



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

AIMS总控系统研究与应用

作者姓名: 佟立越

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: 理学博士

学科专业: 天文技术与方法

培养单位: 中国科学院国家天文台

2024年6月

Research and Application of the Master Control System of AIMS

**A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
in Astronomical technology and methods**

By

Tong Liyue

Supervisor: Professor Deng Yuanyong

Professor Lin Jiaben

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences

June, 2024

中国科学院大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。承诺除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体享有著作权的研究成果，未在以往任何学位申请中全部或部分提交。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人或集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名： 佟立越
日 期：

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

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

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名： 佟立越
日 期：

导师签名： 林桂本
日 期：

摘要

卓越的大型光学天文望远镜是复杂精密的集成系统，除了优良的台址，它还包含具有高成像质量和效率的光学系统、精密的机械系统、智能调度且快速响应的总控系统以及科学的数据处理系统。在这一体系中，总控系统犹如神经中枢，扮演着至关重要的角色，不仅统筹协调望远镜的整体运行，还精准调控各子系统协同作业，是确保望远镜能够高效获取高质量观测数据的基石。

“用于太阳精确测量的中红外观测系统”——AIMS是国家自然科学基金委员会资助的国家重大科研仪器研制项目。其旨在实现太阳磁场从“间接测量”到“直接测量”的跨越发展，是国际上第一台中红外太阳磁场观测设备，也是国内第一个中红外天文观测系统。系统由光学系统，机械系统，总控系统以及科学应用系统组成，其中，总控系统作为观测运行的大脑，是AIMS研制的重要环节。

本研究针对AIMS的总控系统从需求建模、标准提出、系统设计、关键技术研发以及系统应用等多个方面进行了深入的研究。

首先，我们对总控系统需求的关键因素进行了深入探讨：高海拔站址的远程自主要求，不同组件持续集成的松耦合高内聚要求，复杂观测模式的灵活协调控制需求，以及不同用户对环境与仪器数据的定制化需求。从而明确设计的总控系统需具备高稳定性，高伸缩性，自动化-自主化-智能化方向上可持续演进的特性，以满足常态和异常情况下的有效控制管理。

其次，在分析既有望远镜自动化分级标准的适用性后，结合相似领域内的自动化分级标准，提出了全新的望远镜自动化分级方案，以期为AIMS总控制系统的规划设计提供更为精确的指导。据此构建了一个感知-决策-控制的三层系统框架：在底层设备控制子系统中，主要涵盖了负责望远镜指向跟踪功能的望远镜控制子系统（TCS）、负责焦面仪器控制的焦面仪器控制子系统（ICS）、以及负责数据采集存储的观测控制子系统（OCS），这三个子系统共同确保了望远镜硬件层面的精确操作控制。中间层自主化支撑子系统则侧重于提供决策所需的背景信息，包括用于控制各个子系统间通信的通信控制子系统（CCS）、为能源管理决策提供依据的能源监控子系统（PMS）、用于感知并适应外部环境变化的环境感知子系统（EPS）、用于获取外部观测序列的观测交互子系统（OIS），以及通过收集并基于大数据模型进行分析与演进，从而不断优化和迭代决策策略的模型演进系统。位于顶层的中枢决策子系统依据预先设定或动态演化的策略，系统性地整合来自自主化支撑子系统的各类决策信息，调用OIS提供的观测任务序列，通过调动底层设备控制子系统相关功能执行决策后的观测任务，从而实现望远镜高水准的自主化控制运作。在实现这一目标的过程中，采用基于松耦合、高内聚原则的微服务架构进行软件系统设计，同时融入了全方位的控制策略和严格的系统安全防护措施，以确保总控制系统的稳定、可靠和高效运行。

此外，我们还攻克了自主化观测中的关键技术难点，包括自动指向跟踪、自动调焦、自动曝光增益控制、云遮挡分析及数据无损压缩技术，实现了观测全程的自动化功能。

最后，由于AIMS仍处于持续集成、持续调试阶段，因此，我们通过AIMS、温泉望远镜和SFMM三台望远镜上的实践验证，展示了AIMS总控系统设计理念的可行性和有效性。具体而言，在AIMS持续集成与调试过程中，已成功实施了Level 1级别的偏振定标自动化和FTIR科学观测的自动化；针对温泉望远镜的业务需求，简化系统框架并实现Level 2级别的部分自动化观测；而在追求更高自主化水平的SFMM上，精简AIMS总控系统框架的模型演进系统，实现了Level 3级别的有条件自主化观测。

据此验证了AIMS总控系统的大部分设计理念，证明了系统的可行性和稳定性，尽管当前AIMS总控仍处于持续开发、持续应用阶段，但其当前的成功应用仍可为大型望远镜总控系统的自主化设计提供了创新思路和实践范例。

关键词： 太阳磁场，望远镜，总控系统，自主化

Abstract

An outstanding large optical astronomical telescope constitutes a complex integrated system, which encompasses not only an ideal observation site but also an optical system with high imaging quality and efficiency, robust and precise mechanical system, intelligent scheduling and swift response Master Control System (MCS), as well as a scientific data processing system. Within this framework, the MCS akin to the neural center, playing a pivotal role. It not only orchestrates the overall operation of the telescope but also finely tunes the coordination among subsystems, is the cornerstone to ensure the telescope can effectively acquire high-quality observational data.

The "An Infrared System for the Accurate Measurement of Solar Magnetic Field" (AIMS) is a National Major Scientific Instrument Development Project supported by the National Natural Science Foundation of China. Its primary objective is to solar magnetic field measurements from indirect methods to direct ones, marking it as the world's first mid-infrared solar magnetic field observation device and China's pioneering mid-infrared astronomical observation system. AIMS consists of optical system, mechanical system, MCS, and scientific application system. Among them, the MCS, as the brain for observing operation, is an important part of AIMS development.

This research delves deeply into various aspects of the MCS of AIMS, including requirement modeling, standard formulation, system design, key technology development, and system applications.

Firstly, we extensively examine crucial factors affecting the MCS requirements: the need for remote autonomous operation at high-altitude sites, loose coupling and high cohesion among continuously integrated components, flexible coordination for complex observation modes, and customized demands for environmental and instrument data by different users. This leads to the definition of a MCS that must be highly stable, scalable, and capable of evolving towards automation, autonomy, and intelligence, ensuring effective management under both normal and exceptional circumstances.

Secondly, following an analysis of existing telescope automation grading standards' applicability, we propose a novel telescope automation classification scheme drawing on similar fields. Based on this, we develop a three-tier framework of perception-decision-action: The lower layer consists of the Telescope Control Subsystem (TCS), Focal Plane Instrument Control Subsystem (ICS), and Observation Control Subsystem (OCS), all contributing to precise hardware control of the telescope. The middle layer, known as the Autonomous Support Subsystem, focuses on providing decision-making context through the Communication Control Subsystem (CCS), Power Management Subsystem (PMS), Environmental Perception Subsystem (EPS), Observation Interaction

Subsystem (OIS), and a Model Evolution System that uses collected data analyzed via big data models to refine and evolve decision strategies. The top-tier Central Decision Subsystem consolidates diverse decision information from the Autonomous Support Subsystem, engages OIS-provided observation sequences, and executes tasks based on these decisions by controlling corresponding functionalities within the lower-layer devices, thereby realizing high-level autonomous operation of the telescope. To achieve this goal, we adopt a microservices architecture grounded in principles of loose coupling and high cohesion in software system design, incorporating comprehensive control strategies and stringent system security measures to ensure the stability, reliability, and efficiency of the MCS.

Additionally, we overcome critical technical challenges in autonomous observation, such as automatic pointing and tracking, autofocus, auto-exposure gain control, cloud obscuration analysis, and lossless data compression, thereby enabling full automation throughout the observation process.

Through practical validation on AIMS, the solar magnetic field telescope at Xinjiang WenQuan, and the Solar Full-disk Multi-layer Magnetograph (SFMM), we demonstrated the feasibility and effectiveness of the AIMS control system's design philosophy. Specifically, during the continuous integration and debugging phase of AIMS, Level 1 polarization calibration automation and conditional scientific observation automation were achieved; for the business needs of the solar magnetic field telescope at Xinjiang WenQuan telescope, we simplified the system framework and realized partial Level 2 automation; and on SFMM, pursuing a higher level of autonomy, we streamlined the MES of the MCS framework, achieving partial Level 3 automation.

These validations substantiate much of the MCS's design concepts, proving its feasibility and stability. They also provide innovative ideas and practical examples for the autonomous design of large-scale telescope MCSs.

Key Words: Solar magnetic field, Telescope, Master Control System, Autonomous

目 录

第1章 绪论	1
1.1 太阳磁场和AIMS	1
1.1.1 太阳的重要性	1
1.1.2 太阳磁场是研究太阳的第一物理量	1
1.1.3 太阳磁场测量的发展史	2
1.1.4 太阳磁场望远镜的突破——AIMS	4
1.1.5 AIMS的迫切需求——总控系统	6
1.2 总控制系统的国内外发展现状	7
1.2.1 不同望远镜的总控需求	7
1.2.2 总控制系统的各种实现方法	9
1.3 研究意义和内容	12
1.4 论文组织	13
第2章 AIMS总控制系统的自主化需求和建模	15
2.1 AIMS自主化需求	15
2.1.1 高海拔站址的远程自主要求	15
2.1.2 不同组件持续集成的松耦合高内聚要求	17
2.1.3 复杂观测模式的灵活协调控制需求	19
2.1.4 不同用户对环境与仪器数据的定制化需求	21
2.2 AIMS建模	24
2.2.1 受控部件分布及工作流图	25
2.2.2 观测流程	27
2.3 小结	29
第3章 自主化的AIMS总控制系统设计	31
3.1 基于望远镜的自动化标准分级及AIMS总控预期目标	31
3.1.1 现有望远镜自动化分级标准	32
3.1.2 参考无人驾驶的望远镜自动化分级	33
3.1.3 AIMS总控系统自动化发展预期	36
3.2 AIMS自主化系统框架设计	37
3.2.1 子系统的基本构型	37
3.2.2 设备控制系统	40
3.2.3 自主化支撑系统	44

3.2.4 中枢决策系统	49
3.2.5 各个子系统间的关系	49
3.3 系统灵活性的软件架构设计	50
3.3.1 软件架构分类	51
3.3.2 微服务的优缺点以及AIMS的应用	52
3.4 AIMS自主化控制策略	54
3.4.1 基于能源的控制策略	54
3.4.2 基于环境的控制策略	55
3.4.3 基于观测任务的控制策略	56
3.4.4 基于设备故障情况的控制策略	57
3.4.5 多维度的观测控制策略	57
3.5 AIMS总控系统安全策略	59
3.5.1 通信安全策略	60
3.5.2 运行安全策略	72
3.6 小结	74
第4章 AIMS总控系统自主化关键技术攻关	75
4.1 自动指向与跟踪	75
4.1.1 自动指向	75
4.1.2 闭环跟踪-导行	80
4.2 自动调焦	81
4.2.1 常用方法	82
4.2.2 太阳领域调焦的难点	82
4.2.3 改进的自动调焦方法	83
4.3 自动曝光增益	87
4.4 云遮挡判断	90
4.5 数据压缩	91
4.6 小结	94
第5章 AIMS自主化总控系统的应用	95
5.1 总控系统在AIMS上的部分应用	95
5.1.1 当前已集成部件	95
5.1.2 偏振定标的自动化实现	96
5.1.3 有条件的FTIR科学和定标自动化观测	98
5.2 总控系统在温泉太阳磁场望远镜的自动化-远程化应用	99
5.2.1 电子学建模与观测流程	101
5.2.2 系统框架设计	101

5.2.3 软件架构设计	103
5.2.4 通信协议设计	103
5.2.5 当前结果	103
5.3 总控系统在子午全日面矢量磁像仪SFMM的自主化应用	106
5.3.1 SFMM电子学建模及观测流程	107
5.3.2 SFMM系统框架和软件架构设计	111
5.3.3 SFMM的自主化实现	112
5.4 小结	116
第6章 总结及展望	119
6.1 工作总结	119
6.2 未来展望	120
参考文献	123
致谢	127
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果 ..	129

图目录

图 1-1	AIMS光学与机械系统模型	5
图 2-1	AIMS站址位于西北高原	17
图 2-2	AIMS受控部件空间建模	26
图 2-3	AIMS工作流程图	27
图 2-4	AIMS观测流程	28
图 3-1	AIMS总控系统框架	38
图 3-2	不同层的子系统	38
图 3-3	子系统的垂直架构	39
图 3-4	简短指令包含的内容	40
图 3-5	各个子系统之间的关系	50
图 3-6	微服务架构的优点	53
图 3-7	AIMS的软件架构流图	54
图 3-8	AIMS多维度观测控制设计	58
图 3-9	任务的执行流程	59
图 3-10	AIMS的通信协议	61
图 3-11	子系统登录和注销过程	62
图 3-12	子系统通信过程	62
图 3-13	分包通信的实现方式	63
图 3-14	AIMS的密钥交换	69
图 3-15	AIMS的消息加密解密	70
图 3-16	AIMS的 RBAC关系表	71
图 3-17	AIMS的状态监测树	72
图 3-18	AIMS的状态监测	73
图 3-19	AIMS的故障处理	73
图 4-1	温泉多次指向结果	79
图 4-2	SFMM优化后的导行结果	81
图 4-3	自动调焦过程中不同位置谱比结果	84
图 4-4	自动调焦过程	86
图 4-5	自动曝光增益流程	89
图 4-6	SFMM项目中的气象站和全景相机	90
图 4-7	云量识别效果图	91
图 4-8	8 10波段的UI及有效数据分布	92

图 4-9	全日面矢量磁场数据的无损压缩流程	93
图 4-10	数据无损压缩方法的对比结果	93
图 5-1	AIMS偏振定标软件	97
图 5-2	AIMS科学和定标自动化流程	99
图 5-3	温泉太阳磁场望远镜	100
图 5-4	温泉太阳磁场望远镜建模	101
图 5-5	温泉太阳磁场望远镜观测流程	102
图 5-6	温泉太阳磁场望远镜通信模型	104
图 5-7	温泉总控系统	105
图 5-8	全日面矢量磁像仪	106
图 5-9	SFMM建模	108
图 5-10	SFMM开关机流程	109
图 5-11	SFMM科学观测流程	110
图 5-12	SFMM科学任务循环流程	110
图 5-13	SFMM系统框架	111
图 5-14	SFMM的状态转换	112
图 5-15	SFMM中的电源切换	113
图 5-16	SFMM总控系统	114
图 5-17	5324波段波长扫描的时间分辨率	115
图 5-18	4861, 6563, 8542波段波长扫描的时间分辨率	115
图 5-19	AIMS总控系统的应用情况	117

表目录

第1章 绪论

1.1 太阳磁场和AIMS

1.1.1 太阳的重要性

太阳作为太阳系的中心天体，也是距离地球最近的恒星，其重要性涵盖了天文、地理、气候、生态、生物、能源以及太空探测等多个领域，如：

①.天体动力学与稳定性

太阳占据了太阳系总质量的大约99.86%（根据最新的估计），其强大的引力维系了整个太阳系的稳定性，确保八大行星及其他天体按照开普勒定律进行规律有序的轨道运动。

②.能量来源

太阳是地球上所有生命活动的主要能量源泉。通过核聚变过程，太阳持续不断地向周围空间辐射能量，其中包括可见光以及其他形式的电磁波，构成了地球上生命体系能量循环的基础，尤其是光合作用，它支撑着地球上的食物链和生态系统。

③.气候与季节变化

太阳辐射强度的变化直接影响地球的气候系统。太阳直射点随着地球公转位置的变化引起四季更替，并且长期的太阳辐射强度变化与地球历史上和现代的气候变化密切相关。

④.空间天气与地球磁层

太阳活动对地球的空间环境具有决定性影响。太阳的剧烈活动所引发的日冕物质抛射和太阳耀斑能够扰动地球磁层，造成极光现象，并对全球范围内的电力系统、通讯设备和航天飞行器的安全构成挑战。

⑤.科研价值

对太阳的研究有助于揭示恒星结构、演化以及恒星磁场、太阳风等物理现象的本质规律，从而深化对宇宙中普遍存在的天体物理过程的理解。此外，太阳作为距离最近的恒星，成为检验和完善恒星物理学理论模型的理想实验室。

从基础科学研究到现实生活的诸多方面，太阳都扮演着至关重要的角色。因此，我们有必要对太阳进行深入的研究。

1.1.2 太阳磁场是研究太阳的第一物理量

太阳磁场是研究太阳的第一物理量(邓元勇 等, 2020)。太阳磁场在理解太阳内部动力学、塑造太阳系环境等方面扮演着不可或缺的角色，它的研究不仅推动了基础科学理论的发展，而且对保障人类社会科技发展和生活安全具有直接的应用价值。具体为：

在太阳活动周期与动力学过程中：太阳磁场是驱动太阳活动周期的基础，包括太阳黑子、耀斑、日冕物质抛射等现象的发生。太阳黑子的产生与消失遵循大约11年的太阳活动周期，这是由于太阳内部的磁流体动力学过程引起的，特别是较差自转和磁通量传递机制造成太阳磁场反转，从而导致太阳活动周交替。

对太阳大气结构与加热机制研究发现：太阳磁场直接影响太阳大气的结构和动态行为，比如维持日冕高温（百万度以上）的物理过程——这一现象被称为“日冕加热问题”。磁场通过束缚等离子体，形成拱形的磁环和其他复杂的磁场结构，这些结构对于能量的存储和释放至关重要。

而在行星际空间环境与空间天气：太阳磁场延伸至太阳系的广阔空间，形成行星际磁场，它引导太阳风中的带电粒子流动，影响行星磁层和卫星环境。当强烈的太阳活动引发磁暴时，太阳磁场扰动可导致地球磁层扰动、极光现象以及通信和导航系统的干扰，对航天器的安全构成威胁。

对于地球气候变化的关联：近年来，越来越多的证据表明太阳活动与地球气候之间存在某种耦合关系。尽管直接因果关系尚无定论，但太阳磁场的变化可能通过改变宇宙射线到达地球表面的数量、影响云层形成及地球磁场变化等方式间接影响气候系统。

最后，在科学研究与技术应用中：太阳磁场的研究促进了基础物理学的发展，尤其是在磁流体力学领域的理论建模和数值模拟技术的进步。同时，理解和预测太阳磁场的变化对于开发有效的空间天气预报系统至关重要，这对于现代技术社会依赖的电力传输网络、卫星通信、GPS定位以及载人航天任务的安全运行具有重要意义。

1.1.3 太阳磁场测量的发展史

1908年，美国天文学家乔治·海尔（George Ellery Hale）借助于塞曼效应（Zeeman effect）这一科学原理(Hale, 1908b)，对太阳黑子进行了深入探究，并完成了人类历史上首次对太阳磁场的测量(Hale, 1908a, 1909)，从而为量化太阳磁场强度开启了新篇章。

塞曼效应是指当光源处于强磁场环境中时，原本单一的原子谱线会发生分裂成多重谱线的现象。这是因为磁场会影响原子的能级结构，使原本同一能级的电子跃迁产生微小的能量差，进而使得吸收或发射的光子能量出现变化，体现在光谱上就是谱线的分裂。

海尔的工作验证了在太阳黑子区域内存在强磁场，这一发现不仅证明了太阳上有磁场存在，而且预示着磁场在太阳活动，如黑子、耀斑、日珥等现象中起到关键作用。海尔的这一研究成果开启了对太阳磁场的科学研究，并奠定了后续一个多世纪以来，科学家们利用各种技术手段对太阳磁场进行直接或间接测量的基础。尽管早期的测量方法较为粗糙，但正是这些先驱性的研究开启了对太阳磁场测量技术漫长而辉煌的发展历程。

1953年,美国天文学家H.D.巴布科克(Harold Delos Babcock)研制出了太阳光电磁像仪(photoelectric solar magnetograph),这是一个里程碑式的成就,标志着人类在太阳磁场测量技术方面迈出了决定性的一步(Babcock, 1953)。

巴布科克的太阳光电磁像仪改进了先前的测量技术,使之能够更精确地检测到太阳表面微弱的磁场信号。这项技术的应用显著增强了科学家对太阳磁场结构、分布和动态变化的理解,对于太阳物理学和空间天气预报等领域的发展起到了关键作用。通过这种仪器,天文学家能够开始绘制太阳表面的磁场地图,并研究太阳活动周期、太阳耀斑、日冕物质抛射等活动与磁场之间的密切关系。

在1962年,苏联天文学家列昂尼德·阿布拉莫维奇·塞弗尔尼(Leonid Abramovich Severny)和他的团队在太阳磁场测量领域取得了重大突破,他们首次成功测量了太阳的矢量磁场,而不仅仅局限于之前所能获取的视向磁场分量(Severny, 1962)。

在此之前,科学家们虽然已经能够通过诸如Zeeman效应等手段探测到太阳磁场的部分信息,但由于技术限制,通常只能测量到与视线方向平行(即视向)的磁场分量。然而,磁场是三维的矢量,包括两个横向分量和一个垂直分量(相对于视线方向)。要全面理解太阳磁场的复杂结构及其在太阳活动中的作用,例如太阳耀斑、日珥、太阳风等现象,就需要得到完整的矢量磁场数据。

塞弗尔尼的工作正是克服了这一局限性,他发展了一种新的方法或者技术,通过对太阳光谱的细致分析,特别是利用Stokes参量光谱学原理,能够提取出太阳光谱线中包含的全部磁场信息,进而重构出太阳表面磁场的三维矢量性质。这一成就是太阳物理研究史上的一座重要里程碑,极大地推动了对太阳磁场结构和动力学过程的深入研究。

在20世纪后期,Beckers(Beckers, 1968; Beckers et al., 1975a,b)和Ramsey(Ramsey et al., 1979)等科学家在此基础上,提出了利用双折射滤光器原理在单个波段实现太阳磁场快速成像观测的概念。他们的创新之处在于,设计了一种视频矢量磁像仪,该设备能够在选定的光谱线波段上实时捕获和解析太阳表面磁场的矢量信息,即磁场的强度和方向。这种视频矢量磁像仪的优势在于能够连续、实时地生成太阳磁场图像,极大地提高了观测效率和数据采集速度,对于研究太阳活动区的瞬态变化和太阳耀斑等短期事件的磁场动力学过程具有重要意义。

此后,视频矢量磁像仪的理念迅速得到了普及和认可,吸引了众多研究者对其进行优化和推广,这一技术在随后的数十年间经历了快速的技术革新和发展,成为太阳磁场观测领域不可或缺的重要工具。随着观测设备的不断更新和升级,如今的太阳磁场成像技术已达到了前所未有的分辨率和灵敏度,有力推动了太阳物理学和空间天气研究的进步。

在Beckers和Ramsey等科学家提出视频矢量磁像仪的同期,Livingston(Livingston et al., 1976)等利用线阵探测器,通过光谱仪的狭缝扫描获得二维图像,首次实

现了太阳磁场的成像观测。线阵探测器（Line-scanning Detector）是一种能够沿着一条线逐点扫描的传感器，配合光谱仪使用时，可以通过移动狭缝或者让太阳光通过一个狭长的光束入口，逐行扫描太阳表面，然后对每个位置的太阳光谱进行分析。

然而，不论是视频矢量磁像仪的滤光器型磁场测量设备还是狭缝扫描的光谱仪型磁场测量设备，他们都存在自身的局限性。滤光器型的可以实现快速成像，但获得的光谱信息较为单一；而光谱仪型设备可获得丰富的光谱信息，但观测内容为狭缝内信息，需要多次扫描成像，耗时长(Stix, 2002)。

太阳物理学家一直希望同时满足快速成像成谱的磁场测量设备诞生，该类设备发展较为缓慢，但仍不断突破中。如法国学者Mein的“多通道相减式双透过光谱仪”理论，该理论已应用在法意合作的THEMIS望远镜上(Rayrole et al., 1994)；中国学者艾国祥等的“多通道双折射滤光器”，已应用在国家天文台怀柔太阳观测基地(艾国祥等, 1986; 艾国祥, 1989)。他们实现了部分快速成像成谱，但远未达到预期中的程度。

另一方面，当前，在进行太阳磁场测量的过程中，科学家们持续面临两个关键的技术挑战，即模型依赖性和横向磁场分量测定的低精度问题。首先，由于太阳磁场结构复杂且动态变化频繁，现有的测量方法很大程度上依赖于理论模型来解释和重构观测数据，这意味着磁场的实际状态可能受到模型假设和参数选择的影响，这在一定程度上限制了对太阳磁场全局结构及局部细节理解的准确性。

其次，尽管空间和地面望远镜技术经历了显著的进步，但现有的磁场测量精度仍面临显著挑战。Evans等学者相关研究(Evans, 1949)(王东光, 2003)中揭示了当前间接测量方法所带来的不确定性，这些不确定性在很大程度上限制了测量精度。

这两个瓶颈问题严重制约了太阳物理学界对诸如太阳耀斑、日冕物质抛射、太阳黑子演化以及日冕加热机制等前沿研究课题的理解与预测能力，因此，开发更加精确、独立于模型的磁场测量技术，已成为现代太阳物理学研究中亟待突破的关键点之一。随着新型观测仪器和技术的发展，如更高分辨率的偏振成像仪和更先进的数据分析方法，科研人员正不断努力克服这些挑战，以期更好地揭示太阳磁场的奥秘，并服务于太空天气预报和人类航天活动的安全保障。

1.1.4 太阳磁场望远镜的突破——AIMS

1908年 Hale首次实现太阳磁场测量以来，过去一百余年间人类对太阳和天体磁场的认识从无到有、由浅入深，取得了巨大的进展。但到目前为止，太阳磁场测量中仍然存在一些制约观测和研究的不足之处。

迄今为止，有关太阳磁场的可靠测量均是基于 Zeeman 效应而实现的，由于 Zeeman 裂距与波长的平方成正比，而一般来说太阳光谱线的宽度（由 Doppler 谱线致宽效应等决定）与波长的一次方成正比，因此在中远红外波段，Zeeman

效应引起的谱线分裂相对于谱线本身的宽度非常明显，由此可见，中红外波段有望提供直接测量 Zeeman 裂距的机会，从而可将传统的磁场“间接测量”发展到“直接测量”，大大提高磁场测量、特别是横向磁场测量的精度。这一方法将不再依赖于辐射转移模型，也不存在纵、横灵敏度失衡的问题。同时，由于将传统的偏振强度测量转化为偏振轮廓的定位测量，仪器偏振及交叉串扰带来的影响将大大降低，从而显著提高磁场测量精度。

基于上述依据，中国学者提出了“用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统”（An Infrared System for the Accurate Measurement of Solar Magnetic Field, AIMS），即利用中红外波段 Zeeman 效应优于可见光、近红外波段特点，建设采用中红外波段直接测量太阳磁场的望远镜。

AIMS 是国家自然科学基金委员会资助的国家重大科研仪器研制项目（部委推荐）。其拟研制国际上第一台中红外太阳磁场观测设备，利用中红外的观测优势，克服百年历史中的瓶颈问题，实现太阳磁场从“间接测量”到“直接测量”的跨越发展，将现有横场测量精度提高一个量级，促进诸如天体爆发活动的成因、辐射磁流体动力学过程、局地发电机过程、日冕加热等前沿领域的进展，并探索目前知之甚少之中红外波段所蕴含的新的科学研究机遇。同时，AIMS 的研制将极大推动中红外波段大口径太阳望远镜、偏振测量、高分辨光谱、高性能探测器等相关前沿技术的发展。

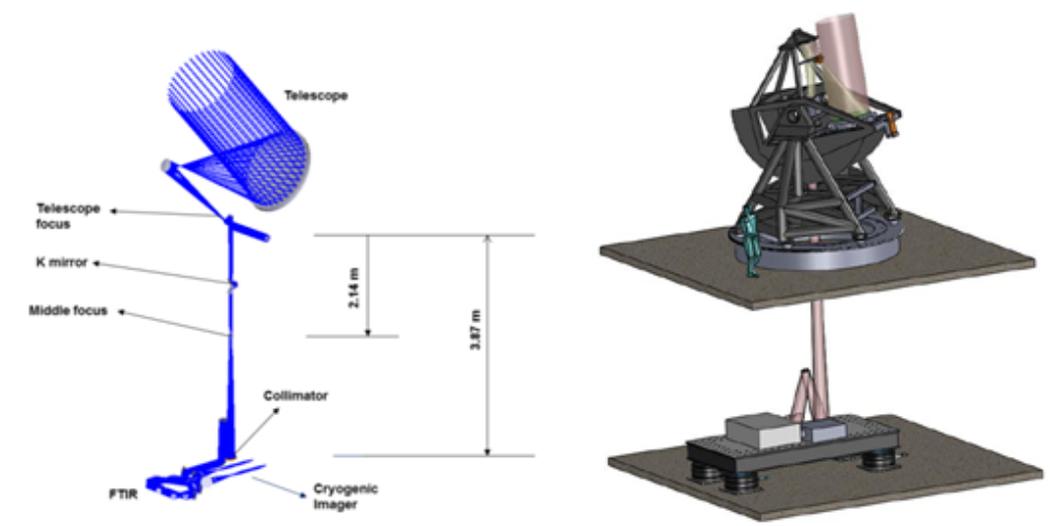


图 1-1 AIMS 光学与机械系统模型

Figure 1-1 AIMS Optical and Mechanical System Models

AIMS 是具有复杂精密结构的大型望远镜，而一个优秀的大型望远镜除了站址因素，其主要由 4 个部分构成：机械结构、光学结构、总控系统 (the Master Control System, MCS)、科学数据处理系统。各个部分之间联系紧密又相互独立。其中总控系统是控制、协调望远镜各个部分的运转，保障望远镜各模块正常工作，是电控系统的总的集成。

那么引申到 AIMS，AIMS 总控系统是是所有望远镜电控系统集成，以及原

始数据的管理。包含了对站址气象安全、望远镜指向跟踪、望远镜温度、望远镜焦面、用户观测、故障处理、数据管理等一系列的监测或控制。

1.1.5 AIMS的迫切需求——总控系统

总控系统是AIMS的神经中枢，其负责调配系统各个部件协调运行，同时根据环境变化的分析，执行不同的观测逻辑，是AIMS必不可少的一部分：

观测环境需求：由于AIMS观测波段为中红外波段（8-14 μm ），对于8-14 μm 波段的地基太阳望远镜观测环境需要考虑观测站址对中红外波段的影响，如空气中的水汽含量，观测站址的视宁度等。根据中红外波段的特性，科学家拟将AIMS选址在人迹罕至，空气稀薄的高原地区。高原的部分地区海拔高，生命活动迹象较少，因此生物对观测视宁度的影响降到了最小；且高原地区地处亚欧大陆腹地，属大陆性气候，常年受高压控制，连年少云少雨，因此其空气水汽含量亦较为符合。但随之而来的问题是人迹罕至的高原并不适合大批量人员长期驻守于观测站进行日常观测，因此需要一套总控系统能代替观测员执行大量简单重复的操作，使观测员投入到更有意义的工作中。

系统组件因素：AIMS作为国内新一代的大型精密地基望远镜，其制造工艺先进而复杂，为此国内多家科研院所联合承办该望远镜的研制，各个院所研制AIMS望远镜的不同组件，并最终汇总集成。其中各个组件在集成过程中身处不同的软硬件层次诸如电机控制、探测器控制、FTIR控制等，且他们对外的接口并不统一：串口、网口或其他，即各个组件具有复杂多样的接口方式。因此需要总控系统能够实现对各个组件的控制，实现控制层面的优化和简化。

观测流程分析：AIMS总控系统与其他系统之间的关系联系紧密，其中对于科学数据处理系统而言，总控系统的产出数据的有效性、可靠性和安全性是科学数据处理能否成功的必要保障。而AIMS的观测模式设计多方面需求，涉及到的功能流程复杂。因此，AIMS需要总控系统实现不同观测模式下的观测任务。

定标观测模式对望远镜的功能需求

- ①.平场观测（测量全系统对强度响应的不均匀性）
- ②.暗场观测（测量无太阳光入射辐射时，系统的本底）
- ③.仪器与大气背景观测（红外受仪器和大气背景影响严重，指向日面边缘可以测量仪器和大气背景）

④.FTIR和宽带成像相机的相对位置、分辨率标定（测量宽带成像和FTIR数据之间分辨率、几何位置的不同）

科学观测模式对望远镜的功能需求

- ①.输入日面坐标，自动指向活动区功能
- ②.偏振调制的功能
- ③.调焦和稳像功能（稳像和六杆调焦时加入平暗场定标模式）
- ④.消旋功能

- ⑤.视场扫描功能
- ⑥.调整宽带相机或FTIR的配置功能，配置文件包括增益、曝光时间等功能
- ⑦.添加观测和仪器参数的头文件功能
- ⑧.不利天气条件下及时响应，执行对应防护措施

综上所述，总控是AIMS实现科学高效观测目标的必不可少的部分，其在保证系统稳定运行，高扩展性，自主性等存在较高要求。

1.2 总控系统的国内外发展现状

1.2.1 不同望远镜的总控需求

鉴于每台望远镜因各自的科学目标各异，其光学、机械和电子设计也存在差异，难以采取统一的标准设计总控系统，因此，不同望远镜的总控系统呈现出各自的特点。

①. Automatic Imaging Telescope (AIT)的总控系统

在佩鲁贾大学天文台（Perugia University Observatory, PUO）研发的AIT基于一台已有的0.4米牛顿反射望远镜改造而成，该望远镜配备赤道装置，还连接了一个固定的0.15米折射望远镜，并使用了CCD相机以及Johnson-Cousins BVRI(C)滤光片进行光度测量。为了实现自动化操作，硬件和软件设计时充分考虑了现有结构（如望远镜、圆顶等）的特点以及有限的预算限制(Tosti et al., 1996)。

Perugia大学天文台的Automatic Imaging Telescope (AIT)的总控需求源于对变源进行长期光度监测任务中的挑战。这类工作极为繁重，需要观测者与望远镜-仪器系统之间频繁交互。为了提高数据采集效率、增加单个夜晚可观测目标的数量，并减少天文学家传统上重复执行的任务，开发了部分或完全自动化的光电和CCD光度学专用望远镜。

整个AIT系统的关键在于实现无人值守下的夜间全自动控制，包括：由计算机决定圆顶快门的开启与关闭、从观测列表中选择目标、设定并调整望远镜指向以使目标位于视场中心、获取所需CCD曝光图像，以及在观测结束后自动处理数据。此外，系统还配置了菜单驱动的用户界面，方便在教学用途下进行交互式控制。

AIT控制系统包含四个主要功能模块：望远镜支架控制系统（Telescope Mount Control System, TMCS）、圆顶控制系统、自动导星系统（Autoguider），以及CCD成像系统。其中TMCS采用闭环双轴控制器，通过PC指令驱动望远镜的电机，利用增量位置编码器提供反馈信息，确保望远镜能够在天空中精确指定位到目标，误差小于1' RMS。同时，安装有气象站监控大气温度和压力，并研发了一套雨滴探测器作为安全设备，以便于在天气条件允许的情况下智能开关圆顶快门。

总的来说，AIT总控系统的首要需求是高度自动化和精准可控，确保望远镜能在无人工干预的情况下完成一系列复杂的观测任务，特别是针对样本中的30多个耀变体进行了长时间光学光度监测。通过精心设计的硬件和软件架构，

实现了从目标选取到数据获取、再到后期处理的全自动化流程，从而显著提高了观测效率和数据质量。

②. Gemini望远镜的天文台控制系统OCS (Observatory Control System)

双子座望远镜 (Gemini Observatory) 是由国际财团资助的两个8米级光学-近红外望远镜，分别位于北半球的夏威夷莫纳克亚山顶 (Gemini North) 和南半球的智利科拉帕塔山山顶 (Gemini South)。这两个望远镜共享同一个名称是因为它们代表了南北半球的对称协作，共同构成了一个全球性的天文观测网络，为全世界的科学家提供了全天候的观测机会。

双子座望远镜配备了尖端的观测设备和控制系统，包括先进的自适应光学系统，能够修正大气湍流对图像质量的影响，提供近乎空间望远镜级别的分辨率。OCS (Observatory Control System) 天文台控制系统是Gemini望远镜的核心，负责整个望远镜及其附属设备的自动化操作，包括望远镜的指向与跟踪、仪器控制、观测序列管理、数据采集与处理等(Gillies et al., 1996)。

Gemini望远镜OCS的需求主要包括：

支持多种观测模式：

经典交互式观测：观察者在站点上实时作出决策。队列式观测：观察者描述其观测并提交给站点，由天文台工作人员执行。灵活调度：允许现场人员根据条件变化在不同程序间切换。远程访问和监测：在观测时提供一定程度的远程访问和监测能力。

多仪器同步运行：

每个 Gemini 望远镜可支持四种仪器。控制系统需保证这些仪器能同时工作且互不干扰。可能存在一种仪器收集校准数据，另一种进行天体观测的情况。

提高效率：

允许单一观察员同时执行多于一项的观测任务。例如，望远镜可能在读取当前观测的探测器数据的同时移动至下一目标位置。观测任务的重叠是可能的，具体实现取决于现场工作人员。

工作人员职责明确：

观测期间始终有两个工作人员在场。系统操作员负责望远镜及其相关系统的专属控制和责任。现场观察员控制望远镜的下一步行动。

半自动化硬件配置：

Gemini 仪器和望远镜硬件系统复杂，可能需要观察员花费大量时间进行交互配置。高海拔观测可能存在错误，因此需要半自动配置硬件组件的功能。在非交互式观测模式下，软件系统应能读取观察者的观测描述并相应配置硬件。

综上所述，OCS 的需求涵盖了观测模式、多仪器管理、效率优化、人员分工和硬件配置等方面，旨在提供一个高效、可靠且易于使用的观测控制系统。

③. Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE)的总控系统

ASTE项目的控制系统需求源于其在智利阿塔卡马沙漠高海拔地区（4,800米）操作一台10米亚毫米波望远镜的挑战性任务。由于该地点环境恶劣且远离日本的操作基地，成功运行望远镜的关键在于实现一套稳定的远程控制系统(Ezawa et al., 2004; Kamazaki et al., 2005)。

具体需求包括：

远程观测能力：系统需配备专为远程操控设计的新版操作软件N-COSMOS3，确保即使在带宽有限（56-64kbps）的卫星网络环境下也能进行实时和有效的远程观测控制。

网络连接稳定性：建立可靠的卫星网络设施，以将望远镜现场与位于智利圣佩德罗德阿塔卡马（海拔2,400米）的操作基地及日本的多个合作机构相连接，确保数据传输和命令控制的稳定通信链路。

网络故障防护机制：N-COSMOS3系统具备监控网络连接状态的功能，若在指定时长内（例如600秒）未收到响应，则会自动停止当前正在进行的观测，以防因网络问题导致的数据丢失或设备误操作。

控制权限管理：制定控制策略，确保拥有控制权限的站点能够独占式地操控望远镜，同时所有相关站点都能进行实时监测。观测序列预先发送至COSMOS3管理器，这样即使在网络连接暂时中断的情况下也能保证望远镜按照预定计划执行观测任务。

系统可靠性增强：基于已用于日本名古屋射电天文台（NRO）45米望远镜和毫米阵列（NMA）的COSMOS3系统进行开发，并在此基础上增加了信息服务器、流量整形等功能，使得新系统更加健壮，能够在突发的网络连接故障下仍能正常工作。

从上述望远镜的控制系统，我们可以看出，AIT的总控系统主要为了实现系统的全自动观测；Gemini望远镜的总控系统更侧重于协助观测人员观测；而在地处偏远的ASTE，其总控系统则强化了远程控制功能；另外，Big Bear Solar Observatory (BBSO) 的Goode Solar Telescope (GST)项目中，其TCS设计原则更倾向易用性和灵活性(Yang et al., 2006)。此外，这些总控系统还需兼顾对新设备的兼容性，LAMOST望远镜正是因为扩展性的需求，对其总控制系统的观测控制系统进行了重构(Tian et al., 2018)。

1.2.2 总控制系统的各种实现方法

为了便于后续开发，科学家构建并开源了通用的望远镜控制软件或标准简化并加速总控制系统的研发进程。如：

①. INDI (Instrument Neutral Distributed Interface)¹是一个开源软件接口规范，设计用于天文设备自动化控制。它是由Eugenio J. Delgado Ruz（又名Gabriel Díaz Moralejo）在2003年发起的项目，目标是创建一个跨平台、中立且分布式的

¹<http://www.indilib.org/>.

天文观测仪器控制协议，允许各种天文望远镜、CCD相机、导星器以及其他相关设备能够通过统一的接口进行操作。

INDI的核心理念在于：

仪器中立：INDI不偏袒任何特定类型的天文设备制造商，而是提供一套通用的标准，让不同厂商生产的仪器都能够遵循这一标准实现控制程序，从而使得用户可以通过单一接口操控多种仪器。

分布式架构：支持网络化部署，仪器可以在本地或远程计算机上运行，并通过网络连接进行通信。这意味着用户可以将多个设备分布在不同的位置，但仍然能够集中控制和同步它们的操作。

模块化设计：每个仪器都有对应的INDI驱动程序，这些驱动程序负责与硬件交互并向INDI服务器报告状态及接收指令。同时，客户端应用程序（如天文软件）可以通过INDI协议与服务器交互，获取实时数据并发送控制命令。

开放源代码：INDI规范及其许多配套的驱动程序都是开源的，鼓励社区参与开发和改进，促进了天文设备控制技术的发展和普及。

通过INDI接口，天文爱好者和专业研究人员能够在他们的观测站整合多样化的硬件资源，实现更为高效和灵活的自动化观测流程。目前，INDI已经被广泛应用于各类天文软件包中，包括KStars/Ekos、MaxIm DL、PHD Guiding等。

②. RTS2 (Remote Telescope System, 2nd Version)²是第二代远程望远镜系统，这是一个专门为自动化天文观测设计的软件框架。RTS2旨在提供一套全面的解决方案，以实现天文望远镜和其他相关天文设备的远程控制、自动化操作和观测计划管理(Kubánek et al., 2008)。

RTS2的主要特点和功能有：

自动化观测：

RTS2允许天文望远镜按照预设的观测计划自动工作，包括寻找目标、跟踪、曝光、数据采集等一系列步骤，而不需要人工实时监控和操作。

设备集成：

它能够集成多种天文观测设备，如望远镜、CCD相机、滤光轮、导星相机、焦点伺服系统等，实现对整个观测系统的中央控制。

远程控制：

RTS2提供了强大的远程访问和控制能力，天文学家可以在世界任何地方通过互联网连接到安装有RTS2系统的天文台进行观测作业。

观测策略：

系统内建有智能决策机制，可以根据气象条件、设备状态和观测需求自动调整观测计划和策略。

可扩展性与兼容性：

²<http://rts2.org/>.

RTS2采用模块化设计，易于扩展和定制，以适应不同规模和配置的天文台设施。同时，它可以与多种硬件设备和通信协议对接，具有良好的兼容性。

开源软件：

RTS2通常是开源项目，这意味着全球的天文研究者和爱好者都可以参与到其发展和优化过程中，共同推进天文观测技术的进步。

在中国天文界，RTS2被广泛应用于多个天文台站，尤其是在促进程控自主天文台技术的发展与应用方面发挥了重要作用。通过举办国际研讨会和开展技术研发，中国科学院云南天文台等机构不断推动RTS2技术在国内的应用和创新。

③. ASCOM (Astronomy Common Object Model)³是一个专为业余和专业天文观测设计的标准化接口协议。它是由一组公开的软件接口规范构成，允许天文软件与天文硬件设备之间进行有效的通信和控制。ASCOM旨在促进天文硬件设备与天文控制软件之间的互操作性，使得开发者更容易为不同品牌的硬件编写驱动程序，同时也使天文爱好者和科学家能够在统一的一个平台上操作多种设备(George et al., 2001)。

ASCOM 主要特点包括：

开放标准：ASCOM 接口规范是公开的，并由志愿者团队维护和更新。这允许硬件制造商遵循标准来开发驱动程序，而不必为每种天文软件单独编写接口。

跨平台支持：尽管 ASCOM 最初基于 Windows 平台开发，但现在也有第三方实现了在 Linux 和 macOS 上的部分兼容性。

模块化结构：每个硬件设备都对应一个 ASCOM 驱动程序，这些驱动程序实现了一组特定的接口方法，以便天文软件通过标准方式查询设备状态、发送控制命令或接收事件通知。

多语言支持：由于基于 Microsoft 的 COM 技术，ASCOM 兼容多种开发语言，包括 Visual Basic、C#、C++ 和 Python 等，方便开发者根据需求选择合适的编程语言编写应用软件。

广泛应用：ASCOM 支持广泛的天文设备类型，如望远镜、导星装置、照相设备、焦点控制器、天气站等，极大地简化了天文观测设备的整体集成和控制过程。

社区驱动：ASCOM 社区活跃，开发者和天文爱好者们共享资源、解答问题，并持续优化和拓展 ASCOM 标准的功能。

通过 ASCOM，天文爱好者和专业研究者可以轻松地集成和控制多种天文硬件，提高观测效率，减少因为设备间不兼容导致的复杂性和局限性。同时，这也鼓励了硬件制造商生产更加兼容和易用的产品，进一步推动了天文观测技术的发展。

³<http://ascom-standards.org/>.

