



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

AIMS 望远镜次镜姿态实时校正方法研究

作者姓名: 荀 辉

指导教师: 王东光 正高级工程师 国家天文台

张志勇 高级工程师 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

2020 年 8 月

Study on the real-time alignment strategy for the secondary
mirror of AIMS

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

Xun Hui

Supervisor: Professor Wang Dongguang

Professor Zhang Zhiyong

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences

August 2020

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。

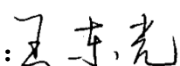
作者签名：
日期：2020.7.29

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。

作者签名：
日期：2020.7.29

导师签名：
日期：2020.7.29

摘 要

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, AIMS），是我国自主研制的第一台中红外太阳观测设备，其核心目标是利用红外波段具有大 Zeeman 裂距的特性，通过直接测量 Zeeman 裂距实现磁场的精确测量，从而推动太阳物理从唯象研究到定量研究的跨越发展。

AIMS 望远镜为口径 1 米的离轴格里高利系统，由于系统离轴量较大，望远镜桁架结构庞大，质量重达数吨。因而在跟踪观测过程中，由桁架弯沉和形变所产生的次镜相对于主镜姿态失调将导致系统像质退化，而无法实现高精度观测的科学目标。这几乎是所有大口径天文望远镜亟待解决的共性问题。

为解决 AIMS 望远镜次镜姿态失调导致像质退化问题，本文开展了次镜姿态实时校正的技术方法研究。针对目前通常采用的基于太阳低对比度扩展目标波前探测技术难点，提出了基于局部孔径波前探测与重构的次镜姿态实时校正方法。该方法利用小口径平行光源构造人工星点，入射望远镜局部区域，采用 Shack-Hartmann 波前传感器探测波前畸变，并利用灵敏度矩阵方法计算次镜失调量，然后采用六足位移平台加以校正。由于采用人工构造的星点作为目标，可以摆脱对日面高对比度活动区的依赖，即使在太阳活动极小年仍然可以进行有效波前探测，并且基于点源质心算法相比较低对比度面源的复杂相关运算而言，可有效提高测量精度和运算速度及稳定性，更容易实现次镜姿态实时校正。同时，由于空气链路短，可以有效降低大气视宁度的影响。

研究采用光学软件模拟和数学仿真相结合的方法，对基于人工星点局部孔径波前探测方法开展仿真分析。分析了选取不同局部口径的区域及口径大小对波前畸变程度探测的影响，并开展了波前重构和利用灵敏度矩阵法计算次镜失调量的研究。仿真结果表明，当选取主镜内边缘直径 200mm 局部口径入射，波前传感器像点质心偏移探测精度达到 $0.01\mu\text{m}$ 时，可以有效提取波像差信息，通常的波前传感器产品即可满足这一精度需求。同时本文分析构造人工星点的平行光源的

需求,当平行光源有效焦距选为 3500mm,可以有效降低平行光源离焦对像质检测结果的影响,并初步设计一款经典卡塞格林系统的平行光源,具有体积小、重量轻、光学质量高等特点,适用于在 AIMS 望远镜。

从仿真结果可见,基于人工星点的局部孔径波前探测的方法可以满足 AIMS 望远镜次镜姿态校正的需求。在仿真分析的基础上,本文对该方法开展了初步实验验证。实验采用与 AIMS 主次镜相同曲率及相同面型精度的局部孔径离轴抛物面镜与离轴椭球面镜搭建实验验证系统,其中主镜口径为 220mm,次镜口径为 50mm,可以完全模拟 AIMS 望远镜局部孔径波前探测的实际情况。光学系统采用 ZYGO 干涉仪进行精密装调,波前达到 PV 值约 $\lambda/3.4$, RMS 值约 $\lambda/18(@632.8\text{nm})$ 。

实验测试过程中,以 ZYGO 干涉仪发出的标准平面波作为平行光源入射测试系统,波前传感器前置滤光片兼作分束镜,将部分光线原路返回干涉仪,实现干涉仪与波前传感器共路测试,互为参考印证。利用六足位移平台模拟次镜不同维度的失调量,并用波前传感器获得失调波前的 Zernike 系数。初步实验结果表明,Zernike 系数与次镜姿态失调量在误差范围内满足线性关系,基本符合仿真分析结论。基于局部口径点源波前探测的次镜姿态校正方法切实可行。

在实验验证的基础上,本文提出了失调量分级校正的策略,即结合桁架结构的有限元分析,预判次镜姿态失调维度和大小,对粗大偏移进行初步校正,然后再利用 Shack-Hartmann 波前传感器进行次镜失调量精确计算,并且用六足位移平台校正。该策略可有效避免校正的盲目性,节省计算时间,提高望远镜运行效率。

针对 AIMS 望远镜桁架形变导致的像质退化问题,创新性提出了基于人工星点局部孔径波前探测的次镜失调校正方法。本文的研究工作是对大口径太阳望远镜主动光学技术的有益探索,可望为有效解决大型地基望远镜的共性问题提供新思路。

关键词: 大口径太阳望远镜、次镜失调、畸变波前、Shack-Hartmann 波前传感器、Zernike 多项式、光学仿真

Abstract

The Accurate Infrared Magnetic Field Measurements of the Sun (AIMS) under construction is the first mid-infrared solar observation equipment independently developed in China. Its core scientific objective is to directly employ Zeeman splitting formula to achieve very accurate magnetic field without model assumption due to the large magnetic sensitivity in the mid-infrared wavelength, which is helpful for the quantitative research of solar physics.

AIMS employs an off-axis Gregorian system with a diameter of 1 meter. Due to the large amount of off-axis system, the weight of the telescope truss structure is as large as several tons. Therefore, in the process of tracking observation, the misalignment of the secondary mirror relative to the primary mirror will cause the image quality of the system to deteriorate and the scientific goal of high-precision observation cannot be achieved. This is a common problem for all the large-aperture telescopes which needs to be solved urgently.

In order to solve the image quality degradation caused by the misalignment of the secondary mirror of AIMS, we carried out the research on the technical strategy of real-time alignment of the secondary mirror in the paper. Aiming at the difficulties of the current wavefront detection technology based on the sun's low-contrast extended source, a real-time alignment strategy of secondary mirror based on wavefront detection and reconstruction of sub-aperture is proposed. Firstly, this strategy uses a small-aperture parallel light source to construct an artificial point, enters the local area of the telescope. Secondly, the Shack-Hartmann wavefront sensor detects wavefront distortion, and the sensitivity matrix method is used to calculate the misalignment amount of the secondary mirror. Lastly, a hexapod can align the secondary mirror. Effective wavefront detection can be carried out during the period of low solar activity, because constructed point source is used as target artificially, which gets rid of the dependence on the high-contrast active area of the solar surface. In addition, the centroid algorithm based on the

point source can effectively improve the speed and stability of measurement precisely comparing with the complex correlation calculations of low-contrast surface sources. Also, it is easier for the closed-loop control of the aligning mirror and can effectively reduce the impact of atmosphere seeing effect because of short air link.

In this paper, we carry out a simulation analysis on the artificial point source sub-aperture wavefront detection strategy by combining the optical software and mathematical simulation method. We select different local apertures and aperture sizes to analyze the influence on the detection of wavefront distortion. We also research wavefront reconstruction and employ sensitivity matrix to calculate the misalignment of secondary mirror. The simulation results show that the wavefront aberration information can be effectively extracted using a generic wavefront sensor if the local aperture of the inner edge diameter of the primary mirror is 200mm and the detection accuracy of the wavefront sensor's image point centroid offset reaches $0.01\mu\text{m}$. Moreover, we analyze the requirements of parallel light sources for the construction of artificial star points. When the effective focal length of the parallel light sources is selected as 3500mm, it can effectively reduce the impact of the defocus of the parallel light sources on the image quality detection results. Then we design a parallel light source of the classic Cassegrain system, with the advantage of small size, light weight, high optical quality, which is suitable for the AIMS telescope.

The simulation results show that the sub-aperture wavefront detection based on artificial point source can meet the needs of the secondary mirror's alignment of AIMS. Based on simulation analysis, this paper carried out preliminary experimental to verify of the above strategy. A experimental verification system is constructed using the off-axis parabolic mirrors and off-axis ellipsoidal mirrors with the same curvature and the same surface accuracy as AIMS but for a relative small aperture. The main mirror has a diameter of 220mm and that for the secondary mirror is 50mm, which fully simulate the actual situation of sub-aperture wavefront detection of the AIMS. The optical system adopts ZYGO interferometer for precise adjustment. The wavefront reaches the

PV value of about $\lambda/3.4$ and the RMS value of about $\lambda/18$ (@632.8nm).

During the experimental test, the standard plane wave emitted by the ZYGO interferometer was used as a parallel light source to enter the test system. Meanwhile, the pre-filter of the wavefront sensor behind focus is doubled as a reflector, returning part of the light to the interferometer in the same way as the wavefront sensor and implementing the same path test of interferometer and wavefront sensor for mutual reference. A hexapod is used to simulate the misalignment of different dimensions of the secondary mirror, and wavefront sensor is used to obtain the Zernike coefficient of the distorted wavefront. Preliminary experimental results show that the Zernike coefficient and the misalignment of secondary mirror satisfy a linear relationship within the error range, which basically conforms the simulation analysis conclusion. The alignment strategy of secondary mirror by the means of wavefront detection based on local aperture and a point source is feasible.

Based on our experimental result, a strategy of grading alignment is proposed. Firstly, we can predict the dimension and size of the secondary mirror's misalignment combined with the finite element analysis of the truss structure and then align the gross deviation preliminarily. Secondly, the wavefront sensor is used to calculate the alignment amount of secondary mirror accurately. Lastly, hexapod align secondary mirror precisely. Our proposed strategy can avoid the blindness of alignment effectively, save calculation time, and improve the efficiency of telescope operation.

Aiming at the image quality degradation problem caused by the deformation of the AIMS truss, we innovatively proposes a secondary mirror alignment strategy by means of local aperture wavefront detection based on the artificial point source in the paper, which is a useful exploration of the active optics technology for the large-aperture solar telescopes, and provide some new ideas to effectively solve the common problems encountered in the large-aperture ground-based telescopes.

Key Words: Large-aperture solar telescope, The misalignment of secondary mirror, Distorted wavefront, Shack-Hartmann wavefront sensor, Zernike Polynomial, Optical simulation

目 录

第 1 章	引言.....	1
1.1	课题研究背景.....	1
1.2	课题研究目的与意义.....	2
1.3	国内外研究现状.....	4
1.4	论文章节结构.....	6
第 2 章	基于 Shack-Hartmann 波前传感器校正方法基本理论	9
2.1	波前探测理论.....	9
2.1.1	Shack-Hartmann 波前传感器原理	9
2.1.2	点质心算法.....	10
2.2	波前重构理论.....	12
2.2.1	基本原理.....	12
2.2.2	评价标准.....	17
2.3	失调量计算理论.....	18
2.4	本章小结.....	20
第 3 章	局部口径校正方案及光学模型仿真计算	23
3.1	局部口径波前探测校正方案.....	23
3.2	局部口径大小和位置选取分析.....	25
3.3	灵敏度矩阵计算分析.....	28
3.4	次镜校正计算模拟.....	29
3.5	平行光源设计分析.....	32
3.6	本章小结.....	35
第 4 章	基于 Shack-Hartmann 波前传感器测试实验系统	37
4.1	实验系统设计.....	37
4.2	光学装调.....	40
4.3	次镜失调校正实验.....	46

4.3.1 建立坐标系.....	46
4.3.2 Zernike 系数数据采集	48
4.3.3 实验结论.....	51
4.4 实验误差分析.....	51
4.5 次镜姿态失调校正策略.....	52
4.5 实验总结.....	53
第 5 章 总结与展望	55
5.1 全文总结.....	55
5.2 未来展望.....	56
参考文献.....	59
致谢.....	65
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	67

图表目录

图 1.1	AIMS 光学系统总体示意图.....	2
图 1.2	AIMS 望远镜引导光学格里高利系统光路图.....	2
图 1.3	AIMS 望远镜主次镜桁架结构.....	3
图 2.1	S-H WFS 原理图	9
图 2.2	S-H WFS 子单元原理图（Thorlabs 官网）	10
图 2.3	前 21 项 Zernike 多项式图像	13
图 3.1	S-H WFS 太阳黑子目标图像阵列	23
图 3.2	局部口径波前探测示意图.....	24
图 3.3	局部口径波前探测校正方法流程图.....	25
图 3.4	200mm 局部口径内边缘入射	27
图 3.5	200mm 局部口径外边缘入射	27
图 3.6	局部口径 200mm 内边缘入射 Zernike 系数关系图	29
图 3.7	计算仿真模型.....	30
图 3.8	平行光源理想状态下光学系统的 MTF 曲线	32
图 3.9	不同焦距平行光源检测 MTF 变化趋势图	34
图 3.10	平行光源光路图.....	35
图 3.11	平行光源像点列图.....	35
图 4.1	AIMS 局部口径选取示意图.....	37
图 4.2	实验验证系统主、次镜及其多维调整结构.....	38
图 4.3	ZYGO 激光干涉仪	39
图 4.4	主镜灵敏度分析准直光路图.....	41
图 4.5	主镜装调 Zernike 系数关系图	42
图 4.6	M1 装调波前图	43
图 4.7	实验装调定位图.....	44
图 4.8	次镜装调 Zernike 系数关系图	45

图 4.9	M2 装调波前图	45
图 4.10	实验验证系统布局	46
图 4.11	PI 六足位移平台坐标系	46
图 4.12	M2 旋转示意图	47
图 4.13	设置波前传感器参数	48
图 4.14	失调量与 Zernike 系数关系图	51

表 1.1	M2 位置公差与像质退化	4
表 2.1	波前重构模式法和区域法对比	12
表 2.2	Noll 序列表	13
表 2.3	Zernike 多项式初级像差含义	14
表 2.4	Zernike 系数表示的初级像差	14
表 3.1	不同口径大小平行光入射波前畸变	26
表 3.2	200mm 局部口径内外边缘入射波前畸变	27
表 3.3	局部口径 200mm 内边缘入射灵敏度矩阵	29
表 3.4	单个维度位置公差失调模拟结果	31
表 3.5	两个维度位置公差失调模拟结果	31
表 3.6	多个维度位置公差失调模拟结果	31
表 3.7	有效焦距 2000mm 的平行光源检测 MTF 值	33
表 3.8	有效焦距 2500mm 的平行光源检测 MTF 值	33
表 3.9	有效焦距 3000mm 的平行光源检测 MTF 值	33
表 3.10	有效焦距 3500mm 的平行光源检测 MTF 值	33
表 3.11	平行光源反射镜面型参数	35
表 4.1	主次镜参数	38
表 4.2	H-825 六足位移平台规格参数	39
表 4.3	WFS150-5C 型的 S-H WFS 参数	40
表 4.4	波前传感器不同计算方式的 Zernike 系数标准差	48
表 4.5	不同时节点的次镜失调有限元分析	53

第1章 引言

1.1 课题研究背景

太阳是距离地球最近的一颗恒星，也是人类唯一可进行精细观测的恒星。对太阳的研究有助于人类对大多数恒星大气的辐射传输，恒星结构与演化等问题的深入认识。同时，太阳以巨大尺度的高温、高压等离子体状态，为人类提供了地球上无法模拟的物理环境，对它的研究促进了等离子体物理和磁流体力学等物理学学科的发展。因而太阳在天文研究领域占据着重要的地位。

然而，太阳带给人类利益的同时，它的剧烈爆发活动也会给人类赖以生存的环境带来灾害性影响。由此可见研究太阳活动的内在机制对于空间灾害性天气的监测和预警有着极其重要的意义。

近百年来的太阳物理研究表明，太阳磁场是太阳一切活动现象和过程的动力之源。对太阳磁场的观测与研究能够更深入理解太阳活动的物理机制。因此，太阳磁场研究始终都是太阳物理研究的最重要课题之一。因此，近年来人类建造的诸如 GREGOR、GST 和 DKIST 等大型太阳观测设备均以高精度磁场测量作为主要观测目标。我国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, AIMS)，是由我国太阳物理学家率先提出并自主研制的一台工作中红外波段太阳望远镜。该望远镜以太阳磁场精确测量为核心目标，利用中红外波段 Zeeman 裂距大的优势实现磁场的直接测量。

AIMS 望远镜选择形成于太阳温度极小区的 Mg I $12.32\mu\text{m}$ 磁敏线作为观测谱线，其 Zeeman 裂距的相对宽度是同等磁场强度条件下的可见光波段 Fe I 532.4nm 磁敏线相对宽度的 60 倍。因此可以通过直接测量 Zeeman 裂距实现磁场精确测量。这一方法摆脱传统测量方法对太阳辐射转移模型及复杂反演方法的依赖，并可将现有横向磁场测量的精度提高一个量级，从而推动太阳物理从唯象研究到定量研究的跨越发展。该望远镜研制成功将成为世界上第一台中红外波段为观测目标的太阳观测设备。

1.2 课题研究目的与意义

为实现其科学目标，AIMS 光学系统主要由引导光学系统、偏振测量与定标系统、红外傅里叶光谱分光系统以及 8-10 μm 成像光学系统等几部分功能模块构成，如图 1.1 所示。

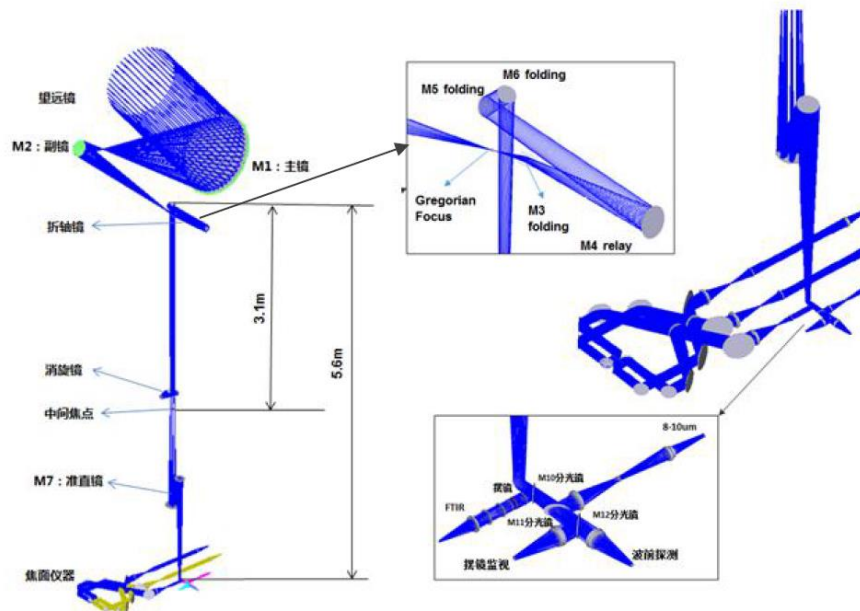


图 1.1 AIMS 光学系统总体示意图

该望远镜引导光学部分设计为离轴格里高利系统，如图 1.2 所示。主镜 M1 为口径 1000mm 的离轴抛物镜，次镜 M2 为口径 220mm 的离轴椭球镜。系统的总长度达到 2.5m，主次镜离轴量达到 1.2 m。

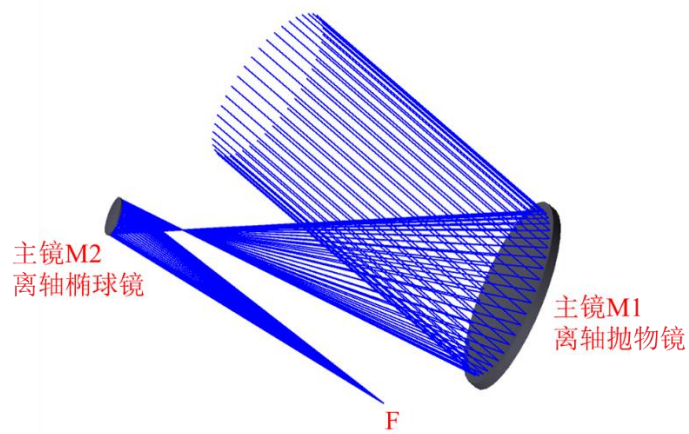


图 1.2 AIMS 望远镜引导光学格里高利系统光路图

由于系统离轴量较大，望远镜桁架结构非常庞大，其总质量达到 6.8 吨，如图 1.3 所示。尽管在结构方面已经过精心设计，但如此庞然大物仍很难保证系统的刚性。在实际的跟踪观测过程中，随望远镜指向变化，由自身重力所致的结构弯沉以及随环境温度变化等复杂因素所致桁架形变，会导致次镜相对于主镜理想位置偏离，从而导致光学系统的像差增大，无法实现其科学目标。

