

四象限探测器镜头光学质量的检测系统设计

顾姗姗¹, 郭玉¹, 句源¹, 朴明旭¹, 王洋^{1*}, 张曦元^{2**}¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;² 吉林省春曦光电科技有限公司, 吉林 长春 130022

摘要 在激光制导中,四象限探测器镜头的光学质量决定了目标定位的精度。鉴于此,设计一种非接触式检测四象限探测器镜头光学质量的系统,该系统能够对四象限探测器镜头的光学质量进行在线批量检测。首先将激光光源整形扩束准直为平顶光束,然后通过四象限探测器镜头在磨砂玻璃上显像,最后通过非接触式长工作距离的显微物镜成像在探测器上以探测光斑的形状、位置及均匀度。设计结果表明,此系统能够有效单独对四象限探测器镜头的光学质量进行批量检测,从而提高四象限探测器镜头的品控,有助于提升四象限激光制导探测系统的整体质量。

关键词 光学设计; 四象限探测器镜头; 检测系统; 显微成像

中图分类号 O435

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0222001

Design of Optical Quality Detection System for Four-quadrant Detector Lens

Gu Shanshan¹, Guo Yu¹, Ju Yuan¹, Piao Mingxu¹, Wang Yang^{1*}, Zhang Xiyuan^{2**}¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;² Jilin Chunxi Photoelectric Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In laser guidance, the optical quality of four-quadrant detector lens determines the accuracy of target positioning. In view of this, a non-contact detection system of the optical quality of the four-quadrant detector lens is designed. The system can detect the optical quality of the four-quadrant detector lens in batches online. First, the laser light source is shaped, expanded, and collimated into a flat-top beam. Then, the image is developed on the frosted glass through the four-quadrant detector lens. Finally, the shape, position, and uniformity of the spot are detected by the non-contact microscopic objective lens with long working distance. The design results show that the system can effectively batch detect the optical quality of the four-quadrant detector lens, thus improving the quality control of the four-quadrant detector lens, and helping to improve the overall quality of the four-quadrant laser guidance detection system.

Key words optical design; four-quadrant detector lens; detection system; microimaging

1 引言

在激光制导中,常利用四象限探测器作为激光光斑位置传感器,四象限探测器镜头可将入射光束聚焦到四象限探测器的探测面上。与常规镜头通过成像质量来检测光学系统质量不同的是,四象限探

测器镜头通过计算光斑在四象限探测器光敏面上的大小、位置及能量均匀度来定位目标方位^[1-4],因此四象限探测器镜头的光学质量决定了激光对目标定位的精度。

目前,国内外对四象限探测器镜头的光学质量进行检测的方法大多采用整机检测,即将四象限探

收稿日期: 2021-06-21; 修回日期: 2021-07-20; 录用日期: 2021-08-16

基金项目: 吉林省科技发展计划(20190302098G)

通信作者: *wangyang11.17@163.com; **xyzhang@cxoptics.cn

测器光学系统、四象限探测器及处理电路进行整机测量。采用光电信号处理的方式对落在四象限探测器光敏面上的光斑进行质心位置的检测,测定目标相对于光轴的偏移量和方位,通过观察四象限探测器光学系统的旋转角度与探测器上光斑的响应位置是否线性一致来判断四象限探测器镜头的光学质量^[5-6]。若线性对应,则光学镜头质量好;若线性不对应,则无法快速确定是光路或是电路部分的原因,故在大批量检测的过程中无法高效对整体质量进行品控,导致品控参差不齐,使武器性能存在较大差异。

本文设计一种对四象限探测器镜头的光学质量进行非接触式检测的系统,将高斯整形、磨砂玻璃散射显像与显微成像结合,基于该方法对全视场为 24° 的四象限探测器光学系统进行检测仿真。设计结果表明,此系统能够有效单独对四象限探测器镜头的光学质量进行批量检测,而且利用长工作距的显微物镜能够检测不同规格的四象限探测器光学系

统,有效解决在工程应用中批量生产四象限探测器镜头品控低下的问题。所设计的系统具有精度高、适应性强和响应快的优点,并且有效提高检测效率,降低检测成本,有助于提升四象限激光制导探测系统的整体质量。

2 四象限探测器镜头光学质量的检测原理

四象限探测器镜头的光学质量检测系统的基本原理如图 1 所示。该系统主要分为三个模块,即光源模块、被测模块和显微成像模块。光源模块由激光器和整形扩束准直镜头组成,将高斯光束整形为平顶光束;被测模块由被测四象限探测器镜头和磨砂玻璃组成,通过磨砂玻璃的散射将被测镜头上的光斑显像;显微成像处理模块由显微物镜、CCD 及计算机(PC)组成,将经磨砂玻璃散射后的光斑缩小,以便 CCD 及计算机进行图像采集。

