

doi:10.3788/gzxb20134212.1507

# 光电多功能检测仪光学系统设计

牛津,王劲松,安志勇,杨海凝

(长春理工大学 光电工程学院,长春 130000)

**摘要:**设计了一种集激光光束质量分析、光电自准直、激光自准直和光轴一致性检测等多种检测功能为一体的多功能光电检测系统.系统工作波长范围为 300~1 700 nm,准直准确度 2",角分辨率 0.1".设计了一种长焦距平行光扩束系统和三光轴系统,采用带有中心平面的、可移动的复曲面望远物镜,物镜口径 75 mm,扩展口径至 400 mm,使系统实现了光轴一致性、出射激光指向及多参量集成检测功能,集成化程度高.利用光学设计软件 ZEMAX 进行系统仿真和优化设计,在全视场内,不同波长所对应的各焦距位置 50 lp/mm 处  $MTF > 0.2$ .成功研制一台功能样机,并于加工装调后进行了测试试验,结果表明该仪器获取图像清晰准确,能够满足测试要求.

**关键词:**光学设计;光电多功能检测;复曲面设计;扩束系统;多光轴系统;望远物镜;多重组态

中图分类号:TH703

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)12-1507-7

## Optical System Design of the Optical Multi-function Detector

NIU Jin, WANG Jin-song, AN Zhi-yong, YANG Hai-ning

(School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun 130000, China)

**Abstract:** An optical system of optical multi-functions detector was designed, which combined multiple detection functions such as laser beam quality analysis, photoelectric auto-collimator, laser auto-collimator, optical coherence detection as one. Its operating wavelength range was 300~1 700 nm, alignment accuracies was 2" and angular resolution was 0.1". One kind of parallel light beam expanding system and three-axis system that had a long focus was designed, and a kind of removable toric lens telephoto with a central plane was adopted. The objective lens diameter was 75 mm, extend to 400 mm diameter. It enabled the optical system to achieve consistency, outgoing laser pointing and integrated multi-parameter detection and had high degree of integration. Furthermore, it used the optical design software ZEMAX for system simulation and optimization. As a result, the modulation transfer functions at 50 lp/mm for the position of the focal length corresponding to different wavelengths are greater than 0.2n in the whole field of view. Then, a functional prototype was successfully developed, and processing equipment was tested after adjustment. Finally, the results show that it can get clear and accurate images in the focus range. The system satisfies the command of test requirements.

**Key words:** Optical design; Optical multi-functions detection; Toric lens design; Beam expander system; Multi-optical axis system; Telephoto lens; Multiple configurations

**基金项目:**吉林省重大专项-科技发展计划项目新型光电子器件及应用技术项目(No. 20100610)、吉林省科技发展计划(Nos. 20080331, 20090555)和高功率半导体激光国家重点实验室科研基金(No. 91400310405)资助

**第一作者:**牛津(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为光学设计与光电技术检测. Email: niujin0615@163.com

**通讯作者:**王劲松(1973-)男,副教授,主要研究方向为光电仪器检测. Email: soldier\_1973@163.com

**导师:**安志勇(1943-)男,教授,博导,主要研究方向为光电测控系统与仪器. Email: an\_zhiyong@126.com

**收稿日期:**2013-07-15; **录用日期:**2013-10-11

## 0 引言

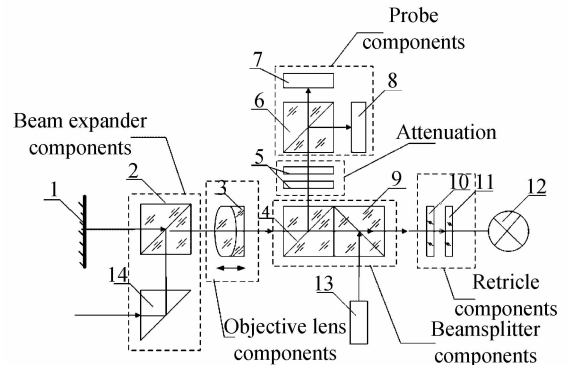
光电多功能检测仪是一种集激光光束质量分析仪、光电自准直仪、激光自准直仪、光轴一致性检测仪和平行光管等多种检测功能为一体的多功能光电检测仪器。该仪器可测量参量包括各种可见及红外激光器的光斑尺寸、束散角、光强分布、激光指示器的调整范围,以及各种白光、微光及红外光学系统的瞄准基线变化量、轴一致性、光斑走动量、焦距、视场等几十项。近年来,在激光光束质量数字化检测方面的产品及相关技术研究较多,国外比较有代表性的有 DataRay 公司、Spiricon Inc 公司和 Photon Inc 公司等,其中研制的 BeamScope™-P8 激光光束质量测量仪、Mode Master Beam Analyzer 型激光光束质量分析仪和 LBA-PC 系列光束分析仪具有代表意义<sup>[1-3]</sup>;而国内的研制起步较晚,且测量准确度较低,比较具有代表性的有北京光电技术研究所研制的 BGS6314 型激光光束质量分析仪<sup>[4-5]</sup>。在数字式光电自准直仪方面,进口产品无论在功能、准确度和可靠性方面均优于国产产品。在多轴一致性检测方面,国外相关技术研究及产品报道较少,国内研究主要集中在长春理工大学、中科院长春光机所等单位<sup>[6-7]</sup>。

