文章编号:1671-4598(2026)10-0051-05 DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2026.10.007 中图分类号:TP391.41 文献标识码:A

基于改进 Canny 算法的石英玻璃环内外径测量方法

郭子锋[1,2]，金守峰[1,2]，连志成[1,2]，冯旭振[1,2]，昝 杰[1,2]，唐文斌[1,2]
(1. 西安工程大学 机电工程学院，西安 710600；
2. 西安市现代智能纺织装备重点实验室，西安 710600)

摘要：针对石英玻璃环在工业检测中易受反射、低对比度干扰而导致测量精度低等问题，提出了基于改进 Canny 算法的石英玻璃环内外径测量方法；采用低角度成像与高角度均匀照明获取石英玻璃环图像，通过双边滤波进行图像预处理，抑制噪声并保留边缘轮廓特征信息；通过融合自适应平滑滤波、多方向梯度计算及 Otsu 自适应阈值优化的改进 Canny 算法，提高了石英玻璃环轮廓特征精度，采用最小二乘拟合法建立石英玻璃环内外径测量模型；实验结果表明，该方法对常见石英玻璃环的内外径测量误差小于±0.05 mm，与人工测量方法相比具有更高的稳定性，测量效率较传统人工接触式测量显著提升。

关键词：石英玻璃环；内外径；改进 Canny 算法；圆拟合；机器视觉

Method for Measuring the Inner and Outer Diameters of Quartz Glass Rings Based on Improved Canny Algorithm

GUO Zifeng[1,2], JIN Shoufeng[1,2], LIAN Zhicheng[1,2], FENG Xuzhen[1,2],
ZAN Jie[1,2], TANG Wenbin[1,2]
(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China;
2. Xi'an Key Laboratory of Modern Intelligent Textile Equipment, Xi'an 710600, China)

Abstract: To address issues such as low measurement accuracy caused by the reflection and low contrast interference in industrial inspection of quartz glass rings, a method for measuring the inner and outer diameters of quartz glass rings based on improved Canny algorithm is proposed. The images of quartz glass rings are obtained by using low-angle imaging and high-angle uniform illumination, and the images are preprocessed by bilateral filtering to suppress noise and preserve the feature information of edge contours. The improved Canny algorithm, which combines adaptive smoothing filtering, multi-directional gradient calculation and Otsu adaptive threshold optimization, improves the feature accuracy of quartz glass ring contours. A least squares fitting method is used to establish a model for measuring the inner and outer diameters of quartz glass rings. Experimental results show that the measurement error for the inner and outer diameters of common quartz glass rings by this method is less than ±0.05 mm, with a higher stability compared with manual measurement methods, significantly improving the measurement efficiency compared with traditional manual contact measurement methods.

Keywords: quartz glass rings; inner and outer diameters; improved Canny algorithm; circular fitting; machine vision

收稿日期:2025-10-30； **修回日期**:2025-12-05。
基金项目:陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2024JC-YBMS-489);陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2023-JC-YB-288);湖北省数字化纺织装备重点实验室开放课题(KDTL2020005)。
作者简介:郭子锋(2002-),女,硕士研究生。
通讯作者:金守峰(1979-),男,博士,教授。
引用格式:郭子锋,金守峰,连志成,等. 基于改进 Canny 算法的石英玻璃环内外径测量方法[J]. 计算机测量与控制,2026,34(10):51-55.

0 引言

石英玻璃环具有良好的透光率、低热膨胀系数等特性，被广泛应用于半导体制造、光学元件及精密检测等领域[1-3]。石英玻璃环是重要参数，常规接触式测量存在易损伤玻璃表面、效率低等问题，光学非接触测量存在环境光散射、噪声等干扰，导致成像的低对比度低、边界模糊化等问题。

