

# 基于散射场分布拟合逼近的表面缺陷检测

武雄骁\*, 王红军\*\*, 魏晨, 田爱玲, 刘丙才, 朱学亮, 刘卫国

西安工业大学光电工程学院陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710021

**摘要** 为了实现对光学元件表面不同尺寸尤其是微小尺寸缺陷的精确检测,以典型的光学元件表面缺陷即麻点和划痕为研究目标,提出了一种基于散射场分布拟合逼近的表面缺陷检测方法。实验结果表明,本方法可以对光学元件表面的微小尺寸缺陷进行快速有效的检测,且拟合计算结果与样件原始尺寸的相对误差基本小于5%,验证了本方法的有效性。此外,本方法还解决了现有测量方法精度低、结构复杂的问题,为精确检测光学元件表面的微小尺寸缺陷提供了新思路。

**关键词** 测量与计量; 缺陷检测; 散射; 表面缺陷; 精密光学元件

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1112003

## Surface Defect Detection Based on Scattering Field Distribution Fitting Approximation

Wu Xiong Xiao\*, Wang Hongjun\*\*, Wei Chen, Tian Ailing, Liu Bingcai, Zhu Xueliang, Liu Weiguo

*Shaanxi Province Key Laboratory of Membrane Technology and Optical Test, School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China*

**Abstract** This study proposes a surface defect detection method based on the scattering field distribution fitting approximation to accurately detect different sizes of optical element surfaces, especially small-size defects, with typical optical element surface defects-pits and scratches-as the research target. Experimental results show that the method can rapidly and effectively detect small-size defects on optical element surfaces and the relative error between fitting calculation results and the original size of a sample is basically less than 5%, which verifies the effectiveness of the method. In addition, the method addresses the problems of low accuracy and complex structure of existing measurement methods and introduces a new idea for accurately detecting microsized defects on optical element surfaces.

**Key words** measurement and metrology; defect detection; scattering; surface defect; precision optical components

**OCIS codes** 120.6650; 120.5820; 240.0240

## 1 引言

近年来,随着航空航天、武器装备等领域对光学系统性能要求的提高,人们对光学元件的表面质量也提出了更高的要求,对表面缺陷检测<sup>[1]</sup>的要求

也越来越苛刻。光学元件表面质量的优劣会直接影响光学系统在各个领域中的应用<sup>[2-4]</sup>,其表面的划痕、麻点、破边等<sup>[5]</sup>缺陷导致的衍射和散射都会严重降低光学系统的性能与效率。

目前,光学元件表面缺陷的检测方法主要包括

收稿日期: 2020-09-25; 修回日期: 2020-11-04; 录用日期: 2020-11-12

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2019JM-373)

\*E-mail: w18091318348@163.com; \*\*E-mail: whj0253@sina.com

目视法、成像法、能量法等。其中,目视法是最基础也是最常用的方法,但该方法的检测质量不稳定,且检测效率低,容易受人为因素的影响。成像法<sup>[6]</sup>与目视法的原理接近,由光学传感器替代人眼进行观察,通过测量缺陷像的大小及明暗水平判断缺陷的大小和特点。能量法<sup>[7]</sup>是将光学元件表面缺陷引起的散射光通过傅里叶透镜后,由其后焦平面的光强分布得到缺陷的后向衍射谱能量,然后利用能量积分与缺陷形态学相关处理得到缺陷的大小及深度,如频谱分析法。机器视觉表面缺陷检测<sup>[8-10]</sup>将计算机视觉与图像处理技术结合起来,利用数字图像检测待识别物体,以提取有用信息,如 Raafat 等<sup>[11]</sup>基于机器视觉系统对塑料及玻璃表面的质量进行检测,检测目标主要为表面划痕、气泡、裂纹等;杨甬英等<sup>[12]</sup>基于显微散射暗场成像原理及机器视觉对光学表面的疵病进行检测,并研发了光学元件表面缺陷的数字化评价系统;Choi 等<sup>[13]</sup>提出了一种基于光热反射显微技术的疵病检测方法,对于灵敏度的检测可精确到几十纳米。虽然基于机器视觉的光学元件表面缺陷检测技术在近年来取得了不错的发展,但受成像系统衍射极限的限制,机器视觉方法<sup>[14]</sup>依旧无法检测微小尺寸缺陷。散射法是一种新的表面缺陷检测技术,通过表面缺陷在散射空间的散射分布实现对表面缺陷的检测。在散射法缺陷检测中,找到散射分布中最亮的第一级条纹后,按照衍射对应关系可计算出缺陷大小。但微小尺寸缺陷的第一级条纹往往超出了散射成像的范围。因此,本文针对微小尺寸表面缺陷难以检测的问题,提出了一种基于散射场分布拟合逼近的表面缺陷检测方法,以实现对小尺寸缺陷的计算。

