

硕士学位论文

AIMS 望远镜 8μm-10μm 成像终端系统光学装调检测方法研究

作者姓名:	王雅琦					
指导教师:	邓元勇 研究员 国家天文台					
学位类别:	工程硕士					
学科专业:	光学工程					
培养单位:	中国科学院国家天文台					

2021年6月

Study on the method of optical assembling and testing for the

<u>8µm~10µm imaging terminal system of AIMS</u>

A thesis submitted to

University of Chinese Academy of Sciences

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

Master of Engineering

in Optical Engineering

By

Wang Yaqi Supervisor: Professor Deng Yuanyong

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences

June 2021

中国科学院大学

研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明:所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作 所取得的成果。尽我所知,除文中已经注明引用的内容外,本论文不包含任何其 他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献 的其他个人和集体,均已在文中以明确方式标明或致谢。

> 作者签名: 主税 椅 日 期: 2021 年 5 月 31 日

中国科学院大学

学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定,即中 国科学院有权保留送交学位论文的副本,允许该论文被查阅,可以按照学术研究 公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容,可以采用影印、 缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

导师签名: 作者签名: 主雅琦 日期: 2021年5月31日日期: 2021年5月31日

摘要

由我国太阳物理学家率先提出并自主研制的用于太阳磁场精确测量的中红 外观测系统(Accurate Infrared Magnetic field Measurementsof the Sun,简称 AIMS) 是世界上第一台以中红外波段为观测目标的太阳观测设备。其中 8~10µm 波段成 像观测系统是该望远镜的重要终端设备之一,用于系统研究太阳活动的中红外响 应,以新的视角探索潜在的科学机遇,开拓新的领域。

然而开拓新领域也意味着面临更多技术挑战。科学观测目标要求该终端系统 的成像质量须达到衍射极限。而为抑制环境背景噪声,系统需要工作在 100K 的 真空制冷环境中。为尽量减小真空舱的体积,该终端采用了折射式光学系统。在 低温环境中光学元件曲率和折射率的变化,以及结构的形变都会严重影响系统像 质。低温环境导致变化的影响因素非常复杂,目前还没有成熟的经验可循,因此 必须要对该终端系统进行精密的在线检测,并根据检测结果指导系统装调,以保 证实现其科学目标。

本文针对 8~10µm 成像终端系统的高精度装调检测需求,设计了基于可见光 波段和基于红外波段的两种检测装调方案,并设计相应的机械结构,使得两种检 测方法可以实现真空制冷环境下在线切换。其中,可见光波段检测装调方法是先 利用 Zemax 软件模拟 8~10µm 终端系统在可见光波段下可能出现的像差及干涉 条纹,然后与 ZYGO 干涉仪实测结果相对照,再结合 Zemax 仿真判断系统失调 信息,指导系统装调。本文完成了可见光检测装调方法的仿真分析,并利用实验 器件开展了实验验证。实验结果显示实测结果与模拟结果在误差范围内相吻合, 从而验证了可见光波段检测方法具有可行性。

同时,本文对在中红外波段检测的方法也进行了探索,创新性地提出了搭建 基于中红外 8~10μm 连续可调谐激光光源的干涉检测装调方法。该方法采用泰曼 一格林型干涉仪,利用其参考臂可调的优势,弥补光源相干性不足的缺陷,从而 可以实现 8~10μm 终端系统的宽谱段干涉检测。

本文根据8~10µm终端系统的参数设计了透射式和反射式两种型式的激光扩 束系统。两种方法均可同时兼顾8~10µm和可见光双波段的波前质量,从而解决 了肉眼不可见为干涉仪自身装调带来的困难。设计结果表明,利用可见光激光器

Ι

进行干涉仪自身装调,可达到 RMS 0.05λ@0.633μm 的波前精度;在 8~10μm 波 段,干涉仪波前 RMS 值均能优于 0.001λ,可满足待测系统衍射极限的装调检测 需求。

基于上述设计完成了干涉仪系统自校准装调及 8~10µm 终端系统的装调检 测流程,并进行了初步仿真,模拟了待测系统不同失调状态下产生的干涉条纹。 根据模拟结果可以看出,系统的失调可以在干涉图上直观地反映出来。因此根据 条纹的变化能够指导真空制冷工作环境中系统的在线装调。

本研究针对 AIMS 望远镜 8~10µm 终端成像系统在真空低温工作环境中高精 度装调检测的需求,设计了基于可见光波段和基于红外波段进行检测的两种方 案。本文的工作是对红外低温光学系统装调检测方法的探索,所提出的基于中红 外可调谐激光器的泰曼—格林型干涉仪在国内是首次提出和研制,该方法研究成 果可为宽波段红外光学系统的装调检测,以及红外材料光学性能参数的测量提供 参考。

关键词:中红外,干涉仪,光学装调,光学检测

II

Abstract

The Accurate Infrared Magnetic Field Measurements of the Sun (AIMS) which was first proposed and independently developed by Chinese solar physicists is the first mid-infrared solar observation equipment. The imaging observation system in 8~10µm wavebands is one of the important scientific terminals of AIMS. It is used to systematically study the response of solar activities in mid-infrared region, explore potential scientific opportunities and develop new fields from a new perspective.

However, opportunities also mean more challenges. The scientific observation target requires that the imaging quality of the terminal system must reach the diffraction limit. In order to suppress the environmental background noise and improve the SNR, the system needs to work in the vacuum and refrigeration environment of 100K. For reducing the volume of the vacuum chamber as much as possible, the refractive optical system is used in the terminal. But in the low temperature environment, the change of curvature radius and refractive index of optical elements, as well as the deformation of the structure will seriously affect the image quality of the system. These changes are more complex and no mature experience to follow. Therefore, it is necessary to test the terminal system accurately under working condition, and guide the system's assembling according to the test results.

In order to meet the requirements of 8~10µm imaging system for high-precision alignment and detection, two detection schemes based on visible band and infrared band are designed. And the two detection schemes can be switched by a set of mechanical structure. In the visible band scheme, we use ZEMAX to simulate the aberrations and interference fringes of the 8~10µm terminal system firstly. Then it is compared with the measured results of Zygo interferometer. Finally, combined with the ZEMAX simulation results to determine the system misalignment information, so as to guide the adjustment of the system. In this paper, the simulation analysis of visible light detection method is completed, and the experimental verification system is built. The test results are consistent with the simulation results thus the feasibility of using visible band for detection is verified.

At the same time, this paper also explores the detection method in mid-infrared region. For this purpose, we build a mid-infrared interference detection and adjustment system in 8~10µm wavelengths based on continuous tunable laser source and a Twyman-Green interferometer. By taking advantage of its adjustable reference arm, the Twyman- Green interferometer can make up for the lack of coherence of the light source. So that the 8~10µm broadband interferometry can be realized.

In this paper, two types of laser beam expanding system, refractive type and reflection type, are designed according to the parameters of the terminal system. Both methods can take into account the wavefront quality of infrared band and visible band at the same time, so as to solve the difficulty caused by invisible to the naked eye. The design results show that the wavefront accuracy of the interferometer can reach RMS $0.05\lambda@0.633\mu$ m when the interferometer is adjusted by visible laser. In 8~10 μ m band, the wavefront of interferometer in RMS value can be better than 0.001λ . It can meet the requirements of the diffraction limit of the tested system.

Based on the above designs, the self calibration of the interferometer system is completed. And the preliminary simulation of installation and testing process for terminal system in 8~10µm band is completed. The interference fringes of the system under test with different misalignment conditions are simulated. According to the simulation results, the misalignment of the system can be directly reflected in the interferogram. Therefore, according to the change of fringes, it can guide the assembling and adjustment of the system under working condition.

In order to meet the needs of high-precision alignment and detection of the 8~10µm terminal imaging system of AIMS in vacuum and low temperature environment, two detection schemes based on visible light band and infrared band are designed. The work of this paper is a kind of exploration for the alignment and detection of cryogenic optical system. The Twyman-Green interferometer based on mid-infrared tunable laser was put forward and developed for the first time in China.

It not only provides a valuable testing scheme for the $8\sim10\mu m$ terminal imaging system of AIMS, but also provides a new idea and method for the assembling and alignment of broadband infrared optical system, as well as the measurement of infrared material optical performance parameters.

Key Words: Mid-infrared, Interferometer, Assembling and alignment, Optical Inspection

目 录

第1章	章 绪论	1
1.1	课题研究目的和意义	. 1
1.2	红外冷光学系统装调检测方法的现状	4
1.3	论文主要研究内容	. 5
第2重	章 可见光检测方案	7
2.1	引言	. 7
2.2	8~10μm 终端系统在可见光波段的仿真分析	8
2.3	可见光干涉检测方案 2.3.1 可见光干涉检测方案总体设计 2.3.2 可见光干涉检测方案仿真	10 10 11
2.4	实验验证	15
2.5	本章小结	23
第3重	章 红外波段检测方案	25
3.1	引言	25
3.2	红外干涉检测方案总体设计	26
3.3	中红外可调谐激光光源的性能参数	28
3.4	相干性分析	29
3.5	红外探测器	31
3.6	激光扩束系统	31 32 38
3.7	红外干涉仪仿真	40
3.8	红外干涉仪自校准装调方法	42
3.9	8~10μm 光学系统装调检测方法的初步模拟	44
3.10	本章小结	47
第4₫	章 总结与展望	49
4.1	全文总结	49

4.2 未来展望	50
参考文献	51
致 谢	55
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	57

图表目录

图 1.1	AIMS 望远镜整体结构示意图	1
图 1.2	AIMS 望远镜光路系统示意图	2
图 1.3	8~10μm 成像终端系统光路	2
图 1.4	8~10μm 成像终端系统点列图	4
图 2.1	8~10μm 终端成像系统光学元件实物图	8
图 2.2	8~10μm 终端成像系统光学元件反射率曲线	8
图 2.3	模拟可见光入射时的干涉条纹	9
图 2.4	可见光入射时待测系统的泽尼克系数	9
图 2.5	利用 ZYGO 干涉仪配合球面标准镜检测方案光路示意图	
图 2.6	利用 ZYGO 干涉仪平面波入射检测方案光路示意图	11
图 2.7	8~10μm 成像终端系统公差分析结果	12
图 2.8	沿 X 轴倾斜时的模拟干涉条纹	13
图 2.9	沿 Y 轴倾斜时的模拟干涉条纹	14
图 2.10	沿 X、Y 轴偏心时的模拟干涉条纹	14
图 2.11	ZnSe 平凸透镜透过率曲线图	16
图 2.12	全口径入射 ZnSe 平凸透镜时光路图	16
图 2.13	全口径入射 ZnSe 平凸透镜时的波前	17
图 2.14	全口径入射 ZnSe 平凸透镜时的模拟干涉条纹	17
图 2.15	标准球面反射镜的波前	
图 2.16	ZYGO 干涉仪检测 ZnSe 平凸透镜的实测光路	
图 2.17	ZnSe 平凸透镜平面调试结果	19
图 2.18	全口径入射 ZnSe 平凸透镜时的实际干涉条纹	20
图 2.19	小口径入射 ZnSe 平凸透镜时光路图	20
图 2.20	小口径入射 ZnSe 平凸透镜时波前	21
图 2.21	小口径入射 ZnSe 平凸透镜时可见光波段模拟干涉条纹	21
图 2.22	ZYGO 干涉仪小口径入射实测结果	22
图 2.23	离焦 1mm 时模拟干涉条纹	22