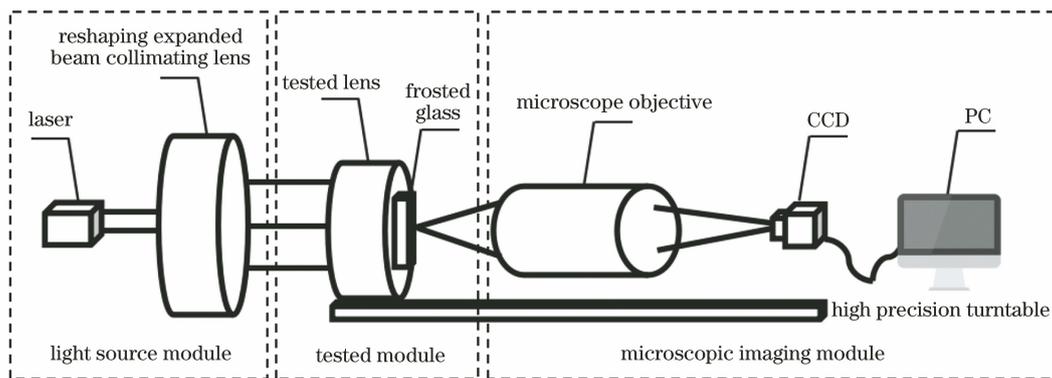


图 1 光学质量检测系统的基本原理图

Fig. 1 Basic principle diagram of optical quality detection system

2.1 光源模块

光源模块由激光器和整形扩束准直镜头组成。设计一整形扩束准直镜头,将激光器发出的高斯光束整形成与后端大口径被测镜头匹配且照度均匀的平顶光束。使用非球面伽利略整形系统^[7],选用平顶洛伦兹函数作为平顶光束分布函数,结合能量守恒定律可知出射光能量等于入射光能量,得到入射光线与出射光线的关系^[8-10]为

$$R = -R_{FL} \sqrt{1 - \exp[-2(r/w_0)^2]}, \quad (1)$$

式中: r 为光线的入射高度; R 为光线的出射高度; w_0 为入射基模高斯光束的束腰半径; R_{FL} 为平顶光束的半径。

采用能量均匀度来评价整形效果,能量均匀度^[11]定义为

$$\gamma = 1 - \frac{\sqrt{\sum (E_i - E)^2 / N}}{E}, \quad (2)$$

式中: E_i 为采样点 i 处的能量值; E 为各采样点的平均值; N 为采样点的个数。

2.2 被测模块

被测模块由被测四象限探测器镜头和磨砂玻璃组成。被测四象限探测器镜头用于接收和会聚由目标反射的激光,将目标位置信息转化成光斑并在探测器光敏面上成像,通过对光敏面上的光斑能量分布状况进行分析处理,可以判断目标的角度和位置信息。通常,光斑直径($2r_0$)是探测器直径($2R_0$)的 $1/2$ ^[12]。采用磨砂玻璃替代四象限探测器作为显像板,磨砂玻璃前表面具有一定的粗糙度,激光通过四象限探测器镜头后,光斑能够被磨砂玻璃接收并散

射到各个方向,透过磨砂玻璃后表面的光束可以作为后方光学结构的光源。

对于一束入射到不规则性表面的激光,由于磨砂玻璃毛面上有凹凸不平的微小表面,故其表面产生散射现象,用双向散射分布函数(BSDF)来表示这种散射现象。在已有的 BSDF 模型中,广泛应用的模型有朗伯漫反射模型、Harvey 模型、修正的 Harvey 模型以及 AB_g 模型等^[13],其中 A 、 B 和 g 为待定系数, A 决定散射率, B 的典型值为 0.001 或者更小, g 一般取 1~3。其中, AB_g 模型是一种常用的 BSDF 形式,适用于常见的随机粗糙表面,形式为

$$F_{\text{BSDF}}(\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0) = \frac{A}{B + |\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0|^g}, \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\beta}$ 为散射方向单位矢量的投影; $\boldsymbol{\beta}_0$ 为镜面方向单位矢量的投影。当 $g=0$ 时, AB_g 模型退化为朗伯漫反射模型,其 BSDF 为定值,即 $A/(B+1)$ 。

2.3 显微成像模块

显微成像模块由显微物镜、CCD 及计算机组成。在系统设计中,为了观测到光斑详情,需利用微型显微物镜将经磨砂玻璃散射后的光斑进行缩小成像,由 CCD 相机采集成像光斑信号。由于被测四象限探测器镜头的像面位于机械结构内,故需设计一长工作距的显微物镜,保证其不仅能适配不同尺寸的四象限探测器镜头,还能够实现非接触式检测,满足各种场合对工作距的使用要求。