## 2 检测原理

本方法的缺陷检测原理如图 1 所示,首先,将测试样件放入检测装置中,激光器发出的激光束经光束整形后形成会聚光,会聚光经过样品表面反射后到达 CCD 靶面。然后,调整样品的位置和姿态,使会聚光的会聚点位于 CCD 靶面中心,且会聚光轴垂直于 CCD 靶面。当样品表面为理想的光滑表面时,反射光束将会聚到 CCD 的靶面中心,是一个冲激函数;当样品表面存在缺陷时,反射光束会在反射表面的半球空间形成散射光,此时 CCD 可得到其局部区域的散射分布图。其中,反射点到 CCD 靶面中心的距离为  $L$ ,结合散射场的拟合逼近算法可得到缺

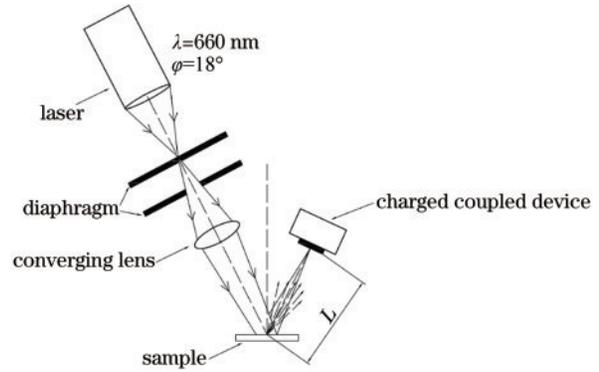


图 1 表面缺陷二维轮廓的检测原理

Fig. 1 Detection principle of two-dimensional profile of surface defects

陷的尺寸, $\lambda$ 为入射激光的波长, $\varphi$ 为入射角度。

由于光学元件表面缺陷的宽度不同,经散射后会形成不同且唯一的分布,因此,可根据缺陷和散射分布之间的对应关系,计算一系列宽度对应的散射光强分布,并与实际样品缺陷的光强散射分布曲线进行对比分析。以最小均方根误差(RMSE)为判断依据,通过多次实验找到与所求样品缺陷散射强度分布最接近的散射强度分布曲线,该曲线对应的宽度  $d'$  即为所求缺陷的宽度。

## 3 散射场的拟合逼近算法

基于上述检测装置,利用重心法求出光学元件表面缺陷散射分布的中心位置,并以中心位置为基准点,沿右半水平方向取值,得到该方向上的一维光强分布曲线  $I(w)$ ,曲线的横坐标为取样方向上每一点与基准点之间的距离  $w$ ,纵坐标为图像的灰度即光强度  $I$ 。根据该方向上的一维光强分布曲线确定光强取值范围  $(I_{\min}, I_{\max})$ ,其中,  $I_{\min}$  为最小光强值,  $I_{\max}$  为最大光强值,将光强最小值和最大值的取值间隔分别设置为  $\Delta I_{\min}$  和  $\Delta I_{\max}$ 。根据缺陷散射分布图的条纹估计出缺陷宽度范围,预先设计足够大的范围,将缺陷宽度包含进去。设置元件表面缺陷的宽度最小值为  $d_{\min}$ ,最大值为  $d_{\max}$ ,则缺陷宽度范围为  $(d_{\min}, d_{\max})$ ,取值间隔为  $\Delta d$ 。

