



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

AIMS 望远镜中无偏消旋系统的关键技术研究

作者姓名: 周明尧

指导教师: 王东光 正高级工程师 中国科学院国家天文台

侯俊峰 高级工程师 中国科学院国家天文台

学位类别: 工程硕士

学科专业: 光学工程

培养单位: 中国科学院国家天文台

2020年6月

Research on Key Technologies of a Non-polarized Derotator
System in AIMS Telescope

A thesis submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Master of Engineering
in Optical Engineering

By

Zhou Mingyao

Supervisor: **Professor Wang Dongguang**
Senior engineer Hou Junfeng

National Astronomical Observatories,
Chinese Academy of Sciences

June 2020

中国科学院大学
研究生学位论文原创性声明

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

作者签名： 周明尧

日期： 2020.04.27

中国科学院大学
学位论文授权使用声明

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

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名： 周明尧

日期： 2020.04.27

导师签名： 王东光

日期： 2020.04.27

摘 要

AIMS 望远镜是国际上第一台专用于太阳磁场精确测量的中远红外地平式太阳望远镜。地平式望远镜在跟踪观测过程中，由于望远镜的方位轴与地球自转轴不重合及库德光路中的折轴反射镜在望远镜跟踪过程中有相对转动，会引入物方及像方视场旋转，极大地影响了 AIMS 望远镜在中远红外波段的磁场测量。传统的消旋 K 镜虽然可以消除视场旋转，但会带来较大的仪器偏振，不利于望远镜的高精度偏振测量。然而，AIMS 望远镜主要基于塞曼效应原理实现磁场测量，高精度的磁场测量意味着需要高精度的偏振测量。因此，一种无偏消旋系统应运而生，该系统是在传统 K 镜基础上通过无偏优化设计而成。它由五块平面反射镜按一定规律排列，通过优化设计可保证在消除像旋的同时显著减小仪器偏振，可以满足 AIMS 望远镜进行光学消旋的同时不带来附加偏振的需求。

无偏消旋系统的设计具有明显优势，但是作为一种新型消旋装置，其在实际研制中的设计和装调方案是否能满足理论设计要求？最终消偏消旋效果是否与理论预言一致？这些都是我们将该无偏消旋系统应用到 AIMS 望远镜之前必须厘清和解决的关键问题。因此，本学位论文即围绕这些关键技术问题展开，在实验室研制了一套原理样机，从偏振光学设计、结构设计、系统装调、偏振性能测试四个方面对无偏消旋系统进行了全方位的研究，主要研究内容和结论如下：

- 1、无偏消旋系统的原理分析，对系统消像旋和消仪器附件偏振两部分进行具体论述，并对无偏消旋系统光学结构设计中存在的光束偏移问题进行分析，提出通过旋转和平移系统中平面镜位置的方式补偿系统光束偏移，形成无偏消旋系统的光束偏移补偿的调整方案。

- 2、设计无偏消旋系统的装调方案，针对结构组成不规则的无偏消旋系统，设计能快速定位的双光路自准直辅助装调方案，并用 MATLAB 对无偏系统精细调节过程进行仿真分析，作为对实验室装调流程的技术指导，提高系统装调效率和装调方案的可重复性，降低传统直接装调方法中的盲目性。

3、在实验室完成无偏消旋系统原理样机的装调并进行消偏振性能测试，实验测得的无偏消旋系统装调精度约为 $15''$ ，无偏消旋系统的消除偏振性能测试的结果为附加仪器偏振基本小于 5%，明显小于传统 K 镜的附加仪器偏振。

关键词：无偏消旋系统、装调方案、偏振测试

Abstract

The AIMS telescope is the first mid-far infrared alt-azimuth solar telescope which dedicated to the accurate measurement of the solar magnetic field in the world. Two kinds of field rotation occur during the process of the alt-azimuth telescope tracking observation which influence the measurement of the mid-far infrared magnetic field in AIMS telescope greatly. Object-side field rotation is caused by the misalignment between azimuth axis of telescope and rotation axis of earth, image-side field rotation is caused by the relative motion of the folding mirrors in Coude optical path. Traditional K mirrors can eliminate the field rotation but bring the additional instrumental polarization. It is not conducive for the accurate measurement of polarization. However, AIMS telescope is mainly based on the Zeeman effect principle to achieve magnetic field measurement. Accurate measurement of magnetic field means accurate measurement of polarization. Therefore, a Non-polarized Derotator System was proposed. It is based on traditional K mirrors with the non-polarized optimization. The non-polarized derotator which composed of five mirrors is possible to reduce the instrumental polarization while eliminating the field rotation. It can meet the requirements of AIMS telescope for optical derotation without additional polarization.

The design of non-polarized derotator system has obvious advantages, but as a new type of derotation device, can the design and adjustment scheme of the non-polarized derotator system meet the theoretical design requirements in practical development? Whether the final depolarization and derotation effect consistent with the theoretical prediction or not? These are key issues should be solved before applying the non-polarized derotator system to the AIMS telescope. Therefore, this thesis focus on these key technical issues, a set of principle prototype was developed in the laboratory. The research including polarization optical design, structural design, system adjustment and polarization performance test were studied comprehensively.

The main research contents and conclusions includes:

1. Principle analysis and verification of the non-polarized derotation system, the elimination of rotation and polarization is discussed in detail, and the beam shift problem in the optical structure design is analyzed, an adjustment scheme is proposed by rotating and translating the position of the plane mirror for compensating the beam deviation.

2. The design of the alignment scheme for the non-polarized derotation system, an auto-collimation dual optical path alignment scheme is designed for the non-polarized derotator system with irregular structure which can locate the position of mirrors quickly. The process of adjustment is simulated by MATLAB to guide the adjustment in laboratory. This scheme could improve the system installation efficiency and reduce blindness in traditional direct adjustment methods.

3. The alignment and the polarization detection for the non-polarized derotator are done in the lab. It is found that the alignment error of the non-polarized derotator is within 15 arcsec and its additional instrumental polarization is within 5% which is much lower than K-mirror's.

Key Words: Non-polarized Derotation System, Alignment Scheme, Polarization Detection

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及研究意义.....	1
1.1.1 望远镜的跟踪架结构.....	1
1.1.2 常见的消旋方式.....	3
1.1.3 课题研究意义.....	4
1.2 本课题的研究目标及主要内容.....	5
1.2.1 研究目标.....	5
1.2.2 主要内容.....	6
第 2 章 无偏消旋系统的基本原理	7
2.1 无偏消旋系统的消旋原理.....	7
2.1.1 望远镜的像旋原理分析.....	7
2.1.2 无偏消旋镜光学结构.....	10
2.2 无偏消旋镜的消偏原理.....	12
2.3 光束偏移问题及补偿方案.....	14
2.4 本章小结.....	17
第 3 章 无偏消旋系统的装调方案	18
3.1 确立无偏消旋系统基准轴.....	20
3.2 无偏消旋系统位置粗调.....	23
3.3 无偏消旋系统位置精调及仿真分析.....	23
3.4 本章小结.....	28
第 4 章 无偏消旋系统实验室装调及验证	29
4.1 无偏消旋系统原理样机设计、加工和装配.....	29
4.2 无偏消旋系统原理样机装调及实验结果.....	31
4.3 消偏振性能测试.....	34
4.4 本章小结.....	36

第 5 章 结论.....	37
5.1 总结.....	37
5.2 展望.....	38
参考文献.....	39
致 谢.....	43
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	45

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景及研究意义

1.1.1 望远镜的跟踪架结构

一些跟踪测量仪器，如望远镜的跟踪观测系统、潜望镜的周视光学系统、跟踪仪器的瞄准镜系统中，会存在由于跟踪运动带来的像旋转。在天文望远镜中，由于望远镜不同的跟踪架结构及光学系统，像旋现象又略有不同。

1608 年荷兰米德尔堡的眼镜师汉斯·李波尔造出了世界上第一架望远镜，1609 年意大利天文学家 and 物理学家伽利略·伽利雷发明了 40 倍双镜望远镜，第一次将望远镜用于天文观测。天文望远镜发展至今已有四百余年的历史，经过许多科学家与工程师的不断研究探索，诞生了多种可以满足不同科研目标及观测需求的望远镜。地基天文望远镜可按跟踪架结构分为以下三种：赤道式结构、地平式结构和水平式结构^{[1][2][3]}，如图 1.1 所示。

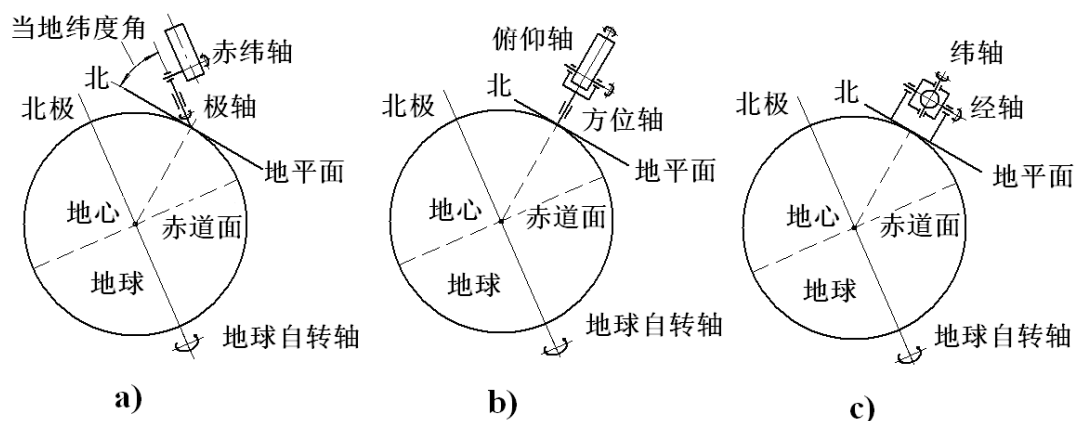


图 1.1 三种望远镜跟踪架结构的轴系方向示意图

a) 赤道式结构 b) 地平式结构 c) 水平式结构

1.1.1.1 赤道式望远镜

赤道式望远镜的跟踪架由赤经轴和赤纬轴构成，赤经轴也称极轴，它的方向与地球自转轴相平行，赤经轴与水平地面的夹角等于望远镜所在位置的地理纬度值，赤纬轴与赤经轴相互垂直。赤道式望远镜镜筒安装在赤纬轴上，可围绕赤经

轴转动。赤道式跟踪架结构望远镜的优点之一是它可以通过使赤经轴与地球自转轴反向同速转动，来补偿跟踪过程中天体的视运动，使被跟踪观测的天体始终保持在视场中，便于进行长时间的观测。赤道式望远镜在工作时，只需要控制赤经轴以 $15''/s$ 匀速转动，不需要转动赤纬轴，控制简单，且不会引起天体在像面上的旋转。但赤道式机架支撑方式的受力情况差，在相同口径下，赤道式望远镜重量大、体积大、成本高，限制了望远镜往大口径方向的发展。

1.1.1.2 地平式望远镜

地平式望远镜的跟踪架由方位轴和高度轴构成，方位轴垂直于地面，指向天顶，高度轴也称俯仰轴，安装方向与方位轴垂直，绕水平方向转动。地平式望远镜在跟踪目标时需要方位轴和高度轴同时旋转，当天顶距为零时，方位轴跟踪速度为无限大，因此会产生一定的跟踪盲区，跟踪盲区大小与望远镜机架和控制系统的性能有关。同时，由于地平式跟踪架的旋转轴与地球自转轴不重合，在跟踪天体时，不能补偿天体的周日视运动，会在焦面上产生一定的像旋转。地平式望远镜的优点是其力学性能好，结构件主要承受竖直方向的重力，相同支撑结构下能支撑更大口径镜筒，整体机架结构紧凑，体积小，成本低。

1.1.1.3 水平式望远镜

水平式望远镜的跟踪架也由相互垂直的两根轴组成，一根轴为固定指向轴，通常平行于南北向放置，称为经轴，另一根轴垂直于经轴，称为纬轴。两轴均平行于水平面，因此称为水平式望远镜。水平式望远镜可以克服地平式望远镜在观测过程中存在一定角度盲区的问题，适用于卫星跟踪。

由于赤道式和水平式跟踪架在望远镜口径较大时结构复杂、体积大、成本高，目前大口径望远镜以地平式跟踪架结构较为常见。地平式望远镜跟踪过程中产生的物方像旋转影响观测数据采集，因此需要对望远镜进行消旋处理。除此之外，若望远镜光学系统中存在多块平面镜的组合，当各块平面镜发生相对运动时，其像空间也会发生旋转，在焦面上产生像方视场旋转。为消除这两种像旋转对焦面仪器的影响，常需要在望远镜中设置消旋系统。

1.1.2 常见的消旋方式

为使焦面仪器正常工作，大口径望远镜中常配有消旋系统，用于消除由地平式跟踪架带来的物方视场旋转和由相对运动的反射镜带来的像方视场旋转^{[4][5]}。

常用的消旋方式有以下三种：物理消旋、电子消旋、光学消旋。

1.1.2.1 物理消旋

物理消旋的原理是通过电机驱动焦面仪器旋转，使焦面与像同步旋转，进而实现图像在焦面上稳定不动的效果。物理消旋的实时性好，不会使光学系统产生由于附加光学元件而带来的能量损失，但电机旋转会带来一定机械振动，会对高精密焦面仪器产生较大影响，而且当望远镜口径较大时，消旋结构体积比较庞大，使整机结构变得更加复杂，令望远镜动态性能变差。

