



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

AIMS 望远镜精密装调技术研究

作者姓名: 沈宇樑

指导教师: 王东光 正高级工程师 国家天文台

侯俊峰 正高级工程师 国家天文台

学位类别: 理学博士

学科专业: 天文技术与方法

培养单位: 中国科学院国家天文台

2023 年 6 月

**Research on Precision Alignment Technology for AIMS
Telescope**

**A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Natural Science
in Astronomy Technology and Methods**

By

SHEN Yuliang

Supervisor: Professor WANG Dongguang

Professor HOU Junfeng

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Science

June, 2023

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。承诺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享有著作权的研究成果，未在以往任何学位申请中全部或部分提交。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人或集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学
学位论文使用授权声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院大学有关收集、保存和使用学位论文的规定，即中国科学院大学有权按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则，保留并向国家指定或中国科学院指定机构送交学位论文的电子版和印刷版文件，且电子版与印刷版内容应完全相同，允许该论文被检索、查阅和借阅，公布本学位论文的全部或部分内 容，可以采用扫描、影印、缩印等复制手段以及其他法律许可的方式保存、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：

导师签名：

日 期：

摘要

磁场是当今太阳物理最重要的观测量,几乎所有的太阳活动都与太阳磁场及其演化密切相关。目前太阳磁场的测量主要基于 Zeeman 效应实现,波长越长,其探测精度和灵敏度越高。因此,在中红外波段开展太阳磁场探测是提高太阳磁场测量精度的最有效手段。用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统(The accurate infrared solar magnetic field measurement system, AIMS)建成后将是国际上首台专门用于中红外磁场探测的太阳望远镜。为了减少望远镜自身红外辐射对太阳磁场测量的影响,AIMS 采用了离轴设计。然而,由于离轴光学系统没有实际的光轴,其装调难度巨大。如何实现精密装调并获得优异像质,是 AIMS 望远镜面向精确太阳磁场观测前面临的最大挑战。

本论文围绕特定姿态下的大口径离轴光学系统开展静态精密装调与动态精密装调方案的研究。以 AIMS 望远镜为分析模型,通过详细的理论仿真,提出一种使用中心小口径圆域的静态精密装调方案与一种基于 Shack-Hartmann 波前传感器的动态精密装调方案。具体研究内容与创新点如下:

1. 离轴光学系统像差特性的研究

根据矢量波像差理论,分析推导了离轴光学系统的像差表达式,结合 AIMS 望远系统,分析了光学元件失调量对 AIMS 望远系统波像差的影响;并分析了不同类型光学元件面型对 AIMS 望远系统波像差的贡献量;根据分析结果,明确了 AIMS 望远系统装调过程需以真实的光学元件面型作为装调模型,制定了初步的装调策略。

2. AIMS 望远系统静态精密装调方案设计

分析总结了现有静态装调方案应用于 AIMS 望远系统装调的不足,根据实际工程需求提出一种基于中心小口径圆域的装调方案;结合理论分析与数值仿真,确认了装调所需元器件的关键参数;开展了静态装调数值仿真实验,验证了基于中心小口径圆域装调方案的可行性,实现了特定姿态下离轴望远系统光学准实时装调(分钟量级),比原先子口径拼接装调速度(小时量级)提升一个量级,有效提高了装调效率。

3. AIMS 望远系统静态精密装调实验

基于中心小口径圆域的干涉装调方案开展了 AIMS 望远系统的外场实验室装调与冷湖台址装调工作。外场实验室装调实验表明,该装调方案可以使系统波像差 RMS 值快速收敛至 $0.127\lambda@623.8\text{nm}$,经过两轮的优化迭代,系统波像差 RMS 值的最终装调结果为 $0.075\lambda@623.8\text{nm}$;冷湖台址装调实验分析了不同环境温度下主次镜间隔的变化,为 AIMS 望远镜在不同环境温度下六杆机构的

调整提供了实验数据。

4. AIMS 望远系统动态精密装调方案设计

建立了用于 AIMS 望远系统动态装调的数值仿真平台；结合冷湖台址实测视宁度开展基于 Shack-Hartmann 波前传感器的动态装调数值仿真工作，为 AIMS 望远系统设计了具体的动态装调方案。

本课题立足于特定姿态下大口径离轴光学系统装调过程中实际的问题，建立了一套完整的装调分析流程。为特定姿态下大口径离轴光学系统提供了有效可靠的装调方案。相关的分析方法、仿真数据与实际装调数据可为未来其他大口径离轴光学系统的装调提供经验，具有极其重要的实际工程应用价值。

关键词：大口径离轴光学系统，静态精密装调，动态精密装调，中心小口径，Shack-Hartmann 波前传感器

Abstract

The magnetic field is the most important observational quantity in solar physics today, and almost all solar activities are closely related to the solar magnetic field and its evolution. Currently, measurements of the solar magnetic field are mainly achieved through the Zeeman effect. The detection accuracy and sensitivity of the solar magnetic field increase with wavelength. Therefore, conducting solar magnetic field detection in the mid-infrared band is the most effective way to improve the accuracy of solar magnetic field measurements. The accurate infrared solar magnetic field measurement system (AIMS) will be the first solar telescope dedicated to measuring the mid-infrared magnetic field in the world. In order to reduce the impact of infrared radiation on the measurement of the solar magnetic field, AIMS is designed as an off-axis optical system. However, because the off-axis optical system does not have an actual optical axis, the difficulty of alignment is enormous. How to achieve precise alignment and obtain excellent image quality is the biggest challenge faced by the AIMS telescope for accurate solar magnetic field observation.

This paper focuses on the static and dynamic precise alignment schemes of large aperture off-axis optical systems in special attitudes. Taking the AIMS telescope as the analysis model, a static precision alignment scheme based on the central small aperture and a dynamic precision alignment scheme based on the Shack-Hartmann wavefront sensor are proposed through detailed theoretical simulation. The specific research contents and innovative points are as follows:

1. Study on the aberration characteristics of off-axis optical systems

Based on vector wave aberration theory, the aberration expression of off-axis optical systems is analyzed and derived. Combined with the AIMS telescope system, the impact of optical component misalignment on the wavefront aberration of the AIMS telescope system is analyzed. The contribution of different types of optical surfaces to the wavefront aberration of the AIMS telescope system is also analyzed. According to the analysis results, the real mirror surface shape needs to be taken as the optical model during the alignment process of the AIMS telescope system, and a preliminary alignment strategy is formulated.

2. Design of static precise alignment scheme for AIMS telescope system.

The shortcomings of the existing static alignment scheme applied to AIMS telescope system alignment are analyzed and summarized, and a central small aperture alignment scheme is proposed based on actual engineering needs. The key parameters of the required components for aligning the system are identified by combining theoretical analysis and numerical simulation. The numerical simulation experiment of the static alignment scheme is carried out, and the feasibility of the alignment scheme based on the central small aperture is verified. The optical quasi-real-time alignment

(on the order of minutes) of the off-axis telescope under a specific attitude is realized, which is one order higher than the sub-aperture stitching alignment speed (on the order of hours). The new alignment scheme improved the alignment efficiency.

3. Static precision alignment experiment of AIMS Telescope System.

The laboratory alignment and Lenghu site alignment of the AIMS telescope system were carried out by the central small aperture alignment scheme. The laboratory alignment experiment showed that the alignment scheme can quickly converge the system wavefront RMS value to $0.127\lambda@623.8\text{nm}$. After two rounds of optimization iteration, the final alignment result of the system wavefront RMS value is $0.075\lambda@623.8\text{nm}$. Though alignment experiment at the Lenghu, we analyzed the changes in the distance between the primary and secondary mirrors at different ambient temperatures, providing experimental data for adjusting the six-axis hexapod of the AIMS telescope at different ambient temperatures.

4. Design of dynamic precise alignment scheme for AIMS telescope system.

A numerical simulation platform for the dynamic alignment of the AIMS telescope system is established. Based on the actual measured visual acuity data at the Lenghu site, a dynamic alignment scheme based on the Shack-Hartmann wavefront sensor is designed for AIMS telescope system.

Based on the actual problems in the alignment process of a large-aperture off-axis optical system in specific attitude, this paper establishes a complete set of alignment analysis processes. It provides an effective and reliable alignment scheme for large-aperture off-axis optical system in specific attitude. The relevant analysis methods, simulation data and actual alignment data can provide experience for the alignment of other large-aperture off-axis optical systems in the future, and have significant practical engineering application value.

Key Words: Large aperture off-axis optical system, Static precision alignment, Dynamic precision alignment, Central small aperture, Shack-Hartmann wavefront sensor

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 论文的主要研究内容及结构.....	5
第 2 章 AIMS 太阳望远镜	7
2.1 望远系统.....	7
2.2 折轴系统.....	9
2.3 消旋系统.....	10
2.4 准直系统.....	11
2.5 焦面设备系统.....	13
2.5.1 傅里叶光谱仪前置系统.....	14
2.5.2 $8\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 成像系统.....	15
2.5.3 Brucker 光谱仪前置系统	16
2.5.4 跟踪监视系统.....	17
2.5.5 摆镜监视系统.....	19
2.6 AIMS 太阳望远镜装调方案.....	21
2.6.1 望远系统装调方案.....	21
2.6.2 其他系统装调方案.....	21
2.6.3 AIMS 太阳望远镜装调的主要难点	22
2.7 小结.....	22
第 3 章 离轴反射光学系统像差特性研究	25
3.1 同轴光学系统波像差.....	25
3.1.1 同轴光学系统理论波像差展开.....	25
3.1.2 非同轴光学系统理论波像差展开（装调误差）	27
3.2 离轴光学系统波像差.....	30
3.2.1 光瞳转换.....	30
3.2.2 离轴光学系统理论波像差.....	31
3.2.3 失调离轴光学系统波像差.....	35
3.2.4 Zernike 多项式与失调离轴光学系统波像差的关系.....	37
3.3 光学元件面型误差对失调离轴光学系统波像差的影响.....	43
3.3.1 主镜(M1)面型的影响	44
3.3.2 次镜(M2)面型的影响	46
3.3.3 光学元件面型误差对 AIMS 望远系统装调的影响.....	47

3.4 小结.....	48
第 4 章 AIMS 望远系统静态精密装调方案设计	49
4.1 现有静态装调方案.....	49
4.2 中心小口径圆域干涉装调方案理论分析.....	51
4.2.1 中心小口径圆域干涉装调评价基准.....	51
4.2.2 C_n 与中心小口径圆域口径的选取.....	52
4.2.3 装调光路.....	55
4.3 中心小口径圆域干涉装调方案数值仿真.....	56
4.3.1 装调仿真流程.....	56
4.3.2 理想装调环境.....	57
4.3.3 非理想装调环境（测量误差）	60
4.4 小结.....	64
第 5 章 AIMS 望远系统静态精密装调实验	65
5.1 光学元件面型检测与系统中心视场标定.....	65
5.1.1 小口径标准平面反射镜面型检测.....	65
5.1.2 主镜(M1)面型检测与系统中心视场标定	66
5.1.3 次镜(M2)面型检测	68
5.1.4 主次镜热分析.....	69
5.2 AIMS 望远系统静态精密装调流程.....	73
5.3 外场装调实验.....	74
5.4 冷湖台址装调.....	78
5.5 小结.....	80
第 6 章 AIMS 望远系统动态精密装调方案设计	81
6.1 Shack-Hartmann 波前传感器	81
6.1.1 工作原理.....	81
6.1.2 波像差反演.....	82
6.2 大气湍流.....	83
6.2.1 Kolmogorov 大气湍流模型.....	83
6.2.2 大气湍流相位屏数值仿真.....	86
6.3 AIMS 望远系统动态装调数值仿真.....	88
6.3.1 装调仿真流程.....	88
6.3.2 实时调整小位置误差的动态装调仿真.....	92
6.3.3 长时间累积大位置误差的动态装调仿真.....	94
6.3.4 AIMS 望远系统的动态装调策略.....	96
6.4 初步动态装调实验.....	97
6.5 小结.....	98

第 7 章 总结与展望	99
7.1 工作总结与创新点.....	99
7.2 未来工作展望.....	100
参考文献.....	101
致 谢.....	107
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果	109

图目录

图 1-1 (a) GST 太阳望远镜示意图 (图片来源: Cao et al, 2010) (b) DKIST 太阳望远镜示意图 (图片来源: https://nso.edu/telescopes/dkist-telescope)	3
图 1-2 DKIST 太阳望远镜格里高利焦点处 Shack-Hartmann 传感器 (图片来源: Liang et al, 2018)	4
图 2-1 AIMS 太阳望远镜整体光学设计示意图	7
图 2-2 AIMS 望远系统光学设计示意图	8
图 2-3 AIMS 望远系统焦点点列图 ($8\mu\text{m}\sim 12.32\mu\text{m}$)	8
图 2-4 AIMS 望远系统热光阑示意图	9
图 2-5 AIMS 折轴系统光学设计示意图	9
图 2-6 AIMS 折轴系统中间焦点点列图 ($8\mu\text{m}\sim 12.32\mu\text{m}$)	10
图 2-7 AIMS 消旋系统光学设计示意	11
图 2-8 AIMS 准直系统光学设计示意图	12
图 2-9 系统出瞳在 M9 上的投影	13
图 2-10 AIMS 焦面设备系统示意图	13
图 2-11 傅里叶光谱仪前置系统光学设计示意图	14
图 2-12 傅里叶光谱仪前置系统出瞳	15
图 2-13 $8\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 成像系统光学设计示意图	15
图 2-14 $8\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 成像系统焦面点列图	16
图 2-15 Brucker 光谱仪前置准直系统光学设计示意图	17
图 2-16 跟踪监视系统光学设计示意图	18
图 2-17 远场光路光瞳图	19
图 2-18 近场光路焦面点列图	19
图 2-19 摆镜监视系统光学设计示意图	20
图 2-20 摆镜监视光路焦面点列图 (a)F#29 光路 (b)F#13 光路	21
图 3-1 光学系统波像差	25
图 3-2 出瞳矢量与视场矢量	26

图 3-3	光学元件偏心与倾斜	27
图 3-4	孔径离轴光学系统光瞳与母系统光瞳对应关系	30
图 3-5	离轴光学系统彗差节点位置矢量	34
图 3-6	离轴光学系统像散节点位置矢量	35
图 3-7	光学系统失调后离轴光学系统彗差节点位置矢量	36
图 3-8	AIMS 望远系统光瞳与母系统光瞳的对应关系示意图	41
图 3-9	不同视场在 M1 上的投影	44
图 3-10	主镜模拟面型 (C5=0.1, C6=0.1, C7=0.1, C8=0.1, C9=0.1)	45
图 3-11	次镜模拟面型 (C5=0.1, C6=0.1, C7=0.1, C8=0.1, C9=0.1)	46
图 3-12	使用光瞳局部区域理论波像差装调仿真结果 (a)中心 450mm 圆域波像差 (b)全口径波像差	47
图 4-1	全口径干涉装调光路	49
图 4-2	用于 AIMS 主镜面型检测的 CGH 相位波片 (a)实物图 (b)主 镜面型实测波前数据	50
图 4-3	子孔径拼接	51
图 4-4	10 组随机 M2 位置误差分布	53
图 4-5	M2 位置误差对全口径系统 Zernike 多项式的影响	53
图 4-6	$\Delta C_{n,r}$ 与半径 r 的变化曲线	55
图 4-7	AIMS 望远系统装调光路图	55
图 4-8	加入 M1、M2 随机面型后 AIMS 望远系统中心视场波像差	56
图 4-9	20 组 M2 的随机位置误差	57
图 4-10	不同中心口径模拟装调完成后的位置残差	58
图 4-11	不同中心口径模拟装调完成后 AIMS 望远系统各视场的波 前 RMS 残差	59
图 4-12	测量误差为 $-0.01\lambda \sim 0.01\lambda$ 时不同中心口径模拟装调完成后 AIMS 望远系统各视场的波前 RMS 残差	62
图 4-13	测量误差为 $-0.02\lambda \sim 0.02\lambda$ 时不同中心口径模拟装调完成后 AIMS 望远系统各视场的波前 RMS 残差	63

图 5-1	450mm 标准平面反射镜面型检测光路.....	65
图 5-2	450mm 标准平面反射镜倾斜 14.036°后实测面型.....	66
图 5-3	(a)M1 轴向支撑结构机械设计图 (b)M1 径向支撑结构机械设计图.....	66
图 5-4	(a)M1 轴向支撑结构实际工装 (b)M1 径向支撑结构实际工.....	67
图 5-5	M1 面型检测光路图.....	67
图 5-6	M1 焦点处中心 450mm 圆域内 Z5/Z6 视场灵敏度曲线 (a)Z5 (b)Z6.....	68
图 5-7	M2 面型检测光路示意图.....	69
图 5-8	M2 面型检测实际光路.....	69
图 5-9	主镜背部与大地垂直时主镜支撑有限元模型.....	70
图 5-10	-10°C主镜背部与大地垂直时主镜整体变形图.....	70
图 5-11	-10°C主镜背部与大地垂直时主镜面型变形图.....	70
图 5-12	阳光照射后主镜表面温度分布.....	71
图 5-13	主镜被太阳照射后, 其背部与大地垂直时主镜整体变形图.....	71
图 5-14	主镜被太阳照射后, 其背部与大地垂直时主镜面型变形图.....	71
图 5-15	-10°C次镜整体变形图.....	72
图 5-16	-10°C次镜面型变形图.....	72
图 5-17	阳光照射后次镜表面温度分布.....	72
图 5-18	太阳照射后次镜面型变形图.....	73
图 5-19	AIMS 望远系统装调流程图.....	74
图 5-20	M1 与 M2 在位实测面型(20°C) (a)M1 (b)M2.....	75
图 5-21	AIMS 望远系统中心视场理论波像差(20°C) (a)全口径 (b)中心 450mm 圆域.....	75
图 5-22	AIMS 望远系统外场实验室装调实际光路.....	76
图 5-23	AIMS 望远系统外第 1 轮中心小口径装调后全口径波像差.....	77
图 5-24	AIMS 望远系统装调完成后全口径波像差.....	78

图 5-25	M1 与 M2 在位实测面型(20°C) (a)M1 (b)M2.....	78
图 5-26	AIMS 望远系统中心视场理论波像差(-10°C).....	79
图 5-27	AIMS 望远系统不同温度下装调完成后中心视场波像差 (a)-10°C (b)-2°C (c)0°C (d)3°C (e)10°C	79
图 5-28	环境温度与六杆 Z 方向平移量的对应曲线	80
图 6-1	Shack-Hartmann 传感器	81
图 6-2	探测器靶面处实测光斑质心与子口径中心点的位置关系....	82
图 6-3	Kolmogorov 大气湍流模型示意图	84
图 6-4	冷湖台址夜间 r_0 实测值 (图片来源: http://lenghu.china-vo.org/sitecondition)	87
图 6-5	大气随机相位屏 ($r_0=0.8''$, $l_0=2\text{cm}$, $L_0=100\text{m}$)	87
图 6-6	不同 r_0 值时相对艾里斑半径大小	88
图 6-7	AIMS 望远系统动态装调流程	90
图 6-8	参与实际成像的微透镜阵列.....	90
图 6-9	系统出瞳处被微透镜阵列分解出瞳波前.....	91
图 6-10	Prime BSI Express 相机.....	91
图 6-11	失调系统波前与大气湍流相位屏叠加 (a)系统出瞳波前(b)微透镜阵列分解后子孔径波前	93
图 6-12	小位置误差波像差反演残差 (a)单帧 (b)50 帧平均 (c)100 帧平均 (d)150 帧平均 (e)200 帧平均	94
图 6-13	大位置误差波像差反演残差 (a)单帧 (b)50 帧平均 (c)100 帧平均 (d)150 帧平均 (e)200 帧平均	96
图 6-14	摆镜 F#13 支路 Shack-Hartmann 光路.....	97
图 6-15	AIMS 望远镜动态像质 (a)初始中心视场波前, RMS 值为 $0.165\lambda@633\text{nm}$ (b)迭代 1 轮后中心视场波前, RMS 值为 $0.137\lambda@633\text{nm}$	97

表目录

表 2-1	AIMS 望远系统光学元件参数	8
表 2-2	AIMS 折轴系统光学元件参数	10
表 2-3	AIMS 消旋系统光学元件参数	11
表 2-4	AIMS 准直系统光学元件参数	12
表 2-5	傅里叶光谱仪前置准直系统元件参数	14
表 2-6	8 μm ~10 μm 成像系统元件参数	16
表 2-7	Brucker 光谱仪前置准直系统元件参数	17
表 2-8	跟踪监视系统元件参数	18
表 2-9	摆镜监视系统元件参数	20
表 3-1	光瞳矢量 $\vec{\rho}$ 与三阶像差的对应关系	31
表 3-2	前 15 项标准 Zernike 多项式与像差的对应关系	38
表 3-3	前 15 项 Fringe Zernike 多项式	39
表 3-4	各视场光瞳中心坐标	46
表 3-5	各视场 5-9 项 Zernike 多项式变化量	46
表 3-6	各视场 5-9 项 Zernike 多项式变化量	47
表 4-1	随机环境噪音 (-0.01 λ ~0.01 λ)	60
表 4-2	随机环境噪音 (-0.02 λ ~0.02 λ)	60
表 4-3	M2 的位置误差	60
表 4-4	随机环境噪音对 M2 的位置误差计算的影响	61
表 5-1	H-850.G2A 型六杆机构性能参数	68
表 5-2	AIMS 望远系统中心圆域 (450mm) 中心视场 Zernike 多项式系数理论值	75
表 5-3	第 1 次中心小口径装调实测波像差	76
表 5-4	第 1 次中心小口径装调六杆位置	76
表 5-5	第 2 次中心小口径装调实测波像差	77
表 5-6	第 2 次中心小口径装调六杆位置	77
表 6-1	Prime BSI Express 型探测器性能参数	92

表 6-2	M2 初始位置误差（小位置误差）	92
表 6-3	次镜失调后中心视场系统波像差变化量（小位置误差） ...	92
表 6-4	反演波像残差对 AIMS 望远系统各视场波像差 RMS 值的影响（200 帧，小位置误差）	93
表 6-5	M2 初始位置误差（大位置误差）	95
表 6-6	次镜失调后中心视场系统波像差变化量（大位置误差） ...	95
表 6-7	反演波像残差对 AIMS 望远系统各视场波像差 RMS 值的影响（200 帧，大位置误差）	95

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

太阳是茫茫宇宙中一颗典型的恒星，是离我们最近的一颗恒星，是维持地球生命的能量来源。太阳是目前唯一一颗可被精细观测的恒星样本，其高时间、高空间、高光谱分辨率及高偏振精度等的成像观测结果，是深入理解天体物理学诸多关键问题的观测依据和研究基础；太阳的高温等离子体环境提供了一个地球上无法模拟的巨大的磁流体动力学实验室，对它的认识可以促进对相关基本物理问题的理解；太阳及其行星系统提供了目前已知的唯一一个天体系统，其中理性生命得以繁衍，因而太阳也是宇宙中生命起源研究的最佳样本；此外，太阳是灾害性空间天气的源头，剧烈的太阳活动会对航空航天、导航通讯乃至国民经济造成灾害性影响(林元章, 2001; 邓元勇 等, 2020; 李文显 等, 2022)。

太阳从里到外主要分为日核、辐射层、对流层与太阳大气，目前，我们可以直接观测的是太阳大气。太阳大气实质上是一个巨大的磁等离子环境，其间的一切现象和过程都是由磁场主导的电磁相互作用过程，因此太阳磁场的观测研究在当代太阳物理学和空间天气学中占有举足轻重的地位。1908 年，美国科学家 Hale 首次将 Zeeman 效应(Zeeman, 1897)用于太阳磁场的观测，成功观测到了太阳黑子的磁场(Hale, 1908)，从此拉开了太阳磁场测量的序幕。

迄今为止，太阳磁场探测主要基于 Zeeman 效应，即太阳光经过具有磁场的太阳大气将分裂成 3 条子谱线，分裂裂距与磁场强度和波长的平方成正比，且各子线具有不同的偏振状态。目前，太阳磁场测量主要集中在可见光(400nm~700nm)与近红外(700nm~2.5 μ m)波段。由于观测波段较短，太阳谱线的裂距非常小，以至无法直接测量，只能依靠太阳谱线分裂的子线之间的偏振态信息变化来反演太阳磁场的信息，因此太阳磁场的测量本质上转化为太阳光谱线的偏振参数测量。这种“间接测量”方法强烈地依赖于太阳大气的辐射转移模型(Unno, 1956)。然而，确定太阳大气模型需要用到许多物理参数，这些参数依赖于局地太阳大气环境而且无法精确测定，这将导致磁场反演结果不唯一、精度受限。

根据 Zeeman 效应的原理，在中远红外波段(2.5 μ m~25 μ m)谱线裂距远大于可见光波段，为直接测量谱线裂距、实现太阳磁场精确测量提供了可能。此外，中远红外波段具有大气视宁度好、大气散射光小、仪器散射光小、仪器偏振小等诸多优势(曹文达, 2001)，是二十一世纪地基天文观测最主要的竞争方向。

过去一百多年间，由于红外探测技术的限制，仅有美国 NSO/McMath 望远镜在太阳中远红外波段开展过零星观测(Deming et al, 1990; Hewagama et al, 1993; Moran et al, 2007)。近些年来，随着红外探测技术的飞速发展，新一代的太阳望

望远镜已逐步开始中远红外波段的观测布局。美国大熊湖太阳天文台的 GST (Goode Solar Telescope) 太阳望远镜配置了中红外冷却光栅摄谱仪 (Cryogenic Infrared Spectrograph, Cyra), Cyra 具有在 $1\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 的双光束偏振测量能力以及 $3\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 低温光谱探测能力, 重点开展 $4\mu\text{m}$ 附近的分子谱线和磁敏谱线认证和观测研究(Yang et al, 2020); 美国已经出光的世界上最大口径光学太阳望远镜 4 米 DKIST (Daniel K. Inouye Solar Telescope), 观测波段延伸至 $30\mu\text{m}$ 的红外波段, 其第一代焦面设备中的 Cryo-NIRSP 和 DL-NIRSP 将提供 $1\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 的偏振光谱成像观测(Snow et al, 2018; Fehlmann et al, 2023)。用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统 (The accurate infrared solar magnetic field measurement system, AIMS) 是由国家自然科学基金资助的重大仪器专项, 建成后将是我国首台专门用于中红外太阳磁场探测的观测设备。第一代焦面设备包括 $8\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 偏振成像系统与 $12.32\mu\text{m}$ 傅里叶光谱仪, 重点开展中红外波段太阳磁场的测量。

由于望远镜的分辨率与观测波长成反比, 与口径成正比, 为了获得高分辨的中远红外太阳磁场数据, 需增大望远镜的有效口径。此外, 对于用于中远红外探测的太阳望远镜来说, 传统同轴望远镜的光学元件与其支撑结构带来的衍射杂光与自身红外辐射会影响观测精度。因此, 为了增加望远镜的有效口径、减少自身衍射杂光与红外辐射杂光对观测的影响, 红外太阳望远镜光学系统通常采用离轴设计, 如 GST 太阳望远镜与 DKIST 太阳望远镜(Hansen et al, 2006; Cao et al, 2010; Cao et al, 2012)。

望远镜的探测精度与其成像质量密切相关。离轴光学系统因为没有实际的光轴, 装调难度较大。目前国内在大口径离轴光学系统装调研究较少, 急需开展大口径离轴光学系统精密装调的研究工作。本论文以 AIMS 太阳望远镜为研究对象, 开展特定姿态下大口径离轴光学系统静态与动态精密装调方法的研究, 解决实际装调过程中的工程问题, 保证 AIMS 太阳望远镜的实际成像质量, 为中远红外太阳磁场的精确测量夯实基础。

1.2 国内外研究现状

光学系统装调是一个涉及光学、机械和控制的复杂工程。离轴光学系统因为没有实际光轴, 装调方法较同轴光学系统有较大的不同, 整体装调难度较大。GST 太阳望远镜与 DKIST 太阳望远镜为典型的大口径离轴格里高里系统, 主镜为离轴抛物面镜, 次镜为离轴椭球镜, 次镜的短轴焦点与主镜焦点对接。图 1-1 为 GST 太阳望远镜与 DKIST 太阳望远镜示意图。主镜固定安装在在桁架上, 为装调基准面; 次镜通过六杆机构连接在桁架上, 装调过程中通过六杆机构进行主次镜相对位置的调整。

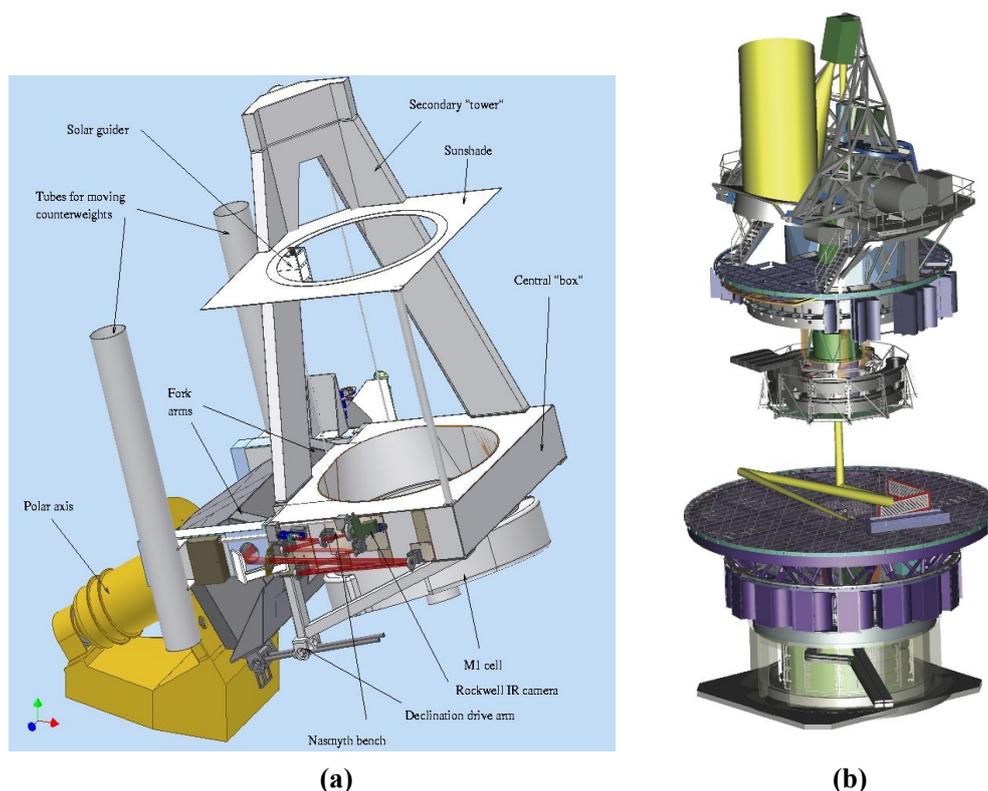


图 1-1 (a) GST 太阳望远镜示意图 (图片来源: Cao et al, 2010) (b) DKIST 太阳望远镜示意图 (图片来源: <https://nso.edu/telescopes/dkist-telescope>)

GST 太阳望远镜与 DKIST 太阳望远镜装调过程中使用激光跟踪仪进行光学元件的粗定位(Burge et al, 2007; Cao et al, 2010; Predray et al, 2016)。将激光跟踪仪的角锥棱镜放置在光学元件表面,利用角锥棱镜入射光与出射光角度一致的特性,激光跟踪仪通过反射回的光线获得角锥棱镜所在的空间位置坐标,每个光学元件需要测量至少上下左右 4 个点的空间位置坐标。通过激光跟踪仪实测的各个光学元件的空间位置坐标与理论光学设计进行比对,从而完成光学元件的粗定位。

完成光学系统粗定位后, GST 太阳望远镜与 DKIST 太阳望远镜均在实际台址上开展了基于 Shack-Hartmann 波前传感器的动态装调(Cao et al, 2010; Liang et al, 2018)。望远镜在实际观星过程中,通过 Shack-Hartmann 波前传感器上各个子口径上图像质心的偏移来评估不同姿态下望远镜的实际像质,实现对望远镜的实时装调。图 1-2 为放置在 DKIST 望远镜格里高利焦点处的 Shack-Hartmann 波前传感器。在实际工作环境开展实时的像质检测与光学装调,更能反应光学系统真实的装调状态,但是,该装调方法易受环境因素的影响。因此, GST 太阳望远镜与 DKIST 太阳望远镜在开展台址动态装调前都进行了详尽的实验分析,制定详细可靠的装调方案。

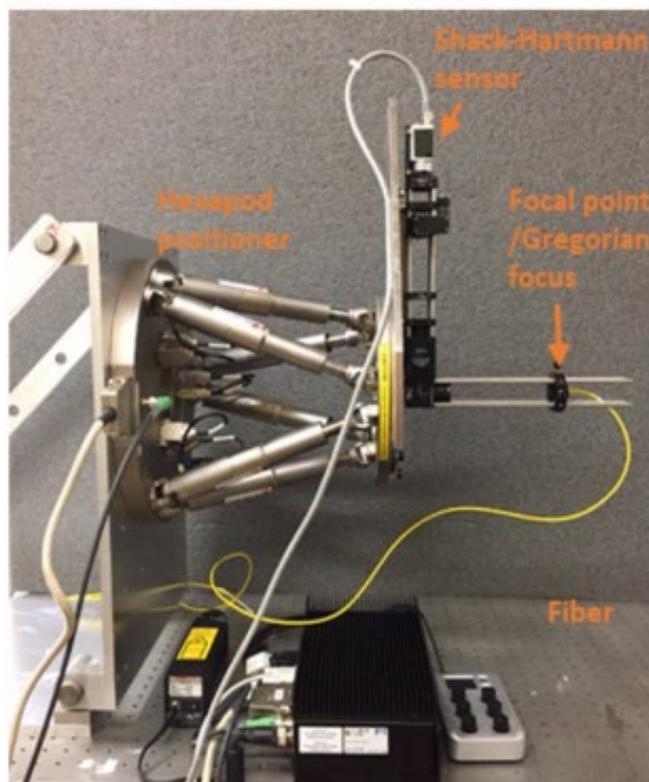


图 1-2 DKIST 太阳望远镜格里高利焦点处 Shack-Hartmann 传感器（图片来源：Liang et al, 2018）

国内对于离轴光学系统装调的研究主要为小口径离轴光学系统的实验室静态装调。朱淼等人(2008)使用计算机辅助的装调方法完成了一台口径为 250mm 的离轴卡塞格林系统的装调，中心视场波像差 RMS 值为 $0.0405\lambda@632.8\text{nm}$ ；庞志海(2013)使用奇异值分解的方法分析了系统波像差与光学元件失调量的关系，完成一台小口径离轴三反的实验室装调工作，全视场波像差 RMS 值优于 $0.09\lambda@632.8\text{nm}$ ；顾志远(2016)以圆形光瞳波前 Zernike 多项式系统的转换算法为基础，建立了离轴光学系统光学元件位置误差的校正模型，并以 GST 太阳望远镜为仿真对象，验证了模型的正确性；李蕾(2020)使用 Zernike 矢量多项的方法，分析了离轴光学系统装调误差的特性，并利用该方法完成了一台小口径离轴三反的实验室装调工作，全视场平均波像差 RMS 值优于 $0.1\lambda@632.8\text{nm}$ ；李明(2015)使用计算机全息与自准直干涉装调方法完成了一台小口径离轴三反的实验室装调，全视场平均波像差 RMS 值优于 $1/14.8\lambda@632.8\text{nm}$ ；罗敬等人(2022)研究了主动送风对 Zernike 多项式系数测量的影响，完成了一台口径 500mm 离轴三反的实验室装调，全视场平均波像差 RMS 值为 $0.086\lambda@632.8\text{nm}$ 。以上关于离轴光学系统装调均使用了全口径标准平面反射镜进行系统像质的干涉测量，适用于小口径望远镜的装调。

随着光学系统口径增大，离轴光学系统装调的难度也随之增大；天文望远镜

通常放置于野外台站，装调空间极其有限，装调环境恶劣。如何在有限条件实现精密装调是离轴大口径望远镜面临的重大难题。相较于国外，国内在地基大口径离轴天文望远镜的装调研究尚属空白。本课题根据 AIMS 太阳望远镜的实际工况开展适用于野外台站的静态、动态精密装调技术方法研究，提出一种基于小口径平面反射镜的静态装调方案与一种基于 Shack-Hartmann 波前传感器的动态装调方案，解决了 AIMS 太阳望远镜实际装调时的工程问题，为未来大口径离轴望远镜提供了技术储备。

1.3 论文的主要研究内容及结构

本论文以 AIMS 太阳望远镜为研究对象，开展特定姿态下的大口径离轴系统在位静态精密装调与动态精密装调的研究。主要章节内容分布如下：

第二章介绍了 AIMS 太阳望远镜的具体功能与光学设计结果，针对各子系统提出初步装调方案；分析给出 AIMS 太阳望远镜装调过程中的技术难点。

第三章从同轴光学系统的矢量波像差入手，以 AIMS 的望远系统为理论模型，分析了离轴光学系统中光学元件失调与系统波像差的关系，以及面型误差对离轴光学系统的影响，为 AIMS 望远系统制定了装调策略。

第四章根据实际的装调条件，提出一种基于中心小口径圆域的静态装调方案；结合 AIMS 望远系统的像差特性，给出了装调所需理论参数；开展了装调方案的理论环境与有环境噪声时的数值仿真，仿真结果验证了该装调方案适用于 AIMS 望远系统的静态精密装调。

第五章介绍了 AIMS 望远系统在外场实验室的静态装调，结果表明采用中心小口径圆域装调方案能够满足实际的装调需求，有效简化了装调流程，提高了装调效率；针对冷湖台址环境温差大，分析实测了环境温度对装调的影响，为实际观测对次镜位置的调整提供了实验数据。

第六章介绍了 Shack-Hartmann 波前传感器的工作原理以及大气湍流理论模型与仿真方法；结合冷湖台址实测的夜间视宁度，开展不同视宁度下 AIMS 望远系统动态装调的数值仿真，仿真结果表明，通过制定合理的装调流程，基于 Shack-Hartmann 波前传感器的动态装调方案能够满足实际装调需求。

第七章为总结与展望。总结了本文的主要工作内容，并对下一步工作重点进行了展望。

第 2 章 AIMS 太阳望远镜

AIMS 是一台地平式太阳望远镜，台址位于青海省海西蒙古族藏族自治州冷湖镇的赛什腾山 C 点，海拔 4000m，将在 $12.32\mu\text{m}$ 开展太阳光谱观测，在 $8\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 开展成像观测。AIMS 太阳望远镜的光学系统分为 5 个子系统，分别为：望远系统、折轴系统、消旋系统、准直系统与焦面设备系统。本章将详细介绍 AIMS 太阳望远镜各个子系统的功能、光学设计以及初步的装调方案。图 2-1 为 AIMS 太阳望远镜整体光学设计示意图。

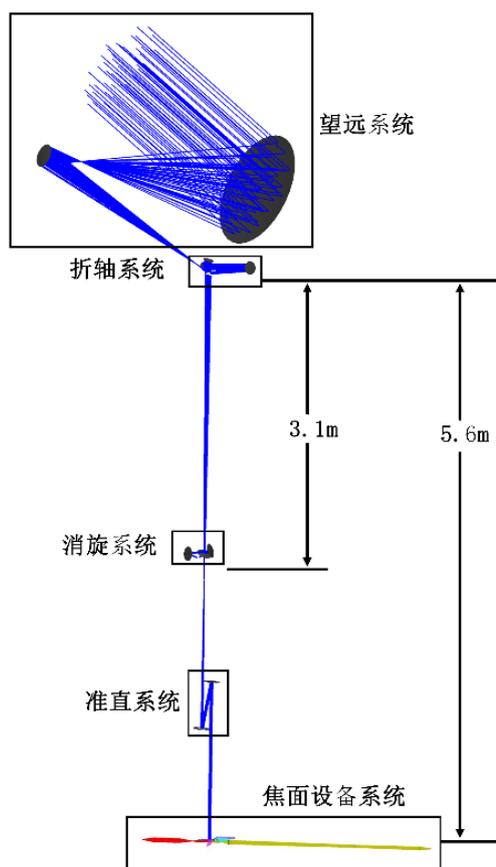


图 2-1 AIMS 太阳望远镜整体光学设计示意图

2.1 望远系统

望远系统是 AIMS 太阳望远镜的接收系统，将太阳光线导入后续的光学系统。为了减小仪器本身的红外辐射以及桁架的衍射对探测精度的影响，AIMS 望远系统采用离轴格里高里设计，有效口径 1000mm，全视场 $6.4'$ ，系统焦比 $F\#10$ 。其中，主镜 (M1) 为一块曲率半径为 4000mm 的离轴抛物面反射镜，次镜 (M2) 为一块曲率半径为 708.333mm 的离轴椭球面反射镜，光学元件的具体参数见表 2-1。图 2-2 为 AIMS 望远系统的光学设计图，图 2-3 为 AIMS 望远系统焦面点列图 ($8\mu\text{m}\sim 12.32\mu\text{m}$)。

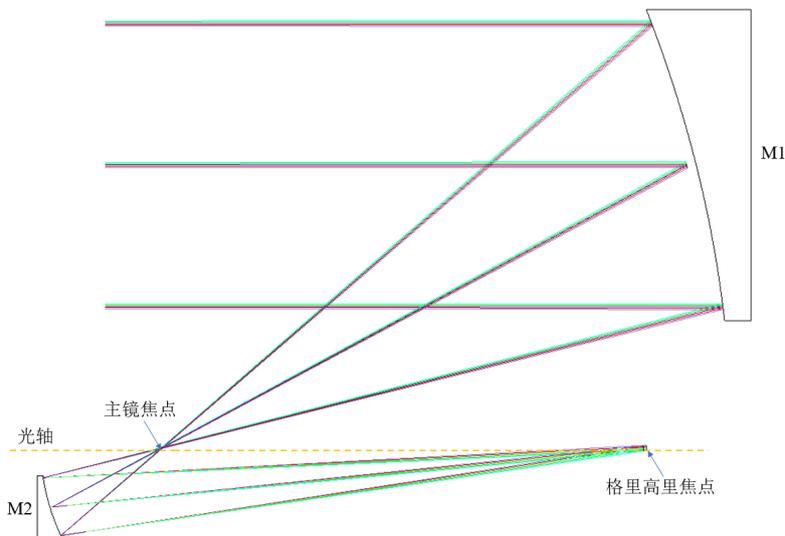


图 2-2 AIMS 望远系统光学设计示意图

表 2-1 AIMS 望远系统光学元件参数

元件名称	曲率/mm	离轴量/mm	口径/mm	非球面系数	材料
M1	4000	1000	1100	-1	微晶
M2	708.33	209.88	220	-0.444	微晶

