



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

# 博士学位论文

AIMS 望远镜杂散光分析

作者姓名: 高碧源

指导教师: 王东光 正高级工程师 中国科学院国家天文台

孙英姿 正高级工程师 中国科学院国家天文台

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

2025 年 6 月



**Stray Light Analysis for the AIMS Telescope**

**A dissertation submitted to  
University of Chinese Academy of Sciences  
in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of  
Doctor of Philosophy  
in Astronomical Techniques and Methodology  
By  
Gao Biyuan  
Supervisor: Professor Wang Dongguang  
Professor Sun Yingzi**

**National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences**

**June, 2025**



中国科学院大学  
学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提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  
学位论文授权使用声明

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

太阳磁场是太阳活动的起源，是太阳物理重要的观测量。而太阳磁场的观测是在强光源下的弱信号提取，系统杂散光对磁场测量灵敏度和精度都有直接影响。AIMS 望远镜是国际上首台专门工作中红外波段的望远镜，其杂散光水平对磁场观测的影响没有经验数据可以借鉴。AIMS 望远镜采用离轴格里高利望远镜系统，在库德焦点放置多台焦面设备，光学元件多，光路复杂，给杂散光分析带来挑战。本论文以 AIMS 望远镜为研究对象，系统开展了望远镜光机全系统的可见-红外杂散光分析。具体研究内容与创新点如下：

### 1. 在国内首次建立了地基太阳望远镜全系统的杂散光分析模型

利用 ASAP 软件，通过蒙特卡洛光线追迹方法建立全系统的三维模型，包含望远镜光学系统、机械结构、圆顶环境；通过识别重点散射表面进行指向性分析，提高计算效率；建立适用于可见 - 中红外波段的杂散光评价体系。

### 2. 给出 AIMS 望远镜焦面科学仪器在不同条件下的杂散光量化分析结果

基于所建模型，以元件的设计参数和实测结果为输入，通过计算分析获得了可见光系统、8-10 $\mu\text{m}$  成像系统、FTIR 的杂散光量化数据，并从光学元件膜系、温度和材料发射率等方面对杂散光进行了分析比较。结果表明，镜面散射和自身热辐射是主要的杂散光来源。当红外系统膜系工艺和可见光相同时，杂散光可降低 80%。自身热辐射在现有的制冷情况下，8-10 $\mu\text{m}$  系统比常温条件下降低 2.3 个量级，FTIR 系统降低 2.5 个量级。

### 3. 完成偏振分析器干涉条纹分析，并给出有效抑制方案

首次开展了偏振测量系统的干涉条纹在红外波段产生的杂散光研究。开展了偏振分析器的干涉条纹特性分析、优化设计以及观测验证工作。基于偏振光学和薄膜光学理论构建四种偏振调制模型，分析不同模型的干涉条纹特性，创新性提出了“1/2 波片主导调制和 1/4 波片选择性切入”的优化方案，通过分离 Q/U 信号与 V 信号的调制路径将仪器偏振降至 0.001 以下，偏振效率提升至 0.98。经 AIMS 望远镜实测，新方案显著减少干涉条纹，振荡频率从 0.02 降至 0.002，数据质量提升。

本论文在国内首次完成了地基太阳望远镜的全系统杂散光分析，获得了 AIMS 望远镜的主要焦面仪器的杂散光水平；通过偏振测量系统的多光束干涉在红外波段产生的杂散光研究，提出了偏振调制的优化方案。论文研究为望远镜调试和长期运行期间的杂散光溯源提供了理论依据，也为未来大型望远镜研制中杂散光抑制提供方法借鉴。

**关键词：**太阳望远镜，光机建模，杂散光分析，偏振干涉条纹

国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59  
中国科学院国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59  
国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59  
中国科学院国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59

## Abstract

The solar magnetic field, recognized as the primary driver of solar activity, constitutes a critical observational parameter in solar physics. However, measuring this field involves extracting weak signals against the intense solar background, where system stray light directly degrades both sensitivity and accuracy. The AIMS (The accurate infrared solar magnetic field measurement system, AIMS) telescope, the world's first dedicated mid-infrared (MIR) solar observatory, employs an off-axis Gregorian design with multiple Coudé-focus instruments. Its complex optical-mechanical architecture—featuring numerous optical elements and extended light paths—presents unprecedented challenges for stray light analysis. This study addresses these challenges through a systematic analysis of visible-to-infrared stray light across the entire AIMS system. The specific research content and innovative points are as follows:

1. A groundbreaking full-system stray light model was developed for the AIMS telescope, marking China's first comprehensive analysis framework for ground-based solar telescopes.

Using ASAP software with Monte Carlo ray-tracing algorithms, the model integrates the telescope's optical components, mechanical supports, and dome environment into a unified three-dimensional simulation. Computational efficiency was enhanced through directional analysis of critical scattering surfaces, prioritizing surfaces with high bidirectional scattering distribution function (BSDF) contributions. Furthermore, a novel evaluation system was established to quantify stray light across visible-MIR bands.

2. The quantitative analysis results of stray light for the focal plane scientific instruments of the AIMS telescope under different conditions.

Based on the established model, using design parameters and measured results of components as inputs, quantitative stray light data were obtained through computational analysis for the visible system, 8-10  $\mu\text{m}$  system, and FTIR systems. The stray light was further analyzed and compared in terms of optical component coatings, temperature, and material emissivity. The results demonstrate that specular scattering and self-thermal emission constitute the primary stray light sources. When applying identical coating processes for both infrared and visible optical systems, stray light is reduced by 80%. Under current cryogenic conditions, self-thermal emission exhibits a 2.3-order-of-magnitude attenuation in the 8-10  $\mu\text{m}$  system and a 2.5-order-of-magnitude reduction in the FTIR system compared to ambient temperature operation.

3. Completed the interference fringe analysis of the polarization analyzer and proposed effective suppression solutions.

The research on stray light generated by interference fringes of the polarization measurement system in the infrared band was carried out for the first time. Regarding the interference fringes generated by the polarization analyzer of the AIMS telescope as a source of stray light, the characteristic analysis, optimization design, and observational verification of the interference fringes of the polarization analyzer were conducted. Based on the theories of polarization optics and thin-film optics, four polarization modulation models were constructed to analyze the interference fringe characteristics of different models. An innovative optimization scheme of “half-wave plate dominated modulation and quarter-wave plate selective insertion” was proposed. By separating the modulation paths of Q/U signals and V signals, the instrumental polarization was reduced below 0.001, and the polarization efficiency was improved to 0.98. Field tests with the AIMS telescope showed that the new scheme significantly reduced interference fringes, with the oscillation frequency decreasing from 0.02 to 0.002, and the data quality was improved.

This study has achieved the first domestic full-system stray light analysis for a ground-based solar telescope, establishing quantitative stray light levels for the primary focal plane instruments of the AIMS telescope. Through systematic investigations of infrared-band stray light induced by multi-beam interference in polarization measurement systems, an optimized polarization modulation scheme has been developed. The research establishes a theoretical foundation for stray light source identification during telescope commissioning and long-term operation, while providing a methodological framework for stray light suppression in future development of large-scale telescope systems.

**Key Words:** Solar Telescope, Optomechanical Modeling, Stray Light Analysis, Polarization Interference Fringes

<b>目 录</b>	
<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 研究背景与意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	3
1.2.1 杂散光发展历程 .....	3
1.2.2 杂散光研究现状 .....	4
1.3 研究内容与论文结构 .....	6
<b>第 2 章 杂散光分析的理论基础</b> .....	7
2.1 杂散光相关概念 .....	7
2.1.1 杂散光定义 .....	7
2.1.2 杂散光术语 .....	8
2.1.3 杂散光分类 .....	9
2.2 杂散光中的辐射度学 .....	10
2.2.1 基础物理量 .....	10
2.2.2 双向散射分布函数 .....	12
2.2.3 辐射传输 .....	13
2.3 杂散光的分析流程 .....	15
2.3.1 系统建模 .....	15
2.3.2 光线追迹 .....	17
2.3.3 数据分析 .....	17
2.3.4 系统评价 .....	17
2.4 典型光学系统对比 .....	20
2.5 本章小结 .....	21
<b>第 3 章 AIMS 望远镜系统建模</b> .....	23
3.1 AIMS 望远镜简介 .....	23
3.2 光学系统建模 .....	24
3.3 机械结构建模 .....	38
3.4 圆顶建模 .....	43
3.5 表面建模 .....	45
3.6 本章小结 .....	46

第 4 章 AIMS 望远镜杂散光分析 .....	47
4.1 杂散光来源分析 .....	47
4.1.1 可见光系统 .....	47
4.1.2 红外系统 .....	48
4.2 杂散光重要表面分析 .....	48
4.2.1 重要散射表面 .....	48
4.2.2 采样表面 .....	52
4.3 非热辐射分析 .....	54
4.4 热辐射分析 .....	57
4.4.1 外部热辐射分析 .....	57
4.4.2 内部热辐射分析 .....	59
4.5 杂散光抑制讨论 .....	63
4.6 本章小结 .....	65
第 5 章 AIMS 望远镜偏振分析器干涉条纹分析 .....	67
5.1 偏振分析器的干涉建模 .....	67
5.1.1 偏振光和光学元件的数学描述 .....	67
5.1.2 偏振分析器的调制类型选择 .....	68
5.1.3 硒化镉波片的干涉模型 .....	69
5.1.4 不同调制模式的调制和解调矩阵 .....	70
5.1.5 偏振分析器的偏振模型 .....	73
5.2 偏振干涉条纹仿真分析和抑制 .....	74
5.2.1 参数设置 .....	74
5.2.2 波片的干涉条纹仿真 .....	76
5.2.3 偏振分析器的干涉条纹仿真 .....	77
5.2.4 偏振干涉条纹抑制 .....	79
5.3 观测验证 .....	82
5.4 本章小结 .....	87
第 6 章 总结与展望 .....	89
6.1 工作总结 .....	89
6.2 未来工作展望 .....	89
参考文献 .....	91
致谢 .....	95
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果 .....	97

## 图目录

图 2-1 界面处镜面反射和折射 .....	8
图 2-2 二阶鬼反射路径示意图 .....	8
图 2-3 关键表面和被照明表面示意图 .....	9
图 2-4 用以定义辐射度的物理量 .....	10
图 2-5 用以定义辐照度的物理量 .....	11
图 2-6 用于定义辐亮度的物理量 .....	11
图 2-7 双向散射分布函数的几何关系示意图 .....	12
图 2-8 面元间辐射能量传输示意图 .....	14
图 2-9 杂散光工程系统图 .....	16
图 2-10 杂光系数测试 .....	19
图 2-11 同轴系统-NVST 光学系统 .....	20
图 2-12 离轴系统-DKIST 光学系统 .....	21
图 3-1 AIMS 望远镜实物图 .....	23
图 3-2 AIMS 望远镜整体光学设计示意图 .....	24
图 3-3 AIMS 望远镜光学系统模型 .....	25
图 3-4 全局坐标信息图 .....	26
图 3-5 望远系统模型 .....	27
图 3-6 格里高利焦点情况 .....	28
图 3-7 格里高利焦点能量分布 .....	28
图 3-8 折轴系统模型图 .....	29
图 3-9 模型和原始设计中 M6 的光斑分布 .....	29
图 3-10 ASAP 模型中 M6 的能量分布图 .....	29
图 3-11 五镜消旋系统模型图 .....	30
图 3-12 中间焦点情况 .....	31
图 3-13 中间焦点能量分布 .....	31
图 3-14 准直系统模型图 .....	32
图 3-15 模型和原始设计中 M9 的光斑分布 .....	32
图 3-16 ASAP 模型中 M9 的能量分布图 .....	33
图 3-17 焦面系统设计图 .....	35
图 3-18 可见光系统模型图 .....	36
图 3-19 8 – 10 $\mu\text{m}$ 系统模型图 .....	36
图 3-20 FTIR 前置光路模型 .....	36

图 3-21 理想透镜替代系统模型图 .....	36
图 3-22 望远镜本体设计结构 .....	38
图 3-23 机械位置信息 .....	38
图 3-24 AIMS 望远镜的本体模型 .....	39
图 3-25 热光阑实物图 .....	39
图 3-26 热光阑模型 .....	40
图 3-27 焦面系统设计分布图 .....	40
图 3-28 傅里叶光谱仪实物照片 .....	41
图 3-29 焦面系统模型图 .....	41
图 3-30 可见光系统模型 .....	41
图 3-31 8 - 10 $\mu$ m 成像系统模型图 .....	42
图 3-32 FTIR 前置光路模型图 .....	42
图 3-33 FTIR 箱体模型图 .....	42
图 3-34 圆顶模型 .....	43
图 3-35 AIMS 望远镜 90° 姿态模型 .....	44
图 3-36 AIMS 望远镜 60° 姿态模型 .....	44
图 3-37 ASAP 软件漫反射金属表面散射模型 .....	45
图 4-1 二次反射光路分类 .....	47
图 4-2 AIMS 模型反向光线追迹 .....	49
图 4-3 正向光线追迹的示意图 .....	52
图 4-4 瞄向探测器的散射光线 .....	53
图 4-5 格里高利焦点处反向追迹图 .....	53
图 4-6 三个系统的 SLR 情况 .....	56
图 4-7 黑体辐射曲线 .....	57
图 4-8 不同温度太阳的黑体辐射曲线 .....	58
图 4-9 外部辐射的杂散光比 .....	58
图 4-10 8-10 $\mu$ m 成像系统制冷前后的像面照度分布图 .....	62
图 4-11 材料发射率变化的影响 .....	63
图 4-12 环境温度变化的影响 .....	63
图 5-1 波片的简单几何模型 .....	69
图 5-2 四种偏振调制方案模型 .....	71
图 5-3 硅基底中红外线栅偏振片透过率曲线 .....	74
图 5-4 多级波片的 Mueller 矩阵 .....	77
图 5-5 复合波片的 Mueller 矩阵 .....	77
图 5-6 四种模式的响应矩阵 X 随波数的变化 .....	78
图 5-7 Q 信号测量仪器偏振与偏振效率随波片旋转角度的变化 .....	80

图 5-8 U 信号测量仪器偏振与偏振效率随波片旋转角度的变化	80
图 5-9 方案 (a) 和方案 (e) 的响应矩阵 X 随波数的变化	82
图 5-10 偏振分析器位置分布图	83
图 5-11 偏振分析器结构图	83
图 5-12 膜系反射率图	83
图 5-13 方案 (a) 的测试实物图	84
图 5-14 方案 (a) 太阳黑子的偏振谱线	85
图 5-15 方案 (e) 测试实物图 (左图为 V 信号测量, 右图为 Q 和 U 信号测量)	85
图 5-16 方案 (e) 太阳黑子的偏振谱线	86
图 5-17 Q、U、V 的信号强度随波数变化图	86
图 5-18 方案 (e) 结构设计图	87

## 表目录

表 1-1 杂散光分析软件对比	3
表 3-1 引导光学系统元件汇总表	34
表 3-2 焦面设备光学元件汇总表	37
表 4-1 可见光系统关键表面	50
表 4-2 8 - 10 $\mu\text{m}$ 成像系统关键表面	51
表 4-3 FTIR 系统关键表面	51
表 4-4 可见光系统杂散光传播路径	54
表 4-5 8 - 10 $\mu\text{m}$ 系统杂散光传播路径	55
表 4-6 FTIR 系统杂散光传播路径	55
表 4-7 三个系统视场内外的平均 SLR	56
表 4-8 8 - 10 $\mu\text{m}$ 系统内部杂散光在探测器上产生的辐照度数据表	60
表 4-9 FTIR 系统对应的内部杂散光在探测器上产生的辐照度数据表	61
表 4-10 8-10 $\mu\text{m}$ 系统和 FTIR 系统制冷前后的杂散光比	62
表 4-11 AIMS 三个焦面系统的杂散光分布	64
表 5-1 方案 (a) 和 (c) 的调制模式	71
表 5-2 方案 (b) 和 (d) 的调制模式	72
表 5-3 硅基底中红外线栅偏振片参数信息	75
表 5-4 旋转波片的仿真参数	76
表 5-5 不同方案的仪器偏振、偏振串扰和偏振调制效率	78
表 5-6 方案 e 的调制模式	81
表 5-7 仪器偏振与偏振效率随波片旋转角度的变化	81

国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59  
中国科学院国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59  
国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59  
中国科学院国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景与意义

太阳是距离我们最近的恒星，也是唯一一颗可以进行精细观测的恒星，其高时间、高空间、高光谱分辨率及高偏振精度的成像观测，为天体物理学关键问题的研究提供了重要的观测依据和理论基础；太阳的高温等离子体环境形成的巨型磁流体动力学实验室是无法在地球上模拟的，对它的研究促进了等离子体物理和磁流体力学等物理学科的发展；以太阳为中心的行星系统是已知唯一孕育理性生命的天体系统，这使得太阳成为探索宇宙生命起源与演化的最佳研究样本；此外，太阳作为灾害性空间天气的源头，其剧烈活动产生的高能辐射与等离子体流，会对日地空间环境造成强烈扰动，对航空航天、导航通讯、电力传输乃至国民经济造成灾害性影响。(邓元勇等, 2020; 林元章, 2000; 汪景琇, 2024)

太阳大气是个巨大的磁等离子体，其间的一切活动现象和过程是由磁场主导的电磁相互作用过程。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，当今太阳物理的重大进展都与太阳磁场的观测研究进展密不可分。因此，太阳磁场的观测研究无论过去、现在还是将来，始终是太阳和日地物理研究的前沿和热点。(李文显等, 2022; 邓元勇等, 2023)

迄今为止，有关太阳磁场的可靠测量均是基于 Zeeman 效应 (Zeeman, 1897) 而实现的，其核心原理在于：在太阳大气磁场环境中，太阳光谱线会发生分裂。这些分裂光谱子线的裂距与磁场强度成正比，具体的函数关系为：

$$\Delta\lambda_B = 4.67 \times 10^{-13} g \lambda^2 B \quad (1-1)$$

其中， $\Delta\lambda_B$  为光谱子线裂距， $g$  为磁敏因子， $B$  为磁场强度。这些分裂后的谱线具有不同的偏振态。目前，太阳磁场的测量主要集中在可见光和近红外波段，Zeeman 裂距远小于谱线宽度，无法直接测量裂距，只能通过 Zeeman 子线之间的偏振态变化来反演太阳磁场的信息。因此，目前的磁场测量方法最终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 (Umno, 1956)，然而，确定太阳大气模型需要用到很多物理参数，这些参数依赖于局地太阳大气环境而且无法精确测定，这导致反演结果不唯一、精度受限。

从公式1-1可知，波长  $\lambda$  越长，谱线裂距  $\Delta\lambda_B$  越大。当在中远红外波段观测太阳磁场时，Zeeman 效应引起的谱线分裂在相同磁敏因子的前提下，比可见光高两个数量级以上，Zeeman 裂距对谱线的相对宽度也比同等前提下的可见光相对宽度高几十倍，为直接测量谱线裂距、实现太阳磁场精确测量提供了可能。而且中远红外波段还有大气视宁度好、大气散射光小、仪器散射光小等优势，是太阳物理尚未打开的最后一扇观测窗口，也是地基天文观测重要的竞争方向。

基于以上分析,在中远红外波段开展太阳磁场观测,是提高磁场测量精度的有效手段。国际上大型太阳光学观测设备均以高空间分辨率为第一追求目标,尽管美国 NST、德国 GREGOR 及中国 NVST 等米级望远镜实现了亚角秒成像,但受限于波段,并不足以开展太阳磁场的精确测量 (Cao et al., 2010; Balthasar et al., 2007; 王瑞等, 2018)。美国 DKIST 望远镜虽设计的观测波段到  $30\ \mu\text{m}$  的红外波段,但投入使用的科学仪器以可见光和近红外为主,着重于高分辨观测 (Rast et al., 2021)。AIMS 望远镜 (The accurate infrared solar magnetic field measurement system, AIMS) 选用太阳发射线 MgI  $12.32\ \mu\text{m}$  谱线作为磁场观测谱线,是国际上首台专用于中远红外太阳观测的科研设备 (Li et al., 2021; 邓元勇等, 2023)。

AIMS 望远镜采用离轴格里高利光学系统设计,通过折轴系统将太阳光引入库德房,库德焦面仪器配置了  $8 - 10\ \mu\text{m}$  成像光路、红外傅里叶光谱仪 (FTIR)、可见光成像光路和偏振测量系统,两路红外仪器都设计有真空制冷系统。太阳磁场测量是在太阳强光背景下的弱信号观测,AIMS 望远镜作为首台中红外观测设备,杂散光不仅来源于外部杂散光和成像杂散光,还有元件自身及周边机械结构热辐射产生的杂散光,其杂散光水平对望远镜成像观测及磁场观测的影响尚无经验可以借鉴,分析评估望远镜的杂散光水平成为 AIMS 望远镜研制中的重要一环。

AIMS 望远镜采用离轴光学系统设计,杂散光传播路径更加复杂,中红外波段的特殊光学特性与低温工作环境,使得杂散光产生机制与可见光系统存在不同;高精度偏振测量对背景噪声极为敏感,杂散光引入的偏振串扰会严重干扰磁场反演结果。而现有杂散光分析方法难以直接适用于 AIMS 望远镜的复杂系统,亟需开展针对性研究。

本论文以 AIMS 望远镜为研究对象,系统开展了望远镜光机全系统的可见-红外杂散光分析。基于杂散光理论,利用 ASAP 软件建立了 AIMS 望远镜全系统的杂散光模型,系统地研究了杂散光产生机制与传播规律,给出了可见光、 $8 - 10\ \mu\text{m}$  光路、FTIR 光路的杂散光分析结果以及杂散光的主要来源,并针对偏振测量系统,进行了红外偏振杂散光分析研究。

本论文的完成,在国内首次实现了红外太阳望远镜的杂散光系统建模分析,相比于目前国内的天文望远镜杂散光分析,不仅包括了望远镜光学系统、机械支撑,而且涵盖了圆顶结构和红外波段的光机系统自身热辐射;首次开展了偏振测量系统的干涉条纹在红外波段产生的杂散光研究。研究结果给出了 AIMS 望远镜的科学终端的系统杂散光水平,为望远镜长期运行中杂散光溯源建立完善的分析评价体系,也为未来大型望远镜设计中杂散光抑制提供技术储备与方法借鉴。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 杂散光发展历程

对于杂散光的研究可以追溯到 1741 年瑞士数学家 Leonhard Euler 给 Anhalt-Dessau 的公主写的一本关于自然科学与哲学的教程中，在《构建望远镜的注意事项》的信中他将杂散光称为“不好的影响”，提出使用黑化表面处理、视场光阑和挡板的解决方法，至今仍然是处理杂散光的核心手段。(Hecht, 2001)

1896 年，Lord Rayleigh 在研究中注意到表面粗糙度对光学性能的影响，并于 1901 年进一步探讨了表面粗糙度、波长和入射角对反射光束的影响 (Rayleigh, 1901)。这也是最早对粗糙表面散射的研究，拓展了杂散光研究的维度，为理解杂散光的产生提供了新视角。

20 世纪初期，国外学者开始关注杂散光对光学系统成像的影响。然而，由于杂散光研究尚未形成独立学科体系，且缺乏系统理论与实验基础，这一时期的研究工作进展缓慢。20 世纪 50 年代大口径光学望远镜的发展让杂散光分析逐渐得到重视，面对复杂的光学系统需求，研究者从几何光学角度出发，借鉴前人经验，进一步优化遮光罩、光阑等设计。但受限于理论的不完善，此阶段杂散光分析仍高度依赖经验积累与实验验证。20 世纪 70 年代初，空间光学仪器对性能有严苛的要求，美国国家航空航天局 (NASA) 开始认识到空间光学系统杂散光抑制技术的重要性，开始邀请专家和学者进行杂散光分析的专项研究。随后，国际光学工程协会 (SPIE) 召开首次杂散光问题专题国际会议，杂散光问题从此正式进入了大家的视野，逐渐成为光学领域的重点关注方向。(Breault, 1990, 1977, 1989)

此后，在前期研究积累与广泛关注的推动下，杂散光研究得到了快速发展。从杂散光的产生和传输理论、杂散光的分析计算、杂散光的测量方法以及杂散光的防治措施等方面展开深入探索，杂散光分析体系逐渐完善。随着理论的成熟，杂散光分析方法也从单纯依赖设计者经验和简单光路判断，转变为以系统模型为基础的定量研究。70 年代后期，随着杂散光分析软件的不断发展成熟，杂散光分析工作进一步升级，研究者依托系统的数学、物理模型，结合大量实测表面数据，借助杂散光分析软件开展更加贴合实际情况的研究；与此同时，杂散光测量、表面模型测量、粗糙表面散射理论、颗粒污染散射理论等相关领域也不断发展。(Nicodemus, 1970; Harvey, 1976; Bennett, 1976; Church et al., 1979)

表 1-1 杂散光分析软件对比

Table 1-1 Comparison of Stray Light Analysis Software

软件名称	软件兼容性	建模能力	分析功能	使用范围
FRED	CODE V、Zemax、OSLO	较差	中等	国外较多
ASAP	CODE V、Zemax、SAYNOPSYS、SOLIDWORKS	较差	最佳	国外较多
LightTools	CODE V、Zemax	较好	较好	较少
TracePro	CODE V、Zemax、OSLO、SOLIDWORKS	较好	较好	国内较多

进入 21 世纪，杂散光研究在前期坚实的理论与技术基础上持续深入，散射杂散光、衍射杂散光的理论研究在不断完善。与此同时，随着杂散光分析软件（如 APART、ASAP）的持续迭代升级，光学表面粗糙度、颗粒污染与表面散射特性 BRDF 的模拟分析变得更加精准高效，为理解杂散光的复杂行为提供了强大的技术支撑。(Stover, 2012; Harvey et al., 2007; Peterson, 2004; Dittman, 2002)

经过一个多世纪的探索与积累，针对各种染黑工艺及涂层材料研究、表面特性及表面污染对杂散辐射的影响以及表面散射特性测量方面的研究不断发展。国外对于杂散光分析从杂散光理论、杂散光仿真、杂散光评估、杂散光测试到杂散光抑制已经有了较为成熟的分析体系。

### 1.2.2 杂散光研究现状

随着天文观测精度需求的持续提升，杂散光抑制逐渐成为地基与空间望远镜设计的核心挑战之一。国内外学者针对不同类型望远镜的杂散光特性，开展了大量的望远镜杂散光研究。

天文望远镜的杂散光研究起源于空间望远镜 (Tiesenhausen et al., 1970)，美国航天局 (NASA) 在 20 世纪 90 年代针对空间红外望远镜 SIRTf 开展专项研究，通过构建光机模型分析内部元件散射与热辐射影响，设计多层遮光结构与低温涂层，有效抑制了低温环境下的杂散辐射干扰，为后续空间红外设备奠定技术基础 (Werner et al., 1990)。2003 年，Patterson 等人利用 TracePro 对 VISTA 望远镜的红外成像系统进行分析，通过挡板设计、涂层优化及制冷优化，将热背景辐射降低 50%，验证了低温光学设计对杂散光的抑制效果 (Patterson et al., 2003)。进入 21 世纪，詹姆斯韦伯太空望远镜 (JWST) 的杂散光分析聚焦复杂空间环境下的多源干扰，通过整合镜面粗糙度控制、低温冷屏设计等技术，解决了自身热辐射与银河天光的散射问题，确保中红外波段杂光辐射亮度低于设计要求 (Rohrbach et al., 2012)。此外，Romoli 等人针对 Solar Orbiter Metis 日冕仪开展实验室测试，通过紫外干涉涂层与光谱带通滤波器优化，实现  $1.5^\circ - 2.9^\circ$  视场内的低杂光成像 (Romoli et al., 2021)；Sien 等人设计 SoloHI/WISPR 日球成像仪的多级挡板系统，结合太阳能电池板反射涂层调整，使杂散光抑制水平优于  $10^{-6}$ ，满足内日球层大视场观测需求 (European Space Agency, 2011)。

地基望远镜领域的杂散光分析研究主要聚焦于大口径望远镜。美国 30 米望远镜 (TMT) 设计初期利用 FRED 软件构建包含圆顶、望远镜与仪器的复杂模型，发现视场内光源为杂光主导因素，圆顶结构贡献较低，据此优化了内部遮光光阑与镜面涂层 (Ellis et al., 2010)。美国 DKIST 望远镜作为当前最大的地基太阳观测设备，主镜口径 4 米，采用离轴格里高利光学设计以减少杂散光，并通过 ASAP 软件分析确认镜面粗糙度控制为杂光抑制关键，为高分辨率太阳观测提供保障 (Hubbard, 2013)。

国内杂散光的研究围绕自主研发设备展开持续探索。2010 年，赵飞等人针对兴隆 1m 光学望远镜，通过仿真与观测验证，优化遮光罩及挡光环设计，显著

降低杂光系数(赵飞等, 2010); 2015年, 李陶然等人利用 TracePro 分析 50 BiN 望远镜, 设计 6 级挡光环使关键视场 PST 下降 3 - 4 个数量级(李陶然等, 2015); 2016年, 韩笑等人针对云南天文台 NVST 望远镜多波段光谱仪, 通过刻蚀狭缝边缘、清洁滤光片及图像处理抑制杂散光(韩笑, 2016); 2019年, 李陶然等人量化分析兴隆 2.16m 望远镜杂散光, 优化机械结构表面处理(李陶然等, 2020); 2020年, 潘森等人通过 TracePro 建模 2m 环形地基太阳望远镜, 确认其杂散光水平不影响太阳磁场高分辨成像(潘森等, 2020)。随着计算机技术的发展, 吴郁楠等人于 2023 年提出空间望远镜杂散光数字孪生框架, 整合地面至轨道段的全链路环境参数(如镜面粗糙度、污染颗粒分布), 实现了动态仿真与实时性能预测(Wu 等, 2023)。2024 年, 张梓扬等人将机器学习技术引入空间引力波探测望远镜的杂散光抑制中, 训练智能代理自动识别表面散射导致的杂散光路径(张梓扬等, 2024)。

AIMS 望远镜的核心目标之一是 MgI 12.32  $\mu\text{m}$  谱线的太阳磁场观测, 偏振技术是实现太阳矢量磁场测量的必要手段。在偏振测量技术领域, 可见光波段常用的调制类型有: 旋转波片调制、光弹性调制 (PEM)、磷酸二氢钾 (KD\*P) 调制、液晶可变延迟器 (LCVRs) 调制和铁电液晶延迟器 (FeLCs) 调制等(Sharma et al., 2022; Hipps et al., 1979; Hou, 2014; Pust et al., 2006; Diner et al., 2007; Xu et al., 2011; Fineschi et al., 2005; Schou et al., 2012; Ichimoto et al., 2008)。相比之下, 长波红外波段 (LWIR, 8 - 15  $\mu\text{m}$ ) 主要采用旋转波片调制和光弹调制 (PEM) 两种方案, 其中光弹调制很少用于偏振成像调制(Hou et al., 2020), AIMS 望远镜采用旋转波片调制方法, 其偏振分析器由旋转波片和偏振片组成。AIMS 望远镜的高精度偏振测量中, 波片多光束干涉产生的杂散光不容忽视, 这些杂散光会引发显著的仪器偏振, 降低系统偏振探测灵敏度, 进而影响太阳磁场的精确测量。

多位学者对波片干涉条纹分析开展了深入研究。Clarke 团队系统的分析了单波片、Pancharatnam 波片、复合波片与消色差波片的干涉条纹, 通过精确数学模型解析干涉图样, 并通过改变波片参数抑制条纹效应(Clarke, 2004a,b,c); Casini 等人运用二维模式识别和主成分分析技术处理太阳观测仪器中的光谱偏振条纹(Casini et al., 2012)。Harrington 团队基于偏振建模和 Berreman 演算, 为 DKIST 太阳望远镜系统分析了 400 - 1600nm 波段的光谱偏振条纹, 并在 Keck LRISp 光谱偏振仪中通过系统校正技术将偏振效应控制在 0.05% 以下(Harrington et al., 2017, 2018)。

目前, 国内外杂散光研究已经形成理论建模与实测验证结合的技术体系。国内在天文应用领域对地基望远镜的杂散光分析集中在可见光波段, AIMS 望远镜作为工作于中红外波段的专用设备, 不仅面临地球大气对红外辐射的强吸收、散射效应, 还存在内部热杂散辐射与大气背景耦合的复杂情况, 致使其杂散光产生机制、传输路径及抑制策略均与可见光波段存在显著差异。在偏振干涉条纹相关研究方面, 尽管已在元器件参数优化和算法后处理等方面取得一定进展, 但仍难以满足 AIMS 望远镜在中红外波段高精度测量太阳磁场的需求。因此, 亟需从杂

散光产生根源出发,开展 AIMS 望远镜全系统的杂散光分析以及偏振干涉条纹的针对性研究。

### 1.3 研究内容与论文结构

本研究以 AIMS 望远镜为研究目标,结合杂散光理论,确定研究方法;构建了光、机全系统杂散光分析模型,给出各光路杂散光水平,并针对偏振干涉条纹对偏振测量的影响展开研究。主要章节内容分布如下:

第二章从杂散光的基础理论出发,介绍了杂散光的产生路径、分类及相关辐射度学理论,重点介绍了杂散光的分析流程。通过分析理解杂散光的理论体系,结合离轴与同轴光学系统特点,给出适于 AIMS 望远镜的来源、计算方法以及杂散光评价指标。

第三章详细阐述了 AIMS 望远镜全系统的建模过程,涵盖光学、机械、圆顶及表面建模。对于光学系统,完成了离轴系统的复杂建模,并通过对比 ASAP 模型与 ZEMAX 原始设计的结果,保证了模型的准确性;对于机械结构和圆顶系统,采用空间坐标信息和表面相互关系进行脚本建模,建立了包含望远镜本体的所有机械结构、圆顶、天窗、科学仪器平台以及库德房墙壁的综合模型,通过对比不同姿态的光线传输进行模型验证。在以上模型中所采用的表面依据形状、材料的不同特性及部分实测数据,选择适于的表面散射模型建模。

第四章基于已有的 AIMS 望远镜光机全系统模型,开展针对性的杂散光分析,给出各科学仪器的杂散光水平。通过分析杂散光的来源,对比可见光与红外系统的不同特性,明确研究重点;筛选重要散射表面和采样表面,进行指向性分析,提高计算效率;对比温度、材料发射率和光学元件膜系的影响,进行差异化分析,为杂散光抑制提供解决方向。

第五章将 AIMS 望远镜偏振分析器产生的干涉条纹视为一种杂散光来源,围绕偏振分析器开展干涉条纹对偏振测量的影响以及优化分析。基于偏振光学和薄膜光学理论建立四种偏振调制模型。分析对比各方案的偏振条纹特性,提出优化方案,经过 AIMS 望远镜实测,优化后方案显著减少干涉条纹,数据质量提升。

第六章总结了本论文的主要工作和结果,对未来的研究方向进行了展望。

## 第2章 杂散光分析的理论基础

AIMS 望远镜的光机系统架构复杂，其观测覆盖可见 - 中红外宽波段，杂散光问题呈现多源性、复杂性特征，需要完备的杂散光分析理论体系予以支撑。本章节从杂散光的基础概念出发，对杂散光的产生路径、分类和相关辐射描述进行了详细介绍；根据杂散光分析流程和 AIMS 望远镜结构特点，确定 AIMS 望远镜杂散光分析的研究内容，为后续本课题的深入研究打下理论基础。