目前,将激光光束质量分析仪、光电自准直仪、激光自准直仪、光轴一致性检测仪和平行光管等功能集成于一体,工作波长范围为 300~1 700 nm,扩展口径至 400 mm,准直准确度为 2"的高度集成化产品,市场上还处于空白<sup>[8-12]</sup>。要实现诸多参量的准确测量,就需要一套能满足检测要求的光学系统。针对此问题,本文专门设计了一种基于复曲面摄远物镜的多光轴系统,并加之创新设计的扩束系统,具有测量准确度高、集成化和自动化程度高、速度快、光路短、体积小等诸多优点。

## 1 光路原理

光电多功能检测仪光学系统原理如图 1。光学系统主要由扩束组件、物镜组件、探测组件、衰减组件、分光镜组件、分划板组件等组成。由物镜 3、分划板 10、毛玻璃 11 和光源 12 构成一个平行光管,模拟无穷远目标;由物镜 3、分光镜 4、偏振衰减器 5、分光棱镜 6、红外 CCD7 和可见光 CCD8 构成激光光束质量分析仪,两个 CCD 分别位于分划板的等效焦平面位置;前两种结构组合在一起便是基于阵列传感器的光电自准直仪。根据测量的光波波长,系统的物镜可以在程序的控制下通过精密伺服机构驱动改变位置,以保证此波长的焦距更准确,从而提高测量的准确度。系统中扩束组件中的反射棱镜 14 可沿

导轨滑动,改变其与耦合棱镜 2 的距离,达到扩展物镜口径的作用,可实现轴一致性检测。激光指示器 13 发出的窄束红色激光可作为指示光,用于测量时被试品快速对准,减少调整时间,提高检测效率,还可以作为光源,与物镜、CCD 构成激光自准直仪。



1-plane mirror; 2-coupling prism; 3-lens; 4,9-beam splitter; 5-polarization attenuator; 6-dichroic prism; 7- infrared CCD; 8-visible light CCD; 10-reticle; 11- frosted glass; 12-light; 13 - indicating laser; 14 - reflector

图 1 光电多功能检测仪光学系统原理

Fig. 1 The optical system schematic of optical multi-function detector

## 2 系统特点及对光学设计的要求

根据以上所述,系统具有以下特点:

### 1) 宽波段

系统工作波段为 300~1 700 nm,在进行焦距、束散角等与波长有关的参量测量时,若系统的物镜位置不变,必会导致较大的测量误差,这就要求系统能根据不同波长的产品适当调整物镜与分划板、探测器之间的距离,实现准确测量。

### 2) 大视场

针对本系统的光电自准直、激光自准直、光轴一致性检测功能而言,视场不易做大;而目前大多数激光指示器的调整范围在±25 mil 内,即±1.5°,这就要求系统既要保证足够的分辨率,又要有较大的视场。

### 3) 高分辨率

根据系统光谱要求,并要达到 0.1"的角分辨率,需采用分辨率 2 048×2 048 的 1"CCD 做为探测器,该尺寸的可见 CCD 和红外 CCD 的像元尺寸一般为 5.5×5.5 μm<sup>2</sup>,有效成像面积一般为 11.26×11.26 mm<sup>2</sup>,再采用 CCD 亚像元细分技术,以实现高分辨率测量。

### 4) 长焦距

光电多功能检测系统是采用焦斑法<sup>[3]</sup>对激光光束质量进行检测的,其原理表达式为

$$2\theta = 2\omega / f' \quad (1)$$

式中激光束散角为 2θ,测量物镜的焦距为 f', 光斑

半径为  $2\omega$ . 当激光束散角一定时,物镜组件的焦距正比于 CCD 像面上激光光斑大小. 欲获得清晰准确的激光光斑,需尽量增大光斑尺寸,即增大系统焦距. 若 CCD 像面上激光光斑大小为  $D$ ,  $D$  取最大极限值 11.26 mm, 视场角  $2\theta=3^\circ$ , 则物镜组件的焦距为

$$f' = D/2 \tan(\theta) = 612.46 \quad (2)$$

考虑到探测器的有效尺寸小于 11.26 mm, 本系统焦距定为 600 mm.