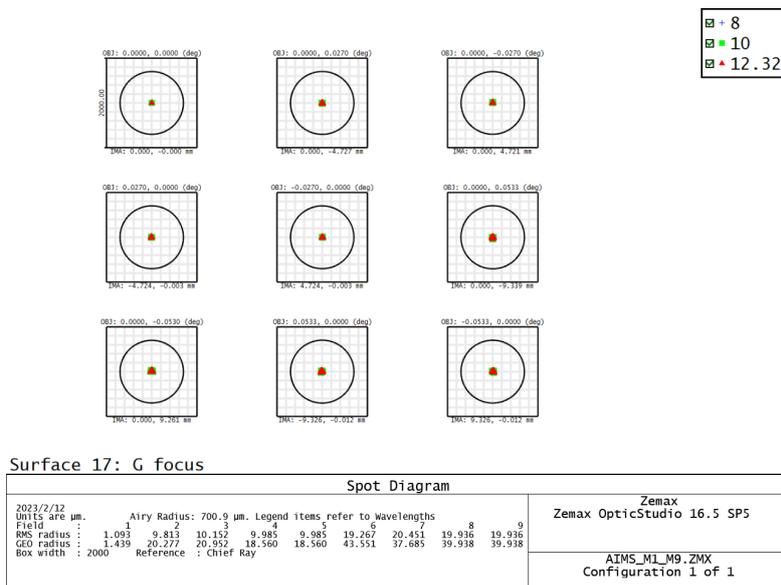


图 2-3 AIMS 望远系统焦点点列图 (8μm~12.32μm)

AIMS 望远系统视场光阑位于主镜焦点，同时也是热光阑。因为太阳的能量极高，为了减小视场以外的太阳光线对观测的影响，需要在主镜焦点设置热光阑将观测视场以外的太阳光线反射出光路。考虑到主镜焦点处能量极高，还需要对热光阑进行制冷。图 2-4 为热光阑示意图。

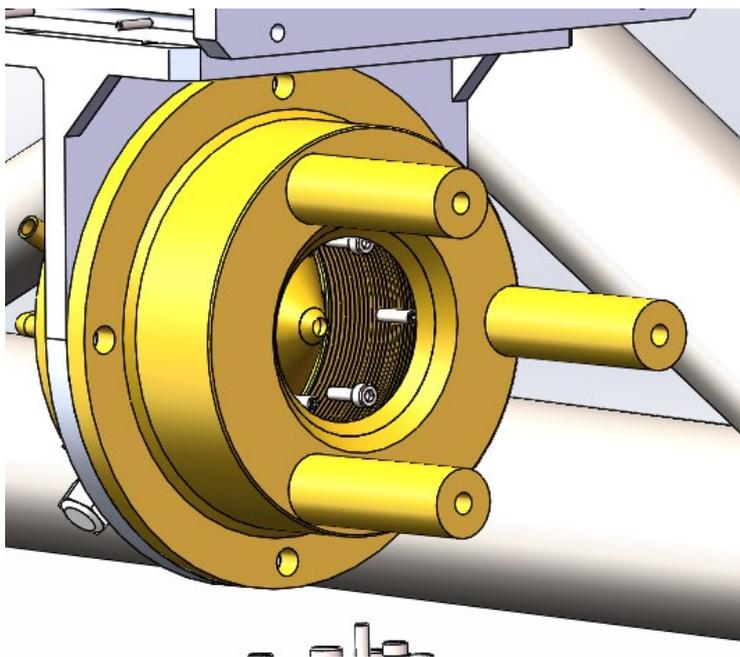


图 2-4 AIMS 望远系统热光阑示意图

2.2 折轴系统

AIMS 太阳望远镜采用焦面探测系统与望远系统分离放置的设计，因此需要折轴系统将望远系统接收的太阳光反射到位于望远系统下方的库德房中。AIMS 折轴系统通过多次反射使其主光线分别与望远镜的高度轴、水平轴同轴。图 2-5 为 AIMS 折轴系统的光学设计示意图。

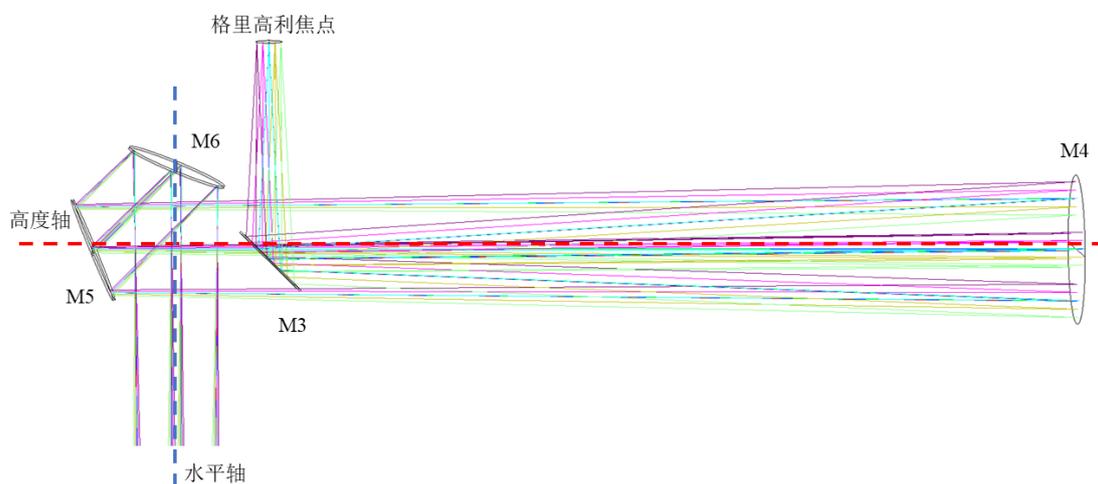


图 2-5 AIMS 折轴系统光学设计示意图

折轴系统的反射镜 M3 将经望远系统成像后的光线反射到离轴椭球反射镜 M4 上，经 M4 反射的太阳光线与望远镜的高度轴同轴，在经过反射镜 M5 与 M6 反射后，出射的太阳光线与望远镜的水平轴同轴。其中，离轴椭球镜 M4 的短轴焦点与格里高利焦点对准，长轴焦点（中间焦点）位于 M6 的正下方，光学元件

的具体参数见表 2-2。图 2-6 为中间焦点的点列图 ($8\mu\text{m}\sim 12.32\mu\text{m}$)。

表 2-2 AIMS 折轴系统光学元件参数

元件名称	曲率/mm	离轴量/mm	口径/mm	非球面系数	材料
M3	平面		60		微晶
M4	1363.296	111.89	124	-0.4936	微晶
M5	平面		98		微晶
M6	平面		98		微晶

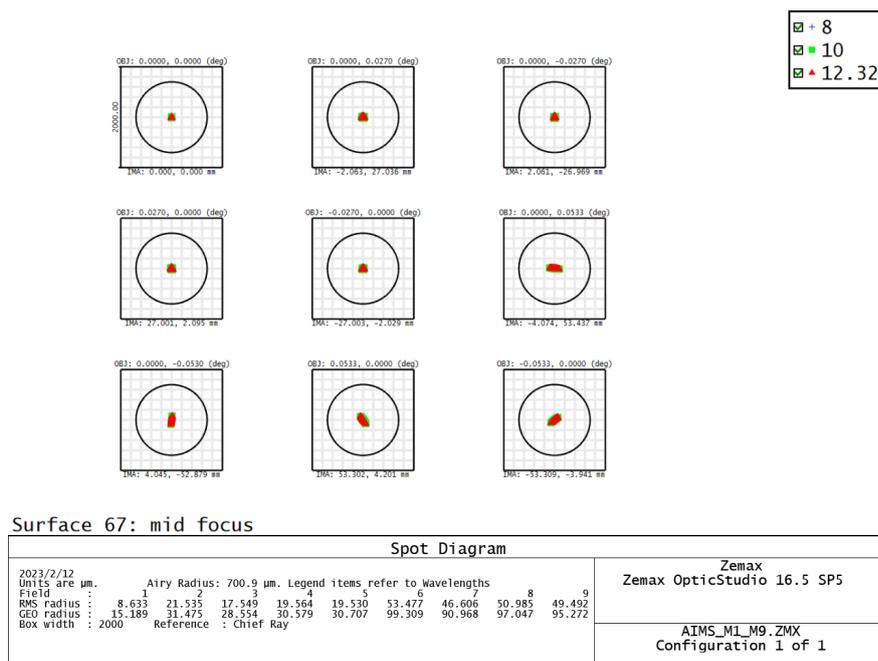


图 2-6 AIMS 折轴系统中间焦点点列图 ($8\mu\text{m}\sim 12.32\mu\text{m}$)

M3 与 M6 安装在二维电动调整架上，以便可以实时调整折轴系统的光轴方向；M5 安装在二维扫描调整架上，从而实现视场扫描的功能。

2.3 消旋系统

AIMS 太阳望远镜为地平式望远镜，在观测过程中因为方位轴与地球自转不重合，会引入像方视场的旋转。因此需要消旋系统进行视场消旋。由于焦面仪器傅里叶光谱仪工作时不能震动，机械消旋不适于本望远镜。传统的 K 镜消旋方案附加偏振较大，会影响太阳磁场的探测精度。为了减小消旋系统带来的附加偏振，AIMS 消旋系统采用无偏消旋的设计方案——五镜消旋。当进入消旋系统的入射光线在两反射镜的入射角度相等且两反射镜的法线相互垂直时，该系统无附加偏振。图 2-7 为 AIMS 消旋系统光学设计示意图。

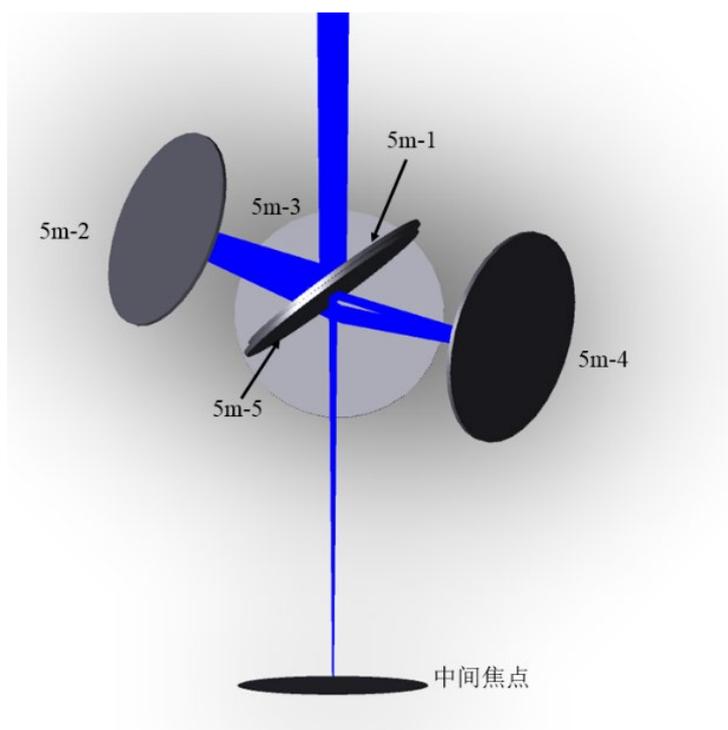


图 2-7 AIMS 消旋系统光学设计示意

五镜消旋系统的第 1 块平面反射镜 5m-1 将经过折轴系统后垂直入射的太阳光线反射到水平面上，太阳光线再经过 5m-2、5m-3 和 5m-4 平面反射镜多次反射到 5m-5 上，经 5m-5 反射后的太阳光线垂直入射到后续系统。根据偏振理论可优化获得，当 5m-1 和 5m-5 的入射角为 36.2° 时，整个五镜消旋镜组没有附加偏振(Hou et al, 2018)。光学元件的具体参数见表 2-3。

表 2-3 AIMS 消旋系统光学元件参数

元件名称	曲率	口径/mm	X 倾斜/ $^\circ$	Y 倾斜/ $^\circ$
5m-1	平面	140	36.2	
5m-2	平面	130	30	
5m-3	平面	130	29.972	1.118
5m-4	平面	130	29.991	1.118
5m-5	平面	140	36.2	

2.4 准直系统

AIMS 准直系统由离轴抛物面反射镜(M7)、平面反射镜(M8)与摆镜(M9)组成，将经过前序系统的太阳光线进行准直，准直后的太阳光线进入焦面设备系统。图 2-8 为 AIMS 准直系统的光学设计示意图。



图 2-8 AIMS 准直系统光学设计示意图

M7 的焦点与中间焦点对准进行准直，经 M7 出射的平行光经 M8 垂直入射到 M9，最终反射到焦面设备系统进行科学观测，系统出瞳位于 M9，图 2-9 为系统出瞳在 M9 上的投影。光学元件的具体参数见表 2-4。

表 2-4 AIMS 准直系统光学元件参数

元件名称	曲率/mm	离轴量/mm	口径/mm	非球面系数	材料
M7	2813.457	446.88	200	-1	微晶
M8	平面		160		微晶
M9	平面		55		微晶

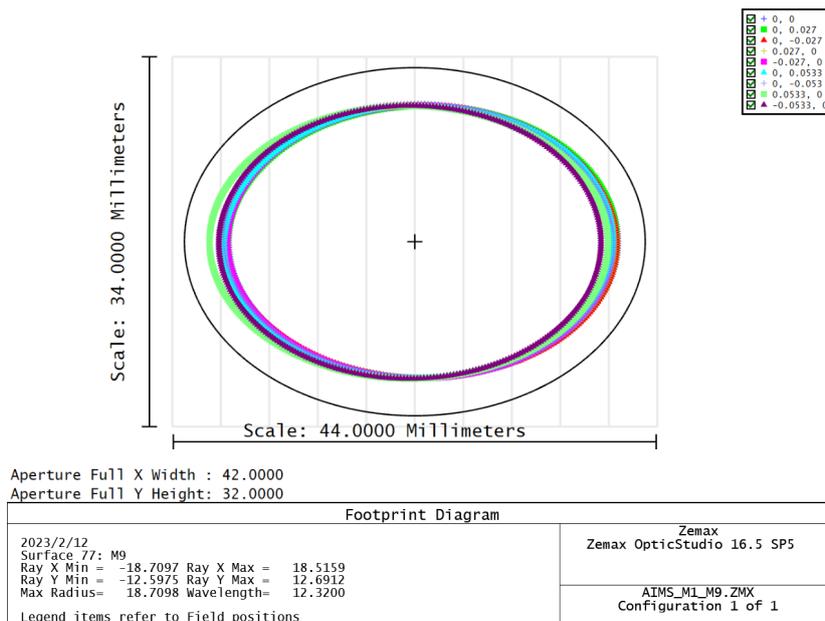


图 2-9 系统出瞳在 M9 上的投影

2.5 焦面设备系统

AIMS 太阳望远镜的焦面设备系统分为 5 个子设备，分别为中红外波段的傅里叶光谱仪前置系统、8-10um 成像系统、Brucker 光谱仪前置系统和可见光波段的远近场监视系统、摆镜系统。图 2-10 为 AIMS 焦面设备系统布局示意图。

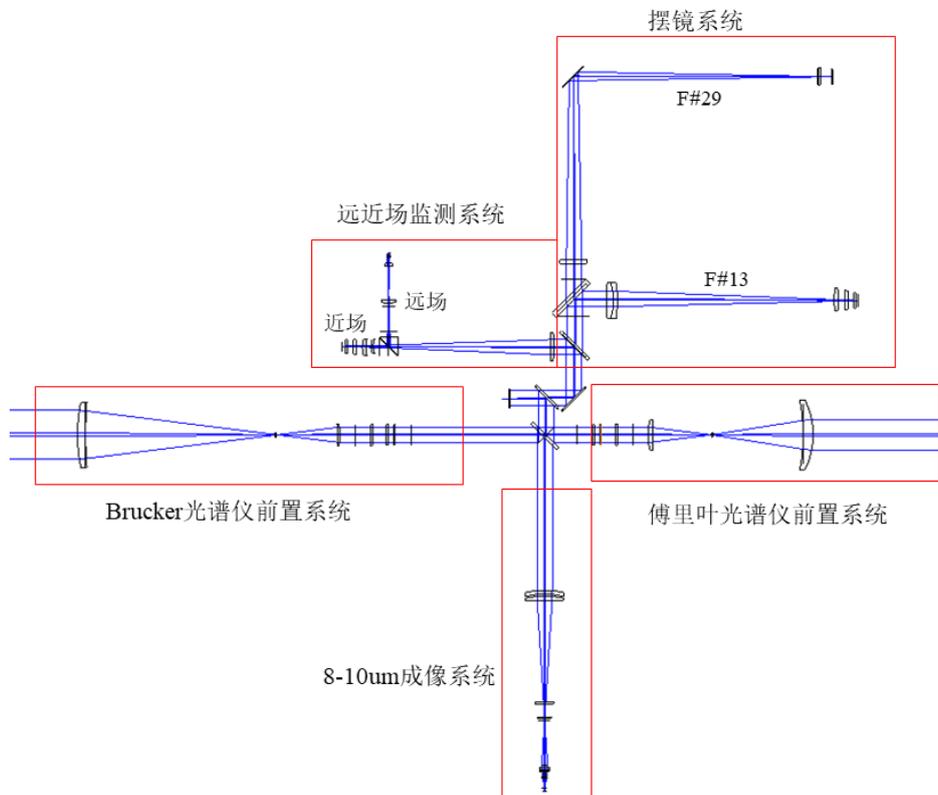


图 2-10 AIMS 焦面设备系统示意图

2.5.1 傅里叶光谱仪前置系统

傅里叶光谱仪是 AIMS 太阳望远镜的核心设备，将在 $12.32\mu\text{m}$ 波段开展太阳磁场的探测。傅里叶光谱仪前置系统视场为 $1.6'$ ，由分光反射镜 (M10)、分束镜 (M11)、偏振分析器、成像透镜 (L1)、场镜 (L2) 和准直透镜 (L3) 组成，为傅里叶光谱仪提供入瞳口径 50mm 的平行光。图 2-11 为傅里叶光谱仪前置系统的光学设计示意图。

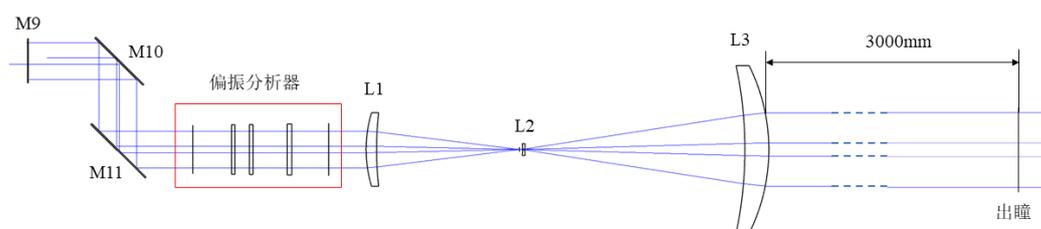


图 2-11 傅里叶光谱仪前置系统光学设计示意图

经过准直系统后的 $2\mu\text{m}$ 以上的太阳光线经 M10 反射到 M11，M11 将 $9.8\mu\text{m}$ 以上的太阳光线反射进入偏振分析器，然后在经过 L1、L2 和 L3，最后在 L2 最后一面后 3000mm 处形成一个口径 50mm 的出瞳，图 2-12 为傅里叶光谱仪前置系统的出瞳示意图。光学元件的具体参数见表 2-5。

表 2-5 傅里叶光谱仪前置准直系统元件参数

元件名称	曲率/mm	厚度/mm	口径/mm	非球面系数	材料
M10	平面		44*66		JGS1
M11	平面		44*66		ZnSe
偏振分析器	平面				
L1	87.226 222.484	7	54	-0.2761	ZnSe
L2	-21.5 31.686	1.5	14		ZnSe
L3	-284.489 -129.224	16	118		ZnSe

注：L3 为偶次非球面，4 阶非球面系数为 $-1.755\text{E}-8$ ，8 阶非球面系数为 $-4.058\text{E}-14$

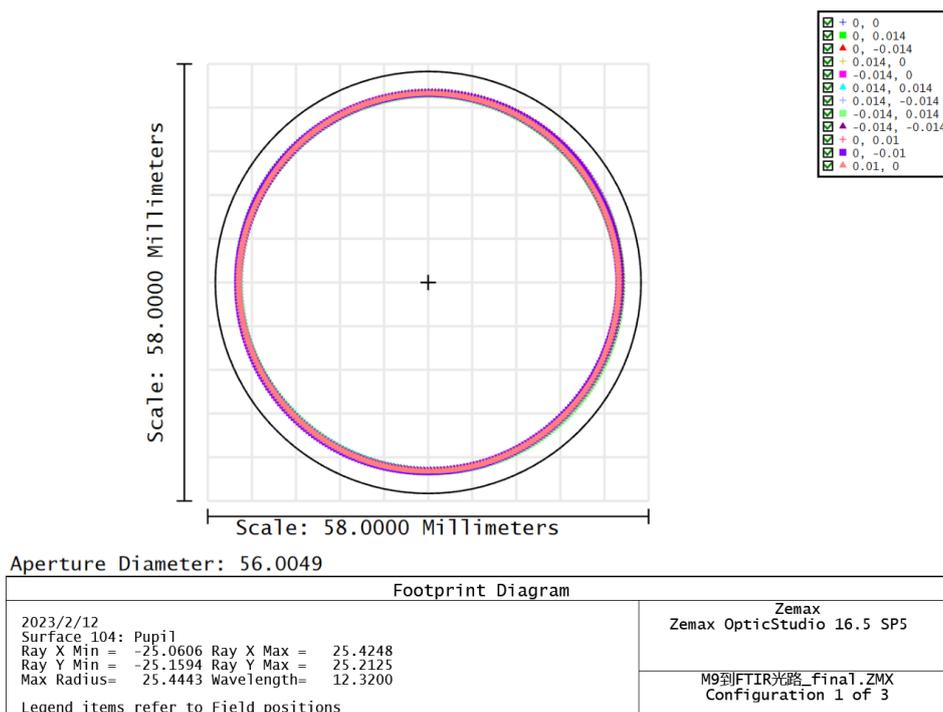


图 2-12 傅里叶光谱仪前置系统出瞳

2.5.2 8 μm ~10 μm 成像系统

8 μm ~10 μm 成像光路的目的是为了引导光谱仪对观测目标进行选择、定位，以及方便观测数据与其它设备资料的联合分析研究。整个系统由中继镜组（L4、L5）、场镜（L6）和成像镜组（L7、L8）组成，系视场为 6.4'，工作温度为 100k。图 2-13 为 8 μm ~10 μm 成像系统光学设计示意图。

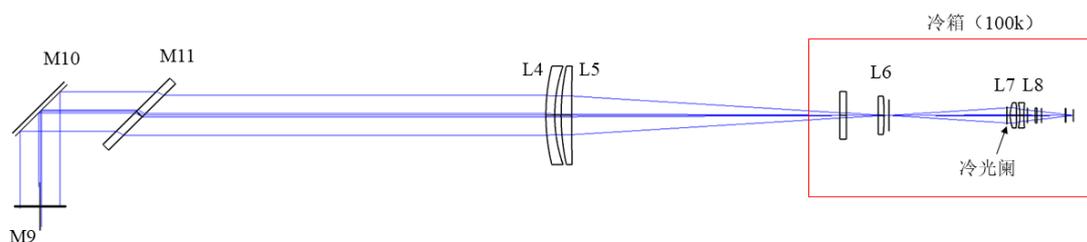


图 2-13 8 μm ~10 μm 成像系统光学设计示意图

2 μm ~10 μm 波段的太阳经过 M10 反射后透过分光镜 M11 进入 8 μm ~10 μm 成像光路。首先由中继镜进行第一次成像，在中继镜组焦点附近放置场镜形成出瞳像，在出瞳位置放置冷光阑用于消除杂光，再经过成镜组最终成像在探测靶面上，干涉滤光片放置在探测器前用于限制透过波段。光学元件的具体参数见表 2-6。图 2-14 为系统焦面点列图。

表 2-6 8 μm ~10 μm 成像系统元件参数

元件名称	曲率/mm	厚度/mm	口径/mm	材料
L4	132.397 95.718	5	62	ZNS_IR
L5	14.277 1265.585	6.5	62	ZNSE
L6	平面 -159.744	3.5	24	ZNSE
L7	21.131 -120.134	4	16	ZNSE
L8	-36.705 66.045	2.5	16	ZNS

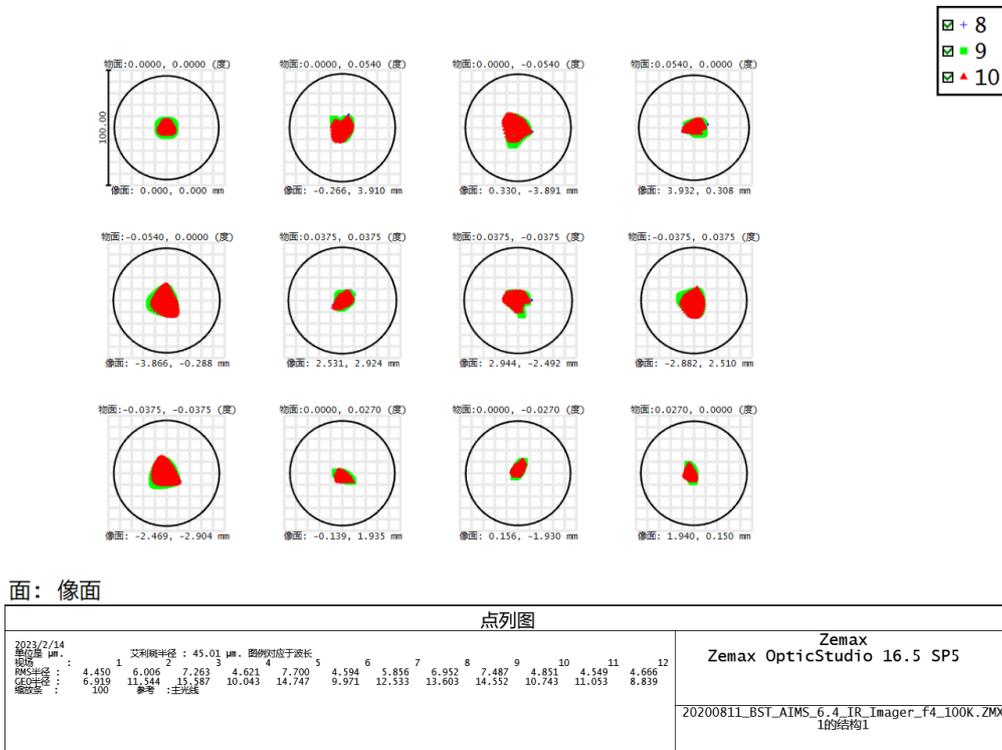


图 2-14 8 μm ~10 μm 成像系统焦面点列图

2.5.3 Brucker 光谱仪前置系统

考虑到面源红外傅里叶光谱仪的研制难度，提前购置了 Brucker 公司生产的 IFS125 型点源红外光谱仪，该设备为市面上的成熟产品，可以用它提前检测前置望远镜光路以及进行部分红外光谱试观测工作。Brucker 光谱仪前置准直系统由偏振分析器、成像镜（L9）和准直镜（L10）组成，图 2-15 为 Brucker 光谱仪前置准直系统光学设计示意图。

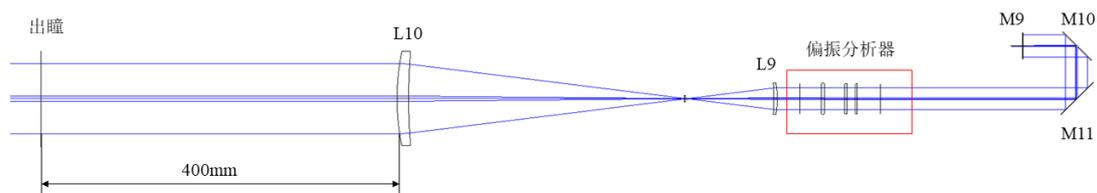


图 2-15 Brucker 光谱仪前置准直系统光学设计示意图

Brucker 光谱仪前置准直系统与傅里叶光谱仪前置准直系统对称放置，分束镜（M11）安装在一个电动转台上，当时用 Brucker 光谱仪进行观测时，M11 将 $9.8\mu\text{m}$ 以上的波段反射到 Brucker 光谱仪前置准直系统的偏振分析器中，光线经过偏振分析器后进入 L9 进行成像，再经过 L10 形成准直光，最后在离 L10 后表面 400mm 处形成一个口径为 80mm 的出瞳。光学元件的具体参数见表 2-7。

表 2-7 Brucker 光谱仪前置准直系统元件参数

元件名称	曲率/mm	厚度/mm	口径/mm	材料
偏振分析器	平面			
L9	86.973 225.379	4	39	ZNSE
L10	-641.287 -266.315	13	110	ZNSE

注：L10 为偶次非球面，4 阶非球面系数为 $-1.855\text{E}-9$ ，8 阶非球面系数 $1.369\text{E}-15$

2.5.4 跟踪监视系统

AIMS 望远系统因为焦距较长，造成望远系统的桁架较长。在望远镜跟踪观测过程中，不可避免会发生桁架的弯沉，导致光线的偏移。因此，需要跟踪监视系统对桁架的弯沉进行实时的监测，通过调整 M3 与 M6 来校正桁架弯沉导致的光线偏移。跟踪监视系统分为两个光路，分别是近场光路与远场光路，视场均为 $3.2'$ ，图 2-16 为跟踪监视系统的光学设计示意图。

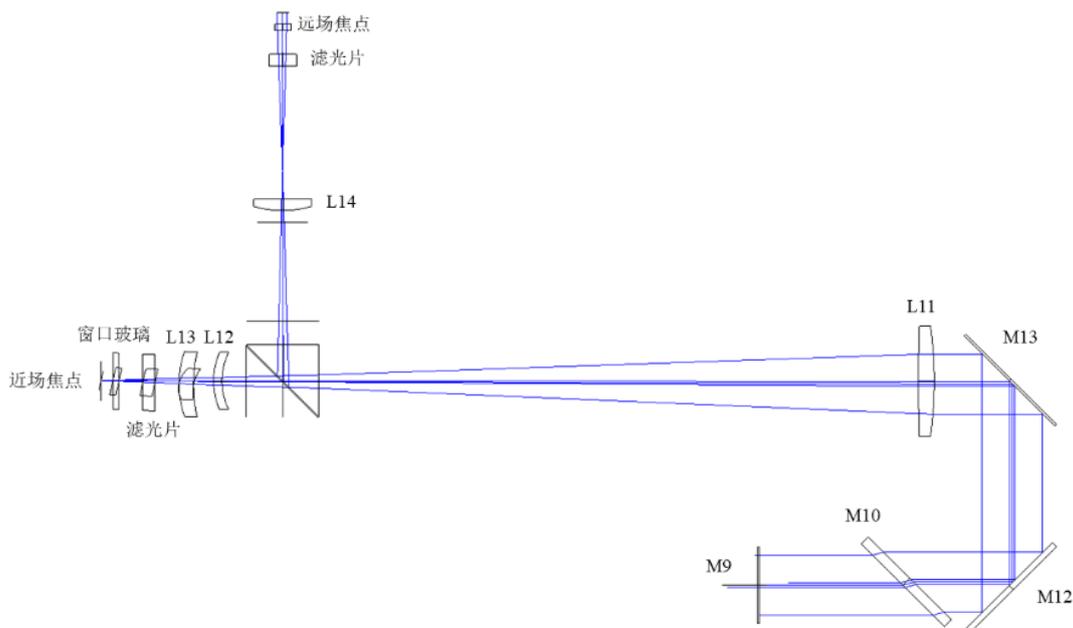


图 2-16 跟踪监视系统光学设计示意图

准直之后的可见光波段的太阳光线透过 M10 经反射镜 (M12) 反射到可见光分光镜 (M13)，550nm 波段的太阳光线进入跟踪监视系统。成像镜 (L11) 后放置分光棱镜，将 50% 的光线反射到远场光路，在 L11 焦点附近放置场镜 (L14)，在后光路中形成光瞳，用于监视光瞳的晃动量，图 2-17 为远场光瞳的设计示意图；50% 的光线透过分光棱镜进入近场光路，经过二次成像镜组 (L12、L13) 在近场焦面成像，用于监视像点的偏移，图 2-18 为近场光路系统焦点的点列图。光学元件的具体参数见表 2-8。

表 2-8 跟踪监视系统元件参数

元件名称	曲率/mm	厚度/mm	口径/mm	非球面系数	材料
M12	平面		56*41		K9
M13	平面		65		SILICA
L11	164.215 -1584.67	6.5	50	-0.596	SILICA
分光棱镜	平面	30	30*30		SILICA
L12	-27.133 -29.866	3.5	28		SILICA
L13	-74.078 -50.967	6	34		SILICA
L14	42.074 340.335	5	27	-0.783	N-BK7

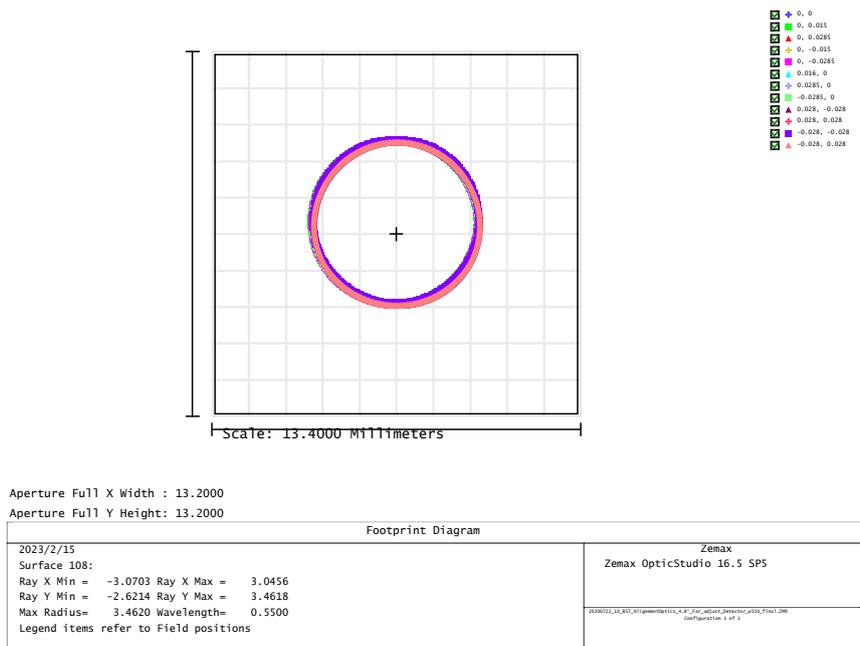


图 2-17 远场光路光瞳图

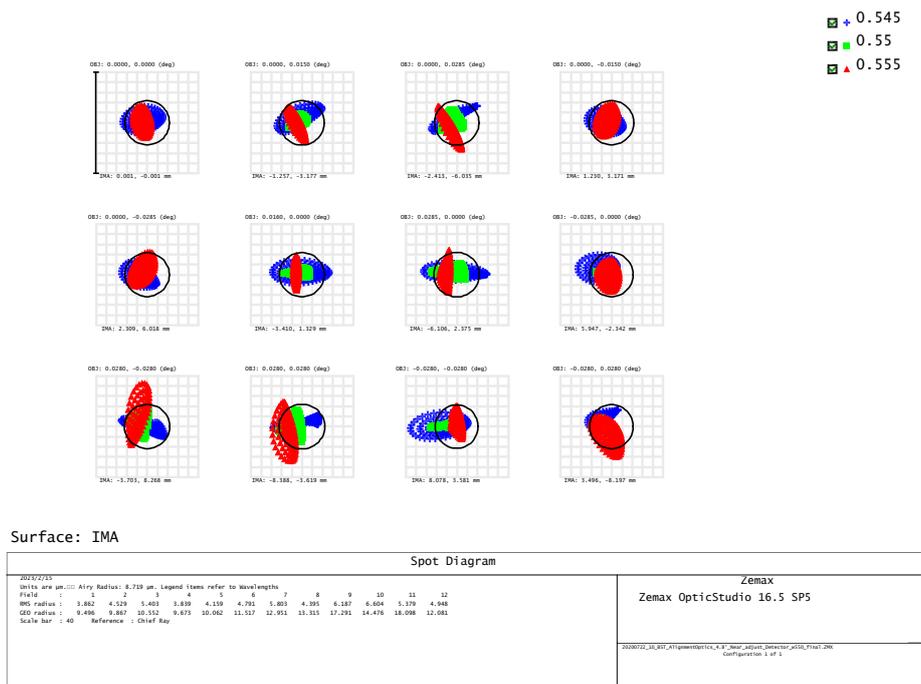


图 2-18 近场光路焦面点列图

2.5.5 摆镜监视系统

为了解决观测过程中太阳入射角的偏差导致的图像偏差，需要使用摆镜进行实时的补偿，起到稳像的效果。根据摆镜的工作原理，需要一路专门的监测光路作为反馈信号。为了兼容不同尺寸的探测器，AIMS 摆镜监视光路分为两路，分别为 F#29 光路与 F#13 光路，视场分别为对应视场 2.13' * 1.7' 与 4.27' * 3.6'，图 2-19 为摆镜监视系统的 optical design 示意图。

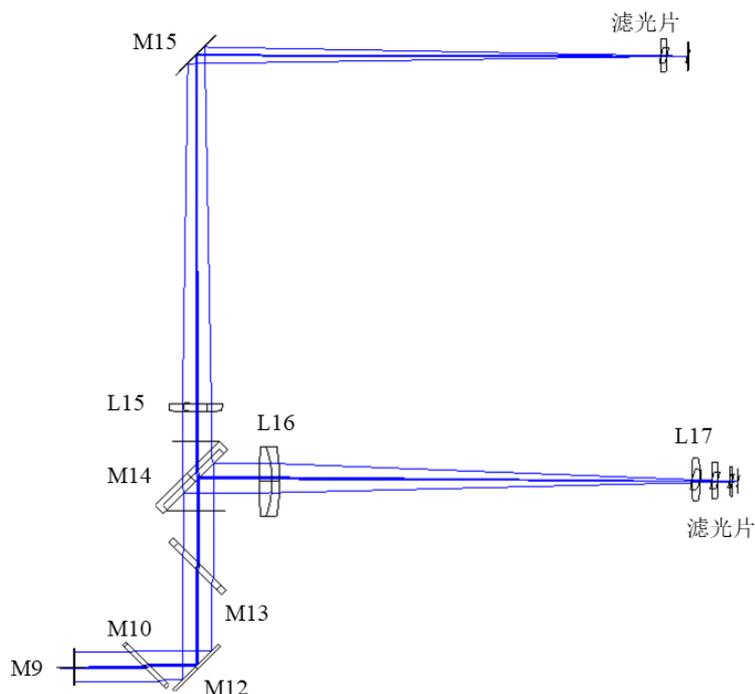
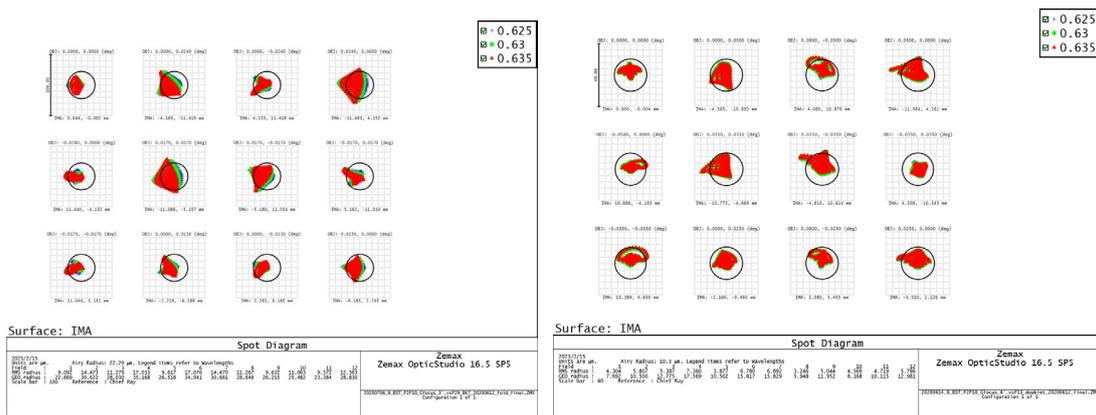


图 2-19 摆镜监视系统光学设计示意图

M12 反射的可见光经 M13 分光后， $630\pm 5\text{nm}$ 波段的光线进入摆镜监视系统，再由分束镜 M14 将各 50% 的光线进入 F#29 和 F#13 光路，分别由 F#29 成像镜组 (L15) 和 F#13 成像镜组 (L16、L17) 进行成像，图 2-20 为摆镜监视光路系统焦面点列图。光学元件的具体参数见表 2-9。

表 2-9 摆镜监视系统元件参数

元件名称	曲率/mm	厚度/mm	口径/mm	非球面系数	材料
M14	平面		70		SILICA
L15	273.252 997.453	7	54	-0.773	N-BK7
M15	平面				K9
L16	1120.732 -92.66 -185.935	10.5 6.5	64		N-BK7 SF2
L17	461.364 -126.654	7	45		SILICA



(a) (b)
图 2-20 摆镜监视光路焦面点列图 (a)F#29 光路 (b)F#13 光路

2.6 AIMS 太阳望远镜装调方案

AIMS 的光学系统及其复杂，整体装调将采用分系统精密装调，再逐一对接的方案。本节将介绍各系统的初步装调方案以及所面临的装调难点。

2.6.1 望远系统装调方案

AIMS 的望远系统装调分为两个阶段：

第一阶段为静态装调，该阶段将采用干涉装调方案。M1 与 M2 安装在桁架后，在格里高里系统焦点放置干涉仪，在系统前方放置标准平面反射镜，组成干涉装调光路。根据获得的格氏焦点的波前数据调整 M2 的安装底座(六杆机构)，装调完成后确定六杆的基准位置。

第二阶段为动态装调，该阶段将采用 Shack-Hartmann 波前传感器装调方案。望远镜在跟踪观测中，望远系统的桁架较长，会出现桁架弯沉变形的情况，需要实时校正 M2 的位置姿态。在夜间开展观星测试，使用 Shack-Hartmann 波前传感器测量实时波前。根据实时波前数据校正六杆的位置，以抵消望远镜运动跟踪过程中的桁架形变。

2.6.2 其他系统装调方案

折轴系统的装调分为 2 个步骤：

步骤 1 为高度轴与水平轴穿心，在望远镜高度轴系与水平轴系上安装分划板，分别使用自准直经纬仪进行标定，标定完成后，自准直经纬仪发出的激光分别代表望远镜的高度轴与水平轴。然后安装 M5 与 M6，使高度轴与水平轴上的激光分别在 M5 与 M6 的中心。按照理论设计，M5 与 M6 将从高度轴水平入射的光线竖直反射到水平轴，调整 M5 与 M6 的角度，使高度轴与水平轴上的自准直望远镜将对方发射的激光与自身的十字分划板重合，即完成高度轴与水平轴的穿心装调。

步骤 2 为与望远系统焦点对接。望远系统完成安装后,在系统焦点处放置十字分划板工装。安装 M4 与 M3,将在水平轴上的自准直经纬仪发射的激光与望远系统焦点处的十字分划板重合。最后在进行中间焦点像质的检测,根据实测像质,调整 M4 的自旋方向与光轴方向的前后距离,实现折轴系统短轴焦点与望远系统焦点的精准对接。