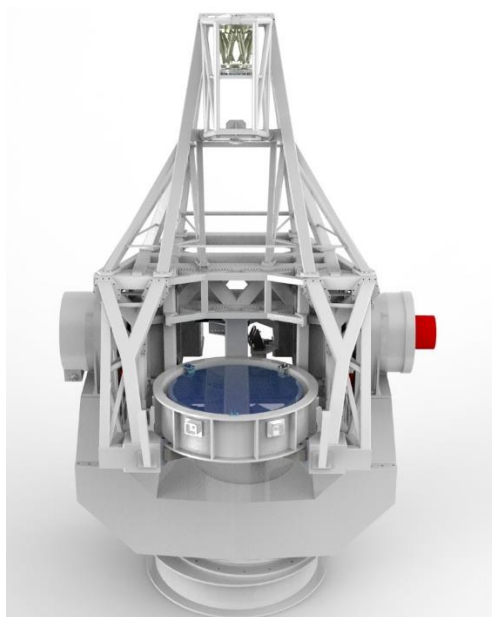


图 1.3 AIMS 望远镜主次镜桁架结构

根据 AIMS 望远镜设计公差要求，如表 1.1 所示，次镜相对于主镜平移量小于 $2.5\mu\text{m}$ ，倾斜量小于 $2''$ 。然而在力热耦合有限元分析中发现，望远镜在对太阳进行跟踪观测过程中，桁架因重力和温度等因素影响，次镜相对于主镜所产生的平移量达到数十微米，倾斜量达到 $3''$ ，将远超出望远镜公差范围，影响光学系统的成像质量。这种因结构形变所致的像质退化，是 AIMS 望远镜的研制面临着诸多技术挑战之一，也几乎是地基大型望远镜不可避免的共性问题。

表 1.1 M2 位置公差与像质退化

	公差	像质退化
Z / μm	1.5	0.0184
U / μm	2.5	0.0078
V / μm	2.5	0.0143
X / $arcsec$	2	0.0134
Y / $arcsec$	2	0.0119
总像质退化		0.0304

本论文正是针对此问题开展研究,探索 AIMS 望远镜次镜姿态失调的实时校正方法,研究次镜失调量与波前畸变像差的关系,解决望远镜桁架因形变导致的像质退化问题,提高望远镜成像质量和测量精度,确保实现其科学目标。

1.3 国内外研究现状

应对次镜失调的问题,世界上大型太阳望远镜,例如美国大熊湖 1.6 米的 GST 望远镜^[1-3]和德国 1.5 米 GREGOR 望远镜^[4,5],以及 4 米的 DKIST^[6]等,均将次镜安装于六足位移平台上,利用自适应光学系统的相关 Shack-Hartmann 波前传感器(Shack-Hartmann Wave-Front Sensor, S-H WFS)进行波前畸变探测,在校正大气扰动的同时,提取次镜失调信息并加以改正的方案。

由于太阳是面源,太阳望远镜的 S-H WFS 每个微透镜子单元获得的是具有一定视场和分辨率的图像。相比基于点目标质心算法波前探测技术^[7],太阳波前探测技术面临的新挑战^[8, 9]:需要选取黑子、暗条、谱斑等高对比度日面特征作为信标进行波前探测。该方法需要利用相关算法计算子孔径图像与参考图像间位置得出偏移量,这不仅加大了系统波前探测的难度,也加重了波前实时处理的计算负担。在观测低对比度的宁静区时,基于相关算法的扩展目标波前探测会出现较大的误差。我们知道,在太阳活动极小年阶段,日面没有明显活动区的情况通常会持续数月之久,这对太阳宁静区的观测研究极为不利。除此之外,由于 AIMS 工作于中红外波段,在该波段的视宁度相当于可见光波段的 200mm 口径的望远镜,因此 AIMS 望远镜并未配备自适应光学系统。在项目设计之初,采用在格里

高利焦点后设置波前传感探测光路,利用日面特征扩展源目标实现次镜姿态校正方案。因此,受限于白天更差的大气视宁度条件,大气的扰动会导致图像高频的随机抖动,也会降低提取次镜姿态失调的灵敏度和可靠性。

在夜天文观测中,为了能将基于点目标的 S-H WFS 应用于星盘、星云等暗弱扩展目标观测,Foy 和 Labeyrie 首次提出激光导星技术^[10],即通过向天空发射一束激光,在目标等晕区范围内的大气层散射形成人造点目标,利用基于质心算法的哈特曼波前探测器探测该目标路径上的波前畸变近似作为原目标的波前畸变,并以此对扩展目标进行校正成像^[11]。KECK II 望远镜使用激光导星自适应光学系统校正后成功采集的银河系的图像^[12,13]。然而,对于太阳观测而言应用激光导星波前探测并不现实,因为要么需要非常明亮的激光透射点源,以对抗太阳的明亮背景,要么必须使用非常特殊的窄带滤光器^[14]。

但该方法启发我们寻求利用构造人工星点的方法实现 AIMS 次镜姿态调整。通常构造星点的方法是采用平行光管实现的。平行光管可以提供高质量的平行光,是望远镜装调检测的常规手段。然而在望远镜实时观测过程中,采用大口径平行光管与望远镜随动非常困难。但我们考虑到可以采用小口径平行光源构造人工星点,在入瞳附近入射望远镜局区域,基于部口径波前探测实现望远镜次镜姿态的实时校正。因为光学系统局部口径波前是全口径波前的子集,所以由次镜姿态失调导致的波前畸变信息亦包含在局部口径波前中。而望远镜主次镜面型由其机械结构和主动光学设计来保证,所以由面型变化导致的波前畸变对局部口径波前探测的影响可忽略不计。因而在原理上这种方法是可行的。该方法优势在于,其一,利用人工星点进行波前探测,可以不依赖低对比度面源的互相关计算,计算速度更快,准确性更高;其二,平行光源靠近望远镜入瞳入射,空气链路短,大气扰动对波前探测影响相对较小。

校正方法 S-H WFS 只探测次镜失调的初级像差,所以校正次镜失调相当于对望远镜主次镜系统的计算机辅助装调^[15]。20 世纪 80 年代,Ira M. Egdall 提出计算机辅助装调的概念^[16],目前衍生出许多关于成像系统光学元件失调的理论和校正方法。目前常用的方法有灵敏度矩阵法和逆向优化法。逆向优化依靠光学优化软件,不具备实时性,适用于光学系统较大的失调。灵敏度矩阵法^[17-19]是目前

应用最为广泛的计算机辅助装调方法,该方法直接反映表征系统像差的 Zernike 系数与不同的失调量建立线性关系,线性系数矩阵被称为灵敏度矩阵,且具备实时性。亚利桑那大学光学中心于 1987 年开始对计算机辅助技术进行了研究, Lawrence 和 Chow 等人采用 Hartmann 法对光学系统的像差进行了检测,依据失调像差情况指导系统的装调^[20]; Anastacia M. Hvisc 利用该方法分析了南非大型望远镜(SALT)球差校正器的失调像差^[21]; 2000 年美国的 Ball Aerospace & Technologies 公司研制 600mm 口径离轴三反光学系统的装调过程,一周时间内波前像差 RMS 值从最开始的 0.45λ 减至 $0.041\lambda(\lambda=632.8\text{nm})$ ^[22]; 2011 年美国 Raytheon 公司利用计算机辅助装调技术成功装配世界上第一台五反离轴镜光学系统^[23]。国内,长春光机所的孙敬伟等利用灵敏度矩阵法完成发射望远镜的装,实现波像差 RMS 为 0.1467λ ^[24]; 南京天光所罗森、朱永田等对一个口径为 250mm 的离轴卡塞格林系统进行了装调,得到了中心视场波像差 RMS 为 0.0405λ ^[25]。随着我国光学技术和天文望远镜的需要的不断发展,该技术趋近于成熟且达到国际先进水平^[26]。

由此可见,计算机辅助装调在装调离轴望远镜过程中,发挥了重要的作用,并且取得较好的装调结果。本文将计算机辅助装调中的灵敏度矩阵理论结合基于点源波前探测技术运用于校正 AIMS 望远镜次镜失调。

1.4 论文章节结构

本论文共分为五章:

第一章主要介绍了 AIMS 项目背景和科学目标,分析了 AIMS 望远镜主次镜离轴格里高利系统面临次镜失调导致像质退化的问题;调研了目前世界上大口径天文望远镜应对次镜失调校正所采用的方法;针对现有方法的不足,并根据 AIMS 望远镜的实际情况,提出了利用小口径平行光源构造人工星点,基于局部口径波前探测实现校正的方案;并调研了计算机辅助装调中的灵敏度矩阵方法的研究现状,该方法可建立失调量与像差之间的关系,应用于 AIMS 望远镜次镜失调校正。

第二章为本文的理论基础。将首先介绍 S-H WFS 的探测原理以及提高质心探测精度的一些算法理论;其次介绍基于 Zernike 多项式的波前重构原理和采用

波前 PV 值、RMS 值和斯特列尔比等波前评价标准；最后介绍失调量计算灵敏度矩阵原理。基于上述论，我们确定了波前探测、波前重构、失调量计算的技术路线。

第三章，我们基于 AIMS 望远镜实际参数，分析了局部口径点源波前探测的次镜校正方法进行了光学模拟仿真分析，计算分析了局部口径选取的位置和大小对波前探测精度的影响；模拟建立了灵敏度矩阵模型，并利用该模型计算了次镜失调量，分析了对质心探测精度的要求。在模拟次镜姿态失调下，根据畸变波前的 Zernike 系数可以准确地计算出次镜失调量，校正后位置残差满足要求，从而在理论上证明了该方法的可行性。此外，本章分析了构造人工星点所需平行光源的精度需求，并初步设计了体积小、质量轻的反射式平行光源，满足 AIMS 望远镜应用需求。

第四章，将详细介绍实验验证系统的设计、装调及开展实测过程。首先系统地阐述利用与 AIMS 望远镜主次镜参数相同的子孔径镜面搭建验证系统，完全模拟次镜失调实际情况的设计思想，以及采用 ZYGO 干涉仪与 S-H WFS 共路检测的方法装调与测试方法。然后给出了实测结果，并进行分析，结果表明在误差范围内，Zernike 系数与次镜姿态失调量近似满足线性关系，从而证实了基于局部口径波前探测的校正方法可行性。最后，基于实测结果制定了 AIMS 望远镜次镜失调校正策略。

第五章在总结本文研究工作的基础上，提出进一步提高测量精度的方案与设想。

第2章 基于 Shack-Hartmann 波前传感器校正方法基本理论

本章介绍基于 S-H WFS 的望远镜次镜校正方法的基本理论，根据 AIMS 望远镜次镜姿态失调的校正设计方案，概括为三大理论模块：波前探测、波前重构、失调量计算，其中包括 S-H WFS 的结构和原理及其质心算法、波前重构的原理和算法及其评价质量标准、灵敏度矩阵理论。

2.1 波前探测理论

2.1.1 Shack-Hartmann 波前传感器原理

波前传感器是次镜校正系统核心部件，实时检测畸变波前，并输出畸变波前函数信息，以用于计算望远镜主次镜相对变化量，并在此基础上对畸变进行复原和校正。目前，波前传感器主要包括 S-H WFS、干涉波前传感器、曲率波前传感器和四棱锥波前传感器。由于 S-H WFS 可以实时探测两个方向的波前斜率，且具有结构简单、抗干扰能力强、光能利用率高、测量动态范围大和方便搭建测量光路等优点，目前广泛应用于天文望远镜领域的自适应光学^[27,28] (Adaptive optics, AO)和主动光学^[29] (Active optics, Ao)。哈特曼波前探测技术最早在 1909 年由德国天体物理学家 Johannes Frans Hartman 提出，用于检测光学元件的表面面型。1971 年，Roland Shack 对其进行了十分有效的改进，将小孔径阵列换成了微透镜阵列，使得该技术的探测精度和光能利用率均得到了大幅的提升^[30]。如今，经过该改进后被称为 Shack-Hartmann 波前传感器。

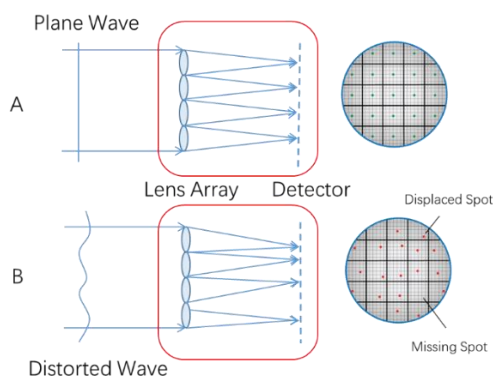


图 2.1 S-H WFS 原理图

S-H WFS 由微透镜阵列和探测器组成，探测器靶面位于微透镜焦平面处，其原理如图 2.1 所示，S-H WFS 利用微透镜阵列将光束聚焦成一个光斑阵列成像于探测器靶面，实现对光波前的分割采样。当一束畸变波前入射波前传感器，经微透镜每个子单元在焦平面成像的光斑质心将会相对于参考基准在 x 和 y 方向上发生偏移。

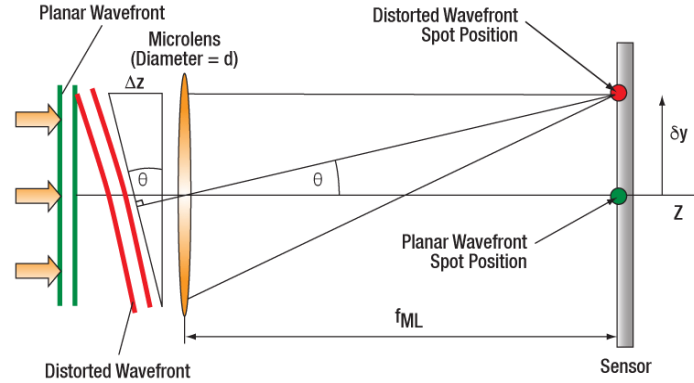


图 2.2 S-H WFS 子单元原理图（Thorlabs 官网）

根据如图 2.2 所示几何关系可得，每一个微透镜子单元范围内畸变波前的平均斜率或者梯度，如公式 2.1 所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial W(x_n, y_n)}{\partial x} = \frac{\Delta x_n}{f_{ML}} \\ \frac{\partial W(x_n, y_n)}{\partial y} = \frac{\Delta y_n}{f_{ML}} \end{cases} \quad (2.1)$$

式中： (x_n, y_n) 表示第 n 个子单元坐标， $\Delta x_n, \Delta y_n$ 表示第 n 个子单元像点坐标偏移量， f_{ML} 表示波前传感器微透镜焦距， W 是波前函数。

2.1.2 点质心算法

S-H WFS 原理是将波前畸变探测转换为对每个子单元的质心探测和偏移量探测的问题。因此，质心探测的精度决定了波前探测的精度，对于 AIMS 次镜姿态校正能力有着至关重要的影响。

常用的一种质心探测方法是加权像素平均值算法，如公式 2.2 所示，即所谓一阶矩算法，适用于图像信噪比较高的情况，其数学运算简单，容易理解。

$$\begin{cases} x_c = \frac{\sum_{i,j}^{M,N} x_i I_{ij}}{\sum_{i,j}^{M,N} I_{ij}} \\ y_c = \frac{\sum_{i,j}^{M,N} y_j I_{ij}}{\sum_{i,j}^{M,N} I_{ij}} \end{cases} \quad (2.2)$$

式中： M, N 为探测窗口大小， I_{ij} 为对应像素点光强， (x_i, y_j) 为像素点坐标， (x_c, y_c) 为像点质心坐标。

对于 S-H WFS 来说，影响传感器的质心探测精度的因素^[31-34]有很多，主要包括：采样误差、截断误差、读出噪声、光子噪声、背景噪声等。为了降低噪声的影响，人们提出不同的算法来提高质心的探测精度。详细的算法原理^[35-38]如下：

1) 有限制的一阶矩算法^[39-41]：由于在一阶矩算法中，每个像素和质心的距离存在杠杆效应，所以远离光斑质心位置的像素随着距离的增加，其影响也会较大。因此，通过适当缩小子单元探测窗口大小来降低边缘噪声对探测精度的影响，以提高质心的探测精度。

2) 加阈值的一阶矩算法：由于背景电平和读出噪声都是互相独立的且可叠加的，而且噪声信号与光斑探测信号是互不相关的，因此可以设置合适的阈值，将图像的每个像素值与阈值作比较，小于阈值的置零，可以有效地抑制噪声，从而提高信噪比和探测精度，但是过低的阈值不能完全的去噪声，过高的阈值会减掉部分有效信号。一般来说，波前传感器光斑强度呈高斯分布，且光斑面积占探测面积的比例较小($< 20\%$)，其像素灰度值集中，信号灰度分布比较稳定，而背景噪声可认为是高斯噪声。阈值选择最简单的方法是人工选择，但是无法满足多个子单元阈值及无人介入的波前探测。自动选取的阈值是基于利用灰度概率密度分析图像的灰度分布，再利用一定的方法选择合适的阈值。常用的自动阈值法有：迭代法、最小误差法和最大类间方差法即 Otsu 法^[42]。针对波前传感器的光斑亮度各异，对每个子单元探测区域求解不同的阈值。

3) 加权的一阶矩算法：根据图像处理理论，图像信噪比和灰度强度的平方根成正比，通过对图像像素的灰度值加大于 1 的指数可以有效的提高图像信噪比，从而提高质心探测精度。

此外，沈峰等人提出使用最小二乘法拟合法来提高弱光波前的质心探测精度^[43]；A. Talmi 和 E. N. Ribak 等人提出使用空间卷积滤波器的方法降低噪声的影

响^[44]；Y. Carmon 和 E. N. Ribak 等人提出在频域进行降噪处理的方法^[45]。

2.2 波前重构理论

2.2.1 基本原理

S-H WFS 探测波前只能测量出各个子单元的波前斜率数据，还需要利用波前重构方法复原波前函数，而用于 S-H WFS 的波前重构方法比较多^[46]，其中应用最为普遍的是模式法^[47, 48]和区域法^[49, 50]。两者对比总结如下：

表 2.1 波前重构模式法和区域法对比

	模式法	区域法
包含项	重构的 Zernike 项	全部 Zernike 项+非 Zernike 项
优点	波前变化平缓，方便分析	展示更多的细节和波前信息
缺点	精度稍低	计算速度缓慢

波前重构过程本质上是一个求解线性方程的问题，两种重构方法均可以采用式 2.3 表示。

$$\mathbf{S} = \mathbf{B}\mathbf{W} \quad (2.3)$$

式中： $\mathbf{B}$ 为重构矩阵，在模式法中是每一项模式对应的每个子孔径的斜率信息，而在区域法中描述子孔径斜率与网格点相位间的关系； $\mathbf{S}$ 为畸变波前对应的所有子单元的斜率； $\mathbf{W}$ 在模式法中为分解的模式系数，在区域法中为求解的子孔径网格对应点相位值。

运用最小二乘法求解式 2.4 的方程，获得待测信息

$$\mathbf{W} = \mathbf{B}^+\mathbf{S} \quad (2.4)$$

式中： $\mathbf{B}^+$ 为 $\mathbf{B}$ 的广义逆矩阵，在实际运用中，可以根据 S-H WFS 的参数和实际光路事先确定广义逆矩阵 $\mathbf{B}^+$ ，并存储在计算机中，以便于快速运算。

本论文波前重构采用模式法，而模式法中最常用的正交模式是 Zernike 多项式模式^[51]，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，它在单位圆内的定义如下：

$$\left. \begin{aligned} Z_{even j} &= \sqrt{n+1} R_n^m(\rho) \sqrt{2} \cos(m\theta) \\ Z_{odd j} &= \sqrt{n+1} R_n^m(\rho) \sqrt{2} \sin(m\theta) \end{aligned} \right\} m \neq 0 \quad (2.5)$$

$$Z_j = \sqrt{n+1} R_n^0(\rho) \quad m = 0$$

其中 $R_n^m(\rho)$ 定义如下:

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^{(n-s)!}}{s! \left[\frac{n+m-s}{2} \right]! \left[\frac{n-m-s}{2} \right]!} \rho^{n-2s} \quad (2.6)$$

式中: n 为轴向级次, m 为角向级次, $n \geq m$ 为非负整数, j 定义为模式序数, 即为 Noll 序列, 如表 2.2 所示。

表 2.2 Noll 序列表

n, m	0,0	1,1	1,-1	2,0	2,2	2,-2	3,1	3,-1	3,3	3,-3
j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n, m	4,0	4,2	4,-2	4,4	4,-4	5,1	5,-1	5,3	5,-3	5,5
j	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

当 j 为偶数时, Zernike 多项式对应 $\cos$ 函数形式, 当 j 为奇数时, Zernike 多项式对应 $\sin$ 函数形式。图 2.3 为前 21 项 Zernike 多项式图像。