④. 天文台控制与天文分析软件 (Observatory Control and Astronomical Analysis Software, OCAAS): OCAAS是专门用于控制天文台硬件设备 (如望远镜、导星系统、CCD相机等) 并进行天文数据收集与初步分析的综合性软件系统。这类软件集成了天文台自动化控制、观测计划安排、设备参数设置、实时数据获取、图像处理、天体测量等多种功能, 使得用户能够远程或现场高效地进行天文观测和科学研究(Downey et al., 1996)。

然而, 这些标准与框架各有局限: OCAAS作为一款较为陈旧的软件平台, 可能无法充分适配新型观测设备; ASCOM虽然广泛应用, 但在硬件驱动的更新支持与标准化范围上面临着挑战; 至于RTS2与INDI, 则存在不同程度的硬件驱动兼容性问题。因此, 除上述这些标准或框架, 还存在一些其他专有领域的开发标准或框架。

1.3 研究意义和内容

根据前文分析, AIMS总控系统必不可少, 然而各个望远镜的科学目标各不相同, 因此其总控需求也各不相同, 无法通过简单的移植实现, 而AIMS的系统构造注定了需要考虑硬件灵活性这一关键因素, 兼顾未来系统的演进可能, 独立的总控开发是必不可少的。

而AIMS总控的需求主要源自以下几个方面:

①. 无人值守操作:

AIMS望远镜地处偏远的西北高原 (青海省海西州冷湖赛什腾山)、环境条件较艰苦苛刻, 望远镜需要能够在没有现场人员直接监控的情况下长时间稳定工作, 这就要求望远镜系统能够完全自主运行。

②. 资源优化:

观测时间是宝贵的科学资源, 尤其是对于AIMS这类大型科研望远镜而言。自主控制可以实现快速响应变化的天文事件 (如耀斑爆发等), 以及根据天气状况、日程安排、仪器状态等因素进行实时最优调度, 最大化有效观测时间。

③. 复杂任务执行:

AIMS望远镜需执行一系列复杂的操作, 包括指向跟踪、滤镜切换、焦距调整、焦面仪器控制等。自主控制系统能够按照预设程序或动态规划完成这些操作, 无需人工介入。

④. 精确控制与适应性:

高精度的望远镜控制系统必须能够准确地校准指向误差, 补偿大气湍流引起的像质劣化 (如自适应光学), 以及应对各种环境变化 (如温度波动、风荷载等)。采用智能控制策略, 结合传感器数据和预测模型, 可实现精准且自主化的姿态调整和维护。

⑤. 故障检测与恢复:

自主系统能够实时监测设备健康状况，及时发现并诊断潜在故障，必要时采取自我修复措施或启动备用系统，确保望远镜长期稳定运行。

⑥.科学研究效率提升：

通过集成深度学习和人工智能技术，总控系统找寻太阳活动的潜在规律，根据规律预测可能的太阳活动，当感兴趣的太阳活动出现时，快速定位并捕获相关数据。

综上所述，AIMS望远镜自主化控制是现代天文观测发展的必然趋势，它不仅提高了观测设施的使用效率，降低了运行成本，也极大地推动了天文研究的进展。随着科技的进步，自动化和智能化程度不断提高，望远镜不仅能实现基本的无人操控，还能在某种程度上进行“智能观测”，为天文学家提供更为丰富和精准的数据支持。

1.4 论文组织

本文第二章主要介绍了AIMS总控系统的自主化需求和建模，包括AIMS总控的各项需求以及针对其受控部件空间分布以及观测流程的时空建模，为自主化实现奠定基础。

第三章主要介绍了AIMS总控系统的自主化设计，包括对基于现有自动化分级标准的改进，AIMS总控系统系统框架，软件架构，控制策略以及安全策略的设计。

第四章主要介绍了AIMS总控系统自主化的关键难点及解决方案，如自动曝光增益，自动调焦，自动指向跟踪，云遮挡判断，以及数据压缩。

第五章主要介绍了AIMS自主化总控系统设计理念的应用，如AIMS自身的部分应用，新疆温泉太阳磁场望远镜的自动化-远程化应用，以及子午工程二期江苏赣榆站的全日面矢量磁像仪的自主化应用。

第六章则是对博士工作的总结以及对未来工作的展望。

第2章 AIMS总控系统的自主化需求和建模

在深入探讨自动化与智能化技术在AIMS中的应用及其自主化设计之前，首要步骤是对AIMS的具体自主化需求进行严谨细致的科学分析。这一分析过程涵盖了多个关键领域，包括AIMS站址的环境因素、AIMS系统的组件因素、科学观测因素，以及仪器数据因素等。

通过全面的需求分析，可以明确AIMS应当具备的功能模块、算法集成、硬件配置以及通信架构等方面的要求，确保所构建的自主化系统能够在无需或仅需极少人工干预的情况下高效运作，满足预定的目标和标准。

同时，充分理解AIMS系统中各受控部件的空间布局、物理关联性以及相互间的信息交互流程至关重要。这需要对系统进行分解和建模，识别各个子系统的功能接口与协同工作机制，并基于此绘制详细的系统工作流图，包括状态转换图、活动图、顺序图等各种形式的图表来描述系统操作的逻辑流程和动态行为。

这种系统级的可视化表达有助于梳理复杂系统的内在逻辑，确定自主控制的关键节点，以及可能存在的瓶颈和冗余环节，进而为设计出既能保证整体效能最优又能实现高度自主化的AIMS总控系统奠定了坚实的理论和技術基础。此外，通过模拟和验证这些工作流模型，还能有效评估和优化自主化设计方案，确保其实现既定的自主控制目标，并在实际应用中表现出预期的稳定性和可靠性。

2.1 AIMS自主化需求

通过分析AIMS站址的环境因素、AIMS系统的组件因素、科学观测因素，以及仪器数据因素，我们可以推断其总控系统应该具备的一般性和特殊性，从而在设计该自主系统时，从系统框架，软件架构，通信方式，控制策略，数据存储与分析等方面进行特殊化的设计，实现针对性的系统构建，从实际出发解决系统落地的实用性问题。

2.1.1 高海拔站址的远程自主要求

在设计与实施AIMS项目时，考虑到其观测波段位于中红外区域（8至14微米），我们必须深入研究并全面评估地基太阳望远镜在这一特定波段面临的环境挑战，尤其是大气对红外辐射的吸收和散射效应。中红外波段由于大气中水汽和其他气体及气溶胶粒子的强烈影响，导致观测信号质量显著降低(韩玉阁等, 2002)。

中红外波段的大气传输特性（通常定义为3至5微米与8至15微米之间，甚至包括更广义的2.5至25微米范围）主要受到大气吸收和散射两方面因素的制约。

①.大气吸收效应

1) 水汽吸收：水汽在中红外波段表现出极强的吸收特性，特别是在6微米和12微米附近的强吸收带。水汽浓度随大气温湿度变化，直接影响该波段辐射的穿透深度和探测器接收能量。

2) 温室气体吸收：除水汽外，温室气体如二氧化碳（CO₂）和甲烷（CH₄）在中红外区域也有特定的吸收谱线和带状结构，虽在某些波段吸收较弱，但在特定波长处仍会引起显著吸收。

②.大气散射效应

1) 瑞利散射：尽管瑞利散射在中红外波段的效应相对较小，由于其强度与波长的四次幂呈反比，但在短波红外部分仍有一定影响力。

2) 米氏散射：大气中较大颗粒（如气溶胶粒子、云滴和冰晶）引起的米氏散射在中红外波段虽不及可见光波段强烈，但仍对较长波长的红外辐射有散射作用，特别是对较大气溶胶粒子影响更为明显。

3) 邻近效应：在红外遥感领域，大气散射导致的邻近效应不可忽视。尽管中红外波段散射较弱，但仍然会对成像质量和辐射传输路径造成影响，例如造成图像边缘模糊和相邻像素间能量溢出。

因此，在中红外波段进行观测时，大气对红外辐射的吸收和散射对信号强度、信号质量和数据分析结果具有显著影响。设计和使用中红外观测设备时，必须精确建模并校正大气参数，以便准确提取地表和大气的辐射信息。同时，选择大气吸收和散射相对较小的“大气窗口”波段，对于提高观测效率和数据准确性至关重要。

此外，观测站址的视宁度（由大气湍流引起的星光抖动程度）直接影响红外图像的分辨率和信噪比。视宁度在中红外波段的重要性在于它决定了图像的清晰度和细节分辨能力。大气湍流由地球大气层内部的温度和密度梯度差异引起，导致光波前扰动和天体影像随机抖动，这对高分辨率成像和精密测量（例如恒星直径测定和系外行星搜寻）带来显著挑战。尽管红外波段相比于可见光波段受到的大气吸收和散射影响较小，但由于红外波长较长，大气湍流导致的像点扩散更明显，降低了成像角分辨率，同时也间接降低了信噪比。

因此，在选择观测站址时，必须严格评估视宁度，优先选择高海拔、干燥、风速适中且稳定的地区，这些地区通常具有较好的视宁度，有利于获取高分辨率红外图像和优质信噪比。同时，结合先进的自适应光学技术和后处理方法，可以最大限度地减少大气湍流对红外观测结果的影响。

鉴于此，科学家们选择将AIMS部署在高原等地形独特的地区，这些地区的高海拔特质导致大气层较薄、水汽含量较低，从而降低了红外波段的吸收损耗。同时，高原地带往往具有优良的大气稳定性和较低的生物活动干扰，尤其在极高海拔、人迹罕至的地区，大气湍流强度较小，视宁度优越，有利于获取高质量的中红外太阳观测数据(Bao et al., 2023)，如图 2-1。



图 2-1 AIMS站址位于西北高原

Figure 2-1 The AIMS site is located on the northwest plateau

然而，高原环境的恶劣条件意味着观测站不宜长期派遣大量人员值守。这促使AIMS总控系统必须具备高度智能化和远程操作能力，不仅要实现无人值守状态下自主完成常规观测任务，如自动指向、跟踪、调焦及数据采集，还应配备先进的远程控制系统，让研究人员在远离现场的安全环境中进行实时操控和数据分析。

此外，总控系统必须具备高级别的自主故障检测与诊断能力，当系统出现异常时，能够迅速启动自我修复或提供有效的故障解决方案，确保系统连续稳定运行。通过上述措施，AIMS总控系统不仅能克服地理环境带来的限制，更能大幅度提升系统的可维护性和可用性，从而有力保障科学实验的顺利进行和重要科研成果的产出。

2.1.2 不同组件持续集成的松耦合高内聚要求

在设计和构建AIMS这一国内自主研发的新一代大型精密地基望远镜时，我们集结了多领域尖端技术，包括精密光学设计、高性能材料加工、先进传感器技术、高速数据采集与处理系统以及复杂机械结构设计等。为了应对望远镜多元化的组件结构和严苛的科研标准，多个国内顶级科研院所携手合作，分别负责望远镜不同组成部分的研发与生产任务，其中西安光学与机械精密研究所致力于研制高精度电动驱动系统，上海技术物理研究所专注于傅里叶光谱仪的设计与制造，另有专门团队攻坚中红外宽带成像采集技术难题。

在AIMS望远镜的集成过程中，各个组件的操作层次和接口规范展现出多样化和异构性特征。例如，电机控制可能采用工业级实时通信协议如CAN总线或EtherCAT，以保证高精度运动控制的实时性；探测器控制单元通过专用接口与数据采集系统相联接，数据输出利用USB、GPIB或千兆以太网接口；傅里叶光谱仪控制则涉及更专业级别的仪器控制软件和硬件接口，通过特定指令集或API进行编程控制。

为了构建一套高效、稳定且易于维护的总控系统，必须解决跨层次、跨模块设备接口的兼容问题以及跨语言、跨系统的通信协议整合挑战。为此，采取了以下关键策略：

①.中间件与接口适配器设计：通过开发标准化的中间件或接口适配器，对不同类型的接口进行抽象封装，使得上层总控系统仅需通过统一标准接口与其交互，从而降低系统耦合度。中间件作为独立的系统软件层，连接不同系统和应用，实现跨系统数据共享和功能调用。在AIMS总控系统中，中间件充当了一个透明的中介，将底层硬件设备的各种接口抽象化和封装，为上层提供统一且标准的服务接口。接口适配器模式则用于桥接不兼容接口，确保系统只需关注标准化接口，而忽略硬件接口的具体实现细节。

1) 抽象层设计：定义一组通用的数据结构和函数调用规范，作为所有设备接口适配的目标基准。

2) 适配器实现：针对每种类型的硬件接口，编写相应的适配器，实现从原接口向抽象层规范的映射和转换。

3) 调度与通信管理：中间件负责管理与调度所有适配器，确保数据在各模块间正确、高效地流转，并处理并发访问、错误处理、数据完整性保护等问题。

4) 集成与测试：将所有适配器接入中间件，并进行严格的集成测试，确保总控系统在处理多种类型接口设备时能保持稳定高效。

②.统一通信协议标准制定：不论底层硬件采用何种接口类型（串口、网口或其他定制接口），都需通过协议转换方式实现遵循统一数据交换格式和通信规程。设计了一套涵盖串行通信接口（如RS-232、RS-485、UART等）、以太网接口（基于TCP/IP协议族）以及其他定制接口的协议转换方案，确保数据按预设的报文格式、编码规则、传输速率、错误检测与纠正机制进行交换。

1) 统一协议框架构建：所有设备按照规定的报文结构、编码方式、传输速率等要素进行通信，确保数据一致性与可靠性。

2) 协议转换模块开发：针对不同接口设备，创建协议转换模块，将原始数据格式转化为统一标准格式。

3) 实时性、安全性考虑：在统一通信协议中加入实时性保障、数据加密、流量控制、拥塞控制、心跳检测等机制，确保高效可靠的数据传输。

③.跨平台编程与语言接口/跨平台软件架构：在总控系统的软件设计中，采用跨平台编程语言如Java和Python，以增强系统的可移植性和开发效率。Java凭借其“Write Once, Run Anywhere”的特性，支持多线程、网络编程和数据库访问等功能，便于构建稳定高效的总控系统软件架构。Python因其简洁语法、强大第三方库及对科学计算、数据分析的支持，在处理复杂数据交换和控制逻辑时极具优势。同时，通过JNI（Java Native Interface）和Cython等工具，实现Java与C/C++或其他语言编写的底层库或硬件驱动间的无缝集成。除此之外，采用跨平台特性的软件架构同样可以达到与增强系统的可移植性和开发效率目的，如微服务架构。

④.设备驱动程序库与API文档建设：建立全面的设备驱动程序库，确保覆盖所有相关硬件设备，并保持驱动程序的稳定性和可移植性。同时编制详尽的API文档，明确每个接口函数的功能、参数含义、返回值说明、异常处理及使用示例，以促进开发团队间的协作和提高开发效率。此外，建立标准接口文档与示例代码，明确规定各组件间的通信方式，确保接口的一致性和兼容性。

⑤.质量管理体系实施：在整个项目周期内，严格执行质量管理体系，涵盖设计、开发、测试直至出厂验收全过程。尤其注重对组件接口兼容性和互操作性的严格测试，包括模块化设计、单元测试、系统级兼容性测试、交叉测试以及出厂前的全面质量检测认证。

通过上述综合手段，AIMS总控系统成功地将各组件紧密集成，形成了协同运作的整体，实现了系统松耦合高内聚的要求，从而确保望远镜能精准、高效地执行各项科学观测任务，并在太阳磁场测量等领域取得重大进展。

2.1.3 复杂观测模式的灵活协调控制需求

AIMS总控系统在统筹协调整个系统运作过程中，除了实现对光学系统与机械系统的精准控制与功能优化，还肩负着从各个前端采集终端收集、处理并向科学应用系统传输宝贵的第一手科学数据和定标数据的关键任务。这其中涵盖了广泛的观测流程和功能模块：

①.调焦控制与优化：总控系统需要精细调控各个光学采集终端的焦距，确保图像清晰度和数据质量，这包括自动或手动调焦机制，以及根据环境变化（如温度波动）进行实时调整的能力。

调焦控制与优化是AIMS总控系统中至关重要的功能模块之一，它关系到系统能否采集到清晰、高质量的光学图像，从而直接影响到后续的数据分析和科学研究成果。在实际操作中，总控系统对光学采集终端的焦距调控主要体现在以下几个方面：

1) 自动调焦机制：总控系统通常集成有先进的自动调焦算法，通过检测图像的锐度、对比度或其他特征参数，实时计算并调整光学元件的位置以达到最佳焦点。这一过程可能依赖于图像处理算法、PID控制器等技术手段，确保在不断变化的观测条件下，光学采集终端始终能保持在最适宜的焦距位置。

2) 手动调焦辅助：尽管自动调焦功能强大，但在特定情况下，如首次安装调试、系统故障排查或针对特殊目标进行精确调焦时，总控系统也需提供手动调焦的支持。手动调焦功能可以使操作员在必要时介入，对焦距进行微调或大范围调整。

3) 环境适应性调焦：总控系统需具备环境适应能力，特别是在温度变化较大的情况下。温差可能导致光学元件的热胀冷缩，进而改变焦距。因此，总控系统需要集成温度传感器，实时监测环境温度变化，并根据预先设定的温度-焦距补偿曲线，动态调节焦距，确保在温度波动下仍能维持理想的聚焦效果。

4) 实时监控与反馈优化：总控系统通过对焦距调整的过程进行实时监控和

反馈，不断优化调焦算法，以适应不同目标、不同光照条件甚至是长时间观测过程中可能发生的细微变化。这既包括对静态目标的持续优化，也包括对移动目标或快速变化场景的快速响应。

综上所述，AIMS总控系统通过精密的调焦控制与优化，实现了对光学采集终端焦距的精细化管理，确保了在复杂多变的环境中，始终能够获取最高品质的光学图像数据，为科学研究提供强有力的数据支撑。

②.平暗场采集：在科学观测过程中，总控系统会执行平场校正和暗场校正，以消除图像的固定噪声和非均匀响应，从而提高后续数据分析的准确性。

在科学观测过程中，平暗场采集是确保数据质量、提高后续分析准确性的关键步骤之一。AIMS总控系统中内置的平场校正与暗场校正功能，是根据光学系统原理和图像处理技术精心设计的。

1) 平场校正：平场校正是为了消除光学系统固有的像面非均匀性导致的图像亮度不均匀问题。这是因为即使是高质量的光学系统，在实际工作中也会由于镜头缺陷、光路不平行、透镜表面形貌误差等因素，使得图像在不同区域的亮度存在差异。在平场采集阶段，总控系统会指导望远镜或光学采集装置指向一片均匀照明的区域（如天空中均匀散射的光源或专用的平场光源），获取一张代表系统像面响应的平场图像。随后，将观测目标的真实图像与平场图像做数学处理（如除法运算），就可以有效校正像面的非均匀响应，从而得到更加均匀且真实的图像数据。

2) 暗场校正：暗场校正则主要是为了去除图像中的固定噪声源，如暗电流、热噪声、像素缺陷等产生的背景噪声。在暗场采集阶段，总控系统会令光学采集装置关闭或遮挡光源，在相同曝光条件下拍摄一张“暗图像”。之后，在处理目标图像时，通过将暗图像从目标图像中扣除，可以极大减少固定噪声对实际观测信号的影响，提高图像信噪比，确保后续的数据分析结果更为精确。

因此，AIMS总控系统在科学观测过程中，通过执行平场校正和暗场校正这两个必不可少的步骤，能够有效地去除影响图像质量的系统性偏差和噪声，从而为科学家提供更为准确、纯净的数据，有力地支持了后续的科学研究和数据分析工作。

③.特定观测任务调度：根据科学研究的需求，总控系统需灵活调度和执行针对特定目标或天文现象的观测计划，例如追踪特定天体的运动轨迹，或捕捉瞬态天文事件的发生。

特定观测任务调度是AIMS总控系统的关键功能之一，它体现了系统对复杂天文观测需求的高度适应性和智能化水平。在科学观测活动中，往往需要对特定目标或特定天文现象进行定时、定点、定向的精确观测，甚至在某些情况下需要迅速响应突发的瞬态天文事件。

首先，总控系统需要根据科研团队提交的观测任务计划，进行合理的时间安排和资源分配。这包括计算天体在夜空中的位置变化，规划望远镜指向和跟踪策略，以及调整光学系统和探测器的参数设置，确保在最佳观测时间内对目

标进行有效采集。

其次，总控系统需要具备强大的自动化调度能力。例如，系统能够根据天文学家提供的天体坐标、运动轨道参数以及观测窗口期，自动计算并生成观测序列，精确引导望远镜跟随天体运动，完成连续或周期性的追踪观测。

此外，对于瞬态天文事件的捕捉，总控系统通常会与全球天文警报网络或其他早期预警系统联动，一旦接收到有关瞬态事件的通知，总控系统便能在极短时间内调整观测计划，启动快速响应机制，确保望远镜能够在事件发生后的关键时间段内立即指向目标区域进行观测。

在此过程中，总控系统还必须考虑到诸多因素，如日月位置、大气透明度、望远镜自身的状态（如温度、指向精度、仪器健康状况等），以做出最优决策，确保观测的成功率和数据质量。

综上所述，特定观测任务调度是AIMS总控系统实现科学观测目标的重要途径，它通过科学、灵活、高效的调度策略，确保望远镜能够在恰当的时间、正确的方向，针对特定目标或瞬态天文事件进行精准观测，从而为天文学家获取宝贵的科学数据，推动相关领域的深入研究与发展。

因此，AIMS总控系统不仅需要具备对硬件设施的精准操控能力，还需具备对科学观测全流程的深刻理解和高度配合，以确保整个系统的高效运转和科学数据的高质量产出。

2.1.4 不同用户对环境与仪器数据的定制化需求

在AIMS总控系统的观测过程中，产生的数据不仅包括直接反映目标对象特性的科学数据，还包括与观测环境和仪器状态密切相关的辅助数据。这些辅助数据对于科学家和系统设计工程师具有同等重要的价值：

①.科学家角度：

1) 环境因素监测数据：在AIMS总控系统的科学观测过程中，环境因素监测数据对于科学家来说具有决定性的作用，这些数据可以帮助科学家深入理解观测结果，确保研究成果的准确性和科学性。以下是几个关键环境因素及其对科学家研究工作的影响：

(1) 大气状况监测：包括温度、湿度、大气压强、风速和风向等参数。这些参数会影响大气折射率，进而影响星光在穿过大气层时的传播路径和强度。例如，大气折射效应会导致恒星位置的视差，湿度和温度会影响大气中水汽含量，从而加大特定红外波段的吸收。通过记录这些环境参数，科学家可以在后期分析时对数据进行大气折射校正，还原观测目标的真实状态。

(2) 大气透明度（视宁度）：视宁度是衡量大气湍流对光波传播影响的一个重要指标，湍流会引起星光的闪烁和扩散，影响高分辨率观测的图像质量。监测视宁度数据，可以让科学家在数据分析阶段剔除大气湍流对观测结果的影响，或是选择视宁度较好的时段进行观测。

(3) 大气成分与污染监测：监测大气中的气溶胶、尘埃、烟雾等污染物浓度，这些物质会对光路造成散射和吸收，对光学和红外波段的观测产生显著影响。了解这些数据有助于科学家评价观测数据的可靠性，特别是在环境科学、气候变化和大气物理学等领域。

(4) 天文台现场环境监测：如噪音、振动、电磁环境等，这些因素可能影响到精密光学和电子设备的性能，尤其是在需要高精度指向和跟踪的场合，如地基太阳望远镜的观测中，轻微的振动和噪音都可能影响到观测结果的精度。

因此，环境因素监测数据是科学研究过程中的重要组成部分，它能帮助科学家深入了解观测数据背后的真实物理过程，排除环境干扰，确保所得数据的科学价值和结论的可靠性。通过这些环境数据与原始观测数据相结合，科学家们可以更准确地诠释观测结果，推动科学研究的进展。

2) 仪器状态数据：在AIMS总控系统的观测过程中，仪器状态数据对科学家的研究工作至关重要。这些数据详细记录了观测设备在观测时刻的运行状态，为科学家分析和解释观测结果提供了必要的上下文信息，有助于确保数据的准确性和可信赖性。以下是仪器状态数据在科学家研究中的重要作用：

(1) 光学系统状态：包括镜头污染程度、光学元件位置精度、反射镜或透镜的表面质量变化等。镜头污染会影响光的透过率和成像质量，光学元件位置的微小变化可能导致聚焦不准或指向失准。科学家通过分析这些数据，可以识别并修正因光学系统状态改变而带来的观测误差，从而得出更为准确的观测结果。

(2) 探测器性能参数：如探测器的量子效率、噪声水平、暗电流、饱和阈值等。这些参数会随时间、温度等因素发生变化，影响到观测数据的信噪比和动态范围。掌握探测器的实时性能状态，科学家可在数据分析阶段进行相应的校正，确保从原始数据中提取到的信号强度和光谱特征准确无误。

(3) 指向与跟踪精度：记录望远镜的指向和跟踪误差，对于需要精确测量天体位置、速度或进行高分辨率观测的项目尤为重要。通过监控和分析这些数据，科学家可以评估观测结果的定位精度，并在必要时进行数据矫正。

(4) 系统噪声与稳定性：系统内部噪声、电源波动、温度变化等因素均可能影响观测数据质量。了解并记录这些信息，有助于科学家区分真实信号与噪声，提高数据分析的有效性。

(5) 设备维护与寿命评估：仪器状态数据还能反映设备的健康状况和使用寿命，例如轴承磨损、电子元器件老化等情况。科学家通过定期审查这些数据，可以及时预见设备故障，安排维护或更换，以确保观测活动的连续性和数据采集的质量。

所以，仪器状态数据不仅是科学家进行精确科学分析的前提，也是优化观测策略、提高观测设备效能的关键依据。通过对仪器状态数据的严谨分析和科学管理，科学家能够从源头上确保观测数据的科学性和可靠性，从而推动相关科研项目的深入发展。

②.系统设计工程师角度:

1) 环境适应性优化: 系统设计工程师在面对AIMS总控系统时, 对环境适应性优化的关注重点在于如何根据实时监测的环境数据, 设计并实施一套灵活、高效的控制策略, 确保系统在各种复杂环境条件下仍能保持最佳的观测性能, 为科学家提供高质量的数据。具体体现如下:

(1) 环境参数动态调整: 工程师会利用实时采集的环境数据(如温度、湿度、风速、大气压力、大气透明度等), 通过算法模型预测环境变化对观测结果的影响, 实时调整望远镜的指向策略、观测时间安排、滤镜选择、增益控制等, 以减小环境因素对观测数据质量的影响。

(2) 抗干扰设计: 对于电磁环境、机械振动、噪声等非自然环境因素, 工程师会在系统设计阶段考虑抗干扰措施, 例如使用电磁屏蔽材料、抗震设计、噪声抑制技术等, 确保系统在复杂环境中依然能够稳定运行。

(3) 适应性控制系统: 设计和实现一套能够自动适应环境变化的控制系统, 例如根据温度变化调整设备冷却系统, 以保持探测器等关键部件的工作温度在理想范围内; 或者根据大气条件变化, 动态优化观测模式和数据处理算法, 确保在不同环境条件下都能得到最优的观测结果。

(4) 故障预测与防范: 通过长期监测环境数据和仪器状态数据, 工程师可以分析设备在特定环境条件下的性能衰退趋势, 预测潜在故障风险, 并提前采取维护或更换措施, 确保系统在极端环境下的可靠性和可用性。

(5) 环境适应性优化算法: 工程师还会研发和应用各种优化算法, 例如模糊逻辑控制、神经网络控制、自适应控制等, 使得总控系统能够根据实时环境数据, 自动调整控制参数, 实现在各种环境条件下的最佳控制效果。

因此, 系统设计工程师通过环境适应性优化, 能够确保AIMS总控系统在面临各种复杂环境挑战时, 仍然能够保持高效、稳定、准确的观测性能, 为科学研究提供坚实的数据支撑。

2) 仪器性能优化: 系统设计工程师在AIMS总控系统中, 对仪器性能优化的重视程度不亚于环境适应性优化。工程师通过实时监测和分析仪器状态数据, 结合科学观测需求和设备特性, 进行系统级别的性能优化, 具体体现在以下几个方面:

(1) 硬件性能优化:

设备维护与升级: 工程师密切关注仪器关键部件的性能参数, 如探测器灵敏度、镜头清洁度、机械部件磨损程度等, 通过定期维护和适时升级替换, 保持仪器的最优性能。

散热与稳定性优化: 针对设备在长时间运行下可能出现的过热问题, 工程师会设计并实施有效的散热系统, 保证设备在高温环境下也能稳定工作, 延长使用寿命。

(2) 控制算法优化:

自动聚焦与跟踪算法：基于光学系统状态数据，工程师会不断优化自动聚焦与跟踪算法，确保在环境条件变化时，望远镜能快速准确地锁定目标并保持稳定跟踪。

数据采集策略：根据探测器性能参数，工程师会选择最佳的数据采集频率、曝光时间等参数，平衡信号与噪声的关系，最大化观测数据的信噪比。

(3) 软件性能优化：

数据处理与压缩算法：为了提高数据传输和存储效率，工程师会对数据处理与压缩算法进行持续优化，确保在有限的带宽和存储资源下，保真度最高的原始数据能够快速准确地传送到后台进行进一步分析。

系统响应速度与鲁棒性：工程师会不断提升系统软件的响应速度和鲁棒性，减少延迟和错误，确保在面对复杂任务和紧急情况时，总控系统能够迅速作出反应并调整策略。

(4) 性能评估与反馈循环：

系统性能监控与评估：通过持续监测仪器状态数据，工程师可以对系统性能进行定量评估，发现潜在瓶颈和短板，为下一步优化提供数据支持。

迭代优化与更新：工程师会根据性能评估结果，不断迭代优化仪器设计和控制策略，形成一个从数据收集、分析、反馈到改进的闭环过程，确保总控系统始终处在性能优化的前沿。

总之，系统设计工程师在仪器性能优化方面的努力，旨在提高AIMS总控系统的整体性能，使其在满足科学观测需求的同时，充分发挥仪器潜力，确保数据的可靠性和准确性，从而推进相关科学研究的发展。

③.观测员角度：

1) 观测环境快速评估：观测员根据环境情况的变化，依托丰富的观测经验，在总控未应用可靠的环境交互策略时，执行相对最优的观测任务。

2) 仪器健康度评估：观测员根据观测经验，在总控未应用稳健的健康度评估策略时，评估系统健康度，并判断是否人工介入当前任务，是否根据风险情况执行中断操作。

综上所述，环境数据和仪器数据在AIMS总控系统中扮演着重要角色，既是科学家分析科学现象的基础，又是工程师优化系统性能、确保观测结果可靠性的关键依据，还是观测员判断是否需要人工介入的重要判据。通过对这些数据的科学严谨分析和利用，同时适配不同应用场景，AIMS总控系统能够更好地服务于科学探索，不断提高观测数据的科学价值。

2.2 AIMS建模

AIMS系统的设计与分析是一项涉及多学科交叉且精密复杂的任务，它涵盖了硬件组件的空间配置、物理连接及数据通讯等多个层面。要全面理解这样一个系统，首先需要深入剖析其结构和功能特性：

①.空间布局与物理关联性:

空间布局指系统内各受控部件如传感器、执行器、处理器等的具体位置安排,以及它们之间的物理连接方式,比如有线传输线路、无线通信网络或者机械传动装置等。

物理关联性则涉及不同部件之间的物理约束和相互影响,例如信号传播延迟、能量传输效率、机械联动响应速度等。

②.信息交互流程:

这部分要求深入了解每个部件如何采集数据、处理信息并作出反应,包括数据的采集、预处理、传输、分析、决策制定以及指令输出等一系列过程。

各个子系统之间通过特定的接口协议进行信息交换,从而实现协同工作,例如通过总线架构或分布式网络结构进行实时通信。

③.系统建模与可视化表达:

为了清晰地展示系统的工作原理,需要建立数学模型和图形化模型,包括状态转换图(State Transition Diagrams,描绘系统状态变迁)、活动图(Activity Diagrams,用于业务流程分析)、顺序图(Sequence Diagrams,显示对象间消息传递的时间顺序)等。

通过这些图表,能够直观展现系统操作的逻辑流程、动态行为以及事件触发机制,便于进行系统性能预测、故障诊断和优化设计。

另外,AIMS系统部署后,其系统建模也有利于进行关键节点识别与系统优化:

在后期数据分析过程中,识别自主控制的关键节点意味着找出那些对系统性能具有决定性影响的组件或环节,如核心控制器、决策算法、冗余备份机制等。

分析潜在的瓶颈和冗余可以指导设计师针对特定场景提升系统效率,减少资源浪费,同时增强系统的容错能力和鲁棒性。

总之,对AIMS系统进行详尽的空间布局分析、物理关联研究以及信息交互建模,不仅有利于提高系统的自主控制能力,还对于系统设计的整体优化乃至最终成功部署具有至关重要的作用。

2.2.1 受控部件分布及 workflow 图

在设计和构建一个精密的太阳观测望远镜总体控制系统时,我们按照光学系统的层级划分,将整个系统细分为五个核心功能区域,分别为圆顶部分、垂直引光部分、光学平台部分、观测室部分以及室外部分,如图 2-2和图 2-3。

①.圆顶部分:

格里高利主次镜控制:负责调整主次反射镜的位置、姿态和倾斜角度,确保光线准确无误地反射至预定光路。

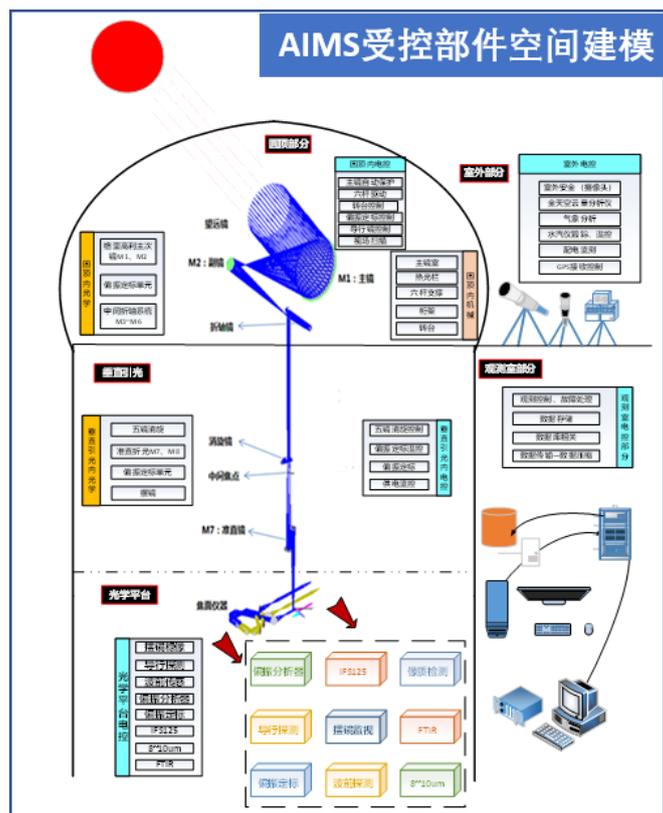


图 2-2 AIMS受控部件空间建模

Figure 2-2 Space modeling of controlled components in AIMS

导行相关控制：负责控制望远镜在圆顶内的水平和垂直移动，实现精确指向。

偏振定标1：作为系统中的关键校准环节之一，与垂直引光内的偏振定标互斥运行，具有不同的定标周期，主要用于测量和修正光路中的偏振效应，非工作时段内光路会直接通向折轴系统。

波前传感：实时监测入射光束的波前特性，提供波前误差数据以便于闭环控制。

折轴系统：将光路从直视方向改变为90度，便于后续光学组件的布置和处理。

②.垂直引光部分：

五镜消旋系统：通过一组透镜组消除由于地球自转带来的视场旋转效应。

偏振定标2：同偏振定标1一样，执行互斥的偏振校准任务，但位于垂直引光路径中。

中间焦点：对光路进行聚焦处理后返回至偏振定标2，实现多次反射与校准的循环。

摆镜系统：配合光学平台的摆镜稳像系统形成闭环控制，确保光路稳定无抖动。

③.光学平台部分：

2.2.2 观测流程

为了确保AIMS能够顺利完成各种科研任务，AIMS总控系统的设计和工作流程遵循严格的操作规程，涵盖了全面的预启动检查、实时故障排查、全天候环境适应能力，以及两种主要观测模式——科学观测模式和定标观测模式，如图 2-4。

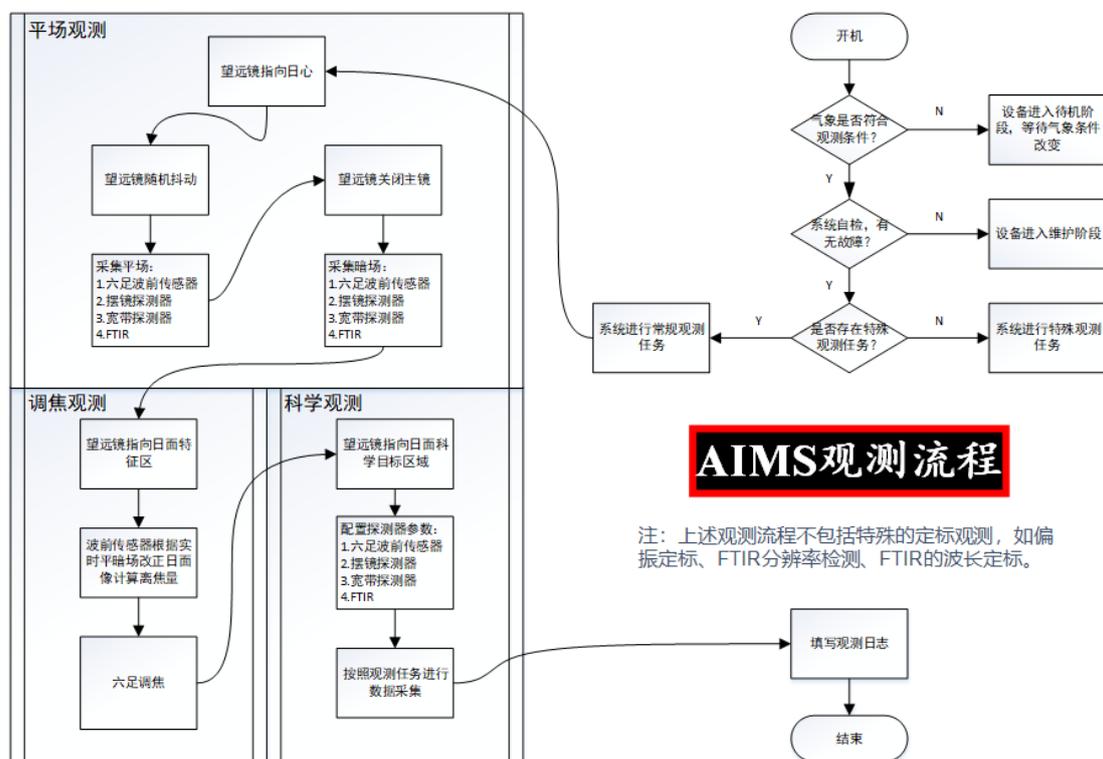


图 2-4 AIMS观测流程

Figure 2-4 AIMS observation process

科学观测模式主要包括：

①. FTIR无偏振狭缝定点观测：偏振分析器未在光路中，对特定目标区域进行连续或周期性的光谱采样。

②. FTIR无偏振视场扫描观测：偏振分析器未在光路中，在指定区域内进行线性或二维扫描，获取大范围的空间分辨光谱数据。

③. FTIR纵向磁场定点观测：偏振分析器处于光路中，对特定目标区域进行连续或周期性的纵向磁场的光谱采样。

④. FTIR纵向磁场视场扫描观测：偏振分析器处于光路中，在指定区域内进行线性或二维扫描，获取大范围的空间分辨纵向磁场光谱数据。

⑤. FTIR矢量磁场定点观测：偏振分析器处于光路中，对特定目标区域进行连续或周期性的矢量磁场的光谱采样。

⑥. FTIR矢量磁场视场扫描观测：偏振分析器处于光路中，在指定区域内进行线性或二维扫描，获取大范围的空间分辨矢量磁场光谱数据。

⑦. 8-10微米宽带成像：通过专用的红外相机捕捉目标区域在特定红外波段的大气、天体或其他现象的影像资料。

定标观测模式着重于系统的精度保障和性能验证，涉及：

①.系统内各部件的焦距调整与几何标定：确保各光学元件间的相对位置和焦距匹配，保证成像质量和光谱测量精度。

②.红外相机的暗场测量：测定相机本身的噪声水平和暗电流，用于后期的数据校正。

③.望远镜的平场观测：校正望远镜成像面的均匀性，补偿因光学元件非均匀性和系统温度变化等因素导致的图像失真。

④.仪器与大气背景观测：记录仪器自身背景信号以及大气透过率等参数，作为后续科学数据解析的重要参考。

在实际运行过程中，AIMS总控系统的工作流程详述如下：

①.人工检查与系统启动：

在人工全面检查确认无误后，启动系统。总控软件定时器1每天根据GPS授时系统获取的实时经纬度和日期信息，计算出日出时间A和日落时间B，并据此自动启动和关闭总控系统。

②.环境判断与启动准备：

距离日出时间A临近时，定时器1触发环境判断定时器2开始工作，后者在白天（A B时间段）每半小时评估一次观测环境是否适宜。外部环境判断：监控观测站的气象参数（如日照强度、湿度、天气状况、云层分布），以及现场安全性（排除设备附近的潜在障碍物）。内部环境判断：确保电力供应正常，检查望远镜、圆顶和其他辅助设备的状态，包括它们的位置、角度是否处于安全和有效范围内，同时审查故障日志，确认先前运行中是否存在未解决的问题。

③.观测前的系统调试：

硬件调试：按预定顺序依次启动圆顶、望远镜指向跟踪系统、望远镜恒温 and 光学仪器（位置及角度调整）。如有故障出现，转入故障处理程序；若一切正常，则继续进行软件调试。

软件调试：系统进行初步的试观测，并对收集到的磁场数据、光谱数据进行初步分析比对。如果数据结果与历史经验或设定标准不符，同样会触发故障处理流程；反之则进入正式观测阶段。

④.科学观测与系统定标观测：在通过所有调试步骤后，系统进入正常的科学观测与定期定标观测程序。

⑤.系统关闭：

当遇到如下任一条件时，系统将自动进入关闭流程：定时器1检测到接近日落时间B；环境判断定时器2判断未来一段时间不具备观测条件；故障处理系统识别出严重故障，短期内无法修复。关闭流程包括：按照规定的顺序逐一关闭

各个仪器设备；生成当日完整的系统运行日志；同时记录当日的故障日志，以供技术人员分析与维修。

2.3 小结

在本章中，我们立足于实践，系统地探讨了构建和完善AIMS总控系统所需考虑的关键因素。

首先，深入分析了影响AIMS观测站选址的各项指标，包括地理、气候、环境稳定性以及天文台基础设施的可行性，这些因素对于总控系统设计之初就确定其自动化程度和适应性具有决定性意义。

其次，针对AIMS所包含的多种受控部件，我们详细研究了它们各自的组成结构、功能特性及其相互之间的依赖关系，明确了总控系统需要具备高效协调管理不同子系统的功能，确保整个观测设施能够在复杂环境中实现精准控制和协同运作。

再者，从科学观测的实际需求出发，讨论了不同观测模式下总控制系统的响应机制，包括傅里叶变换红外光谱仪的定点和扫描观测模式，以及8至10微米宽带成像等多种科学观测策略对应的控制要求。这些需求揭示了总控系统必须具备灵活的任务调度能力和精确的数据采集、处理能力。

此外，通过对仪器数据的质量控制、传输、存储和分析流程的梳理，强调了总控系统在数据链路管理上的重要性，旨在保证观测数据的完整性和准确性，为科学研究提供可靠的基础数据源。

综上所述，本章不仅为今后开发一套高度自主化、智能化的AIMS总控系统明确了设计原则和技术路径，还基于AIMS受控部件的具体空间布局、工作流程以及多样化观测模式，搭建了总控系统组件构成的基本框架和逻辑严密的工作时序模型。这一系列理论与实践相结合的研究成果，为构建一个既能满足高精度观测需求又能适应复杂多变环境挑战的总控系统奠定了坚实基础。

第3章 自主化的AIMS总控系统设计

根据第二章深入细致的需求分析，我们认识到，为了满足AIMS（先进综合观测系统）在复杂环境下高效、精准、持续运行的要求，亟需构建一个高度扩展、易于维护、且能无缝对接多类型设备和通讯协议的总控系统。这一系统不仅要跨越编程语言和操作系统边界，确保跨平台兼容性，而且还需具备强大的历史数据追溯能力和极高的运行稳定性，确保系统无论在常态还是异常情况下都能维持有效的控制与管理。

鉴于当前天文观测领域内关于望远镜自动化程度的标准尚不够明确统一，我们首先着手对当前行业内望远镜自动化的层次结构和功能分类进行剖析，对比国际及行业内的最新技术标准和发展趋势，提炼出适用于AIMS总控系统设计的核心要素与升级方向。

以此为基础，我们将以明确的自动化分级为目标，从系统整体框架设计、软件架构规划、控制策略制定、安全保障措施等多个维度展开论述，力求阐明AIMS总控系统的内在设计理念与实现途径。这不仅意味着要充分考量系统模块化、可配置性以支持未来的扩展与升级，还要在软件层面采用先进的分布式架构和标准化接口，确保多设备协同工作的高效性与一致性。同时，结合智能控制算法与冗余备份机制，实现在不同观测模式下的精准操控，并强化系统抵御外界干扰及应对突发故障的能力，最终打造出一个既符合现代天文观测前沿标准又贴合AIMS个性化需求的自主化总控解决方案。