消旋镜装调采用自准直成像装调方案(Lei et al, 2023), 5m-1 与 5m-5 为一块平面反射镜的两面,先使用经纬仪标定 5m-1 的空间位置,然后再以 5m-1 为基准依次完成 5m-2、5m-3 与 5m-4 的空间位置标定。然后在消旋系统的正下方与正上方放置自准直经纬仪,转动消旋系统后根据上方下方两台经纬仪的自准十字像进行 5m-2、5m-3 与 5m-4 的精调,直到自准十字像重合。

准直系统装调也采用自准直成像装调方案。将 M7 与 M8 安装在事先使用机械定位的方式确定位置的工装中,再使用自准直经纬仪标定 M7 与 M8 的倾斜姿态。分别在 M7 与 M8 前方放置标准十字丝,使用自准直经纬仪标定十字丝姿态,使其与 M7、M8 对齐。再使用自准直经纬仪发出平行激光先后经过 M8、M7 成像,焦点应在 M7 前方十字丝的中心。

焦面各个分系统可作为独立的系统进行单独装调,使用自准直干涉方案进行装调,本文不做详细的介绍。

2.6.3 AIMS 太阳望远镜装调的主要难点

AIMS 装调过程中主要面临的难点如下:

① AIMS 望远系统 M1 与 M2 安装在桁架上后,因为其特殊的工况,静态装调时需要将标准平面倾斜 14.036° 放置,如使用口径 1m 以上的标准平面反射镜进行全口径干涉装调,为了保证标准平面反射镜的面型精度,其支撑结构将十分巨大与复杂,并且自身面型检测十分困难,并不适合在野外台站进行装调;

② AIMS 望远系统在动态装调过程中,因为大气的影晌,很难准确获得光学元件位置误差造成的波像差;

③ 折轴系统中的 M4 短轴需与望远系统的格里高利焦点精准对接,长轴需与望远镜的机械高度轴同心;准直系统中 M7 的焦点需与中间焦点精准对接;M4、M7 均为离轴反射镜没有实际光轴,给对接造成困难;

其中,望远系统作为 AIMS 的前端接收系统,其装调精度直接影响后续系统的成像质量。根据灵敏度分析,望远系统中 M2 的位置最为敏感。因此望远系统的装调是 AIMS 光学系统中最关键的一环。

2.7 小结

本章首先介绍了 AIMS 太阳望远镜的整体光路,然后分别介绍了五个子系统的的功能与光学设计结果;初步介绍了各个子系统的装调方案以及装调过程中

所面临的难点；明确了 AIMS 太阳望远镜装调过程中最关键的是望远系统装调。

第3章 离轴反射光学系统像差特性研究

传统的几何像差理论适用于轴对称光学系统的像差特性分析。对于轴对称光学元件失调成为的非轴对称光学系统像差特性分析，传统几何光学将不适用。科研人员在研究非轴对称光学系统像差特性时经过不断的提炼，形成一套适用于非轴对称光学系统像差分析的像差理论——矢量波像差理论(Hopkins, 1950; Buchroeder, 1976; Thompson, 1980; 2005; 2009; 2010; 2011)。矢量波像差遵循两个基本性质(Buchroeder, 1976): ①在光学系统像面处的像差为各个光学表面像差的总和; ②各个光学表面像差的中心位于该表面的曲率中心与光瞳中心的连线上。

本章首先以同轴光学系统的矢量波像差为基础，推导了离轴光学系统的矢量波像差表达式; 以 AIMS 望远系统为分析模型，结合离轴光学系统矢量波像差表达式，分析了系统失调状态下的像差特性; 最后分析了光学元件的面型误差对 AIMS 望远系统装调的影响。

3.1 同轴光学系统波像差

3.1.1 同轴光学系统理论波像差展开

当光线经过理想光学系统时，光程一致，即为完善成像。在实际光学系统中，由于设计残差、加工误差与装调误差，完善成像的光学系统并不存在。波像差的定义如图 3-1 所示，理想球面波经过光学系统后，在出瞳处的实际波面与理论波面的差值即为波像差(张以谟, 2008)。波像差是衡量光学系统成像质量的重要指标之一。

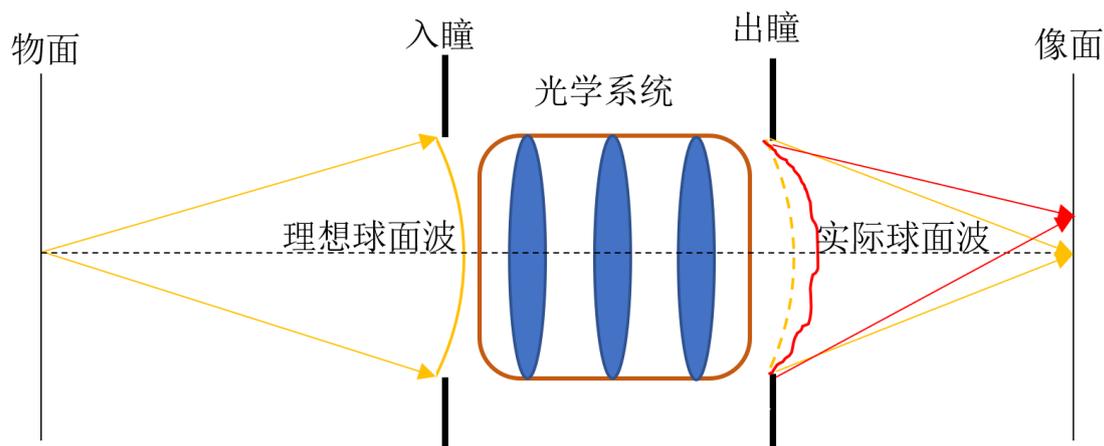


图 3-1 光学系统波像差

光学系统中，通过两个面可以确定任意一条光线的传播路径，即光线通过两个面的交点的连线。在波像差理论中，通常选取光线在光学系统的出瞳面与像面处交点所构成的两个矢量，即出瞳矢量 $\vec{\rho}$ 与视场矢量 \vec{H} 来描述波像差。图 3-2 为

光学系统出瞳矢量与视场矢量的定义示意图。

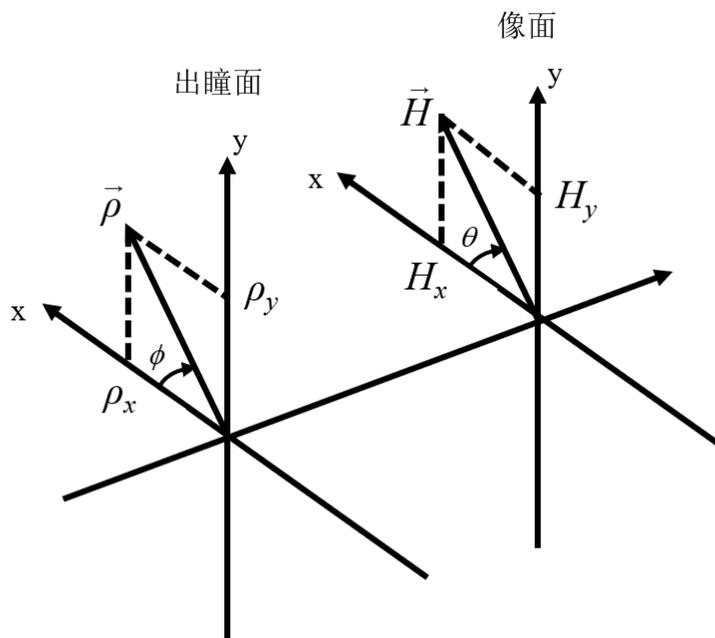


图 3-2 出瞳矢量与视场矢量

$\vec{\rho}$ 与 \vec{H} 分别是归一化的出瞳矢量与视场矢量，长度分别为 ρ 与 H ，方位角分别为 ϕ 与 θ 。对于一个未失调的旋转对称光学系统， $\vec{\rho}$ 与 \vec{H} 的长度、方位角均保持不变。该状态下的同轴光学系统的波像差的标量形式可以由下式表示：

$$W = \sum_j \sum_p \sum_n \sum_m W_{klm,j} H^k \rho^l \cos^m(\theta - \phi) \quad (3-1)$$

$$k = 2p + m, l = 2n + m$$

其中， j 为光学元件表面序号， k 、 l 和 m 分别为 H 、 ρ 和 $\cos(\theta - \phi)$ 的幂指数， W_{klm} 为像差对应的系数。旋转对称光学系统的系统波像差是各光学元件表面波像差的总和，系统波像差可以由公式 3-2 表示：

$$W = \sum_j W_j \quad (3-2)$$

在同轴光学系统中， $k+l=2$ 时，对应的光学系统一阶波像差：平移 W_{200} ，离焦 W_{020} ，倾斜 W_{111} 。光学系统的一阶波像差可以通过焦面的平移、倾斜进行补偿，因此一阶波像差并不作为光学系统的评价指标。 $k+l=4$ 时，对应光学系统的三阶像差，当视场矢量的方位角 $\theta=0$ 时，系统的三阶波像差可以展开为：

$$\begin{aligned}
 W &= \sum_j W_{040,j} \rho^4 + \sum_j W_{131,j} H \rho^3 \cos \phi \\
 &+ \sum_j W_{220,j} H^2 \rho^2 + \sum_j W_{222,j} H^2 \rho^2 \cos^2 \phi \\
 &+ \sum_j W_{311,j} H^3 \rho \cos \phi
 \end{aligned} \quad (3-3)$$

其中, W_{040} , W_{131} , W_{220} , W_{222} , W_{311} 分别为球差、彗差、场曲、像散与畸变。

3.1.2 非同轴光学系统理论波像差展开 (装调误差)

同轴光学系统存在装调误差 (光学元件的偏心与倾斜) 时, 光学系统不再是轴对称系统。非轴对称光学系统的波像差, 通常使用矢量形式进行描述:

$$\begin{aligned}
 W &= W [(\vec{H} \cdot \vec{H}), (\vec{H} \cdot \vec{\rho}), (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})] \\
 &= \sum_j \sum_p \sum_n \sum_m W_{klm,j} (\vec{H} \cdot \vec{H})^p (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^n (\vec{H} \cdot \vec{\rho})^m
 \end{aligned} \quad (3-4)$$

当光学元件表面 j 存在位置误差时, 在像面处的偏移矢量为 $\vec{\sigma}_j$, 与该面的理论视场矢量 \vec{H} 重新构成了新的视场矢量 $\vec{H}_{\sigma j}$:

$$\vec{H}_{\sigma j} = \vec{H} - \vec{\sigma}_j \quad (3-5)$$

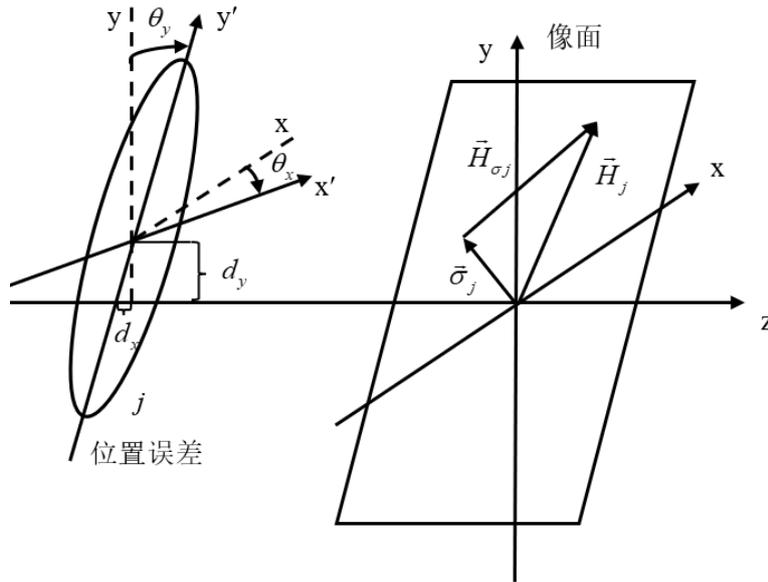


图 3-3 光学元件偏心与倾斜

将公式 3-5 式带入公式 3-4, 非旋转对称的光学系统的波像差矢量展开式为:

$$\begin{aligned}
 W &= W [(\vec{H}_{\sigma j} \cdot \vec{H}_{\sigma j}), (\vec{H}_{\sigma j} \cdot \vec{\rho}), (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})] \\
 &= \sum_j \sum_p \sum_n \sum_m W_{klm,j} [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot (\vec{H} - \vec{\sigma}_j)]^p (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^n [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho}]^m
 \end{aligned} \quad (3-6)$$

3.1.2.1 球差

失调状态下同轴光学系统球差矢量展开式:

$$W_{SA} = \sum_j W_{040,j} (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2 \quad (3-7)$$

根据公式 3-7, 非同轴光学系统的球差仅与瞳面矢量 $\vec{\rho}$ 有关。因此光学元件的偏心误差与倾斜误差不会改变同轴光学系统的球差。影响同轴光学系统球差的主要误差是光学元件之间的空气间隔, 即光学元件沿着光轴方向移动。

3.1.2.2 彗差

失调状态下同轴光学系统彗差矢量展开式:

$$\begin{aligned} W_{COMA} &= \sum_j W_{131,j} [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho}] (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \\ &= \left\{ \left[\left(\sum_j W_{131,j} \vec{H} \right) - \left(\sum_j W_{131,j} \vec{\sigma}_j \right) \right] \cdot \vec{\rho} \right\} (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \end{aligned} \quad (3-8)$$

根据公式 3-8, 非同轴光学系统的彗差分成两部分, 第一部分为系统的理论设计残差:

$$W_{linear} = (W_{131} \vec{H} \cdot \vec{\rho}) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \quad (3-9)$$

其中 $W_{131} = \sum_j W_{131,j}$ 。第二部分为光学元件失调的装调误差:

$$W_{constant} = (\vec{A}_{131} \cdot \vec{\rho}) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \quad (3-10)$$

其中 $\vec{A}_{131} = \sum_j W_{131,j} \vec{\sigma}_j$ 。相较于同轴光学系统的理论系统彗差, 光学元件失调带来了一个仅与出瞳矢量相关的常量 \vec{A}_{131} 。将公式 3-9 与公式 3-10 带入公式 3-8 进行进一步变形:

$$W_{COMA} = W_{131} [(\vec{H} - \vec{a}_{131}) \cdot \vec{\rho}] (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \quad (3-11)$$

其中 $\vec{a}_{131} = \frac{\vec{A}_{131}}{W_{131}}$ 。根据公式 3-11, 光学元件的失调使光学系统的彗差节点发生了偏移, 将不在中心视场, 新的彗差节点位置为 \vec{a}_{131} 。因此, 当光学元件失调时, 全视场的彗差失调量是一个常量, 可以使用单个视场进行失调彗差的调整, 通常选取中心视场。

3.1.2.3 像散

根据中间像面的定义, 中间像面场曲与弧矢像面场曲、像散的关系式为:

$$W_{220M} = W_{220} + \frac{1}{2} W_{222} \quad (3-12)$$

将公式 3-12 代入到公式 3-6 中像散与场曲表达式，可得：

$$\begin{aligned} & \sum_j W_{222,j} [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho}]^2 + \sum_j W_{220,j} [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot (\vec{H} - \vec{\sigma}_j)] (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \\ &= \frac{1}{2} \sum_j W_{222,j} [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho}]^2 + \sum_j W_{220M,j} [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot (\vec{H} - \vec{\sigma}_j)] (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \end{aligned} \quad (3-13)$$

失调状态下同轴光学系统像散矢量展开式为：

$$\begin{aligned} W_{ATS} &= \frac{1}{2} \sum_j W_{222,j} [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho}]^2 \\ &= \frac{1}{2} \left[\sum_j W_{222,j} \vec{H}^2 - 2\vec{H} \left(\sum_j W_{222,j} \vec{\sigma}_j \right) + \sum_j W_{222,j} \vec{\sigma}_j^2 \right] \cdot \vec{\rho}^2 \end{aligned} \quad (3-14)$$

为了进一步简化公式，定义 3 个新的变量，分别为：

$$\begin{aligned} \sum_j W_{222,j} &= W_{222} \\ \vec{A}_{222} &= \sum_j W_{222,j} \vec{\sigma}_j \\ \vec{B}_{222}^2 &= \sum_j W_{222,j} \vec{\sigma}_j^2 \end{aligned} \quad (3-15)$$

将公式 3-15 代入公式 3-14 可得：

$$\begin{aligned} W_{ATS} &= \frac{1}{2} \left[W_{222} \vec{H}^2 - 2\vec{H} \vec{A}_{222} + \vec{B}_{222}^2 \right] \cdot \vec{\rho}^2 \\ &= W_{quadratic} + W_{linear} + W_{contant} \end{aligned} \quad (3-16)$$

根据公式 3-16，当光学元件失调时，光学系统的像散分为 3 部分：①与视场矢量成二次正相关的设计残差 $W_{quadratic}$ ；②与偏移矢量、视场矢量成一次正相关的失调差 W_{linear} ；③与偏移矢量成二次正相关的失调差 $W_{contant}$ 。与三阶彗差一样，三阶像散也存在像散节点。在理想同轴光学系统中像散节点是中心视场，全视场的像散围绕中心视场成轴对称，当光学元件失调时，系统像散会出现双节点。

定义 2 个新的变量：

$$\begin{aligned} \vec{a}_{222} &= \frac{\vec{A}_{222}}{W_{222}} \\ \vec{b}_{222}^2 &= \frac{\vec{B}_{222}^2}{W_{222}} - \vec{a}_{222}^2 \end{aligned} \quad (3-17)$$

将公式 3-17 代入公式 3-16 可得：

$$W_{ATS} = \frac{1}{2} W_{222} \left[(\vec{H} - \vec{a}_{222})^2 + \vec{b}_{222}^2 \right] \cdot \vec{\rho}^2 \quad (3-18)$$

当 $(\vec{H} - \vec{a}_{222})^2 + \vec{b}_{222}^2 = 0$ 时，像散的节点位置为 $\vec{a}_{222} \pm i\vec{b}_{222}$

3.2 离轴光学系统波像差

离轴光学系统主要有两种结构形式：视场离轴与孔径离轴。其中，视场离轴光学系统与同轴光学系统一致，仅通过改变视场实现离轴，其光学元件失调后的像差特性与同轴光学系统一致。孔径离轴光学系统是截取了母系统（同轴光学系统）的一部分，其光瞳大小、位置与母系统的光瞳存在压缩、偏移。本论文中的离轴光学系统为孔径离轴，本节将具体介绍孔径离轴光学系统（以下简称离轴光学系统）的像差特性。

3.2.1 光瞳转换

离轴光学系统光瞳与母系统光瞳的关系如图 3-4 所示。母系统与离轴光学系统的光瞳半径分别为 R 与 r ，离轴光学系统的光瞳中心 o 在母系统原始坐标系内的偏移矢量为 \vec{D} 。离轴光学系统的光瞳缩放因子 B 的定义式为：

$$B = \frac{r}{R} \quad (r \leq R) \tag{3-19}$$

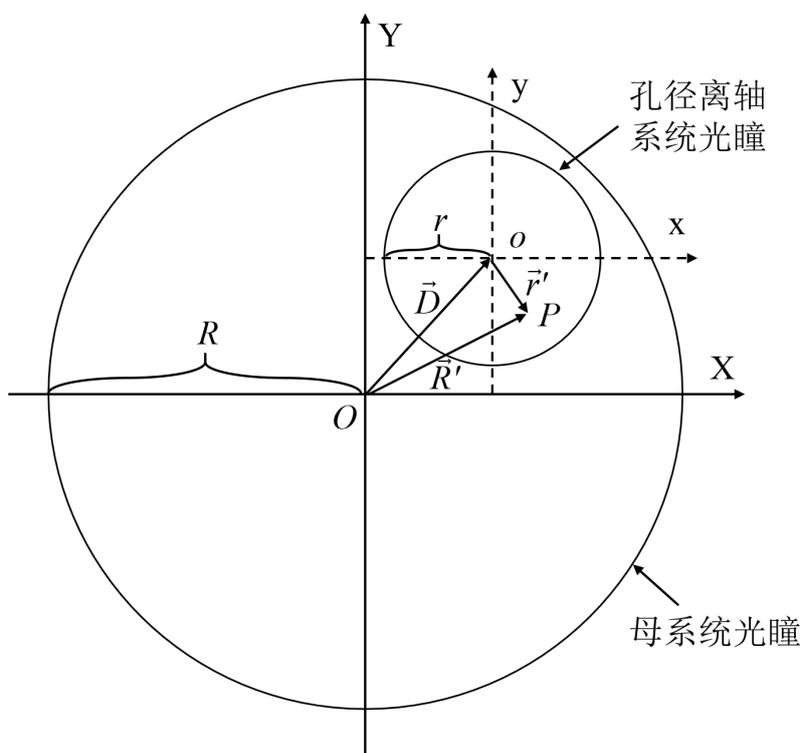


图 3-4 孔径离轴光学系统光瞳与母系统光瞳对应关系

离轴光学系统光瞳中任意一点 P ，在离轴光瞳中的光瞳矢量为 \vec{r}' ，与母系统中 P 点的光瞳矢量 \vec{R}' 的关系为：

$$\vec{R}' = \vec{r}' + \vec{D} \tag{3-20}$$

对公式 3-20 中的矢量进行归一化处理，定义了 3 个归一化矢量：

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{R}'}{R}, \bar{\rho}' = \frac{\bar{r}'}{r}, \bar{d} = \frac{\bar{D}}{R} \quad (3-21)$$

将公式 3-21 带入公式 3-20, 可以改写为:

$$\bar{\rho} = B\bar{\rho}' + \bar{d} \quad (3-22)$$

公式 3-22 为离轴光学系统中光瞳矢量与母系统的对应关系式。

3.2.2 离轴光学系统理论波像差

将上一小节中给出了离轴光学系统中光瞳矢量与母系统的对应关系公式 3-22 代入到公式 3-4 中, 得到光学元件未失调离轴光学系统波像差的矢量展开形式:

$$\begin{aligned} W &= W \left[(\bar{H} \cdot \bar{H}), (\bar{H} \cdot B\bar{\rho}' + \bar{d}), (B\bar{\rho}' + \bar{d}) \cdot B\bar{\rho}' + \bar{d} \right] \\ &= \sum_j \sum_p \sum_n \sum_m W_{klm,j} (\bar{H} \cdot \bar{H})^p \left[(B\bar{\rho}' + \bar{d}) \cdot (B\bar{\rho}' + \bar{d}) \right]^n \left[\bar{H} \cdot (B\bar{\rho}' + \bar{d}) \right]^m \end{aligned} \quad (3-23)$$

与同轴光学系统一样, 公式 3-23 展开可以得到各阶的像差特性, 为了方便公式的书写, 以下公式中 $\bar{\rho}'$ 使用 $\bar{\rho}$ 代替:

$$\begin{aligned} W &= \sum_j W_{040,j} \left[(B\bar{\rho} + \bar{d}) \cdot (B\bar{\rho} + \bar{d}) \right]^2 + \sum_j W_{131,j} \left[\bar{H} \cdot (B\bar{\rho} + \bar{d}) \right] \left[(B\bar{\rho} + \bar{d}) \cdot (B\bar{\rho} + \bar{d}) \right] \\ &+ \frac{1}{2} \sum_j W_{222,j} \left[\bar{H}^2 \cdot (B\bar{\rho} + \bar{d})^2 \right] + \sum_j W_{220M,j} (\bar{H} \cdot \bar{H}) \left[(B\bar{\rho} + \bar{d}) \cdot (B\bar{\rho} + \bar{d}) \right] \\ &+ \sum_j W_{131,j} (\bar{H} \cdot \bar{H}) \left[\bar{H} \cdot (B\bar{\rho} + \bar{d}) \right] \end{aligned} \quad (3-24)$$

在各像差的展开式中, 表达式对应的像差与光瞳矢量 $\bar{\rho}$ 密切相关, 像差与 $\bar{\rho}$ 的对应关系如表 3-1 所示。

表 3-1 光瞳矢量 $\bar{\rho}$ 与三阶像差的对应关系

光瞳矢量 $\bar{\rho}$ 表达式	像差
$\bar{\rho}^0$ (常数项)	平移
$(\bar{\rho} \cdot \bar{\rho})^2$	球差
$[(\) \cdot \bar{\rho}] (\bar{\rho} \cdot \bar{\rho})$	彗差
$(\) \cdot \bar{\rho}^2$	像散
$(\bar{\rho} \cdot \bar{\rho})$	场曲
$(\) \cdot \bar{\rho}$	畸变

在各项的具体展开式中, 遵循的矢量乘法定律为:

$$\begin{aligned}
 2(\vec{A} \cdot \vec{B})(\vec{A} \cdot \vec{C}) &= (\vec{A} \cdot \vec{A})(\vec{B} \cdot \vec{C}) + \vec{A}^2 \cdot (\vec{B}\vec{C}) \\
 \vec{A} \cdot (\vec{B}\vec{C}) &= \vec{A}\vec{B}^* \cdot (\vec{C})
 \end{aligned} \tag{3-25}$$

(* : 共轭矢量)

● 球差展开项

$$\begin{aligned}
 W &= \sum_j W_{040,j} \left[(B\vec{\rho} + \vec{d}) \cdot (B\vec{\rho} + \vec{d}) \right]^2 \\
 &= \sum_j W_{040,j} \left(B^2 \vec{\rho} \cdot \vec{\rho} + 2B\vec{\rho} \cdot \vec{d} + \vec{d} \cdot \vec{d} \right)^2 \\
 &= \sum_j W_{040,j} \left[B^4 (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2 + 4B^3 (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})(\vec{\rho} \cdot \vec{d}) + 4B^2 (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})(\vec{d} \cdot \vec{d}) + \right. \\
 &\quad \left. 2B^2 (\vec{\rho}^2 \cdot \vec{d}^2) + 4B(\vec{\rho} \cdot \vec{d})(\vec{d} \cdot \vec{d}) + (\vec{d} \cdot \vec{d})^2 \right]
 \end{aligned} \tag{3-26}$$

其中, 根据表 3-1, 公式 3-26 中展开的各项对应的像差为:

平移: $(\vec{d} \cdot \vec{d})^2$

球差: $B^4 (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2$

慧差: $4B^3 (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})(\vec{\rho} \cdot \vec{d})$

像散: $2B^2 (\vec{\rho}^2 \cdot \vec{d}^2)$

场曲: $4B^2 (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})(\vec{d} \cdot \vec{d})$

畸变: $4B(\vec{\rho} \cdot \vec{d})(\vec{d} \cdot \vec{d})$

● 彗差展开项

$$\begin{aligned}
 W &= \sum_j W_{131,j} \left[\vec{H} \cdot (B\vec{\rho} + \vec{d}) \right] \left[(B\vec{\rho} + \vec{d}) \cdot (B\vec{\rho} + \vec{d}) \right] \\
 &= \sum_j W_{131,j} \left\{ B^3 (\vec{H} \cdot \vec{\rho})(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + 2B^2 (\vec{H} \cdot \vec{d})(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + B^2 (\vec{H}\vec{d} \cdot \vec{\rho}^2) \right. \\
 &\quad \left. + B \left[2(\vec{d} \cdot \vec{d})\vec{H} + \vec{d}^2 \vec{H}^* \right] \cdot \vec{\rho} + (\vec{d} \cdot \vec{d})(\vec{H} \cdot \vec{d}) \right\}
 \end{aligned} \tag{3-27}$$

其中, 根据表 3-1, 公式 3-27 中展开的各项对应的像差为:

平移: $(\vec{d} \cdot \vec{d})(\vec{H} \cdot \vec{d})$

慧差: $B^3 (\vec{H} \cdot \vec{\rho})(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})$

像散: $B^2 (\vec{H}\vec{d} \cdot \vec{\rho}^2)$

场曲: $2B^2 (\vec{H} \cdot \vec{d})(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})$

畸变: $B \left[2(\vec{d} \cdot \vec{d})\vec{H} + \vec{d}^2 \vec{H}^* \right] \cdot \vec{\rho}$

● 像散展开项

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{1}{2} \sum_j W_{222,j} \left[\vec{H}^2 \cdot (B\vec{\rho} + \vec{d})^2 \right] \\
 &= \frac{1}{2} \sum_j W_{222,j} \left[B^2 \vec{H}^2 \cdot \vec{\rho}^2 + 2B\vec{H}^2 \vec{d}^* \cdot \vec{\rho} + \vec{H}^2 \cdot \vec{d}^2 \right]
 \end{aligned} \tag{3-28}$$

其中, 根据表 3-1, 公式 3-28 中展开的各项对应的像差为:

平移: $\vec{H}^2 \cdot \vec{d}^2$

像散: $B^2 \vec{H}^2 \cdot \vec{\rho}^2$

畸变: $2B\vec{H}^2 \vec{d}^* \cdot \vec{\rho}$

● 场曲展开项

$$\begin{aligned} W &= \sum_j W_{220M,j} (\vec{H} \cdot \vec{H}) [(B\vec{\rho} + \vec{d}) \cdot (B\vec{\rho} + \vec{d})] \\ &= \sum_j W_{220M,j} [B^2 (\vec{H} \cdot \vec{H}) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + 2B (\vec{H} \cdot \vec{H}) (\vec{d} \cdot \vec{\rho}) + (\vec{H} \cdot \vec{H}) (\vec{d} \cdot \vec{d})] \end{aligned} \quad (3-29)$$

其中, 根据表 3-1, 公式 3-29 中展开的各项对应的像差为:

平移: $(\vec{H} \cdot \vec{H}) (\vec{d} \cdot \vec{d})$

场曲: $B^2 (\vec{H} \cdot \vec{H}) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})$

畸变: $2B (\vec{H} \cdot \vec{H}) (\vec{d} \cdot \vec{\rho})$

● 畸变展开项

$$\begin{aligned} W &= \sum_j W_{131,j} (\vec{H} \cdot \vec{H}) [\vec{H} \cdot (B\vec{\rho} + \vec{d})] \\ &= \sum_j W_{131,j} [B (\vec{H} \cdot \vec{H}) (\vec{H} \cdot \vec{\rho}) + (\vec{H} \cdot \vec{H}) (\vec{H} \cdot \vec{d})] \end{aligned} \quad (3-30)$$

其中, 根据表 3-1, 公式 3-30 中展开的各项对应的像差为:

平移: $(\vec{H} \cdot \vec{H}) (\vec{H} \cdot \vec{d})$

畸变: $B (\vec{H} \cdot \vec{H}) (\vec{H} \cdot \vec{\rho})$

3.2.2.1 球差

离轴光学系统的球差:

$$W_{SA} = \sum_j W_{040,j} B^4 (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2 \quad (3-31)$$

根据公式 3-31, 离轴光学系统的三阶球差与同轴光学系统相类似, 仅与光瞳矢量相关, 大小是同轴光学系统的 B^4 。

3.2.2.2 彗差

离轴光学系统的彗差:

$$\begin{aligned} W_{COMA} &= \sum_j W_{040,j} 4B^3 (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) (\vec{\rho} \cdot \vec{d}) + \sum_j W_{131,j} B^3 (\vec{H} \cdot \vec{\rho}) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \\ &= B^3 \left[\sum_j W_{040,j} 4(\vec{\rho} \cdot \vec{d}) + \sum_j W_{131,j} (\vec{H} \cdot \vec{\rho}) \right] (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \\ &= B^3 [4W_{040} \vec{d} + W_{131} \vec{H}] \cdot \vec{\rho} (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \end{aligned} \quad (3-32)$$

根据公式 3-32, 离轴光学系统的彗差包含了同轴光学系统的球差与彗差。其

中，同轴光学系统的球差对应离轴系统的常量彗差，同轴光学系统中的彗差对应离轴光学系统中与视场相关的线性彗差。当 $4W_{040}\vec{d} + W_{131}\vec{H} = 0$ 时，离轴光学系统的彗差为零，对应的彗差节点的位置矢量为：

$$\vec{H}_{131} = \frac{-4W_{040}\vec{d}}{W_{131}} \quad (3-33)$$

此时彗差节点的方向与离轴方向相反，大小为系统离轴量的 $\frac{4W_{040}}{W_{131}}$ 倍，图 3-5 为离轴光学系统彗差节点示意图。

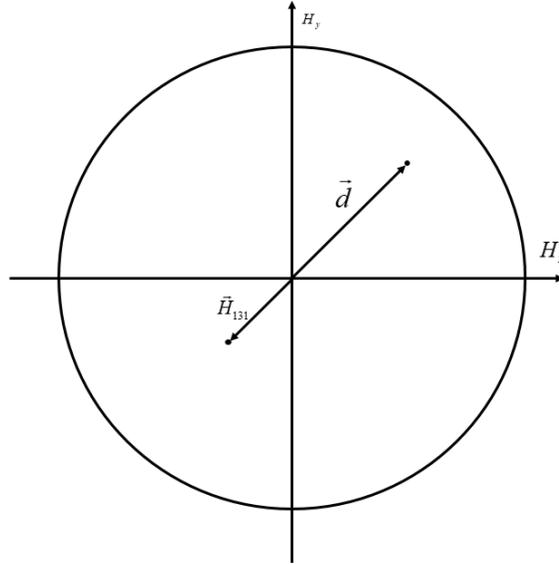


图 3-5 离轴光学系统彗差节点位置矢量

3.2.2.3 像散

离轴光学系统的像散：

$$\begin{aligned} W_{ATS} &= \sum_j W_{040,j} 2B^2 (\vec{\rho}^2 \cdot \vec{d}^2) + \sum_j W_{131,j} B^2 (\vec{H}\vec{d} \cdot \vec{\rho}^2) + \frac{1}{2} \sum_j W_{222,j} B^2 \vec{H}^2 \cdot \vec{\rho}^2 \\ &= B^2 \left(\sum_j W_{040,j} 2\vec{d}^2 + \sum_j W_{131,j} \vec{H}\vec{d} + \frac{1}{2} \sum_j W_{222,j} \vec{H}^2 \right) \cdot \vec{\rho}^2 \\ &= B^2 \left(2W_{040} \vec{d}^2 + W_{131} \vec{H}\vec{d} + \frac{1}{2} W_{222} \vec{H}^2 \right) \cdot \vec{\rho}^2 \end{aligned} \quad (3-34)$$

根据公式 3-34，离轴光学系统的彗差包含了同轴光学系统的球差与彗差。其中，同轴光学系统的球差对应离轴系统的常量彗差，同轴光学系统中的彗差对应离轴光学系统中与视场相关的线性彗差。当 $2W_{040}\vec{d}^2 + W_{131}\vec{H}\vec{d} + \frac{1}{2}W_{222}\vec{H}^2 = 0$ 时，离轴光学系统的彗差为零，对应的彗差节点的位置矢量为：

$$\vec{H}_{222} = -\frac{\left(W_{131} \pm \sqrt{W_{131}^2 - 4W_{040}W_{222}}\right)\vec{d}}{W_{222}} \quad (3-35)$$

当 $W_{131}^2 - 4W_{040}W_{222} = 0$ 时, 离轴光学系统的像散节点只有一个, 方向与离轴方向相反, 大小为系统离轴量的 $\frac{W_{131}}{W_{222}}$; 当 $W_{131}^2 - 4W_{040}W_{222} \neq 0$ 时, 离轴光学系统的像散节点有两个, >0 时, 两个像散节点均落在系统离轴方向上, <0 时, 两个像散节点以系统离轴方向为轴, 呈对称分布, 图3-6为离轴光学系统像散节点示意图。

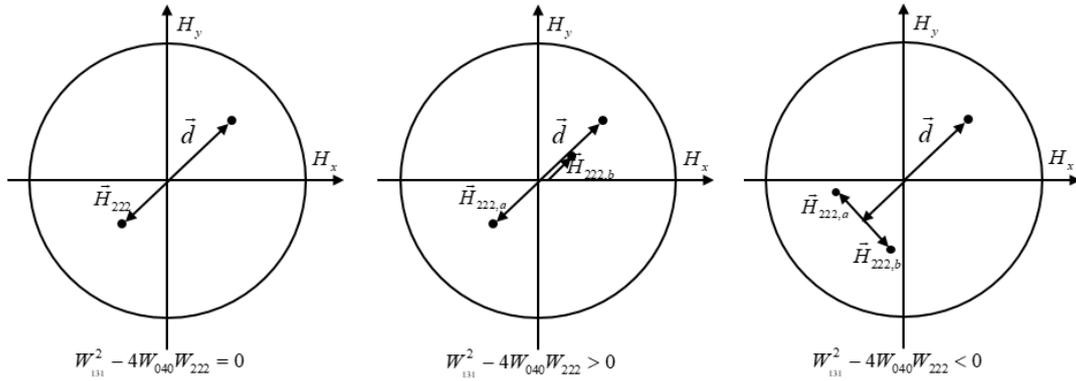


图 3-6 离轴光学系统像散节点位置矢量

3.2.3 失调离轴光学系统波像差

与同轴光学系统光学元件失调分析方法一致, 将公式 3-24 中的视场矢量 \vec{H} 替换成光学元件失调后的视场矢量 \vec{H}_{σ_j} 进行展开分析。

3.2.3.1 球差

光学元件失调后的离轴光学系统的球差:

$$W_{SA} = \sum_j W_{040,j} B^4 (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2 \quad (3-36)$$

与同轴光学系统一样, 光学元件失调后离轴光学系统的球差仅与光瞳矢量有关。影响离轴轴光学系统球差的主要误差是光学元件之间的空气间隔, 即光学元件沿着光轴方向移动。

3.2.3.2 彗差

光学元件失调后的离轴光学系统的彗差展开式为:

$$\begin{aligned} W_{COMA} &= B^3 \left\{ \sum_j W_{040,j} 4(\vec{\rho} \cdot \vec{d}) + \sum_j W_{131,j} [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho}] \right\} (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \\ &= B^3 \left[\left(4W_{040}\vec{d} + W_{131}\vec{H} - \sum_j W_{131,j}\vec{\sigma}_j \right) \cdot \vec{\rho} \right] (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \end{aligned} \quad (3-37)$$

光学元件失调后离轴光学系统的彗差由 3 部分组成：①部分球差分量转换来的常量彗差；②系统本身的线性视场彗差；③光学元件失调造成的常量彗差。

当 $4W_{040}\vec{d} + W_{131}\vec{H} - \sum_j W_{131,j}\vec{\sigma}_j = 0$ 时，光学元件失调的离轴系统的彗差为零，

对应的彗差节点的位置矢量为：

$$\vec{H}_{131} = \frac{\sum_j W_{131,j}\vec{\sigma}_j - 4W_{040}\vec{d}}{W_{131}} \quad (3-38)$$

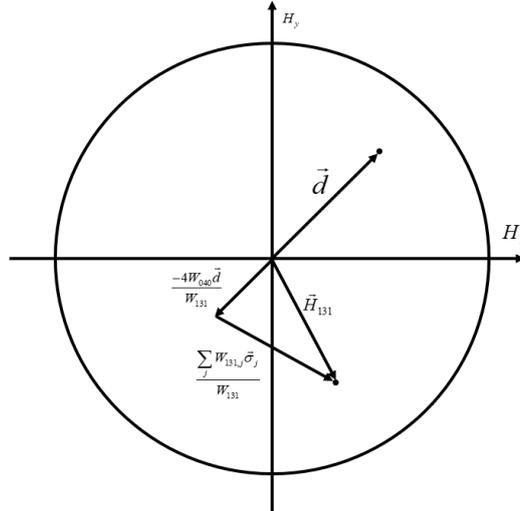


图 3-7 光学系统失调后离轴光学系统彗差节点位置矢量

图 3-7 为失调离轴光学系统彗差节点示意图。当离轴光学系统中光学元件之前存在间隔误差时，光学元件的偏心倾斜带来的常量彗差会与间隔产生的常量彗差进行抵消，在某些特殊失调状态下，失调离轴系统的彗差为零。因此在球差不为零的状态下，彗差为零无法保证光学元件不存在偏心与倾斜。

3.2.3.3 像散

光学元件失调后的离轴光学系统的彗差展开式为：

$$\begin{aligned} W_{ATS} &= B^2 \left[2W_{040}\vec{d}^2 + \sum_j W_{131,j}(\vec{H} - \vec{\sigma}_j)\vec{d} + \frac{1}{2}\sum_j W_{222,j}(\vec{H} - \vec{\sigma}_j)^2 \right] \cdot \vec{\rho}^2 \\ &= B^2 \left(2W_{040}\vec{d}^2 + W_{131}\vec{H}\vec{d} - \sum_j W_{131,j}\vec{\sigma}_j\vec{d} + \frac{1}{2}W_{222}\vec{H}^2 - \sum_j W_{222,j}\vec{H}\vec{\sigma}_j + \frac{1}{2}\sum_j W_{222,j}\vec{\sigma}_j^2 \right) \cdot \vec{\rho}^2 \end{aligned} \quad (3-39)$$

光学元件失调后离轴光学系统的像散由 4 部分组成：①部分球差分量转换来的常量像散；②部分彗差分量转换来的视场线性像散；③系统本身的视场二次像散；④光学元件失调造成的视场线性像散和常量像散。

当 $2W_{040}\vec{d}^2 + W_{131}\vec{H}\vec{d} - \sum_j W_{131,j}\vec{\sigma}_j\vec{d} + \frac{1}{2}W_{222}\vec{H}^2 - \sum_j W_{222,j}\vec{H}\vec{\sigma}_j + \frac{1}{2}\sum_j W_{222,j}\vec{\sigma}_j^2 = 0$ 时，

光学元件失调的离轴系统的像散为零，对应的像散节点的位置矢量为：

$$\bar{H}_{222} = \frac{\sum_j W_{222} \bar{\sigma}_j - W_{131} \bar{d} \pm \sqrt{(W_{131} \bar{d} - W_{222} \bar{\sigma}_j)^2 - W_{222} \left(4W_{040} \bar{d} - 2 \sum_j W_{131} \bar{\sigma}_j \bar{d} + \sum_j W_{222} \bar{\sigma}_j^2 \right)}}{W_{222}} \quad (3-40)$$

为了方便书写，重新定义两个变量：

$$\begin{aligned} \bar{a}_{222} &= \frac{\sum_j W_{222} \bar{\sigma}_j - W_{131} \bar{d}}{W_{222}} \\ \bar{b}_{222} &= 4W_{040} \bar{d} - 2 \sum_j W_{131} \bar{\sigma}_j \bar{d} + \sum_j W_{222} \bar{\sigma}_j^2 \end{aligned} \quad (3-41)$$

公式 3.39 可以简写为：

$$\bar{H}_{222} = \bar{a}_{222} \pm \sqrt{\bar{a}_{222}^2 - \bar{b}_{222}} \quad (3-42)$$

失调状态下离轴光学系统的像散节点与未失调离轴光学系统的像散类似，存在单节点与双节点的情况。对于中心视场的像散，光学元件失调后造成的像散可以与球差与彗差转化成像散的进行抵消，当球差与彗差转化成像散不为零时，在某些特殊的失调状态下，中心视场的像散为零。

根据以上球差，彗差与像散矢量表达式的展开分析，离轴光学系统在装调时，首先需要确保光学元件之间的空气间隔，减小因空气间隔误差造成的系统球差对彗差、像散的影响；然后再根据彗差、像散进行光学元件的偏心、倾斜的装调。

