

基于改进 LoG-Zernike 矩的亚像素磁瓦边缘检测方法^{*}

张 陈 单文桃 徐 成

(江苏理工学院机械工程学院 常州 213001)

摘 要: 针对磁瓦轴长、弦长等关键尺寸在检测过程中所面临的检测手段复杂、精度难以保障的难题,本文提出了一种改进 LoG-Zernike 矩的亚像素边缘检测方法。首先,对采集的磁瓦图像进行预处理,随后采用自适应中值滤波对传统 LoG 算子进行优化,通过滤波去噪实现像素级的粗定位。接着,利用 Zernike 模板计算边缘阈值,并通过二维 Otsu 算法确定最佳阶跃阈值,以确认边缘亚像素点。最后,采用最小二乘法对磁瓦边缘进行拟合。实验结果表明,磁瓦轴长与弦长的相对误差率分别为 0.060%、0.018%,误差精度分别控制在 ± 0.01 mm、 ± 0.004 mm 之间,单个磁瓦平均检测时间为 1.56 s,证实了该方法的有效性与实用性。

关键词: LoG 算子;Zernike 矩;Otsu 算法;最小二乘法;边缘检测

中图分类号: TN29;TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Sub-pixel magnetic tile edge detection method based on improved
LoG-Zernike moment

Zhang Chen Shan Wentao Xu Cheng

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: Addressing the challenges associated with complex detection methods and the difficulties in ensuring accuracy when measuring key dimensions such as the axial length and chord length of magnetic tiles, this study proposes a sub-pixel magnetic tile edge detection method that enhances the traditional LoG-Zernike moment approach. Initially, the collected images undergo preprocessing, followed by the application of adaptive median filtering to optimize the conventional LoG operator, thereby achieving pixel-level coarse positioning through filtering and denoising. Subsequently, the Zernike template is employed to calculate the edge threshold, with the optimal step threshold determined using the two-dimensional Otsu algorithm to identify the sub-pixel points along the edge. Finally, the least squares method is utilized to fit the edge of the magnetic tile. Experimental results indicate that the relative error rates for the magnetic tile shaft length and chord length are 0.060% and 0.018%, The precision of the errors is kept within ± 0.01 mm and ± 0.004 mm, respectively, while the average time taken for detection per magnetic tile is 1.56 seconds. The effectiveness and practicality of the method have been confirmed.

Keywords: LoG operator; Zernike moment; Otsu algorithm; least squares method; edge detection

0 引 言

磁瓦作为电机中关键组件,承担着作为励磁源或转子磁极的功能。在对磁瓦规格进行精确评估的过程中,轴向长度与弦向长度的测量精度具有至关重要的作用。目前,磁瓦轴长的检测主要依赖于人工使用游标卡尺进行目视测量。由于磁瓦所具有的磁性特质,其检测过程遭遇了挑战,进而影响了检测的精度。

在图像处理领域,边缘检测技术经过持续演进已发展成为兼具高效性与精确性的核心技术体系。然而,在实际应用过程中,传统边缘检测算法受限于像素级边缘定位精

度,这种技术瓶颈严重制约了其在精密测量领域的应用^[1]。为应对复杂工业场景下对亚像素级边缘特征提取的迫切需求,杜港等^[2]开发了一种基于 Canny-Franklin 矩的亚像素边缘检测算法,其在检测精度与运算效率方面均呈现突出性能表现。于微波等^[3]通过改进 Zernike 矩边缘点判断条件,减少了伪边缘的存在,提升了定位精度,但未充分考虑降噪性能。欧阳等^[4]在粗定位阶段利用 ROI (Region of Interest) 区域,随后利用 Zernike 矩求解亚像素,从而提高了运行速度与精度。在磁瓦图像预处理方面,学者们也进行了大量研究,其中李明等^[5]针对磁瓦缺陷检测存在的多尺度分割误差、模型参数量冗余及灰度不均匀三大问题,提

出轻量化 Deeplabv3+改进网络,该模型通过多级特征融合架构,在保持检测精度的同时减少了 30% 计算量。Xie 等^[6]提出了一种创新性的方法,该方法融合了 Shearlet 变换与自适应阈值技术。这一创新方案在处理磁瓦图像时,成功地应对了背景不均匀性所带来的挑战。黄兴^[7]利用 Halcon 软件进行了磁瓦缺陷检测研究,并构建了一个集成检测系统,旨在提高缺陷识别的效率和准确性。在对边缘检测算子进行改进的研究中,董雪等^[8]提出一种基于 LoG (Laplacian of Gaussian) 算子优化的自适应阈值去噪方法,通过动态参数调整机制,在抑制图像噪声的同时保持边缘结构特征完整性。

基于前述讨论,本文针对磁瓦边缘检测问题,提出了一项创新的优化方案。该方案通过结合改进的 LoG 算子与 Zernike 矩,实现了对磁瓦边缘的亚像素级检测。利用最小二乘法对检测结果进行直线拟合,精确测量了磁瓦的轴向长度和弦长尺寸^[9],该算法显著减少了噪声干扰,并且大幅提升了检测的精确度。

1 图像预处理与边缘检测

在磁瓦边缘检测的预处理阶段,图像噪声与干扰必须得到有效的抑制,以排除非相关信息,为后续处理步骤奠定坚实基础^[10]。本文首先应用 Otsu 阈值分割法,实现图像特征与背景的有效分离。随后,通过位运算技术对图像进行精细处理以实现图像的精确分割,并运用形态学处理技术解决磁瓦材料反光属性引起的空洞和断点等二值化图像常见问题,以获得更为清晰的轮廓特征图。此外,采用像素级边缘检测算法对图像边缘进行初步定位,继而运用矩方法对初步定位结果进行进一步处理,以实现亚像素级边缘的精确获取^[11]。