图 2.24	离焦 1mm 时干涉仪实测结果23
图 3.1	红外干涉检测方案示意图27
图 3.2	中红外可调谐激光器峰值功率随波长变化曲线28
图 3.3	非球面聚焦透镜结构参数
图 3.4	非球面聚焦透镜点列图
图 3.5	非球面聚焦透镜波前函数
图 3.6	ZnS 材料透过率曲线
图 3.7	不同波长下准直镜组的波前和准直性35
图 3.8	透射式组合系统光路图
图 3.9	透射式组合系统波前
图 3.10	透射式组合系统点列图
图 3.11	反射式离轴抛组合光路图
图 3.12	反射式离轴抛组合波前图40
图 3.13	反射式离轴抛组合点列图40
图 3.14	红外干涉仪光路结构图41
图 3.15	干涉系统波前函数图41
图 3.16	非序列模式下干涉条纹图42
图 3.17	干涉仪装调示意图42
图 3.18	可见光入射时的波前函数43
图 3.19	可见光入射时的干涉条纹44
图 3.20	沿 X 轴倾斜时的条纹变化45
图 3.21	沿 Y 轴倾斜时的条纹变化46
图 3.22	沿 X、Y 轴偏心时的条纹变化46

表 1.1	8~10μm 光学系统参数表	3
表 2.1	ZnSe 平凸透镜结构参数	15
表 2.2	ZnSe 平凸透镜规格参数	15
表 3.1	中红外可调谐激光器相关参数	28
表 3.2	非球面聚焦透镜规格参数	32
表 3.3	准直镜组设计参数	34
表 3.4	准直镜组在不同波段对应的波前	36
表 3.5	透射式组合系统结构参数	36
表 3.6	离轴抛 35497 规格参数	38
表 3.7	离轴抛 37295 规格参数	38
表 3.8	干涉仪在不同工作波段对应的波前	44

第1章 绪论

1.1 课题研究目的和意义

正在建设中的"用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统"(Accurate Infrared Magnetic field Measurements of the Sun,简称 AIMS)是我国太阳物理学家率先提出并自主研制的世界上第一台专门用于中远红外波段太阳观测的大型设备。该望远镜的主要科学目标是利用中红外的观测优势,实现太阳磁场从"间接测量"到"直接测量"的跨越发展,将现有横场测量精度提高一个量级;并探索目前人类知之甚少的中红外波段所蕴含的新的科学研究机遇。该望远镜研制成功将在太阳物理研究中发挥重要作用。

AIMS 望远镜的整体结构示意图如图 1.1 所示,其光路系统如图 1.2 所示。 由离轴抛物面主镜 M1 和离轴椭球面次镜 M2构成 1 米口径的离轴格里高利系统, 等效焦距为 10m。在 M1 焦面处设置制冷光阑,选择观测视场为 6.4′。在格里 高利焦面后,经过中继光学系统和消旋系统后到达中间焦面,再经过准直、折轴 系统向下传输,最终到达终端仪器平台。



图 1.1 AIMS 望远镜整体结构示意图



图 1.2 AIMS 望远镜光路系统示意图

AIMS 望远镜主要包括两大终端系统:其中高精度磁场观测终端系统采用傅 里叶变换红外光谱仪(FTIR)进行高分辨的偏振光谱观测,以期利用 Mg I 12.32μm 磁敏线实现太阳磁场的直接测量;而 8~10μm 波段成像终端系统的目的是获得高 分辨率成像观测数据,用于系统研究太阳活动的中红外响应^[1-4],以新的视角探 索潜在的科学机遇,开拓新的领域。

8~10μm 终端系统在终端仪器平台所处的位置如图 1.2 中标注部分所示。将 该终端系统光路放大后如图 1.3 所示,图中单位为 mm。



图 1.3 8~10µm 成像终端系统光路

注: 1—一次成像镜组 L1、L2; 2—真空舱窗口; 3—场镜; 4—干涉滤光片; 5—制冷光

阑; 6一二次成像镜组 L3、L4; 7—探测器感光面

准直光束经分束镜分光后,将 8~10µm 波段的光入射到该终端系统,经过一次成像镜组会聚后,再经由场镜将中间瞳面成像于二次成像镜组之前。在中间瞳面处设置制冷光阑,以抑制孔径边缘带来的杂散光。干涉滤光片置于靠近制冷光阑的位置,以限制系统透过波段。再经二次成像镜组将太阳像成像于探测器感光面上。整体光路系统长度为 328mm,系统等效焦比为 3.5,视场角为 6.4′。光学系统参数如表 1.1 所示,系统点列图如图 1.4 所示。

Name	Radius	Thickness	Glass	Semi-diameter
Imager L1	132.397	5.500	ZnS_IR	31.000
	95.718	4.000		31.000
Imager L2	149.277	6.500	ZnSe	31.000
	1265.585	167.086		31.000
Window	Infinity	4.000	ZnSe	15.000
	Infinity	20.000		15.000
Field lens	Infinity	3.500	ZnSe	12.000
	-159.744	3.000		12.000
Foucus	Infinity	73.578		10.000
Cold stop	Infinity	2.000		5.641
Imager L3	21.131	4.000	ZnSe	8.000
	-120.134	2.000		8.000
Imager L4	-36.705	2.500	ZnS	8.000
	66.045	2.336		8.000
	Infinity	27.627		3.809
IMA	Infinity			2.672E-3

表 1.1 8~10µm 光学系统参数表



图 1.4 8~10µm 成像终端系统点列图

科学观测要求 8~10μm 终端系统的成像质量须达到衍射极限,这对系统的装 调提出了较高的要求。由于常温的黑体辐射峰值在 8~10μm,为抑制环境背景, 提高信噪比,场镜、干涉滤光片、制冷光阑、二次成像镜组和探测器等均置于真 空制冷环境中,由真空封窗与外部环境隔开,工作温度为 100K。

在如此低温条件下,光学材料的折射率和元件的曲率均将发生较大的变化, 而这种变化并没有可靠的实测数据可供参考。光学结构也将发生较大形变,材料 不均匀性和加工应力等因素导致的形变非常复杂,仅采用模拟仿真很难与实际结 果相吻合,目前还没有成熟的经验可循,这是系统高精度检测装调所面临的一大 难题。因此为确保成像质量,我们需发展一种可行的装调检测方法,对该终端系 统进行精密的在线检测,并根据检测结果指导系统装调。

1.2 红外冷光学系统装调检测方法的现状

光学元器件及其支撑结构工作在环境温度低于 270K 的光学系统一般被称为 低温光学系统^[5]。目前国内外所展开的低温光学系统的研制和装调检测多集中在 反射式光学系统^[5-10]。反射式光学系统具有无色差、对热灵敏度低的优点,在低 温环境下反射镜组及支撑结构易发生轴向位移,在常温装调时对各光学元件进行 位移补偿即可,因此多被用于低温光学系统中。但反射式系统往往有中心遮拦的

4

问题,而且在真空罐内会占据较多空间。真空舱体积较大,抽真空以及制冷均需 耗费较长时间。而折射式光学系统没有中心遮拦的问题,能够节省真空罐内空间, 可快速制冷,因而可有效降低能耗。但由于红外光学材料热膨胀系数较高,折射 率温度系数随温度变化较大^[11],温度变化给系统成像质量带来的影响较大,往往 给后续装调检测带来较大困难。

通常采用干涉仪进行光学系统的装调检测。干涉仪具有非接触检验的特点, 可以快速准确地获取被测信息,能够实现待测系统处于工作环境中时对其进行在 线检测,并在灵敏度、精度上都优于其它类型的光学测量仪器^[12]。而且可通过干 涉图直观、实时的监视光学系统的整个调试过程,并指明调试方向。调试完毕之 后,还可以通过干涉图,定量计算出光学系统的像质指标。因此干涉仪也可以说 是一种方便的调试设备^[13]。然而关于中远红外折射式光学系统在真空低温环境下 的装调检测方面目前几乎没有可参考的、成熟、系统的方法和经验。

AIMS 望远镜 8~10μm 终端系统采用了折射式光学成像系统设计,其工作温度为 100K,如何在低温环境下实现高精度的装调检测是我们所面临的技术挑战。因此本文主要的目的就是探索研究适用于 8~10μm 终端系统的装调检测方法,解决其在低温环境下在线装调检测的困难。

1.3 论文主要研究内容

本论文第一章介绍了 AIMS 项目背景,以及 8~10µm 终端成像系统的光路结构和相关参数,分析了对其进行在线精密检测装调的必要性,并简要介绍了红外 冷光学系统装调检测的发展现状。针对 8~10µm 终端成像系统,我们确定了采用 干涉仪进行装调检测的方案。

第二章介绍了使用可见光进行检测的方案。首先简要介绍了使用 ZYGO 干 涉仪检测的方案存在的优势,其次给出了针对 8~10μm 终端成像系统而设计的可 见光波段检测方案,并在 Zemax 软件中模拟了在可见光波段可能出现的干涉条 纹。对 8~10μm 终端成像系统进行公差分析,确定了二次成像镜组为敏感元件, 模拟了当其存在失调量时产生的干涉条纹。在实验室通过对 ZnSe 透镜的模拟和 实际检测,确定了以小孔径光束入射的检测方式,并通过模拟结果和实际检测结 果的对比,验证了可见光检测方案具有一定的可行性。