3.1 基于望远镜的自动化标准分级及AIMS总控预期目标

在当前的天文观测领域中，望远镜的自动化控制级别存在一定的模糊性，尚未建立一个统一且精细的划分体系。一般来说，望远镜自动化控制系统可以大致分为四个层级：自动化天文台控制系统，远程天文台控制系统，自主化天文台控制系统，智能化天文台控制系统。然而，现有的分级并没有严格的定义和界限，尤其是在不同等级之间是否存在明确的上下兼容关系，这无疑给未来总控系统的设计带来了不确定性。为了解决这个问题，我们借鉴了其他相关领域的自动化分级经验和标准，结合天文观测的特殊性，提出了一个更为详尽且实用的望远镜自动化分级体系。

在这个新的分级框架下，我们针对AIMS进行了定制化的自动化分级预期设定。具体来说，我们期望AIMS总控系统不仅能在硬件控制、观测流程自动化等方面达到较高的自主化水平，还能在数据分析、决策制定以及与其它观测网络协同工作等方面体现出智能化的特点，从而更好地服务于科学研究和技术创新的目标。通过这样的细化分级与设计，有望推动望远镜自动化控制技术的进步，并为后续类似项目的总控系统设计提供明确的标准参考。

3.1.1 现有望远镜自动化分级标准

望远镜自动化控制系统通常可以划分为几个递进的层级，每个层级代表了自动化程度和复杂性的提升，以及系统功能的丰富与完善。以下是对这些层级的专业性详细解读(Castro-Tirado, 2010):

基础自动化控制层级

手动/半自动控制：在这个层级，望远镜的部分动作可以通过电机驱动和简单的电子控制器实现，比如电动马达控制望远镜的俯仰和方位角转动。操作员通过手动输入指令或预设的简单脚本来控制望远镜指向和跟踪目标。虽然已经去除了纯手动操作的繁重，但仍然需要人员现场监控和频繁介入。

自动化天文台控制系统

全自动化观测：系统具备完全的自动跟踪和指向功能，能够根据预先设定的观测列表执行观测任务。它包括了自动寻找目标、跟踪恒星或者深空天体，以及记录数据等功能。此外，这类系统通常整合了气象传感器信息，可根据环境条件自动调整观测策略或暂停观测。

远程天文台控制系统

远程操作与监控：在此层级，望远镜不仅可以全自动运行，还可以通过网络远程控制，允许操作员在远离天文台的地方指挥和监控望远镜的运行。远程系统通常具有安全可靠的通信网络，以及完善的可视化界面，让操作员可以实时查看数据、更改任务计划和监控设备状态。

自主化天文台控制系统

自主决策与自我校准：系统进一步增强，具备了更高的自主性，可以在没有人工直接干预的情况下根据预设规则和实时条件做出决策。例如，系统可以自主进行设备的校准、调整观测参数、处理临时故障，并根据观测条件（如风速、气温、大气扰动等）优化观测策略。

智能化天文台控制系统

集成AI与机器学习：在最高等级，望远镜控制系统引入了人工智能和机器学习技术，使其能够进行更复杂的决策，例如通过深度学习技术预测最佳观测窗口，利用大数据分析优化观测序列，以及对采集数据进行初步分析和筛选。这种级别的系统不仅能够自主运行，而且能够通过学习不断优化自身的性能。

总的来说，随着层级的上升，望远镜自动化控制系统逐渐实现了从单纯机械运动控制到复杂环境感知、智能决策和数据分析的飞跃，极大地提高了天文观测的效率和科学产出质量。

然而，望远镜自动化控制系统的分级标准界定及其兼容性方面存在不足，无法为行业提供设计参考，主要包括以下几点：

①.标准界定模糊：

缺乏统一标准：目前业界对于望远镜自动化控制系统的分级并没有明确、统一的标准，导致各个机构和项目在定义和实现自动化层级时可能存在差异，

难以进行横向比较和统一评价。

功能描述笼统：各层级之间的功能边界有时不清晰，比如自动化和自主化之间的差异可能在于对复杂环境适应能力和决策能力的不同，但实际操作中区分起来并不直观，容易引起混淆。

②.缺乏向上升级能力：

升级难度大：由于不同层级之间的自动化系统在软硬件设计、通讯协议和控制算法等方面可能存在较大差异，较低层级的系统往往难以通过简单的升级或添加组件实现向更高层级的跃迁。

投资浪费风险：如果没有前瞻性的设计和规划，当需要升级时，可能需要推翻重建部分乃至全部系统，导致早期的投资无法充分利用，造成资源浪费。

③.兼容性不足：

不同厂商产品的兼容性：市场上的望远镜自动化控制系统由不同制造商提供，各自产品可能存在封闭性，不利于与其他系统或设备的无缝对接和集成，影响了系统的整体性能和升级可能性。

新旧设备融合难题：随着技术进步，新型自动化设备与传统设备的接口、协议不一致，可能会导致在老旧设备改造升级或新旧混合使用的场景下出现兼容性问题。

④.指导性不足：难以指导最新的望远镜自动化控制系统的研发和部署。

因此，在AIMS总控系统设计之初，基于前瞻性的设计和规划，同时为未来望远镜自动化控制系统的研发和部署提供指导。我们需要结合当前标准与同领域知识，提出一套新的望远镜自动化分级标准。

3.1.2 参考无人驾驶的望远镜自动化分级

望远镜自主化智能化观测与无人驾驶技术在原理和实现方式上有诸多相似之处，具体体现在以下几个方面：

①.环境感知与实时决策：

无人驾驶：车辆通过搭载的各种传感器（如激光雷达、摄像头、毫米波雷达、超声波传感器等）实时感知周围环境，包括道路状况、交通标志、行人、其他车辆等，并通过高级算法处理这些信息，做出避障、路径规划和速度控制等实时决策。

望远镜自主化智能化观测：望远镜同样需要借助多种传感器（如光栅光谱仪、CCD相机、波前传感器、大气监测设备等）对观测环境（包括大气透明度、视宁度、目标天体位置等）进行实时感知，基于这些信息调整望远镜的指向、跟踪策略以及曝光参数，以获得最佳观测效果。

②.闭环控制系统：

无人驾驶：通过闭环控制系统，车辆可以对车辆的动态状态（如位置、速度、加速度）进行实时反馈控制，确保车辆按照规划路线准确行驶。

望远镜自主化智能化观测：同样采用闭环控制系统，望远镜可以对自身的指向精度、跟踪精度以及光学元件的状态进行实时监控和调整，确保望远镜始终保持对观测目标的精确跟踪。

③.自主决策与规划：

无人驾驶：车辆能根据路况和交通规则自主规划行驶路线，遇到突发情况时能自主做出避障、停车等决策。

望远镜自主化智能化观测：望远镜也能根据观测条件和任务需求自主调整观测计划，如遇到不利的天气条件或设备故障时，能自动切换到备用观测目标或进入保护模式。

④.人工智能与机器学习：

无人驾驶：运用AI和机器学习技术，无人驾驶车辆可以从大量数据中学习和优化驾驶策略，提高驾驶效率和安全性。

望远镜自主化智能化观测：同样的，AI和机器学习也在望远镜控制中发挥着重要作用，帮助望远镜优化观测策略、处理观测数据，甚至通过学习过去的观测数据改进未来的观测行为。

⑤.远程控制与自主运行：

无人驾驶：无人驾驶车辆可以在没有驾驶员的情况下远程控制或自主运行。

望远镜自主化智能化观测：现代天文台经常采用远程控制，高端的望远镜系统更是能够实现长时间无人值守的自主观测，只有在必要时才需要人工介入。

综上所述，无论是无人驾驶还是望远镜自主化智能化观测，都涉及到复杂的环境感知、实时决策、闭环控制、自主规划以及人工智能技术的应用，这些都是它们在智能化技术层面上共有的特征。尽管无人驾驶的目标是无人化安全到达预设目的地，而天文观测则是找寻有价值目标并实现机遇观测，但这两者都面临复杂环境的挑战和需要快速适应调整的难题。天文观测的不确定性，如天气突变或新天体现象的发现，要求望远镜控制系统能够灵活调整观测计划和策略。因此，引入无人驾驶的自动化分级标准，实质上是借鉴其在处理复杂情况下的决策逻辑、环境适应性及自动调节机制，而非简单地复制其目标导向性。这有助于构建一个既符合天文观测特殊性又具备高度自动化水平的望远镜控制系统，以提高观测的效率和科学产出。

无人驾驶的分级标准是由国际汽车工程师学会（Society of Automotive Engineers, SAE）制定的，这套标准被全球广泛接受和引用，被称为“SAE J3016”标准¹。该标准将无人驾驶技术分为六个等级，从L0到L5，每个等级都代表了不同程度的自动化和人工干预需求。

¹https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/.

L0级（无自动化）：在这个等级，车辆完全没有自动化功能，所有的驾驶操作完全由人类驾驶员完成，包括转向、加速、制动和观察路况。

L1级（驾驶辅助）：系统能够辅助驾驶员执行某些驾驶任务，如自适应巡航控制（ACC）可以自动控制车辆速度并与前方车辆保持安全距离，或车道保持辅助（LKA）可以帮助车辆保持在车道中央，但驾驶员仍然需要全程监控驾驶环境并对车辆的主要控制负责。

L2级（部分自动化）：在此级别，系统可以同时控制车辆的方向和速度，但驾驶员仍需要保持警觉，并随时准备接管驾驶任务。例如，特斯拉的Autopilot和通用汽车的Super Cruise系统即属于L2级自动驾驶，可以在特定条件下实现自动驾驶，但驾驶员的手不能离开方向盘太久。

L3级（有条件自动化）：在特定的驾驶环境下，系统可以在有限的条件和情境下完成所有驾驶任务，但当系统请求时，驾驶员必须能够立即接管。L3级自动驾驶车辆可以在某些预设的道路和环境条件下自动驾驶，但对人类驾驶员的注意力要求有所放松，但仍需要随时准备介入。

L4级（高度自动化）：L4级自动驾驶车辆在特定的、预先定义好的操作设计域（ODD）内，能够实现几乎完全的自动驾驶，即使在复杂环境条件下也能自主驾驶，无需驾驶员介入。然而，L4车辆可能仍有限制条件，如特定区域、特定天气条件等，在超出其ODD时需要转换为人工驾驶或在安全地点停车。

L5级（完全自动化）：L5级自动驾驶车辆在所有道路和环境条件下都能实现完全的自动驾驶，不再需要人类驾驶员的干预，车内可能不再配备传统的驾驶座和方向盘。L5级车辆能够自行处理所有驾驶情境，包括那些罕见的、未曾预料到的情况。

由此，结合此前的望远镜控制系统自动化分级标准，同时参考上述无人驾驶的分级标准，构建了新的望远镜控制系统自动化分级标准：

L0级（手动控制）：控制系统仅提供基本的电动或手动操作功能，所有观测任务的设定、瞄准、跟踪、数据采集都需要人工完成，类似于无自动驾驶的车辆。

L1级（初级自动化）：系统具有自动跟踪和指向功能，可以辅助操作员完成一些重复性工作，如追踪恒星或小范围内的天体移动，但观测计划的创建、复杂条件下的调整和数据处理依然需要人工操作。

L2级（部分自动化）：系统具备预设观测序列执行能力，自动调整跟踪参数，并能在一定范围内适应环境变化（如大气扰动、设备轻微漂移等）。操作员仍需监控系统运行并准备在必要时介入。

L3级（有限条件下的自主观测）：望远镜能在特定的环境条件（如良好视宁度、已知目标列表）下自主完成观测任务，包括自动编排观测计划、适应环境变化、进行基本的数据质量检查等。当超出其操作设计域（例如天气恶化或目标超出跟踪范围）时，系统应能安全地停止并通知操作员。

L4级（高度自主化）：在预先定义的宽泛操作设计域内（如特定类型的天文学研究任务、多种天气和天文条件），望远镜能自主完成所有观测任务，包括自动调度观测序列、实时优化观测策略、处理复杂数据流和进行初步的数据分析。此时，操作员无需实时监控，仅在必要时（如系统故障或特殊情况）接手控制。

L5级（完全自主智能观测）：望远镜在所有可预见的天文观测条件下实现完全自主操作，包括自主发现和追踪未知目标、自我维护和校准、基于机器学习优化观测策略、进行深度数据分析和报告生成。此等级下的望远镜控制系统不需要任何形式的人工实时干预，能够完全替代人工进行全天候、全方位的天文观测活动。

在这套标准中，L0级即完全手动，而L1则仅包含碎片化的部分自动化功能，L2在L1基础上将这些碎片化功能加以整合，实现观测序列的自动化，L3则是为L2添加了内部和外部的环境判断，根据判断结果执行预设观测序列，L4则是在对内外部环境判断时，同时自行优化调整观测序列，最后，L5则可根据机器学习，深度神经网络，多模态大模型等实时改进优化各项功能。

整套标准各个层级之间界定清晰，同时，若采用前瞻性设计最终系统为L5级系统，即使在早期阶段，该望远镜仅处于L0级，仍可通过不断改进，实现到L5级的跃迁。在概念性上，为自主化的AIMS总控系统设计提供了指导。

3.1.3 AIMS总控系统自动化发展预期

按照新的望远镜自动化分级标准，我们可以逐步提升望远镜操作的自动化程度，使其逐渐从依赖人工操作过渡到高度智能化和自主化：

L1级（初级自动化）：这一级别主要针对那些操作流程较为固定、重复性强的任务进行自动化升级，例如自动指向太阳、跟踪、基本的调焦等。望远镜可以通过预编程指令实现对指定目标的定位和持续跟踪，减轻操作员的工作负担，但仍需人工设定目标和监视整个过程。

L2级（部分自动化）：在L2级，望远镜控制系统集成了一系列自动化模块，能够根据预设的观测模式执行不同的观测任务。例如，用户可以提前设置多个观测计划，包括观测目标列表、观测顺序、曝光时间和滤镜选择等。系统能够在无人值守的情况下执行这些计划，并具备一定的故障检测及恢复能力。然而，L2级系统可能还不具备应对突发状况或环境变化的能力，操作员仍需定期检查系统状态并在必要时进行干预。

L3级（有条件自主化）：在L3级，望远镜系统增加了环境感知能力，集成气象站数据、摄像头图像分析等外部传感器信息，以实时监测天文台的环境条件（如视宁度、云层覆盖、风速等）。系统可以根据这些信息自动决定是否执行某个预设的观测模式，并能切换到备选观测方案。此外，L3级系统可能还可以进行简单的决策制定，如在适合观测深空天体的晴朗夜晚自动开启深空观测模式。

L4级（高度自主化）：达到L4级的望远镜控制系统不仅能够根据实时环境条件优化观测策略，还能结合历史数据、天文事件预测等高级信息，计算出每项观测任务的理想观测窗口、最佳观测参数以及观测顺序的全局优化。系统可以自主安排观测计划，以最大程度提高观测效率和数据质量，尽管在某些极端或未预见情况下，可能仍需人工确认或指导。

L5级（完全智能化）：最终的L5级望远镜系统将是完全自主和智能化的，它不仅包含前几级的所有自动化功能，而且具有自我学习和适应环境变化的能力。通过利用多模态人工智能算法和大数据分析，系统能够自我优化，并能够探索和发掘未知的科学问题。例如，它不仅可以自行规划和执行观测任务，还可以识别新的天文物体、发现罕见天文现象，并自动发起临时观测计划。在这一阶段，望远镜几乎可以独立进行全天候、全方位的科学研究，而人类科学家更多地扮演顾问和数据分析的角色。

3.2 AIMS自主化系统框架设计

从AIMS预期的L5级自动化逆推，结合此前AIMS的需求分析，我们可以得出，总控系统的系统框架必然是由不同功能职责彼此相对独立的子系统构成的，这些子系统不仅涵盖了此前空间布局中提出的一些功能，同时考虑系统的高度扩展、易于维护，强伸缩性，强回溯性等诸多指标，扩展出了一些硬件实体以外的软件系统，就功能方向而言，可归类为3个设备控制类子系统：望远镜控制系统，焦面仪器控制系统，观测控制系统；5个自主化支撑系统：通信控制系统，能源监控系统，环境感知系统，观测交互系统，模型演进系统；以及最终实现核心调度功能的中枢决策系统。各个子系统各司其职，彼此协调配合，实现总控系统的自主化观测，如图 3-1。

从AIMS预期的L5级自动化逆向设计，结合前期的需求分析，我们可以明确，构建一个达到最高自动化水平的总控系统，其系统架构应当是一个由若干功能模块化、职责分明且相互独立的子系统所组成的复杂系统。这些子系统不仅囊括了早期空间布局设计中的硬性功能需求，同时也充分考虑到系统的扩展性、易维护性、强伸缩性和强回溯性等关键性能指标，进而拓展出了涵盖硬件之外的多层次软件系统。根据功能属性，这些子系统可概括为以下几大类别：设备控制类子系统：望远镜控制系统，焦面仪器控制系统，观测控制系统；5个自主化支撑子系统：通信控制系统，能源监控系统，环境感知系统，观测交互系统，模型演进系统；以及最终实现核心调度功能的中枢决策子系统，如图 3-2。

通过以上各子系统的紧密协作与信息共享，AIMS总控系统得以实现从观测目标选定、设备调控、环境适应到数据采集、处理、分析全过程的自主化控制与优化。

3.2.1 子系统的基本构型

在深入探讨各子系统细节之前，我们首先概述子系统的基本架构设计，强



图 3-1 AIMS总控系统框架

Figure 3-1 The framework of the MCS of AIMS

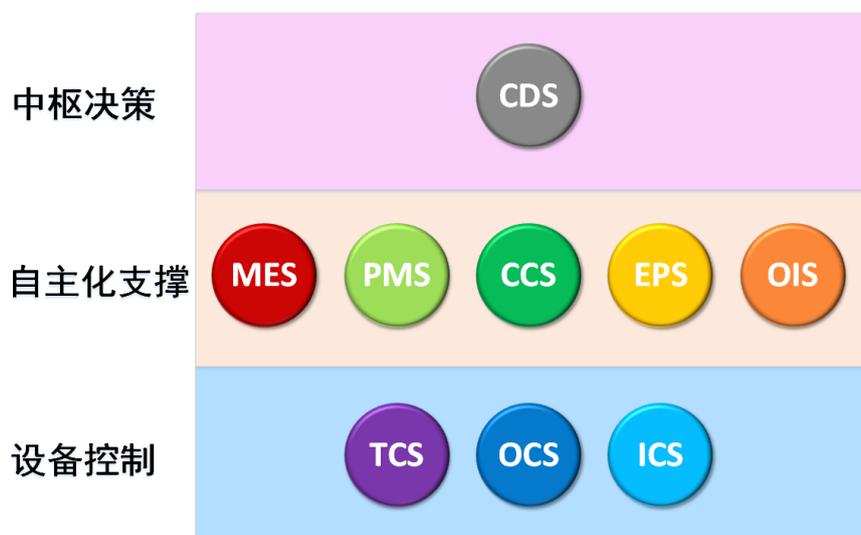


图 3-2 不同层的子系统

Figure 3-2 Subsystems at different layers

调其模块化与灵活性特点。值得注意的是，子系统既有可能被灵活地省略或融合到其余子系统中，也可能是单一的子系统或由多个下级单元集成的集合，这取决于具体的应用场景和技术要求，旨在适应多变的系统配置和功能需求。下图 3-3展示了这一灵活且可配置的子系统结构框架：

当子系统包含可调控的硬件组件时，其构建始于硬件层，随之是硬件驱动层，这一层级通常依赖于制造商提供的硬件驱动基础库。开发工程师基于这些API，并利用诸如套接字、Modbus等低级通讯协议来实施硬件操控逻辑。

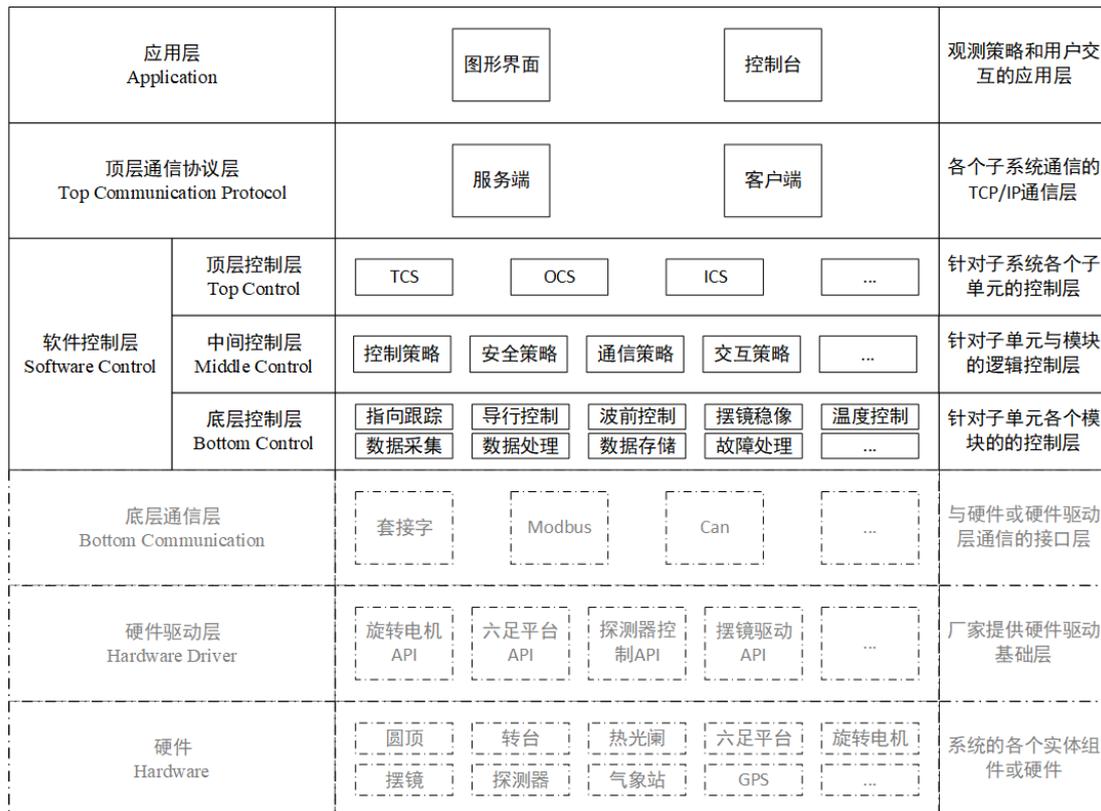


图 3-3 子系统的垂直架构

Figure 3-3 Vertical architecture of subsystems

无论子系统是否涉及物理硬件，软件开发的关键步骤在于将硬件操作或纯软件功能抽象成与望远镜操作直接相关的功能函数，并进一步映射为简洁的指令集，这一层次可称为底层控制层。其中，映射的简短指令包含可生效的子系统对象，内容以及执行的各个阶段判据，如图 3-4。

此层之上，通过整合包括控制逻辑、安全策略及通讯机制在内的多种中间控制层策略，来实现对基本功能的高效管理与控制。随后，依据不同的功能职责，这些控制逻辑被归类并集成到顶层控制层的多个专门子系统中。

为了促进子系统间的协同作业，各子系统借助顶层通信协议层定义的轻量化通信协议，采用客户端-服务器（CS）架构模式进行相互通讯。此设计确保了系统内部交互的高效与灵活性。

最终阶段，根据应用需求，系统通过封装应用层的图形用户界面（GUI）或

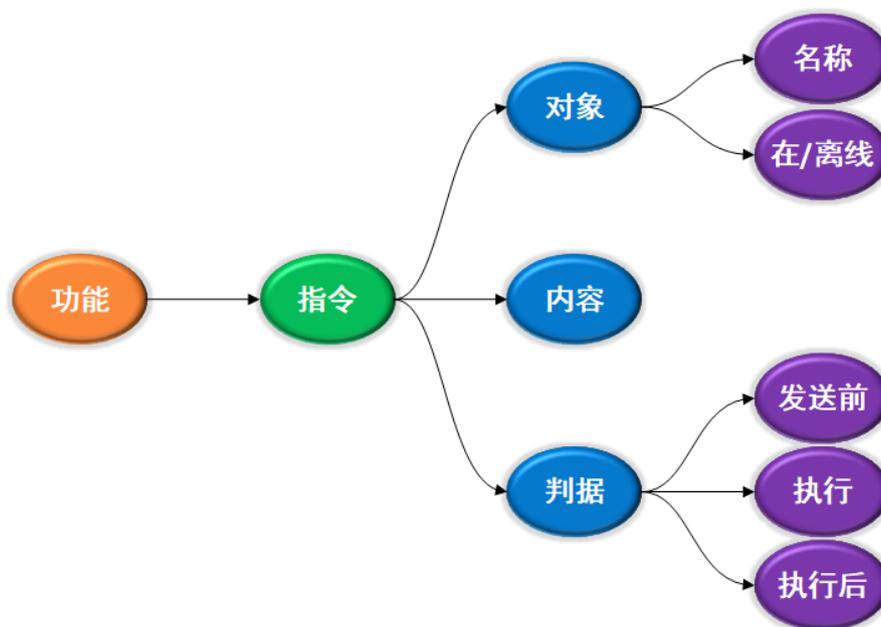


图 3-4 简短指令包含的内容

Figure 3-4 The content contained in a brief instruction

命令行控制台，完成了从底层到用户界面的全面整合，从而实现了系统的整体封装与易用性优化。

3.2.2 设备控制系统

设备控制类子系统构成了整个总控系统的基础，它们直接对应于望远镜核心功能的硬件实体，如驱动系统、指向与跟踪系统、焦面装置等。这些子系统负责对硬件设备进行精密控制，即便在没有中枢决策和自主辅助支持的情况下，也能够通过手动或半自动方式实现L1级的自动化操作，如自动跟踪、基本的指向控制和简单预设观测序列的执行。

在具备中枢决策和自主辅助支持的条件下，设备控制类子系统将进一步提升自动化级别，通过集成通信控制系统、能源监控系统、环境感知系统等，实现更高级别的自主观测，如L2级以上的自动化，直至达到L5级的完全智能化运行。

3.2.2.1 望远镜控制系统

望远镜控制系统是天文观测设施的核心组成部分，其主要功能在于实现对望远镜主体及其附属结构（如圆顶）的精密控制和监测，以确保望远镜能够在各种天文观测条件下进行高效、准确和稳定的运行。

一般的，望远镜分为赤道式望远镜和地平式望远镜(Berry et al., 2005):

赤道式望远镜 (Equatorial Mounts): 赤道式望远镜支架是一种模拟地球自转轴设计的装置，其特点是有一个轴线平行于地球自转轴，这个轴被称为赤经轴 (Right Ascension Axis)。另一个轴垂直于赤经轴，叫做赤纬轴 (Declination

Axis)。赤道式支架能够让望远镜沿着赤经和赤纬这两个坐标轴进行精确移动，这样就可以很容易地追踪天体随地球自转而产生的运动轨迹。

在赤道式望远镜上，观测者只需要调整赤经轴和赤纬轴的角度，就能指向任何一个天体，并且只需在赤经轴上以恒定的速度转动，就能补偿地球的自转，实现对恒星等遥远天体的连续跟踪，这对于长时间曝光摄影、深空观测以及精确的天体测量极为有利。多数望远镜都采用赤道式安装，因为其简单的驱动逻辑能够方便地实现天体的自动跟踪。

地平式望远镜 (Alt-Azimuth Mounts 或 Horizontal Mounts)：地平式望远镜支架则是按照日常生活中我们熟悉的水平（方位角）和垂直（仰角）方向来控制望远镜的指向。在这种配置下，望远镜可以通过左右（水平方向）和上下（垂直方向）的移动来定位天体。尽管一般望远镜多采用赤道式进行观测，然而，地平式望远镜以诸多优点在大型望远镜上更受欢迎。如：

①.适应性强：对于某些特定观测任务，如局部太阳观测、近地物体追踪，以及大规模巡天项目，地平式望远镜能够快速、灵活地指向大面积的天空区域，其快速指向和大角度扫描的能力尤为突出。

②.结构简化：相较于赤道式望远镜，地平式望远镜的结构可以更为简化，尤其是对于非常大型的望远镜，其重量平衡和力学稳定性要求可能更适合地平式设计。

③.成本与复杂性：尽管实现自动跟踪和长时间曝光需要额外的复杂伺服系统和算法，但地平式望远镜的总体成本和设计复杂性在某些情况下可能更低，特别是对于侧重于短时观测和快速响应任务的望远镜。

而AIMS恰恰采用了地平式的方式进行设计，因此，除一般的望远镜指向跟踪外，其望远镜控制系统还包含了额外的消旋功能，具体实现的功能主要包括以下几个方面：

①.指向控制：指向控制是望远镜控制系统中至关重要的部分，其主要目的是确保望远镜能够在三维空间中精确地指向宇宙中的特定天体坐标。望远镜有两个基本自由度，分别是方位角（Azimuth）和高度角（Altitude或Elevation）。

方位角 (Azimuth)：这是望远镜绕着垂直于地球表面的轴线所做的水平旋转角度，通常是从北点顺时针方向测量到望远镜视线与当地子午线之间的夹角。

高度角 (Altitude或Elevation)：这是望远镜视线与当地水平面之间的夹角，或者说，是望远镜指向天顶方向的仰角。

在指向控制过程中，望远镜控制系统首先要根据观测目标的赤经和赤纬坐标计算出所需的方位角和高度角值。然后，通过高精度伺服控制系统，驱动望远镜的机械结构精确地旋转到这些指定的角度。

伺服控制系统的核心是利用高精度的传感器（如编码器、陀螺仪、磁力计等）实时监测望远镜的当前位置，并将实际位置与目标位置进行比较。通过反馈控制算法，系统能够实时计算出电机需要施加的驱动力和方向，以最小化两

者之间的偏差。这种闭环控制系统能够确保望远镜在各种负载和环境条件下都能够快速且准确地定位到目标天体，并在随后的观测过程中保持稳定的跟踪，即使面对地球自转、风载荷、温度变化等因素造成的扰动，也能通过自动调整电机驱动参数，保持望远镜指向的绝对精度和跟踪稳定性。对于长期曝光观测和高精度天体测量，这种指向控制能力尤为重要。

②.闭环跟踪控制：在望远镜成功对准目标天体后，控制系统需要实时调整望远镜的姿态，以精确地补偿地球自转带来的影响，确保望远镜在观测期间能够持续对目标保持对准。为此，望远镜配备了高精度的速率陀螺仪、编码器和其他传感器，如光电或磁敏倾角传感器等，它们能够实时测量望远镜在赤经轴（Right Ascension）和赤纬轴（Declination）方向上的运动状态和位置变化。

速率陀螺仪能够感知望远镜的角速度变化，编码器则用来精确测量望远镜的角位置。这些传感器的信号被传送到高性能的控制器，控制器根据预设的跟踪算法，结合地球自转速率、望远镜当前位置和目标天体的赤经赤纬信息，计算出所需的电机驱动信号，驱动望远镜的驱动马达以适当的速度转动，从而使望远镜始终保持对目标的锁定。

简而言之，在闭环跟踪控制中，控制系统不断地根据传感器反馈的实时信息进行计算，并据此调整望远镜的动作，形成一个实时反馈、纠正偏差的闭环控制回路，确保望远镜在长时间观测中能够精确跟踪目标天体，不受地球自转及其他环境因素的干扰。

③.导行控制：导行系统（Guider System）主要用于确保望远镜在长时间观测过程中，能够精确地跟踪天体，抵消地球自转对望远镜指向的影响，从而获得清晰、稳定的天体图像。

导行系统的工作原理和组成部分包括：

1) 导行传感器：通常采用一个小型的望远镜或导行镜，附带一个高灵敏度的感光元件（如CCD相机或CMOS相机），用于实时捕获一颗或几颗临近主观测目标的“导行”。导行目标为全日面像。

2) 导行图像处理：导行传感器捕获到的全日面图像会被实时分析，通过图像处理算法找出其质心的位置，并计算出其与上一帧质心的偏移量。

3) 反馈控制：导行系统通过连接到望远镜的控制系统，将导行的实时位置信息反馈给伺服电机驱动系统。当检测到导行偏离理想位置时，伺服电机将根据反馈信息调整望远镜的赤经轴或赤纬轴，确保望远镜始终精确跟踪目标天区。

④.消旋控制：地平式望远镜（Alt-Azimuth Mounts）在跟踪天体时，由于其以地平坐标系为基础（即方位角和仰角），而不是赤道坐标系（赤经和赤纬），所以在地球自转过程中，望远镜的视场会发生旋转，这一现象称为视场旋转（Field Rotation）。视场旋转会对长曝光观测（如深空摄影）造成严重的负面影响，因为在曝光过程中，天体相对于感光元件的位置会随时间而发生改变，导致拍摄到的图像星点拖曳，严重影响图像质量。

为了解决地平式望远镜在长时间曝光时视场旋转的问题，通常会引入消旋（Field De-rotation）的概念和技术。消旋系统的设计目的是消除或补偿由于地球自转造成的视场旋转，确保天体在感光元件上的投影位置保持相对静止。

几种常见的地平式望远镜消旋方式包括：

1) 物理消旋：通过在光学系统中加入特定设计的光学元件，如K镜（K-mirror）或消旋棱镜，这些元件能够在不影响光路的前提下，实时调整光线传播方向，以补偿视场旋转。

2) 电子消旋：在数字图像处理阶段，通过记录和分析天体在图像上的位置变化，然后在后期处理时反向旋转图像，以抵消视场旋转的影响。这种方式需要高精度的跟踪信息和复杂的图像处理算法。

3) 主动控制消旋：通过高精度的伺服控制系统，实时监测视场旋转并调整望远镜的姿态，使其能够实时补偿视场旋转。这种系统通常结合高精度的速率陀螺仪、编码器等传感器以及复杂的控制算法，实现对视场旋转的主动抑制。

总之，地平式望远镜引入消旋概念是为了克服地球自转导致的视场旋转问题，确保在进行长曝光观测时，能够获得与赤道式望远镜相当的高质量图像。消旋技术在很大程度上拓展了地平式望远镜在天文观测领域的应用范围，使其不仅适用于快速定位和短时观测，也能进行具有一定精度的长时间曝光观测。

对于AIMS而言，受限于特殊因素，其采用独特的五镜消旋的物理方式消旋法实现消旋。

3.2.2.2 焦面仪器控制系统

焦面仪器控制系统（Instrument Control System, ICS）是天文望远镜系统中负责控制和管理焦面上仪器设备的一个子系统。焦面是望远镜光学系统中光线汇聚形成的焦点所在的位置，此处安置有各种探测器和仪器，如光谱仪、偏振分析器、偏振点源探测器等。

焦面仪器控制系统的主要功能包括：

①. 仪器操作与控制：控制焦面上各类仪器设备的开关机、参数设定（如曝光时间、增益、滤光片选择等），确保仪器按照观测计划正确、高效地工作。

②. 数据采集：管理数据采集过程，确保数据的实时传输和储存，保证观测数据的质量和完整性。

③. 同步与协同：在多台仪器协同工作时，确保它们之间的精确同步，如偏振分析器与傅里叶光谱仪需要同时工作时，ICS需确保所有设备在时间和空间上的一致性。

④. 状态监控与故障诊断：实时监控焦面仪器的工作状态，包括温度、电压、电流等物理参数，以及仪器运行状态，一旦出现异常情况，能够迅速进行故障诊断和处理。

⑤. 校准与标定：执行并管理仪器的校准和标定过程，例如暗场校正、平场校正、波长定标等，以确保仪器数据的科学准确性。

⑥.与望远镜总控制系统的集成：ICS与望远镜的总控制系统紧密集成，根据总控制系统的指令调整焦面仪器的工作状态，并将仪器状态和数据信息反馈给总控系统，实现整个观测系统的闭环控制。

总之，焦面仪器控制系统是望远镜自动化系统中不可或缺的一部分，它确保了焦面上各种仪器设备能够精确、稳定、高效地工作，为天文学家提供高质量的观测数据。

3.2.2.3 观测控制系统

观测控制系统的数据采集与初步处理是整个天文观测流程中至关重要的环节，它涉及到从望远镜的焦面仪器获取原始数据，到初步整理和初步分析这些数据的全过程。

①.数据采集：

数据采集发生在望远镜的焦面仪器，如CCD相机、红外相机、光谱仪等设备。当望远镜精确对准目标并进行跟踪时，这些仪器会记录通过望远镜光学系统传递过来的天体辐射信息。

数据采集的过程中，观测控制系统会控制仪器的各项参数，如曝光时间、增益、滤波器选择等，以确保采集到的数据质量符合观测目标的需求。数据以电子形式实时传输到数据处理单元，通常是以二进制或专有格式存储，以保证高速、高效的数据传输。

②.初步数据处理：

数据预处理：接收原始数据后，观测控制系统首先进行初步的数据预处理。

数据格式转换：将原始数据转换为通用的数据格式，以便后续的分析软件可以读取和处理。这一步可能包括数据压缩、解码和打包等操作。

初步分析：系统可能还会进行初步的图像分析或光谱分析，如检测目标是否在视场内、估计信号强度、检查数据质量等，这些初步结果可以作为系统自动调整观测参数的依据，或作为实时监控系统的反馈。

数据存储与标记：初步处理过的数据会被安全地存储下来，并与相应的元数据（如观测时间、地点、设备状态、目标信息等）一起被妥善地组织和标记，方便后续的科学研究和数据分析。

通过观测控制系统的信息采集与初步处理功能，原始观测数据得以转化为可用于后续科学研究的高质量数据集，为天文学家们深入分析和理解观测对象提供了坚实的基础。

3.2.3 自主化支撑系统

自主化支撑子系统在总控系统实现自主化的过程中起到了关键的作用，它们为设备控制子系统提供必要的辅助和支持，使得整个观测系统能够逐步摆脱人工干预，实现更高层次的自动化操作和智能化决策。随着这些自主化支撑子

系统的不断完善和深度融合，总控系统能够更加自主地进行观测任务的规划、执行和调整，从最初的L1级自动化逐步迈向L5级智能化，即在几乎不需要人工干预的情况下，望远镜能够适应复杂多变的观测环境，实现全天候、全自主的高效观测和数据分析。

3.2.3.1 通信控制系统

通信控制系统在自主化支撑子系统中扮演着核心角色，它负责整个系统中各个组件间的信息交流和指令传递，是实现总控系统自主化不可或缺的一部分：

功能概述：

①.数据传输：通信控制系统首要任务是确保各类设备之间、设备与中央控制单元之间的数据实时、准确地传输。这包括传感器采集的数据、控制指令、状态报告、故障警报等信息。

②.协议支持：设计并实施通信协议，确保不同的设备和系统能按照统一的标准相互通讯，例如TCP/IP通信协议。

③.网络架构：构建稳定可靠的网络基础设施，以满足不同类型设备间的连接需求。

④.路由与优先级管理：根据数据的重要性、时效性等因素设置数据包的路由规则和优先级，确保关键信息能够得到优先传输。

⑤.实时控制：

实现对设备的实时控制，如精密机械设备的位置同步、速度调节、姿态控制等，要求通信控制系统具有极低的延迟性和高可靠性。

⑥.故障检测与冗余设计：

包含对通信链路的健康状况监测和故障诊断功能，当某条链路出现问题时，能够自动切换到备份路径，以维持系统的正常运行。

⑦.安全防护：

在通信过程中采用加密技术和身份认证机制，保护敏感数据不被窃取或篡改，同时防止未经授权的访问和恶意攻击。

⑧.服务质量保证：

对于高性能的自主化系统而言，通信控制系统需要能够保障不同业务的服务质量（QoS），例如对于时间敏感型的控制信号提供确定性的传输时延。

⑨.远程监控与维护：

支持远程访问和控制功能，使运维人员能够在远离现场的地方获取系统状态、更新软件配置，甚至进行故障排查和维修指导。

综上所述，通信控制系统在自主化支撑子系统中不仅实现了数据和指令的高效、安全传输，还提供了灵活的网络管理和故障应对能力，从而增强了总控系统的自主性与智能化水平。

3.2.3.2 能源监控系统

能源监控系统（Power Monitoring System, PMS）是总控系统中一个至关重要的子系统，它负责实时监测和管理整个望远镜设施的能源消耗情况，确保能源的高效利用，同时支持望远镜及相关设备的正常运行。能源监控系统包括如下功能：

①.数据采集：能源监控系统通过布置在各处的智能电表、流量计、温度传感器等设备，实时采集电力、液氮、柴油等能源的使用数据，包括电流、电压、功率、电量等参数。

②.状态监测：监测和记录各类能源设备的工作状态，如供电设备、冷却系统、加热系统、照明系统等，确保这些设备在安全、合理的状态下运行。

③.实时监控与报警：实时显示能源消耗的动态数据，并展示能源使用情况。当能源消耗超过预设阈值或发生异常情况时，系统能够立即发出警报，提醒管理人员及时采取措施。

④.能耗分析与优化：根据收集的数据，能源监控系统可以进行能耗数据分析，识别能源消耗的趋势、峰值时段以及潜在的节能机会。系统能够协助制定和优化能源使用策略，如智能调度设备运行时间、调整负荷分布、启用备用能源等。

⑤.远程控制与管理：提供远程访问和控制功能，允许操作员远程监控能源使用情况，根据实际情况远程调整设备参数，实现能源使用的智能化管理。

⑥.日志记录：自动生成能源消耗日志和统计数据，包括每日、每周、每月乃至每年的能耗统计、对比分析报告，便于模型演进系统的评估使用。

⑦.设备健康管理：通过对能源使用数据的深入分析，能源监控系统还可以间接反映出设备的工作状态和健康状况，为设备维护保养提供依据，预防因设备故障而导致的能源浪费或系统运行中断。

总之，能源监控系统是实现望远镜总控系统高效运行、节能降耗的重要手段之一，通过实时、准确的数据监测和智能分析，为整个望远镜设施的自主化、智能化运营提供了有力支持。

3.2.3.3 环境感知系统

总控系统的环境感知系统是一个负责实时监测和分析望远镜观测环境条件的子系统，它是实现望远镜自主化和智能化观测的重要组成部分。环境感知系统通过集成多种传感器和数据处理技术，为望远镜提供有关外部环境的准确信息，从而支持望远镜做出最优观测决策和动态调整。

主要组成部分与功能：

①.气象参数监测：温度、湿度、风速、风向、大气压力、降雨量等气象参数的实时监测，这些参数会影响望远镜的观测效果，如透过率、图像稳定性和光学元件的热效应。

②.大气条件监测：大气透明度（视宁度）和大气湍流的监测，这对天文观测至关重要，尤其是在红外和可见光波段，良好的大气条件有利于提高观测数据的质量。

③.光学参数监测：观测设备（如主镜、次镜等）温度和形变的监测，以及光学系统像质的实时评估，确保观测数据不受设备热效应和环境温度变化的影响。

④.地理与天文参数监测：星光闪烁指数、地磁场、地球自转速度等相关参数的监测，这些参数关系到望远镜的指向和跟踪精度。

⑤.传感器融合与数据处理：通过融合多个传感器的数据，系统采用先进的算法进行数据清洗、整合和分析，为望远镜控制系统提供实时且准确的环境信息。

⑥.智能决策支持：根据环境感知系统的数据，总控系统能够智能地调整望远镜的操作模式，例如选择最佳观测时间、改变观测策略、启动补偿措施（如自适应光学系统）等。

应用场景：

望远镜保护：在不利天气条件下，环境感知系统可以提示关闭望远镜盖或调整观测模式以避免设备损坏。

观测优化：在观测期间，系统根据实时环境参数动态调整望远镜的控制参数，如跟踪速度、曝光时间等，以获得最佳观测效果。

资源分配：在多任务环境下，系统可以依据环境条件建议优先观测哪些目标或何时进行观测，优化资源分配。

环境感知系统对于现代望远镜总控制系统的自主化和智能化有着不可忽视的作用，它为望远镜在各种复杂环境条件下实现精准观测提供了坚实的基础。

3.2.3.4 观测交互系统

观测交互系统在总控系统中扮演着连接观测者与望远镜设备的关键角色，它是一个集成任务制定、观测交互、数据可视化以及观测指令控制等功能于一体的子系统。

①.任务制定：观测交互系统提供观测者、研究人员或操作员制定观测任务的能力，人们可以根据自身不同需求制定或修改定制化的观测任务（修改选项为预设的可选功能）。

②.观测交互：观测者、研究人员或操作员可通过观测交互系统实时查看当前观测任务进度，并查看感兴趣的任务详情。

③.数据可视化：系统实时接收并处理望远镜设备传回的数据，将原始数据转化为直观的图表、图像或视频等形式，便于观测者实时查看和初步分析观测结果，及时调整观测策略。

④.观测指令控制：观测交互系统接收用户的指令并将其转化为设备可执行

的操作，该功能开放给较了解设备的用户，方便指令组合出预设功能不便提供的功能。

⑤.远程操控与协作：观测交互系统还支持远程操控功能，允许用户在网络环境下远程访问和控制望远镜，进行观测任务的执行和数据下载。同时，系统还可能支持多用户协作，允许多个观测者共同参与同一观测任务的规划和执行。

总之，观测交互系统是总控系统中面向用户和服务于观测流程的核心部分，它通过人性化的设计和强大的功能集合，极大地提升了望远镜系统的使用便利性和观测效率，同时也是实现望远镜自主化、智能化观测的重要支撑。

3.2.3.5 模型演进系统

模型演进系统在总控系统中扮演着持续优化和改进系统性能的关键角色，它是一种集成机器学习、数据分析和预测算法的高级功能模块，通过不断收集和分析系统运行数据，优化和更新模型参数，从而实现对望远镜观测效能的持续改进和智能化提升。