### 2.1 杂散光相关概念

#### 2.1.1 杂散光定义

在成像光学系统中，任何非目标光线经传播后抵达探测器的光均称为杂散光；在非成像系统中，非预期的光线传播（如光斑、光晕）亦属于杂散光范畴 (Fest, 2013; 岑兆丰 等, 2007)。在天文观测中，天体发出的微弱信号易被杂散光淹没，直接导致观测准确性与灵敏度下降，影响对天体特征的精确分析。在成像系统里，杂散光干扰正常成像过程，致使图像对比度降低、画面模糊，严重影响图像质量。在光谱测量中，杂散光会引发光谱失真，对目标光谱特征的准确分析形成干扰，使得测量结果出现偏差。对于红外系统而言，杂散光的影响更为复杂且严重。由于红外探测器对热辐射极为敏感，系统自身及环境中的热辐射极易产生大量杂散光，大幅抬升探测器背景噪声，致使红外图像出现严重的噪点与伪影，降低成像质量 (陈永和 等, 2006)。

杂散光通常由镜面反射或者散射产生。其中，来自镜面的反射光是确定的，遵从 Snell 反射和折射定律 (Greve, 2004)，如图2-1所示。这些规律使得镜面反射产生的杂散光在一定程度上具有可预测性。Snell 反射定律指出，反射光线的反射角等于入射角  $\theta_i$ ，且 Snell 折射定律指出，折射光线的出射角度  $\theta_t$  满足：

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (2-1)$$

其中  $n_i$  和  $n_t$  分别为入射介质与透射介质的折射率。

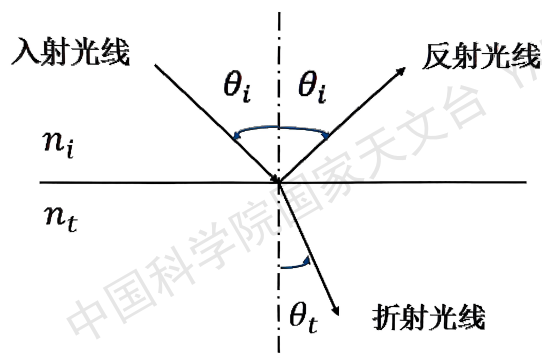


图 2-1 界面处镜面反射和折射

Figure 2-1 Specular reflection and refraction at the interface

而散射光线的角度是随机的，受表面粗糙度、污染物颗粒等因素影响显著(宋延松等, 2017)。在复杂光学系统中，光线可能先在透镜表面因粗糙度发生散射，随后散射光在反射镜表面再次反射，最终抵达探测器。由于散射路径难以精确预测，极大增加了杂散光分析与抑制的难度。

## 2.1.2 杂散光术语

### 2.1.2.1 杂散光路径

在杂散光分析中定义杂散光路径是为了明确杂散光的传播轨迹和来源。光路作为光束到达像面前所经历的序列路径，是实现光学功能的核心通道。通常情况下，大部分光学系统仅存在一条预期光路，保障光线精准传输并达成预期成像或光学效果。但是杂散光会衍生大量的非预期光路，严重干扰系统性能。根据光路中杂散光机制的数目把光路进行分类并定义其阶次。杂散光直接照射像面时为零阶光路，意味着光线未经过任何额外的复杂光学过程便干扰成像；而如图所示的二阶光路，则包含两次鬼反射，即杂散光在光学系统内部经历两次非预期的反射过程后到达像面，影响成像质量。

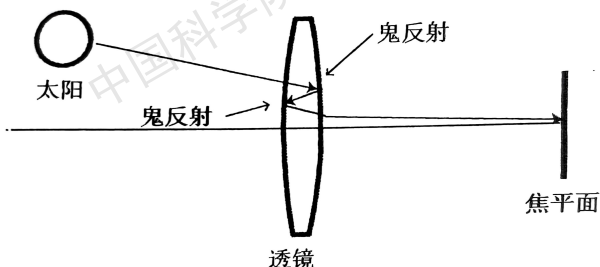


图 2-2 二阶鬼反射路径示意图

Figure 2-2 Example of a second-order ghost reflection path

光路透过率为光路末端光强与起始端光强的比值，通常遵循  $a^n$  的衰减规律，

其中  $a$  为小于 1 的常数,  $n$  代表阶次。即随着阶次  $n$  的增加, 光路透过率呈指数级下降。这表明阶次越低, 在焦平面产生的杂散光就越强, 对光学系统成像或测量结果的影响也就越大。所以, 在光学系统设计与优化时, 需重点关注低阶杂散光的抑制, 以降低其对系统性能的负面影响。

### 2.1.2.2 重要散射表面

杂散光传播路径具有随机性, 每个散射表面对杂散光的贡献不同, 识别重要散射表面是杂散光分析的重要一环。如图 2-3 所示为重要的散射表面, 包括关键表面和被照明表面。关键表面为可以被探测器或像面看到的表面; 被照明表面是被杂散光照射的表面。

既是关键表面又是被照明表面的表面为一阶散射表面, 是一阶杂散光的主要来源, 其产生的杂散光路径也是杂散光传播的核心路径。准确识别这些重要的散射表面, 能够使研究工作聚焦杂散光产生的关键环节, 为杂散光分析与光学系统设计优化提供有力支撑。

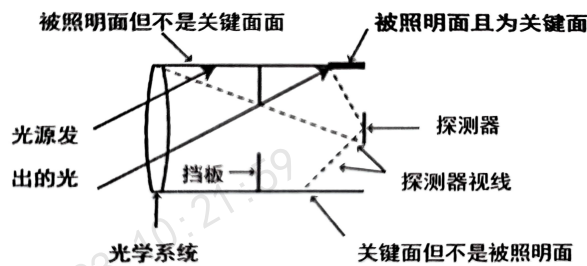


图 2-3 关键表面和被照明表面示意图

Figure 2-3 Critical and illuminated surfaces

(Fest, 2019)

### 2.1.3 杂散光分类

杂散光依据其来源可划分为三类: 系统外部杂散光、内部杂散光以及系统自身热辐射。系统外部杂散光主要源于光学系统外部的非目标辐射源, 如太阳光、地球表面反射光以及大气散射光等。这些外部光线进入系统后经多次反射、折射或衍射抵达探测器像面, 干扰正常成像。内部杂散光是指成像光线偏离正常传播路径, 通过非正常光路或非光学表面传递至探测器像面。在折射式光学系统中, 光线因偶次反射形成的鬼像便是典型的内部杂散光现象。这类杂散光的产生与光学系统的设计缺陷、元件表面质量密切相关。系统自身热辐射是红外光学系统中特有的杂散光来源。系统内部的光学元件以及机械结构等部件因其自身温度产生热辐射, 经过系统内的各种传递过程, 若抵达探测器便会形成干扰。热辐射的强度与物体的温度以及发射率等因素密切相关。一般来说, 温度越高, 热辐射强度越大; 发射率越高, 物体向外辐射的能量也越多。在低温环境下工作的红外探测器, 对热辐射非常敏感, 即使是微小的热辐射也可能会使探测器产生噪声信

号, 系统自身热辐射对探测器的影响尤为显著。(余菲等, 2018; 牛金星等, 2010)

AIMS 望远镜的核心科学目标是 MgI 12.32 $\mu\text{m}$  谱线的太阳磁场观测, 偏振技术是实现太阳矢量磁场测量的必要手段, 偏振分析器是实现偏振测量的核心组件。在中红外波段, 受红外元件研制技术的影响, 偏振分析器中波片的多光束干涉效应产生的条纹更明显, 直接影响偏振测量精度, 进而影响磁场测量精度。因此 AIMS 望远镜的杂散光分析不仅要考虑外部杂散光、内部杂散光和热辐射, 还需考虑偏振器件多光束干涉产生的杂散光。

## 2.2 杂散光中的辐射度学

杂散光通过能量来表述, 辐射度学是杂散光定量分析的基础理论。通过定义辐射度、辐照度、辐亮度等基础物理量, 建立精确描述杂散光能量分布、传播特性及强度变化的数学框架。借助辐射度学的公式与计算方法, 能够系统量化杂散光在光学系统内的能量传输过程, 分析其不同表面的反射、散射及吸收行为, 从而精准获取杂散光的分布等特性。

### 2.2.1 基础物理量

#### 1) 辐射度

辐射度  $M$  为光源单位面积上发射的光通量, 可用于量化杂散光光源能量, 其定义为:

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \quad (2-2)$$

其中  $d\Phi$  是光源发出的微分光通量,  $dA$  是光源的微分面积, 示意图如图 2-4 所示。辐射度单位是  $\text{ph}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$  或者在光度学中单位是  $\text{lx}$  ( $\text{lm}/\text{m}^2$ )。

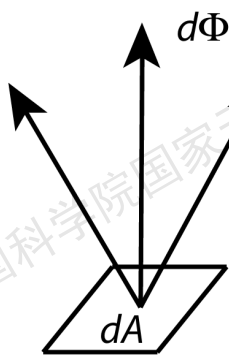


图 2-4 用以定义辐射度的物理量

Figure 2-4 Quantities used in the definition of exitance

#### 2) 辐照度

辐照度  $E$  用于描述单位面积上接收到的光通量, 它反映了光在某一表面上的分布情况, 在杂散光分析中, 通过计算探测器表面的辐照度, 可以了解杂散光

在探测器上的能量分布情况。其定义为：

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (2-3)$$

其单位为  $\text{W}/\text{m}^2$  或  $\text{ph}/(\text{s} \cdot \text{mm}^2)$ 。辐照度与辐射度的唯一区别是光的传播方向不同。

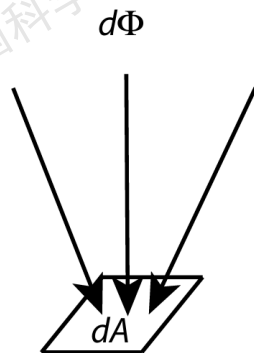


图 2-5 用以定义辐照度的物理量

Figure 2-5 Quantities used in the definition of irradiance

### 3) 辐亮度 ( $L$ )

辐亮度是指单位面积、单位立体角内的光通量。它不仅考虑了光在表面的分布，还考虑了光的传播方向，能够更全面地反映辐射能量在空间特定方向上的分布特性。

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cos(\theta) d\omega} \quad (2-4)$$

其中， $d\Phi$  是从光源的微分投影面积  $dA \cos \theta$  发射到微分立体角  $d\omega$  的微分功率，如图 2-6 所示。单位为  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$  或  $\text{ph}/(\text{s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{sr})$ 。

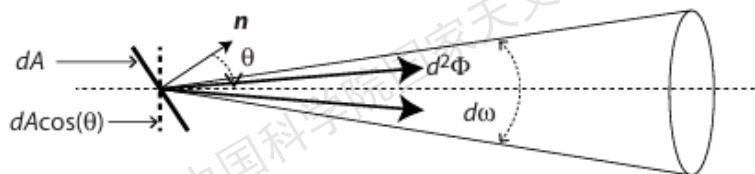


图 2-6 用于定义辐亮度的物理量

Figure 2-6 Quantities used in the definition of radiance

(Fest, 2013)

在红外系统研究中，普朗克黑体方程为光谱辐亮度  $L_\lambda$  的计算提供了理论基础。温度为  $T$  的扩展源在不同波长  $\lambda$  下的光谱辐亮度为

$$L_\lambda(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^4 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad (2-5)$$

单位为  $\text{ph}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{m})$ , 其中,  $C_1 = 5.99584 \times 10^{22} \text{ photons} \cdot \text{m}^5/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ ,  $C_2 = 14387.9 \text{ m} \cdot \text{K}$ ,  $T$  为光源温度, 单位开尔文 (Sagawa et al., 1979)。

### 2.2.2 双向散射分布函数

杂散光的传播是一个涉及多重表面相互作用的复杂过程, 包含反射、散射等物理现象。双向散射分布函数 BSDF (Bidirectional Scattering Distribution Function) (Bartell et al., 1981) 作为核心量化工具, 能够精准刻画材料表面的辐射与方向散射特性, 与材料表面粗糙度、入射波长、介电常数等因素紧密相关。获取 BSDF 数据主要依赖两条路径: 通过高精度实验直接测量材料表面, 或借助散射模型开展仿真模拟获取近似解。从定义层面, BSDF 表征为光在材料表面的散射辐亮度与入射辐照度的比值, 数学表达式如下:

$$\text{BSDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s) = \frac{dL(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s)}{dE(\theta_i, \phi_i)} \quad (2-6)$$

式中,  $\theta_i$ 、 $\phi_i$  分别是入射光线的入射角和方位角,  $\theta_s$ 、 $\phi_s$  分别是出射光线的散射角和方位角,  $dL$  为散射表面的微分辐亮度,  $dE$  为微分入射辐照度。

双向散射分布函数的几何关系示意图如图2-7所示。

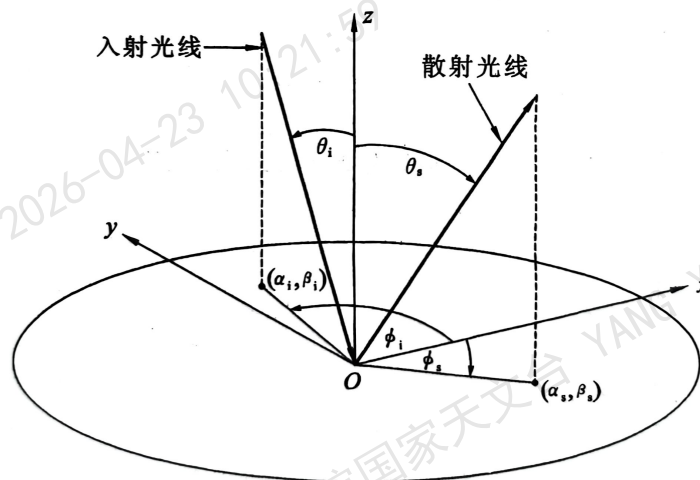


图 2-7 双向散射分布函数的几何关系示意图

Figure 2-7 Schematic of Bidirectional Scattering Distribution Function Geometry

构建材料表面散射特性的物理数学模型 (BSDF) 时, 通常以实验测量的半球反射率为基础, 通过数学拟合形成解析表达式。实际光学系统中, 杂散辐射的产生机制极为丰富, 涵盖光学元件间的菲涅尔反射、孔径边缘的衍射效应, 以及透镜气泡、镜面缺陷、表面污染 (灰尘及颗粒杂质)、空气悬浮颗粒引发的散射, 甚至包含焦平面自身的散射与辐射。BSDF 模型的精度直接决定杂散光分析结果的准确性, 更精确的表面 BSDF 模型能够提供更可靠的分析数据。

BSDF 包括用于描述表面漫反射特性的双向反射分布函数 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function)、描述透明介质表面透射散射特性的双向透射分布函数 BTDF (Bidirectional Transmittance Distribution Function) 以及描述衍射特性的双向衍射分布函数 BDDF (Bidirectional diffraction Distribution Function) (Nicodemus et al., 1977)。在 AIMS 杂散光分析中, 主要考虑 BRDF 和 BTDF。

双向反射分布函数 BRDF 用于描述表面反射特性, 定义为在给定的入射方向上, 单位面积的表面在反射方向上的反射辐射通量与该表面接收到的入射辐射通量之比, 数学表达式为

$$\text{BRDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s) = \frac{d\Phi_s(\theta_s, \phi_s)}{d\Phi_i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_s d\Omega_s} \quad (2-7)$$

其中  $\theta_i$ 、 $\phi_i$  是入射光的方向角,  $\theta_s$ 、 $\phi_s$  是反射光的方向角,  $d\Phi_s$  是反射方向的辐射通量,  $d\Phi_i$  是入射辐射通量,  $d\Omega_s$  是反射方向的立体角。

对 AIMS 望远镜各部件表面进行杂散光分析时, 可以利用 BRDF 对主镜、次镜等光学表面以及一些高反射的结构表面 (例如: 热光阑锥角反射面) 的散射特性进行建模, 通过准确测量和设定 BRDF 参数, 可以更精确地模拟杂散光的传播路径和强度分布。

双向透射分布函数 BTDF 用于描述光透过光学元件时的散射特性, 是指在给定的入射方向上, 单位面积的光学元件在透射方向上的透射辐射通量与该元件接收到的入射辐射通量之比, 数学表达式为

$$\text{BTDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_t, \phi_t) = \frac{d\Phi_t(\theta_t, \phi_t)}{d\Phi_i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_t d\Omega_t} \quad (2-8)$$

其中  $\theta_t$ 、 $\phi_t$  是透射光的方向角,  $d\Phi_t$  是透射方向的辐射通量,  $d\Omega_t$  是透射方向的立体角。

对分析 AIMS 系统中光的传播时, BTDF 能帮助确定光线透过透镜、窗口等元件时的散射情况, 以及光线在不同元件之间的透射和散射, 从而评估杂散光对系统成像的影响。

对于表面散射特性的总体描述, 可采用总积分散射 (TIS)。它是指在所有散射方向上的散射光能量与入射光能量之比。其值等 BSDF 在半球的投影立体角上的积分:

$$\text{TIS} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \text{BSDF} \sin(\theta_s) \cos(\theta_s) d\theta_s d\phi \quad (2-9)$$

TIS 与光学表面粗糙度密切相关, TIS 值越小, 表明表面对光的散射越少, 光学表面质量越高。

### 2.2.3 辐射传输

辐射传输是指电磁辐射在介质或空间中传播时, 因吸收、发射、散射和反射等物理过程引发的能量传递与分布变化。分析辐射传输能够精准解析杂散光在

光学系统中的能量传递过程，从而为评估杂散光对系统性能的影响、制定有效抑制策略提供关键依据。

图 2-8 为两个面元之间的辐射传输示意图。设有两个面元  $dA_s$  和  $dA_c$ ，其中中心距为  $R_{sc}$ ，法线与两中心连线的夹角分别为  $\theta_s$  和  $\theta_c$ 。若照射到面元  $dA_s$  上的辐射照度为  $E(\theta_i, \varphi_i)$ ，面元  $dA_s$  的辐射亮度为  $L_s(\theta_c, \varphi_c)$ ，其中  $\theta_i, \varphi_i$  为面元  $dA_s$  上入射光的入射角和方位角， $\theta_c, \varphi_c$  为面元  $dA_s$  上散射光的散射角和方位角，则面元  $dA_c$  接收来自面元  $dA_s$  的辐射通量为：

$$d\Phi_c = L_s(\theta_c, \varphi_c) dA_s \cos(\theta_s) d\Omega_{sc} \quad (2-10)$$

$$= L_s(\theta_c, \varphi_c) dA_s \frac{\cos(\theta_s) dA_c \cos(\theta_c)}{R_{sc}^2} \quad (2-11)$$

$$= \frac{L_s(\theta_c, \varphi_c)}{E(\theta_i, \varphi_i)} E(\theta_i, \varphi_i) dA_s \frac{\cos(\theta_s) dA_c \cos(\theta_c)}{R_{sc}^2} \quad (2-12)$$

$$= \text{BRDF}(\theta_i, \varphi_i; \theta_c, \varphi_c) d\Phi_s(\theta_i, \varphi_i) d\Omega_{sc} \cos(\theta_s) \quad (2-13)$$

$$= \text{BRDF}(\theta_i, \varphi_i; \theta_c, \varphi_c) d\Phi_s(\theta_i, \varphi_i) \text{GCF}_{sc} \pi \quad (2-14)$$

最后得到杂散光分析中的基本能量传输计算方程：

$$d\Phi_c = \text{BRDF}(\theta_i, \varphi_i; \theta_c, \varphi_c) d\Phi_s(\theta_i, \varphi_i) \text{GCF}_{sc} \pi \quad (2-15)$$

其中：

$$\text{GCF}_{sc} = \frac{\cos(\theta_s) dA_c \cos(\theta_c)}{\pi R_{sc}^2}$$

$\text{GCF}_{sc}$ ：Geometrical Configuration Factor - 几何形状因子

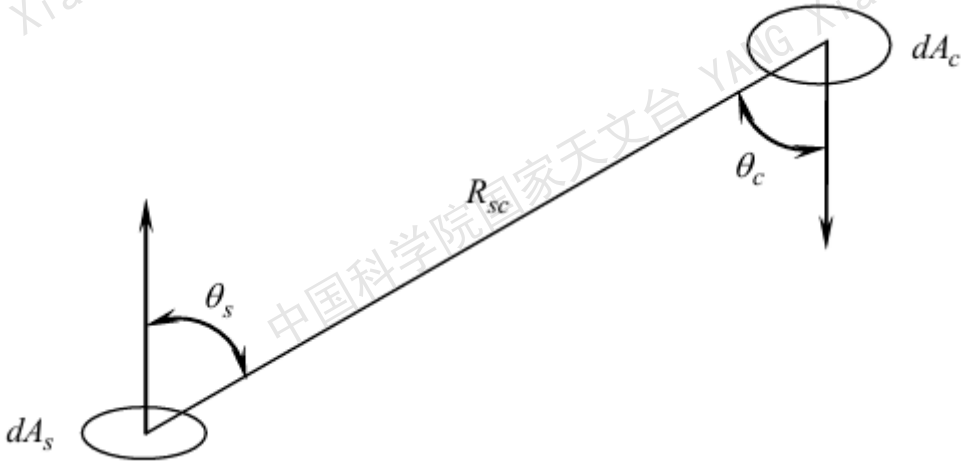


图 2-8 面元间辐射能量传输示意图

Figure 2-8 Schematic Diagram of Radiant Energy Transfer between Surface Elements

根据基本能量传输方程式 (2-15)，可得杂散光抑制的三个关键方向：

(1) BRDF/BTDF: BRDF/BTDF 不可能降为零, 只可能尽量减小, 即尽可能采用低 BRDF/BTDF 值的涂层材料。例如可以对镜架结构等进行黑色阳极氧化降低表面的反射率, 透镜镀增透膜等减少镜片表面的反射和散射;

(2)  $\Phi_c$ : 杂散光源的存在必然产生一定的杂散光能量  $\Phi_c$ , 理论上仅当前一级  $GCF_{sc}$  为零或杂散光源彻底消除时,  $\Phi_c$  才能降为零。例如采用遮光罩遮挡外部强光源, 该措施本质上也是从  $GCF_{sc}$  出发的;

(3)  $GCF_{sc}$ :  $GCF_{sc}$  可以通过减小散射面积、阻挡入射光线等方式降为 0, 是杂散光抑制中的核心环节。例如: 在遮光罩筒壁上加挡光环, 通过物理阻隔改变杂散光传播路径, 降低其传递效率 (Nicodemus et al., 1977; 李陶然, 2016; 张天一, 2018)。

## 2.3 杂散光的分析流程

杂散光分析是一个复杂且系统的过程, 其目的是在准确掌握杂散光在光学系统中的产生、传播和影响规律, 从而为系统设计和优化提供依据。通用的杂散光分析流程如图2-9(Fest, 2013)所示。具体包括: 首先确定系统对杂散光的需求, 进而设计系统的初始结构, 再建立包含杂光光阑和表面处理的杂散光分析模型, 最后计算评估杂散光水平, 如果不满足要求, 则进行优化并重新评估, 反复该过程直到满足要求为止。设计满足后, 搭建硬件测试设备进行测试, 以验证设计是否满足要求。

AIMS 望远镜的光学设计老师具有丰富的光学设计经验, 在系统设计时充分考虑了杂散光影响, 通过离轴、减少光路中的透射元件以及设置冷光阑等措施, 有效避免了杂散光的影响。本课题的杂散光分析研究目的主要是验证光学设计, 评估望远镜杂散光水平, 为望远镜调试过程提供溯源依据, 为今后望远镜运行中杂散光控制提供理论指导, 因此杂散光分析从第三步构建系统模型展开。应用杂散光分析软件, 进行系统的杂散光分析, 分析流程包括系统建模、光线追迹、数据分析和系统评价。

### 2.3.1 系统建模

系统建模是杂散光分析的基础, 需通过两个关键步骤在杂散光分析软件中构建光学与机械系统模型。首先搭建几何模型, 精确刻画光学元件与机械结构的形状、尺寸及相对位置; 随后定义其物理特性, 包括光学材料的折射率、反射率, 机械部件的表面粗糙度等参数。

系统建模是杂散光分析的基础, 模型的准确性和组别划分对于后续的杂散光分析极为重要。建模时所需要的光学系统的透镜、反射镜的曲率半径、厚度等几何参数以及材料属性需从 ZEMAX 或 CODEV 等专业设计软件导入, 这个过程必须保证模型转换的准确性。对于机械结构建模, 需考虑几何形状与表面特性的精确设定以及装配误差对杂散光传播的潜在影响。

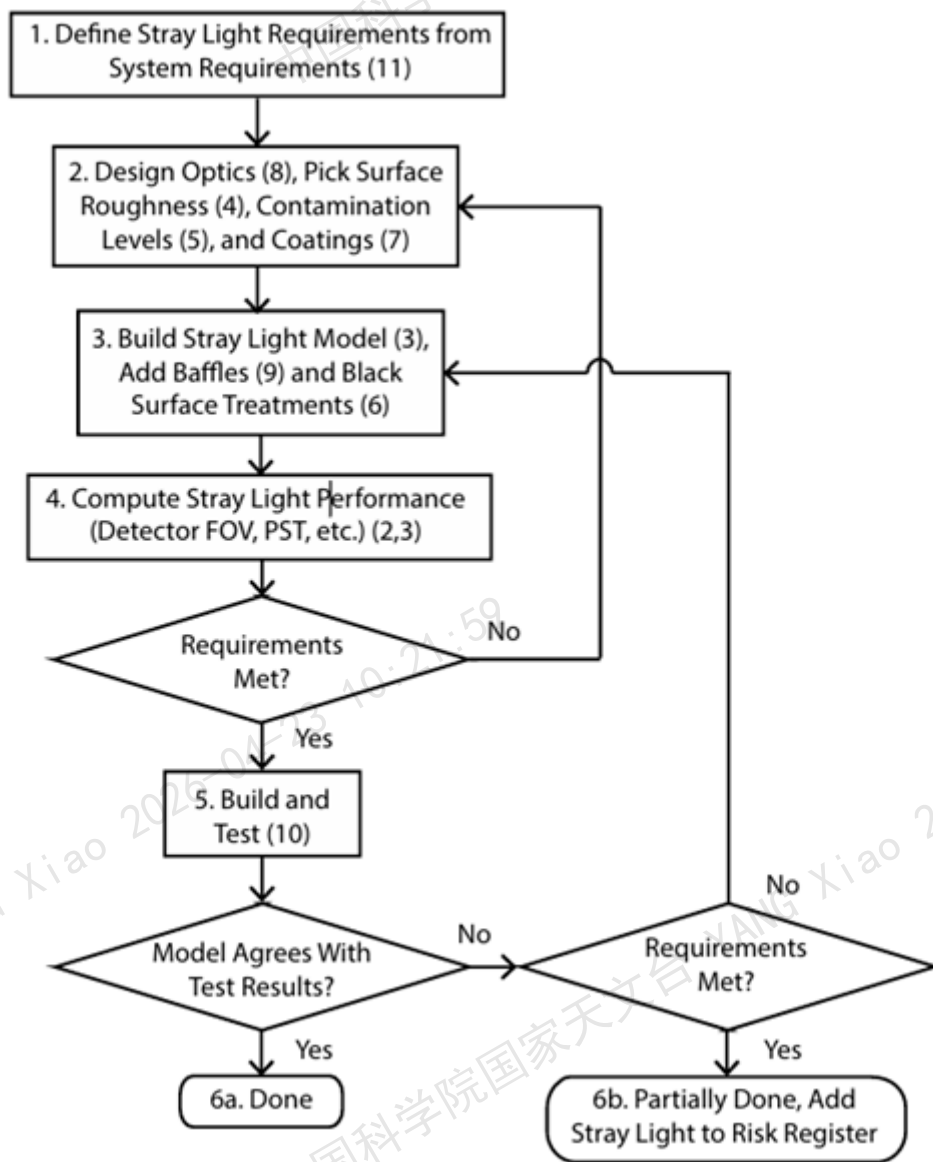


图 2-9 杂散光工程系统图

Figure 2-9 Stray light engineering process flowchart

(Fest, 2013)

### 2.3.2 光线追迹

光线追迹是杂散光分析的核心环节，通过模拟光线在光学系统中的传播路径，为杂散光的量化分析提供直观的数据支撑。

基于几何光学原理，从杂散光的潜在源头出发，按照折射定律、反射定律及散射模型，对光线在每个光学元件表面、机械结构界面上的传输过程进行逐点计算。在光线追迹过程中，软件会依据系统建模阶段设定的物理参数，自动判断光线发生反射、折射、散射或吸收的情况，例如，根据材料的 BRDF/BTDF 参数确定散射光的方向与强度，根据光学材料折射率计算折射角度。

光线追迹中，杂散光分析程序通常使用蒙特卡洛光学传播算法来决定产生光线的初始位置、方向余弦等参数，其中，光线与光学系统中任意表面所发生的反射、透射、吸收以及散射全部是随机的。该方法会追迹每一条随机散射的光线的传输路径并得到其在像面的光能量，直至满足终止条件。然而，这种追迹方式会产生海量光线数据，对于复杂的光学系统，计算量呈指数级增长，为提高计算效率，需开展指定区域的分析研究。

### 2.3.3 数据分析

数据分析是杂散光分析流程中的关键步骤，旨在从光线追迹产生的海量数据中提取有价值的信息，深入理解杂散光在光学系统中的传播特性与影响机制。该环节首先对光线追迹结果进行分类整理，例如按光线来源（外部干扰源、内部元件散射）、传播路径（直接反射、多次散射）和最终落点（探测器区域、非成像区域）等维度进行统计。

在量化分析层面，通过计算杂散光辐照度、杂散光与目标信号比值等核心指标，能够直观评估杂散光强度及其对系统信号的干扰程度；分析杂散光随光源入射角度的分布规律，则可精准定位杂散光的主要来源方向，为后续抑制策略的制定提供关键依据。此外，借助参数敏感性分析方法，即系统性地调整光学元件表面粗糙度、材料折射率、涂层 BRDF/BTDF 参数等关键变量，观察杂散光各项量化指标的动态变化趋势，可深度挖掘系统参数与杂散光特性之间的内在关联，进而为光学系统的优化设计提供数据驱动的改进方向。

### 2.3.4 系统评价

在杂散光分析流程中，面对光线追迹产生的海量数据与复杂分析结果，如何科学表征光学系统的杂散光水平成为关键所在。建立一套系统化、标准化的评价指标体系，不仅是量化杂散光对系统性能危害程度的依据，更是指导杂散光抑制策略优化迭代的重要前提。在杂散光工程领域，通常综合运用点源透射率、杂光系数、信噪比、杂散光比、辐照度分析图等指标，从不同维度全面描述光学系统的杂散光特性。

#### 1. 点源透过率

点源透过率 PST (Point Source Transmittance) (Fest, 2013) 是衡量光学系统

对离轴杂散光抑制能力的关键指标，其定义是指系统视场外离轴角为  $\theta$  的杂散光光源经光机系统传递后，到达探测器像面的辐照度  $E_d(\theta)$  与该光源在系统入瞳处的辐照度  $E_i(\theta)$  的比值，其表达式为：

$$PST = \frac{E_d(\theta)}{E_i(\theta)} \quad (2-16)$$

PST 与光源强度无关，依赖于入射角度和系统工作波段，表示光学系统对杂散光抑制能力的强弱，其值越小，说明对杂散光的抑制效果越好。通过仿真软件（如 ASAP、TracePro）或外场实测获取不同离轴角的 PST 值并绘制曲线，可直观反映系统在各视场方向的杂散光屏蔽能力。

PSNIT 是 PST 的一种特殊形式，也被称为归一化探测器辐照度 NDI，该评价方法与探测器的尺寸无关。它是平均探测器辐照度  $E_{det}$  与入射辐照度  $E_{inc}$  的比值，计算时通常作为入射角  $(\theta, \phi)$  的函数，即

$$PSNIT(\theta, \phi) = \frac{E_{det}(\theta, \phi)}{E_{inc}(\theta, \phi)} \quad (2-17)$$

## 2. 杂光系数

杂光系数 (ISO, 1994) 是可见光成像系统中量化杂散光对图像对比度影响的经典指标，定义为：

$$VGI = \frac{E_{out}}{E_{out} + E_{in}} \quad (2-18)$$

其中  $E_{out}$  是探测器上杂散光的辐射强度， $E_{in}$  是探测器上目标的辐射强度。

杂光系数通常通过遮挡测试确定，如图 2-10 所示。用明亮的光源照亮朗伯型白色屏幕，在屏幕中间放置一个黑色挡光片，尺寸与工作视场大小匹配，此时，焦平面上的辐照度为  $E_{out}$ ，然后将黑色挡光片移除，再次测量焦平面的辐照度，得到  $E_{out} + E_{in}$ ，进而计算系统的杂光系数。杂光系数直接反映了杂散光对目标信号的影响程度，数值越小表示杂散光干扰越小，广泛应用于相机、监控镜头等成像设备的杂散光性能评估。

## 3. 信噪比

信噪比 (SNR) 是综合评估光学系统信号完整性的核心指标，定义为探测器上光辐射产生的输出信号 S 和噪声产生的输出信号 N 的比值（单位：dB），即

$$SNR = 10 \log \left( \frac{P_s}{P_n} \right) \quad (2-19)$$

SNR 可通过信号链建模或实测获得。在杂散光分析中，噪声包含探测器固有噪声及杂散光引入的额外噪声，因此 SNR 直接反映了杂散光对弱信号探测能力的影响。例如，在红外成像系统或天文观测设备中，低 SNR 可能导致目标信号被杂散光背景淹没，无法实现有效探测。

## 4. 杂散光比

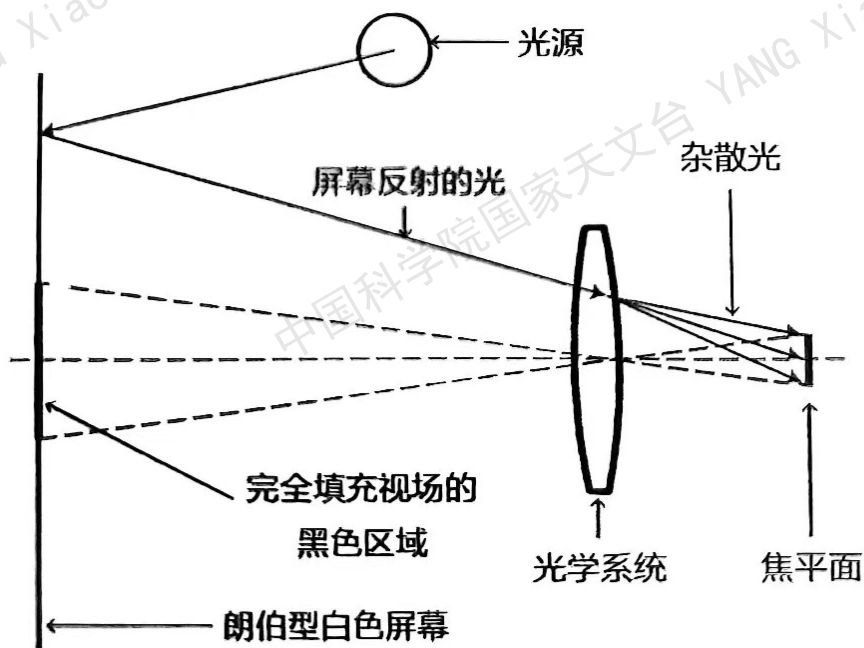


图 2-10 杂光系数测试

Figure 2-10 A veiling glare test

(Fest, 2019)

杂散光比 (SLR) 定义为到达探测器的杂散光能量或光线数量与到达探测器上的实际目标能量或光线数量之比, 其表达式为:

$$SLR = \frac{E_{\text{stray}}}{E_{\text{actual}}} \quad (2-20)$$

其中  $E_{\text{stray}}$  为到达探测器上的杂散光能量或光线数量,  $E_{\text{actual}}$  为到达探测器上的实际目标能量或光线数量。

### 5. 辐照度分布图

辐照度分析图是探测器像面杂散光空间分布的可视化工具, 通过计算或实测获取像面单位面积的辐射功率并绘制伪彩色图。该方法能够清晰呈现杂散光的区域特征, 如边缘光晕、中心亮斑或非均匀背景噪声, 有助于定位杂散光的物理来源 (如光阑边缘散射、机械结构反光或光学元件缺陷)。辐照度分析图需通过足够密度的光线追迹或高精度实测数据支撑, 避免因样本不足导致的分布偏差。结合光学系统结构模型, 可进一步分析杂散光路径, 为消光结构设计 (如挡光环优化、吸光涂层应用) 提供直观依据。