1.1 基于 LoG 算子的边缘检测

传统 LoG 算子认为微分算子需满足与图像各点处一阶或二阶导数计算结果的数学等价性,同时具备多尺度可调特性。为满足上述条件,LoG 算子通过对高斯核函数进行二阶偏导数运算而构建,其滤波器表达式如下:

$$\nabla^2 G \quad (1)$$

其中, ∇^2 代表 LoG 算子,而 G 则表示二维高斯函数,为求得滤波器的精确表达式,需将拉普拉斯算子作用于二维高斯函数,化简整理后可得:

$$\nabla^2 G(x, y) = \left(\frac{x^2 + y^2 - 2\sigma^2}{\sigma^4} \right) e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

1.2 改进的 LoG 算子

传统 LoG 算子高斯平滑程度取决于 σ 取值,当 σ 取值较小时,滤波后图像较清晰,但抑制噪声能力弱。当 σ 取值较大时,抑制噪声能力强,但是图像整体质量下降^[12]。

针对高斯滤波缺乏自适应性以及检测环境噪声中的高灰度值和低灰度值噪点特性,提出了运行 LoG 算子之前使用自适应中值滤波,用小尺度的高斯函数进行平滑处理后再进行拉普拉斯运算。具体运行步骤如下:

步骤 1) 对采集图像执行自适应中值滤波去噪处理,具体流程如下:

(1) 令 $A_1 = Z_{\text{med}} - Z_{\text{min}}$, $A_2 = Z_{\text{med}} - Z_{\text{max}}$, 若 $A_1 > 0$ 或 $A_2 < 0$, 则进入步骤 2); 反之应增加 S , 若增加后尺寸 $\leq S_{\text{max}}$, 则返回步骤 1) 继续执行; 若超过, 则输出 Z_{med} 作为结果。

(2) 令 $B_1 = Z_{xy} - Z_{\text{min}}$, $B_2 = Z_{xy} - Z_{\text{max}}$, 若 $B_1 > 0$ 或 $B_2 < 0$, 输出 Z_{xy} , 反之输出 Z_{med} 。

其中, Z_{med} 为滤波器中位灰度值, Z_{xy} 为某一像素点的灰度值。自适应中值滤波器采用双层动态机制, 首先基于邻域灰度分布动态校准噪声阈值 ($Z_{\text{min}}/Z_{\text{max}}$) 作为异常像素判据, 其次通过限制最大窗口尺寸 S_{max} (7×7) 平衡去噪效果与计算效率。该尺寸在保留边缘细节 (Z_{xy} 与 Z_{med} 差异 $<$ 阈值) 的同时, 能够满足实时处理的计算资源约束。

步骤 2) 对经过滤波处理的图像执行小尺度高斯平滑去噪处理, 以进一步消除残留的噪声杂质。为验证改进算法的有效性, 如图 1(a) 所示, 分别对检测磁瓦施加高斯噪声 ($\sigma = 0.01$) 和椒盐噪声 ($p = 0.1$), 并采用传统 LoG 算子与改进 LoG 算子进行边缘处理分别由图 1(b) 和 (c) 所示。结果显示, 在处理含有噪声图像过程中, 改进后的检测算子相较于传统 LoG 算子展现出更为优越的检测性能。

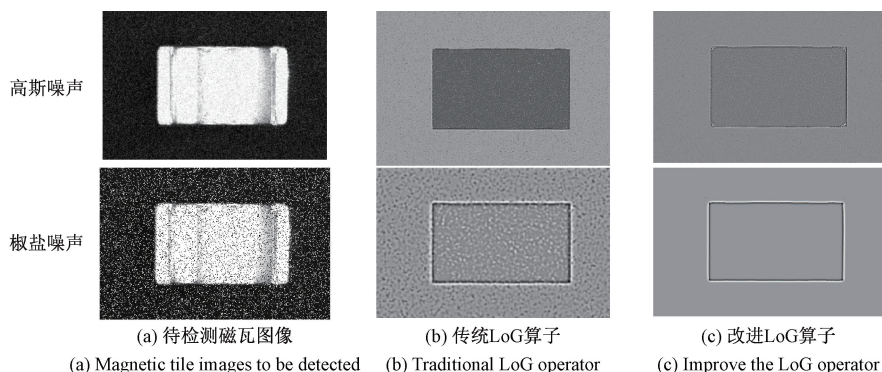


图 1 改进 LoG 算子与传统 LoG 算子实验对比图

Fig. 1 Comparative experimental diagram of improved LoG operator and traditional LoG operator

2 Zernike 矩亚像素边缘提取

在亚像素检测方法中,Zernike 矩因其独特的正交性和旋转不变性而备受关注。基于 Zernike 多项式的定义,可以导出具有所述特性的 Zernike 矩^[13]。具体而言, n 阶 m 次 Zernike 矩的定义式如下:

$$Z_{n,m} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x,y) V_{n,m}^*(\rho,\theta) dx dy \quad (3)$$

其中, $n+1/\pi$ 为归一化函数, $f(x,y)$ 采用的是直角坐标系, $V_{n,m}^*(\rho,\theta)$ 采用的则为极坐标系,* 表示共轭。