①.数据收集与处理：模型演进系统首先从望远镜运行过程中收集大量的实时数据，如观测参数、环境变量、设备状态、观测结果等。这些数据经过预处理和标准化，为模型的学习和优化提供原始素材。

②.机器学习与数据分析：系统采用先进的机器学习算法，如深度学习、强化学习等，对收集到的数据进行分析挖掘，揭示观测结果与各种影响因素之间的内在规律和联系。通过训练模型，系统能够理解和预测不同观测条件下的望远镜表现，以及如何调整参数以优化观测效果。

③.模型迭代与优化：在每次观测任务完成后，模型演进系统都会根据实际观测结果和预期目标的差距，对现有模型进行迭代优化。通过反复训练和验证，模型能不断逼近最优的观测策略和控制算法，实现系统性能的逐步提升。

④.自适应控制与决策支持：基于不断演进和优化的模型，总控系统能够实现更加精准和智能的自适应控制，如在复杂环境下自动调整观测参数，预测并规避潜在问题，以及在紧急情况下采取最优应对策略。

⑤.长期性能评估与演化：模型演进系统不仅关注单次观测任务的效果，还致力于从长远角度提升望远镜的整体性能。它通过积累长期运行数据，持续评估和优化观测策略，确保望远镜在各种观测条件下都能保持高效稳定的工作状态，并随着科学技术的进步和观测需求的变化，逐步实现系统功能和性能的进化。

总之，模型演进系统是望远镜总控系统实现自主化、智能化观测的核心组件之一，通过持续学习和优化模型，它不断推动望远镜观测技术的创新和发展，确保望远镜在日益激烈的天文竞争中始终保持领先优势。

3.2.4 中枢决策系统

中枢决策系统是总控系统的核心部分，它负责整个系统的综合决策和调度指挥，确保望远镜能够在各种观测条件下高效、准确地执行观测任务。中枢决策系统收集各个设备控制子系统和自主化支撑子系统的信息，通过复杂的算法和逻辑判断，实现对望远镜运行状态的全面把控和智能化管理。

①.信息整合与处理：中枢决策系统接收来自各子系统的实时数据，包括设备控制系统的状态参数、通信控制系统的系统通信情况、环境感知系统的气象和地理信息、能源监控系统的能源使用情况、观测交互系统的观测任务和数据反馈等。系统将这些信息整合在一起，通过算法进行综合分析和处理。

②.智能决策与优化：根据当前环境条件、观测目标特性、设备状态和用户需求，中枢决策系统运用模型演进子系统提供的人工智能和优化算法，制定最合适的观测策略和设备控制方案。例如，确定望远镜的指向、跟踪策略，控制焦面仪器的工作参数，以及在不利环境条件下切换观测模式或暂时中止观测任务。

③.任务调度与优先级管理：中枢决策系统负责观测任务的排序和调度，根据任务的紧迫性、重要性以及当前可用资源，合理安排观测序列。它能够动态调整任务执行顺序，确保在有限的观测时间内，最大化观测成果的科学价值。

④.风险评估与应急处理：中枢决策系统能够实时评估系统运行的风险，如设备故障、环境突变等，当存在潜在威胁时，系统能够迅速做出应急决策，启动备份系统或采取保护措施，确保望远镜的安全运行。

综上所述，中枢决策系统如同总控系统的“大脑”，通过对海量信息的整合分析和智能决策，实现了望远镜系统的高效运作和智能化管理，为天文观测提供了强大而灵活的支持。

3.2.5 各个子系统间的关系

在AIMS望远镜总控系统中，各子系统扮演着独特且互补的角色，部分能够独立运作以执行特定任务，而其他系统则需依托整个系统框架协同工作，以实现其预定功能，如图 3-5。

就设备控制层面而言，每个子系统设计为可独立运行，以便灵活调试并确保运行稳定性，这极大增强了系统的模块化与可靠性。

至于自主化支撑层，尽管各子系统同样具备独立运行的能力，它们的功能实现往往直接或间接地依赖于其他子系统的协作。具体而言：

CCS作为纽带，负责协调各个子系统间指令与状态信息的传递与中继，确保了系统间通讯的连贯性。

MES通过汇集其余子系统的运行参数，进行高级分析处理，以输出优化建议至相关系统，促进了系统性能的整体提升，其运作与所有子系统间接相关。

PMS专注于实时监测实体系统的能耗状况，与TCS、OCS、ICS、EPS紧密联动，评估能源使用后，将反馈信息传送给CDS，助力能效管理。

OIS和EPS则分别依据观测计划安排或当前环境状况，向CDS提供关键输入，影响最终决策。

最终在决策层CDS决策时，充分依托自主化支撑层提供的综合感知信息与外部条件，随后指导设备控制层子系统执行相应的操作指令，确保AIMS系统高效、智能地运转。

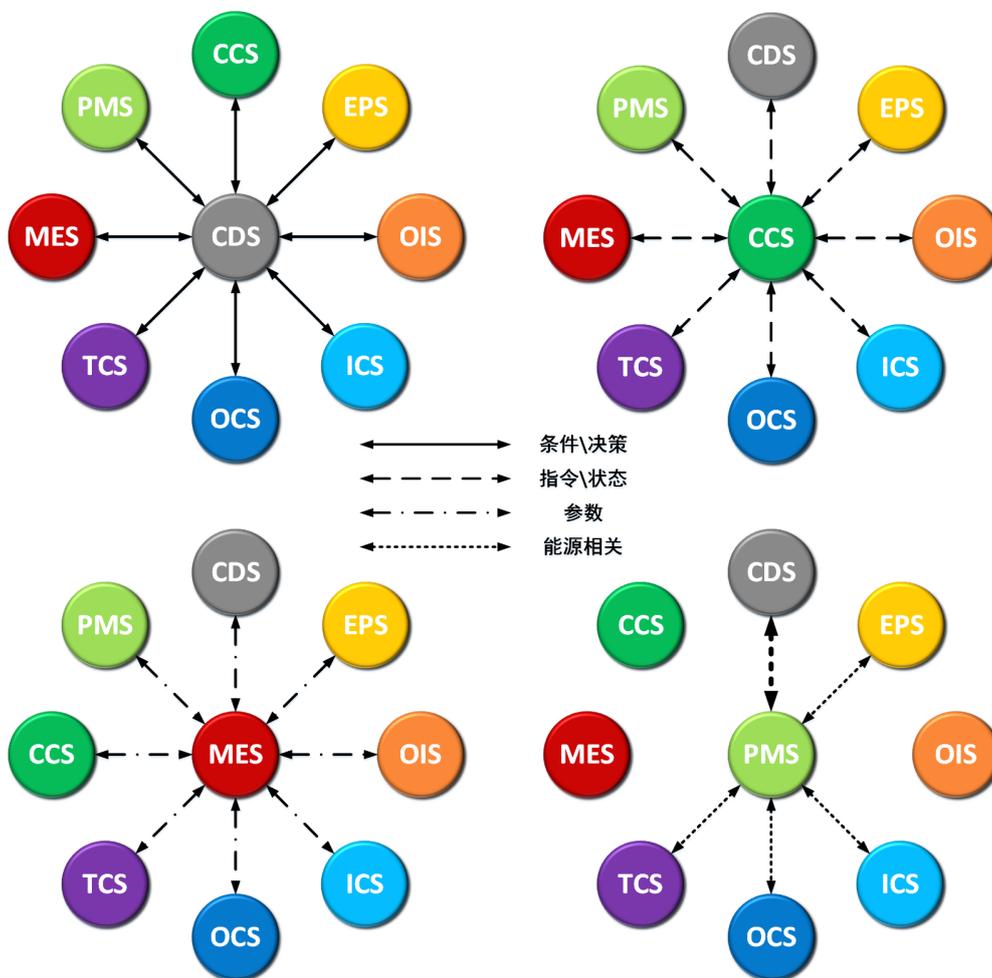


图 3-5 各个子系统之间的关系

Figure 3-5 The relationship between various subsystems

3.3 系统灵活性的软件架构设计

在总控系统中，灵活性的软件架构设计具有至关重要的意义：

适应性增强：灵活的软件架构设计意味着系统能够容易地适应不断变化的技术需求和观测任务。例如，随着观测技术的快速发展和新观测设备的引入，总控系统需要有足够的灵活性来集成新的硬件设备和软件模块，确保整个系统能与时俱进，满足未来可能出现的多样化观测需求。

模块化与可扩展性：灵活的软件架构强调模块化设计，各个子系统可以独立开发、测试和升级，而不会影响整个系统的稳定性。这样的设计使得新增功

能、更换设备或优化算法变得简单易行，有利于系统的可持续发展和长期运行。

兼容性和互操作性：灵活的软件架构有助于实现不同设备、系统之间的兼容和互操作，确保观测数据的无缝传输和处理。例如，通过标准化接口和协议，总控系统可以方便地对接不同制造商的望远镜控制设备、数据采集系统和数据分析软件。

容错与恢复：设计灵活的软件架构能够更好地支持故障隔离和系统恢复。当某一模块出现问题时，不影响其他模块正常工作，系统可以快速识别故障、隔离故障模块，并在必要时启动备用方案或备用设备，保障整体观测任务的连续性和稳定性。

资源优化与动态调度：灵活的软件架构允许系统根据实时观测条件、设备状态以及观测任务的优先级进行动态资源配置和任务调度，从而提高整个系统的运行效率，减少无效观测时间，确保宝贵的观测资源得到充分利用。

降低维护成本与生命周期管理：采用灵活的软件架构设计，可以降低系统的维护成本和升级难度。由于各个模块相对独立，升级和维护可以有针对性地进行，同时有利于系统生命周期的管理，延长系统的使用寿命。

因此，灵活的软件架构设计在总控系统中扮演着关键角色，它不仅是确保系统高效、稳定运行的基础，也是实现系统智能化、自主化发展的前提，更是应对未来不确定性和挑战的有效手段。

3.3.1 软件架构分类

软件架构的分类众多，根据不同维度和视角，可以有多种分类方式。常见的软件架构类型有(Martin, 2017)：

单体架构 (Monolithic Architecture)：单体架构是最基础的软件架构形式，所有的功能模块都集中在一个单独的应用程序中，共享相同的内存空间。所有模块共同编译、部署，形成一个庞大的应用程序。这种架构在小型项目或初期项目中较常见，但随着系统规模扩大，维护和扩展性相对较差。

分层架构 (Layered Architecture)：分层架构将系统按功能划分为一系列层次或层级，每一层负责特定的功能，如表示层、业务逻辑层、数据访问层等。各层之间通过接口进行交互，降低了模块间的耦合度，有利于分工合作和维护。

微服务架构 (Microservices Architecture)：微服务架构将系统拆分成一组小的、相互独立的服务，每个服务都拥有自己的业务逻辑和数据库，能够独立部署和扩展。服务间通过API接口（通常是RESTful API）进行通信，具有高可扩展性、可维护性和松耦合的特点。

事件驱动架构 (Event-Driven Architecture, EDA)：在事件驱动架构中，系统通过发布和订阅事件的方式来通信和协作。事件生产者发出事件，事件消费者处理事件，系统对事件的响应是非同步的。这种架构适用于处理大量并发请求和分布式系统。

服务导向架构 (Service-Oriented Architecture, SOA)：SOA架构强调系统间的松耦合，通过定义一套通用的服务标准，让不同的系统之间可以通过服务的方式相互通信和调用。每个服务都封装了一组功能，服务之间通过消息传递进行交互。

容器化与微内核架构 (Containerized and Microkernel Architecture)：微内核架构把操作系统或软件的核心功能模块化，外围服务以插件的形式运行在核心之上。在现代云计算和容器技术背景下，容器化微服务架构受到广泛关注，其中每个微服务都被部署在一个独立的容器中，进一步增强了服务的独立性和扩展性。

云原生架构 (Cloud-Native Architecture)：云原生架构是一种专门为云环境设计的应用程序架构模式，充分利用云计算的弹性、可扩展性和分布式优势，通常包含容器化、微服务、DevOps文化、持续交付和敏捷基础设施等特征。

客户端-服务器架构 (Client-Server Architecture)：在这种架构中，系统分为客户端和服务端两部分，客户端负责用户交互和界面显示，服务器负责处理业务逻辑和数据存储，两者通过网络进行通信。

无服务器架构 (Serverless Architecture)：无服务器架构将开发者从服务器管理工作中解放出来，开发者只需关心编写业务逻辑函数，而无需关心服务器的部署、维护、扩展等问题。云服务商负责底层资源的管理和调度。

以上每种架构都有其适用的场景和优势，然而，对于AIMS总控系统的软件架构又存在诸多不便或不足：AIMS总控系统复杂的多子系统框架无法选择单体架构，维护成本过高；云原生、事件驱动和无服务器架构无法适用实时驱动硬件的特性；分层和服务导向架构尽管科学严谨，然而无法兼容灵活的硬件特性；而容器化与微内核架构具备各种优点，然而从系统内核出发的特性，注定其高昂的开发成本，当前的人力物力无法胜任；相对而言，微服务更适用AIMS松耦合，高内聚，高兼容的特性。因此，我们选择基于微服务对总控系统软件进行开发。

3.3.2 微服务的优缺点以及AIMS的应用

考虑到AIMS总控系统需求分析的可维护性、可扩展性，结合其设计周期因素的持续集成、持续调试的高伸缩性要求以及组件因素的多模块、多层次、跨语言、跨系统的独立性要求。我们采用微服务的软件架构解决上述要求。

系统的待集成部件具有：职责单一；独立设计；和其他部件围绕具体业务构建等特性。而微服务就是把每个部件或模块分为单一的服务。

上图 3-6微服务包含的诸多优点(Newman, 2015)。从时间上，微服务具有以下3个优点：

- (1) 灵活的交付周期；
- (2) 团队的快速沟通；
- (3) 服务模块的持续演进优化；



图 3-6 微服务架构的优点

Figure 3-6 The advantages of microservice architecture

从技术上，其具备：

- (1) 每个服务进程隔离；
- (2) 可具有不同的技术栈；
- (3) 可根据需求进行定制；

而微服务这些优点恰恰对应了AIMS总控系统软件架构上需要解决的难题。可以很好的解决当下问题，与此同时，由于微服务架构是分布式的，必然带来了分布式系统的一些问题，需要我们加以解决，如：

- (1) 服务之间的分布式通信问题；
- (2) 服务的注册与发现问题；
- (3) 服务之间的分布式事务问题；
- (4) 数据隔离带来的报表处理问题；
- (5) 服务之间的分布式一致性问题；
- (6) 服务管理的复杂性，服务的编排；

但总的来说，新架构的采用利大于弊，且这些缺点我们可以根据模型加以改进，从而使架构尽可能的减少该方面的干扰。实现系统的稳定可靠运行。

针对AIMS总控系统的微服务设计，考虑自底向上的设计思想，根据各个组件的共有属性，逐步的将具体设备抽象为不同单元，再根据单元属性抽象为各个组，从而构成系统。

结果如图 3-7：

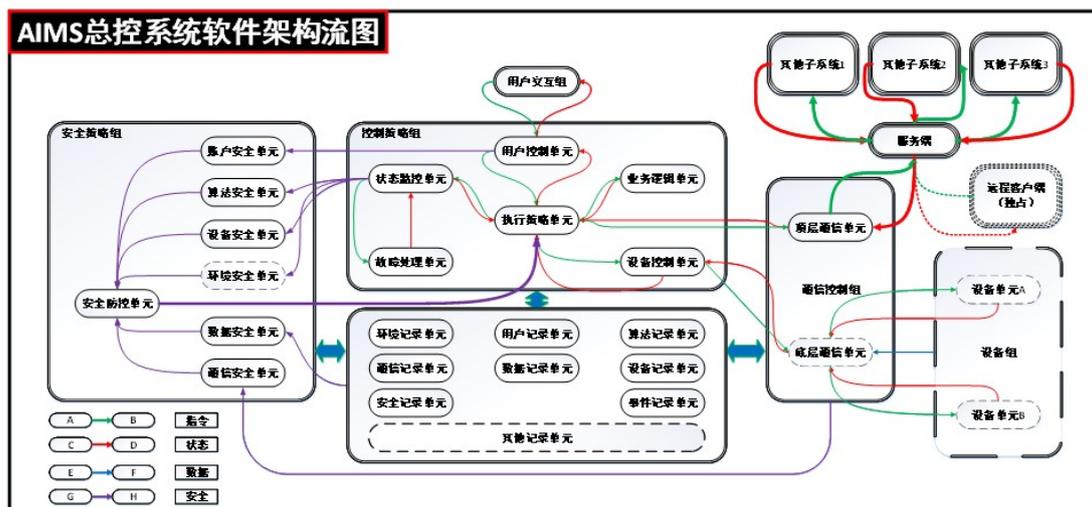


图 3-7 AIMS的软件架构流程图

Figure 3-7 Software Architecture Flow Diagram of AIMS

3.4 AIMS自主化控制策略

AIMS总控实现自主化的关键，不仅在于系统框架设计和软件架构的选择，还包括多角度的自主化控制策略，如基于能源情况的控制策略、基于环境条件的控制策略、基于观测任务的控制策略以及基于设备故障情况的控制策略。其中，任何子系统在无能源供应后均无法正常运行，因此能源的控制策略优先级最高；而外部环境条件直接影响着数据的质量，因此环境控制策略次之；之后，则是基于观测任务的控制策略；当出现故障时（少数特殊情况），则以基于设备故障情况的控制策略进行补充。

3.4.1 基于能源的控制策略

能源自主化控制策略在总控系统中是一个关键的组成部分，主要涉及能源供应、能源管理和优化等方面，旨在确保系统在各种工况下能够有效、高效且自主地管理和调配能源，以维持望远镜及其配套设施的稳定运行。能源自主化控制策略可概括如下：

①.能源监测与管理：

能源监控系统实时监测整个望远镜平台的电力消耗、储能设备的状态以及未来可能的太阳能、风能等可再生能源的产生情况。

通过数据采集与分析，系统可以精确掌握各个设备的能源需求、能源利用率和剩余能源储备，为能源分配提供决策依据。

②.能源供需平衡与调度：

根据观测任务的优先级、设备的运行状态和实时能源供应情况，能源自主化控制系统自动调度能源分配，确保关键设备和任务的能源供应。

在能源短缺时，系统可以智能调度，限制非关键设备的能源使用，或者激活备用能源系统，如切换到储能设备或柴油发电机供电。

③.能源优化与节能策略:

利用预测算法预测未来的能源需求和供应趋势，提前做好能源储备和分配策略。

根据环境因素和设备特性，系统可以动态调整设备的运行模式和参数，比如在低效观测时段降低制冷设备的功率，以节约能源。

通过智能充电策略管理储能设备，如在光照充足或市电稳定的时段进行储能充电。

④.故障诊断与自愈能力:

在能源供应系统出现故障时，系统能自动诊断故障原因并采取适当的恢复措施，如自动切换到备用能源或启动紧急预案，保障系统的不间断运行。

⑤.远程监控与自动化控制:

远程能源管理系统可实现无人值守的远程能源监控和自动化控制，使操作人员能在任何地方查看能源使用情况，远程调整能源管理策略。

通过上述能源自主化控制策略，望远镜总控系统能够实现能源的高效利用和可持续管理，不仅保证了天文观测任务的顺利进行，而且有助于降低运营成本和环境影响。

3.4.2 基于环境的控制策略

基于环境的自主化控制策略主要是指系统根据所处环境条件的变化，自主地调整运行状态和控制参数，以确保系统在各种环境条件下能够高效、安全、准确地执行任务。在天文观测的总控系统中，基于环境的自主化控制策略主要体现在以下几个方面：

①.环境感知与监测:

总控系统集成有多种环境传感器，如气象站、温湿度传感器、风速风向传感器、大气透明度（视宁度）监测设备等，实时监测天文台周边的环境参数，如温度、湿度、风力、空气质量、大气湍流强度等。

②.环境适应性控制:

根据实时环境数据，系统自动调整望远镜及配套设备的工作状态，如在极端低温或高温条件下，启动温度控制系统保证望远镜镜面及关键部件处于最佳工作温度。

若环境中有过强的风力或雨雪，系统可以自动关闭或保护关键部件，避免设备受损，并在条件改善时自动恢复观测。

③.观测策略优化:

当大气条件不佳（如高湍流、低透明度）时，系统会自动调整观测策略，如降低曝光时间、更改观测目标、启用稳像功能。

在良好观测窗口到来时，系统会优先安排对敏感度受环境影响大的观测任务，以获取最佳数据。

④.故障预测与防范:

基于环境数据,系统可以预测可能出现的设备故障或性能下降,如预测由于温度骤变可能导致的设备失灵,提前采取预防措施或切换到备用设备。

⑤.能源管理与效率提升:

根据环境温度、光照等条件,智能调整能源系统的运行策略,如在阳光充足时优化太阳能板的布局和充电策略,在寒冷夜晚优化望远镜的保温措施,以减少能源消耗和提高观测效率。

综上所述,基于环境的自主化控制策略是总控系统智能化的关键体现,它通过实时感知环境变化并做出相应的自主决策,确保望远镜能够在各种复杂环境条件下保持高效运行,同时也降低了人工干预的频率和成本,提升了天文观测的自动化水平。

3.4.3 基于观测任务的控制策略

基于观测任务的自主化控制策略是总控系统针对天文观测任务进行智能规划、执行和调整的一种管理模式,旨在提高观测效率,确保观测数据质量,并减轻人工操作负担。以下是对该策略的详细介绍:

①.任务调度与优先级管理:

系统能够根据观测计划、科学目标、设备状态、环境条件等因素,智能地规划和动态调度观测任务。高优先级的任务(如突发性事件观测、关键科学项目的观测等)会在合适的时间窗口内优先执行。

根据任务属性和设备性能,系统自动分配资源,如在最佳观测时段调度对特定波段或特定目标的观测任务。

②.任务执行与监控:

在任务执行过程中,总控系统实时监控望远镜的指向、跟踪、设备状态和数据质量,确保任务的顺利进行。

当出现设备故障、环境变化或观测数据质量低于预期等情况时,系统能自动调整观测参数或执行备选观测方案。

③.自主观测策略调整:

根据实时观测数据反馈,系统可以自动优化观测策略,如调整曝光时间等提高图像质量。

对于长期观测项目,系统能够根据观测结果调整后续观测周期,以满足科研需求。

④.任务失败与恢复:

当某个观测任务因意外原因未能完成时,系统能够自动识别并触发故障恢复机制,重新安排任务执行或转入应急模式,尽可能减少观测损失。

基于观测任务的自主化控制策略是现代天文观测总控系统的重要组成部分,通过智能化手段,使得望远镜能够高效、准确地执行复杂的观测计划,实现从任务规划、执行到结果反馈的全流程自动化管理。

3.4.4 基于设备故障情况的控制策略

基于设备故障情况的控制策略是总控主动应对设备故障的管理方法，旨在预防设备故障的发生、及时发现并快速响应故障，以及在故障发生后采取恢复措施以最小化对系统整体运行的影响。在控系统中，这种策略的具体实施可能包括以下几个关键方面：

①.预防性维护与监控：

实施定期维护和状态监测，通过监测设备的关键性能指标、运行参数和健康状况，提前识别设备潜在故障迹象，及时进行维护和更换零件，防止设备故障的发生。

②.故障预测与诊断：

利用数据分析和机器学习技术，分析历史故障数据和实时监测数据，预测设备可能出现的故障，实现故障的早期预警。

开发故障诊断算法，当设备表现出异常行为时，系统能自动识别故障原因，提供故障定位和诊断信息。

③.冗余设计与切换：

对于关键设备或系统，采用冗余设计，即配备备份设备或备用系统，一旦主设备出现故障，可以自动或手动切换到备用设备，确保系统的连续运行。

④.故障隔离与恢复：

当发生故障时，总控系统能够迅速隔离故障设备，防止故障蔓延至整个系统，同时启动相应的故障恢复程序，如重启设备、恢复出厂设置、执行预定义的恢复步骤等。

⑤.应急响应与预案执行：

建立全面的故障应急预案，包括详细的故障处理流程和责任人制度，确保在故障发生时，能够迅速、有序地采取行动，减少停机时间和数据损失。

⑥.状态日志与远程支持：

维护详尽的状态日志和故障日志，记录设备运行时的状态变化和故障详情，便于远程技术支持人员分析故障原因和提供远程指导。

⑦.系统优化与升级：

根据设备故障统计分析结果，持续优化总控系统的控制策略，适时对软硬件进行升级，消除已知故障隐患，提高系统的整体可靠性。

总之，基于设备故障情况的控制策略注重预防为主、快速反应、合理隔离、有效恢复的原则，通过多方位的防护措施和技术手段，最大限度降低设备故障对总控系统运行的负面影响，确保天文观测任务的顺利进行。

3.4.5 多维度的观测控制策略

在最终的观测过程中，每一项观测任务的启动与否是基于多方面考量的综

合结果，涵盖了OIS制定的观测任务序列、PMS的能源预估、EPS提供的环境预报，以及整个系统健康状况的全面评估，如图 3-8。具体来说：

CDS首先将OIS提供的观测任务队列视为候选任务池，依据各个任务的优先级别、预计耗时、能耗需求，及其对特定环境与系统状态的依赖性进行详尽分析。这一评估过程紧密考虑了当前系统的整体健康状况（包括故障影响的程度），任务对环境敏感性，优先选取那些优先级高、预计执行时间短、能源消耗低的任务进行部署。

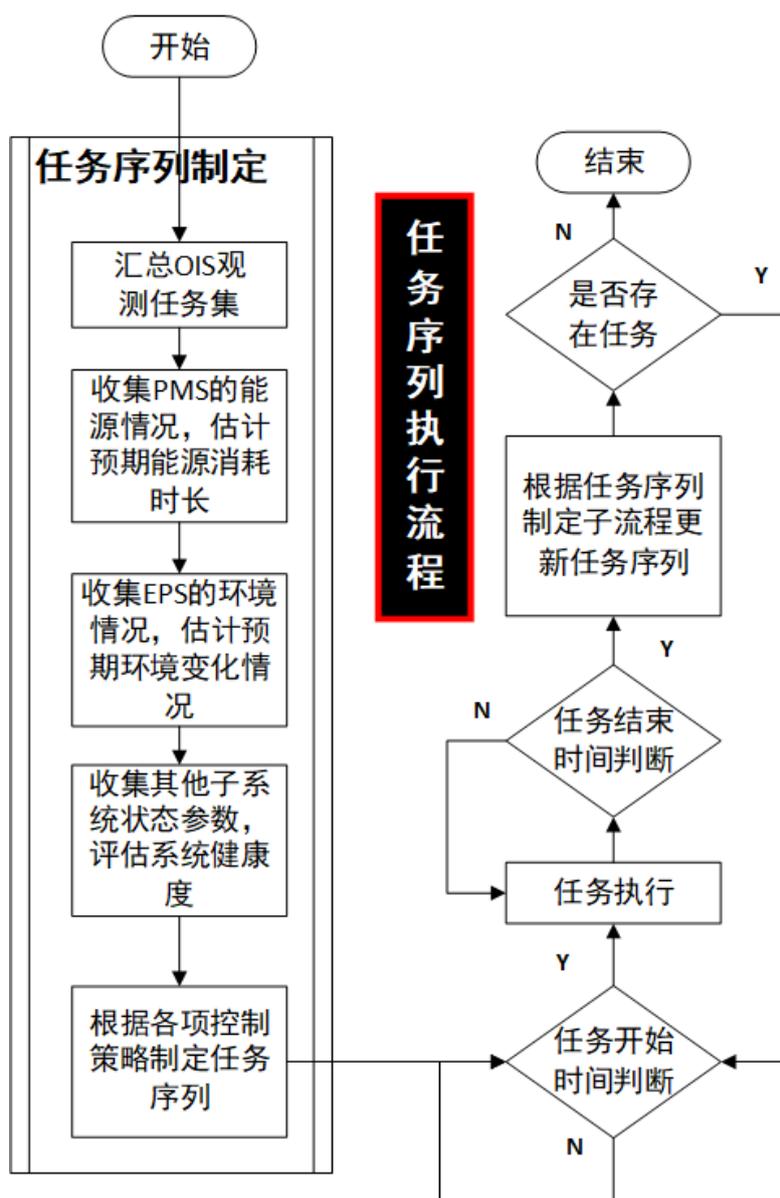


图 3-8 AIMS多维度观测控制设计

Figure 3-8 Multidimensional observation control in AIMS

针对任务序列中的每一步操作，执行流程遵循下图所示模型：每次任务启动前，系统会先加载或刷新该任务对应的指令集，随后进入指令执行环节。指令执行的成功与否通过执行过程中的即时反馈以及任务完成后（部分指令可能

涉及阶段性确认)的综合反馈来判定。在任务执行期间,系统保留了根据新情况调整或中止当前任务的灵活性;如无特殊变动,任务将按既定的指令序列持续进行直至圆满结束。这样的设计确保了观测任务的高效调度与资源的最优配置。

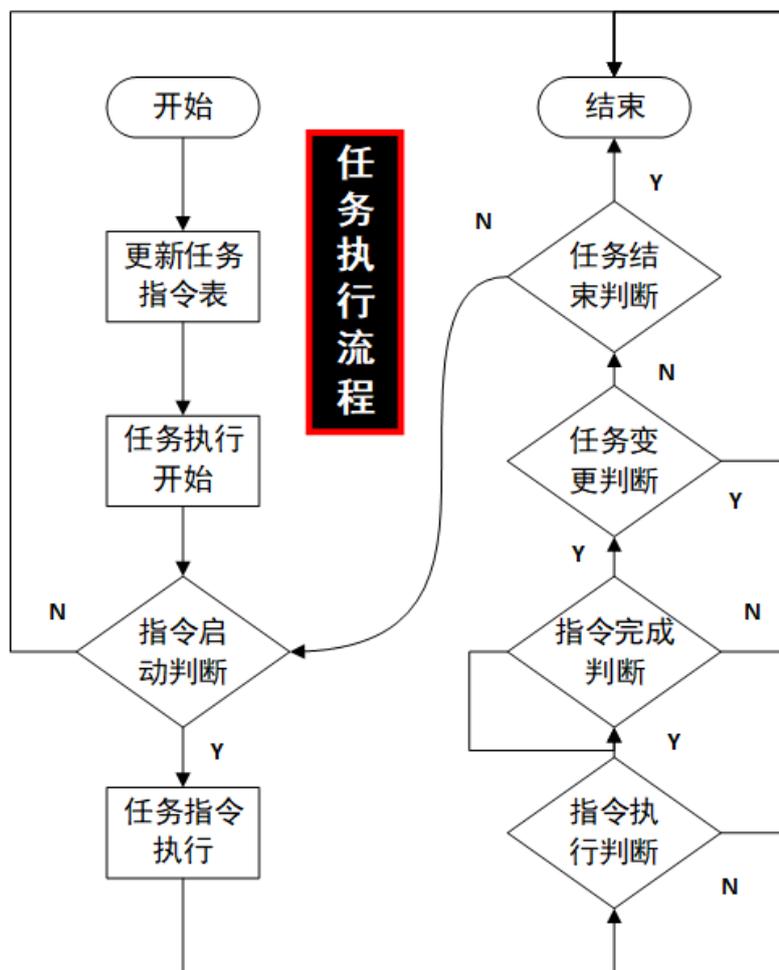


图 3-9 任务的执行流程

Figure 3-9 The execution process of tasks

3.5 AIMS总控系统安全策略

在AIMS总控系统中,我们采用了微服务架构以实现系统组件间的松耦合和高内聚设计原则,从而达到更优的系统性能和稳定性。作为联结各个子系统的枢纽,通信控制系统发挥着至关重要的作用。为了确保整个系统能够安全、稳定地运行,我们对通信控制系统的安全策略进行了专项研究与定制。另外,微服务架构的引入虽然带来了架构层面的优势,但也增加了系统故障诊断的复杂性。因此,我们特意设计并实施了详尽的状态日志和执行日志机制,用于全面记录各子系统的运行状态和执行过程。借此,我们能够凭借这些日志记录,精准地定位故障发生的源头,进行有效的故障回溯分析,从而极大地加快了工程

师在面临故障时的诊断与修复进程。

3.5.1 通信安全策略

通信控制系统在总控系统中扮演着如同神经网络般的纽带角色，高效串联起各个子系统。在此基础上，构建简洁且高效的通信协议显得尤为关键，这是确保整个通信控制系统流畅运转的基石。与此同时，系统内嵌的消息摘要机制不可或缺，它犹如一道坚固的屏障，确保了通信过程中信息传输的完整性和一致性，有效杜绝了数据失真的风险。

为进一步巩固通信安全，我们采纳了AES和RSA等业界公认的安全加密标准，以实现通信内容的高度保护。即便在遭遇外部恶意截取的情况下，这套消息安全机制也能为通信提供最基本的安全防线，防止设备遭恶意操控，进而有效避免望远镜因外来侵入而遭受破坏的风险。

最后，我们特别引入了基于角色的权限访问控制（RBAC）机制，以此确保只有具备相应权限的用户角色方可访问并执行相应的系统功能。这一举措显著降低了因外部用户误操作所带来的潜在风险，确保了望远镜总控系统的安全稳定运行。

3.5.1.1 轻量级通信

在AIMS总控系统架构中，各个子系统间主要依托TCP/IP(Fall et al., 2012; Wright, 2017)通信协议进行数据交换，鉴于顶层通信的密集性与重要性，我们特地研发了一款基于C/S架构的定制化TCP/IP通信协议，旨在确保通信过程的高效与稳定性，如图 3-10。

为了确保每一次数据传输的精准无误，我们的协议设计了三部分结构：消息头部、消息主体和消息尾部。消息头部承载了与正文相关的附加信息，如消息类型、消息长度等关键参数；消息主体则是实际待传输的有效数据内容；而消息尾部则包含了校验信息，用于核实消息的完整性与准确性。

考虑到套接字接收缓冲区的限制，协议规定单个消息的最大长度不得超过256KB（即256*1024字节）。若消息内容超出此上限，协议将自动对消息进行切分和重组，以分包形式进行传输。

在文件传输场景下，我们巧妙地对文件校验进行了优化处理。由于在发送每个文件之前，已先将文件的名称、大小、唯一编号及对应的校验结果提前发送，故而在实际传输大文件时，不必对文件内容本身进行逐块校验，此举大大提升了文件传输的效率。

依据通信协议，一条完整的消息应包括10个内容，各部分内容的功能各不相同，且不可省略

协议版本：包含当前通信的协议版本，便于以后升级或修改协议。

消息属性：当前传输的消息类别，如发送，接收，登录，注销等。

收发属性：当前接收或发送消息的类别，如文本，文件，其他。



图 3-10 AIMS的通信协议

Figure 3-10 Communication Protocol of AIMS

附属属性：当前接受或发送文本，文件的状态，如文件名—大小—编号，文件内容—进度，文件收发状态；文本分包。

消息长度：整个消息的长度。

发送者：消息的来源。

接收者：消息的目的地。

级别：消息所属的级别，如严重，高，一般。

消息内容：所发消息的实际内容。

消息校验：为保证所发消息的完整性添加的消息摘要。采用SHA-512算法。

在总控系统中，分包通信扮演着重要的角色，特别是在处理大数据量传输、保障通信效率和稳定性方面。分包通信是指将原本较大的数据包分割成若干个较小的数据包（子包），这些子包可以独立地通过通信网络进行传输，随后在接收端重新组合成原始数据包的过程。

在总控系统中，分包通信的作用主要包括：

①.适应网络带宽限制：当待传输的数据量过大，超过了通信信道的单次传输能力时，分包技术允许系统将数据分割成适合网络传输的小块，确保数据能够通过有限带宽的网络进行传输。

②.提高传输效率：分包通信允许数据并行传输，多个子包可以在网络中同时传输，从而在总体上传输速度更快，尤其在多线程传输和异步处理机制下，可以显著提升系统的响应速度和吞吐量。

③.错误检测与恢复：每个数据子包可以携带校验和或序列号，使得接收端能够逐一验证每个子包的完整性，并在发现错误时只重传错误的子包，而不必重传整个大包，提高了数据传输的可靠性和容错能力。

④.动态负载均衡：分包通信有助于实现网络资源的动态分配和负载均衡，当网络拥塞或部分链路繁忙时，可以调整子包在不同路径上的传输顺序和速度，优化网络资源的利用。

⑤.易于扩展和维护：分包通信的机制使得总控系统能够更容易地添加新的功能或更新设备，因为系统可以独立处理和传输每个子包，无需等待整个大数据包的完整传输。

在总控系统中，分包通信可能应用于传输大容量的观测数据、控制命令序列或系统状态信息，确保在可能存在的通信条件限制下，依然能够高效、准确地进行信息交互和控制指令执行。

为了更清晰的展示该协议的通信过程，下图给出了登录、注销以及短消息通信过程。

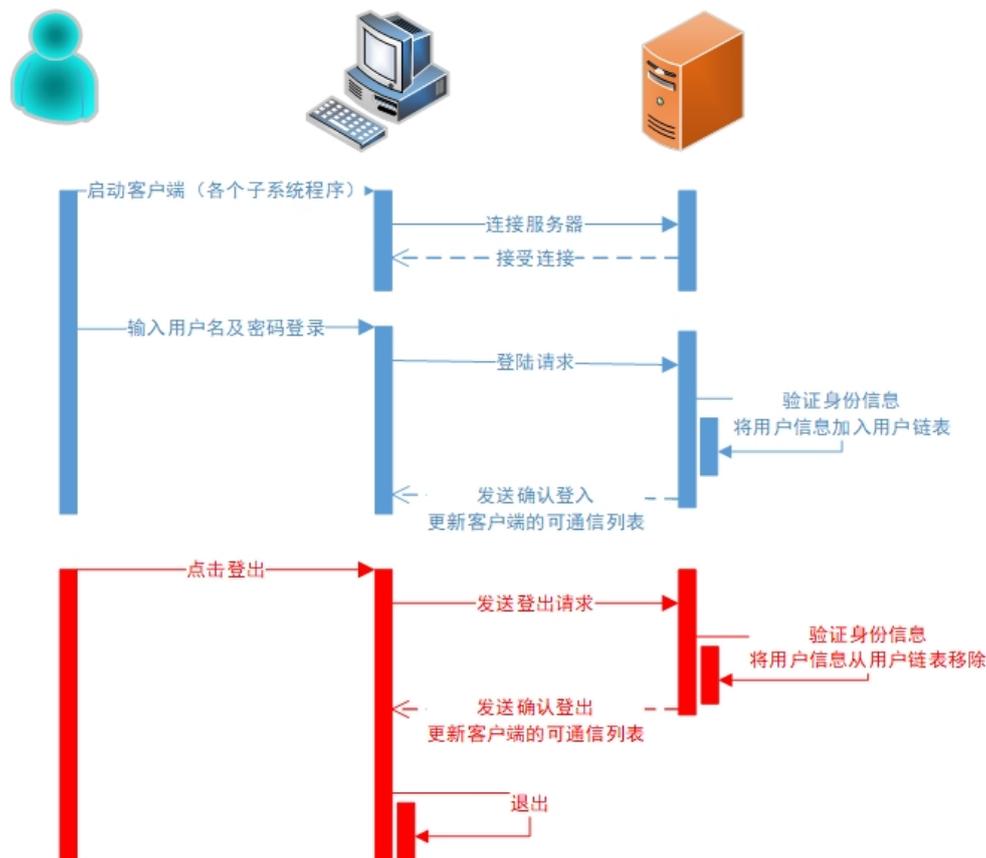


图 3-11 子系统登录和注销过程

Figure 3-11 Subsystem login and logout process

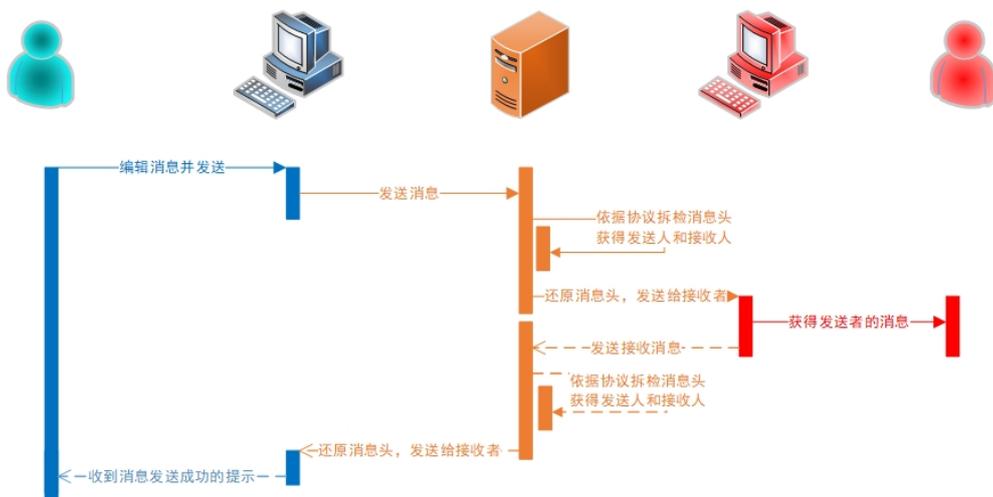


图 3-12 子系统通信过程

Figure 3-12 Subsystem communication process

而分包的通信方式则如下图

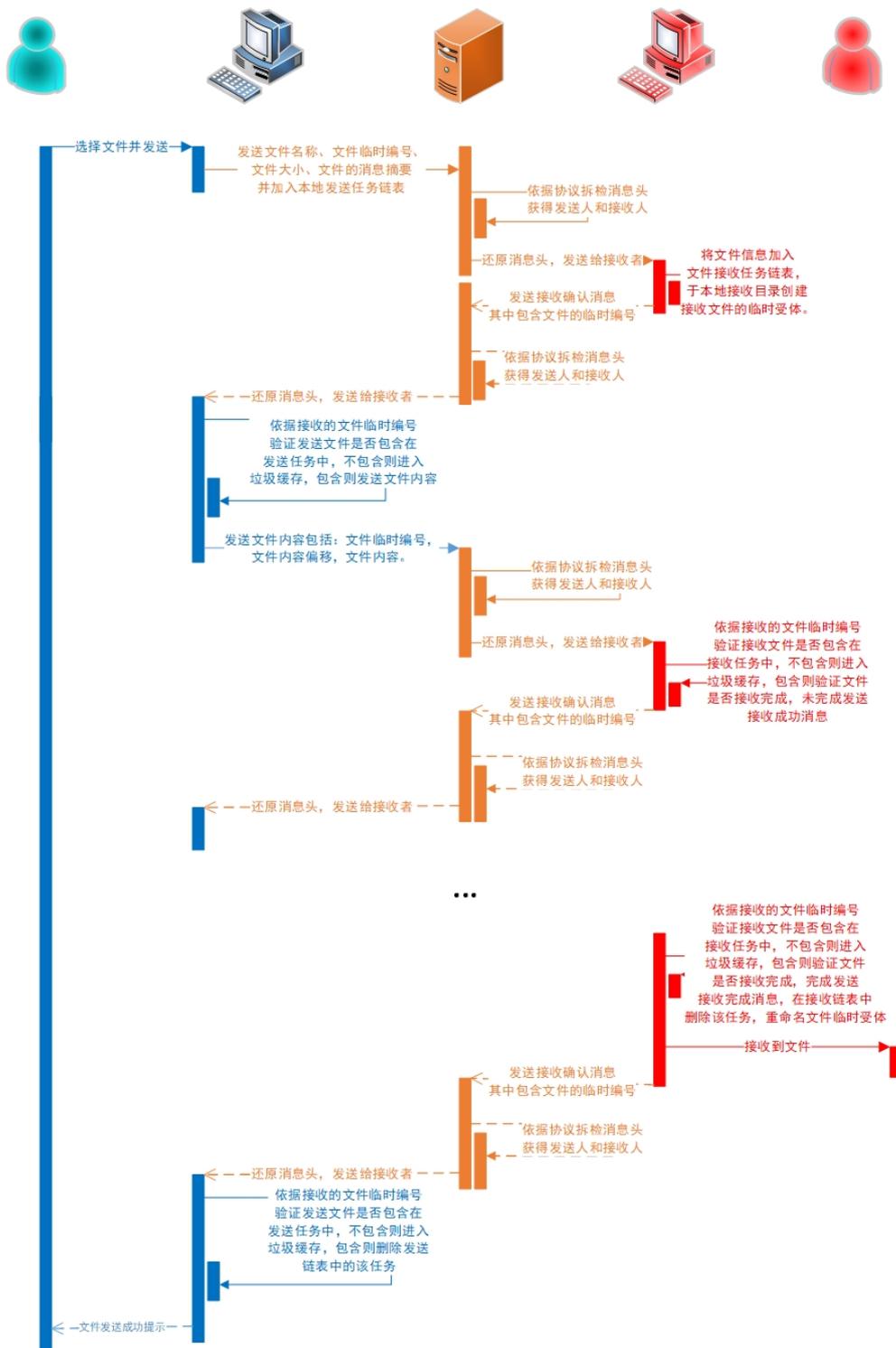


图 3-13 分包通信的实现方式

Figure 3-13 Implementation method of subcontracting communication

3.5.1.2 消息完整性

尽管TCP/IP通信协议因其卓越的稳定性和可靠性而广受赞誉，然而在实际通信环节中，依然无法完全避免由外部因素引起的潜在消息失真问题。一旦发生消息失真，将对总控系统的正常运行带来一系列安全隐患。因此，确保在通信全程中实现消息不失真的传输，以及在接收端对消息的完整性进行严格验证，对于保障总控控制过程的安全性至关重要。

针对接收消息的无失真性验证，当前已存在诸多成熟方案和算法，如校验和（Checksum）、循环冗余校验（CRC, Cyclic Redundancy Check）、消息摘要（Message Digests）等。

