

光学元件激光损伤在线检测装置

史亚莉^{1*}, 陶 显¹, 周信达², 张家斌¹, 丁 磊², 张正涛¹

- (1. 中国科学院自动化研究所 精密感知与控制研究中心, 北京 100190;
2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 设计并搭建了一套光学元件表面损伤检测装置, 用于激光损伤实验中光学元件表面损伤的自动化在线检测。装置主要由自动变倍显微相机、高精度位移传感器、两维扫描轴、调焦轴、快速复位平台和系统控制器组成。两维扫描轴按照规划好的“弓”形路径对光学元件表面激光辐照区域进行扫描, 调焦轴对位移传感器反馈的离焦量进行实时修正, 显微相机采集子图像并进行保存。首先, 分析影响图像拼接精度的主要误差源并通过图像矫正等方法进行补偿; 然后, 利用图像拼接技术将矫正后的子图像矩阵进行高精度无缝拼接, 得到大面积高分辨率的光学元件表面损伤图像; 最后, 对损伤图像进行后处理得到损伤个数和损伤面积等信息。实验结果表明: 装置在 5 min 内实现了光学元件表面 15 mm×15 mm 区域的扫描拼接和检测, 成像系统分辨率优于 228 lp/mm, 图像拼接误差小于 2 pixel。

关键词: 图像拼接; 损伤检测; 光学元件; 自动化

中图分类号: TH7; TP274 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0417003

An online laser-induced flaw inspection device for optical elements

Shi Yali^{1*}, Tao Xian¹, Zhou Xinda², Zhang Jiabin¹, Ding Lei², Zhang Zhengtao¹

- (1. Research Center of Precision Sensing and Control, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The laser-induced damage experiments are very important to verify the reliability and lifespan of the optical elements. The optical elements are irradiated by the high energy laser frequently and the corresponding damage information is recorded by the researchers. A device was designed and constructed to inspect the surface flaws of the optical elements on line efficiently and automatically. The device was composed of six parts, which were automatic zoom microscopic camera, spectral confocal sensor, two dimensional scan movement axes, focus movement axis, fast reset platform and system controller. The laser irradiated area of the optical elements was scanned by the two dimensional scan movement axes according to the planned path. The work distance of the microscope was detected by the spectral confocal sensor and adjusted by the movement of the focus axis. The sub images were acquired by the microscopic camera and saved to the computer. Firstly, the main error factors that affect the image matching precision were analyzed and compensated by the image correction and so on. Then the image

收稿日期: 2017-11-10; 修订日期: 2017-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(61473293, 61503378)

作者简介: 史亚莉(1982-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事精密检测仪器与微装配方面的研究。Email: shiyali0825@126.com

with large area and high resolution was obtained by stitching the corrected sub images. Lastly, the damage information was obtained after image processing. The experimental results show that the time is no more than 5 minutes to detect an area of 15 mm×15 mm. The resolution of the microscope imaging system is better than 228 lp/mm and the stitching error is better than 2 pixel.

Key words: image mosaic; damage inspection; optical element; automation

0 引言

随着强激光技术的快速发展,对光路中光学元件损伤阈值的要求越来越高。激光损伤实验平台是对光学元件的损伤阈值进行前期测试和实验验证的平台,目的是积累不同激光波段和强度下光学元件的损伤数据,理解元件损伤发生、发展的过程,支撑光学元件的损伤判断和寿命评估^[1-2]。实验中需要实验人员频繁装卸光学元件,拿到商用高倍显微镜下进行元件的损伤检查和测量。光学元件的自动化在线损伤检测不仅能够减轻实验人员的工作,还能避免重复装卸光学元件带来的实验误差,能更准确的将损伤点的产生、增长与激光运行发次对应。另外,强激光光路中关键光学元件的在线检测还是设备稳定运行和光学元件安全使用的技术保障,所以近几年,以激光惯性约束核聚变装置为代表的许多强激光光学装置都在陆续安装光学元件在线检测设备^[3-5]。

