

# 基于振镜扫描方式的光学元件表面损伤检测

郭亚晶, 唐顺兴\*, 姜秀青, 朱宝强, 林尊琪

中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

**摘要** 振镜作为一种二维扫描器件, 可以实现光学元件不同位置处表面情况在 CCD 相机上的成像, 利用振镜扫描方式无需移动待检测光学元件和成像系统即可完成大口径光学元件表面损伤的扫描检测, 提出了一种基于振镜扫描方式的大口径光学元件表面损伤检测方法。利用该方法对光学元件表面损伤点检测进行了验证实验, 通过在元件表面设置基准点, 利用振镜扫描步数及图像处理技术确定损伤点位置及尺寸, 并与光学显微镜观察到的损伤情况进行对比, 结果显示利用振镜扫描方法对元件表面损伤点位置及尺寸的检测结果与光学显微镜检测结果偏差较小。该检测系统分辨率可达到  $(2.08 \pm 0.015) \mu\text{m}/\text{pixel}$ , 检测范围大于 2.5 cm, 水平方向和竖直方向位置坐标检测准确度分别为 3.76% 和 1.37%, 损伤点尺寸检测准确度为 6.19%, 能够实现较大尺寸光学元件表面损伤点的高准确性检测。

**关键词** 测量; 损伤检测; 振镜; 扫描; 激光诱导损伤

**中图分类号** TN204 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0612003

## Damage Inspection of Optical Surface Based on Galvanometer Scanning

Guo Yajing, Tang Shunxing, Jiang Xiuqing, Zhu Baoqiang, Lin Zunqi

*National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

**Abstract** As a two-dimensional scanning device, galvanometer can be used to image surface damage status of different regions into CCD. The galvanometer scanning method can accomplish surface damage inspection of large-aperture optical elements without moving optical elements or imaging devices. A damage inspection method for large-aperture optical elements based on galvanometer scanning is presented. The experiment is conducted based on the galvanometer scanning method. By setting reference points on the optical element surface, the damage size and location are obtained after scanning steps and image processing. Then, the results are compared with those from microscope. The resolution of the inspection system is  $(2.08 \pm 0.015) \mu\text{m}/\text{pixel}$ , and the inspection range is larger than 2.5 cm. The inspection accuracies in the horizontal and vertical directions are 3.76% and 1.37%, respectively. The inspection accuracy of damage size is 6.19%. It demonstrates that the galvanometer scanning damage inspection method can detect the damage status on the large-aperture optical element surface with high accuracy.

**Key words** measurement; damage inspection; galvanometer; scanning; laser-induced damage

**OCIS codes** 120.1880; 140.3330; 040.1880; 100.3008

## 1 引言

大口径光学元件的激光诱导损伤是限制激光驱动器通量密度提升的重要因素, 损伤的产生不仅降低了元件寿命, 而且损伤点对入射激光的阻挡和散射会导致光束波前产生畸变, 使到达下游光学元件的光场强度分布发生一定的调制, 从而降低焦斑质量甚至可能损坏下游元件<sup>[1-2]</sup>。激光诱导元件损伤特性研究及元件损伤在线检测是提升系统负载能力及保障装置安全运行的重要手段<sup>[3-4]</sup>, 尤其损伤在线检测对检测精度、准确度、检测范围及检测时间等方面都提出严格的要求。因此, 研究更简单、快速、准确的大口径光学元件损伤在