1.1.2.2 电子消旋

电子消旋是一种利用计算机采用一定算法对焦面实时采集的旋转图像进行像消旋处理的方法^{[6][7]}。图像消旋算法的本质是图像的旋转计算，即将采集的焦面图像旋转特定的角度以消除像旋。设给定的图像用 $f(x, y)$ 表示，其绕图像中心 (x_0, y_0) 旋转 θ 角度后得到图像可表示为 $f(x', y')$ ，则 (x, y) 和 (x', y') 的关系式为：

$$\begin{cases} x' = (x - x_0) \cos \theta + (y - y_0) \sin \theta + x_0 \\ y' = -(x - x_0) \sin \theta + (y - y_0) \cos \theta + y_0 \end{cases} \quad \dots (1.1)$$

由于对计算结果的取整操作将会使得到的旋转图像存在可能的“空洞”现象，一般采用反向旋转算法，首先给定图像 $f(x', y')$ 中的坐标点 (x', y') ，再求其原图像 $f(x, y)$ 的对应点 (x, y) 。反变换公式为：

$$\begin{cases} x = (x' - x_0) \cos \theta - (y' - y_0) \sin \theta + x_0 \\ y = (x' - x_0) \sin \theta + (y' - y_0) \cos \theta + y_0 \end{cases} \quad \dots (1.2)$$

电子消旋无复杂的机械或光学结构，结构简单，使用灵活，但电子消旋的图像处理算法中存在近似取整等操作，会导致经过消旋处理的图像质量下降，同时，计算机进行图像处理时会带来一定的积分延时，不适合用于需要长时间曝光的观测仪器的图像采集和处理中。

1.1.2.3 光学消旋

光学消旋通过在光路中加入具有像旋转功能的光学元件或系统,控制其转速为像旋速度一半来实现对焦面上图像的消旋处理。光学消旋装置可分折射式和反射式两类,折射式消旋装置是在光路中设置具有像旋功能的棱镜,如道威棱镜、别汉棱镜^[8]。棱镜的使用会令光路中产生一段透射光路,由于不同波长的光在棱镜中折射率不同,光路中的透过波段会受棱镜材料影响,难以覆盖较长的波段范围;反射式消旋装置是在光学系统中设置由平面镜组合成具有消旋功能的装置来实现消旋,如 K 镜^[9]、无偏消旋镜^[10]。

K 镜由三块平面镜组成,结构简单,但光束经平面镜传播后偏振态会发生变化,K 镜装置会在光学系统中引入附加仪器偏振,影响后续光学系统进行高精度偏振测量。无偏消旋镜是 K 镜进行了附加偏振优化后的一种消旋系统,通过五块平面镜组合,在具有消除像旋的基础上可最大程度去除附加偏振,为有消旋需求的高精度偏振测量系统提供了解决方案,可以保证高精度偏振测量系统的消旋需求。

物理消旋和电子消旋方式带来的振动和延迟均不利于 AIMS 重要焦面仪器傅里叶光谱仪 (FTIR) 的正常工作,因此,光学消旋是最优可用的消旋方式,而光学消旋透射式棱镜由于折射受材料限制覆盖波段较短也并不适用,反射式装置中 K 镜会带来较大的附加偏振,影响 AIMS 望远镜的偏振测量精度,因此,无偏消旋镜为适用于 AIMS 的消旋装置,它可以满足 AIMS 望远镜消像旋转和消附加仪器偏振的需求。

1.1.3 课题研究意义

AIMS 望远镜就是一台具有消旋需求的高精度偏振测量设备,它的全称是用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统,是一台中红外太阳磁场观测设备。目前太阳磁场测量的方法主要基于磁场敏感谱线的塞曼效应^[11]。塞曼效应由荷兰物理学家塞曼于 1896 年发现,是指原子在外磁场中发光谱线发生分裂且偏振态变化的现象。1908 年美国天文学家海尔等人在威尔逊山天文台利用谱线的塞曼效应,首次测量到了太阳黑子的磁场。太阳辐射的偏振状态可以由一组斯托克斯参数表

示^[12],只要测得一组斯托克斯参数便可通过物理推演的方式得到磁场的全部信息。因此,太阳磁场的测量实际上是太阳辐射的偏振测量。为保证实现太阳磁场的高精度测量,要求观测系统各部分子系统的附加仪器偏振较小且可以被精确的偏振定标。

同时,AIMS 望远镜为地平式机架结构,其在跟踪观测过程中,由于望远镜的方位轴与地球自转轴不重合及库德光路中的折轴反射镜在望远镜跟踪过程中有相对转动,引入了物方及像方视场旋转,需采取一定措施消除视场旋转以实现焦面仪器更好的工作。

基于 AIMS 望远镜消像旋转和消附加仪器偏振的需求,选用五镜无偏消旋镜为 AIMS 望远镜的消旋方案。但无偏消旋系统的不规则结构为其在光学系统中的实际应用带来了不少挑战,在将这一性能优越的消旋系统应用到 AIMS 系统中时,有以下几个问题亟待解决:

1) 无偏消旋镜的结构设计中将第一面反射镜厚度理想化,忽略了系统光路得光束平移问题,在实际应用时会为像面带来额外系统误差;

2) 无偏消旋系统结构不规则,在实际应用时需要为其设计匹配的支撑结构,同时光学系统的实际性能很大程度上取决于系统装调结果,为发挥其优越的光学性能,需要为其设计对应的系统装调方案;

3) 无偏消旋系统的消偏振性能目前只存在理论分析结果,需要实验室的实测数据来证明其消除系统附加偏振的性能。

本课题围绕以上几方面的内容,对无偏消旋系统包括光束偏移补偿方法、系统装调方案、性能测试等关键技术进行深入研究,研究结果将为 AIMS 望远镜系统中实际无偏消旋系统的机械结构设计和装调提供技术支持和经验指导,也将对未来无偏消旋系统的广泛应用提供一定性能分析和经验参考,有助于推广此系统在对系统像面旋转和偏振测量有需求的各个领域光学系统中的使用。

1.2 本课题的研究目标及主要内容

1.2.1 研究目标

本课题围绕无偏消旋系统展开分析和研究,讨论的关键问题包括结构、装调、

偏振检测等方面，主要研究目标包括：为 AIMS 望远镜中无偏消旋系统的光束偏移补偿问题提供解决方案；为不规则结构的无偏消旋镜提供有效可行的双光路辅助装调方案；在实验室完成无偏消旋系统原理样机搭建及系统装调，通过理论分析、软件仿真及实验室装调等方式，分析和总结装调规律，为无偏消旋系统的快速安装调试提供技术支持和经验参考；在实验室完成无偏消旋系统的性能测试，分析得出无偏消旋系统具体性能指标，为无偏消旋系统的实际应用提供参考。其中，AIMS 总体为该部分设定的初步装调指标为倾斜误差 $10''$ ，偏心误差 0.05mm ，对系统的偏振性能的要求为偏振串扰小于 0.01 ，偏振本底小于 0.001 。

1.2.2 主要内容

本课题主要研究内容可分为以下几部分：

首先，从理论上对无偏消旋镜的光学原理进行分析，一方面通过矩阵理论对无偏消旋系统的消旋原理进行分析，同时对望远镜的像旋来源及像旋速度进行分析，得出无偏消旋系统速度为像旋速度二分之一时即可消除像面旋转的结论，另一方面对无偏消旋镜消偏振原理进行分析和论述，得出当系统入射角为 36.3° 时，系统作用可视为单位穆勒矩阵可实现消除附加仪器偏振的目的，从理论角度验证无偏消旋系统光学性能可以满足 AIMS 望远镜的设计要求；

其次，对无偏消旋镜的光束偏移问题进行讨论，对无偏消旋系统的内部光路进行几何分析，考虑实际镜片厚度对光线传播的影响，分析各平面镜位置相应的变化情况，讨论得出系统平面镜位置变化量与镜片厚度的关系，形成对应的光束偏移补偿方案；

再次，通过对无偏消旋系统进行装调需求分析，提出针对无偏消旋系统的不规则结构设计适配、有效的双光路自准直辅助装调方案，并对其中的光轴与系统旋转轴对准、无偏消旋系统各平面镜的快速定位及精调过程的 Matlab 仿真分析进行详细论述。

最后，对无偏消旋系统的原理样机进行实验室装调，并通过穆勒矩阵偏振仪对无偏消旋系统进行偏振性能测试，形成对无偏消旋系统实际工作性能的基本量化指标，为无偏消旋系统的实际应用提供数据参考。

第 2 章 无偏消旋系统的基本原理

2.1 无偏消旋系统的消旋原理

AIMS 望远镜为地平式望远镜, 且其在跟踪过程中存在折轴反射镜相对运动, 因此系统中会存在物方视场旋转及像方视场旋转。物理消旋会使望远镜像面结构更加复杂, 提高研制成本, 不是理想的消旋方案, 电子消旋会在长时间积分时带来时间延迟, 由于 AIMS 望远镜系统中重要的焦面仪器傅里叶光谱仪需要在工作时采集一系列积分时间内的图像再进行运算, 电子消旋同样不适合 AIMS 望远镜, 光学消旋装置中, 折射式的消旋方式不能满足 AIMS 望远镜中红外波段的覆盖范围, 而最常用的结构简单的反射式消旋系统 K 镜则会带来一定的附加仪器偏振, 因此, 选择在消除消旋基础上可以最大限度减小附加仪器偏振的无偏消旋镜作为 AIMS 望远镜的消像旋方案。

2.1.1 望远镜的像旋原理分析

2.1.1.1 物方视场旋旋分析

由于地球的自转, 天体目标相对地球会存在旋转运动。赤道式望远镜会通过自身沿极轴的匀速运动补偿此旋转, 但地平式望远镜的方位轴与地球极轴存在夹角, 会令望远镜在跟踪天体过程中带来额外的焦面图像旋转^{[13][14][15][16][17]}。

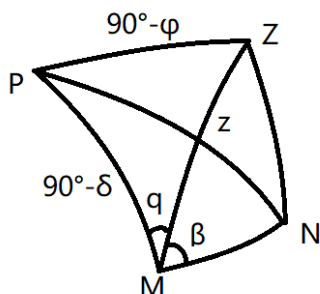


图 2.1 天文三角形

当望远镜对准某一中心点 M 进行跟踪, 该中心点 M 始终处于焦面中心位置, 与其相距 d 的点 N 会在焦面上围绕 M 旋转。 M 、 N 、北天极 P 、天顶 Z 构成如

图 2.1 所示几何关系, 其中点 M 的天顶距为 z , 当地的地理纬度为 φ , 赤纬为 δ , A 为方位角, 角 $\beta = \angle ZMN$, 角 $q = \angle PMZ$, 角 $\varepsilon = \angle PMN$, 令顺时针角度为正, 有关系:

$$\beta = \varepsilon - q, \quad \dots (2.1)$$

在天球运动过程中, ε 不变, 因此有:

$$d\beta = \pm dq, \quad \dots (2.2)$$

在球面三角形 PMZ 中,

$$\sin q \cos \delta = -\sin A \cos \varphi, \quad \dots (2.3)$$

$$\cos \delta \cos q = \sin \varphi \sin z - \cos \varphi \cos z \cos A, \quad \dots (2.4)$$

在地平式中有^[18]:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\sin \varphi \sin z - \cos \varphi \cos z \cos A}{\sin z} \cdot \frac{dH}{dt} = \frac{\cos q \cos \delta}{\sin z} \cdot \frac{dH}{dt}, \quad \dots (2.5)$$

对式 (2.3) 微分:

$$\cos \delta \cos q \frac{dq}{dt} = -\cos \varphi \cos A \frac{dA}{dt}, \quad \dots (2.6)$$

则

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{\cos A \cos \varphi}{\sin z} \cdot \omega, \quad \dots (2.7)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = -\frac{dq}{dt} = \frac{\cos A \cos \varphi}{\sin z} \cdot \omega, \quad \dots (2.8)$$

ω 为周日视运动速度, $\frac{d\beta}{dt}$ 的绝对值为焦面上视场旋转的速率, 既由地平式跟踪架结构带来的物方视场旋转量为 $\frac{d\beta}{dt}$, 由于规定顺时针角度为正, 则当方位角为 $0-90^\circ$ 和 $270^\circ-360^\circ$ 时, 物方视场旋转为顺时针旋转, 方位角为 $90^\circ-270^\circ$ 时物方视场旋转为逆时针旋转。

2.1.1.2 像方视场旋转分析

多块平面反射镜组合后的物象方向关系取决于各块平面镜的位置以及它们之间主截面的相对关系。当平面反射镜的主截面由于光学系统运动而存在相对运动时, 像空间也会产生旋转。在望远镜系统中, 这种由折轴反射镜的相对运动而产生的像面旋转称为像方视场旋转。

AIMS 光学设计如图 2.2 所示, AIMS 望远镜为离轴式望远镜, M3、M4、M5、M6 为折轴镜系统。折轴系统的目的是使光路在传播过程中可以与望远镜方位轴和高度轴分别同轴, 通过在望远镜跟踪过程中转动某折轴镜及与其相固定的望远镜机架结构, 以实现为天体目标的追踪。AIMS 的折轴系统中 M4、M5 的主光线与高度轴旋转轴同轴, 经 M6 反射至库德焦点的光束主光线与方位轴旋转轴同轴, 其中 M3 和 M6 两个反射镜可自动调节光轴。

