

基于干涉的光学玻璃划痕深度测量

程瑶¹, 李思毅^{1*}, 唐永晟²

¹重庆理工大学机械工程学院, 重庆 400054;

²成都光明光电股份有限公司, 四川 成都 610000

摘要 划痕是光学玻璃常见的缺陷,会导致光束质量下降、光学玻璃热效应增强、抗激光损伤性能降低等,所以在加工过程中需要对其进行准确检测和表征。选取划痕深度值为 70 nm 的光学玻璃为检测样本,采用光干涉法通过光波加载光学玻璃划痕信息,接着对干涉条纹图像进行图像处理和边缘检测,获取划痕的实际深度值。实验证明,光干涉法测量划痕深度值为 70 nm 的光学玻璃时,相对误差低于 1%。所提方法为光学玻璃加工过程中发现数十纳米级的划痕深度值提供了一种检测手段。

关键词 光学干涉; 玻璃划痕; 图像处理; 边缘检测

中图分类号 TP391.4 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222239

Scratch Depth Measurement of Optical Glass Based on Interference

Cheng Yao¹, Li Siyi^{1*}, Tang Yongcheng²

¹College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

²CDGM GLASS Co., Ltd., Chengdu 610000, Sichuan, China

Abstract Scratches are commonly found defects in optical glasses, which degrade their beam quality, enhance the thermal effect, and reduce resistance to laser damage. Therefore, accurate detection and characterization of scratches is critical during processing. In this study, an optical glass with a scratch depth of 70 nm was selected as the detection sample. The optical glass scratch information was loaded by light waves using an optical interference method. Then the interference fringe image was processed and edge-detected, and finally the actual scratch depth value was obtained. Experimental results show that the relative error observed for the 70 nm scratch depth of optical glass using optical interferometry is less than 1%. Thus, the proposed method provides a detection method for the scratch depth value in the order of tens of nanometers during optical glass processing.

Key words optical interference; glass scratch; image processing; edge detection

1 引言

目前光学元件表面缺陷检验标准主要参考美国军用标准 MIL-0-13830A 或者国际标准 ISO 10110-7: 2017,依据标准,光学玻璃缺陷主要分为划痕、麻点及破边,当光学元件表面缺陷宽度相同时其长度超过 2 mm 为长划痕,反之为短划痕^[1-2]。划痕是光学玻璃生产加工中常见的缺陷,会导致光束质量下降、光学元件热效应增强、抗激光损伤性能降低、光学元件的腐蚀等^[3]。因此,如何快速、高精度地检测划痕是提高光学元件质量的重要因素。

为了提高玻璃产品的质量和产量,近年来许多学者对玻璃划痕检测提出了不同的方法。亓宁宁等^[4]以缺陷的面积、周长和圆形度为检测指标,基于机器视觉系统和 BP 神经网络对玻璃的划痕、麻点和异物三种缺陷问题进行识别和分类。孟奇等^[5]利用双通道生成对抗网络对镜片的划痕、麻点、异物和气泡 4 种缺陷进行数据采集和类别判断,解决了玻璃缺陷检测过程中样本数量少的问题。石兵华等^[6]采用数字光栅投影方法研究玻璃的光畸变缺陷,通过分析玻璃带表面的屈光度实现 0.1 mm 的检测精度。涂政乾等^[7]根据玻璃划痕、颗粒、气泡 3 种缺陷具有不

收稿日期: 2022-08-04; 修回日期: 2022-09-16; 录用日期: 2022-10-13; 网络首发日期: 2022-10-23

基金项目: 重庆市科委基础与前沿研究一般项目(cstc2016jcykA0497)、青年科学基金项目(61901068)

