

大口径近红外波前检测装置光机设计

周家淳 高天元

Opto-mechanical design of large-aperture near-infrared wavefront detection device

ZHOU Jiachun, GAO Tianyuan

引用本文:

周家淳, 高天元. 大口径近红外波前检测装置光机设计[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 943–951. DOI: 10.5768/JAO202344.0501001

ZHOU Jiachun, GAO Tianyuan. Opto-mechanical design of large-aperture near-infrared wavefront detection device[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(5): 943–951. DOI: 10.5768/JAO202344.0501001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0501001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

红外自适应系统中双波段望远镜与红外物镜设计

Design of dual-waveband telescope and infrared objective in infrared adaptive system

应用光学. 2017, 38(1): 19–23 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0101004>

大口径折反式中波红外衍射望远镜系统设计

Design of catadioptric middle infrared diffractive telescope system with large aperture

应用光学. 2021, 42(5): 767–774 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501002>

多光谱共孔径无穷远目标器设计

Design of multi-spectral common aperture infinity collimator

应用光学. 2018, 39(3): 339–342 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0301007>

近红外超透镜的设计与制备

Design and fabrication of near-infrared metalens

应用光学. 2021, 42(6): 1102–1106 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0604002>

大口径光学元件表面疵病在位检测与评价研究

In situ detection and evaluation of surface defects for large-aperture optical elements

应用光学. 2019, 40(6): 1167–1173 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0605005>

可见-短波红外波段光谱模块光机装调及分析

Opto-mechanical assembly and analysis of spectral module in visible-short wave infrared band

应用光学. 2019, 40(2): 193–201 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 05-0943-09

大口径近红外波前检测装置光机设计

周家淳, 高天元

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 自适应光学校正系统的主要功能是校正入射光的波前失真和补偿波前畸变, 为了测量自适应光学系统的波前误差, 采用非球面技术研制了一种工作波长为 1 030 nm 的波前检测装置。装置能够探测通光口径为 200 mm×80 mm 的大尺寸近红外矩形光束的波前, 系统的中心视场 PV 值为 0.123 λ , RMS 值为 0.036 1λ , 成像质量良好。在光学设计的基础上完成了结构设计, 并在实验室环境下对该装置进行了组装和测试。测试结果表明, 装置的光学参数和机械参数均满足设计的指标要求, 可以完成自适应光学系统的波前检测任务。

关键词: 自适应光学; 矩形光束; 波前检测装置; 结构设计

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0501001

Opto-mechanical design of large-aperture near-infrared wavefront detection device

ZHOU Jiachun, GAO Tianyuan

(College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China)

Abstract: The main function of an adaptive optics correction system is to correct for wavefront distortion and compensate for wavefront distortion of incident light. In order to measure the wavefront error of the adaptive optics system, a wavefront detection device with a working wavelength of 1 030 nm was developed using non-spherical technology. The device could detect the wavefront of a large-size near-infrared rectangular beam with a clear aperture of 200 mm×80 mm, and the center field of view of the system had a PV value of 0.123 λ and an RMS value of 0.036 1λ , which indicated the imaging quality was good. Based on the optical design, the structural design of the device was completed and the device was assembled and tested in the laboratory environment. The test results show that the optical and mechanical parameters of the device meet the design specifications and can complete the wavefront detection task of the adaptive optics system.

Key words: adaptive optics; rectangular beam; wavefront detection device; structural design

引言

自适应光学技术是一种优化光学系统的方法, 这种技术的原理是使用波前传感器来测量光学畸变, 并使用控制器对变形镜进行调整以消除畸变, 从而提高图像质量并提高系统的性能, 通常用于天文目标观测^[1-3] 和空间激光通信^[4-6] 等领域。由

于其产生的波前畸变是动态变化的, 这就需要设计一种波前检测装置能够精确测量波前误差并及时反馈。然而, 变形镜尺寸的增加致使波前检测装置的通光口径增大, 这大大增加了设计难度。自适应光学系统中波前检测单元的设计难点在于, 如何在满足共轭成像和小体积的约束下,

收稿日期: 2023-02-08; 修回日期: 2023-03-26

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (20200401054GX)

作者简介: 周家淳 (1998—), 男, 主要从事现代光学测试理论与技术研究。E-mail: anthony.j.c@foxmail.com

通信作者: 高天元 (1970—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事现代光学技术及工程应用的教学和科研工作。