光学系统的数值孔径(NA)决定光束进入系统的能量。根据显微成像的特点可知,当激光光斑会聚到磨砂玻璃上时,磨砂玻璃会使光发生透射和散

射,信号光向周围 180° 空间内发射。若使光能量尽可能多地被接收且视野尽可能大,物镜的像方数值孔径需尽可能大,这是因为大数值孔径的物镜的衍射极限更小,而且信号收集效率更高^[14]。

在检测显微成像光学系统中,为了提高显微物镜的测量精度,尽量减少其在传输过程中产生的能量损耗以及提高其分辨率,可以向双远心光路的方向进行设计优化,采用双远心光路可以同时消除物方和像方畸变,提高测量分辨率,并且稳定放大倍率^[15]。

3 设计实例

3.1 大扩束比整形扩束准直镜头的设计

激光制导系统一般采用波长为 1064 nm 的激光作为光源,激光器的出射口径较小,约为 3 mm,且出射光束呈高斯分布。考虑到出射光束需与被测四象限探测器的口径匹配,若直接将其扩束,则会引起能量的巨大损耗及光束均匀度的下降,影响探测结果,因此将高斯光束进行二级扩束,以保证能量的最大传输。

采用扩束透镜组与伽利略型整形非球面透镜组相结合的透镜结构,其中第 3、4 片均为非球面透镜,透镜材料均为 H-K9L 玻璃,第 1 片透镜的厚度大于 2 mm,其余厚度为 2.5~4.5 mm,光学结构总长为 350 mm,在可加工范围内。利用 ZEMAX 光学设计软件对整体镜头进行设计与优化,并借助软件的 ZPL 宏指令自动优化设计,将出射的高斯光束进行扩束与准直均匀化,整形结构如图 2 所示。

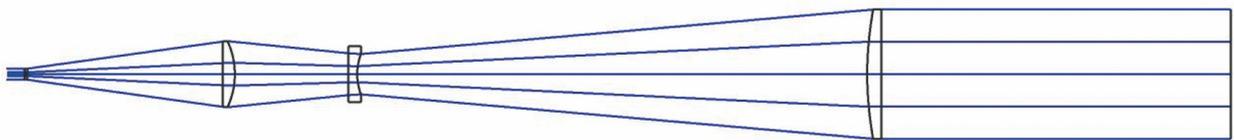


图 2 整形扩束准直镜头的光学结构图

Fig. 2 Optical structure diagram of shaping beam extension collimating lens

图 3(a)和图 3(b)分别为入射光和出射光的能量分布图,入射光束的口径为 3 mm,出射光束的口径为 36 mm,图中横坐标代表光斑坐标值,纵坐标代表归一化的能量密度。

对比图 3(a)和图 3(b)得出,入射光束经过整形系统变换后,高斯光束的能量空间分布已经得到较好的改善,由 2.1 节的(2)式结合处理软件可以计算出图 3(b)的平顶光束在有效孔径范围内的均匀度为 98.16%,符合光学加工要求。

光学系统结构的设计需要考虑后期加工与装

调,因此对设计完成的光学系统结构进行公差分析是有必要的,整形扩束准直系统的公差设置如表 1 所示。在整形扩束准直系统的公差分析中,主要以曲率半径公差、厚度公差、偏心公差以及倾斜公差等为主要限制范围。与灵敏度分析和反转灵敏度分析不同, Monte Carlo 分析法可以同时模拟所有波动的效果^[16]。

将表 1 的公差设置代入整形扩束准直系统中,运用 Monte Carlo 分析方法对公差进行模拟分析,选用 RMS(Root-Mean-Square)角半径作为结构评

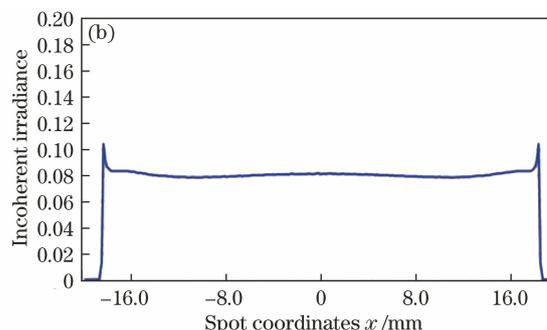
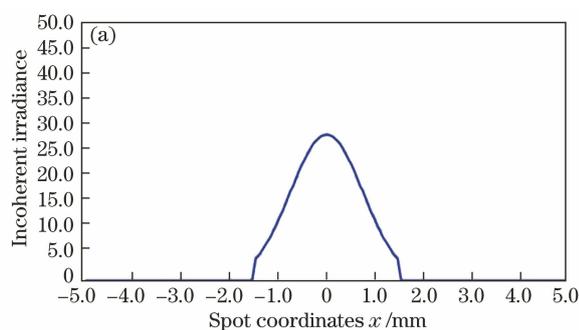


