

基于线扫描相位差分成像的光学元件激光损伤快速检测技术

范星诺^{1,2} 姜有恩¹ 李学春¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 将暗场照明应用到线扫描成像中,提出了一种用于光学元件激光损伤的检测技术。该技术基于相位差分原理,只对引起相位变化的激光损伤区域有响应,因此检测图像具有高对比度。分析了该技术的原理,并从实验上验证了该检测技术的特性。实验研究表明该技术能够获得高对比度和高分辨率的激光损伤图像,且具有快速检测大口径光学元件激光损伤的能力。

关键词 测量;激光损伤检测;线扫描成像;相位差分法;暗场照明

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0908005

Technology for Rapid Detection of Laser-Induced Damage on Optical Components Using Line-Scan Phase Differential Imaging

Fan Xingnuo^{1,2} Jang Youen¹ Li Xuechun¹

(¹ National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A technology for detecting laser-induced damage on optics, using line-scan imaging and dark-field image principle, is proposed. According to the phase differential theory, this technology only responds to laser-induced damages which cause the phase change, and thus the detected images have high contrast. In order to understand the features of the technology, the principle of the technology is analyzed, and the characteristics of the detection technology are verified by experiment. Experimental studies reveal that the technology can acquire high contrast and high-resolution laser-induced damage image, and that it has the potential to quickly detect the laser-induced damage of large aperture optical components.

Key words measurement; laser-induced damage detection; line-scan imaging; phase differential method; dark-field illumination

OCIS codes 120.4630; 120.4640; 120.1880; 120.5800

1 引言

当高功率激光装置运行在高通量时^[1-2],光学元件膜层、表面或内部的部分缺陷会形成损伤区域^[3-4],激光损伤一旦形成不仅会影响光束质量^[5],而且所引入的光场调制可能会造成后续光学元件的

损伤;同时激光损伤区域在强激光继续辐照下会发生损伤增长^[6-7],降低了光学元件的使用寿命,增加系统的维护成本。长期以来,光学元件的激光损伤已成为高功率激光装置向更高通量发展的瓶颈。因此,开展光学元件激光损伤检测技术研究是提升整

收稿日期: 2013-03-14; **收到修改稿日期**: 2013-05-03

作者简介: 范星诺(1986—),男,硕士研究生,主要从事光学元件损伤检测和识别等方面的研究。

E-mail: true428@126.com

导师简介: 李学春(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光技术与光纤应用等方面的研究。

E-mail: lixuechun@siom.ac.cn(通信联系人)

个系统运行效率、降低运行成本和提高光学元件负载能力所必要的手段之一。通常,光学元件激光损伤检测装置多采用暗场成像技术,以提高系统的分辨率与图像的对比度^[8-13]。所谓暗场成像,就是一种使激光损伤区域在检测图像中以亮斑形式呈现在暗背景中的成像技术,它需要检测装置对激光损伤区域的响应高于对背景区域的响应。

对于采用面阵 CCD 的激光损伤检测装置^[14],由于面阵 CCD 感光面积的限制,面对大口径光学元件时,只能对光学元件进行分块检测^[7,15],一块光学元件需采集多幅图像,耗时较长。若要减少检测时间,需要增加面阵 CCD 的尺寸,这将使成本大大增加。线扫描成像技术已经被广泛地应用于文件复印、表面检测^[16]、遥感测绘等领域,因其精度高、速度快而被广泛采用。线阵 CCD 尺寸大、成本较低、采集速度快,使得线扫描成像技术具有快速检测大口径光学元件激光损伤的能力。1996 年,Rainer^[11]将侧照明技术和线扫描结合起来用来检测光学元件的缺陷和激光损伤;2005 年,Nostrand 等^[7]讨论了将线扫描技术用于检测光学元件中的折射率分布不均匀形成的“小透镜”;2009 年,Ravizza 等^[12]通过改进线扫描成像技术,提出了线扫描相位差分成像技术,并对 400 mm×400 mm 光学元件中的折射率分布不均匀形成的“小透镜”实现了每块 67 s 的快速检测。