2.1 Zernike 矩边缘检测原理

首先,建立一个理想灰度阶跃模型,接着借助该矩的旋转不变性提取模型的 4 个参数 l, k, h, θ 后,将其映射到该矩中进行计算,以精确定位图像边缘。如图 2(a) 所示,为 Zernike 矩原始图像边缘,旋转 θ 角后如图 2(b) 所示。

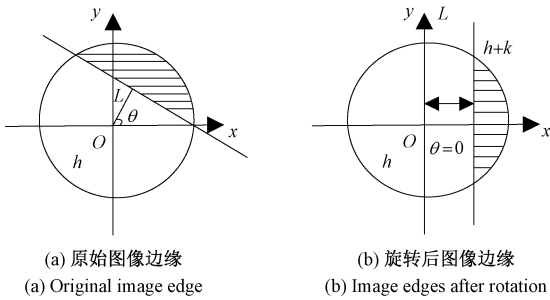


图 2 理想边缘模型

Fig. 2 Ideal edge model

根据 Zernike 矩的特性与定义可求得:

$$\begin{cases} Z'_{0,0} = h\pi + \frac{k\pi}{2} - k \arcsin(l) - kl \sqrt{1-l^2} \\ Z'_{1,1} = \frac{2k(1-l^2)^{\frac{3}{2}}}{3} \\ Z'_{2,0} = \frac{2kl(1-l^2)^{\frac{3}{2}}}{3} \\ Z'_{3,1} = k \left[\frac{4}{5} l^2 (1-l^2)^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{15} (1-l^2)^{\frac{3}{2}} \right] \\ Z'_{4,0} = k \left[-\frac{2}{5} l^2 (1-l^2)^{\frac{3}{2}} + \frac{16}{15} (1-l^2)^{\frac{3}{2}} \right] \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可得出边缘模型的 3 个参数 l, h, k :

$$\begin{cases} l = \frac{Z'_{2,0}}{Z'_{1,1}} \\ k = \frac{3Z'_{1,1}}{2(1-l^2)^{\frac{3}{2}}} \\ h = \frac{Z'_{0,0} - \frac{k\pi}{2} + \arcsin l + kl \sqrt{1-l^2}}{\pi} \end{cases} \quad (5)$$

因为 $Z'_{1,1}$ 的多项式形式为 $x+yi$, 通过定义可得该多项式为:

$$Z'_{1,1} = \text{Re}(Z'_{1,1}) + i\text{Im}(Z'_{1,1}) \quad (6)$$

其中, Re, Im 分别代表复数的实部与虚部, 由式(6)可以得出:

$$\text{Im}(Z_{1,1}) \cos(\theta) - \text{Re}(Z_{1,1}) \sin(\theta) = 0 \quad (7)$$

此时可求出模型中最后一个参数 θ :

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[Z_{1,1}]}{\text{Re}[Z_{1,1}]} \right) \quad (8)$$

如图 2(a) 所示, 将原点与垂足点分别标记为 (x, y) 和 (x', y') 。依据边缘阶跃模型所定义的 4 个参数, Zernike 矩的计算是通过模板与图像之间的卷积操作来完成的。设卷积模板尺寸为 $N \times N$, 那么在边缘点定位的过程中, 需要将 l 放大 $N/2$ 倍, 可以得出:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{Nl}{2} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

在进行图像检测的过程中, 必须借助于不同阶次的矩模板与图像执行卷积运算, 从而获取所需的图像矩特征。基于对文献[1]、[4]、[12]、[14]研究成果进行综合分析, 并对理想边缘的亚像素边缘检测方法进行验证, 研究结果表明, 当模板尺寸设定为 7×7 时, 边缘定位精确度更高。因此本文采用 7×7 模板, 由于篇幅限制具体的卷积模板在此不作详细展示。

2.2 改进 Zernike 算法

在传统 Zernike 算法框架下, 边缘特征点检测采用双阈值判据: 当曲率参数 $k \geq k_i$ 且梯度模量 $l \leq l_i$ 时成立, 其中 k_i (曲率阈值)、 l_i (梯度阈值) 为关键阈值参数。 l_i 的取值范围相对固定, 而 k_i 的取值范围则表现出较大的波动性, 导致寻找最佳阈值变得棘手。文献[14-15]中提到, 不同图像边缘灰度阶跃阈值通常不相同, 采用 Otsu 法确定其阈值有较好的效果。然而在实际情况中, 采集图片不可避免地会有噪声。针对上述问题, 提出了一种基于二维 Otsu 法获取图像最佳阈值 k_i 。图 3(a) 为磁瓦原图, 对原图分别添加相同程度的高斯噪声 ($\sigma = 0.01$) 处理后如图 3(b) 和 (c) 所示, 结果显示与一维 Otsu 法相比, 二维 Otsu 法明显具有更强的去除高斯噪声能力。

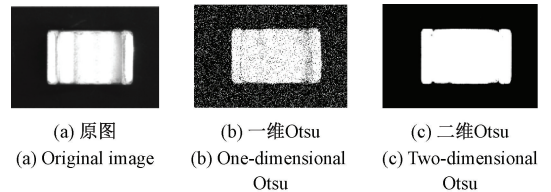


图 3 添加高斯噪声后一维与二维 Otsu 对比图

Fig. 3 Comparison chart of one-dimensional and two-dimensional Otsu after adding gaussian noise