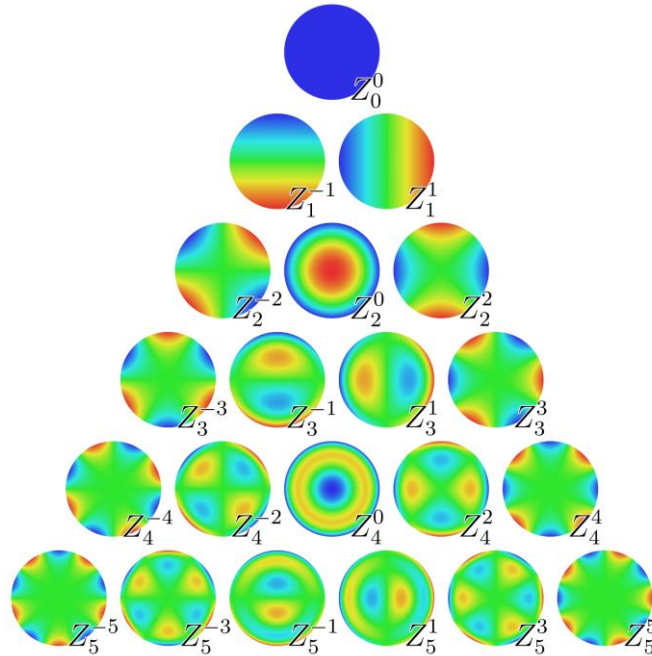


图 2.3 前 21 项 Zernike 多项式图像

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, 如表

2.3 所示是 Zernike 多项式第 2 项到第 9 项对应的像差类别，分别是球差、彗差、像散、离焦和倾斜，并且前几项系数与像差理论中的 Seidel 像差对应，如表 2.4 所示。

表 2.3 Zernike 多项式初级像差含义

	直角坐标系	极坐标	含义
z_2	x	$\rho \cos \theta$	X 方向倾斜
z_3	y	$\rho \sin \theta$	Y 方向倾斜
z_4	$2(x^2 + y^2) - 1$	$2\rho^2 - 1$	离焦
z_5	$x^2 - y^2$	$\rho^2 \cos 2\theta$	0° or 90° 像散
z_6	$2xy$	$\rho^2 \sin 2\theta$	45° 像散
z_7	$x(3(x^2 + y^2) - 2)$	$(3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta$	X 彗差和倾斜
z_8	$y(3(x^2 + y^2) - 2)$	$(3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta$	Y 彗差和倾斜
z_9	$6(x^2 + y^2)^2 - 6(x^2 + y^2) + 1$	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	球差和离焦

表 2.4 Zernike 系数表示的初级像差

像差类别	像差值	角度
位移	$Z_1 - Z_4 + Z_9$	
倾斜	$\sqrt{(Z_2 - 2Z_7)^2 + (Z_3 - 2Z_8)^2}$	$\tan^{-1} \left(\frac{Z_3 - 2Z_8}{Z_2 - 2Z_7} \right)$
离焦	$2Z_4 - 6Z_9 \pm \sqrt{Z_5^2 + Z_6^2}$	
像散	$\pm 2\sqrt{Z_5^2 + Z_6^2}$	$\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{Z_6}{Z_5} \right)$
彗差	$3\sqrt{Z_7^2 + Z_8^2}$	$\tan^{-1} \left(\frac{Z_8}{Z_7} \right)$
球差	$6Z_9$	

光学系统中光学元件的位置参数偏离设计理想值将会引入波像差，因而这种波像差可以表示为元件位置参数的函数。由于失调量主要导致初级像差，而高级像差的变化相对于初级像差较小，因此光学失调量校正时基于初级像差信息，主要控制初级球差、彗差和像散，故选择分析初阶 Zernike 多项式。波前函数 $W(x, y)$

可以表示为 Zernike 系数与 Zernike 多项式乘积的求和：

$$W(x, y) = \sum_{i=0}^M k_i Z_i(x, y) \quad (2.7)$$

式中：\$M\$ 表示 Zernike 多项式项数，\$Z_i(x, y)\$ 表示第 \$i\$ 项 Zernike 多项式，\$k_i\$ 表示第 \$i\$ 项 Zernike 系数。

根据波前探测原理可得：

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial x} = \sum_{i=1}^M k_i \frac{\partial Z_i(x_n, y_n)}{\partial x} = \frac{\Delta x_n}{f_{ML}} \\ \frac{\partial W}{\partial y} = \sum_{i=1}^M k_i \frac{\partial Z_i(x_n, y_n)}{\partial y} = \frac{\Delta y_n}{f_{ML}} \end{cases} \quad (2.8)$$

式中：\$(x_n, y_n)\$ 表示第 \$n\$ 个子单元坐标，\$\Delta x_n, \Delta y_n\$ 表示第 \$n\$ 个子单元像点坐标偏移量，\$f_{ML}\$ 表示波前传感器微透镜焦距。

依据归一化算法将各个参数统一到待测系统坐标系，进一步可计算出光瞳面波前各个子单元对应的波前斜率，以及根据每个子单元的斜率，建立方程组如式 2.9，再通过相应的算法求解得到 Zernike 系数 \$k_i\$，最终得到波前函数。

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=2}^M k_i \frac{\partial Z_i(x_1, y_1)}{\partial x} &= \frac{\Delta x_1}{f} \\ &\vdots \\ \sum_{i=2}^M k_i \frac{\partial Z_i(x_N, y_N)}{\partial x} &= \frac{\Delta x_N}{f} \\ \sum_{i=2}^M k_i \frac{\partial Z_i(x_1, y_1)}{\partial y} &= \frac{\Delta y_1}{f} \\ &\vdots \\ \sum_{i=2}^M k_i \frac{\partial Z_i(x_N, y_N)}{\partial y} &= \frac{\Delta y_N}{f} \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

式中：\$N\$ 为成像子单元数，且 \$N \geq M\$。

改写成矩阵形式，设以下变量：

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Z_2(x_1, y_1)}{\partial x} & \dots & \frac{\partial Z_M(x_1, y_1)}{\partial x} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Z_2(x_N, y_N)}{\partial x} & \dots & \frac{\partial Z_M(x_N, y_N)}{\partial x} \\ \frac{\partial Z_2(x_1, y_1)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial Z_M(x_1, y_1)}{\partial y} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Z_2(x_N, y_N)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial Z_M(x_N, y_N)}{\partial y} \end{bmatrix} \\ \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_2 \\ \vdots \\ k_M \end{bmatrix} \\ \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta x_1}{f} \\ \vdots \\ \frac{\Delta x_N}{f} \\ \frac{\Delta y_1}{f} \\ \vdots \\ \frac{\Delta y_N}{f} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (2.10)$$

可得：

$$\mathbf{ZK} = \mathbf{F} \quad (2.11)$$

因为方程数大于未知数个数，所以该方程组为矛盾方程组，此类方程组没有完全吻合的解，通常采用最小二乘法求解式 2.11 的方程，所求解使得 $\mathbf{F} - \mathbf{ZK}$ 的 2 范数取得最小值，即：

$$\|\mathbf{F} - \mathbf{ZK}\|_2 = \min_{\mathbf{F} \in \mathbb{R}^k} \|\mathbf{F} - \mathbf{ZK}\|_2 \quad (2.12)$$

可利用合适的方法计算 $\mathbf{Z}$ 的广义逆矩阵 $\mathbf{Z}^+$ ，则矩阵的最小二乘解为：

$$\mathbf{K} = \mathbf{Z}^+ \mathbf{F} \quad (2.13)$$

求解广义逆矩阵 $\mathbf{Z}^+$ 的方法主要由直接方程组法（Direct Normal Equations Method，简称 DNE 法）、格莱姆-施密特正交变换法（Gram-Schmidt Orthogonal Transformation Method，简称 G-SOT 法）、豪斯霍尔德变换法（Householder Transformation Method，简称 HT 法）和奇异值分解法（Singular Value Decomposition Method，简称 SVD 法）。

根据文献^[52]可知，在处理数据量较大的情况下，DNE 和 G-SOT 法存在法方程病态的影响；HT 法的 Householder 变换导致计算量较大；而 SVD 法利用系数矩阵的奇异值分解求解广义逆矩阵，该理论较为简单，计算量较小，具有良好的

计算精度。所以，求解广义逆矩阵采用 SVD 分解法，即奇异值分解法，其原理如下：

对于式 2.14 中的矩阵 $Z \in R$ ，其秩 $r \leq M - 1$ ，对 Z 进行奇异值分解：

$$Z = V \begin{bmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U^T \quad (2.14)$$

式中： $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$ ， $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r$ 为矩阵 Z 的奇异值，且 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r \geq 0$ 。U 和 V 分别是矩阵 Z 的右奇异值向量和左奇异值向量的规范正交向量组成的矩阵。

将式 2.14 改写成：

$$V \begin{bmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U^T K = F \quad (2.15)$$

经过矩阵运算可得：

$$K = Z^+ F = U \begin{bmatrix} \Sigma^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} V^T F \quad (2.16)$$

即：

$$Z^+ = U \begin{bmatrix} \Sigma^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} V^T \quad (2.17)$$

综上，根据波前传感器测得的波前斜率信息，基于 Zernike 多项式构建方程组，再使用 SVD 法求解方程组，可得波前函数的 Zernike 系数。

2.2.2 评价标准

波前重构后，通常使用波前峰谷值（PV 值）和均方根（RMS）衡量波前畸变程度^[53, 54]，PV 值表示的是波前相位最大值与最小值之间的差值，它忽略了区域内的局部信息，只是对波前的整体质量进行了描述，RMS 可以全面的反映整个区域上的波前质量，其计算公式如下：

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 (w(\rho, \theta) - \overline{w(\rho, \theta)})^2 \rho d\rho d\theta} = \sqrt{\overline{w^2(\rho, \theta)} - \overline{w(\rho, \theta)}^2} \quad (2.18)$$

其中， $\overline{w(\rho, \theta)}$ 是波前平均值。

$$\overline{w(\rho, \theta)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 w(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \quad (2.19)$$

计算直角坐标系下的离散数据均方根公式如下：

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^N (w_i(x, y) - \overline{w(x, y)})^2} \quad (2.20)$$

$$\overline{w(x, y)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i(x, y) \quad (2.21)$$

在自适应光学系统中，经常使用波前的斯特列尔比(Strehl Ratio, SR)定义畸变波前与理想波前成像的峰值强度的比值，亦是波前重构的一个评价标准，公式如 2.22 所示。

$$SR = \frac{I}{I_0} = \left| \frac{A(\rho)e^{i\varphi(\rho)}}{A(\rho)} \right|^2 \quad (2.22)$$

式中， I_0 是衍射极限的峰值强度， I 是实际的光学系统的峰值强度。

对上面的式子进行麦克劳林级数展开，并忽略二阶以上的高阶项，则上式可简化为：

$$SR = 1 - \sigma_\varphi^2 \quad (2.23)$$

其中 σ_φ^2 为波前畸变相位的方差。

若波前畸变相位服从高斯分布，则上式可进一步表示为：

$$SR = \exp(-\sigma_\varphi^2) \quad (2.24)$$

从上面的式子可以看出，斯特列尔比仅取决于相位的方差，对像差敏感，因此非常适合用于波前质量评价。SR 越大，波前质量越好。

2.3 失调量计算理论

经过波前重构得到了 Zernike 系数，表征像差的 Zernike 系数将用于计算次镜校正量。根据前文分析，课题应用灵敏度矩阵法理论，建立 AIMS 望远镜次镜的失调数学模型，并反馈于六足位移平台实时自动校正次镜失调。模型建立的精度决定了失调量求解的精度，直接影响到次镜姿态校正质量。光学系统失调量是指光学元件位置参数与设计理想值之间存在的偏差量。失调将会引入像差，会使得系统的成像质量降低。从数学上来说，光学系统像差是元件位置参数(失调量)的函数。系统像差用 $F_j(j = 1, 2, \dots, m)$ 来表示，各光学元件的位置参数用 $x_i(i =$

1,2,……m)来表示, 则二者之间用函数关系式表示为:

$$\begin{bmatrix} F_j \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_{2i} \cdots, x_n) \\ \vdots \\ f_m(x_1, x_{2i} \cdots, x_n) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

上式中 $f_j(x_1, x_{2i} \cdots, x_n)$ 表示了系统像差与光学元件位置参数之间的函数关系, 这是一个复杂的非线性方程组, 从数学角度上来讲, 即根据系统要求的成像质量 $(F_1, F_2 \cdots, F_m)$, 求解上述方程或得位置参数 $(x_1, x_2 \cdots, x_m)$ 的值。函数关系式泰勒展开选用幂级数的一次项, 将把失调量与系统像差系数之间的函数关系近似地用线性方程来代替:

$$F_j = F_{0j} + \frac{\partial f_j}{\partial x_1}(x_1 - x_{01}) + \cdots + \frac{\partial f_j}{\partial x_n}(x_n - x_{0n}) \quad (2.26)$$

上式中, F_{0j} 为光学系统在设计完成之后的剩余像差值, $(x_n - x_{0n})$ 为系统中各个位置参数相对于理想系统时的变化量, F_j 为光学系统中像差的实际测量值。 $\frac{\partial f_j}{\partial x_1}, \frac{\partial f_j}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f_j}{\partial x_n}$ 为不同像差对光学元件不同位置参数的一阶偏导数。利用函数值相对于位置的差商 $\frac{\delta f_j}{\delta x_1}, \frac{\delta f_j}{\delta x_2}, \dots, \frac{\delta f_j}{\delta x_n}$ 来近似代替微商 $\frac{\partial f_j}{\partial x_1}, \frac{\partial f_j}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f_j}{\partial x_n}$, 可以得到像差系数与失调量间的近似线性方程组:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{01} \\ \vdots \\ F_{0m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1} \Delta x_1 + \cdots + \frac{\delta f_1}{\delta x_n} \Delta x_n \\ \vdots \\ \frac{\delta f_m}{\delta x_1} \Delta x_1 + \cdots + \frac{\delta f_m}{\delta x_n} \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

改写成矩阵形式, 设以下变量:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta F = \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \vdots \\ \Delta F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{01} \\ \vdots \\ F_{0m} \end{bmatrix} \\ \Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{01} \\ \vdots \\ x_{0m} \end{bmatrix} \\ A = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta f_1}{\delta x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\delta f_m}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta f_m}{\delta x_n} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (2.28)$$

可得：

$$A \cdot \Delta X = \Delta F \quad (2.29)$$

根据波前重构得到的 Zernike 系数，像差变量记为 $\Delta Z = Z - Z_0$ ，表示当前光学系统的实测 Zernike 系数值与光学设计 Zernike 系数之差。 A 为光学系统的灵敏度矩阵，是由光学设计参数确定的已知数据，可以通过光学设计软件模拟系统不同位置的失调状态计算得到系统的灵敏度矩阵。已知灵敏度矩阵 A 和 Zernike 系数 ΔZ ，经过下面矩阵变化，可以求得失调量 ΔX 。

$$A \cdot \Delta X = \Delta Z$$

$$A^T A \cdot \Delta X = A^T \Delta Z$$

$$\Delta X = (A^T A)^{-1} A^T \Delta Z \quad (2.30)$$

通过上述分析发现，灵敏度矩阵法的基础是假设光学系统的像差和失调量是线性关系，而实际上这种线性关系只在失调量很小的情况下近似成立。而从 AIMS 望远镜成像动态分析报告可知，次镜一天最大的位置变化量在微米级别，所以这个方法具有可行性。

2.4 本章小结

本课题选用 S-H WFS，该传感器利用微透镜阵列实现对波前分割，根据每个子单元内像点质心偏移量获得各子区域波前斜率信息，而质心偏移精度关乎波前

探测的精度,需要一定的质心算法提高信噪比保证精度。在获得波前斜率信息后,利用 Zernike 多项式重构波前,可得表征波前像差的 Zernike 系数。然后分析了灵敏度矩阵理论,在失调量很小的情况下,表征像差的 Zernike 系数与不同失调量之间满足近似线性关系,可得灵敏度矩阵。在获得畸变波前的 Zernike 系数后,即可计算出失调量。由此,可确定波前探测、波前重构、失调量计算的技术路线。本章的理论知识为后续章节分析、计算奠定基础。

第3章 局部口径校正方案及光学模型仿真计算

本章节分析太阳低对比度扩展目标的波前探测面临的困难基础上,提出了基于点源的局部口径波前探测的校正方案,并对该方案进行了光学仿真和失调量模拟计算,从理论上分析了该方法的可行性。

3.1 局部口径波前探测校正方案

目前应对同样的次镜失调的问题,通常的解决方法是将次镜安装在精密六足位移平台上,通过相关 S-H WFS 探测光学系统的波前变化,以此判断次镜的姿态失调,并驱动六足位移平台校正次镜失调。太阳望远镜的波前探测是基于面源目标, S-H WFS 每个微透镜子单元获得的是具有一定视场和分辨率的图像,通常使用绝对差分算法或互相关因子法等算法计算子孔径图像与参考图像间的函数峰值位置得出偏移量^[55-58]。图 3.1 所示^[59]为太阳黑子在 S-H WFS 形成的图像阵列示意图,左图表示理想波前,右图表示畸变波前。为了提高探测精度,通常选取黑子、暗条、谱斑等高对比度日面特征作为目标进行波前探测,但观测低对比度的宁静区时,基于相关算法的扩展目标波前探测会有较大的困难。在太阳活动极小年阶段,日面没有明显活动区的情况通常会持续数月之久,这对太阳宁静区的观测研究极为不利。此外,受限于白天更差的大气视宁度条件,大气的扰动会导致图像高频的随机抖动,也会降低提取次镜姿态失调的灵敏度和可靠性。因此,通常应对方案是利用自适应光学系统的相关 S-H WFS 在校正大气扰动的同时提取次镜失调信息,而后加以校正。然而,由于波前传感器的位置靠后,除了次镜姿态失调信息外,还叠加了光路中其他器件的失调导致像差变化,对准确提取次镜姿态变化的信息带来一定的困难。

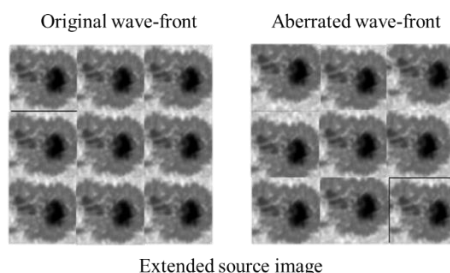


图 3.1 S-H WFS 太阳黑子目标图像阵列

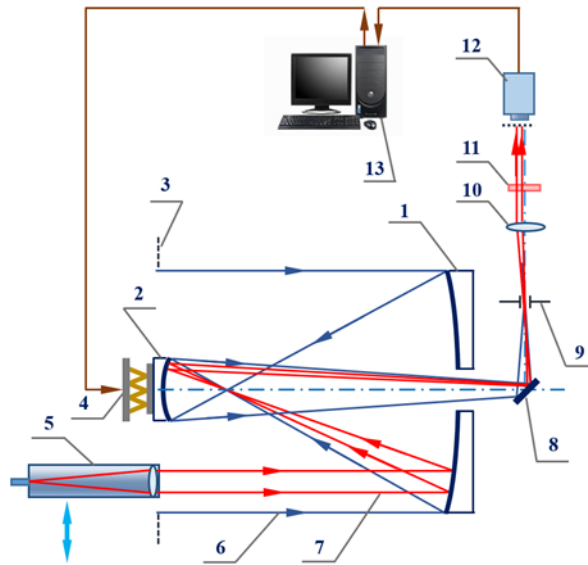


图 3.2 局部口径波前探测示意图

注：1. 主镜；2. 次镜；3. 望远镜入瞳位置；4. 六轴位移台；5. 平行光源；6. 太阳入射光线；7. 检测光线；8. 折轴反射镜；9. 视场光阑；10. 准直镜组；11. 窄带滤光片；12. 波前传感器；13. 主控计算机。

针对上述的困难，我们创新性提出利用小口径平行光源构造人工星点，基于局部口径波前探测实时校正望远镜次镜姿态的方法。局部口径波前探测方法示意图如图 3.2 所示，采用小口径平行光源构造人工星点，使其入射方向平行于望远镜主光线方向，且其出瞳靠近望远镜入瞳，入射望远镜的局部区域。在望远镜的格里高利焦点后设计准直光路，与波前传感器的参数相匹配，并在光路中放置对应波段的窄带滤光片。平行光源安装于精密平移机构上，可在进行校正时切入光路，校正结束后移出光路。次镜安装于精密六足位移平台上，实现姿态精密补偿。在进行校正时，移入折轴反射镜 M3，将光路切换至检测光路。由主控计算机对获得的波前数据进行计算，并驱动精密六足位移平台进行补偿，以达到像质要求。