图 3 整形扩束准直镜头的入、出射光能量分布图。(a)输入光能量分布图;(b)输出光能量分布图

Fig. 3 Energy distribution of incoming and outgoing light of shaping beam expansion collimating lens. (a) Input light energy distribution diagram; (b) output light energy distribution diagram

表 1 整形扩束准直系统的公差设置

Table 1 Tolerance setting for shaping beam extension collimating system

Tolerance type	Value
<i>F</i> -number	±1
Thickness /mm	±0.02
Element decentration /mm	±0.02
Element tilt /(')	±1
Surface tilt /(')	±1

价标准,得出超过 80% 样本的 RMS 角半径为 1.1×10^{-4} ,结果表明整形扩束准直镜头的准直度满足系统要求。

3.2 四象限探测器镜头的设计

本文设计一种有效焦距(EFFL)为 17.8 mm、光圈数(*F*-number)为 0.61 和视场(FOV)为 24°的四象限探测器镜头光学系统,系统总长为 36.8 mm。该系统由球罩、单色滤光片、凸透镜、保护玻璃窗及像面组成,其中凸透镜采用非球面透镜,由于对非球面透镜进行光学冷加工,批量生产费用较高,因此采用了玻璃模压的方式,透镜材料选用低软化点玻璃 D-ZLaF85A,通过模压可以使非球面透镜的边缘有平台,用于定位透镜。光学系统结构如图 4 所示。

图 5 为 0°、4°、8°和 12°视场下的光斑足迹图,显示了不同视场中光斑在探测器光敏面上的位置。由图 5 可以看出,在线性区内的不同视场下,光斑半径均在 2.86~3.11 mm 之间,满足四象限探测器和光学系统对光斑半径的设计要求。

3.3 长工作距离双远心显微物镜的设计

根据实际检测要求,设计一款透射式长工作距离、高分辨率的双远心显微物镜。探测器为 SONY 所生产的 IMX462 型传感器,其像元尺寸为 2.9 μm,光敏面尺寸为 5.6 mm×3.2 mm,显微物镜的设计参

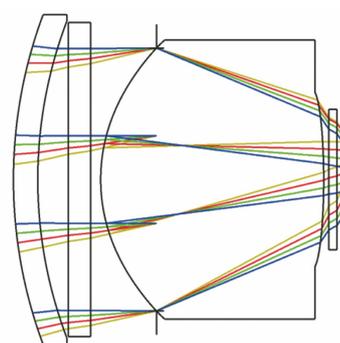


图 4 四象限探测器镜头的光学系统

Fig. 4 Optical system of four-quadrant detector lens

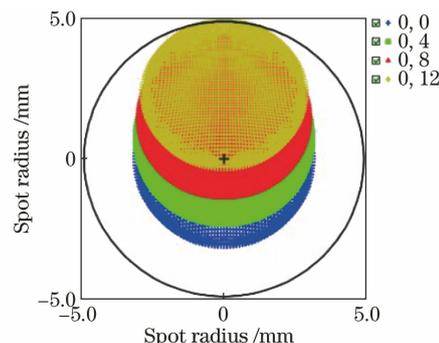


图 5 光斑足迹图

Fig. 5 Spot footprint diagram

数如表 2 所示,其中 MTF 为调制传递函数。

表 2 显微物镜的设计参数

Table 2 Design parameters of microscopic objective lens

Parameter	Value
Working distance /mm	325
Objective magnification	-5
Focal length /mm	55
NA of object space	0.15
Object height /mm	8
Detector size /(pixel×pixel)	1920×1080
Pixel size /(μm×μm)	2.9×2.9
MTF at spatial frequency is 172 lp·mm ⁻¹	≥0.6

为了确保物、像方的高分辨率以及低能量损耗,需保证物、像方的数值孔径都相对较大。由显微物镜的成像原理可知,在无限远校正光学系统中,初次像是由管透镜和无限远显微物镜共同产生的,将它们组合可以满足物、像方都是高数值孔径的设计。合适的管透镜和无限远显微物镜的初始结构如图 6 所示^[17]。