第三章介绍了使用红外波段进行检测的方案。简要介绍了当前国内外红外干

5

涉仪的发展现状,对于可检中红外宽波段光学系统的红外干涉仪的缺乏,我们提出了搭建以中红外可调谐激光器作为光源的泰曼一格林型干涉仪的方案,以此红外干涉仪来实现8~10μm终端成像系统的在线检测装调。分析了该方案的可行性, 对红外探测器、激光聚焦透镜进行了简要介绍和分析,并设计了一组双分离镜组 用于激光束的准直,同时也可用于将平面波会聚成和 8~10μm 成像系统相匹配的 球面波入射到待测系统。在 Zemax 中对红外干涉仪进行了仿真,并对 8~10μm 终端成像系统的装调检测进行了初步模拟,分析了在存在失调时可能产生的干涉 条纹。

第四章主要对两种检测装调方案进行了概括总结,对每种方案的优势以及存 在的缺陷进行了简要分析,并提出进一步改善的方法和设想。

第2章 可见光检测方案

2.1 引言

在可见光波段已有成熟的装调检测方法和仪器,如 ZYGO 干涉仪、4D 干涉 仪以及夏克哈特曼波前传感器等,均可实现 PV λ/20 以上的高精度检测。而且这 些成熟的检测仪器都配备有完善的软件系统,在获得直观的干涉条纹图像同时, 也可以计算出待测系统的像差信息。如 ZYGO 干涉仪所配备的 MetroPro 软件功 能强大,可以根据干涉条纹计算出 36 个 Zernike 系数、峰谷值(PV 值)、标准 偏差(RMS 值)、Strehl 系数,以及 PSF、MTF、圆内能量集中度等,这为利用 可见光波段进行 8~10μm 系统的检测装调提供了有力支持。

基于此,我们可以考虑首先利用 Zemax 光学追迹软件模拟仿真 8~10µm 终端系统处于理想成像状态时,在可见光 0.633µm 波段的像差(泽尼克系数等)及 干涉条纹的形状,并以此作为标准,利用 ZYGO 干涉仪进行实际测量,初步将 干涉条纹调整到与仿真结果一致。然后对比泽尼克系数,再利用追迹软件进一步 仿真分析,采用逆向优化法,判断系统可能存在的失调量,指导系统装调。经反 复迭代最终将系统调整至理想状态。

考虑到可见光波段检测需求,8~10µm 终端成像系统在设计时,光学元件均选择了可见光可透过的 ZnSe 和 ZnS 材料,并在膜系设计时预留了 0.633µm 的透过窗口,系统光学元件实物如图 2.1 所示。



图 2.1 8~10µm 终端成像系统光学元件实物图

图 2.2 为 8~10µm 终端成像系统光学元件反射率实测曲线。由曲线图可见, 元件膜系在 0.633µm 的反射率小于 2%;而从系统光学元件实物也可以看出,无 论是 ZnSe 材料还是 ZnS 材料,在可见光波段均有较好的透明度,因此从系统透 过率上看,可使用 ZYGO 干涉仪对 8~10µm 终端成像系统在可见光波段进行装 调检测。



图 2.2 8~10µm 终端成像系统光学元件反射率曲线

2.2 8~10µm 终端系统在可见光波段的仿真分析

我们利用 Zemax 软件在可见光波段对待测系统进行模拟仿真。将已经完成 优化的 8~10µm 终端系统的各个光学元件工作位置保持不变,并去掉不透过可见 光的干涉滤光片。设定入射波为可见光 0.633µm 的平面波。模拟产生的干涉条纹 如图 2.3 所示,条纹形状为 2 个亮条纹和 3 个暗条纹构成的同心环。当待检的 8~10µm 成像系统工作在真空低温环境时,若能观察到如图所示的条纹,说明待 测系统已基本装调到位。



图 2.3 模拟可见光入射时的干涉条纹

图 2.3 是模拟 8~10µm 成像系统在 100K 温度时,以可见光入射所产生的干 涉条纹。但仅靠肉眼目视来判断条纹显然还比较粗糙,还需要其它指标来为最终 的装调结果提供参考。光学系统的像质评价指标有许多,其中 Zernike 多项式和 光学检测中观测到的像差多项式是一致的,因而常常被用来描述波前特性。 Zernike 多项式的每一项系数都有其特定的意义,均对应一种波像差。因此我们 可根据待测系统在可见光 0.633µm 处的泽尼克系数来指导进一步装调。读取 Zemax 中的系统泽尼克系数如下图 2.4 所示。

Ζ	1	-0.03005581	:	1
Ζ	2	-0.00003826	:	(p) * COS (A)
Ζ	3	0.00042381		(p) * SIN (A)
Ζ	4	-0.02579047	:	(2p^2 - 1)
Ζ	5	-0.00177783	:	(p^2) * COS (2A)
Ζ	6	0.00034897	:	(p^2) * SIN (2A)
Ζ	7	-0.00001507	:	(3p^2 - 2) p * COS (A)
Ζ	8	0.00021348	:	(3p^2 - 2) p * SIN (A)
Ζ	9	0.00316269	:	(6p^4 - 6p^2 + 1)
Ζ	10	-0.0000099	:	(p^3) * COS (3A)

图 2.4 可见光入射时待测系统的泽尼克系数

可见系统主要像差为离焦,然后还有一部分球差。图 2.4 是在理想状态下系统的泽尼克系数。当元件存在装调误差时,干涉图和泽尼克系数会发生一定变化。 在干涉条纹图和泽尼克系数的指导下将系统失调量校正过来,此时图 2.4 中理想状态的泽尼克系数将作为最终定量评价可见光方案装调结果的评价指标。这些参 数将作为系统是否装调到位的判断依据。

2.3 可见光干涉检测方案

2.3.1 可见光干涉检测方案总体设计

在可见光波段使用 ZYGO 干涉仪进行检测。8~10μm 终端系统是以平面波入 射的成像系统,因此检测方案有两种形式可以选择。第一种检测方式是挂载标准 镜头,将平面波转化为球面波后,从 8~10μm 终端系统像方焦点入射,然后用标 准平面镜返回的方式,如图 2.5 所示;第二种检测方式是直接利用 ZYGO 干涉仪 的平面波由系统前端入射,并用标准球面反射镜返回形成干涉的方式,如图 2.6 所示。



图 2.5 利用 ZYGO 干涉仪配合球面标准镜检测方案光路示意图



图 2.6 利用 ZYGO 干涉仪平面波入射检测方案光路示意图

对比这两种检测方式,第一种以球面波入射的方案,如果焦比完全匹配,可 以充分利用 ZYGO 干涉仪的探测器。但现在的问题是现有标准镜的焦比是 F/4.2, 换算到待测系统 0 视场口径为 23.8mm,用不到全口径;第二种方案,8~10µm 终端系统 0 视场口径为 25mm 左右,现有 ZYGO 干涉仪口径为 100mm,能够满 足检测需求。而且第一种方案的检测光路中引入一块平面反射镜,对光路进行转 折,且比第二种方案多经过一块真空封窗,和第一种方案相比,第二种方案显然 更容易实现。而且采用 ZYGO 干涉仪的 ZOOM 功能可以放大干涉条纹区域,在 一定程度上弥补分辨率不足的问题。我们在实测阶段将对两种方案进行尝试,最 终决定采用哪种方案要根据实测结果来确定。

2.3.2 可见光干涉检测方案仿真

为了更有针对性地对待测系统装调,我们首先对 8~10µm 成像系统进行公差

11

分析,以便于判断和确定待测系统中敏感光学件的位置,并对敏感元件的光学结构和微调整结构的设计提出精度要求,从而指导机械装夹与调整机构的设计。敏感元件显然需要有更精密的装卡、调整。尤其是在真空制冷环境中,由于空间有限,仅能够对某个组件提供在线装调的结构,所以找到敏感元件的意义非常重要。

在进行公差分析时,每个光学面包含的数据种类有曲率半径、光学面局部光 圈、玻璃厚度或空气间隔、光学面的偏心和倾斜(分别有 X、Y 两个方向)、以 及和玻璃材料有关的折射率、阿贝数^[14]。本研究中重点考虑在实际应用中和机械 结构装调有关的结构参数的公差分析,即元件在 X、Y、Z 方向的平移,沿 X 轴、 Y 轴的倾斜等。在 Zemax 中以波前质量作为评价指标,采用灵敏度分析模式对 8~10μm 成像终端系统进行公差分析,结果如图 2.7 所示。

最坏偏	离:				
类型			数值	标准	改变
TEDY	12	13	-0.05000000	0.00993047	0.00759731
TEDY	12	13	0.05000000	0.00993047	0.00759731
TEDX	12	13	-0.05000000	0.00993047	0.00759731
TEDX	12	13	0.05000000	0.00993047	0.00759731
TEDY	14	15	-0.05000000	0.00980754	0.00747437
TEDY	14	15	0.05000000	0.00980754	0.00747437
TEDX	14	15	-0.05000000	0.00980754	0.00747437
TEDX	14	15	0.05000000	0.00980754	0.00747437
TIRX	14		-0.02000000	0.00788564	0.00555247
TIRX	14		0.02000000	0.00788564	0.00555247
TIRY	14		-0.02000000	0.00788564	0.00555247
TIRY	14		0.02000000	0.00788564	0.00555247
TIRY	13		-0.02000000	0.00734046	0.00500730
TIRY	13		0.02000000	0.00734046	0.00500730
TIRX	13		-0.02000000	0.00734046	0.00500730
TIRX	13		0.02000000	0.00734046	0.00500730
TETY	14	15	-0.08300000	0.00706772	0.00473455
TETY	14	15	0.08300000	0.00706772	0.00473455
TETX	14	15	-0.08300000	0.00706772	0.00473455
TETX	14	15	0.08300000	0.00706772	0.00473455
topas					

在RSS万法的基础上预计的性能变化:				
名义 RMS	波前	:	0.00233317	
预计变化		:	0.02084664	
预计 RMS	波前	:	0.02317981	

图 2.7 8~10µm 成像终端系统公差分析结果

其中表面序号为 12、13 的面代表的是二次成像镜组中的 L3,表面序号为 14、15 的面代表的是 L4。公差操作数 TEDX、TEDY 表示的是元件沿 X、Y 轴 偏心的误差,TETX、TETY 表示的是元件沿 X、Y 轴倾斜的误差。将图 2.7 的分 析结果整理成下表 2.1。

表 2.1 公差分析结果整理

类型	公差值	波像差变化量
TEDY (L3)	± 0.05 mm	0.00759731λ
TEDX (L3)	± 0.05 mm	0.00759731λ
TEDY (L4)	± 0.05 mm	0.00747437λ
TEDX (L4)	± 0.05 mm	0.00747437λ
TETY (L4)	$\pm 5'$	0.00473455λ
TETX (L4)	$\pm 5'$	0.00473455λ
TETY (L3)	$\pm 5'$	0.00190712λ
TETX (L3)	$\pm 5'$	0.00190712λ