#### 5) 大口径

通光口径由进入仪器能量要求决定,对一定的目标和一定的作用距离而言,口径越大,目标对口径的张角越大,进入仪器的能量就越多. 当焦距一定时,口径大,则仪器的相对孔径也大,这样就提高了像面照度. 由式(3)可求出系统所需的相对孔径.

$$(\pi B/4F^2) \times \tau \times 10^4 = E \quad (3)$$

式中  $B$  为目标亮度,估计为 0.3 sb;  $\tau$  为大气透过率,估计 0.6;  $E$  为像面所需照度,单位为 lx. 对 CCD 而言,所需最小照度为 0.02 lx;  $F$  为相对孔径倒数. 由此求得  $F=8.3$ . 一般希望密度高一些,所以取  $F=8$ . 在焦距 600 mm 情况下,则有

$$\Phi = 600/8 = 75 \quad (4)$$

式中  $\Phi$  为仪器的通光口径,本文取通光口径为 75 mm.

#### 6) 最小弥散斑直径要求

由准直度与分辨力之间的关系式

$$\alpha f' = d \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  为平行光管的准直准确度,  $f'$  为光学系统焦距,  $d$  为系统最小弥散斑直径. 因此,要达到准直准确度  $2''$ , 取焦距  $f'=600$  mm, 可得

$$d \approx (2''/206265) \times 600 = 5.817 \quad (6)$$

即光学系统各视场内的弥散斑直径均小于 5.817  $\mu\text{m}$ , 才可满足系统准直准确度要求.

#### 7) 校正色差

大口径、长焦距的光学系统由于视场较小,主要校正球差、彗差和位置色差. 对于透射式系统,使用双胶合结构就可以很好地校正球差和彗差,主要难点在于对色差的校正. 由于本系统波谱较宽,校正色差后可以保证各波段的成像质量.

#### 8) 图像畸变小

对所有的波段、视场,图像的百分比畸变应尽可能小. 小畸变使图象可读性强,利于图像配准、拼接.

#### 9) 防止晕斑

由于采用 CCD 作为探测器,而 CCD 有较强的反射率,如果镜头最后一个光学面曲率半径为正值,即该面弯向 CCD,则可能出现一个晕斑. 因此,要求

镜头最后一个光学面曲率半径为负值.

#### 10) 激光指示光路高度准直

对于系统的激光自准直仪功能,要求激光指示光严格对准中心,并通过整个光学系统后激光束的准直度不受影响,可采用复曲面物镜设计来解决此问题.

## 3 光学系统设计

### 3.1 扩束组件设计

扩束组件的设计可以解决使用小口径测量仪无法完成大口径的测量任务,如轴一致性检测. 为使测试仪器简化,降低成本,本文设计了由耦合棱镜 2 和反射棱镜 14 组成的扩束组件,并且反射棱镜可相对耦合棱镜上下移动,以适用不同待测器件的光束范围,扩展口径最大至 400 mm. 如图 1 中扩束组件所示.

### 3.2 物镜组件设计

本文提出的光学系统实质上是一种望远系统,采用长焦距物镜设计. 一般的长焦距物镜是采用双胶合物镜及其复杂化的结构形式,间或采用 PETZVAL 型和三片型的复杂化结构<sup>[13-16]</sup>. 这些结构形式的缺点是结构长度大于焦距,使得体积和重量大为增加,给使用带来不便. 摄远型光学结构采用正负光焦度分离的形式,前透镜组为正光焦度、后透镜组为负,整个系统的主面移出摄远物镜之外,从而使筒长即物镜前表面到焦面的距离小于焦距,这使得物镜的结构尺寸大大缩小<sup>[17-18]</sup>. 据此,本文采用摄远型结构.

摄远物镜结构形式有许多的种类,物镜前组需负担较大的光焦度,为遵循本系统简化、低成本的要求,采用双胶合透镜作为前组. 摄远物镜的畸变因其轴外主光线的角放大率不等于 1 而不容易校正,本文设计的视场角不大,所以畸变也不至于太大. 由于前组承担了比整个物镜还要大的相对孔径,因此必须采用能同时校正球差和正弦差的较复杂结构;摄远物镜要求前组和后组各自校正位置色差,为校正整个物镜的倍率色差,故后组也要用两片透镜结构.

本文提出复曲面设计方案,将物镜组件的中心设计成平面透镜,使得指示激光光束通过物镜组件后,激光光束的准直性不受影响,以确保激光自准功能精确实现. 通常激光指示器在 1 m 内的光斑大小为 0.8~3 mm<sup>[3]</sup>,为了保证激光指示器的光束完全由复曲面面型的中心平面处进入光学系统,这里取光斑直径最大值 3 mm.