遵循光瞳衔接的原则,将管透镜与无限远显微

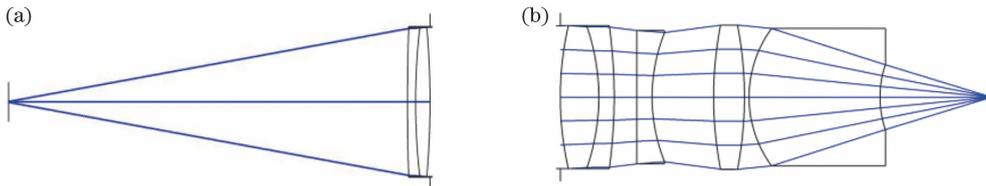


图 6 初始结构图^[17]。(a)管透镜的初始结构图;(b)无限远显微物镜的初始结构图

Fig. 6 Initial structure diagram^[17]. (a) Initial structure diagram of tube lens; (b) initial structure diagram of infinity microscopic objective lens

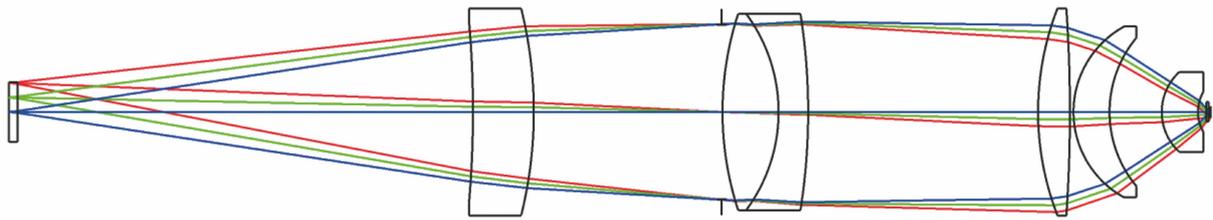


图 7 显微物镜的光学结构图

Fig. 7 Optical structure diagram of microscope objective

所设计的显微物镜的 MTF 曲线如图 8 所示,可以看出在截止频率为 172 lp/mm 处,全视场的 MTF 大于 0.65,系统成像质量较好。图 9(a)为系统的畸变曲线图,可以看出系统的整体畸变小于 0.5%,符合设计要求。此外,图 9(b)为系统的相对照度曲线图,可得出系统的相对照度大于 98.5%,确保光能量的均匀性。

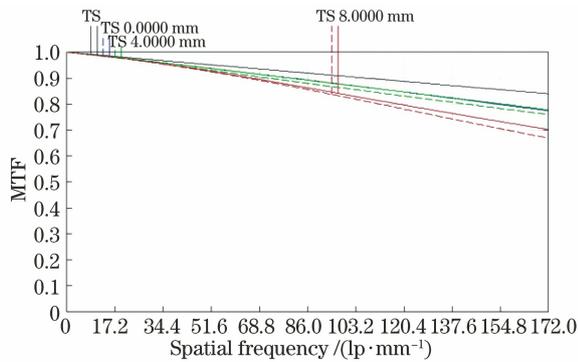


图 8 显微物镜的 MTF 曲线

Fig. 8 MTF curves of microscope lens

将表 3 的公差设置代入显微物镜系统中,运用 Monte Carlo 分析方法对公差进行模拟分析,选用

物镜结合,通过设置各面的曲率半径和厚度来重新调整系统的材料。由于系统可以有限远成像,因此第 1 片透镜应优化为凹透镜,软件优化后显微物镜的光学结构如图 7 所示。该系统由 6 片透镜和保护玻璃组成,其中第 2 片透镜和保护玻璃的材料均为 H-K9L 玻璃,其余透镜均采用 H-ZF52 玻璃。双胶合透镜置于光瞳处,利用正负透镜组合可以在很大程度上消除球差,保证了光学系统的设计质量。

MTF 均值作为结构评价标准,得出在 172 lp/mm 的空间频率处,超过 80%样本的 MTF 预估值大于 0.48,结果表明显微物镜系统满足成像质量的要求。

表 3 显微物镜系统的公差设置

Table 3 Tolerance setting of microscopic objective system

Tolerance type	Value
<i>F</i> -number	±2
Thickness /mm	±0.02
Element decentration /mm	±0.02
Element tilt /(')	±1
Surface decentration /mm	±0.02
Surface tilt /(')	±1

3.4 检测系统非序列仿真

完成四象限探测器镜头光学质量测量装置中各部分光学系统的设计后,利用波长为 1064 nm 的光源、整形扩束准直镜头、四象限探测器光学系统、磨砂玻璃、显微物镜和 CCD 探测器来组合建立非序列系统结构,1064 nm 的激光器发出的高斯光束的束腰半径为 1.5 mm,切趾因子为 1。将系统的被测四