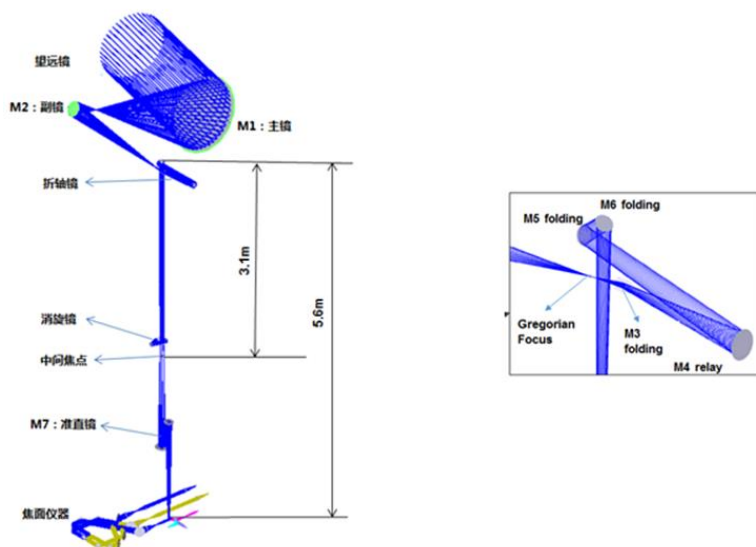


图 2.2 AIMS 望远镜光学设计图

为避免 M3 遮挡后续光路, M3 镜有一定倾斜, M4、M5、M6 也有一定倾斜角度。若用矩阵理论分析通过对四块平面镜后的像面旋转, 需对每一块平面镜进行法向量计算, 需对存在相对运动的 M3、M6 镜的旋转矩阵进行计算, 并计算得出的物像旋转量与方位角 A 和天顶距 Z 的关系, 将此关系式微分可得到像方视场旋转的速率。但由于各平面镜位置均有非整数倾斜的角度, 函数关系相对复杂。而望远镜跟踪过程中, 当方位角或天顶距发生改变时, 像面是同步变化的, 即当天顶距变化 Δz 时, 平面镜 M3 的主截面相对其后的 M4-M6 的主截面同步旋转 Δz , 最终在像面上的也是旋转 Δz , 同理, 当方位角变化 ΔA 时, M6 主截面相对后光学系统旋转 ΔA , 像面旋转 ΔA , 因此只需要根据不同的天区来判断方位角和天顶距的变化量是叠加还是相消^[13]。故将像方视场旋转速度记为 $\frac{d\alpha}{dt}$, 顺时针旋转为正, 逆时针旋转为负。

则在消旋系统前望远镜整体的视场旋转为

$$u = \frac{d\beta}{dt} + \frac{d\alpha}{dt}. \quad \dots (2.9)$$

2.1.2 无偏消旋镜光学结构

无偏消旋镜属于反射式的光学消旋装置，是由传统的光学消旋装置 K 镜经过偏振性能优化后形成。五镜无偏消旋镜由五块平面反射镜（5-M1、M2、M3、M4、M5）组成^[10]，如图（2.3）所示，其中 M1、M5 由同一块反射镜双面镀膜实现，平面反射镜 M2、M3、M4 的法向量位于同一平面 P1，且镜面两两之间的夹角均为 60 度。垂直向下传播的入射光经 M1 将反射到 P1 面，通过反射镜 M2、M3、M4 将光束折转一周，再经 M5 将 P1 面内的光束折转回原垂直向下传播的光路，出射光与入射光传播方向不变。为使结构保持一定对称性，反射镜 M2、M3、M4 构成等边三角形，即使相邻两镜面之间光程相等，各镜面入射角均为 30 度。

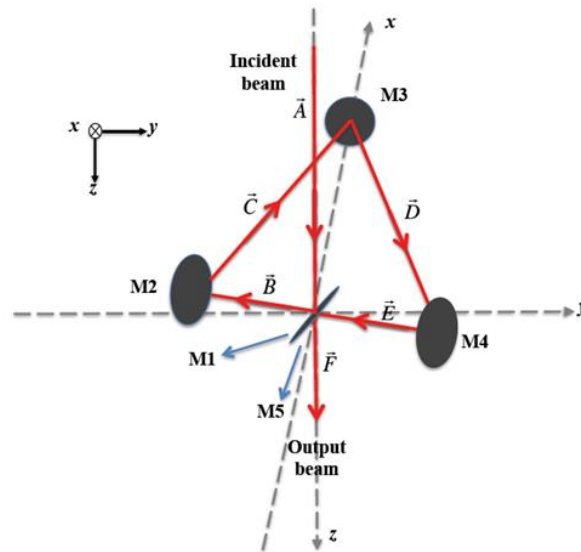


图 2.3 无偏消旋镜的示意图

以 M1 镜面中心为原点建立直角坐标系，如图（2.3）所示，垂直纸面向里为 x 轴正向，水平向右为 y 轴正向，竖直向下为 z 轴正向。假设该光学系统的入射光矢量为 $[0 \ 0 \ 1]^T$ ，其绕 x, y, z 轴旋转 φ 角的旋转矩阵分别为：

$$\mathbf{R}_x(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad \dots (2.10)$$

$$\mathbf{R}_y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad \dots (2.11)$$

$$\mathbf{R}_z(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad \dots (2.12)$$

在图 (2.3) 所示坐标系下, 设 M1 法向量与 z 轴夹角为 θ , 即入射光与 M1 法向量夹角为 θ , 则 M1 至 M5 各平面镜的法向量可表示为:

$$\mathbf{N}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin \theta \\ -\cos \theta \end{bmatrix} = -\mathbf{N}_5, \mathbf{N}_2 = \mathbf{R}_x\left(\frac{\pi}{2} - 2\theta\right) \begin{bmatrix} \sin \frac{\pi}{6} \\ \cos \frac{\pi}{6} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \dots (2.13)$$

$$\mathbf{N}_3 = \mathbf{R}_x\left(\frac{\pi}{2} - 2\theta\right) \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{N}_4 = \mathbf{R}_x\left(\frac{\pi}{2} - 2\theta\right) \begin{bmatrix} \sin \frac{\pi}{6} \\ -\cos \frac{\pi}{6} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad \dots (2.14)$$

若 \mathbf{A} 为入射光矢量, \mathbf{A}' 为入射光经反射镜反射后的出射光矢量, 根据反射定理矢量形式有^[19]:

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A} - 2(\mathbf{A} \cdot \mathbf{N})\mathbf{N}, \quad \dots (2.15)$$

则由 \mathbf{A} 变换到 \mathbf{A}' 的反射镜变换矩阵 \mathbf{T} 为:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_xN_z & -2N_yN_z & 1 - 2N_z^2 \end{bmatrix}. \quad \dots (2.16)$$

其中, \mathbf{N} 为任意镜面的法向量 $[N_x \ N_y \ N_z]^T$, 带入各镜面法向量 \mathbf{N}_1 、 \mathbf{N}_2 、

\mathbf{N}_3 、 \mathbf{N}_4 、 \mathbf{N}_5 , 求出各镜面的变换矩阵 \mathbf{T}_1 、 \mathbf{T}_2 、 \mathbf{T}_3 、 \mathbf{T}_4 、 \mathbf{T}_5 。则当入射光矢量绕 z

轴旋转 σ 角时，五镜无偏消旋镜绕 z 轴同方向旋转 $\sigma/2$ 角时，出射光矢量为：

$$\mathbf{A}' = \mathbf{R}_z(\sigma/2)\mathbf{T}_5\mathbf{T}_4\mathbf{T}_3\mathbf{T}_2\mathbf{T}_1\mathbf{R}_z(-\sigma/2)\mathbf{R}_z(\sigma)\mathbf{A} = [0 \ 0 \ 1]^T. \quad \dots (2.17)$$

出射光矢量与入射光矢量相同，即此时无偏消旋镜可实现消除像旋的效果。

在 AIMS 望远镜的光学系统设计中，五镜无偏消旋镜位于折轴系统之后，中间焦点前，消旋系统前的光路为物方视场旋转和像方视场旋转两种像旋的叠加效果，为实现系统消旋，需要使消旋系统以望远镜整体视场旋转的一半 $1/2u$ 进行旋转。

2.2 无偏消旋镜的消偏原理

AIMS 望远镜是对中红外太阳磁场进行精密测量的观测系统，基于塞曼效应的磁场测量原理使得系统的磁场精密测量转化为偏振精密测量，对望远镜系统提出了仪器偏振较小或易于定标的要求。无偏消旋镜可满足系统消除偏振同时减小仪器偏振的要求，下面从入射光经过无偏消旋镜偏振态的变化对无偏消旋镜的消偏原理进行分析。

斯托克斯在 1852 年提出用四个参量来描述光波的偏振态和强度，称为斯托克斯（Stokes）矢量^[20]，其可以用于描述完全偏振光、部分偏振光和完全非偏振光。斯托克斯矢量是一个 4×1 的矩阵， $S = [I \ Q \ U \ V]^T$ ，参量 I 表示光强信息，参量 Q 和参量 U 表示线偏振的方向和强度，参量 V 表示圆偏振分量。穆勒（Mueller）矩阵 M 是一个 4×4 阶的拥有 16 个参量的实数矩阵，如式（2.18），通常它用来描述入射光经过光学系统后偏振态的变化，如式（2.19）：

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix}, \quad \dots (2.18)$$

$$S' = MS \quad \dots (2.19)$$

假设系统的一束入射光为任意部分偏振光，可以用斯托克斯矢量描述为 $S_{in} = [I \ Q \ U \ V]^T$ ， ϕ 为入射光偏振面与某任意平面镜入射面的夹角， $R(\phi)$ 是当入射光偏振面与平面镜入射面夹角为 ϕ 时的旋转矩阵，如式（2.20）-（2.22）所示：

$$\mathbf{R}(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\phi & -\sin 2\phi & 0 \\ 0 & \sin 2\phi & \cos 2\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \dots (2.21)$$

则该入射光在经过该平面反射镜反射后的出射光偏振态 S_o 可用式 (2.21) 表示:

$$S_o = \mathbf{R}(-\phi) \mathbf{M}_i \mathbf{R}(-\phi) S_{in}, \quad \dots (2.21)$$

M_i 为反射镜的本征 Mueller 矩阵 ($\phi = 0$), 在五镜无偏消旋镜中 $i = 1, 2, 3, 4, 5$, M_i 可由 (2.22) 式描述:

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} 1 & \frac{X^2-1}{X^2+1} & 0 & 0 \\ \frac{X^2-1}{X^2+1} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2X}{X^2+1} \cos \delta & \frac{2X}{X^2+1} \sin \delta \\ 0 & 0 & -\frac{2X}{X^2+1} \sin \delta & \frac{2X}{X^2+1} \cos \delta \end{bmatrix}. \quad \dots (2.22)$$

(2.22) 式中 δ 为 s 分量、p 分量的相位差, X 为 s 分量、p 分量的反射率绝对值之比, n 为光学材料折射率。 δ 、 X 可由 (2.23) — (2.26) 式计算^[21]:

$$r_s = \left(\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} \right) / \left(\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} \right), \quad \dots (2.23)$$

$$r_p = \left(n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} \right) / \left(n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} \right), \quad \dots (2.24)$$

$$X = |r_s| / |r_p|, \quad \dots (2.25)$$

$$\delta = \arctan \left[I_m(r_s) / R_e(r_s) \right] - \arctan \left[I_m(r_p) / R_e(r_p) \right], \quad \dots (2.26)$$

则经过入射光经过无偏消旋镜后的出射光 Stokes 矢量可表示为:

$$S_o = \mathbf{R}(-\phi_5) \mathbf{M}_5 \mathbf{R}(-\phi_5) \mathbf{R}(-\phi_4) \mathbf{M}_4 \mathbf{R}(-\phi_4) \mathbf{R}(-\phi_3) \mathbf{M}_3 \mathbf{R}(-\phi_3) \cdot \dots (2.27)$$

$$\mathbf{R}(-\phi_2) \mathbf{M}_2 \mathbf{R}(-\phi_2) \mathbf{R}(-\phi_1) \mathbf{M}_1 \mathbf{R}(-\phi_1) S_{in} = \mathbf{M}_{all} S_{in}.$$

假设 M_1 的入射面与入射光偏振面重合, 易知 $\phi_1 = \phi_5 = 0$ 和 $\phi_2 = \phi_3 = \phi_4 = \frac{\pi}{2}$, 则无偏消旋镜总的 Mueller 矩阵 M_{all} 为:

$$\mathbf{M}_{\text{all}} = \mathbf{M}_5 \mathbf{R}\left(-\frac{\pi}{2}\right) \mathbf{M}_4 \mathbf{M}_3 \mathbf{M}_2 \mathbf{R}\left(-\frac{\pi}{2}\right) \mathbf{M}_1. \quad \dots (2.28)$$

假设反射镜膜系为铝膜，在入射光波长为 $0.525\mu\text{m}$ 、 $1.082\mu\text{m}$ 、 $12.00\mu\text{m}$ 时，折射率分别为 $n = 0.91 - 6.34i$ 、 $1.36 - 10.64i$ 、 $16.68 - 70.90i$ 。将不同折射率带入总 Mueller 矩阵计算公式，结果显示，当入射角 θ 为 36.3° 时， \mathbf{M}_{all} 可视为单位矩阵，此时由 (2.27) 式可知出射光和入射光的 Stokes 矢量相同，即无偏消旋镜可以实现消除仪器偏振的效果。