第2章 可见光检测方案

由公差分析结果可见,由L3、L4组成的二次成像镜组的装调误差对波像差影响最为敏感,即二次成像镜组是待测系统中的敏感元件。因此在结构设计中, 对二次成像镜组的机械结构采用能够进行多维调整的结构设计。

所以接下来我们以二次成像镜组为例,模拟其在装调过程中存在不同失调量 时,可能产生的干涉条纹,如图 2.8、2.9、2.10 所示。



图 2.8 沿 X 轴倾斜时的模拟干涉条纹



V=-0.02° V=-0.04° V=-0.06°

图 2.9 沿 Y 轴倾斜时的模拟干涉条纹



图 2.10 沿 X、Y 轴偏心时的模拟干涉条纹

其中图 2.8 和图 2.9 分别为二次成像镜组沿 X 轴和 Y 轴倾斜时产生条纹的仿 真结果,设置倾斜量分别取±0.02°、±0.04°和±0.06°;而图 2.10 为二次成像镜组 沿 X 轴和 Y 轴偏心时产生条纹的仿真结果,设置倾斜量分别取±0.02mm 和±0.03 mm。由仿真条纹变化可见,当二次成像镜组在公差限度内发生失调时,在干涉 图上可以足够灵敏地反映出来。因此根据可见光波段所观察到的干涉条纹变化, 能够较准确地判断出待测系统可能存在的失调量大小和方向,并利用精密调整结 构将失调元件调回最佳状态。

当然由于存在各种加工误差,以及真空制冷环境的影响,实际 8~10µm 终端 系统观测到的条纹远比仿真结果复杂,我们可以利用干涉仪实测的泽尼克系数与 仿真结果相对比,并采用逆向优化的方法进一步判断系统失调量及其产生的原 因,并加以修正,经过反复迭代最终完成系统的装调。

2.4 实验验证

由于 8~10µm 终端系统的光学结构加工尚未完成,为验证利用可见光 ZYGO 干涉仪检测方法的可行性,我们利用实验室现有的红外透镜开展了实验验证。该 透镜为 Edmund 公司型号为 39539 的 ZnSe 平凸透镜,其相关性能参数如表 2.2、表 2.3 和图 2.11 所示^[17]。

Surf	Radius	Thickness	Glass	Semi-diameter
OBJ	Infinity	Infinity		10.000
STO	Infinity	4.600	ZnSe	22.860
2	-140.270	99.084		22.860
IMA	Infinity			6.186E-3

表 2.2 ZnSe 平凸透镜结构参数

表 2.3 ZnSe 平凸透镜规格参数

指标	参数
直径 (mm)	50.80 +0.00/-0.10
中心厚度 (mm)	$4.60\pm\!\!0.10$
有效焦距 EFL(mm)	100@10.6μm
涂层	Uncoated
基底	II-VI Infrared ZnSe
Power (P-V) @ 632.8nm	λ





图 2.11 ZnSe 平凸透镜透过率曲线图

将此透镜的相关参数输入 Zemax 中。首先模拟当入射光以全口径入射时的 情况,光路如图 2.12 所示,波前质量和干涉条纹如图 2.13、图 2.14 所示,其中 图 2.14 是在 X 方向设置了 5 个条纹倾斜量的情况下所得到的干涉图。此时的波 前 PV 值为 15.31λ@0.633μm, RMS 值为 4.54λ@0.633μm,由图 2.14 可见此时的 条纹较复杂,包含较大的像差。



图 2.12 全口径入射 ZnSe 平凸透镜时光路图







图 2.14 全口径入射 ZnSe 平凸透镜时的模拟干涉条纹

实测时,利用 ZYGO 干涉仪出射的准直光束,从 ZnSe 平凸透镜的平面一侧 入射,并以标准球面反射镜将光束返回形成干涉,其中标准球面反射镜的波前如 图 2.15 所示。实测光路如图 2.16 所示。



图 2.15 标准球面反射镜的波前



图 2.16 ZYGO 干涉仪检测 ZnSe 平凸透镜的实测光路

之所以选择从平面一侧入射是考虑到利用透镜平面反射回的光所形成的干

涉条纹,调整透镜姿态,使得视场内仅剩一个条纹,以此来确定平行光束正入射。 由实测图可见,由于加工误差,平凸透镜的平面存在较大的 power,因此调整时 我们把条纹调整为同心环,以减小对接下来测量的影响,调试结果如图 2.17 所 示。



图 2.17 ZnSe 平凸透镜平面调试结果

随后利用标准球面镜,使其球心与透镜焦点重合,将光束返回形成干涉。当 调整到条纹最稀疏时,得到干涉图如图 2.18 所示,其中白色圆圈区域内为 ZnSe 透镜波前的干涉结果。可见其干涉条纹形状与模拟结果基本一致,此时的波前 PV 值为 15.04λ@0.633μm, RMS 值为 3.38λ@0.633μm,和模拟结果相吻合,从 而证实了利用 ZYGO 干涉仪检测不完善系统的可行性。



图 2.18 全口径入射 ZnSe 平凸透镜时的实际干涉条纹

接下来对待测系统处于离焦状态时开展模拟和实测验证。但因为按照被测透 镜全口径检测时存在较大的球差,使得观察到的干涉条纹非常复杂,不易观察和 判断。考虑缩小入射光束的口径可以减小球差,我们在待测透镜前设置了口径为 10mm 的孔径光阑,光路如图 2.19 所示。模拟此时在可见光波段透镜的波前如图 2.20 所示,此时 PV 值为 0.31λ@ 0.633μm, RMS 值为 0.086λ@0.633μm。



图 2.19 小口径入射 ZnSe 平凸透镜时光路图


图 2.20 小口径入射 ZnSe 平凸透镜时波前

在 Zemax 中模拟此时可能形成的干涉条纹, 如图 2.21 所示。



图 2.21 小口径入射 ZnSe 平凸透镜时可见光波段模拟干涉条纹

利用 ZYGO 干涉仪的实测结果如图 2.22 所示。可见当加入孔径光阑后,实际结果和模拟结果基本一致。实测的 PV 值为 0.410λ@ 0.633μm, RMS 值为 0.063λ @0.633μm,对比仿真结果的 0.312λ@ 0.633μm、0.086λ@ 0.633μm,实测与模拟 结果基本吻合。



图 2.22 ZYGO 干涉仪小口径入射实测结果

我们进一步在 Zemax 中模拟了待测透镜产生 1mm 的离焦量时的干涉条纹, 如图 2.23 所示。



图 2.23 离焦 1mm 时模拟干涉条纹

利用精密位移台调节标准球面反射镜,使其远离 1mm,其他结构保持不变, 观察此时 ZYGO 干涉仪所测得的结果,如图 2.24 所示。



图 2.24 离焦 1mm 时干涉仪实测结果

但因为条纹太密,干涉区域太小,导致干涉仪探测器无法分辨,所以无法测 得准确的 PV 值和 RMS 值,但从干涉条纹数目和形状看与模拟结果是一致的。 在 8~10μm 终端系统干涉条纹模拟图中可见,条纹的数量少,干涉区域较大,能 够获得足够的分辨率,因此可以判断,以可见光波段来检测红外光学系统的方案 是可行性的。但由于当前实验条件所限,现有的 ZnSe 透镜在红外波段的焦点已 经远远超出了 ZYGO 的测量范围,所以未能完全验证。

2.5 本章小结

本章主要介绍了利用可见光波段进行检测的方案。简要介绍了可见光检测的 原理和 ZYGO 干涉仪。针对 8~10µm 成像系统的特点以及装调检测需求,设计 了可见光波段的装调检测方案,并在 Zemax 软件中模拟了 8~10µm 成像系统装 调完毕后在可见光波段可能出现的干涉条纹。为验证可见光检测方案的可行性, 对实验室里的一 ZnSe 透镜进行了模拟,并使用 ZYGO 干涉仪对其进行了实际测 试,可观察到实际检测的干涉条纹与模拟结果基本一致,由此在一定程度上验证 了可见光检测方案具有可行性。

第3章 红外波段检测方案

3.1 引言

在可见光波段利用 ZYGO 干涉仪进行检测的优势在于检测设备比较成熟完善,且有配套分析软件可得到详细的分析结果,能快速得到测量结果和数据。但可见光检测方案也有显而易见的缺点,被检系统是红外光学系统,而且是按其工作波段位置进行摆放装调,那么原本在红外波段下能达到衍射极限的被检系统,在可见光条件下无法成完善像,此时看到的条纹比较复杂,包含较大像差,给通过观察分析条纹来指导在线装调带来一定难度。

而如果能在待检光学系统所工作的红外波段进行干涉检测,则不但能够检测 不透可见光的系统,而且可以尽可能地得到完善条纹,对 8~10μm 终端系统来说 即是直条纹,易于调试人员观察和判断。能够达到通过干涉条纹实时地监视光学 系统的整个调试过程,指明调试方向,并实现在线检测装调的目的。

国际上对红外干涉仪的研究和应用从上个世纪 60 年代末开始,最早的关于 红外干涉仪的应用是 Munnerlyn 和 Latta 于 1968 年使用泰曼型红外干涉装置对粗 糙光学表面进行检测^[18]。

1980 年第一台光机电算一体化的红外移相式干涉仪问世。之后美国和英国 的研究人员都对红外干涉仪展开了研究,并都研发出了相应的商业化产品。随着 光电子技术的发展,在近红外波段(λ=10.6µm,λ=3.39µm等),高分辨率的红 外焦平面阵列走向实用化。1990 年 Akira Furuya 使用 512×512 的 Pt-Si 红外焦平 面阵列作为红外干涉仪的探测器,工作波长为 3.39µm,并测量了锗材料折射率 的均匀性^[19]。21 世纪以后,红外干涉技术的研究和应用更趋于多样化,例如对 红外材料折射率的测量^[20]、电子元件表面热变形的测量^[21]、丝状液晶在红外波 段非线性的研究等^[22]。

国内在这方面的研究并不多,且起步较晚。南京理工大学 1998 年研制了孔 径φ250mm 的斐索型红外干涉仪,其工作波长λ=10.6μm,并做了相应的应用研 究^[23]。之后,又致力于研究小口径的泰曼—格林型红外干涉仪^[24]。成都光电所 于 2009 年成功研制了一台口径为φ30mm 的斐索型长波红外干涉仪^[25]。