**收稿日期:** 2016-12-12; **收到修改稿日期:** 2017-02-13

**作者简介:** 郭亚晶(1984—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事高功率激光系统中光束传输等方面的研究。

E-mail: guoyajing860501@163.com

\* **通信联系人.** E-mail: leo@siom.ac.cn

线检测方法有着至关重要的意义。

目前,大口径光学元件激光损伤检测技术研究的关键是解决全口径损伤成像和损伤高分辨率之间的矛盾。通常,光学元件初始损伤尺寸小于  $50\ \mu\text{m}$ ,若达到  $50\ \mu\text{m}$  则说明损伤开始增长,为了发现和跟踪损伤点的尺寸变化情况,可将  $50\ \mu\text{m}$  作为在线检测系统的检测尺寸起点<sup>[5-6]</sup>。国家点火装置(NIF)2007年报道的新型终端光学元件在线损伤检测(FODI)系统,利用一个光学望远镜和高分辨率 CCD 摄像机( $4000\times 4000$ )对被检测元件对焦成像,可检测光学元件尺寸为  $300\ \text{mm}\times 300\ \text{mm}$ ,系统分辨率为  $110\ \mu\text{m}$ <sup>[5]</sup>,但难以实现  $50\ \mu\text{m}$  尺寸的损伤点检测。解亚平等<sup>[7]</sup>利用透射式在线检测光路及暗场成像理论设计了一套光学元件在线检测系统,其分辨率为  $1\ \text{mm}$ ,解决了针对大型光学系统检测的大视场、大工作距离问题,但系统分辨率较低,且无法区分相近光学器件的损伤。大口径光学元件损伤离线检测作为在线检测的比对基准,要求其检测精度较高。为了实现高精度损伤检测的要求,通常采用扫描方式分区域对大口径光学元件表面损伤进行检测,然后利用图像拼接技术实现全口径元件的损伤检测。

对于大口径光学元件损伤在线检测,要同时保证全口径检测及高检测精度两个方面,但 CCD 相机分辨率和像素尺寸的限制,使其不能一次性对整个大口径元件的表面损伤情况成像。因此,为了满足大口径元件表面损伤监测需求,需要分区域检测光学元件损伤情况,并将各区域损伤图像进行拼接来完成全口径内光学元件损伤情况的检测,这可以通过移动成像系统或者被测元件来实现。系统中在线使用的光学元件已装校调试好,不易于装卸,难以通过移动待测元件来实现大口径元件的表面损伤检测。如果要移动成像系统,对于较复杂的成像系统来说多个元器件的同步移动难以实现,且这对保证放大倍率的一致性和成像都会产生不利影响。因此,有必要寻求更好的检测手段。

本文提出利用扫描振镜的方式来实现大口径光学元件的损伤检测。扫描振镜作为一种矢量扫描器件<sup>[8-9]</sup>,对于固定入射激光来说,通过转动振镜的反射镜片可以实现出射激光束的移动。相反,如果出射激光束位置固定,也可以通过转动振镜的反射镜来实现对不同位置处入射光的接收。将扫描振镜的这种特性应用到大口径光学元件表面损伤检测技术中,对于被均匀照明的待测元件,转动扫描振镜的反射镜片可以使振镜扫描到待测元件的不同位置,镜片反射后成像到 CCD 上。这种方法不需要移动待测元件或者成像系统,只需转动扫描振镜即可实现对大口径待测元件不同位置处的损伤情况检测,这种基于振镜扫描方式的损伤检测方法不仅可以达到较高的检测精度,而且通过分区域扫描检测的损伤图像拼接也可以实现全口径内光学元件的损伤检测。

基于振镜扫描方式进行了光学元件表面损伤检测的验证性实验,利用一个具有二维扫描功能的二维电动调整反射镜来实现扫描检测功能,通过在元件表面设置基准点,利用二维电动调整反射镜在水平、竖直方向的扫描步数及图像处理技术确定损伤点位置及尺寸,并与光学显微镜观察的损伤情况进行对比。基于振镜扫描方式损伤检测系统的成像分辨率(即 CCD 所成图像中每个像素代表的待检测元件表面的实际尺寸)可达到  $(2.08\pm 0.015)\ \mu\text{m}/\text{pixel}$ ,扫描检测并拼接图像后可实现的检测总范围大于  $2.5\ \text{cm}$ ,水平方向和竖直方向位置坐标检测准确度分别为  $3.76\%$  和  $1.37\%$ ,损伤点尺寸检测准确度为  $6.19\%$ ,能够实现较大尺寸光学元件表面损伤点的高准确性检测。