①.校验和（Checksum）是一种简单的错误检测机制，主要用于网络通信和数据存储中确保数据的完整性。它通过对一组数据进行某种形式的数学运算（通常是对数据的逐字节或逐比特进行加法或异或操作），生成一个固定长度的校验值，这个校验值随原数据一起发送或存储。在接收端，同样对收到的数据执行相同的计算，并将其结果与接收到的校验值进行对比，如果两者相符，则认为数据在传输过程中没有发生改变或丢失；如果不符，则可能存在数据错误。

校验和算法有多种变体，如：

1) 简单累加和校验：

对数据的每一个字节（或按照特定规则打包后的多个字节）进行累加，然后再对最终的和进行特定的处理（比如取反或模某个数值），得到校验和。

这种方法简单快速，但对较大规模的数据错误检测能力有限，因为累加和可能出现“卷绕”现象（当和超过了机器能够表示的最大值时）。

2) TCP/IP校验和：

在TCP/IP协议栈中，校验和覆盖了IP报头以及TCP或UDP报文段，包括伪首部（包含源和目的IP地址、协议类型和数据报长度等）。

计算时首先将每16位数据进行补码求和（进位加法），之后将和的16位反码作为校验和填入报头。此过程确保了对传输错误的较高检测概率。

3) 循环冗余校验（CRC）前的校验和：

在某些场合下，可能会先计算一个简单的校验和作为初步错误检测，随后再加上更复杂的CRC校验，以提高数据完整性的保证程度。

4) 二进制反码求和：

某些校验和算法会采用二进制反码求和的方式，即将数据视为一系列二进制数进行求和，然后对最终的和进行取反操作得到校验和。

具体实现上，校验和算法可能涉及以下几个步骤：

对数据进行预处理，例如填充额外字节使数据长度成为特定倍数。

对数据进行逐位或逐字节的累加运算。

处理溢出，例如进行进位加法或模运算。

最后对累加结果进行特定变换（如取反）生成校验和。

尽管校验和能有效检测部分数据错误，但它并不提供数据的纠错能力，且对于较长数据流或者恶意篡改，其错误检测能力相对较弱。为了更高的数据安全性，现代通信系统往往采用更强的错误检测和纠正机制，如前面提到的CRC或更高级的加密签名技术。

②.循环冗余校验（Cyclic Redundancy Check, CRC）是一种广泛应用于通信和存储系统的数据完整性检测方法(Peterson et al., 1961)。它基于线性反馈移位寄存器（LFSR）的原理，通过一种类似于除法的操作来生成一个固定长度的校验码（也称为CRC码或CRC余数），这个校验码随后附加到原始数据包的末尾一同发送或存储。接收方在接收到数据时重新执行CRC计算，并比较计算得到的校验码是否与接收到的校验码一致，以此来判断数据在传输过程中是否出现错误。

CRC工作原理：

1) 选择生成多项式：CRC的核心是选择一个预定义的二进制生成多项式，它通常是几个比特长的一个数，如CRC-8对应的是8比特的多项式，而CRC-32则对应32比特的多项式。这个多项式决定了CRC的性质和错误检测能力。

2) 初始化并移位：在计算CRC时，首先初始化一个寄存器（CRC寄存器）到一个预设的非零值（INIT）。接着，数据比特串被从高位到低位依次向左移入寄存器。

3) 异或运算：移位过程中，寄存器中的最高位（MSB）与生成多项式的最高阶系数进行异或运算，结果反馈到寄存器的其余位进行更新。

4) 生成CRC校验码：当所有数据比特都经过了寄存器，最后留在寄存器内的比特序列就是CRC校验码。这个校验码按照约定的位置添加到数据包的尾部。

5) 传输和接收：发送方将带有CRC校验码的数据包发送出去，接收方在收到数据后剥离出CRC校验码，同时对接收的数据部分再次执行同样的CRC计算。

6) 错误检测：如果接收方计算出的CRC与接收到的CRC相同，那么可以合理地假设数据在传输过程中没有发生错误。如果计算结果不同，则表明数据很可能出现了错误。

CRC的优点：

CRC可以高效地检测到大多数突发错误，尤其是单比特错误和一定长度的突发错误。

它可以通过调整生成多项式来适应不同的误码率和数据包长度需求。

CRC计算可以用硬件实现，速度快且成本低。

总的来说，CRC因其高效性、可靠性和易于硬件实现等特点，在各种通信协议、磁盘驱动器、USB、以太网、无线通信标准等领域中得到了广泛应用。

③.消息摘要 (Message Digests) 是一种密码学概念, 主要用于数据完整性校验和数据认证过程(Blahut, 2014)。它是一种单向散列函数 (One-Way Hash Function) 或称哈希函数 (Hash Function) 的应用, 能够将任意长度的消息或数据块映射为固定长度的较小数据块, 这个输出结果通常称为“哈希值”、“摘要”或“指纹”。

基本特性:

1) 单向性: 消息摘要算法是不可逆的, 即从摘要无法直接恢复原始数据。这意味着一旦一个消息经过摘要算法处理, 攻击者无法通过已知的摘要轻易重构原始信息。

2) 唯一性: 对于给定的摘要算法, 任何一个消息都有一个唯一的固定长度摘要。即使两个不同的消息只有微小差异, 它们的摘要也会显著不同。因此, 消息摘要可以用来识别数据的任何变化。

3) 确定性: 同一份消息使用相同的摘要算法会产生相同的摘要。不管何时何地, 只要输入相同, 输出总是固定不变的。

4) 抗碰撞: 优秀的消息摘要算法应该具有很强的抗碰撞特性, 也就是说, 找到两个不同的消息使得它们具有相同的摘要在计算上应该是非常困难的。

应用场景:

数据完整性检查: 通过计算消息摘要, 接收方可以对比收到的数据与其对应的摘要是否一致, 从而确认数据在传输过程中是否遭到篡改。

数字签名: 在数字签名中, 消息摘要被用于确保数据的真实性。发送方先对原始数据生成摘要, 然后用自己的私钥对摘要进行加密形成签名, 接收方使用公钥解密签名并与自己计算的摘要比对, 以验证数据未被篡改且确实来源于声称的发送者。

密码存储: 尽管不推荐, 但在一些早期的安全系统中, 用户密码有时会被消息摘要算法处理后存储在数据库中, 而不是存储原始密码。当用户登录时, 系统会重新计算提交的密码的摘要并与存储的摘要对比, 但这种方式并不能防止彩虹表攻击, 现代更推荐使用加盐哈希等更安全的方法。

常见的消息摘要算法:

MD5: Message-Digest Algorithm 5, 产生128位 (16字节) 的摘要, 现在由于安全性原因已不再推荐用于新的应用场合。

SHA-1: Secure Hash Algorithm 1, 产生160位 (20字节) 的摘要, 目前也被认为存在安全隐患, 尤其是在安全关键领域。

SHA-2: 包括SHA-256、SHA-384和SHA-512等变体, 提供了更高强度的摘要, 广泛应用于现代密码学实践。

SHA-3: 作为SHA-2系列的后续发展, SHA-3家族提供了一种全新的设计框架Keccak, 并提供了多种输出长度, 提高了抗量子计算攻击的能力。

综合考虑校验和, 循环冗余校验以及消息摘要的特性, 我们发现, 校验和的错误检测能力相对较弱, 而循环冗余校验更偏硬件, 相对而言消息摘要方法

的单向，唯一，扛碰撞更适合AIMS总控的通信场景，因此，我们选择了消息摘要算法中，成熟广泛，扛碰撞强的SHA-512作为保证消息无失真的验证算法。

3.5.1.3 消息安全性

在总控系统对外开放远程通信过程中，为了防止消息被劫持后，外部恶意破坏望远镜，我们为通信增加了加密解密机制，使得即使消息被劫持接无法快速解析，而只有持有特定密钥的外部用户，才可以基于其权限进行相关功能的访问。其中：

加密 (Encryption)：加密是指将明文 (plaintext)，即我们的消息，通过特定算法转换成难以读取的密文 (ciphertext)，确保只有持有正确密钥的授权接收者才能解读信息。这一过程旨在阻止未经授权的第三方获取和理解信息的内容。

解密 (Decryption)：解密则是加密过程的逆操作，即将密文还原为原始的明文形式，只有知道相应密钥的合法接收者才能执行这一操作。

以加密原理区分，当前加密可分为：对称加密 (Symmetric Cryptography)、非对称加密 (Asymmetric Cryptography) 以及混合加密 (Hybrid Cryptosystems)。

对称加密是一种传统的加密方法，也是最早的加密形式之一，它的核心特点是加密和解密使用的是同一个密钥 (或称为单钥系统)。这意味着用于加密数据的密钥与用来恢复原始数据的密钥是相同的，或者至少可以通过某种简单的操作相互推导得出。

在对称加密过程中，发送方使用一个预共享的密钥对要传输的消息进行加密，然后将密文发送给接收方。接收方收到密文后，使用相同的密钥对该密文进行解密，从而恢复出原始消息。

对称加密算法的特点包括：

高效性：对称加密算法相对于非对称加密算法来说，其加密和解密速度非常快，尤其适用于大数据量的加密场景。

密钥管理问题：因为只有一个密钥，所以必须确保密钥在发送方和接收方之间安全地传递和存储。在大规模分布式系统中，如果每个用户都与其他所有用户共享不同的密钥，密钥管理会变得极为复杂。

常见的对称加密算法：DES (Data Encryption Standard)、3DES (Triple DES)、AES (Advanced Encryption Standard) 等是广泛使用的对称加密算法。其中，AES已经成为当今最常用的对称加密标准，因为它提供了多种密钥长度且经过严格的安全测试(Blahut, 2014)。

工作模式：对称加密算法在实际应用中常常配合各种工作模式，如ECB (Electronic Codebook Mode)、CBC (Cipher Block Chaining Mode)、CFB (Cipher Feedback Mode)、OFB (Output Feedback Mode) 和CTR (Counter Mode) 等，这些模式决定了如何处理连续的数据块，以增强加密的安全性。

总的来说，尽管对称加密在效率上有优势，但在密钥管理和安全性上存在挑战，尤其是对于大型网络环境中的密钥分发。

非对称加密又称公钥加密（Public-Key Cryptography），是一种基于数学难题的现代加密技术，其核心特点是加密和解密使用一对相关的密钥，分别称为公钥（Public Key）和私钥（Private Key）。公钥可以自由发布，而私钥必须严格保密(Blahut, 2014)。

密钥对生成：

在非对称加密系统中，密钥对由特定算法生成，通常基于数学难题如大数因子分解问题（如RSA算法）或离散对数问题（如Diffie-Hellman、ElGamal、椭圆曲线加密算法等）。

密钥对中的两个密钥互相关联但不能互相推算得出，即只知道公钥无法推算出对应的私钥，反之亦然。

加密与解密过程：

加密：发送方使用接收方的公钥对信息进行加密，这样只有拥有对应私钥的接收方才能解密信息。

解密：接收方收到密文后，使用自己的私钥对其进行解密，从而恢复原始消息。

主要优势：

安全性：由于公钥和私钥的不对称性，即使公钥在网络上公开传播，也不影响私钥的安全性，因此有效解决了密钥分发问题。

数字签名：私钥所有者可以利用私钥对消息进行签名，接收者通过公钥验证签名以确认消息来源的合法性及消息未被篡改。

常见的非对称加密算法：

RSA（Rivest-Shamir-Adleman） ECC（Elliptic Curve Cryptography） DSA（Digital Signature Algorithm） ElGamal加密算法

非对称加密技术虽然计算开销较大，不适合加密大量数据，但却极大地提高了网络安全性和便捷性，是现代密码学和信息安全领域不可或缺的基础工具。

混合加密（Hybrid Cryptosystems）是一种结合了对称加密（Symmetric Cryptography）与非对称加密（Asymmetric Cryptography）两种加密技术优势的加密体系结构，它有效地克服了单一加密方式在效率和安全性上的局限性。

混合加密的工作原理：混合加密的核心思想是利用对称加密算法速度快、效率高的特点加密大量数据，同时利用非对称加密算法解决密钥分发和身份认证的问题。具体流程如下：

密钥协商：

发送方首先获取接收方的公钥，这是通过一个可信任的渠道或者公钥基础设施（PKI）完成的。

对称密钥生成:

发送方生成一个随机的对称密钥 (Session Key), 这个密钥只用于本次会话, 具有时效性。

对称密钥加密:

发送方使用接收方的公钥对该对称密钥进行加密, 确保只有接收方能够使用自己的私钥解密得到这个对称密钥。

数据加密:

接下来, 发送方使用刚才生成的对称密钥对实际传输的数据进行加密, 因其效率高, 适合加密大量数据。

数据传输:

发送方将加密后的对称密钥和使用对称密钥加密后的数据一起发送给接收方。

数据解密:

接收方收到数据后, 首先用自己的私钥解密出对称密钥。再使用这个解密出来的对称密钥去解密原本的加密数据。

优势:

性能高效: 通过对称加密算法处理主体数据, 避免了非对称加密算法处理大量数据时的速度瓶颈。

安全性高: 通过非对称加密来保护对称密钥, 确保即便对称密钥在传输过程中被截获, 也无法解密数据, 因为攻击者没有对应的私钥。

密钥管理简化: 仅需安全地分发公钥, 无需考虑每次通信都要安全分发新的对称密钥。

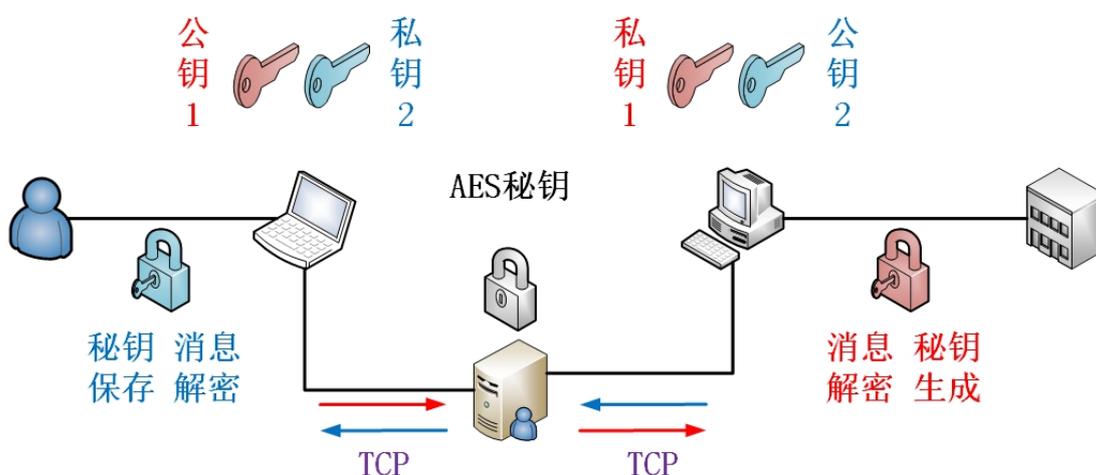


图 3-14 AIMS的密钥交换

Figure 3-14 Key Exchange in AIMS

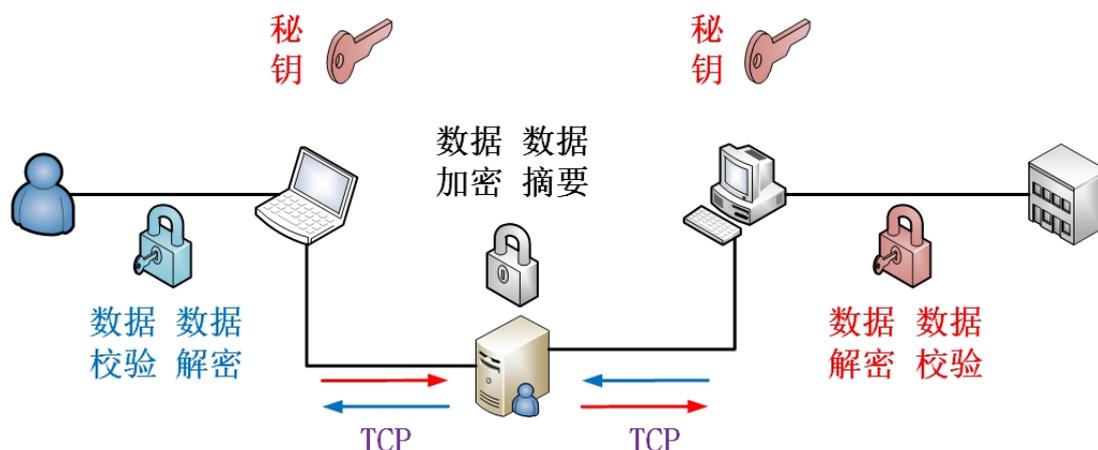


图 3-15 AIMS的消息加密解密

Figure 3-15 Message encryption and decryption in AIMS

混合加密既保证了数据加密的安全性，又兼顾了实际操作效率，因此，AIMS总控选择基于RSA方式的非对称加密方式交换密钥，而以AES的对称加密方式进行消息的加密和解密，如图 3-14以及图 3-15。

3.5.1.4 角色权限

在对外开放的过程中，由于各类用户所承担的角色各异，他们对于总控系统的诉求自然存在显著差异。例如，科研人员通常更加关注观测方案的设计及其所对应数据的精准度；相反，工程师们则聚焦于实验设备及仪器的实际运行状况；而作为一线操作的观测员，则更倾向于密切关注观测任务的具体执行细节。然而，对于各自职责范围之外的功能领域，用户往往缺乏深入理解和熟练掌握，这就可能导致在操作过程中误触不当，进而引发系统故障、错误判断等问题，不仅可能拖累整体观测效率，甚至可能造成实验设备的损害。

为有效防止此类不良后果的发生，我们构建了一套基于角色的权限访问控制系统（Role-Based Access Control, RBAC）。这一机制确保每位用户只能访问并执行与其特定角色相匹配的权限范围内的功能，从而提升了整个操作流程的专业化程度和安全性，如图 3-16。

基于角色的权限访问控制系统是一种普遍应用于计算机安全领域的访问控制模型，其核心理念是通过角色而非用户个体来分配系统资源的访问权限。RBAC模型的目的是简化权限管理、提高系统安全性、符合最小权限原则，并促进组织结构与系统权限的解耦。

RBAC的主要组成部分和工作原理如下：

①.角色（Roles）：角色是在系统中定义的一组权限集合，代表了系统中某一类用户或职务所具有的职责和能力。例如，在天文观测总控系统中，可能会有“科学家”、“工程师”和“观测员”等角色，每个角色都有一组与其职责相关的权限。

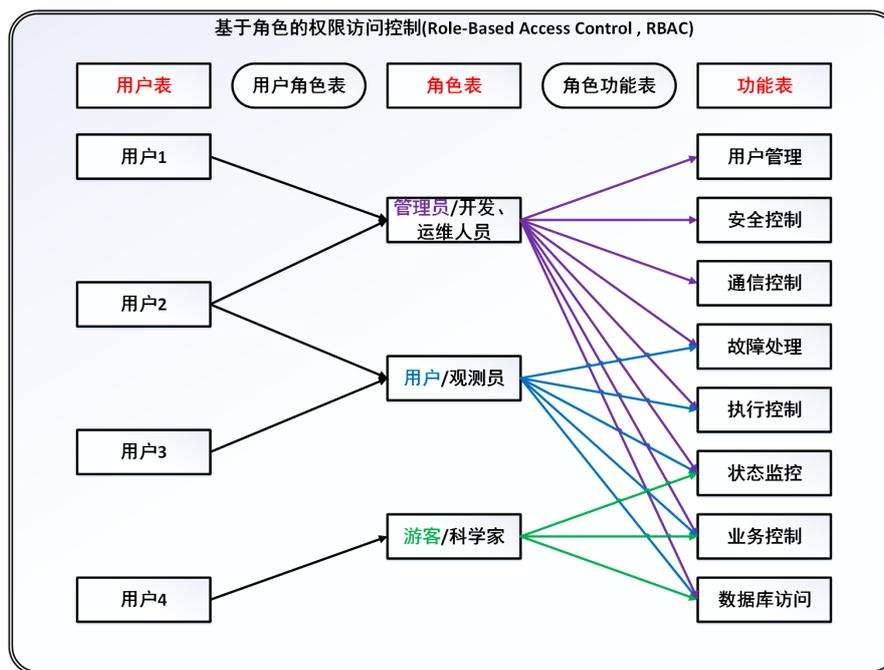


图 3-16 AIMS的 RBAC关系表

Figure 3-16 The Relationship in RBAC of AIMS

②.权限 (Permissions): 权限是系统资源访问的具体行动许可, 如查看、修改、执行等操作。在总控系统中, 权限可能包括创建观测计划、调整设备参数、查看观测数据、修改系统设置等。

③.用户与角色绑定 (User-Role Assignment): 用户账户被赋予一个或多个角色, 用户通过角色间接获得相应的权限。例如, 当一位“科学家”用户被分配给“科学家”角色后, 他就能执行角色中定义的所有权限操作。

④.角色继承 (Role Inheritance): RBAC模型中, 角色之间可以存在继承关系。上级角色可以包含下级角色的所有权限, 这样就可以通过角色层次结构简化权限管理。例如, “高级科学家”角色可能继承了“科学家”角色的所有权限, 并拥有额外的权限。

⑤.权限管理: 管理员通过调整角色所包含的权限, 即可批量地对拥有该角色的用户进行权限变更。这样, 当组织结构发生变化或新设备上线时, 只需要更新相关角色的权限配置, 而无需逐个用户地调整权限。

⑥.最小权限原则: RBAC遵从最小权限原则, 即每个用户账号或角色仅被授予执行其职责所需的确切权限, 多余权限不被赋予, 从而降低了因权限滥用或错误操作带来的风险。

综上所述, 基于角色的权限访问控制系统 (RBAC) 通过将权限与角色相关联, 将用户权限管理转变为角色权限管理, 简化了权限分配和管理过程, 提高了系统安全性, 并能根据组织结构调整权限分配, 实现更为灵活和安全的权限控制。在天文观测总控系统中, RBAC可以确保不同角色的用户只能执行与自身角色相匹配的操作, 从而保障系统资源得到有效、安全的使用。

3.5.2 运行安全策略

在总控系统实际运行中，由于采用了微服务架构以及多个子系统的深度融合，致使系统运行状态的精确评估与故障诊断面临巨大挑战。为了确保系统的稳定可靠运行，我们坚持实施严密的系统状态追踪和执行日志记录机制，并根据前期的建模成果构建了一套系统状态监测树模型，如图 3-17。通过实时将系统状态数据映射到监测树中，我们成功实现了对系统全方位的状态监控和精确的故障诊断功能。

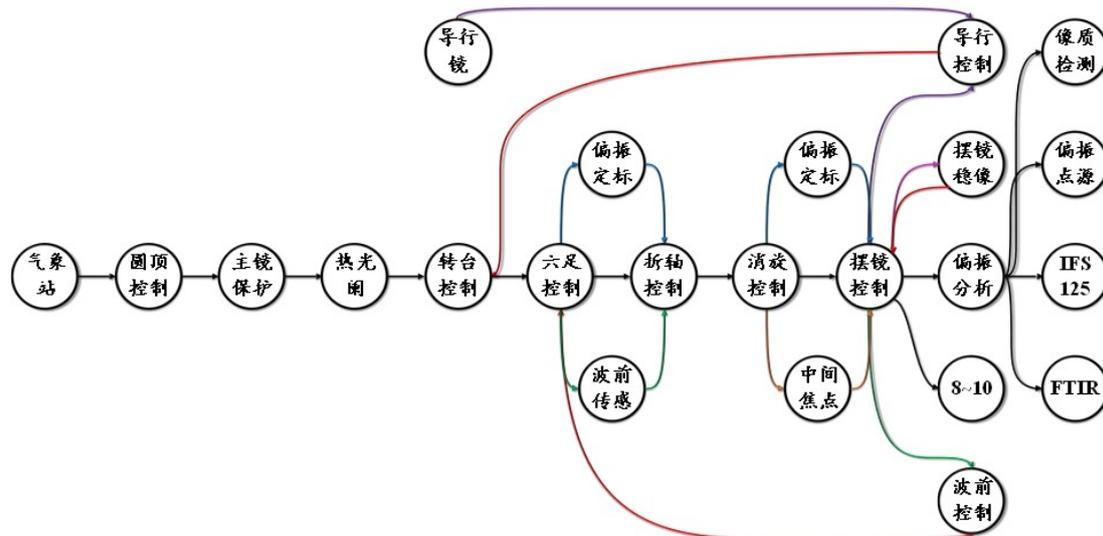


图 3-17 AIMS的状态监测树

Figure 3-17 The Status Monitoring Tree of AIMS

状态监控涵盖了系统内部所有通信活动的实时记录和展示，囊括串口通信、网口通信以及网络通信等各种通信形态的消息记录。根据通信内容的类别，如设备操作指令、设备反馈信息、数据记录片段等进行有序归档存储，并在专用的状态显示面板中清晰呈现。一旦设备操作消息偏离常规阈值，系统将立即发出预警信号；若偏差严重超过设定限度，系统将自动启动保护机制，先行将操作指令调整至安全范围，并同时报警，以避免潜在的错误操作对设备造成物理损害。

面对系统可能出现的各类软件故障，我们的故障处理机制不仅能快速定位问题，还提供了一系列有效的故障解决方案，包括那些机器自动处理较为困难的情况。故障处理的整体策略可分为两大方向：一是从源头上减少错误发生，这包括事前的严密状态监测（如前所述的状态监控功能）以及事后对故障的深入分析与根源排查；二是从降低故障影响的角度出发，通过内置的容错机制和服务降级策略，最大限度地减小故障对系统运行的影响。

在观测系统启动之前，系统预先为各个组件分配了独一无二的故障标识码。当某器件发生故障时，故障处理系统能迅速识别并锁定问题，通过遍历预设的故障处理方案库，选取合适的解决方案进行自动修复。若故障无法通过自动化

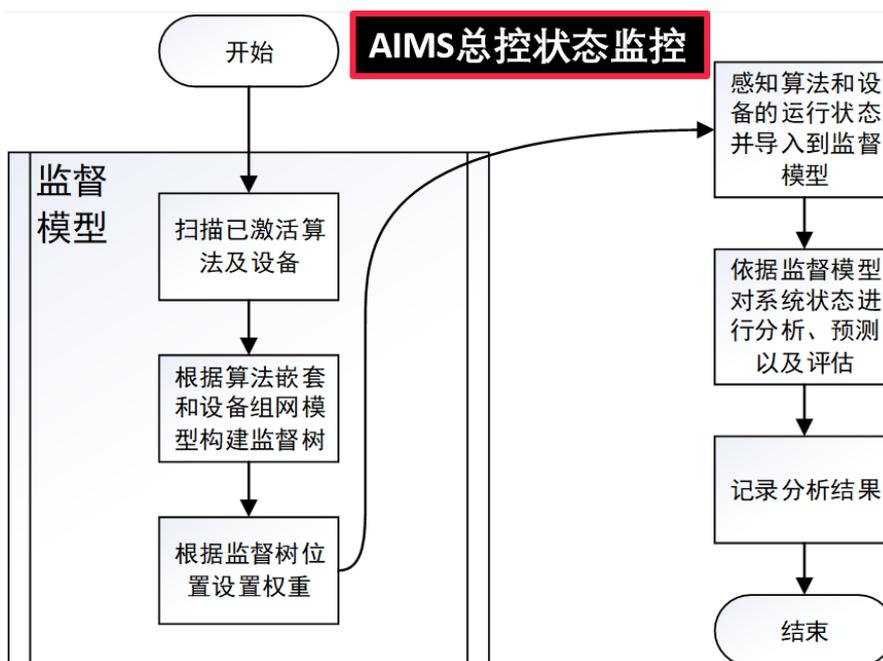


图 3-18 AIMS的状态监测

Figure 3-18 The Status Monitoring of AIMS

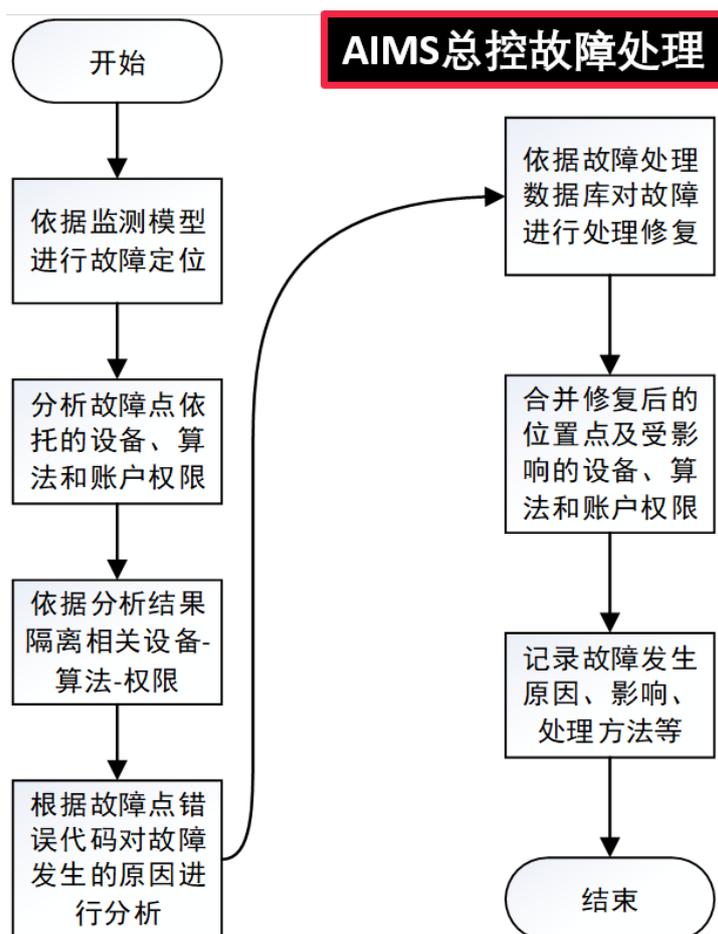


图 3-19 AIMS的故障处理

Figure 3-19 Error handling of AIMS

手段解决，系统会将推荐的故障排除方案及时提供给运维人员参考，以助于尽快恢复正常运行状态。

3.6 小结

在第二章节中，我们系统性地梳理了项目对总控系统的各项具体要求，但在深入探讨望远镜自动化的现有分级体系时，发现现存的标准杂乱无章，难以充分契合AIMS总控系统的设计初衷。因此，在第三章中我们在对照同类领域的分级标准进行深入比较分析后，创新性地提出了一个新的望远镜自动化分级方案，旨在为AIMS总控系统的设计与实现提供更为精确的指导方向。

依照这一新型分级准则，并紧密结合AIMS总控系统的内在需求，我们首先构思了一个三级系统框架：由多个设备控制子系统构成底层基础，辅以一系列自主化支撑子系统，再由中枢决策子系统进行统一协调和调度。在这三层结构中，设备控制子系统负责望远镜硬件层面的具体操控；自主化支撑子系统则提供了一系列决策所需的条件和背景信息；中枢决策系统则担当重任，根据这些决策条件以及自身的调控策略，协同调配各个设备控制子系统，以达成望远镜的高度自主化控制目标。

在实现这一目标的过程中，构筑一个坚实、可靠的软件架构至关重要。鉴于此，我们选择了基于松耦合、高内聚原则的微服务架构来进行开发设计，这一架构充分结合了系统的特殊性与需求。此外，我们还融入了围绕能源管理、环境适应性、观测任务计划以及设备状况监测等多方面的控制策略，并配以严谨细致的系统安全策略，旨在确保整个总控系统能够实现稳定、可靠、高效的运行。

第4章 AIMS总控系统自主化关键技术攻关

在第二章和第三章的深入探究中，我们详尽剖析了AIMS总控制系统的多元化需求，并以此为基础，从系统框架设计、软件架构优化、精细化控制策略及安全保障等多个维度，构建了一套全面自主化的总控体系。

然而，要彻底实现系统的自主化运作，尚需攻克一系列尚未完全实现自动化控制的关键功能难关，其中包括：望远镜自动精确指向和跟踪技术，焦平面设备的智能自动调焦机制，观测期间实时的自动曝光增益调整，对太阳光受云层遮挡状况的智能判别，以及如何高效地实现终端数据的本地存储与传输。

因此，针对上述难点，我们积极开展定向研究，提出并验证了一系列切实可行的解决方案，旨在确保系统能够真正意义上实现实质性的全自主化运行。

4.1 自动指向与跟踪

要实现总控制系统的自主化运行，首要在于确保望远镜具备精准且稳定的自动指向与跟踪能力。若望远镜无法准确捕捉并持续锁定太阳目标，无法实现高质量的闭环跟踪控制，则后续的一切观测自动化乃至整体的自主化策略都将毫无意义。

4.1.1 自动指向

自动指向即望远镜控制系统驱动望远镜指向太阳的过程，在该过程中，望远镜控制系统不仅要实时精确的计算太阳在天区的位置，还需依托相关算法快速驱动望远镜指向该位置，根据系统轴系误差模型实时矫正目标位置，最终实现指向工作(陈垂裕等, 2020)。

首先，太阳的位置信息是以天文学的标准坐标系统来描述的，通常使用的是地球坐标系中的赤经(Right Ascension, RA)和赤纬(Declination, Dec)坐标，或者是地平坐标系中的方位角(Azimuth)和仰角(Elevation)坐标，计算的方法众多，我们采用使用广泛，精度较高的VSOP87行星理论进行计算(柳光乾, 2011)。具体则为：

①.获取当前时间参数：

首先需要当前准确的日期和时间（通常以世界协调时UTC为准），包括年、月、日、时、分、秒、毫秒，一般以标准的时统系统结果为准。

②.使用儒略日(Julian Date, JD)：

将当前日期转换为儒略日数，儒略日是一种连续的时间计量单位，方便进行天文计算。根据当前的日期和时间计算出儒略日数 JD^1 ：

¹<http://www.iausofa.org/>

$$\begin{aligned}
 \text{JDN} = & [365.25 \times (Y + 4716)] + [30.6001 \times (M + 1)] + D \\
 & + \left\lfloor \frac{Y + \left(\frac{M-14}{12}\right)}{4} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{Y + \left(\frac{M-14}{12}\right)}{100} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{Y + \left(\frac{M-14}{12}\right)}{400} \right\rfloor - 32045 \\
 & + \left(\frac{H-12}{24}\right) + \left(\frac{Mi}{1440}\right) + \left(\frac{Se}{86400}\right)
 \end{aligned} \quad (4-1)$$

式中，JDN为待时间信息的儒略日， Y 、 M 、 D 分别代表公历的年月日信息， H 、 Mi 、 Se 分别代表公历的时间信息。

③.地球运动参数:

计算地球在公转轨道上的位置，包括地球的黄经、黄纬等参数。

$$\begin{aligned}
 \tau &= (J_D - 2451545)/365250 \\
 l' &= (l_0 + l_1\tau + l_2\tau^2 + l_3\tau^3 + l_4\tau^4 + l_5\tau^5)/10^8 \\
 b' &= (b_0 + b_1\tau)/10^8 \\
 r &= (r_0 + r_1\tau + r_2\tau^2 + r_3\tau^3 + r_4\tau^4)/10^8 \\
 l &= l' + \Delta l \\
 b &= b' + \Delta b
 \end{aligned} \quad (4-2)$$

其中， τ 为当前儒略日距离 J2000.0 的千年数； l' 是地球平黄经， b' 是地球平黄纬， l 是地球真黄经， b 是地球真黄纬， r 为日心距离； l_0 、 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 、 l_5 、 b_0 、 b_1 、 r_0 、 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 为 VSOP87 行星理论下的地球周期项系数。

④.太阳运动参数:

根据地球运动参数和太阳在黄道面上的位置，计算日心的赤经赤纬。

$$\begin{aligned}
 \alpha &= a \tan\left(\frac{\sin(l) \cos(e) - \tan(b) \cos(e)}{\cos(l)}\right) \\
 \delta &= a \sin(\sin(b) \cos(e) + \cos(b) \sin(e) \sin(l))
 \end{aligned} \quad (4-3)$$

其中， e 是黄赤交角， α 是日心赤经， δ 是日心赤纬。

⑤.计算太阳的地平坐标:

有了太阳的日心赤经赤纬后，考虑当地的地理位置（经度和纬度）以及当地的时间（以计算出的地方时或格林尼治平时为准）。可根据如下公式计算时角 t ：

$$t = S_0 + T + \Delta T - \alpha \quad (4-4)$$

其中， S_0 为当天平时 0h 的恒星时； T 为当前的北京时间； $\Delta T = 120 - \lambda$ 为当地的地理经度与东经120度的差，以时分秒为单位。

然后将时角 t 与赤纬 δ 转换为地平坐标的方位角 A 和仰角 H ：

$$\begin{aligned}\sin H &= \sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\cos t \\ \cos A &= \frac{\sin\delta - \sin H\sin\phi}{\cos H\cos\phi}\end{aligned}\quad (4-5)$$

其中， ϕ 表示观测地点的纬度。

⑥.考虑大气折射和时差：

实际上，由于大气折射效应，太阳在地平线上的位置看起来会稍有偏移，因此在计算时需要加上大气折射改正。

同时，还要考虑真太阳时与平太阳时的差异，真太阳时是指太阳的真实位置，平太阳时则是基于均匀时间划分的，二者之间存在时差，需要通过经验公式或天文表查得。

一旦获得太阳的方位和高度坐标，就需要将其转换为望远镜实际能够理解并执行的机械坐标，即望远镜轴需要转动的角度。

在完成坐标转换后，望远镜指向系统通过精密的伺服电机驱动望远镜的旋转轴。伺服电机能够精确控制旋转角度和速度，根据计算好的机械坐标引导望远镜的镜筒朝着目标天体方向移动。

最后，AIMS配备了精密编码器，它们能够实时监测望远镜轴的精确位置和转动状态。这些系统与闭环控制系统相结合，形成一个持续监测和调整的机制。当望远镜轴开始转动并向目标天体靠近时，编码器或其他反馈设备会不断反馈当前的实际位置，控制器则根据反馈信息与目标位置的差值，实时调整电机的输出，确保望远镜准确无误地指向目标天体，并在跟踪过程中保持精确对准。

4.1.1.1 仪器轴系误差

根据上述原理，望远镜控制系统可较准确的指向太阳，然而，由于环境和仪器自身的因素引入的仪器轴系误差使得望远镜无法精确指向(马锦等, 2011)，其产生原因如下：

①.制造与装配误差：

机械加工精度不足：望远镜的各个轴件在制造过程中可能会出现尺寸公差、形状误差等，导致轴系组装后精度下降。

装配对中误差：经纬轴、水平轴等在装配时难以做到绝对的垂直和平行，存在一定程度的偏斜或倾斜，这会导致指向误差。

②.热膨胀与变形：

材料热胀冷缩：望远镜结构材料在温度变化时会发生尺寸变化，引起轴系的变形和精度漂移。

轴承磨损与间隙：长期运行后，轴承可能因磨损导致轴系间隙增大，影响指向精度。

③.结构刚度不足与振动：

结构刚度不够时，外界载荷（如风荷载、自重、惯性力等）会使轴系产生弯曲变形，影响指向精度。

环境振动（如地震、地面交通、机械设备震动等）会通过支撑结构传递到轴系，导致不稳定指向。

④.控制系统误差：

控制系统的精度限制：伺服电机的驱动精度、编码器的分辨率、控制算法的精度等都会影响轴系的定位精度。

传感器误差：用于反馈轴系位置的传感器（如光电编码器、陀螺仪等）可能存在测量误差。

⑤.环境因素：

大气扰动：特别是对地平式望远镜，大气折射效应和风压等环境因素会影响望远镜的稳定指向。

温度梯度：不均匀的温度分布可能引起轴系的局部变形，影响轴系的直线度和平行度。

而针对望远镜轴系误差，综合考虑各项影响因素，天文学家一般采用全局误差模型来矫正这一误差的影响，一般可分为基于球谐函数的误差模型，定天区的误差模型和基于机器学习的误差模型(陈垂裕等, 2020):

①. 基于球谐函数的误差模型

在天文观测中，基于球谐函数的误差模型利用了球谐函数在描述球面上分布函数时的优越性质(王建军等, 2012)。球谐函数可以把指向误差的空间分布表示为一组球谐系数的线性组合，能够有效地表达指向误差在三维空间中的变化趋势，包括径向、纬向以及不同阶次的切向误差成分(Morse et al., 1953; 姚久民等, 2005)。球谐函数的一般表达如下(王建军等, 2012):

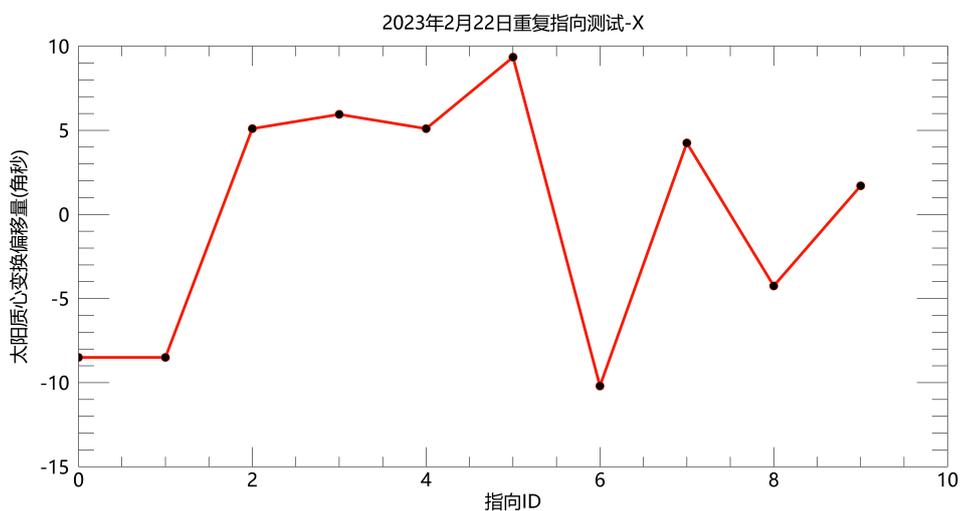
$$F(\theta, \lambda) = \sum_{l=0}^{\infty} \{A_l^0 P_l^0 \cos \theta + \sum_{m=1}^l [A_l^m \cos(m\lambda) + B_l^m \sin(m\lambda)] P_l^m \cos \theta\} \quad (4-6)$$

式中 $P_l^m \cos \theta$ 是连带勒让德多项式，表示为

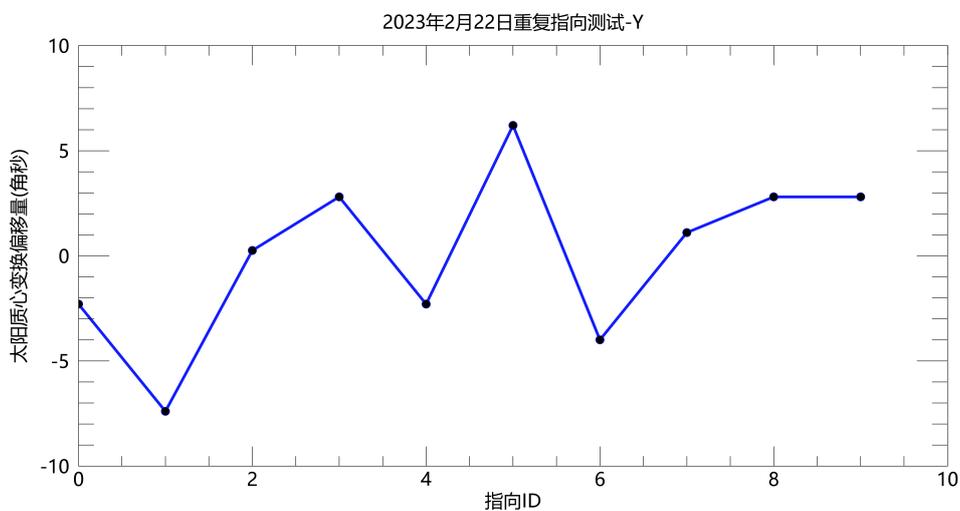
$$P_l^m \cos \theta = \frac{(1 - \cos^2 \theta)^{\frac{m}{2}}}{2^l \cdot l!} \cdot \frac{d^{l+m}}{d(\cos \theta)^{l+m}} (\cos^2 \theta - 1)^l \quad (4-7)$$

通过测量和分析望远镜指向数据，可以确定这些球谐系数，并据此进行误差补偿和校正。例如，在天文望远镜指向系统中，球谐函数模型可用于刻画由于机械结构缺陷、温度变化、风载荷等原因引起的指向误差，通过拟合这些误差分布，可以设计出相应的误差校正算法，从而提高望远镜指向精度。

该方法已成功应用到温泉太阳磁场望远镜和子午工程二期全日面矢量磁像仪(SFMM)上，指向偏差（多次从不同方向指向同一目标的偏差）满足项目的实际要求。(RMS<20角秒(温泉)、RMS<5角秒(子午))



(a)



(b)

图 4-1 温泉多次指向结果

Figure 4-1 Multiple results of pointing in WenQuan

②. 定天区的误差模型

定天区的误差模型着重考虑望远镜在观测特定天区时出现的指向误差特征。这种模型基于对特定天区观测数据的积累和分析，将指向误差与天体位置、时间以及其他可能影响指向精度的因素（如季节变化、观测时间、观测高度角等）相关联(何秋会等, 2005)。通过收集并分析在特定天区观测时的指向数据，可以发现和量化特定条件下的指向误差规律，并据此设计出适用于该天区的指向误差校正策略。