目前国内外所开展的红外干涉测量主要集中在 3.39µm 和 10.6µm 等相干性 较好的激光波段。而对于 AIMS 望远镜 8~10µm 终端系统来说,其波段跨越了 2µm 的带宽,现有红外干涉仪显然无法完全适应该系统的装调检测需求,因此我们需 要发展一种适用于该系统的测试方法。

在可见光和近红外波段利用宽波段短相干光源进行干涉测量已有先例, Lawrence J. Steimle 等人采用连续谱光源配合单色仪构造宽波段的光源,可以覆 盖 200~1100nm 的带宽,利用泰曼—格林型干涉仪,实现了哈勃望远镜干涉滤光 片的透过波前测量^[26]。但在中红外波段,宽波段的连续谱光源通常为碳化硅和氮 化硅等热光源,其辐射强度与温度相关,满足黑体辐射定律。在中红外波段这些 光源辐射强度已经很弱,经单色仪分光,再经过干涉仪系统后能量所剩无几,用 现有的探测器几乎无法探测到。

近年来基于量子级联技术发展起来的红外可调谐激光器能够在8~10μm的波 段实现连续可调,且有较高的辐射强度,可以考虑用来作干涉检测的红外光源 ^[27-28]。但宽谱段可调谐激光器相干性较差,因此我们采用了非共路泰曼—格林型 干涉仪,利用参考臂长度可调的优势实现等光程干涉,以弥补相干性不足的缺陷, 从而实现干涉测量。

3.2 红外干涉检测方案总体设计

8~10μm 光路系统为直径 25mm 准直光入射的成像系统,等效焦比为 F/3.5,为此,设计了采用泰曼一格林型红外干涉仪进行装调和检测的方案,检测方案光路示意图如图 3.1 所示。



图 3.1 红外干涉检测方案示意图

注:1-红外可调谐激光器;2-聚焦透镜;3-针孔光阑;4-准直镜组;5-分束片;6
-标准平面反射镜①;7-真空舱窗口;8-会聚镜组;9-二次成像镜组L3、L4;
10-场镜;11-真空舱窗口;12-一次成像镜组L1、L2;13-标准平面反射镜②;
14-会聚镜组;15-光阑;16-红外探测器;17-真空舱;

红外光源采用 8~10μm 可调谐红外激光器,激光光束经会聚透镜聚焦于针孔 光阑,光阑采用水冷方式制冷,冷却至室温。光束由准直镜组准直后经分束片分 成两路。分束片采用硒化锌(ZnSe)材料,根据待测系统透过率设计分光比, 从而保证参考光与测试光强度尽量相等。反射光束作为参考光,经标准平面反射 镜①返回;透射光束作为测试光,由窗口入射真空舱,经会聚镜组转化为与待测 系统焦比相适应的球面波,并使其球心与待测系统的焦点重合,反向入射待测系 统,经过 8~10μm 成像系统形成准直光束,再经标准平面反射镜②返回。参考光 和测试光再经分束片后汇合成一束平行光,通过会聚镜组,在探测器上接收干涉 条纹。

考虑到对待测系统高精度检测装调的需求,我们设计了一套机械结构,能对 8~10μm 成像系统的各光学件进行多维精密调整,并且通过切换机构完成干涉系 统中位于真空舱内的会聚镜组和可见光检测方案中标准球面参考镜的切换,由此 可实现可见光和红外波段两种检测方案的切换。 设计中,采用了球面波从焦点入射的检测方式,可减小检测所需的准直光束 直径。在本方案中,准直光束的直径仅需 10mm 即可,从而减小了准直镜、后续 分束镜和会聚镜的口径,大大降低了加工难度和成本。

3.3 中红外可调谐激光光源的性能参数

红外光源采用 8~10μm 可调谐红外激光器^[29],其具体参数如图 3.2 和表 3.1 所示。可见该激光器在 8~10μm 波段连续可调,且激光功率均可达到 50mW,能够满足检测需求。



图 3.2 中红外可调谐激光器峰值功率随波长变化曲线[29]

Parameter	Value		
Minimum Spot Size	< 2.5 mm		
Pointing Stability	< 2 mrad per 100cm-1 of tuning		
Height Above Base	4" (10.16 cm) without pedestals		
Profile	Elliptical Gaussian, non-astigmatic		
Beam Waist	Approximately 30 to 50 cm from laser		
Divergence	< 5 mrad (full angle, 1/e ² intensity)		
Center Wavelength(µm)	9-10.5		
Min.Tuning Range (µm)	8-11.5		
Min.Tuning Range (cm ⁻¹)	>300		
Linewidth	0.1cm ⁻¹ /0.081nm@9µm (FWHM)		

表 3.1 中红外可调谐激光器相关参数

3.4 相干性分析

光源单色性好,相干时间和相干长度也长。只有两相干光束的光程差不超过 光源的相干长度,才能形成稳定的干涉条纹^[30]。

在干涉测量中,干涉场中某一点 P 附近的条纹的清晰程度用条纹对比度 K 来量度^[31]:

$$K = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m} \qquad \dots \quad (3.1)$$

式中, I_M 和 I_m 分别为 P 点附近条纹的强度极大值和极小值。上式表明,当 $I_m = 0$ 时, K = 1,对比度有最大值,此时条纹最清晰,即完全相干。当 $I_M = I_m$ 时, K = 0,条纹完全看不见,即非相干。

影响条纹对比度的因素,主要包括光源尺寸、两相干光波振幅比和谱线线宽 等。本系统中光源采用了较小尺寸的针孔光阑,对对比度的影响可以忽略,根据 系统透过率设计分束片膜系,检测光与参考光可以实现等振幅,从而不影响对比 度。因此本系统中对条纹对比度影响较大的因素是光源的单色性。

干涉实验中实际使用的所谓单色光源,并不是绝对单色的,而是包含一定的 光谱宽度Δλ。这种情况会影响条纹的对比度,因为Δλ范围内的每一种波长的光 都生成各自的一组干涉条纹,且各组条纹除零级条纹外,相互间均有位移,各组 条纹重叠的结果使条纹对比度下降。

能够发生干涉的最大光程差ΔL为:

$$\Delta L = \lambda^2 / \Delta \lambda \qquad \dots (3.2)$$

其中λ为激光光源输出谱线的中心波长, Δλ为谱线线宽。

若给定光谱分布,则总光强:

$$I_0 = \int_0^\infty i(\lambda) \, d\lambda \qquad \dots (3.3)$$

也可转化为:

$$I_0 = \int_0^\infty i(k) \, dk \qquad \dots (3.4)$$

在干涉仪中,单一波长光强随ΔL的变化为:

$$2i(k)[1 + \cos(k\Delta L)]$$
 ... (3.5)

不同波长叠加,将式(3.5)带入式(3.4)可得:

$$I(\Delta L) = 2 \int_0^\infty i(k) \left[1 + \cos\left(k\Delta L\right)\right] dk$$

= $2I_0 + 2 \int_0^\infty i(k) \left[\cos\left(k\Delta L\right)\right] dk$... (3.6)

分两种情况进行讨论:

(1) 若取光谱分布为高斯分布[32],则

$$i(k) = I_0 e^{-\frac{(k-k_0)^2}{\alpha^2}}$$
 ... (3.7)

又

$$dI = 2i(k)[1 + \cos(k \cdot \Delta L)]dk \qquad \dots (3.8)$$

令 $\Delta k = k - k_0$,得:

$$dI = 2I_0 e^{-\left(\frac{\Delta k}{\alpha}\right)^2} [1 + \cos\left(\Delta k \cdot \Delta L + k_0 \Delta L\right)] d(\Delta k) \qquad \dots (3.9)$$

所以则将式 (3.11) 带入 (3.6) 可得:

$$\begin{split} I(\Delta L) &= 2I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\left(\frac{\Delta k}{\alpha}\right)^2} \left[1 + \cos\left(\Delta k \cdot \Delta L\right) \cdot \cos\left(k_0 \Delta L\right) - \sin\left(\Delta k \cdot \Delta L\right) \cdot \sin\left(k_0 \Delta L\right)\right] d(\Delta k) \\ &= 2I_0 \left[\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\left(\frac{\Delta k}{\alpha}\right)^2} d(\Delta k) + \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\left(\frac{\Delta k}{\alpha}\right)^2} \cdot \cos\left(\Delta k \cdot \Delta L\right) \cdot \cos\left(k_0 \Delta L\right) d(\Delta k)\right] \\ &= 2I_0 \left[\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\left(\frac{\Delta k}{\alpha}\right)^2} d(\Delta k) + \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\left(\frac{\Delta k}{\alpha}\right)^2} \cdot \frac{1}{2} \left(e^{i\cdot\Delta k \cdot \Delta L} + e^{-i\cdot\Delta k \cdot \Delta L}\right) \cdot \cos\left(k_0 \Delta L\right) d(\Delta k)\right] \\ & \dots (3.10) \end{split}$$

其中

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\left(\frac{\Delta k}{\alpha}\right)^{2}} d(\Delta k) = \alpha \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\left(\frac{\Delta k}{\alpha}\right)^{2}} d\left(\frac{\Delta k}{\alpha}\right) = \alpha \sqrt{\pi} \qquad \dots (3.11)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\left(\frac{\Delta k}{\alpha}\right)^{2} \pm i(\Delta k \cdot \Delta L)} d(\Delta k) = \alpha \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\left(\frac{\Delta k}{\alpha} \mp i\frac{\alpha \cdot \Delta L}{2}\right)^{2} - \left(\frac{\alpha \cdot \Delta L}{2}\right)^{2}} d\left(\frac{\Delta k}{\alpha}\right)$$

$$= \alpha \cdot e^{-\left(\frac{\alpha \cdot \Delta L}{2}\right)^{2}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\left(\frac{\Delta k}{\alpha} \mp i\frac{\alpha \cdot \Delta L}{2}\right)^{2}} d\left(\frac{\Delta k}{\alpha}\right)$$

$$= \alpha \cdot e^{-\left(\frac{\alpha \cdot \Delta L}{2}\right)^{2}} \cdot \sqrt{\pi} \qquad \dots (3.12)$$

整理得:

$$I(\Delta L) = 2I_0 \cdot \alpha \sqrt{\pi} + I_0 \left[\alpha \sqrt{\pi} \cdot e^{-\left(\frac{\alpha \cdot \Delta L}{2}\right)^2} \cdot 2 \right] \cos\left(k_0 \cdot \Delta L\right) \qquad \dots \quad (3.13)$$

$$=2I_0 \cdot \alpha \sqrt{\pi} \left[1 + e^{-\left(\frac{\alpha \cdot \Delta L}{2}\right)^2} \cdot \cos\left(k_0 \cdot \Delta L\right)\right] \qquad \qquad \dots \quad (3.14)$$