由系统几何关系可知散射角  $\theta$  为

$$\theta = \arctan(w/L). \quad (1)$$

设置各项初始参数,令  $I_0 = 0, I_g = 0, d = d_{\min}$ ,其中,  $I_0$  为  $\theta = 0^\circ$  时的光强,  $I_g$  为背景光强,  $d$  为设置的缺陷宽度,将  $d, \theta$  和  $\lambda$  代入(2)式,得到

$$\alpha = \pi d \sin \theta / \lambda, \quad (2)$$

将  $\alpha$ ,  $I_0$  和  $I_g$  代入 (3) 式, 得到一维光强分布曲线  $I_1$  为

$$I_1 = I_0 \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 + I_g \quad (3)$$

缺陷宽度的具体计算流程如图 2 所示, 其中, 输入包括入射光波长  $\lambda$  和散射角  $\theta$  以及初始值, 输出为缺陷宽度, 即匹配的最佳  $d'$ 。  $I_{RMSE}$  为一个中间值, 初始  $I_{RMSE0} = a$  ( $a$  为一个较大的常数),  $X_{RMSE}$  为均方根误差。通过对缺陷宽度  $d$ 、 $I_0$  和  $I_g$  等变量进行遍历循环计算, 得到一系列光强分布曲线。对比找出与实际光强散射分布曲线最接近的光强散射分布曲线, 该曲线对应的  $d'$  即为所求缺陷的宽度, 进而得到缺陷的尺寸。由于算法的执行时间依赖于软硬件环境, 且本算法的运行时间与设置的参数值有关, 如拟合宽度的范围及其取值间隔、光强范围及最大最小取值间隔。取值间隔越小, 迭代次数越大, 拟合的取值间隔范围越小, 则精度越高, 算法的运行时

间也越长; 反之, 当迭代次数较少时, 算法的运行时间也较短。本算法的整体运行速度在秒级, 属于快速检测, 因此, 需要结合相关变量分析衡量算法的运行时间。

## 4 实验研究

实验采用的光源是波长为 660 nm 的 III-B 类激光器, 其功率为 25 mW, 在样品上形成的光斑直径为 3 mm; 采用的 CCD 传感器型号为 MV1-D2080-160-G2-12, 分辨率为 2080 pixel  $\times$  2080 pixel, 像素尺寸为 8  $\mu\text{m}$   $\times$  8  $\mu\text{m}$ , 有效感光面积为 16.64 mm  $\times$  16.64 mm。激光器发出的入射光  $\varphi = 18^\circ$ , 反射点到 CCD 靶面中心的距离  $L = 56$  mm。光经过光束整形系统后打在带有缺陷的样品表面, 经样品反射及散射后的光被 CCD 传感器探测接收, 可通过计算 CCD 传感器接收到的散射场分布得到光学元件表面缺陷的尺寸。

实验研究的缺陷是宽度确定且无倾斜角度的理想状态, 原因是不同深度缺陷的宽度也不同, 从而产生不同的散射分布; 且在纵深方向多次叠加会降低条纹分布之间的对比度, 深度较深时又会产生一个宽度, 进而形成新的散射分布。此外, 倾角的变化会产生不同的衍射间距, 导致计算精度变小, 即等效宽度为一个综合效果; 且深度的数量级较小, 相对于探测距离可忽略不计, 因此, 暂不考虑倾角和深度的影响。

### 4.1 图像数据处理分析

采集的图像在拍摄和传输过程中, 受拍摄机器、传输装备及路径的影响, 会包含一定的噪声, 从而影响缺陷的识别。为了对缺陷尺寸进行更精确的测量, 先对缺陷的散射场分布图进行预处理, 尽可能地降低散射分布图的背景噪声, 增强散射分布图的有用信息。图 3 为标称直径为 10  $\mu\text{m}$  的标准缺陷样品麻点的散射场分布图, 可以发现, 受玻璃样品后表面的影响, 激光经样品缺陷表面反射时会在后表面会形成小亮斑, 该亮斑在麻点尺寸较小时更明显, 容易混淆。由系统结构原理可知, 光照射到后表面反射会形成图像右边的小亮斑, 这表明所测样品前表面形成的散射分布中心大致位于图中的左侧位置。