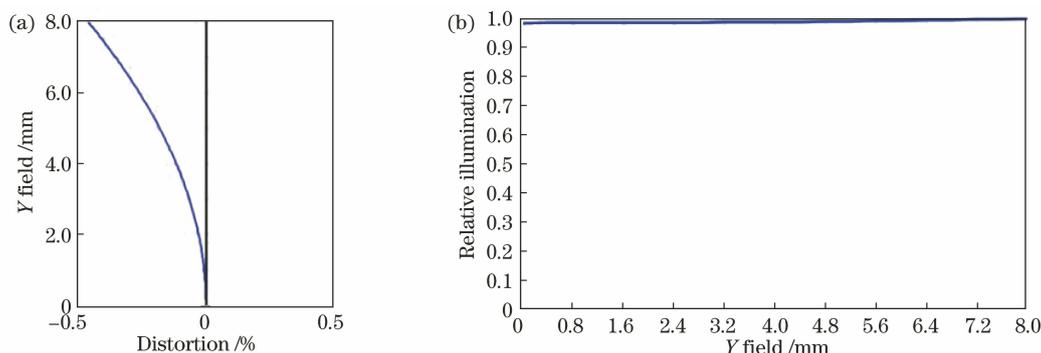


图 9 显微镜物光学系统的像质评价。(a)畸变;(b)相对照度

Fig. 9 Image quality evaluation of microscopic objective optical system. (a) Distortion; (b) relative illumination

象限探测器镜头、显微镜物镜及 CCD 放置在高精密转台上,使其沿 z 轴以逆时针方向分别旋转 8° 和 12° ,得到的光路结构如图 10 所示。其中磨砂玻璃放置在四象限探测器光学系统的像面位置,对激光经过被测镜头后的像进行散射,使其在磨砂玻璃上显像,同时磨砂玻璃能够作为后方显微镜物镜的物面。由显微镜镜头的放大倍率及 CCD 尺寸可知,磨砂玻璃边长

为 8 mm。在 AB_g 模型中,当 $g=0$ 时, AB_g 模型退化为朗伯漫反射模型,其 BSDF 为定值,即 $A/(B+1)$ 。朗伯表面是一种理想的散射面,其所有方向的反射光能量都相等,不吸收任何入射光,能够使得背景杂光强和检测光强达到一个比较理想的比例,对于检测系统的检测精度起着至关重要的作用。

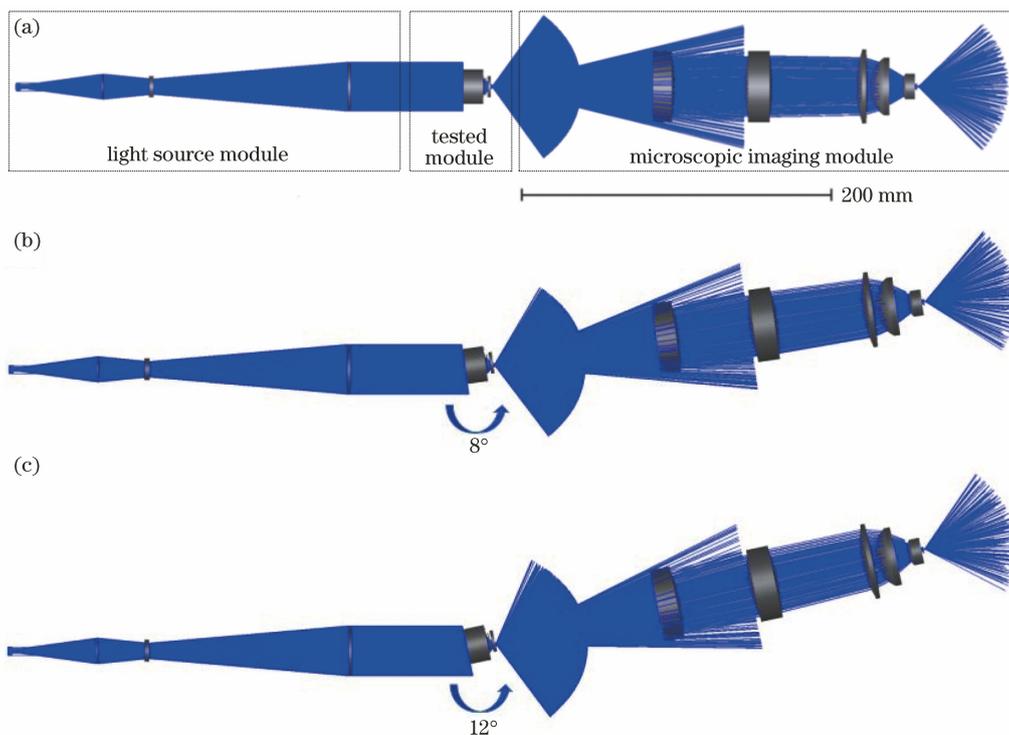


图 10 四象限探测器镜头光学质量检测装置在不同旋转角度下的光路结构图。(a) 0° ;(b) 8° ;(c) 12°

Fig. 10 Lightpath structure of four-quadrant detector lens optical quality inspection device at different rotation angles.