因此,将式(3.16)带入式(3.1)可得:

$$K = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m} = e^{-\left(\frac{\alpha \cdot \Delta L}{2}\right)^2} \qquad ... (3.15)$$

(2) 若取光谱分布为方波分布, 令 $i(k) = \frac{I_0}{\Delta k}$, 则

$$2\int_{0}^{\infty} i(k) \left[\cos\left(k\Delta L\right)\right] dk = 2\int_{k_{0}-\frac{\Delta k}{2}}^{k_{0}+\frac{\Delta k}{2}} \frac{I_{0}}{\Delta k} \cos\left(k\Delta L\right) dk$$

由式 (3.6) 可得:

$$I(\Delta L) = 2I_0 + 2I_0 sinc\left(\frac{\Delta k \cdot \Delta L}{2}\right) cos\left(k_0 \cdot \Delta L\right) \qquad \dots (3.16)$$

将式 (3.16) 带入到式 (3.1) 可得:

$$K = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m} = sinc\left(\frac{\Delta k \Delta L}{2}\right) \qquad \dots \quad (3.17)$$

由表 3.1 可知,可调谐激光器输出的谱线线宽约为Δλ = 0.081nm,在中心波 长λ=9μm 处,当 *K*=0.5 时,可计算出Δ*L* 约为 192mm,即参考臂与测试臂之间的 光程差为 192mm 时,条纹的可见度仍可达到 0.5。该光程差在实际操作中很容易 实现。因此基于中红外可调谐激光光源的干涉检测方案是可行的。

3.5 红外探测器

红外探测器本质上来讲是一种能量转化器件,它可以把红外辐射能转换为电 能进行处理。目前红外探测器主要分为两类:光子探测器和热探测器。在本检测 方案中探测器拟采用国产 640×512 HgCdTe 焦平面阵列探测器,像元大小为 15μm。探测器放置在光阑 12 后适当的距离,使干涉条纹能完全投射在感光面之 内,且需要对其进行制冷处理。探测器在真空制冷系统中,采用铜带连接到探测 器芯片的制冷面上实现制冷。

3.6 激光扩束系统

为了将中红外可调谐激光器发出的 2mm 左右的细光束转换成口径合适的宽 光束,且是具有较高质量的平面波,需要一组能实现扩束和准直功能的系统。为

此设计了一组透射式的组合系统,并对反射式扩束准直系统进行了初步探索。

3.6.1 透射式扩束系统

3.6.1.1 非球面聚焦透镜

受条件所限,本检测方案中的聚焦透镜采用了货架产品。为了和后续准直镜 组相匹配,经过筛选,使用 Edmund 公司型号为 39469 的非球面透镜^[33],用于将 红外激光器发出的 2mm 左右的激光束会聚于针孔光阑处。其具体结构参数和性 能如图 3.3 至图 3.5 所示。

4	表面:类型	标注	曲率半径	厚度	材料	膜层	净口径	延伸区	机械半直径	圆锥系数	TCE x 1E-6	2阶项	4阶项	6阶项	8阶项
0物	」 标准面 ▼	39469	无限	无限			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				
1	标准面▼		无限	10.000			1.000 U	0.000	1.000	0.000	0.000				
2 光前	● (孔 偶次非球面 ▼		8.909	4.000	ZNSE		6.350 U	0.000	6.350	-1.078	-	0.000	-5.417E-05	-1.102E-06	9.270E-09
3 (孔	径) 标准面 •		无限	4.687			6.350 U	0.000	6.350	0.000	0.000				
4 像面	ī 标准面▼		无限	-			3.078E-05	0.000	3.078E-05	0.000	0.000				
		<													

图 3.3 非球面聚焦透镜结构参数

指标	参数		
直径 (mm)	12.70 +0.00/-0.10		
中心厚度 (mm)	4.00±0.10		
有效焦距 EFL(mm)	6.35		
涂层	Uncoated		
基底	II-VI Infrared ZnSe		
Asphere Figure Error (λ, RMS @ 632.8nm)	0.5		
Power (P-V) @ 10.6µm	λ/10		
中心偏(弧分)	≤20		
表面质量	40-20		
表面粗糙度(埃)	<50 RMS		
透过波长范围 (nm)	600 - 18000		

表 3.2 非球面聚焦透镜规格参数



图 3.4 非球面聚焦透镜点列图



图 3.5 非球面聚焦透镜波前函数

3.6.1.2 准直镜组设计

基于上述红外干涉检测方案,设计了一组准直透镜组,将通过非球面聚焦透 镜后由针孔光阑出射的球面波转换为直径约为10mm左右的高质量平面波。准直 镜组作为干涉仪物镜,可以说是干涉仪测试光路中直接影响波像差大小的元件, 在干涉仪中既是扩束准直元件,又是干涉图的成像元件。在准直光路中影响激光 束的质量,在成像光路中影响干涉条纹的成像质量,因此对其设计要求非常严格。

在本检测方案中,准直镜组是采用硫化锌(ZnS)材料透镜构成的双分离镜组。ZnS 材料的透过率曲线如图 3.6 所示。



图 3.6 ZnS 材料透过率曲线

由图 3.6 可见,在可见光 0.633μm 波段透过率可达到 80%以上,能满足使用 需求。准直镜组的焦比为 3.5,和待测系统相匹配,优化设计后的参数如表 3.3 所示。

Surf	Radius	Thickness	Glass	Semi-diameter
OBJ	Infinity	32.192		0
STO	44.288	2	ZnS	5.045
2	40.042	1.6		5.057
3	-159.594	2	ZnS	5.262
4	-31.548	0		5.416
5(Paraxial)		99.893		5.416
IMA				2.802E-3

表 3.3 准直镜组设计参数

利用 Zemax 软件对该镜组进行了波前和准直性分析,如图 3.7 所示。具体结果如表 3.4 所示,可见在不同工作波长下,准直镜组的波前仍可满足测试的精度要求。



图 3.7 不同波长下准直镜组的波前和准直性

波长	焦距	波前 PV 值	波前 RMS 值
8um	31.892mm	0.011λ	0.0035λ
9um	32.192mm	0.0087λ	0.0028λ
10um	32.546mm	0.0067λ	0.0022λ

表 3.4 准直镜组在不同波段对应的波前

由于可调谐激光器输出谱线线宽约为 0.081nm,因而透镜组设计不需要考虑 色差;而整个 8~10μm 检测波段跨度较宽,消色差设计难度较大,因此准直镜组 未采用消色差设计,而是针对不同波长对其进行优化,不同波长对应的像质变化 主要是离焦所致,可通过移动针孔光阑以及非球面聚焦透镜的位置进行补偿。由 表 3.4 可知,该准直镜组在不同波长下仍有较高质量的波前,完全可以满足干涉 检测的需求。

3.6.1.3 透射式组合系统

采用上述非球面聚焦透镜和准直镜组的组合来为红外激光器发出的细光束 进行扩束并准直,组合光路结构如图 3.8 所示。



图 3.8 透射式组合系统光路图

对组合系统进行整体优化,以非球面聚焦透镜和准直镜组之间的间隔作为变量,系统波前质量作为评价指标进行优化,找到两者焦点重合的最佳位置,得到此时组合系统的结构参数如表 3.5 所示。

表 3.5 透射式组合系统结构参数

Surf	Radius	Thickness	Glass	Semi-diameter
OBJ	Infinity	Infinity		0
1	Infinity	5.000		1.000
STO	8.909	4.000	ZnSe	6.350

3	Infinity	4.613		6.350
4	Infinity	32.209		5.931E-003
5	44.288	2.000	ZnS	6.000
6	40.042	1.600		6.000
7	-159.594	2.000	ZnS	6.000
8	-31.548	10.000		6.000
IMA				5.556

组合系统的波前质量如图 3.9 所示, 波前 PV 值为 0.0017λ@9μm, RMS 值为

 $0.0004\lambda@9\mu m_{\circ}$





图 3.10 透射式组合系统点列图

由图 3.10 可见,非球面聚焦透镜和所设计的准直镜组的组合系统,可为后

续干涉检测提供高质量的准直波前。

3.6.2 反射式组合系统

在上一节中为应对不同波长带来的色差影响,对准直镜组在不同波段进行了 优化,并通过调焦的方式来补偿色差。在本节中尝试设计了一组由离轴抛构成的 反射式扩束准直系统。使用反射镜作为准直扩束系统可以完全消除色差的影响。

本方案中采用两个离轴抛物面反射镜的组合来实现对激光束的扩束和准直。 采用 Edmund 公司型号为 35497 和 37295 的两个离轴抛^[33]。其具体性能参数如下 表所示。

指标	参数		
直径 (mm)	25.4 +0.00/-0.38		
有效焦距 EFL(mm)	33.85		
母焦距 (mm)	25.4		
涂层	Protected Gold		
图层规格	Ravg >96% @ 700 - 2000nm Ravg >96% @ 2000 - 10,000nm		
镀膜类型	Metal		
基底	Aluminum 6061-T6		
Y 偏移 (mm)	29.33		
偏离角度(。)	60		
反射波前,RMS	$\lambda/2$		
表面粗糙度 (埃)	<100RMS @0.633µm		
表面质量	80-50		
透过波长范围 (nm)	700-10000nm		

表 3.6 离轴抛 35497 规格参数

表 3.7 离轴抛 37295 规格参数

指标	参数
直径 (mm)	6.35 +0.1/-0.0
有效焦距 EFL(mm)	12.70

母焦距 (mm)	6.35
涂层	Protected Gold
图层规格	Ravg >96% @ 700 - 2000nm Ravg >96% @ 2000 - 10,000nm
镀膜类型	Metal
基底	Aluminum 6061-T6
Y 偏移(mm)	12.7
偏离角度(°)	90
反射波前,RMS	λ/4
表面粗糙度 (埃)	<50RMS @0.633µm
表面质量	80-50
透过波长范围 (nm)	700-10000nm