通信作者: *2235699269@qq.com

同的散射光强特点,采用光散射理论对它们进行研究,实现了微米级缺陷检测。还有暗场显微成像法^[8]、暗场散射与曲率成像法^[9]、光声检测法^[10]等。这些方法虽然检测精度提高了许多,但是检测对象的划痕缺陷尺寸最小为微米级。随着科学技术的发展和光学玻璃需求质量的提高,光学玻璃的尺寸越来越小,采用上述方法很难发现光学玻璃纳米级的缺陷问题。本文基于光干涉法,将光学玻璃的划痕深度值转换为干涉条纹图,通过分析处理干涉条纹图的信息得到划痕深度值。所提方法不仅可以实现纳米数量级的光学玻璃划痕非接触测量,而且具有

很高的时间分辨率和空间分辨率,可用于光学玻璃加工过程的实时检测。

2 干涉条纹成像基本原理

两束或多束频率相同、相位差恒定、振动方向一致的光波在同一个表面或者同一个场内相遇时,就会发生光干涉现象。当被测件的表面没有划痕等缺陷时,就会形成一组直线状的干涉条纹,如果被测件的表面有微小的划痕等缺陷,干涉条纹就会呈弯曲状,弯曲状的角度和大小则表示缺陷的方向和大小。基于光干涉原理绘制的干涉条纹图像采集系统如图 1 所示。

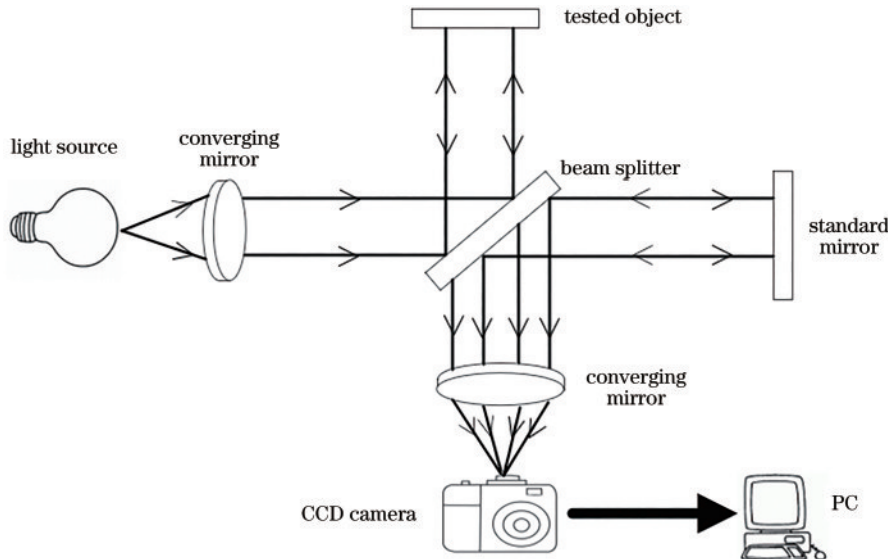


图 1 干涉条纹图像采集系统示意图

Fig. 1 Schematic of the interference fringe image acquisition system

为了采集和处理光学玻璃纳米级的划痕缺陷,选取干涉仪和显微镜结合的 6JA 干涉显微镜。6JA 干涉显微镜中光源发出的白光经过会聚透镜,再经过干涉滤色片后只有半宽度很小的单色光通过仪器,这种单色光有很好的干涉性。仪器的分光板是偏振分光棱镜,可以将一束光的水平偏振和垂直偏振分开,垂直偏振光以 45° 进行反射。经过会聚透镜的光线通过分光板分成两束光,一束光在分光板发生反射,到被测玻璃,然后在被测玻璃上发生反射,到分光板。另一束光则作为参考光,两束光在分光板发生干涉,最后通过摄影目镜在 CCD 相机里呈现非整齐干涉条纹图像。

基于 6JA 干涉显微镜的工作原理,通过测量干涉条纹弯曲量和干涉条纹间距,得到光学玻璃划痕深度值,当光程差每增加半个波长,就会形成一条干涉条纹,故试样表面的划痕深度可以表示为

$$h = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{a}{b} = n \cdot \frac{a}{b}, \quad (1)$$