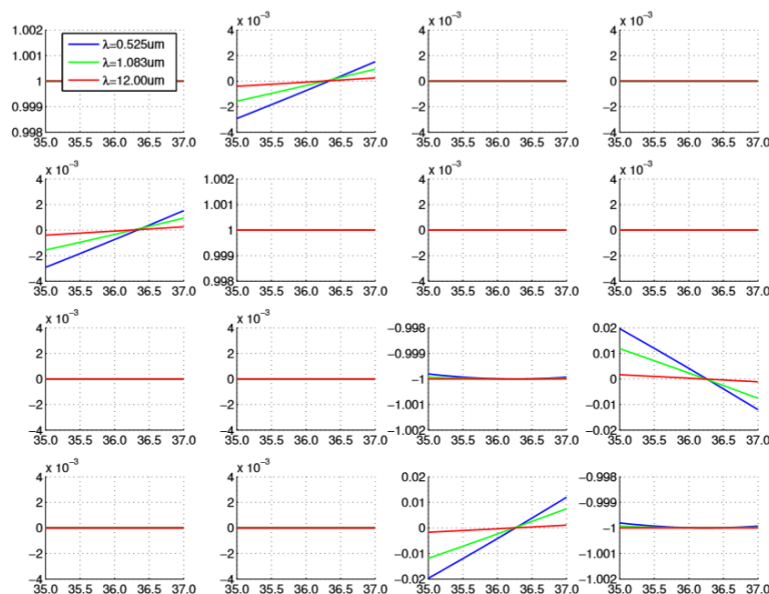


图 2.4 系统穆勒矩阵的仿真结果图

2.3 光束偏移问题及补偿方案

在五镜无偏消旋镜的光学设计中，反射镜 M1 和反射镜 M5 实际上是通过一片反射镜进行双面镀膜实现的，在忽略反射镜 M1、M5 厚度的理想情况下，出射光可实现与入射光同方向出射。但由于实际的反射镜有一定厚度，使 M4 出射光束在未达到理想位置时提前到达 M5，导致 M5 出射光束会产生一定偏移，如图 2.5 所示，因此，系统出射光与入射光束方向不再重合，出射光相对入射光存在一段向右平移的误差，造成主光线位置偏移。在望远镜跟踪过程中，由于消旋系统的转动，主光线的偏移会令探测目标在像面上画圆。因此，需要采取一定措施校正此光束偏移以保证后续光学系统的正常工作。

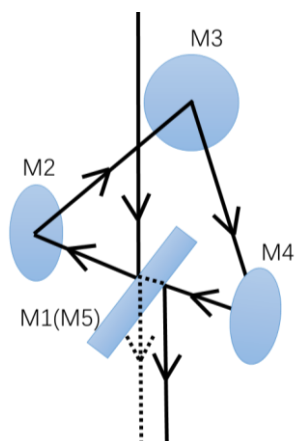


图 2.5 光束偏移

分析五镜系统的光学设计, 尝试通过调整某个或某几个平面镜的位置使来自前光学系统的光经过消旋系统后传播方向不变, 且光学系统主光线不发生偏移。由于为保证无偏消旋系统的消偏振功能实现, 反射镜 M1 的入射角保持 36.3° 不变, 因此需要固定反射镜 M1, 由于反射镜 M1 和 M5 为同一块反射镜双面镀膜实现, 则反射镜 M5 位置也被固定。

反射镜 M5 的入射光束的入射角不变, 光束整体向下平移, M4 中心位置下移, 为减小装调难度, 使反射镜 M3 中心位置保持不变, 则根据反射定律可知, 反射镜 M4 的入射光束也就是反射镜 M3 的出射光束角度发生变化, 呈向下倾斜趋势, 对应的平面镜 M3、M4 的法向量发生旋转, 因此可通过对反射镜 M3、反射镜 M4 的旋转及反射镜 M4 的平移, 来校正无偏消旋镜出射光束的偏移, 调整后的位置如图 2.6 中蓝色路径所示:

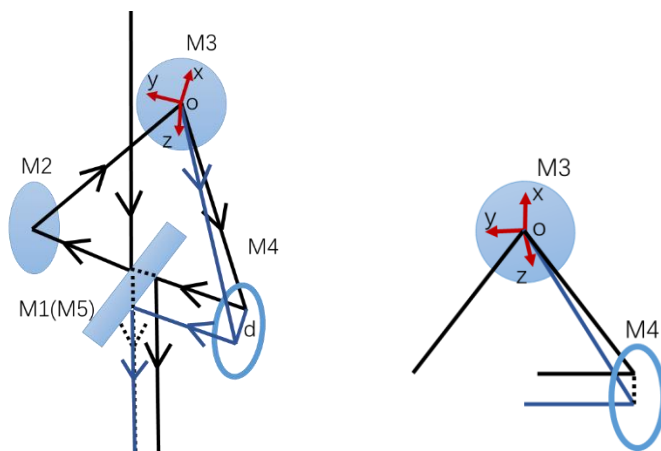


图 2.6 校正光束偏移

以 M3 中心为原点 o 建立直角坐标系, x 轴垂直于调整前平面镜 M2、M3、M4 的入射面, 向上为 x 轴正向, y 轴平行于调整前平面镜 M2、M3、M4 的入射面, 向左为 y 轴正向, z 轴垂直纸面, 向外为 z 轴正向。定义 xoy 面为竖直面 (调整前反射镜 M3 所在平面), yoz 面为水平面。调整前各反射镜中心连线相等 (主光线光程相同), 设为 L , M1 的入射角为 i 、反射镜 M1 厚度为 t , M4 中心平移距离为 d , 有:

$$d = \frac{t}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - i\right)} \cdot \sin 2i, \quad \dots (2.29)$$

观察反射镜 M3、M4 的入射光和出射光, 为满足上述调整要求, M3 出射光需要向下偏移, 调整后的 M3 出射光在水平面的投影位置不变, 在竖直面投影偏移距离 d 。由于光路可逆, M4 的入射光相对于出射光的变化与 M3 出射光相对于入射光的变化相似, 入射光在水平面的投影位置不变, 在竖直面投影偏移距离 d , 不同的是偏移方向向上。因此, M3、M4 偏转角度相同, 方向相反, 对 M3 进行分析。如图 2.7 所示:

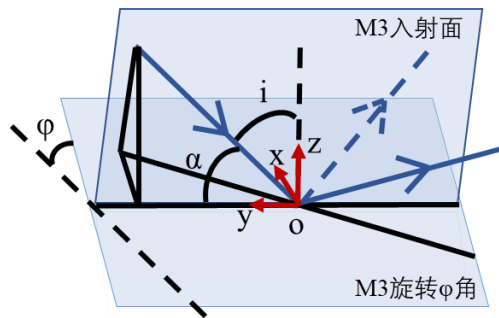


图 2.7 分析 M3 入射面变化情况

当 M3 绕 x 轴旋转 θ 角时, 入射角变化量为 θ , 出射角变化量为 2θ , 出射光在水平面的投影发生偏移, 在竖直面投影不变, 即出射光处于水平面内;

当 M3 绕 y 轴旋转 ϕ 角时, 入射角变为

$$\frac{\pi}{2} - \arcsin(\sin \alpha \cos \phi), \quad \dots (2.30)$$

其中:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - i, \quad \dots (2.31)$$

入射面旋转角度为:

$$\arccos \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \cos^2 \varphi}}, \quad \dots (2.32)$$

出射光在竖直面及水平面的投影均会发生偏移,为使出射光在水平面的投影位置不变,在竖直面投影偏移距离 d ,可以通过旋转 M3、M4 使 M3 出射光在水平面的投影位置不变,在竖直面投影偏移距离 d 。令 M3 绕 y 轴 φ 旋转得到竖直偏移,从 y 轴正向观察,顺时针旋转,绕 x 轴旋转 θ 补偿水平偏移,从 x 轴正向观察,逆时针旋转, M4 的旋转量同 M3,方向相反,根据入射光和出射光的位置关系等联立方程,得到 M3、M4 绕 x 、 y 轴旋转角度 θ 、 φ 与光程 L (M2-M3-M4 之间光程相同)、光束偏移距离 d 、光束与镜面夹角 α (入射角余角) 之间的关系:

$$\frac{\sin(i+\theta)}{2 \cos(i+\theta) \cdot \cos^2 \varphi - \cos(i+\theta)} = \tan i, \quad \dots (2.33)$$

$$\frac{L}{d} \cos(i+\theta) \sin 2\varphi = 1. \quad \dots (2.34)$$

2.4 本章小结

本章节对无偏消旋系统的基本原理进行了详细分析,主要分为无偏消旋系统的消旋原理、无偏消旋系统的消旋原理和无偏消旋系统光束偏移问题及补偿三个部分。在消旋原理介绍中,分析了地平式望远镜系统中物方视场旋转和像方视场旋转的来源及旋转速度,并利用矩阵理论推到证明了对无偏消旋系统消旋功能;在消偏原理介绍中,对无偏消旋系统偏振性能分析,验证其能在特定入射角的情况下最大程度减小仪器附加偏振;最后对无偏消旋系统的光束偏移问题进行分析,并得到 M3、M4 镜旋转量与 M1 镜厚度的关系。

第3章 无偏消旋系统的装调方案

光学系统的性能在设计阶段通常都会优化到较高水平,不管是光学系统的成像质量和位置精度,都会在进行光学设计时达到十分理想的效果,但事实上,许多光学系统的实际工作性能和原始设计指标会存在一定偏差,实际情况和理想情况的偏差主要来源于将设计完成的光学系统进行加工、装调、检测的各个环节中,加工的误差基本上受限于目前加工仪器的精度水平,因此,在光学系统的装调和性能检测过程对光学系统实际的工作性能会有较大影响^{[22][23]}。高效、高精度的装调和检测过程可以使光学系统的实际工作性能最大程度的发挥出其系统光学设计的优越性。

对光学系统进行装调的关键是获取光学系统的失调量^[24],通过对系统失调量的分析得到系统光学元件的失调状态,进而进行相关调试,优化光学系统性能。一般来说,所有的光学系统几乎都存在像差,像差的存在会使像面上的成像形状、大小发生变化,通过探测像面的信息并进行相应的数学分析可得到光学系统的缺陷信息。因此,获取系统失调量即进行系统的像质检测,在光学元件加工以及进行系统装调时常采用的几种检测方法有:星点法^[25]、刀口剪影法^[26]、哈特曼法^{[27][28]}、剪切干涉法等。但平面镜是理想的不会产生像差的光学元件,可以实现理想成像,AIMS的无偏消旋系统就是一个全部由光学平面反射镜构成的光学系统,虽然由于平面镜表面的一些加工误差,也会使平面镜光学系统存在一定像差,但其主要装调目标是使望远镜系统光线经过无偏消旋系统后传播方向不改变,即像点位置不变,且在消旋过程下,无偏消旋系统工作状态下不断旋转时仍不改变望远镜系统光线的传播方向。基于这一基本要求,为无偏消旋系统设计装调方案。

一些传统的直接装调方法一般先将光学系统整体组装起来,然后根据一定方法对像面进行检测。大多数情况下较为依赖装调人员的工作经验^[29],对一些精度要求不高的系统,通常可以满足设计要求,但是传统的直接装调方法存在较大的盲目性,没有明确的指导方向,使装调周期过长,耗费时间和精力,不可重复性高,很难形成技术理论指导实际科研和工作。考虑为五镜无偏消旋系统设计一套

有一定装调规律、阶段性装调目标明确、可重复性强、装调周期短的系统装调方案。

由于无偏消旋镜的结构相对不规则,如果完全凭借经验依据像面轨迹盲目调节无偏消旋镜,整个装调过程耗时久、效率低。分析无偏消旋系统在旋转工作状态下实现理想消旋效果的前提,需要调节使望远镜系统光轴、无偏消旋系统的光轴、无偏消旋系统的旋转轴三者在一定误差允许范围内完全重合,即三轴相互平行且同心。设计双光路自准直调节方案用于无偏消旋镜装调^{[30][31]},其光路原理图如图 3.1 所示:

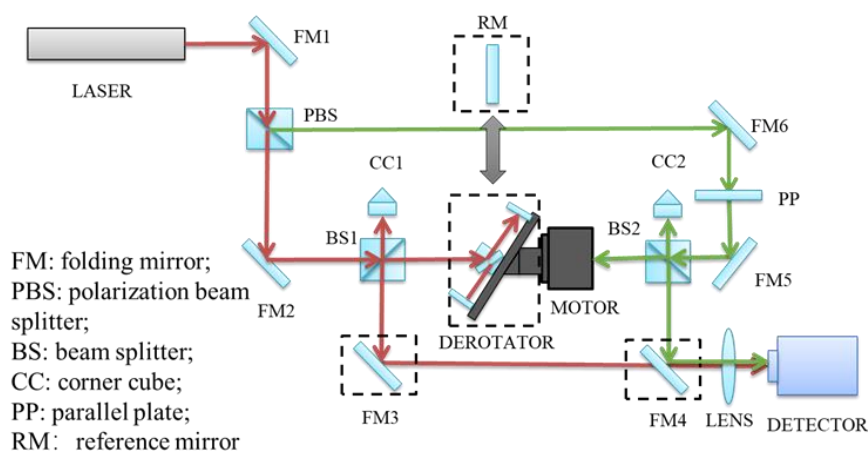


图 3.1 无偏消旋镜的装调方案光路图

系统装调过程可大致分为三个阶段:

- 1、确立无偏消旋系统基准轴: 通过分别调节经过偏振分束镜 (PBS) 分束的透射、反射两光路光轴 (系统光轴) 与电动转台旋转轴重合^[32];
- 2、无偏消旋系统反射镜位置粗调: 调节无偏消旋系统镜面位置使透射光和反射光在无偏消旋系统的各镜面上均能重合,从而确定各镜面的基础位置,实现各个反射镜的初步定位;
- 3、无偏消旋系统反射镜位置精调: 根据像面情况进行无偏消旋系统的各镜面位置精调,利用 MATLAB 仿真分析得到像面变化情况对应的系统失调方向,根据仿真分析结果指导精细调节过程^{[33][34]}。