在最大限度保留散射分布图中主要特征信息的前提下去除图像中的噪点, 可降低噪点对缺陷散射分布图有用信息的损坏。可采用滤波处理方

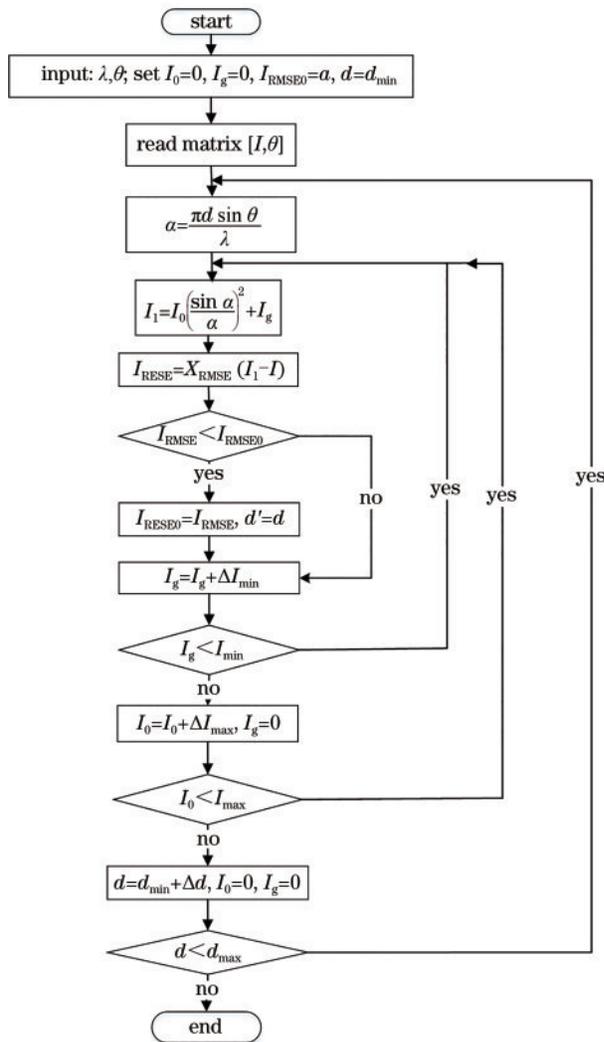


图 2 缺陷宽度的计算流程图

Fig. 2 Flow chart for calculation of the defect width



图 3 直径为 10  $\mu\text{m}$  的麻点散射场分布  
Fig. 3 Scattering field distribution of the pit with diameter of 10  $\mu\text{m}$

法<sup>[15]</sup>消除图像采集过程中的噪声,其中,中值滤波的处理效果最佳。以标称直径为 40  $\mu\text{m}$  的麻点散射分布图为例进行标记,确定左侧亮斑位置为散射分布中心,然后进行降噪处理,原始图像和降噪后的散射分布图分别如图 4(a)和图 4(b)所示。

此外,为了降低玻璃样件后表面形成的小亮斑带来的影响,需对麻点的散射分布图进行旋转处理,如图 4(c)所示。基于上述散射分布逼近算法对处理后的图像进行拟合计算,并根据重心原理确定缺陷散射分布图的中心,即将区域内每一像素位置处的灰度值当作该点的质量,区域中心的坐标可表

示为

$$\bar{u} = \sum_{(u,v) \in \Omega} u \cdot f(u,v) / \sum_{(u,v) \in \Omega} f(u,v), \quad (4)$$

$$\bar{v} = \sum_{(u,v) \in \Omega} v \cdot f(u,v) / \sum_{(u,v) \in \Omega} f(u,v), \quad (5)$$

式中,  $f(u,v)$  为  $(u,v)$  处像素点的灰度值,  $\Omega$  为目标区域集合,  $(\bar{u}, \bar{v})$  为区域中心坐标,重心为区域的能量中心。如图 4(d)所示,将麻点散射分布图中心用十字标记后,根据上述散射分布拟合算法计算缺陷在取样方向上的宽度。