由于加工水平及空间等因素的限制,从成像系统硬件的角度提高检测系统分辨率已经遇到了瓶颈,从检测方法角度对检测系统进行改进逐渐成为研究热点。图像拼接是一种通过图像处理的方式提高检测系统视场及分辨率的方法,目前已经成为大口径光学元件高分辨率损伤检测的常用手段^[6-9]。图像拼接中子图像的获取方法有两种,分别是控制成像系统或者光学元件按照规划的路径进行扫描运动配合图像采集得到。前者多用在不方便移动的大口径光学元件或者在线光学元件的检测,后者多见于奥林巴斯等商业显微扫描成像产品。

目前常见的基于图像拼接的光学元件检测方法有三种,分别是暗场线阵图像扫描拼接、暗场面阵图像扫描拼接和明场面阵图像扫描拼接。暗场图像的特点是通过暗场散射效应可以在较低的图像分辨率下看到尺寸小于图像分辨率的损伤,明场图像的特

点是检测到的损伤形貌更真实,尺寸更准确。线阵图像扫描的优点是可以快速完成大面积的扫描拼接,多用于流水线上的产品检测,面阵图像扫描相对比较耗时,通常用于对时间要求不苛刻的场合。文中^[10]利用明暗场结合的方法,实现了 810 mm×460 mm 大口径光学元件的线阵相机暗场图像扫描拼接和明场高精度细节检测,暗场图像分辨率为 10 μm。文中^[11]利用面阵相机扫描方式实现了光学元件的暗场图像扫描和拼接,图像分辨率为 5 μm。

针对某激光损伤实验平台中竖直放置光学元件的检测要求,以及现有检测装置无法满足其使用需求的现状,文中基于明场面阵图像扫描和拼接原理,设计搭建了一套光学元件激光损伤在线检测装置,在打激光后实现了光学元件表面激光作用区域的快速高精度自动化检测,很大程度上提高了实验平台的实验效率和测量精度,减轻了工作人员的工作负荷。

1 装置设计与搭建

1.1 硬件组成

光学元件激光损伤在线检测装置主要包括显微镜、高精度位移传感器、二维扫描运动轴、调焦轴、快速复位平台和系统控制器六大组件,如图 1 所示是搭建完成的装置。

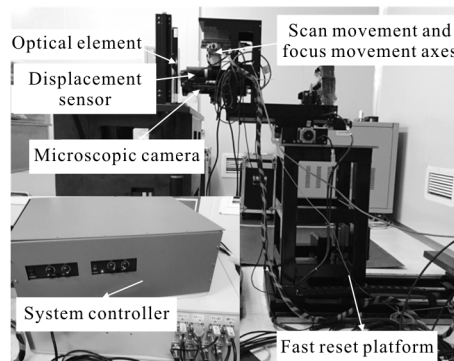


图 1 激光损伤在线检测装置

Fig.1 Online laser-induced flaw inspection device

显微相机选用 12 倍连续自动变倍显微镜头、2/3 in 彩色 CCD 和白色同轴光源。镜头变倍范围为 0.87~10.5 倍,视场大小为 9.7 mm(0.87 倍)~0.8 mm(10.5 倍),图像分辨率为 3.96 m(0.87 倍)~0.33 m(10.5 倍),工作距离为 50 mm,景深为 640 m(0.87 倍)~20 m(10.5 倍),CCD 像元尺寸为 3.45 m×3.45 m,像元数为 2 446×2 046,最大采集帧率 15 FPS。高精度位移传感器基于色散共焦原理,可以实现反射和透射光学元件的表面位置测量,工作距离为 66.9~76.9 mm,最大容忍光学元件表面倾角为 12°,测量分辨率 0.45 m,精度为 0.9 m。二维扫描运动轴和调焦轴均通过步进电机驱动丝杠的方式实现,行程为 50 mm,绝对定位精度为 5 m,重复定位精度为 0.5 m,分辨率为 0.1 m,二维扫描运动轴和调焦轴组成的三自由度精确定位系统可引导显微成像系统按照规划的扫描路径对光学元件表面进行扫描,并实时调节显微成像系统的工作距离。快速复位平台的作用是在光学元件正反面 180 互换时移走和复位显微成像系统、扫描调焦轴和位移传感器,包含 600 mm(前后)、300 mm(左右)、300 mm(前后)行程三个轴。

