



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

硕士学位论文

太阳望远镜高精度指向与跟踪控制方法研究

作者姓名：_____陈垂裕_____

指导教师：_____邓元勇 研究员 中国科学院国家天文台_____

_____林佳本 正高级工程师 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 High Precision Pointing and Tracking Control
Method of Solar 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

Chen Chuiyu

Supervisor: Professor Deng Yuanyong

Professor Lin Jiaben

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：陈书裕

日期：2020年4月29日

中国科学院大学

学位论文授权使用声明

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

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：陈书裕

日期：2020年4月29日

导师签名：陈书裕 林佳本

日期：2020年4月29日

摘 要

在天文观测中，需要望远镜能快速、准确的指向目标天体，并对其进行稳定跟踪。高精度的指向、跟踪是保证高质量天文观测不可缺少的技术之一。精确的目标指向与跟踪技术可以实现对不同目标的快速切换观测，较之于早期依靠观测员手动切换的方法，该技术能够大大提高望远镜的观测效率。太阳磁场测量需要通过深积分观测获得高灵敏度的磁场数据，因此高精度的指向、跟踪系统是高分辨太阳磁场观测的必然要求。

本课题包括两个方面的主要工作：

首先，本课题针对怀柔太阳观测基地（HSOS）的望远镜轴系运动系统开展研究工作，使用伺服电机轴上 23 位高精度绝对式编码器作为绝对位置检测传感器，升级轴系控制系统软硬件；通过 VSOP87 行星理论实时计算日面中心位置；提出使用高精度导行系统不间断跟踪太阳并记录太阳位置，利用最小二乘法分段拟合太阳实时位置与绝对值编码器数值的方法；最后建立指向算法并实现日面中心指向。在此基础上，我们对全日面太阳磁场与磁活动监测望远镜（SMAT）进行升级改造。

SMAT 望远镜原本无自动指向功能，需要观测员凭经验通过手动控制望远镜指向太阳。本课题在 SMAT 望远镜实现了望远镜的自动指向功能，经实测该望远镜赤经方向的指向误差约为 $36.69''$ ，赤纬方向的指向误差约为 $21.49''$ ，达到 SMAT 望远镜的指向设计指标。该方法成本低、兼容性高，不需要对望远镜机械结构进行大的变动就可实现自动指向，对于其他赤道式望远镜的升级改造具有借鉴意义。

其次，本课题又针对全日面矢量磁像仪（FMG）地面试观测导行跟踪系统开展研究工作，完成了 FMG 载荷地面试观测导行跟踪系统的设计，导行系统与赤道仪的轴系系统实现协同工作，并在地面试观测平台开展了验证和测试。

导行跟踪系统通过大面阵 CCD 采集太阳像、多重逻辑条件判定、微调恒动跟踪速度校正偏移等策略，实现了优于 $1''/30\text{ min}$ （RMS）的跟踪精度。通过分

析 FMG 方案阶段试观测的太阳纵向磁图，开启导行 30 分钟后磁图特征点在赤经方向的偏移比恒动条件下减少 $17.5''$ ，提升了磁图空间分辨率。

综上，本文主要研究指向与跟踪控制方法，在怀柔观测基地的设备上开展了长期实验，在 SMAT 望远镜上达到优于 $1'$ 的指向精度，实现了 SMAT 望远镜的指向要求，目前已投入实际测试超过 3 个月；在 FMG 载荷地面试观测平台达到优于 $1''/30\text{ min}$ 的跟踪精度，满足了 FMG 地面试观测对导行跟踪的要求，为 FMG 载荷外场试观测提供技术支持。本课题开展研究期间，为用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统（AIMS）指向跟踪系统的算法设计和系统调试积累了大量的前期工程数据和技术经验。

关键词：指向控制，导行跟踪，太阳观测，轴系升级，太阳望远镜

Abstract

In astronomical observations, telescopes are required to quickly and accurately point the target celestial bodies and to track them steadily. High-precision pointing and tracking is one of the indispensable technologies to ensure high-quality astronomical observation. Compared with the early way of relying on the manual switching of observers, the precise target pointing and tracking technology can achieve fast switching observation of different targets, which can greatly improve the observation efficiency. The measurement of solar magnetic field needs to obtain high-sensitivity magnetic field data through deep integration observation, so high-precision pointing and tracking system is the inevitable requirement of high-resolution solar magnetic field observation.

This topic includes two main tasks:

First of all, this subject carries out research work on the telescope shaft motion system of Huairou Solar Observing Station (HSOS), we using a 23 bit high-precision absolute encoder on the axis of servo motor is used as the absolute position detection sensor to upgrade the hardware and software of the axis control system. The VSOP87 planetary theory is used to calculate the center position of the solar in real time. The present method using a high-precision guiding system based on a large area CCD to continuously track the solar and record the position of the solar, and using a least square method to fit the real-time position of the solar and the value of the absolute encoder. Finally, the pointing algorithm is established and the solar center pointing is realized. On this basis, we upgrade the Solar Magnetism and Activity Telescope (SMAT).

The SMAT telescope originally did not have an automatic pointing function, requiring observers to manually control the telescope to point to the sun by virtue of experience. This subject realized the automatic pointing function of SMAT telescope. It was measured that the pointing error of the telescope's right ascension direction is about 36.69 ", and that of declination direction is about 21.49 ", reaching the designing

index of the SMAT telescope. This method has low cost and high compatibility, and can be realized without major changes to the mechanical structure of the telescope. It has reference significance for the upgrading of other equatorial telescopes.

Secondly, this subject also conducted research work on the Full-disk solar vector MagnetoGraph (FMG) ground-based experimental observation tracking system, and completed the design of the Ground-based Experimental Observation of FMG Payload guiding tracking system. The guiding system works cooperatively with the shafting system of the equatorial telescope, and is tested on the ground-based experimental observation platform.

The guiding tracking system achieves tracking accuracy better than $1'' / 30 \text{ min}$ (RMS) by using a large-area array CCD acquisition of solar images, multiple logic condition determination, fine-tuning the perpetual motion speed to complete the offset correction, etc. By comparing and analyzing the solar longitudinal magnetograms during the experimental observation of the planning phase, the deviation of the feature point in the right ascension direction is $17.5''$ less than that under perpetual motion condition after 30 minutes of enabling the guiding, which improves the spatial resolution of the magnetograms.

In summary, this article mainly studies the pointing and tracking control methods, and has carried out long-term experiments on the equipment of Huairou Solar Observing Station, HSOS. This experiment achieved a pointing accuracy of better than $1'$ on the SMAT telescope, and achieved the pointing requirement of the SMAT telescope. It has been put into actual testing for more than 3 months; it has achieved a tracking accuracy better than $1'' / 30 \text{ min}$ on the ground-based experimental observation of FMG Payload platform, which meets the requirements of FMG ground test observations for guiding tracking, and provides technical support for FMG load field experimental observations. The research carried out in this project has accumulated a lot of pre-engineering data and technical experience for the algorithm design and system debugging of the pointing tracking system of AIMS (An Infrared System for Accurate

Measurement of the Solar Magnetic Field).

Key Words: Pointing Control, Guide Tracking, Solar Observation, Shafting upgrade,
Solar Telescope

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 本论文的研究背景及意义.....	1
1.1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.1.2 国内外研究现状.....	1
1.2 本论文的研究目的及内容.....	3
1.3 本论文的主要内容.....	4
第 2 章 太阳指向与跟踪的基本原理	5
2.1 天球坐标系.....	5
2.1.1 赤道坐标系.....	5
2.1.2 地平坐标系.....	6
2.1.3 坐标系的转换.....	7
2.2 太阳实时方位的计算.....	8
2.3 望远镜实时位置的检测.....	10
2.4 太阳指向的基本方法.....	11
2.5 太阳跟踪的基本方法.....	12
2.6 本章小结.....	13
第 3 章 望远镜轴系运动控制系统	14
3.1 硬件选型与实现.....	14
3.1.1 硬件选型.....	14
3.1.2 硬件实现.....	16
3.2 软件设计与开发.....	19
3.3 本章小结.....	20
第 4 章 指向方法的实现与测试	21
4.1 指向方法实验平台.....	21

4.1.1 全日面磁场与活动监测望远镜.....	21
4.1.2 35 厘米太阳磁场望远镜.....	22
4.2 望远镜坐标系的建立.....	23
4.3 SMFT 望远镜指向实验	27
4.4 SMAT 望远镜指向实验	28
4.4.1 SMAT 望远镜轴系升级.....	28
4.4.2 建立 SMAT 望远镜坐标系	29
4.4.3 建立望远镜坐标系方法改进.....	31
4.4.4 实验测试结果.....	32
4.5 本章小结.....	34
第 5 章 跟踪方法的验证与测试	36
5.1 导行方法测试平台.....	36
5.2 导行系统需求分析.....	37
5.3 软硬件设计.....	37
5.3.1 硬件设计.....	38
5.3.2 算法与软件设计.....	38
5.4 测试与分析.....	41
5.4.1 不同跟踪条件下的跟踪精度.....	41
5.4.2 不同跟踪条件下对磁图的影响.....	44
5.5 本章小结.....	46
第 6 章 总结与展望	47
参考文献.....	49
致谢.....	55
简 历.....	57
发表文章及科研成果	59

图目录

图 2.1 赤道坐标系	6
图 2.2 地平坐标系	7
图 2.3 坐标系旋转	7
图 2.4 怀柔太阳观测基地不同节气太阳方位角、高度角的变化	10
图 2.5 指向系统控制流程图	11
图 2.6 导行系统控制流程图	12
图 3.1 典型赤道式望远镜机械结构示意图	14
图 3.2 轴系运动控制系统硬件组成	15
图 3.3 众为兴 ADT-8860	15
图 3.4 松下 MINAS A6 系列电机与驱动器	16
图 3.5 轴系控制箱布局规划	17
图 3.6 驱动器与上位机通信模式	17
图 3.7 轴系系统控制箱	18
图 3.8 轴系控制系统基本框架	19
图 3.9 轴系运动控制系统界面	20
图 4.1 全日面磁场与活动监测望远镜	22
图 4.2 35 厘米太阳磁场望远镜	23
图 4.3 35 厘米磁场望远镜刻度盘	24
图 4.4 SMFT 望远镜驱动系统的布局	25
图 4.5 SMFT 望远镜赤经赤纬传动系链	25
图 4.6 三轴陀螺仪及测量界面	26
图 4.7 SMFT 望远镜磁场观测程序	26
图 4.8 SMFT 望远镜编码器数值与观测数据拟合	27
图 4.9 SMFT 望远镜 2019 年 6 月 11 日指向测试	28
图 4.10 SMAT 望远镜指向功能界面	29
图 4.11 基准太阳图像	32
图 4.12 八个时刻指向后的 $H\alpha$ 太阳像	32
图 4.13 不同时间点对应的赤经（赤纬）指向偏差	34

图 5.1 FMG 地面试观测平台.....	37
图 5.2 FMG 试观测导行系统界面.....	40
图 5.3 启动恒动跟踪 30 分钟内,太阳质心的偏移量情况	42
图 5.4 启动导行跟踪 30 分钟内,太阳质心的偏移量情况	43
图 5.5 启动导行跟踪 210 分钟内,太阳质心的偏移量情况	44

表目录

表 3.1 控制器引脚与驱动器接口对照	18
表 4.1 SMAT 望远镜设计指标参数.....	22
表 4.2 35 厘米太阳磁场望远镜指标参数	23
表 4.3 望远镜指向不同时角对应的编码器数值	30
表 4.4 望远镜指向不同赤纬对应的编码器数值	30
表 4.5 2020 年 1 月 4 日全天指向测试数据	33

第 1 章 绪论

1.1 本论文的研究背景及意义

1.1.1 课题研究背景及意义

太阳影响并决定日地环境,从而维系着人类生存以及地球上其他生命所需的生存环境,激烈的太阳活动及其周期变化,影响人类的生活与生产^[1]。太阳是我们拥有最多观测数据的恒星,为我们验证恒星理论提供了严格的测试^[2]。中国人对太阳观测有着悠久的历史,《汉书·五行志》载,“河平元年(公元前 28 年)三月己未。日出黄,有黑气,大如钱,居日中央”,对太阳黑子出现的时间、大小、位置等做了明确的记述^[3]。

现代太阳物理研究表明,磁场和磁能释放是太阳活动根源。磁场是太阳物理最重要的观测量,目前太阳物理最具挑战性的三大科学难题^[4]——太阳发电机、纤维化的磁对流过程、日冕加热,无一不与太阳磁场的性质与演化密切相关,精确定量的磁场测量是解决这些问题的关键环节。

太阳物理学家对观测数据的质量要求日益提高,高精度的指向、跟踪是保证更高质量观测数据的必须技术之一。跟踪精度的好坏对磁场数据的质量有直接影响,需要克服机械轴的轴偏、运动系统或伺服系统的误差、结构温度不均造成的形变、重力形变和大气蒙气差等造成的误差。指向精度是评价望远镜性能的重要指标,直接影响着望远镜是否能够实现自动控制和无人值守观测。

利用望远镜观测目标天体的第一步便是指向目标,即驱动望远镜使得被测天体进入望远镜的视场范围。没有高精度的自动指向,高精度的自主观测便无从谈起。太阳磁场的测量需要进行深积分观测,一次测量过程往往需要持续几分钟的时间,通过多帧图像叠加或长曝光的方法获得高信噪比的磁场数据,因此观测过程中要求望远镜能对观测目标进行高精度的稳定跟踪^[5]。

1.1.2 国内外研究现状

望远镜的机架结构影响着指向跟踪算法的设计。早在上世纪 80 年代,钱志

瀚^[6]、王京生^[7]、程景全^[8]等已开始分析赤道式望远镜轴系误差对指向精度的影响,并改进极轴指北校准方法。90 年代,杜鸿^[9]、韩涛^[10]、顾健星^[11]等分别对不同的射电望远镜天线指向误差进行分析,发展了指向校准方法。21 世纪,王志臣等^[12]通过球面三角形分析并总结了赤道式望远镜的不同轴系误差对于指向精度的影响。随着地平式望远镜的发展,张晓祥等^[13]分析了地平式望远镜静态误差模型的基本参数,并以此构建了基本参数修正模型。

国内外的学者通过对指向误差进行分析,提出了诸多模型和方法提升指向精度。郑向明等^[14]在云南天文台 1.2m 望远镜建立全天指向模型。赵金宇^[15]总结分析了光电望远镜静态误差和动态误差的各项来源。王家骥等^[16]提出通过坐标变换构建光电跟踪测量设备的测量方程进行误差分析。李岩等^[17]对基于几何误差的误差源进行建模,并通过统计方法分析了各项误差的影响机理。赵彦^[18]通过四元数构建大型射电望远镜指向误差分项修正模型,提出新的基于半参数回归的指向误差修正模型。

Wallace^[19]研发了可交互的望远镜指向分析系统,可通过指向测试和增删不同误差项来调整误差模型。Kimbrell^[20]、Keitzer^[21]分析讨论了静态跟踪误差和动态跟踪误差,并通过编码器和观星数据来识别误差进行修正。Negishi^[22], Gawronski^[23], Ukita^[24], Kong^[25]等对望远镜方位导轨不平度误差进行分析,提出了通过查表法提升指向精度的方法。

太阳跟踪方法随着成像器件的发展,经历了“点-线-面”的辩证发展规律^[5]。20 世纪 90 年代以前,通常以太阳的一点或几点作为跟踪的目标,其中以四象限法最为普遍。四象限法对技术要求低,响应速度快,但精度低,容易受到天气和季节的影响。80 年代以后,随着线阵探测器的推广和计算机处理能力的提升,线阵探测器技术开始运用于太阳跟踪,后期发展为采用两个相互垂直的 CCD 线阵做探测器^[26]等技术。进入 21 世纪以后,计算机图形处理能力显著提高,面阵探测器技术日趋成熟逐渐取代了线阵探测器^[27]。面阵探测器跟踪方案最初运用于空间观测中,目前已成为太阳望远镜的主流跟踪方案。大熊湖新太阳望远镜^[28]、欧洲 EST 太阳望远镜^[29]、云台一米红外太阳望远镜^[5]、怀柔观测基地用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统^[30]等都使用通过导行镜和面阵 CCD 获取全日面像进