二维 Otsu 算法通过构建像素灰度值 $f(x, y)$ 与局部邻域均值 $g(x, y)$ 的联合特征空间, 将双维度灰度分布量化为 L 阶离散直方图。再令 $f(x, y) = i, g(x, y) = j$, 对于某像素点可构建出一个二元组 (i, j) 。图像总像素点数

设为 N , 此时可定义二元组 (i, j) 对应概率密度为 $P_{i,j}$:

$$P_{i,j} = \frac{f_{i,j}}{N}, i, j = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (10)$$

选择阈值 (s, t) 将图像二维直方图划分为 4 个区域, 设目标区域与背景区域所占比例为 ω_0 与 ω_1 , 目标区域与背景区域对应的均值向量分别为 \mathbf{u}_0 和 \mathbf{u}_1 , 二维直方图全局均值为 \mathbf{u}_T , 从而可得:

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t p_{i,j} \quad (11)$$

$$\omega_1 = \sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=t+1}^{L-1} p_{i,j} \quad (12)$$

$$\mathbf{u}_0 = (\mu_{0i}, \mu_{0j})^T = \left(\sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t \frac{ip_{i,j}}{\omega_0}, \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t \frac{j p_{i,j}}{\omega_0} \right)^T \quad (13)$$

$$\mathbf{u}_1 = (\mu_{1i}, \mu_{1j})^T = \left(\sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=t+1}^{L-1} \frac{ip_{i,j}}{\omega_1}, \sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=t+1}^{L-1} \frac{j p_{i,j}}{\omega_2} \right)^T \quad (14)$$

$$\mathbf{u}_T = (\mu_{Ti}, \mu_{Tj})^T = \left(\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} ip_{i,j}, \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} j p_{i,j} \right)^T \quad (15)$$

二维 Otsu 阈值分割技术能够排除对角线以外的像素点影响, 进而定义一个类间离散度量:

$$S_B(s, t) = \omega_0[(u_{0i} - u_T)^2 + (u_{0j} - u_{Tj})^2] + \omega_1[(u_{1i} - u_T)^2 + (u_{1j} - u_{Tj})^2] \quad (16)$$

作为灰度阈值与邻域均值的双变量参数, (s, t) 的优化解需满足以下条件:

$$\sigma_{Bi}(s) = \omega_0(u_{0i} - u_i)^2 + \omega_1(u_{1i} - u_i)^2 \quad (17)$$

$$\sigma_{Bj}(t) = \omega_0(u_{0j} - u_j)^2 + \omega_1(u_{1j} - u_j)^2 \quad (18)$$

由式(17)、(18)分析得出, 二元函数 $S_B(s, t)$ 的最优解可分解为两个一元函数最优解之和, 即:

$$S_B(s', t') = \max_{0 \leq s \leq L-1} \{\sigma_{Bi}(s)\} + \max_{0 \leq t \leq L-1} \{\sigma_{Bj}(t)\} = \sigma_{Bi}(s') + \sigma_{Bj}(t') \quad (19)$$

为了获取更为精确的边缘检测效果, 本文采用 s 作为分割阈值, 以 s' 作为判断阈值 k_i 。改进 Zernike 算法的具体步骤如下:

步骤 1) 计算 7×7 的 Zernike 矩模板系数 $\mathbf{M}_{0,0}, \mathbf{M}_{1,1}, \mathbf{M}_{2,0}, \mathbf{M}_{3,1}, \mathbf{M}_{4,0}$;

步骤 2) 通过对 LoG 算子优化后的像素级边缘点与步骤 1) 中所定义的模板执行卷积运算, 以计算出 Zernike 矩的子模板系数 $\mathbf{Z}_{0,0}, \mathbf{Z}_{1,1}, \mathbf{Z}_{2,0}, \mathbf{Z}_{3,1}, \mathbf{Z}_{4,0}$;

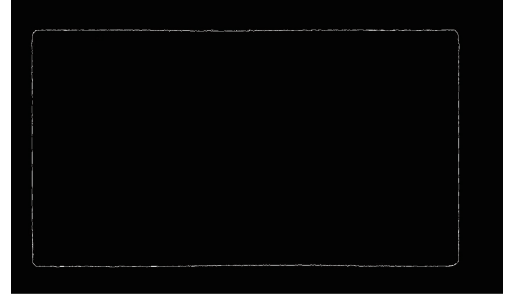
步骤 3) 通过边缘阶跃模型得到不同阶次的 Zernike 矩 $\mathbf{Z}'_{0,0}, \mathbf{Z}'_{1,1}, \mathbf{Z}'_{2,0}, \mathbf{Z}'_{3,1}, \mathbf{Z}'_{4,0}$ 后计算出关于参数 l, k, θ 的公式;

步骤 4) 将步骤 2) 得到的 Zernike 矩的子模板系数 $\mathbf{Z}_{0,0}, \mathbf{Z}_{1,1}, \mathbf{Z}_{2,0}, \mathbf{Z}_{3,1}, \mathbf{Z}_{4,0}$ 代入即可得出 l, h, k, θ 的具体数值;

步骤 5) 若边缘点满足 $k \geq k_i \cap l \leq l_i$, 则该点认定为亚像素边缘点, 并依据式(9)进行坐标计算。最佳阈值点的确定可依据式(19)得出。否则返回步骤 4), 计算下一个像素点。