3.2.4 Zernike 多项式与失调离轴光学系统波像差的关系

3.2.4.1 Zernike 多项式

Zernike 多项式由 F.Zernike 使用刀口法检测圆形反射镜面型时提出的一组在单位圆域内的完备正交基，主要有如下三个重要特性(杨甬英, 2017)：

①在单位圆域内连续正交。目前主流的光学系统的光瞳均为圆形，因此 Zernike 多项式在单位圆域内连续正交的特性与圆形光瞳光学系统完美适配。并且，各项 Zernike 多项式是相互独立，互不干扰，利于实际的工程分析。

②Zernike 多项式具有旋转对称性。当波面围绕光瞳中心进行旋转时，对应的 Zernike 多项式保持不变，在求解光学波面问题时有着良好的收敛性。

③Zernike 多项式与光学系统的初级像差有着密切的联系。在实际的设计生产过程中，使用 Zernike 多项式建立与初级像差的数学关系式，大大方便光学系统的设计与装调。

标准 Zernike 多项式由径向多项式 $R(\rho)$ 与角向函数 $\Theta(\phi)$ 构成：

$$Z_n^m(\rho, \phi) = R_n^m(\rho) \Theta(m\phi) \quad (3-43)$$

其中 ρ 为归一化半径， n 为为多项式的阶数， ϕ 为方位角， m 为方位角的角频率。径向多项式 $R(\rho)$ 与角向函数 $\Theta(\phi)$ 的定义式为：

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [0.5(n+|m|)-s]! [0.5(n-|m|)-s]!} \rho^{n-2s} \quad (3-44)$$

$$\Theta(m\phi) = \begin{cases} \cos(m\phi), m \geq 0 \\ \sin(-m\phi), m < 0 \end{cases}$$

此外， n 与 m 需满足：

$$\begin{aligned} n &\geq 0 \\ m &= n - 2t, t = 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (3-45)$$

光学系统波像差使用标准 Zernike 多项式进行波面拟合的表达式为：

$$W(\rho, \phi) = \sum_0^\infty C_n^m Z_n^m(\rho, \phi) \quad (3-46)$$

其中 C_n^m 为每一阶 Zernike 多项式对应的系数。Zernike 多项式进行波面拟合时，每一阶都对应了明确的波像差，对应关系以及波形图见表 3-2。

表 3-2 前 15 项标准 Zernike 多项式与像差的对应关系

项数	阶数(n,m)	标准 Zernike 多项式	波像差	波形图
1	0,0	1	平移	
2	1,1	$\sqrt{2}\rho \cos \phi$	X 方向倾斜	
3	1,-1	$\sqrt{2}\rho \sin \phi$	Y 方向倾斜	
4	2,0	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	离焦	
5	2,2	$\sqrt{6}\rho^2 \cos 2\phi$	像散 0°	
6	2,-2	$\sqrt{6}\rho^2 \sin 2\phi$	像散 45°	
7	3,-1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\sin \phi$	X 方向彗差	
8	3,1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\cos \phi$	Y 方向彗差	
9	3,-3	$\sqrt{8}\rho^3 \sin 3\phi$	三叶像散 0°	
10	3,3	$\sqrt{8}\rho^3 \cos 3\phi$	三叶像散 45°	
11	4,0	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	球差	
12	4,2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\cos 2\phi$	二阶像散 0°	
13	4,-2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\sin 2\phi$	二阶像散 45°	
14	4,4	$\sqrt{10}\cos 4\phi$	六叶像散 0°	
15	4,-4	$\sqrt{10}\sin 4\phi$	六叶像散 45°	

在实际的光学系统装调检测过程中, 通常使用 Fringe Zernike 多项式进行波像差的拟合(Thompson, 2010; Rolland, 2010)。Fringe Zernike 多项式为标准 Zernike 多项式的子集, 保留了波像差拟合中最高阶对称项, 共 37 项。目前, Fringe Zernike 多项式广泛应用于光学设计检测的商业软件中, 例如著名的光学设计软件 Zemax, 可以通过 Fringe Zernike Phase/Sag 面输入特定的波像差进行光学系统的设计分析工作(OpticStudio 16.5 SP5 Help Files); 另外, 主流的动态干涉检测设备 4D 也使用 Fringe Zernike 进行波像差的拟合。各项 Fringe Zernike 多项式具体的表达形式见表 3-3。本论文接下来章节使用的 Zernike 多项式均为 Fringe Zernike 多项式。

表 3-3 前 15 项 Fringe Zernike 多项式

项数	Fringe Zernike 多项式	波像差
1	1	平移
2	$\rho \cos \phi$	X 方向倾斜
3	$\rho \sin \phi$	Y 方向倾斜
4	$2\rho^2 - 1$	离焦
5	$\rho^2 \cos 2\phi$	X 方向像散
6	$\rho^2 \sin 2\phi$	Y 方向像散
7	$(3\rho^3 - 2\rho)\cos \phi$	X 方向彗差
8	$(3\rho^3 - 2\rho)\sin \phi$	Y 方向彗差
9	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	球差
10	$\rho^3 \cos 3\phi$	X 方向三叶像散
11	$\rho^3 \sin 3\phi$	Y 方向三叶像散
12	$(4\rho^4 - 2\rho^2)\cos 2\phi$	X 方向二阶像散
13	$(4\rho^4 - 2\rho^2)\sin 2\phi$	Y 方向二阶像散
14	$(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho)\cos \phi$	X 方向二阶彗差
15	$(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho)\sin \phi$	Y 方向二阶彗差

离轴光学系统单个视场波像差的 Zernike 多项式表达式为:

$$W(\rho_{off-axis}, \phi_{off-axis}) = \sum_1^{37} C_n Z_n(\rho_{off-axis}, \phi_{off-axis}) \quad (3-47)$$

其中 $\rho_{off-axis}$ 与 $\phi_{off-axis}$ 为以离轴光瞳为中心建立直角坐标系的归一化光瞳半径与方位角, 与以母系统光瞳为中心建立的直角坐标系的归一化光瞳半径 $\rho_{on-axis}$

与方位角 $\phi_{on-axis}$ 的关系为:

$$\begin{aligned}\rho_{off-axis} &= \sqrt{(B\rho_{on-axis} \cos \phi_{on-axis} + P_x)^2 + (B\rho_{on-axis} \sin \phi_{on-axis} + P_y)^2} \\ \phi_{off-axis} &= \arctan\left(\frac{B\rho_{on-axis} \sin \phi_{on-axis} + P_y}{B\rho_{on-axis} \cos \phi_{on-axis} + P_x}\right)\end{aligned}\quad (3-48)$$

其中 P_x 、 P_y 为离轴光学系统光瞳中心在母系统光瞳坐标系的位置坐标。将公式 3-47 式带入公式 3-46, 得到使用母系统中归一化光瞳半径 $\rho_{on-axis}$ 与方位角 $\phi_{on-axis}$ 表示的离轴光学系统波像差:

$$W(\rho_{off-axis}, \phi_{off-axis}) = \sum_0^{\infty} C_n(\rho_{off-axis}, \phi_{off-axis}) Z_n\left(\sqrt{(B\rho_{on-axis} \cos \phi_{on-axis} + P_x)^2 + (B\rho_{on-axis} \sin \phi_{on-axis} + P_y)^2}, \arctan\left(\frac{B\rho_{on-axis} \sin \phi_{on-axis} + P_y}{B\rho_{on-axis} \cos \phi_{on-axis} + P_x}\right)\right)\quad (3-49)$$

其中像散、彗差和球差的离轴 Zernike 多项式系数与母系统 Zernike 多项式的对应关系为:

$$\begin{aligned}C_{5,off-axis} &= B^2 C_{5,on-axis} + 12B^2(P_x^2 - P_y^2)C_{9,on-axis} + 3P_x B^2 C_{7,on-axis} - 3P_y B^2 C_{8,on-axis} \\ C_{6,off-axis} &= B^2 C_{6,on-axis} + 24P_x P_y B^2 C_{9,on-axis} + 3P_x B^2 C_{8,on-axis} + 3P_y B^2 C_{7,on-axis} \\ C_{7,off-axis} &= B^3 C_{7,on-axis} + 8P_x B^3 C_{9,on-axis} \\ C_{8,off-axis} &= B^3 C_{8,on-axis} + 8P_y B^3 C_{9,on-axis} \\ C_{9,off-axis} &= B^4 C_{9,on-axis} \\ (P &= \sqrt{P_x^2 + P_y^2})\end{aligned}\quad (3-50)$$

3.2.4.2 失调离轴格里高里系统的 Zernike 多项式系数

Zernike 多项式中没有视场相关变量, 只能对单个视场的波像差进行拟合, 不同视场对应不同的 Zernike 多项式系数 C_n^m 。因此, 可以将公式 3-46 进行改写得到光学系统有效视场内的 Zernike 多项式拟合的波像差:

$$W(H_x, H_y, \rho, \phi) = \sum_1^{37} C_n^m(H_x, H_y) Z_n^m(\rho, \phi)\quad (3-51)$$

其中 H_x, H_y 为归一化视场系数, m 为视场数, $C_n^m(H_x, H_y)$ 为不同视场对应的 Zernike 多项式系数。

本小结以 AIMS 的望远系统为分析模型, 分析失调状态下离轴光学系统与 Zernike 多项式之间的关系。AIMS 望远系统光瞳与母系统光瞳的对应关系如图

3-8 所示, $B = \frac{1}{3}$, 望远系统中心在母系统光瞳归一化坐标(0,0.5)。

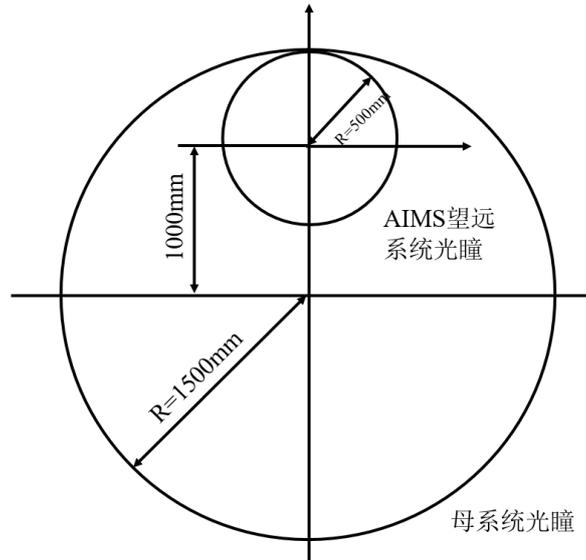


图 3-8 AIMS 望远系统光瞳与母系统光瞳的对应关系示意图

AIMS 望远系统中心视场波像差为离焦，扣除离焦后为完善成像点，水平方向（X 轴）上边缘视场的波像差对称分布，其中主要像差为像散，离轴方向（Y 轴）上边缘视场波像差出现高点波像差比低点波像差差的现象，其中主要像差为像散。接下来将对 AIMS 望远系统光学元件失调造成中心视场波像差对应的各项 Zernike 多项式进行分析讨论。

● 球差

根据公式 3-50，失调离轴光学系统的球差在全视场内为常量，由 Z 轴方向的平移造成。因光学元件失调造成的球差对应的 Zernike 多项式系数为：

$$C_{9,off-axis} = B^4 C_{9,on-axis} \quad (3-52)$$

将 AIMS 望远系统的光瞳缩放因子带入公式 3-52，AIMS 望远系统因光学元件失调造成的球差对应的 Zernike 多项式系数为：

$$C_{9,off-axis} = \frac{1}{81} C_{9,on-axis} \quad (3-53)$$

● 彗差

根据公式 3-50，失调离轴光学系统的彗差由光学元件失调造成的球差分量转换来的常量彗差，系统本身的线性视场彗差与光学元件失调造成的常量彗差。

① 光学元件失调造成的常量球差

$$W_{COMA(SA)} = 4B^3 W_{040} (\vec{d} \cdot \vec{\rho})(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \quad (3-54)$$

对应的 Zernike 多项式系数为：

$$\begin{aligned} C_{7,off-axis} &= 8P_x B^3 C_{9,on-axis} \\ C_{8,off-axis} &= 8P_y B^3 C_{9,on-axis} \end{aligned} \quad (3-55)$$

AIMS 望远系统中 $\vec{d} = (0, 0.5)$ ，球差转换为的常量彗差对应的 Zernike 多项

式系数为:

$$\begin{aligned} C_{7,off-axis} &= 0 \\ C_{8,off-axis} &= \frac{2}{27} C_{9,on-axis} \end{aligned} \quad (3-56)$$

②光学元件失调造成的常量彗差

$$W_{COMA(constant)} = -B^3 \sum_j W_{131,j} (\vec{\sigma}_j \cdot \vec{\rho})(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \quad (3-57)$$

对应的 Zernike 多项式系数为:

$$\begin{aligned} C_{7,off-axis} &= B^3 C_{7,on-axis} \\ C_{8,off-axis} &= B^3 C_{8,on-axis} \end{aligned} \quad (3-58)$$

光学元件失调造成的常量彗差对应的 Zernike 多项式系数为:

$$\begin{aligned} C_{7,off-axis} &= \frac{1}{27} C_{7,on-axis} \\ C_{8,off-axis} &= \frac{1}{27} C_{8,on-axis} \end{aligned} \quad (3-59)$$

● 像散

根据公式 3-50, 失调离轴光学系统的像散由学元件失调造成的球差分量转换来的常量像散, 部分彗差分量转换来的视场线性像散, 系统本身的视场二次像散和光学元件失调造成的视场线性像散和常量像散。

①光学元件失调造成的常量球差

$$W_{ATS(SA)} = 2(B^2 W_{040} \vec{d}^2) \cdot \vec{\rho}^2 \quad (3-60)$$

对应的 Zernike 多项式系数为:

$$\begin{aligned} C_{5,off-axis} &= 12B^2 (P_x^2 - P_y^2) C_{9,on-axis} \\ C_{6,off-axis} &= 24P_x P_y B^2 C_{9,on-axis} \end{aligned} \quad (3-61)$$

失调 AIMS 望远系统中由球差转化成像散对应的 Zernike 多项式系数为:

$$\begin{aligned} C_{5,off-axis} &= \frac{-1}{3} C_{9,on-axis} \\ C_{6,off-axis} &= 0 \end{aligned} \quad (3-62)$$

②光学元件失调造成的常量彗差

$$W_{ATS(COMA)} = B^2 \left(\sum_j W_{131,j} \vec{\sigma}_j \vec{d} \right) \cdot \vec{\rho}^2 \quad (3.63)$$

对应的 Zernike 多项式系数为:

$$\begin{aligned} C_{5,off-axis} &= 3P_x B^2 C_{7,on-axis} - 3P_y B^2 C_{8,on-axis} \\ C_{6,off-axis} &= 3P_x B^2 C_{8,on-axis} + 3P_y B^2 C_{7,on-axis} \end{aligned} \quad (3-64)$$

失调 AIMS 望远系统中由彗差转化成像散对应的 Zernike 多项式系数为:

$$\begin{aligned} C_{5,off-axis} &= \frac{-1}{6} C_{8,on-axis} \\ C_{6,off-axis} &= \frac{1}{6} C_{8,on-axis} \end{aligned} \quad (3-65)$$

③ 光学元件失调造成的像散

对于 AIMS 望远系统的中心视场，光学失调造成的视场线性像散为 0，只存在常量像散。

$$W_{AST(constant)} = -B^2 \left(\sum_j W_{222,j} \bar{\sigma} \bar{\rho} \right) \cdot \bar{\rho}^2 \quad (3-66)$$

对应的 Zernike 多项式系数为：

$$\begin{aligned} C_{5,off-axis} &= B^2 C_{5,on-axis} \\ C_{6,off-axis} &= B^2 C_{6,on-axis} \end{aligned} \quad (3-67)$$

失调 AIMS 望远系统中由彗差转化成像散对应的 Zernike 多项式系数为：

$$\begin{aligned} C_{5,off-axis} &= \frac{1}{9} C_{5,on-axis} \\ C_{6,off-axis} &= \frac{1}{9} C_{6,on-axis} \end{aligned} \quad (3-68)$$

对于 AIMS 望远系统的中心视场，光学元件失调造成的波像差对应的 Zernike 多项式系数为：

$$\begin{aligned} C_{5,off-axis} &= \frac{-1}{3} C_{9,on-axis} - \frac{1}{6} C_{8,on-axis} - \frac{1}{9} C_{5,on-axis} \\ C_{6,off-axis} &= \frac{1}{6} C_{8,on-axis} + \frac{1}{9} C_{6,on-axis} \\ C_{7,off-axis} &= \frac{1}{27} C_{7,on-axis} \\ C_{8,off-axis} &= \frac{2}{27} C_{9,on-axis} + \frac{1}{27} C_{8,on-axis} \\ C_{9,off-axis} &= \frac{1}{81} C_{9,on-axis} \end{aligned} \quad (3-69)$$

从公式 3-69 可以看出，对于 AIMS 望远系统中心视场装调而言，光学元件失调对离焦影响最小，可以通过 $C_{8,off-axis}$ 调整主次镜之前的空气间隔，然后再根据 $C_{5,off-axis}$ 、 $C_{6,off-axis}$ 、 $C_{7,off-axis}$ 和 $C_{8,off-axis}$ 的进行次镜姿态的调整。需要注意的是 $C_{8,off-axis}$ 包含球差与彗差，因此在具体装调时需要多次迭代。

3.3 光学元件面型误差对失调离轴光学系统波像差的影响

对于实际的光学系统，光学元件的面型精度也是影响波像差的重要因素。因

此，光学系统的实际波像差为：

$$W_{actual} = W_{design} + W_{alignment} + W_{surface} \quad (3-70)$$

其中为 W_{design} 设计波像差， $W_{alignment}$ 装调误差造成的波像差， $W_{surface}$ 光学元件面型造成的波像差。当光学元件面型足够小时，其对系统波像差的影响可以认为是各个光学元件面型的累加。本小节以 AIMS 望远系统为分析模型，分析讨论光学元件面型对失调离轴光学系统的影响。

3.3.1 主镜(M1)面型的影响

AIMS 望远系统的主镜面型对应的 Zernike 多项式为：

$$W_{surface,M2} = \sum_1^{37} C_n^{surface,M1} Z_n(\rho, \phi) \quad (3-71)$$

M1 不是 AIMS 望远系统的孔径光阑，因此不同视场的光线在 M1 上的不同区域。图 3-9 为不同视场在 M1 上的投影。因此，M1 镜面面型导致的波像差分析与离轴光学系统的波像差分析一致。M1 上不同视场投影圆的直径与其镜面直径之比为视场光瞳压缩因子 B_H ，不同视场在 M1 上投影的中心坐标为 (H_x, H_y) ，将公式 3.50 中的 B 与 (P_x, P_y) 替换成 B_H 与 (H_x, H_y) ，得到 M1 面型造成的不同像差对焦面波像差的影响。

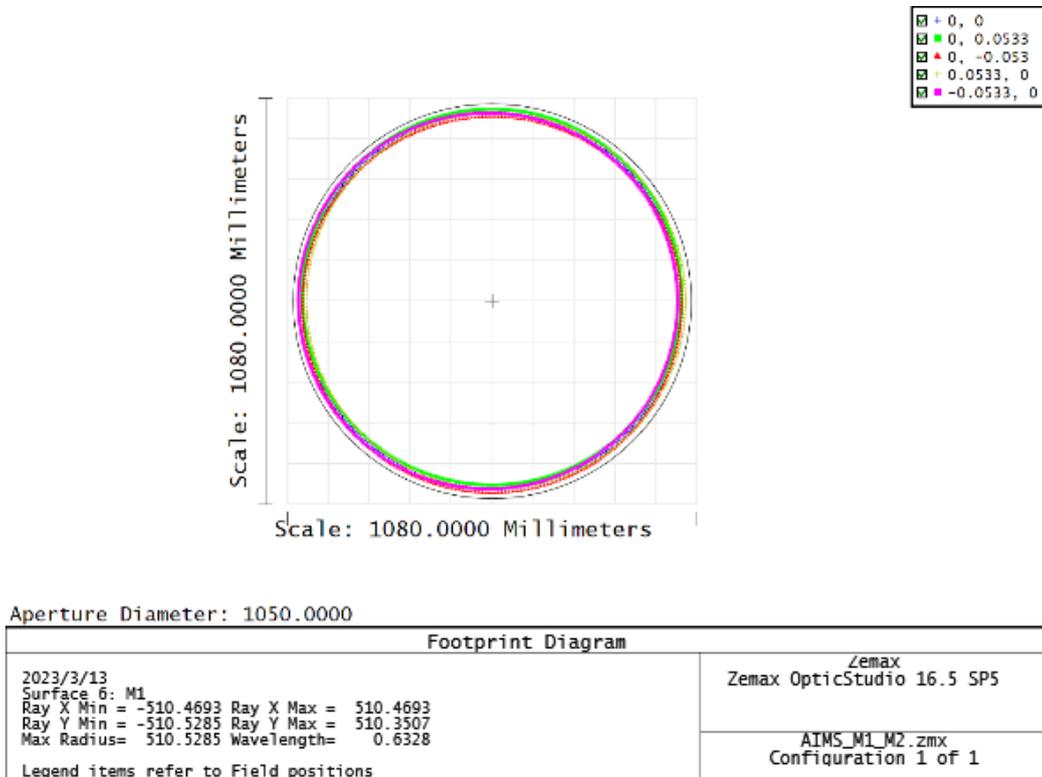


图 3-9 不同视场在 M1 上的投影

①面型球差对焦面波像差的影响

M1 面型的球差在焦面将分解为常量球差，视场线性彗差与视场二次像散，具体表达式如下：

$$\begin{aligned}
 C_5^{image} &= 12B_H^2 (H_x^2 - H_y^2) C_9^{surface,M1} \\
 C_6^{image} &= 24H_x H_y B_H^2 C_9^{surface,M1} \\
 C_7^{image} &= 8H_x B_H^3 C_9^{surface,M1} \\
 C_8^{image} &= 8H_y B_H^3 C_9^{surface,M1} \\
 C_9^{image} &= B_H^4 C_9^{surface,M1}
 \end{aligned} \tag{3-72}$$

②面型彗差对焦面波像差的影响

M1 面型的彗差在焦面将分解为常量彗差，视场线性像散，具体表达式如下：

$$\begin{aligned}
 C_5^{image} &= 3H_x B_H^2 C_7^{surface,M1} - 3H_y B_H^2 C_8^{surface,M1} \\
 C_6^{image} &= 3H_x B_H^2 C_8^{surface,M1} + 3H_y B_H^2 C_7^{surface,M1} \\
 C_7^{image} &= B_H^3 C_7^{surface,M1} \\
 C_8^{image} &= B_H^3 C_8^{surface,M1}
 \end{aligned} \tag{3-73}$$

③面型像散对焦面波像差的影响

M1 面型的像散在焦面上为常量像散，具体表达式如下：

$$\begin{aligned}
 C_5^{image} &= B_H^2 C_5^{surface,M1} \\
 C_6^{image} &= B_H^2 C_6^{surface,M1}
 \end{aligned} \tag{3-74}$$

在 Zemax 中使用 Zernike Fringe Phase 面添加次镜的模拟面型, $C_5=0.1, C_6=0.1, C_7=0.1, C_8=0.1, C_9=0.1$, 图 3-10 为添加的主镜面型。

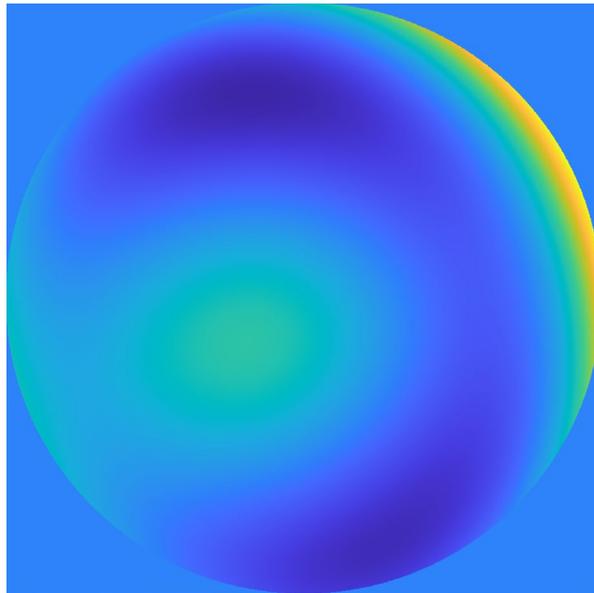


图 3-10 主镜模拟面型 ($C_5=0.1, C_6=0.1, C_7=0.1, C_8=0.1, C_9=0.1$)

AIMS 望远系统中 B_H 为 0.98 (1000/1020)，不同视场光瞳中心坐标(H_x, H_y)

见表 3-4。

表 3-4 各视场光瞳中心坐标

	(0°,0°)	(0°,0.053°)	(0°,-0.053°)	(0.053°,0°)	(-0.053°,0°)
X/mm	0.0000	0.0000	0.0000	10.471	-10.471
Y/mm	0.0000	10.468	-10.468	0.0000	0.0000

将 B_H 与 (H_x, H_y) 带入公式 3-72、3-73 与 3-74 中，得到各视场因 M1 面型造成的 Zernike 多项式系数，具体见表 3-5。

表 3-5 各视场 5-9 项 Zernike 多项式变化量

视场	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
(0°,0°)	0.096	0.096	0.094	0.094	0.092
(0°,0.053°)	0.090	0.090	0.094	0.110	0.092
(0°,-0.053°)	0.102	0.102	0.094	0.078	0.092
(0.053°,0°)	0.091	0.090	0.078	0.094	0.092
(-0.053°,0°)	0.103	0.102	0.110	0.094	0.092

3.3.2 次镜(M2)面型的影响

AIMS 望远系统的次镜面型对应的 Zernike 多项式为：

$$W_{surface,M1} = \sum_1^{37} C_n^{surface,M2} Z_n(\rho, \phi) \quad (3-75)$$

因为次镜为孔径光阑，各视场的光线均均匀经过其表面，因此次镜面型造成的波像差在全视场内均为常量。在 Zemax 中使用 Zernike Fringe Phase 面添加次镜的模拟面型， $C_5=0.1$ ， $C_6=0.1$ ， $C_7=0.1$ ， $C_8=0.1$ ， $C_9=0.1$ ，图 3-11 为添加的次镜面型。表 3-6 为添加面型后各视场 Zernike 多项式系数的变化量，全视场内 Zernike 多项式系数的变化量与次镜面型的 Zernike 多项式系数一致。

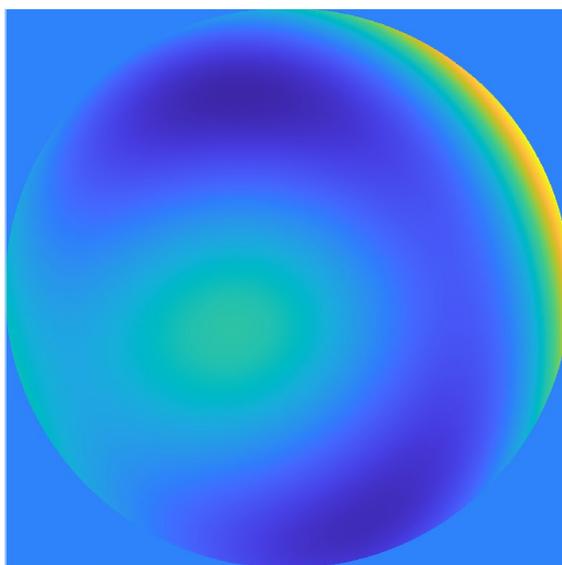


图 3-11 次镜模拟面型 ($C_5=0.1$ ， $C_6=0.1$ ， $C_7=0.1$ ， $C_8=0.1$ ， $C_9=0.1$)

表 3-6 各视场 5-9 项 Zernike 多项式变化量

视场	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
(0°,0°)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
(0°,0.053°)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
(0°,-0.053°)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
(0.053°,0°)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
(-0.053°,0°)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

3.3.3 光学元件面型误差对 AIMS 望远系统装调的影响

在光学系统装调过程，因为光学面型带来的波像差与装调误差带来的波像差在某些视场会相互抵消，出现系统局部像质较好，其余视场像质较差的现象。因此，使用传统干涉装调方法进行光学系统装调时需在多个视场下进行光学元件失调量的计算。考虑到 Zernike 多项式在圆域内是连续正交的特性，可以使用 Zernike 多项式对光学元件的实测面型进行拟合，获得系统波像差的真实理论 Zernike 多项式系数，通过 Zernike 多项式系数分离面型误差与装调误差，在装调过程中以 Zernike 多项式系数作为像质评价的标准。

当光学系统截取光瞳中一部分区域进行系统装调时，因为光学元件面型带来的波像差，仅使用局部区域理论设计波像差（不含光学元件面型）进行系统装调时，会出现局部光瞳像质较好，全口径像质较差的情况，无法准确计算光学元件的失调量。以 AIMS 望远系统为例，将上一小结生成的 M1、M2 面型输入到 ZEMAX 模型中，截取全口径光瞳中的部分区域（以中心 450mm 圆域为例）进行模拟装调。图 3-12 中左图为完成装调后中心 450mm 圆域内的中心视场系统波像差，该区域像质较好，波像差 RMS 值为 $0.0102\lambda@632.8\text{nm}$ ，右图为系统全口径中心视场波像差，波像差 RMS 值为 $0.3391\lambda@632.8\text{nm}$ ，像质较差，未达到装调需求。

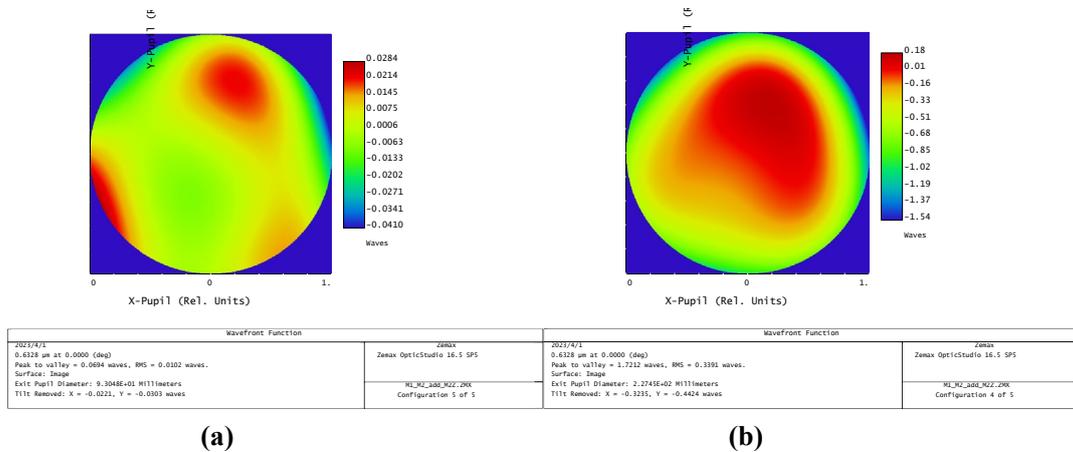


图 3-12 使用光瞳局部区域理论波像差装调仿真结果 (a)中心 450mm 圆域波像差 (b)全口径波像差

因此,在 AIMS 望远系统装调过程中,将获得真实可靠的光学元件面型导入系统模型建立装调基准是装调的必要条件。

3.4 小结

本章首先介绍了失调同轴光学系统的矢量波像差的表达形式;再根据光瞳转化,详细推到了离轴光学系统的矢量波像差的表达形式,对失调离轴光学系统的波像差进行了分析讨论,建立了波像差与 Zernike 多项式的对应关系,推导了失调离轴光学系统对各项 Zernike 多项式系数的影响,根据具体 Zernike 多项式系数的变化制定初步的装调策略;最后分析讨论了光学元件面型误差对离轴光学系统波像差的影响。

第4章 AIMS 望远系统静态精密装调方案设计

本章首先分析了现有静态装调方案应用于 AIMS 望远系统静态装调时的不足；针对现有静态装调方案的不足，提出一种中心小口径圆域的静态干涉装调方案，利用小口径标准平面反射镜在倾斜状态下能够较好的保证其面型精度的特点与 Zernike 多项式在圆域内连续正交的特性，建立了小口径圆域的像质评价基准，实现 AIMS 望远系统的静态精密装调。

4.1 现有静态装调方案

现有光学系统静态装调方案主要包括：全口径干涉装调，计算机全息（Computer Generated Holography, CGH）装调，波前传感器装调与子孔径拼接装调。对于 AIMS 望远系统装调而言，以上 4 种装调方案均有各自的缺点，具体如下：

① 传统全口径干涉装调方案需要使用一块口径大于待装调光学系统口径的标准平面反射镜。AIMS 望远系统有效口径为 1m，因此用于装调的标准平面反射镜口径需大于等于 1m。标准平面反射镜是干涉装调的基准，因此要求其面型精度 $RMS \leq 1/40\lambda$ (λ 为光学系统的装调波段)。AIMS 望远系统因其光学设计的特点，在静态装调过程中，标准平面反射镜在水平方向倾斜至少 14.036° 。在倾斜 14.036° 的条件下，保证口径大于 1m 的标准平面反射镜的面型精度 $\leq 1/40\lambda$ 是十分困难的(Chen et al, 1992; Shen et al, 2022)，并且 1m 口径标准平面反射镜的机械支撑结构将十分复杂、巨大，并不适合在野外台址进行装调，图 4-1 为 AIMS 望远系统全口径干涉装调光路示意图。

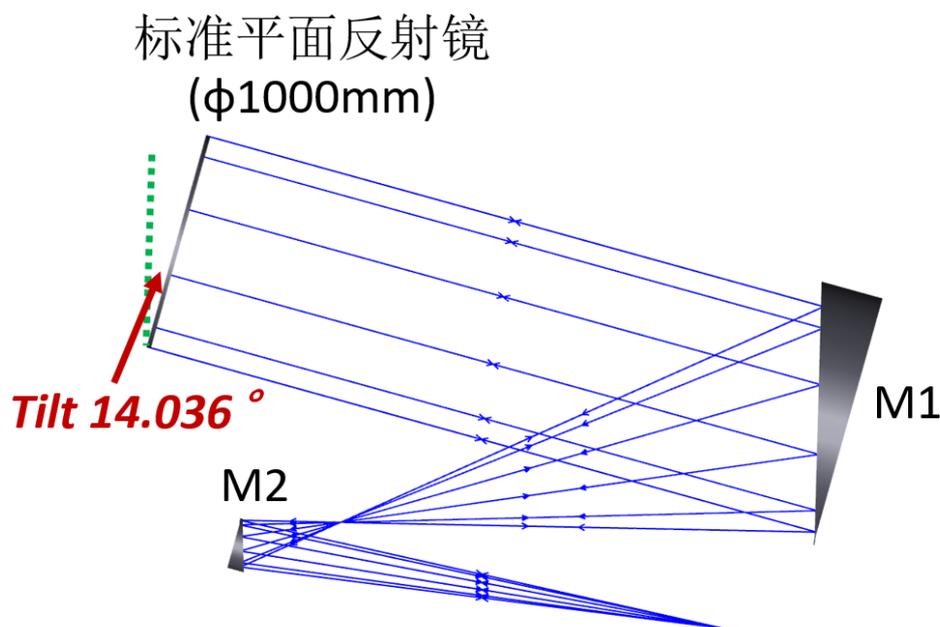


图 4-1 全口径干涉装调光路

② CGH 装调方案是使用 CGH 相位波片进行相位补偿,从而实现系统装调,其装调精度受 CGH 相位波片的加工、安装精度的影响。AIMS 望远系统中的光学元件离轴量较大(主镜离轴量 1000mm,次镜离轴量 708.33mm),使用 CGH 相位波片进行装调时,畸变较为严重,对 CGH 相位波片加工精度与定位精度要求较高。以 AIMS 主镜面型的 CGH 检测为例,CGH 实测数据畸变严重,其检测精度受 CGH 相位波片安装精度的影响较大(E et al, 2021)。图 4-2 为用于 AIMS 望远系统主镜面型检测的 CGH 相位波片与主镜面型检测原始数据。因此,CGH 装调方案并不适用于 AIMS 望远系统的野外台站装调。

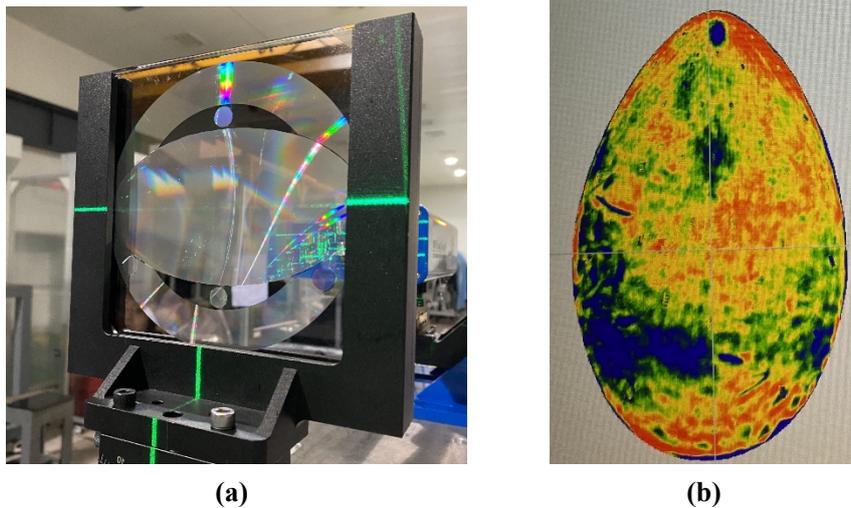


图 4-2 用于 AIMS 主镜面型检测的 CGH 相位波片 (a)实物图 (b)主镜面型实测波前数据

③ 使用波前传感器进行静态装调时需口径大于待装调光学系统口径的平行光管。对于 AIMS 望远系统的装调,需要一个口径大于 1m 的平行光管倾斜 14.036° 。在倾斜状态下保证平行光管出光的平行度十分困难,因此,波前传感器装调也并不适用于 AIMS 望远系统的野外台站装调。

④ 子口径拼接装调使用一块小口径的标准平面反射镜进行扫描拼接(Thunen et al, 1983),从而达实现全口径干涉装调。虽然小口径标准平面反射镜在倾斜状态下可以较好的保持其面型精度,但是进行全口径扫描需要花费较长的时间。以 AIMS 望远系统为例,使用一个口径为 450mm 的标准平面反射镜进行全口径扫描,需要依次扫描 9 个点位,花费 40 分钟,图 4-3 为 AIMS 望远系统子口径拼接示意图。光学系统的装调是一个需要多次迭代的过程,因此使用子口径拼接装调将大大降低装调效率。

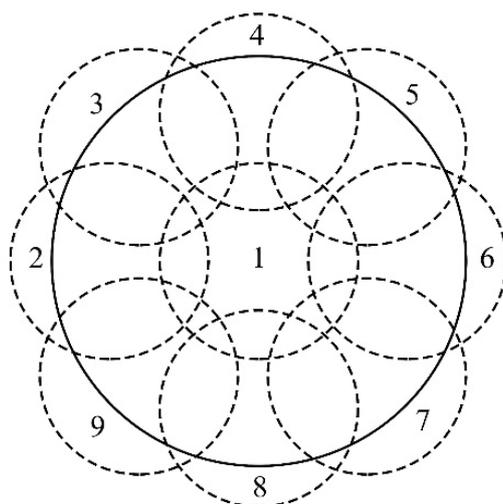


图 4-3 子孔径拼接

基于以上 4 种装调方案的缺点，AIMS 望远系统装调方案需要具备以下 3 个特性：

①可靠性：装调设备需要在倾斜状态下保证其测量精度；

②高效性：在尽可能短的时间内完成装调；

③灵活性：AIMS 望远系统需要在野外台站进行现场装调，因此要求装调设备便于运输，可以在有限的场地中搭建装调光路。

4.2 中心小口径圆域干涉装调方案理论分析

AIMS 望远系统静态精密装调采用小口径标准平面反射镜干涉装调方案，区别于传统全口径干涉装调，该方案使用中心小口径的波前数据进行全口径光学系统的装调，本小结将详细介绍中心小口径的装调评价基准、平面反射镜口径的选取与装调光路。

4.2.1 中心小口径圆域干涉装调评价基准

不同于全口径的标准平面镜，使用小口径的标准平面镜进行干涉装调时无法实时获取全口径的系统波像差。对于存在面型误差的光学系统，使用小口径标准平面反射镜将光学系统小口径波像差调整至最佳时，往往全口径的波像差未调整至最佳。因此，使用小口径标准平面镜进行大口径光学系统的干涉装调最关键的一步是建立小口径装调的评价基准。在实际装调过程中，为了方便定位，小口径标准平面反射镜将与待装调光学系统的中心对齐，因此，本章将以中心小口径圆域进行理论仿真分析。

在实际生产过程中，因为加工误差，光学元件的面型存在面型误差。因此光学系统实际的理论系统波像差是由设计残差与光学元件的面型误差组成：

$$W_{actual} = W_{design} + W_{surface} \quad (4-1)$$

光学系统的设计残差与光学元件的面型误差均可以使用 Zernike 多项式进行拟合:

$$W_{design} = \sum_1^{37} C_{n,design} Z_n(\rho, \phi) \quad (4-2)$$

$$W_{surface} = \sum_1^{37} C_{n,surface} Z_n(\rho, \phi)$$

根据 3.3 小结的分析讨论, 孔径光阑光学元件的面型与非孔径光阑光学元件的面型对光学系统波像差各项 Zernike 多项式的贡献不同, 4-1 式可以改写为:

$$W_{actual} = \sum_1^{37} (C_{n,design} + C_{n,surface}^{stop}) Z_n(\rho, \phi) + \sum_1^{37} \sum_1^j C_{n,j,surface}^{non-stop} Z_n(\rho, \phi) \quad (4-3)$$

其中, $C_{n,surface}^{stop}$ 为孔径光阑光学元件面型对应的 Zernike 多项式系数, $C_{n,j,surface}^{non-stop}$ 为第 j 面非孔径光阑面光学元件面型对应的 Zernike 多项式系数分解到光桶面中心的系数。对于 AIMS 望远系统, 4-3 式可以简写为:

$$W_{actual} = \sum_1^{37} (C_{n,design} + C_{n,surface}^{M1} + C_{n,surface}^{M2}) Z_n(\rho, \phi) \quad (4-4)$$

其中 $C_{n,surface}^{M1}$ 为 M1 面型分解后对应的 Zernike 多项式系数。在实际装调过程中, 4D 动态干涉仪显示的是各项 Zernike 多项式对应的系数值, 因此 AIMS 望远系统理论实际波像差可以进一步简写为:

$$W_{actual} \sim C_{n,design} + C_{n,surface}^{M1} + C_{n,surface}^{M2} \quad (4-5)$$

当 M1 与 M2 存在装调误差时, 光学系统的波像差将与理论值不符, 该状态下用于拟合波像差的 Zernike 多项式系数与理论值 ($C_{n,design} + C_{n,surface}^{M1} + C_{n,surface}^{M2}$) 存在偏差。因此, 装调过程中系统实测的 Zernike 多项式系数与理论值的偏差是衡量装调是否完成的依据。使用中心小口径圆域进行系统装调时, 装调基准为中心小口径圆域内系统设计残差与光学元件面型构成的理论 Zernike 多项式系数。