行导行的方案。

柳光乾等^[31]讨论了大气湍流造成的望远镜导行误差,提出使用太阳面源作为导行目标可以降低高层大气湍流的影响。Wang Qiang 等^[32]为了提高望远镜系统的跟踪精度,提出了一种基于扰动观测与补偿的级联加速度反馈控制方法。Mei Rong 等^[33]针对参数不确定、外部干扰未知和输入饱和的光学跟踪望远镜,提出了一种鲁棒的自适应控制方案。2000 年以后,自适应光学系统开始部署在一些大型地基太阳望远镜上^[34],多层共轭自适应光学技术等新技术发展迅速^[35]。

1.2 本论文的研究目的及内容

本课题基于国家重大科研仪器项目《用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统》(简称: AIMS)开展研究工作。精确的指向、跟踪系统是 AIMS 的重要分系统,是 AIMS 实现精确磁场测量这一科学目标的关键保障。AIMS 的科学指标要求严苛,无商用控制系统能够直接满足 AIMS 的要求,需要针对 AIMS 系统的特点开发指向跟踪系统,本课题主要为 AIMS 积累工程数据和技术经验。

本论文的研究内容是依据怀柔太阳观测基地的实际需求,完成轴系控制系统硬件的选型、安装与调试,实现望远镜轴系系统优化升级;依托现有理论模型,考虑多重影响因素完善指向算法;明确系统整体需求,通过面向对象的方法并基于 MFC 设计控制系统的用户交互界面;结合软硬件设计实现对伺服电机的转速、转矩等关键参数的精密控制,实现高精度的太阳指向;以全日面矢量磁像仪(Full-disk solar vector MagnetoGraph, FMG)开展地面试观测为契机,完成 FMG 载荷地面试观测导行跟踪系统的设计,并在地面试观测平台开展验证和测试;依托怀柔太阳观测基地的设备进行实际测试,利用实测数据分析误差,不断改进和优化。

综上,本论文的研究目标是通过软硬件结合,以怀柔太阳观测基地的望远镜设备开展研究和调试,设计一套基于轴系伺服控制的高精度太阳观测自动指向与实时跟踪方法,提升怀柔太阳观测基地望远镜的观测效率,同时为 AIMS 的精确指向、跟踪系统的算法设计和系统调试积累工程数据和技术经验。

1.3 本论文的主要内容

本文介绍了高精度指向与跟踪系统的设计与实现，全文分为六个章节。

第一章节介绍课题研究背景，分析了国内外的研究现状，并介绍了本论文的研究目的和内容。

第二章涉及太阳指向与跟踪的基本原理，介绍了实现控制所需要的理论基础。定义了参考坐标系，给出了天体测量的基本规律、坐标转换公式；介绍了太阳实时位置的计算方法，以及望远镜位置检测的基本方法；最后对指向系统、跟踪系统的整体框架和流程进行了阐释。

第三章介绍对望远镜轴系运动控制系统升级所作的工作。介绍了硬件系统的组成和选型，并对重要的硬件连接进行说明。最后介绍了轴系运动控制软件的设计与开发。

第四章对指向方法的实现与测试结果进行了阐述。首先介绍了开展实验的平台设备，以及为建立望远镜坐标而开展的工作。对前期 SMFT 望远镜的实验结果进行总结，并提出新方法计算望远镜实际位置。重点介绍了在 SMAT 望远镜开展的指向实验，通过实际观测计算指向精度，测试并验证了指向方法。

第五章重点介绍跟踪方法在 FMG 载荷地面试观测的设计与实现。首先介绍了测试平台及其系统的需求，并对系统的软硬件设计进行简单介绍。对导行测试结果进行了重点分析，分析对比恒动跟踪与导行跟踪的精度，并利用方案阶段试观测期间太阳纵向磁图，分析跟踪精度对于矢量磁图空间分辨率的影响。

第六章对本文进行了总结，并对未来的研究方向做了展望。

第 2 章 太阳指向与跟踪的基本原理

太阳指向与跟踪，可以类比为向日葵在晴天日出后转动花序朝向太阳，在日落前跟随太阳转动并始终迎向太阳。作为一套控制系统，需要具备什么才能够实现对望远镜这样的控制？我们先从系统的输入着手，实现太阳指向与跟踪控制，必须要明白系统的输入是什么。对于指向系统而言，输入是太阳实时位置和望远镜实时位置的偏差。对于跟踪系统而言，输入是当前太阳图像质心与基准图像质心的偏移。理解并掌握参考坐标系的定义与转换、位置检测方法、太阳位置计算方法以及系统控制流程等基本原理，是计算位置偏差、图像偏移的基础。对这些关键量的计算是构建系统的基础，同时会影响到系统的输出误差。

2.1 天球坐标系

描述太阳的位置与运动必须依据合适的参考坐标系。与太阳望远镜有关的天球坐标系主要有赤道坐标系、地平坐标系以及水平坐标系^[36]。由于周日运动的存在，用赤道坐标系描述恒星位置最为方便，传统的太阳望远镜一般为赤道式。赤道式望远镜结构沉重不适用于大口径望远镜，大型望远镜为了减小体积和重量通常采用地平式结构。不同坐标系之间的根本区别在于所选用的基本圈不同，所采用的基本点和度量方法也会有所差异，各坐标系之间存在相应的转换关系^[37]。

2.1.1 赤道坐标系

赤道坐标系是原点在地球地心，以地球赤道平面为基准平面，天北极和天南极为两极的天球坐标系，分为第一赤道坐标系和第二赤道坐标系。

第一赤道坐标系最重要的两个参数是时角和赤纬 (t, δ)，赤道式望远镜的指向常以这两个关键参数来进行望远镜的控制。时角指的是子午圈到目标天体所在赤经圈的角度（向西 0 到 180°，向东 0 到 -180°），即图 2.1 中的 $\angle t$ 。赤纬指的是过目标天体的赤经圈与天赤道的交点到目标天体离的角度（向北 0 到 90°，向南 0 到 -90°，天赤道赤纬为 0°），即图 2.1 中的 $\angle \delta$ 。在第一赤道坐标系中，目标天体的赤纬不因观测的时间和地点而改变，但时角与观测的时间和地点有关，

会随着地球自转而变化 24^h ，因此赤纬和时角主要用于确定目标天体的瞬时位置 [38]。

第二赤道坐标系最重要的两个参数是赤经和赤纬 (α, δ)。赤经等于天体所在的赤经圈距春分点所在的赤经圈的角度。赤经是一种与观测者无关的客观量，虽然春分点有规律性的运动，一般认为一个天体的赤经为常数。

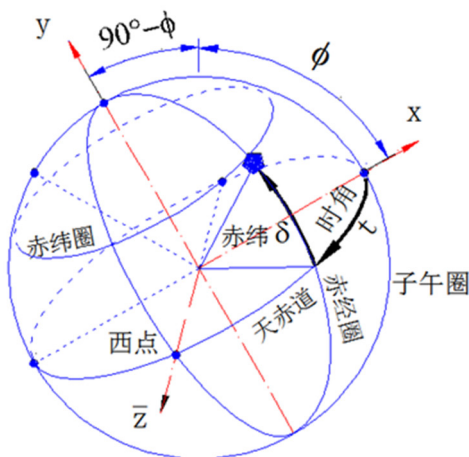


图 2.1 赤道坐标系

2.1.2 地平坐标系

地平坐标系将真地平圈定为基准圈，基本点为北点，天顶为极点 [37]。由于地球自转引起的视运动，目标天体的地平坐标随着时间的不同而改变。此外，地平坐标的基准与观测者所处的地面位置直接相关，目标天体的地平坐标也会随着观测点的不同而改变。在地平坐标系中，最重要的两个参数是高度角和方位角。高度角定义为过目标天体的地平经圈与地平圈的交点到目标天体的角度（向上 0 到 90° ，向下 0 到 90° ），即图 2.2 中的 $\angle h$ 。方位角是指子午圈到目标天体所在地平经圈的角度（以正南/正北为零，向西逐渐变大，向东逐渐变小），即图 2.2 中的 $\angle A$ 。由于地平坐标是以观测者来建立基准的，便于使用者直观地感受太阳位置的变化。在天文观测和天体测量中，需要测算地平坐标以便于进行坐标系转换 [37]。

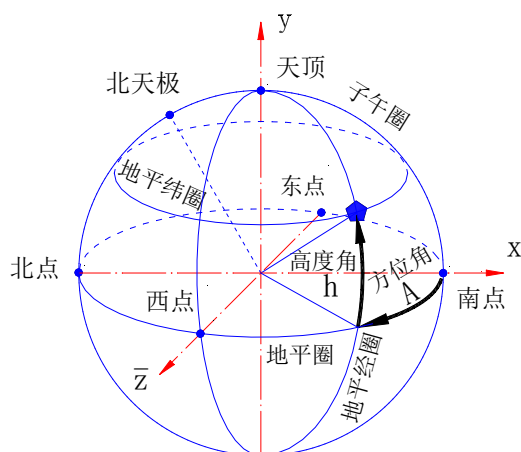


图 2.2 地平坐标系

2.1.3 坐标系的转换

根据观测的需要，可以对不同坐标系进行转换。坐标系转换的基础是理解坐标旋转所涉及的矩阵变换。首先定义坐标旋转对应旋转变换矩阵的表示方法，如图 2.3，矢量 $\mathbf{r}(x, y, z)$ 为旋转前的坐标，矢量 $\mathbf{r}'(x', y', z')$ 为旋转后的坐标：

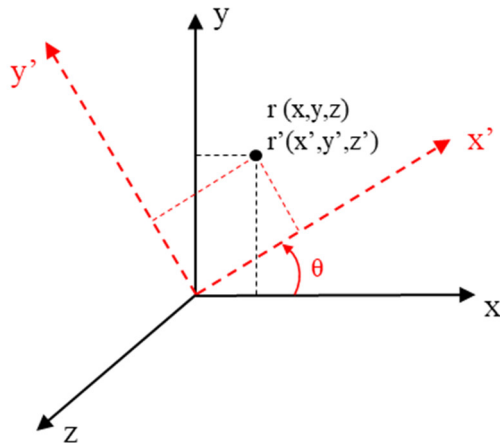


图 2.3 坐标系旋转

那么, YZ 平面、ZX 平面和 XY 平面分别绕 X 轴、Y 轴和 Z 轴转动 θ 角(逆时针为正), 则有^[39]:

$$\begin{aligned} r' &= R_x(\theta)r \\ r' &= R_y(\theta)r \\ &\dots \quad (2.1) \\ r' &= R_z(\theta)r \end{aligned}$$

其中：

$$\begin{aligned} R_X(\theta) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}; \\ R_Y(\theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}; \\ R_Z(\theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad \dots (2.2)$$

对于任意两个坐标系,可将其转换关系分解成几次绕轴旋转,通过将 $R_X(\theta)$ 、 $R_Y(\theta)$ 、 $R_Z(\theta)$ 组合运用即可实现相应的坐标转换。若观测者所在的地理纬度为 φ ,则赤道坐标系相当于在地平坐标系绕 Z 轴转动 θ (如图 2.3), 其中 $\theta = 90^\circ - \varphi$ 。通过式 2.1、2.2, 地平坐标系 (x, y, z) 与赤道坐标系 (x', y', z') 的相互转换关系为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad \dots (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \dots (2.4)$$

利用式 2.3, 可以将赤道坐标转化为地平坐标系:

$$\left. \begin{aligned} \sin H &= \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t \\ \tan A &= \frac{\sin t}{\sin \phi \cos t - \cos \phi \tan \delta} \end{aligned} \right\} \quad \dots (2.5)$$

利用式 2.4, 可以将地平坐标系转换为赤道坐标系:

$$\left. \begin{aligned} \sin \delta &= \sin \phi \sin H - \cos \phi \cos H \cos A \\ \tan t &= \frac{\sin A}{\sin \phi \cos A + \cos \phi \tan H} \end{aligned} \right\} \quad \dots (2.6)$$

综上, 利用上述公式可以实现不同天球坐标系之间的转换。怀柔观测基地的望远镜设备多为赤道式望远镜, AIMS 为地平式望远镜, 通过坐标系转换更容易理解不同架构的望远镜在指向与跟踪控制上的区别与联系。

2.2 太阳实时方位的计算

指向的目标是日面中心, 实现指向首先需要计算实时的日面中心坐标。本文

采用 P.Bretagnon 和 G.Francou 提出的 VSOP87 行星理论^[40], 该方法可以较为准确的计算出任意给定时刻太阳系内八大行星相对于太阳的位置分布情况, 计算过程相对简便, 计算误差在 2" 以内^[41]。

根据该理论对应的地球周期项系数, 可以计算:

$$\left. \begin{aligned} l &= \sum_{i=1}^n L_i \tau^i \\ b &= \sum_{i=1}^n B_i \tau^i \\ r &= \sum_{i=1}^n R_i \tau^i \end{aligned} \right\} \quad \dots (2.7)$$

式 2.7 中, l 为日心黄经, b 为日心黄纬, r 为日心距离, L_i 、 B_i 、 R_i 为周期项系数。 τ 为当前儒略日距离 $J2000.0$ 的千年数, 可按照式 2.8 计算, 其中 J_D 为当前的儒略日:

$$\tau = (J_D - 2451545)/365250 \quad \dots (2.8)$$

式 2.9 将日心黄经、日心黄纬转化为地心黄经 L' 、地心黄纬 B' :

$$\left. \begin{aligned} L' &= l + \pi \\ B' &= -b \end{aligned} \right\} \quad \dots (2.9)$$

考虑章动修正量 $\Delta\lambda_1$ 和光行差 $\Delta\lambda_2$, 通过式 2.10 可得到视黄经 L 、视黄纬 B :

$$\left. \begin{aligned} L &= l + \pi + \Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2 \\ B &= -b \end{aligned} \right\} \quad \dots (2.10)$$

利用黄道坐标系到赤道坐标系的变换公式, 通过 L 和 B 可计算视赤经、视赤纬:

$$\left. \begin{aligned} \tan \alpha &= \frac{\sin L \cos e - \tan B \cos e}{\cos L} \\ \sin \delta &= \sin B \cos e + \cos B \sin e \sin L \end{aligned} \right\} \quad \dots (2.11)$$

式 2.11 中, α 为视赤经, δ 为视赤纬, e 为真黄赤交角。通过 α 可计算时角 t :

$$t = S_0 + T + \Delta T - \alpha \quad \dots (2.12)$$

式 2.12 中, S_0 是当天平时 0^h 的恒星时, T 是当前的北京时间, $\Delta T = 120^\circ - \lambda$ 是当地的地理经度与东经 120° 的差, 以时分秒为单位。通过视赤纬 δ 和时角 t 得到

方位角 A 和高度角 H :

$$\sin H = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t \quad \dots (2.13)$$

$$\cos A = \frac{\sin \delta - \sin H \sin \phi}{\cos H \cos \phi} \quad \dots (2.14)$$

综上, 利用上述公式可以实时计算日面中心坐标。图 2.4 为怀柔太阳观测基地不同节气太阳方位角、高度角的变化。

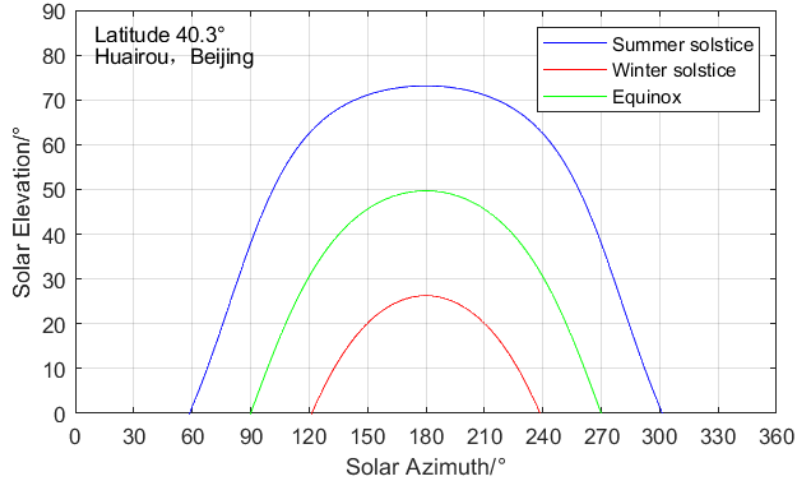


图 2.4 怀柔太阳观测基地不同节气太阳方位角、高度角的变化

2.3 望远镜实时位置的检测

通过安装测角仪器可以测量望远镜轴系的转动角度来实现位置检测。常见的测角仪器有传统光学度盘、圆感应同步器、圆光栅编码器、光电编码器等。

AIMS 轴系测角设计方案中采用高精度的绝对式圆光栅编码器, 选用对称安装四个读数头获取转角数据, 并用于纠偏和跳动。绝对式光栅编码器型号为海德汉 ECA4000-425, 实时控制器为倍福 CX 系列嵌入式 PC 实时控制器和 TWinCat 实时控制内核。海德汉 ECA4000-425 为 29 位编码器, 测量步距为 $0.0024''$, 光栅精度为 $\pm 1.5''$ 。