素点。

本文提出的算法处理磁瓦亚像素边缘结果如图 4(a) 所示, 其局部放大如图 4(b) 所示, 可以看出磁瓦亚像素边缘的总体轮廓得到了较为完整的保留。



(a) 磁瓦总体轮廓亚像素边缘

(a) Subpixel edge of the overall contour of the magnetic tile



(b) 亚像素边缘局部放大

(b) Subpixel edge local magnification

图 4 亚像素边缘检测结果

Fig. 4 Subpixel edge detection results

2.3 最小二乘法拟合

基于改进的 Zernike 矩亚像素算法实现磁瓦边缘的亚像素级定位后。实验结果表明虽然能够完整提取磁瓦边缘轮廓, 但所得边缘数据仍存在离散噪声干扰。故本文利用下述方式对磁瓦边缘进行筛选, 具体步骤如下:

步骤 1) 设图 4(a) 为 2448×2048 维度的矩阵 \mathbf{X} , 并构建一个 1×2048 的零矩阵 \mathbf{Y} , 规定白色像素取值 1, 黑色像素取值 0。

步骤 2) 矩阵 \mathbf{X} 以左上角元素为起点, 按行优先顺序进行全域扫描, 若该点满足所在行下一行的像素点值为 1 的个数大于 50 (避免噪声点被误存) 且为所在列 2048 个像素点中第一次满足上述条件的点, 将其存入矩阵 \mathbf{Y} 中的对应列, 当矩阵 \mathbf{Y} 被填充满时表示上边缘的像素点搜索完毕。

步骤 3) 按照上述方法, 对其余边缘点进行遍历, 将其存入对应矩阵中, 并进一步采用最小二乘法对磁瓦边缘进行拟合^[16]。

最小二乘法核心原理在于最小化误差平方和, 以求得最接近实际轮廓的边缘, 实现对直线轮廓的拟合^[17]。其中

最小二乘法要求 $\sum_{i=1}^N [y_i - (b + kx_i)]^2$ 的值最小, 分别对该式 k, b 进行偏导后可得最佳估计值:

$$\begin{cases} k = \frac{N(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \\ b = \frac{(\sum x_i^2)(\sum y_i) - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \end{cases} \quad (20)$$

通过对前述公式进行微分运算,可以求解出最优参数 k 和 b 。如图 5(a)所示,基于边缘轮廓筛选结果,应用最小二乘法^[18]实现了磁瓦四周轮廓拟合,最终集成轮廓效果如图 5(b)所示,结果表明该方案在综合层面呈现优异拟合特性。

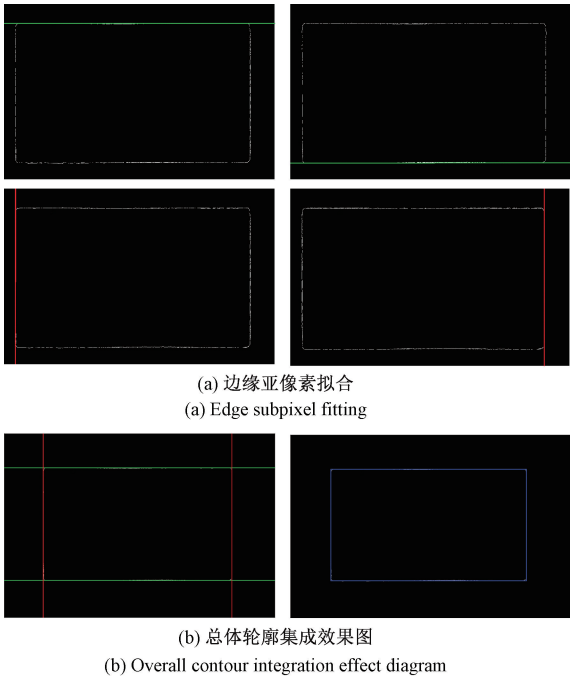


图 5 最小二乘法拟合直线

Fig. 5 Least squares fitting of a straight line

2.4 检测算法流程

基于改进的 LoG-Zernike 矩磁瓦边缘检测具体步骤如图 6 所示。

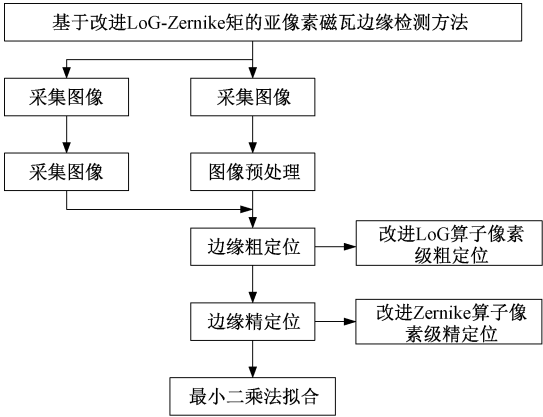


图 6 步骤流程图

Fig. 6 Step flowchart

其中检测算子程序处理部分具体步骤如下:

步骤 1)通过阈值分割、形态学等方面的算子完成图像预处理、使用改进 LoG 算子进行滤波去噪并且获取像素级边缘;

步骤 2)依托步骤 1)获取的边缘坐标数据,通过将 Zernike 矩模板系数与图像 $f(x,y)$ 边缘像素灰度值实施卷积运算,推导出子模板系数 $Z_{0,0}$ 、 $Z_{1,1}$ 、 $Z_{2,0}$ 、 $Z_{3,1}$ 、 $Z_{4,1}$,进而解算关键模型参数 l 、 h 、 k 、 θ ;