4.2.2 C_n 与中心小口径圆域口径的选取

AIMS 望远系统装调时, M1 为装调的参考面, 通过调整 M2 与 M1 的相对位置姿态进行系统装调。M2 以其镜面为中心共有 6 个自由度: X/Y/Z 轴方向上的平移; 绕 X/Y/Z 轴的倾斜。在实际装调过程中, 首先对绕 Z 轴的倾斜 (自旋) 进行定位。确定 M1、M2 的光学高低点后, 先后使用投线仪粗装, 激光跟踪仪精装后, 保证 M2 的自旋误差在 $5''$ 以内, 造成的波像差 RMS 值变化量 $<0.003\lambda@632.8\text{nm}$ 。因此, 实际装调过程中 M2 的调整量简化为 5 个自由度 (X/Y/Z 轴方向上的平移, 绕 X/Y 轴的倾斜), 其中 Z 轴方向的平移对应 M1 与 M2 的间隔, X/Y 轴的平移对应 M2 的偏心。假设 M2 的位置误差为 ΔP , 对应的由位置

误差造成的系统全口径波像差对应的 Zernike 多项式系数 C_n 的变化量为:

$$\Delta C_n = C_{n,maesure} - C_{n,design} - C_{n,surface}^{M1} - C_{n,surface}^{M2} \quad (4-6)$$

根据常规装调经验,使用 Matlab 中 Rand 函数随机生成 10 组 ΔP , 其中包括: X/Y 方向上的偏心误差, 误差范围为-0.2mm~0.2mm; Z 方向上的元件间隔误差, 误差范围为-1mm~1mm; X/Y 方向上的倾斜误差, 误差范围为-500"~500"。图 4-4 为 10 组 M2 位置误差的具体数值。将 10 组随机 M2 位置误差输入到 AIMS 望远系统的 ZEMAX 模型中, 得到系统失调状态下中心视场全口径波像差对应 ΔC_n 。图 4-5 为 10 组 ΔC_n 的平均值, 横坐标为 Zernike 多项式的阶数, 纵坐标为 ΔC_n 平均值。从图 4-5 可以看出 ΔP 主要影响低阶项 (Z5-Z11), 其中 Z9 项受 M2 的位置误差影响较小, 与第 3 章的分析结果相吻合。

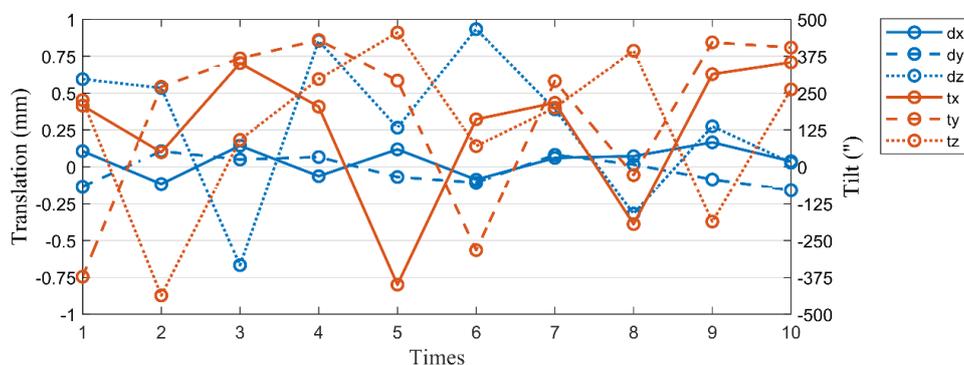


图 4-4 10 组随机 M2 位置误差分布

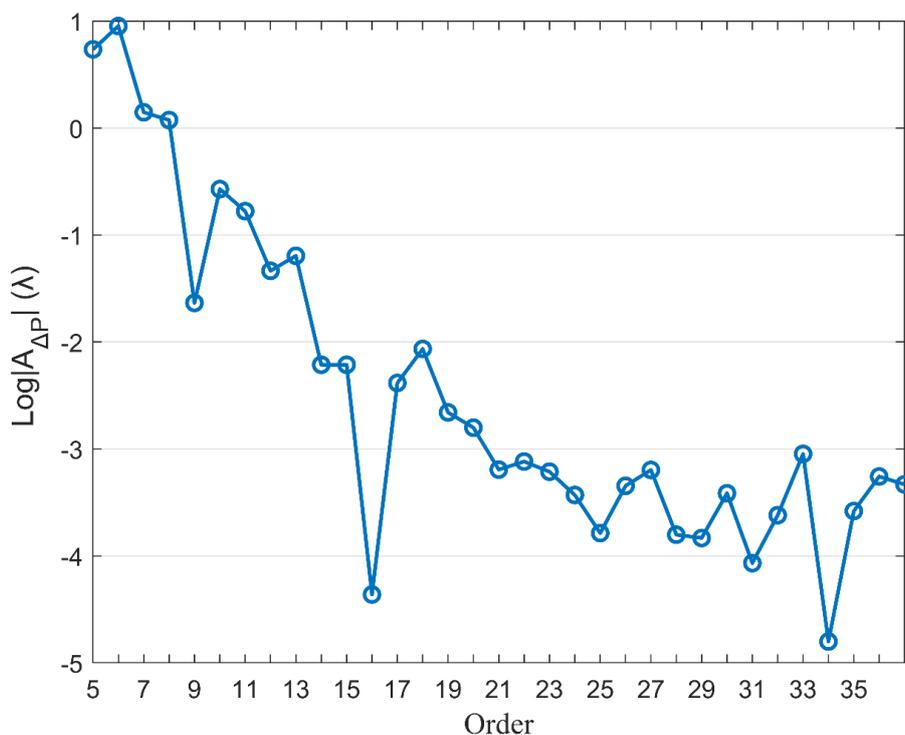


图 4-5 M2 位置误差对全口径系统 Zernike 多项式的影响

根据 Zernike 多项式的定义, 同一个点对应的 Zernike 多项式系数值与其归一化半径的参考半径成正相关。以 AIMS 望远系统为仿真模型, AIMS 望远系统的全口径半径为 R , 与望远系统同心的小口径圆域的半径为 r , ΔP 导致小口径圆域内波像差残差 $\Delta W^{\Delta P}$ 为:

$$\Delta W^{\Delta P} = \sum_1^{37} \Delta C_{n,r} Z_n(\rho, \theta) = \sum_1^{37} \Delta C_{n,R} Z_n(\rho, \theta) \quad (4-7)$$

其中当归一化对应的参考半径为 R 时, ρ 的取值范围为 $\left[0, \frac{r}{R}\right]$; 当归一化对应的参考半径为 r 时 ρ 的取值范围为 $[0, 1]$ 。小口径圆域任意一点的归一化半径值是该点对应全口径的归一化半径值的 R/r , 小口径圆域内 $\Delta C_{n,r}$ 与全口径 $\Delta C_{n,R}$ 的对应关系为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta C_{5,r} = \frac{r^2}{R^2} \Delta C_{5,R} \\ \Delta C_{6,r} = \frac{r^2}{R^2} \Delta C_{6,R} \\ \Delta C_{7,r} = \left(\frac{r^3}{R^3} \rho^3 - 2 \frac{r}{R} \rho \right) \frac{\Delta C_{7,R}}{(\rho^3 - 2\rho)} \\ \Delta C_{8,r} = \left(\frac{r^3}{R^3} \rho^3 - 2 \frac{r}{R} \rho \right) \frac{\Delta C_{8,R}}{(\rho^3 - 2\rho)} \\ \Delta C_{9,r} = \left(6 \frac{r^4}{R^4} \rho^4 - \frac{r}{R} \rho^2 + 1 \right) \frac{\Delta C_{9,R}}{(6\rho^4 - \rho^2 + 1)} \\ \Delta C_{10,r} = \frac{r^3}{R^3} \Delta C_{10,R} \\ \Delta C_{11,r} = \frac{r^3}{R^3} \Delta C_{11,R} \end{array} \right. \quad \text{其中 } 0 \leq \rho \leq 1, 0 < \frac{r}{R} \leq 1 \quad (4-8)$$

根据公式 4-8, $\Delta C_{n,r}$ 与 r 成正比, 当 $r=R$ 时 $\Delta C_{n,r}$ 的最大值为 $\Delta C_{n,R}$ 。将图 4-4 中所示的 ΔP 输入到 AIMS 望远系统的 ZEMAX 模型中, 获得不同孔径的系统波像差对应的 $\Delta C_{n,r}$ 。图 4-6 为 AIMS 望远系统中 Z5-Z11 项对应的 $\Delta C_{n,r}$ 随半径值的变化曲线。考虑到实际装调时环境带来的干扰, $\Delta C_{n,r}$ 需大于 0.1λ , 因此使用中心小口径圆域干涉装调方案进行 AIMS 望远系统装调时, 小口径平面反射镜的直径需大于 370mm, 选取 $C_{5,r}$ 、 $C_{6,r}$ 、 $C_{7,r}$ 、 $C_{8,r}$ 、 $C_{10,r}$ 与 $C_{11,r}$ 作为像质评价标准。

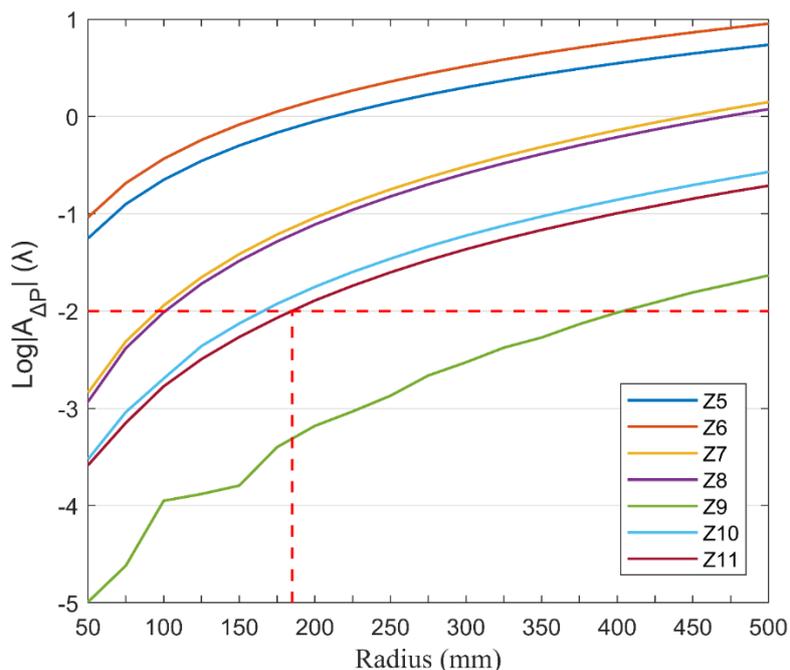


图 4-6 $\Delta C_{n,r}$ 与半径 r 的变化曲线

4.2.3 装调光路

用于 AIMS 望远系统对的中心小口径干涉装调光路如图 4-7 所示。M1 安装在望远镜桁架上后，其镜面与大地垂直，M2 通过六杆机构与桁架连接，小口径标准平面反射镜（Small-aperture standard flat mirror, SAFM）放置在 M1 前方，俯仰倾斜 14.036° ，并且与主镜中心对准。在望远系统的系统焦点处放置干涉仪，用于获得望远系统中心小口径的实时系统波像差。

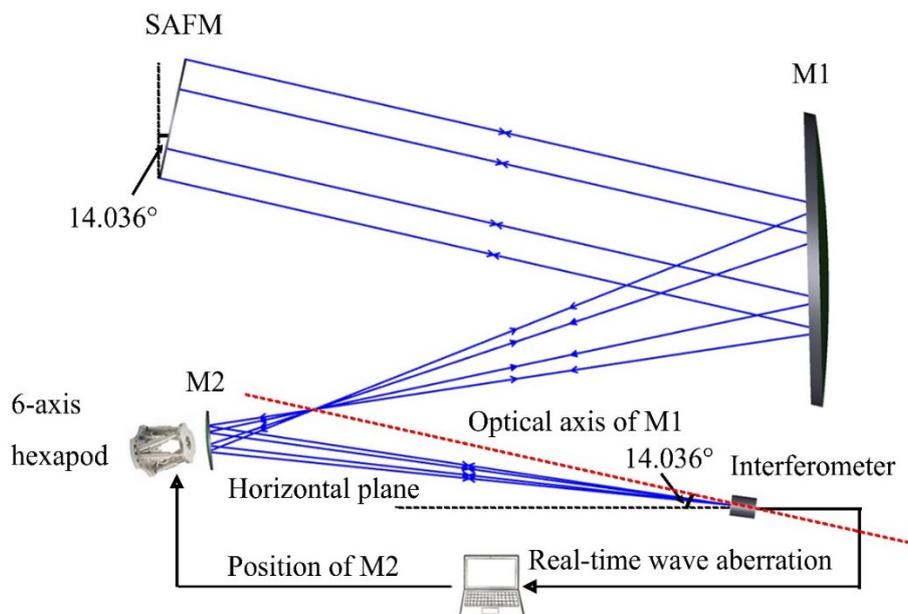


图 4-7 AIMS 望远系统装调光路图

4.3 中心小口径圆域干涉装调方案数值仿真

逆向优化法是利用光学软件的逆向优化功能,将光学系统实测波像差对应的 Zernike 多项式系数作为优化目标进行逆向优化,求解光学元件的失调量。Kim 利用逆向优化成功完成了一台卡塞格林望远镜的装调工作,实现全视场系统波像差 RMS 平均值为 $0.194\lambda@632.8\text{nm}$ (Kim et al, 2007)。根据 Kim 的分析,逆向优化法的装调精度由于灵敏度矩阵法,但是暂不适合多元件的光学系统的装调。因此,逆向优化法主要应用于两镜系统的装调。中心小口径圆域干涉装调方案数值仿真使用 ZEMAX 光学软件的逆向优化功能进行光学元件位置误差的计算。

在 ZEMAX 光学软件中,评价函数的定义式为(OpticStudio 16.5 SP5 Help Files):

$$MF^2 = \frac{\sum \omega_n (V_n - T_n)^2}{\sum \omega_n} \quad (4-9)$$

其中 n 为目标子函数的个数, T_n 为优化子函数的目标值, V_n 为优化子函数的实际值, ω_n 为各项优化子函数的权重。在中心小口径圆域干涉装调方案数值仿真中,将失调状态下的 $C_{5,r}$ 、 $C_{6,r}$ 、 $C_{7,r}$ 、 $C_{8,r}$ 、 $C_{10,r}$ 与 $C_{11,r}$ 作为优化子函数的目标值进行逆向优化。

4.3.1 装调仿真流程

用于 AIMS 望远系统的中心小口径圆域干涉装调方案仿真包括以下 4 步:

步骤 1: 将 M1、M2 面型输入到 AIMS 望远系统的 ZEMAX 模型,获得装调的逆向优化基底。中心小口径圆域的望远系统中心视场理论波像差(中心小口径圆域直径分别为 370mm、450mm、550mm 和 1000mm)。为了使装调方案的仿真具有普适性,使用 Matlab 中的 Round 函数生成 M1、M2 的随机面型。图 4-8 为将 M1、M2 随机面型输入到望远系统 ZEMAX 模型后,中心视场的全口径焦面波像差。

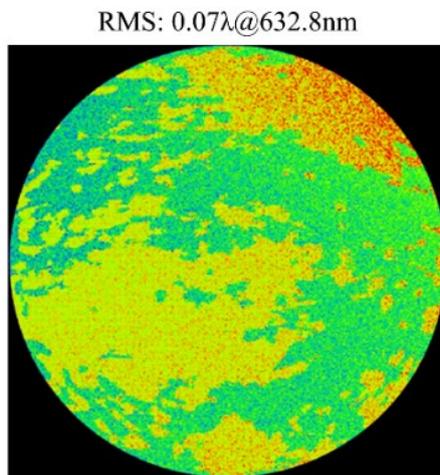


图 4-8 加入 M1、M2 随机面型后 AIMS 望远系统中心视场波像差

步骤 2: 在带有面型的望远系统中加入 M2 的位置误差 ΔP , 获得带有位置误差时中心小口径圆域的系统中心视场波像差对应的 Zernike 多项式系数 $C_{5,r}$ 、 $C_{6,r}$ 、 $C_{7,r}$ 、 $C_{8,r}$ 、 $C_{10,r}$ 与 $C_{11,r}$, M2 的位置误差由 Matlab 的 Round 函数随机生成, 其中包括: X/Y 方向上的偏心误差, 误差范围为 $-0.2\text{mm}\sim 0.2\text{mm}$; Z 方向上的元件间隔误差, 误差范围为 $-1\text{mm}\sim 1\text{mm}$; X/Y 方向上的倾斜误差, 误差范围为 $-500''\sim 500''$ 。共生成 20 组随机位置误差, 具体见图 4-9。

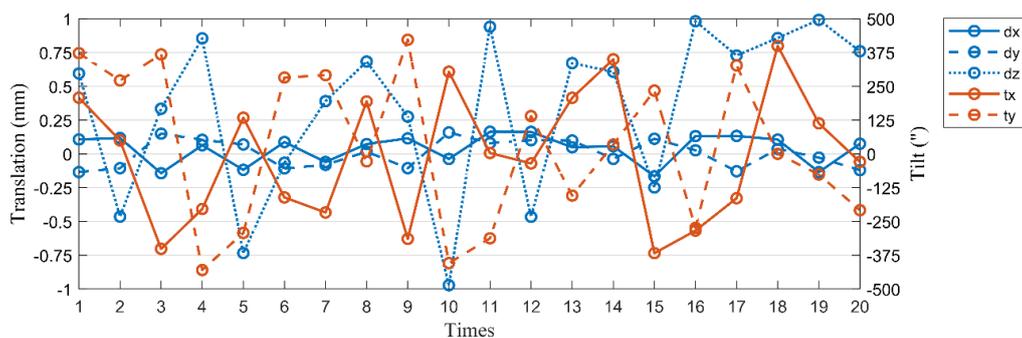


图 4-9 20 组 M2 的随机位置误差

步骤 3: 将步骤 2 中获得 $C_{5,r}$ 、 $C_{6,r}$ 、 $C_{7,r}$ 、 $C_{8,r}$ 、 $C_{10,r}$ 与 $C_{11,r}$ 作为目标值, 使用 ZEMAX 进行逆向优化, 获得位置误差的计算值 ΔP_c , 从而获得与输入值 ΔP 的位置误差残差值 ΔP_r 。

步骤 4: 将步骤 3 中获得 ΔP_r 输入到望远系统的 ZEMAX 模型中, 获得系统全口径的装调波像差残差 W_r 。

4.3.2 理想装调环境

在理想装调环境的装调数值仿真认为系统波像差中对应的各项 Zernike 多项式系数变化量仅有装调误差造成, 无环境噪声的干扰。依次使用 370mm、450mm、550mm 与 1000mm 口径的中心小口径圆域进行 ΔP 的逆向优化, 单次逆向优化时间 1 分钟, 评价函数残差小于 5×10^{-7} 。

图 4-10 为使用不同中心圆域逆向优化后的 ΔP_r , 其中蓝线表示平移、偏心残差, 其数值大小参照左侧的纵坐标, 橙线表示的是倾斜残差, 其数值大小参照右侧的纵坐标, 横坐标为逆向优化实验次数, 共 20 次。根据仿真分析, 理想装调环境下, 使用 ZEMAX 逆向优化后的装调位置残差随着中心子口径圆域口径的增大而减小; 使用 370mm 的中心圆域完成装调后, 平移、偏心残差小于 $1\mu\text{m}$, 倾斜残差小于 $0.5''$ 。图 4-11 为使用不同口径的中心圆域模拟装调后, ΔP_r 对 AIMS 望远系统全视场波像差的 RMS 值的影响。当使用 370mm 的中心圆域完成装调后, 望远系统中心视场波像差 RMS 值的残差小于 $4.5 \times 10^{-6}\lambda@632.8\text{nm}$, 边缘视场波像差 RMS 值的残差小于 $3.5 \times 10^{-5}\lambda@632.8\text{nm}$ 。

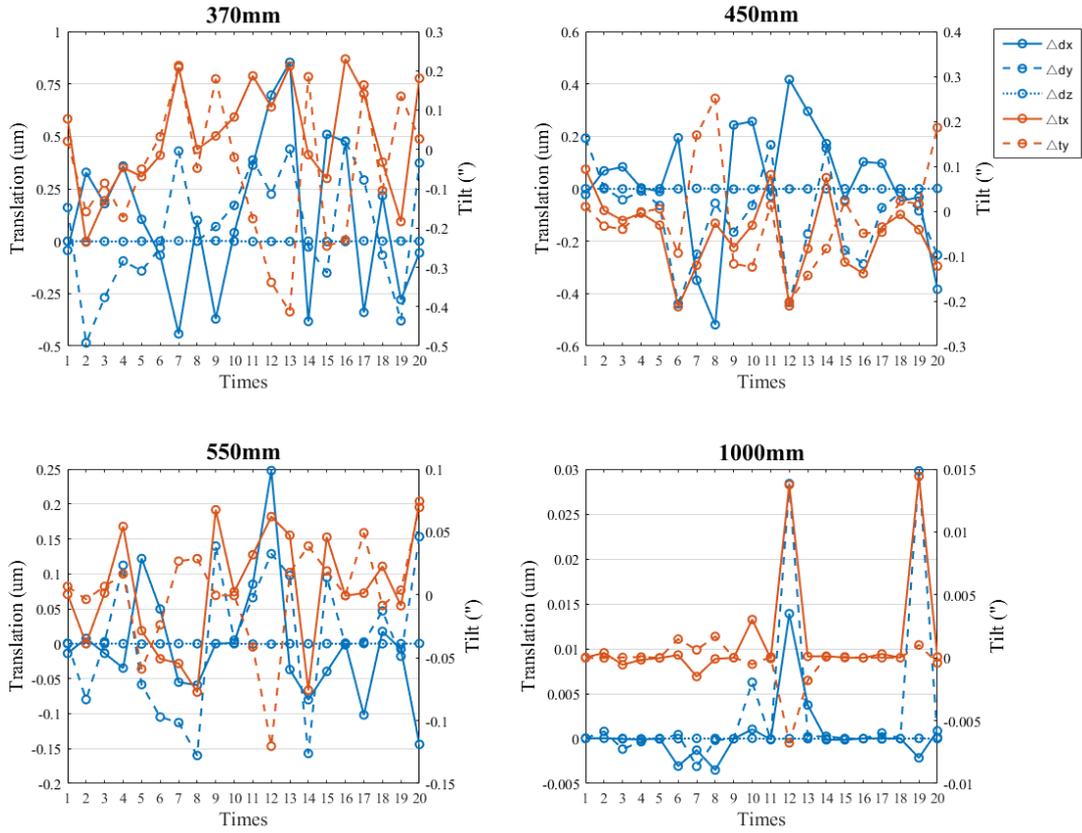


图 4-10 不同中心口径模拟装调完成后的位置残差

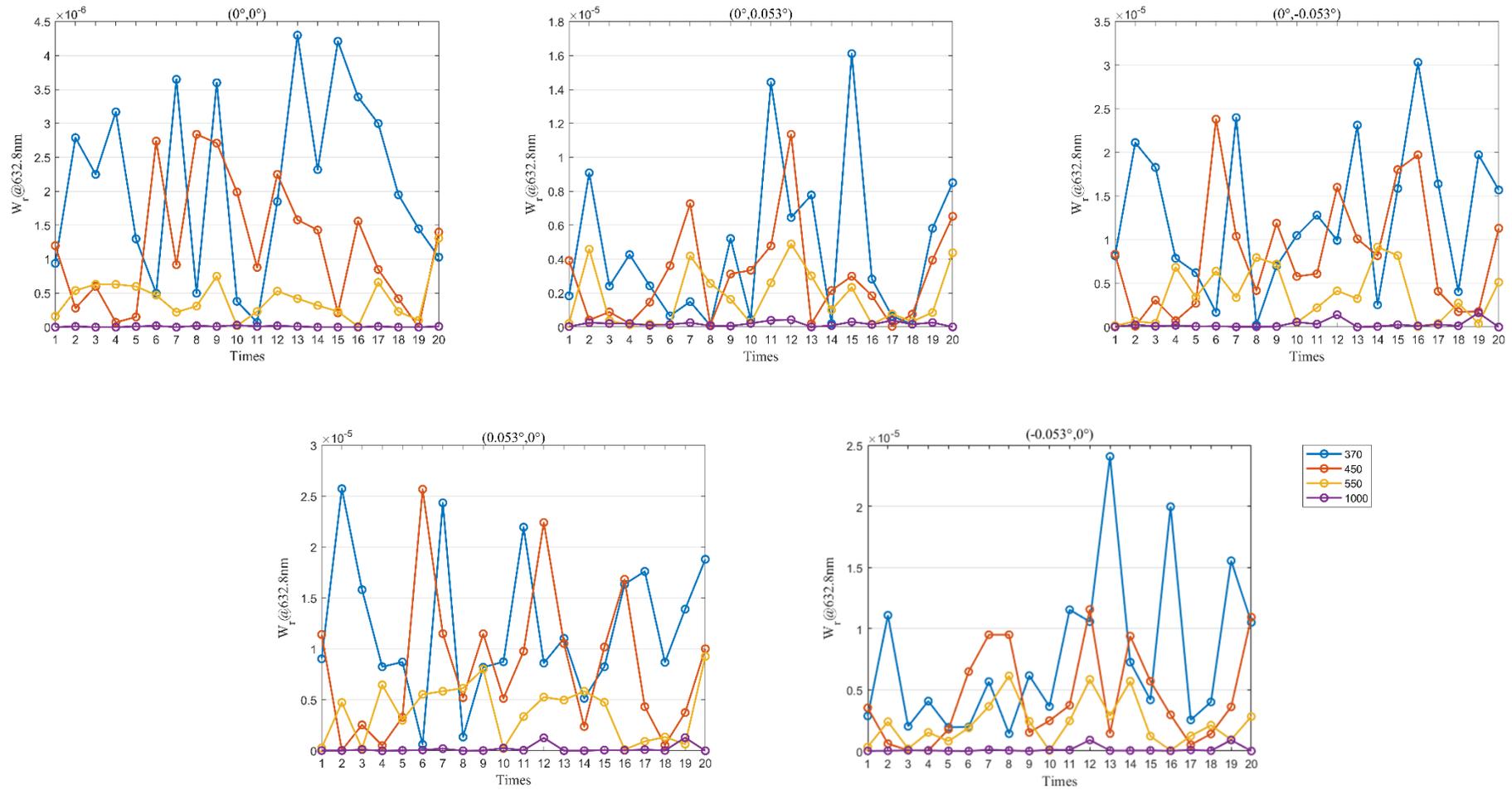


图 4-11 不同中心口径模拟装调完成后 AIMS 望远系统各视场的波前 RMS 残差

4.3.3 非理想装调环境（测量误差）

AIMS 望远系统将在野外台站上进行实际的装调，因此装调过程中环境造成的测量误差将影响实际装调精度。为了使中心小口径圆域干涉装调方案的数值仿真更加真实地反应实际装调结果，在 M2 失调装调下的 $C_{5,r}$ 、 $C_{6,r}$ 、 $C_{7,r}$ 、 $C_{8,r}$ 、 $C_{10,r}$ 与 $C_{11,r}$ 基础上，在各项随机加上 $-0.01\lambda\sim 0.01\lambda$ 和 $-0.02\lambda\sim 0.02\lambda$ 范围内的测量误差，具体各项测量误差见表 4-1 与表 4-2。M2 的位置误差见表 4-3。

表 4-1 测量误差 (-0.01λ~0.01λ)

Order	Wave aberration ($\lambda@632.8\text{nm}$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Z5	0.00503	0.00094	0.00629	0.00232	0.00834	-0.00848	0.00138	-0.00378	0.00378	-0.00695
Z6	-0.00490	-0.00723	-0.00513	-0.00053	-0.00428	-0.00892	-0.00061	0.00057	0.00496	0.00652
Z7	0.00012	-0.00701	0.00859	-0.00297	0.00514	0.00062	-0.00976	-0.00669	-0.00099	0.00077
Z8	0.00398	-0.00485	-0.00300	0.00662	0.00508	0.00558	-0.00326	0.00204	-0.00832	0.00992
Z10	0.00782	0.00681	-0.00607	0.00171	-0.00239	0.00868	-0.00676	-0.00474	-0.00542	-0.00844
Z11	0.00919	-0.00491	-0.00498	0.00099	0.00136	-0.00740	0.00589	0.00308	0.00827	-0.00115
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Z5	-0.00685	0.00941	0.00914	-0.00029	0.00601	-0.00716	-0.00156	0.00832	0.00584	0.00919
Z6	0.00312	-0.00929	0.00698	0.00868	0.00358	0.00516	0.00486	-0.00216	0.00311	-0.00658
Z7	0.00412	-0.00936	-0.00446	-0.00908	-0.00806	0.00647	0.00390	-0.00366	0.00900	-0.00931
Z8	-0.00123	-0.00237	0.00531	0.00590	-0.00626	-0.00020	-0.00109	0.00293	0.00419	0.00509
Z10	-0.00448	0.00359	0.00310	-0.00675	-0.00762	-0.00037	0.00920	-0.00319	0.00171	-0.00552
Z11	0.00503	-0.00490	0.00012	0.00398	0.00782	0.00919	0.00094	-0.00723	-0.00701	-0.00485

表 4-2 测量误差 (-0.02λ~0.02λ)

Order	Wave aberration ($\lambda@632.8\text{nm}$)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Z5	-0.00046	0.00314	-0.01051	-0.00165	0.01852	0.00187	0.00085	-0.01074	-0.00044	0.00496
Z6	-0.00659	0.00719	-0.01454	0.00885	-0.01573	0.00615	-0.00023	0.01116	0.00860	0.01615
Z7	0.00471	0.01438	0.01222	0.00307	-0.01268	-0.01040	0.01546	-0.01885	-0.00040	-0.01328
Z8	0.01273	0.01270	0.00890	-0.01401	0.00638	0.00074	0.01892	0.00596	0.01201	-0.00185
Z10	0.00108	-0.00333	0.00627	0.00512	-0.00832	-0.00273	-0.01938	0.01936	-0.01331	-0.01575
Z11	0.00192	0.01771	-0.00329	0.01932	-0.00794	0.00804	0.00665	0.00157	0.00792	0.00666
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Z5	0.00717	-0.00418	-0.00530	0.01952	-0.01849	0.01541	0.01653	0.01185	-0.01605	-0.00953
Z6	0.01564	-0.00663	0.00795	-0.01209	-0.01878	0.00976	0.00000	-0.00080	0.01619	0.00440
Z7	0.01914	0.00851	0.00002	-0.00116	-0.01762	0.00728	-0.01830	-0.01714	0.00087	-0.01613
Z8	-0.00270	0.01301	-0.01666	-0.01467	-0.01306	-0.00436	0.01326	0.01214	-0.01758	-0.00403
Z10	-0.00510	-0.01208	-0.00041	-0.00642	0.01807	0.01681	-0.01789	0.00951	-0.00924	-0.00309
Z11	-0.01287	-0.01488	0.01996	-0.01316	-0.01870	0.00245	0.01528	0.00677	-0.01238	-0.00524

表 4-3 M2 的位置误差

dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	tx (°)	ty (°)
0.1146	-0.1062	-0.2750	-0.0874	0.1173

将添加测量误差后的 $C_{5,r}$ 、 $C_{6,r}$ 、 $C_{7,r}$ 、 $C_{8,r}$ 、 $C_{10,r}$ 与 $C_{11,r}$ 作为优化函数的目标值,使用 ZEMAX 进行逆向优化,单次逆向优化时间 1 分钟,评价函数残差在 1×10^{-4} 和 3×10^{-4} 之间。表 4-4 为在不同范围的测量误差干扰下,使用不同口径的中心圆域完成装调对应的位置误差(20 次仿真的平均值)与中心视场波像差的 RMS 残差(20 次仿真的平均值)。图 4-12 和图 4-13 分别为测量误差在 $-0.01\lambda \sim 0.01\lambda$ 和 $-0.02\lambda \sim 0.02\lambda$ 范围内,使用不同口径的中心圆域完成装调后 ΔP_r 对 AIMS 望远系统全视场波像差的 RMS 值的影响。

根据环境误差的仿真分析,提高中心圆域方案的实际装调精度主要方法有以下两种:

- ①尽可能增大中心圆域的口径,提高各项 Zernike 多项式系数的灵敏度;
- ②装调环境保持稳定,减小测量误差。

结合实际的装调设备与环境条件条件,AIMS 望远系统静态装调将使用 450mm 口径的标准平面反射镜进行装调,使用 100 帧叠加平均,将测量误差的影响控制在 $-0.01\lambda \sim 0.01\lambda$ 之间。

表 4-4 测量误差对 M2 的位置误差计算的影响

Aperture (mm)	measurement error (λ)	Δdx (mm)	Δdy (mm)	Δdz (mm)	Δtx ($^\circ$)	Δty ($^\circ$)	W_r of central FOV (λ)
370	-0.02~0.02	0.0115	0.0300	0.2272	0.0142	0.0017	0.0770
	-0.01~0.01	0.0048	0.0229	0.1065	0.0057	0.0007	0.0404
450	-0.02~0.02	0.0116	0.0308	0.1157	0.0071	0.0014	0.0341
	-0.01~0.01	0.0090	0.0180	0.0513	0.0033	0.0005	0.0215
550	-0.02~0.02	0.0036	0.0182	0.0632	0.0030	0.0004	0.0105
	-0.01~0.01	0.0048	0.0122	0.0281	0.0019	0.0012	0.0116
1000	-0.02~0.02	0.0052	0.0109	0.0109	0.0016	0.0003	0.0014
	-0.01~0.01	0.0070	0.0089	0.0064	0.0014	0.0019	0.0010

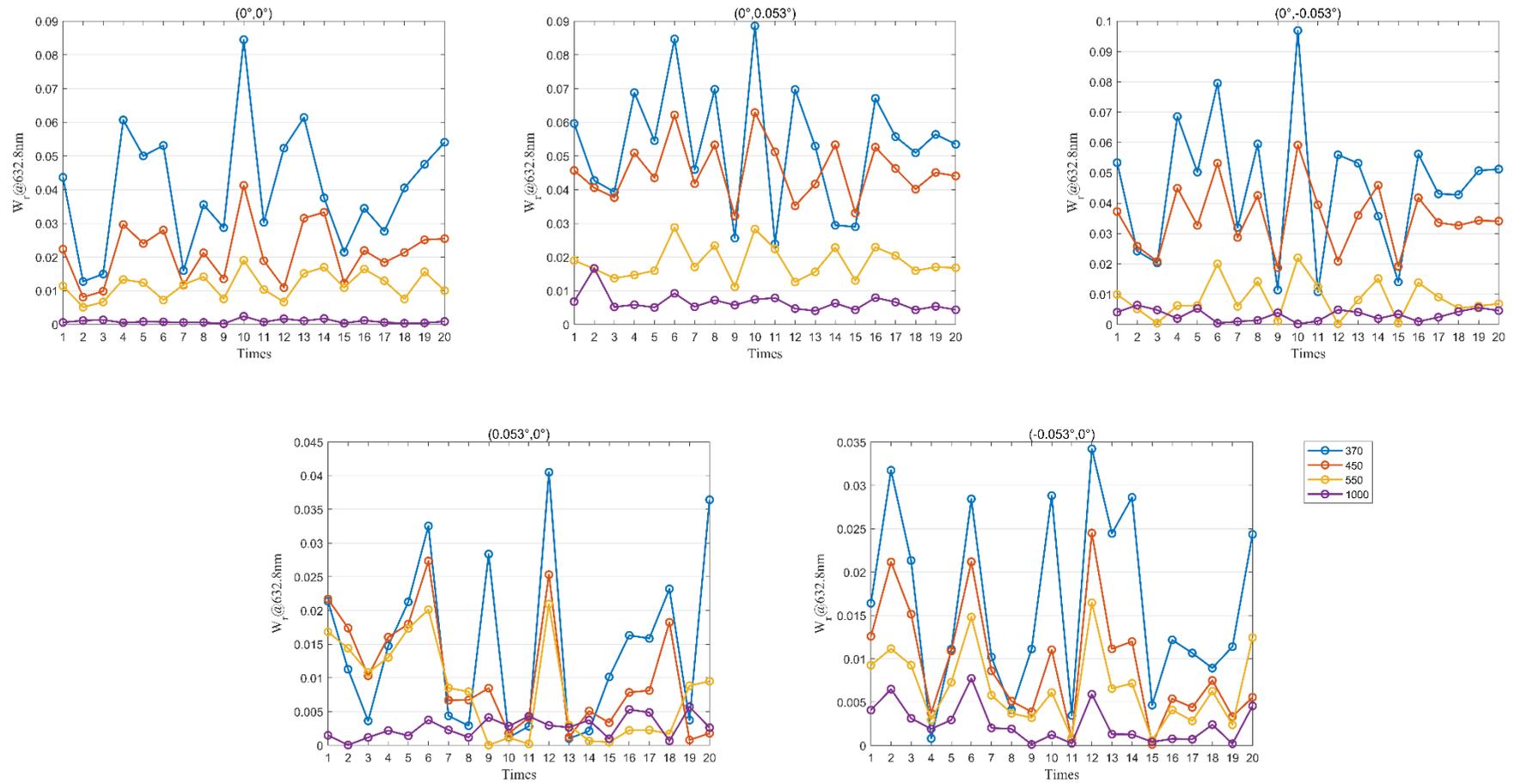


图 4-12 测量误差为 $-0.01\lambda\sim 0.01\lambda$ 时不同中心口径模拟装调完成后 AIMS 望远系统各视场的波前 RMS 残差

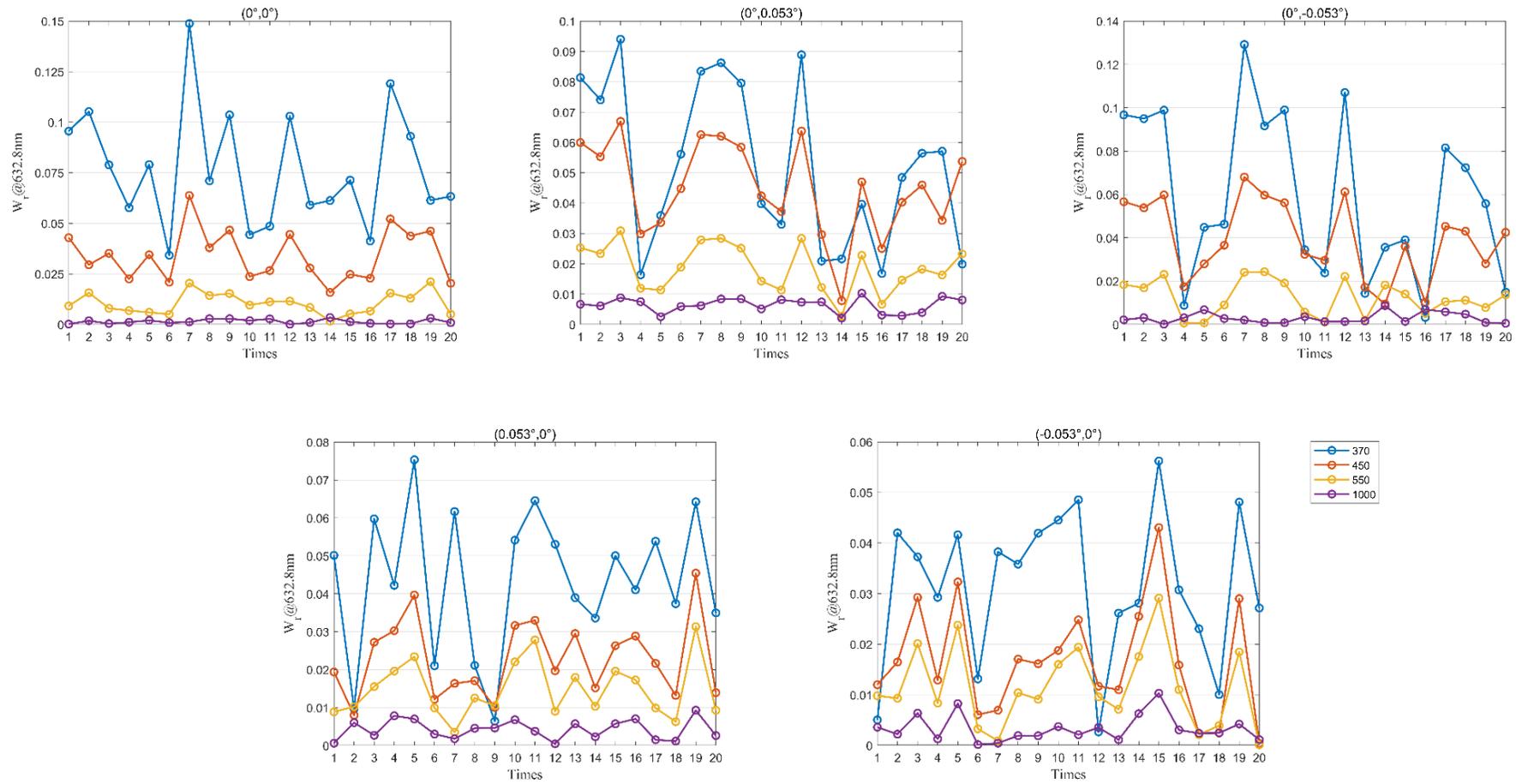


图 4-13 测量误差为 $-0.02\lambda \sim 0.02\lambda$ 时不同中心口径模拟装调完成后 AIMS 望远系统各视场的波前 RMS 残差

4.4 小结

本章详细介绍了中心小口径圆域干涉装调方案的原理与重要参数的选择标准，开展了理想装调环境下与非理想装调环境下的装调方案仿真，分析了不同范围的环境噪声对装调精度的影响，结合实际的装调设备，选定 AIMS 望远系统装调使用的标准平面反射镜的口径，并给出现场装调测量误差允许的误差范围。

第5章 AIMS 望远系统静态精密装调实验

AIMS 望远系统静态装调主要包括：主次镜在位面型检测、小口径标准平面反射镜检测、中心视场标定、干涉装调光路的搭建以及外场实验室与野外台站装调，本章将详细介绍各个环节的具体的装调检测过程与结果。

5.1 光学元件面型检测与系统中心视场标定

5.1.1 小口径标准平面反射镜面型检测

AIMS 望远系统将使用一块口径 450mm 的标准平面反射镜进行检测装调，标准平面反射镜是检测装调的基准，因此在实际装调前，需开展平面反射镜的面型标定工作。

450mm 标准平面反射镜俯仰倾斜 14.036° 状态下的面型测量光路如图 5-1 所示。4D 动态干涉仪、450mm 标准平面反射镜与标准球面镜共同构成干涉检测光路，其中 4D 动态干涉仪放置在标准球面反射镜焦点处，其发射出的球面波经过倾斜状态下的 450mm 标准平面反射镜与标准反射镜的反射回到 4D 动态干涉仪。经测量，450mm 标准平面反射镜在倾斜状态下面型为 $0.0237\lambda@632.8\text{nm}$ ，满足装调要求，面型检测结果如图 5-2 所示。