过程 1 可实现系统光轴和无偏消旋系统旋转轴重合,过程 2 和过程 3 实现无偏消旋系统与无偏消旋系统旋转轴和系统光轴的重合。

值得一提的是，由于系统中存在光线传播的闭环，会使透射光路方向传播和反射光路方向传播的光束发生干扰，影响光学系统的稳定性，闭环的光线在传播过程中容易回射到系统光源激光器中从而影响激光器的稳定工作。因此，需要借助光学元件偏振分光棱镜（PBS），实现透射光路方向传播和反射光路方向传播的光束的隔离。偏振分光棱镜由两个直角棱镜组成，介质分束膜镀在其中一个棱镜的斜面上，两个直角棱镜通过光学胶粘合在一起，从任意一个抛光面入射的光都可以被分离成 s 偏振光和 p 偏振光，经介质分束膜反射的是 s 光，透射的是 p 光。经系统回转一周，s 偏振光和 p 偏振光再次回到偏振分光棱镜处时，s 偏振光反射，p 偏振光透射，可以避免系统光线回射到激光器中产生扰动，如图 3.2 所示：

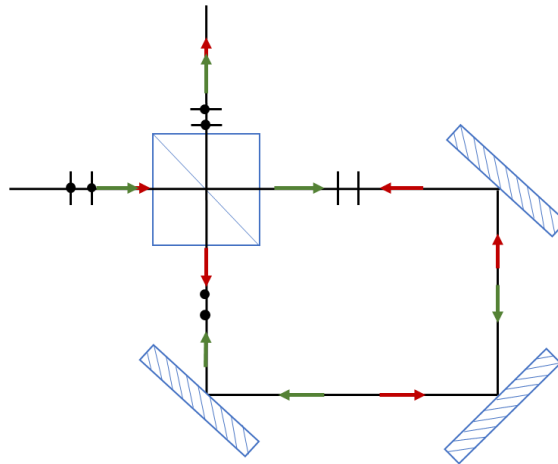


图 3.2 偏振分束棱镜的作用

3.1 确立无偏消旋系统基准轴

建立基准轴这一部分的目标是使通过偏振分光棱镜分束的前后光路的光轴均能实现与电动转台旋转轴平行且同心。系统装调精度很大程度上取决于旋转无偏消旋系统的转台精度，高精密转台通常体积和质量较大，其微小位移的调节相较光路的调整更加复杂，因此选取电动转台旋转轴为系统装调基准轴。

根据图 3.1 所示，以透射光路为例，调节光路的光轴与电机旋转轴重合的过程将分为以下三个步骤：

1) 寻找电动转台旋转轴：在电动转台上安装具有二维调节功能的参考平面镜（RM），使用透射光路 $\text{LASER} \rightarrow \text{FM1} \rightarrow \text{PBS} \rightarrow \text{FM2} \rightarrow \text{BS1} \rightarrow \text{RM} \rightarrow \text{BS1} \rightarrow \text{FM3}$

→LENS→ DETECTOR 进行调节，利用探测器实时记录电动转台旋转过程中来自参考平面镜反射光斑的运动轨迹，调节参考平面镜使电动转台转动一周时参考平面镜反射光斑在探测器上画圆直径最小，从而实现参考平面镜法线与电动转台旋转轴平行^{[35][36]}，如图 3.3 所示。此时，参考平面镜法线即为电动转台旋转轴；

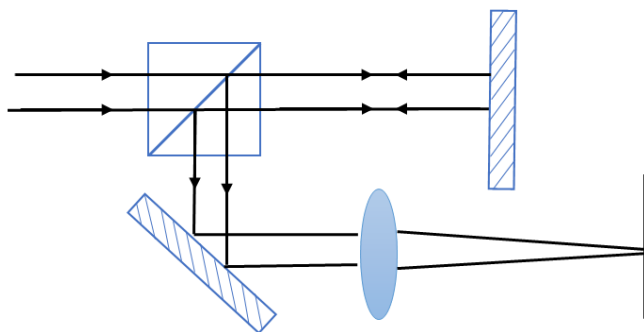


图 3.3 探测参考平面镜反射光轨迹

2) 光轴与电动转台旋转轴的平行调节：利用透射光路 LASER→FM1→PBS→FM2→BS1→CC1→BS1→FM3→LENS→DETECTOR 进行调节，角锥棱镜可以将入射光线反射到原来的入射方向，如图 3.4 所示，因此角锥棱镜 1 (CC1) 的回射光可做为光轴参考位置^[37]。探测器上可以探测到作为光轴参考的角锥棱镜的反射光及作为电动转台旋转轴位置参考的平面镜反射光，如图 3.5 所示，调节折轴反射镜 FM2 使角锥棱镜的回射光与参考平面镜反射光在探测器上间距最小，此时光轴与参考平面镜法线平行，从而间接实现系统光轴与电动转台旋转轴平行；

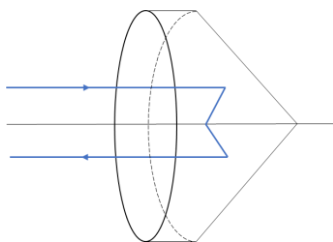


图 3.4 角锥棱镜原理图

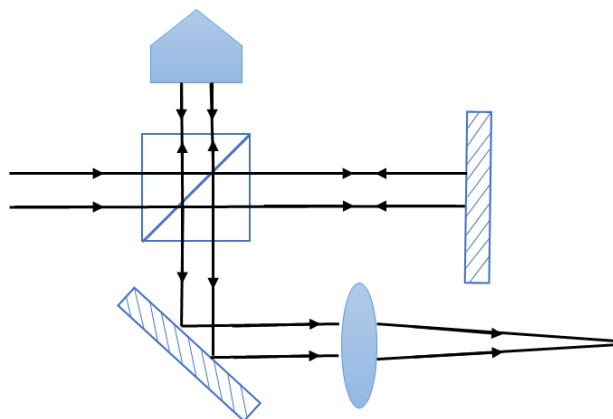


图 3.5 调节光轴与电动转台旋转轴平行

3) 光轴与电动转台旋转轴的同心调节：移除参考平面镜，在电动转台上安装探测器，利用透射光路 $\text{LASER} \rightarrow \text{FM1} \rightarrow \text{PBS} \rightarrow \text{FM2} \rightarrow \text{BS1} \rightarrow \text{DETECTOR}$ 进行调节，调节激光器的二维位移平台，使电动转台旋转一周时光斑轨迹在探测器上画圆直径最小，实现光轴与电动转台旋转轴的同心，如图 3.6 所示：

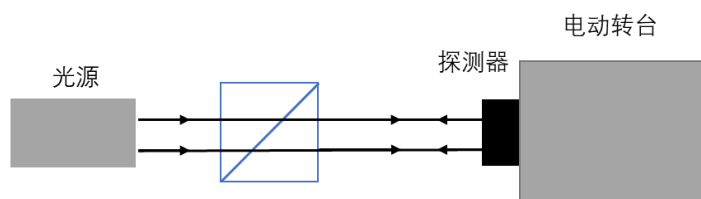


图 3.6 调节光轴与电动转台旋转轴同心

经此三个步骤的调节，基本实现系统光轴经偏振分束棱镜分束后的透射光路与无偏消旋系统的旋转轴的重合。反射光路光轴与系统旋转轴重合的调节方法与上述三个步骤基本相同：调节参考平面镜（反向放置）使其法线与电动转台旋转轴平行；调节折轴反射镜 FM5 使反射光路光轴与电动转台旋转轴平行。唯一不同之处在于，在光轴与电动转台旋转轴的同心调节过程中，由于激光器位置在透射光路调整过程中已经被固定，因此在反射光路中增加了平行平板(PP)，通过三维调节平行平板产生的光线平移量替换二维调节激光器位置产生的平移量，如图 3.7 所示，从而实现光轴与电动转台旋转轴的同心调节。

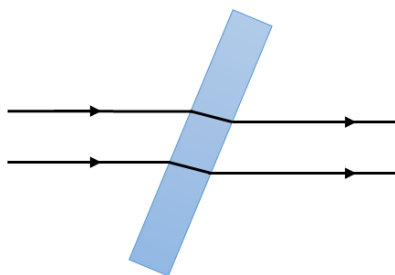


图 3.7 光线通过平行平板产生位移

3.2 无偏消旋系统位置粗调

在完成透射光路、反射光路分别与系统旋转轴重合后，可认为系统中透射光路与反射光路已经基本同轴，此时，将无偏消旋镜安装到电动转台上，可以在无偏消旋系统的各个反射镜面上观察到来自透射光路和反射光路的两个光斑，不断调整无偏消旋系统各个平面反射镜使两个光斑在各个镜面上基本保持重合，以实现各平面反射镜位置的初步定位。

调节过程中，观察各镜面上的光斑位置情况，若 M4 上两光斑间距较大时，可调节平面反射镜 M2、M3 来调整光斑位置，M2 距 M4 的光程为 M3 距 M4 光程的 2 倍，因此调节 M2 可较为明显的感受到 M4 上光斑位置的移动，即 M4 上的光斑位置对 M2 的调节量较为敏感。反之同理，即沿着光路传播方向，后光路镜面上两光斑的位置对距离越远的平面反射镜调节量越敏感。由于调节任意一面反射镜的位置都会同时影响透射光路和反射光路的传播，会使来自透射光路和反射光路的光斑同时移动，因此，调节过程中注意随时观察各镜面光斑位置情况，不断进行微量调节。

当透射光路和反射光路的光斑在各镜面上基本重合时，无偏消旋镜的基础位置已基本确定，完成无偏消旋系统各镜面的粗调，为下一步各镜面位置的精细调节做好准备。

3.3 无偏消旋系统位置精调及仿真分析

上述过程可以快速确定无偏消旋系统各镜面的基础位置，但受限于光斑大小、人眼分辨能力、距离等一系列客观条件，使得装调精度有限，因此需选择透射或

者反射光路进行下一步精细调节。但无偏消旋镜一共有 12 个转动自由度，如何减少自由参数以有效的对无偏消旋镜进行装调是精调过程必须考虑的关键问题。因此，考虑通过 MATLAB 仿真分析探索装调规律以指导实验室装调。

侯俊峰等人无偏消旋镜的设计表明，无偏消旋镜受 M1（同 M5）的影响较小，因此，精调过程中不再调节 M1（M5），即误差来源项变为为 M2、M3、M4 以及系统光轴。仿真分析中，选用与图 2.3 相同的坐标系， z 轴为装调光路的光轴，即入射光。假设 M2、M3、M4 绕 x 、 y 轴的旋转角度误差分别为 $\alpha_2, \beta_2; \alpha_3, \beta_3; \alpha_4, \beta_4$ ，其各自法向量由 (2.13) - (2.14) 式变为 (3.1) - (3.3) 式：

$$N_{c2} = R_x\left(\frac{\pi}{2} - 2\theta\right) R_y(\beta_2) R_x(\alpha_2) R_x\left(2\theta - \frac{\pi}{2}\right) \begin{bmatrix} \sin \frac{\pi}{6} \\ \cos \frac{\pi}{6} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \dots (3.1)$$

$$N_{c3} = R_x\left(\frac{\pi}{2} - 2\theta\right) R_y(\beta_3) R_x(\alpha_3) R_x\left(2\theta - \frac{\pi}{2}\right) \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \dots (3.2)$$

$$N_{c4} = R_x\left(\frac{\pi}{2} - 2\theta\right) R_y(\beta_4) R_x(\alpha_4) R_x\left(2\theta - \frac{\pi}{2}\right) \begin{bmatrix} \sin \frac{\pi}{6} \\ -\cos \frac{\pi}{6} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad \dots (3.3)$$

假设入射光在 xoz 平面内绕 y 轴旋转的角度为 γ ，可表述为：

$$A_c = [\sin \gamma \quad 0 \quad \cos \gamma]. \quad \dots (3.4)$$

通过法向量 N_{c2} 、 N_{c3} 、 N_{c4} 计算得到变换矩阵变为 T_{c2} 、 T_{c3} 、 T_{c4} ，则出射光矢量变为：

$$A_c' = R_z(\sigma/2) T_5 T_{c4} T_{c3} T_{c2} T_1 R_z(-\sigma/2) R_z(\sigma) A_c. \quad \dots (3.5)$$

由 (3.1) - (3.3) 式及 (3.5) 式分析可知，M2、M4 的调节效果具有一致性，选择二者之一进行调节。因此，仿真分析将只考虑 M3、M4 的误差影响

$(\alpha_3, \beta_3; \alpha_4, \beta_4)$ 。利用 Matlab 对 M3、M4 绕 x, y 轴旋转量及光轴绕 y 轴旋转对出射光矢量 A'_c 的影响进行仿真，结果如图 3.8-3.10 所示。

图 3.8 为光轴绕 y 轴旋转不同角度 γ 情况下，探测光斑随电动转台旋转一周的运动轨迹。其中，(a) 为 M3、M4 无旋转误差情况下的仿真结果，即 $\alpha_3 = \alpha_4 = \beta_3 = \beta_4 = 0$ ，可知当 M3、M4 以及光轴均不存在旋转误差时，探测光斑不随电动转台转动而转动；当 M3、M4 无误差但光轴存在旋转误差时，探测光斑运动轨迹为两个直径相同的同心圆，同心圆半径为光轴绕 y 轴的旋转误差 γ 。图 3.8 (b) 和 (c) 分别为 M4 无误差 M3 旋转误差为 10 角秒、M3 无误差 M4 旋转误差 10 角秒情况下的仿真结果，可知当 M3 或 M4 存在旋转误差时，探测光斑的运动轨迹为两个不同大小的圆，而且随着光轴误差 γ 不断变小，两个圆的大小差异愈加显著。