式中: λ 为中心波长; a 为干涉条纹弯曲量; b 为干涉条纹间距; h 为光学玻璃的划痕深度; n 为干涉条纹数。6JA 干涉显微镜的绿色干涉滤色片波长约为

0.530 μm ,白光经过过滤后,不仅可以得到干涉性很好的单色光,并且单色光的半波长约为 0.265 μm 。

3 干涉条纹处理

3.1 图像处理

干涉条纹图像采集过程受到噪声干扰或者其他环境因素的影响,可以清晰地看到干涉条纹周围有噪点存在,为了提高对玻璃划痕深度值的检测精度,需要对图像进行预处理。图像处理的流程如图 2 所示。

采用单阈值法对图像进行二值化处理,将需要的玻璃缺陷图像的像素值设置为 1,其余的图像包括噪声之类的像素值设置为 0,将最低值作为阈值,表达式为

$$f(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) \geq T \\ 0, & f(x, y) < T \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $f(x, y)$ 为图像的像素值。采用遍历的方法得到类间方差最大阈值 $T^{[11]}$,然后对图像进行二值处理,结果如图 3 所示。

为了获取干涉条纹弯曲量和干涉条纹间距,采用二维高斯滤波^[12]进行去噪处理,图像滤波的表达式为

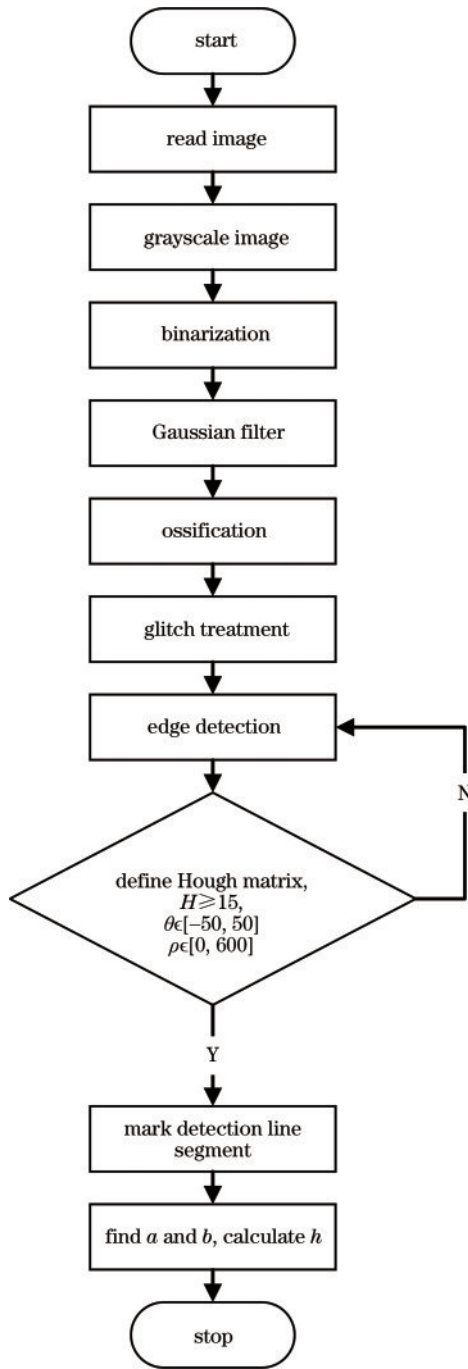


图 2 干涉条纹图像处理流程
Fig. 2 Flow chart of interference fringe image processing

$$O(i, j) = \sum_{m, n} I(i + m, j + n) \cdot K(m, n), \quad (3)$$

式中： $O(i, j)$ 为像素的最终输出值； $I(i + m, j + n)$ 为给定像素周围的像素值； $K(m, n)$ 为滤波器。高斯滤波是一种线性平滑滤波，对整幅图像像素点值相加后取平均，适用于消除高斯噪声。根据图像的像素点构成，采取二维高斯分布方法，数学公式为

$$G(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma^2} e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