E-mail: gty@cust.edu.cn

完成对矩形大口径近红外光束波前像差的检测与评估。

为了满足大口径波前检测的要求,研究人员已开展了相关工作。WANG D 等人基于开普勒望远系统,使用双透镜对 260 mm×260 mm 矩形口径光束进行压缩,尽管如此,这个开普勒系统的总焦距还是达到了 2.05 m^[7]。虽然使用了反射器件来折叠光路,但检测单元仍然很大,并且只能测量单个参数。LI S S 在高质量近场光束高功率激光系统的研究中,采用 10× 压缩比的缩束系统,将光束直径压缩至 6 mm^[8],然而,望远系统的筒长达到了 1.3 m。相里微等人则采用放大倍率为 11× 的无焦开普勒系统,采用 150 mm×150 mm 的方形通光口径进行波前检测,但其筒长达到 2.42 m^[9]。FOURMAUX S 等人在 200 TW 激光系统的波前校正研究中,使用开普勒望远系统压缩了一束直径约 75 mm 的光束,以满足波前传感器的靶面要求,但其光学筒长仍很大,接近 1.04 m^[10]。张禹、杨忠明等设计的 450 mm 大口径多光谱通道波前测量系统,可以实现可见光、近红外和中红外多波段的单一参数波前的测量^[11-12],但是由于口径过大,装置的体积无法实现小型化。

在尺寸限定的条件下,目前的技术方案未能满足自适应光学校正系统共轭探测的需求,本文为解决该问题开展了相关工作。首先,根据探测口径大、共轭成像以及近红外光束波前探测的技术要求,基于开普勒望远系统的成像原理,确定采用大倍率光束压缩后分光探测的方案。其次,为了解决高压缩比、筒长限制和长出瞳距的问题,主缩束系统使用了双高斯初始结构来消除像差,并利用非球面技术来保证成像质量,同时利用摄远成像原理压缩筒长,优化出瞳距。再次,根据主缩束系统、光瞳探测系统和光轴探测系统的技术指标要求,分别对相关部件进行了机械结构设计,并建立了波前检测装置的三维结构模型,为实验平台的搭建提供依据。最后,搭建相关实验,对装置进行测量和测试,验证设计结果。

1 设计指标与主缩束系统

波前检测装置的总体光路示意图如图 1 所示,包括主缩束系统、光瞳探测系统、光轴探测系统和哈特曼波前传感器。主缩束系统将大口径近红外光束压缩到传感器能够接收的范围,并在相应的

出瞳位置处安装哈特曼波前传感器,使其与变形镜满足共轭条件。在经过变形镜校正后,光束在哈特曼传感器像面上形成阵列光斑,用来检测波前误差。光瞳探测系统配合主缩束系统完成对光轴的搜索,光轴探测系统配合主缩束系统对光轴进行精调。

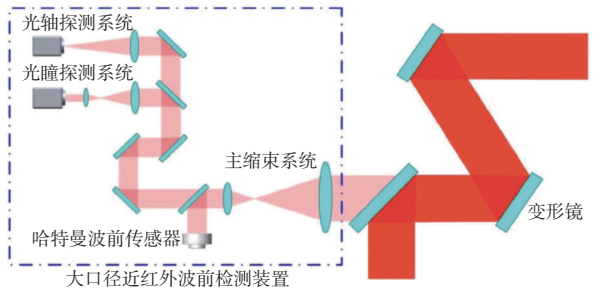


图 1 波前检测装置总体光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of overall optical path of wavefront detection device

1.1 装置技术指标

表 1 是波前检测装置的技术指标。主缩束系统的放大倍率、视场和入瞳位置决定了该系统的初始结构。光学系统的进一步优化方向取决于 1 030 nm 处的工作波长和入射光瞳的共轭位置。

表 1 波前检测装置技术指标

系统指标	数值
主缩束系统倍率	11.9
主缩束系统通光口径/mm	200×80
视场/(°)	±2.89
波长/nm	1 030±1
主缩束系统筒长/mm	≤265
主缩束装置出射光束准直度/(°)	≤0.02
主缩束系统入瞳位置/mm	500
主缩束系统配合光轴探测子光学系统等效焦距/m	5.5±5%
光轴探测子光学系统焦距/mm	462±2%

考虑到安装调试的复杂性,632.8 nm 干涉仪的波长也要考虑在内。此外,本装置使用了哈特曼波前传感器和两个 CCD(charge coupled device)相机,哈特曼波前传感器结构简单、稳定,易于操作,不需要参考光,并可以同时探测光束的相位和强度,相比传统的测量方法更加方便快速^[13]。在结构设计中应在不同的位置设置衰减片,以满足不同传感器对入射光的不同能量要求。