本文详细研究了线扫描相位差分成像技术的原理,并对 Ravizza 等^[12]的实验装置做了改进,消除了检测图像中的“带状”条影响,并分析了影响本检测装置图像对比度的因素,通过实验验证了该技术具有超分辨率的分辨能力,并分析了该技术的局限性以及相应的改进手段。

2 实验装置与原理

扫描检测装置主要由线光源、精密电动位移台、成像镜头和线阵 CCD 组成,如图 1(图中精密电动

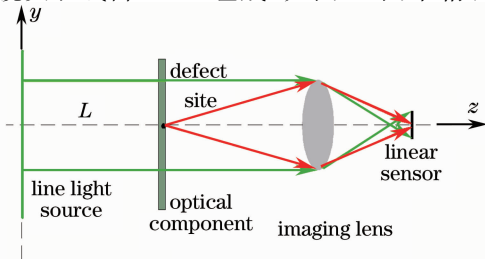


图 1 线扫描检测装置结构

Fig. 1 Configuration of line-scan imaging equipment

位移台未画出)所示,其中的线光源和待测元件之间的距离为 L ,线光源和线阵 CCD 平行 y 轴放置。实验中线光源与线阵 CCD 固定不动,待测元件固定于精密电动位移台上,通过电动位移台带动待测元件沿 x 轴运动实现扫描检测。

对于图 1 所示的检测装置构型,由于不含损伤点信息的背景光叠加在信号光上,采集到的图像为明场图像。为了得到高对比度和高分辨能力的暗场图像,Ravizza 等^[12]将线光源沿 x 轴方向移动一段距离 x_d ,由于随 x_d 的增加,背景响应较信号响应降低较快,当 x_d 达到一定值时,将会发生明暗反转,得到暗场图像。但是此时要保证线光源与待测件距离较近,这将使线光源光强分布的不均匀性在检测图像中显现出来,出现“带状”条影响^[12]。为了避免这种干扰,这里装置在移动线光源的同时,旋转线光源指向,使其仍照亮其在 $x_d=0$ 处照亮的待测件区域,如图 2 所示。这样做能用线光源光强最强的部分照明检测部位,因此可增加线光源与待测件的距离,将背景光从成像镜头中完全偏出,从而避免了线光源光强分布不均匀带来的“带状”条影响。

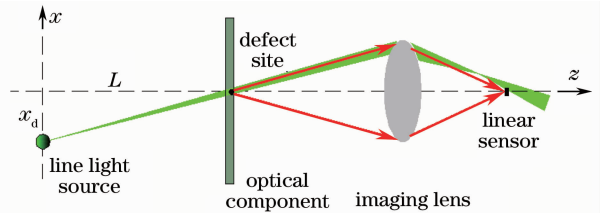


图 2 改进的线扫描检测装置俯视图

Fig. 2 Top view of improved line-scan detection equipment

为了研究改进装置的特性,首先定义装置的光线收集角 α_{\pm} ,只有进入收集角内的光线才能进入线阵 CCD,如图 3 所示。

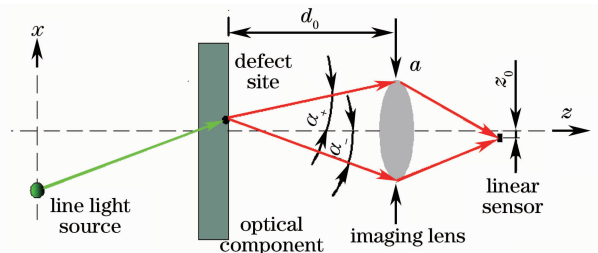


图 3 检测装置光线收集角

Fig. 3 Light collection angle of detection equipment

根据几何关系,由图 3 可知, α_{\pm} 可以由物距 d_0 、成像镜头的通光口径 a 和 CCD 与 z 轴的距离 z_0 以及成像系统的纵向放大率 A 表示为

$$\alpha_{\pm} = \arctan \left[\frac{(-a/2) \pm (z_0/A)}{d_0} \right]. \quad (1)$$