式中： σ 为方差； x 和 y 为像素值； $G(x, y)$ 为高斯滤波后的像素值。运用二维高斯滤波，将标准差设置为 1、1.5、2 时，得到不同的干涉条纹图像。比较后选择标准差 1.5，模块尺寸为 5×5 的参数，对干涉条纹图进行高斯滤波去噪后的结果如图 4(a) 所示。高斯滤波去噪后的干涉条纹图像条纹形状过粗且周围还留有噪点。为了更清晰直观地观察干涉条纹，对去噪后图像进行骨化处理，调用 Matlab 软件的 `bwmorph` 函数，重复 30 次以后噪点几乎消失，骨化处理后的图像如图 4(b) 所示。骨化图像存在一些毛刺，为了获取清晰明亮的干涉条纹，对骨化图像的刺激像素进行移除，去毛刺处理后的结果如图 4(c) 所示。

3.2 干涉条纹图像分割处理

去毛刺后的图像出现了清晰的干涉条纹，由于干涉条纹存在不连续部分特征，所以采用 Canny 算子进行边缘检测^[13]确定区域；通过区域划分，把图像分割成特征相同的区域，这样便于观察干涉条纹图像性质与数据提取。为了简化计算步骤，对 Sobel 算法进行简化。采用 3×3 的图像模板邻域，这样可以避免在像素点之间计算梯度^[14]，改进后的模板如图 5 所示。

Canny 算子计算梯度和方向时采用了 Sobel 算子，并对 Sobel 算子进行了改进，使用反正切的近似表示梯度方向。在每一个点上，邻域中心 x 沿着其对应的梯度方向的两个像素相比，若中心点 $Z5$ 的像素最大，则保留，否则中心置 0，这样可以抑制非极大值，保留局部梯度最大的点，可以得到细化的边缘。采用 Canny 算子提取图像边界，对图 4(c) 进行处理，如果是边界，则为 1，否则为 0。Canny 算子处理后的图像如图 6 所示。

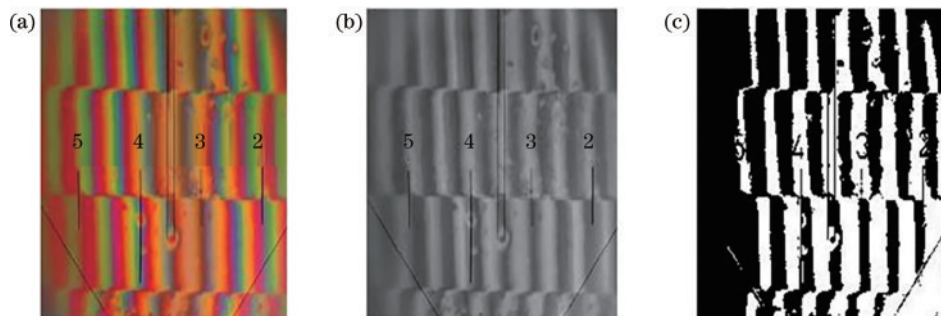


图 3 干涉条纹二值图像。(a) 原图；(b) 灰度图像；(c) 二值图像
Fig. 3 Interference fringe binary image. (a) Original image; (b) grayscale image; (c) binary image

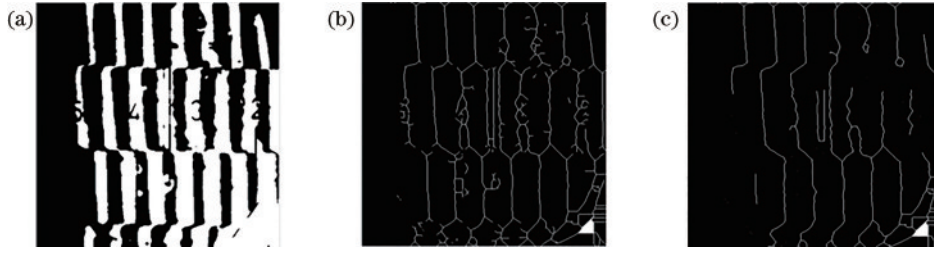


图 4 预处理图像。(a)高斯滤波去噪图;(b)骨化图像;(c)去毛刺图像

Fig. 4 Preprocessed images. (a) Gaussian filtering denoising image; (b) ossification image; (c) deburring image