1.2 主缩束系统光学设计与分析

自适应光学系统的像差控制非常重要,在设计光学系统时,针对望远系统采用双高斯初始结构来消除畸变、彗差和色差等,并通过非球面技术消除大口径透镜引起的球差。哈特曼波前传感器位于主缩束系统的出瞳位置,负责对入射光进行波前探测,由于其靶面尺寸的限制,大口径近红外入射光需要进行大倍率光束压缩。缩束光学系统本质上是无光焦度望远系统,具有 200 mm×80 mm 的通光口径和 215 mm 的等效圆形口径。尽管检测的光束具有矩形孔径,但在具体设计时应基于矩形口径的外圆直径设计光学系统。与伽利略望远镜系统相比,开普勒望远镜系统可以实现图像传输,具有物像共轭关系,从而允许自适应校正,因此选择了开普勒望远镜系统作为光学系统的初始结构。

根据装置的指标要求,使用非球面方形镜作为

缩束系统的主镜,使得主缩束系统的光学筒长达到最小。由于系统成像的光斑直径较大,所以需要适当调整光学系统的参数,使其焦点位置与哈特曼传感器的像面距离合适,从而得到更好的像质。最终优化后的光学结构如图 2 所示。

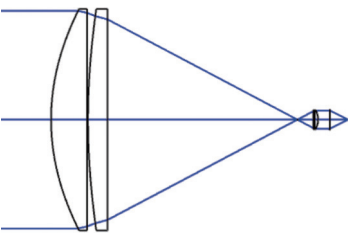


图 2 主缩束系统光学结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical structure of main beam-shrinking system

用 zemax 软件对初始结构优化后,为了方便安装与调试,调整了相关镜片的口径余量,最终的透镜数据如表 2 所示。

表 2 主缩束系统透镜数据

Table 2 Lens data of main beam-shrinking system

表面类型	曲率半径/mm	厚度/mm	材料	4阶项	6阶项	8阶项
偶次非球面	200	33	H-ZF7LA	-1.70×10^{-8}	-2.16×10^{-13}	-3.69×10^{-18}
标准面	∞	1	—	—	—	—
偶次非球面	636	18	H-ZF7LA	-5.39×10^{-9}	-1.55×10^{-14}	1.12×10^{-19}
标准面	∞	174.75	—	—	—	—
标准面	∞	1.5	H-ZF7LA	—	—	—
偶次非球面	-53.3	0.1	—	-1.19×10^{-5}	1.01×10^{-7}	-2.71×10^{-10}
标准面	∞	2.8	H-ZF7LA	—	—	—
偶次非球面	-16.8	10.72	—	4.41×10^{-5}	2.55×10^{-8}	1.31×10^{-10}
近轴面	—	16.81	—	—	—	—

主缩束系统的缩束倍率为 11.9, 出瞳距离为 16.8 mm, 在入瞳为 500 mm 的情况下满足物像共轭关系, 并且筒长 258.68 mm, 小于 265 mm, 达到了装置的系统指标要求。

对设计优化的主缩束系统进行像质评价,通过分析评估,近红外光线在像面上的点列图如图 3 所示,并分别给出了缩束系统在 0 视场、1/2 视场和边缘视场的波前图,如图 4 所示。中心视场 PV (peak-valley) 值为 0.123λ , RMS (root-mean-square) 值为 0.0361λ ; 边缘视场 PV 值为 0.302λ , RMS 值为 0.0689λ ($\lambda=1030\text{ nm}$), 表明该系统的像质优秀,可以满足波前检测的要求。