1.2 控制方式与软件界面

工控机作为上位机,系统控制器作为下位机进行控制。系统控制器集成了光源控制、激光位移传感器控制、镜头变倍电机控制、镜头调焦轴控制和扫描运动系统控制的功能,上位机和下位机连接后,可以对光源强度、镜头放大倍数、镜头位置和成像清晰度进行自动调整。

软件界面如图 2 所示,主要包括:图像实时显示区、面阵图像显示区、功能区、损伤信息统计区和系

统日志及程序状态区五个部分。图像实时显示区可以显示当前 CCD 的图像,面阵图像显示区显示拼接前或者拼接后的面阵图像,功能区可以对装置的各个硬件参数进行设置和控制,损伤信息统计区显示当前拼接图像中的损伤信息,系统日志及程序状态区显示系统的运行日志以及软件目前的状态。

1.3 检测流程

光学元件激光损伤在线检测装置的详细工作流程如下:

(1) 快速复位。快速复位平台运动,将显微成像系统、扫描调焦轴和高精度位移传感器组成的检测头快速移动到待检测光学元件附近指定位置;

(2) 确定起始扫描位置。扫描轴运动,将显微成像系统和高精度位移传感器移动到起始扫描位置;

(3) 精确聚焦。开启高精度位移传感器检测光学元件表面距离,根据位移传感器的反馈值,调焦轴前后运动进行显微成像系统的精确聚焦;

(4) 光学元件姿态测量。扫描轴分别在光学元件两个扫描方向运动指定距离,测量光学元件表面的偏摆和俯仰角度,运动完成后回到起始扫描位置;

(5) 图像扫描。扫描轴按照规划好的路径对光学元件待检测区域进行扫描,显微成像系统采集子图像并编号进行保存;

(6) 图像矫正与拼接。对子图像进行图像矫正和图像拼接,得到扫描区域的损伤图像;

(7) 损伤分析。对拼接得到的损伤图像进行处理,得到被测区域的损伤信息,包括损伤个数、尺寸和位置等。

2 路径规划与误差分析

2.1 扫描路径规划

当激光辐照光斑尺寸为 $\Phi 10$ mm 时,设定扫描范围为 15 mm×15 mm,设置显微镜头的放大倍数为 3.45 倍,图像分辨率 1 m,单幅图像视场为 2.4 mm×2.1 mm,经计算共需要水平 7 次、垂直 8 次扫描,水平扫描运动间隔 2.1 mm,垂直扫描运动间隔 2.15 mm。本着扫描路径最短、累积误差最小的原则进行扫描路径规划,如图 3 所示,二维扫描运动系统从起始点开始采用“弓”字形的方式进行扫描,首先沿水平方向运动 7 步采集 7 幅子图像,然后沿垂直方向运动

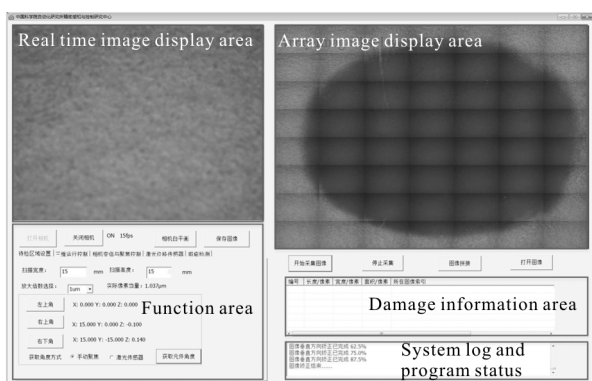


图 2 装置软件界面

Fig.2 Surface of the software

1 步,之后再沿水平反方向运动 7 步采集 7 幅子图像,之后再沿垂直方向运动 1 步,重复以上运动,直到完成 7 列 8 行子图像的采集。扫描过程中,每次水平运动,需要同时运动调焦轴,对光学元件的偏摆角误差进行补偿,每次垂直运动,需要同时运动调焦轴,进行光学元件的俯仰角误差补偿。