因为光学系统局部口径波前是全口径波前的子集，所以由次镜姿态失调导致的波前畸变信息亦包含在局部口径波前中，而望远镜主次镜面型由其机械结构和主动光学设计来保证，面型变化导致的波前畸变对次镜失调波前探测的影响可忽略不计。因此，本方法在原理上是可行的。这种方法优势在于，其一，利用人工星点进行波前探测，可以不依赖低对比度面源的互相关计算，计算速度更快，准确性更高；其二，平行光源靠近望远镜入瞳入射，空气链路短，大气扰动对波前探测影响相对较小；其三，可避免其他光学元器件失调像差影响。局部口径波前

探测的校正方法的流程图如图 3.3 所示。

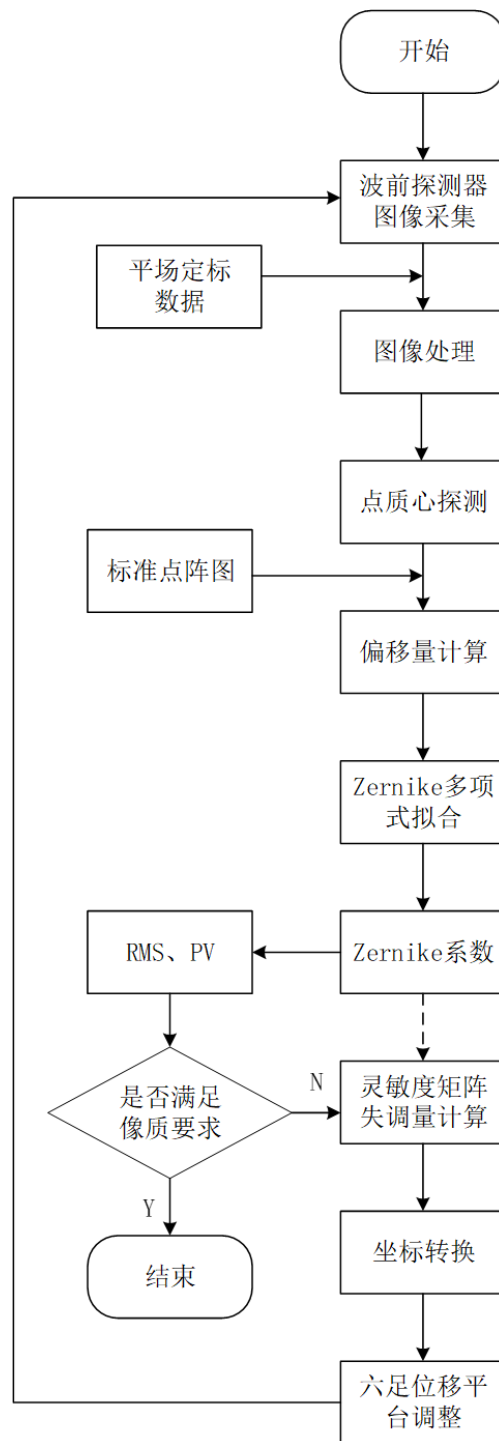


图 3.3 局部口径波前探测校正方法流程图

3.2 局部口径大小和位置选取分析

当我们确定基于局部口径波前探测的次镜姿态校正方案时,需要考虑并分析局部口径区域和大小、平行光源入射位置、AIMS 主次镜光学系统次镜姿态变化

是否满足灵敏度矩阵模型、以及平行光源参数设计。

将 AIMS 望远镜光路导入 ZEMAX 光学软件中, 选取 1000mm 全口径、200mm 局部口径内边缘以及 100mm 局部口径内边缘平行光入射主镜。此时按照次镜的最小位置公差改变次镜的姿态, 在 ZEMAX 软件上读取主次镜焦点后经准直得到的波前函数的 PV 值和 RMS 值, 比较在入射不同口径大小的局部平行光下, 次镜姿态的改变对波前产生畸变的影响程度是否不同。

表 3.1 不同口径大小平行光入射波前畸变

位置失调	1000mm 全口径		200mm 局部口径		100mm 局部口径	
	PV/ λ	RMS/ λ	PV/ λ	RMS/ λ	PV/ λ	RMS/ λ
X/ $2.5\ \mu\text{m}$	2.228	0.558	0.465	0.116	0.233	0.058
Y/ $2.5\ \mu\text{m}$	2.019	0.504	0.448	0.112	0.226	0.056
Z/ $1.5\ \mu\text{m}$	0.536	0.135	0.071	0.018	0.033	0.008
U/ $2\ \text{arcsec}$	5.919	1.477	1.268	0.316	0.633	0.158
V/ $2\ \text{arcsec}$	6.277	1.568	1.297	0.323	0.645	0.161

由表 3.1 数据可知, 在相同的次镜姿态变化下, 波前畸变 PV 值几乎与口径大小成线性, 随着入射口径大小变小, 波前畸变程度越小, 所以在保证波前可探测的前提下, 尽量缩小平行光源入射口径, 选择口径 200mm 入射继续研究。

考虑到望远镜主次镜桁架的对称性结构以及平行光源尽量不挡光, 故选取入射位置为主镜的内外两边缘, 如图 3.4 和图 3.5 所示。同样按照次镜的最小位置公差改变次镜的姿态, 在 ZEMAX 软件上读取主次镜焦点后经准直得到的波前函数的 PV 值和 RMS 值, 比较在入射不同位置下, 次镜姿态的改变对波前产生畸变的影响程度是否不同。

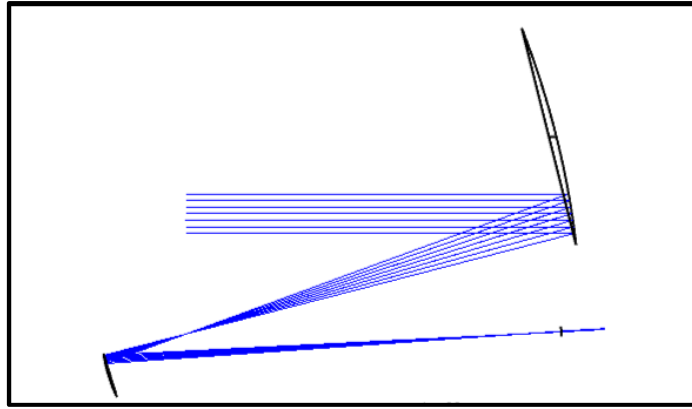


图 3.4 200mm 局部口径内边缘入射

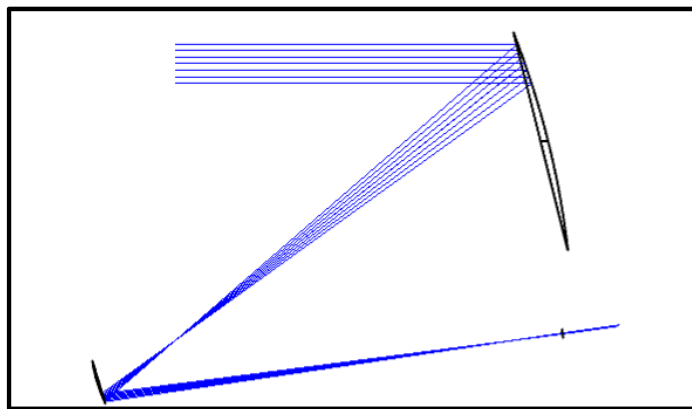


图 3.5 200mm 局部口径外边缘入射

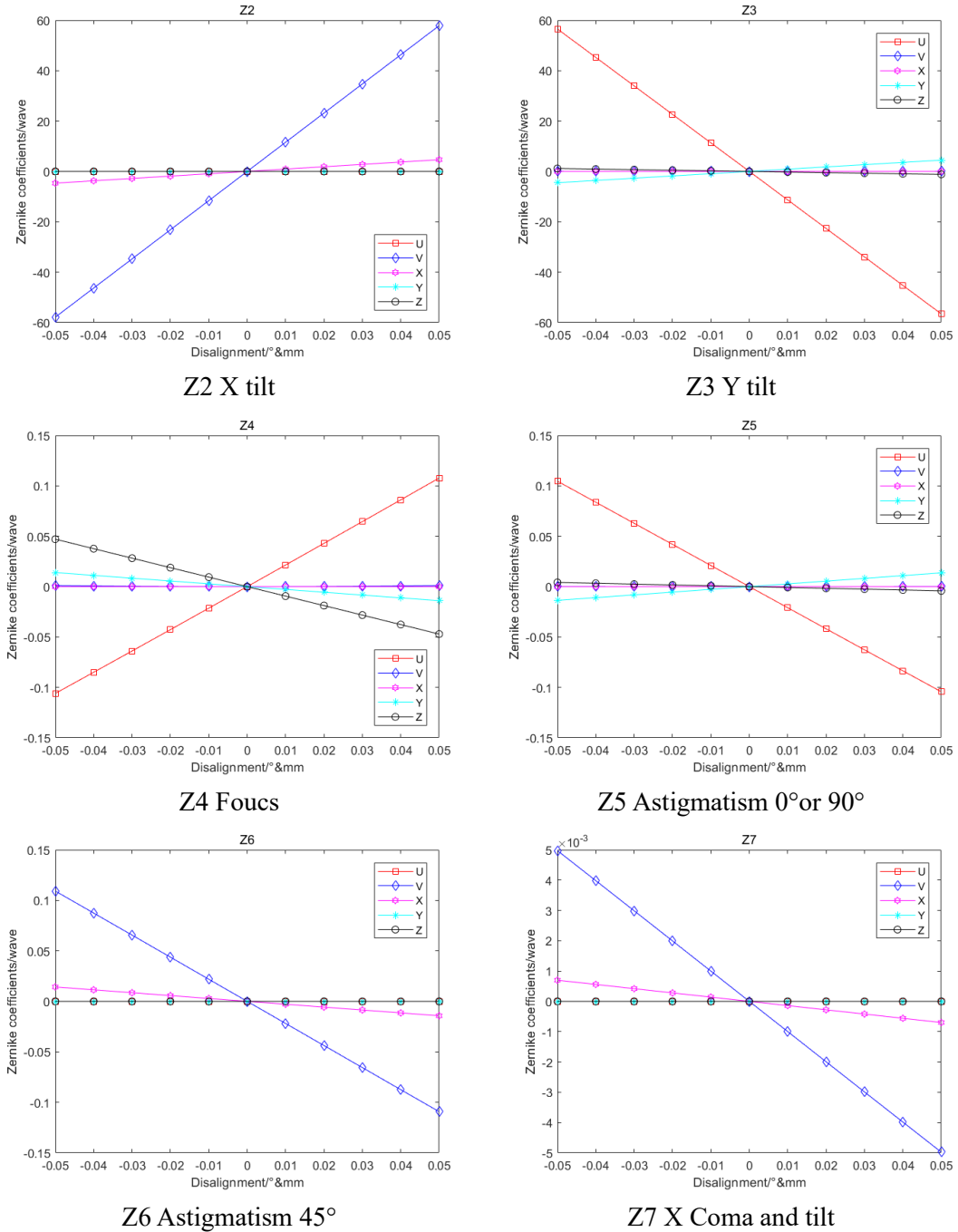
表 3.2 200mm 局部口径内外边缘入射波前畸变

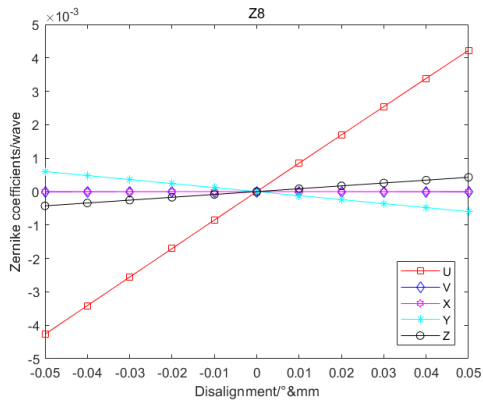
位置失调	200mm 局部口径内边缘		200mm 局部口径外边缘	
	PV/ λ	RMS/ λ	PV/ λ	RMS/ λ
X/ $2.5\ \mu\text{m}$	0.465	0.116	0.431	0.107
Y/ $2.5\ \mu\text{m}$	0.448	0.112	0.354	0.088
Z/ $1.5\ \mu\text{m}$	0.071	0.018	0.138	0.034
U/ $2\ \text{arcsec}$	1.268	0.316	1.098	0.274
V/ $2\ \text{arcsec}$	1.297	0.323	1.229	0.306

由表 3.2 数据可知,在相同的局部口径光入射和相同的次镜姿态失调的条件下,内边缘入射的波前畸变程度在除了沿 Z 方向失调外均大于外边缘入射,且差距较小,所以说,入射主镜的局部区域不同选取对波前畸变的影响较小,可忽略。最终根据望远镜主次镜桁架的结构,考虑合适的安装平行光源,我们选择 200mm 内边缘入射。

3.3 灵敏度矩阵计算分析

基于上述分析，进行灵敏度矩阵计算分析。在格式焦点后放置焦距 250mm 准直镜，使用 ZEMAX 光学设计软件模拟仿真，设置次镜绕 x、y、z 轴倾斜范围从 $-0.05^\circ \sim 0.05^\circ$ ，间隔 0.01° ；沿 x、y、z 轴偏移范围从 $-0.05\text{mm} \sim 0.05\text{mm}$ ，间隔 0.01mm 。绘制 Zernike 系数与失调量关系图如图 3.6 所示。





Z8 X Coma and tilt

图 3.6 局部口径 200mm 内边缘入射 Zernike 系数关系图

拟合计算 Zernike 系数变化斜率,即可得灵敏度矩阵 A,结果如表 3.3 所示:

表 3.3 局部口径 200mm 内边缘入射灵敏度矩阵

	X	Y	Z	U	V
Z2	93.006	0.000	0.000	0.000	1157.652
Z3	0.000	89.582	-23.594	-1131.447	0.000
Z4	0.000	-0.279	-0.942	2.139	0.000
Z5	0.000	0.273	-0.083	-2.091	0.000
Z6	-0.285	0.000	0.000	0.000	-2.186
Z7	-0.014	0.000	0.000	0.000	-0.100
Z8	0.000	-0.012	0.009	0.085	0.000

对上述灵敏度矩阵进行分析,可知 AIMS 望远镜次镜主要失调特性有以下:

- (1) 在一定范围内, Zernike 系数(像差系数)与次镜姿态变化成线性,符合灵敏度矩阵理论模型;
- (2) 次镜失调对 Zernike 系数的两项倾斜系数(Z2、Z3)影响比较大,其次影响较大的像差是像散,对球差影响最小;
- (3) 失调量对主次镜像差影响从大到小依次为: V、U、X、Y、Z。

3.4 次镜校正计算模拟

根据上面的光学仿真分析,基于 200mm 口径平行光内边缘入射,采用光学设计软件模拟和数学仿真协同分析的方法建立计算模型,模拟计算次镜姿态失

调后，经过模拟波前探测，波前重构计算 Zernike 系数，再推算次镜的失调量，最后将计算得到的次镜失调量与施加的已知失调量对比分析，在此基础上，加入偏移量精度模型，进一步模拟计算，流程如图 3.7 所示：

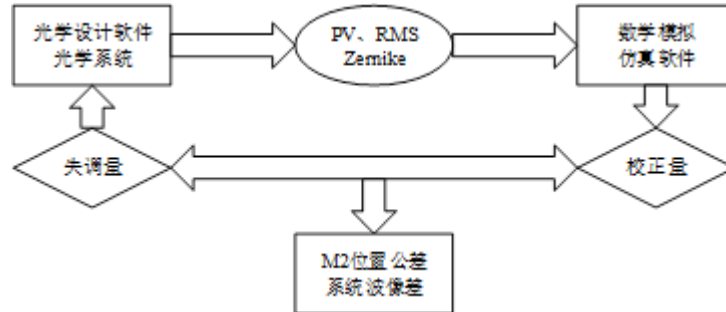


图 3.7 计算仿真模型

第一步，将 200mm 局部口径内边缘入射 AIMS 主次镜系统导入 ZEMAX 光学设计软件，利用 ZEMAX 软件模拟局部口径的波前畸变，改变次镜的姿态，在光路焦点准直后，于瞳面处读取畸变波前的 Zernike 系数，重构波前函数，设为入射波前传感器的理想波前函数。

第二步，利用 MATLAB 仿真模拟点阵的位置。我们选择口径为 5mm 的波前传感器，微透镜阵列 10×10 排布，每个子单元口径为 0.5mm，焦距为 15mm，其中有效子单元数 76 个。根据 S-H WFS 的原理，对理想入射畸变波前函数 W_d 求偏导数，可以模拟该畸变波前在波前传感器每个子单元像点的理想偏移量；而后，利用理想点阵偏移量数据，分别模拟 0.1、0.01 和 0.001 μm 的点阵质心计算精度模型，以模拟获得不同测量误差条件下的点偏移量；最后由上述误差条件下的点偏移量，利用波前重构算法计算畸变波前 Zernike 系数。

第三步，基于失调灵敏度矩阵模型，根据上述波前重构的畸变波前 Zernike 系数，计算望远镜次镜位置失调量，即为校正量。以此补偿已知施加的失调量得到校正后的望远镜次镜位置，如表 3.4、表 3.5、表 3.6 所示，分析校正后的望远镜次镜位置和波像差是否满足要求，以及分析像点偏移测量精度与校正量计算误差间的作用规律。

表 3.4 单个维度位置公差失调模拟结果

		$X/\mu m$	$Y/\mu m$	$Z/\mu m$	U/arcsec	V/arcsec	PV/λ	RMS/λ
	失调量	2.5	0	0	0	0	0.0841	0.0197
$0.1\mu m$	校正量	-3.980	0.000	0.000	0.000	1.872		
	M2	6.480	0.000	0.000	0.000	-1.872	0.0844	0.0196
$0.01\mu m$	校正量	2.056	0	0	0	0.128		
	M2	0.444	0	0	0	-0.128	0.058	0.0163
$0.001\mu m$	校正量	2.517	0.004	0.000	0.001	-0.005		
	M2	-0.017	-0.004	0.000	-0.001	0.005	0.0567	0.0162

表 3.5 两个维度位置公差失调模拟结果

		$X/\mu m$	$Y/\mu m$	$Z/\mu m$	U/arcsec	V/arcsec	PV/λ	RMS/λ
	失调量	0	0	-1.5	0	2	0.1642	0.0387
$0.1\mu m$	校正量	1.405	-8.203	-0.510	-2.411	1.595		
	M2	-1.405	8.203	-0.990	2.411	0.405	0.0727	0.0172
$0.01\mu m$	校正量	0.084	0.376	-1.514	0.108	1.978		
	M2	-0.084	-0.376	0.014	-0.108	0.022	0.0606	0.017
$0.001\mu m$	校正量	-0.001	0.017	-1.502	0.005	2.003		
	M2	0.001	-0.017	0.002	-0.005	-0.003	0.0568	0.0163

表 3.6 多个维度位置公差失调模拟结果

		$X/\mu m$	$Y/\mu m$	$Z/\mu m$	U/arcsec	V/arcsec	PV^a/λ	RMS^a/λ
	失调量	1.5	-2	2.5	2	-1.5	0.1845	0.0436
$0.1\mu m$	校正量	3.628	-3.870	3.334	1.394	-2.118		
	校正后	-2.128	1.870	-0.834	0.606	0.618	0.0907	0.0231
$0.01\mu m$	校正量	1.358	-2.020	2.495	1.997	-1.461		
	校正后	0.142	0.020	0.005	0.003	-0.039	0.0564	0.0161
$0.001\mu m$	校正量	1.468	-2.062	2.504	1.984	-1.493		
	校正后	0.032	0.062	-0.004	0.016	-0.007	0.0565	0.0161

注：^a 表示望远镜主次镜光学系统全口径的波像差。

根据模拟不同的精度模型可知,模拟测量点阵偏移量精度越高,次镜姿态失调量的计算越准确,残差越小。当点阵质心偏移计算精度优于 $0.01\mu\text{m}$ 时,失调次镜经过校正后的次镜位置满足公差要求,表明当波前探测精度较高时,局部波前探测可以有效提取望远镜光学系统的像差信息,并且可以准确地计算出导致波前畸变的次镜姿态失调量。根据目前波前传感器产品水平和现有质心算法精度,点偏移量测量精度通常能达到上述精度要求,因此基于局部波前探测实时校正次镜的方法可行。

3.5 平行光源设计分析

局部口径波前探测方案需要利用小口径平行光源构造人工星点,出射参考波前,因此需要设计一个口径 200mm 的平行光源。为了架设于 AIMS 望远镜桁架上且方便移动,平行光源应体积小、质量轻、光学质量高,因此可考虑反射式光学设计,并对平行光源的焦距进行研究分析。根据传统的光学检测理论,为了提高波前探测的精度,降低平行光源离焦对测量结果的影响,设计的平行光源的焦距对像质有着较高的要求。为了研究平行光源的焦距与 AIMS 望远镜局部口径光路的像质评价的关系,本节以 AIMS 望远镜局部口径光路为光学系统,利用 ZEMAX 光学设计软件仿真分析平行光源的不同焦距对该光学系统进行检测,并利用 MTF(调制传递函数)评价检测结果,以确定平行光源合适的焦距。