(a) 0° ; (b) 8° ; (c) 12°

激光器发出的高斯光束经过整形扩束准直镜头后得到能量均匀的平顶光束,平顶光束入射到四象限探测器光学系统后,利用磨砂玻璃的散射特性将轴上光束经过四象限探测器光学系统后形成的光斑成像到磨砂玻璃上,磨砂玻璃上的光敏面边长为

10 mm,再经显微镜物镜缩小 $1/5$ 后成像,CCD 探测器上的有效探测区域边长为 2 mm。若在 CCD 探测器有效探测区域内的光斑直径略大于 1 mm,且光斑的一侧包含中心点而另一边不超过 CCD 探测器有效探测区域的边界,则光斑在线性区内,反之则

在非线性区内。各部分探测器上的光斑能量对比如图 11 所示。从图 11(a) 可以看到, 磨砂玻璃上的光斑半径为 3.11 mm, 与序列中光斑大小一致, 光斑经过显微物镜缩小后, 在 CCD 上成像的光斑半径为 0.62 mm, 大小为原来的 1/5。图 11(b) 和图 11(c)

分别为将显像模块和显微成像模块放在高精度转台上旋转 8° 和 12° 后, 在磨砂玻璃和 CCD 探测器上得到的光斑能量图, 磨砂玻璃上的光斑与 CCD 探测器上的光斑半径比值符合 1/5。设计结果表明, 此系统能够对四象限探测器镜头的光学质量进行单独检测。

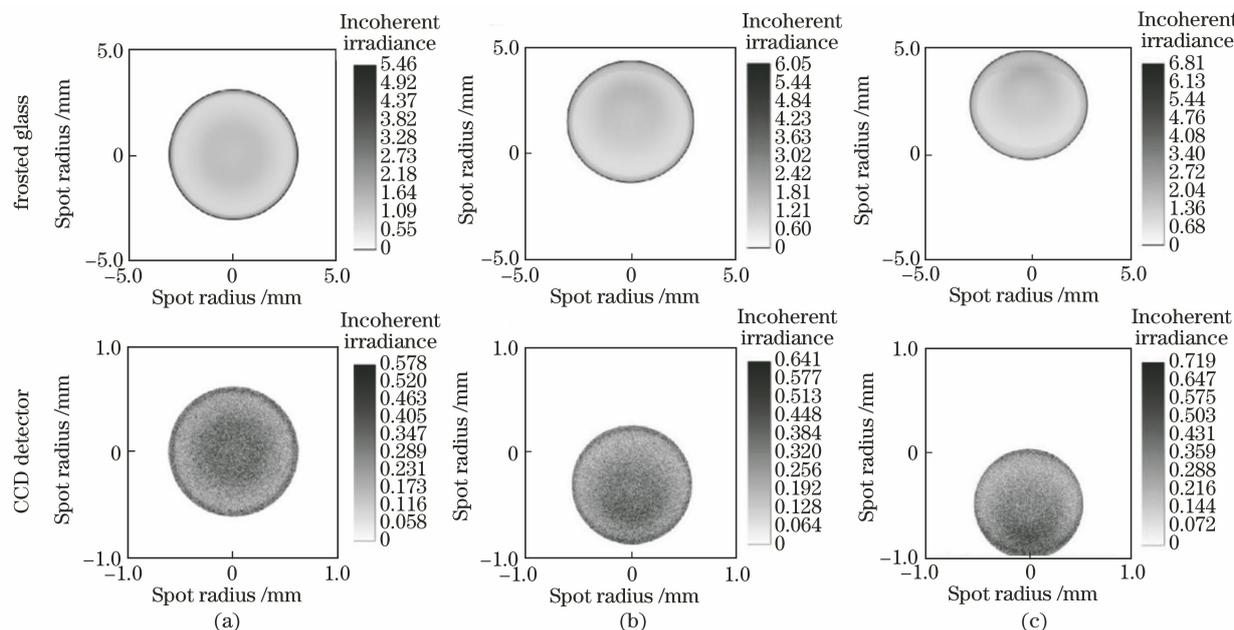


图 11 模块旋转不同角度后的光斑能量图。(a) 0° ; (b) 8° ; (c) 12°

Fig. 11 Spot energy diagram of module after rotating at different angles. (a) 0° ; (b) 8° ; (c) 12°