③. 基于机器学习的误差模型

随着人工智能技术的发展，基于机器学习的误差模型开始在天文观测领域崭露头角。这种模型通过训练机器学习算法，利用大量的历史指向数据，让算法自行学习和挖掘指向误差与多种因素之间的复杂关系。例如，神经网络、支持向量机、决策树、随机森林等机器学习方法可以用于构建误差模型，预测和校正望远镜指向误差。

在这种模型中，输入变量可能包括时间、天气条件、设备状态参数、观测目标特性等多种因素，输出变量则是指向误差。通过训练，模型能够在未知条件下对指向误差进行预测，从而在实际观测前或过程中进行精确的指向修正，以提高望远镜的指向精度和观测效率。

总结来说，基于球谐函数的误差模型适用于描述和校正指向误差的空间分布特征，定天区的误差模型则专注于特定天区和特定条件下的指向误差规律，而基于机器学习的误差模型则能够发掘和利用大量数据中的复杂关联性，实现对指向误差的智能预测和校正。这三种模型各有优势，可以根据实际观测需求和条件灵活选用或结合使用。

对于当前AIMS，其望远镜控制系统主要采用定天区的观测，并将这些观测结果带入到球谐函数的误差模型中，计算太阳全年活动天区的误差模型。在后续对整个系统不断了解的过程中，则会引入机器学习的相关模型与此前模型一起参考，计算最佳的轴系误差模型。

4.1.2 闭环跟踪-导行

在AIMS磁场观测任务中，存在着众多需要深度积分观测的情景，这就对望远镜的跟踪精度提出了极高的要求。为此，我们深入探究并优化了望远镜的导行系统以确保满足这一关键指标。

在先前的部分中，我们对望远镜导行系统已有详尽的阐述，然而，在实际操作中，仍有若干核心挑战有待克服，其中首要问题是确保在不同观测条件下准确识别太阳质心并实施有效的闭环跟踪。

识别太阳质心这一议题可以细分为两个关键子问题：一是如何在存在云遮挡情况下辨别太阳位置，二是如何调整导行相机的曝光设置以获取最优的成像效果。先前，诸如郭晶晶等人(吴春晖等, 2007; 柳光乾等, 2013; 郭晶晶等, 2016)对此领域的研究已经针对云遮挡情况提出了明确的应对策略，但针对薄云

遮蔽的情况，固定曝光策略不足以有效应对，导致在云遮挡时段内可能出现图像闭环缺失，从而影响跟踪精度。因此，我们创新性地提出了一种自动曝光增益方法，这种方法能在薄云遮挡时通过增大曝光度来削弱云层对太阳影像的干扰，从而维持稳定的导行和跟踪。一旦薄云消散，望远镜依旧能够准确锁定并追踪目标。

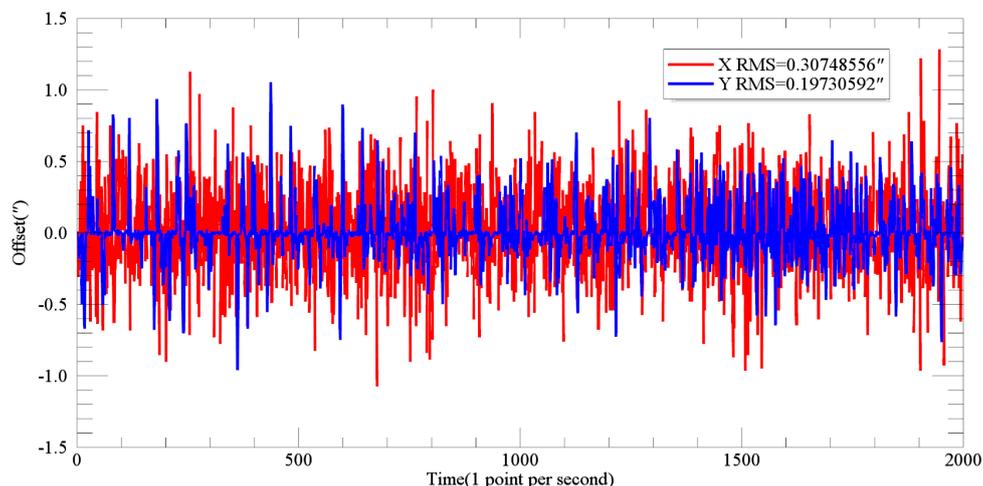


图 4-2 SFMM优化后的导行结果

Figure 4-2 The result of Optimized Guide in SFMM

另一方面，望远镜导行调整过程实质上表现为一种动态平衡与调整的过程。为确保在较大跟踪偏差出现时，望远镜能够迅速回归到预先标定的标准位置，我们采用了基于比例-积分-微分（PID）控制策略。在质心位置大幅偏离时，系统会采用较快的速度进行位置矫正；而在偏差较小的时候，则采用较慢的速度，力求既能迅速纠正大的偏离，又能确保在小偏差范围内稳定地保持太阳目标处于视野中心。

该方法已成功应用到温泉太阳磁场望远镜和子午工程二期全日面矢量磁像仪（SFMM）上，其效果可根据长时间导行偏差的结果查看，导行偏差的RMS<1角秒/30分钟，实现了稳定的导行。

4.2 自动调焦

自动调焦是自主化观测的一项关键技术，它通过自动化的方式来确保镜头或镜片系统能够精确聚焦到目标物体上，从而获得清晰的图像。

在望远镜运行期间，以下因素均会引起焦距的变化，因此需要进行调焦：

①.大气扰动：

大气折射引起的视宁度波动（大气湍流）会改变光线的传播路径，导致成像模糊，需要通过实时调焦来改善成像质量。

②.温度变化导致的光学元件热膨胀：

光学元件材质的热胀冷缩会改变望远镜镜片间的间距，影响焦距，需要根据温度变化情况进行调焦。

③.机械结构的精度限制：

望远镜机械结构的装配精度、长期使用后零部件的磨损、变形等都可能导致焦距的微小变化，需要调焦予以校正。

以往的太阳望远镜多由观测员根据经验进行手动调焦，这种方法存在一定的主观误差，不同观测员的人为误差各不相同，无法达成统一标准。另外，随着望远镜数字化的推进，各个功能都已实现自动控制，人工的调焦反而成为了数字化的一大阻碍，所以望远镜如何自动调焦成为了亟待解决的问题。

4.2.1 常用方法

现今，自动调焦技术在各领域光学终端设备上应用广泛，其原理为在自动调焦过程中，观测目标在成像终端所成像存在特征或中高频分量的变化，利用清晰度评价/调焦函数可对不同位置的成像质量进行分析，特征符合或中高频分量多的视为最佳焦点成像，该位置即为最佳成像焦点。但不同的观测目标具备独特的物理特性，导致成像终端所成图像的图像特征不同，无法采用统一的标准进行自动调焦，在不对现有设备进行额外更改的前提下，根据当前自动调焦的应用情况统计，其普适的技术方案大致可分为基于梯度函数为调焦函数的自动调焦，基于频谱函数为调焦函数的自动调焦以及基于熵函数为调焦函数的自动调焦，三者的理论依据各有不同(王欣等, 2008; 张来线等, 2013)。

梯度函数的评价依据为越靠近最佳焦点的图像，其具有更锐利的边缘，反应到梯度图像上则为更大的梯度值。

频谱函数的依托则为越清晰的图像包含更多的细节信息，因此其在频率域的中高频信息越多。

熵函数的使用前提是，最佳焦点图像的熵一定大于离焦图像熵，在此前提下，可根据熵大小选择最佳焦点。

4.2.2 太阳领域调焦的难点

自动调焦在民用以及工业领域技术成熟，但在太阳观测上却仍处于探索阶段，究其原因，可归咎为以下3点：

①.大气湍流对太阳成像影响

地基太阳望远镜的观测目标为太阳，太阳光需经过地球大气才能被望远镜探测到，在途径大气过程中，从日面发出的光经历了大气的吸收，辐射，散射和湍动。其中尤以最后一项对焦距分析影响最甚(Roddier, 1981)。

大气湍动是指大气湍流的无规则运动，就区域而言具备在各个尺度上对望远镜成像的影响，包括放大，扭曲，位移等。且存在非常强的时变性，即强时变性多空域变化的过程。而获得的太阳像，除正常太阳活动外，还受到了各种尺度的影响。

②.地基望远镜的设备误差

地基望远镜在运行过程中,存在各种误差,而这些误差大部分会反映到最终的图像上。如望远镜的跟踪误差会导致不同时间的太阳像存在抖动;滤光器波带漂移导致太阳像特征变化;光学成像系统存在的脏点,不均性导致的太阳像小尺度、大尺度强度变化等等。

即环境干扰的强时变多空域变化,和观测设备引入的多尺度空域变化。由于图像内容变化导致无法确定最佳焦距位置的图像熵是否为最大,熵函数的评价首先被排除;而对于梯度函数而言,强时变多空变的图像导致梯度选区十分困难,不同时刻不同区域的噪声影响,导致无法在有效区域内实现可重复的精确计算;对于频谱分析而言,尽管其规避了多空域变化的影响,但对于随时间变化的图像,不同时刻的计算结果呈现为大气抖动的规律,而这种规律本身为随机过程。因此无法精确定位最佳焦点。

③.较强的学科背景

在自动调焦过程中,除了需要数据采集,数据处理,电机控制等,还需要诸多学科专业知识储备,如环境与设备对太阳像影响,望远镜光学系统最佳焦点范围,望远镜成像分辨率等。其中环境与设备的影响和望远镜成像分辨率便于设计者根据影响因素而设计方案,光学系统最佳焦点的光学指导则确定调焦范围与步长。因此无法简单的套用成熟的解决方案实现自动调焦。

4.2.3 改进的自动调焦方法

针对当前太阳望远镜自动调焦所存在的问题,我们结合相关学科知识,利用选帧技术选取大气冻结时间内的最佳太阳像,减少大气时变性影响;选择改进的频谱分析法——谱比法(梁波等,2014)作为评价函数,确定不同焦点位置图像的图像质量,即利用谱比法抑制多空域变化的影响;最后利用高斯拟合法实现对最佳焦点较为准确的计算,并根据结果驱动电机使成像系统位移到最佳位置。

首先,根据大气湍流的强时变特性可知:长曝光图像会抹平不同时刻湍流影响,导致整体像质变差,而极短时间内的短曝光像则仅保留该时刻的湍流影响,即大气湍流影响的最小时间尺度,该极短时间也被称为大气冻结时间,一般在10ms以下。根据该现象天文领域专家提出了幸运成像理论,即连续拍摄多帧短曝光图像,通过像质评价函数提取接近望远镜衍射极限的图像。在短时间内连续拍摄多帧图像,每帧图像的曝光时间均小于大气冻结时间,在后期对该系列图像进行像质评价时,总有像质接近望远镜衍射极限的图像。依据该理论,本发明在同一焦点拍摄多帧大气冻结时间内的短曝光像,然后对该系列短曝光像利用图像评价函数进行选帧,选择像质最佳图像作为该焦点基准图像,减少大气湍流时变的影响。后续对每一焦点均采用该方法,从而获得每个焦点的基准图像。

然后,针对大气湍动的多空变特性,在时不变情况下,图像上各个区域具

有不同的瞬时点扩散函数，但是在一定区域内，其瞬时点扩散函数一致，该区域被称为等晕区。在等晕区范围内，大气的光学特性基本不变，点光源经过该等晕区所成像被成为斑点图，同一时刻所成像完全一致。对于包含多个等晕区的太阳像而言。由于包含了诸多等晕区，每个等晕区均存在随机变化，因此无法选取特定的某个区域作为调焦的衡量标准，而根据大气的随机运动的统计进行分析，对多个等晕区联合分析会拉低等晕区图像质量高的区域，同时也会抬高等晕区图像质量低的区域，因此选择整个区域进行图像质量分析可一定程度上抑制大气湍流对全日面像的影响，可以从频谱分析法出发，将不同的全日面像频谱进行比较，再对比较结果结合望远镜空间分辨率进行分析，选择最佳像质图像，即谱比法作为图像质量评价函数确定最佳像质图像，如图 4-4。

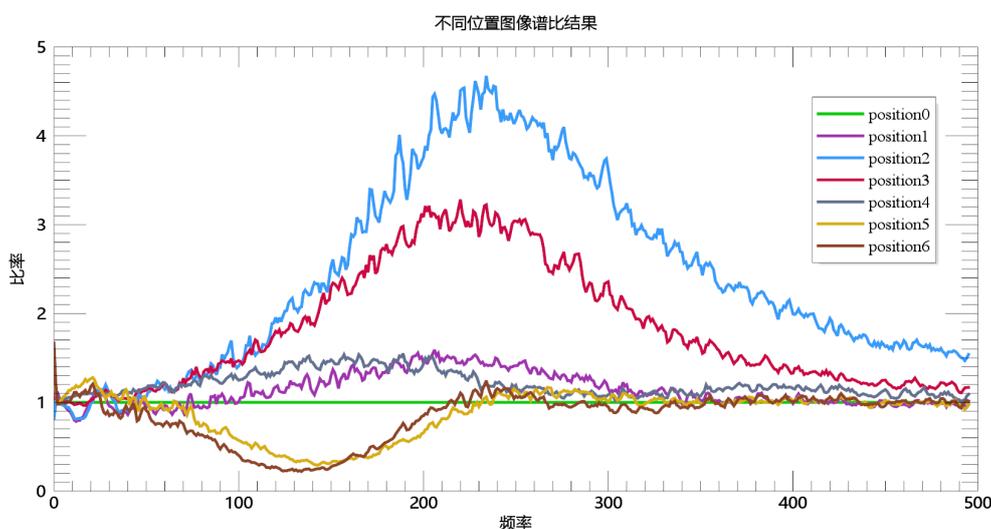


图 4-3 自动调焦过程中不同位置谱比结果

Figure 4-3 Power spectral ratio results at different positions during autofocus process

具体的谱比法为：

①.首先对待比较的各个图像进行零均值归一化，剔除光强变化的影响。

零均值归一化公式如下：

$$f(x, y) = \frac{I(x, y) - \mu}{\sigma} \quad (4-8)$$

式中， x 代表图像横向坐标， y 代表图像纵向坐标， $I(x, y)$ 为原图像的像素值， μ 为原图像均值， σ 为原图像得标准差， $f(x, y)$ 为零均值归一化后图像得像素值。

②.然后将归一化后图像分别进行傅里叶变换，在频率域得到图像的功率谱。

二维离散傅里叶变换公式如下：

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (4-9)$$

式中, u 代表频域的横向坐标, v 代表频域纵向坐标, M 代表图像得宽度, N 代表图像的高度, j 为虚数单位, $F(u, v)$ 表示二维离散傅里叶变换之后的结果。

计算功率谱的公式如下:

$$P(u, v) = \text{Re}(F(u, v))^2 + \text{Im}(F(u, v))^2 \quad (4-10)$$

式中, Re 表示取实部操作, Im 表示取虚部操作, $P(u, v)$ 为最终功率谱结果。

③.将频率域的功率谱从笛卡尔坐标系, 以频域中心为原点, 频域轴长为半径转换为极坐标。

极坐标转换公式如下:

$$Q(\rho, \theta) = P\left(\sqrt{u^2 + v^2}, \arctan\left(\frac{v}{u}\right)\right) \quad (4-11)$$

式中, ρ 代表极坐标系下半径方向坐标, θ 代表极坐标系下角度方向坐标, Q 表示极坐标下的功率谱, \arctan 是反正切函数。

④.在极坐标系中, 对每个半径(即频率)沿着角度方向做平均, 得到一条平均曲线, 这条曲线就代表功率谱沿着频率方向的分布。

其公式如下:

$$L(\rho) = Q(\rho, \bar{\theta}) \quad (4-12)$$

式中, $\bar{\theta}$ 表示沿角度方向取平均, $L(\rho)$ 表示功率谱沿频率方向分布。

⑤.以首帧图像的功率谱沿着频率方向的分布作为基准, 其余图像的功率谱沿着频率方向的分布均与该基准进行比较。即:

$$C_n(\rho) = \frac{L_n(\rho)}{L_0(\rho)} \quad (4-13)$$

式中, L_0 代表基准功率谱沿频率方向分布, L_n 代表当前图像的功率谱沿频率方向分布, C_n 代表该图像的谱比曲线。

⑥.结合望远镜空间分辨率分析谱比结果, 即在望远镜空间分辨率映射到频率域的比较。大于1则优于基准结果, 反之则低于基准, 可选择最优的结果作为该序列的最佳像质图像。

最后, 理想的最佳焦点附近的图像质量变化可近似为高斯变化, 因此, 可根据该理论指导, 可进一步抑制在选帧过程中存在的误差, 结合上文分析得出最终的方法:

⑦.首先根据望远镜光学系统模型, 确定理论最佳焦点与其可调范围与步长, 避免调焦到其他像面(确定最佳焦面位置范围)。

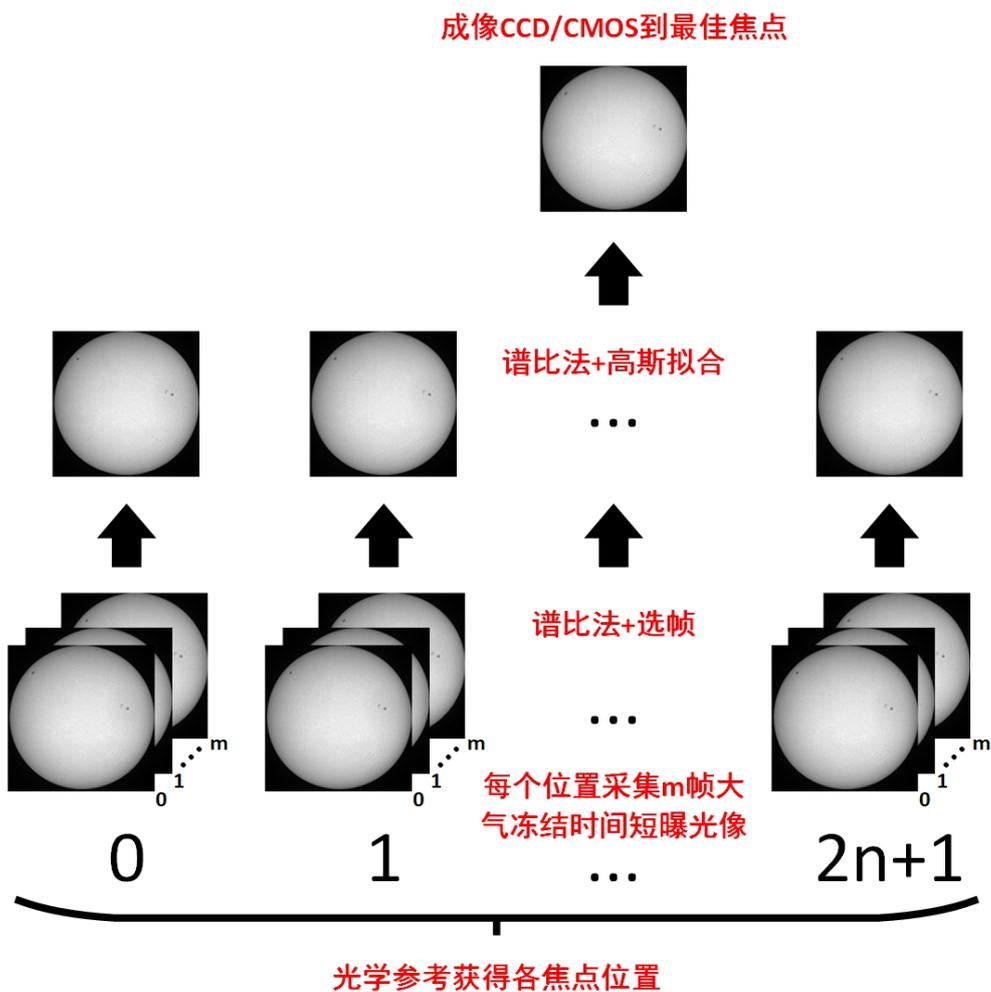


图 4-4 自动调焦过程

Figure 4-4 autofocus process

①.在同一焦点连续采集多帧大气冻结时间内的短曝光像，对该序列内的短曝光像利用谱比法进行比较获得该焦点的最佳像质图像作为焦点基准像。

②.对不同焦点均采用步骤1的方法获取不同焦点的基准像，作为调焦图像序列。

③.利用谱比法对调焦图像序列的图像进行比较，获得不同焦点在接近望远镜极限空间分辨率的比值结果作为调焦序列像质。

④.利用高斯拟合法对调焦序列像质进行拟合，再根据拟合函数计算为设备可调的最佳焦点。其拟合函数如下：

$$G(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} \quad (4-14)$$

式中， a ， b ， c 代表高斯函数的3个系数，也为高斯拟合参数， x 在本方法中代表不同焦点位置， $G(x)$ 表示谱比结果。

⑤.驱动调焦机构带动成像设备到最佳焦点。

4.3 自动曝光增益

自动曝光增益技术是一种可根据环境光照条件动态调整感光元件敏感度的关键手段，旨在确保在任何情境下都能捕捉到既不过暗也不过曝的理想亮度图像。在太阳观测领域中，由于太阳光强度受到地球轨道变化、天气状况如云层遮挡以及设备自身工作状态等多种因素的影响，保持观测数据的一致性和标准化至关重要。为此，除了自动调焦之外，自动曝光增益成为总控自主化不可或缺的核心功能。

随着技术的不断进步，自动曝光增益已发展为相机及各类光学观测设备的标准配置。但在面对特定且复杂的太阳观测任务时，常规的自动曝光增益机制可能无法完全满足多样化的场景需求，亟需进行针对性的优化与定制。

针对太阳观测的特殊性，当前面临的主要挑战在于：

1)要求自动曝光增益策略专注于日面局部区域的光线调整，而非全画面平均亮度；

2)在实施自动曝光的过程中，确保不会显著降低视频流的帧率，保持流畅连续的观测记录；

3)提供灵活的亮度范围设定和曝光增益调控区间，以使用户根据具体科研目标进行个性化配置。

基于上述要求，我们创新性地改良了传统的自动曝光增益算法，主要措施包括：

1)设定阈值筛选法，排除图像中的暗部背景，精准定位并仅针对日面明亮区域执行自动曝光增益；

2)引入跳帧策略，在不影响整体帧频的基础上平滑执行自动曝光过程，有效减轻因调整曝光带来的画面卡滞现象；

3)实现了可自由设定和调整的亮度范围以及曝光增益区间，赋予用户更为精细的操作权限。

通过这些有目的性的改进措施，我们成功地实现了对望远镜自动曝光增益功能的精细化控制，使之能更好地服务于各种复杂多变的太阳观测场景。

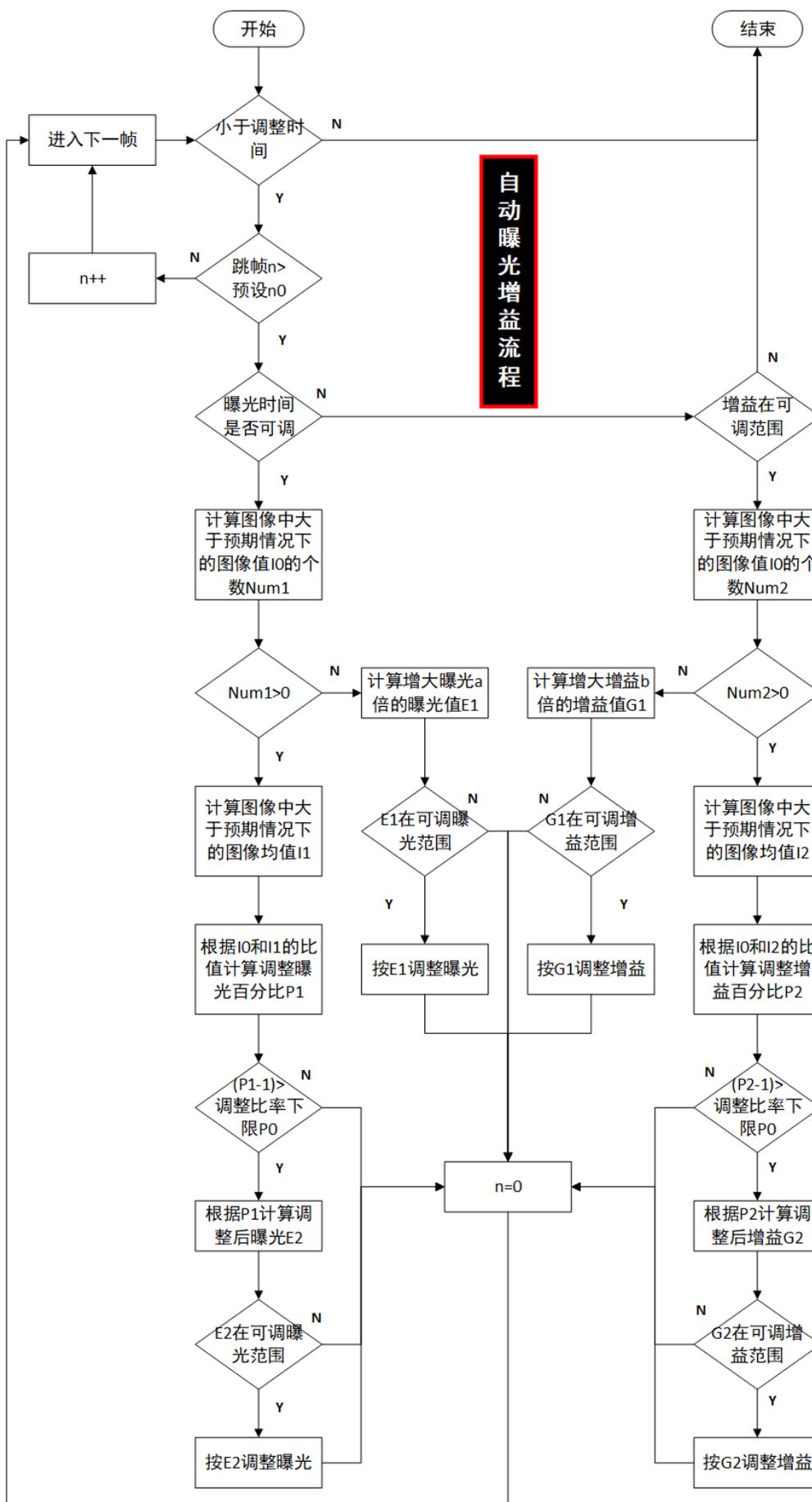


图 4-5 自动曝光增益流程

Figure 4-5 Automatic exposure and gain process

4.4 云遮挡判断

在太阳望远镜的智能化观测过程中，对云遮挡现象的精确识别与应对具有至关重要的地位。云层遮挡与否，直接决定了总控系统能否按照原定的观测策略有效执行任务。为了适应多变的天气条件，特别是在存在云遮挡的情况下，观测总控系统依托于精密的环境感知子系统，其中包含了多项关键设备和技术手段。

首先，全景相机作为一种重要的云量监测工具，它可以实时捕捉并分析宽广视野下的云层分布和厚度变化，为总控系统提供直观的云量信息。与此同时，太阳辐照计或光照计则用于精确测定接收到的太阳辐射强度，这两者的数据结合，能使总控系统准确把握当前的气象条件，据此动态调整曝光时间、增益等参数，确保在云层遮挡造成光照强度降低的情况下，依然能够获取到尽可能清晰且有用的观测数据。

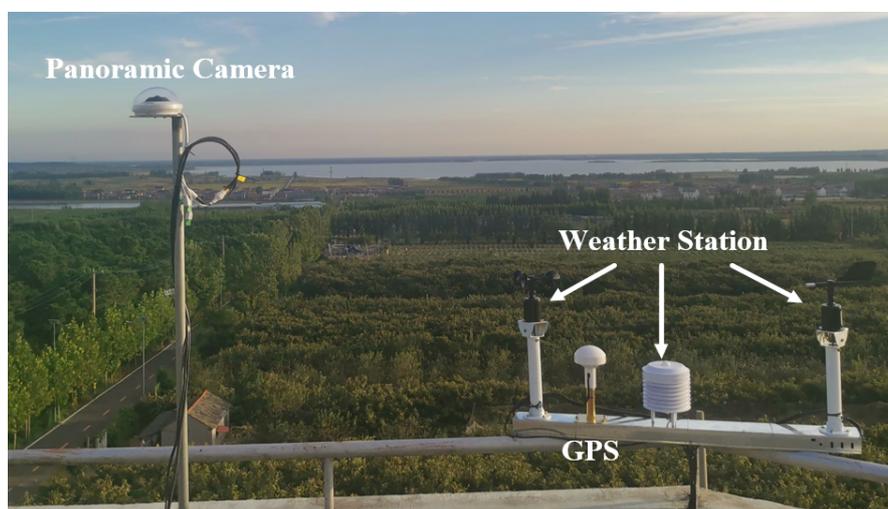


图 4-6 SFMM项目中的气象站和全景相机

Figure 4-6 Meteorological stations and panoramic cameras in the SFMM project

此外，借助前沿的云检测算法和实时图像处理技术，总控系统能够进一步预见和规避云层可能带来的遮挡风险。例如，通过算法预测未来一段时间内的云层动态，总控系统可在观测计划阶段合理安排观测窗口，尽量避开影响严重的云遮挡时段，从而最大化观测效率和数据质量(Yang et al., 2012; Urquhart et al., 2015; 王依人等, 2023)。

最后，记录下来的云遮挡事件不仅可以作为衡量观测数据有效性的参照标准，还能帮助天文学家在后期的数据筛选和分析过程中，判断哪些数据受到了云遮挡的影响，哪些特殊现象可能是由于云层遮挡造成的。这一判断对于排除干扰因素、确保科研成果的准确性具有不可忽视的价值。通过这样的智能策略，太阳望远镜得以在云遮挡等复杂环境条件下，始终保持高水准的观测能力和科学产出。

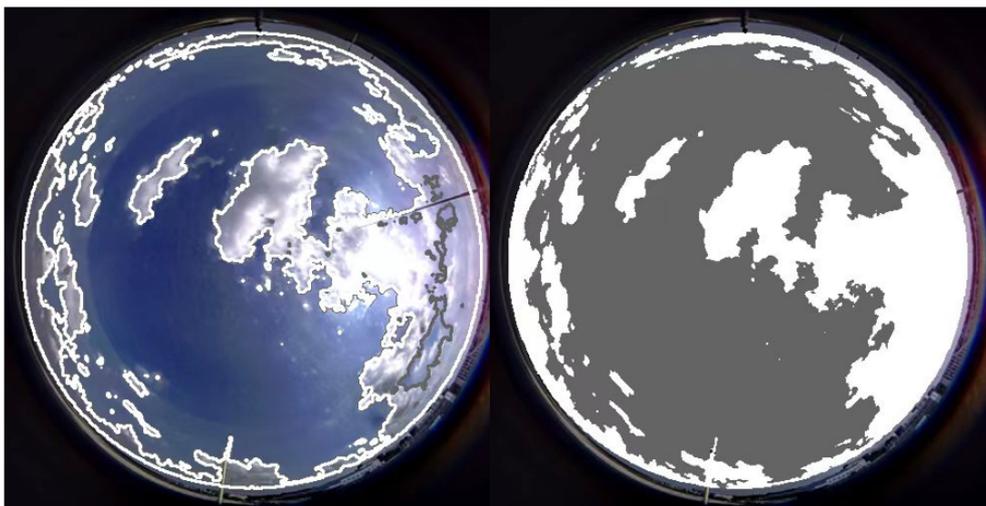


图 4-7 云量识别效果图

Figure 4-7 Cloud recognition rendering

4.5 数据压缩

AIMS总控系统在观测过程中会产生诸多科学数据，定标数据，仪器数据，操作日志，环境数据等，其中尤以科学数据最甚。因此，针对该类数据开展数据压缩研究即可提高本地存储数据量，同时减轻远程传输的带宽压力。

太阳探测中高性能的数据压缩的发展可概括为早期有损阶段和近年来无损阶段。在空间太阳探测领域的早期阶段，受限于技术手段，在权衡有限的带宽、海量的数据传输以及可容忍的数据失真之后，选择了更高压缩比的有损压缩，例如太阳过渡区与日冕探测器（Transition Region and Coronal Explorer, TRACE）、太阳和日球天文台（Solar and Heliospheric Observatory, SOHO）、太阳动力学天文台（Solar Dynamics Observatory, SDO）、日出卫星（Hinode）使用高质量有损 JPEG 压缩减少数据传输带宽依赖(Fischer et al., 2017)。近年来，存储与传输技术发展迅速，为无损压缩的实现提供了可能。就当前空间无损压缩方案而言，多数载荷基于Lossless JPEG的图像无损压缩标准编码或借鉴空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS)数据压缩工作组制定的无损数据压缩标准设计适用于自身的算法。其中，前者又分为了联合图像专家组2000编码（Joint Photographic Experts Group 2000, JPEG2000）(Itu-T, 2002)和联合图像专家组无损编码（Joint Photographic Experts Group Lossless）JPEG-LS两个不同标准，如全日面矢量磁像仪（the Full-disk MagnetoGraph, FMG）即采用JPEG2000的无损压缩方案来减少数据大小完成传输(Gan et al., 2019; Deng et al., 2019; Gan et al., 2023)；后者则针对图像采用二维离散小波变换+位平面编码的图像无损压缩编码[9]，针对任意数据流采用哥伦布莱斯编码(Golomb, 1966; Merhav et al., 1998; Rice et al., 2003)。此前，刘粤等人通过研究发现，通用的图像压缩方法针对全日面磁场图像的最大无损压缩比可达2.053，而经过哥伦布莱斯编码后的方法在2.084，表明在全日面磁场图像的无损压缩方向上后者更优。

上述方法主要采用了不同编码方法压缩数据，却并未剔除数据的先验知识的冗余，而这可大幅提升数据压缩效果。而剔除太阳磁场和多普勒速度场数据的背景信息、连续帧之间的特征不变性和其他形式的先验知识的冗余，可大幅提升了数据压缩效果：

0.针对8-10的有效数据均在一个圆的范围内，可选择适当模板提取日面信息，从而减少总体的数据量。

设8-10科学数据图像中最大内切圆的半径为 R_{Cut} ，则提取的圆大小 S_{Cut} 为 πR_{Cut}^2 ，原始方形图像的边长为 $2R_{\text{Cut}}$ ，方形图像的大小 S_{Image} 为 $(2R_{\text{Cut}})^2$ 。计算压缩比 $\text{Ratio}_{\text{Cut}}$ 如下所示：

$$\text{Ratio}_{\text{Cut}} = \frac{1}{\text{Rate}_{\text{Cut}}} = \frac{S_{\text{Image}}}{S_{\text{Cut}}} = \frac{(2R_{\text{Cut}})^2}{\pi R_{\text{Cut}}^2} = \frac{4}{\pi} \quad (4-15)$$

则原始数据减少了约22.46%的数据，大幅提升了数据压缩效率。

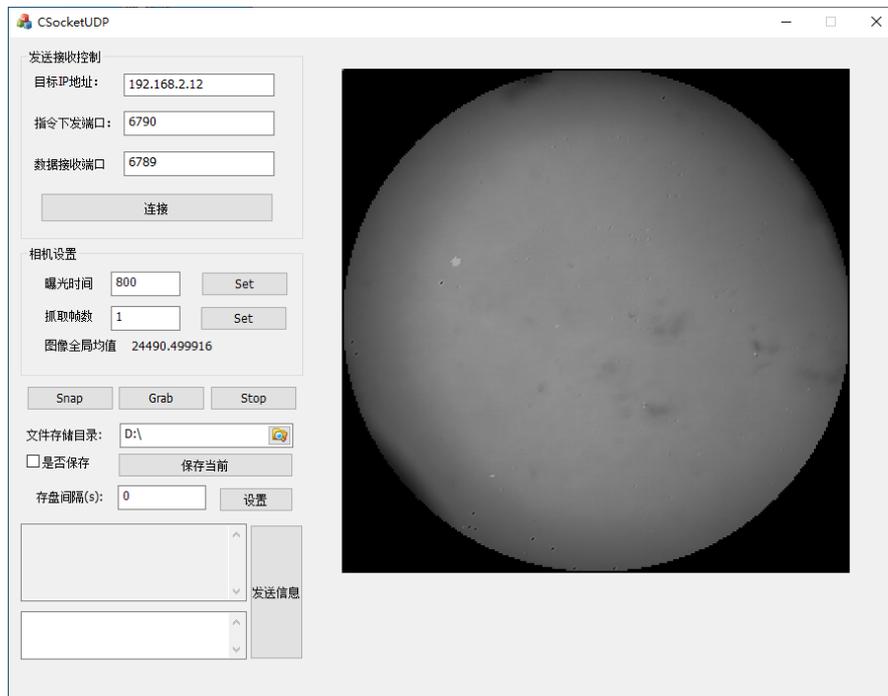


图 4-8 8-10波段的UI及有效数据分布

Figure 4-8 UI and effective data distribution in the 8-10 band

①针对磁场计算时，所需两帧数据差分结果强度较弱特点，我们可仅保留差分结果而获得更好压缩效果。

②针对同组矢量磁场数据，不同偏振参量计算磁场所需的两帧数据之和是近似的，本文即可依据该特性进一步提升压缩效果：

$$P(I+Q) + P(I-Q) \approx P(I+U) + P(I-U) \approx P(I+V) + P(I-V) \quad (4-16)$$

其中, P 代表图像的灰度强度, $I \pm S$, ($S = Q, U, V$)表示测量过程中的不同偏振状态。

③针对速度场数据, 不同波长的同偏振参量数据在大尺度上存在强度变化.依据这一特性, 我们可设计更好的压缩方法, 从而获得更高压缩效果。

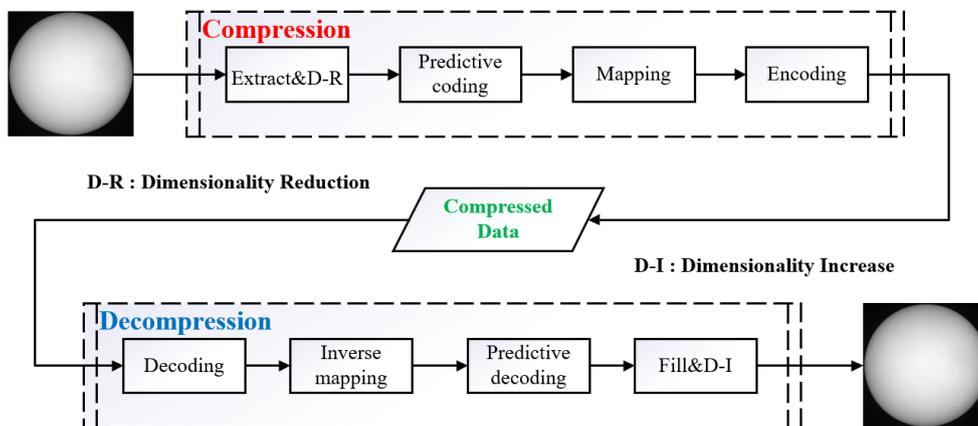


图 4-9 全日面矢量磁场数据的无损压缩流程

Figure 4-9 Lossless compression process for full-disk solar vector magnetic field data

最终, 根据上述流程, 获得剔除先验知识的无损压缩数据。该方法在MHI载荷的预研压缩算法中进行了实际验证, 实验选取了一组全日面磁场和多普勒速度场数据, 并分别采用了不同方法进行无损压缩测试, 从下图中可以看出, 本文提出的方法的数据压缩比(源数据大小与压缩后数据大小的比值)远胜其他方法, 实现数据的高效存储和传输(Tong et al., 2024)。

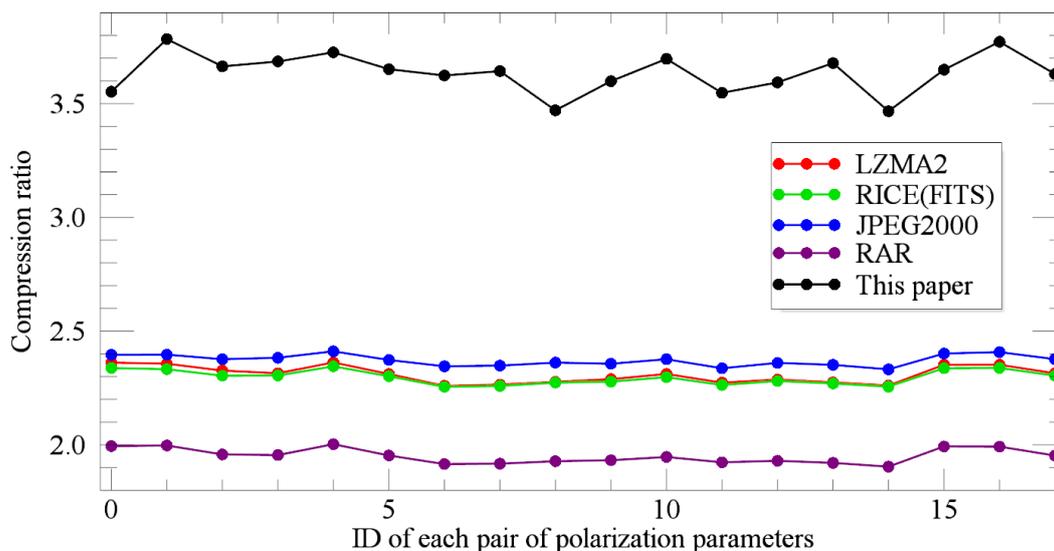


图 4-10 数据无损压缩方法的对比结果

Figure 4-10 Comparison of data lossless compression methods

4.6 小结

在本章中，我们详细探讨了AIMS总控系统在推进实现全面自主化观测过程中遭遇的若干关键挑战及其应对策略。具体涵盖以下几点：

首先，针对指向跟踪的精度问题，我们采用了一种创新的复合误差模型，结合定天区特性与球谐函数分析，实现对望远镜自动指向跟踪的精准控制与校正。

其次，在自动调焦技术方面，我们引入了高斯拟合与选帧技术的有机结合，以及谱比法的运用，旨在确保在各种观测条件下实现快速且准确的自动调焦，以获得清晰的图像质量。

接着，针对太阳观测过程中因光照强度变化和云遮挡所带来的曝光难题，我们设计了一种专门针对太阳选区的定制化自动曝光增益策略，并融入了跳帧技术，以确保在复杂光照环境下也能实现平滑、高效的曝光控制。

同时，我们还研发了一套基于实时气象条件监测与先进云识别算法的云遮挡判断系统，能够及时识别并应对云层对观测的影响，优化观测计划，确保观测数据的连续性和完整性。

最后，在数据处理阶段，我们采用了一种基于先验知识的剔除方法，结合高效的无损数据压缩技术，有效去除因云遮挡或其他干扰因素导致的无效数据，进一步提升了观测数据的质量和利用率。

综上所述，通过解决上述一系列技术难点，AIMS总控系统成功实现了从指向跟踪、自动调焦、曝光控制到数据处理的全流程自主化观测，大大提升了系统的稳定性和观测效率。

第5章 AIMS自主化总控系统的应用

目前，AIMS望远镜正处于紧张有序的调试周期之中，如同国内外众多大型望远镜的发展历程一样，其必经之路涵盖了调试阶段、试观测阶段以及正式投入使用的实际观测阶段，每个阶段的历时均可能长达数年之久。调试阶段尤为关键，这是一个反复集成并优化望远镜各个组件的过程，属于持续集成的核心阶段。因此，为了验证AIMS总控系统在不同层面的设计理念，我们分别在AIMS、温泉望远镜以及SFMM三台望远镜上进行了实践：

对于仍处于持续集成调试阶段的AIMS，我们结合实际观测需求，对已集成的部件进行了深入分析，并成功实现了Level 1级别的偏振定标自动化以及有条件进行的FTIR科学观测和定标自动化。

针对温泉望远镜固定业务流程的要求，我们简化了AIMS的系统框架，并沿用了相同的软件架构，使其成功实现了Level 2级别的部分自动化观测。

而对于追求更高自主化观测水平的SFMM，我们仅精简了AIMS系统框架中的模型演进系统部分，其余子系统均予以保留并实现落地，同样采用了同一软件架构，从而成功实现了Level 3级别的有条件的自主化观测。

至于更高级别的Level 4级自主化，考虑到温泉望远镜和SFMM的观测任务更倾向于遵循固定流程，目前尚需等待AIMS的进一步整体集成完善。届时，我们将依据既定的控制策略，部署相应的观测计划。

待AIMS步入试观测阶段后，总控系统将通过持续收集和分析各种观测数据，并结合最新的机器学习技术和多模态大模型，有望实现Level 5级完全智能化观测。

5.1 总控系统在AIMS上的部分应用

当前，AIMS系统正处在重要的调试阶段，其间总控平台虽仅完成了部分系统的整合工作，但即便如此，这一阶段依然承载了密集而丰富的观测任务实践。鉴于此，我们对当前存在较高操作重复性的观测任务展开了深入剖析，通过对这些任务进行细致的时间序列步骤梳理，提炼出它们的核心功能模块和关键状态参数，进而成功地构建了一系列无需人工实时参与的自动化观测流程。这一举措不仅显著提高了当前调试阶段的观测效率，同时也有力地助推了整体调试进程。

5.1.1 当前已集成部件

当前集成的硬件组件包括：圆顶内部的主镜自动保护、热光阑控制、六杆结构驱动，以及圆顶内的偏振定标单元1；在垂直引光部分，集成了偏振定标单元2；光学平台上集成了偏振分析器、偏振定标点源探测器，8至10微米宽带成

