而 A1:60/100 缺陷深宽较大,当非磁性层

厚度高于 200.0 μm 时, 清晰度评价为“模糊”。综上, 该方法可为评价磁痕清晰度提供依据, 得出的评价结果相较于人工判断更加客观。

【参考文献】

- [1] 姚力, 胡学知, 范吕慧. 压力容器无损检测—磁粉检测技术[J]. 无损检测, 2004(6): 302-306.
YAO Li, HU Xuezh, FAN Lühui. Nondestructive testing of pressure vessels: magnetic particle testing[J]. Nondestructive Testing, 2004(6): 302-306.
- [2] 吴前驱, 余锡荣. 漏磁场检测在无损检验中的应用[J]. 热力发电, 1979(10): 47-54.
WU Qianqu, YU Xirong. Application of magnetic leakage detection in nondestructive testing[J]. Thermal Power Generation, 1979(10): 47-54.
- [3] 胡丹, 高向东, 张南峰, 等. 焊缝缺陷检测现状与展望综述[J]. 机电工程, 2020, 37(7): 736-742.
HU Dan, GAO Xiangdong, ZHANG Nanfeng, et al. Review of status and prospect of weld defect detection[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(7): 736-742.
- [4] 徐桂荣, 刘甜甜, 关雪松, 等. 航空产品磁粉检测与渗透检测分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(6): 123-127.
XU Guirong, LIU Tiantian, GUAN Xuesong, et al. Analysis of magnetic particle testing and penetrant testing for aviation products[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2021, 44(6): 123-127.
- [5] 雷雨. 航空器机轮轮毂连接螺栓的磁粉检测[J]. 无损检测, 2007(3): 163-164.
LEI Yu. Magnetic particle inspection of aircraft tie bolt[J]. Nondestructive Testing, 2007(3): 163-164.
- [6] 沈功田. 承压设备无损检测与评价技术发展现状[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 1-12.
SHEN Gongtian. Development status of nondestructive testing and evaluation technique for pressure equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(12): 1-12.
- [7] 杨国军. 压力容器焊缝及其附近微裂纹的检测[J]. 制造业自动化, 2010, 32(14): 17-18.
YANG Guojun. The detection of pressure vessels and near the weld cracks[J]. Manufacturing Automation, 2010, 32(14): 17-18.
- [8] 程志义, 姜岩, 周广浩, 等. 基于旋转磁场磁化技术的铁道机车车辆转向架构架整体磁粉检测[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(2): 120-122.
CHENG Zhiyi, JIANG Yan, ZHOU Guanghao, et al. Overall magnetic particle detection of railway locomotive vehicle bogie frame based on rotating magnetic field magnetization technology[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(2): 120-122.
- [9] 蔡瑛, 阮振荣. 磁粉探伤在重型汽车维修上的应用[J]. 矿山机械, 2002(12): 29-31.
CAI Ying, RUAN Zhenrong. Application of magnetic particle inspection in heavy duty vehicle maintenance[J]. Mining & Processing Equipment, 2002(12): 29-31.
- [10] 黄立好. 在役液化石油气罐焊缝表面裂纹分析[J]. 无损检测, 2006(11): 615.
HUANG Lihao. Seam surface crack analysis of liquified petroleum gas tank in service[J]. Nondestructive Testing, 2006(11): 615.
- [11] 张庆社. 石油专用钻具螺纹荧光磁粉探伤及缺陷分析[J]. 无损检测, 2004(5): 256-257.
ZHANG Qingshe. Fluorescent magnetic particle inspection and flaw analysis for the screw thread of oil drilling tool[J]. Nondestructive Testing, 2004(5): 256-257.
- [12] 姚力, 范吕慧. 便携式磁轭法及交叉磁轭法磁粉检测技术的发展现状[J]. 无损检测, 2017, 39(12): 29-35.
YAO Li, FAN Lühui. The development status of magnetic particle testing using portable single and cross magnet yoke[J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(12): 29-35.
- [13] 林锡忠. 交流电磁轭的关节与磁粉检测灵敏度的关系[J]. 无损检测, 2013, 35(2): 67-70.
LIN Xizhong. The relationship between AC electromagnetic yoke and testing sensitivity[J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(2): 67-70.
- [14] 刁海波, 孙晓明, 马晶晶, 等. 磁轭放置方式对磁粉检测灵敏度影响的有限元分析[J]. 无损检测, 2014, 36(12): 73-75.
DIAO Haibo, SUN Xiaoming, MA Jingjing, et al. Finite element analysis of influence for magnetic particle inspection sensitivity by yoke placement[J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(12): 73-75.
- [15] 刘必荣, 董家美. 影响表面缺陷磁粉探伤检测质量的研究[J]. 表面技术, 2004(5): 66-67.
LIU Birong, DONG Jiamei. Research on affecting quality of surface disfigurement detection to magnetic powder[J]. Surface Technology, 2004(5): 66-67.
- [16] 余月娥. 磁悬液对磁粉探伤灵敏度的影响[J]. 无损检测, 1986, 8(5): 138-139.
YU Yuee. The effect of suspension on magnetic particle inspection sensitivity[J]. Nondestructive Testing, 1986, 8(5): 138-139.
- [17] 杨芸, 李龙, 蔡翔, 等. 荧光磁粉探伤中磁悬液品质的影响及测控装置[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(4): 574-580.
YANG Yun, LI Long, CAI Xiang, et al. Influence of magnetic suspension quality in fluorescent magnetic particle inspection and its measurement and control system[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(4): 574-580.
- [18] 王珏炜, 王建德, 郭志贤, 等. 工件表面粗糙度对磁粉检测结果的影响[J]. 中国特种设备安全, 2008, 24(10): 39-41.
WANG Yuwei, WANG Jiande, GUO Zhixian, et al. Effect of workpiece surface roughness on magnetic particle detection results[J]. China Special Equipment Safety, 2008, 24(10): 39-41.
- [19] 张继楷, 李龙, 冯搏, 等. 表面粗糙度对磁粉检测的影响[J]. 无损检测, 2016, 38(3): 52-55.
ZHANG Jikai, LI Long, FENG Bo, et al. Influence of surface roughness on magnetic particle inspection[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(3): 52-55.
- [20] 宋国成. 表面粗糙度对磁粉检测的影响分析[J]. 冶金与材料, 2019, 39(1): 132-134.
SONG Guocheng. Analysis of the influence of surface roughness on magnetic particle detection[J]. Metallurgy and Materials, 2019, 39(1): 132-134.
- [21] 陈昌华, 王司男, 汤志贵, 等. 磁粉检测磁化电流计算与分析[J]. 物理测试, 2017, 35(5): 1-6.
CHEN Changhua, WANG Sinan, TANG Zhigui, et al. Calculation and analysis of the magnetic current in the magnetic particle testing[J]. Physics Examination and Testing, 2017, 35(5): 1-6.