Z1	Z2	Z3
Z4	Z5	Z6
Z7	Z8	Z9

图 5 改进后的模板

Fig. 5 Improved template

对于经过预处理和分割处理的干涉条纹图,采用 Hough 变换^[15]确定每一条干涉条纹的直线形状,建立 Hough 矩阵。确定 Hough 空间的表达式为

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta, \quad (5)$$

式中: ρ 表示直线到原点的距离; θ 表示 x 轴与直线垂线的角度。采用 Matlab 软件的 Hough 函数遍历 Canny 算子处理后的图像像素,确定了 θ 为 $[-50, 50]$ 、 ρ 为 $[0, 600]$ 的 Hough 矩阵图。为了更好地标记干涉条纹



图 6 Canny 算子处理后的图像

Fig. 6 Image processed by Canny operator

的直线,对比了 Hough 矩阵峰值个数 H 为 5、10、15、20 时直线的标记情况,最后取 $H \geq 15$ 确定一条直线,并将起点记为黄色,终点记为红色,线段则用绿色进行标记,如图 7 所示。

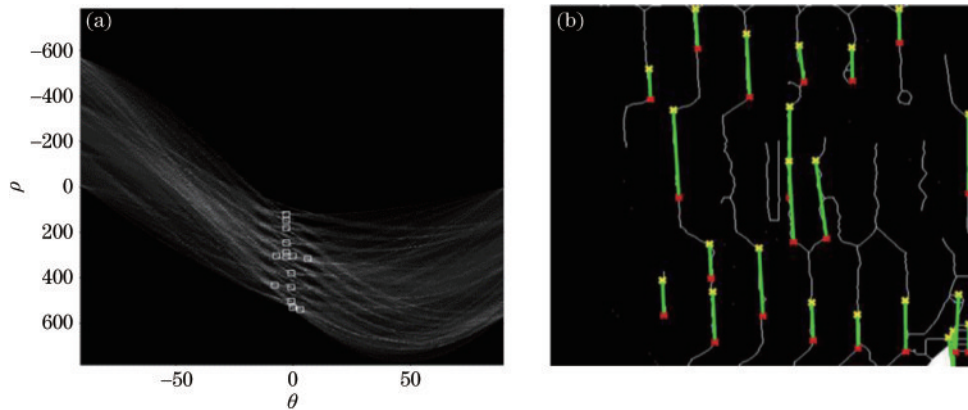


图 7 Hough 变换处理后的图像。(a)Hough 变换矩阵显示;(b)Hough 变换直线检测

Fig. 7 Images after Hough transform processing. (a) Hough transform matrix display; (b) Hough transform line detection

根据直线线段的起点和终点坐标,确立一条直线,直线的斜率(k)和截距(b')、两坐标值的直线距离(d)分别为

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = -\frac{B}{A}, \quad (6)$$

$$b' = y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_1 = -\frac{C}{B}, \quad (7)$$

$$d = \frac{|Ax + By + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad (8)$$

式中: (x_1, y_1) 为起点坐标值; (x_2, y_2) 为终点坐标值。

3.3 划痕深度值与相对误差计算

为了消除系统误差,采取均值法对干涉条纹弯曲量和干涉条纹间距进行计算,依次取 3 组数值,然后取期望,得到干涉条纹弯曲量和干涉条纹间距的均值 \bar{a} 和 \bar{b} ,通过式(1)得到划痕深度值。计算相对误差的公式为

$$\nabla = \frac{|\bar{h} - 70|}{70} \times 100\%, \quad (9)$$

式中： ∇ 为相对误差； \bar{h} 为玻璃划痕深度均值；70 nm 表示测试样本划痕深度的标准值。本次实验提取了三组数据进行计算分析，研究干涉条纹弯曲量的所取线段部分如图 8 所示。