## 2 检测原理

### 2.1 振镜扫描元件分区域成像

基于振镜扫描方式的大口径光学元件表面损伤检测技术是通过转动振镜的反射镜 1、反射镜 2 实现成像系统对待测元件表面不同位置处损伤情况的扫描式检测,基本原理如图 1 所示。当反射镜 1 和反射镜 2 不转动时,光源面( $xoy$  面)上原点  $o$  处光束经两块镜面反射进入 CCD 内,即 E 区域成像到 CCD 内。当反射镜 1 转动  $\theta_x$  角度时,F 区域内光束经两块镜面反射进入 CCD 内,即扫描沿着  $x$  方向进行;同理,当反射镜 2 转动  $\theta_y$  时,扫描沿着  $y$  方向进行。配合两块反射镜的转动,可使  $xoy$  面上不同位置处的表面情况成像到 CCD 上。

图 1 中,反射镜 1 与反射镜 2 间的距离为  $d_x$ ,振镜 1 与光源面间的距离为  $d_y$ ,反射镜转动对应待检测面上移动位移为

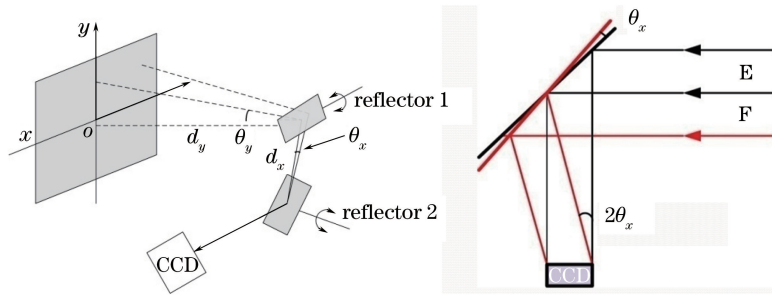


图 1 振镜扫描方式检测元件表面损伤原理

Fig. 1 Schematic of damage detection based on galvanometer scanning

$$\Delta x = d_x \times \tan(2\theta_x), \quad (1)$$

$$\Delta y = d_y \times \tan(2\theta_y), \quad (2)$$

式中  $\theta_x$ 、 $\theta_y$  为扫描振镜的反射镜 1 和反射镜 2 转动的角度,  $\Delta x$  和  $\Delta y$  为反射镜 1 和反射镜 2 转动后接收光束在水平方向和竖直方向移动的距离。

对于大尺寸待测元件来说,  $d_y$ 、 $d_x$  越大, 可检测光学元件范围越大; 另外, 为了尽量减小反射镜 1 和反射镜 2 的尺寸, 需要使反射镜最大转动角度  $\Delta\theta$  减小。根据(1)、(2)式可知, 对于固定尺寸的待测元件来说, 只有增加  $d_y$ 、 $d_x$  才会使  $\Delta\theta$  尽量小, 无限增加  $d_y$ 、 $d_x$  会使反射镜每次转动的角度变得很小, 又提高了对反射镜转动精度的要求。

## 2.2 大口径光学元件在线检测方案

由于样品全口径成像与检测分辨率是相互矛盾的关系, 样品在 CCD 相机上所成像尺寸越小, 检测系统分辨率越低, 检测精度越低。为满足检测系统高分辨率的需求, 样品在 CCD 相机上所成像尺寸大于 CCD 相机尺寸, 同时在成像光路中放置具有二维扫描功能的二维反射镜, 通过驱动二维反射镜使样品表面不同位置处的损伤情况成像到 CCD 相机上, 进而实现样品表面损伤情况的全口径检测。这种损伤在线检测方案可以保持待测的光学元件不动, 同时可以在不影响原光路的情况下实现元件表面损伤情况的检测。针对不同尺寸光学元件和所要求的检测精度, 通过合理地选择透镜焦距、成像放大倍率和反射镜的反射角度即可实现对光学元件表面损伤情况的检测。