像观测设备，以及傅里叶变换红外光谱（FTIR）相关控制。

根据AIMS总控系统的设计蓝图，当前的设备控制子系统尚不健全，部分功能仍然需要人工干预，未能实现全自动化操作。

与此同时，自主化支撑子系统各部分进展不一：能源监控子系统有待能源设备开放更多控制接口，但由于供应商倾向在设备进入试运行并趋于稳定后再纳入总控系统，故这部分工作暂时搁置；环境感知子系统受限于部分硬件设施还在部署阶段，因而暂未能开发并融入总控；同样，由于各个子系统尚不完备，无法全面实现自主观测或对外观测功能，因此，模型演化子系统和观测交互子系统的开发也被迫推迟。相比之下，通信控制子系统得益于其灵活性，已成功并入当前的自主化支撑子系统。

最后，在中枢决策子系统方面，由于当前各设备控制功能及决策条件尚不齐全，其开发和部署工作须待后续完善。总结当前状态，总控系统仅能在有限的子系统层级实现部分功能的自动化操作，整体功能的完全实现仍需后续各模块的不断集成与优化。

5.1.2 偏振定标的自动化实现

在AIMS系统中，偏振模块扮演着至关重要的角色，它由偏振定标单元和偏振分析器这两个关键组件构成，分别肩负着对AIMS望远镜进行偏振校准和偏振测量的任务。偏振定标单元由两部分独立的偏振定标子单元以及一个点源探测器整合而成。其中一个偏振定标子单元巧妙地安置在接近格里高利焦点的位置，而另一个则嵌置于M7组件与消旋镜之间的光路中。值得注意的是，这两个偏振定标子单元并不会同时启用，且仅在望远镜进行必要偏振定标时才会适时地插入光路进行工作。在望远镜进行日常常规观测时，偏振定标单元会被精准地移出光路以避免干扰正常观测过程(Hou, 2019)。

偏振分析器则是AIMS望远镜实现精确偏振测量的核心元素，在对太阳磁场进行测量或偏振定标时，它会被适当地嵌入到光路结构中。偏振分析器通过解析入射光的偏振特性，以实现太阳磁场属性的精密测定。通过这一系列精密且协调的操作，AIMS望远镜得以有效地捕捉并解析太阳光的偏振信息，从而揭示出隐藏在光谱背后的太阳磁场奥秘。

偏振定标子单元

偏振定标子单元包含两个PI电机，分别命名为P和WP。定标过程中，要求两个PI电机可以回机械零位、回光学零位，可以分别以一定步长步进式正反旋转，可以显示当前的电机位置（相对于机械零位）。其中要求：

- ①. 光学零位可以手动输入和修改；
- ②. 旋转步长可以手动输入和修改；
- ③. 正反向旋转可以手动选择正向或反向旋转；
- ④. 当前位置显示两个PI电机可以分别显示各自的当前位置。

偏振分析器

偏振分析器同样包含两个PI电机，分别命名为QWP和HWP。定标或观测过程中，要求两个PI电机可以回机械零位、回光学零位，可以分别以一定步长步进式正反旋转，可以显示当前的电机位置（相对于机械零位）。其中要求：

- ①. 光学零位可以手动输入和修改；
- ②. 旋转步长可以手动输入和修改；
- ③. 正反向旋转可以手动选择正向或反向旋转；
- ④. 当前位置显示两个PI电机可以分别显示各自的当前位置。

偏振点源探测器

偏振点源探测器为一个构造复杂的点源探测器，在定标时，仅需包含采集功能即可：

- ①.开始采集
- ②.单次抓取数据
- ③.叠加抓取数据
- ④.结束采集

偏振定标的自动化实现

根据上述功能列表，我们将这一系列功能映射为可供调取的功能函数，并通过相关状态参数准确描述其完成状态，然后将功能函数和状态参数整合为一系列功能包，自动化执行序列开始后，通过不断调取功能包的功能函数执行操作，然后通过功能包里对应的状态参数确认执行状态，一旦状态参数确认为完成状态，则系统执行下一个功能包，如此往复直至完成整个任务序列。



图 5-1 AIMS偏振定标软件

Figure 5-1 Polarization calibration software for AIMS

偏振定标软件启动后可独立运行，亦可通过TCP连接作为下属模块连接入ICS，保证了系统的去中心化。当独立运行时首先进行设备库初始化，随后即可扫描可用电机设备，通过AIMS观测总控流程图可以看出系统存在多个偏振定标单元，但有且只有1个会在定标时工作，因此需要在扫描的设备中选择需要的电机

进行连接。而对于点源探测器则需打开相关串口并开始采集并抓取数据后获得数据。连接后系统读入电机的当前位置，若需操作偏振状态可通过软件中央的控制按钮操作，若需手动修改设定的各个偏振态初始值，可通过修改按钮逐个修改。修改完毕后再次点击该按钮（此时该按钮文本已显示为保存参数）保存参数到本地文件中。

5.1.3 有条件的FTIR科学和定标自动化观测

尽管AIMS总控系统仍在持续进行组件的集成与优化，但在某些特定操作情境下，针对大量重复性的观测任务，我们已经着手进行适度的自动化改进，旨在减轻多名观测员的手动操作负担，让他们能更专注于其他重要任务。

当望远镜处于自动跟踪状态时，主镜保护帘处于打开，热光阑保护盖打开，其他焦面仪器处于光学零位，FTIR-定点/视场扫描-偏振/非偏振观测包含大量重复操作：

FTIR定点非偏振观测：视场扫描电机固定于预设位置，FTIR在此状态下进行数据采集。

FTIR定点偏振观测：视场扫描电机保持特定位置不变，偏振分析器的双电机则循环切换不同的偏振态，FTIR依据当前偏振态的不同收集对应数据。

FTIR视场扫描非偏振观测：视场扫描电机按照预设的等间距连续运动，每当电机运动至下一位置时，FTIR进行一次数据采集。

FTIR视场扫描偏振观测：视场扫描电机按照设定进行等间距运动，与此同时，偏振分析器的双电机也在不断改变偏振状态。无论视场扫描电机还是偏振分析器电机中的任意一个动作后，FTIR随即进行一次数据采集。

因此，我们针对这一连串操作流程设计了一套有针对性的FTIR自动化观测方案，将上述功能操作转化为一系列可调用的功能函数，并通过精确的状态参数描述每一功能的执行状态。随后，我们将这些功能函数与对应状态参数打包为功能包，一旦自动化执行序列启动，系统便会依序调用功能包中的功能函数执行操作，并通过检查功能包内对应的状态参数确认操作的完成情况。当状态参数确认已完成，系统将执行下一个功能包，直至整套任务序列顺利完成。

为了实时监测并定位可能发生的故障，我们在自动化执行过程中同步记录了各个状态参数和执行功能的相关信息，并结合上述详尽的观测序列示意图，有力地保障了整个自动化过程的稳定可靠运行。

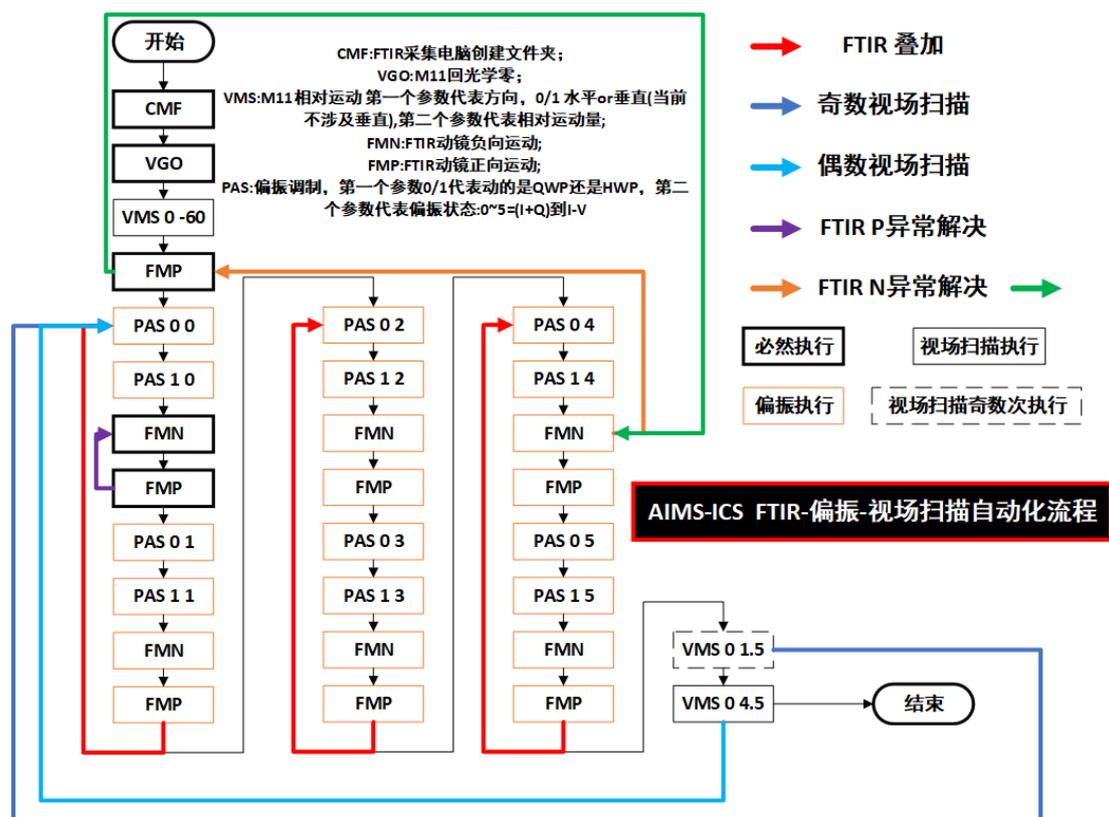


图 5-2 AIMS科学和定标自动化流程

Figure 5-2 The Scientific and Calibration Automation Process of AIMS

5.2 总控系统在温泉太阳磁场望远镜的自动化-远程化应用

新疆温泉太阳磁场望远镜又称新疆温泉全日面矢量磁场望远镜，是中国气象局《气象监测与灾害预警工程》项目支持下在新疆维吾尔自治区博尔塔拉蒙古自治州温泉县部署的全日面太阳磁场望远镜。该望远镜是我国第二台太阳磁场望远镜，2013年9月在温泉气象局落地正式运行，该望远镜开展太阳磁场的常规观测业务、数据传输以及为太阳磁场研究和太阳活动的监测与预报提供长期可靠的观测资料，为国家空间天气预报预警提供数据支撑。

多年来，温泉望远镜产出不少高价值的产品，为我国空间天气预报起到突出作用。然而，随着设备整体性能下降，电子设备老化等，望远镜的数据质量大不如前，无法为空间天气预报起到参考作用，需要进行升级改造。因此，其于2022-2023年间进行了升级改造，以助其实现更长久更自动的全日面矢量磁场观测，助力空间天气预报的精准预报。

此次改造的重点除了更换老化的器件，还提出了需要建立一套自动化观测流程。由于不同的观测员在观测经验上存在部分差异，且操作顺序略有不同，导致同一天气下观测的数据存在较大不同，而这种操作逻辑的不同导致的数据质量不统一，则给后期空间天气预报带来极大困扰。为了避免该问题的出现，本次改造设计了温泉望远镜总控系统实现全套的自动化。

总控系统依托现有电子学设计实现，因此首先需要对现有器件进行建模，

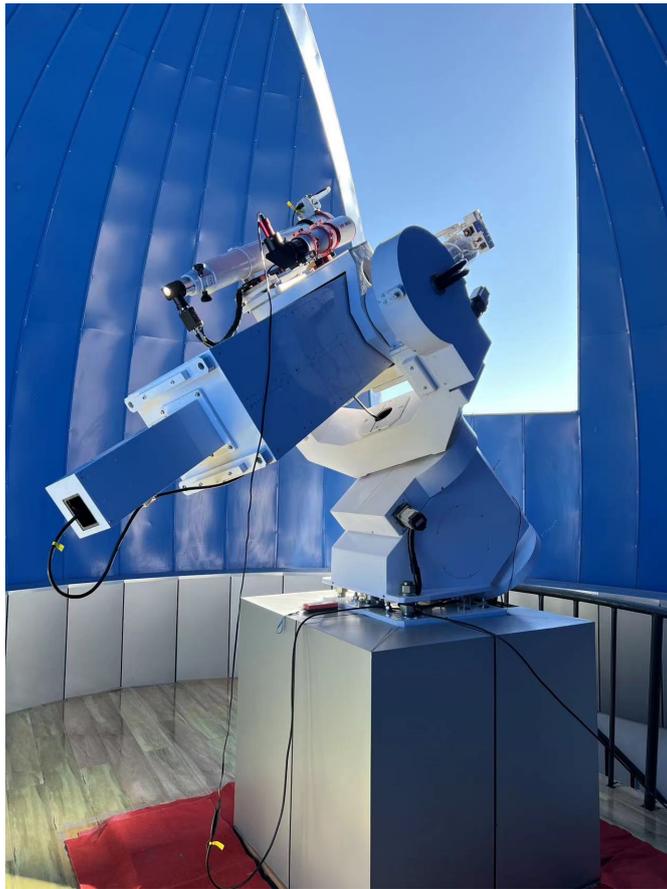


图 5-3 温泉太阳磁场望远镜

Figure 5-3 WenQuan's solar magnetic field telescope

依托该模型构建系统框架，在充分考虑系统耦合性前提下，设计软件架构以及相应的软件协议，对关键的系统状态构建状态机，依靠该状态机实现对系统的闭环控制，最后在考虑系统安全前提下，记录当日观测的所有操作和操作的结果等。

5.2.1 建模与观测流程

温泉全日面矢量磁场望远镜共分为用于磁场观测的主镜，用于实现望远镜闭环跟踪的导行镜，实现指向跟踪的赤道仪以及必要的外围电控设备。整个望远镜包含的设备如下图：

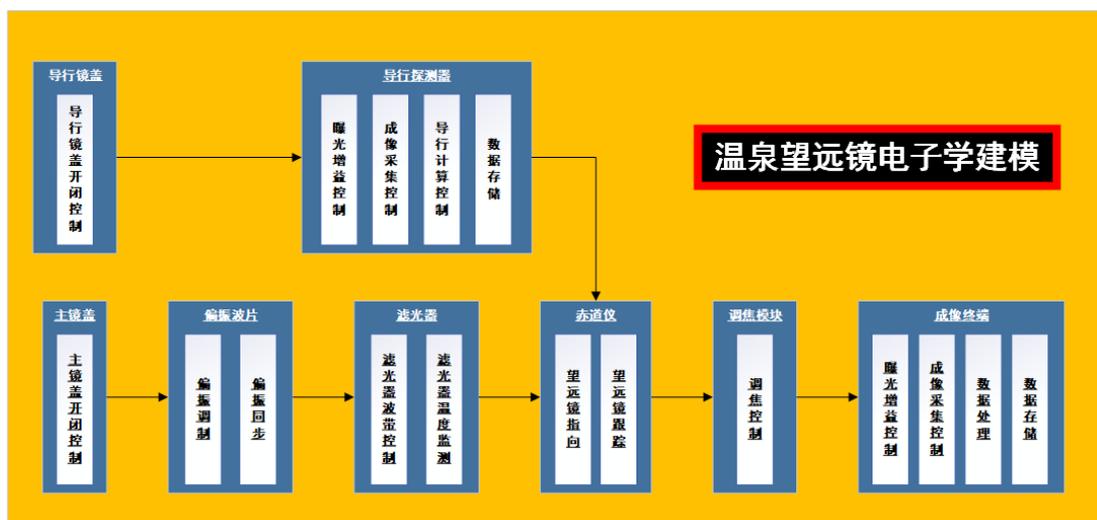


图 5-4 温泉太阳磁场望远镜建模

Figure 5-4 Modeling of WenQuan's solar magnetic field telescope

导行镜中主要包含：导行镜盖开闭控制，导行探测器的曝光增益控制、成像采集控制、导行计算控制以及数据存储。

主镜中主要包括：主镜盖的开闭控制，偏振波片的调制与同步，滤光器的波带控制和温度监测，赤道仪的指向和跟踪控制，调焦模块的调焦控制，成像终端的曝光增益控制、成像采集控制、数据处理以及数据存储。

根据温泉望远镜建模结果，结合其观测需求，我们构建了其开机流程-常规观测流程-关机流程，如下图：

5.2.2 系统框架设计

根据上述温泉望远镜的建模以及其实际依托硬件，参考AIMS总控的系统框架，我们将系统划分为四个子单元，分别是导行计算单元，轴系控制单元，焦面控制单元以及观测控制单元。其中由于主镜盖控制端依托与偏振模块和调焦模块为同一控制板，因此划归到焦面系统。偏振同步与采集协同，因此划归到观测控制端。

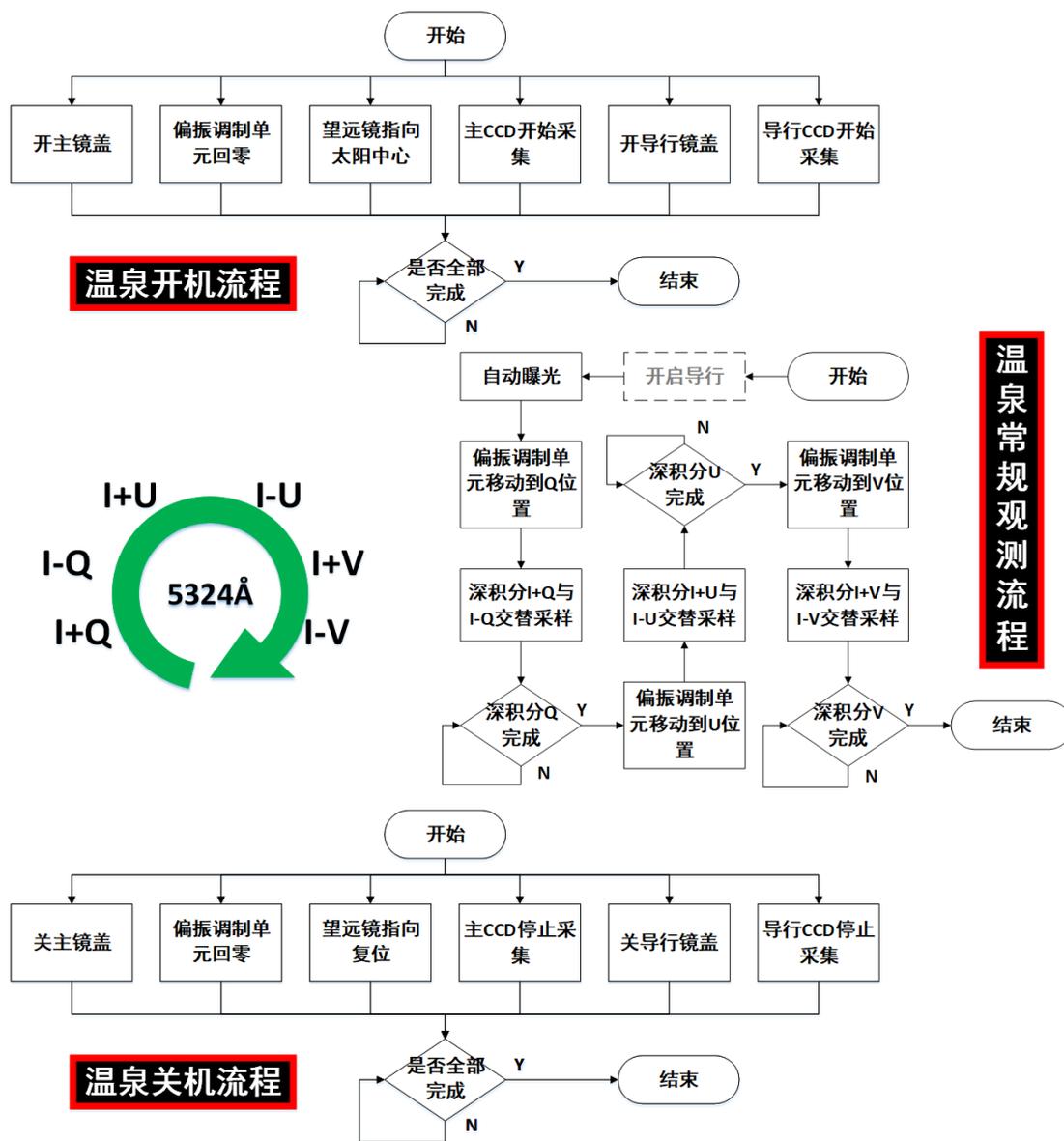


图 5-5 温泉太阳磁场望远镜观测流程

Figure 5-5 Observation process of WenQuan's solar magnetic field telescope

其中，导行计算单元分为导行镜盖开闭，导行采集控制，自动曝光控制，导行计算控制，数据存储。

轴系控制单元分为望远镜指向，望远镜跟踪，手动控制，导行调整，平暗场指向。

焦面控制单元分为主镜盖开闭，偏振调制，滤光器波带控制，滤光器温度监测，调焦控制。

观测控制单元分为采集同步，自动曝光增益，焦距计算，磁场计算，数据存储。

5.2.3 软件架构设计

整个温泉望远镜系统是高度耦合内聚的系统，如果依据该特性设计一个覆盖所有功能的系统必然极其臃肿，不仅系统调度是一大难题，而且当某个非关键模块出现故障时，整个系统都会宕机，这极其不符合控制理论的。

为了实现系统的解耦，温泉总控系统参考AIMS总控系统框架，采用微服务架构，利用各个子单元与独立的总控系统通信实现控制。在无总控系统时，各个子单元仍可独立运行，该模式符合原有的观测习惯，须观测员根据经验实行观测任务计划；当启动总控系统后，各个子单元与总控系统实现通信，总控系统负责观测任务计划的调配，实现观测的自动化。

5.2.4 通信协议设计

温泉观测总控系统通信协议分两层，一层为子单元与各个硬件实体的通信，通信内容为状态/指令/数据流，其中导行、轴系、焦面与底层的通信方式为串口和网口，而观测控制单元则包括串口，I/O，以及CamLink通信。另一层为各个子单元与总控制系统的通信，他们以TCP/IP方式连接实现通信，通信内容为状态/指令，详细如下图：

其中上层的TCP/IP采用AIMS总控系统相同的通信协议和通信控制子系统，实现上层系统稳定可靠的连接。

5.2.5 当前结果

根据上述设计，我们补全了部分仪器的状态，实现了闭环控制，加之自动曝光增益、自动调焦等关键技术支持，已基本完成温泉总控系统Level 2级的自动化运行，观测员当前仅需判断环境是否可以执行观测，然后再硬件系统完备且开启情况下，启动相应软件，再点击总控制系统的开机，开启整个系统，待系统进入待命中，即可开启观测，日落时分点击关机即可，待状态更新为已关机，即可关闭硬件系统。当需要调焦时，在系统开机后，点击自动调焦即可。另外，也可根据语序设定特定时间的开关机以及相应的观测计划，当启动执行后，温泉总控系统根据观测序列依次执行观测序列任务。

在应用了自动指向跟踪、导行优化、自动曝光增益、自动调焦等技术后，

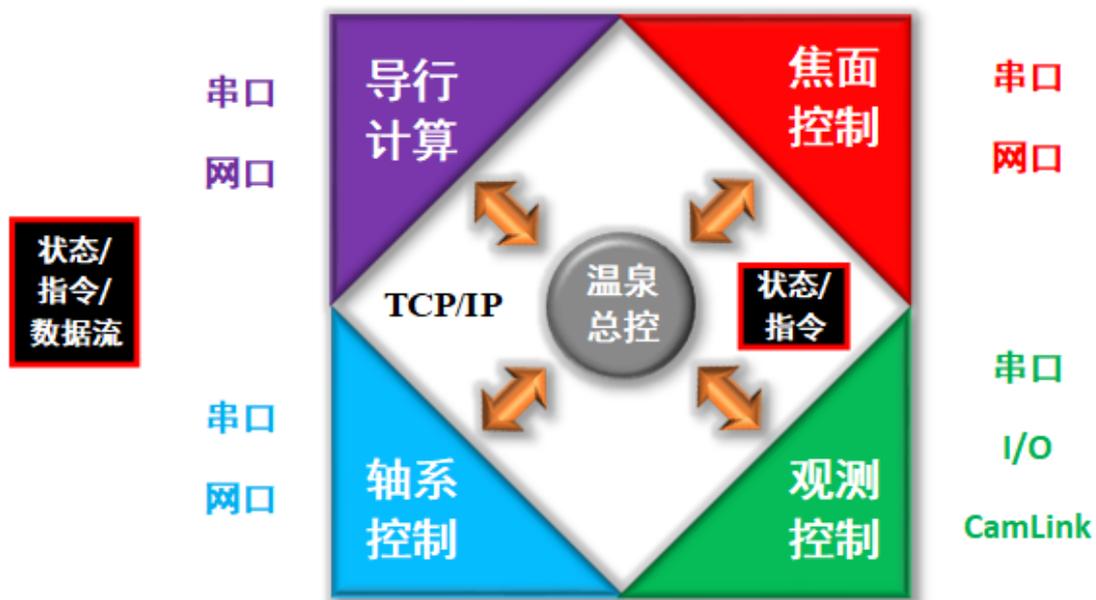
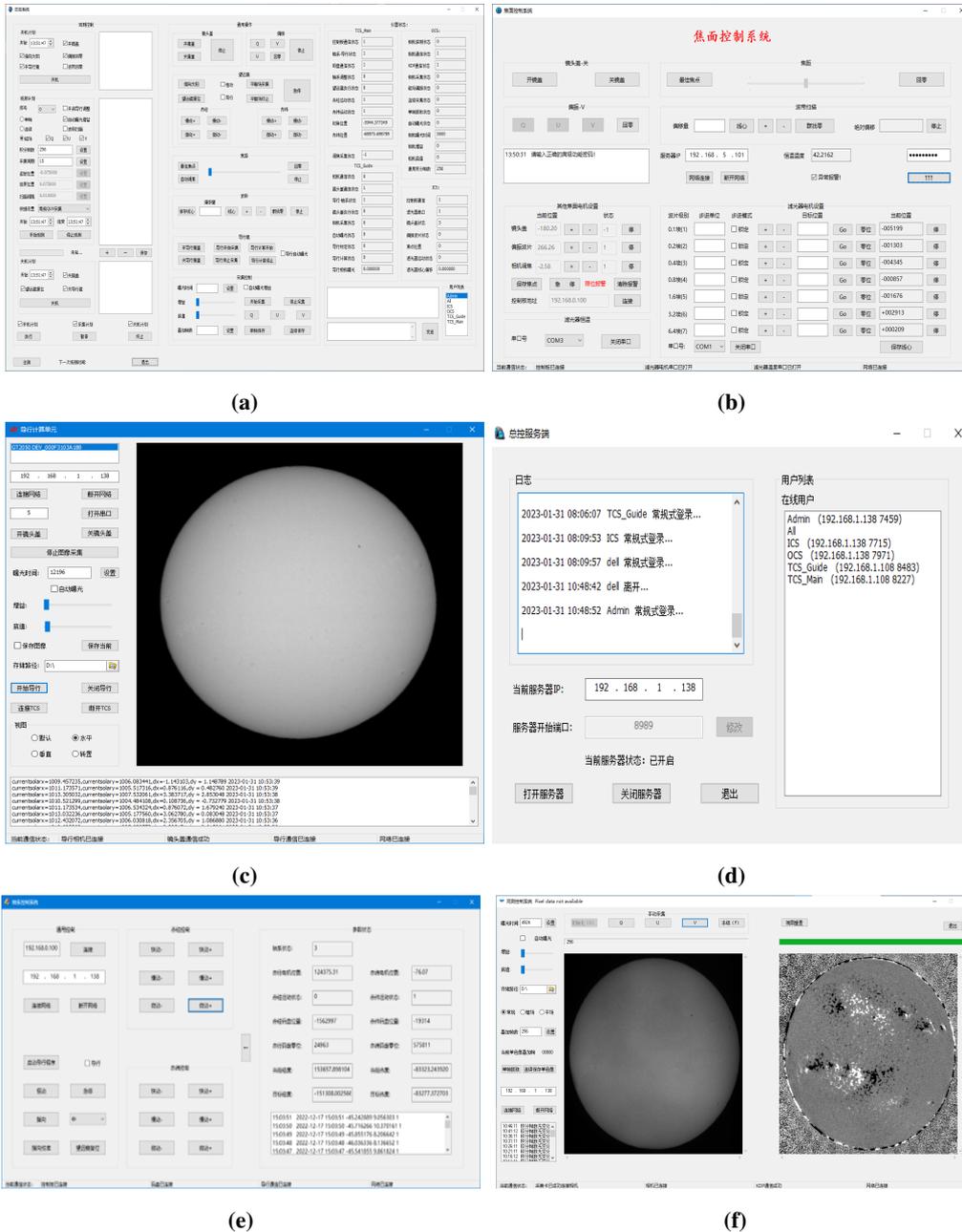


图 5-6 温泉太阳磁场望远镜通信模型

Figure 5-6 Communication model of WenQuan's solar magnetic field telescope

目前整套系统已在新疆温泉气象局稳定运行1年多，无异常情况发生，数据产出稳定可靠，且对初级观测员操作友好，符合项目预期。



(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

图 5-7 温泉总控系统

Figure 5-7 The MCS of WenQuan

5.3 总控系统在子午全日面矢量磁像仪SFMM的自主化应用

随着我国航天和空间技术的发展，自主的空间环境保障成为了日益迫切的需求。为此，我国科学家提出了“子午工程”构想，该构想利用东经120°子午线和北纬30°线附近布局多种探测设备实现空间环境的初步监测，已于2012年完成I期的建设。为了实现更全面的空间环境监测，2019年我国又启动了子午工程II期。子午工程II期沿东经100°和120°、北纬30°和40°布局31个台站、近300台监测设备，组成空间环境地基综合监测网。



图 5-8 全日面矢量磁像仪

Figure 5-8 Solar Full-disk Multi-layer Magnetograph

在子午工程II期中，对太阳活动的监测，太阳爆发前兆观测，太阳爆发事件的跟踪观测尤为重要。为了实现这些关键监测，中国科学院国家天文台承担研制了“全日面矢量磁像仪”（Solar Full-disk Multi-layer Magnetograph, SFMM）并于2023年10月部署于江苏省连云港市赣榆区。SFMM通过四条谱线在两套终端实现太阳光球和色球的窄带单色像、全日面磁场及速度场观测（光球线Fe I 5324.19 Å、色球线H β 4861.34 Å、色球线H α 6562.8 Å 和色球线Ca II 8542.1 Å）。利用快速成谱成像的特点，SFMM在极短时间内从不同波段的科学数据映射并重构太阳立体化的磁场、流场分布及演化信息，实现对太阳磁场与磁活动多维度的监测。

SFMM具备多波段快速切换的观测流程，需要高效的逻辑判断与复杂的系统调度才能实现，同时对系统的业务化运行具有极高要求。这些要求整个系统具有较高的稳定性，自动化程度以及统一的运行标准，从而保证数据产品的科学可靠。其中，高稳定性是指仪器能够较稳定运行并记录运行状态，发生故障及时记录并能快速修复；高自动化需求是指望远镜能够依照事先制定的观测流程自动运行，无需人工干预；而统一的运行标准是指望远镜的各项功能或动作均可量化，并在自动运行过程中其偏差范围始终在制定标准范围内。而这些目标实现离不开总控系统的控制调度，在包含各设备控制的同时，兼具观测自动运行，以及统一标准的执行。

5.3.1 SFMM建模及观测流程

SFMM的多波段成像成谱观测涉及诸多硬件的协调配合，这些硬件彼此联系紧密，职能各不相同，且观测时自身状态不断变化。因此，需要根据职能对他们进行解耦分类，以便构建低复杂度的总控系统；同时理清各硬件在观测时的状态变化，为总控系统协调调度提供理论基础。

根据SFMM各硬件的职能的分类，并依据空间部分整合，其可概括为4个部分：望远镜部分，室外部分，赤道仪部分以及观测室部分，见图1，图中除几何光学部件，其余均在总控系统控制范围内。

①. 望远镜部分是整个硬件系统的核心，由三个通道构成：光球通道、色球通道和导行通道。具体为：

1). 磁场通道包括镜盖1、散射片、偏振定标机构、几何光学元件1、偏振分析器、滤光器1、调焦机构1以及终端采集设备1。其主要实现对光球线Fe I 5324.19 Å的单色像、矢量磁场、多普勒速度场以及色球线H β 4861.34 Å的单色像、纵向磁场、多普勒速度场测量。

2). 色球通道包含镜盖2、散射片、几何光学部件2、滤光器2、调焦机构2和终端采集设备2，它专注于对色球线H α 6562.8 Å和色球线Ca II 8542.1 Å的单色像采集，并完成多普勒速度场的测量。

3). 导行通道整合了成像光学3与终端采集装置3，其主要功能在于为望远镜提供指向跟踪的闭环控制条件，确保太阳始终精确位于各通道视场中心；

②. 室外部分则由全景相机，气象站，GPS构成，其主要为望远镜提供时间统一性，环境感知情况，以及全天云量分析，为望远镜观测提供必要的环境判决条件。

③. 赤道仪部分由赤道仪，电源监控1，以及望远镜中部分控制单元1构成。其是望远镜电力及动力的保障。

④. 观测室部分主要由UPS&电池、电源监控2、控制单元2以及计算机构成。其作用为对总电源监控，剩余焦面控制以及观测调度提供硬件支持基础。

清晰的硬件状态的变化是总控的控制调度的基础，因此，分析SFMM观测流程是其总控实现的前提。SFMM的开关机流程如下图：

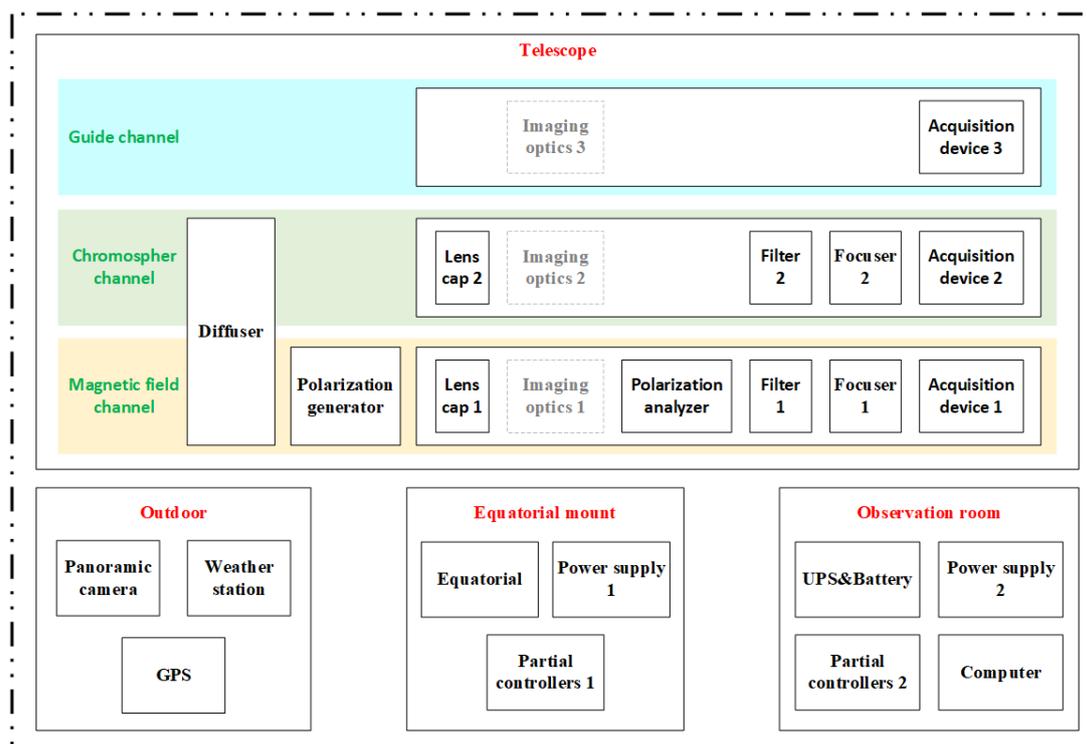


图 5-9 SFMM建模

Figure 5-9 SFMM modeling

科学观测为开机后的主要观测模式，其观测任务为不同波段单色像-磁场-多普勒速度场的采集与测量。

其中，太阳磁场测量基于 Zeeman 效应开展，太阳物理学家通过太阳望远镜测量 Zeeman 效应下夫琅禾费磁敏谱线的偏振光 Stokes 参量 (I, Q, U, V)，利用太阳大气的辐射转移模型，反演获得太阳磁场的信息。太阳望远镜的磁场测量本质上是偏振测量，即偏振参数 $I Q U V$ 的测量。

太阳偏振的测量采用差分测量，以 Q 参量测量为例：通过偏振调制分别获得探测强度 $P(I+Q)$ 、 $P(I-Q)$ ，两者之差获得 Q 参量，两者之和获得 I 参量。为了提高信噪比，多采用短曝光， $I+Q$ 、 $I-Q$ 交替采样叠加。

速度场测量则基于 Lyot 滤光器实现，通过测量观测波段中心波长附近多个波长位置的成像强度，然后多点拟合光谱轮廓计算观测谱线的线心偏移量，依据多普勒原理-运动速度与线心漂移量成正比，从而获得太阳视向速度。在本文中，该过程被简称为 WaveScan。（色球通道中 6563/8542 WaveScan 见下图）

在观测过程中，既要观测磁场也要观测多普勒速度场，为了提升观测效率，SFMM 将磁场与多普勒速度场测量进行耦合，实现磁场-多普勒速度场的联合测量，（见图中 5324/4861 Wavescan）。而为了获得更高磁场分辨率的色球磁场，该通道还配置了更深积分程度的 4861Å 线翼磁场测量。（见图中 4861 LineWing）

在色球通道中，科学家关注更高时间分辨率的色球 6563Å，8542Å 波段成像观测，因此 SFMM 对 6563Å，8542Å 波段均设置了线心位置的高时间分辨率成像

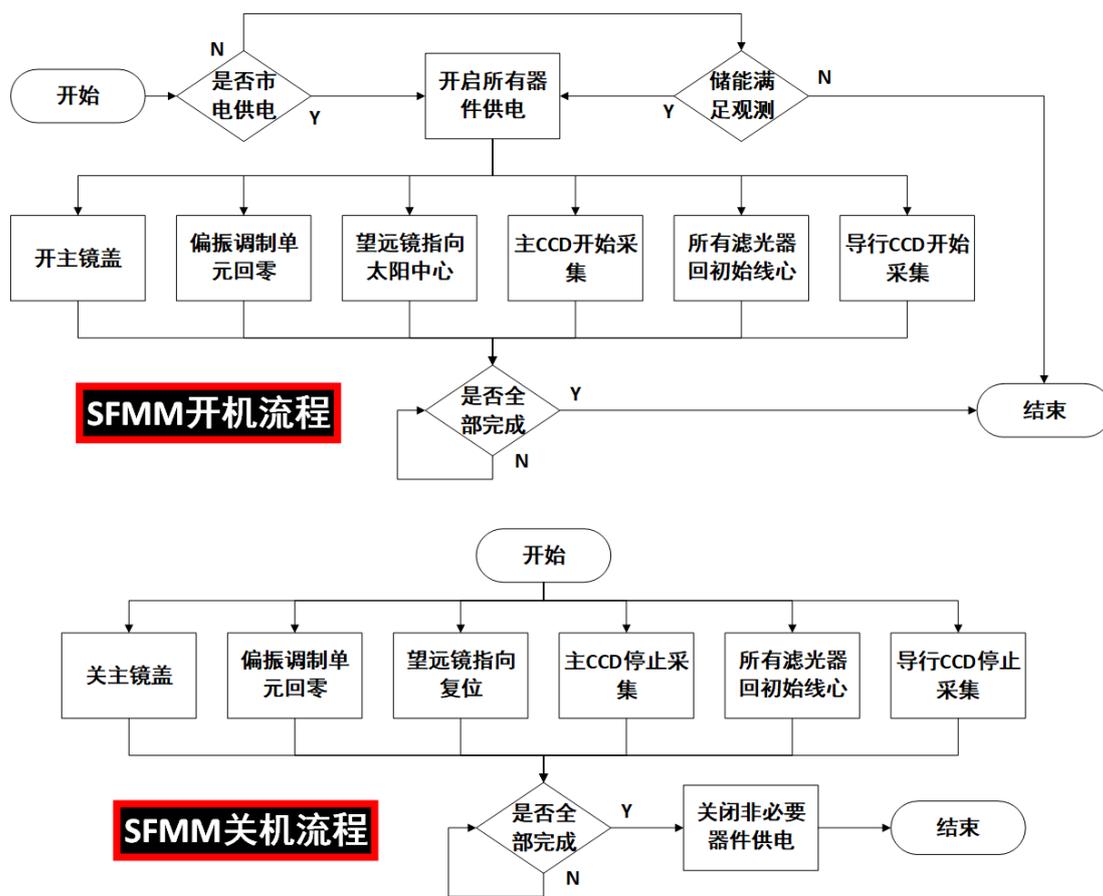


图 5-10 SFMM开关机流程

Figure 5-10 Power on/off process of SFMM

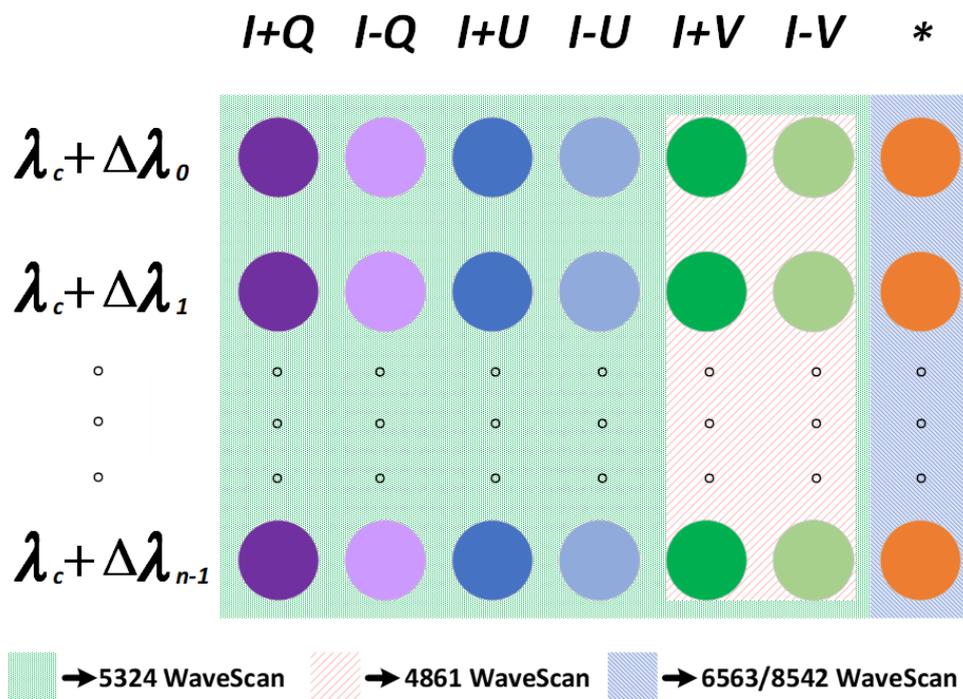


图 5-11 SFMM科学观测流程

Figure 5-11 Observation process of SFMM

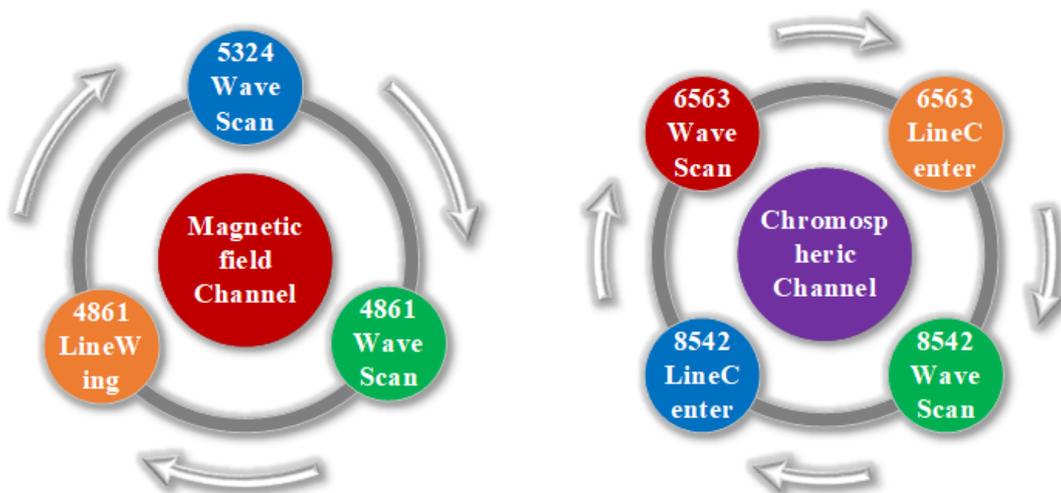


图 5-12 SFMM科学任务循环流程

Figure 5-12 Observation cycle process of SFMM

观测（见图中6563/8542 LineCenter）

每个通道均采用循环制，即一个波段任务结束即刻进入下一波段任务，往复循环，直至观测结束。

5.3.2 SFMM系统框架和软件架构设计

据上述分析，我们发现SFMM是一个高复杂度，高耦合的系统，为了实现松耦合，高内聚的自主化总控系统，我们基于微服务架构对总控系统进行开发。根据系统观测模式，结合部件自身属性，我们将组成同一职能的部件组合为一个模块，将职能相近的组件抽象为一个或一系列服务，并封装为一个子系统。封装后的各个子系统如图所示：