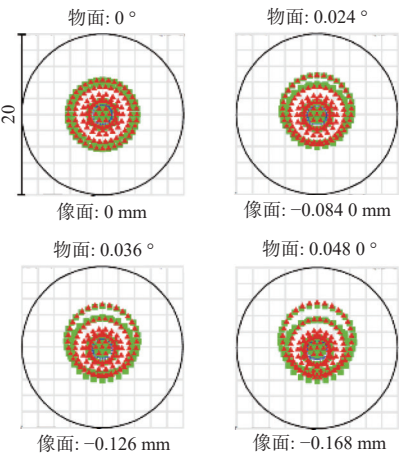


图 3 追迹光线的点列图

Fig. 3 Spot diagram of tracing lights

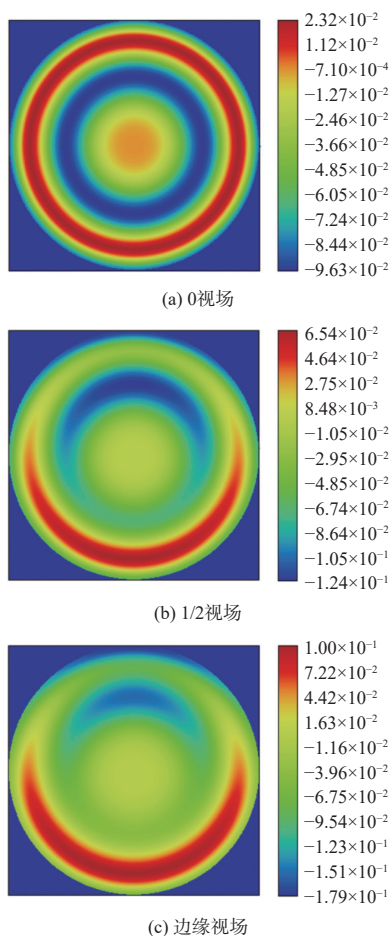


图 4 波前图

Fig. 4 Wavefront diagram

2 装置结构设计

2.1 总体结构

使用 SOLIDWORKS 软件建立三维结构模型, 最终结果如图 5 所示, 主缩束系统是测量系统的主要组成部分, 其他子系统被连接到装置的框架上, 如图 5(b) 所示。由于主缩束系统采用开普勒望远系统结构形式, 主镜与次镜之间距离受温度影响

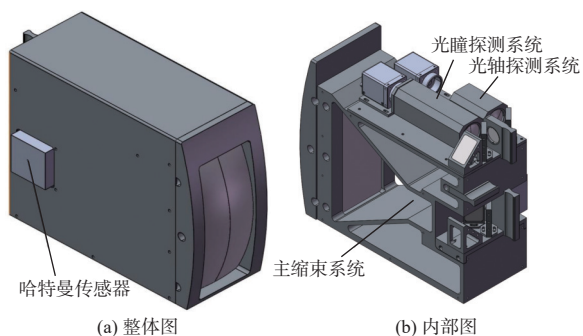


图 5 波前检测装置结构图

Fig. 5 Structure diagram of wavefront detection device

较大, 为了减小温度的影响, 主框架采用 TC4 钛合金作为结构材料, 其优点包括高强度和优异的耐热性(低热膨胀系数)。经过 zemax 模拟仿真, 光轴探测系统和光瞳探测系统受温度影响较小, 故采用 6061 铝合金。

波前检测装置机械性能要求如表 3 所示, 机械结构按照表中要求进行设计。

表 3 波前检测装置整体性能指标

Table 3 Overall performance indexes of wavefront detection device

整体性能	技术要求
环境适应性	方便运输、易于安装、抗霉菌、抗腐蚀抗锈、 户外环境温度-30℃~+60℃
装置重量/kg	<20
外形尺寸/mm ³	<300×120×250

2.2 主缩束系统结构

基于给出开普勒式望远系统的光学设计方案, 对主缩束系统进行机械结构设计。本装置中主缩束系统直接接收变形镜的反射光线, 是共轭波前探测的重要组成部分, 其主次镜面形及装配精度是影响波前探测及成像质量的重要因素之一, 因此主缩束系统的结构设计是波前检测装置的设计重点。

2.2.1 主镜固定结构

非球面方形镜作为主缩束系统的主要组件, 在结构设计上需要考虑诸多的因素: 1) 非球面主镜的整体结构稳定性; 2) 降低支撑结构对主镜镜面面形的影响; 3) 利于主镜的装配及调整。非球面主镜的通光口径为 200 mm×80 mm, 材料为 H-ZF7LA 玻璃, 图 6 为主缩束系统非球面主镜结构设计示意图。

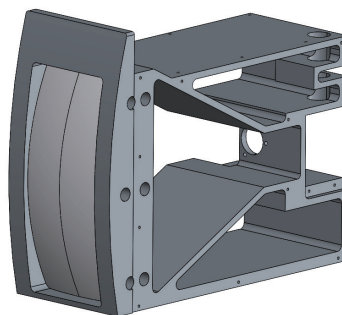


图 6 主缩束系统主镜结构设计示意图

Fig. 6 Schematic diagram of main-mirror structure design of main beam-shrinking system

本装置选择胶粘技术对主镜进行连接, 该技术在降低机械结构复杂程度的同时, 也能简化装配工艺、减少加工难度及减轻整体装置的质量^[14]。黏接剂则采用了硅橡胶, 黏接后的结构轻、成本低, 应力的分布更加均匀, 柔性更好。考虑到粘接剂自身属性、粘接层的厚度及粘接表面的清洁度, 本装置采用沿方形镜两条长边粘接的分布方案。

2.2.2 次镜组结构

如图 7 所示为主缩束系统次镜镜筒, 利用隔圈依次保证次镜 1 和次镜 2 两枚透镜间正确的空间位置, 隔圈与镜片的接触为尖角形式, 透镜的间隔误差为 $\pm 0.05\text{ mm}\sim 0.1\text{ mm}$, 最后使用螺纹压圈对整个镜组进行固定。在镜筒圆周上 120° 角等分设置了 3 个螺纹孔, 使用螺钉与装置框架连接定位, 并使用垫圈进行位置的微调。