针对神光 II 升级装置上光学元件的在线损伤检测, 设计了基于振镜扫描方式的在线光学元件损伤检测方案, 如图 2 所示, 由于在线光学元件的不可拆卸或不可移动性, 且为避免损伤检测系统对待测光学元件后续光路及光学元件的影响, 方案设计在光路中加入反射式取样镜, 取样的反射光避开原光路经过透镜成像到 CCD 上, 待测的光学元件表面和 CCD 感光面分别位于透镜物面和像面的位置。

以在线待检测光学元件尺寸为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ , 使用的 CCD 相机像素尺寸为  $4.65 \mu\text{m}/\text{pixel}$ , 像素数为  $1024 \times 1024$  为例, 对检测方案进行设计。在反射式取样镜后放置成像透镜(焦距为  $1.5 \text{ m}$ ), 待检测面经过透镜成像到 CCD 上, 在 CCD 和成像透镜之间放置可二维调整的反射镜来实现扫描功能。由于二维调整反射镜在透镜的会聚光路中, 可以减小二维反射镜的尺寸和质量, 进而降低对马达驱动器的要求。

参数设计如下。

1) 物距、像距: 由于损伤检测起始尺寸为  $50 \mu\text{m}$ , CCD 像素尺寸为  $4.65 \mu\text{m}/\text{pixel}$ , 因此可设计成像系统成缩小的像。设放大倍率为  $1/2$ , 根据成像高斯公式, 计算得到物距(待检测面与透镜的距离)为  $4.5 \text{ m}$ , 像距(透镜到 CCD 的距离)为  $2.25 \text{ m}$ 。

2) 二维调整反射镜角调整范围: 令二维调整反射镜放置在距离透镜  $2 \text{ m}$  处, 由于待检测样品尺寸为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ , 根据(1)、(2)式可以得到二维调整反射镜的角度调整范围为  $\pm 2.2^\circ$ 。

3) 二维调整反射镜角调节精度: 对于尺寸为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  的待检测元件, 经过成像系统后所成像尺寸为  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。由于 CCD 感光面尺寸为  $1024 \text{ pixel} \times 4.65 \mu\text{m}/\text{pixel} = 4.76 \text{ mm}$ , 若要对整个元件表面进行检测, 扫描次数至少为 35 次, 每次扫描时反射镜角度转动为  $3.77'$ , 即二维调整反射镜角度调节精度至少为  $3.77'$ 。

4) 损伤检测系统的分辨率:检测系统分辨率是指 CCD 所成图像中每个像素对应的待检测元件表面的实际尺寸。由于成像系统成像放大倍率为  $1/2$ ,所以该检测系统分辨率为  $9.3 \mu\text{m}/\text{pixel}$ ,满足起始尺寸为  $50 \mu\text{m}$  的损伤点对分辨率的要求。

根据以上方案及参数设计,结合损伤图像处理及图像拼接手段,即可以实现口径为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  的大口径光学元件表面损伤检测。