根据文献[12]推导相位差分公式的方法,这里将光学元件的缺陷放大并近似为一个半球形平凸透镜来推导相应的关系式。当检测系统扫描该缺陷时,若用 o 表示缺陷球心, θ 表示光线离开缺陷时与 z 轴的夹角, β 表示入射光线与 z 轴夹角, γ 表示缺陷表面光线出射点法线与 x 轴夹角, δ 表示缺陷表面出射光线点的切线与 x 轴夹角,如图4所示。

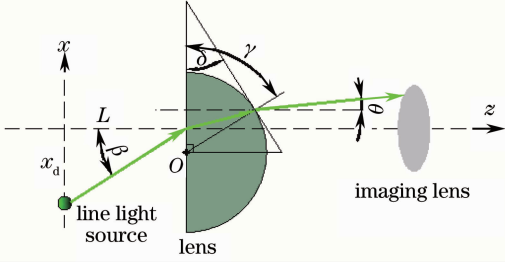


图4 相位差分公式推导

Fig. 4 Derivation of phase differential formula

由光线的折射定律和几何关系可得

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \gamma - \arcsin \left\{ n \cos \left[\arcsin \left(\frac{\sin \beta}{n} \right) + \gamma \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 n 表示缺陷材料的有效折射率。由于装置一旦确定, L 和 x_d 的数值便确定了,相应的 β 也确定了,即

$$\sin \beta = \frac{x_d}{\sqrt{x_d^2 + L^2}}. \quad (3)$$

由(2)、(3)式可知,装置确定时, γ 是决定 θ 大小的唯一条件。由于只有满足条件 $\alpha_- \leq \theta \leq \alpha_+$ 的光线才能进入线阵 CCD 成像,所以装置确定时, γ 是影响检测装置成像的唯一条件。

图4中由几何关系知

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \delta. \quad (4)$$

由文献[12]可知,若人为定义一相位缺陷形状函数 $h(x, y)$ 来表示缺陷的有效高度轮廓,则有

$$\delta = \arctan \left[\frac{\partial h(x, y)}{\partial x} \right]. \quad (5)$$

由(4)、(5)式可得

$$\gamma = \operatorname{arccot} \left[\frac{\partial h(x, y)}{\partial x} \right]. \quad (6)$$

可见该线扫描检测装置的图像与待测件的相位偏导数有关,故称之为线扫描相位差分成像技术。

3 装置性能研究

装置采用白光卤素灯照明。同时,为保证图像有较高的信噪比,应使线光源有尽可能小的纵向分布,因此装置中线光源为光纤紧密排列组成的线阵列,并

将卤素灯的光耦合到该光纤的线阵列中。线阵 CCD 的像素尺寸为 $14 \mu\text{m}$,分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$ 。成像系统的放大率为 -0.28 ,每个像素点对应的物面尺寸为 $50 \mu\text{m}$ 。

装置采用匀速扫描模式,即电动位移台速度 v 和线阵 CCD 的行扫描频率 ω 满足

$$v = \omega \times l, \quad (7)$$

式中 l 为线阵 CCD 的分辨率。

实验中 x_d 通过手动位移台调节,调节精度为 $10 \mu\text{m}$;线光源安放在角位移台上,角位移台的调节精度为 0.35 mrad 。实验研究表明: x_d 的调节精度为 $100 \mu\text{m}$,角位移台的调节精度为 1 mrad 时,便能满足要求。实验测试元件尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,CCD 的行扫描频率 ω 为 500 Hz ,检测用时 2 s 。

3.1 检测图像的对比度

图像对比度的高低关乎激光损伤的提取,是衡量一种检测技术的重要指标。由(2)、(3)、(6)式可知,有两个因素影响检测装置图像:1)缺陷本身的相位偏导数;2) L 和 x_d 决定的角度 β 。由于角度 β 关乎背景光叠加到信号光上比例的大小,它是影响图像对比度最直接的因素。这里首先测试了图像对比度随 L 和 x_d 的变化关系,如图5所示。为了将明暗场区分开,此处的对比度定义为