步骤 3)采用二维 Otsu 算法确定最优阈值判定标准,并据此判断边缘像素点是否满足判定条件;

步骤 4)采用最小二乘法直线拟合,获取磁瓦尺寸。

3 图像检测系统设计

磁瓦图像检测系统主要由光源、相机、镜头、载物平台、PC 端等硬件部分构成。上位机系统为 Windows11,图像处理软件为 MATLAB2023b 版本,图像处理库为 Image Processing Toolbox,软件界面设计为 MATLAB App Designer,处理器为 Intel(R)Core(TM)i5-12600kf,内存为 32 GB。检测平台如图 7 所示。载物平台选用具有纯黑磨砂质感的金属铁板,光源系统采用 LED 环形照明方式,以减少阴影和镜面反射的干扰。针对尺寸在 10~30 mm 范围内的磁瓦,检测精度要求高于 0.03 mm。通过计算,若单边像元个数设定为 $50\text{ mm}/0.03\text{ mm}=1\ 500$,则选用 $2\ 448\times2\ 048$ (500 万)像素的工业相机即可满足需求。因此,选择海康威视公司的 MVL-HF1228-05S 型号面阵相机作为系统相机。

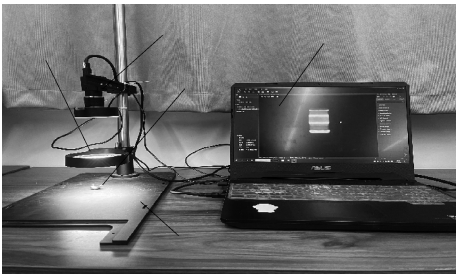


图 7 实验平台

Fig. 7 Experimental platform

3.1 系统标定

系统标定使用实验平台采集的标准量块图像,其中量块参数为 30 mm,精度为 0.001 mm。设定量块像素数目为 x ,其实际尺寸为 Z ,标定系数为 Y ,三者之间的关系可表述为:

$$Y = Z/x \tag{21}$$

其中, x 、 Z 、 Y 的单位分别为 pixel、mm、mm/pixel。应用传统 Zernike 矩算法检测该量块后,计算的标定系数为 $P=0.022\ 08\text{ mm/pixel}$,其物理含义为采集到的图片中每个像素实际尺寸为 0.022 08 mm。

3.2 外形尺寸检测结果

为评估系统检测性能,本研究采用 30.000 mm 的标准量块,通过应用改进后的算子进行 8 次实验,每次实验中量块摆放位置和角度均有所变化。通过本文提出的算法进行实验处理,所得量块尺寸数据如表 1 所示。分析表 1

数据可知,本研究提出的算法在测量过程中误差稳定控制在 0.030 mm 以内,该精度满足对磁瓦进行精确测量的需求。

表 1 标准量块测量结果

Table 1 Measurement results of standard gauge blocks		
测量次数/次	理想误差/mm	测量误差/mm
1	0	0.023
2	0	0.013
3	0	0.019
4	0	0.015
5	0	0.028
6	0	0.009
7	0	0.017
8	0	0.010

经过标准量块评定该系统的稳定性后,使用由磁瓦生产厂家提供的 8 块相同规格的磁瓦分别进行检测。本实验采用人工测量值作为精标准并将其与传统 Zernike 算法、本文算法的检测结果做比较,表 2、3 和图 8 所示。对表 2、3 数据进一步处理可得,人工测量的轴长、弦长的平均值分别为 12.504 8 mm、20.109 6 mm。传统 Zernike 矩算法的相对误差率分别为 0.218%、0.070%,其误差平均值为 0.027 3 mm、0.014 3 mm。本文研发算法在磁瓦轴长、弦长检测中相对误差率分别为 0.060%与 0.018%,其误差平均值为 0.007 5 mm、0.003 8 mm,对比实验证实其较传统算法具有更优的误差控制能力,显著提升了边缘拟合稳定性,满足精密检测要求。图 8(a)和(b)分别为采用人工测量、传统 Zernike 算法、本文算法对 8 块相同规格的磁瓦测量后的轴长和弦长折线图,可以看出本文算法测量值与人工测量值更为接近,直观验证了本文算法具有较高的精度。

表 2 轴长测量磁瓦关键尺寸结果

Table 2 Key dimension results of magnetic tile measurement for shaft length							
序号	人工测量值/mm	传统算法测量			本文算法测量		
		测量值/mm	相对误差/mm	相对误差率/%	测量值/mm	相对误差/mm	相对误差率/%
1	12.496 0	12.470 1	0.025 9	0.207	12.486 0	0.010 0	0.080
2	12.501 0	12.473 5	0.027 5	0.220	12.492 6	0.008 4	0.067
3	12.512 0	12.478 3	0.033 7	0.269	12.506 7	0.005 3	0.042
4	12.510 0	12.482 5	0.027 5	0.220	12.504 7	0.005 3	0.042
5	12.498 0	12.471 2	0.026 8	0.214	12.490 2	0.007 8	0.062
6	12.504 0	12.480 8	0.023 2	0.186	12.496 8	0.007 2	0.058
7	12.498 0	12.472 2	0.025 8	0.206	12.490 3	0.007 7	0.062
8	12.497 0	12.469 3	0.027 7	0.221	12.488 8	0.008 2	0.066