机器视觉高精度测量领域，国内外学者开展了深入研究，Cheng 等人[4]针对镜面表面缺陷识别困难问题，提出基于相位测量偏折术（PD，phase deflectometry）的检测方法，结合 Graycode 编码与四步相移法重建表面梯度，通过相位突变识别细微缺陷，实现了微米级反射面检测精度。Xu 等人[5]在其综述中指出 PMD（phase measuring deflectometry）作为一种成熟的非接触全场测量技术，具有高动态范围与高测量精度的优势，是镜面与透明表面形貌测量的有力工具。Burke 等人[6]撰写的偏折测量综述系统总结了目前 Deflectometry 的体系结构、变种与挑战，并指出未来在多表面干扰、信号分离、系统校准等方面仍有较大提升空间。Zhang 等人[7]在镜面 3D 形貌获取方面也展示了 PMD 的应用潜力。

Ye 等人[8]建立多频条纹投影与混合反射－折射模型融合的双面测量系统，在单视图下实现透明透镜上下表面同步重构，验证了双面测量的高精度可行性。Li 等[9]进一步提出利用正交光栅透射型相位偏折术同时测定透明元件的前后表面轮廓，实现双面 profile 的同步重构。Xiong 等人[10]提出基于红外偏折测量（Infrared Deflectometry）的大尺寸透明表面三维重构方法，利用红外条纹检测与相位映射，在无漫反射条件下实现高信噪比测量。Bai 等人[11]针对非接触结构振动监测中边缘定位误差较大的问题，设计基于 Zernike 插值的子像素边缘检测算法，显著提升了边缘定位的分辨率与稳定性，为结构位移与动态响应测量提供了高精度实现途径。此外，为了更快地对透明对象进行条纹分离与解耦，Gao 等人[12]提出快速条纹解耦方法，通过全局优化在单次迭代中分离上下表面条纹信号，提高测量效率与精度。在透明物体测量的综述方向，Quan 等人[13]对非破坏性光学测量技术进行了全面回顾，涵盖宏观到微观尺度的透明体测量方法、优劣势分析与未来发展方向。对于条纹重叠问题，Yang 等人[14]提出基于经验 Curvelet 变换的条纹模式识别与融合技术，在透明元件偏折测量中取得了较好分离效果。

在国内研究方面，魏雨和黄玉蕾[15]提出 Kirsch 算子结合双阈值分割的彩色图像边缘检测算法，通过梯度加权与形态学滤波增强了低对比图像的边缘可检性，实现了工业产线的实时检测。宋栓军等人[16]利用端面与侧面图像特征提取建立齿轮螺旋角测量模型，结合相机标定与亚像素拟合显著提高尺寸检测精度。盛强等人[17]针对孔内表面测量畸变问题，提出基于内窥图像畸变校正的非接触测量方法，利用神经网络拟合校正函数实现边缘精准恢复，测量误差控制在 1.95％以内。

针对环形石英玻璃的内外径测量精度的问题，本文提出基于改进 Canny 算法的石英玻璃环内外径测量方法。通过对石英玻璃环图像进行预处理，利用改进 Canny 算法进行边缘轮廓特征提取，建立基于迭代最小二乘圆拟合的内外径测量模型，实现环形石英玻璃的内外径测量。

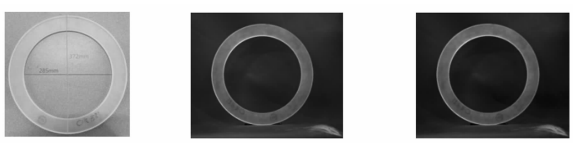
1 石英玻璃环特征分析

1.1 工艺分析

石英玻璃环以高纯度 $SiCl_4$ 为原料，采用化学气相沉积工艺合成石英玻璃，再通过电熔热改型与机加工得到外形为规则圆环的产品。该类圆环制品具有良好的几何对称性和优异的光学性能，因而被广泛应用于半导体及精密光学等领域。

1.2 特征分析

由图 1（a）可知，石英玻璃环呈标准环状，其内径为 285.00～352.00 mm，外径为 362.00～430.00 mm，宽度为 55.00～87.00 mm，外径轮廓边缘存在 1.0 mm×45°的倒角，内径轮廓边缘存在 1.0 mm×45°倒角。表面呈高透明状态，无明显划痕与内部杂质，仅在边缘倒角区域因加工工艺残留的微小凹凸结构存在轻微漫反射现象，导致成像时该区域表现为亮—暗渐变的过渡带。