点源透过率更适于描述视场外的杂散光抑制能力。杂散系数主要通过实际测试获得, 多用于小型光学镜头的杂散光评估。信噪比指标需对照探测器的光电参数计算获得, AIMS 望远镜的探测器为在红外波段工作的自研产品, 尚不能提供完整的参数信息。因此, 我们选用了杂散光比将视场内外的杂散光进行统一量化分析, 辅以辐照度分布图, 获得在探测器上的杂散光分布, 使其可视化。

## 2.4 典型光学系统对比

由于 AIMS 望远镜采用了离轴系统的光学设计，其杂散光分析方法与传统同轴设计存在不同。作为两类典型光学系统架构，同轴光学系统与离轴光学系统因光路布局、元件排列方式的本质区别，在杂散光产生机制、传播路径及分析重点上呈现出鲜明的差异。分析理解两种光路的杂散光特征，可 AIMS 望远镜的杂散光研究提供明确研究内容。

同轴系统以光轴为中心对称布局，结构简洁但存在中心遮拦；离轴系统通过偏离光轴消除中心遮挡，却带来光路复杂的挑战。这种本质区别使得两类系统在杂散光产生机制、传播路径及分析方法上各有特点。目前，国内外太阳望远镜对两种系统均有应用，如 NVST、CLST、EST 等采用同轴设计，而 GST、DKIST、AIMS 等则采用离轴系统。

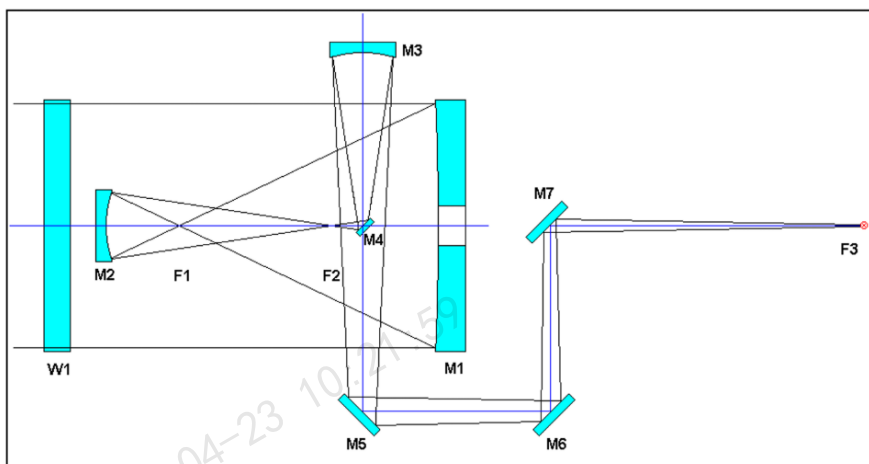


图 2-11 同轴系统-NVST 光学系统

Figure 2-11 Coaxial System - NVST Optical System

(<https://fso.ynao.ac.cn/public/device/device.html?type=nvst&v=320d491c>)

同轴系统以光轴为中心对称布局，这种设计虽然结构简洁、便于制造装配，但中心遮拦结构（如格里高利望远镜的副镜及支撑结构）成为杂散光的主要来源。光线在遮挡物表面发生反射与散射后，由于传播路径相对规则且集中于光轴附近，经多次反射或散射后极易抵达探测器，在成像面上形成亮斑或光晕，严重影响观测效果。因此，同轴系统的杂散光分析重点在于精确模拟中心遮拦及光学元件表面的散射特性，如何量化中心遮拦及其支撑结构对成像的影响，是该类系统杂散光分析的难点。(林剑春等, 2013; 栗洋洋等, 2019; 黄强, 2006)

离轴系统通过偏离光轴消除中心遮拦，从根源上减少了部分杂散光，但非对称布局使光线传播路径更为复杂。反射镜与透镜的不规则排列导致光线反射、散射情况难以预测，甚至存在经多次反射后从特殊角度到达探测器的光线，这使得杂散光路径难以预测。同时，离轴系统对光学元件的加工和装配精度要求极高，微小误差也可能显著增加杂散光强度。(Stauder, 2000; 颜昌翔 等, 2010; 朱杨 等, 2014; 王虎 等, 2024) 离轴系统的杂散光分析需聚焦于处理非对称布局带来的光线传播不确定性，以及梳理复杂结构中的杂散光路径。如何在保证计算精度的同时控制计算量是离轴系统杂散光分析的难题。

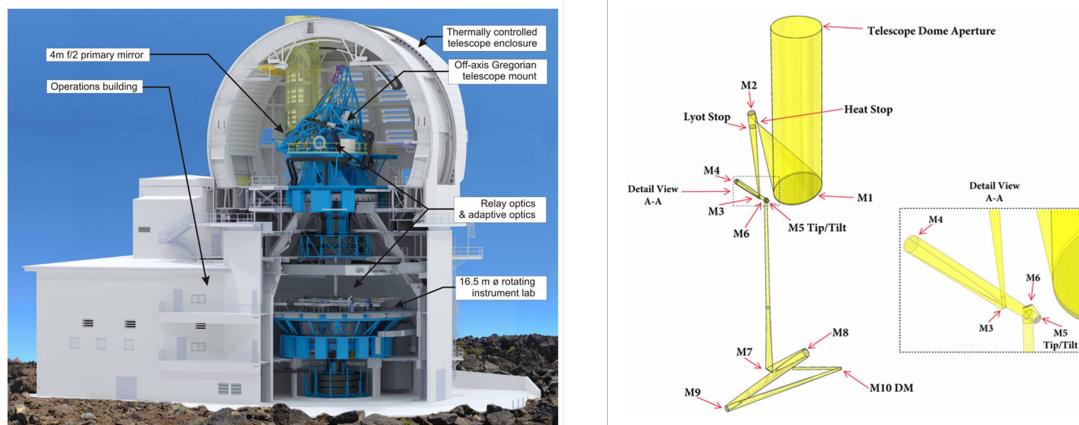


图 2-12 离轴系统-DKIST 光学系统

Figure 2-12 Off - axis System - DKIST Optical System

(Rimmele et al., 2020)

## 2.5 本章小结

本章节系统地阐述了杂散光分析的基础理论，从定义、路径、反射散射机制及分类入手，结合杂散光辐射基本物理参数、双向散射分布函数以及辐射传输过程，详细描述杂散光传输过程，提供杂散光抑制技术手段；通过系统建模、光线追迹、数据分析以及科学评价指标体系，形成了一套完整的杂散光分析流程。最后对比同轴与离轴系统在杂散光分析中的差异，确定 AIMS 望远镜的重点研究内容，为其杂散光分析与抑制提供理论依据。

国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59  
中国科学院国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59  
国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59  
中国科学院国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59

### 第3章 AIMS 望远镜系统建模

在光学系统的杂散光分析中，精确的系统建模是获取可靠分析结果的重要基础。光学元件的材质特性、曲率参数，以及机械结构的表面特性等，都直接影响着杂散光的产生机制与传播路径。针对 AIMS 望远镜的杂散光分析，本研究以其真实设计参数与实测数据为依据，借助 ASAP 杂散光分析软件构建高精度系统模型，为后续杂散光分析提供坚实的数据支撑与可靠的仿真基础。本章将系统描述 AIMS 望远镜的光学系统、机械系统、圆顶模型构建研究过程，并介绍了模型中表面散射模型的建立。

#### 3.1 AIMS 望远镜简介

AIMS 望远镜是国际首台专用于中远红外波段太阳观测的科研设备，放置于青海省海西州海拔 4000 米的赛什腾山冷湖天文观测基地 (Bao et al., 2023)，如图3-1所示。



图 3-1 AIMS 望远镜实物图

Figure 3-1 Diagram of AIMS Telescope

AIMS 望远镜采用离轴格里高利光学系统设计，主镜通光口径 1 米，兼具红外成像与光谱观测以及可见光成像功能。望远镜的光学系统可以分为引导光学系统和焦面仪器两部分。引导光学由格里高利望远系统、折轴系统、消旋系统、准直系统和焦面跟踪辅助光路构成。离轴抛物主镜和离轴椭球副镜构成的格里高利系统将太阳成像于系统焦点，经折轴反射镜进入库德房，经过准直系统出射的平行光经过焦面辅助光路到各个焦面设备。焦面仪器分为 6 个部分，分别为

8-10 $\mu\text{m}$  成像光路、傅里叶光谱仪 (FTIR)、可见光波段的远近场监视系统以及 F/29 和 F/13 两路摆镜系统, 用于偏振测量的偏振分析器位于傅里叶光谱仪前端的准直光路中。其中, 8-10 $\mu\text{m}$  成像光路和 12.32 $\mu\text{m}$  的 FTIR 都设计有真空制冷系统。AIMS 望远镜的整体光学设计示意图如图3-2所示。

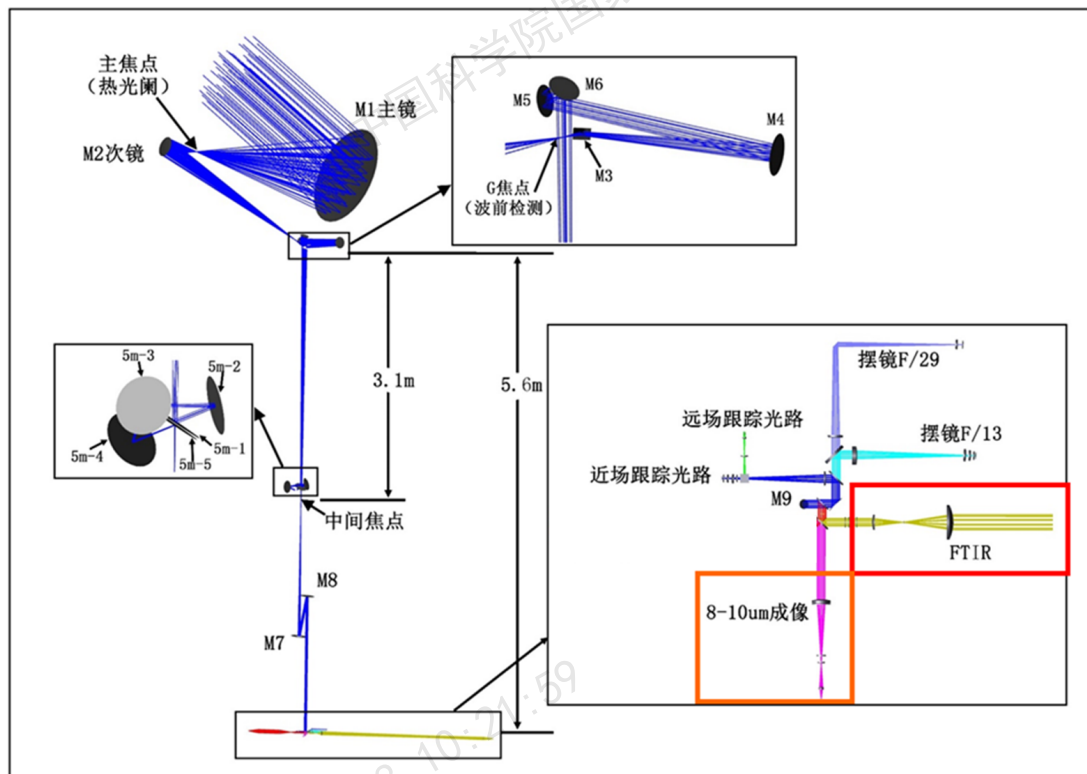


图 3-2 AIMS 望远镜整体光学设计示意图

Figure 3-2 Optical Design Diagram of AIMS Telescope

(沈宇樑, 2023)

### 3.2 光学系统建模

光学系统建模是 AIMS 望远镜杂散光分析的重要基础, 旨在精准还原光线传播路径与杂散光产生机制。鉴于 ASAP 软件强大的分析计算能力和国外望远镜的普遍应用, 本课题采用 ASAP 脚本语言进行分析建模。

AIMS 望远镜的光学系统设计通过 Zemax 软件完成, 望远镜系统采用离轴设计, 光学元件涉及种类多, 结构复杂, 建模难度大。根据系统的光学设计, 通过光学元件位置信息的坐标转换、脚本建模、模型验证等过程在 ASAP 软件中建立了望远镜全系统的光学模型, 如图3-3所示, 具体的建模过程如下:

在 ASAP 软件中构建光学系统模型存在两种方法。一种是直接使用 ASAP 软件从 Zemax 软件将光学元件参数和位置信息导入; 另一种是运用 ASAP 脚本语言的命令行对 Zemax 的设计参数进行建模。第一种方法, 由软件自动生成, 具体过程不可见, 可能会因为系统兼容性等多种因素出现导入错误。因此, 选择采用



图 3-3 AIMS 望远镜光学系统模型

Figure 3-3 The optical system model of AIMS Telescope

ASAP 脚本语言进行建模的方法，对光学系统进行合理的模块化分组，保障后续表面定义、散射模型设定等操作的规范性与高效性。为确保建模过程的准确性，需要比较模型与原始系统的成像质量。

采用 ASAP 脚本语言建模，需要获取位置、角度信息和光学元件参数等信息。光学元件的全局位置坐标通过在 Zemax 软件中定义一个全局坐标参考面获得，如图3-4中第五列 X-Y-Z 信息所示；角度信息获取需首先完成 Zemax 软件局部坐标系与 ASAP 软件全局坐标系转换问题，建立统一的坐标转换机制(蒋佶松, 2020)，获得的描述全局坐标变换的旋转矩阵如图3-4中 R 矩阵所示，该矩阵可解析出在 ASAP 软件中沿 X - Y - Z 轴的旋转角度序列；根据 Zemax 设计数据表，输入光学元件的几何尺寸、材料属性等参数；经过以上步骤，完成 AIMS 望远镜光学系统在 ASAP 环境下的精确建模。

下面，我们详细介绍矩阵转换的推导过程。

广义旋转矩阵 R 为：

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

在三维空间中，对于绕单一坐标轴 (x, y, z) 轴旋转角度为  $\theta$  的旋转矩阵为：

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

表面	R11 R21 R31	R12 R22 R32	R13 R23 R33	X Y Z	倾斜 X 倾斜 Y 倾斜 Z	
1	1.000000000 0.000000000 0.000000000	0.000000000 1.000000000 0.000000000	0.000000000 0.000000000 1.000000000	0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00	0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00	
2	1.000000000 0.000000000 0.000000000	0.000000000 1.000000000 0.000000000	0.000000000 0.000000000 1.000000000	0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00	0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00	
3	1.000000000 0.000000000 0.000000000	0.000000000 0.9659258263 -0.2588190451	0.000000000 0.2588190451 0.9659258263	0.00000000E+00 0.00000000E+00 2.00000000E+03	-1.50000000E+01 0.00000000E+00 0.00000000E+00	
4	1.000000000 0.000000000 0.000000000	0.000000000 1.000000000 0.000000000	0.000000000 0.000000000 1.000000000	0.00000000E+00 -1.00000000E+03 2.20000000E+03	0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00	
5	1.000000000 0.000000000 0.000000000	0.000000000 1.000000000 0.000000000	0.000000000 0.000000000 1.000000000	0.00000000E+00 -1.00000000E+03 2.20000000E+03	0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00	M1
6	1.000000000 0.000000000 0.000000000	0.000000000 1.000000000 0.000000000	0.000000000 0.000000000 1.000000000	0.00000000E+00 -1.00000000E+03 2.00000000E+02	0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00	Element Tilt
7	1.000000000 0.000000000 0.000000000	0.000000000 1.000000000 0.000000000	0.000000000 0.000000000 1.000000000	0.00000000E+00 -1.00000000E+03 2.00000000E+02	0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00	prime focus

图 3-4 全局坐标信息图

Figure 3-4 Diagram of Global Coordinate

$$R_y = \begin{vmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{vmatrix} \quad (3-3)$$

$$R_z = \begin{vmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3-4)$$

按照  $x - y - z$  轴顺序旋转时，得到的旋转矩阵  $R$  为：

$$R = R_z R_y R_x = \begin{vmatrix} \cos \theta_y \cos \theta_z & \sin \theta_x \sin \theta_y \cos \theta_z - \cos \theta_x \sin \theta_z & \cos \theta_x \sin \theta_y \cos \theta_z + \sin \theta_x \sin \theta_z \\ \cos \theta_y \sin \theta_z & \sin \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z + \cos \theta_x \cos \theta_z & \cos \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z - \sin \theta_x \cos \theta_z \\ -\sin \theta_y & \sin \theta_x \cos \theta_y & \cos \theta_x \cos \theta_y \end{vmatrix} \quad (3-5)$$

通过图3-4获得的每个光学元件的旋转矩阵  $R$ ，计算得到在 ASAP 软件中该元件按  $x - y - z$  轴顺序的旋转角度。

$$\theta_x = \text{atan2}(R_{32}, R_{33}) \quad (3-6)$$

$$\theta_y = \text{atan2}(-R_{31}, \sqrt{R_{32}^2 + R_{33}^2}) \quad (3-7)$$

$$\theta_z = \text{atan2}(R_{21}, R_{11}) \quad (3-8)$$

式中，角度值范围为  $[-\pi, \pi]$ 。

为便于分析比较，在建模过程中，我们将光学系统分为望远系统、折轴系统、消旋系统、准直系统和焦面设备分别进行建模分析，将上述子系统进行整合，得到望远镜光学系统的整体模型。选取 M9 位置处的光斑信息对系统的验证，确保最终模型能够真实、准确地还原 AIMS 望远镜光学系统的实际情况。

下面将从各子系统建模、局部验证到系统整合的全流程，详细阐述光学系统的完整建模过程。

### • 望远系统

AIMS 的望远系统采用离轴格里高利系统设计，太阳光经过主镜和次镜的反射后会聚至格里高利焦点。其中，主镜 (M1) 为离轴抛物面镜，通光口径 1000mm，焦比 1/2，次镜 (M2) 为离轴椭球面镜，通光口径 220mm。望远系统的模型如图 3-5 所示：

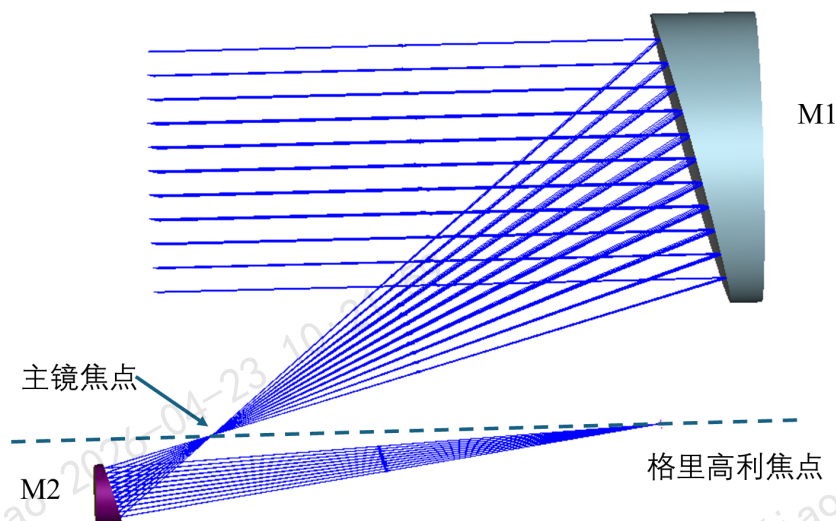


图 3-5 望远系统模型

Figure 3-5 Model of the Telescope System

主次镜系统是望远镜性能的关键所在，为验证模型准确性，我们模拟全口径平行光入射到望远镜系统，在格里高利焦点处的光斑成像情况如图 3-6 所示，RMS 大小、焦点位置以及系统焦比，与 Zemax 的设计结果高度吻合，模型中格里高利焦点在中心视场的能量分布如图 3-7 所示。

### • 折轴系统

折轴系统的 ASAP 模型如图 3-8 所示。为验证模型准确性，我们模拟全口径平行光入射到望远镜系统，如图所示为 ASAP 模型和 Zemax 模型中 M6 出射光斑信息对比，其中在 Zemax 原始设计中，X 方向光斑直径为 70.34562 mm，Y 方向为 64.98854mm；而 ASAP 模型对应的光斑尺寸在 X 方向为 70.5898 mm，Y 方向为 65.1640 mm。经计算，X 方向的相对误差为 3.5‰，Y 方向的相对误差为 2.7‰，模型中 M6 的能量分布如图所示。

--- FOCUS

Least Squares Focus Calculation for 8021 Rays:

	X	Y	Z
Centroid Point	0.4914192E-10	0.6278325E-04	-300.0066
RMS Deviations	0.1841E-04	0.1998E-04	0.2626E-05
Mean Direction	0.0000000	0.0997510	0.9950124

Total Flux = 8021.      RMS Blur Diameter = 0.5446524E-04  
 Maximum Ray Angle from Mean = 2.8599 degrees, F/ 10.01 , .0499 N.A.

图 3-6 格里高利焦点情况

Figure 3-6 Situation of the Gregorian Focus

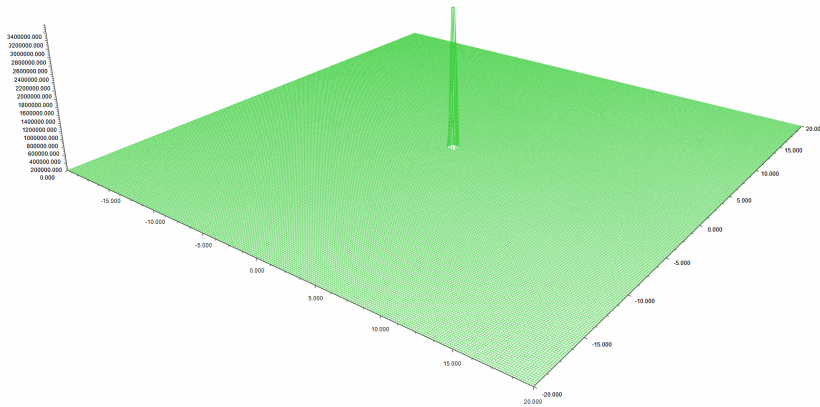


图 3-7 格里高利焦点能量分布

Figure 3-7 The energy distribution of the Gregorian Focus

AIMS 的折轴系统由反射镜 M3、M4、M5 和 M6 组成，其主要功能是将望远镜系统的光线引导到位于望远镜系统下方的库德房中。M3 镜将经望远镜系统成像后的光线反射到离轴椭球反射镜 M4 上，M4 将光线引导至 M5 镜，经 M4 反射的太阳光线与望远镜的高度轴同轴，M4 的短轴焦点与格里高利焦点对准，长轴焦点位于 M6 的正下方。M5 和 M6 镜将光线垂直引向库德房，出射的太阳光线与方位轴同轴。

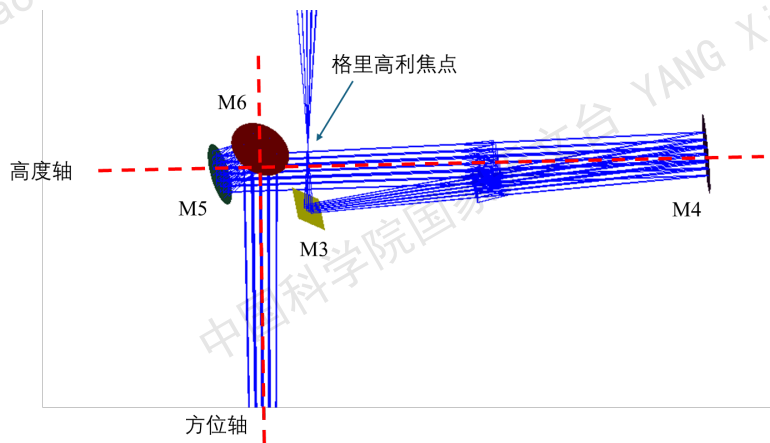


图 3-8 折轴系统模型图

Figure 3-8 Model Diagram of the Folding - axis System

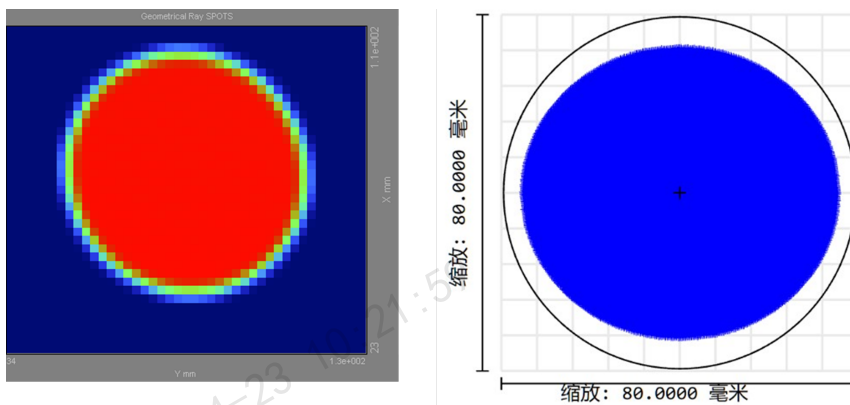


图 3-9 模型和原始设计中 M6 的光斑分布

Figure 3-9 The spot distribution of M6 in the model and the original design

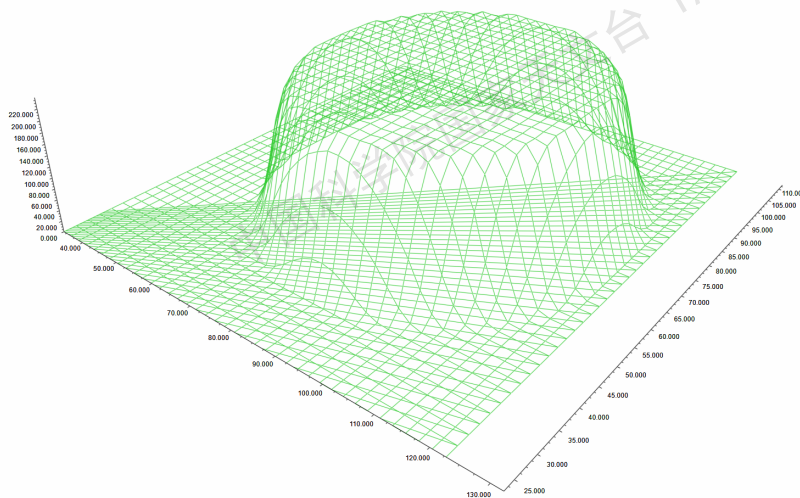


图 3-10 ASAP 模型中 M6 的能量分布图

Figure 3-10 The energy distribution diagram of M6 in the ASAP model

### • 消旋系统

AIMS 望远镜采用地平式结构，在跟踪过程中需要同时驱动方位轴和高度轴以保持对目标的跟踪。地平式的视场相对于地平经圈是固定的，而在进行日周跟踪时，地平经圈相对于赤道经圈会不断变化，这将导致物像空间的旋转。望远镜通过折轴反射镜将光线引入库德焦点，并确保像面稳定。在跟踪过程中，折轴反射镜的安装位置以及望远镜运动时各平面反射镜之间相对位置变化的关系，都会对望远镜像方的视场造成旋转。AIMS 望远镜采用了一种无偏消旋的设计方案——五镜消旋系统，解决了像旋问题的同时减小消旋系统的附加偏振 (Junfeng et al., 2018)

五镜消旋系统的 ASAP 模型如图3-11所示，为验证模型准确性，我们模拟全口径平行光入射到望远镜系统，在中间焦点处的光斑成像情况如图3-12所示，RMS 大小、焦点位置以及系统焦比，与 Zemax 的设计结果高度吻合，模型中格里高利焦点在中心视场的能量分布如图3-13所示。

该系统由五面反射镜 (5M1、5M2、5M3、5M4、5M5) 组成。5M1 镜将垂直入射光反射到水平面上，然后通过三面反射镜 5M2、5M3、5M4 将光束反射到 5M5，最终由 5M5 将光再次转变为垂直光束。由于五面反射镜将光束由垂直变为水平再恢复垂直，达到了仪器偏振相消的效果。为确保入射光束和出射光束的一致性，5M1 和 5M5 由一面反射镜的正反面镀膜构成，其法线方向相反；当 5M1 和 5M5 的入射角为  $36.2^\circ$  时，整个五镜消旋系统不会产生附加偏振。

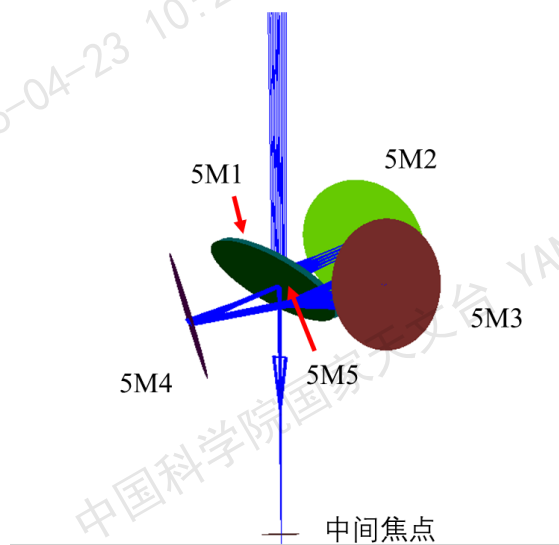


图 3-11 五镜消旋系统模型图

Figure 3-11 Model Diagram of the de-rotate system with five mirrors

### • 准直系统

准直系统的模型如图3-14所示。准直系统的作用是将来自中间焦点的光线进行准直，为后续的焦面仪器提供平行光。该系统由离轴抛物面反射镜 M7、反射镜 M8 和摆镜 M9 组成。其中，M7 为焦距 1410.75 mm 的离轴抛物镜，其焦点

```

-- FOCUS
Least Squares Focus Calculation for 39765 Rays:
      X           Y           Z
Centroid Point  71.83734    392.2161    2881.645
RMS Deviations 0.9298E-03  0.9871E-03  0.1032E-03
Mean Direction -0.0000020   0.0997656   0.9950110

Total Flux = 0.7855E+06 RMS Blur Diameter = 0.2718959E-02
Maximum Ray Angle from Mean = .4989 degrees, F/ 57.42 , .0087 N.A.

```

图 3-12 中间焦点情况

Figure 3-12 Situation of the Mid Focus

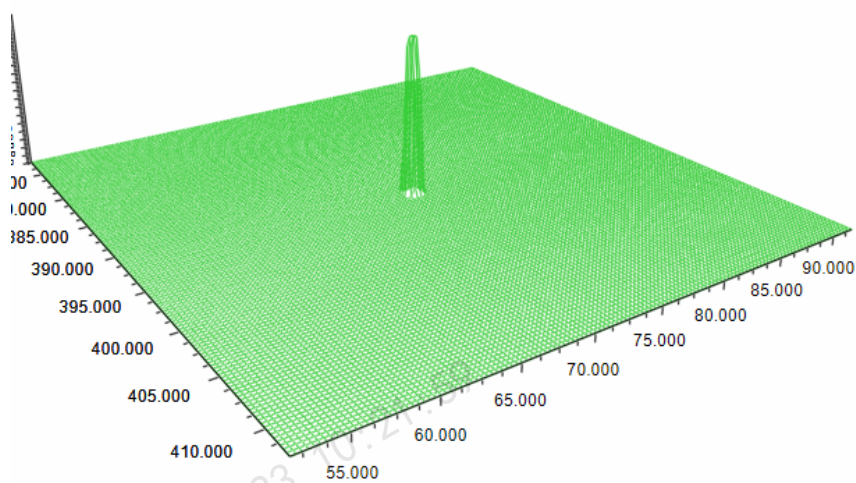


图 3-13 中间焦点能量分布

Figure 3-13 The energy distribution of the Mid Focus

与中间焦点对准以实现光线的准直。M8 的功能是将光线引导至摆镜 M9，而 M9 则将准直后的平行光反射到光学平台上的焦面系统，系统的出瞳位于 M9 处。

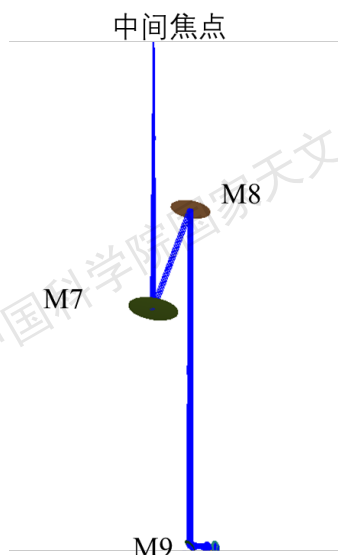


图 3-14 准直系统模型图

Figure 3-14 Model Diagram of the Collimation System

为验证 ASAP 杂散光模型的准确性，对 M9 之前的光学系统进行整体验证，我们选择 M9 表面的光斑信息进行比对分析。图3-15中直观呈现了 M9 处在模型和原始设计中的光斑分布情况。在 ASAP 软件构建的模型中，光斑的空间坐标为  $(-77.4796, 642.2137, 5375.5599)$ ，该位置参数与 Zemax 原始设计中的 M9 光斑位置完全吻合。在光斑尺寸方面，Zemax 原始设计中，光斑在 X 方向和 Y 方向的尺寸分别为 35.35946mm 和 24.9926mm；而 ASAP 模型对应的光斑尺寸在 X 方向为 35.5574mm，Y 方向为 25.0925mm。经计算，X 方向的相对误差为 5.6‰，Y 方向的相对误差为 4‰。由此可见，两个方向上的光斑尺寸差异极小，表明所建立的 ASAP 杂散光模型与原始 Zemax 设计结果高度吻合，可以反映光学系统真实特性，模型中 M9 的能量分布如图3-16所示。

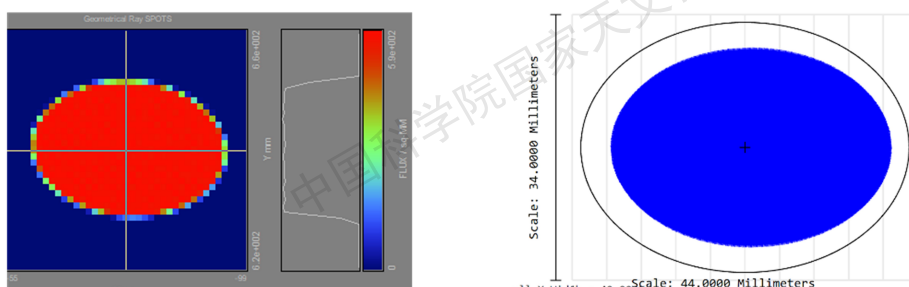


图 3-15 模型和原始设计中 M9 的光斑分布

Figure 3-15 The spot distribution of M9 in the model and the original design

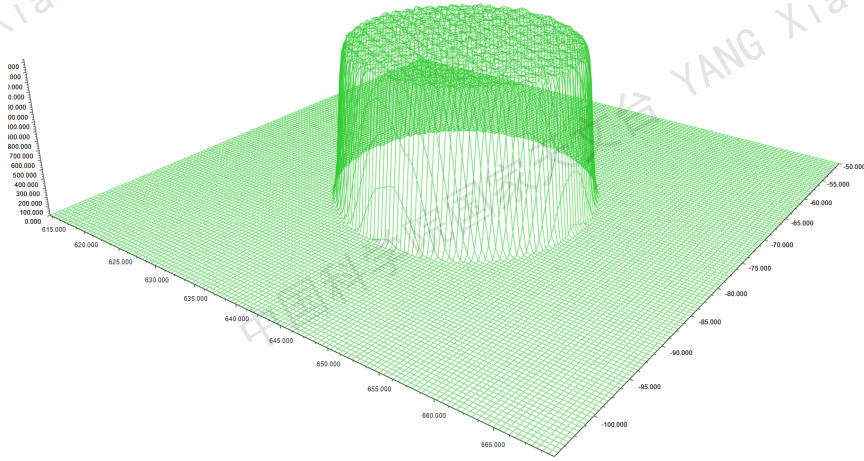


图 3-16 ASAP 模型中 M9 的能量分布图

Figure 3-16 The energy distribution diagram of M9 in the ASAP model

引导光学系统中涉及到了光学元件参数汇总表如3-1所示：

表 3-1 引导光学系统元件汇总表

Table 3-1 guide optical elements

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
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
5M1	平面	/	140	/	微晶
5M2	平面	/	130	/	微晶
5M3	平面	/	130	/	微晶
5M4	平面	/	130	/	微晶
5M5	平面	/	140	/	微晶
M7	2813.457	446.88	200	-1	微晶
M8	平面	/	160	/	微晶
M9	平面	/	55	/	微晶