首先在 ZEMAX 中建立一个口径 200mm 的等效光路的平行光源,并分别是使用有效焦距 2000mm 、 2500mm 、 3000mm 和 3500mm 对光学系统进行仿真分析。理想状态下的 MTF 曲线如图 3.8 所示,空间频率范围 $0\text{lp/mm}\sim 33\text{lp/mm}$ 。

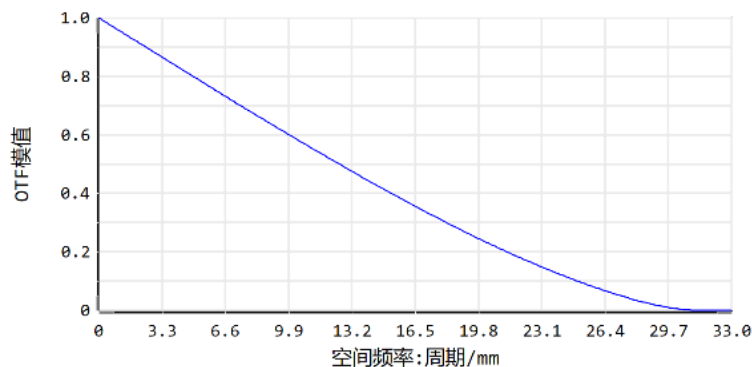


图 3.8 平行光源理想状态下光学系统的 MTF 曲线

根据平行光源焦面标定误差(-0.2mm~0.2mm)仿真分析,以光学系统在空间频率 8lp/mm、16lp/mm 和 24lp/mm 处的 MTF 值作为像质评价依据,分析不同焦距的平行光源对光学系统探测结果影响的差异性,如表 3.7、3.8、3.9、3.10 所示,可视化如图 3.10 所示。

表 3.7 有效焦距 2000mm 的平行光源检测 MTF 值

离焦/mm	-0.2	-0.15	-0.1	-0.05	0	0.05	0.1	0.15	0.2
8lp/mm	0.4214	0.5230	0.6044	0.6570	0.6754	0.6575	0.6054	0.5248	0.4242
16lp/mm	0.1629	0.2409	0.3091	0.3558	0.3727	0.3566	0.3105	0.2424	0.1642
24lp/mm	0.0861	0.1012	0.1133	0.1212	0.1242	0.1220	0.1148	0.1030	0.0877

表 3.8 有效焦距 2500mm 的平行光源检测 MTF 值

离焦/mm	-0.2	-0.15	-0.1	-0.05	0	0.05	0.1	0.15	0.2
8lp/mm	0.5618	0.6097	0.6456	0.6678	0.6754	0.6681	0.6462	0.6108	0.5633
16lp/mm	0.2729	0.3138	0.3455	0.3656	0.3727	0.3661	0.3464	0.3151	0.2744
24lp/mm	0.1070	0.1141	0.1194	0.1229	0.1242	0.1234	0.1205	0.1155	0.1087

表 3.9 有效焦距 3000mm 的平行光源检测 MTF 值

离焦/mm	-0.2	-0.15	-0.1	-0.05	0	0.05	0.1	0.15	0.2
8lp/mm	0.6188	0.6431	0.6608	0.6717	0.6754	0.6719	0.6613	0.6437	0.6197
16lp/mm	0.3217	0.3432	0.3593	0.3692	0.3727	0.3695	0.3600	0.3442	0.3230
24lp/mm	0.1154	0.1191	0.1218	0.1235	0.1242	0.1239	0.1225	0.1202	0.1168

表 3.10 有效焦距 3500mm 的平行光源检测 MTF 值

离焦/mm	-0.2	-0.15	-0.1	-0.05	0	0.05	0.1	0.15	0.2
8lp/mm	0.6444	0.6578	0.6675	0.6734	0.6754	0.6735	0.6678	0.6582	0.6450
16lp/mm	0.3444	0.3565	0.3653	0.3707	0.3727	0.3710	0.3658	0.3572	0.3454
24lp/mm	0.1192	0.1213	0.1228	0.1238	0.1242	0.1241	0.1234	0.1221	0.1203

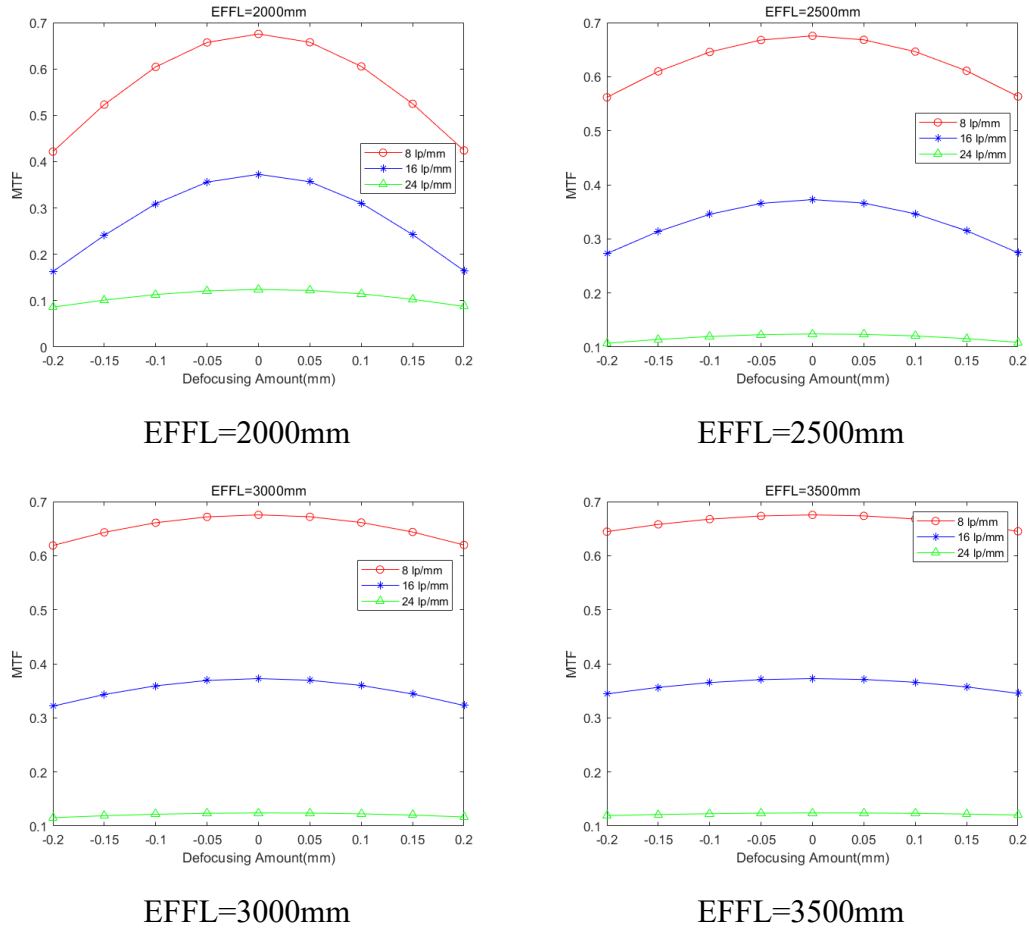


图 3.9 不同焦距平行光源检测 MTF 变化趋势图

根据结果分析可知,当平行光源有效焦距增大时,平行光源离焦对光学系统像质检测下降程度降低。当平行光源有效焦距为 2000mm 时,平行光源离焦对光学系统像质检测下降明显;当平行光源有效焦距为 2500mm,平行光源的离焦控制在-0.05mm~0.05mm 范围时,光学系统的 MTF 值下降幅度在 2%以内;当平行光源有效焦距为 3500mm,平行光源的离焦控制在-0.1mm~0.1mm 范围时,光学系统的 MTF 值下降幅度在 2%以内。

因此,平行光源有效焦距选为不小于 3500mm,使用精度较高的检焦方法使得平行光源的焦面位置误差(离焦量)控制在-0.1mm~0.1mm 范围内,可使得平行光源的离焦量对光学系统的像质检测影响控制在 2%以内,有效降低平行光源离焦对像质检测结果的影响,使得系统误差控制在允许的范围内。

利用 ZEMAX 初步设计了一款经典卡塞格林反射式平行光源,等效焦距为 3500m, F/17.5, 主次镜相距 250mm, 系统总长 350mm, 面型参数如表 3.11 所示,光路图如图 3.10 所示,成像点列图如图 3.11 所示。

表 3.11 平行光源反射镜面型参数

	R/mm	K	D/mm
M1	555.556	-1	200
M2	60.345	-1.375	20

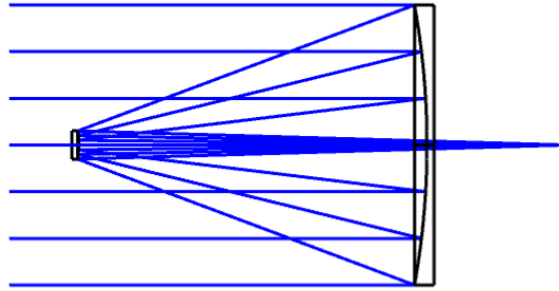


图 3.10 平行光源光路图

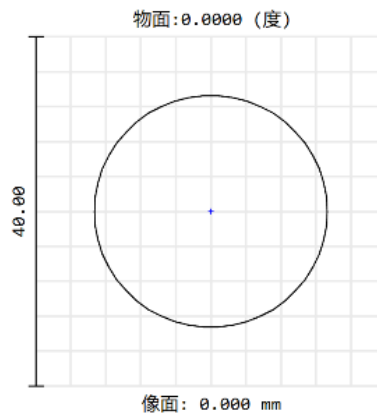


图 3.11 平行光源像点列图

3.6 本章小结

本章创新性提出基于局部口径波前探测实时校正望远镜次镜姿态的方法,利用小口径平行光源构造人工星点,可以摆脱对日面高对比度活动区的依赖,基于点源质心算法相比较低对比度面源的复杂相关运算而言,可有效提高测量精度和运算速度及稳定性;另外,由于空气链路短,可以有效降低大气视宁度的影响。接着,采用光学软件模拟和数学仿真相结合的方法,对基于人工星点局部孔径波前探测方法开展了仿真分析。在 AIMS 望远镜上选取不同局部口径的区域及口径大小分析波前畸变程度探测影响,并研究了波前重构和利用灵敏度矩阵法计算次镜失调量。仿真结果表明,当选取主镜内边缘直径 200mm 局部口径入射,波前

传感器像点质心偏移探测精度达到 $0.01\mu\text{m}$ 时，可以有效提取波像差信息，通常的波前传感器产品即可满足这一精度需求。最后分析了构造人工星点的平行光源的需求，当平行光源有效焦距选为 3500mm ，可以有效降低平行光源离焦对像质检测结果的影响，并初步设计一款 200mm 口径的经典卡塞格林系统平行光源，其具有体积小、重量轻、光学质量高等特点，适用于 AIMS 局部口径波前探测。

第4章 基于 Shack-Hartmann 波前传感器测试实验系统

本章在上文基于局部口径校正方案和光学仿真分析的结果上,设计了一套基于 S-H WFS 波前探测的次镜校正的实验验证系统,阐述了实验测试系统的设计和器件选型过程,光学系统装调,次镜姿态失调 Zernike 系数采集以及实验数据和误差分析,并针对 AIMS 提出次镜校正策略。

4.1 实验系统设计

由于 AIMS 望远镜尚在建设中,直接利用 AIMS 的主、次镜开展实验不具备条件,因此为验证基于局部口径的点源波前探测的次镜失调校正方案的有效性,我们需要设计并搭建实验验证系统并开展验证实验。

实验验证系统必须要尽可能模拟 AIMS 望远镜次镜失调的实际情况。如果简单按照缩比建造测试系统,显然像质退化与实际系统有较大差别,难以取得令人信服的验证效果。分析验证系统的需求,其关键点在于,验证利用子孔径是否可以检测到次镜的失调量,也就是说 AIMS 望远镜次镜失调在公差范围附近的变化是否能够被准确的测量,以及其变化趋势是否与仿真的结果一致。

我们考虑到如果根据前文模拟分析结果,截取 AIMS 望远镜主镜 200mm 口径局部区域离轴抛物面和与此相对应的次镜区域离轴椭球面,加工两面反射镜, M1 和 M2,如图 4.1 所示,搭建子孔径离轴格里高利实验系统,即可完全模拟 AIMS 的实际的失调检测。

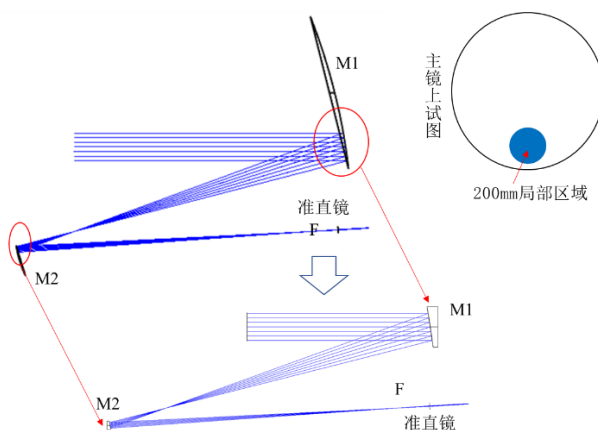


图 4.1 AIMS 局部口径选取示意图

两面反射镜的曲率和圆锥系数与 AIMS 望远镜主次镜参数一致，如表 4.1 所示，加工面型精度要求与 AIMS 望远镜主次镜要求一致。系统通光口径 $D = 200\text{mm}$ ，等效焦距 10m ，与 AIMS 望远镜相同。

表 4.1 主次镜参数

	R/mm	K	D/mm	$\text{Off-axis}/\text{mm}$
M1 离轴抛物镜	4000	-1	220	610
M2 离轴椭球镜	708.333	-0.444	60	129.03

根据光学系统的需求，我们设计了主次镜多维调整机械支撑结构，如图 4.2 所示，左图为主镜及其机械结构，可实现 X、Y、Z 三维精密调整，且主镜光轴可以以镜面几何中心为旋转中心旋转；右图，次镜安装于六足位移平台上，而再将六足位移平台安装于 X、Y、Z 三维移动平台上用于大范围调整，次镜六维调整。

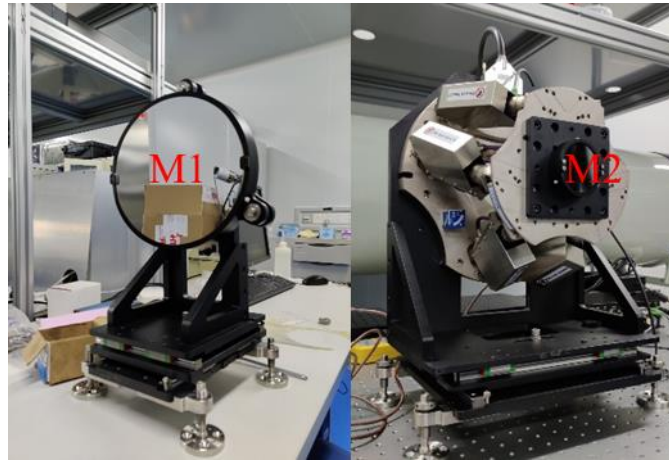


图 4.2 实验验证系统主、次镜及其多维调整结构

本实验使用 ZYGO 激光干涉仪作为辅助装调设备，利用其功能强大的 MetroPro 软件，将实验验证系统装调到理想的初始状态。同时，使用 ZYGO 激光干涉仪作为平行光源，为实验提供质量高的参考平面波，减小由光源带来的误差。在测试过程中，实现干涉仪与 S-H WFS 共路测试，以便互相参考印证。如图 4.3 所示为 ZYGO 干涉仪实物图。



图 4.3 ZYGO 激光干涉仪

根据 AIMS 成像动态分析报告中次镜的失调量对应的量程和最小位移量, 我们选用 PI 公司 H-825 六足位移平台, 其具体规格参数如表 4.2 所示:

表 4.2 H-825 六足位移平台规格参数

规格	参数
主动轴	$X, Y, Z, \theta_X, \theta_Y, \theta_Z$
X、Y 向上的行程/mm	$\pm 27.5; \pm 25$
Z 向上的行程/mm	± 14
θ_X, θ_Y 向上的行程/ $^\circ$	$\pm 11.5; \pm 10.5$
θ_Z 向上的行程/ $^\circ$	± 19
促动器设计最小分辨率/ μm	0.008
X、Y、Z 向上的最小位移/ μm	0.3; 0.3; 0.25
$\theta_X, \theta_Y, \theta_Z$ 向上的最小位移/arcsec	0.72; 0.72; 0.83

由于实验条件所限, 我们选用 Thorlabs 公司的 WFS150-5C 型的 S-H WFS, 具体参数如表 4.3 所示, 它由 CCD 探测器、微透镜阵列和干涉滤光片组成, 其中干涉滤光片兼做分束镜, 前表面将准直光线原路返回 ZYGO 干涉仪, 得到光学系统波前。在实验中, 波前传感器在光路中具有两个功能: 一是配合 ZYGO 干涉仪进行计算机辅助装调主次镜, 二是测量并记录次镜失调后的波前 Zernike 系数。

表 4.3 WFS150-5C 型的 S-H WFS 参数

指标	参数
微透镜数量	39*31
微透镜口径	146 μm
微透镜间距	150 μm
微透镜有效焦距	3.7mm
CCD 分辨率	1280*1024pixels(Set at 768*768)
像元大小	4.65 μm
探测波长范围	300-1100 μm

波前探测软件选用 Thorlabs 公司研发的用于 S-H WFS 探测的软件，主要用于计算和显示表征像差的 Zernike 系数、计算光束质心和直径、波前 PV 值和 RMS 值等参数，可用于实验中 WFS150-5C 型的 S-H WFS。

为了入射该 S-H WFS，需要在实验系统格里高利焦点后设置准直镜，根据波前传感器的有效入射口径直径 4mm，确定准直镜焦距 $f = \frac{EFFL}{D} D' = 100 \times 4 = 400\text{mm}$ 。因此，选择 Thorlabs 公司型号为 AC508-400-A-ML 的双胶合消色差透镜作为准直镜。

4.2 光学装调

实验光路的搭建与调试是进行实验的前提和基础，不仅可以对已有的设计方案进行检验，还可以根据反馈结果对设计方案进行改进。光学装调在实验系统中有着至关重要的作用，光路中任一光学元件的位置和精确度对实验结果都会产生重要的影响，因此搭建和调试光学系统需遵循一定的要求和方法，遵循顺序调试，逐个增加光学元件，确定通过光学元件后的光束位置和像差均在设计的允许范围内。整个光学系统装调如下：

1) 主镜装调

实验使用 ZYGO 干涉仪作为装调辅助工具，由于 ZYGO 干涉仪质量和体积较大，不便对其姿态作微调整，因此装调时以 ZYGO 干涉仪为基准，利用激光水平仪确定光路水平参考面，将其干涉仪出射光调至水平。在出射光后放置主镜 M1，根据离轴抛物面反射镜的光学原理，首先调整离轴抛物面反射镜的高点和

低点的连线和水平参考面平行等高；然后调节 M1 的俯仰，使得焦点在水平参考面内，此时 M1 主截面与水平参考面基本重合；最后根据设计的离轴量调节 M1 偏摆，使得焦点 F1 位于母线上。自此，M1 姿态初步确定。

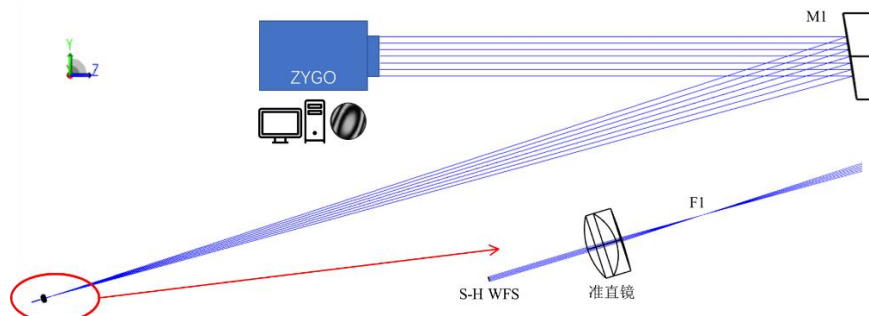
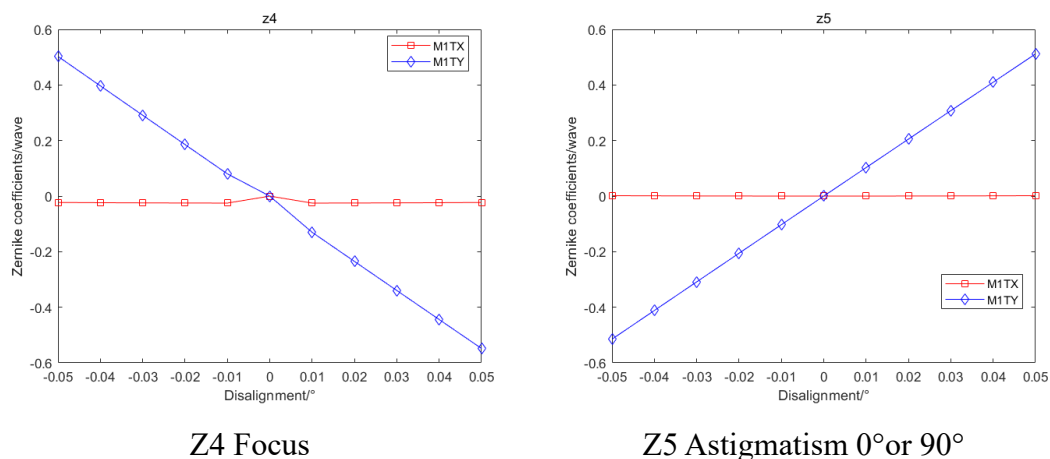