1)当激光损伤响应强度高于背景响应强度(暗场图像)时,对比度表示为

$$C_{\text{contrast}} = I_{\text{sig}} / I_{\text{bac}}, \quad (8)$$

式中 C_{contrast} 表示图像对比度, I_{sig} 表示激光损伤在 CCD 上的响应强度, I_{bac} 表示无损伤的背景区域在 CCD 上的响应强度。

2)当激光损伤响应强度低于背景响应强度(明场图像)时,对比度表示为

$$C_{\text{contrast}} = -I_{\text{bac}} / I_{\text{sig}}. \quad (9)$$

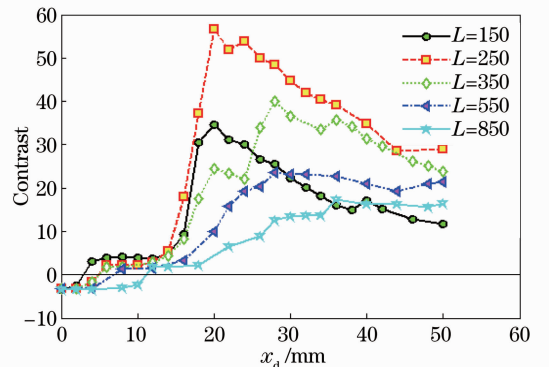


图5 对比度随 x_d 和 L 变化关系图

Fig. 5 Diagram of contrast versus x_d with different L

由图 5 可知, x_d 的大小决定了检测图像为明场或是暗场, 并且随 L 的增大, 明暗场转换点对应的 x_d 亦随之增加; 同时, 该装置明场图像的最高对比度 ($x_d=0$ 处的对比度) 与 L 无关, 而暗场图像的最高对比度则由 L 和 x_d 共同决定, 且暗场图像的对比度较明场图像有很大提高。当 x_d 较大时对比度再次减小, 这是因为此时背景光响应已接近 CCD 暗场响应, 随 x_d 的增加不再变化, 而信号光随 x_d 增加仍在降低。

图 6 为明暗场图像对比度的对比图, 其中图 6(a) 为 $L=250$ mm 处测得具有最高信噪比的暗场图像, 图 6(b) 为圈取的损伤点的放大图, 图 6(c) 为相应的损伤点的明场图像放大图。可以看出暗场图像的对比度较明场图像提高了一个数量级。

同时, 由图 6 可以看出检测图像中并未出现文献[12]的检测图像中出现的“带状”条。

3.2 装置的分辨能力

为了测试装置的分辨能力, 通过实验检测了一

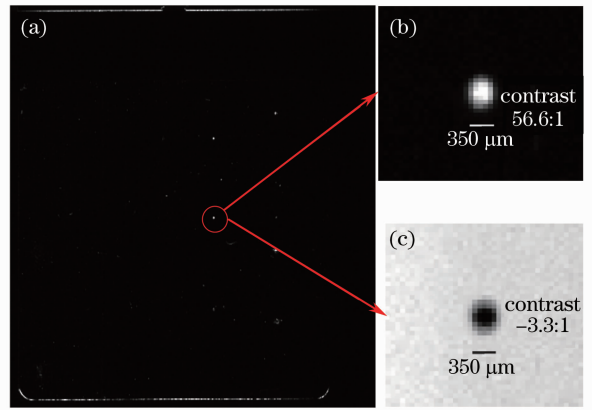


图 6 图像对比度的对比图

Fig. 6 Comparison of image contrast

系列已知大小的激光损伤, 如图 7 所示, 由左向右损伤点大小分别为 300、140、70、50、35 μm 。本实验装置的设计分辨率为 50 μm , 即线阵 CCD 每个像素点对应的物面损伤点大小, 但是对于尺寸小于系统分辨率的激光损伤此处也被检测了出来, 这说明本装置具有一定的超分辨率分辨能力。