- [22] 肖成珺. 便携式电磁轭探伤仪电流类型对无损检测灵敏度的影响[J]. 甘肃科技, 2020, 36(23): 36-38.
XIAO Chengjun. Influence of current type of portable yoke flaw detector on sensitivity of nondestructive testing[J]. Gansu Science and Technology, 2020, 36(23): 36-38.
- [23] 林锡忠. 蓄电池供电式交流电磁轭磁粉检测灵敏度的补偿[J]. 无损检测, 2014, 36(6): 52-54.
LIN Xizhong. Sensitivity compensation for magnetic particle detection with battery power supply type alternating current electromagnetic yoke[J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(6): 52-54.
- [24] 袁兴龙, 李跟社, 王超. 磁粉探伤中 A₁ 30/100 与 A₂ 30/100 标准试片使用性能探讨[J]. 焊管, 2018, 41(1): 60-62.
YUAN Xinglong, LI Genshe, WANG Chao. Performance discussion on A₁ 30/100 and A₂ 30/100 standard test pieces in magnetic particle inspection[J]. Welded Pipe and Tube, 2018, 41(1): 60-62.
- [25] 合肥通用机械研究院. 承压设备无损检测. 第 4 部分: 磁粉检测: NB/T 47013.4—2015[S]. 北京: 新华出版社, 2015: 8.
Hefei General Machinery Research Institute. Nondestructive testing of pressure equipments—Part 4: magnetic particle testing: NB/T 47013.4—2015[S]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2015: 8.
- [26] 段峰, 王耀南, 雷晓峰, 等. 机器视觉技术及其应用综述[J]. 自动化博览, 2002(3): 62-64.
DUAN Feng, WANG Yaonan, LEI Xiaofeng, et al. Overview of machine vision technology and its applications[J]. Automation Panorama, 2002(3): 62-64.
- [27] 曹亮, 魏怡, 姚思勤. 机器视觉技术及其发展和应用[J]. 中国科技信息, 2008(11): 40-41.
CAO Liang, WEI Yi, YAO Siqin. Machine vision technology and its development and application[J]. China Science and Technology Information, 2008(11): 40-41.
- [28] 张绿云, 韦肖雨, 李琳. 基于 Python 与 OpenCV 的人脸识别系统设计与实现[J]. 电脑知识与技术, 2022, 18(10): 87-88.
ZHANG Luyun, WEI Xiaoyu, LI Lin. Design and implementation of face recognition system based on Python and OpenCV[J]. Computer Knowledge and Technology, 2022, 18(10): 87-88.
- [29] 李成勇, 王莎, 陈成瑞. 基于 OpenCV 的人脸识别系统设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(11): 168-172.
LI Chengyong, WANG Sha, CHEN Chengrui. Design and implementation of face recognition system based on OpenCV[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(11): 168-172.
- [30] 石泽琼, 毛俊强, 李双伟, 等. 基于 OpenCV 的运动目标识别跟踪[J]. 中国集成电路, 2019, 28(4): 20-25.
SHI Zeqiong, MAO Junqiang, LI Shuangwei, et al. Moving target recognition and tracking based on OpenCV[J]. China Integrated Circuit, 2019, 28(4): 20-25.
- [31] 张玉荣, 王强强, 吴琼, 等. 基于 Python-OpenCV 图像处理技术的小麦不完善粒识别研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 105-112.
ZHANG Yurong, WANG Qiangqiang, WU Qiong, et al. Research on imperfect wheat grain recognition based on Python-OpenCV image processing technology[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(6): 105-112.
- [32] 王键, 梁春娇, 郭俊先, 等. 基于 OpenCV 确定植物叶片面积[J]. 分子植物育种, 2020, 18(6): 2023-2027.
WANG Jian, LIANG Chunjiao, GUO Junxian, et al. Measurement of plant leaf area based on OpenCV[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(6): 2023-2027.
- [33] 刘军, 高雪婷, 王利明, 等. 基于 OpenCV 的前方车辆检测和碰撞预警算法研究[J]. 汽车技术, 2017(6): 11-16.
LIU Jun, GAO Xueting, WANG Liming, et al. Research on preceding vehicle detection and collision warning method based on OpenCV[J]. Automobile Technology, 2017(6): 11-16.
- [34] 李清洲, 潘为刚, 王书新. 基于 Python-OpenCV 的车牌识别系统[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2020, 20(9): 59-62.
LI Qingzhou, PAN Weigang, WANG Shuxin. License plate recognition system based on Python-OpenCV[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2020, 20(9): 59-62.

(责任编辑 杜亚勤)