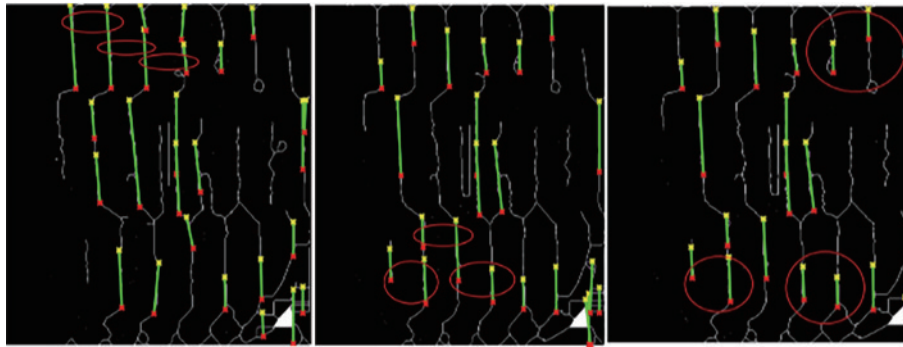


图 8 干涉条纹弯曲量 a_1, a_2, a_3 取值图

Fig. 8 Interference fringe bending amount a_1, a_2, a_3 value maps

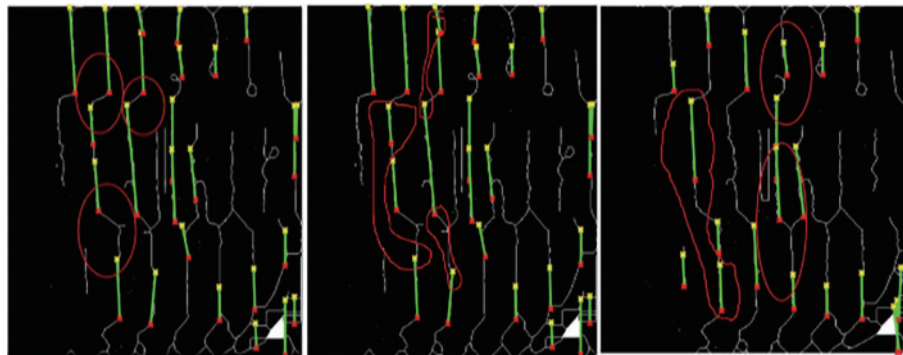


图 9 干涉条纹间距 b_1, b_2, b_3 取值图

Fig. 9 Interference fringe spacing b_1, b_2, b_3 value maps

提取的坐标值通过式(6)~(9),得干涉条纹间距三组数值分别为 $b_1=80.1534$ nm, $b_2=82.7763$ nm, $b_3=87.0914$ nm。通过式(1)和式(9),得划痕深度值 $h_1=69.3738$ nm, $h_2=69.4060$ nm, $h_3=70.5848$ nm, 相对误差分别为 0.89%, 0.84%, 0.90%。

4 结 论

所提系统的实现主要分为 3 个步骤:干涉条纹图像获取、干涉条纹图像处理分析、划痕数据处理。干涉条纹图像处理由预处理和分割处理 2 部分组成,干涉条纹预处理主要采用二维高斯滤波进行去噪,干涉条纹图像分割处理采用 Canny 算子进行边缘检测和 Hough 矩阵进行线段标记。实验结果表明,测量 70 nm 的光学玻璃划痕深度值时相对误差低于 1%,证实了光干涉法测量纳米级光学玻璃划痕深度的可行性。