图 4.4 主镜灵敏度分析准直光路图

在此粗调的基础上，利用计算机辅助装调技术进行精微调，在 ZEMAX 中导入光路，建立计算机辅助装调模型，如图 4.4 所示，焦点后加入准直镜($f = 27mm$)，在瞳面处测波前 Zernike 系数。此时，根据 ZEMAX 的坐标系，M1 的运动维度为沿 X、Y 轴平移和绕 X、Y 轴旋转(分别对应俯仰和偏摆)，设为 DX、DY、TX、TY，其中 TX 和 TY 影响较大。因此，我们主要针对 TX 和 TY 光学模拟的分析，得到表征像差的 Zernike 系数和 M1 的 TX 和 TY 关系，如图 4.5 所示。



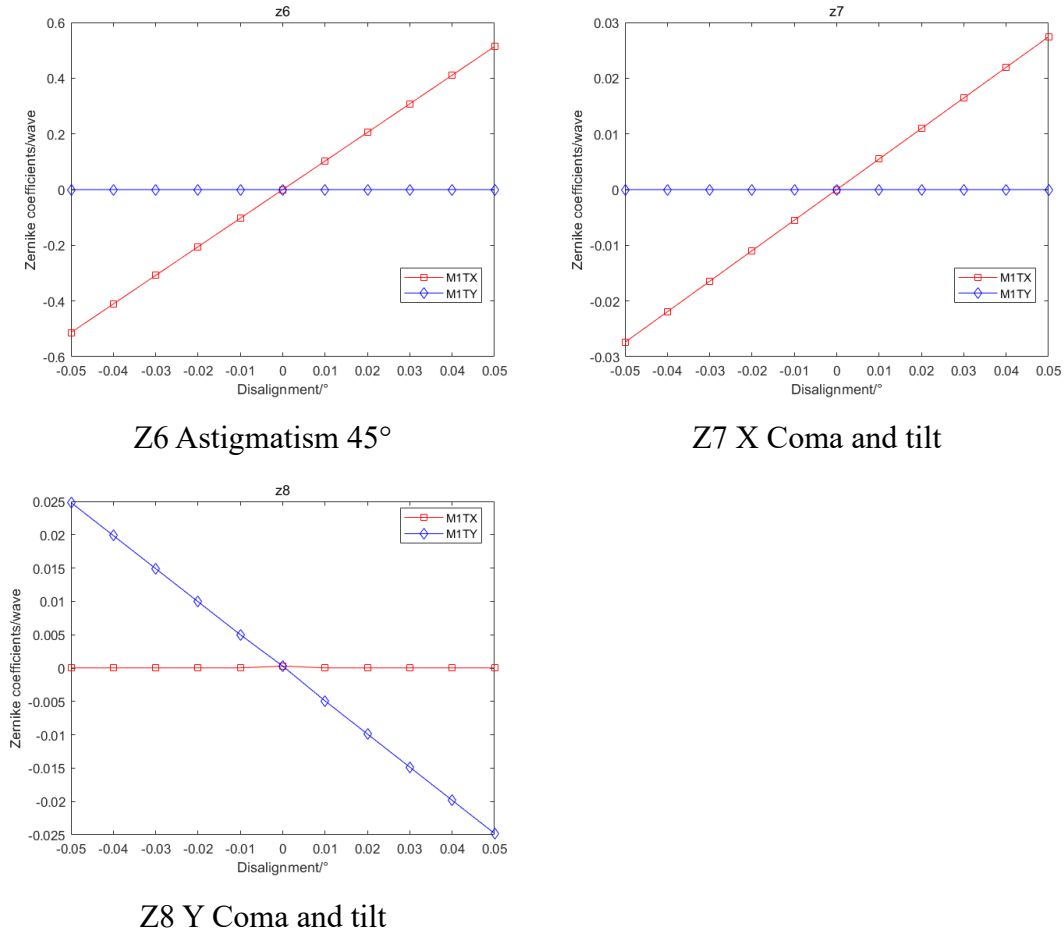


图 4.5 主镜装调 Zernike 系数关系图

根据分析结果可知，TX 对 Z6 和 Z7 产生影响，TY 对 Z4、Z5 和 Z8 产生影响，其中像散值变化最为明显。在实际的装调中，我们在主镜 M1 焦点后，加入准直镜，用 WFS150-5C 型 S-H WFS 测波前 Zernike 系数，根据测得的 Z5 和 Z6 像散值指导装调 M1，反复迭代，不断收敛，使得波前传感器测得像差最小。使用 ZYGO 干涉仪拍摄干涉图，从 MetroPro 软件分析可得，M1 离轴抛物镜装调波前 PV 值约为 $\lambda/5$ ，RMS 值约为 $\lambda/30$ ，其中 λ 为 632.8nm，如图 4.6 所示。

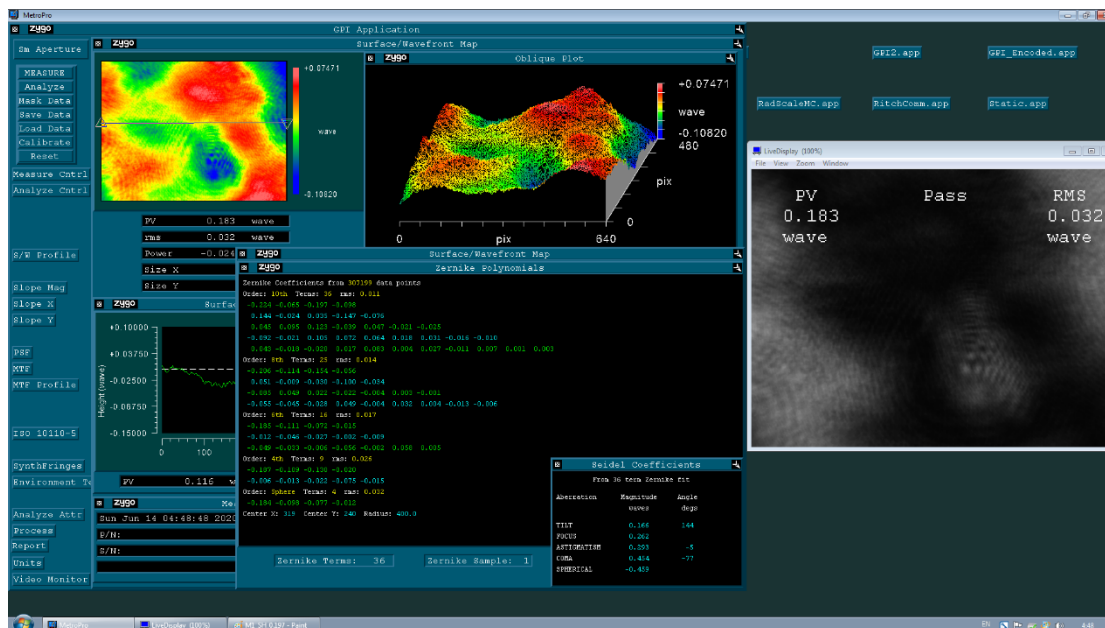


图 4.6 M1 装调波前图

2) 次镜装调

装调离轴椭球面反射镜 M2，是装调中最难的环节。根据格里高利光学系统的性质，主镜离轴抛物面反射镜的光轴与次镜离轴椭球面反射镜的光轴重合，次镜的两个焦点都在光轴上，并且主镜的焦点与次镜的第一焦点重合。由于离轴式反射镜非对称性，其焦点和母线难以定位。根据 M1 和 M2 的离轴量和光学性质，建立几何关系，如图 4.7 所示， l_1 为平行光源出射光光轴，以 l_1 为基准，使用光学导轨和十字分划板定位，利用 He-Ne 激光器定位出系统光轴 l_2 ，使其经过 F1 且与 l_1 平行。再利用另外一台 He-Ne 激光器建立光轴 l_3 ，与 l_2 平行等高，且距离 l_2 为 M2 的设计离轴量 129.03mm，如此只需调节 M2 的前后位置，即可使得 M1 反射光斑入射于 M2 中心。调节 M2 的高度和旋转使得主截面与参考水平面共面，调节 M2 的俯仰和偏摆，使得其第二焦点 F2 位于 l_2 上。此时，M2 的姿态初步确定。经过建立辅助定位参考，可以减小装调离轴椭球反射镜的难度。

在精调 M2 时，用六足位移平台调整 M2 的姿态和位置，可实现沿 X、Y、Z 轴平移和绕 X、Y、Z 轴旋转。与装调主镜 M1 方法一致，F2 焦点加入准直镜准直，使用 S-H WFS 测畸变波前函数的 Zernike 系数。基于计算机辅助装调计算模型生成灵敏度矩阵如图 4.8 所示。

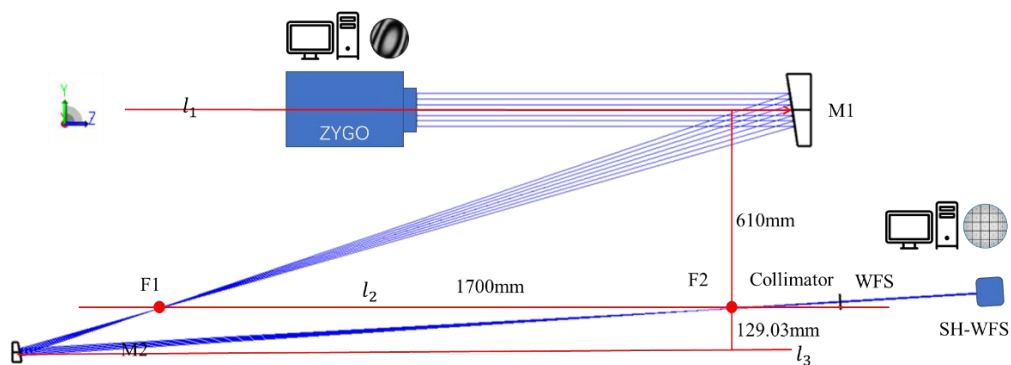
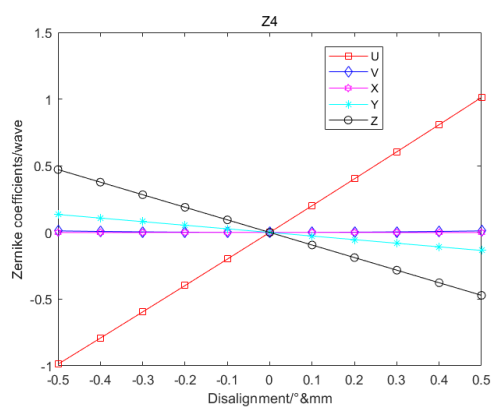
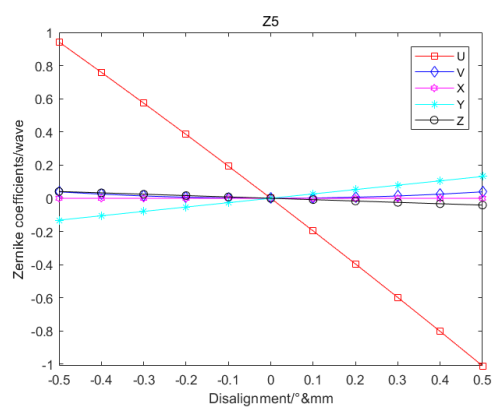


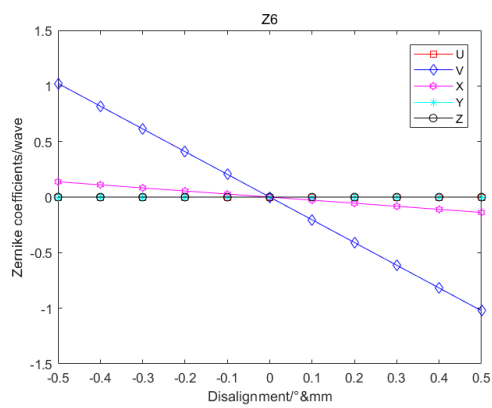
图 4.7 实验装调定位图



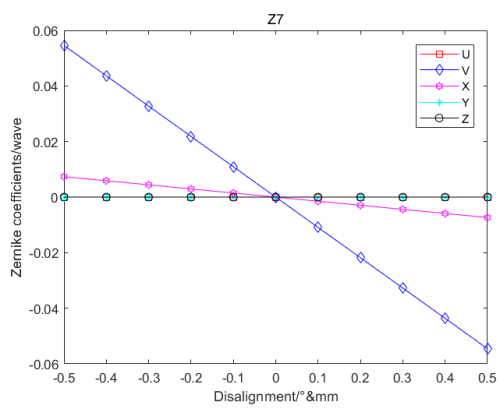
Z4 Focus



Z5 Astigmatism 0° or 90°



Z6 Astigmatism 45°



Z7 X Coma and tilt

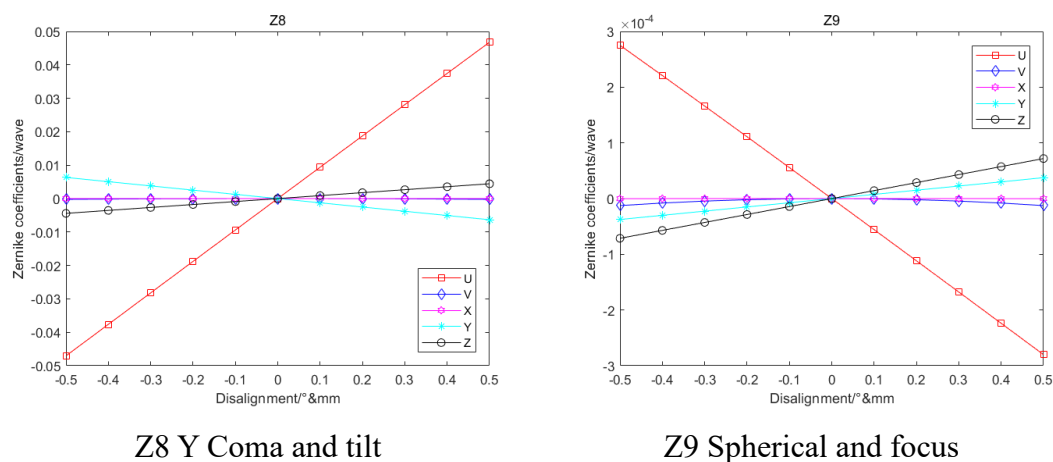


图 4.8 次镜装调 Zernike 系数关系图

根据 Zernike 系数进行微调对其影响较大的失调量，与装调 M1 类似，主要根据像散值指导微调，不断收敛，使得波前传感器测得的波像差最小。由 ZYGO 干涉仪拍摄干涉图分析可知，最终装调结果为，波前 PV 值为 0.295λ ，约为 $\lambda/3.4$ ，RMS 值为 0.055λ ，约为 $\lambda/18$ ，其中 λ 为 632.8nm ，如图 4.9 所示，装调结果满足要求。实验验证系统布局如图 4.10 所示。

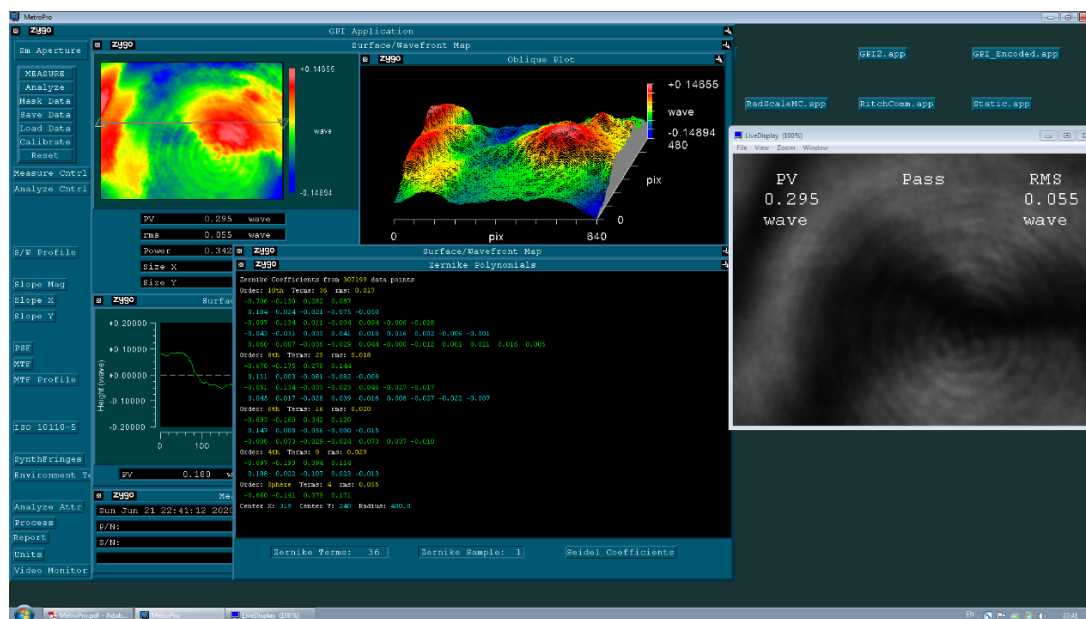


图 4.9 M2 装调波前图

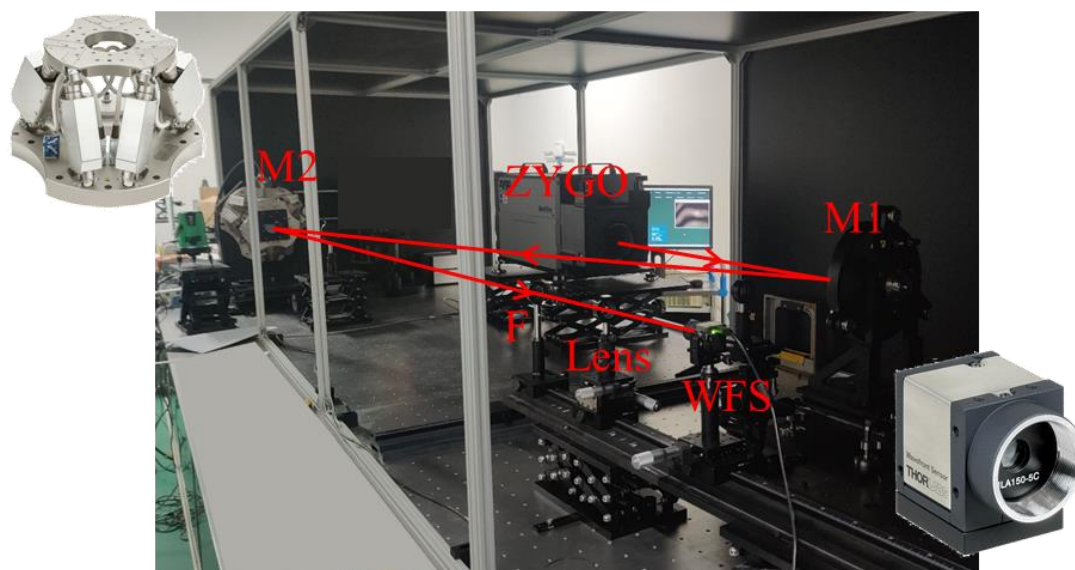


图 4.10 实验验证系统布局

4.3 次镜失调校正实验

在局部口径的主次镜光学系统装调的成功基础上，开展次镜姿态失调实验，验证 Zernike 系数与次镜姿态失调量的线性关系。

4.3.1 建立坐标系

在实验中建立统一的坐标系，实验以六足位移平台的坐标系为参考，其坐标系为右手坐标系，X 轴为铅直方向，Y 轴为水平方向，原点位于安装面中心，记为 $A(0, 0, 0)$ ，如图 4.11 所示。