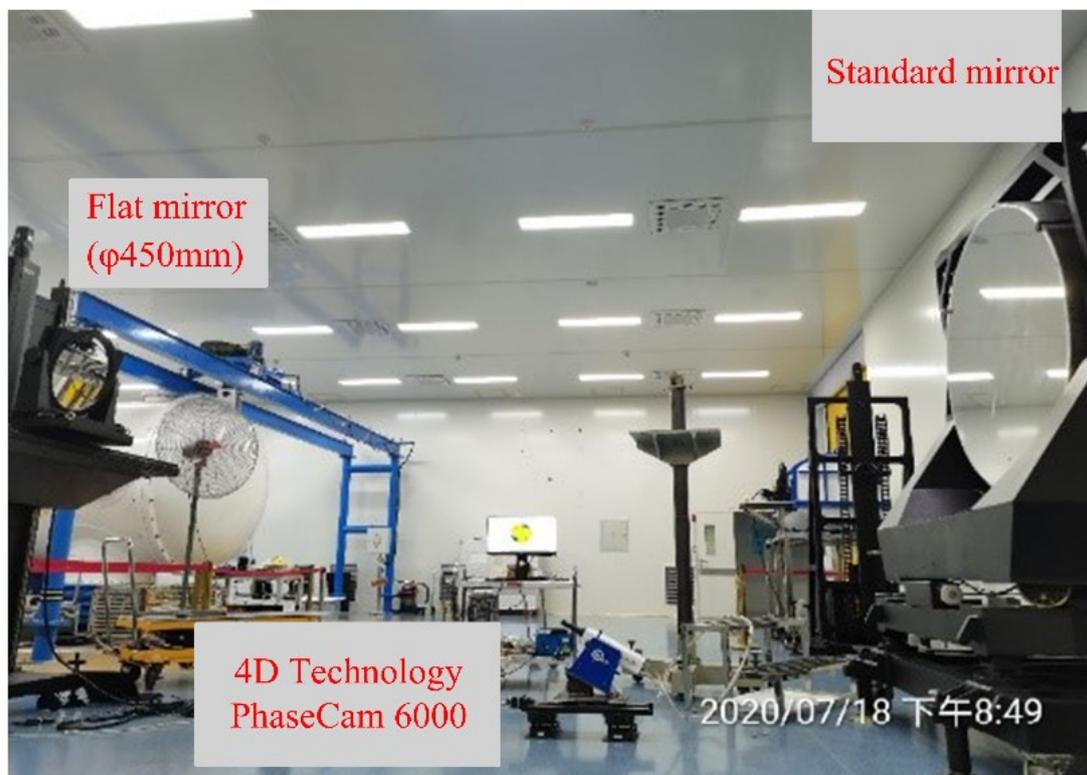


图 5-1 450mm 标准平面反射镜面型检测光路

RMS: $0.0237\lambda@632.8\text{nm}$

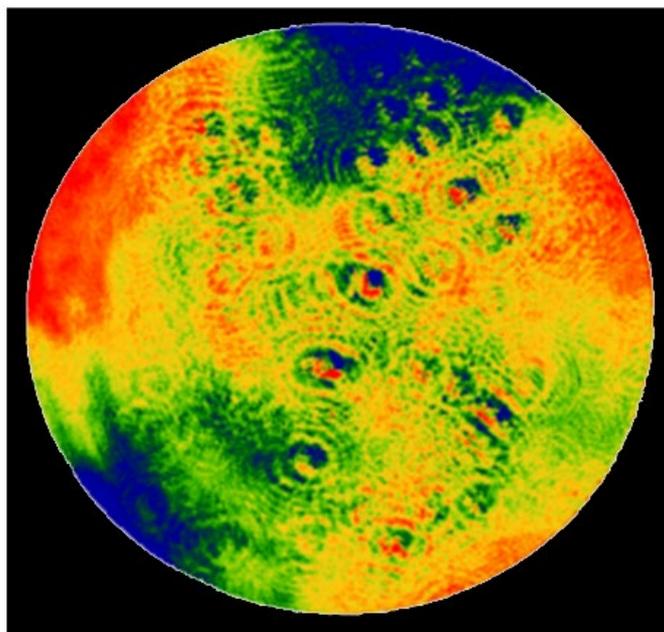


图 5-2 450mm 标准平面反射镜倾斜 14.036°后实测面型

5.1.2 主镜(M1)面型检测与系统中心视场标定

AIMS 望远系统主镜 (M1) 轴向支撑采用 18 点浮动支撑, 主镜背部 18 点支撑结构贴合; 径向支撑使用 6 个杠杆-重锤机构, 沿着主镜径向方向进行重力卸载。图 5-3 与图 5-4 分别为 M1 轴向支撑与径向支撑的设计示意图与实际工装图。M1 安装在主镜框之后将安装在望远镜桁架上, M1 镜面与大地垂直。

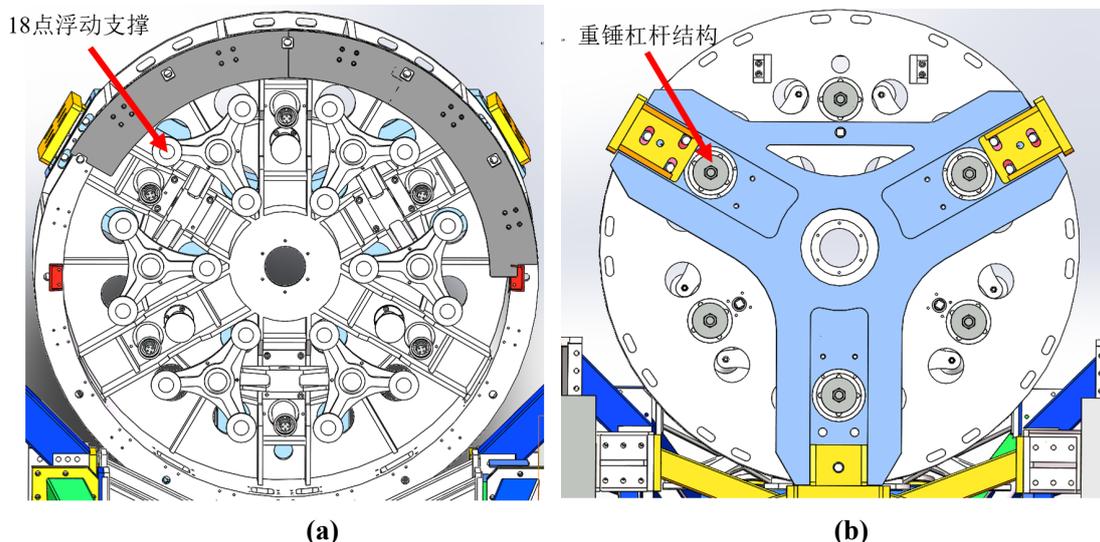


图 5-3 (a)M1 轴向支撑结构机械设计图 (b)M1 径向支撑结构机械设计图

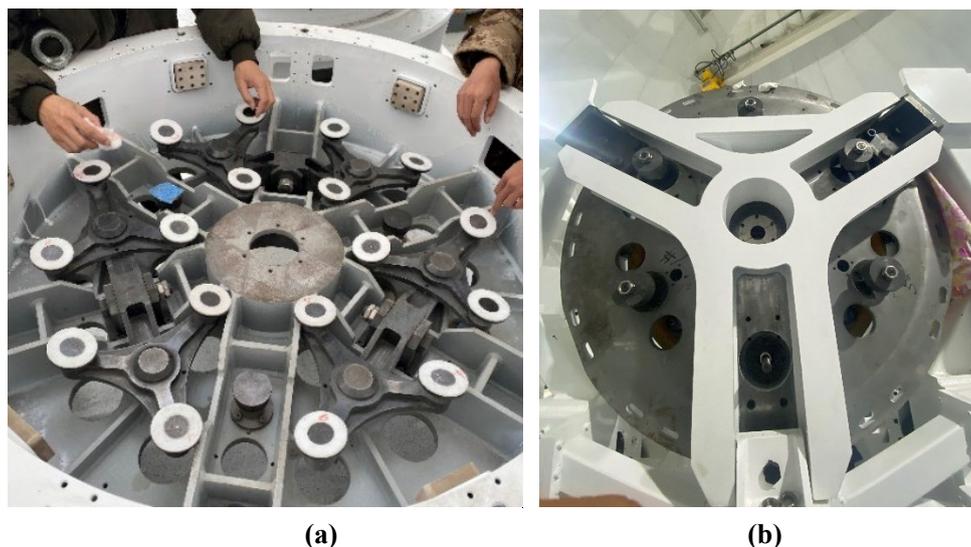


图 5-4 (a)M1 轴向支撑结构实际工装 (b)M1 径向支撑结构实际工

M1 面型的在为检测将采用子口径拼接检测方案，检测光路如图 5-5 所示。450mm 标准平面反射镜放置在主镜前，4D 动态干涉仪放置在通过机械定位的 M1 焦点处，需要注意的是，使用机械定位方式确定的 M1 焦点位置与实际 M1 焦点之前存在偏差，在检测过程中需根据实测像点调整干涉仪的位置姿态。

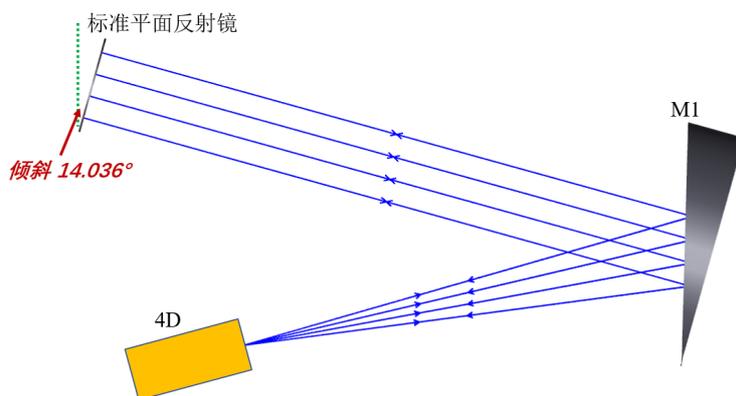


图 5-5 M1 面型检测光路图

M1 面型测量需在中心视场下进行。因此在 M1 面型检测之前，需要进行 450mm 标准平面反射镜与 M1 的相对位置的粗标定。首先使用经纬仪标定主镜背面的空间姿态，以主镜背面为基准，将 450mm 标准平面反射镜相对于主镜背面基准俯仰 14.036°。因为主镜背面存在平行度误差，在实际 M1 面型测量过程中，根据干涉仪实测的面型数据进行标准平面反射镜的位置姿态的精标定。

完成上述前期工作后，进行 M1 的面型检测工作。根据 M1 焦点处波像差的灵敏度分析，中心小口径圆域(直径 450mm)内入射光视场的变化只对像散(Z5/Z6)产生影响，中心视场为像散最小值，图 5-6 为 M1 焦点处 Z5、Z6 项对应系数与视场的灵敏度曲线。因此在实际面型检测时，根据 4D 动态干涉仪获得的中心小

口径圆域（直径 450mm）内实时的波像差数据对小口径标准平面反射镜的姿态进行精定位，当小口径圆域内的像散值达到最小时，认为此时平面反射镜的姿态为中心视场，再依次进行子口径扫描，最后将各子孔径数据进行拼接，获得 M1 的在位面型数据。

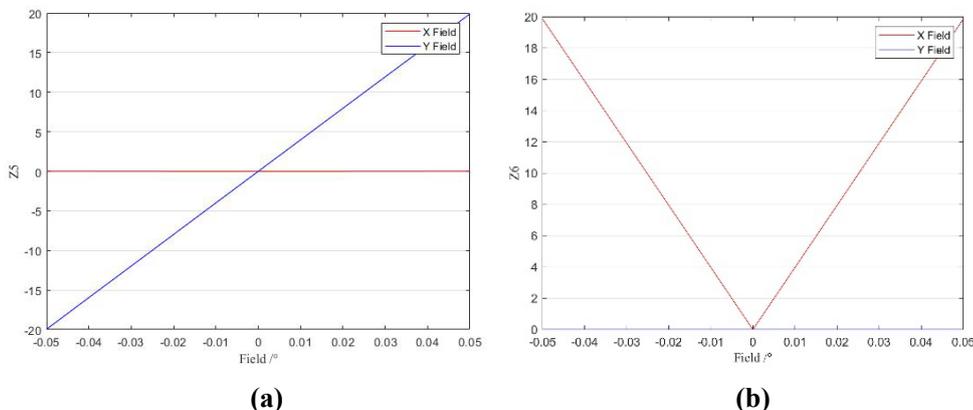


图 5-6 M1 焦点处中心 450mm 圆域内 Z5/Z6 视场灵敏度曲线 (a)Z5 (b)Z6

M1 面型测量完成之后，使用经纬分别测量主镜背面与标准平面反射镜的位置姿态，从而确定系统的中心视场。

5.1.3 次镜(M2)面型检测

AIMS 望远系统次镜 (M2) 通过侧面三点圆周粘胶的方式与次镜框相连接，次镜框使用螺钉固定在六杆机构上。六杆机构型号为 H-850.G2A，具体性能参数见表 5-1。M2 面型检测光路示意图如图 5-7 所示，在 M2 短轴焦点处放置 4D 动态干涉仪，在长轴焦点后方放置标准球面反射镜，标准球面反射镜的焦点与 M2 长轴焦点重合。图 5-8 为 M2 面型测量实际光路。

表 5-1 H-850.G2A 型六杆机构性能参数

Motion	Unit	
Travel range in X	mm	±50
Travel range in Y	mm	±50
Travel range in Z	mm	±25
Rotation range in θX	°	±15
Rotation range in θY	°	±15
Rotation range in θZ	°	±30
Minimum incremental motion in X	μm	1
Minimum incremental motion in Y	μm	1
Minimum incremental motion in Z	μm	0.5
Minimum incremental motion in θX	"	1.5
Minimum incremental motion in θY	"	1.5
Minimum incremental motion in θZ	"	3

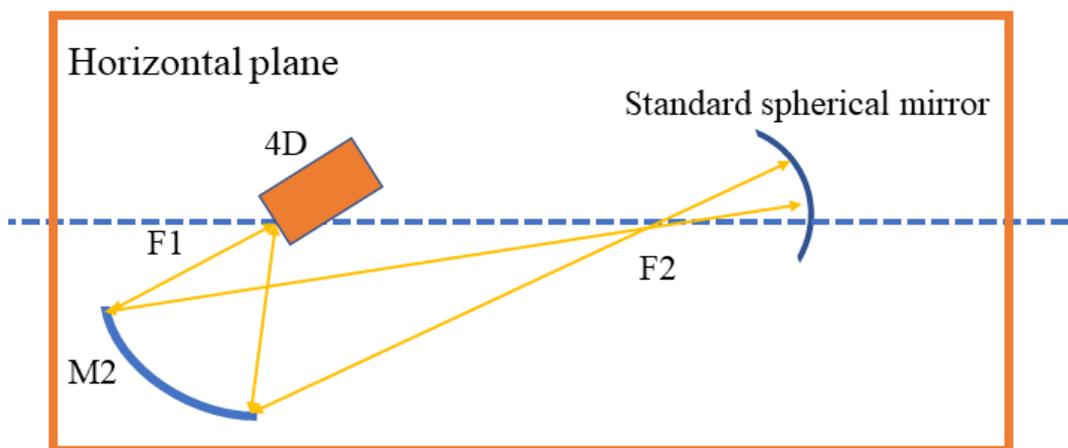


图 5-7 M2 面型检测光路示意图

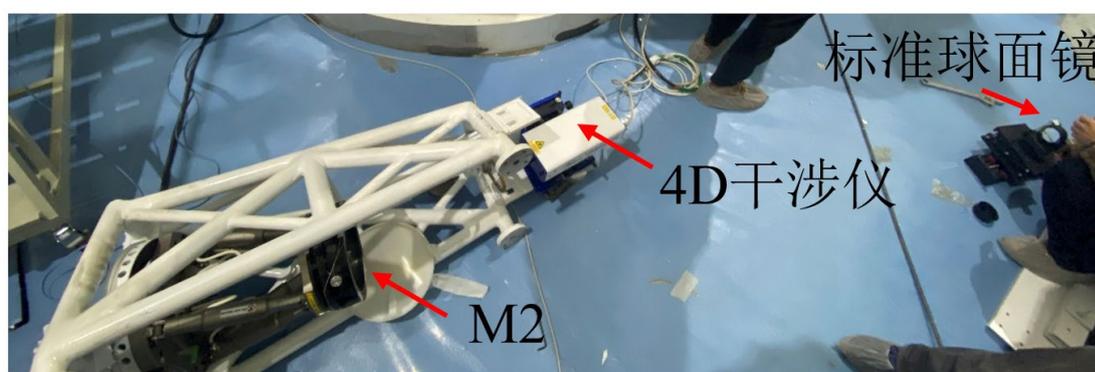


图 5-8 M2 面型检测实际光路

5.1.4 主次镜热分析

根据冷湖台址实测的气象数据，AIMS 工作环境温度范围为 $-10^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。在实际的工作中镜面面型受低温影响较大。因此，主次镜热分析将围绕模极限低温 -10°C 进行。

5.1.4.1 主镜面型低温热分析

由于主镜口径较大，其面型精度容易受到自身重力和环境温度变化等因素的影响。因此选用高刚度、高强度且膨胀系数低的微晶玻璃作为主镜的材料。主镜实际口径为 1100mm ，厚度为 150mm ，导热率为 $1.46\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 膨胀系数为 $0.13\cdot 10^{-7}/\text{K}$ 。在装调过程中，主镜背部与大地垂直，主镜重力完全依靠底部 6 点杠杆-重锤承担，其热分析有限元模型如图 5-9 所示。

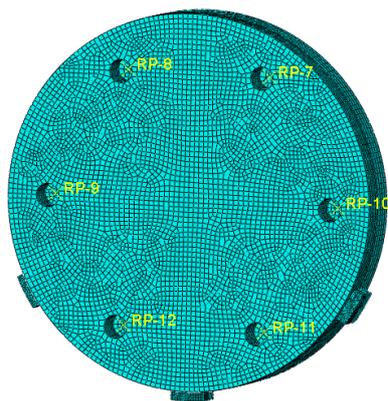


图 5-9 主镜背部与大地垂直时主镜支撑有限元模型

在环境温度为-10℃主镜背部与大地垂直状况下,通过有限元计算主镜整体变形如图5-10所示,主镜镜面变形如图5-11所示。提取主镜面型变形数据,通过面型拟合, -10℃时主镜面型形变RMS值为 $1/134\lambda@632.8\text{nm}$ 。

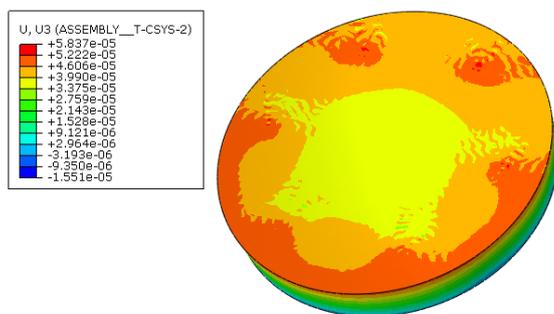


图5-10 -10℃主镜背部与大地垂直时主镜整体变形图

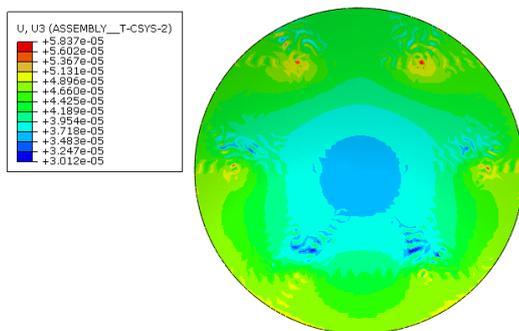


图5-11 -10℃主镜背部与大地垂直时主镜面型变形图

当主镜被太阳照射10小时后,主镜表面温度呈现中间温度高,四周温度低的分布,图5-12为阳光照射后主镜表面温度分布。

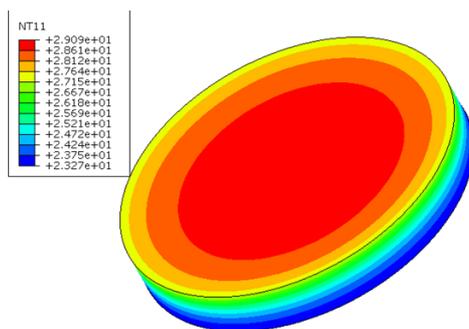


图5-12 阳光照射后主镜表面温度分布

被太阳照射10小时后，当主镜背面与大地垂直时，通过有限元计算主镜整体变形如图5-10所示，主镜镜面变形如图5-11所示。提取主镜面型变形数据，通过面型拟合，被太阳照射10小时后，主镜背部与大地垂直时主镜面型形变RMS值为 $1/159.5\lambda@632.8\text{nm}$ 。

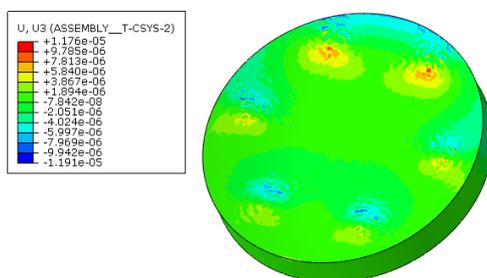


图5-13 主镜被太阳照射后，其背部与大地垂直时主镜整体变形图

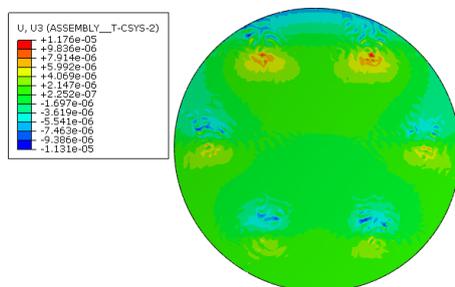


图5-14 主镜被太阳照射后，其背部与大地垂直时主镜面型变形图

5.1.4.2 次镜面型热分析

次镜与主镜材料一致，口径为 220mm，厚度为 35mm，与六杆机构连接采用背部粘胶的形式。在环境温度为 -10°C 时，通过有限元计算次镜整体变形如图 5-15 所示，次镜镜面变形如图 5-16 所示。提取次镜面型变形数据，通过面型拟合，次镜面型形变 RMS 值为 $1/61\lambda@632.8\text{nm}$ ，整体呈现出三叶像散分布。

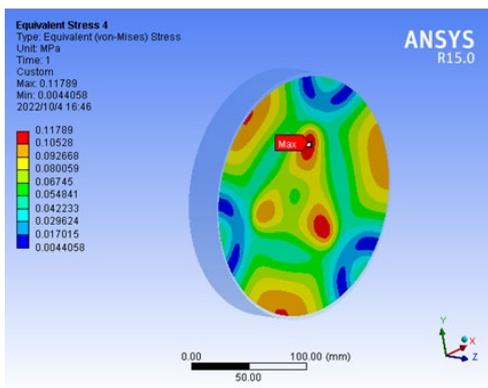


图5-15 -10°C次镜整体变形图

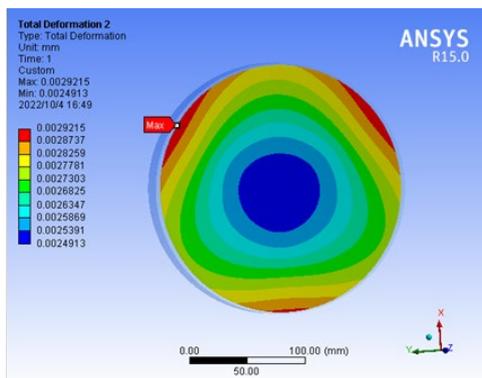


图5-16 -10°C次镜面型变形图

当次镜被太阳照射10小时后，次镜表面温度呈现中间温度低，四周温度高的分布，图5-17为阳光照射后次镜表面温度分布。

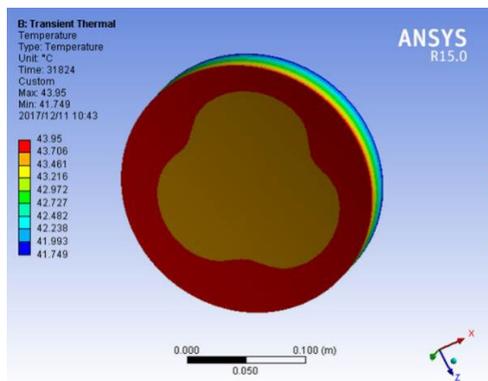


图5-17 阳光照射后次镜表面温度分布

太阳照射10小时后，通过有限元计算次镜镜面变形如图5-18所示。提取次镜面型变形数据，通过面型拟合，被太阳照射10小时后，次镜面型形变RMS值为 $1/97.6\lambda@632.8\text{nm}$ 。

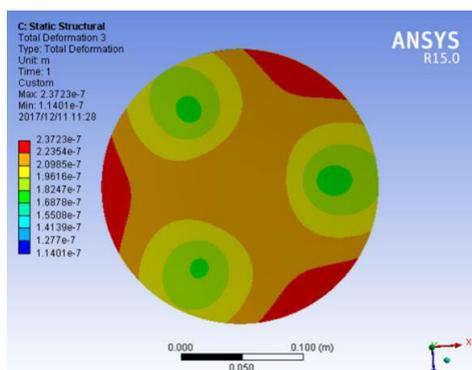


图5-18 太阳照射后次镜面型变形图

需要注意的是，主次镜面型热分析涉及光学元件、机械结构支撑、粘胶工艺等诸多方面，分析结果与实际面型可能存在误差。在实际系统装调之前，需开展主次镜面型检测。

5.2 AIMS 望远系统静态精密装调流程

AIMS 望远系统装调使用 ZEMAX 光学软件的逆向优化功能进行位置误差的求解，具体装调流程如下：

步骤 1：将 M1 和 M2 的实测面型使用 Grid Phase 面输入到 AIMS 望远系统 ZEMAX 模型中，截取系统中心 450mm 圆域的理论波像差作为优化基底。

步骤 2：测量中心直径 450mm 圆域内的波像差，获得各项 Zernike 多项式系数 $C_{5,r}$ 、 $C_{6,r}$ 、 $C_{7,r}$ 、 $C_{8,r}$ 、 $C_{10,r}$ 与 $C_{11,r}$ 。

步骤 3：将步骤 2 测量所得的实测的获得各项 Zernike 多项式系数作为逆向优化函数的目标值，使用 ZEMAX 光学软件进行逆向优化，获得 M2 的位置误差。

步骤 4：将步骤 3 计算所得的位置误差输入到六杆中，再次测量中心直径 450mm 圆域内的波像差，当实测的 $C_{5,r}$ 、 $C_{6,r}$ 、 $C_{7,r}$ 、 $C_{8,r}$ 、 $C_{10,r}$ 与 $C_{11,r}$ 与步骤 1 中的理论值相差 ≤ 0.01 时，认为中心圆域装调完成，进行子口径拼接获得全口径波像差；当上述实测值与理论值的差值 > 0.01 时，返回步骤 3 进行迭代优化。

步骤 5：当子口径拼接所获得的全口径波像差 RMS 值 $\leq W_{actual}$ 时，AIMS 望远系统全口径装调完成；当子口径拼接所获得的全口径波像差 RMS 值 $> W_{actual}$ 时，返回步骤 3 进行 M2 位置误差的迭代计算，此时逆向优化函数的目标值使用全口径波像差对应的各项 Zernike 多项式系数。根据装调要求， W_{actual} 为理论全口径波像差的 1.25 倍。

图 5-19 为 AIMS 望远系统装调流程图。

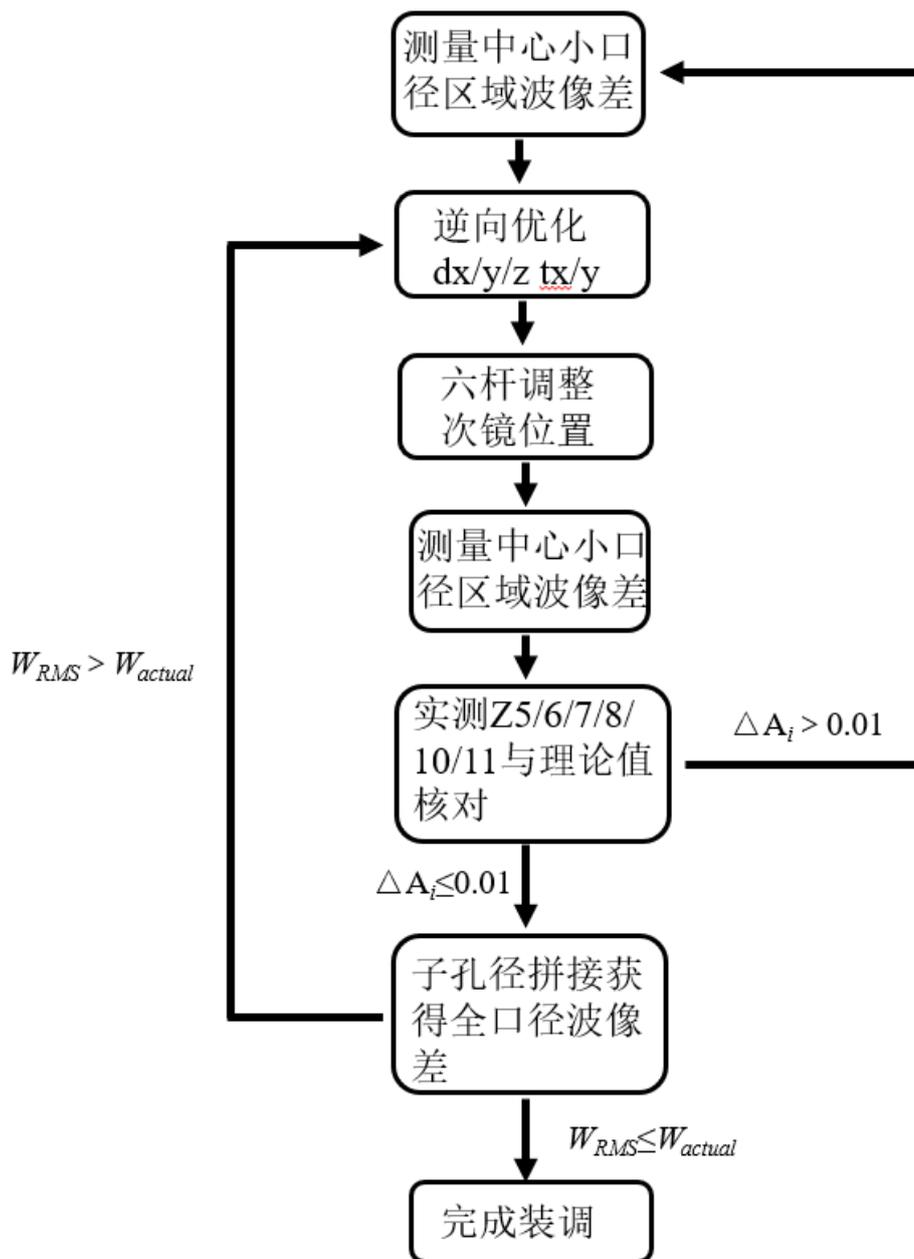


图 5-19 AIMS 望远系统装调流程图

为了获得装调后的全口径波像差，需要进行子口径拼接。AIMS 望远系统子口径拼接需要依次测量 9 个点位的子口径波像差数据，通过重叠区域上的数据进行波前数据的修正，达到最终的拼接结果。

5.3 外场装调实验

外场装调环境温度为 20°C，M1 与 M2 在位面型 RMS 值分别为 $0.033\lambda@632.8\text{nm}$ 和 $0.019\lambda@632.8\text{nm}$ ，面型检测结果如图 5-20 所示。将 M1 与 M2 实测的面型数据导入到 AIMS 望远系统 ZEMAX 模型，获得望远系统的理论波像差，

中心视场全口径波像差 RMS 值为 $0.064\lambda@632.8\text{nm}$ ， W_{actual} 为 $0.08\lambda@632.8\text{nm}$ ，中心圆域内的波像差 RMS 值为 $0.044\lambda@632.8\text{nm}$ ，各项 Zernike 多项式系数见表 5-2，系统理论波像差如图 5-21 所示。

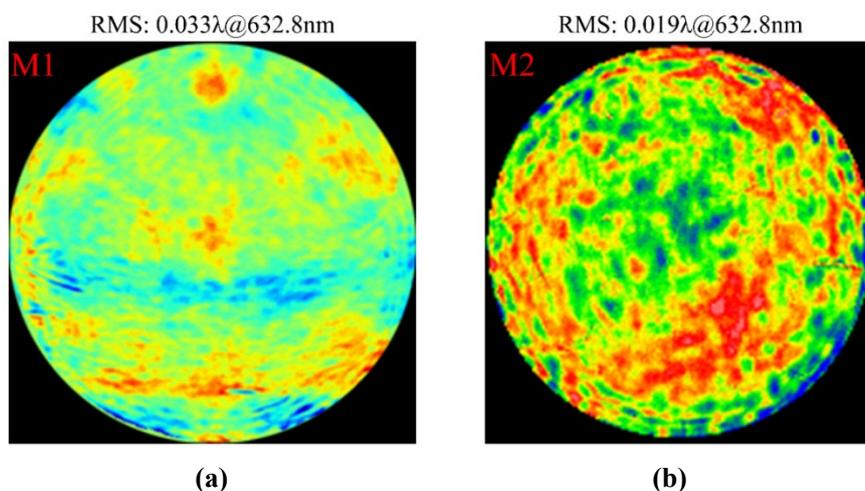


图 5-20 M1 与 M2 在位实测面型(20°C) (a)M1 (b)M2

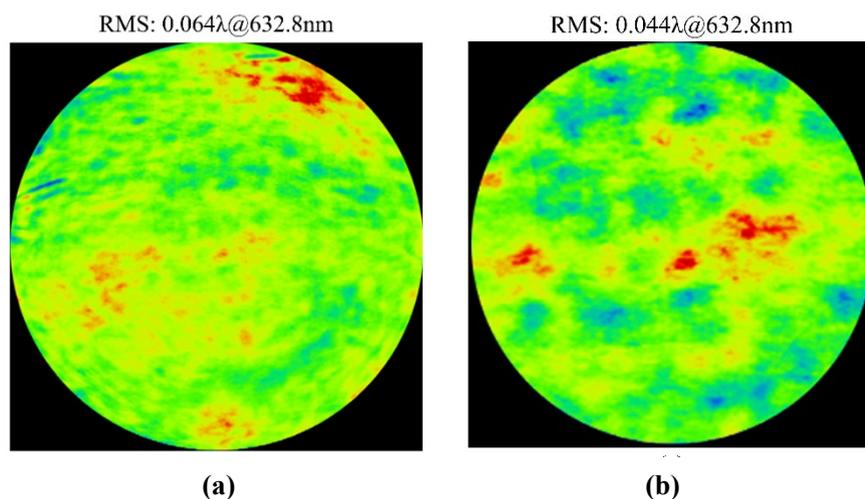


图 5-21 AIMS 望远系统中心视场理论波像差(20°C) (a)全口径 (b)中心 450mm 圆域

表 5-2 AIMS 望远系统中心圆域 (450mm) 中心视场 Zernike 多项式系数理论值

Wave aberration ($\lambda@632.8\text{nm}$)						
Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_{10}	Z_{11}	RMS
-0.0035	0.0326	-0.0104	-0.0222	0.0030	0.0132	0.0440

AIMS 望远系统外场实验室装调光路如图 5-22 所示。450mm 标准平面反射镜放置在望远系统前，根据 M1 面型检测时的空间位置数据，使用经纬仪标定标准平面反射镜与望远系统的相对位置，确保装调视场为望远系统中心视场。4D 动态干涉仪首先放置在由机械定位确定的望远系统焦点处，在装调过程根据实际像点调整 4D 动态干涉仪的位置姿态。

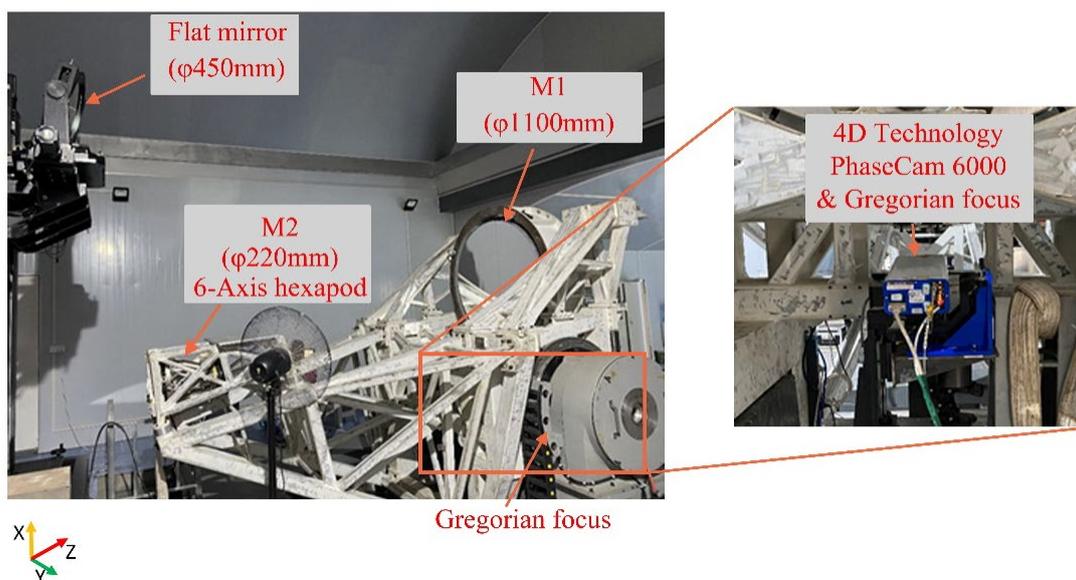


图 5-22 AIMS 望远系统外场实验室装调实际光路

在实际装调过程，中心小口径圆域干涉装调需迭代装调 2~6 次，完成全口径装调需进行 2~4 轮子口径拼接。第 1 轮中心小口径装调进行了 4 次迭代，中心小口径圆域内实测的各项 Zernike 多项式系数与理论值相差在 0.01 以内，此时中心小口径圆域内实测波像差 RMS 值为 $0.0468\lambda@632.8\text{nm}$ 。表 5-3 为每次迭代装调后中心小口径圆域内实测波像差数据，表 5-4 为每次迭代优化后的六杆数据。

表 5-3 第 1 次中心小口径装调实测波像差

Alignment number	Wave aberration ($\lambda@632.8\text{nm}$)						RMS
	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈	Z ₁₀	Z ₁₁	
Origin	-0.2010	0.0763	-0.0085	-0.0114	0.0056	0.0157	0.0949
1	-0.0725	0.0651	-0.0081	-0.0136	-0.0035	0.0140	0.0552
2	-0.0613	0.0501	-0.0133	-0.0318	-0.0172	0.0137	0.0512
3	-0.0386	0.0458	-0.0097	-0.0205	0.0032	0.0136	0.0457
4	-0.0115	0.0418	-0.0152	-0.0312	-0.0013	0.0178	0.0468

表 5-4 第 1 次中心小口径装调六杆位置

Alignment number	Position				
	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	tx (°)	ty (°)
1	-0.0449	-0.0505	0.0060	0.0077	0.040
2	-0.0428	-0.0023	0.0568	-0.0012	0.0042
3	-0.0035	-0.0005	0.0105	0.0024	-0.0018
4	-0.0021	0.0002	-0.0033	-0.0029	-0.0004

完成第 1 轮中心小口径装调后，平移标准平面反射镜进行子口径拼接获得全口径波像差为 $0.127\lambda@632.8\text{nm}$ ，如图 5-23 所示。此时全口径波像差未满足需进行第 2 轮中心小口径装调。

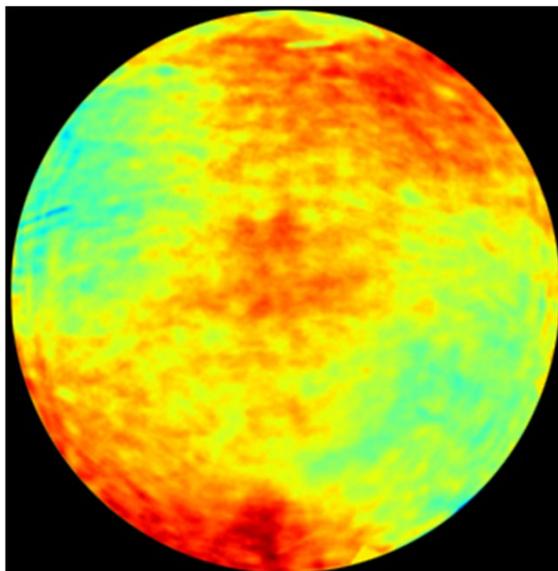
RMS: $0.127\lambda@632.8\text{nm}$ 

图 5-23 AIMS 望远系统外第 1 轮中心小口径装调后全口径波像差

第 2 轮中心小口径装调的初始优化数据使用全口径波像差数据, 经过 2 次迭代优化后, 中心小口径圆域内实测的各项 Zernike 多项式系数与理论值相差在 0.01 以内, 此时中心小口径圆域内实测波像差 RMS 值为 $0.0435\lambda@632.8\text{nm}$ 。表 5-5 为每次迭代装调后中心小口径圆域内实测波像差数据, 表 5-6 为每次迭代优化后的六杆数据。

表 5-5 第 2 次中心小口径装调实测波像差

Alignment number	Wave aberration ($\lambda@632.8\text{nm}$)						RMS
	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_{10}	Z_{11}	
1	-0.0256	0.0456	-0.0096	-0.0214	0.0032	0.0134	0.0442
2	-0.0056	0.0301	-0.0102	-0.0275	0.0018	0.0145	0.0435

表 5-6 第 2 次中心小口径装调六杆位置

Alignment number	Position				
	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	tx ($^\circ$)	ty ($^\circ$)
1	0.0270	-0.0326	-0.1371	0.0071	-0.0057
2	-0.0050	0.0057	-0.0055	0.0029	-0.0001

完成第 2 轮中心小口径装调后, 平移标准平面反射镜进行子口径拼接获得全口径波像差为 $0.075\lambda@632.8\text{nm}$, 如图 5-24 所示, 满足装调要求, AIMS 望远系统完成装调。

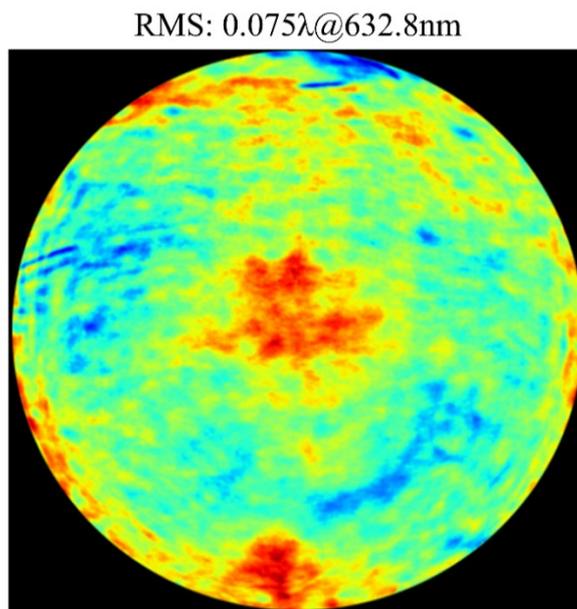


图 5-24 AIMS 望远系统装调完成后全口径波像差

5.4 冷湖台址装调

冷湖台址装调过程与外场实验室装调一致，因此本小结将不详细介绍冷湖台址装调的过程，仅展示最终的装调结果。由于冷湖台址的环境温度($-10^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$)远远低于外场实验时的环境温度(20°C)，本小结将分析讨论环境温度对装调的影响。