### • 焦面设备

AIMS 望远镜的焦面设备如图3-17所示，其中，远场光路和摆镜光路用于提高望远镜的跟踪精度；8 - 10 $\mu\text{m}$  成像系统、傅里叶光谱仪（FTIR 系统）和近场系统（以下简称可见光系统）涉及科学观测，FTIR 系统将在 12.32 $\mu\text{m}$  波段承担太阳磁场探测重任；8 - 10 $\mu\text{m}$  成像系统与可见光系统则负责太阳局部区域的成像观测，并与光谱数据协同开展分析研究，同时为光谱仪提供观测目标的选择与定位引导。对这三部分的焦面设备进行杂散光分析。

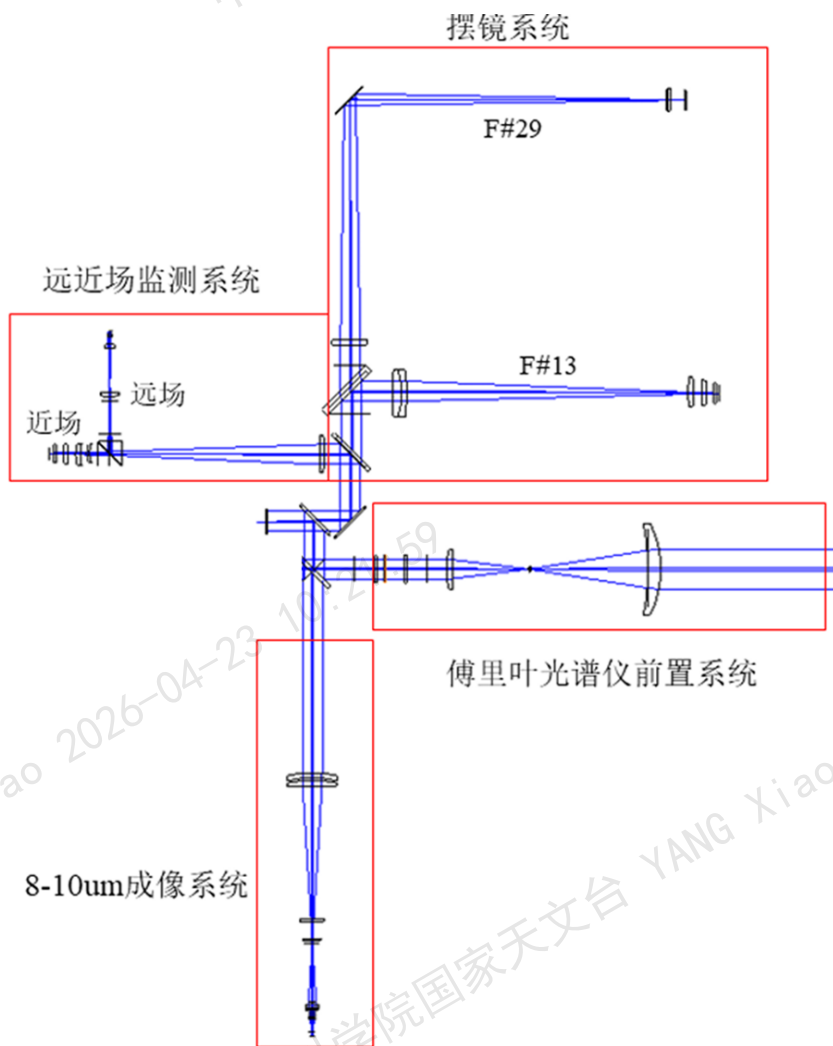


图 3-17 焦面系统设计图

Figure 3-17 Design Diagram of the Focal Plane System

可见光系统与 8 - 10 $\mu\text{m}$  成像系统依据原始光路设计，建立的系统模型如图3-18和图3-19所示。对于傅里叶光谱仪而言，为简化分析过程，采用透镜成像进行替代，以完善望远镜的杂散光建模，所设置的视场光阑、冷光阑、制冷温度等相关参数和光谱仪的要求一致。建立的系统模型如图3-21所示，焦面设备光学元件汇总如表 3-2 所示。

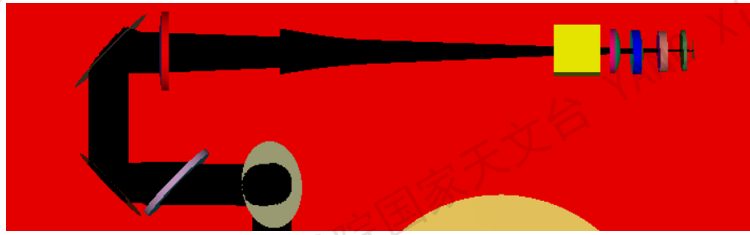


图 3-18 可见光系统模型图

Figure 3-18 Model Diagram of the Visible Light System

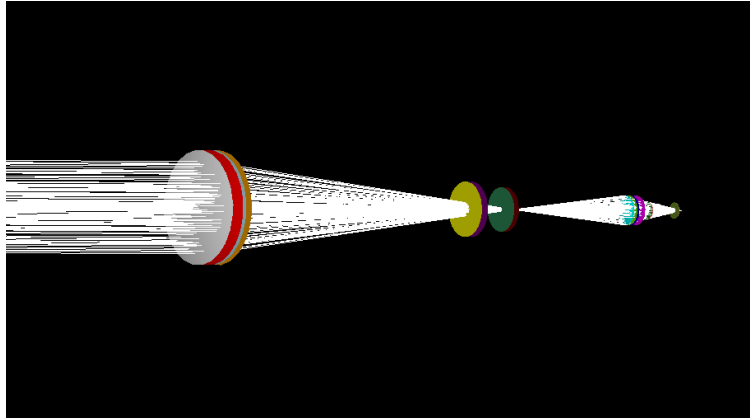


图 3-19 8 – 10  $\mu\text{m}$  系统模型图

Figure 3-19 Model Diagram of the 8 – 10  $\mu\text{m}$  Imaging System

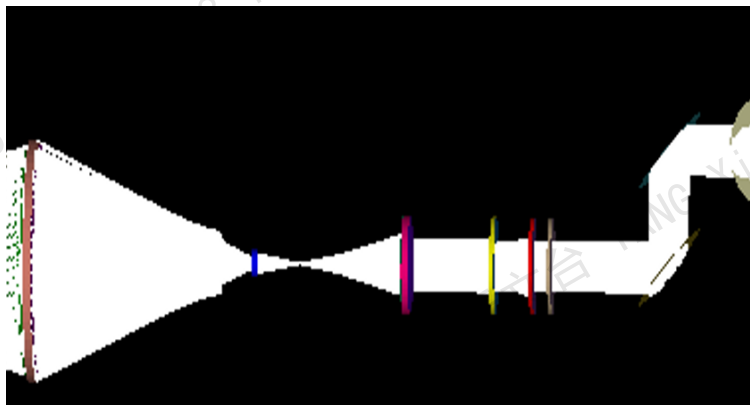


图 3-20 FTIR 前置光路模型

Figure 3-20 Model of the Pre-optical Path for FTIR

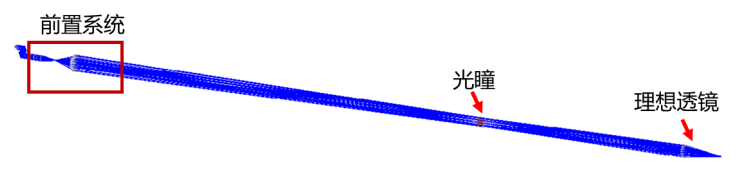


图 3-21 理想透镜替代系统模型图

Figure 3-21 Model Diagram of the Ideal Lens Alternative System

表 3-2 焦面设备光学元件汇总表

Table 3-2 Summary Table of Optical Components of Focal Plane Equipment

系统名称	元件名称	曲率/mm	厚度/mm	口径/mm	非球面系数	材料	
傅里叶光谱仪前置系统	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	16	118	偶次非球面 4阶: -1.755E-8 8阶: -4.058E-14	ZnSe	
		-129.224			-		
8 - 10 $\mu$ m 成像系统	L4	132.397 95.718	5	62	-	ZnS_IR	
	L5	14.277 1265.585	6.5	62	-	ZnSe	
	L6	平面	3.5	24	-	ZnSe	
	L7	21.131 -120.134	4	16	-	ZnSe	
	L8	-36.705 66.045	2.5	16	-	ZnS	
	Brucker 光谱仪前置准直系统	偏振分析器	平面	-	-	-	-
L9			86.973 225.379	4	39	-	ZnSe
L10		-641.287	13	110	偶次非球面 4阶: -1.855E-9 8阶: 1.369E-15	ZnSe	
		-266.315			-		
摆镜监视系统	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	10.5	64	-	N - BK7	
		-185.935	6.5		SF2		
	L17	461.364 -126.654	7	45	-	SILICA	
	跟踪监视系统	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	

### 3.3 机械结构建模

机械结构建模是探究 AIMS 望远镜杂散光非光学路径传播的关键步骤。AIMS 望远镜的机械结构设计通过 Solidworks 软件完成（如图3-22）。

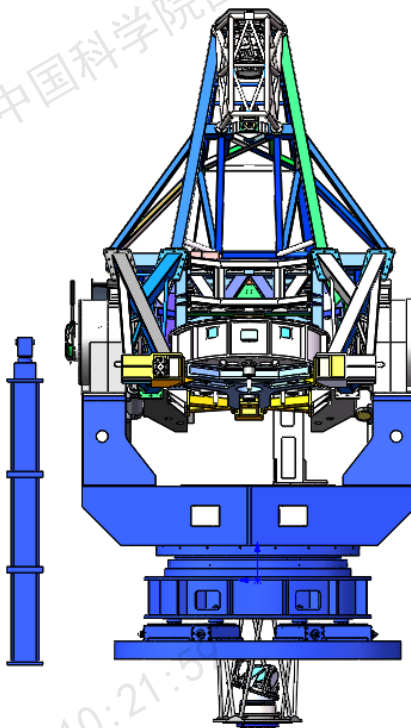


图 3-22 望远镜本体设计结构

Figure 3-22 Design Structure of the Telescope

在将机械结构数据导入 ASAP 模型时，常面临表面精度不足的问题，加之 AIMS 望远镜机械结构高度复杂，包含众多零部件与精密装配关系，导致整体导入操作难度极大，仍需采用脚本编写的方式进行建模。首先在 Solidworks 软件中，建立与 Zemax、ASAP 完全统一的坐标参考原点与轴系，确保各软件间数据的空间一致性。随后，对复杂的望远镜机械结构进行科学简化，在精简后的模型中，获取每个部件的三维空间坐标（如图3-23中左图）以及并明确各表面间的相对位置关系（如图3-23中右图），基于这些精确数据，编写 ASAP 脚本，成功构建出符合杂散光分析需求的望远镜本体模型如图3-24所示。

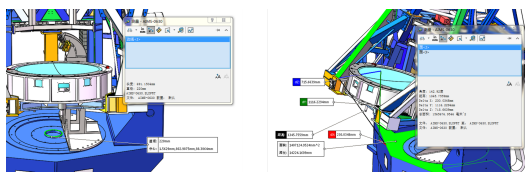


图 3-23 机械位置信息

Figure 3-23 Mechanical position information

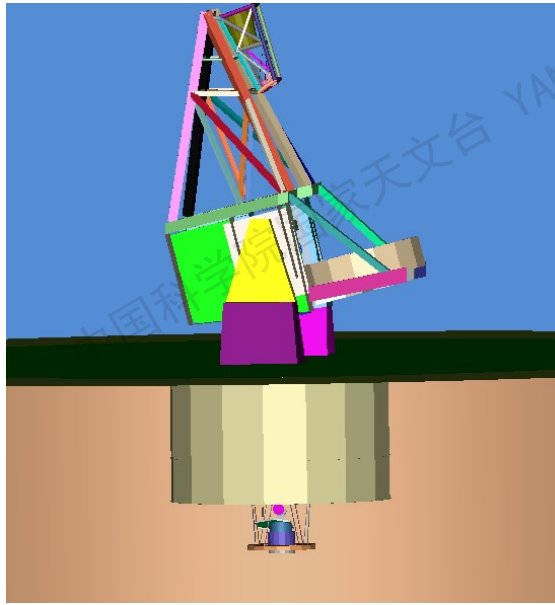


图 3-24 AIMS 望远镜的本体模型

Figure 3-24 The Body Model of AIMS Telescope

在建立望远镜本体模型时，需要特别关注热光阑的建模。热光阑（如图3-25）是 AIMS 望远镜的关键部件，位于太阳望远镜主镜的焦面处，在光路内部。AIMS 望远镜热光阑处的热载荷可达  $1100\text{kW/m}^2$ ，在短时间内热光阑与环境温度之间可能产生几百摄氏度的温差，这将导致严重的光阑自身热辐射，直接影响观测效果。建立的热光阑模型如图3-26所示。

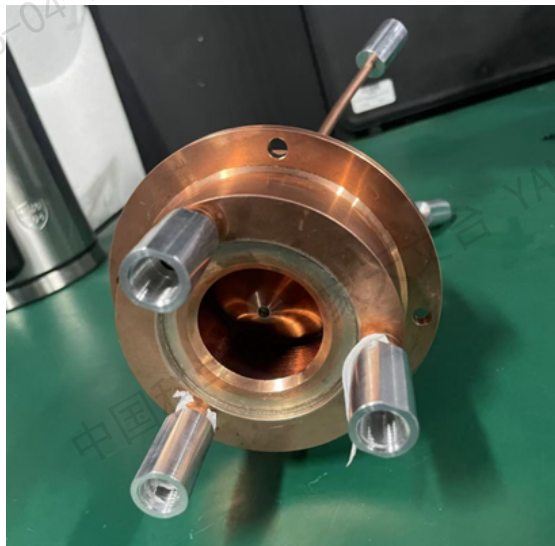


图 3-25 热光阑实物图

Figure 3-25 Physical Diagram of the Thermal Diaphragm

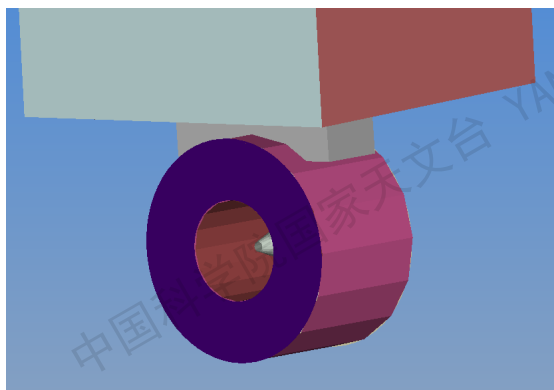


图 3-26 热光阑模型

Figure 3-26 Model of the Thermal Diaphragm

AIMS 望远镜的焦面系统安装在库德房的光学平台上，可见光系统的结构和 FTIR 前置系统的结构直接安装在平台上，而光谱仪整机（如图3-28）以箱体安装在平台上，8-10 $\mu\text{m}$  成像系统置于杜瓦瓶内安装在平台上。建立的焦面设备模型在光学平台的分布如图所示，各系统的建模如图3-30-图3-33所示

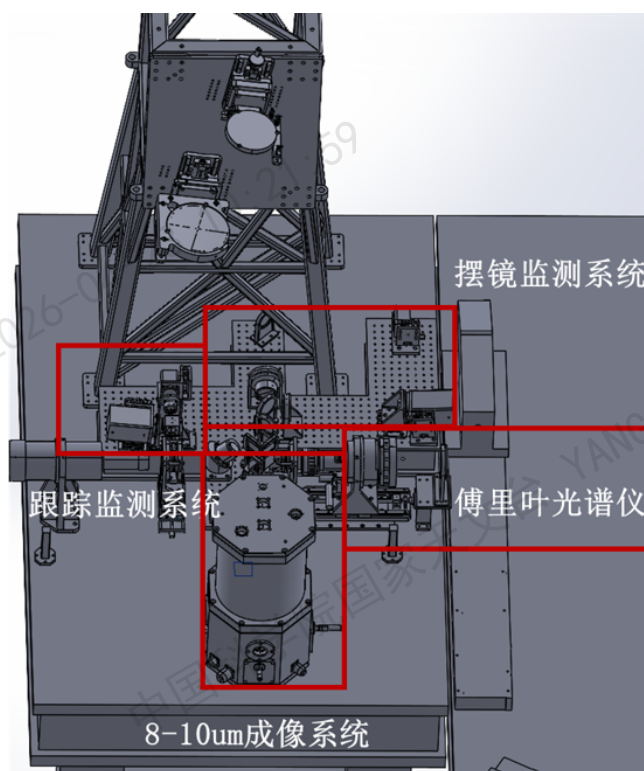


图 3-27 焦面系统设计分布图

Figure 3-27 Design Distribution Diagram of the Focal Plane System

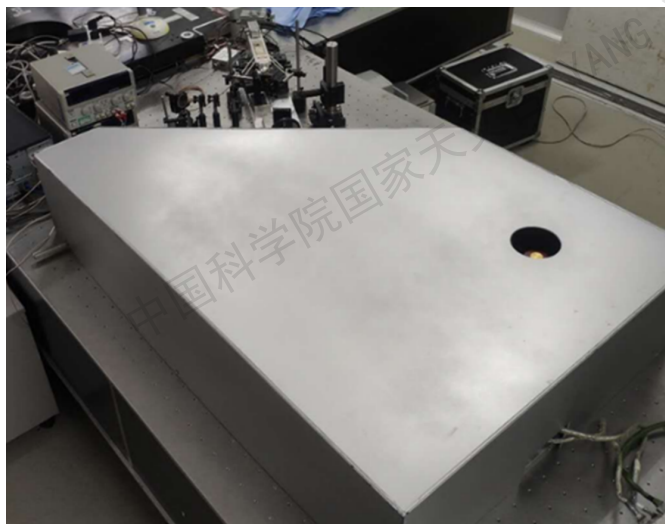


图 3-28 傅里叶光谱仪实物照片

Figure 3-28 Physical Photo of the Fourier Spectrometer

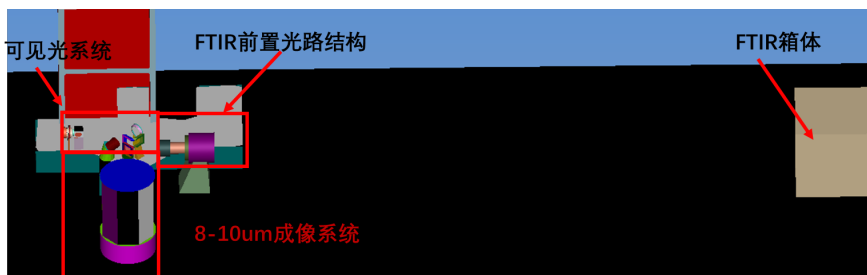


图 3-29 焦面系统模型图

Figure 3-29 Model Diagram of the Focal Plane System

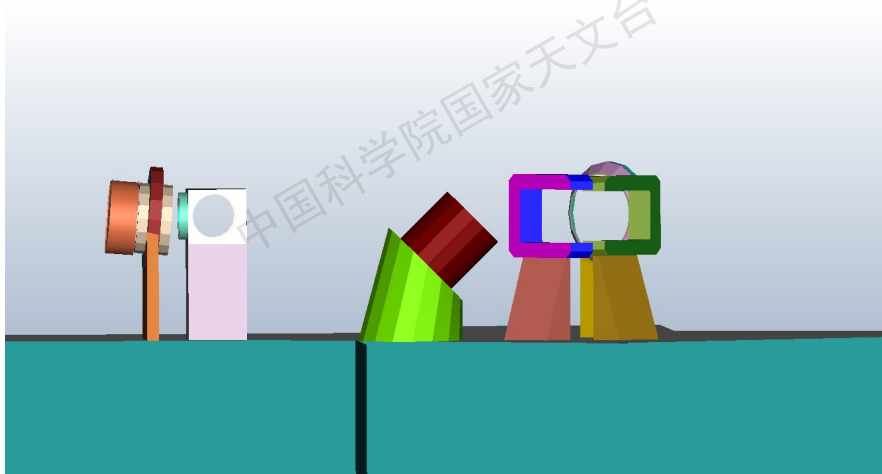


图 3-30 可见光系统模型

Figure 3-30 Model of the Visible Light System

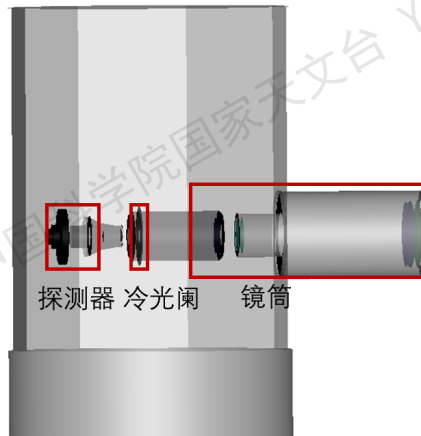


图 3-31 8 - 10 $\mu\text{m}$  成像系统模型图

Figure 3-31 Model Diagram of the 8 - 10 $\mu\text{m}$  Imaging System

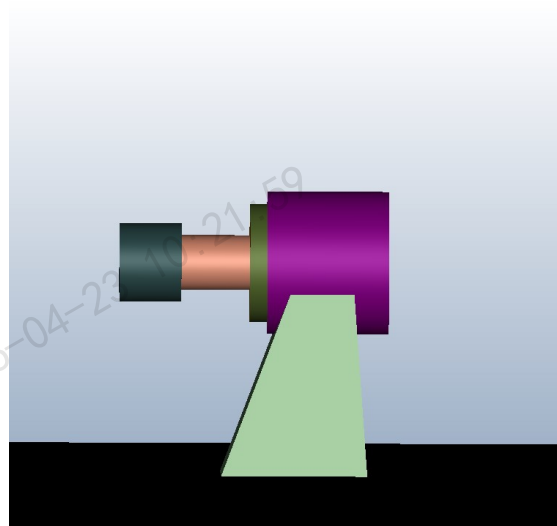


图 3-32 FTIR 前置光路模型图

Figure 3-32 Model Diagram of the FTIR Pre-optical Path

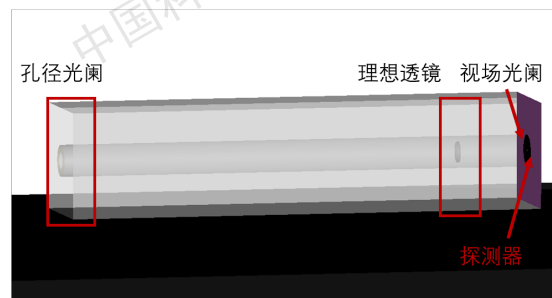


图 3-33 FTIR 箱体模型图

Figure 3-33 Model Diagram of the FTIR Box

### 3.4 圆顶建模

AIMS 望远镜的圆顶采用直径 10 米的超半球结构，配备可开闭的天窗。圆顶内壁会将太阳光散射到望远镜光路，圆顶本身可以减少天空背景光对望远镜的影响。在建立杂散光模型时，构建一个包含 10 m 圆顶，2 m 天窗以及库德房光学平台的综合模型，如图3-34所示。

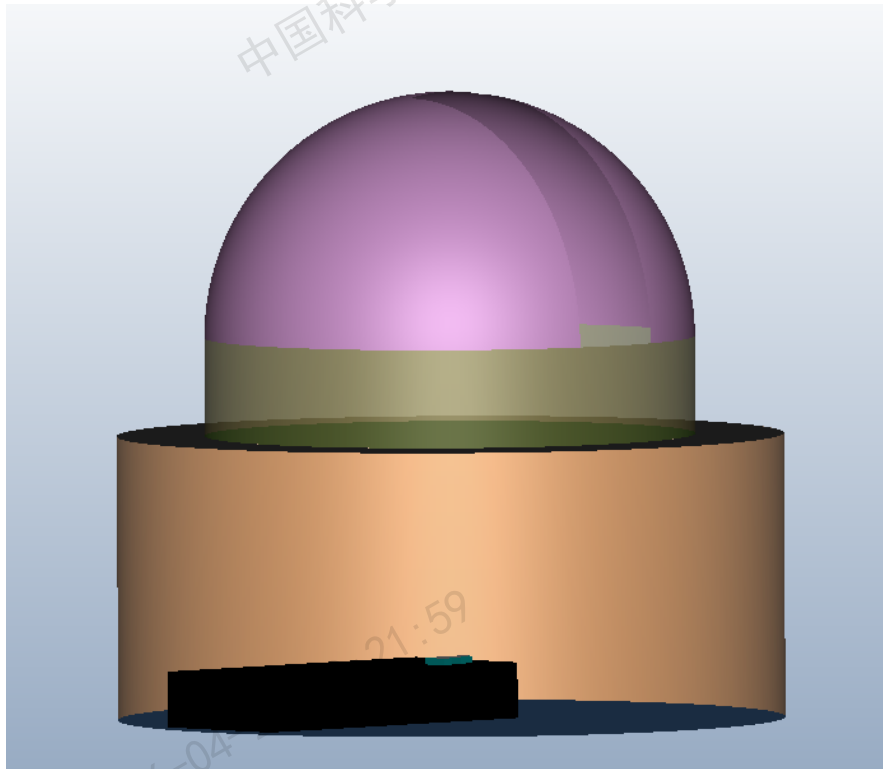


图 3-34 圆顶模型

Figure 3-34 Model of the Dome

通过上述建立得到光学模型，机械模型以及圆顶模型整合后得到 AIMS 望远镜的整体模型如图3-35所示，通过对比望远镜不同姿态的光线情况验证模型的准确性（ $15^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ），如图3-36为高度轴  $60^{\circ}$  时望远镜的情况，在望远镜绕高度轴转动时，光线路径不存在遮挡，成像没有发生变化，从而验证了望远镜整体模型的准确性。

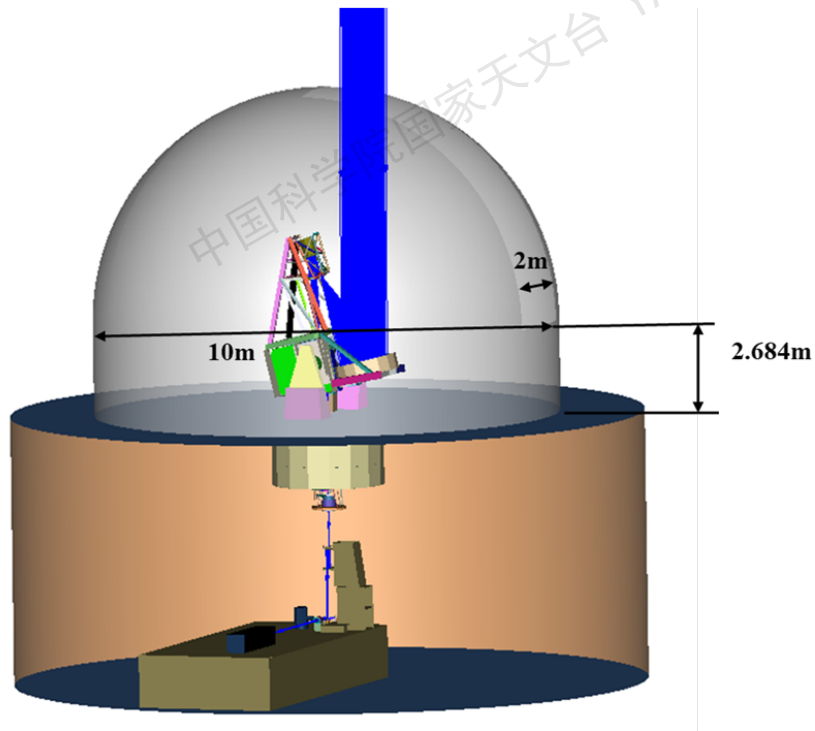


图 3-35 AIMS 望远镜 90° 姿态模型

Figure 3-35 The 90° attitude model of the AIMS telescope

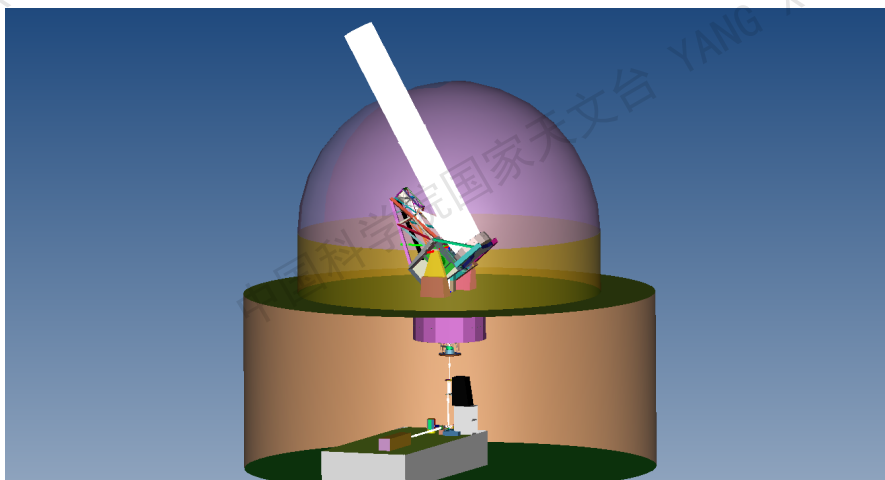


图 3-36 AIMS 望远镜 60° 姿态模型

Figure 3-36 The 60° attitude model of the AIMS telescope

### 3.5 表面建模

在杂散光分析中，表面双向散射分布函数（BSDF）的准确设定是关键环节。构建表面模型存在多种方法，涵盖 Lambertian、Harvey、Polynomial 多项式、RMS、BSDFdata 以及 ABg 模型等，不同模型适用于不同表面特性的模拟需求。在实际仿真过程中，为提高分析精度，将表面类型划分为光学表面与机械表面两类分别处理。目前，光学表面采用 Harvey 模型进行描述。该模型基于反射镜表面反射率、材料属性等特征参数进行配置，适用于光学表面及高反射率的机械表面。当镜面的均方根（RMS）粗糙度远小于入射光的波长时，镜面散射可用改进的三阶哈维散射模型进行描述。该散射模型如下所示：

$$\text{BSDF}(\theta, \theta_0) = b_0 \left( 1 + \left( \frac{\sin \theta - \sin \theta_0}{L} \right)^2 \right)^{-s/2} \quad (3-9)$$

其中， $\theta_0$  是入射角，表示入射光线与镜面法线之间的夹角； $\theta$  是散射角，表示散射光线与镜面法线之间的夹角； $b_0$  是归一化系数，与表面粗糙度和波长有关； $L$  是特征长度参数，反映了表面粗糙度的空间频率特性； $s$  是衰减指数，控制着散射分布的展宽程度（其值越大，散射在镜面反射方向上就越集中）。

圆顶内的机械表面大多涂白漆，采用 Lambertian 模型进行定义；库德房中的机械表面大多做了发黑处理，采用 ABg 模型设定其表面的散射情况。对于常用材料采用软件自带的模型库中的数据，如图3-37所示为软件自带的漫反射金属表面散射情况。目前对于光学表面设定的模型是基于光学元件透过率反射率实测值的散射模型，机械表面借助系统库里的模型建立，这些表面模型很大程度上可以反应表面的情况。

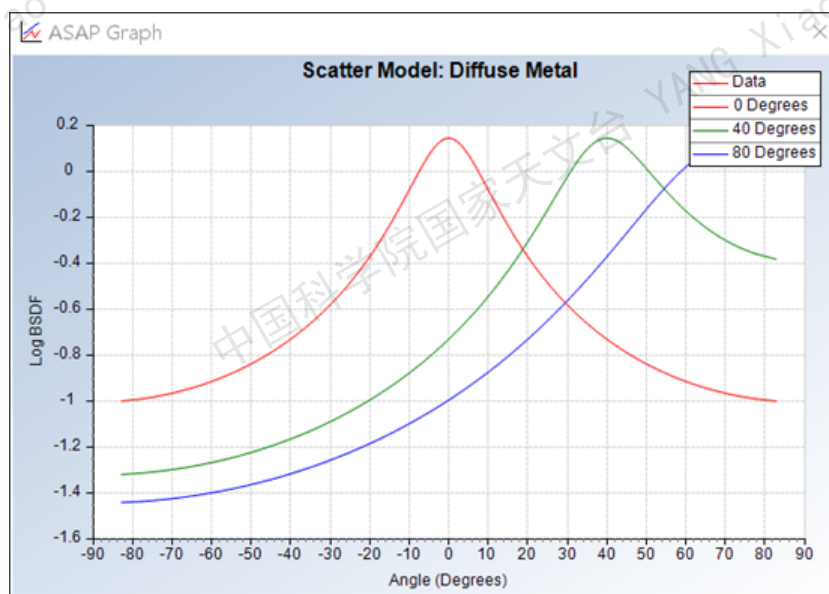


图 3-37 ASAP 软件漫反射金属表面散射模型

Figure 3-37 Scattering Model of the Diffuse Reflection Metal Surface in ASAP Software

### 3.6 本章小结

本章主要介绍了 AIMS 望远镜全系统建模的详细过程，涵盖光学系统、机械结构、圆顶及表面模型四大核心模块。在光学系统建模中，鉴于 Zemax 与 ASAP 的差异，采用 ASAP 脚本语言建模，通过构建统一坐标转换机制，完成引导光学与焦面设备建模，并经对比验证，确保模型与原始设计高度契合。机械结构建模时，同样采用脚本编写方式，经简化结构、统一坐标系后成功构建望远镜机械模型，并着重关注热光阑等关键部件建模。圆顶建模方面，构建了包含圆顶、天窗与光学平台的综合模型。表面建模则依据表面特性，光学表面采用 Harvey 模型，机械表面依实际情况选用 Lambertian 或 ABg 模型，实现表面特性的准确描述。

## 第4章 AIMS 望远镜杂散光分析

AIMS 望远镜独特的离轴设计、特定观测波段与冷光学设计，既赋予其卓越性能，也为杂散光研究带来挑战。本章节将基于已有的光机系统模型，从杂散光来源、重要散射表面、不同条件等方面开展针对性的杂散光分析，给出各科学仪器的杂散光水平。

### 4.1 杂散光来源分析

在可见光波段望远镜的杂散光分析中，镜面散射是占主导地位。(Ellis et al., 2010); 对于 AIMS 红外望远镜，热辐射是其重要的杂散光来源；同时 AIMS 望远镜采用开放式架构，外部杂散光容易通过结构散射进入系统中，在分析中也不容忽视。根据 AIMS 杂散光的来源从非热辐射与热辐射开展分析，其中可见光系统的杂散光只考虑非热辐射，红外系统杂散光需分析非热辐射与热辐射的双重影响。

#### 4.1.1 可见光系统

可见光系统的非热辐射由外部杂散光和内部杂散光两部分构成。外部杂散光主要源于望远镜周围的环境光。这些环境光能够通过圆顶的天窗进入望远镜，直接或经过光学系统抵达探测器，影响成像质量。对于 AIMS 望远镜而言，太阳既是其观测目标同时也是主要的外部杂散光来源。

