



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

# 博士学位论文

丽江 2.4 米望远镜观测控制系统关键技术研究

作者姓名: 王传军

指导教师: 王锋 教授

中国科学院云南天文台

学位类别: 理学博士

学科专业: 天文技术与方法

培养单位: 中国科学院云南天文台

2019 年 6 月



**Study on Key Technologies of Observatory Control System for  
Lijiang 2.4-meter Telescope**

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

**By**

**Wang Chuanjun**

**Supervisor: Professor Wang Feng**

**Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences**

**June 2019**



**中国科学院大学**  
**研究生学位论文原创性声明**

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

作者签名：

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

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：



# 学位论文版权使用授权书

本人完全了解中国科学院大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存学位论文。

本人同意《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》出版章程的内容，愿意将学位论文提交《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社，编入 CNKI 学位论文全文数据库并充实到“学位论文学术不端行为检测系统”比对资源库，同意按章程规定享受相关权益。

保密论文在解密后遵守此规定。

论文作者签名：

指导教师签名：

日期：        年        月        日





## 摘 要

天文学是一门研究天体、宇宙的结构和发展的科学，它的发展离不开观测实验。天文学的研究依赖于天文观测所获得的观测数据，观测数据的质量好坏直接会影响到天文研究的成果。从望远镜发明到照相底片、CCD 芯片的发明和应用，到如今大型望远镜的建设、精密观测终端的建造等等，都是努力在提高观测质量从而获取更好的观测数据。随着望远镜口径的不断增大，观测终端设备性能的不不断提高，使得可以观测的目标变得越来越多，也使得望远镜的观测时间变得越来越宝贵，如何通过观测控制系统有效地对望远镜、观测终端、待观测目标进行合理的调度，最优化地利用有限的望远镜观测时间获得更多高质量观测数据，成为国内目前亟需研究的课题。

丽江 2.4 米望远镜依然是国内口径最大的通用型光学望远镜，自 2008 年投入观测以来，已逐渐成为我国重要的天文观测研究平台之一。本文将以丽江 2.4 米望远镜为研究平台，对其中的望远镜控制系统智能化控制、观测终端基于信息融合技术的统一控制、观测数据处理及反馈的数据流等关键技术进行研究，并将这些技术应用到了丽江 2.4 米望远镜观测控制系统的研发过程中，完成了如下几个方面的工作：

1) **丽江 2.4 米望远镜观测控制系统的基础框架研究。**在对国内外望远镜观测控制系统进行研究的基础上，提出了丽江 2.4 米望远镜观测控制系统的基础框架结构，并对系统中各个部分的功能进行详细的分析，概括出建设丽江 2.4 米望远镜观测控制系统需要完成的相关工作目标。

2) **望远镜控制系统的集成研究。**在没有望远镜控制系统源代码的前提下，完成了望远镜网络通信接口的升级改造，建立望远镜状态数据库。基于序列控制的模式，完成了对望远镜控制系统控制指令的二次开发，开发完成了一整套望远镜的序列控制指令集，将其应用到望远镜自动测光观测任务中。通过该部分工作，已经为实现观测控制系统对望远镜控制系统的统一控制和调度提供了基础。

3) **终端控制系统的研究与实现。**在对丽江 2.4 米望远镜的主要观测终端及其控制系统进行研究的基础上，提出了适合丽江 2.4 米望远镜的基于序列控制的终

端控制系统。采用了序列控制的思想，实现了对多波段测光系统（PI CCD）和高色散光谱仪（HiRES）两个终端的控制系统研发。从而实现观测控制系统对三个主要观测终端的统一控制和调度。此外，定义了三个观测数据的规范，包括观测数据文件名的统一标准、FITS 头信息中望远镜信息的统一标准和 FITS 头中 WCS 信息的标准，并将其成功应用到终端控制系统中。