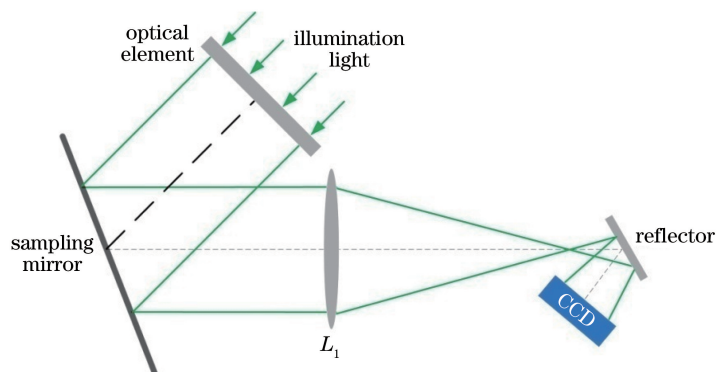


图 2 损伤在线检测方案

Fig. 2 Damage online detection scheme

### 3 实验方法

#### 3.1 实验装置

根据上述方案进行线下光学元件表面损伤检测验证性实验,实验光路和实验装置如图 3(a)、(b)所示。在实验中,利用一个具有二维扫描功能的二维电动调整反射镜代替扫描振镜以实现待检测光学元件表面的分区域扫描成像至 CCD,相应的反射镜转动角度  $\theta_x$ 、 $\theta_y$  也由马达驱动步数  $i$ 、 $j$  表征,即马达驱动步数为  $i$ 、 $j$  时,电机带动反射镜转动  $\theta_x$ 、 $\theta_y$  角度,此时对应的待检测光学元件表面在水平和垂直方向扫描长度为  $d_1$ 、 $d_2$ 。该二维电动调整架带有两个直流伺服电机,电动角分辨率为  $6''$ 。使用大口径(约  $35 \text{ mm}$ )、高功率(约  $100 \text{ mW}$ )的钠黄光进行照明,因此,成像对比度较高,如图 4 所示。所用 CCD 相机为 DMK 41AU02,像素数为  $1280 \times 960$ 。待检测样品为 Corning 7980,采用波长为  $1053 \text{ nm}$ 、脉宽为  $10 \text{ ns}$  的脉冲激光器聚焦使样品表面产生损伤点,损伤点直径为  $70 \sim 400 \mu\text{m}$ 。

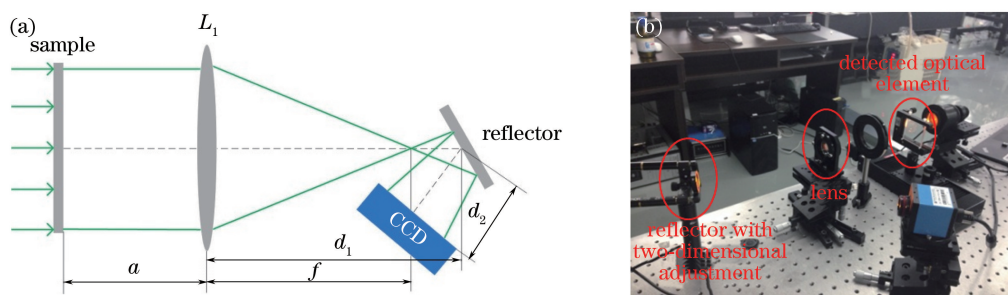


图 3 (a) 实验光路图; (b) 实验装置图

Fig. 3 (a) Optical path of experiment; (b) experimental setup

#### 3.2 损伤点位置信息提取

在损伤点检测过程中,二维反射镜在电机驱动下转动,样品的像经过成像透镜在 CCD 相机感光面上沿水平和垂直方向移动,当某一损伤点成像在 CCD 相机上时,根据电机的步数及该损伤点在 CCD 相机上的位置得到该损伤点在样品上的位置信息,步骤如下。

1) 如图 5 所示,设光学元件表面所对应的坐标系为  $XOY$ ,原点  $O(0,0)$  为元件表面边缘位置处的基准点。CCD 相机采集图像所对应的坐标系为  $xoy$ ,检测开始前令基准点成像在 CCD 相机上,基准点在 CCD 图