(a)实物图 (b)成像图 (c)预处理的图

图 1 石英玻璃环

2 基于改进 Canny 算法的石英玻璃环轮廓特征提取

2.1 石英玻璃环图像的预处理

本文采用低角度成像与高角度均匀照明的方式获取的图像如图 1（b）所示，由于在成像过程中受透明材质高透过率和局部反射的影响，导致图像整体对比度不足，且边缘区域叠加噪声干扰，使得内外径边界模糊化。为此，本文采用双边滤波算法对原始图像进行预处理[18]，通过构建空间域与灰度域的联合权重函数，采

用基于像素邻域灰度差异的自适应平滑策略，利用双边滤波抑制混合噪声，同时保留边缘细节的特性，结果如图 1（c）所示，预处理后的图像背景区域得到有效平滑，圆环边缘呈现出清晰而连续的灰度变化。

2.2　改进 Canny 算法的边缘轮廓特征提取

传统 Canny 算子在石英玻璃环的边缘提取过程中，常因阈值选择依赖人工设定，在弱对比度与复杂光照条件下易出现边缘丢失或虚假响应，导致轮廓不完整，降低了测量精度[19-20]。本文提出改进 Canny 算法提取边缘轮廓特征，通过引入自适应平滑、多方向梯度计算及 Otsu 阈值分割，具有更强的鲁棒性和计算效率。

2.2.1　自适应平滑替代高斯滤波

传统高斯滤波采用固定方差 σ，无法兼顾噪声抑制与边缘保持。本文引入自适应平滑滤波，以增强对不同噪声水平的适应性，自适应平滑滤波器的表达式为：

$$I'(p)=\frac{1}{W_p}\sum_{q\in\Omega_p}f_s(\|p-q\|)\cdot f_r[|I(p)-I(q)|]\cdot I(q) \tag{1}$$

式中，p 为当前像素点，Ω_p 为其邻域，$f_s(\cdot)$ 为空间权重函数，Ω_p 为灰度相似度权重，W_p 为归一化系数。

自适应滤波根据局部噪声水平动态调整，能够在噪声区域增强平滑，在边缘区域减弱平滑，从而为实现石英玻璃环内外径的高精度测量提供可靠保障。

2.2.2　多方向梯度计算

传统 Canny 算子仅在 x、y 两个方向计算梯度，容易在斜向或曲率变化较大的边缘处出现响应不足。为解决该问题，本文在原有水平和垂直梯度的基础上，增加了 45°与 135°两个方向的梯度分量。通过 4 方向的梯度幅值，能够反映圆环边缘的局部变化特征。

计算得出 x，y，45°以及 135°共 4 个方向上的一阶梯度分量，用 $G_x(x,y)$、$G_y(x,y)$、$G_{45}(x,y)$、$G_{135}(x,y)$ 表示，梯度幅值 $M(x,y)$，梯度角度 $\theta(x,y)$ 可以由以上 4 个分量求出，公式如下：

$$M(x,y)=\mathrm{sqrt}(G_x^2+G_y^2+G_{45}^2+G_{135}^2) \tag{2}$$

$$\theta(x,y)=\arctan\left(\frac{G_y^2}{G_x^2}\right) \tag{3}$$

2.2.3　轮廓特征提取

采用 Otsu 方法进行二值化处理如图 2（a）所示，由于受到玻璃表面局部反射、内部微结构散射及预处理后残留的微小噪声的影响，石英玻璃环的边缘存在多条闭合轮廓，不仅包括目标圆环的内外边缘，还包含由噪声或反射产生的小面积区域。

为解决上述问题，本文进一步采用基于连通区域分析与面积阈值筛选的方法对干扰像素进行轮廓分离与筛选。

将二值图像记为 $I(x,y)$，若像素 (x,y) 与邻域像素满足 8 邻接准则：

$$(x_i,y_i)\in N_8(x,y)\ \text{且}\ I(x_i,y_i)=1 \tag{4}$$

则判定它们属于同一连通区域，这样即可将整幅图像分解为若干个连通区域 $\{R_1,R_2,\cdots,R_n\}$。

对每个连通区域 Ri，从边界点出发按顺时针方向逐像素跟踪，得到闭合轮廓曲线 $C_i=[(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots,(x_m,y_m)]$。