对应于不同波段,系统焦距不同,这不仅增大了系统的色差,而且不能保证 CCD 敏感面上的成像清晰度,还影响了测量准确度. 本文将摄远物镜与分划

板设计成位置可调,使白光 CCD 和红外 CCD 的接收面同时位于摄远物镜的焦面上,这样激光的光斑清晰成像于 CCD 的敏感面上,这样就满足了不同波段的待测仪器的参量测量。

结合以上考虑,本设计采用带有中心平面的、可移动的复曲面摄远物镜,其前组选择带有正光焦度双胶合透镜,后组选择带有负光焦度的双胶合透镜,既消除了色差对系统象质带来的影响,又保证了物镜的焦面同时位于 CCD 探测器的敏感面上和激光光束的准直性不受物镜曲面的影响。根据系统的技术指标,最终设计结构为:焦距  $f' = 600$  mm,通光孔径为 75 mm,视场角  $2\theta = 3^\circ$ ,准直准确度  $2''$ ,如图 2。各曲面的复曲面设计如图中的局部放大图。

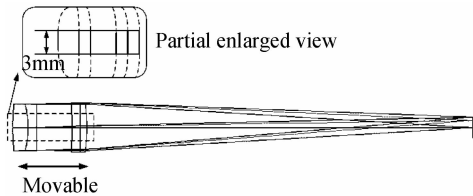


图 2 物镜组件设计

Fig. 2 Lens component design

### 3.3 衰减组件

在进行激光光束参量检测时,由于系统采用焦斑法测量原理,光束是汇聚的,接收器敏感面上的光能量密度很大。为保护器件及保证测量准确性,需要对激光束进行大消光比衰减,因此采用偏振片和滤光片组合式消光。

### 3.4 分光镜组件和分划板组件

分光镜组件和分划板组件分别采用半反半透分光棱镜和透射式、亮背景暗线分划板。

### 3.5 设计结果仿真及象质评价

本系统集激光光束质量分析、光电自准直、激光自准直和轴一致性检测等多种功能为一体,集成化程度高。使用光学设计软件 ZEMAX 进行光学系统仿真,可利用多重组态编辑器来实现整个系统的结构仿真。本系统需要四种组态:1)第一个组态将建构实现光电自准直仪功能的非折转光路;2)第二个组态将建构实现光电自准直仪功能的向下折转光路;3)第三个组态将建构实现光束质量分析仪功能的向上折转光路,并再次折转光路与探测组件中的可见光 CCD 相匹配;4)第四个组态将建构实现光束质量分析仪功能的向上折转光路,并直接与探测组件中的红外 CCD 相匹配。其中,第一个组态可实现光电自准直功能;第二个组态组合可实现激光自准直功能,第三、四个组态组合可实现光束质量分析功能,第一、二、四个组态组合可实现轴一致性检测功能。

通过以上分析,在 ZEMAX 软件多重组态功能

中,将四个组态分别输入,数据如图 3。

Multi-configuration editor					
Edit Solves Tools View Hep					
Active : 3/4		Config 1	Config 2	Config 3*	Config 4
1: PRAM	9/3	-45.000	-45.000	45.000	45.000
2: GISS	8	N-BK7	N-BK7	MIRROR	MIRROR
3: THIC	9	25.000	25.000	-25.000	-25.000
4: THIC	10	0.000	0.000	-170.000	-170.000
5: PRAM	14/3	45.000	-45.000	-45.000	45.000
6: GISS	13	N-BK7	MIRROR	MIRROR	BK7
7: THIC	14	25.000	-25.000	25.000	-25.000
8: THIC	15	167.000	-167.000	30.000	-30.000

图 3 多重组态数据表

Fig. 3 Multiple configuration data sheet

得到初步的设计结构后,利用 ZEMAX 软件进行光路优化设计及像差平衡,最终得到的光学系统结构如图 4。图 5 为通过系统中心的激光指示光光路。为加工简易、降低成本,本设计采用材料为 BAK1、SF8,有效口径为 75 mm,取  $F$  数为 8。该系统总长度为 385 mm,高度为 410 mm,扩束组件扩束范围至 400 mm,物镜组件移动范围最大至 12 mm,在满足所有参量要求的前提下,达到了减小仪器体积的目的。

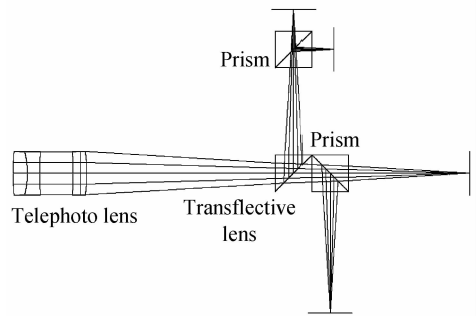


图 4 光学系统结构

Fig. 4 An optical system structural diagram path of the laser

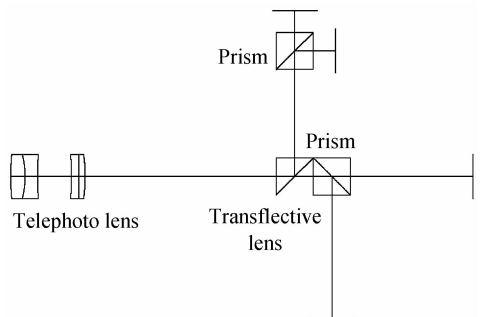


图 5 通过系统中心的激光指示光光路

Fig. 5 Indication light through system center

调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 可以全面反映光学系统的成像质量,像质高的光学仪器的调制传递函数一般都达到或接近衍射极限。物镜组件引起的球差、彗差、像散、场曲、畸变和色差等对激光光斑大小均有不同程度的影响,利用 ZEMAX 软件对系统进行优化,将最后像面的位置和物镜组件的 6 个曲率、厚度设为变量,控制系统的有效焦距为 600 mm,同时重点对四个组态的球差、色差、畸变和像散等进行优化。优化后,该光学系