4 结 论

本文将高斯整形、磨砂玻璃散射与显微成像结合, 设计一套能够对新型四象限探测器镜头的光学质量进行单独检测的系统, 实现了对四象限探测器镜头光学质量的准确检测。相比于目前四象限探测器系统只能整机检测的弊端, 所设计的系统实现了单独对四象限探测器镜头光学质量的非接触式检测, 可用来对不同尺寸的四象限探测器光学系统实现批量检测。应用该系统不仅能够解决镜头质量的标准化测量问题, 降低检测成本, 还能够提高其在四象限激光制导探测系统中对目标的定位精度, 进而保证我国军用武器的品控, 促进我国军用光学产品的质量提升。

参 考 文 献

- [1] Xue P Y, Wu Y, Feng Q, et al. Design of the large field optical system for four-quadrant detecting [J]. Chinese Optics, 2014, 7(3): 462-468.
薛珮瑶, 吴耀, 冯茜, 等. 大视场四象限探测光学系统设计 [J]. 中国光学, 2014, 7(3): 462-468.
- [2] Zhang H, Chen Y S, Geng T W, et al. Study on

main factors affecting position detection accuracy of four-quadrant detector [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1217002.

张辉, 陈云善, 耿天文, 等. 四象限探测器位置检测精度的主要影响因素研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1217002.

- [3] Hu Y B, Wang M. Study on the technology of mutual alignment based on the four-quadrant photo electric detector [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9795: 979501.
- [4] He C, Chang J T, Wang Y, et al. Linear polarization optimized Stokes polarimeter based on four-quadrant detector [J]. Applied Optics, 2015, 54(14): 4458-4463.
- [5] Du Y W, Dong Q L, Pu X Q, et al. Analysis and design of optical system of laser semi-active seeker [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(12): 1536-1540.
杜亚雯, 董全林, 蒲小琴, 等. 激光半主动制导头光学系统设计与分析 [J]. 激光与红外, 2018, 48(12): 1536-1540.
- [6] Hu B, Chang W J, Sun T, et al. Laser semi-active seeking guided seeker optical system [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(2): 402-405.
胡博, 常伟军, 孙婷, 等. 激光半主动制导头光学系统的设计 [J]. 应用光学, 2012, 33(2): 402-

- 405.
- [7] Li D J, Liang S Y, Cao J J. Spatial laser beam shaping using aspheric Galilean beam expansion system[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(4): 427-429.
李殿军, 梁思远, 曹建建. 非球面伽利略扩束系统实现激光束空间整形[J]. *激光技术*, 2008, 32(4): 427-429.
- [8] Luo S R, Lü B D, Zhang B. Propagation characteristics of flattened Gaussian beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(9): 1213-1217.
罗时荣, 吕百达, 张彬. 平顶高斯光束的传输特性[J]. *光学学报*, 2000, 20(9): 1213-1217.
- [9] Shealy D L, Chao S H. Geometric optics-based design of laser beam shapers [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(11): 3123-3138.
- [10] Dickey F M, Lizotte T E. *Laser beam shaping applications*[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [11] Gao Y H. Research of Gaussian beam shaping[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012: 88-97.
高瑀含. 高斯光束整形技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012: 88-97.
- [12] Zhang J Q, Xie F, Xue Q S, et al. Laser guided lens based on four-quadrant detector[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 471-479.
张军强, 谢飞, 薛庆生, 等. 基于四象限探测器的激光导引镜头的研制[J]. *中国光学*, 2015, 8(3): 471-479.
- [13] Shi D L. Research on stray light of optical and mechanical system based on BRDF [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 14-21.
石栋梁. 基于 BRDF 的光机系统杂散辐射研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 14-21.
- [14] Wu D L, Feng L S, Wang A M. Optical design of two-photon endoscopy objective with high collection efficiency [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 071801.
吴丹磊, 冯丽爽, 王爱民. 高收集效率双光子内窥镜的光学设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 071801.
- [15] Yu D Y, Tan H Y. *Engineering optics*[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016: 66-67.
郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2016: 66-67.
- [16] Smith W J. *Modern optical engineering*[M]. 4th ed. Zhou H X, Cheng Y F, Transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 511-524.
沃伦 J. 史密斯. *现代光学工程*[M]. 4 版. 周海宪, 程云芳, 译. 北京: 化学工业出版社, 2011: 511-524.
- [17] Wang Z J. *Practical optical technology manual*[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 320-336.
王之江. *实用光学技术手册*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 320-336.