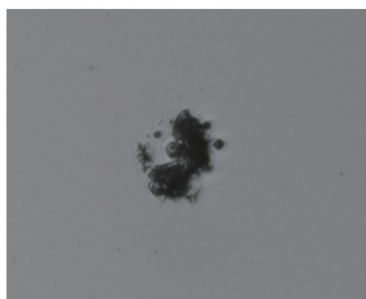


图 4 CCD 采集的损伤点图像  
Fig. 4 Damage image collected by CCD

像坐标系  $xoy$  上的坐标为  $(x_0, y_0)$ 。

2) 对于待检测元件表面任意一损伤点  $S$ , 当马达驱动电机 1 和电机 2 使反射镜在角位及俯仰方向旋转一定角度, 成像到 CCD 上的待检测光学元件表面沿水平方向和竖直方向移动步数分别为  $i, j$ , 此时, 损伤点  $S$  成像到 CCD 相机上, 且损伤点  $S$  在  $xoy$  坐标系上的坐标为  $(x, y)$ 。则损伤点  $S$  在  $XOY$  坐标系上的坐标  $(X, Y)$  为

$$X = d_1 \times i + (x - x_0), \quad (3)$$

$$Y = d_2 \times j + (y - y_0), \quad (4)$$

式中  $d_1$  和  $d_2$  分别是电机驱动下对应光学元件上的扫描步长, 即马达驱动步数为  $i, j$  时对应的待检测光学元件上的扫描步长。

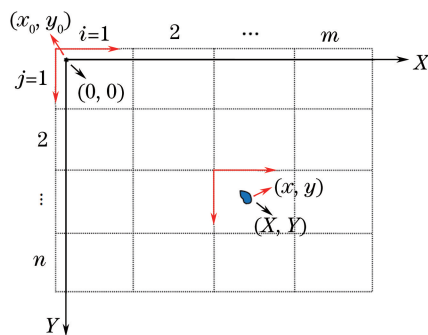


图 5 损伤点位置的坐标  
Fig. 5 Coordinates of damage site

为了验证振镜扫描方式检测光学元件表面损伤情况的准确性, 利用光学显微镜对待检测样品进行观察, 并将观察结果与利用扫描方式检测得到的结果进行比较。由于显微镜检测到的损伤点位置信息与扫描方式检测到的损伤点位置信息不在同一个坐标系内, 需要得到两个坐标系间的转换矩阵  $M$ , 才可实现两个检测结果在同一坐标系内的对比。

转换矩阵是通过在光学元件表面设置两个基准点来实现的, 基准点  $A$  和基准点  $B$  在显微镜观察坐标系下的坐标分别是  $(X'_a, Y'_a)$  和  $(X'_b, Y'_b)$ , 在  $XOY$  坐标系下的坐标分别为  $(X_a, Y_a)$  和  $(X_b, Y_b)$ , 令  $H = \begin{pmatrix} X_a & Y_a \\ X_b & Y_b \end{pmatrix}$ ,  $K = \begin{pmatrix} X'_a & Y'_a \\ X'_b & Y'_b \end{pmatrix}$ , 则转换矩阵  $M$  可表示为

$$H = M \cdot K, \quad (5)$$

$$M = H \cdot K^T. \quad (6)$$

损伤点  $S$  在显微镜坐标系下的坐标  $(X', Y')$  与其在  $XOY$  坐标系下的坐标  $(X, Y)$  间有如下关系:

$$(X, Y) = M \cdot (X', Y'). \quad (7)$$

## 4 实验结果与分析

基于振镜扫描方式的损伤点检测原理及图 3 所示光路,进行光学元件表面损伤检测验证实验。

### 4.1 成像分辨率和扫描步长的标定

对检测系统成像分辨率和扫描步长  $d_1$ 、 $d_2$  进行标定。

成像系统分辨率就是 CCD 上所成图像的每一个像素对应的光学元件表面的实际尺寸。将实际宽度为 0.96 mm 的标尺放置在样品成像面处,标尺在 CCD 相机上所成像如图 6 所示,图像处理得到标尺宽度对应的平均像素数为 461 即检测系统成像分辨率为  $(2.08 \pm 0.015) \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。