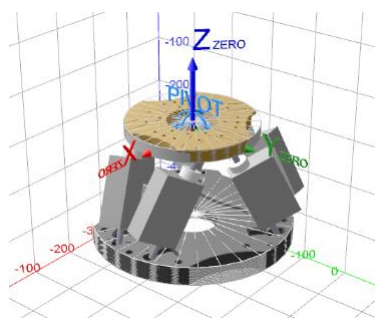


图 4.11 PI 六足位移平台坐标系

由于 M2 椭球镜和其镜室有一定厚度 d ，将其装在六足位移平台上，镜面原点为 $B(0, 0, d)$ 。当六足位移平台沿 X、Y、Z 轴平移时，M2 平移相同的距离；但是当六足位移平台绕 X、Y 轴旋转时，M2 椭球镜在旋转的同时亦发生平移，因此在控制 M2 椭球镜面旋转时需要补偿其位移，如图 4.12 所示。

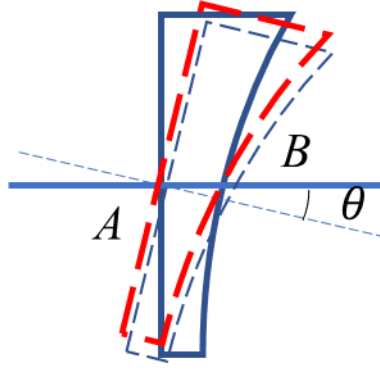


图 4.12 M2 旋转示意图

根据坐标系旋转矩阵，如式 4.1 和式 4.2 所示。

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

控制六杆绕 X 轴旋转 θ ，记为 U，经过式 4.3 可知，B 点位置发生变化。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -d\sin\theta \\ d\cos\theta \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

即镜面发生位移：

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ -d\sin\theta \\ d\cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ d\sin\theta \\ d - d\cos\theta \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

同理可得，绕 Y 轴旋转 θ ，记为 V，经过式 4.5 可知，B 点位置发生变化。

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d\sin\theta \\ 0 \\ d\cos\theta \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

即镜面发生位移：

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -d\sin\theta \\ 0 \\ d\cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d\sin\theta \\ 0 \\ d - d\cos\theta \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

从上述公式可知，绕 X 轴旋转，需要沿 Y 轴方向平移补偿；绕 Y 轴旋转，需要沿 X 轴方向平移补偿。在实验中，椭球镜和机械结构整体厚度为 30mm，因

此，当六足位移平台绕 X 轴旋转 0.1 度，需要沿 Y 轴方向平移补偿 0.053mm，X 轴方向为 0，Z 轴方向为 4.569e-5mm。

4.3.2 Zernike 系数数据采集

实验以装调完成的光学系统为初始状态，即失调量为 0 时，利用波前传感器采取 Zernike 系数，采集 Zernike 系数前需控制变量，设置波前传感器 CCD 相同的曝光时间和增益。在光学系统初始位采集数据，叠加帧数分别选择 3、10、30、100roll，并分别采 20 组数据，计算标准差，分析稳定性。从表 4.4 数据可知，100roll 数据采集的标准差值小于其余采集方式，即 100 张滚动叠加平均采集数据稳定性较好，所以本实验在采集数据时采用 100roll 平均计算方式，如图 4.13 所示。

表 4.4 波前传感器不同计算方式的 Zernike 系数标准差

多帧叠加	3	10	30	100roll
Z4	0.0104	0.0110	0.0037	0.0024
Z5	0.0067	0.0055	0.0056	0.0034
Z6	0.0115	0.0065	0.0063	0.0035
Z7	0.0080	0.0062	0.0040	0.0017
Z8	0.0070	0.0058	0.0030	0.0019
Z9	0.0024	0.0027	0.0020	0.0016

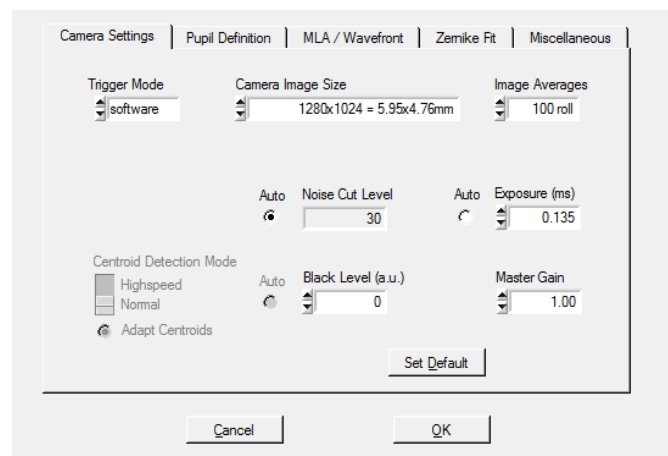
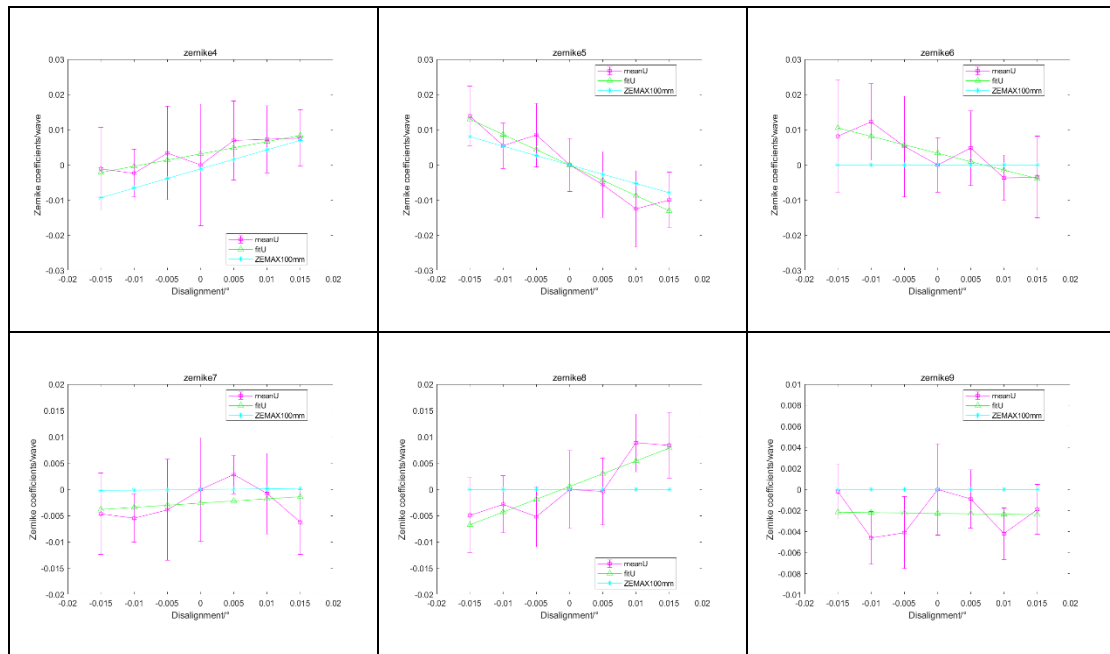
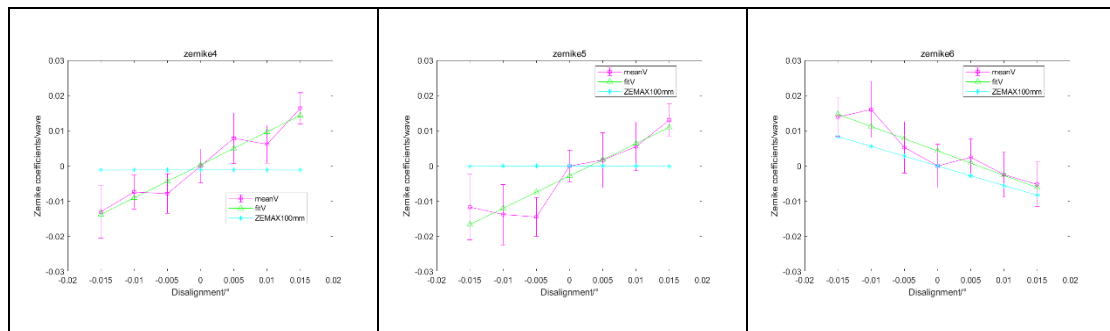


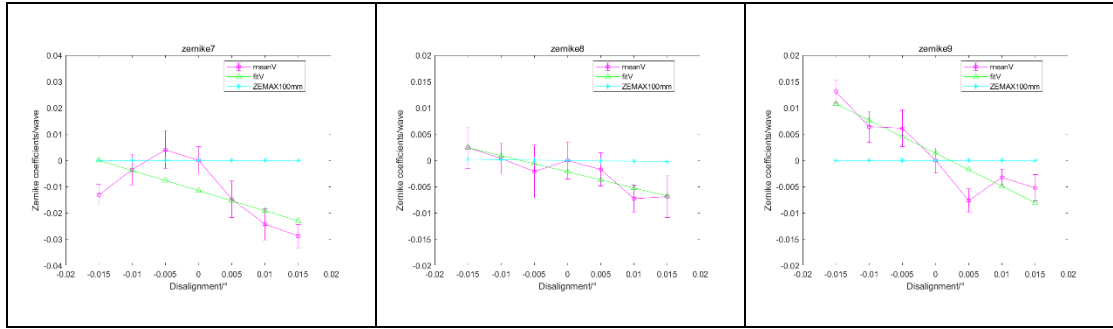
图 4.13 设置波前传感器参数

设置好波前传感器参数后, 研究 Zernike 系数与失调量之间的关系, 利用六足位移平台调整次镜 M2 的姿态, 分别沿 X、Y、Z 方向平移, 从-0.15mm 到 0.15mm 分别取 7 个采样点, 间隔 0.05mm, 以及分别绕 X、Y 方向旋转, 记为 U、V, 从-0.015° 到 0.015° 分别取 7 个采样点, 间隔 0.005°, 分别记录 Zernike 系数。采集数据过程中, 为了降低随机误差, 每个采样点保存 10 组数据, 分别采样 5 次。接着, 利用 MATLAB 软件将数据可视化, 去除数据中最大值和最小值, 求平均值和标准差, 绘制 Zernike 系数误差棒图, 并利用最小二乘一次线性拟合 Zernike 系数平均值, 同时与 ZEMAX 模拟失调的 Zernike 系数进行对比, 如图 4.14 所示, a、b、c、d、e 分别是 UVXYZ 的失调对应的 Zernike 系数关系图。

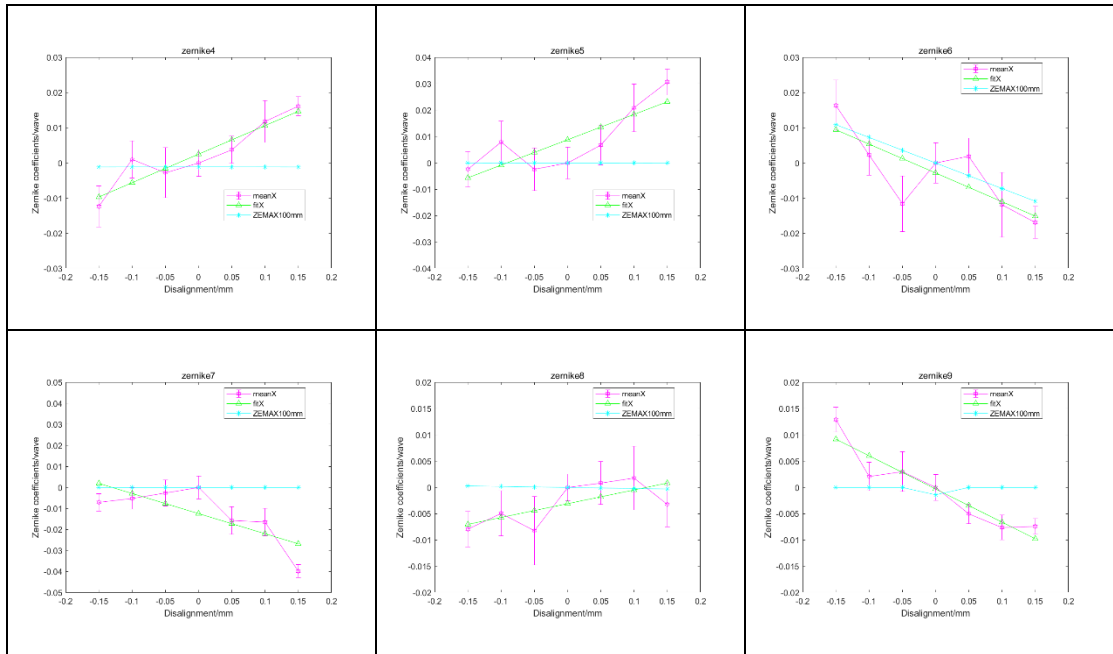


(a) U 失调的 Zernike 系数关系图

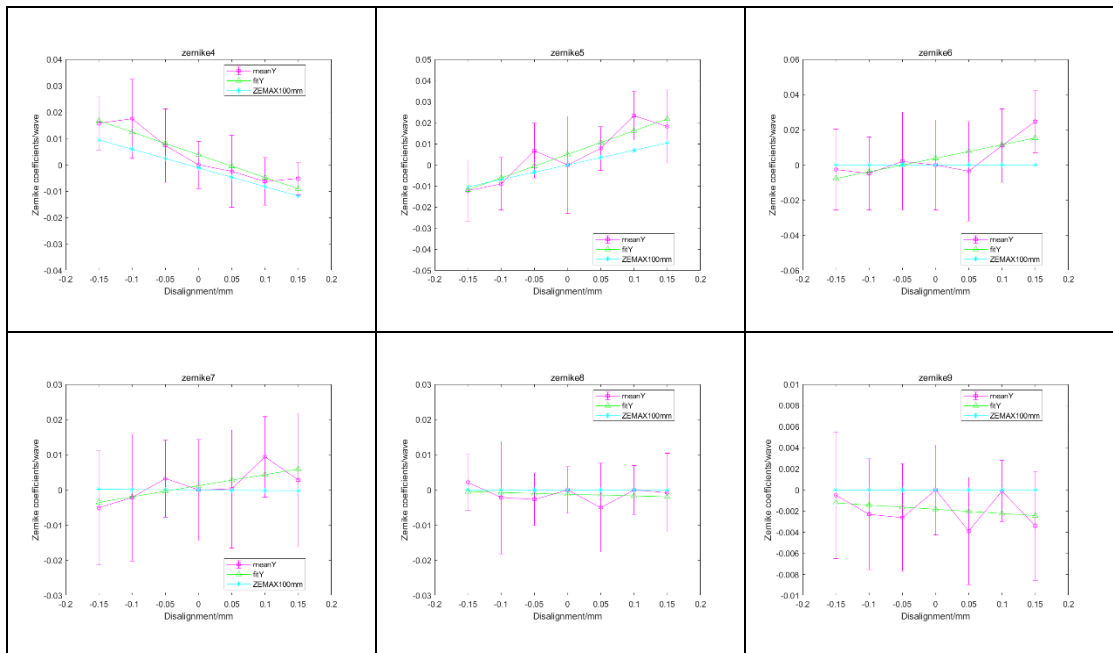




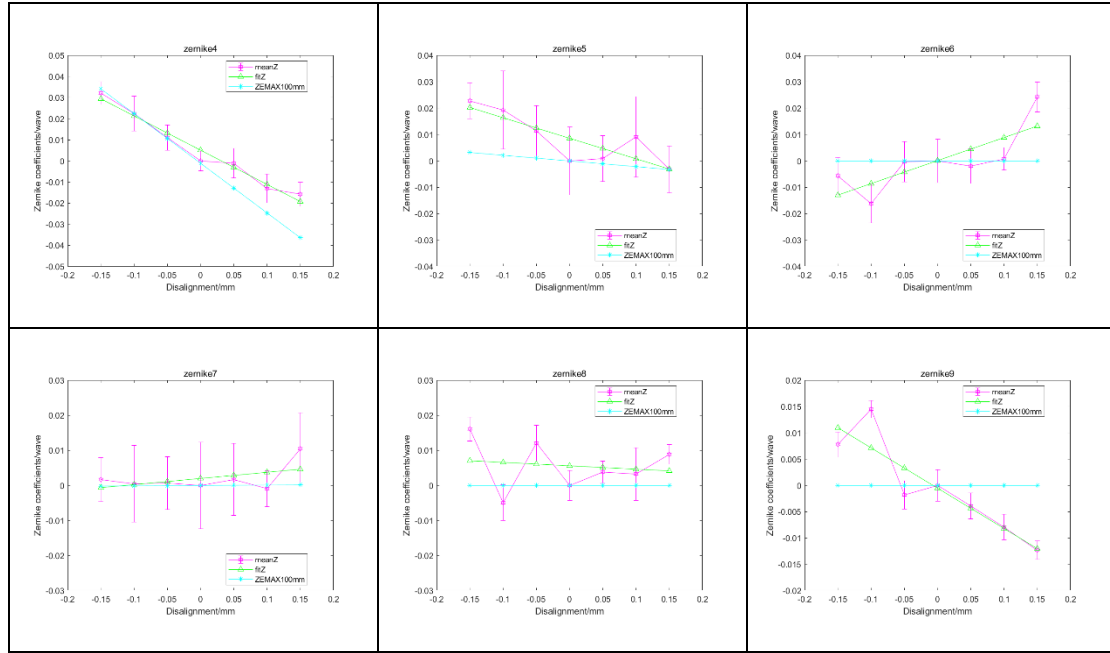
(b) V 失调的 Zernike 系数关系图



(c) X 失调的 Zernike 系数关系图



(d) Y 失调的 Zernike 系数关系图



(e) Z 失调的 Zernike 系数关系图

图 4.14 失调量与 Zernike 系数关系图

4.3.3 实验结论

通过对比分析上图中实验测量 Zernike 系数折线、Zernike 系数拟合直线和 ZEMAX 模拟的 Zernike 系数折线图，我们发现：与 U 相关的 Z4 和 Z5、与 V 相关的 Z6、与 Y 相关的 Z4 和 Z5、与 Z 相关的 Z4 等 Zernike 系数近似线性关系，且拟合直线斜率接近于 ZEMAX 模拟直线；与 U 相关的 Z6 和 Z8、与 V 相关的 Z4 和 Z8、与 X 相关的 Z4 和 Z9、与 Z 相关的 Z7 和 Z9 等 Zernike 系数近似线性关系，但是拟合直线斜率大于 ZEMAX 模拟直线；与 U 相关的 Z7 和 Z9、与 V 相关的 Z5 和 Z9、与 X 相关的 Z6 和 Z8、与 Z 相关的 Z8 和 Z9 等 Zernike 系数在某个失调点出现异常变化；不同维度的姿态变化对 Zernike 系数影响程度不一样。从测量数据的误差棒可知，在一定误差范围内，失调量与 Zernike 系数成线性关系，但是仍然存在 Zernike 系数异常变化的失调点。因此，局部口径波前探测校正方法具有可行性。

4.4 实验误差来源分析

结合实际实验系统，分析影响实验波前探测误差的因素，主要为：

(1) 光学元件质量与装调误差

整个实验光学系统中光学元件包括 ZYGO 激光干涉仪、离轴抛、离轴椭球、准直镜、干涉滤光片和微透镜阵列，任一光学元件的制造误差都会对整个系统产生影响。虽然从干涉图可知装调波前 PV 值和 RMS 值较小，但是离轴椭球镜的第一焦点与离轴抛焦点重合存在多种可能，所以在次镜失调时，Zernike 系数变化与模拟结果不符合。

(2) S-H WFS 引入的探测误差

实验中 S-H WFS 采用的是 Thorlabs 的 WFS150C 型，这是一款普通商用的波前传感器，波前探测精度较低，RMS 约为 $\lambda/25$ ，其探测精度亦不满足前文理论分析需求的精度。根据第二章影响质心算法精度分析可知，CCD 探测器的非均匀性引入的噪声会影响波前传感器的探测精度；此外，当波前传感器各个子光斑的光强分布差别较大，而所有光斑探测窗口选用同一阈值可能会造成部分窗口内光斑有用信号被截去，而部分窗口内噪声未被完全去除，进而影响质心的探测精度；另外，不同区域的微透镜阵列差异，以及波前重构时边缘情况的不确定性，导致波前探测出现误差，Zernike 系数偏离线性。

(3) 实验环境的影响

我们在实验中发现沾灰的光学元件导致光斑质量不理想和光强分布不均匀，主次镜相隔较远，无机械结构连接，容易受到光学平台和六足位移平台的振动、实验室气流抖动、外界轻微扰动等因素影响，导致波前传感器探测波前不断发生变化，影响波前探测准确性，降低了采集数据的稳定性和重复性。

4.5 次镜姿态失调校正策略

在验证实验中我们发现，当次镜姿态出现较大的失调量时，准直光束会产生较大的偏离，即使不经过波前计算也可以看到光斑明显偏离微透镜阵列的中心区域。这使我们考虑到，应对这种较大的误差时，是否可以先将光斑校正到中心区域，然后再通过波前计算进行精密调整。