对划痕的散射分布图处理方法与麻点类似,先进行中值滤波处理以降低噪点、突出主要信息,再根据拟合逼近算法进行拟合计算,图 5(a)为标称宽度为 10  $\mu\text{m}$  的划痕散射场分布图,降噪处理后的图像如图 5(b)所示。受样件玻璃后表面的影响,激光经样件缺陷表面反射后会形成亮条,由系统结构原理可知,光照射到后表面反射形成的应为图 5(a)右边的两个亮条,因此确定划痕的散射分布位于图中左侧位置。计算划痕缺陷尺寸前,需对散射分布图进行旋转预处理,首先利用边缘检测,对图像中的水平线进行强化处理;然后基于 Hough 变换检测划痕图像,获取倾斜角度;最后根据倾斜角度对划痕图像进行倾斜校正,使其散射分布呈水平横向放置,如图 5(c)所示。利用重心原理提取区域的能量

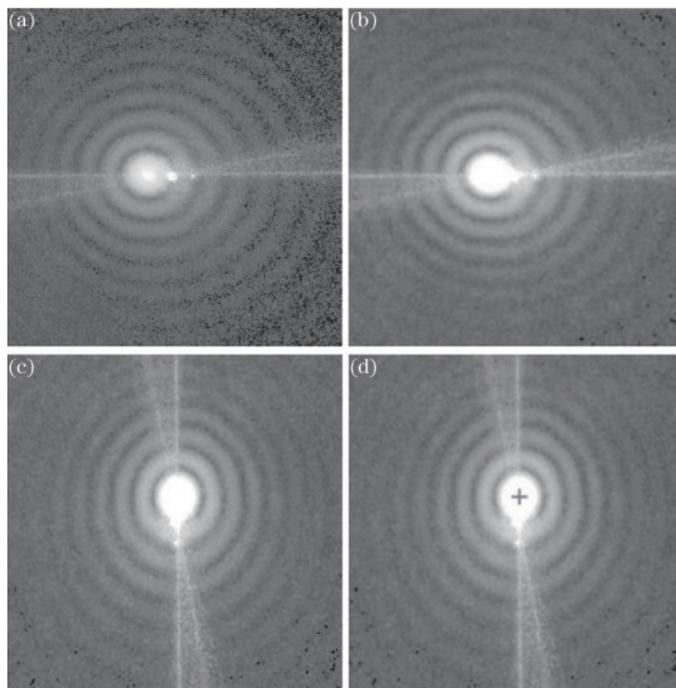


图 4 降噪后的散射场分布图。(a)原始图像;(b)降噪后的图像;(c)旋转后的图像;(d)标记后的图像  
Fig. 4 Scattering field distribution diagram after noise reduction. (a) Original image; (b) denoised image; (c) rotated image; (d) marked image