本文的实验主要基于怀柔太阳观测基地的望远镜设备开展, 部分望远镜无光栅钢带码盘。为了降低成本并提升兼容性, 我们决定将原电机更换为带有绝对编码器的伺服电机。

通过电机的轴上编码器, 可以实现对电机转动量的测量。电机驱动望远镜机架的转动, 利用编码器可以反映望远镜在赤经、赤纬方向的运动情况^[42]。通过标

定，可以建立编码器数值与望远镜赤经、赤纬方向转动角度的对应关系。从而通过读取编码器数值，建立望远镜坐标，得到望远镜当前位置的具体信息。

轴上编码器的采集系统集成在伺服电机里，上位机控制器通过 RS485 通信或 RS232 通信可以同时连接赤经、赤纬方向的电机，把位置信息作为串行数据进行读取，将各个数据进行处理后可以得到两个轴的绝对位置信息^[43]。相比于光栅钢带码盘，轴上编码器无需进行特殊定制，轴上编码器的数据采集相对简单，不需要额外配置光栅读数头和数据采集卡，也不需过多考虑安装精度和系统校准等问题。同时，直接更换电机不会涉及到望远镜结构的位移，不需要对轴系进行重新校正。

2.4 太阳指向的基本方法

望远镜指向是指为望远镜的轴选择需要旋转的角度，以便在视场中能看到指定的目标^[44]。指向控制系统是望远镜轴系运动控制的重要子系统，其功能是能够自动将望远镜对准太阳，无需观测人员进行手动对准。如图 2.5 所示，首先需要建立太阳实时位置和望远镜实时位置模型。依据位置模型，计算出望远镜位置和太阳位置之间的位置差。然后根据位置差，换算到运动控制系统的脉冲量上，将脉冲量发送到轴系控制系统，由轴系控制系统驱动望远镜指向太阳。望远镜的指向控制系统要求能快速、准确的把望远镜指向观测目标。

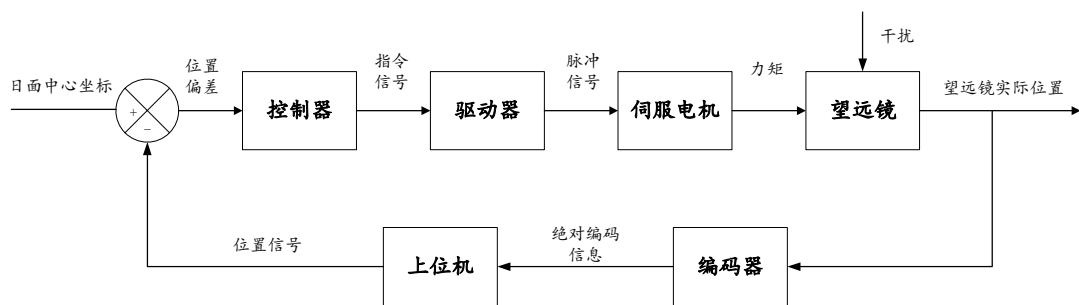


图 2.5 指向系统控制流程图

通过读取时间和地理位置信息，实时计算日面中心坐标。利用轴上编码器得到望远镜位置，并将望远镜位置与日面中心的位置差作为输入。控制器将根据下列公式换算为相应的指令信号发送到驱动器。驱动器根据指令将脉冲信号发送到伺服电机，由电机驱动望远镜轴系系统指向太阳。

驱动器发送脉冲数

$$= \frac{\text{日面中心赤经（赤纬）对应总单圈数} - \text{望远镜当前赤经（赤纬）总单圈数}}{\text{电机每旋转 1 单圈输出脉冲数}}$$

利用上述基本方法，通过软硬件结合，可以实现太阳的实时指向。

2.5 太阳跟踪的基本方法

恒动跟踪是指赤道式望远镜的赤经轴可以通过匀速转动来补偿因地球自转而产生的天体视运动^[12]，从而通过设定恒定转动速度后可以实现跟踪太阳。每天太阳在赤经方向上保持恒动，恒动跟踪属于开环跟踪，望远镜的轴系误差会影响恒动跟踪精度，单靠恒动跟踪难以满足高精度磁场观测的需要，需要进行高精度导行。

夜天文的导星方法与太阳导行方法有本质的区别。在夜天文的自动导星算法中，目标星点的提取和星点质心的定位是关键步骤，目标星体的识别精度和质心坐标的计算精度将直接影响最后的跟踪精度^[45]。夜晚星空中的星体经过光学系统后在焦平面上成像形成点状光斑，点状光斑目标的细分定位方法主要分为基于灰度和基于边缘两大类^[46]，星点中心定位技术实际上是利用数字图像处理中的点状光斑定位技术^[47]。与夜天文分布在较暗背景上的点状光斑不同，太阳是强面源像，夜天文的导星方法无法采用。太阳导行的关键步骤是对太阳图像移动量进行高精度检测，一般通过对面源像的位置定标计算偏移。面源像的位置定标是指确定观测目标在 CCD 上的位置，一般以确定目标的“中心”为基准，对于太阳而言可以是太阳像的重心或圆心^[41]。

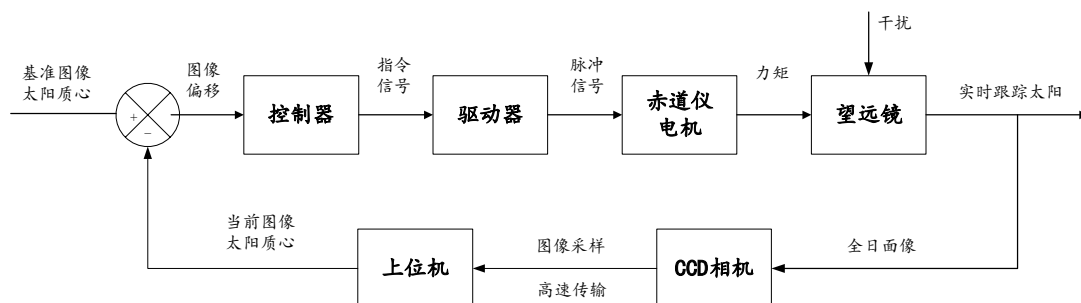


图 2.6 导行系统控制流程图

太阳导行有四象限探测、线阵探测器导行、面阵探测器导行等方法^[48]。随着大尺寸 CCD 相机的推广和计算机性能的提升，全日面图像实时处理逐渐成为提高导行精度的可行手段之一。在我们的地面测试平台中，通过全日面导行镜和大尺寸 CCD 相机获取可见光全日面像，利用算法实时计算全日面像的质心位置，通过与基准图像质心的偏移量来自动控制望远镜的运动，以实现长时间高精度的跟踪。图 2.6 是导行系统控制流程图，具体的流程为^[48]：CCD 相机采集首张太阳像计算质心作为基准；利用导行镜和高帧频 CCD 相机获取全日面像，通过 GigE 接口高速传输给上位机；上位机实时计算图像的太阳质心，并与基准图像的质心做比较，得到质心在赤经、赤纬方向的偏移；根据算法设定的条件进行判定，满足调整的条件后，通过 TCP/IP 通信到控制器；控制器发送信号指令到驱动器，驱动器根据偏移量发送相应脉冲到赤道仪的伺服电机进行校正。

2.6 本章小结

本章介绍了实现太阳指向和跟踪的基本原理。只有掌握了不同坐标系定义和转换方法，理解了基于 VSOP87 行星理论计算实时的日面中心坐标，建立了望远镜实时位置模型，并明确了指向与跟踪系统框架和流程，才能指导具体研究的开展。

第3章 望远镜轴系运动控制系统

望远镜轴系运动控制系统的功能是实现轴系的基本运动控制,可以通过上位机发送快动、慢动、微动或者相应脉冲量的指令实现对赤经轴、赤纬轴的运动控制,也可通过手柄实现对轴系的运动控制。图 3.1 是典型的赤道式望远镜的机械结构示意图,电机通过转动蜗轮蜗杆驱动望远镜轴系的运动。

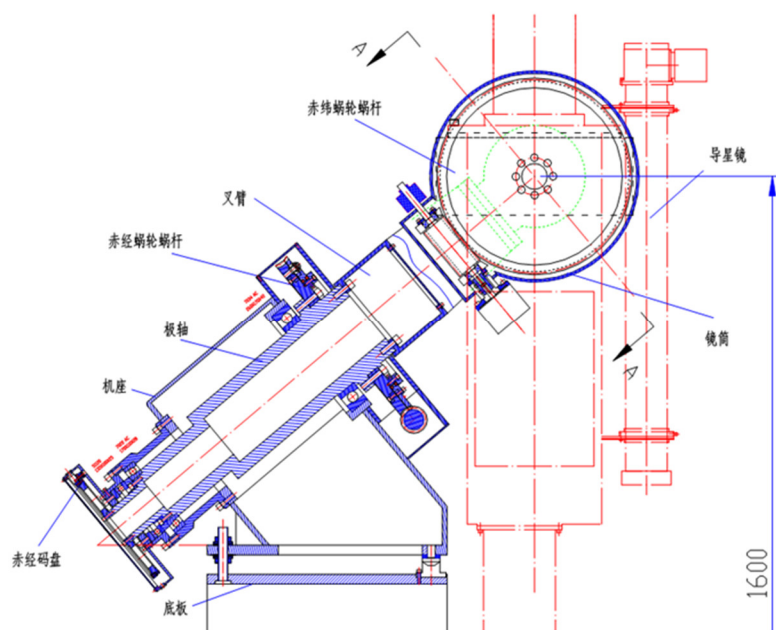


图 3.1 典型赤道式望远镜机械结构示意图

轴系运动控制系统是望远镜系统必不可少的部分,指向跟踪控制是在望远镜轴系运动的基础上实现的。指向跟踪控制系统通过控制电机运动,从而控制望远镜赤经和赤纬轴的运动,最后实现指向跟踪的目的。进一步开展指向和跟踪方法研究,需要对怀柔太阳观测基地望远镜进行轴系升级,优化改进轴系运动控制系统。

3.1 硬件选型与实现

3.1.1 硬件选型

轴系运动控制系统的硬件主要由运动控制器、驱动器、伺服电机、位置检测

装置和上位机组成，如图 3.2 所示。

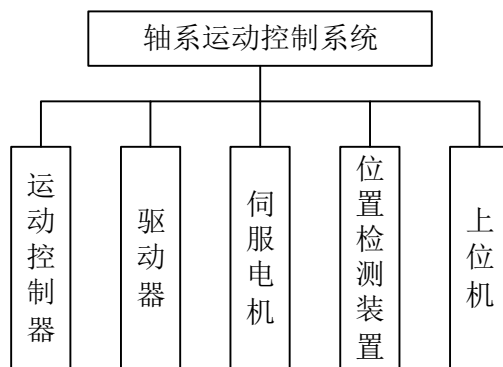


图 3.2 轴系运动控制系统硬件组成

结合怀柔太阳观测基地的实际需要，经过调研，选定了以下硬件型号：

（1）运动控制器

运动控制器采用众为兴型号为 ADT-8860 的 PMC 控制器，最多可支持六轴运动控制。该款控制器的内部寄存器可以通过标准协议被轻松访问，从而实现多种控制功能，灵活性高且自定义开发空间大。

控制器采用 SANSUNG 系列 32 位高性能处理器 Samsung S3C2440AL，主频 400MHz，板载 64MB SDRAM，SDRAM 时钟频率高达 100MHz。输出脉冲频率最大为 2M，具有 86 路输入 IO 和 40 路输出 IO。控制器通过标准以太网接口（RJ45）与上位机直连通信，串口一般用于系统升级、控制台调试、系统信息显示，USB 接口主要用于烧录 LUA 脚本程序。



图 3.3 众为兴 ADT-8860

（2）伺服电机、驱动器

伺服电机选用松下机电公司 MINAS A6 系列产品（图 3.4），电机型号为 MSMF082L1U2M，驱动器型号为 MCDLT35SF。这款电机及其配套的驱动器，具备体积小、功率大的特点，满足望远镜设备对安装尺寸和转矩的要求。能快速

响应，内置算法可自动消除微型振动提升定位精度。通过前面板或 PC 能快速调整参数，可自动设定和调整自适应陷波滤波器功能及各种增益。驱动器的输入电压为三相 220V，响应频率 3.2kHz，可根据实际需要切换 7 种控制模式。通过 RS485 可与上位控制器进行 1 : n 通信，通过 USB 可以实现电脑和驱动器的通信，在配套软件内可以更改电机参数并监视运行状态。



图 3.4 松下 MINAS A6 系列电机与驱动器

（3）位置检测装置

位置检测装置使用的是松下 A6 伺服电机 23 位轴上绝对式编码器，分辨率达到 8388608 p/rev。绝对式编码器通过读取光电码盘的机械刻线输出唯一的二进制数字，每一位置的信息都是唯一且固定的^[49]。与增量式编码器不同，绝对式编码器通电后就能提供位置信息并随时供后续信号处理电子电路读取，不需要进行原点复位，也不需要任何参考点就能知道轴转动的绝对位置信息，这对于指向功能的实现是极为重要的。发生断电或意外移位时，有独立电源的绝对式编码器也不会丢失编码信息。绝对式编码数据主要有单圈数据和多圈数据，单圈数据为电机旋转一圈之内的绝对位置，多圈数据为编码器清零后电机旋转的圈数，通过 RS232/485 协议可以读取多轴的多圈和单圈数据。

（4）上位机

上位机操作系统为 Windows7，处理器为 Intel Core i7 CPU，主频 2.93GHz，内存为 4GB，硬盘 1TB。

3.1.2 硬件实现

完成主要硬件选型后，还需要配备相应的外围设备，如控制器电源、滤波器、断路器、屏蔽磁环等，最后将硬件连线并集成到金属控制箱内。控制箱的布局如

图 3.5 所示：

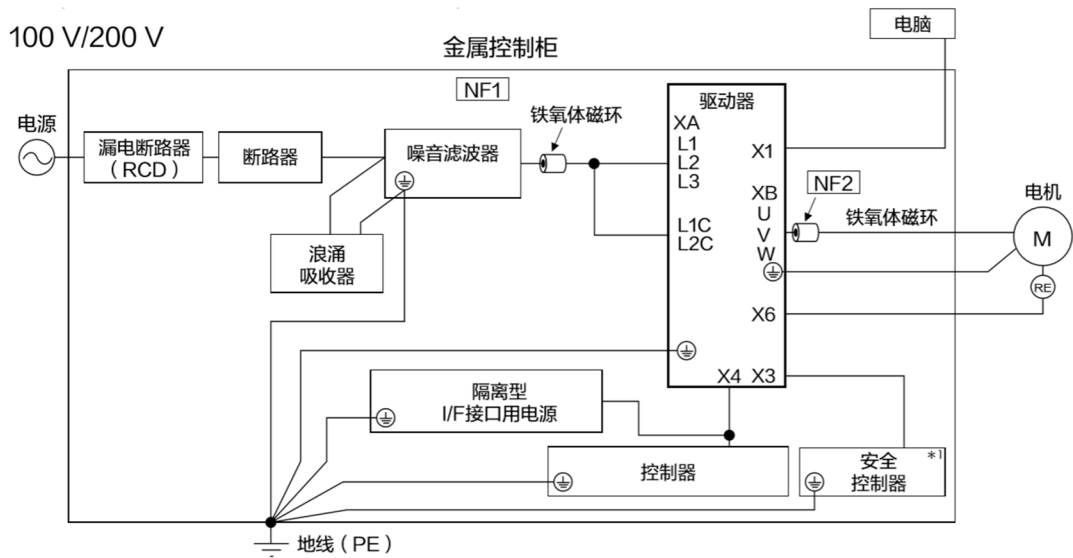


图 3.5 轴系控制箱布局规划

通过 USB 与驱动器通信，将赤经轴驱动器设为主驱动器，赤纬轴驱动器设为从驱动器。两轴的驱动器通过 RS485 连接，主驱动器与上位机通过 RS232 连接，便于上位机接收两轴的编码器数据，如图 3.6。读取两轴编码器数据时，需间隔 50ms 以上。