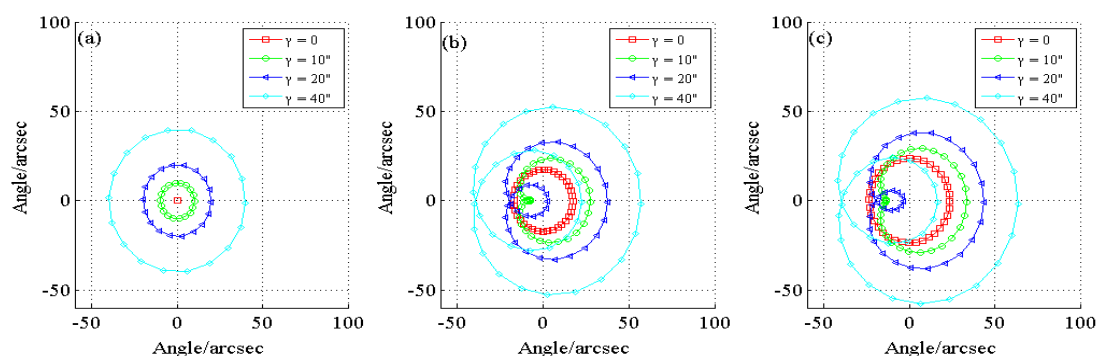


图 3.8 光轴绕 y 轴旋转情况下的探测光斑轨迹。(a) $\alpha_3 = \alpha_4 = \beta_3 = \beta_4 = 0$; (b) $\alpha_3 = \beta_3 = 10''$, $\alpha_4 = \beta_4 = 0$; (c) $\alpha_3 = \beta_3 = 0$, $\alpha_4 = \beta_4 = 10''$

图 3.9 为光轴误差 γ 为 10 角秒、M4 无误差、M3 轴绕 x, y 轴旋转不同角度误差情况下，探测光斑随电机旋转一周的运动轨迹。其中，(a) 和 (b) 分别为 M3 绕 x 轴、 y 轴旋转下的仿真结果。可以发现，M3 绕 x 轴旋转时，像面轨迹基本无明显变化；M3 绕 y 轴旋转时，像面轨迹显著变化，而且旋转误差越大，两个圆的差异越大。

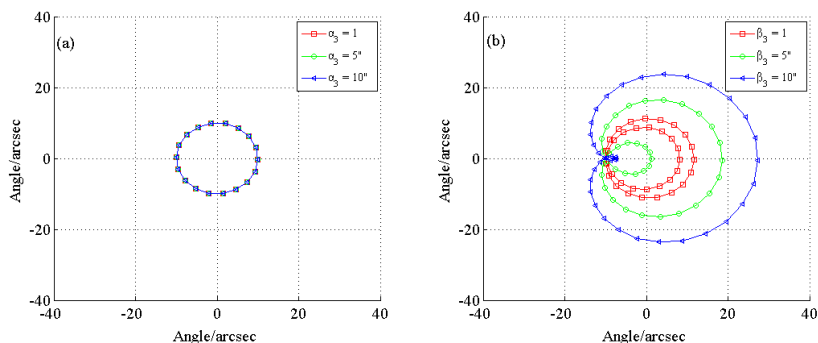


图 3.9 M3 绕 x 、 y 轴旋转情况下的探测光斑轨迹。(a) 绕 x 轴旋转；(b) 绕 y 轴旋转

图 3.10 为光轴误差 γ 为 10 角秒、M3 无误差、M4 轴绕 x 、 y 轴旋转不同角度误差情况下，探测光斑随电机旋转一周的运动轨迹。其中，(a) 和 (b) 分别为 M4 绕 x 轴、 y 轴旋转下的仿真结果。M4 绕 x 和 y 轴旋转误差引起的运动轨迹相近。此外，同 M3 绕 y 轴旋转时的情况类似，M4 绕 x 、 y 轴旋转时，像面轨迹显著变化，而且旋转误差越大，两个圆的差异越大。图 3.9 和 3.10 表明，M3 绕 y 轴旋转误差可以通过调节 M4 绕 x 或 y 轴旋转一定角度进行补偿，即 β_3 和 α_4 ， β_4 相关。图 3.11 给出了两者的相关情况，结果表明当 M3 存在旋转误差 β_3 时，可通过调节 M4 绕 y 轴旋转 $2\beta_3$ ，从而实现完全补偿。

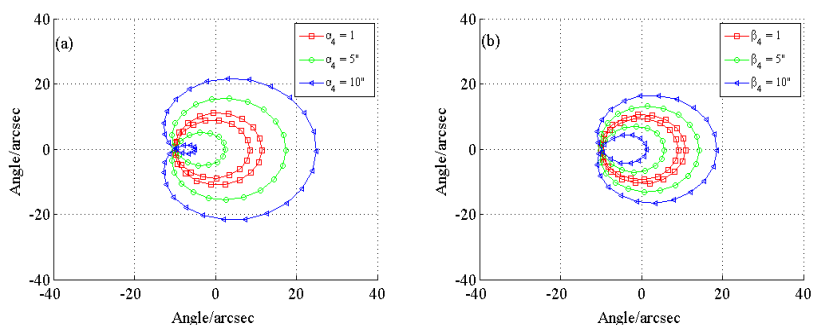


图 3.10 M4 绕 x 、 y 轴旋转情况下的探测光斑轨迹。(a) 绕 x 轴旋转；(b) 绕 y 轴旋转

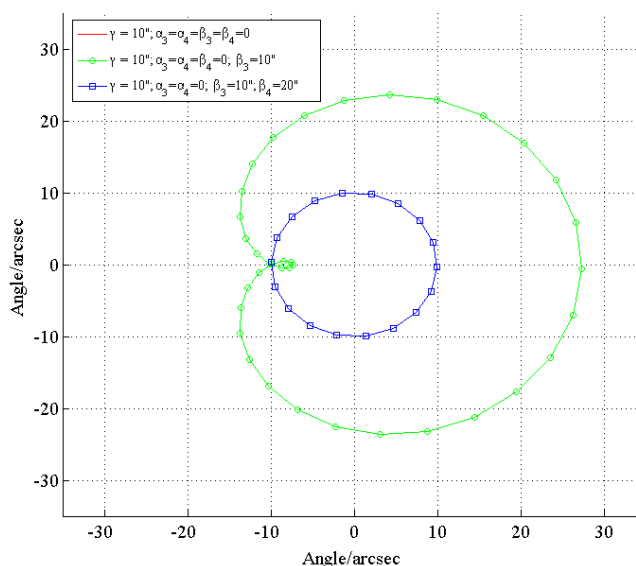


图 3.11 M3、M4 绕 y 轴旋转的相互补偿效果

综合图 3.8-3.11 可将无偏消旋系统精密装调方法总结如下：

1) 无偏消旋系统可以通过仅仅调节 M4 来实现精密装调，装调自由度显著减少；

2) 实际装调过程中，可以首先调节 FM2 或 FM5 来调节光轴偏角，使运动轨迹趋向光斑画圆直径变小、两圆周期差异变大；然后再调节 M4 使运动轨迹的两圆周期差异逐渐变小。反复进行上述过程，使得运动轨迹圆直径最小，且两圆最趋近于两个相同周期，即可实现无偏消旋系统的精密装调。

无偏消旋系统的装调方案主要由确立无偏消旋系统基准轴、无偏消旋系统位置粗调、无偏消旋系统位置精调及仿真分析这三个流程组成。第一步，利用在电动转台上设置参考平面镜作为系统光轴参考、利用角锥棱镜回射光作为系统光轴参考，通过调节可以实现系统光轴与旋转轴重合；第二步，通过透射光路、反射光路在无偏消旋镜面上的对比，可以快速确定各平面反射镜基础位置；第三步，依照仿真结果，调节光轴使像面轨迹直径变小，调节无偏消旋镜使像面轨迹周期性更强，反复调节，确定无偏消旋镜准确位置。至此，可实现系统光轴、无偏消旋系统的光轴、无偏消旋系统的旋转轴三轴重合。同时，无偏消旋系统整个装调过程中，无偏消旋系统基准轴确立的过程中每一个步骤都会进行阶段性的检测，可以清楚定位每个部分的误差来源与调整方向，而双光路的方案设计可以快速定

位无偏消旋系统各平面镜的基础位置，减小系统装调过程中的盲目性，对系统精调过程的仿真使装调过程变得有迹可循，根据像面轨迹灵活判断系统失调量和调整趋向，提高装调效率。此无偏消旋系统的装调方案一定程度上增加系统装调的可重复性、降低系统装调过程的盲目性，形成了对装调过程的理论指导。

3.4 本章小结

本章对无偏消旋系统的装调方案进行详细介绍，通过对无偏消旋系统结构进行分析，提出双光路自准直辅助装调方案，通过双光路装调可以使无偏消旋系统在系统基准轴确定后实现各反射镜实现快速定位，此外，通过 MATLAB 对各反射镜位置的精调过程进行仿真，得出系统根据像面状态进行调节的精调方法，最终实现系统光轴、无偏消旋系统的光轴、无偏消旋系统的旋转轴三轴重合，形成一套完整的可重复性强的无偏消旋系统装调方案。

第4章 无偏消旋系统实验室装调及验证

4.1 无偏消旋系统原理样机设计、加工和装配

分析无偏消旋系统的光学结构设计，M1(M5)、M2、M3、M4 排列紧凑、且作为一个整体按系统像面旋转速度 $1/2$ 旋转，因此考虑为结构无偏消旋系统设计相应物理支撑结构，完善支撑平台在内的机械设计部分，设计、加工完整的无偏消旋系统的原理样机。

由于平面反射镜 M2、M3、M4 的入射面在同一平面上，考虑将 M2、M3、M4 固定到同一支撑平板上，并用同型号三维光学调整架固定。考虑到为补偿系统光束偏移 M3、M4 平面镜位置有微量调节，为减小实验室装调难度，将 M3、M4 的旋转量及平移量转移到支撑结构上，利用机械设计软件 SolidWorks 设计五镜支撑平台结构，如图 4.1 所示：

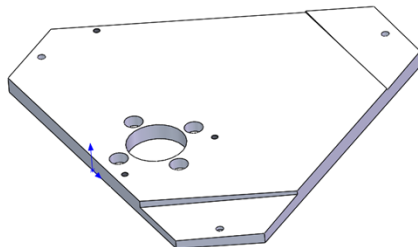


图 4.1 五镜支撑平台结构

平面反射镜 M4 除需要旋转外，还应竖直向下位移一段距离 d ，由于 M4 为平面镜，镜面内的位移并不影响光线的传播，考虑尽量减小实际装调难度，提供中心位置的参考，因此也将此平移量体现在五镜支撑平台的机械结构设计中。

平面反射镜 M1 与 M2、M3、M4 的入射面夹角是无偏消旋系统入射角的余角，为 53.7° ，为 M1 设计此特定角度的镜片支撑架，由于后续装调过程中不会对 M1 进行调节，同时为降低系统装调难度，M1 支撑架为不可调节的固定支架，如图 4.2，支架中镜片的中心高度位置与五镜支撑平台上 M2、M3、M4 的中心高度相匹配，使系统光路的主光线在传播过程中沿各平面镜中心位置行进。

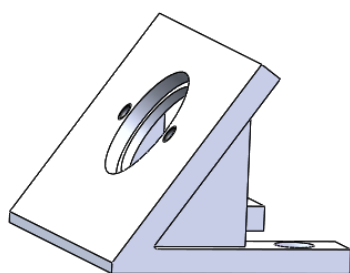


图 4.2 平面镜 M1 支撑架结构

根据五镜设计可知，平面反射镜 M2、M3、M4 的入射面与望远镜系统光轴夹角为 $17.4^\circ = 90^\circ - 2 \times 36.3^\circ$ ，设计五镜支撑平台与旋转电机的连接结构的表面为 17.4° 倾斜面，利用机械结构的加工精度控制五镜支撑平台位置，如图 4.3 所示：

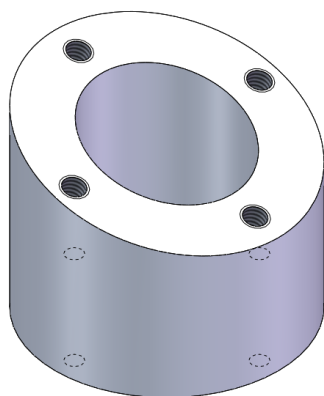


图 4.3 五镜支撑平台与旋转电机的连接结构

实际加工安装完成的五镜无偏消旋系统的原理样机如图所示：

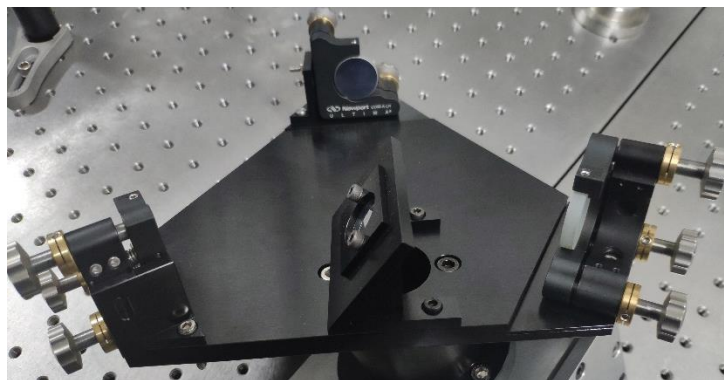


图 4.4 无偏消旋镜的原理样机

4.2 无偏消旋系统原理样机装调及实验结果

图 4.5 为实验室根据图 3.6 的装调设计方案搭建的无偏消旋镜装调系统的光路：

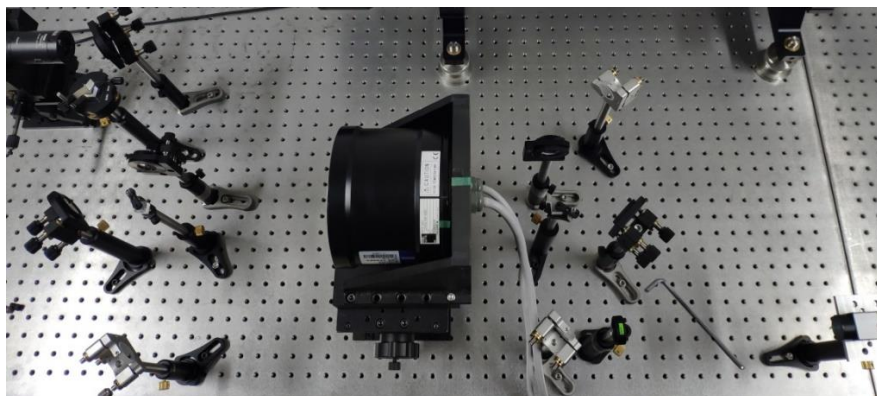


图 4.5 装调系统实验室光路图

控制消旋镜旋转的电动旋转台是系统中的关键部件，其轴向偏摆、端面平整度等性能参数对消旋镜装调精度有一定影响，很大程度上决定无偏消旋系统的消旋精度。因此，在实验室对现有的三款电动旋转平台进行性能对比测试，选择合适的电动旋转平台作为无偏消旋系统的旋转机构。主要测试内容包括以下两项：