参 考 文 献

- [1] United States Department of Defense. General specification for manufacture, assembly and inspection of optical elements for fire control instruments: MIL-0-13830[S]. Washington, D.C.: United States Department of Defense, 2011.
- [2] ISO. Optics and photonics-preparation of drawings for optical elements and systems-part 7: surface imperfections: ISO10110-7: 2017[S]. Geneva: ISO, 2017.
- [3] 向弋川, 林有希, 任志英. 光学元件表面缺陷检测方法研究现状[J]. 光学仪器, 2018, 40(1): 78-87.
Xiang Y C, Lin Y X, Ren Z Y. Study on surface defect detection method of optical element[J]. Optical Instruments, 2018, 40(1): 78-87.
- [4] 亓宁宁, 常敏, 刘雨翰. 基于机器视觉的玻璃缺陷检测[J]. 光学仪器, 2020, 42(1): 25-31.
Qi N N, Chang M, Liu Y H. Glass defects inspection based on machine vision[J]. Optical Instruments, 2020, 42(1): 25-31.
- [5] 孟奇, 苗华, 李琳, 等. 基于双通道生成对抗网络的镜片缺陷数据增强[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(20): 2015001.
Meng Q, Miao H, Li L, et al. Data enhancement of lens defect based on dual channel generative adversarial networks[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(20): 2015001.
- [6] 石兵华, 金永, 王召巴, 等. 基于数字光栅投影的浮法玻璃缺陷检测方法研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(3): 521-525.

- Shi B H, Jin Y, Wang Z B, et al. Research on defects detection for float glass based on digital grating projection [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2014, 25(3): 521-525.
- [7] 涂政乾, 董立超, 赵东峰, 等. 基于光散射理论的玻璃晶圆表面缺陷检测方法研究[J]. *光散射学报*, 2020, 32(3): 245-250.
- Tu Z Q, Dong L C, Zhao D F, et al. Research on surface defect detection method of glass wafer based on light scattering theory[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2020, 32(3): 245-250.
- [8] 张璇, 宋德林, 张涛, 等. 光学表面微缺陷的高对比度暗场成像检测方法[J]. *机电技术*, 2019, 42(1): 86-87, 108.
- Zhang X, Song D L, Zhang T, et al. High contrast dark field imaging detection method for optical micro-defects [J]. *Mechanical & Electrical Technology*, 2019, 42(1): 86-87, 108.
- [9] 苏程程, 万新军, 陈红豆, 等. 结合暗场散射与曲率成像的镜面缺陷检测方法[J]. *光学仪器*, 2021, 43(3): 1-8.
- Su C C, Wan X J, Chen H D, et al. Research on mirror defect detection technology combining curvature and dark field imaging[J]. *Optical Instruments*, 2021, 43(3): 1-8.
- [10] 李海洋, 智斌亮, 潘强华, 等. 表面窄缺陷深度的光声检测方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(2): 0212001.
- Li H Y, Zhi B L, Pan Q H, et al. Photoacoustic detection method for depth of surface narrow defects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 0212001.
- [11] 沈圆, 李国勇. 图像的阈值分割法设计[J]. *机械工程与自动化*, 2012(5): 45-46.
- Shen Y, Li G Y. Threshold segmentation design of complex image[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2012(5): 45-46.
- [12] 冯新星, 张丽艳, 叶南, 等. 二维高斯分布光斑中心快速提取算法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0512002.
- Feng X X, Zhang L Y, Ye N, et al. Fast algorithms on center location of two dimensional Gaussian distribution spot[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0512002.
- [13] 李静, 陈桂芬, 丁小奇. 基于改进 Canny 算法的图像边缘检测方法研究[J]. *计算机仿真*, 2021, 38(4): 371-375.
- Li J, Chen G F, Ding X Q. Research on image edge detection method based on improved Canny algorithm[J]. *Computer Simulation*, 2021, 38(4): 371-375.
- [14] 郑欢欢, 白鱼秀, 张雅琼. 一种基于 Sobel 算子的边缘检测算法[J]. *微型电脑应用*, 2020, 36(10): 4-6.
- Zheng H H, Bai Y X, Zhang Y Q. An edge detection algorithm based on sobel operator[J]. *Microcomputer Applications*, 2020, 36(10): 4-6.
- [15] Yam-Uicab R, Lopez-Martinez J L, Trejo-Sanchez J A, et al. A fast Hough Transform algorithm for straight lines detection in an image using GPU parallel computing with CUDA-C[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2017, 73(11): 4823-4842.