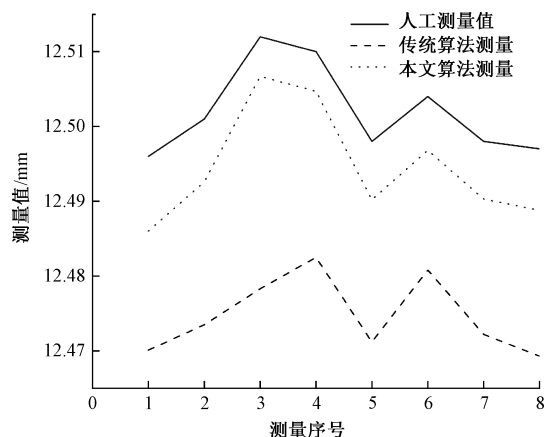
表 3 弦长测量磁瓦关键尺寸结果

Table 3 Key dimension results of string length measurement for magnetic tile							
序号	人工测量值/mm	传统算法测量			本文算法测量		
		测量值/mm	相对误差/mm	相对误差率/%	测量值/mm	相对误差/mm	相对误差率/%
1	20.121 0	20.110 5	0.010 5	0.052	20.117 8	0.003 2	0.016
2	20.112 0	20.101 6	0.010 4	0.052	20.106 2	0.005 8	0.029
3	20.109 0	20.094 5	0.014 5	0.072	20.106 1	0.002 9	0.014
4	20.108 0	20.093 3	0.014 7	0.073	20.106 5	0.001 5	0.007
5	20.109 0	20.090 2	0.018 8	0.093	20.104 4	0.004 6	0.023
6	20.105 0	20.090 2	0.014 8	0.073	20.101 1	0.003 9	0.019
7	20.103 0	20.086 8	0.016 2	0.081	20.098 6	0.004 4	0.022
8	20.104 0	20.091 1	0.012 9	0.064	20.100 7	0.003 3	0.016

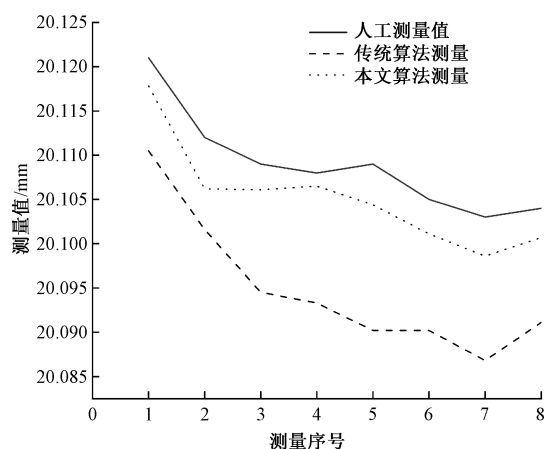
3.3 磁瓦边缘检测系统设计

如图 9 所示,该软件集成了可视化界面实时显示测量结果,并通过本地化存储功能支持多格式数据/图像导出,保障后续离线的分析。通过产线验证,该优化算法集成的

检测系统可以迅速计算出不同检测边缘所需的四个边缘参数,实现了检测 30 个磁瓦需 47 s,单件检测节拍平均时间为 1.56 s,较传统人工检测效率提升 4.8 倍,有效解决了工业场景中精密部件快速测量的技术瓶颈。



(a) 轴长测量值
(a) Axis length measurement value



(b) 弦长测量值
(b) Chord length measurement value

图 8 磁瓦尺寸测量结果对比图

Fig. 8 Comparison diagram of magnetic tile size measurement results

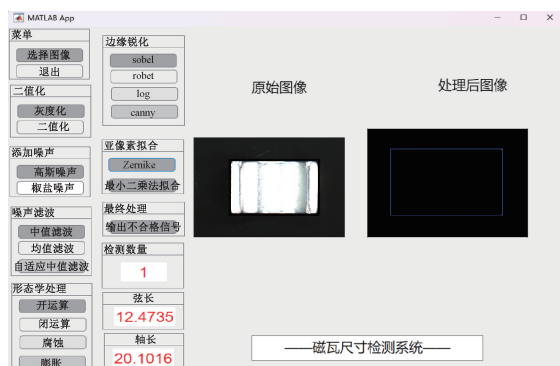


图 9 磁瓦边缘检测系统设计

Fig. 9 Design of the magnetic tile edge detection system

4 结 论

针对像素级边缘检测技术在磁瓦零件测量领域的应用局限性,本研究提出了一种基于改进 LoG-Zernike 矩的磁瓦尺寸检测方法,该方法能够同步实现磁瓦轴长与弦长

的精确测量。首先,通过对磁瓦图像进行预处理以及应用 LoG 算子进行像素级边缘提取,改进后的 Zernike 算子展现出卓越的抗噪声性能。其次,针对传统算法在自适应性方面的不足,本研究提出了一种二维 Otsu 分割阈值方法,以优化 Zernike 亚像素边缘检测算法。最后,采用最小二乘法对磁瓦边缘进行拟合,实现了磁瓦关键尺寸的精确测量。实验结果表明,与传统算法相比,本研究提出的检测方法相对误差率显著降低,分别控制在 0.060% 和 0.018%,误差均值分别为 0.007 5 mm 和 0.003 7 mm,显示出更高的准确性和更小的相对误差,平均每个磁瓦的检测时间为 1.56 s,检测效率和稳定性得到显著提升。后续研究工作将集中于增强磁瓦轴向尺寸的测量精度,并且推进对磁瓦其他维度及缺陷的检测进程。在此研究基础上,旨在构建一套专门针对磁瓦尺寸和缺陷检测的自动化检测系统。