1) 利用自准直法的测量原理，将平面反射镜固定在电动转台的前端面上，并用光源透射一束入射光到反射镜上，电机转台旋转时带动反射镜绕旋转轴旋转，对反射光随电动转台旋转一周的成像变化情况进行分析和比较，反射光斑旋转一周直径最小者性能最优。

2) 利用千分表对电动转台的端面平整度进行测试，将千分表分别放置到各个电动转台距中心旋转轴相同距离的位置，探测电动转台旋转时千分表指针的跳动情况，指针跳动幅度小，跳动波动情况比较随机的电动转台性能最优。

经过对比测试后，选择横河电机 DM1B-045G 作为实验实无偏消旋系统原理样机装调使用的电动转台，如图所示。



图 4.6 电动转台示意图

根据第 3 章所述的无偏消旋系统的装调方案对无偏消旋系统原理样机进行装调，装调过程及结果如下：

1) 确立无偏消旋系统基准轴

在透射光路、反射光路下分别进行参考平面镜法线与电动转台旋转轴平行、光轴与电动转台旋转轴平行、光轴与电动转台旋转轴同心三个过程的调节。

在进行调节参考平面镜法线与电动转台旋转轴平行的过程中，该部分的倾斜误差 α 可由式 (4.1) 计算：

$$\alpha = \frac{d}{f * \pi} * 180 * 3600 / 2 \quad \dots (4.1)$$

其中 d 为电动转台旋转一周光斑所画圆的直径， f 为透镜焦距。该调节过程主要的误差来源为电动转台的轴向跳动，同时也受激光器稳定性及平面镜位置调节精度的影响。不断调节参考平面镜位置，观察探测器上接收的光斑运动轨迹，使光斑所画圆的直径最小，调试结果如图 4.7 所示，透射光路与反射光路的参考平面镜法线与电动转台旋转轴的倾斜误差分别约为 $9''$ 、 $8''$ ，则在此误差范围内，可视为参考平面镜法线与电动转台旋转轴平行。

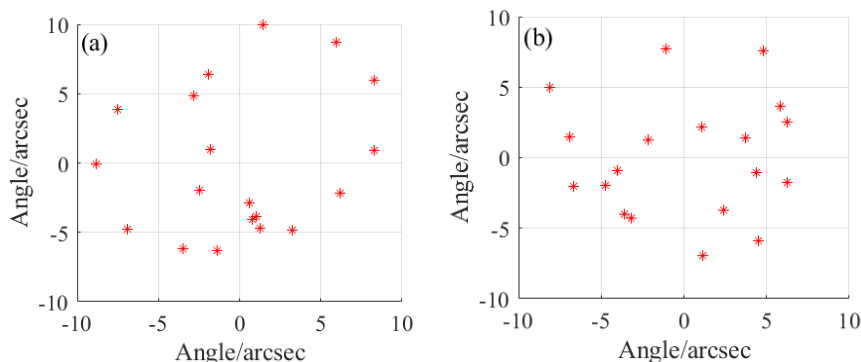


图 4.7 参考平面镜法线与电动转台旋转轴的平行调节。(a) 透射光路；(b) 反射光路

在进行调节光轴与电动转台旋转轴平行的过程中，该部分的倾斜误差 β 可由式(4.2)计算：

$$\beta = \frac{l}{f \cdot \pi} * 180 * 3600 \quad \dots (4.2)$$

其中 l 为电动转台旋转一周光斑所画圆的直径， f 为透镜焦距。平面镜反射光作为电动转台旋转轴的参考位置，不断调节折轴镜，使平面反射镜反射及角锥棱镜回射的两光斑间距最小，调试结果如图4.8所示，则透射光路与反射光路在调节光轴与电动转台旋转轴平行过程中的倾斜误差分别约为 $7''$ 、 $11''$ ，即在此误差范围内，可视为光轴与电动转台旋转轴平行；

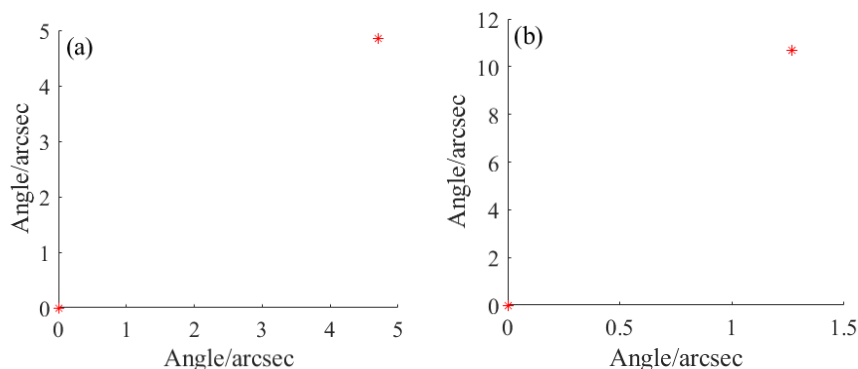


图 4.8 光轴与电动转台旋转轴的平行调节。(a) 透射光路；(b) 反射光路

在进行光轴与电动转台旋转轴同心的调节过程中，此部分的偏心误差为电动转台旋转一周时，光斑运动轨迹所画圆直径的一半，调试结果如图4.9所示，则在透射光路与反射光路中，光轴与电动转台旋转轴的偏心误差分别约为 $23.6 \mu\text{m}$ 、 $18.2 \mu\text{m}$ 。

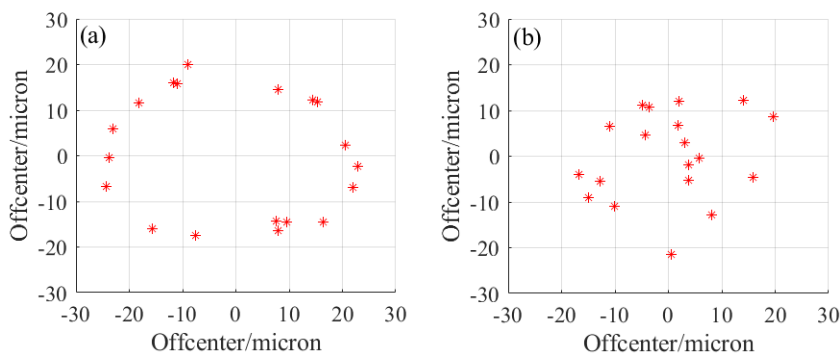


图 4.9 光轴与电动转台旋转轴的同轴调节。(a) 透射光路；(b) 反射光路

2) 无偏消旋系统位置粗调

通过调节平面反射镜 M2、M3、M4，使透射光路、反射光路光斑在五块平面镜上基本重合，完成无偏消旋系统各个平面反射镜基础位置确定，实现无偏消旋镜系统位置的粗调；

3) 无偏消旋系统位置精调

根据仿真结果指导精密装调，调节 FM2 或 FM5 来调节光轴偏角，使电动转台旋转一周情况下探测器像面上的光斑运动轨迹趋向光斑画圆直径变小、两圆周期差异变大；调节 M4 使运动轨迹的两圆周期差异逐渐变小。反复进行上述过程，使得运动轨迹圆直径最小，且两圆最趋近于两个相同周期。该调节过程的现象变化趋势与 MATLAB 仿真分析得出的结论一致。装调结果如图 4.10 所示，计算得最终无偏消旋镜的倾斜误差约为 $15''$ 。

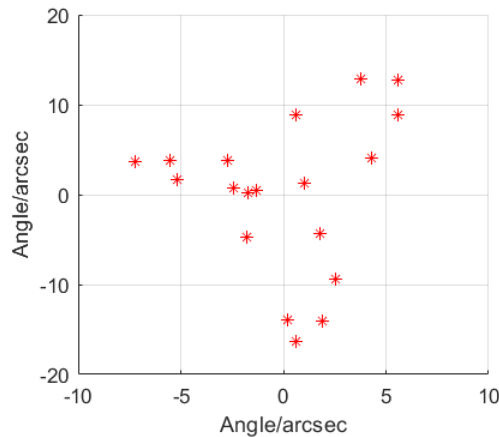


图 4.10 无偏消旋镜装调结果

基于 AIMS 总体的精度指标，初步为消旋系统拟定的较为严格的装调指标为：倾斜误差 $10''$ ；偏心误差 0.05mm 。目前，受实验用电动转台精度所限，调节精度的倾斜误差约为 $15''$ ，偏心误差约为 0.048mm ，未来可通过提高电动转台性能，提高光源稳定性，优化实验光路等方式进一步提高装调精度。

4.3 消偏振性能测试

利用 Mueller 矩阵椭偏仪对装调完成的消旋镜进行偏振性能测试^{[38][39][40]}，椭偏仪的基本原理是将一束偏振态已知的入射光打到被测样本上，通过对入射光束

和出射光束偏振态的调制和测量，得到不同状态下入射光束和出射光束的偏振态，根据关系式 $S_0 = MS_i$ ，可以得到被测样品的穆勒矩阵，推算出被测样品的各种物理信息。

将待测的装调完成的无偏消旋系统原理样机放入穆勒矩阵椭偏仪的待测样品平台上进行偏振测试，实验装置如图 4.11 所示：

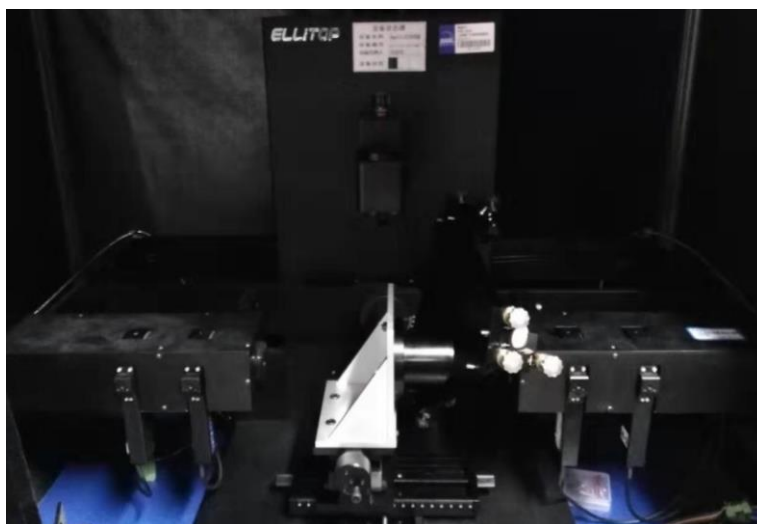


图 4.11 无偏消旋镜的偏振测试图

测试结果如图 4.12 所示，横坐标为波长（nm），纵坐标为 Mueller 矩阵的各个矩阵元。结果表明，在测试光谱范围 500-600nm 内，无偏消旋镜整体的附加偏振基本小于 5%，而传统 K 镜在 525nm 的波长下其偏振本底和偏振串扰的理论值分别达 13%和 83%，无偏消旋镜的仪器偏振明显小于 K 镜。测试结果中的矩阵元 M_{42} 误差较大，可能的原因有反射镜的膜系作用、系统装调带来的偏差、视场角等。总体上，经过系统装调的无偏消旋镜的附加仪器偏振明显小于传统 K 镜，而中红外波段下附加偏振预计会再降低一个量级^[10]，可满足 AIMS 研制需求。

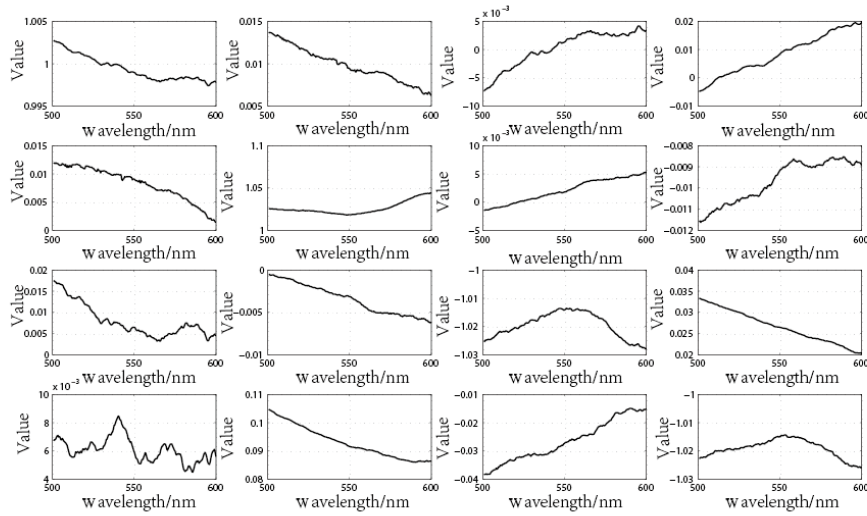


图 4.12 无偏消旋镜的 Mueller 矩阵

4.4 本章小结

本章首先介绍了无偏消旋系统原理样机的设计、加工和装配过程；其次，对无偏消旋系统原理样机进行实验室装调，给出在装调过程中调节参考平面镜法线与电动转台旋转轴重合、调节光轴与电动转台旋转轴重合、及最终整体系统调节的装调结果，得到无偏消旋系统的倾斜误差在 $15''$ 以内；最后，对装调后的无偏消旋系统原理样机进行偏振性能测试，证明其附加仪器偏振明显小于传统 K 镜。