**4) 数据管理系统的研究与实现。**为丽江 2.4 米望远镜建立了包含存储、备份、预览、检查、预处理、入库归档和发布这七个模块的数据管理系统。根据不同的地理分布将数据管理系统划分成站内系统和站外系统，对应完成不同的工作。建立了完整的观测数据归档和入库的流程，通过跨网段的传输方式实现观测数据的异地备份。建立了观测数据在线预览和检查系统以及离线检查系统，在观测过程中及时对观测数据进行检查，从而向观测控制系统提供反馈。

**5) 系统集成与统一调度。**对观测调度相关的关键因素进行分析，在此基础上研发完成了一系列观测调度辅助系统，为观测控制系统各个部分的集成提供了很好的基础。基于此，为引力波事件后随观测建立了完整的观测调度模型，及时响应引力波事件并开展后随观测。

目前已经完成了丽江 2.4 米望远镜观测控制系统中望远镜控制系统、终端控制系统和数据管理系统的相关工作，并已经在实际观测过程中进行了应用。接下来将继续完成观测调度相关工作的研究，逐步提高丽江 2.4 米望远镜的观测效率。

**关键词：**观测控制系统，望远镜控制系统，终端控制系统，数据管理系统

## Abstract

Astronomy is a science that studies the structure and evolution of celestial bodies and the universe, and the development for it cannot be achieved without the astronomical observations. The scientific studies of astronomy are rely on the observational data obtained by astronomical observations. The output results of these studies are affected by the quality of the observational data directly. The invention of telescope, the invention and application of photographic film and CCD chips, the construction of large telescopes and precision observational instruments, are all trying to improve the quality of astronomical observation and to obtain observational data with better quality. The diameter of the telescope is increasing continues, and the performance of the observational instruments is also improved continues, which result in more and more targets that can be observed. The observational time of the telescope become more and more valuable, too. How to schedule the observational resources, such as telescope, observational instruments and the targets to be observed more effectively through the observatory control system, and then make full use of the limited observational time of the telescope to obtain more observational data with better quality, has become an urgent problem need to be studied now.

Lijiang 2.4-meter telescope, the largest general-purpose optical telescope in China, has been applied to the worldwide astronomers since 2008. It has become one of the most important astronomical observation and research platforms in China. In this paper, the key technologies such as intelligent control of telescope control system, unified control of instruments based on information fusion technology, data flow of observational data processing and responding of the observatory control system has been studied based on the Lijiang 2.4-meter telescope. After that, these technologies were applied into the studying and developing procedure of the observatory control system for Lijiang 2.4-meter telescope. All the works that have been completed are summarized as follows:

- 1) Study on the basic frame structure of observatory control system for Lijiang 2.4-meter telescope. Based on the study on the observatory control system of telescopes at home and abroad, formed the basic frame structure of the observatory control system for Lijiang 2.4-meter telescope. The function of each part of this system was also analyzed in details. Then, all the relevant works need to be completed in order to

construct the observatory control system for Lijiang 2.4-meter telescope are described.

2) Study on the integration of telescope control system. On the premise that there has no source code of the telescope control system for Lijiang 2.4-meter telescope, the telescope network communication interface (TNT in short) was upgraded completely, and the status database of this telescope was reconstructed, too. Based on the sequencer control pattern, the control command set of the telescope control system was redeveloped. A set of sequencer control command was developed for this telescope, and then was applied into the autonomous photometric observation task. Through the works completed, a basis for realizing the unified control and scheduling of the telescope control system by the observatory control system has been achieved.

3) Study and implement of the instrument control system. Based on the study of the major instruments and their control system of Lijiang 2.4-meter telescope, we proposed an instrument control system suitable for this telescope under the sequencer control pattern. After that, the control system of two instruments was developed by using the idea of sequencer control used by YFOSC, which is PI CCD and HiRES respectively. Thus, the unified control and dispatching of these three major observation instruments by observatory control system is realized. In addition, in order to realize the unified management of observation data, we defined three standards for the instrument control system while producing the observational data. They are the uniform standard of observation data file name, the uniform standard of telescope information in FITS header information and the standard of WCS information in FITS header. All of these standards have been utilized in the instrument control system, which will be controlled by the observatory control system.