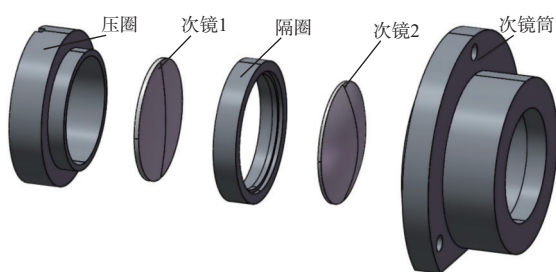


图 7 主缩束系统次镜镜筒结构图

Fig. 7 Structure diagram of secondary mirror tube of main beam-shrinking system

2.2.3 主框架结构

装置的主框架的结构模型如图 8 所示, 为了减轻装置重量, 在保证主框架结构强度的基础上, 采用框架式设计, 去除了多余的金属材料。根据设计需要, 在主框架结构的顶部进行通孔处理, 孔的直径为 20 mm , 目的是让光线顺利进入顶层。此外, 在主框架结构的后方预留了孔洞和槽位用来固定衰减片。

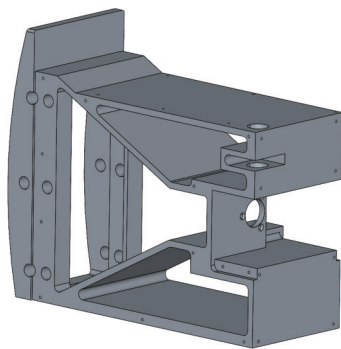


图 8 主框架结构设计示意图

Fig. 8 Schematic of design for main frame structure

2.3 分光结构

装置的分光结构较为复杂, 应用 zemax 软件模拟折叠光路, 优化折叠方案后, 采用 2 块分光片对光束进行分割, 并使用了 4 块平面反射镜对光路进行折叠。反射镜和分光镜均采用注胶的方式固定于镜框上, 镜框结构如图 9 所示, 均有 6 个注胶孔, 为了避免胶粘后应力造成镜面变形, 所以选取硅橡胶作为粘接剂。由于反射镜和分光镜的位置误差与镜框的材料无关, 为了进一步减轻重量, 提高镜框的加工性能, 镜框材料选取 6061 铝合金, 该材料具有中等强度和良好的外形尺寸稳定性、良好的可加工性以及优良的可焊接性。安装过程中, 使用修切垫片或添加铜箔的方式来实现分光片与反射镜高度的微调。为了避免带来额外像差, 需要严格控制分光片表面面型。

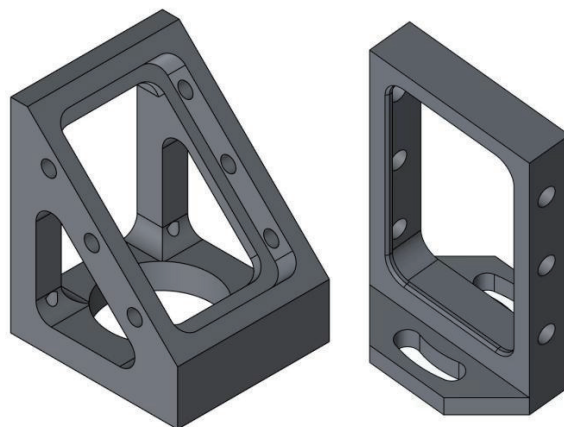


图 9 反射(分光)镜框

Fig. 9 Reflection (spectroscopic) frame

为了便于安装调试, 在装置的后部分光位置和上层位置分别设计了一块基板, 如图 10 所示。作为独立于主结构框架的存在, 可以将分光和反射元件首先单独在基板上进行装调, 在这之后将基板安装到装置的主框架上, 再对整体光路进行微调处理, 这样做的好处是既方便了装调, 又保证了装置的测量精度。

2.4 光瞳探测系统结构

基于优化后的光学系统对光瞳探测系统进行机械结构设计, 针对透射式光学系统设计了光管, 如图 11 所示。为降低装调及机械加工的难度, 对于 3 片式的次镜组采取了镜筒嵌套的方案, 镜筒采用了整体法兰结构形式。镜框及隔圈的机械材料均为 6061 铝合金。