根据 Green 公式可计算每个闭合轮廓的面积：

$$A_i=\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{m}(x_jy_{j+1}-x_{j+1}y_j),(x_{m+1},y_{m+1})=(x_1,y_1) \tag{5}$$

将所有闭合轮廓面积按从大到小排序，由于石英玻璃环的内外边缘对应的连通区域在面积上远大于噪声区域，因此选择面积最大的两条闭合轮廓分别作为圆环的内边缘与外边缘，其余面积较小的轮廓则被判定为噪声并予以剔除，优化结果如图 2（b）所示。



(a) Otsu二值化结果图　　(b) 优化后的二值化结果图

图 2　石英玻璃环的二值化与优化结果对比

3　内外径测量模型的建立

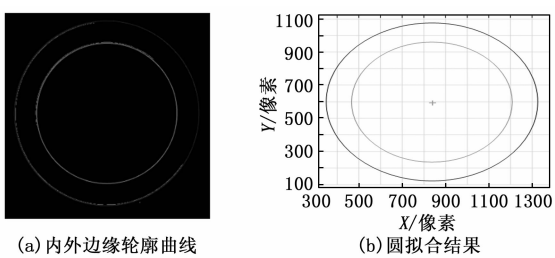
3.1　基于最小二乘法的内外圆拟合模型

由图 3 可知，设轮廓点集为 $[(x_i,y_i)]$，$i=1,2,\cdots,N$，圆的标准方程为：

$$(x-a)^2+(y-b)^2=r^2 \tag{6}$$

式中，(a,b) 为圆心坐标，r 为半径。对边缘点集进行拟合时，可构建以下代价函数：

$$F(a,b,r)=\sum_{k=1}^{N}\left[\sqrt{(x_k-a)^2+(y_k-b)^2}-r\right]^2 \tag{7}$$



(a) 内外边缘轮廓曲线　　(b) 圆拟合结果

图 3　石英玻璃环内外边缘提取与圆拟合结果

采用迭代最小二乘法进行拟合，步骤如下：

1）初始值设定。根据点集的几何平均值确定圆心初值：

$$a^{(0)} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} x_k, b^{(0)} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} y_k \tag{8}$$

并以平均半径作为初始 $r^{(0)}$。

2）迭代更新。第 t 次迭代时，点到圆心的距离为：

$$d_k^{(t)} = \sqrt{(x_k - a^{(t)})^2 + (y_k - b^{(t)})^2} \tag{9}$$

构建线性最小二乘问题：

$$\min_{a,b,r} \sum [(x_k - a^{(t)})^2 + (y_k - b^{(t)})^2 - (r^{(t)})^2]^2 \tag{10}$$

通过求解正规方程更新参数，得到 $[a^{(t+1)}, b^{(t+1)}, r^{(t+1)}]$。

3）收敛判据。当相邻两次迭代的圆心移动距离与半径变化量小于设定阈值时停止迭代。最终得到拟合圆的参数：内圆（a_i，b_i，r_i），外圆（a_o，b_o，r_o）。

得到的内外边缘曲线和内外圆拟合结果如图 3 所示。

3.2 内外径测量模型

由拟合参数 r_i 和 r_o，可得出石英玻璃环的内径 D_i 模型和外径 D_o 模型，其表达式为：

$$D_i = 2kr_i, D_o = 2kr_o \tag{11}$$

式中，k 为物面分辨率。

4 实验数据分析

4.1 实验平台

4.1.1 实验平台

本文搭建了实验平台，采用 MV-EM200M 型 CCD 工业相机，其分辨率为 1 600×1 200 像素，25 mm 焦距镜头。相机安装在伺服电机驱动的丝杠－导轨滑块机构上，根据圆环直径进行调节，物距为 1 800 mm，视场为 900 mm×675 mm，光源采用高亮度白色 LED 环形光源，减弱反射干扰。