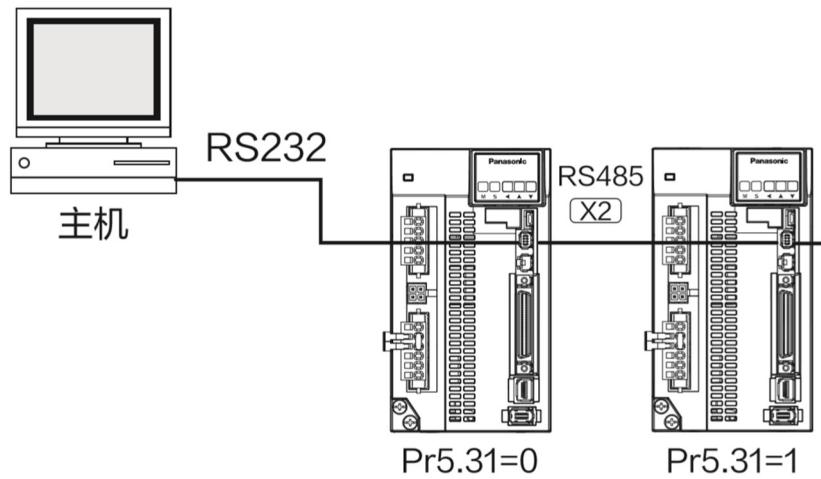


图 3.6 驱动器与上位机通信模式

ADT-8860 控制器有六个驱动器控制接口，选用 Axis-X、Axis-Y 控制接口分别与赤经、赤纬驱动器连接器 X4 连接，接口引脚连接见表 3.1。

表 3.1 控制器引脚与驱动器接口对照

控制器引脚	功能	驱动器接口	功能
1	XPU+	3	PULS1
2	XPU-	4	PULS2
3	XDR+	5	SIGN1
4	XDR-	6	SIGN2
5	/	/	/
6	OUT18	29	SEV-ON
7	XECZ+	23	OZ+
8	XECZ-	24	OZ-
9	/	/	/
10	+24V	7	COM+
11	24GND	41	COM-
12	XECA +	21	OA+
13	XECA-	22	OA-
14	XECB+	48	OB+
15	XECB-	49	OB-
/	/	13	GND
/	/	25	GND

按照说明连线 and 焊接后，轴系系统控制箱如图 3.7 所示。通过将 USB 通讯，将写好的 Lua 脚本烧录进控制器，可以实现不通过上位机软件，直接使用手柄控制望远镜，方便观测人员在必要的时候直接手动控制望远镜。同时控制箱预留 4 个限位开关接口，可在赤经、赤纬轴添加硬限位，保障望远镜的运行安全。

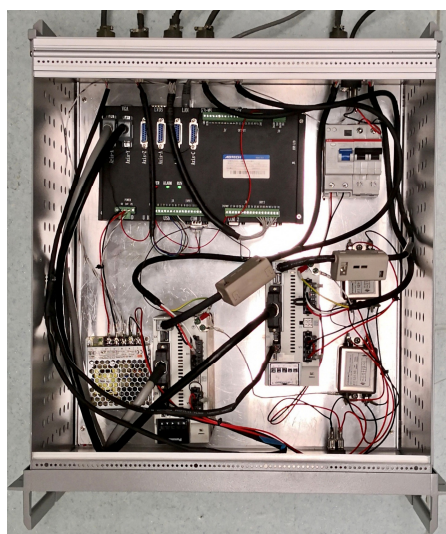


图 3.7 轴系系统控制箱

3.2 软件设计与开发

轴系运动控制软件是在 VS2010 的开发平台下,使用面向对象的 C++语言开发的,软件运行的操作环境为 Windows7。望远镜轴系控制主要的功能有三大模块(图 3.8):跟踪控制模块、运动控制模块以及辅助观测模块。

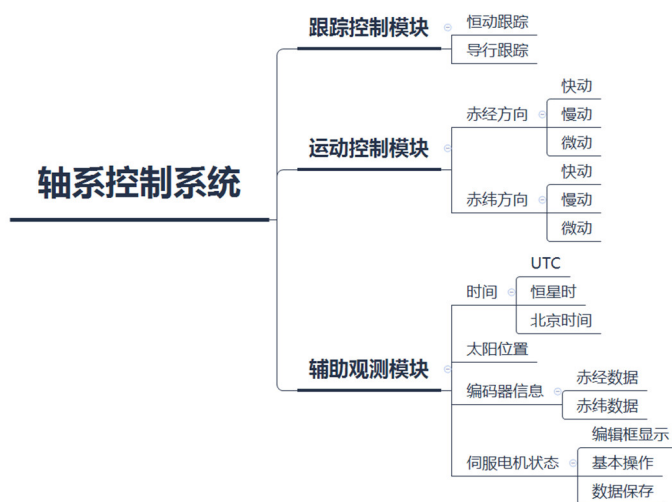


图 3.8 轴系控制系统基本框架

跟踪控制模块主要有恒动跟踪、导行跟踪。恒动跟踪是通过反复测试和调整,确定赤经轴电机的速度,让赤经轴保持 $15' / \text{min}$ 的速度跟踪太阳。导行跟踪建立在轴系控制的基础上,在程序内写入相关的轴系运动控制代码,预留导行系统的控制接口。

运动控制模块主要是对赤经轴、赤纬轴进行不同的速度控制,以便观测员根据需要及时调整望远镜位置。对快动、慢动和微动的速度进行合理区分和设定,速度调整按钮采用“点动”方式,方便精细调整。

辅助观测模块主要是为观测员提供观测必要的信息,包括当前时间、太阳位置、伺服电机状态和编码器信息。编码器信息的读取,让观测员能更直观感受望远镜的运动。同时获取绝对式编码器数据,也是实现指向功能的基础。

目前,怀柔太阳观测基地的望远镜都已更新为新的轴系控制系统,实现了软硬件的升级,图 3.9 为怀柔太阳观测基地所使用的轴系运动控制系统界面。导行系统和指向系统将在后续章节详细叙述,其余功能为其他测试所需。



图 3.9 轴系运动控制系统界面

3.3 本章小结

望远镜轴系运动控制系统是指向系统和跟踪系统开展工作的基础，通过对轴系运动的软硬件的更新，实现了怀柔太阳观测基地的轴系升级。改善了操作体验，提升了望远镜运行的稳定度，低成本的实现了望远镜位置检测，为进一步的研究奠定了基础。接下需要在轴系运动控制系统的基础上，在望远镜上进行指向跟踪控制方法调试，通过调试不断改进控制方法。

第 4 章 指向方法的实现与测试

上一章实现了对望远镜轴系的基本控制，下一步的工作是开展指向控制系统的调试。指向控制系统是望远镜轴系运动控制的重要子系统，其功能是能够自动将望远镜对准太阳，无需观测人员手动调整望远镜对准太阳。精确的指向，可实现对特定日面区域的观测，节省人工调试时间，提高望远镜观测效率。为了对指向方法进行深入研究，依托怀柔太阳观测基地的设备资源，在两台大型望远镜平台上开展了长期的实验。不同的望远镜具有不同的轴系状况，指向方法需要根据具体情况进行调整，面对棘手问题也需要提出新方法新手段。

4.1 指向方法实验平台

本论文主要以怀柔太阳观测基地的望远镜设备开展指向方法的测试与实验。开展指向实验的望远镜设备主要有：全日面磁场与活动监测望远镜、35 厘米太阳磁场望远镜。

4.1.1 全日面磁场与活动监测望远镜

全日面磁场与活动监测望远镜（The Solar Magnetism and Activity Telescope, SMAT）是怀柔太阳观测基地的重要观测设备之一（图 4.1），属于国家空间天气部门支持的重大课题，于 2005 年 12 月实现首光，2006 年 5 月通过验收投入常规观测^[50]。SMAT 望远镜由两个望远镜组成，一个是口径为 10cm 的全日面矢量磁场望远镜，主要测量 FeI 5324.19 Å 波段的全日面矢量磁图；另一个是口径为 20cm 的全日面 H α 望远镜，主要用于获取全日面 H α 单色像，后续研究中主要利用该图像进行指向误差分析。该望远镜通过观测太阳光球大尺度矢量磁场演化和色球活动现象，主要研究太阳活动爆发的动力学过程和触发机理^[51]。



图 4.1 全日面磁场与活动监测望远镜

SMAT 属于赤道式望远镜，该望远镜的机架上的全日面太阳磁场望远镜和全日面太阳 $H\alpha$ 望远镜，部分设计参数如表 4.1 所示。

表 4.1 SMAT 望远镜设计指标参数

	全日面太阳磁场望远镜	全日面 $H\alpha$ 太阳望远镜
入瞳直径	100mm	200mm
工作谱线	532.40nm	656.28nm
有效视场	33'×33'	34'×34'
透过波长半宽	0.0125nm	0.025nm
空间分辨率	优于 5"	优于 2"
CCD	1K*1K	2K*2K
跟踪精度	1"/30 分钟内(rms)	1"/30 min(rms),
磁场分辨率	纵横磁场优于 5 高斯；横 向磁场优于 150 高斯	/

4.1.2 35 厘米太阳磁场望远镜

35 厘米太阳磁场望远镜（Solar Magnetic Field Telescope，SMFT）（图 4.2）是多通道太阳望远镜的组成部分，于 1985 年投入使用，至今已工作 30 余年。SMFT 望远镜包括 35cm 口径真空折射镜、带有 KD*P 晶体的偏振分析器、双折射滤光器以及图像采集系统。双折射滤光器能滤掉无需观测的波段，选择性观测

FeI 5324Å 波段或 H β 4861Å 波段的太阳图像。通过 SMFT 望远镜可以获取光球矢量磁图和视向速度场数据、色球纵向磁场和视向速度场数据。



图 4.2 35 厘米太阳磁场望远镜

35 厘米太阳磁场望远镜属于赤道式望远镜，具体参数如表 4.2 所示。

表 4.2 35 厘米太阳磁场望远镜指标参数

参数	指标
物镜直径	350mm
焦距	2800mm
观测谱线	FeI 532.419nm、H β 486.134nm
带宽	0.0125nm
磁场测量精度	纵磁场 ± 10 高斯、横磁场 ± 50 高斯
视向速度场测量精度	$\pm 20\text{m/s}$

4.2 望远镜坐标系的建立

通过绝对式编码器，可实现对电机转动量的测量，建立望远镜坐标，得到望远镜当前位置的具体信息。为了对编码器数据与望远镜转动角度的建立映射关系，除了读取实时编码器数据，还需要得到望远镜实际转动的角度。针对 SMFT 望远镜，我们对刻度盘测量、传动比换算、三轴陀螺仪测量、实际观测值拟合等方法都进行过测试。

(1) 刻度盘测量

SMAT 望远镜和 SMFT 望远镜都有自带的刻度盘（图 4.3，左为赤纬方向，

右为赤经方向)，通过刻度盘可以估算望远镜转动的角度。赤经刻度盘以时角的时间单位显示，0~24 小时表示 0~360°，量程为 6~18 时，分度值为 1.25°。赤纬刻度盘直接以角度显示，量程为-25°~25°，分度值为 1°。在测试过程中，需要手动控制望远镜，通过肉眼将指针指向刻度盘指定角度后，记录当前角度和编码器数据。通过不断地测试和记录，利用线性拟合能得到编码器数值与望远镜角度的映射关系。为了提升拟合优度，必须测量足够多的数据点。该方法耗时费力，而且由于刻度盘的分度值较大，通过目视对准刻度盘的方法也会带来较大的误差。

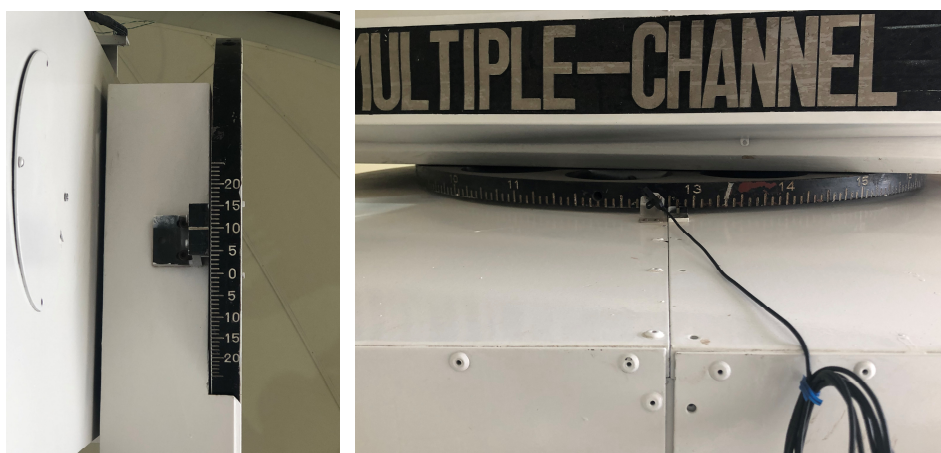


图 4.3 35 厘米磁场望远镜刻度盘

(2) 传动比换算

望远镜的传动比为电机转动的角速度与对应方向的轴系转动的角速度之比。电机转动的圈数可以通过编码器数值获取，知道传动比后可以计算出对应方向轴转动的角度。传动比与望远镜的传动系统相关，SMFT 望远镜主要的传动机构有蜗轮蜗杆传动、齿轮传动等。SMFT 望远镜已经建成 30 多年，为了不影响望远镜的正常观测，只能通过查询历史资料找到望远镜系统的基本布局和赤经赤纬传动系链（图 4.4、4.5）^[52]。

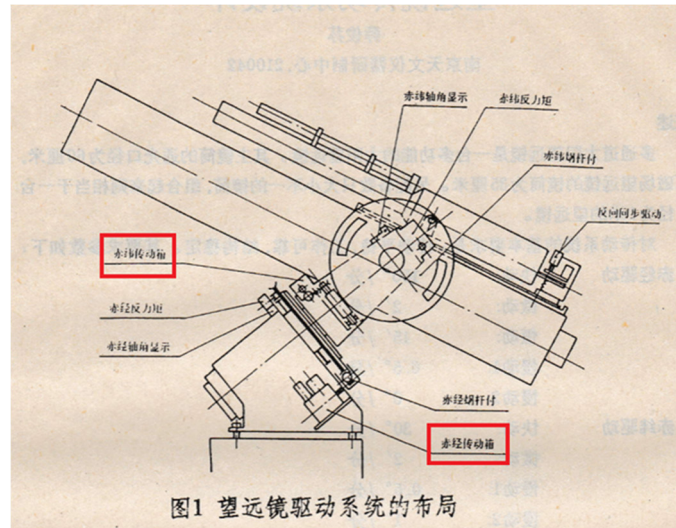


图 4.4 SMFT 望远镜驱动系统的布局

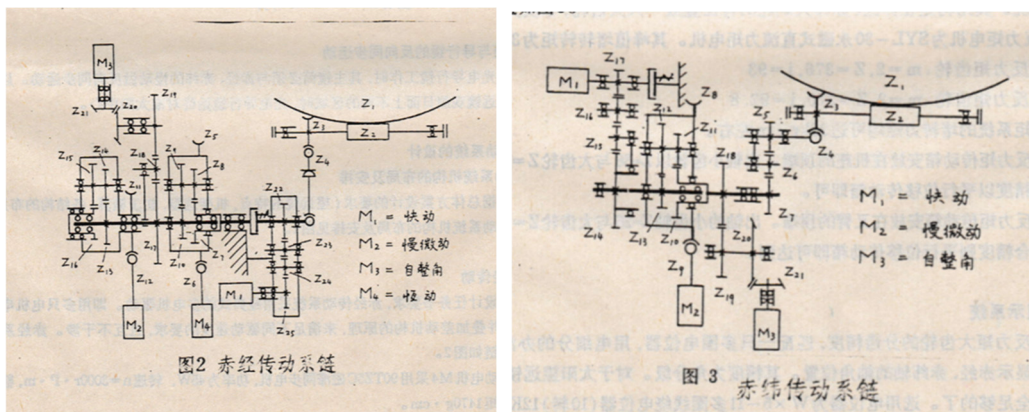


图 4.5 SMFT 望远镜赤经赤纬传动系链

通过计算和实际测试，赤经轴传动比 $i=10800$ ，赤纬轴传动比 $i=7200$ 。该方法使用的前提是望远镜传动平稳、结构稳定且轴系安装误差小，但在实际运用中依靠相对固定的传动比计算 SMFT 望远镜实际的转动角度误差较大，主要的原因是受到齿隙误差和轴系状况不佳的影响。