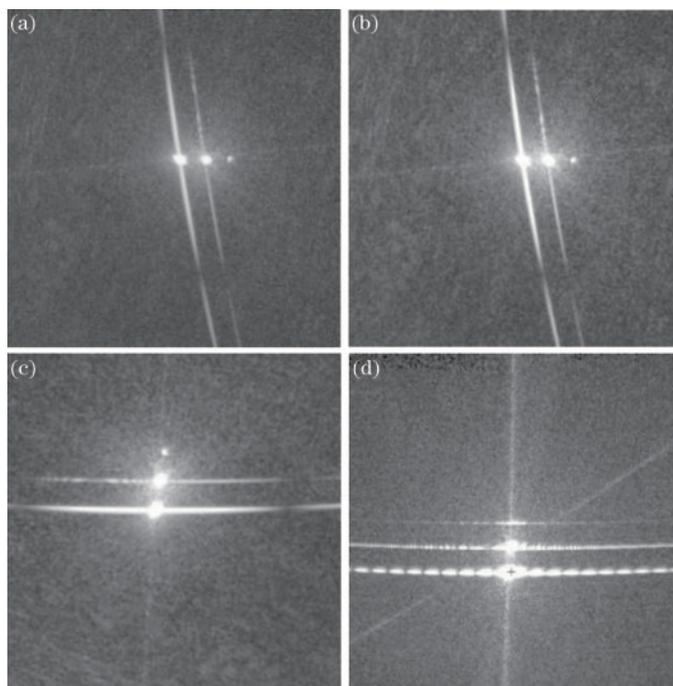


图 5 10  $\mu\text{m}$  划痕的散射场分布图。(a)原始图像;(b)降噪后的图像;(c)旋转图像;(d)标记后的图像

Fig. 5 Scattering field distribution of 10  $\mu\text{m}$  scratch. (a) Original image; (b) denoised image; (c) rotated image; (d) marked image

中心即划痕散射分布图的重心,以标称宽度为 40  $\mu\text{m}$  的划痕为例,用十字号标记,再依据上述拟合逼近算法得到划痕的横向宽度,如图 5(d)所示。

#### 4.2 缺陷检测

本方法主要针对微小尺寸缺陷的检测,因此,只拟合并计算标称直径小于 70  $\mu\text{m}$  的缺陷。为实现微小尺寸的拟合计算,选取标称直径为 10~70  $\mu\text{m}$  的麻点标准样件和标称横向宽度为 10~70  $\mu\text{m}$  的划痕标准样件作为测量对象。将缺陷样件放置在根据检测原理设计的光路中,得到其拟合逼近的尺寸,并将拟合结果与由白光干涉仪测得的缺陷实际尺寸进行对比分析。

##### 1) 麻点检测

对实际直径为 40.2  $\mu\text{m}$  和 10.1  $\mu\text{m}$  的麻点缺陷散射场分布图进行降噪处理,结果如图 6(a)和图 6(b)所示。对于直径为 40.2  $\mu\text{m}$  的麻点缺陷,拟合时设置的直径范围为 1~70  $\mu\text{m}$ ,间隔为 0.1  $\mu\text{m}$ ,用图 6(a)中以原点为中心右半部分横坐标线上的灰度值计算得到的麻点直径为 41.8  $\mu\text{m}$ 。用相同方法得到图 6(b)中的麻点直径为 9.8  $\mu\text{m}$ 。可以发现,由于受散射场的限制,图 6(b)中的麻点缺陷无法形成明显的衍射条纹,难以观测到条纹分布,无法根据缺陷条纹的间距获得缺陷尺寸。

以标称直径为 10~70  $\mu\text{m}$  的麻点缺陷为例,拟

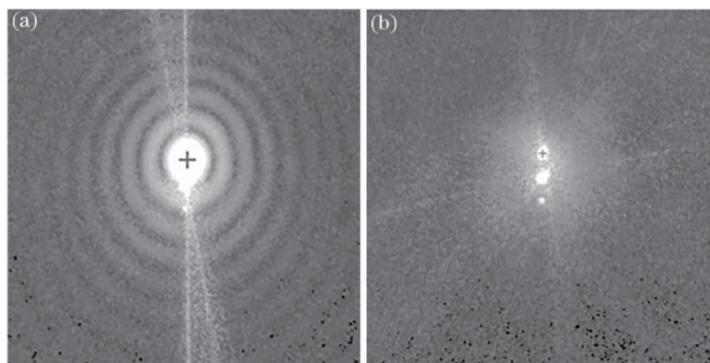


图 6 降噪后麻点缺陷的散射场分布图。(a)直径为 40.2  $\mu\text{m}$ ; (b)直径为 10.1  $\mu\text{m}$

Fig. 6 Scattering field distribution diagram of pit defect after noise reduction. (a) Diameter is 40.2  $\mu\text{m}$ ; (b) diameter is 10.1  $\mu\text{m}$

合得到不同尺寸的麻点缺陷计算结果、白光干涉仪测得的实际尺寸以及两者之间的误差及相对误差如表 1 所示。可以发现,两种检测方法的总体误差范围为  $0.3\sim 1.6\ \mu\text{m}$ ,相对误差范围为  $2.28\%\sim 4.47\%$ ,小于  $5\%$ ,这表明本方法计算得到的缺陷尺寸与实际尺寸十分接近,验证了本方法的可行性与准确性。