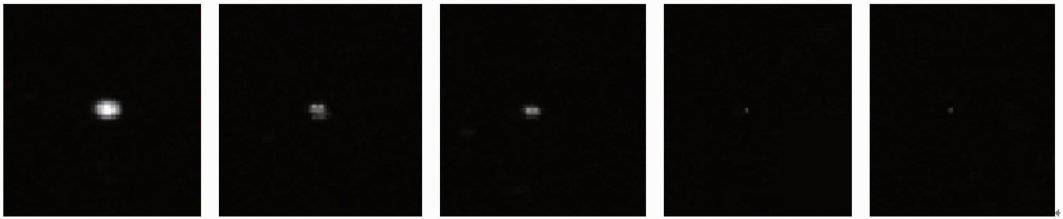


图 7 装置分辨能力测试图

Fig. 7 Test results of resolving power of proposed equipment

本装置产生的暗场图像不仅对光学元件损伤有较强的分辨能力, 对光学元件表面的微小灰尘亦有很高的响应, 因此在对光学元件进行损伤检测时应保证待测件的清洁, 以减少误判。

3.3 检测技术的局限性和解决途径

由相位偏导数的表达式 $\frac{\partial h(x,y)}{\partial x}$ 可知, 本装置的检测图像只与 x 轴相位变化相关, 与 y 轴方向的相位变化无关。故只有激光损伤满足 $\frac{\partial h(x,y)}{\partial x} \neq 0$ 时, 损伤在图像上才会产生响应, 而对于 $\frac{\partial h(x,y)}{\partial y} \neq 0$ 、 $\frac{\partial h(x,y)}{\partial x} = 0$ 的损伤结构, 本装置是检测不到的。如图 8 所示, 图 8(a) 为一条平行于 y 轴的线性损伤在 $20\times$ 光学显微镜下的图像, 图 8(b) 为激光损伤平行于线光源 (y 轴) 的响应图像, 此时 $\frac{\partial h(x,y)}{\partial x} \neq 0$, 损伤在检测图像中清晰可辨; 当将其绕 z 轴旋转 90°

时, $\frac{\partial h(x,y)}{\partial x} \approx 0$, 损伤在图像上消失, 如图 8(c) 所示。

为了避免这种局限性带来的损伤“漏检测”, 对同一待测元件可以分别检测其未旋转和绕 z 轴旋转 90° 后的图像, 综合两幅图像找出所有损伤信息。

4 结 论

通过将线光源移开坐标原点, 用线扫描技术能够得到高对比度的激光损伤暗场图像, 理论分析和实验研究均验证了本装置的图像与 x 轴方向的相位偏导数有关。本装置检测图像的对比度由线光源与待测件距离 L 和线光源移动距离 x_d 决定, 通过调节 L 和 x_d 能得到高对比度的暗场图像。同时, 该技术有较高的分辨能力, 在系统设计分辨率为 50 μm 的情况下, 检测图像能检测到 35 μm 大小的损伤点。该技术的另一个优势在于检测速度较快, 50 mm \times 50 mm 的光学元件的实际检测用时为 2 s。

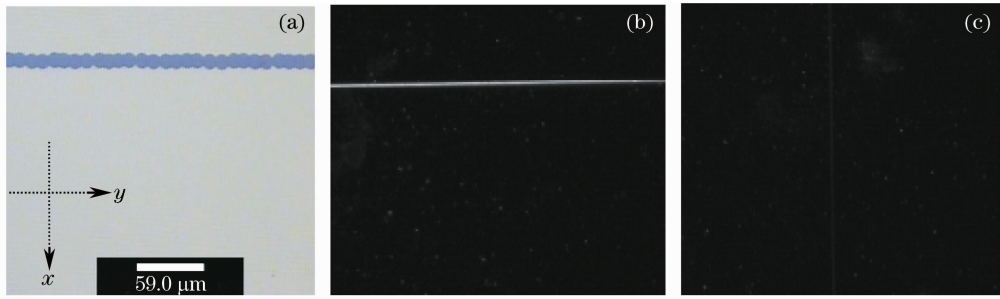


图8 不同对称轴激光损伤的响应图像。(a) 线形损伤在 $20\times$ 光学显微镜下的图像；
(b) 激光损伤平行于线光源(y 轴)的响应图像；(c) 激光损伤沿 z 轴旋转 90° 后的响应图像