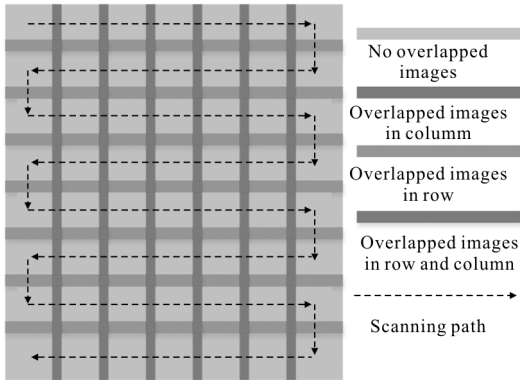


图 3 光学元件扫描路径规划示意图

Fig.3 Schematic of the scanning path planning

由于显微镜的最小景深为 $20\ \mu\text{m}$, 在扫描过程中, 光学元件表面与扫描运动坐标系之间的角度误差会引起镜头离焦, 从而导致图像模糊。通过在扫描之前检测光学元件的角度误差, 以及扫描过程中调焦轴的实时运动调节, 可以解决这个问题。角度检测原理如图 4 所示, $L1$ 、 $L2$ 、 $L3$ 分别对应光学元件表面 A、B、C 三点的距离, 光学元件在两个扫描方向上的角度误差 α 、 β 的计算公式见公式(1)。考虑到当光学元件表面没有损伤和灰尘等特征点的情况下, 镜头不能自动聚焦, 系统配备一个高精度位移传感器在没有图像特征时辅助实现自动聚焦。

$$\begin{cases} \tan\alpha=(L3-L2)/BC \\ \tan\beta=(L2-L1)/AB \end{cases} \quad (1)$$

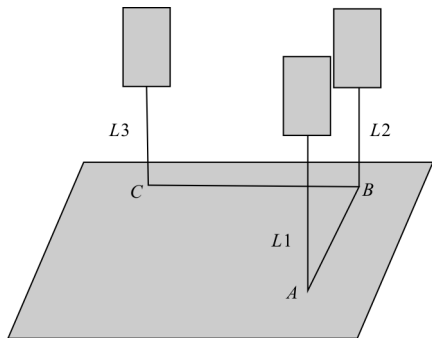


图 4 离焦量检测原理图

Fig.4 Schematic of defocus measurement

2.2 系统误差分析

假设三维运动台的三个运动方向互相垂直, 三维运动坐标系为 $OXYZ$, 光学元件表面所在的二维坐标系为 $O'X'Y'$, CCD 成像表面所在的二维坐标系为 $O''X''Y''$, 色散共焦位移传感器的测量方向为 AB 。各个坐标系以及向量之间的理想关系如表 1 所示, 坐标系示意如图 5 所示, 各坐标轴之间是理想的平行或者垂直关系。

表1 理想的坐标关系

Tab.1 Ideal coordinate relations

$OXYZ$	$OX \perp OY, OX \perp OZ, OY \perp OZ$
$O'X'Y'$	$OX \parallel O'X', OY \parallel O'Y'$
$O''X''Y''$	$OX \parallel O''X'', OY \parallel O''Y''$
AB	$AB \parallel OZ$

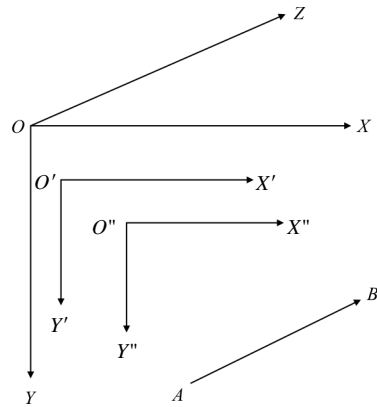


图 5 理想坐标关系示意图

Fig.5 Schematic of the ideal coordinate relations

实际情况是各个轴之间由于加工或者安装等原因均存在角度误差, 见图 6。角度误差和运动轴的单向定位误差、以及机械加工误差等决定了最后图像拼接存在一定大小的误差。表 2 列出了最主要