4.1.2 物面分辨率

为了准确标定物面分辨率，本文使用了 1 000 mm 的标准量块。通过对标准量块图像的处理，统计出标准量块在图像中的像素数目。由此建立的物理尺寸与像素数量的对应关系系数 k 可表示为：

$$k = L/p \tag{12}$$

式中，L 表示标准尺的实际尺寸，p 表示标准尺的像素点个数。

本文对标准尺进行多次测量，取其测量值的平均值得标定值 k=1 000/19 504.58≈0.051 27（mm/pixel）。

4.2 实验数据分析

4.2.1 实验用玻璃圆环

为验证所提方法的有效性，采用 3 种不同内外径的石英玻璃圆环样本进行实验，采用精度为 0.02 mm 的游标卡尺对各圆环的内外径进行人工测量，多次测量取平均值，结果如表 1 所示。

表 1 石英玻璃环额定尺寸与卡尺实测数据对比表 mm

编号	尺寸类型	额定尺寸	卡尺测量值	绝对偏差
样本 1	内径	285.00	285.14	+0.14
	外径	372.00	372.06	+0.06
样本 2	内径	352.00	352.14	+0.14
	外径	430.00	430.04	+0.04
样本 3	内径	307.00	307.16	+0.16
	外径	362.00	361.96	−0.04

4.2.2 数据分析

为了对测量的精度与重复性进行评价，将石英玻璃环 1 重复测量 8 次，测量精度用平均值与标准差来衡量，并对实验结果进行统计分析。

石英玻璃环 1 的 8 次内外径测量值及统计分析如表 2 所示。

表 2 内外径尺寸测量结果及分析 mm

序号	内径尺寸	外径尺寸
1	284.987	371.960
2	285.012	372.021
3	285.034	372.008
4	284.978	371.990
5	285.021	372.043
6	285.005	372.012
7	284.963	371.978
8	285.019	372.030
平均值	285.002	372.005
最大值	285.034	372.043
最小值	284.963	371.960
标准差	0.023	0.026

由表 2 可知，内径测量平均值为 285.002 mm，标准差为 0.023 mm；外径测量平均值为 372.005 mm，标准差为 0.026 mm。石英玻璃环的所有内外径测量结果均在±0.05 mm 的区间范围内。

为了进一步分析不同规格尺寸条件下测量结果的稳定性，本文对 3 种不同尺寸的石英玻璃环分别进行了 8 次重复测量，结果如表 3 所示。

表 3 不同直径石英玻璃环的重复测量统计结果

编号	内径额定值/mm	外径额定值/mm	内径标准差/mm	外径标准差/mm
样本 1	285.000	372.000	0.023	0.026
样本 2	352.000	430.000	0.049	0.034
样本 3	307.000	362.000	0.032	0.019

由表 3 可知，本文方法在不同尺寸下外径标准差介于 0.019～0.034 mm 之间，内径标准差在 0.023～0.049 mm 之间。随着直径增大，内径测量标准差增加，主要误差来源于边缘梯度扩展及局部反射干扰增强。

内外径测量误差的箱线如图 4 所示，95%以上的数据点均落入±0.05 mm 的误差范围内，本文测量结果具有良好的稳定性和一致性。

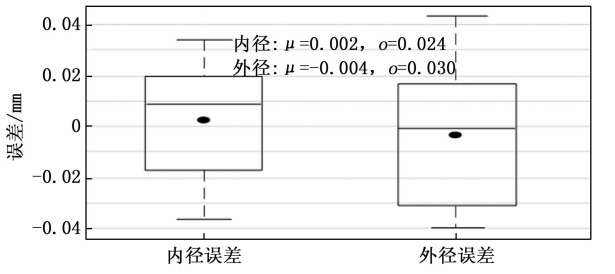


图 4　误差分布箱线图

5　结束语

本文提出了基于改进 Canny 算法的石英玻璃环内外径非接触检测方法，实现对不同内外径的石英玻璃环进行测量，内径标准差为 0.023 mm、外径标准差为 0.026 mm。

针对传统 Canny 算法在低对比度、复杂光照下的边缘缺失问题，本文提出融合自适应平滑、四方向梯度计算与 Otsu 自适应阈值的改进算法，在保留边缘结构的同时有效抑制噪声。

针对传统最小二乘拟合易受噪声、异常点干扰的问题，通过设定几何初值、迭代求解线性最小二乘问题及动态收敛判据构建迭代最小二乘圆拟合模型，提高了圆拟合的抗干扰能力与精度，有效降低了边缘噪声和异常点对内外径计算结果的影响。

参考文献：

[1] MOORE L A，SMITH C M. Fused silica as an optical material [J]. Optics & Materials Express，2022，12 (8)：3043－3059.