统对应于不同孔径处的调制传递函数曲线如图 6. 由于采用单个像元尺寸为  $5.5 \times 5.5 \mu\text{m}^2$  的高分辨率 CCD 作为探测器件,系统在 50 lp/mm 处,无论是弧矢平面(S)还是子午平面(T)内,MTF 值均接近衍射极限. 图 7 是对于不同孔径处的 MTF 曲线,可知,将物镜移动到相对的位置后,对于不同的波段物镜焦点均位于 CCD 的敏感面上,完全避免了色差对系统成像的影响.

小于  $5.817 \mu\text{m}$ ,场曲,畸变  $< 0.02\%$ ,均达到系统参量要求. 此时,采用点传递函数表示系统成像质量更为合适,如图 7(c);系统优化后波像差如图 7(d).

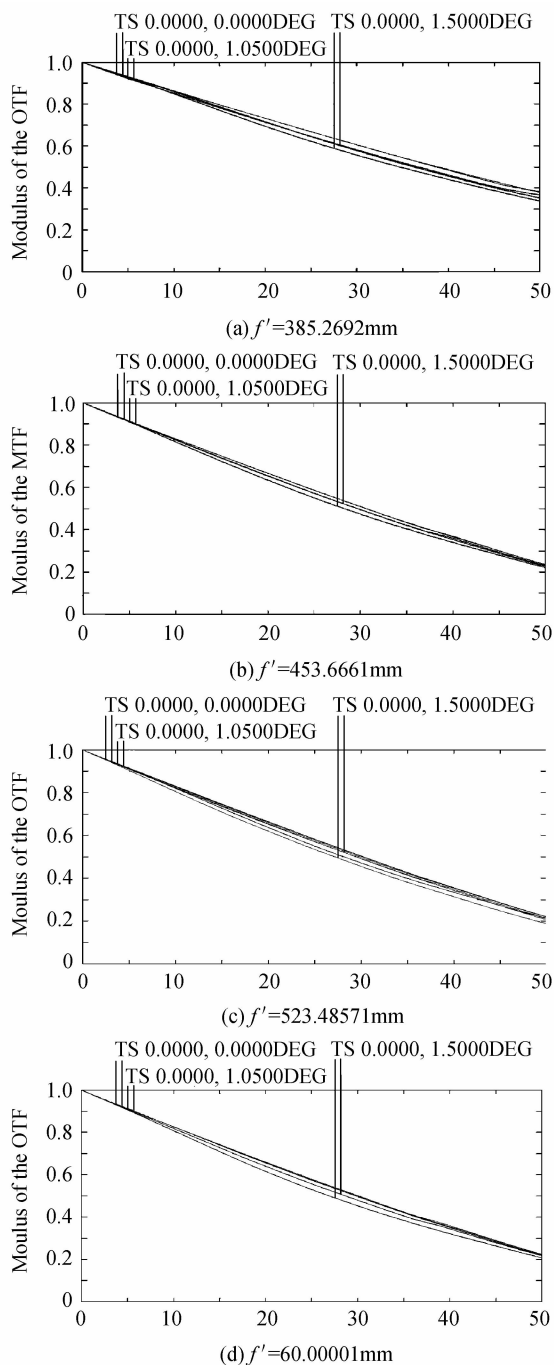


图 6 不同孔径处系统 MTF 曲线

Fig. 6 System MTF curves at different pore

以焦距为 600 mm 为例,系统优化后的点列图、场曲和畸变值如图 7(a)和(b). 由图可知,艾里斑半径远远大于点列图半径,各视场内的弥散斑直径均

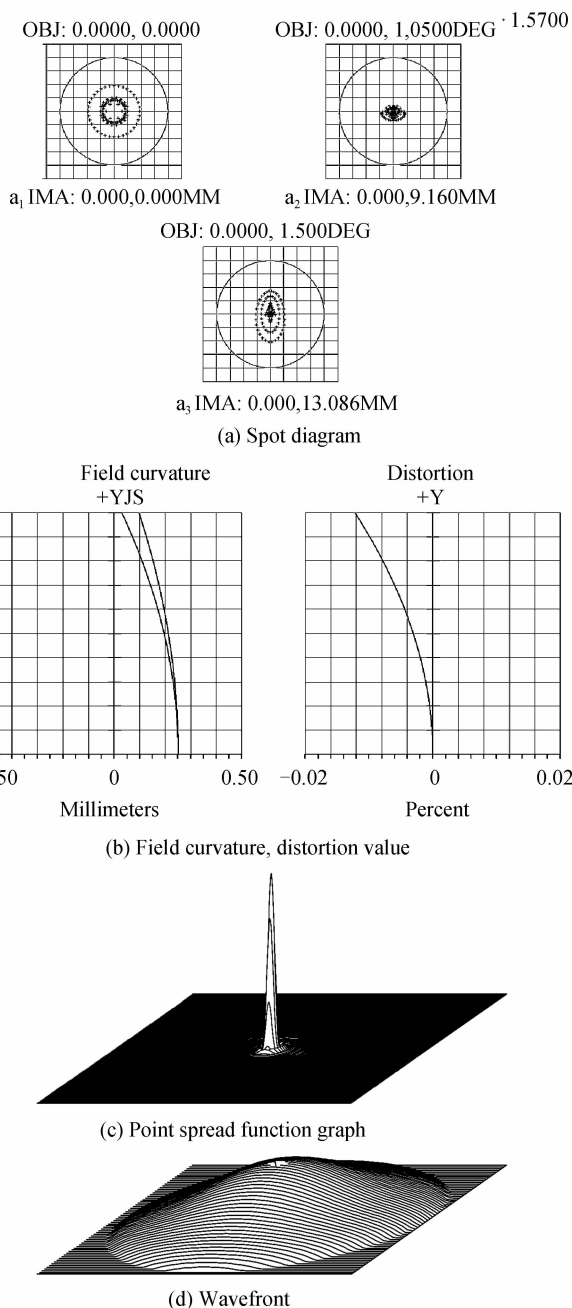


图 7 系统优化后的点列图、场曲与畸变值、点扩散函数图波像差

Fig. 7 System optimized spot diagram, field curvature and distortion value, point spread function graph, wavefront

通过各个象质评价的图像可以看出,本文设计的光电多功能检测仪光学系统像质均达到指标,符合测试要求.