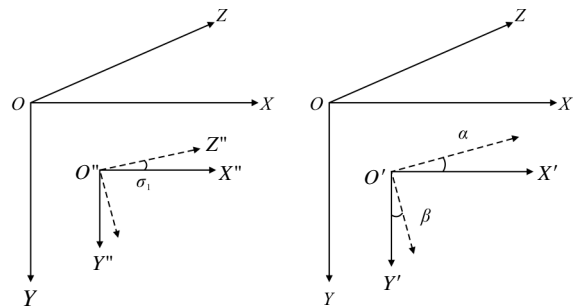


图 6 真实坐标关系示意图

Fig.6 Schematic of the actual coordinate relations

的四个误差源及其类型和测量值。其中, σ_1 代表 CCD 图像坐标与扫描坐标之间的面内角度误差, 属于系统误差, 经过测量大小约为 0.5° ; σ_2 代表色散共焦位移传感器光轴方向 AB 与显微镜镜头光轴方向之间的角度误差, 属于系统误差, 经过测量大小约为 0.5° ; θ 代表三维运动轴的单向定位误差, 属于随机误差, 产品出厂标定值为 $5 \mu\text{m}$; (α, β) 代表光学元件表面与扫描坐标之间的角度误差, 大小由光学元件的安装姿态决定, 是一个随机变化的量。

表 2 主要误差来源表

Tab.2 Main error sources

Number	Error items	Error types	Standard deviation
1	Angle error between two coordinate axes of CCD and scan movement	Systematic error	$\sigma_1=0.5^\circ$
2	Angle error between two optic axes of spectral confocal sensor and microscopic camera	Systematic error	$\sigma_2=0.5^\circ$
3	Absolute precision of the movement axes	Random error	$\theta=5 \mu\text{m}$
4	Angle error between two coordinate systems of optical element surface and scanning plane	Random error	(α, β)

针对以上四种误差, 分别采取的误差补偿方法如下: σ_1 通过图像矫正的方法进行补偿, σ_2 通过像素当量标定的方法进行补偿, 通过软件拼接算法进行补偿, (α, β) 通过实时测量和扫描过程中调焦轴的实时运动进行补偿。其中, σ_1 、 σ_2 、 (α, β) 三项基本可以高精度补偿, 只有 θ 受软件拼接算法、图像质量影响比较大, 是造成最终拼接误差的主要误差源。

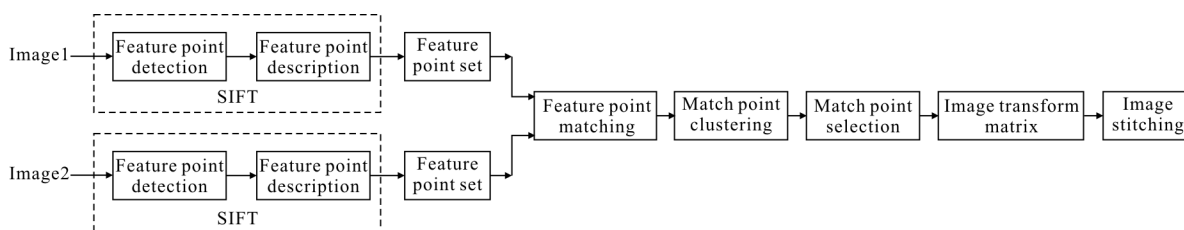


图 8 图像缝合流程图

Fig.8 Fusion method of the sub images

4 实验验证

在搭建完成的装置上开展了三个实验研究, 分

3 图像矫正与拼接

文中装置检测时, 最常用的图像分辨率为 $1 \mu\text{m}$, 扫描系统的绝对定位精度为 $5 \mu\text{m}$, 约为 5 个像素。另外, CCD 坐标系与扫描运动坐标系之间的角度也给拼接带来难度。针对扫描运动精度低于图像分辨率的实际情况, 通过拼接前的图像矫正和图像信息融合的方法进行面阵图像的拼接。矫正原理如图 7 所示, OXY 为扫描轴运动坐标系, ouv 为图像坐标系, 测量出二者之间的角度误差后, 通过对原子图像进行裁减的方式得到新的子图像。