Fig. 8 Response images of laser damage with different symmetry axes. (a) Image of the damage with $20\times$ optical microscope; (b) response image of laser damage which is parallel to the line light source (y axis); (c) response image of laser damage which is rotated 90° along the z -axis

通过扩大线光源和线阵 CCD 尺寸,完全可实现大口径光学元件的快速检测。

参 考 文 献

- 1 C A Haynam, P J Wegner, J M Auerbach, *et al.*. National ignition facility laser performance status[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(16): 3276–3303.
- 2 Zhao Dongfeng, Wang Li, Lin Zunqi, *et al.*. Experimental study of 351 nm propagation with high fluence on No. 9 system of SG-II laser facility[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(7): 0702001.
赵东峰, 王利, 林尊琪, 等. 在神光 II 装置第九路系统开展 351 nm 波长激光高通量传输的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0702001.
- 3 Yin Xianhua, Zhang Guowen, Zhou Shenlei, *et al.*. Criteria study of laser induced damage [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 011404.
尹宪华, 张国文, 周申蕾, 等. 激光损伤机理判断研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 011404.
- 4 Cui Yun, Yi Kui, Shen Zicai, *et al.*. Research progress of damage performances for laser coatings and substrates used in space[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 040001.
崔云, 易葵, 沈自才, 等. 激光薄膜和基底在不同空间环境中的损伤性能研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(4): 040001.
- 5 Mike Runkel, Ruth Hawley-Fedder, Clay Widmayer, *et al.*. A system for measuring defect induced beam modulation on inertial confinement fusion-class laser optics[C]. *SPIE*, 2005, 5991: 59912H.
- 6 M A Norton, L W Hrubesh, Z Wu, *et al.*. Growth of laser-initiated damage in fused silica at 351 nm[C]. *SPIE*, 2001, 4347: 468–468.
- 7 M C Nostrand, C J Cerjan, M A Johnson, *et al.*. Correlation of laser-induced damage to phase objects in bulk fused silica laser-induced damage in optical materials[C]. *SPIE*, 2005, 5647: 233–246.
- 8 Zhang Ji, Li Dahai. Algorithm of optics damage inspection from its dark-field image [J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(8): 1009–1112.
张际, 李大海. 光学元件损伤暗场成像检测的算法[J]. *中国激光*, 2006, 33(8): 1009–1112.
- 9 Lynn M Sheehan, Mark Kozlowski, David W Camp. Application of total internal reflection microscopy for laser damage studies on fused silica[C]. *SPIE*, 1997, 3244: 282–295.
- 10 Alan Conder, Jim Chang, Laura Kegelmeyer, *et al.*. Final optics damage inspection (FODI) for the national ignition facility[C]. *SPIE*, 2010, 7797: 77970P.
- 11 F Rainer. Mapping and inspection of damage and artifacts in large-scale optics[C]. *SPIE*, 1997, 3244: 272–281.
- 12 Frank L Ravizza, Michael C Nostrand, Laura M Kegelmeyer, *et al.*. Process for rapid detection of fratricidal defects on optics using line-scan phase differential imaging[C]. *SPIE*, 2009, 7504: 75041B.
- 13 Ren Bingqiang, Huang Huijie, Zhang Weixin, *et al.*. Online inspection apparatus and experiments on optics damage[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2004, 16(4): 465–468.
任冰强, 黄惠杰, 张维新, 等. 光学元件损伤在线检测装置及实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(4): 465–468.
- 14 Wu Ligang, Li Zupan, Wang Xunsi, *et al.*. Internal macroscopic defects perspective imaging detection system for infrared chalcogenide glasses [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0108001.
吴礼刚, 李祖盼, 王训四, 等. 红外硫系玻璃内部宏观缺陷透视成像检测系统[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0108001.
- 15 M C Nostrand, T L Weiland, R L Luthi, *et al.*. A large-aperture high-energy laser system for optics and optical component testing [C]. *SPIE*, 2004, 5273: 325–333.
- 16 Joon H Han, Kyueun Yi. Design and implementation of a metal surface defect image acquisition system[C]. *SPIE*, 1997, 3029: 101–108.

栏目编辑:何卓铭