M1 与 M2 在冷湖台址进行面型检测时的环境温度为 -10°C ，M1 与 M2 在位面型 RMS 值分别为 $0.074\lambda@632.8\text{nm}$ 和 $0.041\lambda@632.8\text{nm}$ ，检测结果如图 5-25 所示。将 M1 与 M2 实测的面型数据导入到 AIMS 望远系统 ZEMAX 模型，获得望远系统的理论波像差，中心视场全口径波像差 RMS 值为 $0.126\lambda@632.8\text{nm}$ ， W_{actual} 为 $0.1575\lambda@632.8\text{nm}$ ，系统理论波像差如图 5-26 所示。

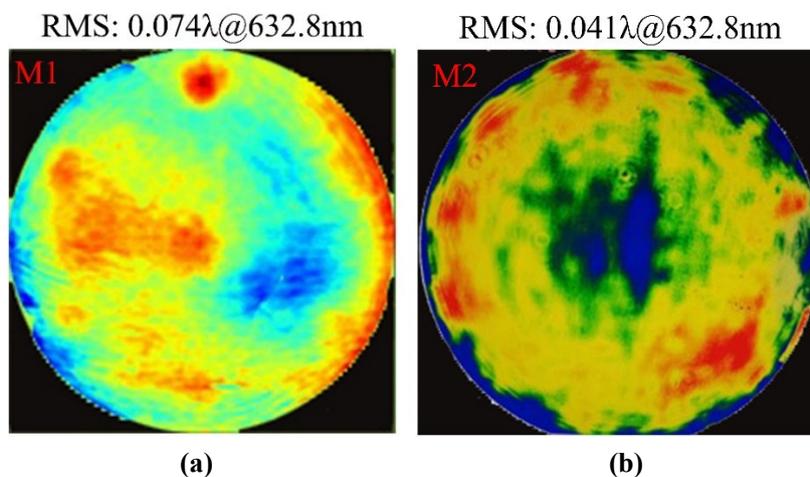


图 5-25 M1 与 M2 在位实测面型(20°C) (a)M1 (b)M2

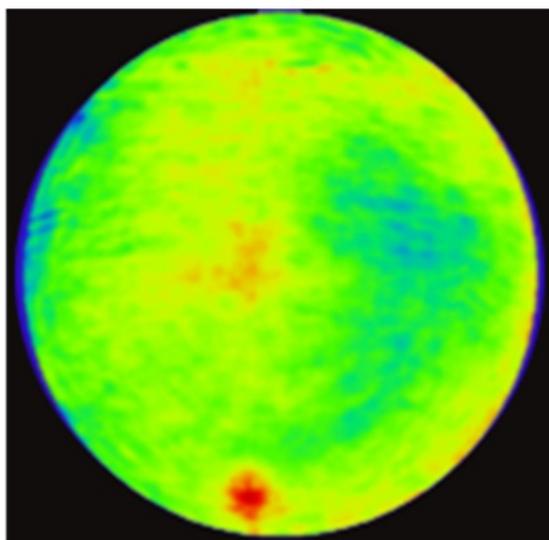
RMS: $0.126\lambda@632.8\text{nm}$ 

图 5-26 AIMS 望远系统中心视场理论波像差(-10°C)

AIMS 望远系统在环境温度分别为-10°C、-2°C、0°C、3°C和 10°C时的环境温度下进行了望远系统装调,各环境温度下装调完成后 AIMS 望远系统中心视场实测波像差如图 5-27 所示,不同环境温度下系统中心视场全口径波像差 RMS 均小于 $0.1575\lambda@632.8\text{nm}$ 。

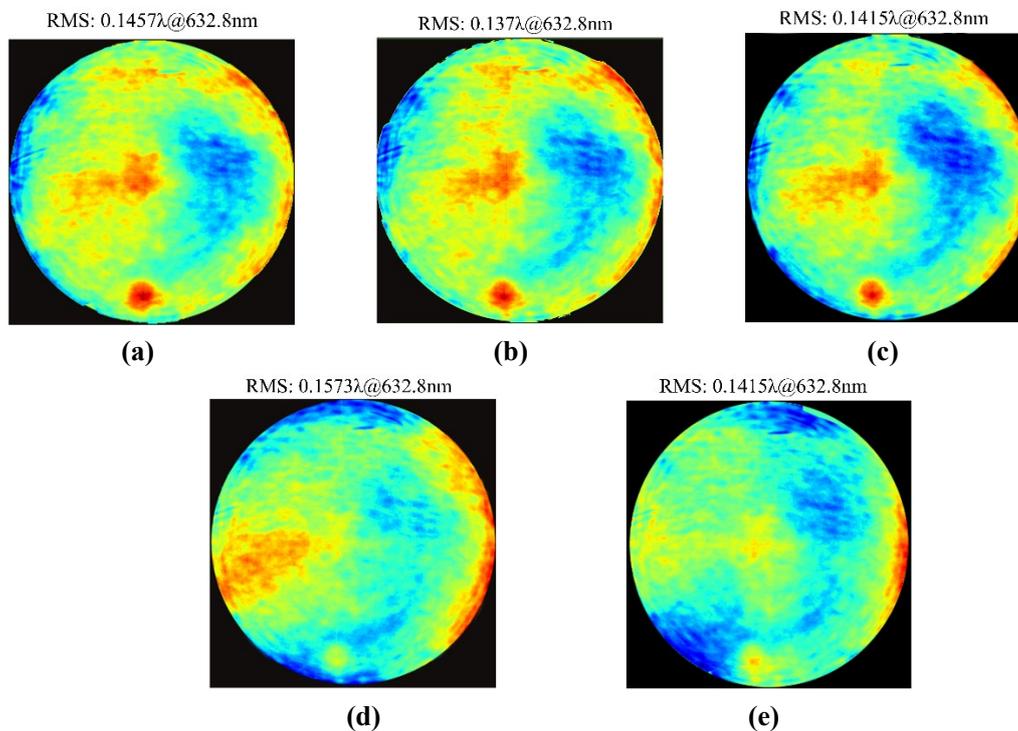


图 5-27 AIMS 望远系统不同温度下装调完成后中心视场波像差 (a)-10°C (b)-2°C (c)0°C (d)3°C (e)10°C

因为 AIMS 望远镜桁架较长,在不同的环境温度下,桁架在光轴方向上的形

变最为明显。根据不同环境温度下完成系统装调后的六杆机构位置坐标，Z 方向的调整量与温度呈明显的线性关系，温度每变化 1°C ，六杆将延光轴方向移动约 0.04mm ，图 5-28 为温度与六杆 Z 方向变化曲线。根据第 3 章的分析，光学元件的间隔误差将引起球差，在离轴系统，光学间隔误差引起的球差将转换为彗差与像散。对于 AIMS 望远系统，M1 与 M2 的间隔误差主要影响 Z8 项对应的系数。因此 AIMS 望远系统在不同环境温度下进行观测时，在根据实验数据完成六杆机构位置修正后，可以继续通过 Z8 项对应的系数进行六杆机构位置的精调。

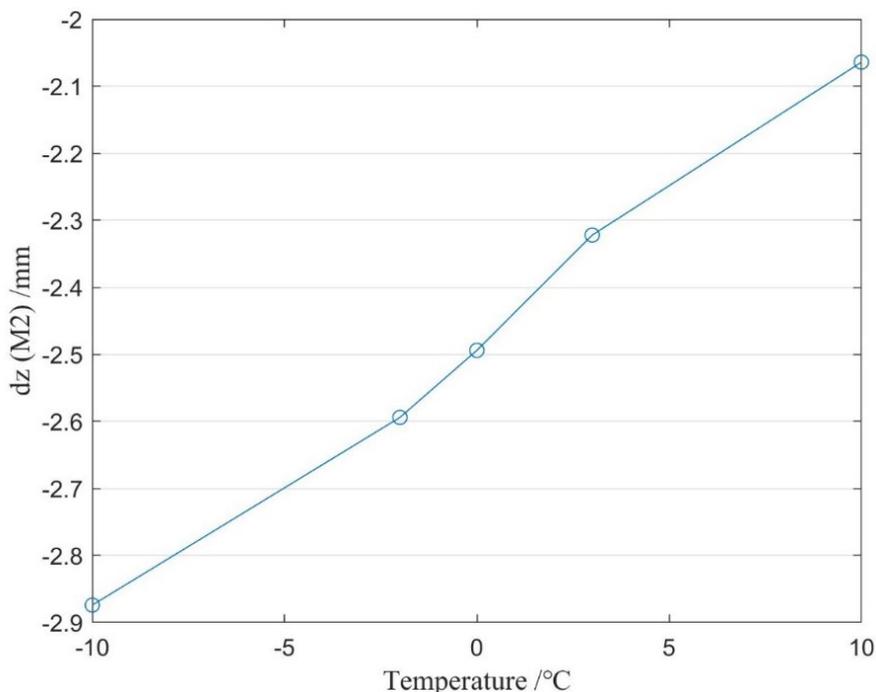


图 5-28 环境温度与六杆 Z 方向平移量的对应曲线

5.5 小结

本章详细介绍了 AIMS 望远系统中各光学元件面型的测量方法与中心视场标定方法；开展了外场实验室装调，首次实现了使用小口径标准平面反射镜进行大口径光学系统的装调实验，实验结果表明，中心小口径圆域装调方案满足实际的装调需求，简化了特殊姿态下离轴望远系统光学装调流程，有效提高了装调效率；开展了冷湖台址装调，分析了环境温度对装调结果的影响，结合装调结果，给出了不同环境温度下六杆机构 Z 轴方向的平移曲线，为 AIMS 望远镜在不同环境温度下六杆机构的调整提供了参考。

第 6 章 AIMS 望远系统动态精密装调方案设计

AIMS 望远系统在实际观测过程中,因为重力的影响,不同姿态下的桁架弯沉形变不同,并且不同环境温度导致的桁架热变形不同,从而导致 M2 与 M1 的相对位置误差。因此,在 AIMS 实际观测过程中监测并及时修正 M2 的位置误差是保证 AIMS 望远镜观测数据质量的关键一环。Shack-Hartmann 传感器目前广泛应用于自适应光学与主动光学领域(Merkle, 1990; 夏爱利, 2011; Marino et al, 2016; 姜文汉, 2018; 丰帆 等, 2018), 可以进行实时波像差的测量, GST 太阳望远镜与 DKIST 太阳望远镜在其动态装调中也使用 Shack-Hartmann 波前传感器进行次镜位置的实时调整。AIMS 望远系统动态装调将使用 Shack-Hartmann 波前传感器测量不同姿态下的实时系统波像差。但是在实际装调过程中,因为大气视宁度的干扰,实测的波像差中包含了系统设计残差、光学元件面型误差、装调误差与大气湍流,因此如何有效的减小大气视宁度对装调误差计算的干扰是 AIMS 望远系统动态精密装调方案的研究重点。

本章将介绍 Shack-Hartmann 传感器的工作原理与波像差反演原理; 结合冷湖台址的实测视宁度分析不同视宁度对 AIMS 望远系统动态装调的影响; 为 AIMS 望远系统制定实际的动态装调策略。

6.1 Shack-Hartmann 波前传感器

6.1.1 工作原理

Shack-Hartmann 传感器由微透镜阵列 (Microlens array, MLA) 与焦面探测器组成(Platt et al, 2001; Neal et al, 2002)。MLA 放置在入射光线经过光学系统后形成的出瞳处,共有 $N \times N$ 个微透镜; 探测器放置在 MLA 的焦面处。图 6-1 为 Shack-Hartmann 波前传感器示意图。

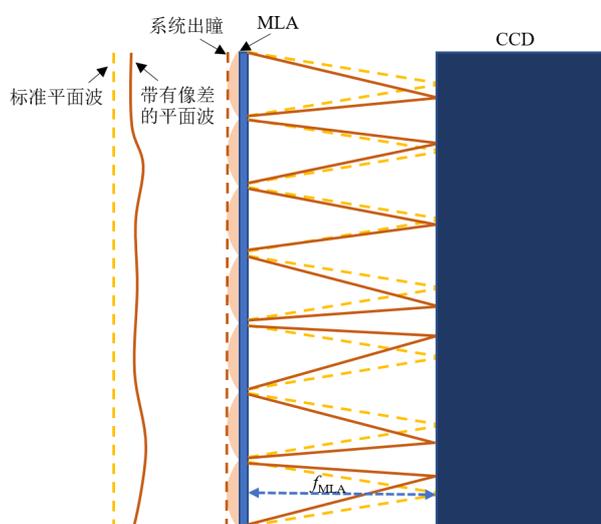


图 6-1 Shack-Hartmann 传感器

当光学系统是完善成像系统时，系统出瞳处为标准平面波，经 MLA 分割成的子光束分别汇聚在其子口径对应区域的中心；当光学系统存在设计残差与装调误差时，系统出瞳处为带有像差的平面波，经 MLA 分割成的子光束将分别汇聚在子口径的不同区域，汇聚光斑的质心相对于子口径的中心在 X 与 Y 方向上存在偏移分别为 d_x 和 d_y ，从而得到实测光斑相对于中心点的斜率：

$$\begin{cases} k_x = \frac{d_x}{f_{MLA}} \\ k_y = \frac{d_y}{f_{MLA}} \end{cases} \quad (6-1)$$

其中 f_{MLA} 为 MLA 的焦距。图 6-2 为微透镜阵列实测光斑示意图。

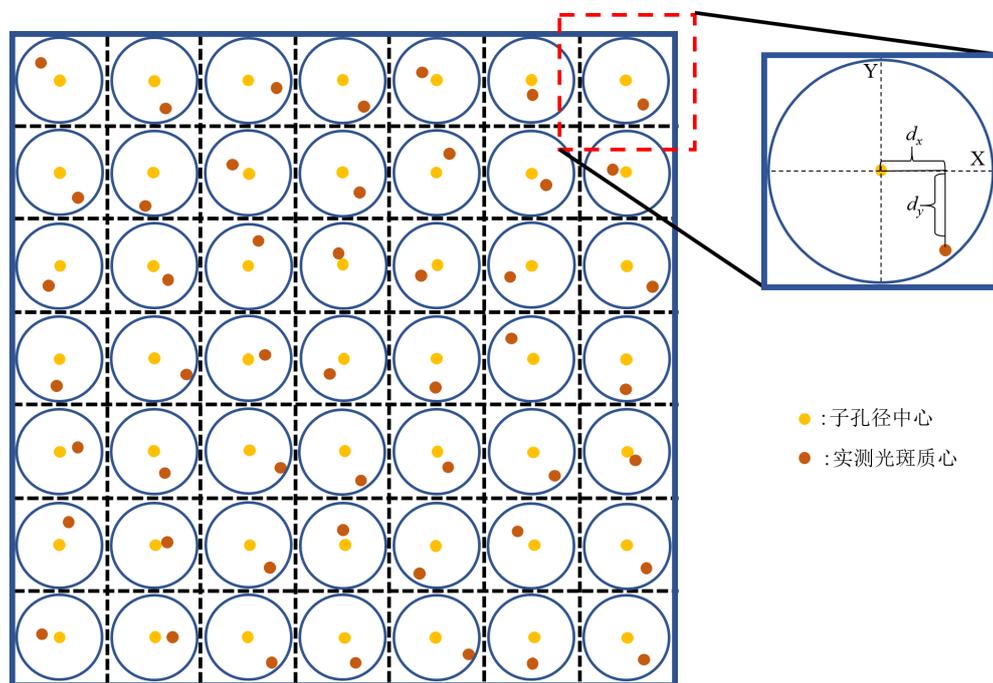


图 6-2 探测器靶面处实测光斑质心与子口径中心点的位置关系

6.1.2 波像差反演

使用 Shack-Hartmann 波前传感器获得各个子口径的光斑质心斜率后，将使用 Zernike 多项式进行波像差的反演。目前，Zernike 多项式进行像差反演主要有模式法与区域法(张强 等, 1998; Dai et al, 2012; Mochi et al, 2015)。两种算法的主要区别在于区域法用于波像差反演的项中较模式法多了非 Zernike 项，对于高阶波像差模拟更加精准，但计算时间较慢。根据第 3 章与第 4 章的分析 AIMS 望远镜系统的装调误差主要影响低阶项 (Z5-Z11)，并且在实际装调过程中，需要实时快速计算。因此，将使用模式法进行像差的反演，模式法对应的反演公式为：

$$C = G^{-1}K \quad (6-2)$$

其中：

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_x^1 \\ \vdots \\ k_x^N \\ k_y^1 \\ \vdots \\ k_y^N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \iint_{S_1} \frac{\partial Z_1(x,y)}{\partial x} dx dy & \cdots & \iint_{S_1} \frac{\partial Z_n(x,y)}{\partial x} dx dy \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \iint_{S_N} \frac{\partial Z_1(x,y)}{\partial x} dx dy & \cdots & \iint_{S_N} \frac{\partial Z_n(x,y)}{\partial x} dx dy \\ \iint_{S_1} \frac{\partial Z_1(x,y)}{\partial y} dx dy & \cdots & \iint_{S_1} \frac{\partial Z_n(x,y)}{\partial y} dx dy \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \iint_{S_N} \frac{\partial Z_1(x,y)}{\partial y} dx dy & \cdots & \iint_{S_N} \frac{\partial Z_n(x,y)}{\partial y} dx dy \end{bmatrix} \quad (6-3)$$

\mathbf{C} 为用于反演波像差的 n 项 Zernike 多项式系数, \mathbf{K} 为 N 个子孔径的实测斜率, \mathbf{G} 为 Zernike 模式法对应的重构矩阵, \mathbf{G}^{-1} 为 \mathbf{G} 的广义逆矩阵。 S_N 为第 N 个子口径的面积。波前反演的本质是多目标优化拟合, 本章将使用最小二乘法进行波像差的反演计算。

6.2 大气湍流

由于大气的随机运动, 在不同空间位置上的温湿度与气压不同, 从而形成了大气湍流(Roddier, 1999)。不同空间位置上的大气湍流的大小与温度均不相同, 导致了大气密度的随机分布。大气密度与折射率相对应, 因此大气湍流在光学上的性质就是不同空间位置处的折射率不同。光线在经过大气时, 因为大气折射率的不同, 导致光程不同, 存在光程差, 从而影响光学系统的成像质量。在过去 100 多年中, 大气湍流对地基望远镜影响逐渐受到重视, 科研人员对大气湍流进行了大量的研究工作, 其中 Kolmogorov 大气湍流模型是目前最被广泛接收的大气模型。本节将以 Kolmogorov 大气湍流模型为基础, 开展大气湍流的数值仿真工作。

6.2.1 Kolmogorov 大气湍流模型

Kolmogorov 大气湍流模型中, 大气湍流在传输过程是由上层的大湍流随着能量的逐步衰减为近地面的小湍流, 直到小湍流的自身黏性力与惯性力相平衡, 形成稳定的平流(Kolmogorov, 1991), 图 6-3 为 Kolmogorov 大气传输模型示意图。定义大湍流的平均尺寸为外尺度 L_0 , 其大小通常为 10~200m 不等; 小湍流的平均尺寸为内尺度 l_0 , 其大小通常为 2~50cm 不等(Ziad et al, 2000)。

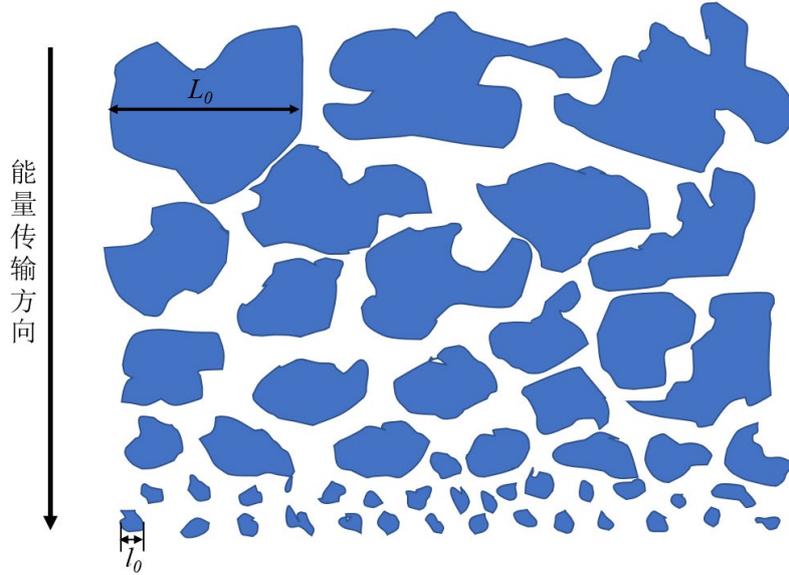


图 6-3 Kolmogorov 大气湍流模型示意图

内外尺度之间的区域为惯性区，该区域内的大气湍流在局部是各项同性的，定义大气湍流折射率结构函数 D_n 为：

$$D_n = C_n^2 r^{2/3} \quad (6-4)$$

其中 r 为大气湍流中两个点的空间距离，其取值范围为 $[l_0, L_0]$ ； C_n^2 为大气湍流折射率结构常数，表示折射率变化的剧烈强度，其定义式为(Bufton et al, 1972; Hufnagel, 1974; Valley, 1980)：

$$C_n^2 = 0.00594 \left(\frac{w}{27} \right) (10^{-5} \times h)^{10} \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + A \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) \quad (6-5)$$

其中 w 为风速的均方差， h 为大气湍流所在的海拔高度， A 为统计常数，通常为 1.7×10^{-14} 。根据公式 6.3 可以看出，海拔越低，风速变化越剧烈时，大气湍流的折射率变换越剧烈， C_n^2 通常取值范围为 $(10^{-17}, 10^{-13})$ (Goodman, 1985)。假设大气湍流在局部是均匀各向同性，根据公式 6-4，大气折射率结构函数的 Kolmogorov 三维密度谱为：

$$\begin{aligned} \Phi_n^K(\kappa) &= \frac{1}{4\pi^2 \kappa^2} \int_0^\infty \frac{\sin(\kappa r)}{\kappa r} \frac{d}{dr} \left[r^2 \frac{d}{dr} D_n(r) \right] dr \\ &= 0.033 C_n^2 \kappa^{-11/3} \end{aligned} \quad (6-6)$$

其中 $\kappa = 2\pi(f_x \hat{\mathbf{i}} + f_y \hat{\mathbf{j}})$ 为空间角频率，其取值范围为 $\left[\frac{1}{L_0}, \frac{1}{l_0} \right]$ 。von Karman 三维密度谱在在 Kolmogorov 三维谱密度谱的基础上进行了外尺度修正(Schmidt,

2010):

$$\Phi_n^{vK}(\kappa) = \frac{0.033 C_n^2}{(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{11/6}} \quad (6-7)$$

其中 κ_0 为 $\frac{2\pi}{L_0}$, κ 的取值范围为 $\left[0, \frac{1}{l_0}\right]$ 。在 von Karman 三维密度谱上进一步加入内尺度修正, 得到改进 von Karman 三维密度谱(Schmidt, 2010):

$$\Phi_n^{mvK}(\kappa) = 0.033 C_n^2 \frac{\exp(-\kappa^2 / \kappa_m^2)}{(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{11/6}} \quad (6-8)$$

其中 κ_m 为 $\frac{5.92}{l_0}$, κ 的取值范围为 $[0, \infty)$ 。

光线在大气中传输时因大气折射率造成的光程差可以看作是光线穿越了无数个湍流薄层, 湍流薄层内的折射率为 $n(z)$, z 为光线传播的路径, 总光程为:

$$L = \int n(z) dz \quad (6-9)$$

光程与波像差对应的相位 ϕ 关系为:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int n(z) dz \quad (6-10)$$

光线通过大气后到达光学系统出瞳处, 假设出瞳处 A 点的空间坐标为 \mathbf{r} , B 点的空间坐标为 $\mathbf{r} + \boldsymbol{\xi}$, $\boldsymbol{\xi}$ 为 A 到 B 的路径, 大气湍流相位结构函数的定义式为:

$$D_\phi(\mathbf{r}) = \left\langle \left| \phi(\mathbf{r} + \boldsymbol{\xi}) - \phi(\mathbf{r}) \right|^2 \right\rangle \quad (6-11)$$

将公式 6-8 与公式 6-10 式带入到公式 6-11 中, 通过简化与近似得到 Kolmogorov 相位结构函数:

$$D_\phi^K(\mathbf{r}) = 6.88 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{5/3} \quad (6-12)$$

其中 r_0 为大气相干常数, 由 D.L.Fried 首次提出, 因此 r_0 也被称为 Fried 常数(Fried, 1965; 1966), 其定义式为:

$$r_0 = \left[0.423 k^2 \int_0^{\Delta z} C_n^2(z) dz \right]^{-3/5} \quad (6-13)$$

其中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, Δz 为薄层大气的厚度。引入内外尺度修正后, 公式 6-12 可以进一步修正为改进型 von Karman 相位结构函数:

$$D^{mvK}(\mathbf{r}) \simeq 7.75 r_0^{-5/3} l_0^{-1/3} r^2 \left[\frac{1}{(1 + 2.03 r^2 / l_0^2)^{1/6}} - 0.72 (\kappa_0 l_0)^{1/3} \right] \quad (6-14)$$

改进型 von Karman 相位功率谱密度为：

$$\Phi_{\phi}^{mvK}(\kappa) = 2\pi k^2 \Delta z \Phi_n^{mvK}(\kappa) \quad (6-15)$$

将公式 6-8 与公式 6-14 式带入公式 6-15，得：

$$\Phi_{\phi}^{mvK}(\kappa) = 0.49r_0^{-5/3} \frac{e^{-\kappa^2/\kappa_m^2}}{(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{11/6}} \quad (6-16)$$

相位功率谱密度与相位的自相关函数互为对方的傅里叶变化，因此大气湍流的相位自相关函数为：

$$\phi(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{\phi}^{mvK}(\kappa_x, \kappa_y) e^{i2\pi(\kappa_x x + \kappa_y y)} d\kappa_x d\kappa_y \quad (6-17)$$

根据公式 6-16 与公式 6-17，当确定功率谱密度由大气相干长度 r_0 ，外尺度 L_0 与内尺度 l_0 后，就可以计算出大气湍流相位屏。

6.2.2 大气湍流相位屏数值仿真

基于傅里叶变换的相位功率谱反演方法（FFT 法）由 McGlamery 首次提出 (McGlamery, 1967)，使用随机高斯白噪声对大气湍流相位功率谱密度进行滤波，再使用傅里叶变换得到实际的大气湍流相位屏。使用 FFT 法能够快速生成符合大气湍流相位功率谱密度的随机相位屏，但是由于在空间频率上不均匀采样，导致生成的随机相位屏在低频分量上有所不足。Lane 在 FFT 法的基础上提出一种使用次谐波进行低频补偿的反演方法（SH-FFT 法），能够有效改善 FFT 法中低频分量不足的问题 (Lane et al, 1992)。具体的仿真流程如下：

步骤 1：生成随机高斯白噪声矩阵，矩阵均值为 0；

步骤 2：输入大气相干长度 r_0 ，外尺度 L_0 与内尺度 l_0 参数，生成高、低频大气湍流相位屏，再使用步骤 1 生成的随机矩阵进行滤波，得到随机的高、低频大气湍流相位屏；

步骤 3：使用次谐波补偿法生成低频补偿大气湍流相位屏，再使用步骤 1 生成的随机矩阵进行滤波，得到随机的低频补偿大气湍流相位屏；

步骤 4：将步骤 2 与步骤 3 所获得的随机大气湍流相位屏相加，获得最终的随机大气湍流相位屏。

冷湖台址拥有目前北半球最好的观测条件 (Deng et al, 2021)，根据科研人员的长时间观测，冷湖台址夜间平均 r_0 为 0.199m (0.8", 632.8nm)，图 6-4 为冷湖台址夜间实测视宁度。根据实测值，在进行大气湍流相位屏模拟时 r_0 分别为 0.159m (1")、0.199m (0.8") 和 0.265m (0.6")，对应波长为 632.8nm，内尺度 l_0 为 2cm，外尺度 L_0 为 100m。图 6-5 为 r_0 为 0.8" 时生成的随机大气湍流相位屏。

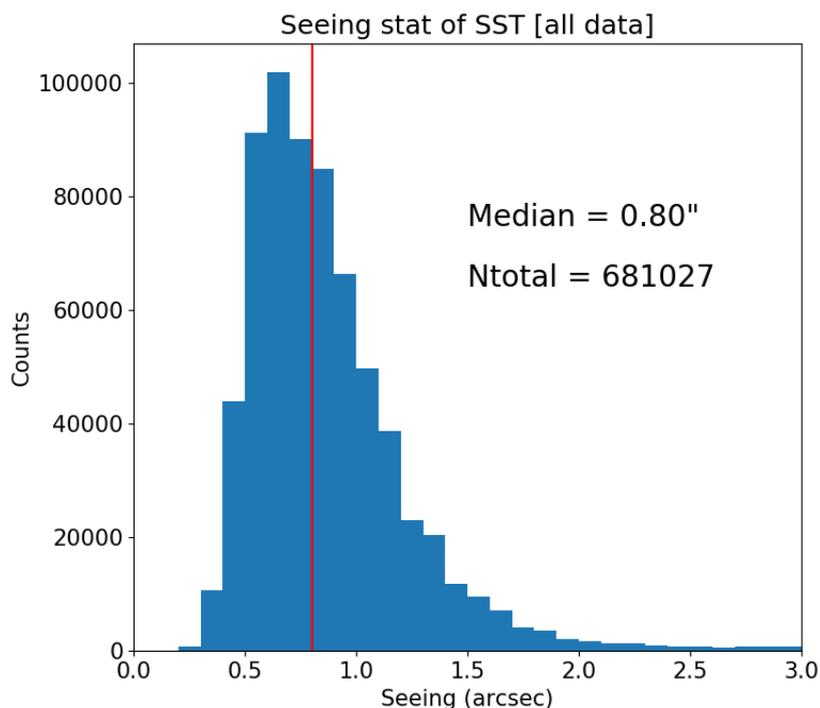


图 6-4 冷湖台址夜间 r_0 实测值（图片来源：<http://lenghu.china-vo.org/sitecondition>）

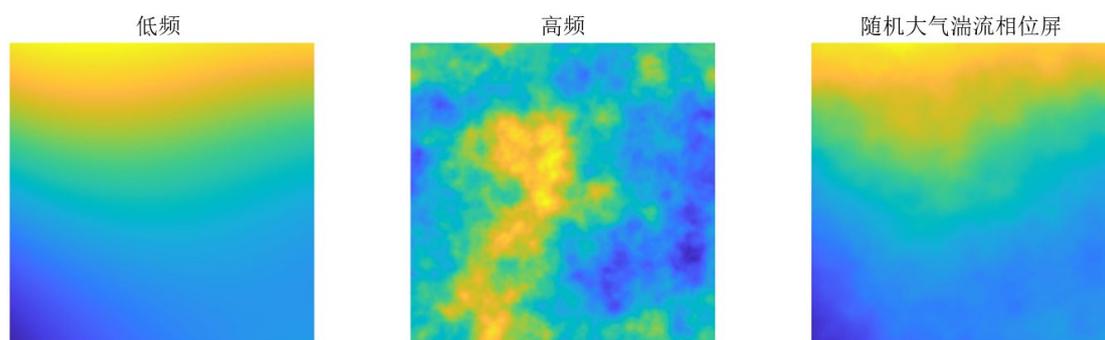


图 6-5 大气随机相位屏 ($r_0=0.8''$, $l_0=2\text{cm}$, $L_0=100\text{m}$)

根据光场的衍射理论(Goodman, 2005), 无限远处的星光经过望远镜成像在焦面的图像为望远镜口径的衍射图像, 中心艾里斑半径为:

$$d = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (6-18)$$

其中 D 为望远镜的口径, λ 为观测波段。以 AIMS 望远系统为例, 望远系统口径为 1m, 星光经望远系统成像后, 其焦面图像的中心艾里斑半径为 1.22λ 。因为大气湍流的影响, AIMS 望远系统实际成像艾里斑半径将比理论值大。对于不同 r_0 的大气湍流, AIMS 望远系统的实际成像的艾里斑半径等口径为 r_0 的光学系统对应的艾里斑半径理论值。因此, 通过计算大气湍流屏的艾里斑半径可以对生成的大气随机湍流相位屏进行复核。图 6-6 为 r_0 分别为 0.159m (1'')、0.199m (0.8'') 和 0.265m (0.6''), λ 为 632.8nm 时, 大气湍流相位屏艾里斑 RMS 半径

的统计曲线，横坐标为生成的大气随机湍流相位屏的个数，不同 r_0 各生成 50 个大气随机相位屏，共纵坐标为大气湍流衍射图像的艾里斑 RMS 半径 ($R_{turbulence}$) 与理论值 (R_{r_0}) 的比值。 r_0 为 1"、0.8" 和 0.6" 时大气随机湍流屏的相对艾里斑 RMS 半径的平均值分别为 1.11、0.96 和 0.97。生成的大气相位屏的艾里斑 RMS 半径与理论值基本一致。

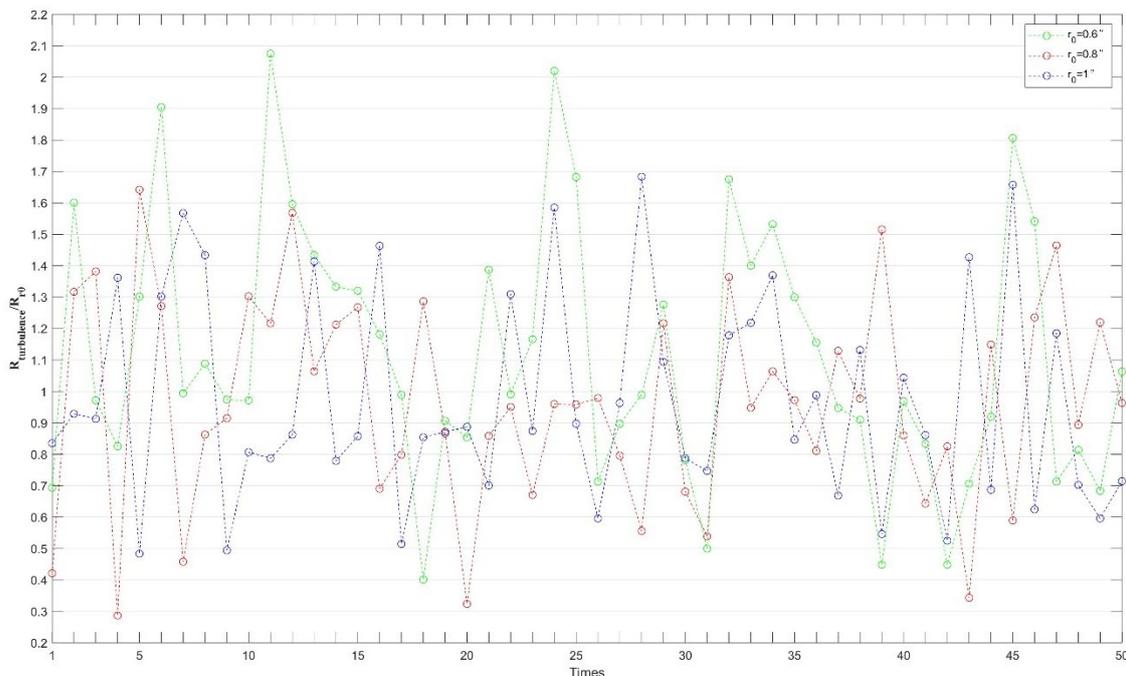


图 6-6 不同 r_0 值时相对艾里斑半径大小

6.3 AIMS 望远系统动态装调数值仿真

使用 Shack-Hartmann 传感器进行光学系统实时装调时，需要探测各个子口径下的光斑质心斜率。因为大气湍流的原因，实测的子口径光斑质心斜率中包含了大气湍流带来误差、光学系统的设计残差、光学元件的面型误差与光学系统的装调误差，本小结以 6.1 与 6.2 小结为基础，结合冷湖台址的实测数据，分析讨论不同 r_0 值对 AIMS 望远系统动态装调的影响。

6.3.1 装调仿真流程

假设单个子口径的波像差为 W_{MLA} ：

$$W_{MLA} = \sum_1^{37} (C_n^{turbulence} + C_n^{alignment} + C_n^{system} + C_n^{surface}) Z_n(\rho, \phi) \quad (6-19)$$

其中 $C_n^{turbulence}$ 、 $C_n^{alignment}$ 、 C_n^{system} 与 $C_n^{surface}$ 分别为单个子口径下的大气湍流误

差、光学系统的装调误差、光学系统的设计残差与光学元件的面型误差与对应的 Zernike 多项式系数。此时, Shack-Hartmann 波前传感器探测器靶面处的光斑分布 I_{MLA} 为:

$$I_{MLA}(x, y) = \left| F^{-1} \left\{ F \left[P(x, y) e^{iW_{MLA}} \right] \right\} \right|^2 \quad (6-20)$$

其中 $P(x, y)$ 为光瞳函数, F 与 F^{-1} 分别代表傅里叶变换与逆傅里叶变换。根据傅里叶变换的性质, 相位并不改变焦面能量的总和, 仅改变能量的分布。因此每个子口径内的能量总和为常量 I 。单个子口径内光斑质心坐标的定义式为:

$$\begin{cases} X_c = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m x_i I_{MLA}(x_i, y_j)}{I} \\ Y_c = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m y_j I_{MLA}(x_i, y_j)}{I} \end{cases} \quad (6-21)$$

其中 m 为子口径区域对应的像素个数, (x_i, y_j) 为像元的坐标。当参考质心点为坐标原点时, 将公式 6-21 带入公式 6-1, 得到带有像差时子口径的斜率公式:

$$\begin{cases} k_x = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m x_i I_{MLA}(x_i, y_j)}{I_{MLA}} \\ k_y = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m y_j I_{MLA}(x_i, y_j)}{I_{MLA}} \end{cases} \quad (6-22)$$

获得实测子口径斜率后, 使用最小二乘法进行波像反演的拟合, 计算拟合值与理论值的残差。AIMS 望远系统动态装调仿真流程具体如下:

步骤 1: 将望远系统实测面型带入其 ZEMAX 光学模型, 获得实际的理论波像差; 再根据实际的波像差确定 Shack-Hartmann 波前传感器各个子口径的理论质心;

步骤 2: 将 M2 的随机装调误差输入到带有实测面型数据的望远系统 ZEMAX 光学模型中, 获得带有装调误差的波前相位屏与各项 Zernike 多项式系数;

步骤 3: 将生成的大气随机湍流相位屏与步骤 2 中获得的波前相位屏相加, 通过微透镜阵列将输入相位屏分割成 $N \times N$ 个子口径, 对子口径的相位屏进行快速傅里叶变化, 获得子口径对应的光斑;

步骤 4: 根据步骤 3 获得的子口径光斑计算对应的质心;

步骤 5: 根据步骤 1 与步骤 3 中的理论质心与实测质心进行子口径斜率的计算, 在使用最小二乘法进行波像差拟合, 获得实测的各项 Zernike 多项式系数, 计算各项 Zernike 多项式系数的残差, 使用 Fringe Zernike 面输入到望远系统的

ZEMAX 模型中，获得不同视场装调完成后波像差。

图 6-7 为 AIMS 望远系统动态装调流程图。

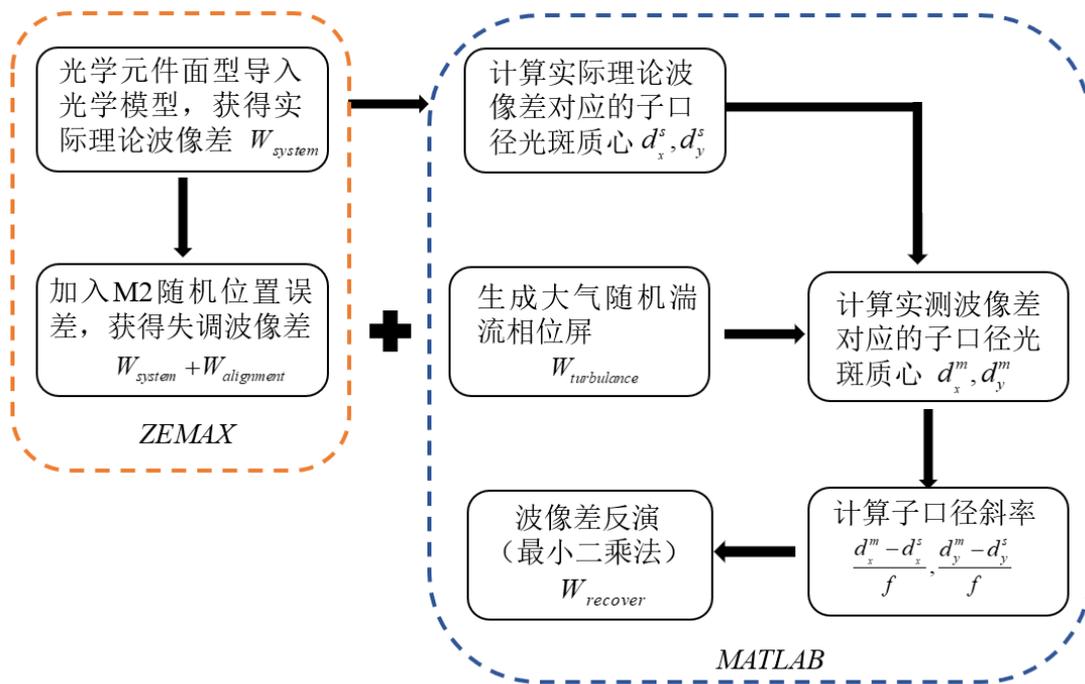


图 6-7 AIMS 望远系统动态装调流程

本小结所使用的微透镜阵列列为 10*10，子口径有效焦距为 15mm。由于系统光瞳为圆形，微透镜阵列中部分子孔径并未参与成像。根据数值仿真，实际用于成像的微透镜共 68 个，图 6-8 为参与实际成像的微透镜分布。