图 8 是加入复曲面前摄远物镜 MTF 曲线图. 由图 6 和图 8 可知,加入复曲面 MTF 曲线变化甚微,在 40 lp/mm,全视场处有最大变化量,加入复曲面前 MTF 为 0.325 2,加入复曲面后为 0.313 7,其

余各处几乎无变化。

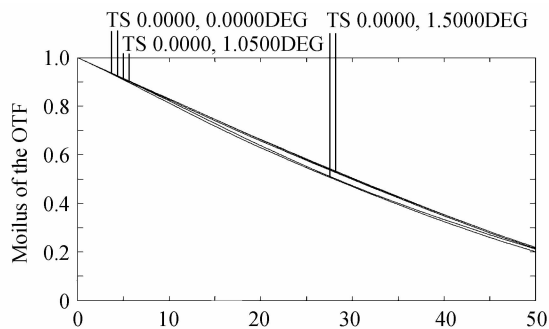


图 8 加入复曲面前 MTF 曲线图

Fig. 8 MTF curves before adding a toric

图 9 是加入复曲面前望远镜点列图. 由图 7 (a)与图 9 对比可知, 三个视场的点列图均无明显变化. 表 1 为加入复曲面前后望远镜点列图数据对比.

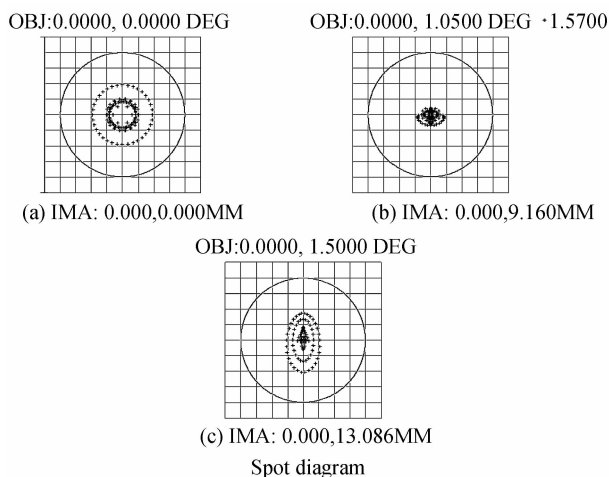


图 9 加入复曲面前点列图

Fig. 9 System spot diagram before adding a toric

表 1 加入复曲面前后望远镜点列图数据对比

Table 1 The data comparison of telephoto lens spot diagram before and after adding a toric

		Field 1	Field 2	Field 3
RMS	Before	5.049	1.835	4.265
RADIUS	After	5.069	1.854	4.047
GEO	Before	7.659	3.481	8.199
RADIUS	After	7.653	3.481	8.199

据此分析可知, 设计成中心设计成直径为 3 mm 的平面, 激光光束仅仅通过平面位置, 不会通过望远镜使其发散(激光光束路径是逆向光路), 因而对激光光束的准直度影响很小; 由于中心平面尺寸相对较小, 对光学系统的象质影响甚微, 满足测试要求.