将两个离轴抛的相关参数输入 Zemax,在 Zemax 中查看仿真结果如下图所

示。



图 3.11 反射式离轴抛组合光路图



图 3.12 反射式离轴抛组合波前图



图 3.13 反射式离轴抛组合点列图

由上图可见,反射式组合系统的波前 PV 值几乎为 0,所以通过两个离轴抛的组合可得到较为理想的波前,并且采用反射式系统不会产生色差。

3.7 红外干涉仪仿真

针对 8~10µm 成像系统,我们将会聚镜组以及成像镜组设计为与准直镜组相同的镜组,系统对称结构的补偿将使得像质进一步提高。会聚镜组将准直光束转化为 F/3.5 的球面波,与待测系统的焦比相匹配。在不加入待检系统的情况下,使用一个等焦比的理想透镜(不会引入任何像差)替换待测系统放入干涉仪中,以模拟干涉仪自身的波像差,如图 3.14 所示。



图 3.14 红外干涉仪光路结构图

在低温环境下对光学系统进行检测时,光学窗口是保持仓内真空密封所必需的。但是,由上述检测方法可以看出,光学窗口对系统干涉检测的影响也必须加 以考虑。

仿真结果显示,干涉系统的波像差 RMS 值为 0.0014λ@9μm,如图 3.15 所示。 可见能够满足待测系统衍射极限的装调检测需求。



图 3.15 干涉系统波前函数图

在 Zemax 中非序列模式下对干涉系统进行建模,在探测器上观察到仿真干涉条纹,如图 3.16 所示:



图 3.16 非序列模式下干涉条纹图

3.8 红外干涉仪自校准装调方法

在对待测系统进行检测之前干涉仪自身需要精确装调,以获得高质量波前。 但由于红外波段肉眼不可见,干涉仪系统的装调难度较大。为此在光学设计 时,考虑利用可见光 He-Ne 激光器实现干涉仪装调^[34-36]。所以在设计准直镜以及 会聚透镜时采用了可见光波段具有较好透过率的 ZnS 材料,并在膜系设计时考 虑了可见光的透过带。在透镜参数的优化设计时也兼顾了可见光的波前。

对干涉仪的具体装调过程即是调整光路中单个组件在光轴中位置,使用自准 直法调整干涉仪的光路^[36-39]。如图 3.17 所示。



图 3.17 干涉仪装调示意图

注:1—He-Ne 激光器;2—针孔光阑;3—准直镜组;4—分束片镜;5、6—标准平面反射镜;7—会聚镜组;8—可见光探测器

将 0.633µmHe-Ne 激光器切入光路,光束会聚后经针孔及准直镜,到达标准 平面反射镜,由平面镜返回后使光点与针孔重合,调整激光器,以及针孔光阑之 间的位置关系,使返回针孔处的光斑明亮,光斑图形对称分布;然后在准直光路 中插入分束板,再利用标准平面镜将光束返回;调整反射镜的角度,在会聚透镜 处放置一接收屏,在屏上可以观察到两平行光束的干涉条纹。然后撤去观察屏, 插入会聚透镜,调整会聚透镜及标准平面镜的角度,在会聚透镜焦面上将两光点 调整至重合,此时利用可见光探测器接收干涉条纹,经过精密调整将波前调整到 最佳。

由光学设计软件模拟结果图 3.18 可见,此时系统的波前 RMS 值可达到 0.05λ@0.633µm,其干涉条纹如图 3.19 所示。



图 3.18 可见光入射时的波前函数



图 3.19 可见光入射时的干涉条纹

中红外波段与可见光的区别仅在于焦距不同,根据追迹软件计算,波长分别为9µm与0.633µm时,准直镜焦距差值为3.570mm,因此可以平移针孔光阑相应的距离,而后切入中红外激光束。为保证和可见光共光路,利用红外靶标进行红外和可见光的共光路调整。此时系统仅有离焦误差,只需微调针孔光阑的位置即可校准干涉仪系统。同样,在切换不同波长时,系统像差仍然是离焦为主,所以只需要沿光轴调整针孔即可。在Zemax中模拟了不同工作波长下干涉仪的调整情况,如表3.8 所示:

波长	移动距离	波前 RMS 值
8μm	0.3mm	0.0019λ
9µm	0	0.0014λ
10µm	-0.354mm	0.0010λ

表 3.8 干涉仪在不同工作波段对应的波前

3.9 8~10µm 光学系统装调检测方法的初步模拟

为确保仪器能够正常工作并达到设计指标,可利用搭建的红外干涉仪,采用 传统的逐个安装,逐个调试的装调方法,对之进行改进。

干涉仪装调完成后,将待检 8~10µm 光学系统插入干涉仪的检测臂中,并调整参考光路中标准平面镜的距离实现等臂长,此时即可开展波前的检测。

由于真空制冷结构的空间限制,会聚透镜需放置于真空制冷系统中。干涉仪 出射的准直光束经过封窗入射。装调的具体步骤如下:

 1、将安装好前后封窗的真空罐体放置于测试臂,此时真空罐密封顶盖敞开, 处于常温常压状态;

2、依次插入会聚透镜、二次成像镜组、场镜,并逐次在各镜组焦面后用标 准球面镜将光束返回形成干涉,每一步均通过观察干涉条纹将波前调整到最佳。

3、安装一次成像镜组,利用标准平面镜将光束返回,并再次将波前调整到 最佳,此时应观察到直条纹。

至此,系统在常温常压环境下完成安装。而后抽真空并加注液氮。当温度稳 定到 100K 后,进行工作温度下检测和装调。需要说明的是,由于在检测光路中 会聚透镜占据了观测系统探测器的位置,因此在 8~10μm 终端系统的光学结构设 计中,探测器和会聚透镜可以在真空制冷条件下进行切换,且均可进行多维度调 整。

将采用逆向优化法进行装调,即利用 Zemax 通过设置失调量模拟出干涉条 纹,以此判断光学元件失调量的大小与方向,从而指导系统装调。以二次成像镜 组为例,当二次成像镜组分别沿 X 轴和 Y 轴倾斜时,条纹随镜组倾斜角度变化 的模拟结果,如图 3.20 和图 3.21 所示。



图 3.20 沿 X 轴倾斜时的条纹变化



图 3.21 沿 Y 轴倾斜时的条纹变化

当二次成像镜组分别沿 X 轴、Y 轴偏心时,条纹随镜组偏心而产生的变化 如图 3.22 所示:



图 3.22 沿 X、Y 轴偏心时的条纹变化

在实际检测中,通过提取探测器获得的条纹信息,并对其进行处理即可得出此时镜组的失调量信息。因此,根据条纹的变化可实现指导待测系统的装调。

3.10 本章小结

本章介绍了使用红外波段对 8~10µm 终端成像系统进行检测的方案。对于当前能够检测中红外宽波段光学系统的干涉仪缺乏的现状,创新性地提出搭建基于中红外可调谐激光器的泰曼一格林型干涉仪的检测方案。所使用的可调谐激光器输出的谱线线宽约为Δλ = 0.081nm,计算分析表明在中心波长λ=9µm 处,若想使条纹对比度 K 达到 0.5,此时的ΔL 仍有 192mm 左右。该光程差在实际操作中很容易实现,因此基于中红外可调谐激光光源的干涉检测方案是可行的。设计了透射式和反射式两种组合系统用于激光束的扩束准直。其中透射式系统中的准直镜组也可用于将平面波会聚成和8~10µm 成像系统相匹配的球面波入射到待测系统。在 Zemax 中对红外干涉仪进行了仿真,在不加入待测系统时,干涉仪的波前可达到 0.0019λ@8µm, 0.0014λ@9µm, 0.0010λ@10µm,可见能够满足待测系统行射极限的装调检测需求。

并对 8~10µm 终端成像系统的装调检测进行了初步模拟,分析了待测系统存 在不同失调状态时可能产生的干涉条纹。根据模拟结果可知,通过干涉图能够判 断出系统可能存在的失调,因此根据条纹的变化能够指导真空制冷工作环境中待 测系统的在线装调,为装调指明方向。

第4章 总结与展望

4.1 全文总结

为克服在真空低温环境下 AIMS 望远镜 8~10µm 终端成像系统在线装调检测的困难,提出了两种干涉检测方案,分别是基于可见光进行检测和基于红外波段进行检测。基于可见光检测的方案是以 ZYGO 干涉仪为基础而展开。可见光波段目前,就是有成熟的检测仪器和检测方法,ZYGO 干涉仪自带有配套的软件分析系统,可以快速、准确获得待检光学系统的波前质量。首先模拟了 8~10µm 终端成像系统在可见光波段可能产生的干涉条纹,然后通过对 ZnSe 透镜以可见光检测方案模拟,并在实验室中使用干涉仪对其实际检测,对比模拟结果和实际测量结果可发现可见光检测的方案是可行的。

虽然在可见光波段检测有成熟完善的仪器设备和强大的软件支持,能快速得 到测量结果和数据,但该方案也有显而易见的缺点,当遇到待测系统不透可见光 或者像差超出量程的情况时,可见光检测方案就无能为力了。因此,我们也尝试 设计了基于红外波段检测的方案。首次提出构造宽波段泰曼一格林型红外干涉仪 进行检测的方法。以中红外可调谐激光器作为干涉仪的红外光源,采用泰曼一格 林型非共路干涉的检测光路来弥补相干性不足的缺陷,从而实现相干测量。以待 检系统的工作波段作为检测波长,当系统装调到位后,可观察到平行直条纹,易 于区别和判断。这种方案比较适合对待检系统进行在线检测和装调。

本文首先分析了以中红外可调谐激光器作为光源的该方案的可行性,其次根据 8~10µm 成像系统的相关参数,选择了适合在本检测方案中用于会聚激光光束的非球面聚焦透镜,并优化设计了匹配待检系统参数的泰曼一格林干涉仪光学系统。干涉系统自身的波前 RMS 值可达到 0.0014λ@ 9µm,完全能够满足 8~10µm 成像系统的检测需求。接下来模拟了待测系统的装调流程。由仿真结果可见,系统的失调能够通过干涉条纹较直观地反映出来,从而可指导系统装调。

但以红外波段进行检测的方案也有其局限性,目前暂无强大的软件系统支撑 是一大短板,要想得到精确的测试数据,需要从红外探测器上提取条纹信息进行 处理,对所测得的系统波面信息数据尚不能即时得到。

4.2 未来展望

由于 8~10μm 终端系统的光机结构尚未完成加工,目前研究工作仅是初步验 证了可见光检测方案的可行性,对红外波段的检测方案也是处在模拟仿真阶段, 还有许多工作和问题需要进一步完善,包括:

1) 待光机结构件加工完成后,对 8~10μm 终端系统展开实际测试,进一步 改进并完善可见光检测方案和红外检测方案。

2) 在可见光检测方案中,利用灵敏度矩阵的方法,分析 Zernike 系数的变化, 判断系统失调量的大小和方向,由此可进一步提高可见光波段检测方案的检测精 度。

 3)关于红外干涉仪,接下来可进一步改进和完善结构,获得更好的性能, 提高系统稳定性和测试精度,进一步降低干涉系统自身所引入的波像差。

 进一步开展平场定标、条纹信息提取和误差分析等数据处理方法的研究, 提高测量结果的准确性。

5) 拟引入移相功能,使得干涉仪能够达到高精度的定量测量,以实现更多的测量功能(如折射率等参数的测量)。

参考文献

- [1] Matt Penn, Säm Krucker, Hugh Hudson. Spectral and imaging observations of a White-Light solar flare in the mid-infrared[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2016, 819: L30 (5pp).
- [2] Paulo J A Simões, Graham S Kerr, Lyndsay Fletcher. Formation of the thermal infrared continuum in solar flares[J]. Astronomy&Astrophysics, 2017, 605: A125(11pp).
- [3] Li Xin, Song Yongliang, Uitenbroek, H. Infrared diagnostics of the solar magnetic field with Mg I 12µm lines: forward-model results[J]. Astronomy&Astrophysics, 2021, 646: A79(12pp).
- [4] Hong Jie, Bai Xianyong, Li Ying. Non-LTE Calculations of the Mg I 12.32µm Line in a Flaring Atmosphere[J]. The Astrophysical Journal, 2020, 898: 134(12pp).
- [5] 王鑫. 低温红外镜头装调测试[J]. 理论与方法, 2018, 37(12): 54-57.
- [6] 沈忙作,马文礼,廖胜,等. 低温光学系统的研制[J]. 光学学报. 2001. 21(02): 202-205.
- [7] 李妥妥,苏云,兰艳丽. 低温红外镜头星点检测数据处理方法研究[J]. 航天返回与遥 感. 2008, 29(4):24-29.
- [8] 彭晴晴, 骆守俊, 何伍斌. 基于相位补偿的低温光学系统常温装调方法研究[J]. 激光 与红外. 2013, 43(4): 433-437.
- [9] 黄智国, 王建立, 殷丽梅,等. 多波段冷光学红外成像终端研制[J]. 红外与激光工程. 2018, 47 (9):57-65.
- [10] 阴刚华, 栗孟娟, 李凌, 等. 低温真空环境光学系统波像差测试方法[J]. 红外与激光 工程. 2018, 47(7):170-175.
- [11] 温彦博, 白剑, 侯西云, 等. 红外无热化混合光学系统设计[J]. 光学仪器, 2005, 27(5): 82-86.
- [12] 吴仁安. 移相式红外泰曼干涉仪的研究与应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [13] 申劭萌,马军,何煦. 便携式泰曼格林型干涉仪装调方法研究[J]. 应用光学, 2011, 32(6): 1173-1179.

- [14] 周松钻. 标准球面透镜的计算机辅助装调技术[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [15] 杨敏. 自适应光学技术在医学眼科检测中的应用[D]. 太原: 中北大学, 2009.
- [16] 申劭萌. 基于 Twyman-Green 原理的波像差测试方法与测试设备研究[D]. 长春: 2011.
- [17] Edmund Optics. [2021-04-21]. https://www.edmundoptics.cn/p/508mm-dia-x-100mm-fluncoated-znse- plano-convex-lens/40479/.
- [18] Munnerlyn C R, Latta Milton. Rough surface interferometry using a CO2 Laser Source[J].Applied Optics, 7: 1858-1859.
- [19] FURUYA Akira. Design of interferometer. Proc SPIE 1990, 1320: 478-482.
- [20] GLEN D Gillen, SHEKHAR Guha. Refractive-index measurements of zinc germanium diphosphide at 300 and 77K by use if a modified Michelson interferometer[J]. Applied Optics, 2004, 43(10): 2054-2058.
- [21] VERMA K, HAN B. Warpage measurement on dielectric rough surface of microelectronics devices by far infrared Fizeau interferometry[J]. Journal of Electronic Packageing, 2000, 122: 227-232.
- [22] ENRICO Allaria, STEFANO Brugioni, SERGIO De Nicola, et al. Interferometric analysis of reorientational nonlinear phenomena at 10.6HAN in a nematic liquid crystal[J]. Applied Optics, 2003, 43(24): 4827-4834.
- [23] 陈进榜,陈磊,王青,等.大孔径移相式 CO2 激光干涉仪[J].中国激光,1998,25(1): 31-36.
- [24] 何勇,陈磊,王青,等.移相式泰曼-格林红外干涉仪及应用[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(4): 335-338.
- [25] Wu Yongqian, Zhang Yudong, Wu Fan, et al. Far-infrared Fizeau interferometer for large aspheric mirror. SPIE, 2008, 7064(0S):1-6.
- [26] Lawrence J Steimle, L J Steimle Enterprises. Development of a broadband achromatic Twyman-Green interferometer[J]. SPIE, 1993, 2019:366-373.
- [27] Alexander Ebner, Robert Zimmerleiter, Christoph Cobet. Sub-second quantum cascade laser based infrared spectroscopic ellipsometry[J]. Optics Letters, 2019, 44(14):3426-3429.
- [28] Alicja Dabrowska, Andreas Schwaighofer, Stefan Lindner. Mid-IR refractive index sensor for detecting proteins employing an external cavity quantum cascade laser-based Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Express, 2020, 28(24): 36632-36642.

- [29] DRS Daylight Solutions. MIRcat-QT [™] Mid-IR Laser[EB/OL]. [2021-04-13]. https:// daylightsolutions.com/product/mircat/.
- [30] 武旭华. Ф300mm 移相干涉仪的关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [31] 梁铨廷. 物理光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 81-87.
- [32] 相凤华,华跃平. 高斯型频谱分布光源下双光束干涉可见度[J]. 廊坊师范学院学报. 2009, 9(1): 48-49.
- [33] Edmund Optics. [2021-04-21] https://www.edmundoptics.com/p/127mm-dia-x-635mm-fl-uncoated-znse-aspheric-lens/40563/.
- [34] D. 马拉卡拉. 光学车间检测[M]. 北京: 机械工业出版社,
- [35] 贺俊, 王青, 陈磊. 移相式泰曼-格林红外干涉仪调试技术[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3):516-520.
- [36] 赵智亮,陈立华,赵子嘉,等.半导体双波长透射式红外干涉仪的研制及应用[J].光学 精密工程,2018,26(11):2639-2646.
- [37] 史磊, 金光. 航空相机的自准直自动检焦方法研究[J]. 光学精密工程, 2010, 16(12): 2460-2464.
- [38] 刘磊, 李景林. 大口径反射光学系统装调装置设计研究[J]. 光学精密工程, 2005, zl: 134-137.
- [39] 刘秀梅. 利用干涉仪检测调整非球面物镜的光路[J]. 红外, 2010, 31(5): 12-15.
- [40] 王佩斯. 红外光学系统像面装调与检测方法的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.

致 谢

时光荏苒,如白驹过隙,行文至此,硕士研究生求学生涯即将画上句号,人 生又将开启新的篇章。回忆起曾在怀柔和在国台度过的学习时光,感慨万千,在 国科大的学习和在国台度过的科研生活是我人生中宝贵的财富。有过努力,有过 迷茫,有过踌躇不前,有过奋起直追,能一直走到现在离不开良师益友的帮助和 关怀。在他们身上,有许多值得我学习的地方,使我受益匪浅,不断成长,不仅 收获了专业知识,锻炼了科研能力,同时也更加开拓了视野和思维。这段求学时 光值得感谢,我将永远铭记!

衷心感谢我的第一导师邓元勇老师,邓老师是怀柔大家庭的大家长,爱护关 心我们,感谢邓老师让我成为怀柔基地的一员,带我走入科研的大门,感谢邓老 师在我硕士期间对我学习中的指导和关怀,并提出的宝贵建议。邓老师老师工作 认真,为人豁达,是我学习工作的榜样。

衷心感谢张志勇老师,张老师虽然不是我的第二导师,但却依然对我的课题 研究精心地给予了全面指导,引领我前进的方向。张老师平易近人,认真负责, 在课题确定后,耐心地帮助我讨论分析,提供尽可能的支持,在科研上的思路和 方法使我受益良多。在生活中也常常站在学生的立场,教导我为人处事,分析问 题,为我指点迷津,走出困境。感谢张老师的谆谆教诲,时刻铭记,感激不尽。

感谢冯志伟老师在课题研究期间提供的支持和帮助,在小论文修改期间提出 宝贵建议,全力帮助斟酌字句,十分感谢冯老师;感谢白先勇老师在课题研究过 程中给予的建议;感谢王东光老师在我科研学习过程中给予的指点和引导;感谢 徐刚老师帮助安装调试设备;感谢孙英姿老师在课题研究过程中的帮助;感谢王 薏老师,罗琳姐,闫璐姐,怀柔基地后勤工作人员为我们创造良好便捷的工作与 生活环境;感谢人事处的马怀宇老师、艾华老师、李响老师在研究生期间提供的 各方面帮助和支持,祝您们工作顺利。

感谢孙文君师兄、沈宇樑师兄、杨潇师姐、张洋师姐、魏烨艳师姐、佟立越师兄、白阳师兄、王全师兄、黄威师兄、胡兴师兄、朱晓明师兄、吴玮同学、李 鑫师妹在科研道路上的倾力帮助和分享;感谢荀辉同学、陈垂裕同学、周明尧同

学,从雁栖湖到奥运村,大家一起工作学习玩耍,因为有你们,我的研究生生活 多了很多精彩和快乐,将是我一生难忘且珍贵的回忆。

感谢我挚爱的父母,默默为我付出许多牺牲,含辛茹苦供我求学,无条件地 理解和支持我,永远是我力量的源泉,您们的养育和教导之恩无以为报,衷心祝 福我的家人们平安喜乐。

谨以此文献给所有帮助和关心我的人们, 致以衷心的感谢!
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历:

2012 年 09 月——2016 年 06 月,在长春理工大学光电工程学院获得学士学位。 2017 年 09 月——2021 年 06 月,在中国科学院国家天文台攻读硕士学位。

已发表(或正式接受)的学术论文:

王雅琦, 张志勇, 冯志伟等. AIMS 望远镜 8 到 10 微米成像终端系统装调检测方法[J]. 天文研究与技术.

参加的研究项目及获奖情况:

用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统(AIMS),国家重大科研仪器研制项目(11427901)