表 1 不同直径麻点的拟合计算结果

Table 1 Fitting calculation results of pits with different diameters

Nominal size / $\mu\text{m}$	White light interferometer size / $\mu\text{m}$	Fitting size / $\mu\text{m}$	Error value / $\mu\text{m}$	Relative error /%
10	10.1	9.8	0.3	2.97
20	20.1	19.2	0.9	4.47
30	30.1	31.4	1.3	4.32
40	40.2	41.8	1.6	3.98
50	50.3	51.5	1.2	2.38
60	60.1	58.6	1.5	2.49
70	70.2	71.6	1.6	2.28

拟合计算中产生的误差一方面是背景噪声造成的,越是靠近边缘的条纹,与背景噪声的对比度就越小,对拟合计算结果产生的影响会越大。另一方面是由反射后样件后表面引起的小亮斑造成的,当样件很厚时,反射后不会产生小亮斑,而实验室中的样件较薄,暂时无法消除后表面形成的小亮斑。

## 2) 划痕检测

以白光干涉仪得到的横向宽度为  $40.2\ \mu\text{m}$  的划痕缺陷为例,经图像降噪处理得到的划痕缺陷散射场分布如图 7 所示。根据上述拟合算法,得到其散射场分布对应的划痕宽度为  $41.6\ \mu\text{m}$ 。可以发现,拟合计算的尺寸十分接近白光干涉仪得到的尺寸,

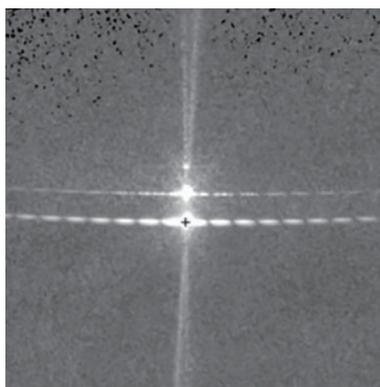


图 7 降噪后划痕缺陷的散射场分布图

Fig. 7 Scattering field distribution diagram of scratch defect after noise reduction

误差为  $1.4\ \mu\text{m}$ 。

对标称横向宽度小于  $70\ \mu\text{m}$  的不同尺寸划痕进行散射场分布的拟合计算,得到白光干涉仪测得的实际尺寸与拟合算法计算尺寸之间的误差和相对误差如表 2 所示。可以发现,两种方法的总体误差范围为  $0.3\sim 2.1\ \mu\text{m}$ ,相对误差范围为  $0.99\%\sim 5.97\%$ 。只有宽度为  $20.1\ \mu\text{m}$  的划痕缺陷误差稍大,为  $5.97\%$ ,总体相对误差基本小于  $5\%$ ,进一步验证了本方法的准确性和可行性。

表 2 划痕的拟合计算结果

Table 2 Fitting calculation result of the scratch

Nominal size / $\mu\text{m}$	White light interferometer size / $\mu\text{m}$	Fitting size / $\mu\text{m}$	Error value / $\mu\text{m}$	Relative error /%
10	10.2	10.5	0.3	2.94
20	20.1	21.3	1.2	5.97
30	30.1	29.8	0.3	0.99
40	40.2	41.6	1.4	3.48
50	50.1	51.2	1.1	2.19
60	60.3	58.4	1.9	3.15
70	70.2	72.3	2.1	2.99