## 4 样机研制与测试实验

### 4.1 样机研制

根据设计结果进行了样机研制, 实物图如图 10

所示, 测量时软件操作界面如图 11.

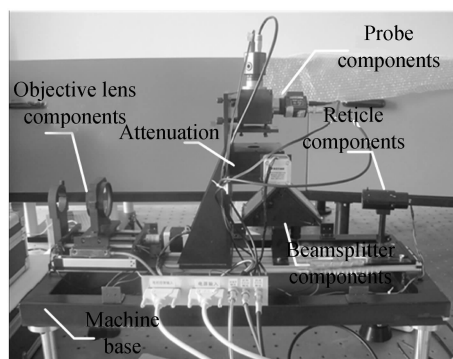


图 10 系统的整体外观图

Fig. 10 Overall appearance of the system

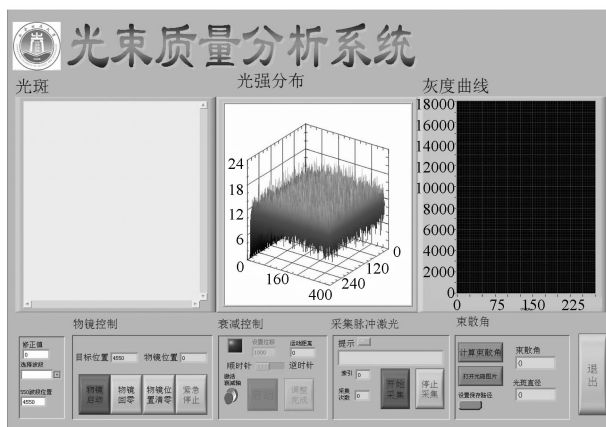


图 11 测量时软件操作界面

Fig. 11 Measurement software interface

### 4.2 测试实验

测试参量中的激光光束束散角、光斑跳动量、偏离量调整范围、轴一致性均为角度的测量. 因此, 实验中采用 0.5" 徕卡光电经纬仪和经过整形后的 3 mW、630 nm 半导体点状激光器来对样机进行功能和准确度的测试实验. 实验前, 均对这两种检测仪器进行了全面标定, 尤其是对激光束散角、激光器外径以及经纬仪的准确度. 此时, 所选用激光器的束散角即为标定值, 用此量来评定本文设计的仪器测试激光束散角这一参量是否精准.

实验前, 将此激光器用专用胶粘结在经纬仪粗瞄器上端, 并采用立靶法(距离 200 m 左右)测定半导体激光器的发射轴(光束中心)与经纬仪瞄准镜光轴(视准轴)之间的夹角, 用此夹角作为标定值, 用以评定本文设计的仪器在测量轴一致性这一参量时是否精准.

实验时, 首先将已知束散角的激光器与经纬仪的组合体对准样机, 使得激光器对准扩束组件的分光棱镜, 经纬仪的瞄准镜对准扩束组件下方的直角棱镜. 然后, 通过瞄准镜对准样机中的十字分划, 测量出激光光束的束散角和轴一致性, 并记录数据. 再用经纬仪分别在水平方向、垂直方向转动一固定的小角

度(一般不超过  $30'$ ),并通过样机分别测定水平和垂直两个方向的转角值,用以测量光斑走动量,最后,将束散角、转角值、轴一致性与标定值进行对比,如表 2。由结果可以看出,准确度完全满足设计要求。

表 2 实际测量值与标定值数据对比

Table 2 The actual measured value and the calibration value data comparison table

	Laser beam divergence angle/(mrad)	Theodolite angle value		Axis consistency/(")
		Horizontal/(")	Vertical/(")	
Calibration	0.86	15.26	19.02	9.87
Actual	0.861 7	15.03	18.83	9.63
Difference	0.001 7	0.23	0.19	0.24

## 5 结论

本文针对光电多功能检测仪器,综合多参量的检测原理及特点,设计出一套集成激光光束质量分析、光电自准直、激光自准直和轴一致性检测为一体的光电多功能检测仪光学系统。采用带有中心平面的、可移动的摄远复曲面物镜,解决了不同波段成像面与 CCD 敏感面不重合以及如何保持激光指示光束准直度的难题。设计了扩展口径至 400 mm 的扩束系统,实现了 300~1 700 nm 光谱范围光电仪器的多参量检测,准直准确度  $2''$ ,满足了系统集成化、简易化、轻型化、准确度高的要求。