(3) 三轴陀螺仪测量

为了更精确地测量望远镜转动角度，我们在望远镜上装配了三轴陀螺仪。基于角动量守恒原理，陀螺仪能通过测量角速度计算出不同轴向旋转的角度。利用陀螺仪对望远镜的转动进行监测，记录转动角度的变化，可与编码器数据进行拟合。经过调研，我们选用了迈科传感 ML7100 的 MEMS 陀螺仪，该陀螺仪可以同时测量望远镜的高度角、翻滚角和方位角，测量的最高转速为 $300^\circ/\text{s}$ ，分辨率为 $\pm 0.1^\circ/\text{s}$ ，非线性误差为 $0.1\% \text{ of FS}$ 。在使用过程中遇到一些问题，主要有：

灵敏度低、零位飘移大、分辨率低。ML7100 是工业级的陀螺仪，整体性能距离军工级品质还有一定差距。以分辨率 $\pm 0.1^\circ/\text{s}$ 为例，SMFT 望远镜的恒动跟踪速度为 $15' / \text{min}$ ，恒动跟踪的情况下达不到陀螺仪的分辨率，无法对赤经轴进行运动监测。所以只能通过手动控制望远镜快动，来获取相应数据作为其他测量方法的参考。



图 4.6 三轴陀螺仪及测量界面

(4) 实际观测值拟合

为了进一步提升拟合优度和验证角度数据的精度，可以通过实际观测值进行拟合。在已经实现太阳实时方位的计算的基础上，通过观测员手动控制 SMFT 望远镜，利用观测程序视窗（图 4.7）调整视场，最终指向日面中心，记录当前太阳的时角、赤纬即为望远镜的赤道坐标。

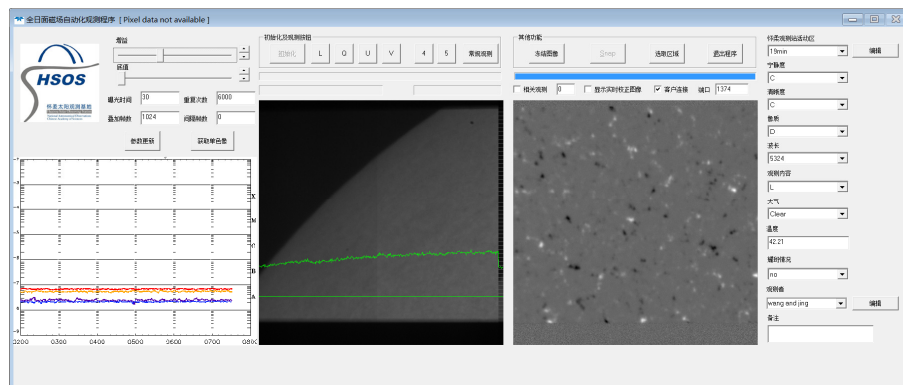


图 4.7 SMFT 望远镜磁场观测程序

通过连续 4 天，每天 8 组的数据，拟合出了图 4.8 的线性关系。其中 Y 为赤经/赤纬轴的总单圈数，X 为太阳的赤道坐标时角/赤纬。该方法的精度与采样密度相关，采样密度越大拟合优度越高。通过观测员手动指向日面中心，也会引入误差。因为望远镜赤纬方向在短周期内变化范围不大，所以拟合误差大于赤经方向。

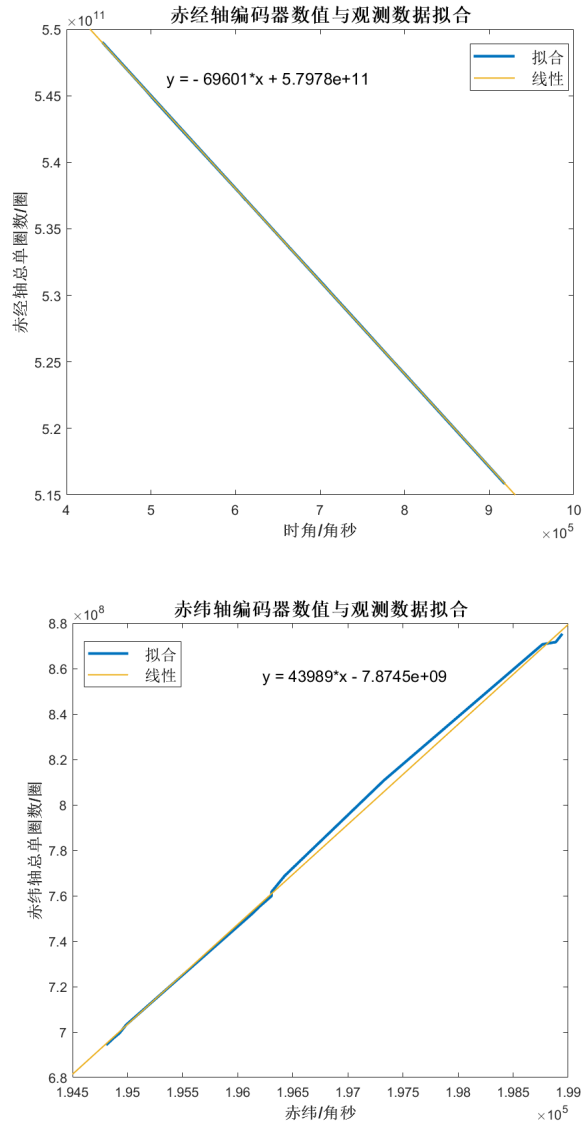


图 4.8 SMFT 望远镜编码器数值与观测数据拟合

4.3 SMFT 望远镜指向实验

指向方法前期主要在 SMFT 望远镜上调试，通过与实际观测值拟合建立映射后，可以读取两轴编码器的单圈、多圈数据计算出望远镜指向的第一赤道坐标。通过第 2.4 章节的方法，编写了相应的算法，在 2019 年 6 月 11 日下午开展了 2 个小时的指向实验。15:10 为基准图像，指向后望远镜停止运行，每隔 30 分钟重新指向一次并记录图像（图 4.9）。

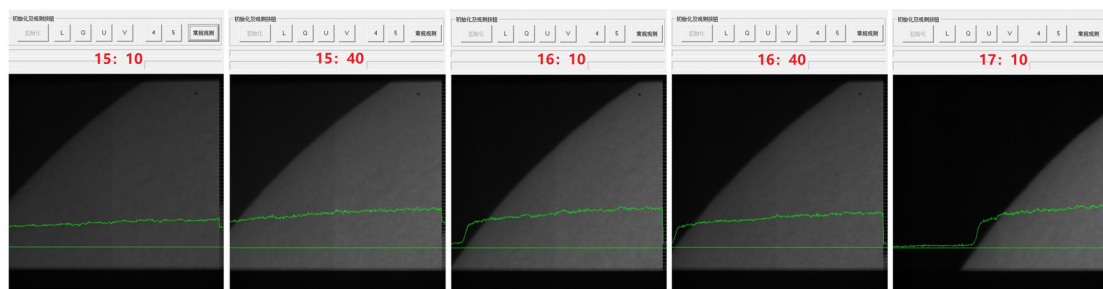


图 4.9 SMFT 望远镜 2019 年 6 月 11 日指向测试

图 4.9 中的为局部太阳像，视场为 $3.75' \times 5.45'$ ，为了更直观的展示指向效果，基准图像设为太阳像的左上边缘。经估算，6 月 11 日实验中的指向精度约为 $2'$ 。因为 SMFT 望远镜已建成 30 多年，轴系整体的状况不佳，在 SMFT 上达到角分精度的指向后，中后期的调试主要在 SMAT 望远镜上开展。

4.4 SMAT 望远镜指向实验

2019 年 7 月以后，主要以 SMAT 望远镜开展指向实验。SMAT 属于赤道式望远镜，设计之初安装了光栅钢带码盘作为位置检测元件，基于此元件构建了相应的位置闭环跟踪系统^[53]。2012 年，码盘发生故障无法利用其进行望远镜的跟踪导行。该望远镜无自动指向功能，需要观测员凭经验通过手柄控制望远镜指向太阳，指向精度不高且效率低。考虑望远镜实际情况，SMAT 望远镜指向精度的设计指标为 $1'$ 。

4.4.1 SMAT 望远镜轴系升级

首先针对 SMAT 进行了轴系升级，将高精度的轴上编码器替代光栅钢带码盘，以更低成本和代价实现望远镜位置检测。在改造升级前，SMAT 使用的是型号为 HC-SFS52 的三菱电机，额定功率 750W，带有 17 位增量式编码器，分辨率为 131072 p/rev。为了实现更高精度的位置检测和建立稳定的望远镜坐标，将电机更换为型号 MSMF082L1U2M 的松下 A6 伺服电机，驱动器型号为 MCDLT35SF。该电机有 23 位轴上绝对式编码器，分辨率达到 8388608 p/rev。

更换了新的轴系系统控制箱，控制器采用众为兴 ADT-8860 可编程控制器。能实现对伺服电机的控制，可读取编码器数值，同时控制箱具备单独的硬限位、手柄控制等接口，可以不经过软件就能实现相应的功能。

SMAT 望远镜轴系控制系统是在 VS2010 的开发平台下,使用面向对象的 C++语言开发的。在原有轴系控制系统的基础上,实现了实时读取并显示赤经赤纬编码器单圈/多圈数值。添加了“方位指向”“高度指向”等功能,实现日面中心的实时指向,并可通过输入时角、赤纬等参数实现在望远镜轴系允许范围内的指向(图 4.10 红色方框部分)。



图 4.10 SMAT 望远镜指向功能界面

4.4.2 建立 SMAT 望远镜坐标系

利用望远镜自带的刻度盘和三轴陀螺仪,测量编码器数值与望远镜实际位置,可以得到表 4.3、表 4.4。多圈数指电机旋转的圈数,即电机旋转了几圈;单圈数指电机旋转后的细分位置(23 位的分辨率,每个多圈被细分为 8388608 个位置);
 $\text{总圈数} = \text{多圈数} \times 8388608 + \text{单圈数}$ 。

表 4.3 望远镜指向不同时角对应的编码器数值

时角	单圈数据	多圈数据	赤经方向总圈数
06:00	5639173	64118	537866406917
08:00	6374936	64586	541793011224
10:00	2614303	65063	545790616607
12:00	4478367	65543	549819012511
14:00	5799792	66020	553821699952
16:00	3612120	66500	557846044120
18:00	6809296	66961	561716389584

将时角转化成角度（以正北为 0°，顺时针为正），并将时角与对应的赤经方向总圈数进行线性拟合可得到如下关系：

$$y_{\text{赤经}} = k_1 x + b_1$$

其中 $k_1=132960829.93$ 为赤经-圈数转换系数， $b_1=525874647886.86$ 是与选取的零位相关的截距，拟合后相关系数 $R^2=0.99998812$ 。

表 4.4 望远镜指向不同赤纬对应的编码器数值

赤纬	单圈数据	多圈数据	赤纬方向总圈数
30	2660548	65129	537866406917
20	4427532	65289	541793011224
10	1283567	65450	545790616607
0	3586696	65609	549819012511
-10	7425139	65767	553821699952
-20	2753279	65928	557846044120
-30	544914	66089	561716389584

将赤纬参数转化成角度（以水平为 0°，向上为正），将赤纬与对应的赤纬方向总圈数进行线性拟合可得到如下关系：

$$y_{\text{赤纬}} = k_2 x + b_2$$

其中 $k_2 = -398882489.78$ 为赤纬-圈数转换系数, $b_2 = 549807597273.57$ 与选取的零位相关, 拟合后相关系数 $R^2 = 0.99998812$ 。

4.4.3 建立望远镜坐标系方法改进

在初期调试中, 我们发现由于 SMAT 望远镜本身存在轴系误差, 在望远镜跨过平衡位置前后, 通过少量的数据并不能很好的拟合时角与圈数的关系。为了进一步提升指向精度, 提出将高精度的导行方法运用到指向方法中, 通过导行系统跟踪太阳并记录每一秒太阳实时位置和编码器数值。导行精度可以达到角秒级别, 可以视为导行后当前太阳时角就是当前望远镜的时角坐标。

2019 年 12 月 31 日在 SMAT 望远镜开启全天导行跟踪, 从开机启动 (8:45) 直到观测结束 (16:00), 获取超过 25000 个数据点。根据数据点的分布规律, 将数据点分为 4 段, 利用最小二乘法建立分段拟合关系。

$$y_{\text{赤经}} = \begin{cases} k_1 x + b_1 & 90^\circ \leq x < 150^\circ \\ k_2 x + b_2 & 150^\circ \leq x < 180^\circ \\ k_3 x + b_3 & 180^\circ \leq x < 210^\circ \\ k_4 x + b_4 & 210^\circ \leq x < 270^\circ \end{cases}$$

其中, k_i 为赤经-圈数转换系数, b_i 为与零位相关的截距。经拟合后得到:

$$\begin{cases} k_1 = 133989396.03 \\ k_2 = 134119324.64 \\ k_3 = 134096567.09 \\ k_4 = 133934683.68 \end{cases} \quad \begin{cases} b_1 = 525635679475.37 \\ b_2 = 525616255916.98 \\ b_3 = 525621311109.30 \\ b_4 = 525656405631.19 \end{cases}$$

R_i^2 为拟合后的相关系数, 使用导行数据分段拟合的新方法后比 4.4.2 章节的相关系数提升了两个数量级。

$$\begin{cases} R_1^2 = 0.99999950 \\ R_2^2 = 0.99999988 \\ R_3^2 = 0.99999962 \\ R_4^2 = 0.99999935 \end{cases}$$

4.4.4 实验测试结果

2020 年 1 月 4 日，在 SMAT 望远镜进行了指向功能的实际测试。预先设定基准图像（图 4.11），从早上 8:55 到下午 15:55，期间每隔 15 分钟进行指向，并保留指向后的全日面 $H\alpha$ 太阳像，图 4.12 为每隔 60 分钟指向后的 $H\alpha$ 太阳像。通过基于 Hough 变换的太阳图像质心与半径检测算法对图像进行分析，并与基准图像对比计算偏移。通过全天的指向，得到表 4.5：

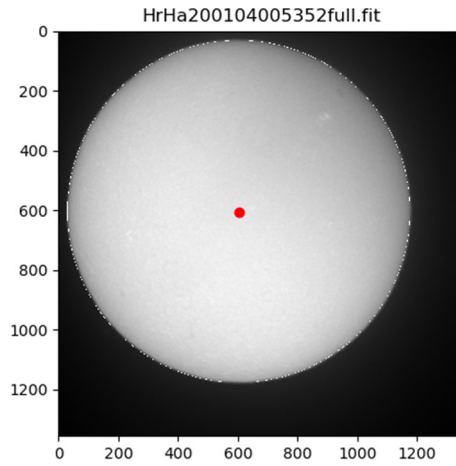


图 4.11 基准太阳图像

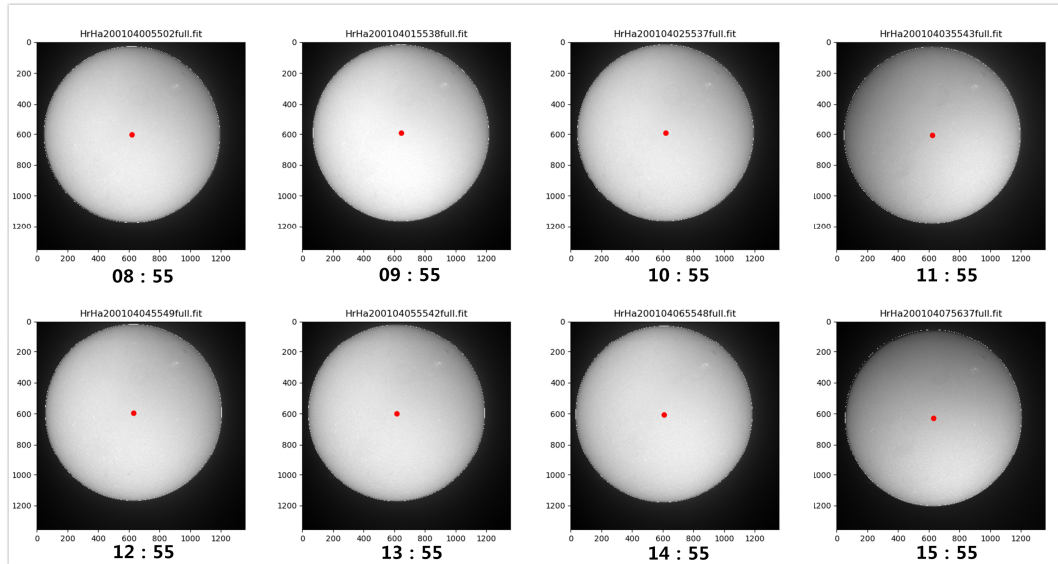


图 4.12 八个时刻指向后的 $H\alpha$ 太阳像

经计算，基准图像的（图 4.11 红点）圆心坐标为（1207.0,1211.0）。当天 $H\alpha$ 太阳像直径 $R \approx 2296.593084 \text{ pixels}$ ，中午 12 时太阳视直径 $R' = 32' 32.01''$ ，可知