内部杂散光主要来源于光学表面和机械表面的散射。这些缺陷可能导致光线在元件表面发生散射，经过传输后到达探测器。即便各光学表面均镀有增透或增反膜，多次反射依然是杂散光的主要来源。若光学系统包含  $n$  个光学表面，二次反射光路的组合数目为  $\frac{n(n-1)}{2}$ ；4 次反射光路的组合数目为  $\frac{n!}{4!(n-4)!}$ ，经过 4 次反射后，光线能量大幅降低，其在像面上的影响可忽略不计。

所有的二次反射光路产生的杂光，可进一步细分为三类，如图4-1所示。

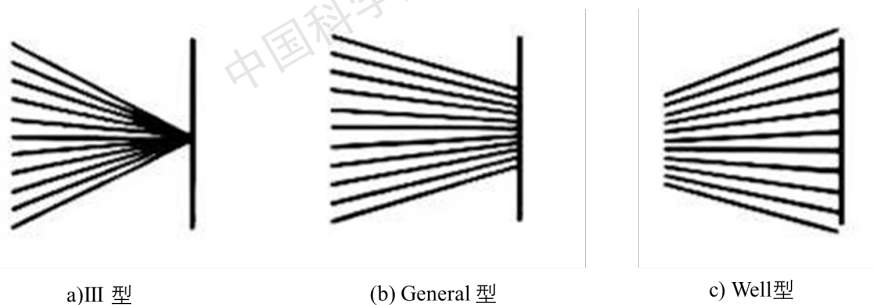


图 4-1 二次反射光路分类

Figure 4-1 Classification of secondary reflection light paths

(a) III 型二次反射杂光，光线经光学表面二次反射后在像面上汇聚对成像质量影响显著；(c) Well 型二次反射杂光，光线经两次反射后在像面发散，其影响较小，可忽略不计；(b) General 型二次反射杂光，光线经两次反射后有汇聚趋势，但汇聚程度较弱，介于前两者之间。对此，虽无法完全消除 General 型杂光，但需尽可能降低其汇聚程度，以减少对成像的干扰。

AIMS 光路中涉及反射镜，透镜，分光镜等多种光学元件，复杂的光路结构使得内部杂散光成为非热辐射分析的核心内容。而光学表面的多次反射，尤其是二次反射所产生的杂散光，更是系统杂散光的主要来源，直接关系到系统成像质量与光学性能的优劣，需重点分析与防控。

#### 4.1.2 红外系统

红外系统的非热辐射分析与可见光系统类似，不再赘述。其热辐射分析主要分两部分：第一部分是大气中的热辐射，AIMS 望远镜观测目标是局部太阳，太阳为亮光源，是热辐射的主要来源。另外，在 8-10 $\mu\text{m}$  观测波段，地面环境背景辐射达到峰值。因此在该波段的杂散光分析中，需考虑环境热辐射的影响。

第二部分是红外系统的自身热辐射。由于光学元件和机械结构在工作过程中会产生热量，这些热量引发的热辐射会传递至探测器，影响成像质量。为了减少自身热辐射的影响，通常采用冷光学设计，即通过将光学元件与机械结构维持在低温环境下工作，减少热辐射干扰。

AIMS 望远镜的 8-10 $\mu\text{m}$  系统和 FTIR 系统均采用制冷设计，8-10  $\mu\text{m}$  系统制冷温度为 100 K，FTIR 系统中，成像镜制冷温度为 80 K、冷光阑为 62 K、视场光阑为 80 K、探测器为 60K。通过进行制冷前后的自身热辐射分析量化制冷的效果。

### 4.2 杂散光重要表面分析

AIMS 望远镜为离轴系统，这种非对称布局导致光线传播路径复杂，计算量庞大。为了减少计算量提高效率，优化采样、识别并聚焦重要表面开展针对性分析，这里重要表面包括重要散射表面和采样表面。

#### 4.2.1 重要散射表面

重要散射表面中，关键表面是能被探测器或像面看到的表面，被照明表面是受杂散光照射的表面，兼具二者属性的一阶散射表面是一阶杂散光主要来源及传播核心路径。

借助已构建完成的 AIMS 模型开展光线追迹来确定关键表面和被照明表面。在焦平面上定义一个与像尺寸相同的扩展光源，随后在整个系统中对该光源进行反向光线追迹，并保证光线能够完全覆盖入射孔径，由此追迹得到关键表面。AIMS 模型反向光线追迹如图4-2所示：

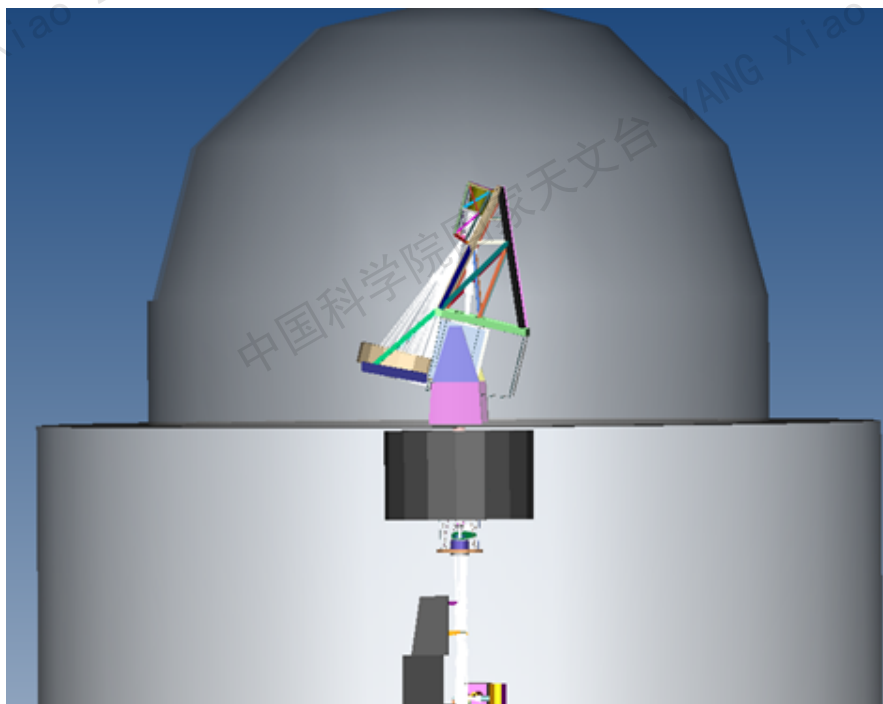


图 4-2 AIMS 模型反向光线追迹

Figure 4-2 Reverse Ray Tracing of AIMS Model

不同系统反向光线追迹获得的关键表面如表4-1—表4-3所示。图中四列分别对应表面的编号、到达表面的光线数、辐照度和表面名称。通过对比分析，可见光系统的关键面数量显著多于其他系统。由于可见光系统直接安装于平台之上，缺乏整机箱体的遮挡，使得探测器发出的光线能够传播至更多的表面，进而增加了关键面的数量。

被照明表面通过正向追迹获得，定义不同入射角的外部光源，并对其实施正向光线追迹，确定系统中各个被照明表面。正向光线追迹的示意图如图4-3所示。经分析发现，在 AIMS 望远镜的光学系统内，绝大多数的光学镜面都属于被照明表面，这意味着这些镜面会受到外部光线的直接照射，并可能引发光线的反射、散射等现象，从而产生杂散光。同时，望远镜圆顶内的机械结构由于开放式的结构设计，也极易接收来自光源的能量，这些机械结构大多也被归类为被照明表面。

表 4-1 可见光系统关键表面

Table 4-1 Key Surfaces of Visible Light System

Object	Rays	Flux	Name
1	2	0.1935909E - 05	MOUNT.BASE.1
16	7012	0.9515408E - 02	MOUNT.BASE.16
22	24	0.2445359E - 04	MOUNT.BASE.22
30	32	0.2795452E - 04	OSS.TOP.8
72	37	0.3232242E - 04	OSS.SECSUP.26
98	54	0.5791640E - 04	OSS.BOTTOM.12
114	388	0.3389486E - 03	OSS.ARM.11
116	853	0.7451627E - 03	OSS.ARM.13
118	55953	0.6968986E - 09	DOWN.JIEGOU.2
119	8376	0.7799824E - 10	DOWN.JIEGOU.3
130	2342	0.6477604E - 11	DOWN.JIEGOU.14
131	5266	0.8963345E - 02	DOWN.JIEGOU.15
132	8	0.2078805E - 13	DOWN.JIEGOU.16
133	6633	0.1015071E - 02	DOWN.JIEGOU.17
140	6	0.2988986E - 04	DIZUO.KJ.2
142	12394	0.5993810E - 01	DIZUO.KJ.4
143	10868	0.1705109E - 08	DIZUO.KJ.5
144	55	0.8950933E - 04	DIZUO.KJ.6
146	4509	0.1244255E - 10	DIZUO.KJ.8
147	5798	0.1567712E - 10	DIZUO.KJ.9
149	860	0.1469658E - 02	DIZUO.KJ.11
150	1680	0.1525010E - 02	DIZUO.KJ.12
153	75680	0.6251812E - 02	DIZUO.NEAR.1
155	3783	0.1435019E - 02	DIZUO.NEAR.3
157	33058	0.2938923E - 03	DIZUO.NEAR.5
158	7496	0.3174848E - 01	DIZUO.NEAR.6
160	992	0.4209376E - 02	DIZUO.NEAR.8
161	56906	0.3151236E - 01	DIZUO.NEAR.9
162	1633	0.6599404E - 02	DIZUO.NEAR.10
163	6	0.2988986E - 04	DIZUO.NEAR.11
164	14758	0.7320108E - 01	DIZUO.NEAR.12
167	11163	0.4864383E - 01	DIZUO.NEAR.15
168	1170	0.1351847E - 02	DIZUO.NEAR.16
169	233981	0.4868885E - 10	DIZUO.NEAR.17
170	322	0.7589808E - 10	DIZUO.NEAR.18
172	2179	0.1358073E - 01	DIZUO.NEAR.20
173	173	0.1570528E - 02	DIZUO.NEAR.21
174	3247	0.1445824E - 01	DIZUO.NEAR.22
175	12479	0.9911897E - 01	DIZUO.NEAR.23
176	78553	0.7059625E - 10	DIZUO.NEAR.24
177	63700	0.2557020E - 09	DIZUO.NEAR.25
181	11	0.4611935E - 13	DIZUO.NEAR.29
184	15404	0.8740427E - 01	DIZUO.NEAR.32
185	4475	0.8982207E - 09	DIZUO.NEAR.33
190	36	0.1527787E - 03	DIZUO.NEAR.38
191	44	0.1867295E - 03	DIZUO.NEAR.39
192	304	0.1507987E - 02	DIZUO.NEAR.40
193	1230	0.6101170E - 02	DIZUO.NEAR.41
199	8598	0.4264690E - 01	DIZUO.NEAR.42
202	94	0.4662485E - 03	DIZUO.NEAR.50
203	1687	0.1209341E - 02	OPTIC.M1
219	6052	0.4423582E - 09	OPTIC.M10.BACK
222	219	0.1629071E - 03	OPTIC.NEAR.L4.FRONT
223	595	0.2394743E - 03	OPTIC.NEAR.L4.BACK
224	2497	0.3620865E - 02	OPTIC.NEAR.L4.EDGE
227	236350	0.3979108E - 04	OPTIC.NEAR.M14.EDGE
229	193512	0.9572419E - 09	OPTIC.NEAR.L6.BACK
230	20076	0.3996173E - 09	OPTIC.NEAR.L6.EDGE
232	76346	0.1212685E - 09	OPTIC.NEAR.L7.BACK
233	600	0.9340911E - 10	OPTIC.NEAR.L7.EDGE
236	333	0.1196392E - 02	OPTIC.NEAR.IF.EDGE
238	39	0.4042833E - 06	OPTIC.NEAR.WINDOW.BACK
239	108	0.3096870E - 03	OPTIC.NEAR.WINDOW.EDGE
287	92	0.3904345E - 03	JIEGOU.HEXEDGE.4

表 4-2 8 - 10 $\mu\text{m}$  成像系统关键表面Table 4-2 Key Surfaces of 8 - 10 $\mu\text{m}$  Imaging System

Objects	Rays	Flux	Name
14	1	1.9158691E - 05	MOUNT.BASE.14
30	7	0.1303387E - 04	OSS.TOP.8
72	6	0.1117189E - 04	OSS.SECSUP.26
113	30	0.5530084E - 04	OSS.ARM.10
114	323	0.6014199E - 03	OSS.ARM.11
116	2489	0.4634471E - 02	OSS.ARM.13
131	24234	0.5657408E - 01	DOWN.JIEGOU.15
133	10763	0.261852E - 01	DOWN.JIEGOU.17
140	4	0.1010534E - 04	DIZUO.KJ.2
142	5	0.1264168E - 04	DIZUO.KJ.4
147	24	0.6063204E - 04	DIZUO.KJ.9
149	4245	0.1045657E - 01	DIZUO.KJ.11
150	15	0.3986327E - 04	DIZUO.KJ.12
186	939	0.4996058E - 02	DIZUO.NEAR.34
193	356	0.210024E - 02	DIZUO.NEAR.35
203	7650	0.1396070E - 01	OPTIC.M1
250	1476	0.3385331E - 01	OPTIC.8 - 10. COLD STOP
252	496	0.4692327E - 02	OPTIC.8 - 10.L4
265	1487	0.1076884E - 01	JIEGOU.6
267	1163	0.118569E - 01	JIEGOU.10
270	3807	0.3689827E - 01	JIEGOU.11
271	384	0.3810262E - 02	JIEGOU.12
273	97	0.9699994E - 03	JIEGOU.13

表 4-3 FTIR 系统关键表面

Table 4-3 Key Surfaces of FTIR System

Object	Rays	Flux	Name
16	107	0.1006762E - 03	MOUNT.BASE.16
22	23	0.1228556E - 04	MOUNT.BASE.22
37	3	0.1485260E - 05	OSS.TOP.15
49	4	0.1988346E - 05	OSS.SECSUP.3
72	36	0.1782312E - 04	OSS.SECSUP.26
89	11	0.6023639E - 05	OSS.BOTTOM.11
114	51	0.2524942E - 04	OSS.ARM.11
116	169	0.8369694E - 04	OSS.ARM.13
139	5	0.4704495E - 05	DIZUO.KJ.1
150	36	0.2543841E - 04	DIZUO.KJ.12
153	1	0.7210434E - 06	DIZUO.NEAR.1
154	8	0.1882248E - 05	DIZUO.NEAR.2
156	1	0.9403592E - 06	DIZUO.NEAR.4
160	25	0.1881798E - 05	DIZUO.NEAR.7
164	1	0.4408991E - 06	DIZUO.NEAR.8
182	1	0.1948991E - 06	DIZUO.NEAR.12
186	37	0.2667860E - 04	DIZUO.NEAR.30
188	31	0.2429603E - 04	DIZUO.NEAR.36
192	20	0.6456760E - 05	DIZUO.NEAR.40
193	45	0.4234049E - 04	DIZUO.NEAR.41
195	6	0.5645395E - 05	DIZUO.NEAR.44
199	57	0.5363125E - 04	DIZUO.NEAR.42
202	139	0.1307850E - 03	DIZUO.NEAR.50
203	669	0.6294615E - 03	OPTIC.M1
305	5676	0.5340543E - 02	OPTIC.FTIR.STOP
308	36756	0.3565326E - 01	OPTIC.FTIR.L4.EDGE
309	63731	0.6064250E - 01	OPTIC.FTIR.L4.TAOTONG
312	104041	0.401401E - 01	OPTIC.FTIR.FIELD STOP

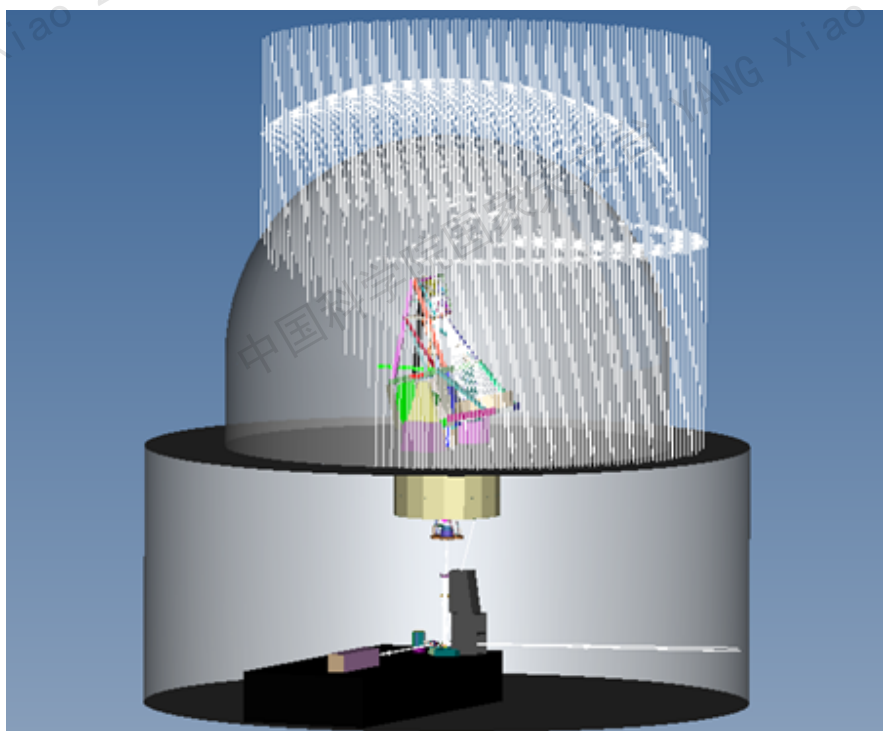


图 4-3 正向光线追迹的示意图

Figure 4-3 Schematic Diagram of Forward Ray Tracing

#### 4.2.2 采样表面

采样表面是杂散光分析中，为进行散射光线瞄准选取的具有代表性的表面。散射光线瞄准是提升计算收敛速度的常用方法，其基本原理是通过优化光线传播路径，使散射光线更高效地抵达目标区域。如图4-4所示，散射光线的瞄准可以将光线集中到探测器上，减少不必要的计算。AIMS 光路系统的复杂性，很少有光线可以直接散射到探测器表面，大多要经过光学表面后到达探测器，系统的成像表面和虚拟像面也要作为采样表面来进行光线瞄准。

寻找虚拟像面方法如下：

1. 在焦面定义一个点光源，并在系统中对其进行反向光线追迹，确保光线充满整个光瞳。
2. 将光线追迹到其散射光束被瞄准的表面（比如次镜），光线在此表面上终止。
3. 通过最佳焦点计算确定这些光线的聚焦位置，即确定为虚拟像面的位置。
4. 在焦平面定义一个与像大小相同的扩展光源，重复 1.2 步骤，将光线终止在虚拟像面上，获得虚拟像面的大小。

对于 AIMS 望远镜光路，其光路存在格里高利焦点和中间焦点，需分别对这两种焦点情况进行分析。如图4-5所示为格里高利焦点处反向追迹的结果，光线经离轴椭球面镜 M2 反射后，会在主镜焦点处形成实像，该实像所在表面就是一个重点采样表面；同理，在中间焦点处反向追迹，离轴椭球镜 M4 会在格里高利

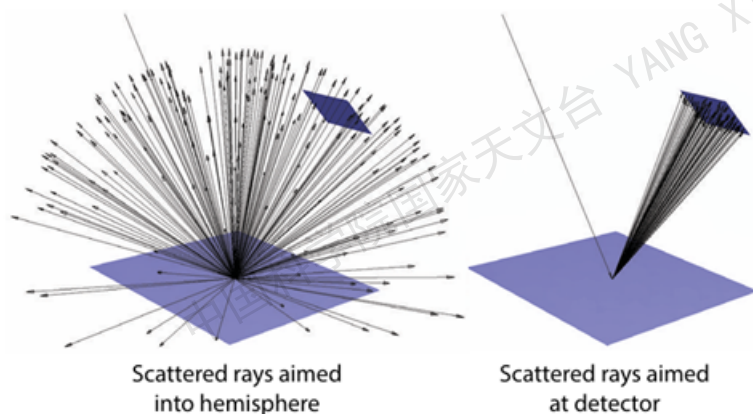


图 4-4 瞄向探测器的散射光线

Figure 4-4 Scattered Light Aiming at the Detector

焦点位置形成实像，该位置同样被列为重点采样表面。

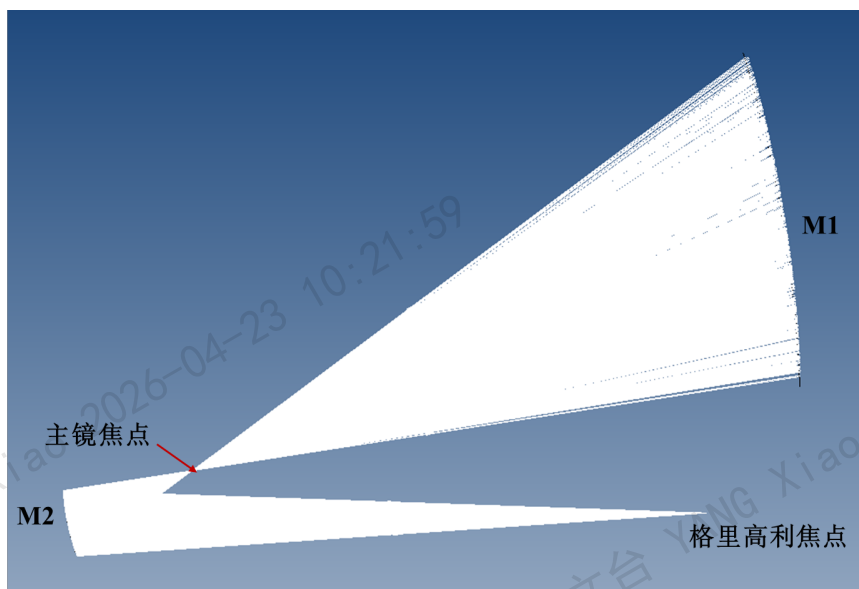


图 4-5 格里高利焦点处反向追迹图

Figure 4-5 Reverse Tracing Diagram at Gregorian Focus

综合来看，AIMS 望远镜的重点采样区域涵盖探测器、主镜焦点、格里高利焦点和中间焦点等关键部位。在实际仿真过程中，针对每个表面分配对应的散射模型和重点采样表面，并利用软件中的 TOWARDS 命令将散射光线精准引导至目标表面，配合 SCATTER MODELS 散射模型构成完整的光线瞄准体系。同时，使用 LEVEL 命令中的 n 参数灵活控制多重散射过程，在保证计算精度的前提下，显著提升杂散光分析的计算效率。

### 4.3 非热辐射分析

在 AIMS 望远镜的杂散光研究体系中，可见光系统与红外系统均需开展非热辐射分析，非热辐射分析包括外部杂散光和内部杂散光。

外部杂散光主要源自太阳与大气散射，作为观测目标的太阳，同时也是最主要的外部杂散光来源；而内部杂散光则归因于望远镜光学及机械结构的非理想特性，涵盖镜面微粗糙度导致的散射、支撑结构的光线漫反射，以及光学元件间产生的鬼像反射等现象。

在杂散光量化分析时，太阳产生的杂散光可视为固定点源进行处理，此类杂散光抵达探测器的量级通常采用点源透过率（PST）衡量；与之不同，天空背景属于朗伯发射体，其在探测器上引发的杂散光水平无法通过 PST 评估，需依据天空平均辐亮度、系统透过率等参数综合计算。为实现统一评估，研究采用杂散光比（SLR）作为量化指标。

定义光源完成光线追迹后，获得三个系统中杂散光具体的传播路径（以  $0^\circ$  入射为例）如表4-4-表4-6所示，表面 240，表面 259 和表面 312 分别为三个系统的探测器。分析图中数据可知，可见光系统杂散光主要路径是窗口玻璃以及滤光片的前后表面的多次反射；8-10 $\mu\text{m}$  系统杂散光主要路径是滤光片的表面和成像镜的最后一个表面反射；FTIR 系统主要路径是理想透镜的后表面反射。

表 4-4 可见光系统杂散光传播路径

Table 4-4 Stray Light Propagation Path of Visible Light System

Path	Rays	SumTOTAL	Percent	Hits	Curr	Prev	Split/Scatter
1	4670	2.9459E - 10	0.0256	-31	240	238	-221.004
2	4001	3.6519E - 10	0.0317	-31	240	238	-222.004
3	7886	7.4665E - 10	0.0648	-31	240	238	-223.004
4	8097	4.5981E - 08	3.9932	-31	240	238	-226.004
5	8097	3.6809E - 08	3.1967	-31	240	238	-229.004
6	4508	2.9534E - 08	2.5649	-31	240	238	-231.004
7	8097	6.8061E - 08	5.9107	-31	240	238	-232.004
8	8097	1.2400E - 07	10.7686	-31	240	238	-234.004
9	8097	1.7537E - 07	15.2301	-31	240	238	-235.004
10	8097	5.0306E - 07	43.6880	-31	240	238	-238.004
11	2228	1.3935E - 07	12.1021	-31	240	238	-237.004
12	5059	2.0432E - 09	1.7744	-31	240	238	-228.004
13	5711	7.4680E - 09	0.6486	-31	240	238	-225.004
14	4	3.8263E - 13	0.0000	-27	240	238	-224.004
15	66	5.1744E - 12	0.0004	-28	240	238	-220.004
16	2	1.8388E - 13	0.0000	-27	240	238	-222.004
17	1	1.9752E - 14	0.0000	-29	240	238	-222.004
18	1	2.0254E - 14	0.0000	-25	240	229	-222.004
19	1	6.4937E - 14	0.0000	-29	240	238	-221.004
19	82720	1.1515E - 06					

通过运用蒙特卡洛方法，结合 ASAP 软件构建的系统模型，进行杂散光分析，获得光源不同入射角下三个焦面系统的杂散光比，如图4-6所示。黑实线、绿

表 4-5 8 - 10 $\mu\text{m}$  系统杂散光传播路径Table 4-5 Stray Light Propagation Path of 8 - 10 $\mu\text{m}$  System

Path	Rays	SumTOTAL	Percent	Hits	Curr	Prev	Split/Scatter
1	1689	5.7811E - 08	0.2697	-34	259	257	-244.001
2	7973	2.3715E - 08	0.1106	-34	259	257	-244.002
3	12194	3.9347E - 08	0.1836	-34	259	257	-245.002
4	4734	1.8294E - 07	0.8534	-34	259	257	-245.001
5	5667	2.7911E - 08	0.1302	-34	259	257	-246.002
6	254	1.5818E - 07	0.7393	-34	259	257	-247.002
7	8097	4.2144E - 08	0.1966	-34	259	257	-247.002
8	13232	2.9641E - 07	1.3828	-34	259	257	-249.002
9	9640	3.0008E - 06	13.9991	-34	259	257	-252.002
10	8097	1.4848E - 06	6.9266	-34	259	257	-254.002
11	8097	1.4437E - 05	67.3499	-34	259	257	-257.002
12	6938	1.1700E - 08	0.0545	-32	259	257	-243.001
13	3	9.5662E - 10	0.0045	-32	259	257	-252.002
14	3623	8.2034E - 07	3.8269	-34	259	257	-251.002
15	494	8.7675E - 08	0.4090	-34	259	257	-253.002
16	274	6.1146E - 07	2.8525	-34	259	257	-256.002
17	7506	1.7010E - 09	0.0079	-34	259	257	-243.002
18	66	3.2076E - 09	0.1946	-32	259	257	-246.001
19	9	2.1586E - 09	0.0101	-32	259	257	-251.002
20	9	1.1569E - 07	0.5397	-33	259	257	-249.001
21	3	8.3709E - 10	0.0039	-34	259	257	-252.002
22	1	1.8061E - 10	0.0008	-33	259	256	-253.002
22	98600	2.1436E - 05					

表 4-6 FTIR 系统杂散光传播路径

Table 4-6 Stray Light Propagation Path of FTIR System

Path	Rays	SumTOTAL	Percent	Hits	Curr	Prev	Split/Scatter
1	71169	1.1508E - 10	0.3278	-25	312	307	-300.001
2	71169	1.1515E - 10	0.3280	-25	312	307	-301.001
3	71169	1.2165E - 10	0.3465	-25	312	307	-304.001
4	60497	3.4756E - 08	98.9907	-25	312	307	-307.001
5	1123	1.7475E - 12	0.0050	-25	312	307	-298.001
6	383	5.9433E - 13	0.0017	-25	312	307	-297.001
7	92	1.5815E - 13	0.0005	-25	312	307	-303.001
7	275603	3.5111E - 08					

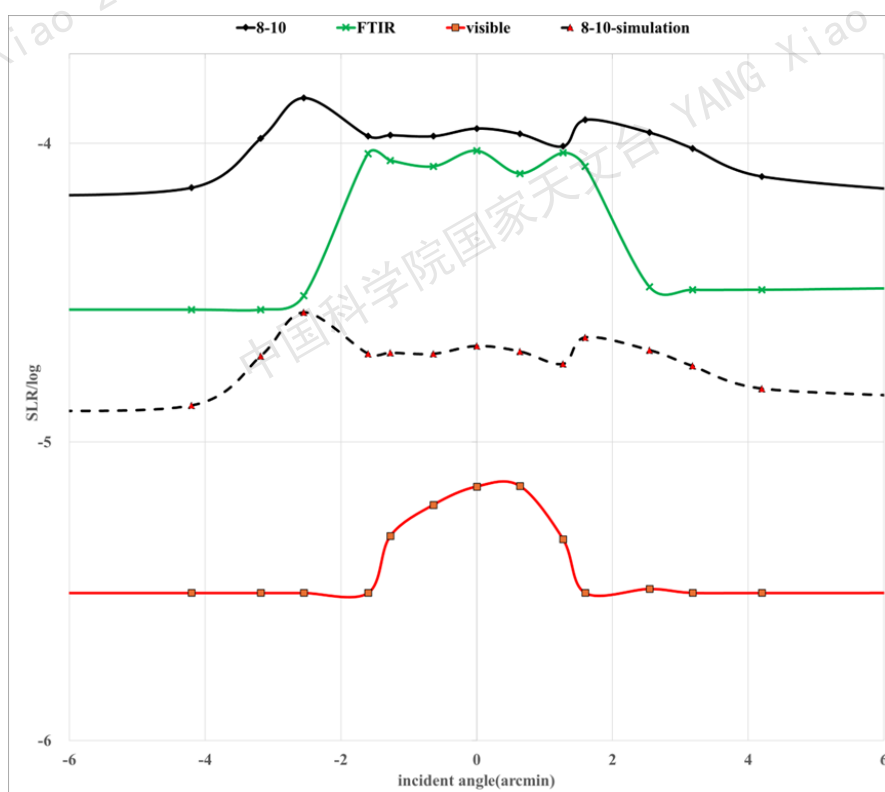


图 4-6 三个系统的 SLR 情况

Figure 4-6 SLR Situation of Three Systems

实线和红实线分别代表 8 - 10um 系统、FTIR 系统和可见光系统的 SLR 随光源入射角的变化。随着入射角的增大，SLR 值均趋于稳定。此外，三个系统在视场内外的平均 SLR 数据详见表4-7。

表 4-7 三个系统视场内外的平均 SLR

Table 4-7 Average SLR of Three Systems Inside and Outside the Field of View

	8-10 $\mu\text{m}$	FTIR	Visible system
视场内	$1.08 \times 10^{-4}$	$8.77 \times 10^{-5}$	$6.17 \times 10^{-6}$
视场外	$8.24 \times 10^{-5}$	$3.16 \times 10^{-5}$	$3.14 \times 10^{-6}$

通过对比，红外系统的杂散光水平相较可见光系统高出一个量级。经分析，这一差异可能归因于红外光学元件镀膜工艺的局限性。与可见光波段相比，红外波段光学镀膜在透过率、反射率等关键指标上难以达到同等工艺水平。为验证这一假设，我们将红外波段光学元件的膜系透过率、反射率等设定为和可见光波段一致，并重新进行系统仿真分析。结果显示，杂散光比降低了 0.7 个量级，如图4-6 中虚线所示，更接近于可见光系统的杂散光比。该结果充分证明，膜系性能对红外系统的非热杂散光抑制具有决定性作用，优化膜系设计将成为提升红外系统杂散光控制水平的关键方向。

另外，图中的四条曲线具有一个相同特性，即在视场边缘杂散光比明显下

降，这验证了系统视场光阑在隔绝外部杂散光方面的有效性。对比表4-7中的数据发现，AIMS 望远镜的非热辐射杂散光主要来源于望远镜光学及机械结构产生的内部杂散光。

#### 4.4 热辐射分析

热辐射是红外系统杂散光的主要来源。依据热辐射来源进行分类，内部热辐射即系统自身产生的辐射，外部热辐射为环境辐射。望远镜机械部件与光学元件自发热引发的内部热辐射直接作用于探测器，是红外系统杂散光分析的重点。

##### 4.4.1 外部热辐射分析

太阳为强光源，辐射能量显著高于环境辐射，如图4-7所示图中两个蓝线6000K 指代太阳辐射能量曲线，300K 为环境辐射能量曲线，300K 为环境辐射能量，因此，在外部热辐射分析中，太阳辐射能量成为研究的重点。不同温度下的太阳随波长的黑体辐射曲线如图所示。

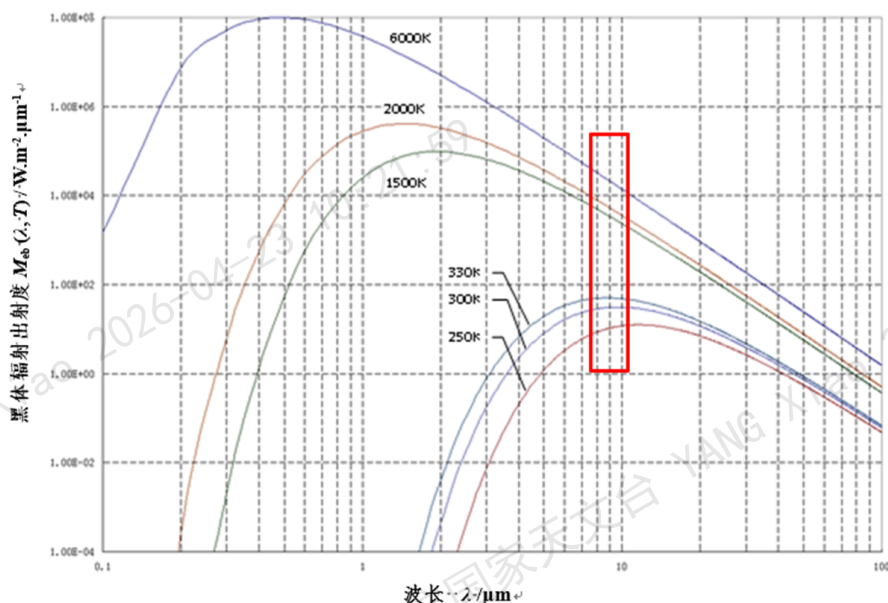


图 4-7 黑体辐射曲线

Figure 4-7 Blackbody Radiation Curve

依据普朗克黑体辐射公式，将太阳温度设定为 5778K 进行计算，结果显示：AIMS 望远镜 1m 主镜在 8–10  $\mu\text{m}$  波段接收到的太阳辐射功率为 0.95 W，在 12–12.5  $\mu\text{m}$  波段则为 0.00677 W。此外，外部热辐射的杂散光比 (SLR) 与入射角几乎无关。具体而言，8–10  $\mu\text{m}$  系统和 FTIR 系统的外部辐射 SLR 分别为  $7 \times 10^{-5}$  和  $3 \times 10^{-5}$ 。