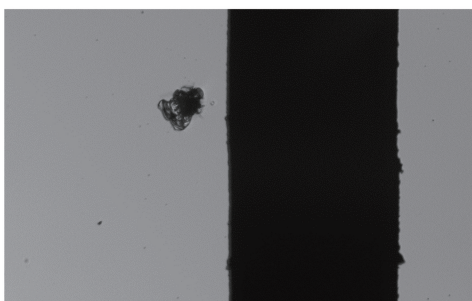


图 6 标尺成像

Fig. 6 Image of scale in CCD

标定扫描步长。图 7(a)、(b)分别为水平方向和竖直方向扫描时选定的基准点在 CCD 相机上移动的距离,水平和竖直方向电机步数为 0.3 时,基准点水平位置由 278 pixel 位置处移动到 787 pixel 位置处,竖直位置由 694 pixel 位置处移动到 325 pixel 位置处,则得到水平和竖直方向扫描步长分别为 1696.7 pixel 和 1230 pixel。

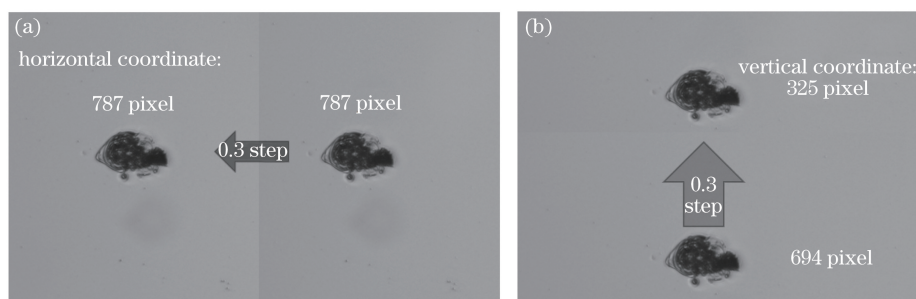


图 7 (a)水平方向和(b)竖直方向的步长标定

Fig. 7 Calibration of (a) horizontal and (b) vertical step length

### 4.2 损伤点位置及尺寸检测

依据上述扫描检测原理和损伤点位置信息提取方法对表面损伤样品进行损伤检测验证实验,并与显微镜观察结果进行比较。图 8 和图 9 为利用振镜扫描方式和显微镜观察检测到的样品上各损伤点分别在水平方向和竖直方向的位置信息,黑色为显微镜检测的结果,绿色为扫描 CCD 检测的结果,红色为两者的偏差,

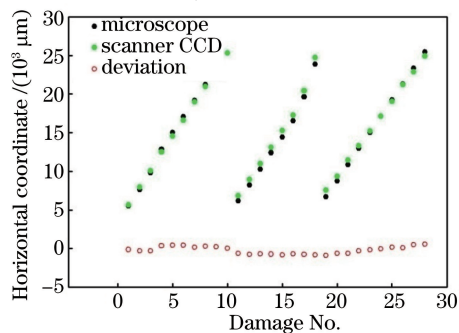


图 8 水平方向损伤点坐标

Fig. 8 Horizontal coordinate of damage site

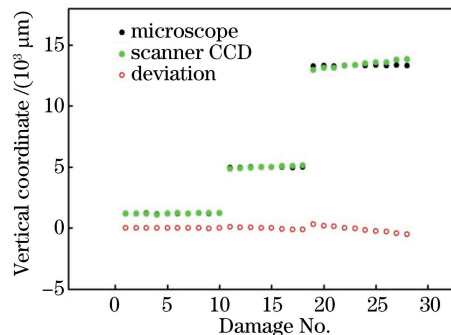


图 9 竖直方向损伤点坐标

Fig. 9 Vertical coordinate of damage site

水平方向平均相对偏差为 3.76%，竖直方向平均相对偏差为 1.37%。

图 10 为利用振镜扫描方式和显微镜观察检测到损伤点尺寸的对比,蓝色为扫描 CCD 检测的损伤点尺寸,红色为显微镜观察得到的损伤点尺寸,黑色为两者的偏差。实验得到扫描 CCD 检测到的损伤点尺寸相对于显微镜测得尺寸的平均相对偏差为 6.19%。