图 4.11 中 $1 \text{ pixel} \approx 0.849959''$ 。

表 4.5 2020 年 1 月 4 日全天指向测试数据

时间	圆心赤经坐 标/pixel	赤经偏移量 /pixel	圆心赤纬坐 标/pixel	赤纬偏移量 /pixel	半径长度 /pixel
08:55	1239	32	1207	-4	1147.2
09:10	1241	34	1213	2	1146.6
09:25	1257	50	1207	-4	1146.2
09:40	1279	72	1203	-8	1146.6
09:55	1287	80	1185	-26	1147.2
10:10	1247	40	1201	-10	1149.4
10:25	1247	40	1193	-18	1148.4
10:40	1241	34	1193	-18	1148.8
10:55	1235	28	1185	-26	1149.6
11:10	1231	24	1215	4	1146.2
11:25	1259	52	1195	-16	1147.4
11:40	1267	60	1195	-16	1150.4
11:55	1243	36	1215	4	1146.2
12:10	1231	24	1201	-10	1148.8
12:25	1249	42	1195	-16	1147.8
12:40	1271	64	1189	-22	1148.4
12:55	1259	52	1189	-22	1150.6
13:10	1257	50	1191	-20	1149.2
13:25	1269	62	1187	-24	1150.2
13:40	1235	28	1187	-24	1146.2
13:55	1231	24	1197	-14	1151.6
14:10	1213	6	1193	-18	1150.0
14:25	1229	22	1203	-8	1149.2
14:40	1205	-2	1209	-2	1149.2
14:55	1217	10	1211	0	1150.2
15:10	1235	28	1239	28	1148.8
15:25	1195	-12	1263	52	1145.8
15:40	1265	58	1293	82	1144.8
15:55	1259	52	1257	46	1149.6

图 4.13 为赤经、赤纬与基准图像的指向偏差(以像素为单位)。利用公式 4.1, 可计算指向的标准偏差, $S_{RA} = 43.16927388 \text{ pixels}$, $S_{DE} = 25.28185938 \text{ pixels}$ 。已知 $1 \text{ pixel} \approx 0.849959''$, 所以赤经方向的指向误差约为 $36.69''$, 赤纬方向的指向误差约为 $21.49''$, 指向总误差约为 $42.52''$ 。指向精度优于 $1'$, 满足指向

精度的指标要求。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \quad \dots (4.1)$$

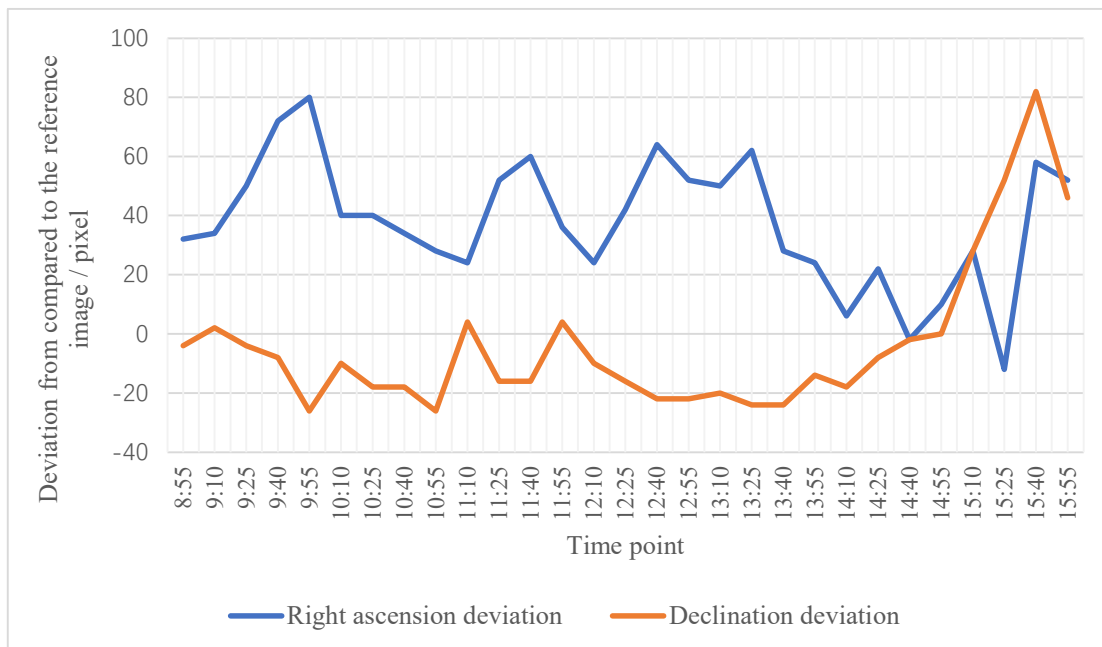


图 4.13 不同时间点对应的赤经（赤纬）指向偏差

4.5 本章小结

指向精度是评价望远镜性能的重要指标，在很大程度上影响着望远镜是否能够进行自动控制和无人值守。利用望远镜观测目标天体的首要任务便是指向目标，即移动望远镜的机械轴使天体在望远镜的视场范围内。

前期实验主要在 35 厘米太阳磁场望远镜（SMFT）上开展，通过对刻度盘测量、传动比换算、三轴陀螺仪测量、实际观测值拟合等方法建立 SMFT 望远镜坐标系。通过实际测试，在 SMFT 上达到角分级别的指向精度。

中后期实验主要在全日面磁场与活动监测望远镜（SMAT）展开。针对 SMAT 望远镜进行轴系升级，使用伺服电机轴上 23 位高精度绝对式编码器替代光栅钢带码盘；通过 VSOP87 行星理论实时计算日面中心位置；提出使用基于大面阵 CCD 的高精度导行系统不间断跟踪太阳并记录太阳位置，利用最小二乘法分段拟合太阳实时位置与绝对值编码器数值的方法，建立指向算法并实现日面中心指向。经实测，赤经方向的指向误差约为 $36.69''$ ，赤纬方向的指向误差约为 $21.49''$ ，

满足 SMAT 的指向要求,该方法成本低兼容性高,对于其他赤道式望远镜的升级改造具有借鉴意义。

第 5 章 跟踪方法的验证与测试

太阳矢量磁图需要多幅图像累加生成,高精度的跟踪是保证叠加图像稳定的关键。由于跟踪精度要求高,赤道仪自带的跟踪系统只能做初级的跟踪,通常称之为恒动系统。赤道仪无法满足太阳磁场望远镜的跟踪精度,一般会研制专门的高精度跟踪装置,称之为导行系统。

跟踪导行系统的功能是实时跟踪太阳像,保证太阳像在视场中的偏移量小于指标值,从而保证磁场观测期间的高空间分辨率。导行系统是望远镜提高跟踪精的关键部件,是获得高灵敏度的太阳磁场的重要保障。本课题的导行方法为利用一个独立的导行镜探测到全日面太阳像,通过计算日面重心并判别图像偏移,进而调整电机转动速度,保证图像重心的稳定。

5.1 导行方法测试平台

本课题以全日面矢量磁像仪(Full-disk solar vector MagnetoGraph, FMG)在怀柔太阳观测基地开展地面试观测为契机,完成了 FMG 载荷地面试观测导行跟踪系统的设计,并在地面试观测平台开展验证和测试。

FMG 是 ASOS 卫星的三台载荷之一,ASO-S 卫星是中国科学院空间科学战略性先导科技专项中第二批确定的科学实验卫星之一,卫星轨道高度为 720 公里,设计寿命为 4 年。ASO-S 卫星旨在以太阳活动第 25 周峰年观测为突破口,以观测太阳上两类最剧烈的爆发现象—耀斑和日冕物质抛射以及产生它们的磁场结构作为主要科学目标,揭示磁场演化、耀斑爆发、日冕物质抛射三者之间的关系,简称“一磁两爆”,在发现和研究太阳爆发机理的同时,也为空间天气预报提供重要的理论基础^[54]。FMG 目标是实现整星科学目标中的“一磁”,即获取全日面矢量磁场数据。

为了对 FMG 进行全系统性能测试和定标试验,怀柔太阳观测基地搭建了用于 FMG 外场测试的地面试观测平台,如图 5.1 所示。高精度的跟踪是实现高分辨观测的基础^[42],地面试观测平台需要有一套高精度跟踪系统保证联试工作的顺

利开展。为实现高精度跟踪太阳，结合 FMG 方案阶段试观测的基本情况和观测指标，在地面试观测平台上开展了导行跟踪系统的研制。



图 5.1 FMG 地面试观测平台

5.2 导行系统需求分析

在 FMG 的设计方案中，常规模式下采用积分观测，单幅图像由 30 秒内采集的多幅图像累加生成，除满足图像采样速率外，此过程还需要保持太阳像位置相对不变。此外，FMG 还有深积分模式，需要 18 分钟采集图像进行积分处理。利用较长时间的多帧叠加换取磁场灵敏度的提高，这就要求望远镜在观测时必须具备长时间、稳定、高精度的自动跟踪能力^[5]。

FMG 系统以 ASO-S 卫星为平台，卫星的姿态变化、指向精度以及颤振等因素都会对系统的连续稳定观测产生不利影响。在太空中卫星平台的设计指向精度 $\leq 0.01^\circ$ ，指向稳定度 $\leq 0.0005^\circ/\text{s}$ 。结合磁场试观测的实际需要和测试平台的实际情况，我们将地面试观测的跟踪精度指标定为 $1''/30\text{ min(RMS)}$ 。目前正在建设的 AIMS 在设计方案中的跟踪及其精度^[55]：没有摆镜： $\leq 1''/30$ 分钟，加入摆镜 $\leq 0.3''/30$ 分钟，在没有稳像系统的情况下地面试观测的跟踪精度指标是相对合理的。

5.3 软硬件设计

搭建用于 FMG 试观测的导行跟踪系统，需要结合实际情况完成相关的硬件

选型、安装和调试等工作，并将算法编写进入控制软件，通过软硬件平台结合实现导行功能。

5.3.1 硬件设计

在实验中，导行系统主要依托以下硬件开展实验：

(1) 赤道仪

赤道仪采用日本西村制造所的 NH-HR-02 叉式单筒赤道仪，操作控制系统为制造商定制开发的 Master of Telescope 程序，通过上位机可以实现太阳指向和恒动跟踪。其设计指标中指向精度为 $10''$ (RMS) (高度 $\geq 20^\circ$)，带自动导向装置的跟踪精度为 $5''/10 \text{ min}$ (高度 $\geq 30^\circ$)。

(2) 全日面导行镜

导行镜采用 Vixen 望远镜，主镜筒口径为 100mm，主镜口径为 105mm，焦距为 1000mm，焦比为 F9.5。为了便于调整，导星镜另外安装了可调整距离的巴洛镜，口径 50mm，焦距 100mm，安装过程中可通过手动调焦。实际观测中，巴洛镜放大倍率为 1.273，合成焦距为 1273mm。

(3) CCD 相机

采用 IMPERX 公司型号为 GEV-B2020M 的相机，该相机体积小，重量轻，可提供 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 的图像分辨率，靶面尺寸为 $15.15\text{mm} \times 15.15\text{mm}$ ，标准帧率为 16 fps，像素尺寸为 $7.4\mu\text{m} \times 7.4\mu\text{m}$ 。经测试全日面太阳像尺寸约为 $1600 \text{ pixel} \times 1600 \text{ pixel}$ ，该相机满足实验要求。使用 GigE 接口，通过 Cat5e 或者 Cat6 网线每秒能传输 120MB 数据。

5.3.2 算法与软件设计

上位机程序在 VS2010 平台下使用面向对象的 C++ 语言进行开发。算法中设定了判定条件^[48]，只有满足判定条件的图像才会计算质心。不同的质心算法对导行方法的影响不大^[56]，本次方案采用平均亮度阈值法。满足条件的全日面太阳像，首先通过 OTSU 算法设定阈值并使用式 5.1 将图像二值化。

设全日面太阳像中某一点像素值为 $f(i, j)$ ，通过阈值 T 进行分割：

$$g(i,j) = \begin{cases} 1, & f(i,j) > T \\ 0, & f(i,j) \leq T \end{cases} \quad \dots (5.1)$$

经过二值化处理后的图像可通过质心法计算质心位置。设图像有 i, j 两个方向, m, n 分别为 i, j 方向的像素点数量, 像素点 (i,j) 处的灰度值为 $g(i,j)$, 图像质心的坐标 (x,y) 可通过式 5.2 进行计算:

$$x = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i,j) \times i}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i,j)} \quad \dots (5.2)$$

$$y = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i,j) \times j}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i,j)}$$

设基准图像的质心为 (x_0, y_0) , 当前图像质心位置为 (x, y) , 偏移量按照式 5.3 计算:

$$\begin{aligned} dx &= x_0 - x \\ dy &= y_0 - y \end{aligned} \quad \dots (5.3)$$

通过计算, 实时获取的图像的质心偏移量 dx 、 dy 再将其转化为控制指令, 就能实现导行。赤道仪仅可以依靠继电器吸合控制两个预留接口来实现高精度导行。前期调试中, 使用的方案是通过众为兴 ADT-8860 控制器对继电器进行吸合控制, 依据偏差来发送相应脉冲驱动电机的方式来调整望远镜位置, 这样导致系统复杂且响应时间长。为了提升跟踪精度, 后更换为研华 PCI-1761 数字式 IO 卡, 引入 IO 卡后提升了系统稳定性, 降低了控制难度。

在导行过程中, 需要与赤道仪的轴系控制系统相配合。与将质心偏移量换算为运动控制系统的正负脉冲量进行轴系控制的方法不同^[56-57], 本次导行是通过偏移量改变脉冲频率进行控制, 在电机的赤经恒动速度的基础上, 采用加减速完成调整。通过设置速度调整系数 $SpAdjust$, 根据偏移量 dx , 可以将当前速度调整为 $SpeedX = raPerpetualSpeed + dx * SpAdjust$, 其中 $raPerpetualSpeed$ 为赤经恒动速度。当 dx 小于设定的阈值后, 停止速度调整。通过速度调整系数 $SpAdjust$ 的设定, 可以实现在偏移阈值范围内, 不同的偏移量以不同的速度进行调整。使用这种方法, 赤经方向的速度始终大于 0 (设自东向西为正方向), 望远镜能保持自东向西的运动, 从而减小传动机构中齿隙的影响。如果使用正负脉冲量进行调整,

望远镜在往复运动之间会直接受到齿隙影响，加大系统震荡影响控制精度。赤纬轴一年的变化范围为 $-23^{\circ} 27' \sim +23^{\circ} 27'$ ，在一天中调整的幅度较小，此外赤纬轴没有设置恒动不能通过改变速度调整，只能通过正负脉冲量来调整。