根据对桁架结构的有限元分析可以初步判断失调是由哪些维度产生的，并估计失调量的大小。由于 AIMS 望远镜为地平式跟踪系统，桁架形变趋势相对简单，可排除一些干扰因素，例如表 4.5 所示，在不同时节有限元分析，次镜主要在 Y 轴方向位移、在 Z 轴方向位移、绕 X 方向旋转失调较大，在 X 轴方向位移、绕

Y 轴旋转失调几乎为 0。因此，我们可以采取对失调量分级校正的方案，即结合有限元分析，对明显探测到的偏移量进行预先校正，然后再通过 S-H WFS 对失调量进行精密计算，如此可以有效避免校正的盲目性，减小迭代次数，节省计算时间。

表 4.5 不同时节点的次镜失调有限元分析

主镜-次镜	X / μm	Y / μm	Z / μm	弯沉 / arcsec
夏至	0.31E-02	16.64	46.7	3.27
春秋分	1.46 E-03	10.41	32.2	2.249
冬至	0.69 E-03	5.12	16.2	1.118

4.5 本章小结

本章在前文仿真分析基础上，选取并加工了 AIMS 望远镜内边缘 200mm 口径的离轴抛物镜和对应的离轴椭球镜，搭建实验系统完全模拟了 AIMS 望远镜次镜失调。实验创新性地采用 ZYGO 干涉仪与波前传感器共路方法指导完成装调，由干涉仪检测可得波前 PV 约为 $\lambda/3.4$ ，RMS 值约为 $\lambda/18$ ，满足要求。在此基础上，开展了次镜姿态失调实验，通过六足位移平台控制次镜的姿态失调，波前传感器实时记录畸变波前的 Zernike 系数，研究次镜姿态变化与表征像差的 Zernike 系数之间的关系。实验结果表明：在误差范围内，初级像差 Zernike 系数与失调量成线性关系，不同姿态失调量主要引起的像差程度不同。在实验基础上提出了结合有限元分析分级校正次镜失调的策略。

第5章 总结与展望

5.1 全文总结

为解决 AIMS 望远镜次镜姿态失调导致像质退化问题,创新性提出基于局部孔径波前探测与重构的次镜姿态实时校正方法。该方法利用小口径平行光源构造人工星点,入射望远镜局部区域,采用 S-H WFS 探测波前畸变,然后采用六足位移平台加以校正。该方法可以摆脱对日面高对比度活动区的依赖,即使在太阳活动极小年仍然可以进行有效波前探测,而且基于点源质心算法相比较低对比度面源的复杂相关运算而言,可有效提高测量精度和运算速度及稳定性,更容易实现次镜姿态实时校正。同时,由于空气链路短,可以有效降低大气视宁度的影响。因此,本课题开展了基于局部口径波前探测的次镜姿态实时校正技术方法研究,研究结论如下:

1) 研究了 S-H WFS 的波前探测原理以及质心算法,采集斜率信息后利用 Zernike 多项式构建波前重构方程,并采用奇异值矩阵法求解 Zernike 系数;研究了失调量与表征像差的 Zernike 系数的线性关系。最终,确定了波前探测、波前重构、失调量计算的技术路线;

2) 光学仿真选取了 200mm 局部口径和主镜内边缘入射位置;分析了局部波前畸变程度和波前探测可行性;根据畸变波前 Zernike 系数模拟计算了失调量,当点阵质心计算精度优于 $0.01\mu\text{m}$ 时,可以有效提取波像差信息,准确地计算出导致波前畸变的次镜姿态失调量;

3) 分析了构造人工星点的平行光源的需求,利用离焦下光学系统的 MTF 指标确定了平行光源的焦距为 3500mm,并且使用 ZEMAX 初步设计了经典卡塞格林式平行光源。该光源可以获得高质量的平行光,而且体积更小,重量更轻,适于在 AIMS 望远镜上应用;

4) 在前文仿真分析基础上,选取并加工了 AIMS 望远镜内边缘 200mm 口径的离轴抛物镜和对应的离轴椭球镜,搭建实验系统完全模拟了 AIMS 望远镜次镜失调,实验创新性地采用 ZYGO 干涉仪与波前传感器共路方法指导完成装调,

系统波前 PV 约为 $\lambda/3.4$, RMS 值约为 $\lambda/18$ 。利用六足位移平台控制次镜失调, S-H WFS 采集 Zernike 系数, 验证 Zernike 系数与失调量的线性关系, 验证局部口径点源波前探测技术路线的可行性。在实验基础上提出了结合有限元分析分级校正次镜失调的策略。

5.2 未来展望

由于受疫情影响, 目前研究工作初步验证了校正方法可行性, 仍然需要进一步提高测量性能和实验数据稳定性, 还有许多工作和问题需要进一步研究和完善, 包括:

1) 需要提高 WFS 的精度和性能。由于实验条件有限, 本实验所采用的 S-H WFS 精度 RMS 为 $\lambda/25$, 帧频约 8Hz。而当前已有更高精度的 S-H WFS 货架产品, 例如 OPTOCRAFT 的 WFS 精度达到 $\lambda/100$, 帧频达到 18Hz。亦可根据精度要求研制 S-H WFS, 在软件算法方面, 具有优化空间, 例如在每个子单元设置自适应阈值^[60]分割降低 CCD 探测器噪声影响和光强不均匀性, 通过优化窗口去除边缘不确定性和采用高阶矩方法计算质心^[61]等。高性能 WFS 的应用可望提高探测波前探测精度和有效减小环境因素干扰。

2) 需要优化设计准直光路。本实验采用了商用透镜准直, 并未针对实验系统优化设计, 同时在实验中, 我们也发现, 采用透镜式的准直光路, 瞳面到焦点的光路较长, 更容易受到干扰, 可根据准直系统焦距, 结合光学系统设计优化准直光学系统, 可考虑反射式系统缩短准直光路, 减小准直系统对波前探测的影响。

3) 需要平行光源联合测试。本实验采用 ZYGO 干涉仪作为光源, 并没有采用前文设计的长焦反射式平行光源。在初步设计基础上, 进一步优化设计, 模拟分析平行光源, 研制该平行光源, 与主次镜系统一起搭建试验系统, 联合测试, 更加接近实际应用。

4) 需要改进失调量计算模型。本文采用一阶灵敏度矩阵模型, 可此基础上发展改进的灵敏度矩阵法^[62], 例如在传统方法的数学模型中加入二次修正项, 使得模型更加接近实际测量, 提高失调量计算准确度。

此外, 本方法可以推动局部口径或者子孔径波前探测方法应用于大口径天文

望远镜的主动光学、面型检测、拼接面型、装调等方面，为天文望远镜向大口径方向发展和追求高分辨率提供新思路。

参考文献

- [1] CAO W, GORCEIX N, COULTER R, et al. Scientific instrumentation for the 1.6 m New Solar Telescope in Big Bear [J]. *Astronomische Nachrichten*, 2010, 331(6): 636-639.
- [2] GOODE P R, CAO W. The 1.6 m Off-Axis New Solar Telescope (NST) in Big Bear [M]. 2012.
- [3] GOODE P R, CAO W, TEAM B. The 1.6 m Off-Axis New Solar Telescope (NST) in Big Bear; proceedings of the Conference on Ground-Based and Airborne Telescopes IV, Amsterdam, NETHERLANDS, F 2012Jul 01-06, 2012 [C]. 2012.
- [4] BERKEFELD T, SCHMIDT D, SOLTAU D, et al. The GREGOR adaptive optics system [J]. *Astronomische Nachrichten*, 2012, 333(9): 863-871.
- [5] SCHMIDT W, VON DER LUEHE O, VOLKMER R, et al. The 1.5 meter solar telescope GREGOR [J]. *Astronomische Nachrichten*, 2012, 333(9): 796-809.
- [6] UPTON R. Optical control of the Advanced Technology Solar Telescope [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(23): 5881-5896.
- [7] 饶长辉, 张学军, 姜文汉. 太阳米粒结构相关哈特曼-夏克波前传感模拟研究 [J]. *光学学报*, 2002, 03): 285-289.
- [8] RIMMELE T R. Recent advances in solar adaptive optics [M]//CALIA D B, ELLERBROEK B L, RAGAZZONI R. *Advancements in Adaptive Optics*, Pts 1-3. 2004: 34-46.
- [9] 饶长辉, 朱磊, 张兰强, et al. 太阳自适应光学技术进展 [J]. *光电工程*, 2018, 45(03): 22-32.
- [10] FOY R, LABEYRIE A. FEASIBILITY OF ADAPTIVE TELESCOPE WITH LASER PROBE [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 1985, 152(2): 29-31.
- [11] GHEZ A M, HORNSTEIN S D, LU J R, et al. The first laser guide star adaptive optics observations of the Galactic center: Sgr A*'s infrared color and the extended red emission in its vicinity [J]. *Astrophysical Journal*, 2005, 635(2): 1087-1094.

- [12] VAN DAM M A, BOUCHEZ A H, LE MIGNANT D, et al. The W. M. Keck Observatory laser guide star adaptive optics system: Performance characterization [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2006, 118(840): 310-318.
- [13] WIZINOWICH P L, LE MIGNANT D, BOUCHEZ A H, et al. The W. M. Keck Observatory laser guide star adaptive optics system: Overview [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2006, 118(840): 297-309.
- [14] BECKERS J M. Laser guide stars for daytime thermal IR observations [M]//ANDERSEN T E. Extremely Large Telescopes: Which Wavelengths?: Retirement Symposium for Arne Ardeberg. Bellingham; Spie-Int Soc Optical Engineering. 2008.
- [15] 孙敬伟, 陈涛, 王建立, et al. 主次镜系统的计算机辅助装调 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2156-2163.
- [16] EGDALL I M. MANUFACTURE OF A 3-MIRROR WIDE-FIELD OPTICAL-SYSTEM [J]. Optical Engineering, 1985, 24(2): 285-289.
- [17] 巩盾, 田铁印, 王红. 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(08): 1754-1759.
- [18] 杨晓飞, 张晓辉, 韩昌元. Zemax 软件在离轴三反射镜系统计算机辅助装调中的应用 [J]. 光学精密工程, 2004, 03): 270-274.
- [19] 赵菲菲. S-H 波前传感器在计算机辅助装调中的应用研究 [D]; 中国科学院研究生院 (长春光学精密机械与物理研究所), 2013.
- [20] LAWRENCE G N, CHOW W W. WAVE-FRONT TOMOGRAPHY BY ZERNIKE POLYNOMIAL DECOMPOSITION [J]. Optics Letters, 1984, 9(7): 267-269.
- [21] HVISC A M, BURGE J H. Alignment analysis of four-mirror spherical aberration correctors - art. no. 701819 [M]//ATAD-ETTEDGUI E, LEMKE D. Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation, Pts 1-3. 2008: 1819-1819.
- [22] FIGOSKI J W. Alignment and test results of the QuickBird telescope using the Ball Optical System Test Facility [M]//ROYBAL W. Advanced Telescope Design, Fabrication, and Control. 1999: 99-108.
- [23] SILNY J F, KIM E D, COOK L G, et al. Optically fast, wide field-of-view, five-mirror

- anastigmat (5MA) imagers for remote sensing applications [M]//SHEN S S, LEWIS P E. Imaging Spectrometry Xvi. 2011.
- [24] 孙敬伟, 吕天宇, 姚丽双, et al. 发射望远镜的设计与装调 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(02): 369-375.
- [25] 罗淼, 朱永田. 计算机辅助装调方法在离轴卡塞格林系统中的应用 [J]. 光学技术, 2008, 04): 514-517.
- [26] 庞志海. 离轴反射光学系统计算机辅助装调技术研究 [D]; 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2013.
- [27] BABCOCK H W. THE POSSIBILITY OF COMPENSATING ASTRONOMICAL SEEING [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1953, 65(386): 229-236.
- [28] 周仁忠. 自适应光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [29] 苏定强, 崔向群. 主动光学—新一代大望远镜的关键技术 [J]. 天文学进展, 1999, 01): 1-14.
- [30] SHACK R V, PLATT B C. PRODUCTION AND USE OF A LENTICULAR HARTMANN SCREEN [J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(5): 656-&.
- [31] CAO G R, YU X. ACCURACY ANALYSIS OF A HARTMANN-SHACK WAVE-FRONT SENSOR OPERATED WITH A FAINT OBJECT [J]. Optical Engineering, 1994, 33(7): 2331-2335.
- [32] JIANG W, XIAN H, SHEN F. Detecting error of Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998, 15(218-227).
- [33] IRWAN R, LANE R. Analysis of optimal centroid estimation applied to Shack-Hartmann sensing [J]. Applied Optics, 1999, 38(6737-6743).
- [34] 黄晨曦. 沙克哈特曼波前传感器关键技术研究 [D]; 浙江大学, 2013.
- [35] 沈锋, 姜文汉. 提高 Hartmann 波前传感器质心探测精度的阈值方法 [J]. 光电工程, 1997, 249(03): 2-9.
- [36] REN J, RAO C, LI M. An Adaptive Threshold Selection Method for Hartmann-Shack Wavefront Sensor [J]. Opto-Electronic Engineering, 2002, 29(1): 1-5.

- [37] LIANG J, GRIMM B, GOELZ S, et al. Hartmann-Shack Sensor as a Component in Active Optical System to Improve the Depth Resolution of the Laser Tomographic Scanner [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1991, 1542(
- [38] YAN H-X, CHEN S, LI S-S. Numerical simulation investigations of the effects of noise and detection error in an adaptive optics system [J]. Proc SPIE, 2002, 144-155.
- [39] 王薇, 陈怀新. 基于优化探测窗口的光斑质心探测方法 [J]. 强激光与粒子束, 2006, 08): 1249-1252.
- [40] 周文超, 彭勇, 游安清. 提高哈特曼波前传感器质心探测精度的一种计算方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(06): 114-118.
- [41] 张艳艳, 郝晓龙, 陈洁玮. 加门限的一阶矩光斑质心探测方法 [J]. 光学技术, 2015, 41(01): 59-63.
- [42] OTSU N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms [J]. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, 1979, 9(62-66.
- [43] 沈锋, 姜文汉. 弱光波前传感器质心计算的新方法 [J]. 强激光与粒子束, 1999, 01): 31-34.
- [44] TALMI A, RIBAK E N. Direct demodulation of Hartmann-Shack patterns [J]. Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision, 2004, 21(4): 632-639.
- [45] CARMON Y, RIBAK E N. Fast Fourier demodulation [J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(23): 4656-4657.
- [46] FRIED D L. LEAST-SQUARE FITTING A WAVEFRONT DISTORTION ESTIMATE TO AN ARRAY OF PHASE-DIFFERENCE MEASUREMENTS [J]. Journal of the Optical Society of America, 1977, 67(3): 370-375.
- [47] DAI F, TANG F, WANG X, et al. Modal wavefront reconstruction based on Zernike polynomials for lateral shearing interferometry: comparisons of existing algorithms [J]. Applied Optics, 2012, 51(21): 5028-5037.
- [48] MOCHI I, GOLDBERG K A. Modal wavefront reconstruction from its gradient [J]. Applied Optics, 2015, 54(12): 3780-3785.
- [49] 沙定国. 自适应光学波面相位重构的区域算法 [J]. 北京理工大学学报, 1991, 04): 74-

- 79.
- [50] 张强, 姜文汉, 许冰. 用于 Hartmann-Shack 波前探测器的区域法算法研究 [J]. 强激光与粒子束, 1998, 02): 70-74.
- [51] NOLL R J. ZERNIKE POLYNOMIALS AND ATMOSPHERIC-TURBULENCE [J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(3): 207-211.
- [52] 倪英善. 基于波前传感器的像差测量系统研究 [D]; 南京航空航天大学, 2017.
- [53] TYSON R K. Principles of Adaptive Optics [M]. CRC Press, 2015.
- [54] LI X Y, WANG C H, XIAN H, et al. Zernike modal compensation analysis for an adaptive optics system using direct-gradient wavefront reconstruction algorithm [M]//TYSON R K, FUGATE R Q. Adaptive Optics Systems and Technology. Bellingham; Spie-Int Soc Optical Engineering. 1999: 116-124.
- [55] CAIN S. Design of an image projection correlating wavefront sensor for adaptive optics [J]. Optical Engineering, 2004, 43(7): 1670-1681.
- [56] ZHU L, GU N, CHEN S, et al. Real Time Controller for 37-Element Low-order Solar Adaptive Optics System at 1m New Vacuum Solar Telescope [M]//JIANG W, CHO M K, WU F. 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Large Mirrors and Telescopes. 2012.
- [57] LOFDAHL M G. Evaluation of image-shift measurement algorithms for solar Shack-Hartmann wavefront sensors [J]. Astronomy & Astrophysics, 2010, 524(
- [58] RAO C H, JIANG W H, LING N, et al. Correlation tracking algorithms for low contrast extended object [M]//TYSON R K, BONACCINI D, ROGGMANN M C. Adaptive Optics Systems and Technology Ii. 2001: 245-251.
- [59] 王娅雯. 基于扩展目标的相关哈特曼波前探测方法研究 [D]; 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.
- [60] 任剑峰, 饶长辉, 李明全. 一种 Hartmann-Shack 波前传感器图像的自适应阈值选取方法 [J]. 光电工程, 2002, 01): 1-5.
- [61] 夏爱利, 马彩文. 提高波前探测精度的高阶矩方法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(02): 472-477.

- [62] 顾志远, 颜昌翔, 李晓冰, et al. 改进的灵敏度矩阵法在离轴望远镜装调中的应用 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(09): 2595-2604.

致谢

光阴似箭，岁月如梭，三年的北京研究生求学生涯即将画上句号。行文至此，回忆起三年时光，感慨万千，硕士期间离不开良师益友的帮助和关怀，让我受益匪浅，一路成长，不仅学习了专业知识，锻炼了科研能力，同时也提高了个人素质，开拓了视野。这段求学生涯让我更上一层楼，亦是人生重要的一段经历，我将永远铭记。感恩拥有！

衷心感谢我的第一导师王东光老师，感谢王老师在考研复试中对我的指导和鼓励，让我成为怀柔基地的一员，带我走入科研的大门，感谢王老师在我硕士期间对我学习中的悉心指导和生活上无微不至的关怀，时刻关心我的课题研究进展，并提出宝贵的建议。王老师工作认真负责，是我学习的榜样。

衷心感谢我的第二导师张志勇老师，张老师平易近人，为人和蔼，回台后全面负责我的课题研究，在课题确定后，耐心地与我讨论分析，指导我学习研究，提供尽可能的支持，在我的科研道路上给予我很大的帮助，让我受到很大的启发，受益颇多，在生活中教我为人处事，常常交流分享心得，在我遇到困难的时候是我坚强的后盾，为我指点迷津，走出困境。回忆起这两年的点点滴滴，张老师对我的谆谆教诲历历在目，时刻铭记，感激不尽。

感谢怀柔基地主任邓元勇老师，邓老师是怀柔大家庭的大家长，爱护关心我们，感谢邓老师对我科研学习的指点；感谢宋谦老师、冯志伟老师，提供实验室和实验设备，保证实验的顺利进行；感谢王建师傅帮助安装调试设备；感谢梁明老师在光学设计方面给予的帮助和指点；感谢白先勇老师、廖周老师、刘文劲老师、云台刘忠老师、姜爱民老师在课题研究过程中的建议和指点；感谢侯俊峰老师、孙英姿老师、林佳本老师在课题研究过程中的帮助；感谢王蕙老师，罗琳姐，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、杨潇师姐、张洋师姐、郭晶晶师姐、魏烨艳师姐、王刚师

兄、佟立越师兄、张鑫伟师兄、白阳师兄、王全师兄、祝高飞师兄、沈宇樛师兄、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；感谢舍友陈垂裕同学、周明尧同学、王雅琦同学，我们是“光工钢铁四侠”，从雁栖湖到奥运村，大家一起工作学习玩耍，是你们给我的研究生生活带来了精彩和快乐，是我一生难忘且珍贵的回忆。

感谢我亲爱的女朋友杨同学，不管什么时候都有你的陪伴和关心，让我充满动力，不断努力奋斗前进。

感谢我挚爱的父母，含辛茹苦供我求学，无条件地支持我，是我永远的港湾，您们的养育之恩无以为报。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:

2013 年 09 月——2017 年 06 月, 在淮海工学院理学院获得学士学位。

2017 年 09 月——2020 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:

荀辉、张志勇、白先勇等。基于局部口径波前探测的大口径太阳望远镜次镜姿态校正方法[J]。影像科学与光化学, 2020, 38(3): 377-382.

申请或已获得的专利:

张志勇、荀辉、冯志伟、白先勇、邓元勇、王东光。一种大口径天文望远镜副镜姿态在位调整方法, 申请号: 201910090837.2。

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)

大口径太阳望远镜副镜姿态高精度闭环校正方法研究, 国家自然科学基金项目(11973061)

2019 年 07 月, 获得中国科学院大学“三好学生”。