## 5 结 论

针对微小缺陷难以检测的问题,提出了一种基于散射场分布拟合逼近的缺陷检测方法,通过对麻点和划痕散射场分布图的降噪处理,拟合计算出缺陷的尺寸,弥补了通过条纹图像计算缺陷尺寸的不足。实验结果表明,本方法能快速有效地检测微小尺寸光学元件表面的缺陷,相比白光干涉仪测得的缺陷尺寸,本方法拟合计算的麻点直径误差范围为  $0.3\sim 1.6\ \mu\text{m}$ ,相对误差范围为  $2.28\%\sim 4.47\%$ ;划痕宽度误差范围为  $0.3\sim 2.1\ \mu\text{m}$ ,相对误差范围为  $0.99\%\sim 5.97\%$ 。两种类型的缺陷尺寸相对误差基本小于  $5\%$ ,验证了本方法的可行性。但实验只考虑了光学元件表面的划痕和麻点缺陷,后续还需进一步探索光学元件表面的其他缺陷与损伤检测。

## 参 考 文 献

- [1] Feng F, Tian A L, Liu B C, et al. Full-field three-dimensional test for scratch defects using digital holographic scanning imaging system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0409003.

冯方,田爱玲,刘丙才,等.基于数字全息扫描成像的划痕缺陷全场三维测试[J].中国激光,2020,47

- (4): 0409003.
- [2] Wang H D, Zhang T H. Research progresses on characterization and detection technology of subsurface damages in optical materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 100003.  
王华东, 张泰华. 光学材料亚表面损伤的表征与检测技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 100003.
- [3] Zhang K P. Assessing surface quality for optical components by light scattering measurement[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.  
张科鹏. 基于散射测量的光学元件表面质量评估方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [4] Li K B, Yu H Y, Zhou S J. Surface scratch detection of mechanical parts based on morphological features [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815027.  
李克斌, 余厚云, 周申江. 基于形态学特征的机械零件表面划痕检测[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815027.
- [5] 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.  
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.
- [6] Trivedi V, Joglekar M, Mahajan S, et al. Digital holographic imaging of refractive index distributions for defect detection[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 111: 439-446.
- [7] Zhang X, Yang G G, Cheng S Y, et al. Laser frequency spectrum analysis method and automatic inspection instrument of optical surface imperfection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1994, 15(4): 396-399.  
张晓, 杨国光, 程上彝, 等. 光学表面疵病的激光频谱分析法及其自动检测仪[J]. *仪器仪表学报*, 1994, 15(4): 396-399.
- [8] Li S H, Zhou Y T, Wang D, et al. Surface defect detection of polyvinyl chloride pipes based on machine vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(13): 131006.  
李书华, 周亚同, 王丹, 等. 基于机器视觉的聚氯乙烯管材表面缺陷检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(13): 131006.
- [9] Li D, Bai G J, Jin Y Y, et al. Machine-vision based defect detection algorithm for packaging bags[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(9): 091501.  
李丹, 白国君, 金媛媛, 等. 基于机器视觉的包装袋缺陷检测算法研究与应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(9): 091501.
- [10] Chen G F, Guan G Y, Wei X. Online stamping parts surface defects detection based on machine vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011501.  
陈广锋, 管观洋, 魏鑫. 基于机器视觉的冲压件表面缺陷在线检测研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011501.
- [11] Raafat H, Taboun S. An integrated robotic and machine vision system for surface flaw detection and classification[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1996, 30(1): 27-40.
- [12] Yang Y Y, Lu C H, Liang J, et al. Microscopic dark-field scattering imaging and digitalization evaluation system of defects on optical devices precision surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(6): 1031-1038.  
杨甬英, 陆春华, 梁蛟, 等. 光学元件表面缺陷的显微散射暗场成像及数字化评价系统[J]. *光学学报*, 2007, 27(6): 1031-1038.
- [13] Choi W J, Ryu S Y, Kim J K, et al. Fast mapping of absorbing defects in optical materials by full-field photothermal reflectance microscopy[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4907-4910.
- [14] Zeng X B. Research on automatic detection technology of lens defects based on machine vision [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014.  
曾祥波. 基于机器视觉的镜片疵病自动化检测技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2014.
- [15] Li J L, Cui S H, Wang M. Threshold de-noising method for mixed noise based on improved median filter and lifting wavelet transform[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(5): 817-822.  
李金伦, 崔少辉, 汪明. 基于改进中值滤波和提升小波变换的阈值去噪方法研究[J]. *应用光学*, 2014, 35(5): 817-822.