参考文献

- [1] 刘利平,孙建,孙文悦. 改进 Zernike 矩的亚像素圆孔类零件测量方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(4): 69-77.
LIU L P, SUN J, SUN W Y. Measurement method of subpixel circular hole parts based on improved zernike moment [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(4): 69-77.
- [2] 杜港,佟强,侯凌燕,等. 基于 Canny-Franklin 矩的亚像素边缘检测方法[J]. 计算机集成制造系统, 2025, 31(3): 903-912.
DU G, TONG Q, HOU L Y, et al. Sub-pixel edge detection method based on Canny-Franklin moments[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2025, 31(3): 903-912.
- [3] 于微波,马艳辉,刘芳雪,等. 改进 Zernike 矩亚像素边缘检测算法研究[J]. 电视技术, 2016, 40(6): 144-148.
YU W B, MA Y H, LIU F X, et al. Research of improved subpixel edge detection algorithm using zernike moments [J]. Video Engineering, 2016, 40(6): 144-148.
- [4] 欧阳,罗建桥,熊鹰,等. 基于自适应阈值 Zernike 矩的铆钉尺寸检测[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(3): 139-142, 152.
OU Y, LUO J Q, XIONG Y, et al. Rivet size detection based on adaptive threshold zernike moment [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(3): 139-142, 152.
- [5] 李明,魏利胜. 基于改进 Deeplabv3+ 的磁瓦表面缺陷分割[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(1), 50-56.
LI M, WEI L SH. Magnetic tile surface defect segmentation based on improved deeplabv3+ [J].

- Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025,39(1):50-56.
- [6] XIE L F, LIN L J, YIN M, et al. A novel surface defect inspection algorithm for magnetic tile [J]. Applied Surface Science, 2016, 375: 118-126.
- [7] 黄兴. 磁瓦缺陷自动检测关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- HUANG X. A study on the key technology of the automatic detection system for magnetic tile defects[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [8] 董雪, 林志贤, 郭太良. 基于 LoG 算子改进的自适应阈值小波去噪算法[J]. 液晶与显示, 2014, 29(2): 275-280.
- DONG X, LIN ZH X, GUO T L. Improved self-adaptive threshold wavelet denoising analysis based on LoG operator[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2014, 29(2): 275-280.
- [9] 任长清, 张佳林, 杨春梅, 等. 基于机器视觉的木窗双端铣削加工尺寸测量方法[J]. 林业工程学报, 2024, 9(1): 141-149.
- REN CH Q, ZHANG J L, YANG CH M, et al. Research on the dimensional measurement method of double end milling processing of wooden windows based on machine vision [J]. Journal of Forestry Engineering, 2024, 9(1): 141-149.
- [10] 牛晗, 伍希志, 任桂芹, 等. 基于 OTSU 与 CANNY 算法的竹片缺陷图像检测[J]. 森林工程, 2022, 38(6): 75-81.
- NIU H, WU X ZH, REN G Q, et al. Image detection of bamboo chip defects based on OSTU and CANNY aigorithms[J]. Forest Engineering, 2022, 38(6): 75-81.
- [11] WANG Y N, SHUAI S S, REN X F, et al. Sub-pixel high precision dimensional measurement method for aero-engine hollow turbine blade based on industrial computed tomography image [J]. China Foundry, 2022, 19(4): 307-320.
- [12] 刘悦, 朱均超. 基于改进 Zernike 矩的光斑图像亚像素边缘检测算法[J]. 激光杂志, 2021, 42(5): 32-35.
- LIU Y, ZHU J CH. Sub-pixel edge detection algorithm of spot image based on improved zernike moment[J]. Laser Journal, 2021, 42(5): 32-35.
- [13] SUN H H, ZHANG X F. Study on coded permutation entropy of finite length gaussian white noise time series[J]. Chinese Journal of Electronics, 2024, 33(1): 185-194.
- [14] 巢渊, 唐寒冰, 刘文汇, 等. 基于改进 Zernike 矩的轴类零件尺寸测量方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(3): 169-176.
- CHAO Y, TANG H B, LIU W H, et al. Improvd zernike moment-based dimensional measurement method for shart parts [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(3): 169-176.
- [15] 吴昊荣, 李晓晓, 孙付春. 基于亚像素精度的汽车冲压件尺寸测量系统设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(3): 44-48, 53.
- WU H R, LI X X, SUN F CH. Design of automotive stamping part size measurement system based on sub pixel accuracy [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024(3): 44-48, 53.
- [16] BHANDARI K A, GHOSH A, KUMAR V I. A local contrast fusion based 3D otsu algorithm for multilevel image segmentation [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 7(1): 200-213.
- [17] 张宇. 基于快速最小二乘法的两步随机相移算法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 121-133.
- ZHANG Y. Two-step random phase shifting algorithms based on fast leaset-squares method [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 121-133.
- [18] YAN J, NIU Z Y, YANG X Q, et al. A robust compact least-squares reconstruction method for compressible turbulent flow simulations of complex configurations [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(12): 113-138.

作者简介

张陈(通信作者), 实验师, 主要研究方向为机器视觉和图像处理、机电控制与智能控制技术。

E-mail: 1033749111@qq.com

单文桃, 教授, 主要研究方向为机器视觉和图像处理、智能驱动控制算法研究。

E-mail: shanwentao520@163.com

徐成, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉和图像处理。

E-mail: 995385062@qq.com