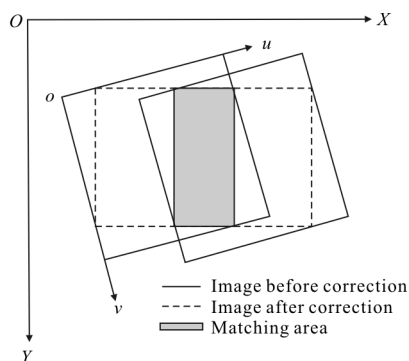


图 7 图像矫正原理示意图

Fig.7 Correction of the sub images

图像缝合技术就是用来解决相邻两列图像的重合问题, 具体缝合流程如图 8 所示, 缝合功能的实现主要采用的 SIFT(scale invariant feature transform) 技术实现重叠图像之间的特征点匹配, 然后通过聚类算法对获得的匹配点进行筛选, 保留正确的匹配点, 最后通过筛选后的匹配点计算出两图像之间的变换关系, 得到两图像的变换关系之后在对图像进行缝合处理。

别是检测时间、成像系统光学分辨率和拼接误差实验。检测时间主要取决于快速复位时间、初始参数设置时间、图像扫描拼接时间和损伤分析时间, 快速退

出和复位时间为 50 s, 初始参数设置时间约 1 min, 15 mm×15 mm 面积的图像扫描拼接时间约 2 min, 损伤分析时间约 30 s, 单次检测总时间不超过 5 min。

使用艾特蒙特 1951 USAF 鉴别率板验证成像系统的分辨率, 结果如图 9 所示, 表明系统在最大倍数下可以清晰鉴别 228 lp/mm; 1m 图像分辨率档位可以清晰鉴别 161 lp/mm。

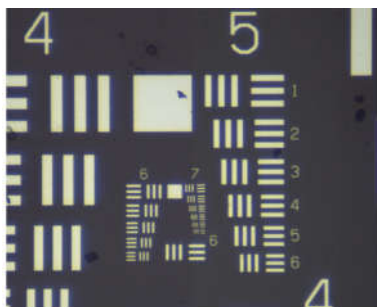


图 9 成像系统分辨率测试

Fig.9 Resolution of the imaging system

图 10 是一组拼接前和拼接后的图像, 图 10(a) 为拼接前, 图 10(b) 为拼接后, 基本看不出明显的损伤错位和拼缝。

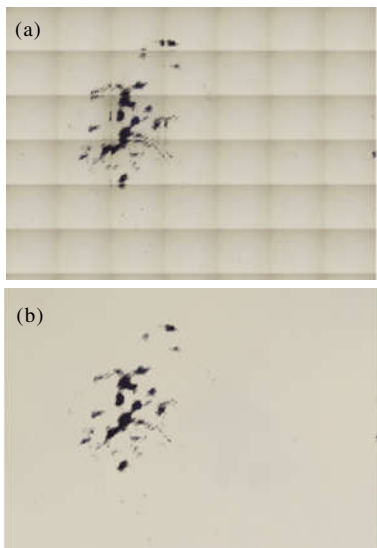


图 10 拼接前后图像对比

Fig.10 Images of before and after stitching

分别对十个相邻扫描列或者相邻扫描行之间的拼接误差随机挑选进行实验, 进行自动拼接量 and 人眼手动拼接量的对比, 拼接实验结果如表 3 所示, 拼接量真值通过手动直接测量得出, 可以看出, 行和列的最大拼接误差均不超过 2 pixel。

表 3 拼接误差实验数据

Tab.3 Experimental data of stitching error

Index	Column stitching pixels between two adjacent sub images			Row stitching pixels between two adjacent sub images		
	Truth value	Measured value	Error	Truth value	Measured value	Error
1	(365,1)	(365,0)	(0,-1)	(0,209)	(0,210)	(0,1)
2	(365,0)	(366,1)	(1,1)	(0,208)	(1,210)	(1,2)
3	(364,1)	(364,2)	(0,1)	(0,209)	(1,209)	(1,0)
4	(364,2)	(364,0)	(0,-2)	(1,209)	(0,210)	(-1,1)
5	(365,0)	(366,2)	(1,2)	(1,210)	(2,210)	(1,0)
6	(365,0)	(366,0)	(1,0)	(0,208)	(1,207)	(1,-1)
7	(365,1)	(365,1)	(0,0)	(1,210)	(1,208)	(0,-2)
8	(366,0)	(364,1)	(-2,1)	(0,209)	(0,209)	(0,0)
9	(364,1)	(365,0)	(1,-1)	(0,209)	(2,210)	(2,1)
10	(365,0)	(365,1)	(0,1)	(0,208)	(1,209)	(1,1)