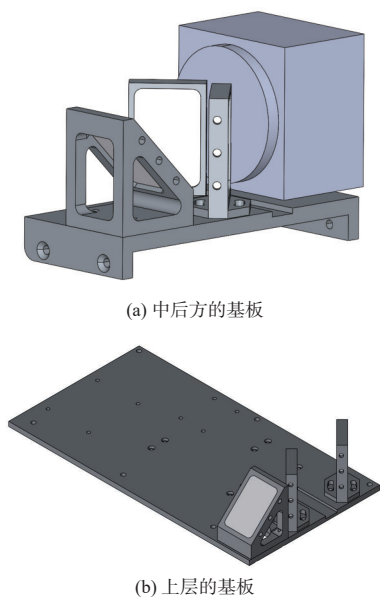


图 10 光学元件在基板上的分布示意图

Fig. 10 Schematic diagram of distribution of optical elements on substrate

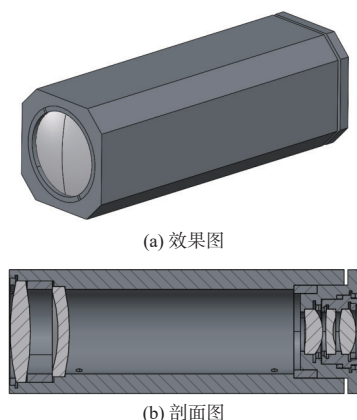


图 11 光瞳探测系统结构图

Fig. 11 Structure diagram of pupil detection system

本文设计的光瞳探测系统次镜属于小口径光学元件,透镜组件都经过了磨边处理,采用镜片与镜筒内壁间隙配合的结构形式,径向间隙 0.025 mm,通常情况下圆形光学零件的固定方法有轱边法及压圈法^[15],由于所设计的透镜组及隔圈都为圆形光学零件,所以选取压圈法进行固定。

2.5 光轴探测系统结构

光轴探测系统则使用远场镜筒成像的方法来帮助校正光轴,通过 zemax 软件对光学系统进行设计,最终的优化结果表明,光轴探测系统位于主缩束系统出瞳面后 400 mm 处,焦距为 462 mm,配合前置 11.9 倍主缩束系统,等效焦距为 5.5 m。

基于优化后的光学方案对光轴探测系统进行结构设计,如图 12 所示。和光瞳探测系统的设计方案类似,此处为 2 片式的结构单独设计了一个镜筒,使用螺纹压圈和隔圈将镜片安装至镜筒内,再将其作为一个整体安装至光管内部,单透镜则采用压圈法固定。

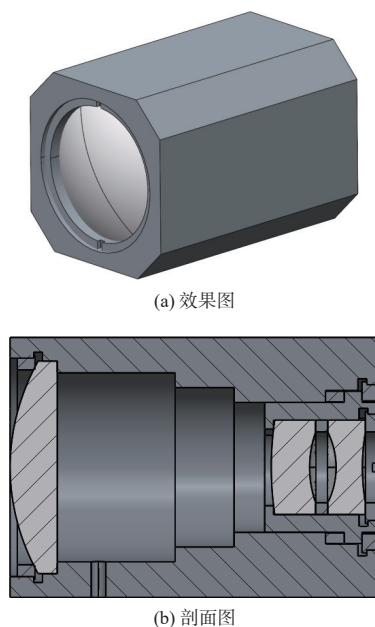


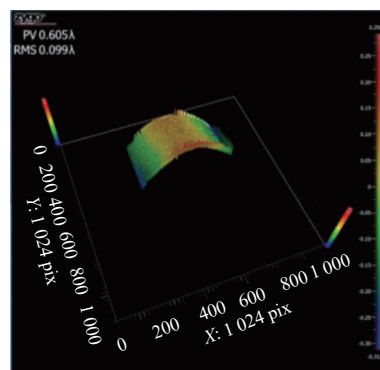
图 12 光轴探测系统结构图

Fig. 12 Structure diagram of optical axis detection system

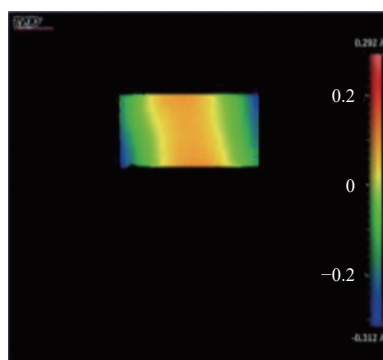
3 检测及检测结果

3.1 缩束系统主镜面形分析

本课题采用了非接触式的干涉仪测量法对非球面方形镜进行面形测量,根据 zemax 设计结果,主缩束系统的成像质量已达到波前检测的指标要求。在非球面光学元件加工完成后搭建了实验平台,如图 13 所示,利用 zygo 干涉仪对其进行面型测量与分析。