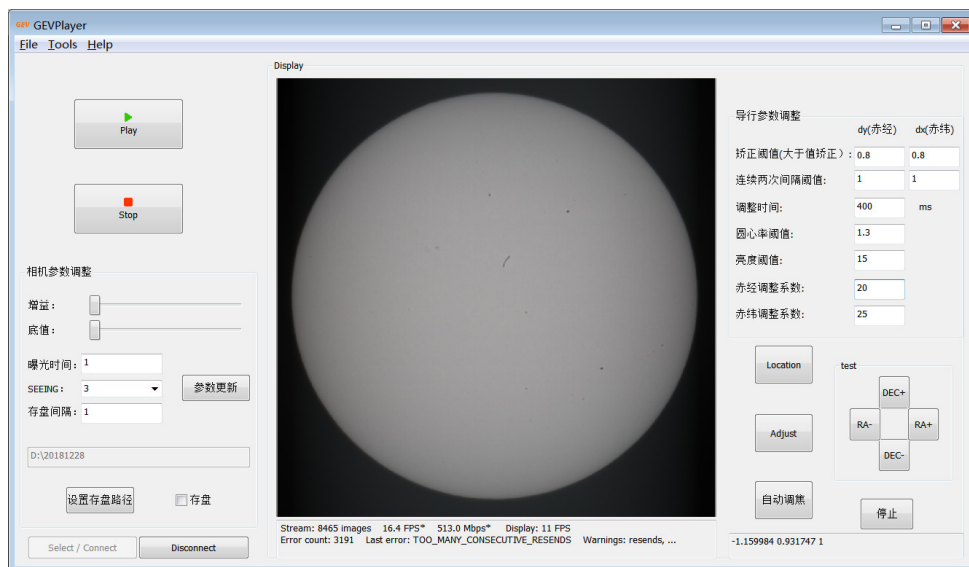


图 5.2 FMG 试观测导行系统界面

图 5.2 是 FMG 试观测导行系统的界面，界面左侧可以调整增益、底值、曝光时间等相机参数，同时可以设置存盘间隔和路径。界面右侧下方是导行系统的控制界面，点击 Location 按钮可以保存基准图像，点击 Adjust 启动导行功能，自动调焦可以根据图像进行自动调焦，十字键可以对轴系系统进行微动调整。用户通过界面右侧上方可以调整导行参数：只有质心偏移量大于矫正阈值才进行导行操作，可避免微小偏移触发操作，设定值需要经过调试，设定过大影响导行精度，设定过小容易引起轴系振动。为了避免质心大幅偏移时望远镜误操作，只有相邻两次偏移的差值小于间隔阈值才进行导行操作，一般将其设定为比矫正阈值略大的数值。导行时间是指多久进行一次导行检测和调整，设定为合理的导行时间，可避免系统高频振荡。理想情况下，全日面太阳像接近于正圆，用圆心率阈值判断图像是否为正圆，一般将其设定为 1.1~1.3。当长短轴之比小于设定值时，图像接近于正圆（比率为 1）才能进行导行操作，这样可以避免太阳像偏离出视场或视场受到遮挡时望远镜误操作。亮度阈值设定为观测条件较好时图像像素灰度平均值的 30%，低于设定的亮度阈值时，表示图像质量不佳会停止导行。根据试观测的实际情况设定合理的参数，可以避免误操作提升安全性，保证导行系统的可

靠性。通过界面参数的调整，使得导行系统在较短时间内与赤道仪的轴系系统协同工作。证明了导行系统具备较好的可移植性，对硬件兼容性高。

5.4 测试与分析

2019 年 5 月在外场观测期间，我们在恒动和导行两种条件下，记录了相机采集的全日面太阳像，进行对比并计算跟踪精度。此外，也对比了两种条件下 FMG 方案阶段试观测的太阳纵向磁图，分析跟踪精度对于磁图空间分辨率的影响。

5.4.1 不同跟踪条件下的跟踪精度

在实验中进行 30 分钟不间断的跟踪，以 1 秒/张的频率进行图像采样，逐一计算采样图像的质心坐标，并通过式 5.4 计算赤经（赤纬）的跟踪精度 RMS。

在式 5.4 中， a_i 为采样图像的质心赤经（赤纬）坐标， μ 为所有采样图像的平均质心赤经（赤纬）坐标， N 为采样图像的数量。在采样图像中，全日面像的直径约为 1595 像元，当天的太阳视直径为 $31' 33.78''$ ，所以全日面像中 1 像元 $\approx 1.187322''$ 。

若设 x_i 为采样图像的质心赤经坐标， y_i 为采样图像的质心赤纬坐标， μ_x 和 μ_y 分别为采样图像平均质心的赤经、赤纬坐标，则总偏差的 RMS 可通过式 5.5 计算：

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - \mu)^2}{N}} \quad \dots (5.4)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 + (y_i - \mu_y)^2}{N}} \quad \dots (5.5)$$

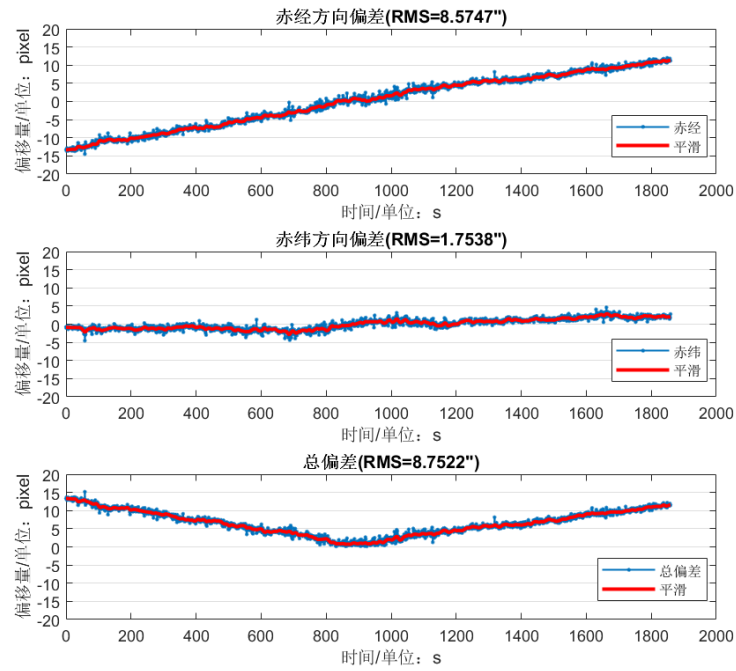


图 5.3 启动恒动跟踪 30 分钟内,太阳质心的偏移量情况

开启恒动 30 分钟内的太阳质心在赤经、赤纬方向以及总体的偏移情况如图 5.3 所示。赤经方向的跟踪误差 $\text{RMS}=8.5747''$ ，呈现一定的线性变化。赤纬方向的偏差主要集中在两个像元以内,跟踪误差 $\text{RMS}=1.7538''$ ，总偏差达到 $\text{RMS}=8.7522''$ 。在试观测之前我们对恒动跟踪精度进行了多次评估，恒动跟踪总偏差约为 $\text{RMS}=10''$ ，赤经、赤纬跟踪精度波动较大，不满足 FMG 地面试观测的要求。

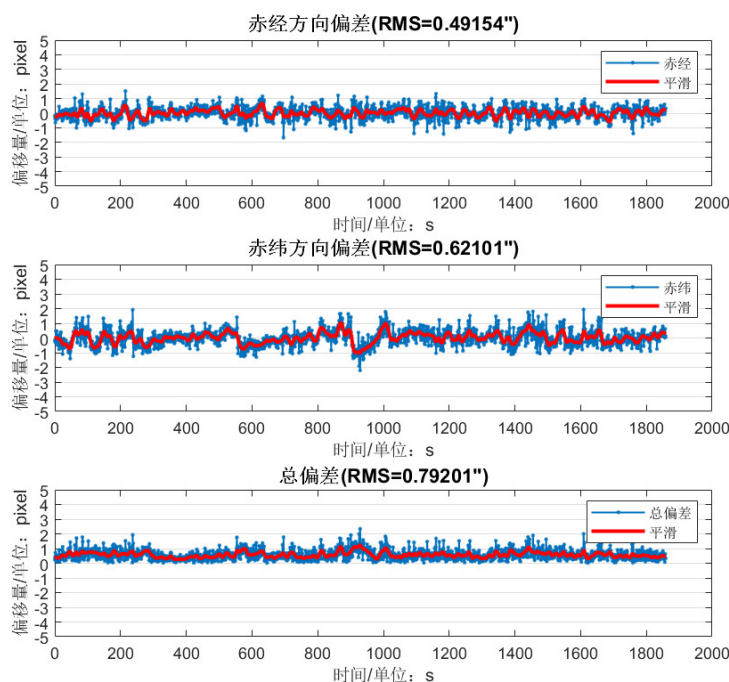


图 5.4 启动导行跟踪 30 分钟内,太阳质心的偏移量情况

开启导行 30 分钟内的太阳质心在赤经、赤纬方向以及总体的偏移情况如图 5.4 所示。赤经、赤纬方向的跟踪精度优于 $1''$ ，没有极端峰值的出现。总偏差 $\text{RMS}=0.79201''$ ，表明导行系统跟踪精度达到 $1''/30\text{ min}$ 的指标要求，可以满足 FMG 地面试观测的需求。

通过恒动和导行跟踪的对比，单靠赤道仪的恒动跟踪是无法满足试观测需求，加上导行跟踪后达到了指标要求。为了验证系统长时间工作的稳定性，图 5.5 为开启导行 210 分钟内的太阳质心在赤经、赤纬方向以及总体的偏移情况。赤经、赤纬方向长时间跟踪精度保持在 $\text{RMS}\leq 1''$ ，总偏差略大于 $1''$ ，证明了导行系统可以为 FMG 试观测提供稳定的技术支撑。

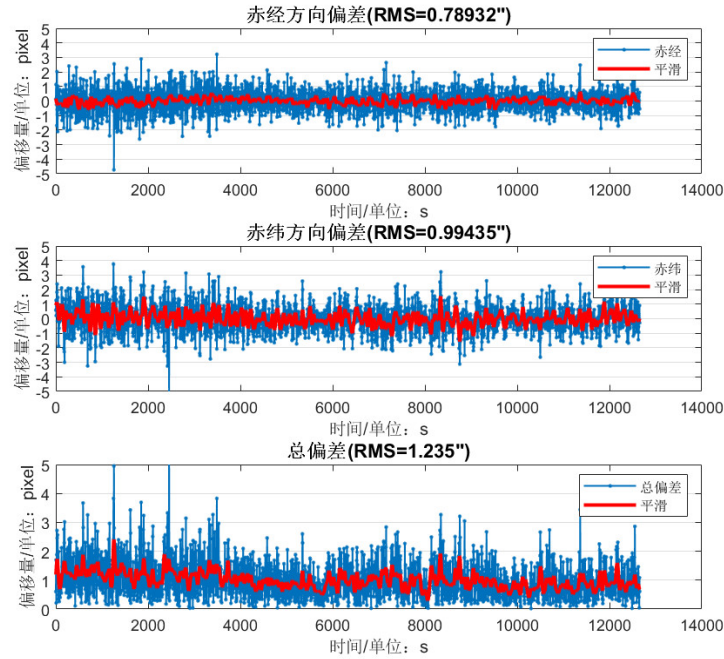


图 5.5 启动导行跟踪 210 分钟内,太阳质心的偏移量情况

5.4.2 不同跟踪条件下对磁图的影响

FMG 在常规模式下 30 秒生成单幅磁图,我们以纵向磁图为例(见图 7,为更直观显示结果,从全日面磁图中提取日面中心附近局部磁图)。纵向磁图中可以看到黑白磁特征结构,通过对这些特征点的识别,可以判断在不同跟踪条件下,跟踪点的位移情况。

图 5.6 为开启恒动跟踪 30 分钟前后的磁图对比,左图为刚开启恒动时的磁图,右图为开启恒动跟踪 30 分钟后的磁图,红色圆圈区域为特征点。特征点在赤经方向偏移 $32''$ 。

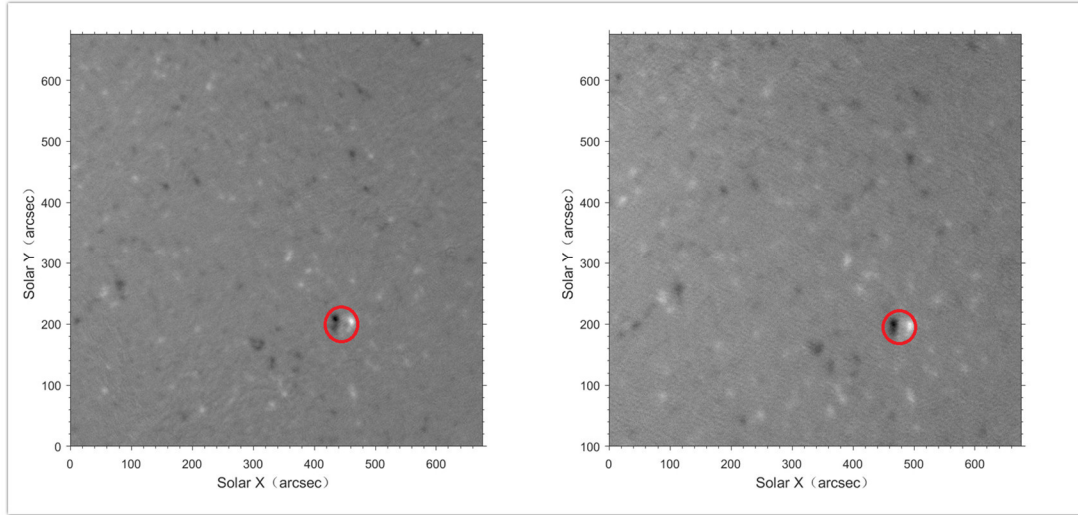


图 5.6 开启恒动 30 分钟前纵向磁图的对比

图 5.7 为开启导行跟踪 30 分钟前后的磁图对比，左图为刚开启导行时的磁图，右图为开启导行跟踪 30 分钟后的磁图，红色圆圈区域为特征点。特征点在赤经方向偏移 $14.5''$ 。尽管全日面像的质心位置相对不变，但局部日面位置会因太阳自转而发生变化。经过换算，30 分钟太阳赤道处因自转引起偏移最大量为 $16.6''$ ，跟踪点在赤经方向的偏移量略小于换算结果，表明跟踪状态良好。在导行跟踪下，在赤经方向的偏移比恒动条件下减少 $17.5''$ 。更少的偏移能减少在积分时间内因为图像偏移导致的磁图空间分辨率的降低，显示更丰富的磁图细节。

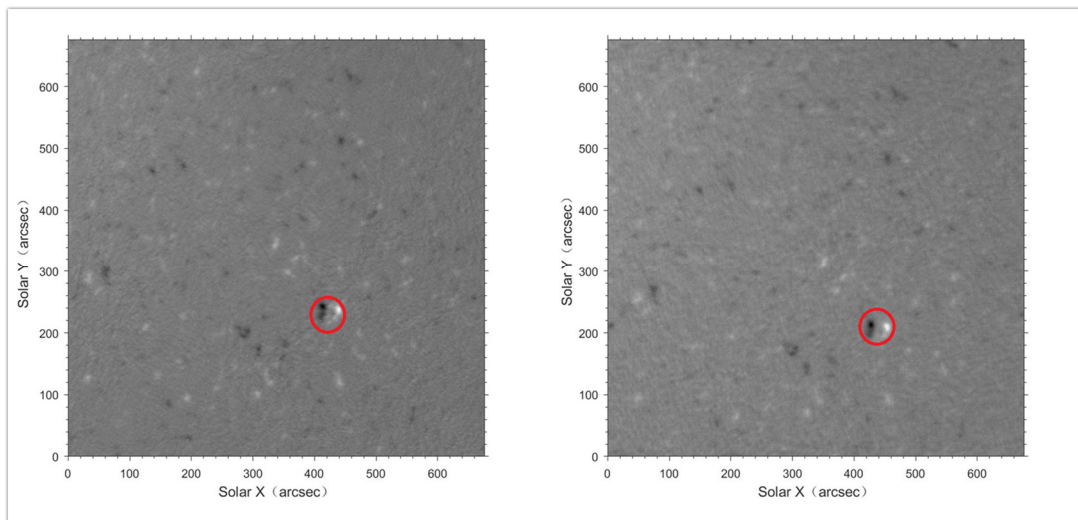


图 5.7 开启导行 30 分钟前纵向磁图的对比

5.5 本章小结

由于太阳磁场观测算法的特殊性要求太阳磁场望远镜必须在观测时间段内对太阳保持锁定，跟踪精度的好坏直接影响磁场数据的质量，所以跟踪系统是保证磁场观测的必要组成部分。跟踪是通过控制望远镜轴系运动，使太阳保持在望远镜视场中，导行是进一步提高跟踪精度的有效技术和方法。

以 FMG 在怀柔太阳观测基地开展地面试观测为契机，完成了 FMG 载荷地面试观测导行跟踪系统的设计，并在地面试观测平台开展验证和测试。导行跟踪系统通过大面阵 CCD 采集太阳像、多重逻辑条件判定、微调恒动跟踪速度校正偏移等策略，实现了优于 $1''/30\text{ min}$ (RMS) 的跟踪精度。该系统达到设计指标且工作稳定，对硬件兼容性高，可移植性强。通过对比分析方案阶段试观测期间纵向磁图，该系统实现了连续稳定的跟踪效果，提升了磁图空间分辨率，为 FMG 地面试观测提供了良好的技术支撑并已投入实际使用。