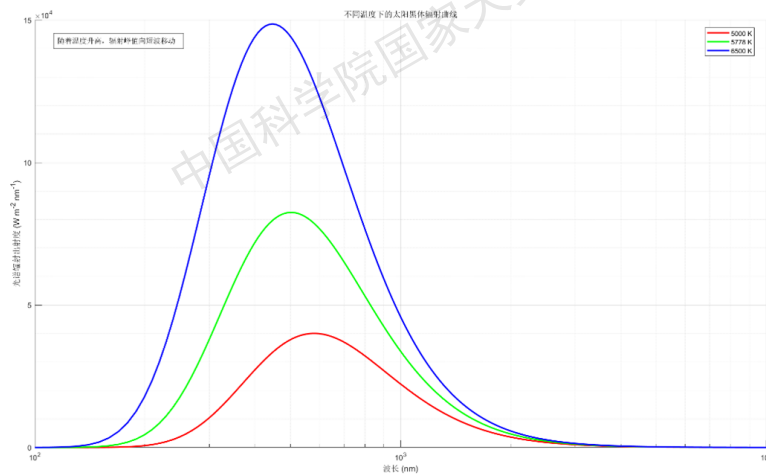


图 4-8 不同温度太阳的黑体辐射曲线

Figure 4-8 Blackbody radiation of the Sun at different temperatures

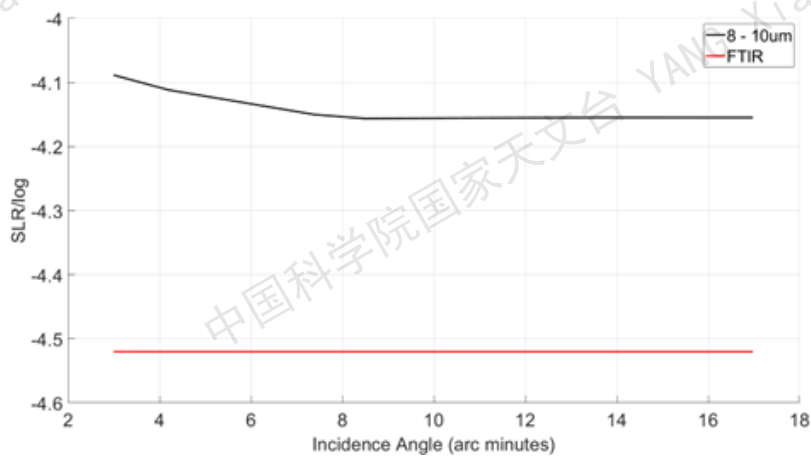


图 4-9 外部辐射的杂散光比

Figure 4-9 The SLR of external thermal radiation varies

#### 4.4.2 内部热辐射分析

内部热辐射主要源于望远镜机械部件（如镜框、平台）及光学元件的自发热现象。在实际分析中，对探测器产生显著影响的热辐射，通常由反向光线追迹所确定的关键表面贡献。

红外系统自身热辐射引起的杂散光具体的计算方法为：

1. 在探测器处定义一个拓展光源，光源的光通量为 1，从光源开始反向光线追迹获得关键表面。

2. 列出关键表面的光通量，因为光源光通量为 1，所以第  $i$  个表面上的光通量等于探测器上的光源所看到的每一个表面的投影立体角乘以光路透过率 ( $\Omega_i \tau_i$ )。

3. 使用 FBI 函数计算每个物体的热辐射。其对应黑体辐射的辐亮度等于

$$L = \frac{\sigma T^4}{\pi} (FBI(\lambda_{max}T) - FBI(\lambda_{min}T)) \quad (4-1)$$

其中， $\sigma$  为斯蒂芬 - 玻尔兹曼常数，值为  $5.67 \times 10^{-12} \text{Watts/cm}^2/\text{Kelvin}^4$ 。

FBI 全称是 Fractional Blackbody Irradiance。FBI( $\lambda_{max}T$ ) 表示当黑体温度为  $T$  时，在波长范围  $0 < \lambda < \lambda_{max}$  内黑体辐射度的占比。此函数中的参数为波长（单位： $\mu\text{m}$ ）和温度（单位：Kelvin）的乘积。

4. 计算探测器上关键表面的辐照度  $E_{sl}$

$$E_{sl} = \sum_i L_i \epsilon_i \Omega_i \tau_i \quad (4-2)$$

其中， $L_i$  和  $\epsilon_i$  分别为第  $i$  个表面在分析波段内的黑体辐射度和发射率。

由此方法获得的 8 - 10 $\mu\text{m}$  成像系统和 FTIR 系统关键表面产生的辐照度情况见 4-8和4-9。

表 4-8 8 - 10 $\mu\text{m}$  系统内部杂散光在探测器上产生的辐照度数据表

Table 4-8 Irradiance data table of internal stray light generated on the detector in the 8 - 10 $\mu\text{m}$  system

表面	温度	发射率	辐亮度	投影立体角	探测器辐照度
OSS.ARM.10 入瞳 (M1 光阑)	300	1	$1.94E - 05$	$7.23E - 07$	$1.40E - 11$
OSS.ARM.11 M2 镜架	300	1	$1.94E - 05$	$1.82E - 06$	$3.55E - 11$
OSS.ARM.13 M2 镜框	300	1	$1.94E - 05$	$1.46E - 05$	$2.84E - 10$
DOWN.JIEGOU.14 五镜结构面框架	300	1	$1.94E - 05$	$7.67E - 05$	$1.49E - 09$
DOWN.JIEGOU.15 五镜通光口	300	1	$1.94E - 05$	$1.89E - 04$	$3.67E - 09$
DOWN.JIEGOU.17 中间焦点前面五镜后结构面	300	1	$1.94E - 05$	$5.05E - 04$	$9.82E - 09$
DIZUO.KJ.1 库德房小平台侧边	300	1	$1.94E - 05$	$1.98E - 06$	$3.85E - 11$
DIZUO.KJ.2 库德房小平台上表面	300	1	$1.94E - 05$	$1.34E - 05$	$2.60E - 10$
DIZUO.KJ.4 库德房大平台上表面	300	1	$1.94E - 05$	$1.51E - 04$	$2.94E - 09$
DIZUO.KJ.9 M7 镜框	300	1	$1.94E - 05$	$3.18E - 03$	$6.19E - 08$
DIZUO.KJ.10 M8 镜架	300	1	$1.94E - 05$	$3.05E - 06$	$5.92E - 11$
DIZUO.KJ.11 M8 镜框	300	1	$1.94E - 05$	$7.79E - 03$	$1.51E - 07$
DIZUO.KJ.12 M9 镜架	300	1	$1.94E - 05$	$1.56E - 06$	$3.04E - 11$
DIZUO.NEAR.34 M11 镜框	300	1	$1.94E - 05$	$1.84E - 04$	$3.58E - 09$
DIZUO.NEAR.35 M10 镜架	300	1	$1.94E - 05$	$9.48E - 05$	$1.84E - 09$
OPTIC.M1	300	0.02	$3.89E - 07$	$7.30E - 05$	$2.84E - 11$
OPTIC.8 - 10.COLD STOP	100	1	$5.49E - 10$	$5.43E - 02$	$2.98E - 11$
OPTIC.8 - 10.L4	100	0.02	$1.10E - 11$	$5.45E - 03$	$5.99E - 14$
JIEGOU.6 8 - 10 内部镜筒前端	100	1	$5.49E - 10$	$1.06E - 03$	$5.79E - 13$
JIEGOU.8 8 - 10 内部镜筒	100	1	$5.49E - 10$	$9.84E - 04$	$5.41E - 13$
JIEGOU.10 8 - 10 内部镜筒后端	100	1	$5.49E - 10$	$6.80E - 02$	$3.74E - 11$
JIEGOU.11 滤光片的镜框	100	1	$5.49E - 10$	$3.90E - 02$	$2.14E - 11$
JIEGOU.12 滤光片筒	100	1	$5.49E - 10$	$6.53E - 02$	$3.59E - 11$
JIEGOU.13 探测器套筒壁	100	1	$5.49E - 10$	0.7118438	$3.91E - 10$

表 4-9 FTIR 系统对应的内部杂散光在探测器上产生的辐照度数据表

Table 4-9 Irradiance data table of corresponding internal stray light generated on the detector in the FTIR system

表面	温度	发射率	辐亮度	投影立体角	探测器辐照度
MOUNT.BASE.16 库德房墙	300	1	$3.49E-07$	$9.41E-06$	$3.29E-12$
OSS.ARM.13 M2 镜框	300	1	$3.49E-07$	$2.53E-07$	$8.82E-14$
DIZUO.KJ.1 库德房小平台侧边	300	1	$3.49E-07$	$9.41E-07$	$3.29E-13$
DIZUO.KJ.9 M7 镜框	300	1	$3.49E-07$	$1.37E-05$	$4.78E-12$
DIZUO.KJ.11 M8 镜框	300	1	$3.49E-07$	$1.72E-05$	$6.02E-12$
DIZUO.KJ.12 M9 镜架	300	1	$3.49E-07$	$2.38E-06$	$8.32E-13$
DIZUO.NEAR.2 M10 镜框	300	1	$3.49E-07$	$7.21E-07$	$2.52E-13$
DIZUO.NEAR.7 M10 镜架	300	1	$3.49E-07$	$4.70E-06$	$1.64E-12$
DIZUO.NEAR.34 M11 镜框	300	1	$3.49E-07$	$4.33E-06$	$1.51E-12$
DIZUO.NEAR.36 M11 镜架	300	1	$3.49E-07$	$2.35E-06$	$8.21E-13$
DIZUO.NEAR.40 FTIR 前置套筒	300	1	$3.49E-07$	$3.76E-06$	$1.31E-12$
DIZUO.NEAR.44 FTIR 前置套筒	300	1	$3.49E-07$	$5.65E-06$	$1.97E-12$
DIZUO.NEAR.42 FTIR 前置套筒	300	1	$3.49E-07$	$1.41E-05$	$4.93E-12$
DIZUO.NEAR.50 FTIR 前置套筒	300	1	$3.49E-07$	$8.09E-05$	$2.83E-11$
OPTIC.M1	300	0.02	$6.99E-09$	$1.49E-06$	$1.04E-14$
OPTIC.FTIR.STOP	62	1	$1.11E-13$	$6.21E-04$	$6.88E-17$
OPTIC.FTIR.L4.EDGE	80	1	$7.67E-12$	$4.32E-03$	$3.31E-14$
OPTIC.FTIR.TAOTONG	80	1	$7.67E-12$	0.6592293	$5.06E-12$
OPTIC.FTIR.FIELD STOP	80	1	$7.67E-12$	0.150164	$1.15E-12$

在 AIMS 模型中，将得到的关键表面设定为热辐射源带入计算，对比分析了 8 - 10 $\mu\text{m}$  成像系统和 FTIR 系统制冷前后的内部热辐射情况，如表 4-10) 所示。同时，对 8 - 10 $\mu\text{m}$  成像系统制冷前后的像面照度分布进行可视化分析。如图 4-10 所示，制冷前后像面照度分布形态发生变化，而且制冷后像面的能量较制冷前有了明显的降低，制冷前后图中的能量图标值相差两个两级。表4-10中的量化数据显示，8-10  $\mu\text{m}$  系统将光学组件冷却至 100 K 后，内部热辐射功率从  $6.43 \times 10^{-5} \text{ W}$  降至  $1.48 \times 10^{-7} \text{ W}$ ，SLR 降低 2.3 个数量级；FTIR 系统通过对成像镜 (80 K)、孔径光阑 (62 K)、视场光阑 (80 K) 的差异化冷却，内部热辐射功率从  $1.24 \times 10^{-8} \text{ W}$  降至  $6.26 \times 10^{-11} \text{ W}$ ，SLR 降低 2.5 个数量级。这些数据充分印证了制冷措施在抑制系统内部热辐射方面的显著成效。

表 4-10 8-10  $\mu\text{m}$  系统和 FTIR 系统制冷前后的杂散光比

Table 4-10 Stray - light ratio before and after cooling for 8 - 10  $\mu\text{m}$  system and FTIR system

	8 - 10 $\mu\text{m}$ 系统		FTIR 系统	
	未冷却	冷却	未冷却	冷却
内部热辐射	$6.43 \times 10^{-5} \text{ W}$	$1.48 \times 10^{-7} \text{ W}$	$1.24 \times 10^{-8} \text{ W}$	$6.26 \times 10^{-11} \text{ W}$
SLR	$9.84 \times 10^{-3}$	$2.27 \times 10^{-5}$	$1.02 \times 10^{-3}$	$5.17 \times 10^{-6}$

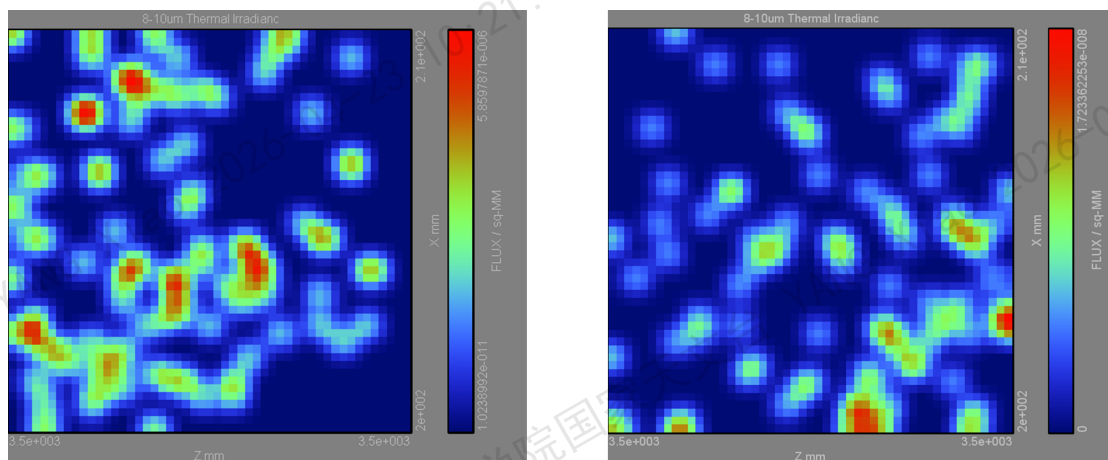


图 4-10 8-10 $\mu\text{m}$  成像系统制冷前后的像面照度分布图

Figure 4-10 Image - plane illuminance distribution before ( left ) and after ( right ) cooling for 8 - 10 $\mu\text{m}$  imaging system

在前期分析中，材料发射率采用理想化设定。为更贴近实际工况，进一步探究了材料发射率对系统自身热辐射的影响，相关结果如图 4-11 所示。从图中可知，系统自身热辐射的杂散光比与材料发射率呈正相关，即随着材料发射率降低，热辐射杂散光比相应下降。然而，在工程实践中，对于既定表面而言，材料发射率无法实现从 1 到 0 的理想降幅。实际可通过表面抛光处理或更换低发射率涂层等手段适度降低发射率，进而减少内部热辐射。需要注意的是，这些措施

会改变表面散射特性，可能导致系统非热辐射水平上升。

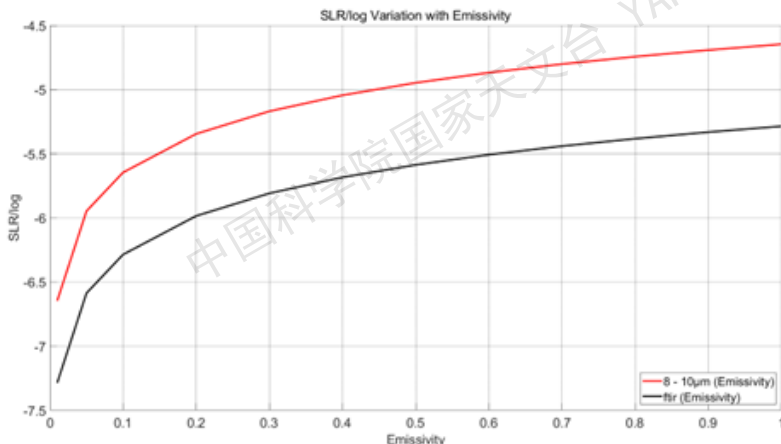


图 4-11 材料发射率变化的影响

Figure 4-11 Influence of material emissivity variation

除材料发射率外，环境温度变化同样可能对系统自身热辐射产生影响。环境温度变化与系统热辐射的 SLR 如图 4-12 所示，环境温度波动对系统自身热辐射的影响可忽略不计。AIMS 望远镜五镜消旋系统之后的组件均安装于温度恒定的库德房内，有效隔绝了外界温度扰动，确保系统结构温度的稳定性；同时，8-10 $\mu\text{m}$  系统与 FTIR 系统均配备制冷装置，进一步削弱了环境温度变化对系统热辐射的潜在影响。

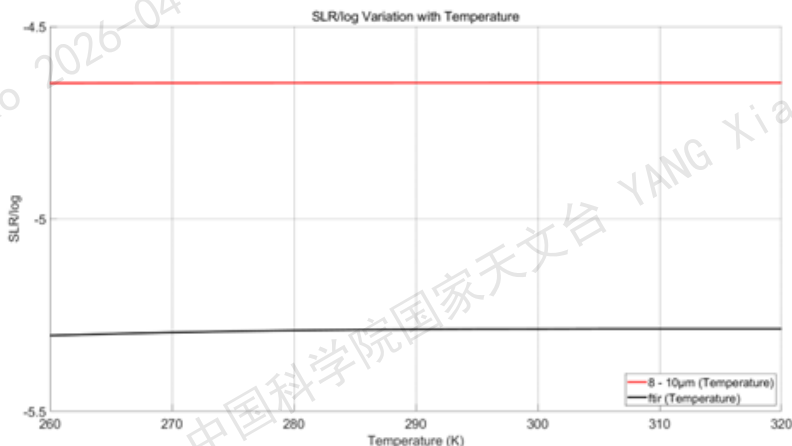


图 4-12 环境温度变化的影响

Figure 4-12 Influence of ambient temperature variation

#### 4.5 杂散光抑制讨论

综合非热辐射与热辐射的分析结果，可见光系统、8-10  $\mu\text{m}$  系统和 FTIR 系统的杂散光水平如表 4-11 所示。由表可知：可见光系统的杂散光主要来自望远

镜光学与机械结构产生的内部杂散光；而经冷却处理后的红外系统，杂散光的主要来源同样是内部杂散光，热辐射的影响较小。

表 4-11 AIMS 三个焦面系统的杂散光分布

Table 4-11 Stray - light distribution of three focal - plane systems in AIMS

	可见光系统	8 - 10 $\mu\text{m}$ 成像系统 (制冷)	FTIR 系统 (制冷)
非热辐射 - 视场内	$6.17 \times 10^{-6}$	$1.08 \times 10^{-4}$	$8.77 \times 10^{-5}$
非热辐射 - 视场外	$3.14 \times 10^{-6}$	$8.24 \times 10^{-5}$	$3.16 \times 10^{-5}$
非热辐射 - 总计	$9.31 \times 10^{-6}$	$1.90 \times 10^{-4}$	$1.19 \times 10^{-4}$
热辐射 - 外部	-	$7.00 \times 10^{-5}$	$3.00 \times 10^{-5}$
热辐射 - 内部	-	$2.27 \times 10^{-5}$	$5.17 \times 10^{-6}$
热辐射 - 总计	-	$9.27 \times 10^{-5}$	$3.52 \times 10^{-5}$
总计	$9.31 \times 10^{-6}$	$2.83 \times 10^{-4}$	$1.54 \times 10^{-4}$

对于 AIMS 望远镜而言，视场光阑的设计有效的减小了视场外杂散光的影响；红外仪器终端制冷以及冷光阑的设计有效降低了红外系统的自身热辐射；同时，消旋系统之后的光路以及仪器终端放置在相对恒温的库德房中，有效控制了环境温度的影响。根据 2.2.3 节的描述，AIMS 望远镜进一步降低杂散光影响可从以下三个方向展开：

(1) 降低元器件的 BRDF/BTDF：在红外波段，光学元件表面的亚微米级粗糙度会导致表面散射显著增加。4.3 节的分析发现，红外系统膜系工艺优化可使杂散光强度降低 80%。随着镀膜技术发展，可结合杂散光仿真结果，对关键光学表面选用高精度镀膜技术和新型低散射膜层材料，控制膜系的均匀性、散射和吸收系数等，以减小表面散射；针对视场边缘入射光，设计渐变折射率膜层，通过界面光学匹配降低散射；

(2) 减少杂散光源：红外系统的杂散光主要来源是自身热辐射，元器件的热辐射主要受温度、材料发射率等影响，红外系统的制冷已经有效降低了杂散光源，可通过调控材料发射率进一步减少杂散光的影响，结构材料表面改性，通过精密抛光工艺、阳极氧化处理、超材料涂层等方式降低材料发射率。需注意抛光过度可能导致反射增强，需通过边缘倒圆、微结构纹理设计（如 0.2mm 周期的矩形槽）等平衡散射与反射；在冷光阑边缘增加锯齿形消光结构，抑制边缘衍射杂散光；

(3) 降低  $GCF_{sc}$ ：改变杂散光的传播路径，对可见光系统而言，元器件直接安装在光学平台上，设计遮光箱体，箱体接缝处设计迷宫式密封结构，阻断环境光泄漏，降低外部杂散光对系统的影响。

#### 4.6 本章小结

本章围绕 AIMS 望远镜杂散光问题展开全面分析，明确了可见光与红外系统面临的杂散光来源，通过正向追迹和反向追迹识别重要表面，进行针对分析，提高了分析效率。非热辐射分析结果表明，当红外系统膜系工艺和可见光系统一致时，杂散光可以降低 80%。热辐射分析发现，8-10 系统经过制冷后，杂散光比常温状态低 2.3 个量级，FTIR 系统降低 2.5 个量级。AIMS 望远镜的离轴设计、光阑布局与冷却系统协同作用，有效抑制了杂散光，满足了成像与磁场观测的高精度需求，同时也为后续系统优化提供依据。

国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59  
中国科学院国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59  
国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59  
中国科学院国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59

## 第5章 AIMS 望远镜偏振分析器干涉条纹分析

AIMS 望远镜的核心目标之一是 MgI 12.32  $\mu\text{m}$  谱线的太阳磁场观测，偏振技术是实现太阳矢量磁场测量的必要手段。与常规成像测量不同，偏振测量本质上是一个调制和解调过程，一组完整的全偏振参数至少需要 4 次不同状态的观测图像，然后通过偏振解调才可获得。在此测量过程中，除了前面章节提到的杂散光以外，偏振调制和解调过程的杂散光也需要考虑。这类杂散光通常主要来自于多光束干涉引起的仪器偏振，而中红外波段的减反膜效率比可见 - 近红外波段差，更加剧了多光束干涉对偏振测量的影响。

从望远镜的偏振测量角度，偏振分析器是实现偏振调制的核心组件。AIMS 望远镜中，偏振分析器由波片和偏振片以及相关旋转机构组成。因此，本章节围绕偏振分析器开展干涉条纹对偏振测量的影响以及优化分析。

### 5.1 偏振分析器的干涉建模

#### 5.1.1 偏振光和光学元件的数学描述

偏振光是指光波的振动方向在一定时间范围内的运动轨迹。根据偏振光的振动方向，可以将其分为线偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光。偏振光可以通过斯托克斯 (Stokes) 参数来描述，这些参数能够描述部分偏振光的偏振态和偏振度。

斯托克斯参数  $I, Q, U, V$  是描述偏振光状态的四个参量，它们与偏振光的偏振度和偏振角有关。具体定义如下：

- $I$ : 总光强，表示光的总强度。
- $Q$ : 线偏振光在水平和垂直方向上的强度差。
- $U$ : 线偏振光在  $\pm 45^\circ$  方向上的强度差。
- $V$ : 圆偏振光的强度差，表示左旋和右旋圆偏振光的强度差。

斯托克斯参数之间的关系可以通过偏振度  $P$  来表示：

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (5-1)$$

其中， $P$  表示偏振度，其值在 0 到 1 之间，表示偏振光的偏振程度。当  $P = 0$  时，表示光为非偏振光；当  $P = 1$  时，表示为完全偏振光。

用 Stokes 参量描述的偏振光  $S = [I, Q, U, V]^T$  通过一个光学元件后变为  $S'$ ，此线性变化可以用一个  $4 \times 4$  的矩阵  $M$  来表示， $S' = MS$ ，这个转换矩阵  $M$  称为元件的 Mueller 矩阵，它描述了光学元件的偏振特性。

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

零方位的部分线偏振片  $\mathbf{P}$ :

$$\mathbf{M}_{\mathbf{P}} = \frac{\tau_p}{2} \begin{bmatrix} 1 & p & 0 & 0 \\ p & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{1-p^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{1-p^2} \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

其中,  $p$  为线偏振度,  $\tau_p$  为透射率。当  $p = 1$  时为完全直线偏振片。

零方位的位相延迟器  $\mathbf{WP}$ :

$$\mathbf{M}_{\mathbf{WP}} = \tau_{\mathbf{WP}} \begin{bmatrix} 1 & -\cos 2\Psi & 0 & 0 \\ -\cos 2\Psi & 1 & \sin 2\Psi \cos \delta & \sin 2\Psi \sin \delta \\ 0 & 0 & -\sin 2\Psi \sin \delta & \sin 2\Psi \cos \delta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

其中  $\Psi$  为二向色角,  $\delta$  为位相延迟。当  $\Psi = 45^\circ, \delta = 90^\circ$  为理想 1/4 波片; 当  $\Psi = 45^\circ, \delta = 180^\circ$  为理想 1/2 波片。

$\mathbf{R}(\theta)$  为旋转矩阵:

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & -\sin 2\theta & 0 \\ 0 & \sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-5)$$

任何元件以  $\theta$  旋转后得到的 Mueller 矩阵为

$$\mathbf{M}' = \mathbf{R}(\theta)\mathbf{M}\mathbf{R}(-\theta) \quad (5-6)$$

一般情况下, 偏振系统包括很多的光学元件。所以辐射光强通过偏振系统时 Stokes 参量的变化实际上是一系列线性变化。总的变化为按入射顺序的所有元件的 Mueller 矩阵的乘积, 描述为

$$\mathbf{M}_{\text{total}} = \mathbf{M}'_n \bullet \mathbf{M}'_{n-1} \bullet \dots \bullet \mathbf{M}'_2 \bullet \mathbf{M}'_1. \quad (5-7)$$

### 5.1.2 偏振分析器的调制类型选择

偏振分析器通常由偏振调制器和偏振片组成, 偏振调制器实现偏振参数  $Q$ 、 $U$  和  $V$  之间的交叉调制, 偏振片用于将  $Q$ 、 $U$ 、 $V$  调制到光强分量  $I$ , 两者组合实现  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  和  $V$  之间的调制, 实现全偏振测量。在偏振测量技术领域, 可见光波段和短波红外波段常用的调制类型有: 旋转波片调制、光弹性调制 (PEM)、磷酸二氢钾 (KD\*P) 调制、液晶可变延迟器 (LCVRs) 调制和铁电液晶延迟器 (FeLCs) 调制等 (Sharma et al., 2022; Hipps et al., 1979; Hou, 2014; Pust et al., 2006; Diner et al., 2007; Xu et al., 2011; Fineschi et al., 2005; Schou et al., 2012; Ichimoto et al., 2008)。相比之下, 中红外波段 (LWIR, 8 - 15  $\mu\text{m}$ ) 主要采用旋转波片调制

和光弹调制 (PEM) 两种方案, 其中光弹调制很少用于偏振成像调制 (Hou et al., 2020), AIMS 望远镜采用旋转波片调制方法, 其偏振分析器由旋转波片和偏振片组成。在中红外波段, 偏振器的干涉效应通常可以忽略不计, 因为其消光比远大于 10000 : 1。因此, 仅需考虑调制器的干涉效应。在中红外波段, 旋转波片调制通常包含一个或多个由相同双折射晶体——硒化镉 (CdSe) 构成的波片。

### 5.1.3 硒化镉波片的干涉模型

硒化镉波片是由具有双折射特性的单轴晶体构成, 在考虑其干涉效应时, 镀有增透膜 (AR coating) 的波片可等效为两侧折射率为  $n_0$  的晶体结构。如图 5-1 所示。

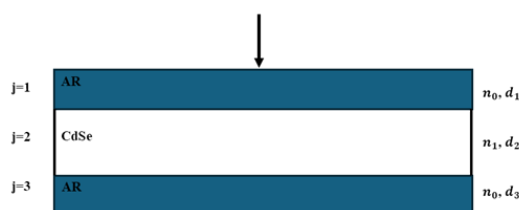


图 5-1 波片的简单几何模型

Figure 5-1 The simplified geometric model of a waveplate

根据薄膜光学和晶体光学理论, 在正入射情况下, 波片的偏振特性可以用特征矩阵  $\mathbf{C}$  来描述 (Macleod, 2018):

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\frac{i}{n_k} \sin \delta \\ -in_k \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (5-8)$$

其中,

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_k d \quad (k = o, e) \quad (5-9)$$

$\delta$  代表相位延迟,  $n_k$  是波片的折射率,  $\lambda$  为波长,  $n_o$ 、 $n_e$  分别是寻常光和非寻常光的折射率,  $d$  是波片厚度。

特征矩阵  $\mathbf{C}$  建立了波片上下界面电磁场之间的联系:

$$\begin{bmatrix} E_u \\ H_u \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} E_l \\ H_l \end{bmatrix} \quad (5-10)$$

通过麦克斯韦方程和边界条件,

$$\begin{aligned} E_u &= E_{in,i} + E_{in,r}, \\ H_u &= n_0(E_{in,i} - E_{in,r}), \\ E_l &= E_{out,t}, \\ H_l &= n_0 E_{out,t} \end{aligned} \quad (5-11)$$

进一步推导得出波片的透射比  $t_k$  :

$$t_k = \frac{E_{out}}{E_{ini}} = \frac{2n_0}{2n_0 \cos \delta + i \left( \frac{n_0^2}{n_k} + n_k \right) \sin \delta} \quad (k = o, e) \quad (5-12)$$

当波片光轴沿水平方向时, 其透射琼斯矩阵  $\mathbf{J}$  为:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} t_e & 0 \\ 0 & t_o \end{bmatrix} \quad (5-13)$$

波片的 Mueller 矩阵  $\mathbf{M}$  为:

$$\mathbf{M} = \mathbf{A}(\mathbf{J} \otimes \mathbf{J}^*)\mathbf{A}^{-1} \quad (5-14)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -i & i & 0 \\ 0 & i & i & 0 \end{bmatrix} \quad (5-15)$$

$\otimes$  是张量积,  $\mathbf{M}$  具体展开为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{t_e \cdot t_e^* + t_o \cdot t_o^*}{2} & \frac{t_e \cdot t_e^* - t_o \cdot t_o^*}{2} & 0 & 0 \\ \frac{t_e \cdot t_e^* - t_o \cdot t_o^*}{2} & \frac{t_e \cdot t_e^* + t_o \cdot t_o^*}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{t_e \cdot t_o^* + t_o \cdot t_e^*}{2} & i \cdot \frac{t_e \cdot t_o^* - t_o \cdot t_e^*}{2} \\ 0 & 0 & -i \cdot \frac{t_e \cdot t_o^* - t_o \cdot t_e^*}{2} & \frac{t_e \cdot t_o^* + t_o \cdot t_e^*}{2} \end{bmatrix} \quad (5-16)$$

#### 5.1.4 不同调制模式的调制和解调矩阵

考虑到加工工艺以及偏振测量效率等因素, 我们建立了以下四种偏振调制方案的模型 (如图 5-2 所示): (a) 1/4 波片 (QWP)、1/2 波片 (HWP) 和偏振片的组合; (b) 135° 波片 (135°WP) 和偏振片的组合 (Sweatt et al.); (c) 复合 1/4 波片和复合 1/2 波片和偏振片的组合; (d) 复合 135° 波片和偏振片的组合。图中 (a) 和 (b) 使用多级波片作为模型, 而 (c) 和 (d) 使用复合波片。每个模式的调制模式如表 5-1 和表 5-2 所示。

- 方案 (a): QWP、HWP 和偏振片组合

由 1/4 波片、1/2 波片和偏振片组成的偏振模型的总穆勒矩阵  $\mathbf{M}_{(c_1)}$  为

$$\mathbf{M}_{(c_1)}^m = \mathbf{M}_P \cdot \mathbf{R}(\theta_{\text{HWP}}^m) \mathbf{M}_{\text{HWP}} \mathbf{R}(-\theta_{\text{HWP}}^m) \cdot \mathbf{R}(\theta_{\text{QWP}}^m) \mathbf{M}_{\text{QWP}} \mathbf{R}(-\theta_{\text{QWP}}^m) \quad (5-17)$$

其中 1/4 波片和 1/2 波片的穆勒矩阵  $\mathbf{M}_{\text{QWP}}$  和  $\mathbf{M}_{\text{HWP}}$  可以通过公式 5-16 计算,  $m$  表示第  $m$  个调制态。

$$\mathbf{M}_P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5-18)$$

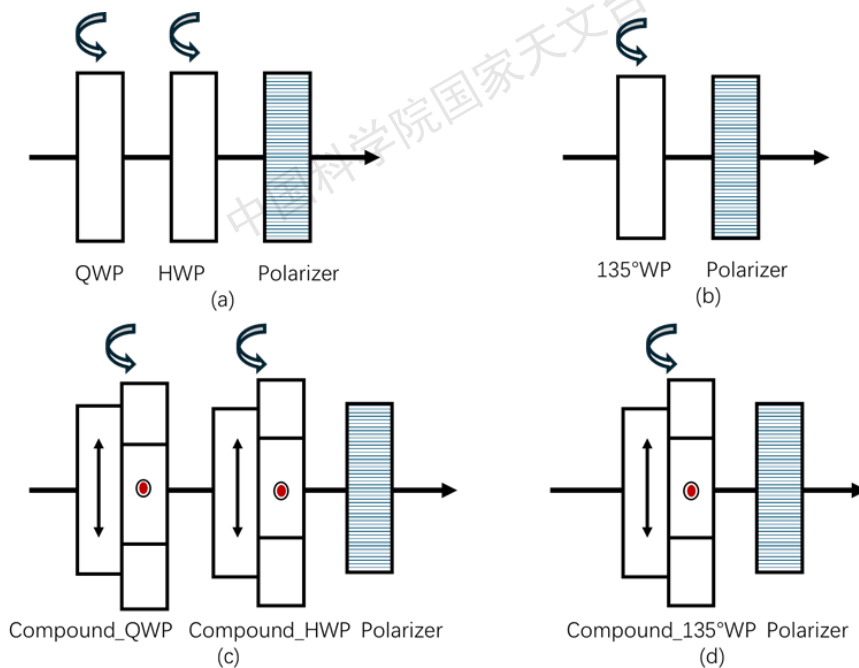


图 5-2 四种偏振调制方案模型

Figure 5-2 Models of Four Polarization Modulation Schemes

表 5-1 方案 (a) 和 (c) 的调制模式

Table 5-1 Modulation Modes of Schemes (a) and (c)

States	$\theta_{\text{QWP}}$	$\theta_{\text{HWP}}$	$\theta_{\text{P}}$	Modulated signal
1	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	$I + Q$
2	$0^\circ$	$45^\circ$	$0^\circ$	$I - Q$
3	$45^\circ$	$22.5^\circ$	$0^\circ$	$I + U$
4	$45^\circ$	$-22.5^\circ$	$0^\circ$	$I - U$
5	$0^\circ$	$22.5^\circ$	$0^\circ$	$I + V$
6	$0^\circ$	$-22.5^\circ$	$0^\circ$	$I - V$

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & -\sin 2\theta & 0 \\ 0 & \sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-19)$$

对于表 5-1 中列出的每个状态，调制矩阵  $\mathbf{M}_{\text{mod}_1}$  的对应行可从穆勒矩阵  $\mathbf{M}_{c_1}$  的第一行获得。

$$\mathbf{M}_{\text{mod}_1} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{c_1}^1(1:4) \\ \vdots \\ \mathbf{M}_{c_1}^6(1:4) \end{bmatrix} \quad (5-20)$$

该方案的解调矩阵为

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (5-21)$$

- 方案 (b): 135° WP 和偏振片组合

表 5-2 方案 (b) 和 (d) 的调制模式

Table 5-2 Modulation Modes of Schemes (b) and (d)