### 参考文献

- [1] BULYDIN F, IOVALEV A, MARAMZIN K. Measurement of the quality of laser beams by methods of fourier optics[J]. *Measurement Techniques*, 2006, **49**(10): 1015-1020.
- [2] LI Gang, ZHOU Bing, SUN Xin-hua, et al. Laser guidance device emitted laser beam divergence angle and parallel to the optical axis of easy detection method[J]. *Optical Technology*, 2004, **30**(5): 628-629, 636.  
李刚,周冰,孙新华,等.激光制导装置出射激光束散角和光轴平行性的简易检测方法[J]. *光学技术*, 2004, **30**(5): 628-629, 636.
- [3] SHEN Lin, YANG Jin-hua, HAN Fu-li, et al. Based on the spot of the laser beam divergence angle image measurement method[J]. *Ordnance*, 2011, **32**(7): 890-895.  
申琳,杨进华,韩福利,等.基于光斑图像的激光束散角测量方法研究[J]. *兵工学报*, 2011, **32**(7): 890-895.
- [4] YANG Jin-hua, HU Nan. Photoelectric method test divergence angle of the laser beam[J]. *Changchun University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, **32**(4): 527-530.  
杨进华,胡楠.光电法测试激光束散角研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2009, **32**(4): 527-530.
- [5] ZHOU Jian-kang. Using image fusion to improve the dynamic range of the CCD laser spot detection[D]. Suzhou: Soochow University, 2006.  
周建康.利用图像融合提高 CCD 的动态范围进行激光光斑检测[D].苏州:苏州大学,2006.
- [6] JIN Wei, WANG Xia, ZHANG Qi-yang, et al. Multi-axis consistency detection technology progress and analysis[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(3): 526-531.
- [7] CHEN Xi, WANG Yue-feng, FAN Dong. Multi-axis optical system axis parallel field test method[J]. *Applied Optics*, 2002, **23**(5): 46-48.  
陈曦,汪岳峰,樊东,等.多光轴光学系统光轴平行度野外试验方法[J]. *应用光学*, 2002, **23**(5): 46-48.
- [8] LI Hong-zhuang, ZHANG Zhen-duo, CAO Jing-tai, et al. High magnification zoom focal length optical system design[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 358-363.  
李宏壮,张振铎,曹景太,等.长焦距超高倍率变焦距光学系统设计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(3): 358-363.
- [9] HUANG Lei, HU Wen-wen, YANG Zhi-wen. Broad spectrum, long focal length collimating lens optical design[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(S2): 1252127.  
黄雷,胡雯雯,杨志文.宽光谱、长焦距准直物镜光学设计[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(S2): 1252127.
- [10] SONG Yan-yan, WANG Ke-wei, HU Ling, et al. Photovoltaic system optical axis parallelism detection method[J]. *Applied Optics*, 2009, **30**(5): 802-805.  
宋严严,王科伟,胡玲,等.光电系统光轴平行性检测方法研究[J]. *应用光学*, 2009, **30**(5): 802-805.
- [11] MIAO Xing-hua, XUE Ming-qiu, AN Bao-qing. Long focal length collimator. Chinese patent. ZL Patent No. 99256104.3.  
苗兴华,薛鸣球,安葆青.长焦距平行光管.中国专利. ZL 专利号 99256104.3.
- [12] LI Ming, AN Zhi-yong, ZHU Hai-bing, et al. Multi-infinity optical axis coplanar target simulation device testing technology research [J]. *Changchun University of Technology: Natural Science Edition*, 2010, **33**(1): 26-28.  
李明,安志勇,朱海滨,等.多无限远目标模拟装置光轴共面测试技术研究[J]. *长春理工大学学报:自然科学版*, 2010, **33**(1): 26-28.
- [13] CHENG Hui-quan, YAO Wei-yong, YANG Guo-guang. The imaging of the binary panoramic annular lens based on the combined perspective technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(9): 1111-1114.  
程惠全,姚炜勇,杨国光.基于二元光学色差校正的全景环形成象系统设计. *光子学报* 2001, **30**(9): 1111-1114.
- [14] WANG Hu, MIAO Xing-hua, HUI Bing. The distortion correct of short focus wide-angle optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(11): 1409-1412.  
王虎,苗兴华,惠彬.短焦距大视场光学系统的畸变校正[J]. *光子学报*, 2001, **30**(11): 1409-1412.
- [15] ZHOU Rui, FANG Jian-cheng, ZHU Shi-ping. Spot size optimization and performance analysis in image measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000, **21**(2): 177-179.  
周锐,房建成,祝世平.图像测量中光斑尺寸优化及性能分析[J]. *仪器仪表学报*, 2000, **21**(2): 177-179.
- [16] CHAN J, HENDEY G, BERGMAN K, et al. Physical-layer modeling and system-level design of chip-scale photonic interconnection networks [J]. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2011, **30**(10): 1507-1520.
- [17] ROBERT H, BARKHOUSER, STEPHEN A, MARGARET M, et al. Optical and optomechanical design of the WIYN High Resolution Infrared Camera[C]. //Ground-based instrumentation for astronomy, 2004: 921-931.
- [18] CLEMENS D, SARCIA D, GRABAU A, et al. Mimir: A near-infrared wide-field imager, spectrometer, and polarimeter[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2007, **119**(862): 1385-1402.