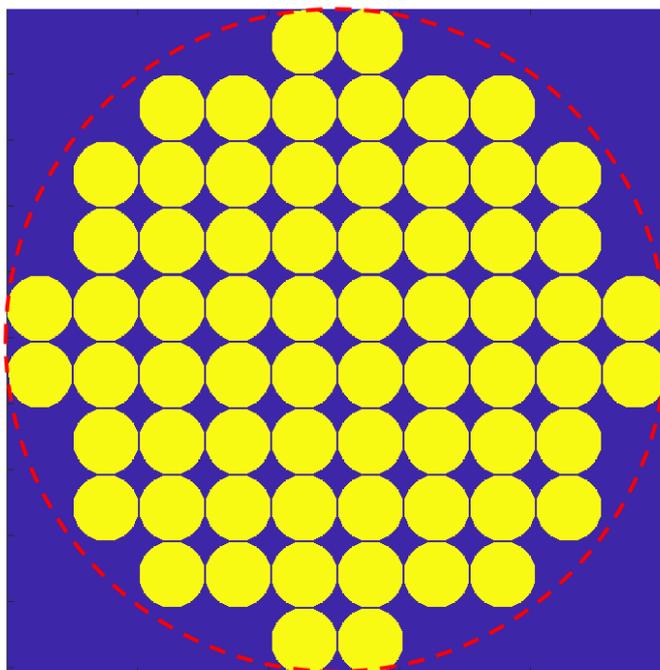


图 6-8 参与实际成像的微透镜阵列

将 5.3 小结中实测的 M1、M2 面型输入到 AIMS 望远系统 ZEMAX 模型中，获得系统中心视场的理论波像差，再使用微透镜阵列进行分解，获得不同子口径的理论波像差，图 6-9 为系统出瞳处被微透镜阵列分解出瞳波前。再根据光场的衍射原理进行焦面光斑的数值仿真，获得理论光斑质心(d_x^S, d_y^S)。

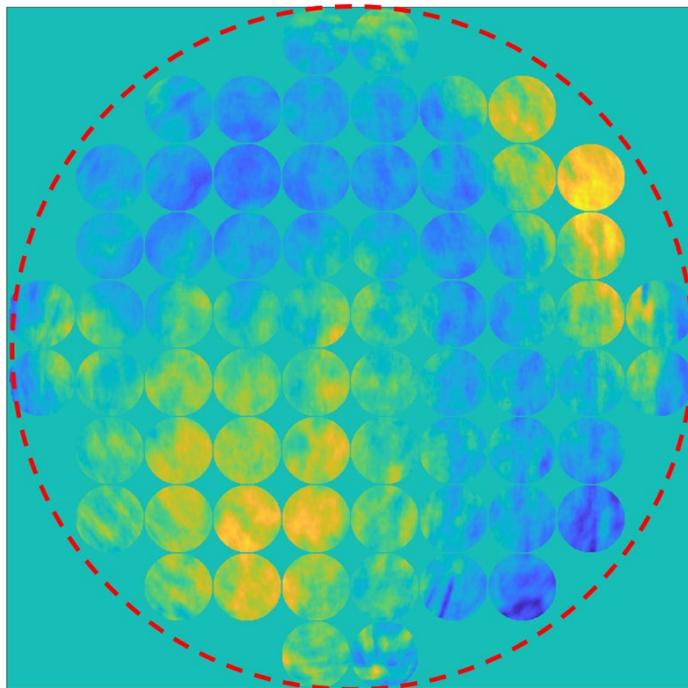


图 6-9 系统出瞳处被微透镜阵列分解出瞳波前

为了更加真实的模拟 AIMS 望远系统的动态装调，在微透镜成像时需加入探测的影响。AIMS 望远系统动态装调将选用 Teledyne Photometrics 公司生产的 Prime BSI Express 型探测器，具体参数见表 6-1。



图 6-10 Prime BSI Express 相机

表 6-1 Prime BSI Express 型探测器性能参数

参数	性能
像元大小/ μm	6.5
分辨率/pixel	2048*2048
峰值量子效率/%	95
读出噪声/e-	1
暗电流/e-/pixel/s	1.5
数据位数	12

数值仿真过程中单帧曝光时间为 5ms, 分别在单帧、50 帧平均、100 帧平均、150 帧平均与 200 帧平均的情况下进行 AIMS 望远系统动态装调方案的数值仿真。仿真中 M2 位置误差分为 2 种情况, 一种时实时调整的小位置误差, 另一种是长时间积累的大位置误差。

6.3.2 实时调整小位置误差的动态装调仿真

使用 Matlab 的 Round 函数生成一组 M2 的小位置误差, 如表 6-2 所示。将随机位置误差输入到 AIMS 望远系统 ZEMAX 模型中, 获得系统焦面波像差 (Z5~Z11) 的变化量, 具体系数值见表 6-3。

表 6-2 M2 初始位置误差 (小位置误差)

dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	dx ($^{\circ}$)	dy ($^{\circ}$)
-0.0048	0.0024	-0.0034	0.0015	0.0012

表 6-3 次镜失调后中心视场系统波像差变化量 (小位置误差)

Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈	Z ₉	Z ₁₀	Z ₁₁
0.0758	0.0506	0.0088	0.0053	0.0011	0.0017	0.0025

小位置误差的动态装调数值仿真大气湍流相位屏 r_0 分别为 1"、0.8"和 0.6", 单个 r_0 值在不同拍摄模式下分别生成 100 个大气随机相位屏。将失调后的系统波前与大气湍流相位屏叠加, 获得实际进入 Shack-Hartmann 波前传感器的测量波前, 图 6-11 为叠加后的波前示意图。

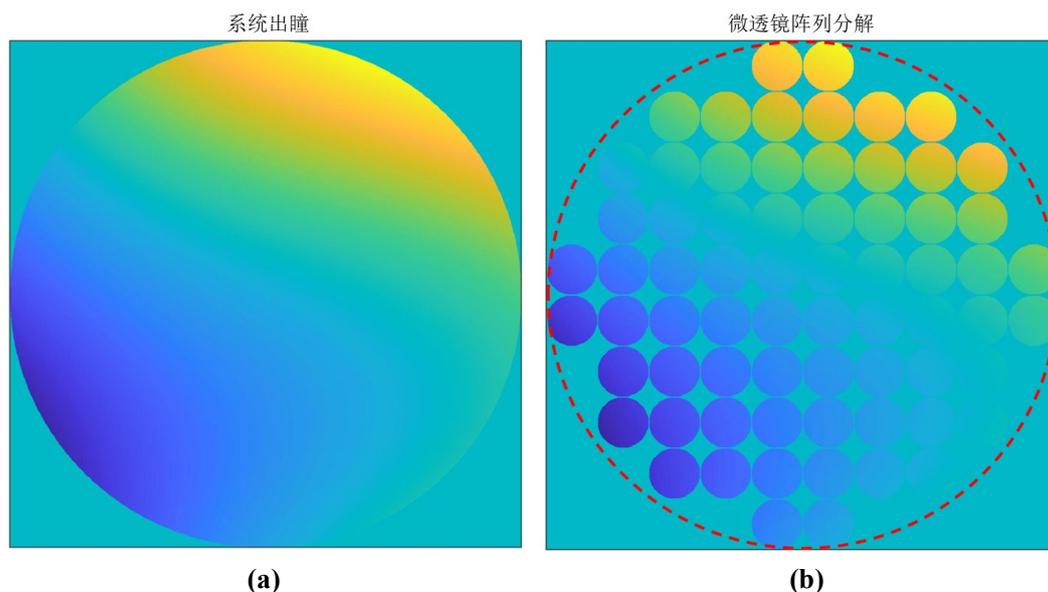


图 6-11 失调系统波前与大气湍流相位屏叠加 (a) 系统出瞳波前 (b) 微透镜阵列分解后子孔径波前

单个子口径成像后根据理论子口径质心(d_x^s , d_y^s)进行子口径斜率的计算, 获得 68 组子口径斜率, 再根据公式 6-2 使用最小二乘法进行波前反演。图 6-12 为不同 r_0 情况下不同拍摄模式下反演的波像差与理论值的残差(100 组随机实验平均值)。当仅使用单帧数据进行动态装调时, 反演的波前受大气湍流的影响较大, 无法真实反应光学元件位置失调对系统像质的影响。随着平均帧数的增加, 反演所得的各阶 Zernike 多项式系数残差逐渐减小, 当平均帧数为 200 帧, r_0 为 0.8" 时反演所得的各阶 Zernike 多项式(Z5~Z11)系数残差小于 $0.025\lambda@632.8\text{nm}$ 。将反演后的残差数据通过 Zernike Fringe Phase 面输入到 AIMS 望远系统 ZEMAX 模型中, 获得各视场波像差 RMS 值的残差。200 帧平均后各视场波像 RMS 值残差平均值小于 $0.01\lambda@632.8\text{nm}$, 具体数据见表 6-4。

表 6-4 反演波像残差对 AIMS 望远系统各视场波像差 RMS 值的影响(200 帧, 小位置误差)

	(0°,0°)	(0.053°,0°)	(-0.053°,0°)	(0°,0.053°)	(0°,-0.053°)
0.6"	0.0113	0.0073	0.0077	0.0036	0.0049
0.8"	0.0128	0.0079	0.0083	0.0042	0.0057
1"	0.0157	0.0099	0.0103	0.0051	0.0069

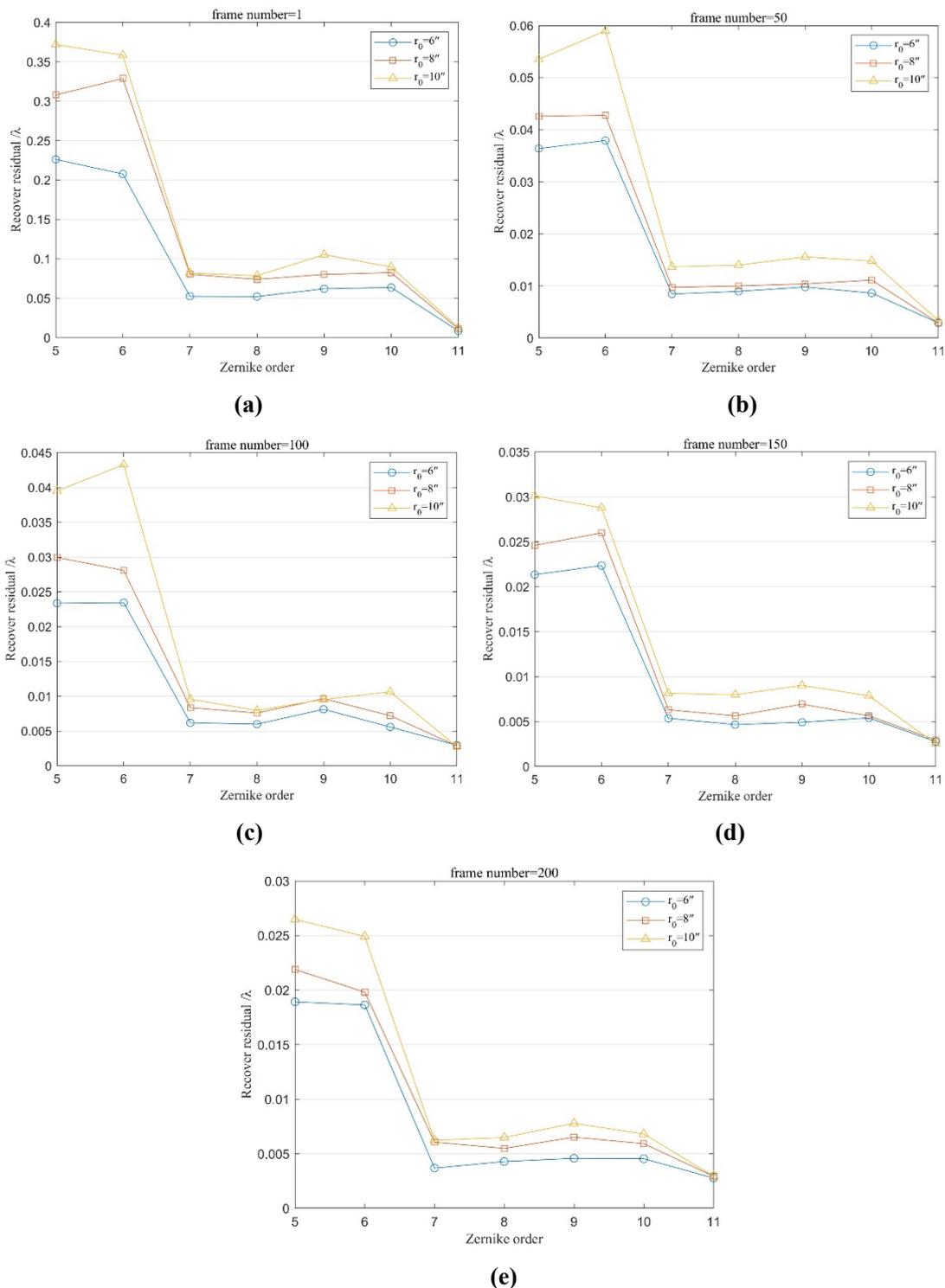


图 6-12 小位置误差波像差反演残差 (a)单帧 (b)50 帧平均 (c)100 帧平均 (d)150 帧平均 (e)200 帧平均

6.3.3 长时间累积大位置误差的动态装调仿真

与实时调整小位置误差的动态装调相类似，首先使用 Matlab 的 Round 函数生成一组 M2 的大位置误差，如表 6-5 所示。将随机位置误差输入到 AIMS 望远系统 ZEMAX 模型中，获得系统焦面波像差 (Z5~Z11) 的变化量，具体系数值见

表 6-6。

表 6-5 M2 初始位置误差 (大位置误差)

dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	dx (°)	dy (°)
1.474	1.850	0.472	0.215	0.196

表 6-6 次镜失调后中心视场系统波像差变化量 (大位置误差)

Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈	Z ₉	Z ₁₀	Z ₁₁
0.1452	0.2174	0.1025	0.1652	0.0211	0.0084	0.0043

图 6-13 为不同 r_0 情况下不同拍摄模式下反演的波像差与理论值的残差 (100 组随机实验平均值)。与小位置误差波前反演相类似, 随着平均帧数的增加, 反演所得的各阶 Zernike 多项式系数残差逐渐减小, 当平均帧数为 200 帧, r_0 为 0.8" 时反演所得的各阶 Zernike 多项式 (Z5~Z11) 系数残差小于 $0.055\lambda@632.8\text{nm}$ 。将反演后的残差数据通过 Zernike Fringe Phase 面输入到 AIMS 望远系统 ZEMAX 模型中, 获得各视场波像差 RMS 值的残差。200 帧平均后各视场波像 RMS 值残差平均值小于 $0.04\lambda@632.8\text{nm}$, 具体数据见表 6-7。

表 6-7 反演波像残差对 AIMS 望远系统各视场波像差 RMS 值的影响 (200 帧, 大位置误差)

	(0°,0°)	(0.053°,0°)	(-0.053°,0°)	(0°,0.053°)	(0°,-0.053°)
0.6"	0.045	0.071	0.0124	0.0191	0.0328
0.8"	0.0464	0.0724	0.0112	0.0187	0.0335
1"	0.0465	0.0732	0.0103	0.0184	0.0339

相较于小位置误差时, 大位置误差波前反演残差较大。在实际装调过程中, 需要进行多次的迭代优化, 从而实现 AIMS 望远系统的动态装调。

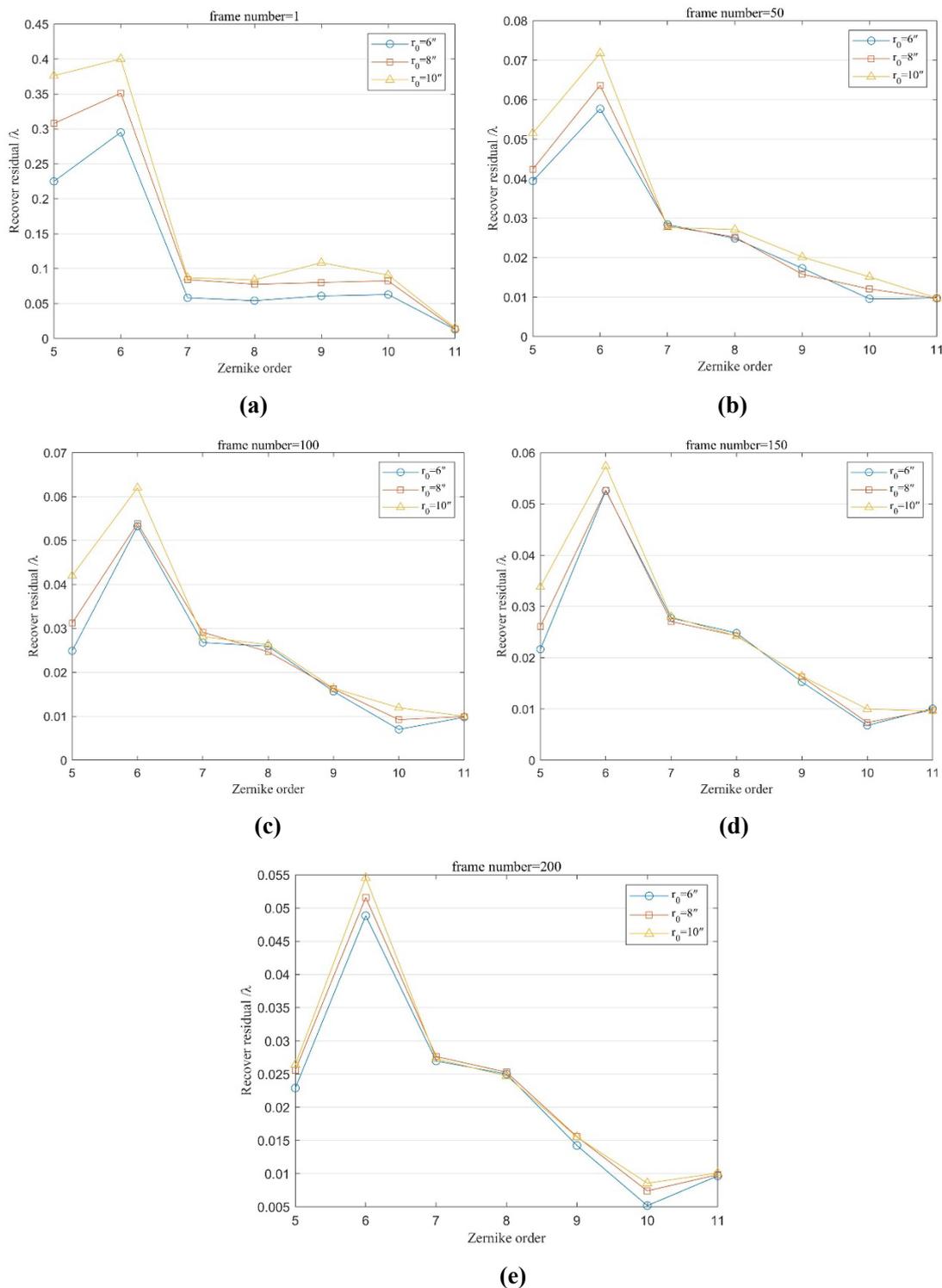


图 6-13 大位置误差波像差反演残差 (a)单帧 (b)50 帧平均 (c)100 帧平均 (d)150 帧平均 (e)200 帧平均

6.3.4 AIMS 望远系统的动态装调策略

根据 6.3.2 小结与 6.3.3 小结的仿真分析,使用多帧平均能够有效减小大气湍流对系统装调误差波前反演的影响;当光学元件的位置误差积累到较大值时,装调需要进行多次迭代优化。因此,AIMS 望远系统进行动态装调时需要注意以下

三点：

- ① 根据实测数据，选择 r_0 较小时间段开展动态装调实验；
- ② 动态装调过程中，需使用多帧叠加平均减小大气湍流的影响，根据数值仿真结果，建议平均帧数为 200 帧；
- ③ AIMS 望远系统动态装调之前，六杆位于静态装调完成后的位置，此时望远系统初始姿态基本与大地水平；进行动态观星测试时，起始星建议选取俯仰角较低的星，再逐步观测俯仰角较高的星，减小 M2 位置误差的长时间累积。

6.4 初步动态装调实验

AIMS 望远系统动态装调实验将在摆镜 F#13 支路中进行，实验光路如图 6-14 所示。

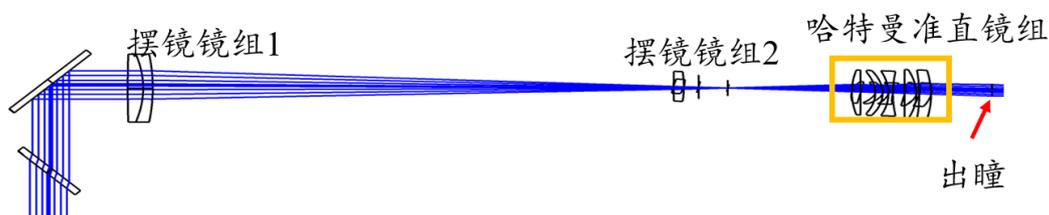


图 6-14 摆镜 F#13 支路 Shack-Hartmann 光路

根据本章 6.2 与 6.3 小结的仿真分析，AIMS 望远系统初步动态装调实验选取高度角为 $18^{\circ}49'51''$ 的武仙座 β 星作为观测星，其视星等为 2.78 等。单次曝光为 100ms，平均帧数为 200 帧。经过 1 次迭代优化，通过调整六杆姿态，AIMS 望远镜中心视场 RMS 值从 $0.165\lambda@633\text{nm}$ 调整至 $0.137\lambda@633\text{nm}$ ，图 6-15 为 AIMS 望远镜实测动态像质。初步验证了 AIMS 望远系统动态装调方案的可行性。

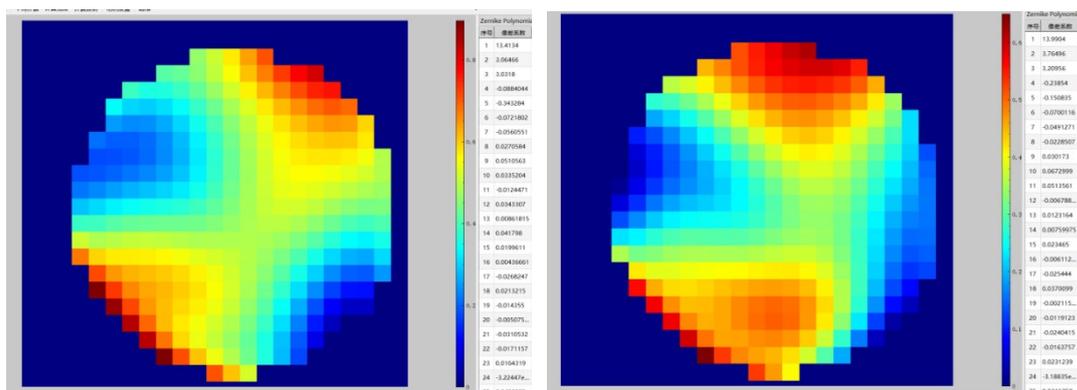


图 6-15 AIMS 望远镜动态像质 (a) 初始中心视场波前，RMS 值为 $0.165\lambda@633\text{nm}$
(b) 迭代 1 轮后中心视场波前，RMS 值为 $0.137\lambda@633\text{nm}$

6.5 小结

本文详细介绍了 Shack-Hartmann 波前传感器的工作原理与大气湍流的理论模型；根据冷湖台址实测 r_0 进行大气湍流相位屏的数值仿真；结合 Shack-Hartmann 波前传感器与大气湍流相位屏开展了 AIMS 望远系统动态装调的数值仿真；根据数值仿真结果，为 AIMS 望远系统动态装调方案的制定了具体的装调策略；开展了初步的动态装调实验，验证了该动态方案的可行性。

第7章 总结与展望

自从1908年, Hale首次观测到太阳耀斑的磁场, 精确的太阳磁场数据是科学家研究了解太阳内部演化的重要实测依据。随着探测技术的不断发展, 太阳磁场望远镜从过去小口径可见光折射望远镜逐渐向大口径红外离轴望远镜发展。光学系统的精密装调是获得优异像质的基础。本文以AIMS望远系统为研究对象, 开展了大口径离轴光学系统在位装调的研究工作。本章将对本文研究内容进行总结, 并对下一步的研究工作进行展望。

7.1 工作总结与创新点

本论文的研究内容主要集中在特定姿态大口径离轴光学系统在位静态精密装调方案与动态精密装调方案的设计与实际装调应用; 首次使用小口径标准平面反射镜实现了大口径离轴光学系统的静态装调; 结合台址实测视宁度数据, 使用Shack-Hartmann波前传感器为AIMS望远镜动态装调制定了可靠的装调方案, 主要研究成果如下:

① 根据同轴光学系统与离轴光学系统矢量波像差理论, 开展了AIMS望远系统像差特性的研究; 分析光学元件位置误差与面型误差对AIMS望远系统的影响, 为后续装调方案设计提供了理论基础。

② 根据AIMS望远系统的在位状态, 研究了利用小口径标准平面反射镜进行全口径系统装调的可行性; 提出一种基于中心小口径圆域的静态干涉装调方案, 明确了光学面型误差输入到光学系统模型建立真实的装调模型是小口径装调的装调基准; 详细分析了中心小口径圆域干涉装调方案中关键参数的选取标准; 进行了装调方案的数值仿真工作, 分析了环境噪声对装调的影响。本研究为特定姿态大口径离轴光学系统在位装调提供了一种新的装调方案。

③ 开展了AIMS望远系统静态装调实验; 将提出的基于中心小口径圆域的静态干涉装调方案应用实际装调环节, 实现小口径标准平面反射镜对大口径离轴光学系统的装调, 成功完成了AIMS望远系统在位静态装调, 装调结果表明, 本文所提出的静态装调方案能够满足实际的装调需求, 优化了装调流程, 降低了装调成本, 有效提高了装调效率, 具有实际的工程应用价值。

④ 结合冷湖台址实测视宁度开展了AIMS望远系统动态装调方案的研究工作; 提出一种基于Shack-Hartmann波前传感器的动态装调方案; 根据实测视宁度数据, 分析了不同视宁度对波前反演的精度影响; 结合实际装调过程, 分析了不同位置失调量对波前反演的影响; 为AIMS望远系统动态装调制定了详细的装调策略; 开展了初步的动态装调实验, 验证了该方案的可行性。

主要创新点如下:

① 首次提出一种基于中心小口径圆域的静态干涉装调方法,首次实现了使用小口径平面反射镜进行大口光学系统的装调,解决了 AIMS 望远镜装调的实际工程问题,为其它大口径离轴光学系统静态装调提供了一种新的、具有普适性的高效装调方案。

② 建立了基于冷湖台址实测视宁度的 AIMS 望远系统动态装调仿真模型,并依此提出一种基于 Shack-Hartmann 波前传感器的动态装调方案,为 AIMS 望远系统波前传感闭环控制提供了理论依据,初步动态装调实验表明该方案具有可行性,为其他望远镜动态像质检测提供了一种可靠的分析方法。

7.2 未来工作展望

目前 AIMS 望远系统已经完成了静态装调工作,即将开展动态装调实验,未来工作将围绕以下 2 点开展:

① 使用 Shack-Hartmann 波前传感器进行波前反演的本质是多目标优化拟合最优化的问题。目前,有多种优化算法适用于多目标优化拟合,如最小二乘法、遗传算法、退火算法、随机并行梯度法、人工神经网络算法等(Jeong et al, 1986; 王钰 等, 2013; Li et al, 2019; 曾宗顺 等, 2020; 吴伟 等, 2021)。本文使用最小二乘法来验证 Shack-Hartmann 波前传感器用于动态装调的可行性。为了进一步提高动态装调的精度,需开展不同算法的研究工作,寻找适用 AIMS 望远系统动态装调的最优算法。

② 目前动态装调方案是使用夜间观星的方法进行光学元件位置误差的反演计算从而获得望远系统在不同俯仰姿态下六杆机构的位置坐标。AIMS 实际观测时间段为白天,相较于夜间环境,冷湖台址白天环境温度更高,桁架的弯沉较夜间存在一定的偏移。目前白天的动态装调工作可以结合夜间动态装调结果与不同温度下的静态装调结果进行,但是依旧可能存在较大的误差。因此,下一步装调工作需开展面源 Hartmann 波前传感器的研究工作,设计一种适合于白天的动态精密装调方案。

参考文献

- 邓元勇, 甘为群, 颜毅华等. 太阳磁场探测现状与展望[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11):230-236.
- 曹文达. 红外波段太阳观测技术方法研究[D]. 中国科学院紫金山天文台, 2001.
- 丰帆, 李常伟, 张思炯. 离焦型 Shack-Hartmann 传感器的光斑矩波前重建[J]. 光学学报, 2018, 38(06):313-319.
- 顾志远. 反射式望远镜失调校正技术研究[D]. 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
- 姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. 光电工程, 2018, 45(03):7-21
- 林元章. 太阳物理导论[M]. 科学出版社, 2001.
- 李文显, 田晖. 太阳磁场测量[J]. 自然杂志, 2022, 44(1):12.
- 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, 192(04):514-517.
- 李蕾. 基于 Zernike 矢量多项式的离轴反射系统装调技术研究[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), 2020.
- 李明. 基于 CGH 的非球面混合补偿检测及离轴光学系统装调的关键技术研究[D]. 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2015.
- 罗敬, 王金鑫, 鞠国浩, 等. 主动随机送风条件下大口径离轴三反光学系统的计算机辅助装调[J]. 光学精密工程, 2022, 30(07):802-812.
- 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.
- 王钰, 张新, 王灵杰, 等. 基于人工神经网络方法的自由曲面光学系统装调[J]. 光学学报, 2013, 12:6.
- 吴伟, 罗自荣, 于乃辉, 等. 基于夏克-哈特曼传感器的计算机辅助装调方法[J]. 光学学报, 2021(020):041.
- 夏爱利. 基于 Shack-Hartmann 波前传感器的自适应光学系统研究[D]. 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2011.
- 杨甬英. 先进干涉检测技术与应用[M]. 浙江大学出版社, 2017.
- 张以谟. 应用光学(第 3 版)[M]. 电子工业出版社, 2008.
- 曾宗顺, 张方, 牛志元, 等. 基于遗传算法的微反射镜阵列角位置分布算法[J]. 中国激光, 2020, 47(08):197-205.
- 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.
- Burge J H, Peng S, Zhao C, et al. Use of a commercial laser tracker for optical

- alignment[J]. Proc of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2007, 6676.
- Buchroeder R A. Tilted component optical systems[D]. Tucson: University of Arizona, 1976.
- Buften J L, Titterton I P J, Fitzmaurice M W, et al. Measurements of turbulence profiles in the troposphere[J]. Journal of the Optical Society of America, 1972, 62(9): 1068.
- B. L. McGlamery. Restoration of turbulence-degraded images[J]. Journal of the Optical Society of America. 1967, 57(3), 293-297.
- Cao W, Gorceix N, Coulter R, et al. First light of the 1.6 meter off-axis New Solar Telescope at Big Bear Solar Observatory[J]. Proc of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2010, 7733(6):773330-773330-8.
- Cao W. The 1.6 m New Solar Telescope (NST) in Big Bear[J]. IAU Special Session, 2012, 6.
- Chen Liang, Predrag Sekulic, Kerry Gonzales, et al. Development of DKIST IT&C Shack-Hartmann wavefront measurement system[C]// Ground-based and Airborne Telescopes VII. 2018.
- Chen M Y, Cheng W, Wang C. Multiaperture overlap-scanning technique for large-aperture test[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1992, 1553:626-635.
- Deming D, Hewagama T, Jennings D E, et al., 1990. Observations of the 12.3 micron MG I emission line during a major solar flare[J]. The Astrophysical Journal, 364: L49–L52.
- Deng, L, Yang, F, Chen, X. et al. Lenghu on the Tibetan Plateau as an astronomical observing site[J]. Nature, 2021, 596, 353–356.
- 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.
- E Kewei, Zhao Jianke, Wang Bo, et al. Distortion mapping correction in the AIMS primary mirror testing by a computer-generated hologram[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2021, 21(7).
- Fehlmann, A, Kuhn, J.R., Schad, T.A. et al. The Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST) Cryogenic Near-Infrared Spectro-Polarimeter[J]. 2023, Sol Phys 298, 5.
- Fried D L. Statistics of a geometric representation of wavefront distortion[J]. Journal of the Optical Society of America, 1965, 55(11): 1427-1435.
- Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures[J]. Journal of the Optical Society of America, 1966, 56(10): 1372-1379.
- Goodman J W. Wiley series in pure and applied optics: Statistical optics[M]. New York:Wiley, 1985.
- Goodman J W. Introduction to Fourier Optics[M], Roberts, 2005

- Hale G E. Solar vortices and the zeeman effect[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1908, 20(121):220.
- Hewagama T, Deming D, Jennings D E, et al. Solar magnetic field studies using the 12 micron emission lines. II - Stokes profiles and vector field samples in sunspots[J]. Astrophysical Journal Supplement, 1993, 86(1).
- Hufnagel R E. Variations of atmospheric turbulence[J]. Topical Meeting on Optical Propagation through Turbulence, 1974, Wal-1, July 9-11: Univ. of Colorado, Boulder.
- Hansen E, Price R, Hubbard R. Advanced Technology Solar Telescope Optical Design[C]// Conference on Ground-based and Airborne Telescopes. National Solar Observatory USA, 2006.
- Hopkins H H. Wave theory of aberrations[M]. Clarendon Press, 1950.
- Junfeng H, Ming L, Dongguang W, et al. Design and analysis of a five-mirror derotator with minimal instrumental polarization in astronomical telescopes[J]. Optics Express, 2018, 26(15):19356.
- Jeong H J, Lawrence G N, Nahm K B. Auto-Alignment of a Three-Mirror Off-Axis Telescope by Reverse Optimization and End-To-End Aberration Measurements[J]. Proc of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1986, 818:419-430.
- Kim S, Yang H S, Lee Y W, et al. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems[J]. Optics Express, 2007, 15(8):5059-68.
- Kolmogorov A N. The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds Numbers[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, 1991.
- Lane R, Glindemann A, Dainty J. Simulation of a Kolmogorov phase screen[J]. Waves in random media, 1992, 2: 209-224.
- Moran T G, Jennings D E, Deming L D, et al. Solar Magnetograms at 12[J]. 2007, 241(2):213-222.
- Merkle F, Rousset G, Kern P Y, et al. First diffraction-limited astronomical images with adaptive optics[C]// Astronomy 90, Tucson Az, Feb. 1990.
- Marino J, Carlisle E, Schmidt D. Simulation of DKIST solar adaptive optics system[C]// SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. 2016.
- Movhi I, Goldberg K A. Modal wavefront reconstruction from its gradient [J]. Applied Optics, 2015, 54(12): 3780-3785
- M Li, X Liu, A Zhang, et al. Telescope alignment based on the sharpness function of under-sampled images[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(6).
- Neal D R, Copland J, Neal D A. Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy[C]// Advanced Characterization Techniques for Optical, Semiconductor, and Data Storage Components. 2002.

OpticStudio 16.5 SP5 Help Files

- Predrag Sekulic, Chen Liang, Kerry Gonzales, et al. Daniel K. Inouye Solar Telescope optical alignment plan[J]. Proc. SPIE 9906, Ground-based and Airborne Telescopes VI, 990653, 2016.
- Platt B C, Shack R V. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing[J]. Journal of Refractive Surgery, 2001, 17(5):S573.
- Rolland J P, Dunn C, Thompson K P. An Analytic Expression for the Field Dependence of FRINGE Zernike Polynomial Coefficients in Rotationally Symmetric Optical Systems[C]// Interferometry XV: Techniques and analysis, 2010.
- Roddier F. Adaptive optics in astronomy[M]. Cambridge, U.K.; New York: Cambridge University Press, 1999.
- Snow B, Botha G, Scullion E, et al. Predictions of DKIST/DL-NIRSP observations for an off-limb kink-unstable coronal loop[J]. The Astrophysical Journal, 2018.
- Shen Yuliang, E Kewei, Fu Xin, et al. Alignment technology based on a central small aperture for the AIMS telescope[J]. Applied optics, 2022, 61(19):5646-5656.
- Schmidt J D. Numerical simulation of optical wave propagation with examples in MATLAB[M]. Bellingham, WA: SPIE Press, 2010.
- Thompson K P. Aberration fields in tilted and decentered optical systems[D]. Tucson: University of Arizona, 1980.
- Thompson K P. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2005, 22(7):1389-1401.
- Thompson K P. Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: spherical aberration[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2009, 26(5): 1090-1100.
- Thompson K P. Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: the comatic aberrations[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010.
- Thompson K P. Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: the astigmatic aberrations[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2011, 28(5): 821-836.
- Thompson K P, Fuerschbach K, Rolland J P. An analytic expression for the field dependence of FRINGE Zernike polynomial coefficients in optical systems that are rotationally nonsymmetric[C]// 2010, Photonics Asia.
- Thunen J G, Kwon O Y. Full Aperture Testing with Subaperture Test Optics[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1983, 351:19-27.
- Unno W. Line Formation of a Normal Zeeman Triplet[J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 1956, 8: 108.
- Valley G C. Isoplanatic degradation of tilt correction and short-term imaging systems[J].

- Applied Optics, 1980, 19(4): 574-577.
- Yang X, Cao W, Gorceix N, et al. CYRA: the cryogenic infrared spectrograph for the Goode Solar Telescope in Big Bear[C]// 2020.
- Yu Lei, Songbo Xu, Mingqiang Cao, et al. Research on precision alignment method of a five-mirror optical derotator system[J]. J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 9(1) 014004.
- Zeeman P. The effect of magnetization on the nature of light emitted by a substance [J]. Nature, 1897, 55: 347.
- Ziad A, Conan R, Tokovinin A, et al. From the grating scale monitor to the generalized seeing monitor[J]. Applied Optics, 2000, 39(30): 5415-5425.

致 谢

行文至此，才发现我的学生生涯即将画上句号。回顾二十四年的求学之路，起起伏伏，其中的酸甜苦辣也只有自己能够体会。博士四年，就像是过去二十年的浓缩，从低谷开始，一步一步往上爬，最终到达半山腰，距离山顶还有很长一段距离，还需要更加努力。

首先，特别感谢我的导师王东光研究员与侯俊峰研究员。王老师学识渊博，治学严谨。进组之后，在王老师的带领下，我开始正式走入太阳光学仪器研究领域，接触到了前沿的装调技术，并对此产生了浓厚的科研兴趣。在攻读博士学位期间，王老师因材施教，给了我颇多受益的指导性意见，教导我要用科学的视角研究工程问题。每次与王老师针对课题进行探讨，我都能从中获益匪浅，对课题产生更加深入的思考。侯老师亦师亦友，在我学习、科研的过程中，都给予了方向性、建设性的帮助和指导。侯老师对科研工作的满腔热情、对学科发展的前瞻性眼光及严谨求实的科研态度令人敬佩，是我学习的榜样。

其次，感谢美国国家光学红外天文实验室的梁明老师。AIMS 的光学设计及其复杂庞大，每次与梁老师线上讨论都让我对 AIMS 的光学设计与装调有更深入的了解，受益匪浅。梁老师 76 岁的高龄，依旧保持着对光学设计工作的极高热情，希望未来有机会能当面和梁老师请教光学设计装调问题。

感谢邓元勇研究员、林佳本研究员、孙英姿副研究员、张志勇副研究员、杨尚斌副研究员、宋永亮副研究员在工作、学习中给予的帮助。

感谢西安光机所的付兴副研究员、鄂可伟副研究员与雷昱工程师。从西安到蒲城再到冷湖，一起工作的三年多时间，共同完成了 AIMS 各阶段的装调研究工作。一起经历了量子楼的微寒，唐景陵的小寒，冷湖的酷寒。我忘不了蒲城的那一夜的凌晨，首次成功完成 AIMS 望远系统装调的喜悦；忘不了冷湖台址装调时一筹莫展的迷茫；忘不了一起找到装调问题时的激动。感谢李华研究员、徐崧博副研究员、王鹏副研究员在 AIMS 装调过程中提供的帮助。感谢董荣光工程师、王鹏工程师在镜面面型热分析中提供的帮助。感谢西安的肉夹馍与泡馍，蒲城的大包子与水盆羊肉，冷湖的牛羊肉的陪伴，每当结束一天的工作时，吃上一口甚是幸福。

感谢南京天光所的王岚老师。四年前，在天光所 4 楼会议室的门口，刚刚经历失败的我心灰意冷，是王岚老师鼓励我北上，去完成自己的理想。如果没有王岚老师的鼓励，我的学生生涯很可能在四年前已经画上了句号。感谢杨潇师姐与王全同学，四年前在我迷茫时，领我走进怀柔基地，得到继续进修学业的可能。

感谢王薏站长在学习生活上给予我的帮助；感谢车慧利老师、包星明老师、

耿志军师傅在冷湖提供的后勤保障；感谢孙文君师兄与闫璐姐在报销上的帮助；感谢怀柔观测站的所有工作人员，提供舒适的工作生活环境；感谢国家天文台研究生处的马怀宇老师与李响老师在博士期间提供的各方面帮助与支持。

感谢南京天光所的王焯儒师兄和丰帆师兄，给初到北京的我提供便利的住宿条件，两位师兄对科研工作热情也是我学习的榜样。

感谢怀柔观测站的各位师兄、师姐、同学、师弟、师妹：张洋、王刚、郭晶晶、张鑫伟、白阳、朱晓明、冯宇飞、佟立越、黄威、胡兴、王全、吴纬、周明尧、荀辉、郑州、李鑫、胡子尧、高碧源、郭思幡，在生活学习上给我的帮助。

感谢我的父母，给我从小提供一个自由的生长环境，读书开始每一个重要的选择都给予我无条件的支持。感谢我的女朋友尹琦瑜女士，对我长时间出差的理解与支持，感染新冠与甲流期间对我无微不至的照顾，与你相遇是我这四年间最幸福的事。

谨以此文感谢过去三十年中所有关心和帮助过我的人们！

2023年6月

作者简介及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果

作者简介:

2012年9月——2016年6月,在南京信息工程大学物理与光电工程学院获得学士学位。

2016年9月——2019年6月,在中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究获得硕士学位。

2019年9月——2023年6月,在中国科学院国家天文台攻读博士学位。

已发表(或正式接受)的学术论文:

1. Shen Yuliang, E Kewei, Fu Xin, et al. Alignment technology based on a central small aperture for the AIMS telescope[J]. Applied optics, 2022, 61(19):5646-5656. 第1作者

2. E Kewei, Fu Xin, Shen Yuliang, et al. Computer-aided alignment method for AIMS solar telescope[C]. Proc. SPIE 12166, Seventh Asia Pacific Conference on Optics Manufacture, 2021. 第3作者

3. E Kewei, Zhao Jianke, Wang Bo, et al. Distortion mapping correction in the AIMS primary mirror testing by a computer-generated hologram[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2021, 21(7). 第5作者

4. 王雅琦, 冯志伟, 白先勇,等.AIMS 望远镜 8~10 微米成像终端系统装调检测方法[J]. 天文研究与技术, 2022(002):019. 第7作者

申请或已获得的专利:

1. 沈宇樑, 王东光, 侯俊峰. 一种基于小口径平面镜装调大口径光学系统的装调方法. 发明专利, 实质性审查. 第1申请人

参加的研究项目及获奖情况:

项目情况

1. 国家自然科学基金——用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统(AIMS)
2. 中科院先导专项——先进天基太阳天文台(ASO-S)卫星全日面矢量磁像仪(FMG)
3. 国家重大科技基础设施——子午工程二期:全日面矢量磁像仪建设、全日面磁场-色球望远镜改造
4. 国家天文台——沙河站太阳 H α 望远镜改造

获奖情况

1. 国家天文台 2020-2021 学年三好学生