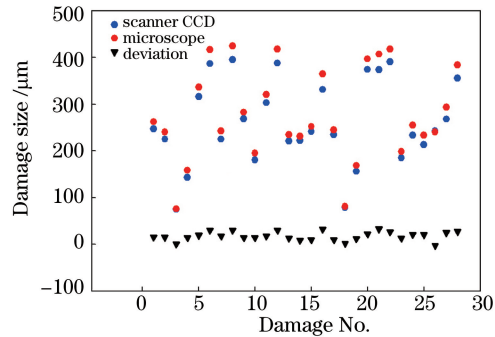


图 10 损伤点尺寸

Fig. 10 Damage size

在此验证实验中,利用扫描检测方法和图像拼接手段可以使总的检测范围大于 2.5 cm,损伤点位置及尺寸信息的检测准确度较高,能够满足大口径光学元件表面损伤检测的实际要求。根据(1)、(2)式,对于更大尺寸的光学元件损伤检测而言,可以通过选取长焦距的成像透镜来增加该检测方法的检测范围。对于一定的振镜转动角度,成像透镜焦距越长,相应的  $d_x$  和  $d_y$  也越大,那么能扫描到的光学元件范围越大,而且焦距较长的透镜也有利于降低反射镜偏转对成像系统焦深的要求。

## 5 结 论

提出了一种基于振镜扫描方式的大口径光学元件表面损伤检测方法,并利用该方法对光学元件表面损伤点检测进行线下验证实验,实验中检测系统分辨率可达到  $(2.08 \pm 0.015) \mu\text{m}/\text{pixel}$ ,总的检测范围大于 2.5 cm,水平方向和竖直方向位置坐标检测准确度分别为 3.76% 和 1.37%,损伤点尺寸检测准确度为 6.19%。实验结果表明,利用振镜扫描方法能够实现较大尺寸光学元件表面损伤点的高准确性检测。基于振镜扫描方式的光学元件损伤检测方法,在无需移动待检测光学元件和成像系统的条件下,可以准确地实现元件表面损伤点的定位及损伤点尺寸的测量,对高功率激光系统中大口径光学元件的在线损伤检测具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] Beregol H, Bouchut P R, Lamaignere L, *et al.* The impact of laser damage on the lifetime of optical components in fusion lasers[C]. SPIE, 2004, 5273: 312-324.
- [2] Bercegol H, Boscheron A, DinNicol J M, *et al.* Laser damage phenomena relevant to the design and operation of an ICF laser driver[J]. Journal of Physics Conference Series, 2008, 112(3): 032013.
- [3] Wang Libin, Ma Weixin, Ji Lailin, *et al.* Influence of metal particles on damage threshold of fused silica at  $3\omega$ [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502004.  
王立斌, 马伟新, 季来林, 等. 三倍频激光下金属颗粒对熔石英原件损伤阈值的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502004.
- [4] Lamaignere L, Reyne S, Loiseau M, *et al.* Effects of wavelengths combination on initiation and growth of laser-induced surface damage in  $\text{SiO}_2$  [C]. SPIE, 2007, 6720: 67200F.
- [5] Conder A, Azevedo S, Kegelmeyer L, *et al.* Final optics damage inspection (FODI) for the National Ignition Facility [J]. SPIE, 2007, 6720: 672010.
- [6] Liu Nan. Research on key technologies of high fluence optics damage on-line inspection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.  
刘楠. 大通量光学元件损伤在线检测关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [7] Xie Yaping, Sun Zhihong, Cheng Ze, *et al.* Image processing in online inspection of damage in optics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(7): 1085-1089.  
解亚平, 孙志红, 成泽, 等. 光学元件损伤在线检测中的图像处理[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(7): 1085-1089.
- [8] Ye Qiao. A study of high speed galvanometer and practice[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2004.  
叶乔. 高速振镜理论研究及实践[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [9] Jablonowski D P, Raamot J. Beam deflection at high accuracy and precision[C]. SPIE, 1976, 84: 69-76.