第6章 总结与展望

天文学中对天体指向和跟踪有一些经典的实现方法,本文根据太阳这一特殊观测目标以及怀柔太阳观测基地望远镜的赤道仪式机架结构、观测要求等,对其指向、跟踪方法进行了深入的学习、研究,形成了一套可以应用于怀柔观测基地望远镜的坐标计算方法和算法。同时,在不对望远镜机械结构进行大改造的前提下,通过电子学硬件系统的升级、软件算法的优化,实现了太阳磁场望远镜高精度指向、跟踪控制系统,赤经方向的指向精度为 $36.69''$, 赤纬方向的指向精度为 $21.49''$, 跟踪精度达到 $1''/30\text{ min}$, 满足了太阳磁场望远镜科学观测要求。

目前,指向方法已达到了 SMAT 使用需求,正在 SMAT 望远镜上做长期测试并积累数据,并在 SMAT 望远镜上尝试开展指星实验。跟踪方法已经投入使用,为 FMG 载荷的地面试观测提供了稳定可靠的技术支撑。

虽然已经满足 SMAT 和 FMG 要求,但是在系统研制过程中我们发现还有许多因素会影响望远镜的指向跟踪精度,例如:望远镜本身轴系误差、指向算法误差、大气蒙气差甚至是图像质心与半径检测算法等,后续可以通过量化分析建立误差模型来进一步提升指向精度。另外,定期开展指向测试,单独分析指向数据集,并将其组合成一个大的数据集。根据单独数据集随时间的变化以及和组合数据集的比较可以揭示望远镜的物理变化,对这些变化进行趋势分析可以预测并防止将来发生故障^[58]。

基于图像处理的跟踪方法,需要不断适应硬件和算法的改进。如何提升对硬件兼容性,增强可移植性使其在更多望远镜上得到运用是值得探索的方向。例如在 FMG 地面试观测期间,能否迅速与赤道仪协同工作,快速完成跟踪导行系统的设计与实现是非常关键的。将基于全日面图像处理的跟踪方法空间化也值得探索,针对空间限制条件对算法和硬件进行改进,可以解决微小卫星平台的稳像问题。

在研究过程中,我认为有一些新的技术和方法可以尝试在望远镜上使用:

- 三轴陀螺仪,将三轴陀螺仪安装在望远镜上,可以实时监测望远镜的运

行状态，及时发现运行异常。同时，对其监测参数的利用也能进一步提升自动化水平。

- 变焦镜头，通过变焦镜头可以扩大视场，逐步指向逐步缩小视场，通过反复迭代进一步提升指向冗余。
- 通过高精度导行改善指向精度，利用连续跟踪目标星体并记录星体位置和望远镜位置的方法，可以构建高精度的指向模型。

以上的方法和技术，希望能带来一些新的改进，促进天文技术的发展。

参考文献

- [1] 林元章. 太阳物理导论[M]. 科学出版社, 2001.
- [2] Carroll B W, Ostlie D A. An introduction to modern astrophysics[M]. Cambridge University Press, 2017.
- [3] 杜石然, 范楚玉, 陈美东,等. 中国科学技术史稿, 修订版[M]. 北京大学出版社, 2012.
- [4] Board S S, National Research Council, Astronomy and Astrophysics Survey Committee. Astronomy and Astrophysics in the New Millennium: Panel Reports[M]. National Academies Press, 2002.
- [5] 邓林华. 一米红外太阳望远镜光电导行系统的研究[D].中国科学院研究生院(云南天文台),2009.
- [6] 钱志瀚,顾健星,高一华,汪沪生.上海天文台六米射电望远镜指向精度的检测[J].中国科学院上海天文台年刊,1982(00):206-213.
- [7] 王京生.一种赤道式射电望远镜极轴的精密校准方法[J].云南天文台台刊,1982(02):75-84.
- [8] 程景全.英国 3.8 米红外望远镜指向误差的修正[J].天文学报,1987(03):308-314.
- [9] 杜鸿 ,苏步美.十米射电望远镜指向跟踪精度分析[J].云南天文台台刊,1991(02):52-60.
- [10] 韩溥,周玉兰,肖汉流,雷成明,吕静.紫台 13.7 米望远镜在 22GHz 波段的指向校准[J].紫金山天文台台刊,1991(01):64-71.
- [11] 顾健星.佘山 25 米天线导轨问题对指向误差影响的研究[J].中国科学院上海天文台年刊,1994(00):205-211.
- [12] 王志臣,王志,赵勇志.赤道式望远镜指向精度分析[J].长春理工大学学报(自然科学版),2011,34(01):9-11.
- [13] Zhang X. The basic parameters of static pointing model of telescope[J]. Chinese Astronomy and Astrophysics, 2001, 25(4): 499-505.
- [14] Xiang-ming Z, Wu W, Yun-cheng Z, et al. Research on the pointing model of the 1.2-m altazimuth telescope (1. Modeling of the global pointing)[J]. Chinese Astronomy and

- Astrophysics, 2004, 28(1): 105-111.
- [15] 赵金字. 光电望远镜误差分析及补偿技术[D].中国科学院研究生院（长春光学精密机械与物理研究所）,2005.
- [16] 王家骥,金光,颜昌翔.机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J].光学精密工程,2005(02):105-116.
- [17] 李岩,范大鹏.光电稳定机构指向误差建模与敏感度分析[J].国防科技大学学报,2008(01):104-109.
- [18] 赵彦. 大射电望远镜指向误差建模分析与设计研究[D].西安电子科技大学,2008.
- [19] Wallace P T. TPOINT--Telescope Pointing Analysis System[J]. Starlink User Note, 1994, 100.
- [20] Kimbrell J E, Greenwald D, Smith R, et al. Deterministic errors in pointing and tracking systems II: identification and correction of dynamic errors[C]//Acquisition, Tracking, and Pointing V. International Society for Optics and Photonics, 1991, 1482: 415-424.
- [21] Keitzer S A, Kimbrell J E, Greenwald D. Deterministic errors in pointing and tracking systems I: identification and correction of static errors[C]//Acquisition, Tracking, and Pointing V. International Society for Optics and Photonics, 1991, 1482: 406-414.
- [22] Negishi S, Kanzawa T, Tomono D, et al. Subaru Telescope improved pointing accuracy in open-loop and Az rail flatness[C]//Ground-based and Airborne Telescopes. International Society for Optics and Photonics, 2006, 6267: 62673K.
- [23] Gawronski W, Baher F, Quintero O. Azimuth-track level compensation to reduce blind-pointing errors of the Deep Space Network antennas[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2000, 42(2): 28-38.
- [24] Ukita N, Ezawa H, Ikenoue B, et al. Thermal and wind effects on the azimuth axis tilt of the ASTE 10-m antenna[J]. Publ. Natl. Astron. Obs. Japan, 2007, 10: 25-33.
- [25] Kong D Q, Wang S G, Wang J Q, et al. A new calibration model for pointing a radio telescope that considers nonlinear errors in the azimuth axis[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2014, 14(6): 733.
- [26] Kozhevnikov I E , Rudenchik E A , Cheragin N P , et al. A new controlling system for the solar

- tower telescope of IZMIRAN: II. A solar image motion compensator[J]. Instruments & Experimental Techniques, 2000, 43(1):114-118.
- [27] Klvana M , Bumba V , Sobotka M . A CCD-based guiding and control system for solar telescopes[J]. Astronomische Nachrichten, 2003, 324(4):305-307.
- [28] Varsik J R, Yang G. Design of a telescope pointing and tracking subsystem for the Big Bear Solar Observatory New Solar Telescope[C]//Advanced Software and Control for Astronomy. International Society for Optics and Photonics, 2006, 6274: 62741T.
- [29] Sobotka M, Klvaňa M, Melich Z, et al. Auxiliary full-disc telescope for the European Solar Telescope[C]//Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III. International Society for Optics and Photonics, 2010, 7735: 77351Z.
- [30] AIMS 指向跟踪系统控制方案设计.2018
- [31]柳光乾,杨磊,邓林华,李银柱,刘忠.大气湍流对天文望远镜光电导行精度的影响[J].光学学报,2013,33(01):7-11.
- [32] Wang Q, Cai H X, Huang Y M, et al. Acceleration feedback control (AFC) enhanced by disturbance observation and compensation (DOC) for high precision tracking in telescope systems[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2016, 16(8): 124.
- [33] Rong Mei,Mou Chen,William W. Guo. Robust adaptive control scheme for optical tracking telescopes with unknown disturbances[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics,2015,126(11-12).
- [34] Rimmele T R . Recent advances in solar adaptive optics[J]. Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering, 2004, 5490:34-46.
- [35] 饶长辉,朱磊,张兰强,饶学军,鲍华,孔林,郭友明,钟立波,马学安,李梅,王成,张小军,樊新龙,王晓云,凡木文,陈东红,冯忠毅.太阳自适应光学技术进展[J].光电工程,2018,45(03):22-32.
- [36] 胡企千著.望远镜技术与天文测天[M].南京: 东南大学出版社.2014.
- [37] 胡中为, 萧耐园, 朱慈璵. 天文学教程[M]. 高等教育出版社, 2003.
- [38] 王洪振. 航用天体位置计算及自动选星研究[D].大连海事大学,2012.
- [39] 王大轶,黄翔宇,魏春岭著.基于光学成像测量的深空探测自主控制原理与技术[M].北京:

中国宇航出版社.2012.

- [40] BRETAGNON, FRANCOU. Planetary theories in rectangular and spherical variables. VSOP 87 solutions[J]. 1988, 202(1-2):309-315.
- [41] 柳光乾. 一米红外太阳望远镜控制系统研制[D]. 2011.
- [42] 严灵杰. 光电望远镜视轴指向及预测技术研究[D].中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所),2019.
- [43] 柯子博, 晏磊, 王东光. 大气偏振中性点遥感观测系统研制与验证[J]. 影像科学与光化学, 2019, 37(03):85.
- [44] Wallace P T. Rigorous algorithm for telescope pointing[C]//Advanced Telescope and Instrumentation Control Software II. International Society for Optics and Photonics, 2002, 4848: 125-136.
- [45] Cai W , Wang L , Yuan B . Star detection and tracking algorithm of autoguiding[J]. Infrared & Laser Engineering, 2014.
- [46] 魏新国,张广军,江洁.星敏感器中星图图像的星体细分定位方法研究[J].北京航空航天大学学报,2003(09):812-815.
- [47] 马晓蕾. 星点高精度细分定位算法研究[D].北方工业大学,2017.
- [48] 郭晶晶,杨云飞,冯松,季凯帆,林佳本,曾真,王丙祥.太阳望远镜高精度导行方法[J].科学通报,2016,61(10):1112-1120.
- [49] 程晓莉, 谢剑英, 王林. 绝对式编码器在电机定位中的应用[J]. 控制工程, 2007, 14(5):548-550.
- [50] 林佳本,沈洋斌,朱晓明,邓元勇,曾真.怀柔太阳观测基地全日面磁场自动化观测系统[J].天文研究与技术,2013,10(04):392-396.
- [51] Zhang H Q, Wang D G, Deng Y Y, et al. Solar magnetism and the activity telescope at HSOS[J]. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, 2007, 7(2): 281.
- [52] 薛孙荪.望远镜传动系统设计[J].光学技术增刊,1995,129-132
- [53] 吴春晖,朱庆生,周小军.全日面太阳光学和磁场望远镜的自动跟踪与导行方法[J].天文研究与技术,2007(02):147-152+146.

- [54] 先进天基太阳天文台(ASO-S)卫星 FMG 初步方案设计报告.2017
- [55] AIMS 望远镜转台部件结构详细设计方案.2019.
- [56] 郭晶晶. 太阳望远镜的高精度自动导行和自动调焦方法的研究[D].昆明理工大学,2015.
- [57] 肖江,胡柯良,林佳本,申基,邓元勇.用大面阵 CCD 实现全日面像自动导行[J].光学精密工程,2008(09):1589-1594.
- [58] Kwok S H, Krasuski T, Lyke J, et al. Improving the pointing and tracking performance of the Keck telescopes[C]//Software and Cyberinfrastructure for Astronomy IV. International Society for Optics and Photonics, 2016, 9913: 991305.

致谢

一个人的成长，总是依托着关爱他所给的支持。又一次走到十字路口，感谢一路的雨露和阳光，硕士三年的时光又给了自己更多的勇气走向另一片广阔而未知的世界。

感谢我的导师邓元勇研究员，感谢您让我成为您的学生。是您带领着怀柔基地披荆斩棘，带领着我们追日问天。邓老师治学严谨、循循善诱，经常在科研上教给我“关键一招”，在迷茫时为我“指明方向”，感谢您每次对我论文提出的建议，您的治学态度永远是我学习的榜样。我想真的很难找到这样一位负责的老师，为了提高学生科研能力，亲自为组内研究生开设“科研与论文”课程，每周布置不同任务，亲自批改因材施教，还经常开设“公开课”拓展研究生的学术视野。感谢您一直关心爱护着我们 17 位研究生，给予我们机会去历练，给予我们空间去成长，成为您的学生是我的万分荣幸。

感谢我的导师林佳本研究员，您是我学术道路的领路人，感谢您两年多的悉心指导。感谢您一直以来对我课题的支持，让我有底气去尝试不怕犯错。每周的工作汇报、团队报告，日常一对一的交流和关心，感谢您让我不断修正航向，不断深入课题的研究。经师易遇，人师难求，您对待工作的态度鞭策我不断前行，您对待生活的态度激励我追求卓越。我会记得您的建议，多读书，多思考，多规划。感谢您一直以来的关怀，您辛苦了。

感谢王东光研究员对我课题的支持和帮助，您身上闪耀着“怀柔人”的拼搏精神，向您表达由衷的敬意。感谢白先勇老师、张志勇老师、孙英姿老师，对我课题的大力支持和帮助。感谢汪国萍老师、荆帅老师在获取观测数据和调试望远镜时给予我的大力帮助，感谢王丙祥老师、王建老师在电子和机械方面对我的帮助和指导。感谢组里的其他老师，是你们让我感受到了怀柔基地的无私和博爱。感谢王薏站长和站上的后勤人员，感谢你们一直以来的照顾。

感谢郭晶晶师姐，对我的课题不厌其烦地指导，鼓励我在课题上不断前进。感谢朱晓明师兄、王刚师兄、佟立越师兄、张鑫伟师兄、白阳师兄对我的帮助和鼓励。感谢 A202 办公室的所有伙伴，每天在 A202 总有那么多的快乐，是你们

让 A202 变成了温馨的“小家”。感谢杨潇师姐，你是如此的仗义，真诚地感谢你在这几年给予我这么多的帮助。感谢孙文君师兄，我不能想象如果没有你，我们将会多么手忙脚乱，A202 将少了多少乐趣。

感谢荀辉、周明尧、王雅琦，感谢际遇让我们四个人在研究生阶段学习同一专业，成长在同一课题组，谢谢你们让我的研究生生活增添了许多色彩。特别是荀辉，和你做了三年的室友真的是一件很棒的事。

感谢所有在硕士期间帮助和支持我的老师、同学们。感谢我的好朋友们，未来大家要更加努力。最后要感谢我的父母，感谢你们二十多年来对我的信任和鼓励，我才能坚定信心做好自己，不断朝着理想彼岸前进！

简 历

基本情况

陈垂裕，男，汉族，海南省三亚市人，中国科学院国家天文台在读硕士。

教育简历

2012 年 9 月-2016 年 7 月，山东大学，控制科学与工程学院，本科，测控技术与仪器专业

2017 年 9 月-至今，中国科学院大学，中国科学院国家天文台，硕士，光学工程专业。

获奖情况

2018 年 5 月 中国科学院 优秀共青团员

2018 年 9 月 中国科学院大学三好学生、优秀学生干部

2019 年 9 月 中国科学院大学三好学生、优秀学生干部

研究兴趣

太阳望远镜指向与跟踪控制

联系方式

通讯地址：北京市朝阳区大屯路甲 20 号 中国科学院国家天文台

邮编：100012

邮箱：cychen@nao.cas.cn chenchuiyu@163.com

发表文章及科研成果

- [1] **陈垂裕**,郭晶晶,林佳本,邓元勇.全日面磁场与活动监测望远镜轴系升级[J].天文研究与技术（已接收）
- [2] **陈垂裕**,郭晶晶,林佳本,白先勇,邓元勇,甘为群. FMG 载荷地面试观测导行跟踪系统的设计与实现[J].天文学报（已接收）
- [3] 王刚,林佳本,郭晶晶,张鑫伟,佟立越,白阳,**陈垂裕**.基于FPGA的多轴步进电机控制系统[J].天文研究与技术,2020,17(02):185-190.