5 结论

为提高某高能激光作用下光学元件损伤特性实验平台的测试效率和数据准确度, 搭建了一套光学元件激光损伤自动化在线检测装置。装置实现了竖直放置的光学元件表面损伤情况的正反面在线检测, 完成 15 mm×15 mm 区域的检测所需时间不超过 5 min, 大大提高了检测效率。装置可兼容的最大光学元件尺寸为 860 mm×430 mm×50 mm, 检测范围和检测分辨率可根据激光光斑尺寸和检测数据的要求进行选择, 成像系统最高倍数下的光学分辨率优于 228 lp/mm, 通过图像矫正后图像拼接误差不超过两个像素, 很好地保证了检测数据的准确性和精度。

参考文献:

[1] Zhou Gang, Ma Bin, Jiao Hongfei, et al. 1 064 nm high-reflection mirrors[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(4): 963-968. (in Chinese)
周刚, 马彬, 焦宏飞, 等. 1 064 nm 高反射薄膜激光损伤阈值测量方法[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(4): 963-968.

[2] Liu Anping, Duan Lihua, Hu Jianping, et al. Automatic detection of laser damage threshold by scattering light technique [C]//Proceedings of the 6th World Congress on

- Intelligent Control and Automation, 2006: 5318–5321.
- [3] Alan Conder, Terry Alger, Stephen Azevedo, et al. Final optics damage inspection (FODI) for the national ignition facility [J]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, 2007, 6720: 1–15.
- [4] Xu Longbo, Peng Zhitao, Sun Zhihong, et al. Damage online inspection technology of driver terminal optical elements[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38 (4):721–724. (in Chinese)
徐隆波, 彭志涛, 孙志红, 等. 驱动器终端光学组件损伤在线检测技术[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 721–724.
- [5] Feng Bo, Liu Bingguo, Chen Fengdong, et al. Final optics damage online inspection system for ICF [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2519–2524. (in Chinese)
冯博, 刘炳国, 陈凤东, 等. ICF 终端光学元件损伤在线检测装置的研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2519–2524.
- [6] Tao Xian, Zhang Zhengtao, Zhang Feng, et al. Development of detection techniques of surface defects for large aperture optical elements based on machine vision[C]//Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, 2014: 2935–2940.
- [7] Benjamin Potsaid, Yves Bellouard, John T. Design of an adaptive scanning optical microscope for simultaneous large field of view and high resolution [C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005: 460–465.
- [8] Yang Yongying, Lu Chunhua, Liang Jiao, et al. Microscopic dark-field scattering imaging and digitalization evaluation system of defects on optical devices precision surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 42(9): 1031–1038. (in Chinese)
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, 2013, 42(9): 1031–1038.
- [9] Cheng Xiaofeng, Xu Xu, Zhang Lin, et al. Defect testing of large aperture optics based on high resolution CCD camera [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(11): 1677–1680. (in Chinese)
程晓锋, 徐旭, 张林, 等. 基于高分辨力 CCD 的大口径光学元件疵病检测 [J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(11): 1677–1680.
- [10] Xian Tao, Zhengtao Zhang, Feng Zhang, et al. A novel and effective surface flaw inspection instrument for large-aperture optical elements [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(9): 2530–2540.
- [11] Xiao Bing, Yang Yongying, Gao Xin, et al. Mosaic algorithm for images of detects on surface of large fine optics [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2011, 45(2): 375–381. (in Chinese)
肖冰, 杨甬英, 高鑫, 等. 适于大口径精密光学表面疵病图像的拼接算法 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2011, 45(2): 375–381.