States	$\theta_{135^\circ}$	$\theta_p$	Modulated signal
1	0°	0°	$I + Q$
2	22.5°	0°	$I + U - V$
3	45°	0°	$I - Q - V$
4	67.5°	0°	$I - U - V$
5	90°	0°	$I + Q$
6	112.5°	0°	$I + U + V$
7	135°	0°	$I - Q + V$
8	157.5°	0°	$I - U + V$

方案 (b) 的偏振模型由一个波片和偏振片组成。波片的相位延迟为 135°，使得偏振参数  $Q$ 、 $U$  和  $V$  具有相同的偏振调制效率。该模型的总穆勒矩阵  $\mathbf{M}_{c_2}^m$  为

$$\mathbf{M}_{c_2}^m = \mathbf{M}_p \cdot \mathbf{R}(\theta_{135}^m) \mathbf{M}_{135} \mathbf{R}(-\theta_{135}^m) \quad (5-22)$$

波片以 22.5° 的步长逐步旋转完成一个调制周期，它的调制矩阵  $\mathbf{M}_{\text{mod}_2}$  为

$$\mathbf{M}_{\text{mod}_2} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{c_1}^1(1:4) \\ \vdots \\ \mathbf{M}_{c_1}^8(1:4) \end{bmatrix} \quad (5-23)$$

该方案的解调矩阵为

$$\mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-24)$$

• 方案 (c) 和方案 (d)

方案 (c) 和方案 (d) 具有与方案 (a) 和 (b) 相似的调制矩阵与解调矩阵。他们之间的区别是将波片由原来的多级波片替换为复合波片，复合波片的穆勒矩阵  $M_{\text{HWP}_c}$  为

$$\mathbf{M}_{\text{QWP}_c} = \mathbf{R}(90^\circ)\mathbf{M}_{\text{QWP}_1}\mathbf{R}(-90^\circ)\mathbf{M}_{\text{QWP}_2} \quad (5-25)$$

$M_{\text{QWP}_1}$  和  $M_{\text{QWP}_2}$  分别表示复合 1/4 波片中两个波片的穆勒矩阵，复合 1/2 波片和 135° 波片的表示方法和复合 1/4 波片的方法相同。

$$\mathbf{M}_{\text{HWP}_c} = \mathbf{R}(90^\circ)\mathbf{M}_{\text{HWP}_1}\mathbf{R}(-90^\circ)\mathbf{M}_{\text{HWP}_2} \quad (5-26)$$

$$\mathbf{M}_{135^\circ_c} = \mathbf{R}(90^\circ)\mathbf{M}_{135^\circ_1}\mathbf{R}(-90^\circ)\mathbf{M}_{135^\circ_2} \quad (5-27)$$

### 5.1.5 偏振分析器的偏振模型

根据偏振辐射理论，目标发出的任意辐射光束均可由斯托克斯矢量描述。

$$\mathbf{S}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} I & Q & U & V \end{bmatrix}^T \quad (5-28)$$

而实际观测得到的是不同调制模式下的光强：

$$\mathbf{I}_{\text{meas}} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{mod}}\mathbf{S}_{\text{in}} \quad (5-29)$$

利用解调矩阵  $\mathbf{D}$  可提取斯托克斯分量，即

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{I}_{\text{meas}} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{M}_{\text{mod}} \cdot \mathbf{S}_{\text{in}} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{S}_{\text{in}} \quad (5-30)$$

其中，

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} - & - & - & - \\ I \rightarrow Q & Q \rightarrow Q & Q \rightarrow Q & Q \rightarrow Q \\ I \rightarrow U & Q \rightarrow U & U \rightarrow U & V \rightarrow U \\ I \rightarrow V & Q \rightarrow V & U \rightarrow V & V \rightarrow V \end{bmatrix} \quad (5-31)$$

$X$  为偏振响应矩阵，反应了入射与测量斯托克斯矢量之间的关系。由于偏振信号相较于光强通常极为微弱，实际测量中， $Q$ 、 $U$ 、 $V$  分量对光强  $I$  的串扰可近似忽略（即矩阵  $X$  的第一行），重点关注矩阵  $X$  的后三行。其中，矩阵  $X$  的第一列为光强  $I$  对  $Q$ 、 $U$ 、 $V$  分量的串扰，即仪器偏振；后三列反映  $Q$ 、 $U$ 、 $V$  分量之间的串扰，称为偏振串扰。矩阵对角线元素 ( $Q \rightarrow Q$ 、 $U \rightarrow U$ 、 $V \rightarrow V$ ) 的绝对值表示偏振效率，即偏振调制器根据特定调制模式改变光偏振态的有效性 (Ichimoto et al., 2008)。通过系统性分析偏振响应矩阵  $X$ ，能够精准评估偏振分析器的性能，为优化偏振测量模式提供关键依据。

## 5.2 偏振干涉条纹仿真分析和抑制

### 5.2.1 参数设置

偏振分析器核心组件包括偏振片和波片，偏振片为硅基底中红外线栅偏振片，具体参数如表5-3和图 5-3 所示。

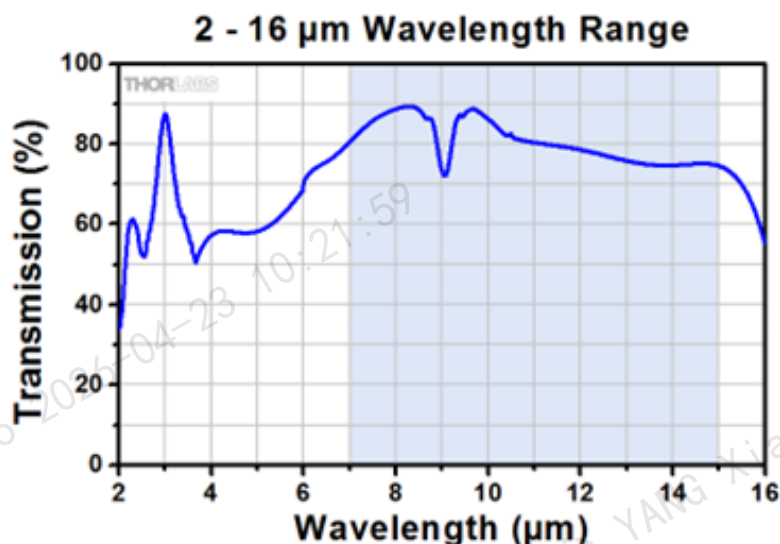


图 5-3 硅基底中红外线栅偏振片透过率曲线

Figure 5-3 Transmittance curve of infrared wire grid polarizer on silicon substrate

表 5-3 硅基底中红外线栅偏振片参数信息

Table 5-3 Parameter information of infrared wire grid polarizer on silicon substrate

Features	Benefits
Nanowire Technology	Brightness and contrast uniformity > 20° half angle without performance loss Wavelength and AOI independent Broadband
Inorganic	High reliability High heat resistance
<b>Substrate Specifications</b>	
Type: Silicon	
Thickness: 0.675 mm ± 0.095 mm	
Index of Refraction: 3.421 at 10.33 μm 3.427 at 4.132 μm	
Thermal Expansion: $2.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	
<b>General Specifications</b>	
AR Coating: Custom engineered for mid-wave or long-wave IR	
Dimensional Tolerance: ±0.4 mm	
Edge Exclusion: 2 mm	
Transmission Axis (TA): Referenced to long side	
TA Tolerance: ±2°	
Angle of Incidence: 0° ± 20°	
Maximum Temperature: 200°C > 5,000 hours	
Part Shape: Square or rectangle	
RoHS: Compliant	

线栅偏振片表面镀有增透膜，具备显著的偏振选择性，可实现一个偏振态透射，另一个反射，在 7 - 15  $\mu\text{m}$  波段消光比高达 10000:1 以上，基于此优异性能，在分析过程中可将其作理想化处理。波片采用 CdSe 晶体材料，在 12  $\mu\text{m}$  波长下，其寻常光折射率  $n_o = 2.42$ ，非常光折射率  $n_e = 2.4373$ ，双折射率  $\Delta n$  达 0.0173。考虑到实际加工工艺限制，建模时选用更符合工程应用的三级波片，具体参数设置详见表 5-4。

表 5-4 旋转波片的仿真参数

Table 5-4 Simulation parameters of rotating waveplates

元件	参数	数值
四分之一波片 (QWP)	相位延迟	1170°
	厚度	2.3144mm
	级数	3
复合四分之一波片 (Compound QWP)	相位延迟	90°
	厚度	2.1364mm、 2.3144mm
	级数	0
半波片 (HWP)	相位延迟	1260°
	厚度	2.4924mm
	级数	3
复合半波片 (Compound HWP)	相位延迟	180°
	厚度	2.1364mm、 2.4924mm
	级数	0
135° 波片 (135°WP)	相位延迟	1215°
	厚度	2.4035mm
	级数	3
复合 135° 波片 (Compound 135°WP)	相位延迟	135°
	厚度	2.1364mm、 2.4035mm
	级数	0
增透膜 (AR Coating)	折射率	2

### 5.2.2 波片的干涉条纹仿真

基于前文所述的参数设定进行建模，获得波片随波长的穆勒矩阵变化如图 5-4-图5-5 所示。图 5-4 中展示了 1/4 波片、1/2 波片、135° 波片的穆勒矩阵随波数的变化，图5-5则展示的复合波片的情况。对比可以发现，多级波片和复合波片

具有类似的变化趋势，1/4 波片、1/2 波片和 135° 波片具有相同的振荡周期，约一个波数，但这三者的二向色性存在差异。在这三种多级波片中，1/2 波片的二向色性最小，约为 0.1%；1/4 波片的二向色性最大，约为 2%。

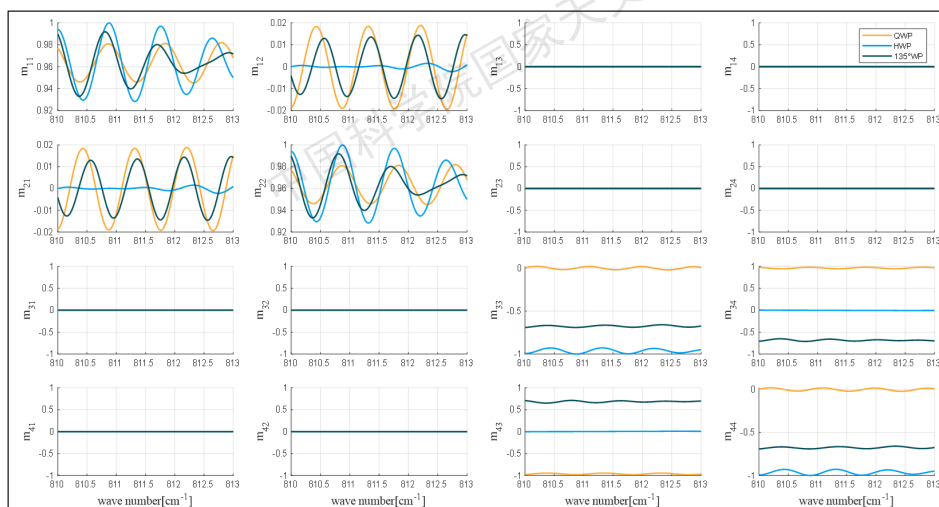


图 5-4 多级波片的 Mueller 矩阵

Figure 5-4 The Mueller matrices of Multi - order Waveplates

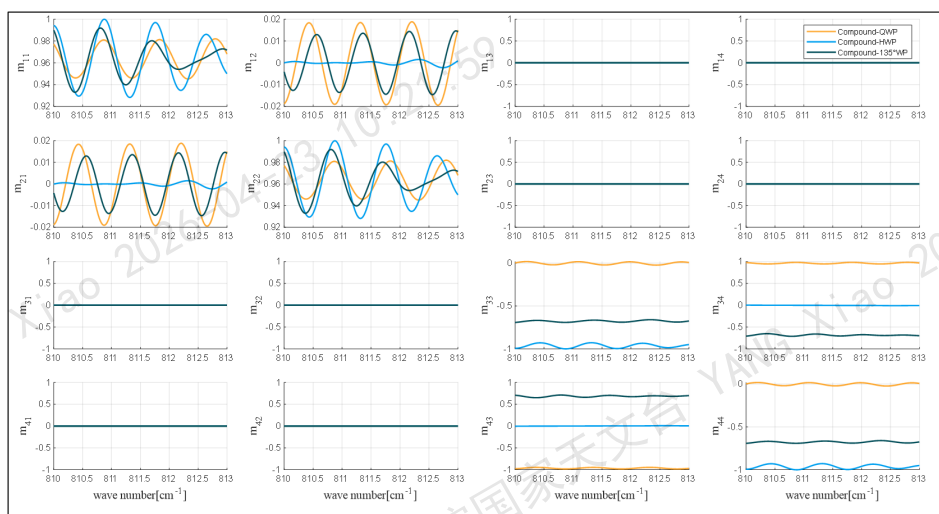


图 5-5 复合波片的 Mueller 矩阵

Figure 5-5 The Mueller matrices of compound Waveplates

### 5.2.3 偏振分析器的干涉条纹仿真

为精准评估偏振分析器的性能，基于不同调制模式构建了四种偏振调制方案模型。通过对各模型的深入分析，获取了对应的偏振响应矩阵  $X$ ，并系统研究其随波数的变化特性。四种方案下偏振响应矩阵  $X$  的变化趋势如图 5-6 所示。

从图 5-6 中可以看出，方案 (b) 和 (d) 的变化趋势几乎相同，二者均未引入仪器偏振，仅存在  $U \rightarrow V$  的偏振串扰，串扰值在  $\pm 0.02$  范围内，但是这两种

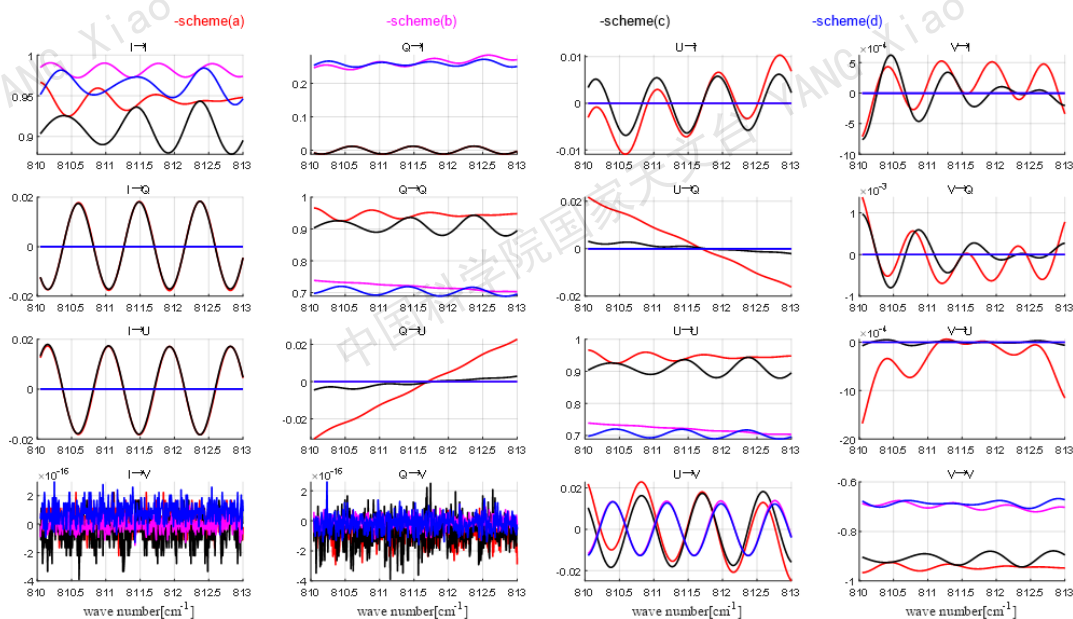


图 5-6 四种模式的响应矩阵 X 随波数的变化

Figure 5-6 The response matrix X for four schemes varies with the wavenumber.

方案的偏振调制效率仅 0.7 左右。方案 (a) 引入  $I \rightarrow Q$  和  $U$  的仪器偏振, 约 0.02, 振荡周期约一个波数, 偏振串扰同样保持在  $\pm 0.02$  区间, 而偏振调制效率达到 0.95。方案 (c) 与方案 (a) 的变化趋势相似, 区别在于其不存在  $Q$  与  $U$  之间的偏振串扰。四种方案的仪器偏振、偏振串扰和偏振调制效率的具体数据见表 5-5。

表 5-5 不同方案的仪器偏振、偏振串扰和偏振调制效率

Table 5-5 Polarization efficiency, instrumental polarization, and polarization crosstalk of different schemes

方案	偏振效率	仪器偏振	偏振串扰
(a): QWP+HWP+ Polarizer	0.95	$I \rightarrow Q$ and $U: \pm 0.02$ $I \rightarrow V: \pm 2 \times 10^{-16}$	$Q \rightarrow U: \pm 0.02$ $U \rightarrow Q$ and $V: \pm 0.02$
(b): $135^\circ$ WP+ Polarizer	0.71	$I \rightarrow Q, U,$ and $V: \pm 1 \times 10^{-16}$	$U \rightarrow V: \pm 0.02$
(c): Compound QWP + Compound HWP + Polarizer	0.92	$I \rightarrow Q$ and $U: \pm 0.02$ $I \rightarrow V: \pm 1 \times 10^{-16}$	$U \rightarrow V: \pm 0.02$
(d): Compound $135^\circ$ WP + Polarizer	0.69	$I \rightarrow Q, U,$ and $V:$ $0-2 \times 10^{-16}$	$U \rightarrow V: \pm 0.015$

对比分析发现, 由多阶波片与复合波片构建的偏振分析器, 在仪器偏振、偏振串扰及偏振效率方面表现相近。鉴于红外波段波片制造工艺复杂、装调难度大且成本高昂的特点, 优先选择采用多阶波片组成的系统, 如方案 (a) 和 (b)。进一步对比可知, 方案 (b) 虽避免了仪器偏振, 但需进行 8 次测量, 且 0.71 的偏振效率显著降低系统信噪比; 而方案 (a) 仅需 6 次测量, 同时具备高达 0.95

的偏振效率，更契合实际偏振测量需求。尽管如此，方案（a）中存在的仪器偏振问题仍需重点关注与优化。

#### 5.2.4 偏振干涉条纹抑制

针对方案（a）在  $Q$  和  $U$  信号测量中存在仪器偏振的问题，通过对比多级波片与复合波片的穆勒矩阵发现， $1/2$  波片产生的二向色性仅约 0.1%，显著低于  $1/4$  波片的 2%，这表明采用  $1/2$  波片测量  $Q$  和  $U$  信号或可有效降低仪器偏振。由此，我们提出仪器偏振与偏振效率联合优化策略，旨在实现  $Q$  和  $U$  信号测量的最优偏振调制效果。具体方案为， $Q$  和  $U$  信号分别通过独立的  $1/2$  波片或  $1/4$  波片获取。使用  $1/2$  波片测量  $Q$  信号的过程如下：

该方案的总穆勒矩阵  $\mathbf{M}_{c_3}^m$  为

$$\mathbf{M}_{c_3}^m = \mathbf{M}_p \cdot \mathbf{R}(\theta_{\text{HWP}}^m) \mathbf{M}_{\text{HWP}} \mathbf{R}(-\theta_{\text{HWP}}^m) \quad (5-32)$$

理论上， $Q$  信号可以通过  $1/2$  波片不同旋转角度调制，调制矩阵  $\mathbf{M}_{\text{mod}_3}$  为

$$\mathbf{M}_{\text{mod}_3} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{c_3}^1(1:4) \\ \mathbf{M}_{c_3}^2(1:4) \end{bmatrix} \quad (5-33)$$

其中半波片的旋转角度分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ 。该方案的解调矩阵为

$$\mathbf{D}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5-34)$$

基于公式 5-30，该方案的响应矩阵  $\mathbf{X}_3$  为

$$\mathbf{X}_3 = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} \end{bmatrix} \quad (5-35)$$

优化过程聚焦于两个核心目标：仪器偏振  $X_{11}$  和偏振效率  $X_{12}$ 。要求在最大化偏振效率  $X_{12}$  的同时，仪器偏振  $X_{11}$  小于  $10^{-3}$ 。 $U$  信号的测量采用类似方法。

通过系统研究旋转  $1/2$  波片或  $1/4$  波片对  $Q$  和  $U$  信号测量的影响发现（见图 5-7-图 5-8）， $1/2$  波片产生的仪器偏振较  $1/4$  波片低一个数量级，且具备更高的偏振效率，具体情况见表 5-7。当  $1/2$  波片旋转至  $0^\circ$  和  $45^\circ$  时， $Q$  信号偏振效率可达 0.98，仪器偏振仅为  $3.8 \times 10^{-4}$ ；而  $U$  信号测量的最优旋转角度为  $\pm 22.5^\circ$ ，此时偏振效率同样达到 0.98，仪器偏振近乎可忽略不计。基于上述优化结果，创新性提出方案（e）：调制模式见表 5-6。在测量  $Q$  和  $U$  信号时不使用  $1/4$  波片，仅在测量  $V$  时将其插入光路。

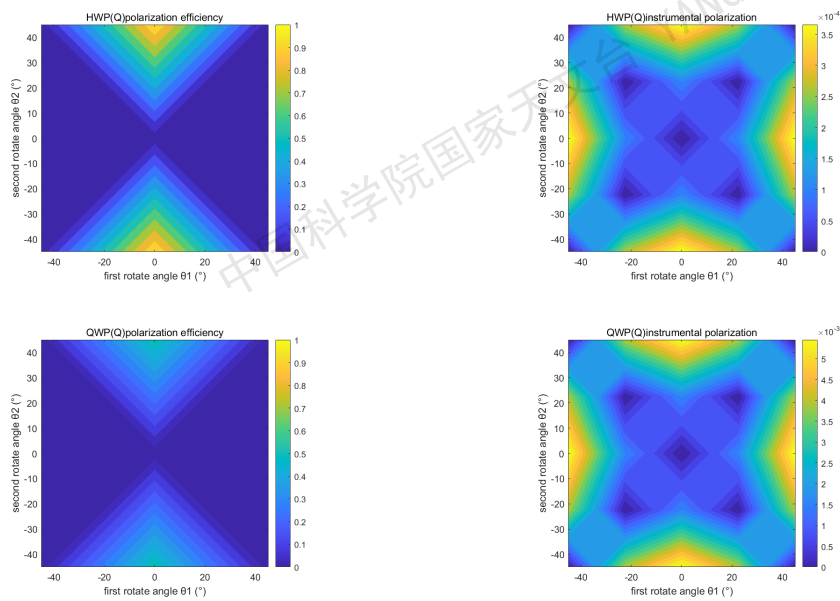


图 5-7 Q 信号测量仪器偏振与偏振效率随波片旋转角度的变化

Figure 5-7 The variation of instrument polarization and polarization efficiency with waveplate rotation angle for Q - signal measurement

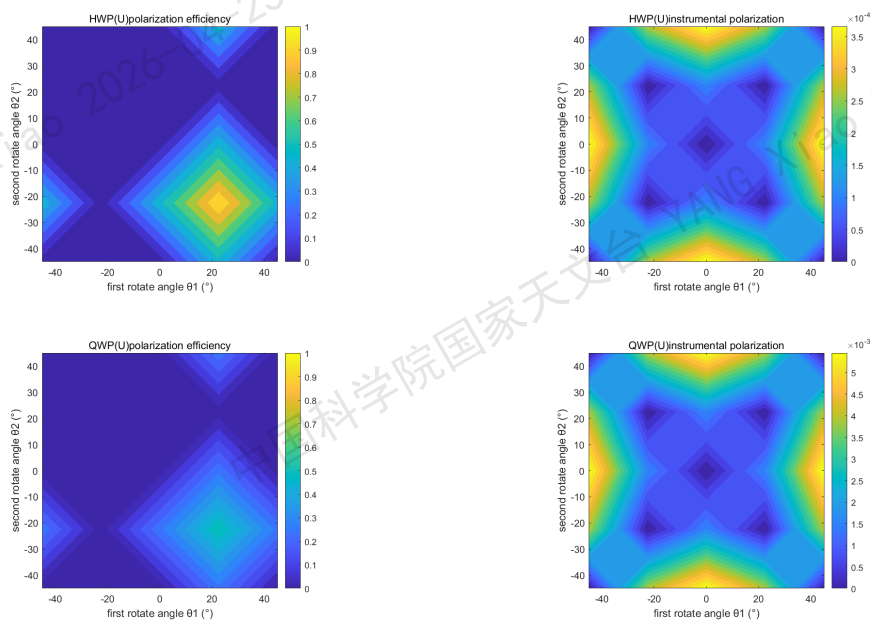


图 5-8 U 信号测量仪器偏振与偏振效率随波片旋转角度的变化

Figure 5-8 The variation of instrument polarization and polarization efficiency with waveplate rotation angle for Q - signal measurement

表 5-6 方案 e 的调制模式

Table 5-6 Modulation modes of scheme (e)

States	$\theta_{\text{QWP}}$	$\theta_{\text{HWP}}$	$\theta_{\text{P}}$	Modulated signal
1	-	0°	0°	I + Q
2	-	45°	0°	I - Q
3	-	22.5°	0°	I + U
4	-	-22.5°	0°	I - U
5	0°	22.5°	0°	I + V
6	0°	-22.5°	0°	I - V

表 5-7 仪器偏振与偏振效率随波片旋转角度的变化

Table 5-7 Variation of Instrument Polarization and Polarization Efficiency with Waveplate Rotation Angle

测量模式		HWP	QWP
Q 信 号	旋转角度	0°, 45°	0°, 45°
	偏振效率	0.98	0.53
	强度串扰	0.0004	0.0057
U 信 号	旋转角度	±22.5°	±22.5°
	偏振效率	0.98	0.53
	强度串扰	0	0

方案 (a) 和 (e) 响应矩阵  $X$  随波数的变化如图 5-9 所示, 对比可见, 经优化后得到的方案 (e) 的偏振效率显著高于方案 (a), 同时, 方案 (e) 的仪器偏振控制在 0.001 以下, 偏振串扰维持在约 0.02 的可接受水平, 有效平衡了测量精度与系统稳定性。

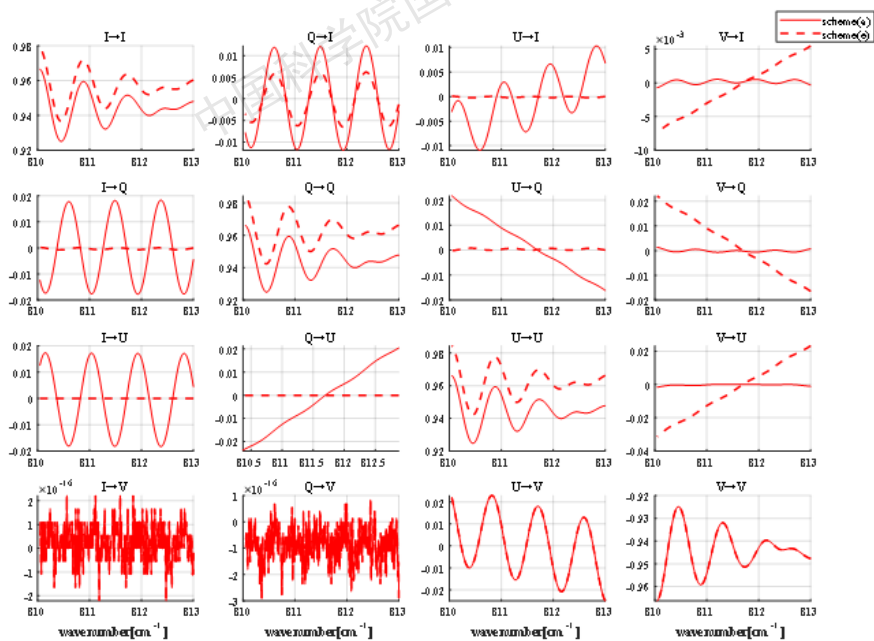


图 5-9 方案 (a) 和方案 (e) 的响应矩阵  $X$  随波数的变化

Figure 5-9 The response matrix  $X$  for schemes (a) and (e) varies with wavenumber

### 5.3 观测试验

2023 年在 AIMS 望远镜上开展了观测试验, 进一步验证优化前后偏振分析器的性能。AIMS 望远镜的偏振分析器部署于傅里叶光谱仪前端的准直光路中 (见图 5-10), 通光口径达 36mm。该偏振分析器通过两个 PI 空心电机驱动两个波片实现  $360^\circ$  自由快速旋转, 确保对光偏振态的精确调控, 其详细结构设计如图 5-11 所示。其中,  $1/4$  波片厚度为 2.314mm, 相位延迟达  $1170^\circ$ ;  $1/2$  波片厚度为 2.492mm, 延迟量为  $1260^\circ$ 。此外, 两片波片均镀制增透膜, 其膜系反射率特性如图 5-12 所示。

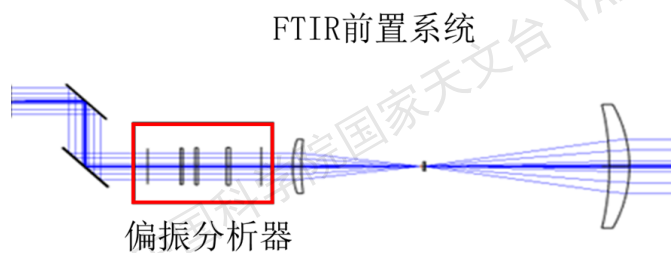


图 5-10 偏振分析器位置分布图

Figure 5-10 Distribution diagram of the polarization analyzer position

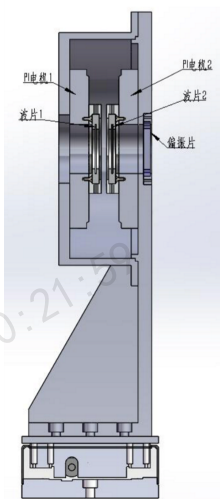


图 5-11 偏振分析器结构图

Figure 5-11 Structural diagram of the polarization analyzer

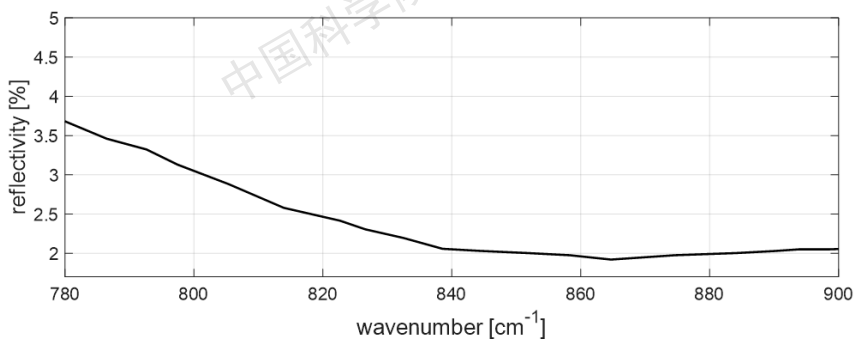


图 5-12 膜系反射率图

Figure 5-12 Reflectance diagram of the coating system

基于该偏振分析器,首先对方案(a)展开实测验证,如图5-13所示。依据该方案的调制模式,获得不同的偏振态。AIMS望远镜采用方案(a)对太阳黑子进行观测,所得偏振谱线如图5-14所示。其中,红色框选区域为太阳黑子在 $12.32\ \mu\text{m}$ 处的塞曼分裂谱线,横轴表征波数变化,纵轴对应探测器不同像元响应。观测结果显示,受仪器偏振影响,方案(a)下的 $Q$ 和 $U$ 信号中出现明显干涉条纹,这些条纹严重干扰光谱信息,甚至导致部分谱线特征被掩盖,极大影响了测量数据的准确性与有效性。



图 5-13 方案 (a) 的测试实物图

Figure 5-13 Physical test diagram of scheme (a)

方案(e)在 $V$ 信号测量上装置和(a)的相同,如图5-15左图所示。在 $Q$ 和 $U$ 信号测量时,装置和(a)装置有所不同,测量系统仅有HWP在光路中,如图5-15右图所示。

方案(e)测量得到的太阳黑子的 $Q$ 和 $U$ 信号如图5-16所示。与方案(a)的测量结果相比,方案(e)所得到的信号中干涉条纹显著减少,原本较为明显的粗条纹几乎消失不见,信号质量得到了极大提升。为进一步对比方案(a)与方案(e)的测量效果,将两个方案所得到的光谱数据沿像元方向求取强度平均值,最终得到的结果如图5-17所示。从沿像元方向取强度平均值的结果来看,方案(a)呈现出较为明显的条纹特征,其条纹周期约为一个波数,振荡频率约达0.02,这对光谱数据的准确性产生了较大干扰。而方案(e)的振荡频率显著降低,约为0.002,该振荡信号几乎被淹没在噪声信号之中,表明其受干扰程度大幅下降。

观测结果与前期仿真分析高度契合,有力地验证了偏振分析模型的有效性与可靠性。同时也充分说明,经过优化的调制方案(e)在降低仪器偏振方面成

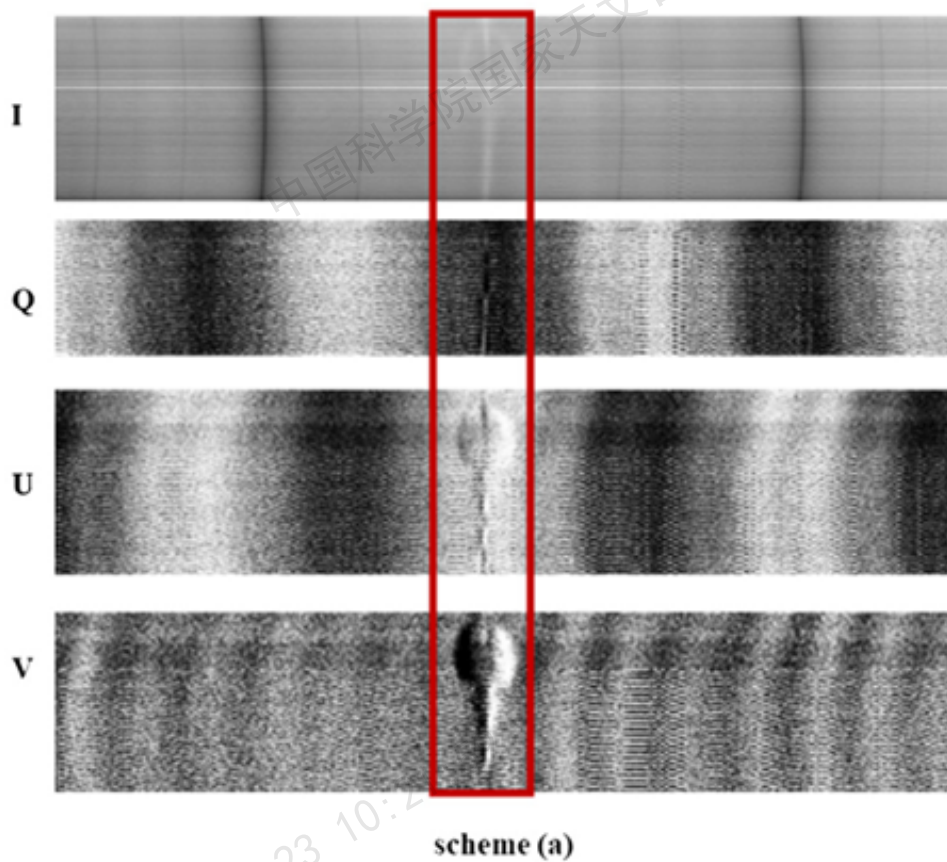


图 5-14 方案 (a) 太阳黑子的偏振谱线

Figure 5-14 Polarization spectrum lines of sunspots in scheme (a)



图 5-15 方案 (e) 测试实物图 (左图为 V 信号测量, 右图为 Q 和 U 信号测量)