[2] HE H，HAHN S H，YU J，et al. Friction-induced subsurface densification of glass at contact stress far below indentation damage threshold [J]. Acta Materialia，2020，189：166－173.

[3] 白　倩，马　浩，殷景飞. 基于偏振激光共聚焦的研磨石英玻璃亚表面损伤检测 [J]. 光学精密工程，2021，29 (8)：1795－1803.

[4] CHENG X M，WANG T T，ZHU W B，et al. Phase deflectometry for defect detection of high reflection objects [J]. Sensors，2023，23 (3)：1607.

[5] XU Y，GAO F，JIANG X. A brief review of the technological advancements of phase measuring deflectometry [J]. PhotoniX，2020，1：14.

[6] BURKE J，PAK A，HÖFER S，et al. Deflectometry for specular surfaces：an overview [J]. Advanced Optical Technologies，2023，12：1237687.

[7] ZHANG Z. Phase measuring deflectometry for obtaining 3D shape of specular surface [J]. Optical Engineering，2021，60 (2)：020903.

[8] YE J，NIU Z，ZHANG X，et al. Simultaneous measurement of double surfaces of transparent lenses with phase measuring deflectometry [J]. Optics and Lasers in Engineering，2021，137：106356.

[9] LI S Y，LIU Y P，YANG B，et al. Simultaneous dual-surface profile determination of transparent objects using orthogonal grating transmissive phase deflectometry [J]. Optics & Laser Technology，2025，190：113162.

[10] XIONG P，ZHAO J，CHEN J，et al. Three-dimensional reconstruction method based on infrared deflectometry [J]. Photonic Sensors，2025，15 (2)：250207.

[11] BAI X，YANG M，AJMERA B. An advanced edge－detection method for noncontact structural displacement monitoring [J]. Sensors，2020，20 (17)：4941.

[12] GAO Y Q，WEI H Y，LI Y. Rapid fringe decoupling for transparent object profiling using global optimization in modal wavefront reconstruction [J]. Measurement，2025，247：116875.

[13] QUAN H，SHI W，KONG L. Non-destructive optical measurement of transparent objects：a review [J]. Light：Advanced Manufacturing，2025，6 (2)：333－357.

[14] YANG P D，CHEN T，WANG D F，et al. Recognition and separation of fringe patterns in deflectometric measurement of transparent elements based on empirical curvelet transform [J]. Measurement，2024，237：115242.

[15] 魏　雨，黄玉蕾. Kirsch 联合高低双阈值的 RGB 图像边缘检测算法 [J]. 计算机测量与控制，2023，31 (3)：95－101.

[16] 宋栓军，王启宇，贾秀海，等. 基于斜齿轮端面与侧面图像处理的螺旋角测量方法 [J]. 西安工程大学学报，2021，35 (3)：81－85.

[17] 盛　强，郑建明，陈　婷，等. 基于内窥图像畸变校正的孔内表面尺寸测量方法 [J]. 光学学报，2023，43 (3)：312－320.

[18] 武新玲，文　丰，张凯华. 基于双边滤波的高速图像采集系统设计 [J]. 工业仪表与自动化装置，2025 (1)：13－17.

[19] 关雪梅，田国刚. 一种新的基于 Canny 算子数字图像边缘检测算法 [J]. 安阳师范学院学报，2025，27 (2)：11－16.

[20] SUN C，YIN S，XIAO Y Q，et al. A method for electric vehicle charging port recognition in complex environments based on wavelet enhancement and improved Canny algorithm [J]. Recent Advances in Electrical and Electronic Engineering，2025，18 (7)：959－971.