(a) 表面



(b) 伪彩色



(c) 干涉

图 13 主缩束系统主镜面形分析

Fig. 13 Analysis of main mirror shape of main beam-shrinking system

通过对实验结果进行分析,非球面方形镜的PV值为 0.605λ ,RMS值为 0.099λ 。将面型的zernike系数带入zemax文件中进行模拟仿真,仿真结果表明,主缩束系统具有较高的成像质量,非球面方形镜的面形误差满足指标要求。

3.2 装置的装调与测试

在实验室中搭建波前检测装置的实验平台。实验室温度保持在 $22\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为50%。在此环境条件下将装置的各零部件组装起来,并对整机的光学指标和机械指标进行测量和测试,确认装置是否满足设计需求。

3.2.1 装置的装调

在装调装置前,首先将整个光路结构划分成了几个位置相近且各自承担不同功能的功能分区。在装调过程中以功能分区为单位,对每个分区内的元件进行统一安装和调试。由于光学系统设计时兼顾了 632.8 nm 的干涉仪波长,因此本装置主要使用干涉仪进行装调。图14展示了装置安装调试完成后的状态。

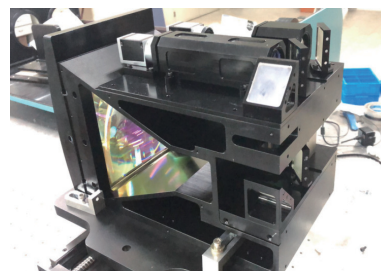


图 14 大口径近红外波前检测装置

Fig. 14 Large-aperture near-infrared wavefront detection device

3.2.2 光学系统指标检测

本课题中为了完成正确的波前测量,必须保证波前检测装置检测到的波前与由变形镜校正的波前具有相同的物理值,这就要求主缩束系统像面的位置应与变形镜共轭。因此变形镜被设定在距离主缩束系统 500 mm 位置处,哈特曼波前传感器被定位在出瞳处,下面计算出瞳入瞳位置是否满足共轭关系。

使用焦距测量仪测得主缩束系统主镜焦距为 200.08 mm ,次镜焦距为 16.81 mm ,已知物像关系表征基本公式为

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}$$

当 $l=-500\text{ mm}$ 时, $l'=16.8\text{ mm}$,此时出瞳位置为 16.8 mm ,与设计指标相吻合。

光轴探测系统不仅负责对系统光轴进行精调,还承担着分析光束质量的任务,相关测试结果如表4所示。

表 4 光学指标检测结果

Table 4 Test results of optical indexes

名称	检测项目	技术指标要求	检测结果	检测设备
光轴探测系统	焦距/mm	462	462.5	焦距测量仪
复合传感器	焦距/m	5.5	5.5	焦距测量仪

哈特曼传感器与两个CCD相机的图像如图15所示。其中,波前传感器的光斑阵列图像可用于测量主缩束装置出射光准直度,方法是通过比对阵列光斑质心偏移量及焦距计算平行度,结果为 0.018° ,满足 $\leq 0.02^{\circ}$ 的技术指标要求。

为了进一步分析装置的光束质量,利用系统周围能量曲线中83.6%能量点的成像光斑与衍射限制光斑尺寸的比值来近似等效光束质量。图15(c)

的实验结果表明,光束质量因子 β 优于 1.2 倍衍射极限,满足了装置的设计要求。

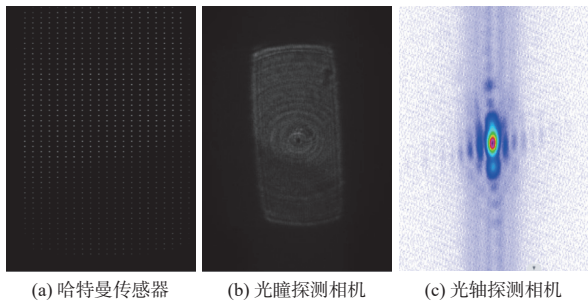


图 15 各传感器的接收图像

Fig. 15 Received images of each sensor

3.2.3 机械系统指标检测

本节对所设计的波前检测装置的机械结构进行测量和测试,主要为尺寸和重量的测量。用游标卡尺测量尺寸,结果如表 5 所示,均满足机械结构的安装要求。

表 5 部件与整机外形尺寸
Table 5 External dimensions of parts and whole machine

名称	安装要求 (长×宽×高)	检测结果
光瞳探测光学系统	<123×45×45	126×44×44
光轴探测光学系统	<70×45×45	63×44×44
整机	<300×120×250	299.9×120.1×249.8