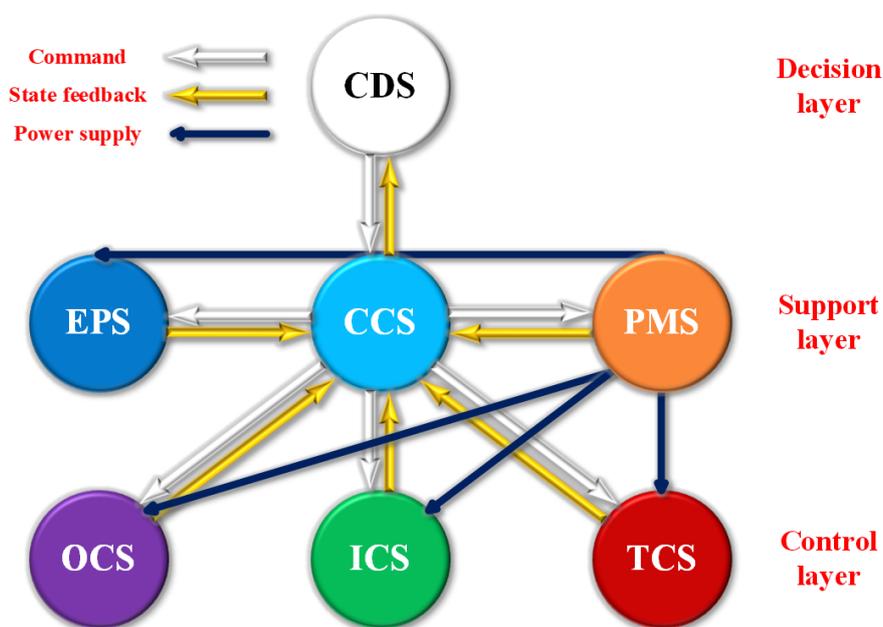


图 5-13 SFMM系统框架

Figure 5-13 The System Framework of SFMM

其中TCS是望远镜控制系统，主要实现望远镜的指向跟踪职能；ICS为焦面控制系统，主要是除终端成像组件的其他影响成像的控制；OCS为观测控制系统，主要实现观测有关的采集控制功能；TCS，ICS以及OCS共同构成了总控系统控制层。

CCS为通信控制系统，其已轻量级通信方式使其他各个子系统能够稳定通信；PMS为电源监控系统，主要负责整个系统的供电备电；EPS为环境感知系统，主要实现对望远镜周边环境的感知；CCS,PMS以及EPS共同构成了总控系统的辅助支撑层。

CDS为中枢决策系统，其汇总其他各个系统服务，并根据当前系统状态，执行相应的观测策略，是整个总控系统的最高决策层。

最后，为了最大程度降低系统复杂度，每个子系统都具有独立的UI，可采

用不同的技术栈独立开发，具备自身的状态监控，故障处理以及数据库，可独立部署。

5.3.3 SFMM的自主化实现

为了实现总控系统在不同场景（断电，云遮挡）下的自主运行，我们设计了CDS不同的系统状态。这些状态可帮助CDS辨别当前所处的动作执行阶段，便于下一动作的执行：

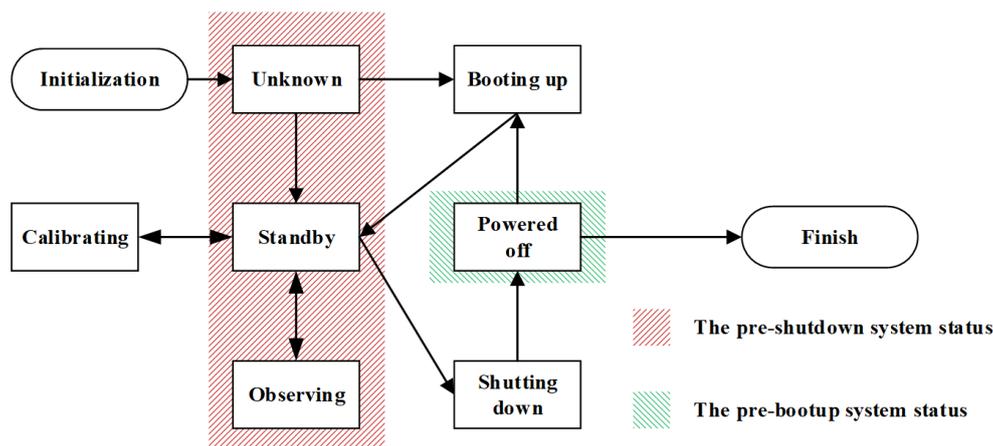


图 5-14 SFMM的状态转换

Figure 5-14 State transition of SFMM

CDS启动后处于未知状态，并于后台循环判断是否处于待命中，未知状态无法执行观测，定标或关机。观测员或系统执行开机后，CDS状态变更为开机中，开机完成后处于待命中，执行观测或定标任务后，状态变为观测中或定标中，结束观测或定标后，系统回归待命中，观测员或系统执行关机后系统进入关机中，后台循环判断是否已关机，若需重启则状态从已关机变为开机中。

当CDS检测到电源异常时，循环判断是否符合预关机状态，如图，符合则自主执行关机任务；而当电源恢复正常，同时无云遮挡时，循环判断是否符合预开机状态。

当前SFMM可实现光球Fe I 5324.19 Å 矢量磁场速度场时间分辨率小于15分钟，色球H β 4861.34 Å 纵向磁场速度场、色球H α 6562.8 Å 和Ca II 8542.1 Å 速度场时间分辨率均小于180s的快速成像成谱观测。另外，总控还根据需求，参考同类系统方案(Lin et al., 2012; 林佳本等, 2013)，设有耀斑模式，在该模式下H α 6562.8 Å或Ca II 8542.1 Å 的成像观测可以最高每秒1帧速度记录4k*4k分辨率的数据，实现高时间分辨率的太阳爆发事件跟踪观测。

在应用了自动指向跟踪、导行优化、自动曝光增益、自动调焦、云遮挡分析等技术后，目前整套系统已在level 3级有条件的自主化下稳定运行半年，无异常情况发生，数据产出稳定可靠，且对观测员操作友好，符合项目预期。

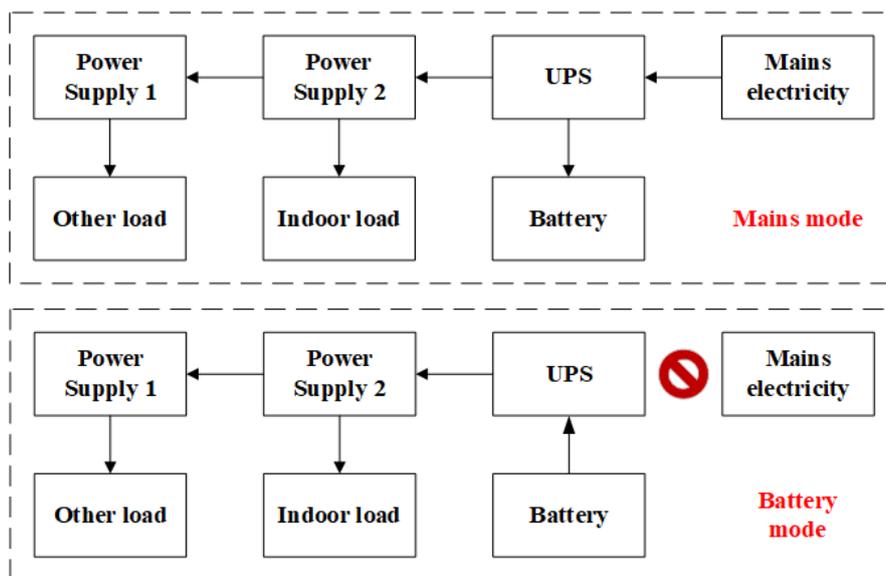
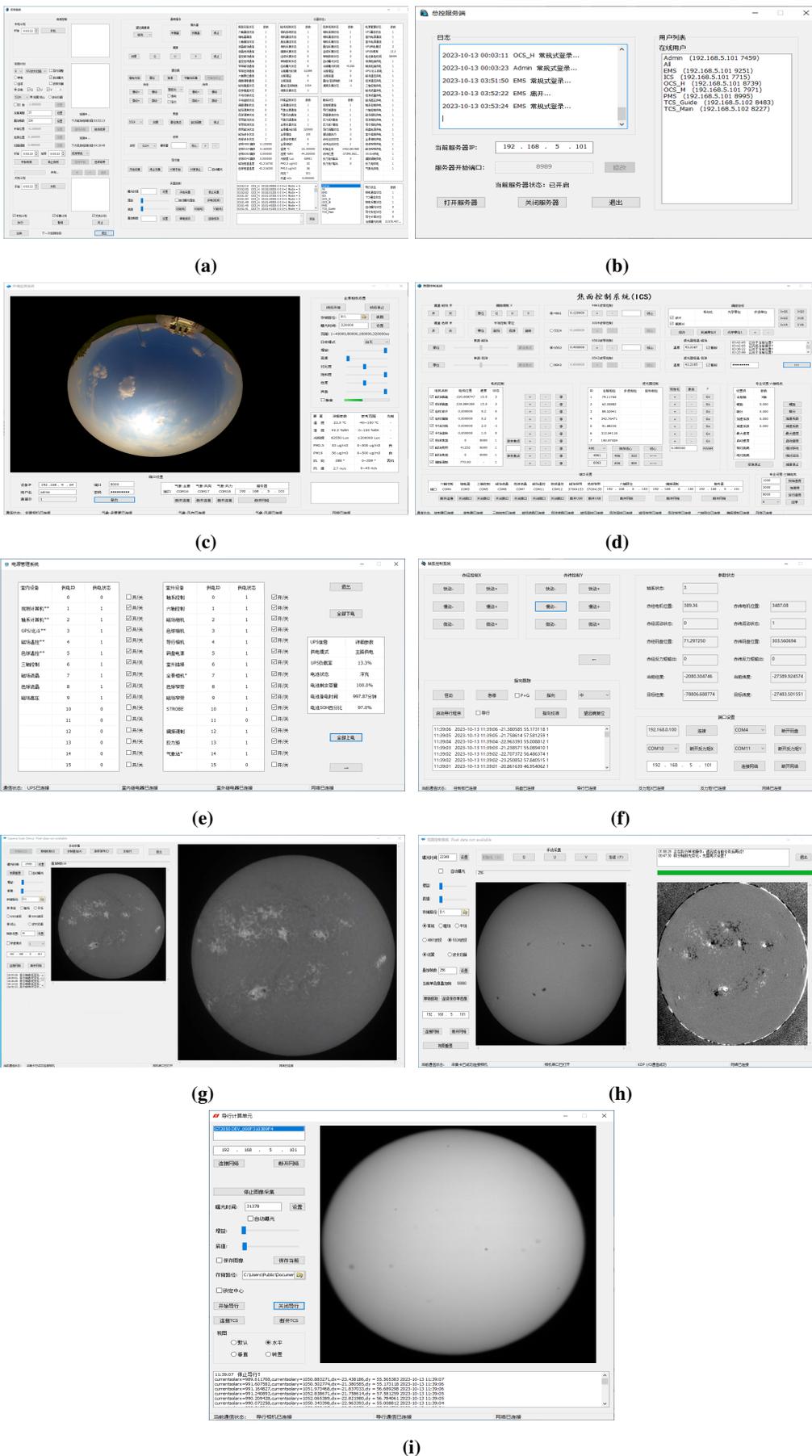


图 5-15 SFMM中的电源切换

Figure 5-15 Power switching in SFMM



(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

(i)

图 5-16 SFMM总控系统
Figure 5-16 The MCS of SFMM

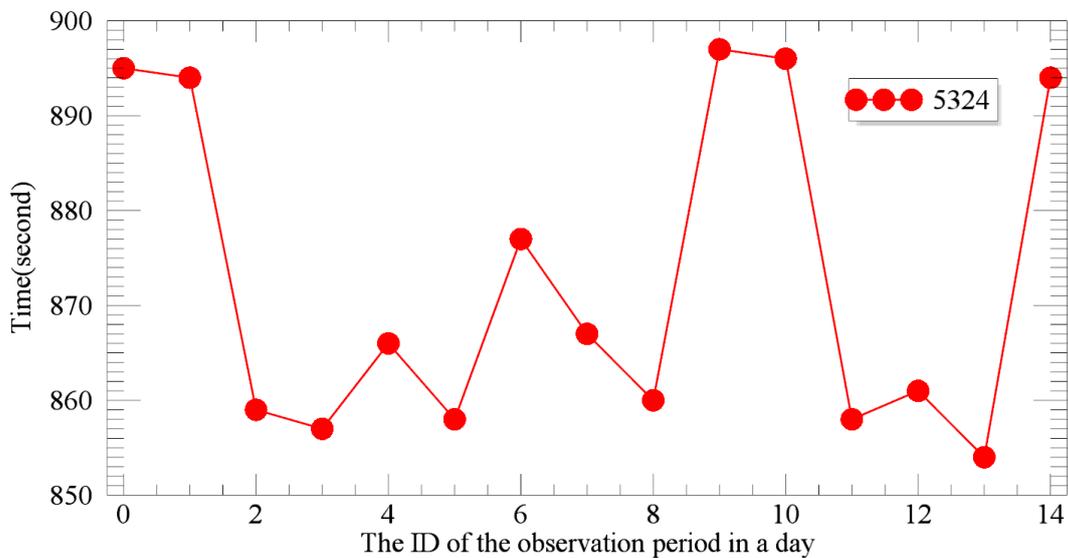


图 5-17 5324Å波段波长扫描的时间分辨率

Figure 5-17 Temporal Resolution of 5324 WaveScan

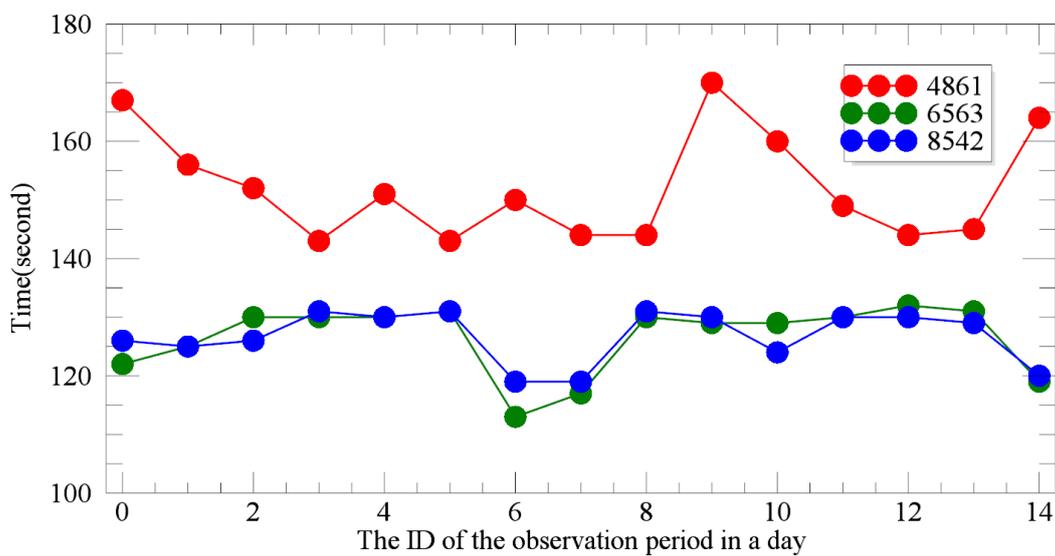


图 5-18 4861Å, 6563Å, 8542Å波段波长扫描的时间分辨率

Figure 5-18 Temporal resolution of 4861, 6563, 8542 WaveScan

5.4 小结

在本章内容中，我们已经成功地将先前设计的大部分理念如系统框架、软件架构、控制和安全策略付诸实践，尽管考虑到当前AIMS系统尚处在一个持续集成与调试的阶段，部分设备厂商暂无接入总控的能力，现场暂不具备部署环境和能源相关系统的能力，当前数据积累程度不足以构建模型演进子系统，导致部分设计理念如设备控制子系统、自主化支撑子系统暂时未能完全实现，仅实现了Level 1的初级自动化。然而，我们巧妙地借助了其他项目的实际需求，将部分自主化设计理念延伸并成功应用到了新疆温泉太阳磁场望远镜（温泉望远镜）和子午工程二期全日面矢量磁像仪（SFMM）等项目中。通过这种方式，原本无法在当前阶段验证设备控制子系统的可行性得以在温泉望远镜和SFMM上实现，使温泉望远镜实现了Level 2的部分自动化；原本无法在当前阶段验证自主化支撑子系统的先进性得以在SFMM上实现，使SFMM实现了Level 3的有条件的自主化。从而从侧面验证了AIMS总控系统部分设计理念的切实可行性和有效性。

当然，我们深知构建一个完整且高效的AIMS自主化运行方案是一项持久的工作，而目前能够支撑机器学习的数据太少或不够全面，不足以支撑构建模型演进子系统的功能。尽管验证了系统框架，软件架构，控制和安全策略等，但我们明白，通往最终目标的道路仍未走完，因此，我们将继续保持探索精神和实践勇气，持续向前推进。

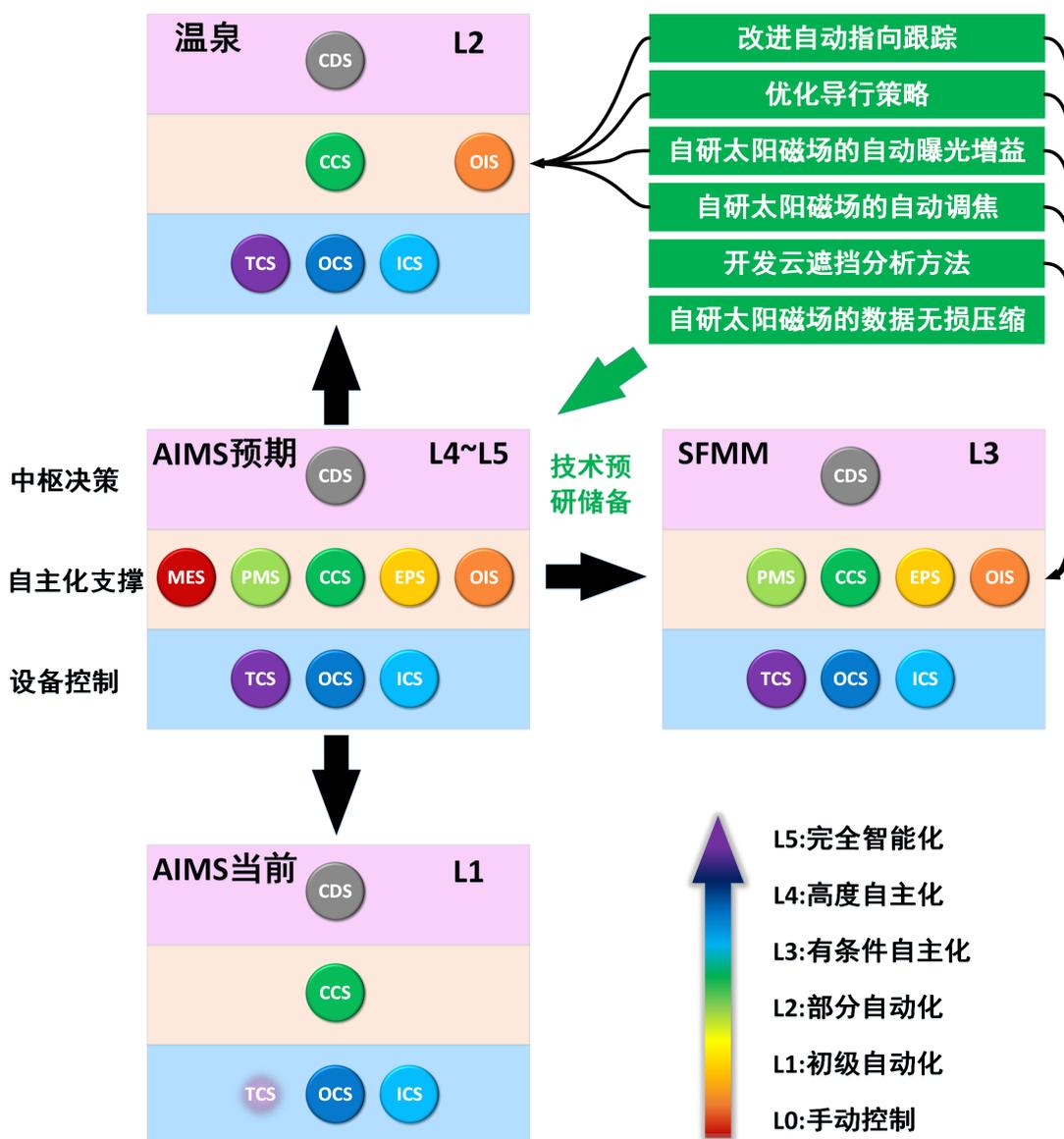


图 5-19 AIMS总控系统的应用情况

Figure 5-19 Application of the MCS in AIMS

第6章 总结及展望

太阳磁场的测量惠及科学探索、军事应用以及民生建设等诸多领域，其精确测量价值无可估量。传统上，依据塞曼效应配合相关模型进行磁场反演计算的方法虽然广泛应用，但却面临着诸多局限性，如计算过程复杂且只能实现间接测量。而AIMS系统的部署，旨在打破这一壁垒，大幅度减少对模型的依赖，实现对太阳磁场的直接、精确测量，从而显著提升观测精度，并达到高光谱分辨率的太阳磁场探测水平。

然而，作为一款精密的大型红外观测波段太阳磁场望远镜，AIMS的构建极具挑战性。系统内部构造复杂繁琐，牵涉到多家国内科研院所的合作共建，设备的集成工作难度颇高。加之望远镜选址于偏远的内陆高原地带，其日常运营和维护成本也相对高昂。因此，我们急需研发一套高度自主化的观测系统，不仅要解决当前面临的种种难题，更要具备对未来新技术的兼容与拓展能力。正是基于此种需求，我们展开了对AIMS总控系统的深入研究与开发。

6.1 工作总结

在规划与设计AIMS总控系统之初，我们首先深入探讨了构建和优化这一系统所需要关注的关键要素，包括站点环境条件、设备组件特性、科学观测需求以及仪器状态监控机制。我们认识到，理想的总控系统不仅要跨越编程语言和操作系统界限，确保跨平台兼容性，同时还需具备卓越的历史数据回溯能力以及极其稳定的运行性能，以确保系统在任何常态或异常状态下都能保持有效的控制与管理职能。鉴于AIMS所包含的各种受控部件的具体空间布置、作业流程以及多样的观测模式，我们构建起了总控系统组件的基础框架，并设计出逻辑严密的工作流程模型，为后续的模式开发奠定了基础。

然而，在参照现有的望远镜自动化分级标准进行设计时，我们察觉到现行标准存在一定的混乱与不适用性，无法完全符合AIMS总控系统的设计初衷。因此，我们通过深入对比分析相似领域的分级标准，提出了一个新的望远镜自动化分级方案，旨在为AIMS总控系统的规划设计提供更加精准的指导方针。

按照这一全新分级规范，并紧密贴合AIMS总控系统的内在需求，我们率先构思了一个由三个层次构成的系统框架：底层由多个设备控制子系统构成，中间层是一系列提供决策背景信息的自主化支撑子系统，顶层则是负责统筹协调的中枢决策子系统。在这个结构中，设备控制子系统承担着望远镜硬件操作的具体控制；自主化支撑子系统为决策提供必要条件；而中枢决策系统则肩负重任，根据预设的决策条件和调控策略，协调指挥各个设备控制子系统，从而实现望远镜的高水平自主化操控。

为了达成这一目标，我们选用基于松耦合、高内聚原则的微服务架构进行

软件系统的设计开发，以确保架构既贴合系统特点又满足需求。此外，我们还融入了涵盖能源管理、环境适应性、观测任务规划以及设备状态监控等多个方面的控制策略，并严格执行严格细致的安全防护措施，目的是确保整个总控系统能够稳健、可靠且高效地运行。

在构建AIMS总控系统的全程中，除了系统架构、软件架构、控制策略和安全策略等方面的考量，我们还重点攻克了一系列阻碍自主化实现的关键技术难题，包括自动指向跟踪、自动调焦、自动曝光增益控制、云遮挡分析以及数据无损压缩技术的研究。通过逐一破解这些难题，我们确保了观测全过程中的所有功能都可以实现自动化操作，为实现全面自主化观测扫除了障碍。

最后，为了验证AIMS总控系统在不同层面的设计理念，我们分别在AIMS、温泉望远镜以及SFMM三台望远镜上进行了实践：

对于仍处于持续集成调试阶段的AIMS，我们结合实际观测需求，对已集成的部件进行了深入分析，并成功实现了Level 1级别的偏振定标自动化以及有条件进行的FTIR科学观测和定标自动化。

针对温泉望远镜固定业务流程的要求，我们简化了AIMS的系统框架，并沿用了相同的软件架构，使其成功实现了Level 2级别的部分自动化观测。

而对于追求更高自主化观测水平的SFMM，我们仅精简了AIMS系统框架中的模型演进系统部分，其余子系统均予以保留并实现落地，同样采用了同一软件架构，从而成功实现了Level 3级别的有条件的自主化观测。

本文的核心创新之处，在宏观层面上，构建了一套高度灵活且具备渐进式演进能力的系统架构。该架构允许开发团队根据望远镜总控系统的阶段性需求，模块化地设计并实现各个子系统，逐步推进至望远镜控制的全面智能化。此方法不仅促进了系统的高效迭代，也确保了对未来发展需求的适应性。在技术实施的细微层面，我们成功攻克了一系列关键技术挑战，包括：优化了自动指向与跟踪精度，提升了导行策略的效率，开发了云遮挡分析方法，自研了针对太阳磁场观测的自动曝光增益与调焦技术，以及研究出针对太阳磁场数据设计的数据无损压缩算法。这些技术突破扫清了AIMS总控的阻碍，并推动其向自动化、自主化及智能化的目标迈进。尤为重要的是，上述设计理念与技术创新已在AIMS，新疆温泉太阳磁场望远镜，以及SFMM项目中得到了应用与验证。这些实践不仅展现了设计思路的可行性，还进一步验证了整个系统在实际运行中的稳定性和可靠性，为天文学领域的相关观测技术提供了新的思路和参考。

6.2 未来展望

温泉望远镜与SFMM的成功稳定运行，有力地证明了AIMS总控系统设计理念的合理性与实用性。然而，对于更高级别的自动化操作，譬如达到level 4级别，需要更加灵活多变的观测策略来应对。当前的控制策略是否足以满足此类需求，尚有待在后续的AIMS系统集成实践中得到验证。至于level 5级的完全智能自动化，目前全球范围内并无任何望远镜实现这一目标，这片领域尚属无

人涉足的科研前沿。AIMS总控系统提出的依靠模型演进子系统，结合多模态大模型实现智能化的设想，虽前景广阔，但仍处于探索阶段，亟待实践检验。值得庆幸的是，当前多模态大模型技术正以前所未有的速度迭代更新，不断刷新人们对智能系统的认知边界，同时市面上涌现了一批开源的大模型资源，这对AIMS总控制系统的未来发展提供了极大的助力。

此外，构建AIMS总控制系统的数字孪生亦是当前技术研发的重要趋势。尽管现阶段首先要面临的挑战是如何通过多波段视觉融合系统构建出AIMS的实时时空模型，而这背后涉及的技术难题仍有待攻克，但值得一提的是，我们已积累了丰富的仪器调试参数数据。一旦实时时空模型搭建完成，AIMS望远镜的数字孪生体将随之自然而然地构建起来。与此同时，随着无人驾驶技术的蓬勃发展，机器视觉的研究进展神速，市场上已有多款开源方案可供借鉴，这无疑为AIMS多波段视觉融合系统的模型建构带来了极大的便利性。

参考文献

- 何秋会, 刘利利, 汪翊鹏, 等, 2005. 南京大学65cm天文望远镜指向精度的修正研究[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 41(4): 8.
- 吴春晖, 朱庆生, 周小军, 2007. 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, 4(2): 7.
- 姚久民, 石凤良, 2005. 球坐标系中拉普拉斯算符表达式的推导[J]. 唐山师范学院学报, 27(5): 5.
- 张来线, 孙华燕, 郭惠超, 等, 2013. 基于图像灰度梯度最大值累加的自动调焦算法[J]. 光子学报(5): 6.
- 林佳本, 沈洋斌, 朱晓明, 等, 2013. 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(04): 67-71.
- 柳光乾, 2011. 一米红外太阳望远镜控制系统研制[D]. 北京: 中国科学院大学.
- 柳光乾, 杨磊, 邓林华, 等, 2013. 大气湍流对天文望远镜光电导行精度的影响[J]. 光学学报(1): 5.
- 梁波, 施正, 林佳本, 等, 2014. 太阳深积分磁场观测中异常结构的改正[J]. 科学通报(36): 6.
- 王东光, 2003. 空间太阳望远镜偏振分析器的设计与研制[D]. 北京: 中国科学院大学.
- 王依人, 杨明, 刘达新, 等, 2023. 双波段全天空云量观测系统研制及数据分析[J]. 光学学报, 43(6): 0612001.
- 王建军, 陆长明, 高昕, 等, 2012. 极轴式望远镜系统误差修正方法研究[J]. 飞行器测控学报, 31(1): 4.
- 王欣, 安志勇, 杨瑞宁, 2008. 基于图像清晰度评价函数的CCD摄像机自动调焦技术研究[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 31(1): 4.
- 艾国祥, 1989. 太阳磁场望远镜[J]. 天文研究与技术(S1): 5-7.
- 艾国祥, 胡岳风, 1986. 太阳磁场望远镜的工作原理[J]. 天文学报(02): 91-98.
- 邓元勇, 甘为群, 颜毅华, 等, 2020. 太阳磁场探测现状与展望[J]. 红外与激光工程, 49(11): 7.
- 郭晶晶, 杨云飞, 冯松, 等, 2016. 太阳望远镜高精度导行方法[J]. 科学通报(10): 9.
- 陈垂裕, 郭晶晶, 林佳本, 等, 2020. 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, 17(4): 9.
- 韩玉阁, 宣益民, 2002. 大气传输特性对目标与背景红外辐射特性的影响[J]. 应用光学, 23(6): 4.
- 马锦, 顾伯忠, 2011. 地平式望远镜轴系误差对指向精度和跟踪精度的影响[J]. 天文研究与技术, 8(2): 7.
- Babcock H W, 1953. The Solar Magnetograph.[J/OL]. , 118: 387. DOI: [10.1086/145767](https://doi.org/10.1086/145767).
- Bao X M, Wang J, Jing S, et al., 2023. The AIMS Site Survey[J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 23(11): 115003. DOI: [10.1088/1674-4527/acf1e6](https://doi.org/10.1088/1674-4527/acf1e6).
- Beckers J M, 1968. High-Resolution Measurements of Photosphere and Sun-Spot Velocity and Magnetic Fields using a Narrow-Band Birefringent Filter[J/OL]. , 3(2): 258-268. DOI: [10.1007/BF00155161](https://doi.org/10.1007/BF00155161).
- Beckers J M, Dickson L, Joyce R S, 1975a. A fully tunable Lyot-Ohman filter[Z].
- Beckers J M, Dickson L, Woodman D, 1975b. Cinematography of solar intensity, velocity, and magnetic fields.[J]. Optical Engineering, 14: 64-68.
- Berry R, Burnell J, 2005. The handbook of astronomical image processing: Vol. 2[M].

- BLAHUT R E, 2014. Cryptography and secure communication[M]. Cambridge University Press: 602.
- Castro-Tirado A J, 2010. Robotic Autonomous Observatories: A Historical Perspective[J/OL]. *Advances in Astronomy*, 2010: 570489. DOI: [10.1155/2010/570489](https://doi.org/10.1155/2010/570489).
- Deng Y Y, Zhang H Y, Yang J F, et al., 2019. Design of the Full-disk MagnetoGraph (FMG) onboard the ASO-S[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 19(11): 157. DOI: [10.1088/1674-4527/19/11/157](https://doi.org/10.1088/1674-4527/19/11/157).
- Downey E C, Mutel R L, 1996. The University of Iowa Automated Telescope Facility[C]//Jacoby G H, Barnes J. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series: Vol. 101 Astronomical Data Analysis Software and Systems V*. 380.
- Evans J W, 1949. The Birefringent Filter: A Correction[J/OL]. *Journal of the Optical Society of America*, 39(5): 412. DOI: [10.1364/JOSA.39.0412_1](https://doi.org/10.1364/JOSA.39.0412_1).
- Ezawa H, Kawabe R, Kohno K, et al., 2004. The Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE)[C/OL]//Oschmann J, Jacobus M. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series: Vol. 5489 Ground-based Telescopes*. 763-772. DOI: [10.1117/12.551391](https://doi.org/10.1117/12.551391).
- FALL K R, STEVENS W R, 2012. *Tcp/ip illustrated, volume 1: The protocols*[M]. 2nd ed. Addison-Wesley Professional: 1056.
- Fischer C E, Müller D, De Moortel I, 2017. JPEG2000 Image Compression on Solar EUV Images [J/OL]. , 292(1): 16. DOI: [10.1007/s11207-016-1038-3](https://doi.org/10.1007/s11207-016-1038-3).
- Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al., 2019. Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S): an overview[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 19(11): 156. DOI: [10.1088/1674-4527/19/11/156](https://doi.org/10.1088/1674-4527/19/11/156).
- Gan W, Zhu C, Deng Y, et al., 2023. The Advanced Space-Based Solar Observatory (ASO-S)[J/OL]. , 298(5): 68. DOI: [10.1007/s11207-023-02166-x](https://doi.org/10.1007/s11207-023-02166-x).
- George D B, Denny R, 2001. ASCOM - Progress In Technology And Applications[J]. *International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communications*, 84: 16.
- Gillies K, Walker S, 1996. The Design of the Gemini Observatory Control System[C]//Jacoby G H, Barnes J. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series: Vol. 101 Astronomical Data Analysis Software and Systems V*. 347.
- GOLOMB S W, 1966. Run-length encodings[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 12(3): 399-401.
- Hale G E, 1909. Solar vortices and magnetic fields[J]. *The Observatory*, 32: 311-315.
- Hale G E, 1908a. On the Probable Existence of a Magnetic Field in Sun-Spots[J/OL]. , 28: 315. DOI: [10.1086/141602](https://doi.org/10.1086/141602).
- Hale G E, 1908b. The Zeeman Effect in the Sun[J/OL]. , 20(123): 287. DOI: [10.1086/121847](https://doi.org/10.1086/121847).
- Hou J F, 2019. Spectral-Modulation-Based Polarization Calibration of the AIMS Telescope[C]//Belluzzi L, Casini R, Romoli M, et al. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series: Vol. 526 Solar Polarization Workshop 8*. 335.
- ITU-T I, 2002. Information technology—jpeg 2000 image coding system: Core coding system[J]. *ITU-T Recommendation T.800 and ISO/IEC International Standard*, 21(1): 27-51.
- Kamazaki T, Ezawa H, Tatematsu K, et al., 2005. The Remote Control System for the ASTE Telescope[C]//Shopbell P, Britton M, Ebert R. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series: Vol. 347 Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV*. 533.

- Kubánek P, Jelínek M, French J, et al., 2008. The RTS2 protocol[C/OL]//Bridger A, Radziwill N M. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series: Vol. 7019 Advanced Software and Control for Astronomy II. 70192S. DOI: [10.1117/12.788623](https://doi.org/10.1117/12.788623).
- Lin J, Deng Y, 2012. Automatic full disk vector magnetogram observing system in HSOS[J]. IAU Special Session, 6: E5.03.
- Livingston W C, Harvey J, Slaughter C, et al., 1976. Solar magnetograph employing integrated diode arrays.[J/OL]. , 15: 40-52. DOI: [10.1364/AO.15.000040](https://doi.org/10.1364/AO.15.000040).
- MARTIN R C, 2017. Clean architecture: A craftsman's guide to software structure and design[M]. Pearson: 432.
- MERHAV N, SEROUSSI G, WEINBERGER M J, 1998. Coding of sources with two-sided geometric distributions and unknown parameters[J]. Information Theory IEEE Transactions on, 46(1): 229-236.
- MORSE P M, FESHBACH H, 1953. Methods of theoretical physics: Vol. 1[M]. New York: McGraw-Hill.
- NEWMAN S, 2015. Building microservices: Designing fine-grained systems[M]. 1st edition ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media.
- PETERSON W W, BROWN D T, 1961. Cyclic codes for error detection[J]. Proceedings of the IRE, 49(1): 228-235.
- Ramsey H B, Schoolman S A, Smithson R C, et al., 1979. Using Tunable Filters for Two-Dimensional Solar Spectroscopy[C]//Bulletin of the American Astronomical Society: Vol. 11. 640.
- Rayrole J, Mein P, Cavallini F, 1994. The THEMIS telescope[C]//Rutten R J, Schrijver C J. NATO Advanced Study Institute (ASI) Series C: Vol. 433 Solar Surface Magnetism. 507.
- RICE R, PLAUNT J, 2003. Adaptive variable-length coding for efficient compression of spacecraft television data[J]. IEEE Transactions on Communication Technology, 19(6): 889-897.
- Roddiér F, 1981. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy[J/OL]. Progress in Optics, 19: 281-376. DOI: [10.1016/S0079-6638\(08\)70204-X](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70204-X).
- Severny A B, 1962. Magnetically Active Regions on the Sun[J]. Transactions of the International Astronomical Union, Series B, 11B: 426.
- Stix M, 2002. The sun: an introduction[M].
- Tian Y, Wang Z, Li J, et al., 2018. LAMOST CCD camera-control system based on RTS2[J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 18(5): 054. DOI: [10.1088/1674-4527/18/5/54](https://doi.org/10.1088/1674-4527/18/5/54).
- Tong L Y, Lin J B, Deng Y Y, et al., 2024. Lossless Compression Method for the Magnetic and Helioseismic Imager (MHI) Payload[J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 24(4): 045019. DOI: [10.1088/1674-4527/ad2cd4](https://doi.org/10.1088/1674-4527/ad2cd4).
- Tosti G, Pascolini S, Fiorucci M, 1996. The Perugia University Automatic Observatory[J/OL]. , 108: 706. DOI: [10.1086/133789](https://doi.org/10.1086/133789).
- URQUHART B, KURTZ B, DAHLIN E, et al., 2015. Development of a sky imaging system for short-term solar power forecasting[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 8(2): 875-890.
- WRIGHT G R, 2017. TCP/IP Illustrated, Volume 2: The Implementation[M]. Addison-Wesley Professional.
- Yang G, Varsik J R, Shumko S, et al., 2006. The telescope control system of the New Solar Telescope at Big Bear Solar Observatory[C/OL]//Lewis H, Bridger A. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series: Vol. 6274 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. 62741Y. DOI: [10.1117/12.672402](https://doi.org/10.1117/12.672402).

YANG J, LU W, MA Y, et al., 2012. An automated cirrus cloud detection method for a ground-based cloud image[J]. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 29(4): 527-537.

致 谢

在这篇博士学位论文即将画上句号之际，我首先要向浩瀚宇宙中的星辰表达深深的敬畏，它们犹如引路的灯塔，引导我走过一段既充满挑战又饱含收获的科研之旅。而今，当我回首过往，我意识到这个旅程并非一帆风顺，而是由无数个决定、转折点与机遇共同编织而成，每一个都深深镌刻着我对天文之梦的执着追求。

童年时期，星空是我最初的启蒙老师，那璀璨的银河、闪烁的星座，点燃了我心中成为天文学家的梦想。然而，随着年龄的增长，现实的道路似乎离那个稚嫩梦想渐行渐远。在大学阶段，我选择了电子信息工程这一专业，深入学习电子学的软硬件知识体系，彼时虽未直接涉足天文领域，但我深知任何一门科学技术都是探索宇宙奥秘的基石。

临近大学生活的尾声，我面临着人生的又一次抉择，是沿着既定的职业轨道前行，还是勇敢追寻内心深处的梦想？幸运的是，在师长们的悉心教诲和同窗好友的激励之下，我选择挑战自我，步入了研究生阶段，并转向了更加契合个人兴趣与能力的计算机方向。命运之轮在此时展现了它的奇妙之处，我有幸被推荐至国家天文台怀柔太阳观测基地进行联合培养，仿佛冥冥之中让我重新回到了童年的星光之路。

在怀柔基地的日子，不仅让我有机会接触到前沿的太阳物理学研究，更赋予了我亲手参与太阳磁场望远镜技术革新与建设的宝贵机会。这段经历犹如一场酣畅淋漓的科技盛宴，我得以全方位地理解并掌握太阳磁场观测的原理、技术与实践。在博士学位攻读期间，我有幸参与到包括AIMS望远镜、SFMM项目以及新疆温泉望远镜等多个重大科研项目的新建或改造升级工作，这些经历无疑极大地丰富了我的专业知识结构，锤炼了我的科研能力。

在导师的引领下，我将电子信息工程与计算机科学的积淀融入到太阳磁场望远镜的研发工作中，设计并构建了一套高效稳定的望远镜总控系统。这套系统的成功研发与实际应用，不仅提升了这些项目的自动化水平，也使我在实践中深刻领悟到跨学科融合创新的魅力所在。

首先，我要深深地向我的导师邓元勇研究员和林佳本研究员表达我由衷的感激之情。两位导师严谨的学术态度、卓尔不群的专业素养和无私的教诲关怀，如同灯塔般照亮了我科研道路的方向，对我个人学术造诣的提升和科研理念的确立起到了决定性的影响，助我在科研之路上稳健且坚定地向前迈进。

同样，我要真诚地感谢季凯帆研究员、王东光研究员、侯俊峰研究员及杨潇师姐。他们不仅在我的专业领域内给予了详实而深入的指导，还在日常生活层面屡次伸出援手，每当我在科研过程中遭遇困境或迷惑不解之时，总是能及时提供富有洞察力的指引，帮助我迅速走出困顿，全身心地投入到新的科研挑战中去。

接下来，我要对张洪起研究员、张枚研究员、苏江涛研究员、谭宝林研究员、林钢华研究员、杨尚斌研究员、李文显研究员、包兴明老师、冯志伟老师、张志勇老师、孙英姿老师、黄静老师、张印老师、王晓帆老师、徐海清师姐、白先勇师兄、宋永亮师兄、张洋师姐以及孙文君师兄等各位专家学者表示衷心的感谢。在我攻读博士学位的过程中，他们所给予的帮助和启发，使我受益匪浅，对我科研能力和人格修养的成长起到了不可替代的作用。

尤为值得一提的是怀柔太阳观测基地的全体工作人员，特别是王慧站长、陈洁站长、张鼎波师傅、汪国萍老师、荆帅老师、王建师傅、阮文东师傅、王立东师傅、苏海奇师傅以及杨桂莲阿姨，你们营造出的温馨环境使我在怀柔基地的每一日都如同身处家中一般舒适安心。你们的默默奉献和无私付出，使我深深感受到人间温情，对此我深感荣幸与感激。

此外，我要特别提及那些曾共度研究生生涯的同门好友，诸如祝高飞、王全、吴玮、沈宇樑、王强、荀辉、王雅琦、周明尧、李鑫、胡子尧、高碧源、郭思璠、王哲楷、钟云毅、关思琪等，我们一起携手同行，共享科研过程中的苦与乐。

还要对与我并肩作战在科研一线的团队伙伴们——王丙祥、朱晓明、郭晶晶、王刚、袁飞、张鑫伟、柯子博、于鹏达、白阳、胡兴、黄威、陈垂裕、商益、邵明福、王慧等人表示崇高的敬意和诚挚的感谢，因为你们的支持与通力合作，才使得我们的研究成果得以焕发出耀眼的光芒。

再次感谢怀柔基地的每位老师同学，感谢怀柔基地大家庭！

最后，我要将最深沉的谢意献给我挚爱的家人——我的父母、我的贤妻以及我亲爱的女儿。是你们在我身后无声却有力的支持，如同坚实的后盾，让我在风雨兼程的求索路上无所畏惧，坚定前行。你们的包容、理解与无私奉献，如同源源不断的动力，滋养着我不断超越自我，勇攀科研高峰的决心。

谨以此文献给所有帮助过我的人，愿岁月静好，砥砺前行！

2024年4月

作者简介及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果

作者简介:

佟立越,北京市房山人,中国科学院国家天文台博士研究生。主要从事望远镜相关自动控制、图像处理等方面的研究工作。

教育:

2011年09月——2015年07月,在北方工业大学信息工程学院获得学士学位。

2015年09月——2018年07月,在昆明理工大学信息工程与自动化学院获得硕士学位。

2018年09月——2024年07月,在中国科学院国家天文台攻读博士学位。

已发表(或正式接受)的学术论文:

- (1) Research in Astronomy and Astrophysics (SCI): Lossless compression method for the Magnetic and Helioseismic Imager (MHI) payload, 第一作者, 已录用, 2024
- (2) Astronomical Techniques and Instruments (核心): Design and application of autonomous Master Control System (MCS) for multi-layer magnetic and helioseismic telescope, 第一作者, 正式接受, 2024

申请或已获得的专利:

发明专利(已受理): 一种基于地基全日面太阳望远镜的自动调焦方法

参加的研究项目及获奖情况:

1. 用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统(AIMS)。
2. 先进天基太阳天文台(ASO-S)。
3. 子午工程二期-全日面矢量磁像仪(SFMM)。
4. 新疆温泉全日面矢量磁场望远镜升级项目。
5. 北京沙河科普天文基地全日面色球望远镜改造项目。