第 5 章 结论

5.1 总结

本学位论文围绕 AIMS 望远镜中的无偏消旋系统展开,对无偏消旋系统的关键技术进行了重点研究,主要包括:

1、无偏消旋系统的原理分析及验证,原理分析部分包括系统消像旋和消仪器附件偏振两部分。一方面对 AIMS 望远镜跟踪过程中的像旋来源及像旋速度进行介绍,利用矩阵理论对消旋系统的光矢量追迹,验证无偏消旋系统的消像旋性能。另一方面对系统的入射光的偏振态变化进行理论分析,无偏消旋系统对系统偏振态的影响在入射角为 36.3° 时可视为单位穆勒矩阵,验证了无偏消旋系统的消偏振性能。此外,针对无偏消旋镜光学结构设计中由于 M1(M5)镜厚度问题带来的光束偏移进行分析,提出利用 M3、M4 镜绕 x、y 轴旋转及 M4 镜位移的方法来补偿系统光束经过无偏消旋系统的光束偏移的补偿方案。

2、无偏消旋系统的装调方案设计:针对结构不规则的无偏消旋系统,设计能快速定位的双光路自准直辅助装调方案,并对装调过程中的各步骤进行了详细介绍,为更好的提高装调效率和装调方案的可重复性,对系统精细调节过程进行了仿真分析,作为对实验室装调流程的技术指导;

3、无偏消旋系统实验室装调及验证:为具有不规则结构的无偏消旋系统设计平面镜支撑结构,完成无偏消旋系统的原理样机的设计、加工和装配;在实验室完成无偏消旋系统原理样机的装调并进行消偏振性能测试,实验测得的无偏消旋系统装调精度约为 $15''$,消除偏振性能测试的结果为无偏消旋镜附加仪器偏振基本小于 5%。

无偏消旋系统的装调精度与 AIMS 总体分配的误差指标相近,但有待进一步提高,其附加偏振在 500-600nm 的测试波长下基本小于 5%,中红外波段下附加偏振预计会再降低一个量级,可满足 AIMS 研制需求。但更精确的数据和更准确的结论还需要后续研究工作中提高测试仪器性能,提高系统装调精度后再做进一步分析。同时,在 AIMS 望远镜无偏消旋系统的关键技术研究过程中得到的关于

结构设计、光学系统装方案设计等方面的数据和经验，可以为类似的具有消像旋转及消附加仪器偏振需求的光学系统提供参考。其中双光路自准直辅助装调的快速定位装调方案也可以为一些具有不规则光学结构的系统装调提供参考。

5.2 展望

作为一种在传统 K 镜基础上优化偏振性能而提出的消旋结构，无偏消旋系统有其自身性能上的优越性，它可以在解决许多跟踪系统存在的像旋问题的同时还对附件仪器偏振做出限制，对一些跟踪测量目标为偏振相关物理量的光学系统来说，是一个优秀的可参考对象。但由于其结构的特殊性，它的结构设计和装调方法相对复杂，对于精度要求高的光学系统来说，优秀的装调结果是限制系统性能的关键因素，因此，对于无偏消旋系统的包括结构设计、系统装调等在内的关键技术研究还需要不断升级和优化，以更高的装调精度，更准确的性能检测指标为目标开展进一步的研究，未来可以从提高系统中电动转台的精度，增加光源整形和稳定的系统光路，改进实验数据的拟合算法等方面进一步优化装调方案，减小装调误差，得到更精细的数据分析结果，以便此装调方案更好的服务于无偏消旋系统，使无偏消旋系统能更广泛地应用在各种光学系统中，更好的发挥其优越的消旋消偏性。

参考文献

- [1]. 梁红艳, 郑振华, 郭劲. 大口径望远镜跟踪架的结构研究[J]. 仪器仪表学报, 2006(S1):1017-1019.
- [2]. 王志臣, 张艳辉, 乔兵. 望远镜跟踪架结构形式及测量原理浅析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(01):18-21.
- [3]. 赵勇志. 4m级地基光电望远镜跟踪架结构研究[D]. 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2012.
- [4]. 鞠青华. 1.2米地平式望远镜视场旋转研究与消旋[D]. 云南: 中国科学院云南天文台, 2008: 40-48.
- [5]. 郭鹏. 望远镜消旋系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013: 1-20.
- [6]. 徐正伟, 王军宁, 吴成柯. 实时电子图像消旋系统[J]. 红外与毫米波学报, 1997, 16(05): 364-368.
- [7]. 曾祥萍, 杨涛. 实时图像的电子消旋系统[J]. 光电工程, 2005, 32(10): 27-30.
- [8]. 蒋世磊. 别汉棱镜的旋像精度分析和装校方法[J]. 光电工程, 1991(06):50-56.
- [9]. 魏焯艳, 王东光, 梁明, 等. 天文望远镜消旋K镜光学结构设计及分析[J]. 中国激光, 2016, 43(03): 0316002
- [10]. Hou J F, Liang M, Wang D G, et al. Design and analysis of a five-mirror derotator with minimal instrumental polarization in astronomical telescopes[J]. Optics express, 2018, 26(15): 19356-19370.
- [11]. 林元章. 太阳物理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [12]. 叶式辉. 斯托克斯参数与天体向量磁场测量[J]. 天文学进展, 19875, (01): 3-12.
- [13]. 熊耀恒, 冯和生. 1.2米地平式望远镜视场的旋转[J]. 天文研究与技术, 1991, 0(4): 40-45.

- [14]. Taras Golota, Shin Oya, Sebastian Egner, et al. Software control and characterization aspects for image derotator of the A0188 system at Subaru[J]. *proc spie*, 2010, 7735(6):38-41.
- [15]. Matthieu Brangier, Albert R. Conrad, Thomas Bertram, et al. Pupil rotation compensation for LINC-NIRVANA[J]. *proc spie*, 2012, 8447:84472U-84472U-4.
- [16]. 鞠青华, 李语强, 熊耀恒. 1.2m 地平式望远镜视场旋转角的理论计算[J]. *天文研究与技术*, 2009, 6(01):28-35.
- [17]. 柳光乾, 付玉, 程向明. 1 米太阳望远镜光谱仪像旋转及消旋控制[J]. *天文研究与技术*, 2012, 9(01):86-92.
- [18]. 柳光乾, 卢汝为. 云台红外太阳望远镜中光电导行系统的像场旋转[J]. *云南天文台台刊*, 2003(04):28-33.
- [19]. Polasek J. Matrix analysis of gimballed mirror and prism system[J]. *Optical Society of America*, 1967, 57(10): 1193-1201.
- [20]. 廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 45—63.
- [21]. Born M, Wolf E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[M]. 6th ed. Oxford: Pergamon Press, 2013: 38-41.
- [22]. 段学霆. 共轴光学系统计算机辅助光轴一致性装调研究[D]. 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2006.
- [23]. 张燕. 车长周视瞄准镜装调工艺技术研究[D]. 西安工业大学, 2013.
- [24]. 封志伟. 一种大视场离轴反射式光学系统的调试方法[D]. 合肥工业大学, 2018.
- [25]. 朱瑶. 光学系统的星点检验方法[J]. *红外*, 2004(09):31-37.
- [26]. 范珂. 刀口法检测光学元件面形的数字化技术研究[D]. 西安工业大学, 2010.
- [27]. 汤国茂, 何玉梅, 廖周. 大型光学系统径向哈特曼像质检测方法[J]. *中国激光*, 2010, 37(03):795-799.
- [28]. 张金平. 夏克-哈特曼波前传感器检测大口径非球面应用研究[D]. 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2012.

- [29]. 李小燕. 高精度星敏感器光学系统装调工艺与检测方法研究[D]. 西安电子科技大学, 2018.
- [30]. Parks R E. Alignment of optical systems[C]//International Optical Design Conference. JUN 04-08, 2006, Vancouver, Canada, Bellingham: SPIE, 2006, 6342: 634204.
- [31]. Zhang C, Duan F, Fu X, et al. Dual-axis optoelectronic level based on laser auto-collimation and liquid surface reflection[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 113: 357-364.
- [32]. Brunelli A, Bergomi M, Dima M, et al. Tips and tricks for aligning an image derotator[C]// Conference on Ground-Based and Airborne Telescopes IV, JUL 01-06, 2012, Amsterdam, Netherlands, Bellingham: SPIE, 2012, 8446: 84464L.
- [33]. 顾志远, 颜昌翔, 胡春晖, 王洋, 高志良, 刘伟. 光学系统计算机辅助装调的坐标基准过渡方法[J]. 光学学报, 2014, 34(03):235-240.
- [34]. Khalil H , Kim D , Jo Y , et al. Optical derotator alignment using image-processing algorithm for tracking laser vibrometer measurements of rotating objects[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(6):065111.
- [35]. 史亚莉, 高云国, 张磊, 邓伟杰. 提高CCD激光自准直测角精度的硬件方法[J]. 光学精密工程, 2008(04):726-732.
- [36]. 党小刚, 蒋世磊, 孙国斌, 弥谦, 向雪峰. 转台旋转轴的偏角误差检测与分析[J]. 西安工业大学学报, 2019, 39(01):21-26.
- [37]. 焦仲科, 岳永坚. 角锥棱镜的入射角及有效反射面积分析[J]. 半导体光电, 2014, 35(05): 811-816.
- [38]. 侯俊峰, 王东光, 邓元勇, 等. 基于非线性最小二乘拟合法的Mueller矩阵椭偏仪[J]. 中国激光, 2013, 40(04): 0408004.
- [39]. 刘敬, 夏润秋, 金伟其, 王霞, 杜岚. 基于斯托克斯矢量的偏振成像仪器及其进展[J]. 光学技术, 2013, 39(01):56-62.
- [40]. 刘柠林. 中红外穆勒矩阵椭偏测量系统研究[D]. 华中科技大学, 2019.

致 谢

三年的研究生生活一瞬而逝，在此，我想对所有给予过我帮助、陪伴我度过人生中又一重要阶段的老师、同学、亲友表示最衷心的感谢。

感谢我的研究生导师，王东光研究员，因为王老师的帮助和认可，我有机会来到国家天文台怀柔太阳观测基地这个温馨有爱的大家庭，度过了三年丰富且充实的学习生活。王老师对科研工作的认真严谨和为人处世的热情与真挚都深深感染了我，让我在学习知识的同时也学到了许多优秀的品质。

感谢我的第二导师，侯俊峰高级工程师，他既是在我学习过程中给予我细心指导的老师，也是在生活中对我关怀备至的师兄，他在自身科研任务重的情况下依然对我的课题提供了大量指导和帮助，他对待工作的热情与坚实的科研能力让我十分敬佩，是我未来学习和工作中的榜样。

感谢怀柔团组的主任，邓元勇研究员，邓老师在科研和管理组内事务上有着自己独特的方法，大事认真不放松，小事开明放手做的态度使怀柔团组的工作氛围严肃中带着活泼，自由中带着认真，使原本稍显枯燥的科研生活多了许多色彩。

感谢林佳本老师、孙英姿老师、张志勇老师、冯志伟老师、白先勇老师、王建老师等老师在科研上对我无私的帮助，感谢王薏站长、罗琳姐、张鼎波师傅、阮文东师傅、汪国萍老师、苏师傅、杨阿姨等对大家工作和生活上的支持，感谢杨潇师姐、王刚师兄、郭晶晶师姐、孙文君师兄、张洋师姐、魏烨艳师姐、王全师兄、祝高飞师兄、佟立越师兄、张鑫伟师兄、白阳师兄等师兄师姐在我遇到科研和生活中的困难时毫不吝啬的帮助与鼓励。

感谢我的同学荀辉、陈垂裕、吴玮等，我的室友王雅琦、王佳琪、陈天奕等在生活上对我的照顾与支持，三年的时间我们相伴而过，分享开心互诉辛苦，给我留下了许多日后回想起来也会面带笑容的宝贵回忆。

最后感谢我的父母，他们都一直非常坚定的支持我，无论是在人生选择还是在工作和生活中，他们给了我自由选择的空间也竭尽所能的支持我，做我坚实的后盾。

感谢所有曾帮助过我的人，因为你们的支持我才能顺利完成本课题的研究。在这个特殊的时期，我还想向全国的医护人员表示最诚挚的感谢，向社会各界站在防疫一线的人员表示真挚的谢意，你们的无私付出保障了全国人民的生命安全，衷心祝愿全国和全世界各国能早日战胜病毒，让一切回归正轨，继续用笑容迎接充满希望的明天。

周明尧

2020年6月

作者简介及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简介:

2013年9月——2017年6月,在北京理工大学光电学院获工学学士学位。

2017年9月——2020年6月,在中国科学院大学国家天文台攻读工程硕士学位。

正式接受的学术论文:

[1] 周明尧,侯俊峰,王东光,邓元勇.天文望远镜无偏消旋镜装调方案设计及验证[J].中国激光,2020,47(06).