Figure 5-15 Physical test diagram of scheme (e) (Left: V signal measurement, Right: Q and U signal measurement)

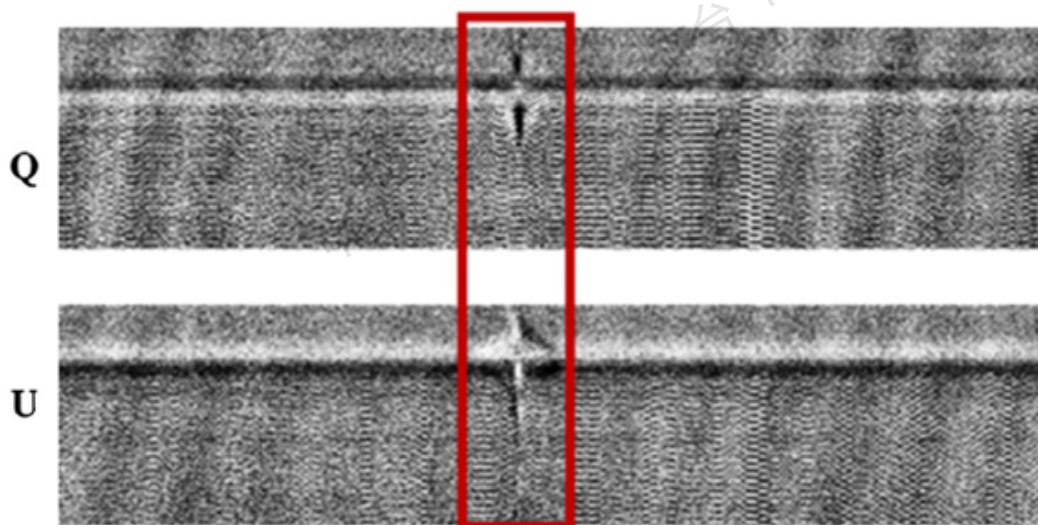


图 5-16 方案 (e) 太阳黑子的偏振谱线

Figure 5-16 Polarization spectrum lines of sunspots in scheme (e)

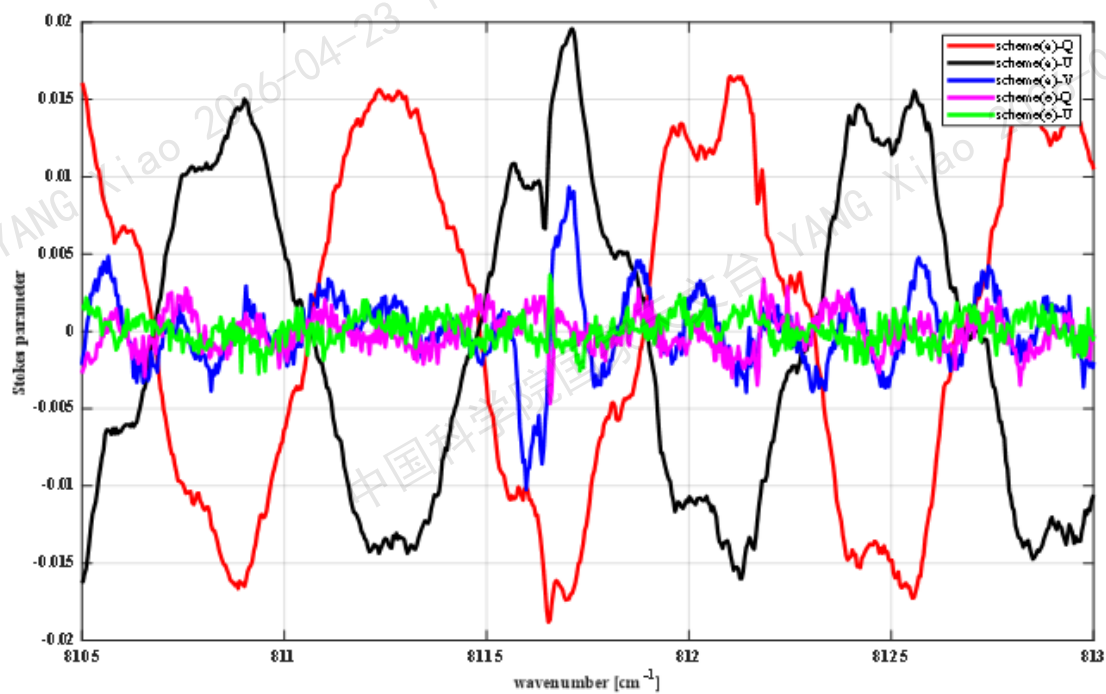


图 5-17 Q、U、V 的信号强度随波数变化图

Figure 5-17 Variation diagram of signal intensities of Q, U, and V with wavenumber

效显著，相较于方案 (a)，能够更有效地减少干涉条纹对信号的影响，提升测量数据的质量和准确性，为后续基于 AIMS 望远镜的观测与研究提供了更优的技术方案。

针对优化后的方案 (e)，设计了一款新的结构，具体如图 5-18 所示。在该结构里， $1/2$  波片依旧由原有的 PI 电机进行控制，以保证其精准的旋转操作。而  $1/4$  波片则被安装在一款电动滤光片翻转架上，此翻转架选用的是 THORLABS 的 MFF102/M 型号，在图中呈现为黑色结构。在实际安装过程中，仅在其中一个镜框内安装  $1/4$  波片，另一个镜框则保持空置。在对  $Q$  和  $U$  信号进行测量时，会确保  $1/4$  波片处于光路之外，避免其对信号产生不必要的影响；而在测量  $V$  信号时，通过切换翻转架，能够将  $1/4$  波片切入光路之中，以满足不同信号测量的需求。目前，这一结构设计方案已顺利完成，后续将正式应用于 AIMS 望远镜中，有望进一步提升望远镜的偏振测量性能和数据质量。

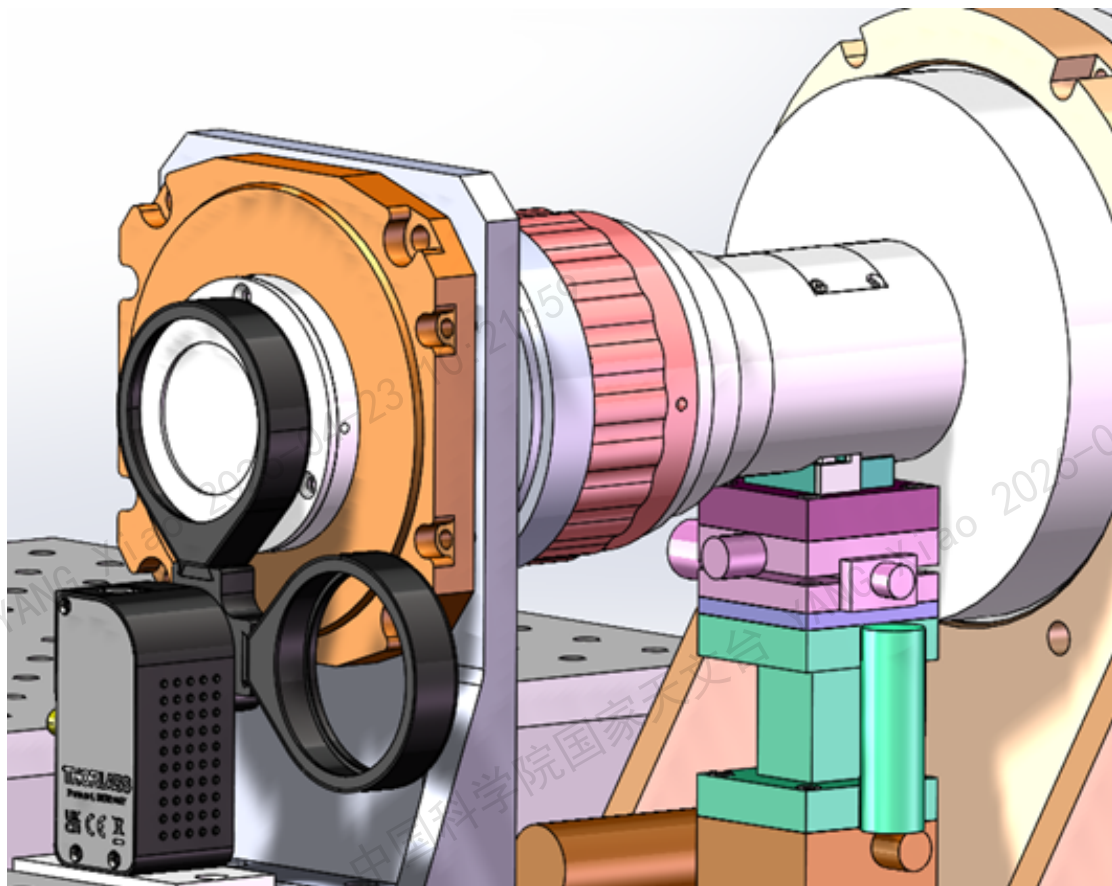


图 5-18 方案 (e) 结构设计图

Figure 5-18 Structural design diagram of scheme (e)

#### 5.4 本章小结

本章针对 AIMS 望远镜偏振分析器干涉条纹问题，以实现  $\text{MgI } 12.32 \mu\text{m}$  谱线太阳磁场观测为目的，基于偏振光学和薄膜光学理论构建数学模型，选用旋

转波片调制方案，建立了四种偏振调制模型。分析各方案的偏振响应矩阵  $X$  后，发现部分方案存在仪器偏振、偏振串扰问题且调制效率有差异，其中  $1/4$  波片、 $1/2$  波片与偏振片组合方案仪器偏振影响  $Q$ 、 $U$  信号测量。对此，利用  $1/2$  波片二向色性优势优化方案，测量  $Q$ 、 $U$  信号时用  $1/2$  波片 ( $0^\circ$ 、 $45^\circ$  测  $Q$ ， $\pm 22.5^\circ$  测  $U$ )，测  $V$  时插入  $1/4$  波片，使仪器偏振低于  $0.001$ ，偏振效率达  $0.98$ ，串扰在可接受范围。经 AIMS 望远镜实测，新方案显著减少干涉条纹，振荡频率从  $0.02$  降至  $0.002$ ，数据质量提升，且基于新方案的结构已完成，未来应用可优化偏振测量性能。

## 第6章 总结与展望

### 6.1 工作总结

大型光学望远镜的杂散光是影响太阳磁场测量的主要因素之一。AIMS 望远镜是国际上首台专用于中红外太阳磁场观测的设备，其复杂的光学系统设计、独特的中红外波段观测和极端工作环境等因素增加了杂散光分析难度，本论文以 AIMS 望远镜为研究对象，对其进行了理论建模和杂散光分析。主要创新成果如下：

#### 1. 在国内首次获得地基太阳望远镜的复杂光机系统杂散光模型

完成 AIMS 望远镜全系统的建模研究，建立了包含光学系统、机械结构、圆顶、天窗、科学仪器平台以及库德房墙壁的综合模型，并依据表面形状、材料的不同特性及部分实测数据，完成了表面建模。通过对比 ASAP 模型与 ZEMAX 原始设计的结果，保证了光学模型的准确性。

#### 2. 给出了 AIMS 望远镜焦面科学仪器在不同条件下的杂散光量化分析结果

利用所建立的 AIMS 望远镜光机全系统模型，开展针对性的杂散光分析，获得了可见光系统、8-10 $\mu\text{m}$  成像系统和 FTIR 系统的杂散光量化数据。结果表明，镜面散射和自身热辐射是主要的杂散光来源。当红外系统膜系工艺和可见光相同时，杂散光可降低 80%。8-10  $\mu\text{m}$  系统在冷却至 100 K 后，自身热辐射比常温条件下降低 2.3 个量级；FTIR 系统在冷光阑冷却至 62 K、视场光阑冷却至 80 K 后，降低 2.5 个量级。

#### 3. 偏振分析器干涉条纹特性分析、优化设计和观测验证

首次开展了偏振测量系统的干涉条纹在红外波段产生的杂散光研究。开展偏振分析器干涉条纹特性分析、优化设计与观测验证，利用偏振光学和薄膜光学理论构建四种偏振调制模型，分析干涉条纹特性。创新性提出“1/2 波片主导调制和 1/4 波片选择性切入”优化方案，通过分离 Q/U 信号与 V 信号调制路径，将仪器偏振降至 0.001 以下，偏振效率提升至 0.98。AIMS 望远镜实测表明，优化方案显著减少干涉条纹，振荡频率从 0.02 降至 0.002，数据质量提升。

本课题建立了 AIMS 红外望远镜全系统杂散光分析模型，获得了不同视场、不同传输光路和多波段的杂散光量化数据，并分析验证了偏振分析器干涉条纹对磁场测量的影响，提出了优化设计方案。本项研究为望远镜长期运行中杂散光溯源建立完善的分析方法，也为未来大型望远镜研制中杂散光抑制提供技术储备。

### 6.2 未来工作展望

综合博士期间的研究工作，仍然存在以下问题有待研究：

### 1. 强化环境因素对望远镜影响的研究

针对观测地风沙大的现实挑战，聚焦镜面划痕、灰尘沉积等环境要素，深入剖析其对望远镜杂散光分布及观测性能的作用机理。通过开展长期实地监测，制定科学规范的清洁维护方案，从根源上减少环境因素对望远镜观测精度的负面影响，保障设备长期稳定运行。

### 2. 多物理场耦合效应对杂散光的影响研究

AIMS 望远镜在高原环境中运行，光学元件的热变形、机械结构的应力形变可能改变杂散光传播路径。通过开展热-光-力多物理场耦合仿真，量化镜面面形误差、支撑结构微位移对杂散光的影响。

### 3. 望远镜杂散光的实际测量研究

建立专用杂散光测量系统（可先尝试搭建小系统的测量设施），通过实测获取杂散光数据；将实测结果与基于光学建模的杂散光分析模型进行比对，以验证模型准确性并优化杂散光抑制策略，为提升望远镜在宽波段范围内的观测性能提供关键支撑。

## 参考文献

- FEST E C, 2019. 杂散光抑制设计与分析: Analysis and Control[M]. 华中科技大学出版社.
- WU Y, HUANG Y, LI X, 等, 2023. 星载望远镜杂散光数字孪生模型的发展与展望[J]. 光学精密工程.
- 余菲, 任栖锋, 李华, 等, 2018. 同轴全反红外光学系统自身热辐射测量方法[J]. 中国激光, 45(1): 0104003.
- 宋延松, 杨建峰, 李福, 2017. 基于杂散光抑制要求的光学表面粗糙度控制方法研究[C]//光学精密工程: 第 25 卷. 601-608.
- 岑兆丰, 李晓彤, 朱启华, 2007. 光学系统杂散光分析[J]. 红外与激光工程(03): 300-304.
- 张天一, 2018. LAMOST 高分辨率光谱仪研制与杂散光分析方法的研究[J/OL]. 中国光学, 12(1): 145-155. DOI: [10.3788/co.20191201.0148](https://doi.org/10.3788/co.20191201.0148).
- 张梓扬, 常军, 黄一帆, 等, 2024. 基于强化学习的空间引力波探测望远镜系统外杂光抑制研究[J]. 光学学报.
- 朱杨, 张新, al. 伍雁雄, 2014. 离轴反射式空间天文望远镜系统设计及其杂散光抑制研究[J]. 中国光学, 7(4): 553-560.
- 李文显, 田晖, 2022. 太阳磁场测量[J]. 自然杂志, 44(01): 19-30.
- 李陶然, 2016. 反射式光学天文望远镜杂散光控制方法研究[D]. 中国科学院国家天文台.
- 李陶然, 王建峰, 张晓明, 等, 2020. Stray light analysis of the Xinglong 2.16-m telescope[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 20(3).
- 李陶然, 姜晓军, 2015. 50 BiN 望远镜杂散光分析及控制方案[J]. 红外与激光工程(12).
- 林元章, 2000. 太阳物理导论[M]. 北京: 科学出版社.
- 林剑春, 孙丽崑, al. 陈博洋, 2013. 同轴两反光学系统杂散光分析及内遮光罩优化设计[J]. 红外与激光工程, 42(S1): 168-173.
- 栗洋洋, 刘琳, 彭晴晴, 等, 2019. 卡塞格林系统的杂散辐射分析[J]. 激光与红外, 49(8): 987-991.
- 汪景琇, 2024. 预测太阳磁场的时空分布, 认知太阳活动的演化规律[J]. 中国科学: 地球科学, 54(08): 2744-2746.
- 沈宇樑, 2023. AIMS 望远镜精密装调技术研究[D]. 中国科学院国家天文台.
- 潘森, 许孝芳, 李金鹏, 等, 2020. 2 m 环形地基太阳望远镜系统杂散光分析[J]. 光学仪器, 42(3): 65-70.
- 牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等, 2010. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析[J]. 光学学报, 30(8): 2267-2273.
- 王瑞, 徐稚, 陈宇超, 等, 2018. 新真空太阳望远镜多波段高分辨率成像系统的视场定标[J]. 光学学报, 38(1): 108-115.
- 王虎, al. 陈钦芳, 2024. 杂散光抑制设计与分析[M]. 科学出版社.
- 蒋佶松, 2020. 自适应光学控制方法及集成建模技术研究[D]. 中国科学院大学.
- 赵飞, 王森, 邓超, 等, 2010. 兴隆 1 米光学望远镜消杂散光系统[J]. 光学精密工程, 18(3): 513.
- 邓元勇, 甘为群, 颜毅华, 等, 2020. 太阳磁场探测现状与展望[J]. 红外与激光工程, 49(11): 230-236.
- 邓元勇, 王东光, 包星明, 2023. AIMS: 探索中远红外太阳物理研究的新机遇[J]. 青海科技, 30(03): 17-22+30.
- 陈永和, 傅雨田, 沈学民, 2006. 红外光学系统内部构件热辐射分析[J]. 光学技术, 32(S1): 73-75+79.

- 韩笑, 2016. NVST 多波段光谱仪杂散光研究[D]. 中国科学院大学.
- 颜昌翔, 许杰, 彭岩, 2010. 离轴三反空间光学望远系统的杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 18(2): 305-311.
- 黄强, 2006. 空间光学系统的杂散光分析与研究[D]. 中国科学院研究生院.
- Anon, 1994. Optics and optical instruments — veiling glare of image forming systems — definitions and methods of measurements: ISO 9358:1994[S]. Geneva: International Organization for Standardization.
- BALTHASAR H, VON DER LÜHE O, KNEER F, et al., 2007. Gregor: the new german solar telescope[A/OL]. arXiv: 0704.2693. <https://arxiv.org/abs/0704.2693>.
- BAO X, WANG J, JING S, et al., 2023. The aims site survey[J]. Res. Astron. Astrophys., 2314(5): 1-15.
- BARTELL F O, DERENIAK E L, WOLFE W L, 1981. The theory and measurement of bidirectional reflectance distribution function (brdf) and bidirectional transmittance distribution function (btdf) [C]//SPIE Proceedings: Vol. 0257 Proceedings of the 1980 Huntsville Technical Symposium. Huntsville, AL, USA: SPIE: 154-160.
- BENNETT J M, 1976. Measurement of the rms roughness, autocovariance function and other statistical properties of optical surfaces using a feco scanning interferometer[J]. Applied Optics, 15: 2705-2721.
- BREault R P, 1977. Problems And Techniques In Stray Radiation Suppression[C/OL]//LYTLE J D, MORROW H E. Stray Light Problems in Optical Systems: Vol. 0107. SPIE: 2 - 23. <https://doi.org/10.1117/12.964591>.
- BREault R P, 1989. Stray Light Technology Overview In 1988[C/OL]//BREault R P. Stray Light and Contamination in Optical Systems: Vol. 0967. SPIE: 2 - 9. <https://doi.org/10.1117/12.948084>.
- BREault R P, 1990. Stray light technology overview of the 1980 decade (and a peek into the future)[C/OL]//BREault R P. Stray Radiation in Optical Systems: Vol. 1331. SPIE: 2 - 11. <https://doi.org/10.1117/12.22643>.
- CAO W, GORCEIX N, COULTER R, et al., 2010. First light of the 1.6 meter off-axis new solar telescope at big bear solar observatory[J/OL]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 7733. DOI: 10.1117/12.856611.
- CASINI R, JUDGE P G, SCHAD T A, 2012. Removal of spectro-polarimetric fringes by two-dimensional pattern recognition[J/OL]. The Astrophysical Journal, 756(2): 194. <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/756/2/194>. DOI: 10.1088/0004-637x/756/2/194.
- CHURCH E L, JENKINSON H A, ZAVADA J M, 1979. Relationship between surface scattering and microtopographic features[J]. Opt. Eng., 18: 125-136.
- CLARKE D, 2004a. Interference effects in compound and achromatic waveplates[J]. J. Opt. A, 6: 1041-1046.
- CLARKE D, 2004b. Interference effects in pancharatnam waveplates[J]. J. Opt. A, 6: 1047-1051.
- CLARKE D, 2004c. Interference effects in single waveplates[J]. J. Opt. A, 6: 1036-1040.
- DINER D J, DAVIS A, HANCOCK B, et al., 2007. Dual-photoelastic-modulator-based polarimetric imaging concept for aerosol remote sensing[J/OL]. Appl. Opt., 46(35): 8428-8445. DOI: 10.1364/AO.46.008428.
- DITTMAN M G, 2002. Contamination scatter functions for stray-light analysis[C]//Optical System Contamination: Effects, Measurements, and Control VII: Vol. 4774 Proceedings of SPIE. SPIE: 99-110.

- ELLIS K S, BERNSTEIN R A, BIGELOW B C, 2010. Conceptual design phase stray light analysis of the mobile imaging spectrograph for tmt[C/OL]//Astronomical Telescopes + Instrumentation. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:120916632>.
- European Space Agency, 2011. Solar orbiter: Exploring the sun-heliosphere connection[R/OL]. ESA. <https://sci.esa.int/web/solar-orbiter>.
- FEST E, 2013. Stray light analysis and control[M/OL]. DOI: [10.1117/3.1000980](https://doi.org/10.1117/3.1000980).
- FINESCHI S, ZANGRILLI L, ROSSI G, et al., 2005. Kpol: Liquid crystal polarimeter for k-corona observations from the score coronagraph[C/OL]//Proc. SPIE: Vol. 5901. SPIE: 59011I. DOI: [10.1117/12.618987](https://doi.org/10.1117/12.618987).
- GREVE B, 2004. Reflections and refractions in ray tracing[C/OL]//<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18690050>.
- HARRINGTON D M, SUEOKA S R, 2018. Polarization modeling for dkist part 3[J]. J. Astron. Telesc. Instrum. Syst., 4: 018006.
- HARRINGTON D M, SNIK F, KELLER C U, et al., 2017. Polarization modeling and predictions for dkist part 2[J/OL]. J. Astron. Telesc. Instrum. Syst., 3: 048001. DOI: [10.1117/1.JATIS.3.4.048001](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.3.4.048001).
- HARVEY J E, 1976. Light-scattering characteristics of optical surfaces[Z]. University of Arizona: 35-52.
- HARVEY J E, KRYWONOS A, VERNOLD C L, 2007. Modified beckmann-kirchhoff scattering model for rough surfaces with large incident and scattered angles[J/OL]. Optical Engineering, 46 (7): 078002-1-078002-10. DOI: [10.1117/1.2753721](https://doi.org/10.1117/1.2753721).
- HECHT E, 2001. Optics[M]. 4th ed. Reading, MA: Addison-Wesley.
- HIPPS K W, CROSBY G A, 1979. Applications of the photoelastic modulator to polarization spectroscopy[J/OL]. J. Phys. Chem., 83: 555-562. DOI: [10.1021/j100470a001](https://doi.org/10.1021/j100470a001).
- HOU J, 2014. Design and measurement of a full-stokes spectropolarimeter with kd\*p crystals for land objects[C/OL]//Proc. SPIE: Vol. 9099. SPIE: 909917. DOI: [10.1117/12.2053421](https://doi.org/10.1117/12.2053421).
- HOU J F, WANG D G, DENG Y Y, et al., 2020. Interference effect on the liquid-crystal-based stokes polarimeter\*[J/OL]. Chin. Phys. B, 29: 124211. DOI: [10.1088/1674-1056/ab9e5c](https://doi.org/10.1088/1674-1056/ab9e5c).
- HUBBARD R, 2013. M1 microroughness and dust contamination[R/OL]. 950 N. Cherry Avenue, Tucson, AZ 85719: Advanced Technology Solar Telescope. <http://atst.nso.edu>.
- ICHIMOTO K, LITES B, ELMORE D, et al., 2008. Polarization calibration of the solar optical telescope onboard hinode[J/OL]. Sol. Phys., 249: 233-261. DOI: [10.1007/s11207-008-9169-9](https://doi.org/10.1007/s11207-008-9169-9).
- JUNFENG H, MING L, DONGGUANG W, et al., 2018. Design and analysis of a five - mirror derotator with minimal instrumental polarization in astronomical telescopes[J]. Optics Express, 26(15): 19356.
- LIX, SONG Y, UITENBROEK H, et al., 2021. Infrared diagnostics of the solar magnetic field with mg i 12  $\mu\text{m}$  lines: forward-model results[J]. A&A, 646: A79.
- MACLEOD H A, 2018. Series in optics and optoelectronics: Thin-film optical filters[M]. 5th ed. CRC Press.
- NICODEMUS F E, RICHMOND J C, HSIA J J, et al., 1977. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance[J]. National Bureau of Standards (US). Monograph, 161.
- NICODEMUS F E, 1970. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity[J]. Applied Optics, 9: 1474-1475.
- PATTERSON B A, ATAD-ETTEDGUI E, WELLS M, et al., 2003. Analysis of scattered light for vista[C/OL]//Proceedings of SPIE: Vol. 4842. 459-469. DOI: [10.1117/12.460369](https://doi.org/10.1117/12.460369).

- PETERSON G L, 2004. Analytic expressions for in-field scattered light distributions[C]//Optical Modeling and Performance Predictions: Vol. 5178 Proceedings of SPIE. SPIE: 184-193.
- PUST N J, SHAW J A, 2006. Dual-field imaging polarimeter using liquid crystal variable retarders [J/OL]. *Appl. Opt.*, 45(22): 5470-5478. DOI: [10.1364/AO.45.005470](https://doi.org/10.1364/AO.45.005470).
- RAST M P, BELLO GONZÁLEZ N, BELLOT RUBIO L, et al., 2021. Critical science plan for the daniel k. inouye solar telescope (dkist)[J/OL]. *Solar Physics*, 296(4). <http://dx.doi.org/10.1007/s11207-021-01789-2>.
- RAYLEIGH L, 1901. Polish[J]. *Nature*, 64: 385-388.
- RIMMELE T R, WARNER M, KEIL S L, et al., 2020. The daniel k. inouye solar telescope – observatory overview[J/OL]. *Sol. Phys.*, 295: 172. <https://link.springer.com/article/10.1007/sXXXXX-020-01723-1>.
- ROHRBACH S O, IRVIN R G, SEALS L T, et al., 2012. Stray light modeling of the james webb space telescope (jwst) integrated science instrument module (isim)[C/OL]//Proceedings of SPIE: Vol. 8442. 84422H. DOI: [10.1117/12.926581](https://doi.org/10.1117/12.926581).
- ROMOLI M, ANDRETTA V, BEMPORAD A, et al., 2021. Challenges during metis-solar orbiter commissioning phase[C]//International Conference on Space Optics (ICSO). ESA: 11852-11863.
- SAGAWA M, YAMAGISHI W, OKADA M, et al., 1979. Rare earth–cobalt permanent magnets with improved mechanical properties[J]. *Journal of Applied Physics*, 50(B3): 2340-2342.
- SCHOU J, BORRERO J M, NORTON A A, et al., 2012. Polarization calibration of the helioseismic and magnetic imager (hmi) onboard the solar dynamics observatory (sdo)[J/OL]. *Sol. Phys.*, 275: 327-355. DOI: [10.1007/s11207-011-9832-4](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9832-4).
- SHARMA M, LIM J, LEE H, 2022. The amalgamation of object detection and semantic segmentation for steel surface defect detection[J/OL]. *APPLIED SCIENCES-Basel*, 12(12). DOI: [10.3390/app12126004](https://doi.org/10.3390/app12126004).
- STAUDER J L, 2000. Stray light comparison of off-axis and on-axis telescopes[D]. Logan, Utah: Utah State University.
- STOVER J C, 2012. Optical scattering: Measurement and analysis[M]. 3rd ed. Bellingham, WA: SPIE Press: 158-183.
- SWEATT W C, SASS D T, HAMILTON T W, et al. Design and optimization of a complete stokes polarimeter for the mwir[C]//SPIE: 1-12.
- TIESENHAUSEN G, SHARPE T H, 1970. Space flight evolution[R]. NASA Marshall Space Flight Center.
- UNNO W, 1956. Line formation of a normal zeeman triplet[J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 8: 108.
- WERNER M W, WILLOUGHBY D S, 1990. Sirtf: Probing the dark corners of the galaxy[C]//TARTER J C, CHANG S, DEFREES D J. *Carbon in the Galaxy: Studies From Earth and Space*. Dordrecht: Springer: 27-39.
- XU X G, ZHANG C, XU G J, et al., 2011. Electron tunneling in single layer graphene with an energy gap[J/OL]. *Chin. Phys. B*, 20(2): 027201. DOI: [10.1088/1674-1056/20/2/027201](https://doi.org/10.1088/1674-1056/20/2/027201).
- ZEEMAN P, 1897. The effect of magnetisation on the nature of light emitted by a substance[J]. *Nature*, 55: 347.

## 致 谢

文至最后，回顾我五年的研究生生涯，有太多人的鼓励与支持，在此向所有关心、支持和帮助过我的老师、同学、朋友和家人们表示诚挚的感谢以及美好的祝愿。

首先要感谢我的导师天团-王东光老师，孙英姿老师和侯俊峰老师。从科学研究的探索，到待人接物的日常点滴都离不开老师们的倾囊相授。几位导师在我这里的角色不单单是科研引路人，有时候也像心理咨询师，有时候像家里的长辈，有的时候像身边的朋友，日常相处可以插科打诨，在科研上又严谨入微。老师们总能在轻松幽默与专业严肃间自如切换。我的科研之路走得歪歪扭扭，文章更是天马行空，各种意识流写作，平日里也是大大咧咧、状况不断。老师们应该很是头疼，但是始终对我进行耐心细致地指导，非常幸运遇上我的神仙导师们，给老师们疯狂打 call。

怀柔基地整体的氛围比起说是团组更像一个大家庭。在邓老师这个大家长的带领下，一起追太阳。感谢怀柔基地的教职工在我研究生期间在工作、学习上给予的帮助。感谢邓元勇老师在学习和生活上的指导；感谢亲爱的潇姐在学习、工作和生活对我各种照顾，是我研究生生涯各种状况的见证人。感谢机械方面的大拿王建师傅，他总有各种解决问题的招数，想学；感谢张志勇老师在学习上的大力帮助，带我和十一所的老师讨论波片的各种问题；感谢张洋师姐在机械设计方面的指导；感谢包星明老师、车慧利老师在冷湖出差期间对我这个晕车人士的照顾；感谢张印老师在研究生期间答辩工作提供的帮助；感谢陈洁老师在参加工会活动上的支持；感谢林佳本研究员、张洪起研究员、林钢华研究员、谭宝林研究员、杨尚斌研究员、李文显研究员、张枚研究员、苏江涛研究员、宋永亮、朱晓明、刘锁、白先勇、黄静、徐海清等老师在我研究生期间的关心和照顾。

感谢朱丽佳在各种琐碎文档整理、材料提交方面的帮助，感谢闫俊、孙文君、闫璐帮我报销了一堆差旅、加工材料。感谢怀柔站的各位工作人员，疫情期间王慧站长给我提供隔离住宿，每次坐张鼎波师傅开的班车往返怀柔站，超喜欢苏海奇师傅做的饭，感谢汪国萍老师、王立东、阮文东、荆帅在站上工作调试期间提供的帮助，感谢杨桂莲阿姨在生活上的照顾。

感谢教务处的梁艳春处长、马怀宇老师和李响老师在研究生期间提供的各方面帮助。感谢在冷湖出差期间冯志伟老师、段帷老师、徐刚老师还有冷湖的赵主任、李主任、董部长、李部长、咎工等人的照顾，天选高原人在冷湖出差的日子很开心有大家的陪伴。感谢西光所的付兴，徐崧博，鄂可伟，尹雅梅，雷昱，董荣光等老师在蒲城 AIMS 调试期间的照顾，是比自己组里老师还要更早认识的西光所的老师。

感谢雁栖湖一起度过的杜维、冯凯、孙得志、吴莹、李佳琪、杨翰林、刘洋、朱芯雨、刘威、张小凡等小伙伴们，雁栖湖的一年是研究生生涯最轻松惬意的一

年，一起参加合唱，游泳、自驾、吃吃喝喝。感谢排协的各位大佬们，带我练习的戴老师、凯哥、潇姐，把我这个排球小白拉进坑里，走不出来一点。感谢欧书记，蔡老师，吴老师，朱哥，高老师，关老大，大师，小林师兄，璐璐，谭媛，熊，小顾，思佳等人一起快乐打球、干饭，通过排球也认识了很多的小伙伴，感谢大家的陪伴。

感谢苗博，虽然师兄很抽象，但总是紧要关头救命，超级靠谱；感谢我的研究生搭子——人美心善的小郭同学，和小郭同学共度了五年的研究生时光；感谢228的“工友们”：王全、胡子尧、喻子晗、吴纬、邵明福、王哲楷对我的包容，我的到来，228从社恐到“社恐”，超级热闹；感谢怀柔基地的小伙伴们：沈宇樑、冯宇飞、杨景杰、白阳、胡兴、佟立越、王慧、郑州、黄威、吴昱川和罗佩欣等人在学习、生活日常上的帮助。

感谢周末酒鬼群友和lala姐妹芮芮、思雨、小红、洋哥、罗哥、乐涛、板栗、弘哥的陪伴，一起度过疫情的日子，一起打球、唱歌、看电影、溜冰、野餐。和大家一起吃吃喝喝玩玩乐乐的相处就很放松很开心。感谢我们丁雪林同学、张欢昕同学和升官发财暴瘦暴富群友们研究生涯的云陪伴。

离开家九年的北京求学之路，感谢我的家人和亲戚的支持和鼓励。从高考填报志愿、考研、转博等各个阶段，遇事不决给家里打电话，不开心了给家里打电话，不管什么情况都给家里打电话，家人是我坚强的后盾，超爱你们！

研究生期间，我就是个努力上进的退堂鼓选手，最后，感谢坚持下来的我自己。

## 作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

### 作者简历:

高碧源, 女, 汉族, 陕西西安人, 政治面貌共青团员, 中国科学院国家天文台博士。

### 教育经历:

2016年9月-2020年6月, 在北京理工大学光电学院获得工学学士学位, 专业: 测控技术与仪器

2020年9月-2025年6月, 中国科学院国家天文台 硕博连读 专业: 天文技术与方法

### 已发表(或正式接受)的学术论文:

- (1) B. Gao, J. Hou, Y. Shen, Y. Sun, D. Wang, X. Yang, and Y. Deng, "Analysis of interference fringes in a long-wave infrared full Stokes polarimeter based on rotating waveplates," Appl. Opt. 63, 7756-7766 (2024).
- (2) BiYuan Gao, Dongguang Wang, YingZi Sun,\* Yuliang Shen, Xiao Yang and Jun-Feng Hou, "Stray Light Analysis for the AIMS Telescope", Astronomical Techniques and Instruments (2025) 已接收.

### 参加的研究项目:

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. 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
3. 融合项目——温泉太阳望远镜改造、某地太阳望远镜项目申请
4. 太空探源系列科学卫星专项——太阳极轨天文台卫星工程项目

### 获奖情况:

中国科学院大学 三好学生

国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59  
中国科学院国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59  
国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59  
中国科学院国家天文台 YANG Xiao 2026-04-23 10:21:59