用电子秤测量整机重量为 18.9 kg,满足技术指标小于 20 kg 的要求。

预留接口方面,本装置在机械结构设计时已在外壳上预留了相关孔位,用来保证光学探测子系统的供电与图像传输。此外在装置的内部喷涂了消光漆,抑制了装置内可能出现的杂散反射光,表面黑色氧化抗腐蚀处理,整体处理效果如图 16 所示,能够满足波前检测需要。

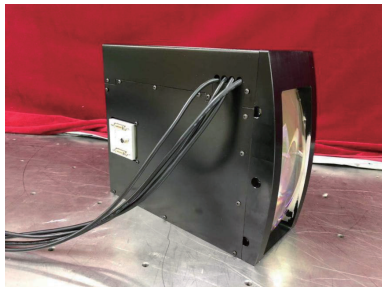


图 16 整体处理结果

Fig. 16 Overall processing result

4 结论

本文对大口径近红外变形镜波前检测装置进行设计,根据装置的指标要求设计了主缩束系统,采用开普勒式望远系统以满足自适应光学共轭探测的需求。在光学设计的基础上对主缩束系统、光瞳探测系统和光轴探测系统的机械结构进行设计,有效地压缩了装置的结构尺寸,应用了自研的高灵敏度哈特曼波前传感器,提高了测量范围、效率和精度。设计完成后对装置进行装调与实验,对主缩束系统非球面方形主镜进行了面形测量,结果表明光学元件具有较好的成像质量,此外还分别测量和测试了装置的光学参数和机械结构,结果均满足技术指标的要求。所设计的波前检测装置具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] CAHOY K L, MARINAN A D, NOVAK B, et al. Wavefront control in space with MEMS deformable mirrors for exoplanet direct imaging[J]. *Journal of Micro/Nanolithography MEMS and MOEMS*, 2014, 13(1): 011105.
- [2] 饶长辉, 朱磊, 张兰强, 等. 太阳自适应光学技术进展[J]. *光电工程*, 2018, 45(3): 170733.
RAO Changhui, ZHU Lei, ZHANG Lanqiang, et al. Development of solar adaptive optics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170733.
- [3] RAO CH H, GU N T, RAO X J, et al. First light of the 1.8 m solar telescope-CLST[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2020, 63(10): 1-2.
- [4] CHEN M, LIU CH, RUI D M, et al. Performance verification of adaptive optics for satellite-to-ground coherent optical communications at large zenith angle[J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4230.
- [5] CHEN M, LIU C, RUI D, et al. Experimental results of atmospheric coherent optical communications with adaptive optics[J]. *Optics Communications*, 2019, 434: 91-96.
- [6] 芮道满, 刘超, 陈莫, 等. 自适应光学技术在星地激光通信地面站上的应用[J]. *光电工程*, 2018, 45(3): 170647.
RUI Daoman, LIU Chao, CHEN Mo, et al. Application of adaptive optics on the satellite laser communication ground station[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170647.
- [7] WANG D, ZHANG X, DAI W J, et al. 1178 J, 527 nm near diffraction limited laser based on a complete closed-loop adaptive optics controlled off-axis multi-pass ampli-

- fication laser system[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: 1-12.
- [8] LI S S, WANG Y L, LU ZH W, et al. High-quality near-field beam achieved in a high-power laser based on SLM adaptive beam-shaping system[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 681.
- [9] 相里微. 大功率激光波前测量系统设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- XIANGLI Wei. Design of high power laser wavefront measurement system[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
- [10] FOURMAUX S, PAYEUR S, ALEXANDROV A, et al. Laser beam wavefront correction for ultra high intensities with the 200 TW laser system at the advanced laser light source[J]. *Optics Express*, 2008, 16(16): 11987.
- [11] 张禹, 杨忠明, 刘兆军, 等. 大口径多光谱通道波前测量系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(8): 20190559.
- ZHANG Yu, YANG Zhongming, LIU Zhaojun, et al. Design of large aperture multi-spectra channel wavefront measurement system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 20190559.
- [12] 张禹. 共轴式大口径多光谱通道波前测量系统的研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- ZHANG Yu. Research on coaxial large aperture multispectral wavefront measurement system[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [13] 吴道胜. 相位差图像重建技术在液晶自适应光学系统中的应用研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
- WU Daosheng. Application of phase difference image reconstruction technology in liquid crystal adaptive optical system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [14] 郭骏立. 视频相机反射镜组件结构设计及其胶结工艺研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2015.
- GUO Junli. Structural design and cementing technology of mirror assembly for video camera[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [15] 邢辉, 焦文春, 王昀. 透射式红外镜头的高精度定心装调[J]. *红外*, 2013, 34(9): 19-23.
- XING Hui, JIAO Wenchun, WANG Yun. High precision assembling of diffractive infrared lens[J]. *Infrared*, 2013, 34(9): 19-23.