4) Study and implement of the data management system. The framework of the data management system with seven modules, including storage, backup, preview, inspection, preprocessing, archiving and release of the data, has been established for the Lijiang 2.4-m telescope. According to the different geographical distribution, the data management system is divided into the on-site system and the off-site system to responsible for different work. A complete process of observational data archiving is also established. The off-site backup of observational data is realized through the transport across different networks. In addition, an online preview and inspection system for the observational data, as well as an offline inspection system, has been established to conduct timely inspection of observational data in order to provide feedback to observatory control system.

5) System integration and unified scheduling. Based on the analysis of the key factors related to observation scheduling, a series of observation and scheduling auxiliary systems have been developed, which provides a good basis for the integration of several subsystems with the observatory control system. Based on this, a complete observation scheduling model is established for the follow-up observation of gravitational wave events, which can respond to gravitational wave events in as soon as possible.

Several works related to the observatory control system of Lijiang 2.4-meter telescope have been completed, such as the telescope control system, the instrument control system and data management system. All of the works finished have been applied during the astronomical observation. In the future, we will continue to complete the unfinished work, and improve the observation efficiency of the Lijiang 2.4-meter telescope finally.

**Key Words:** Observatory Control System, Telescope Control System, Instrument Control System, Data Management System



## 目 录

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 摘 要.....                         | I   |
| Abstract.....                    | III |
| 目 录.....                         | VII |
| 图目录.....                         | XI  |
| 表目录.....                         | XV  |
| 第 1 章 绪 论.....                   | 1   |
| 1.1 观测控制系统.....                  | 1   |
| 1.2 观测控制系统的应用情况.....             | 3   |
| 1.2.1 LAMOST.....                | 4   |
| 1.2.2 利物浦望远镜和 LCOGT.....         | 5   |
| 1.2.3 BOOTES.....                | 7   |
| 1.2.4 Subaru.....                | 8   |
| 1.2.5 DKIST.....                 | 9   |
| 1.2.6 LSST.....                  | 10  |
| 1.3 国内望远镜面临的问题.....              | 11  |
| 1.4 论文主要研究工作.....                | 12  |
| 1.5 论文章节安排.....                  | 13  |
| 第 2 章 丽江 2.4 米望远镜观测控制系统整体设计..... | 15  |
| 2.1 丽江 2.4 米望远镜控制系统现状及存在的问题..... | 15  |
| 2.2 丽江 2.4 米望远镜观测控制系统的目标.....    | 18  |
| 2.3 丽江 2.4 米望远镜观测控制系统总体设计.....   | 18  |
| 2.3.1 系统用户.....                  | 21  |
| 2.3.2 观测模式.....                  | 22  |
| 2.4 基于观测控制系统的完整观测流程.....         | 23  |
| 2.5 本章小结.....                    | 24  |
| 第 3 章 望远镜控制系统的集成研究.....          | 25  |
| 3.1 观测控制系统对望远镜控制系统的调度需求.....     | 25  |
| 3.2 望远镜网络通信接口的升级.....            | 27  |

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| 3.3 望远镜状态数据库的实现.....              | 28        |
| 3.4 望远镜控制指令的二次开发.....             | 31        |
| 3.5 已完成工作的运行情况.....               | 32        |
| 3.5 本章总结.....                     | 33        |
| <b>第 4 章 终端控制系统的研究与实现.....</b>    | <b>35</b> |
| 4.1 国内外终端控制系统发展的现状.....           | 35        |
| 4.2 丽江 2.4 米望远镜的主要观测终端及其控制系统..... | 37        |
| 4.2.1 YFOSC.....                  | 38        |
| 4.2.2 PI CCD.....                 | 39        |
| 4.2.3 高色散光谱仪.....                 | 39        |
| 4.2.4 LiJET.....                  | 40        |
| 4.3 丽江 2.4 米望远镜终端控制系统设计.....      | 41        |
| 4.4 终端控制系统的实现.....                | 42        |
| 4.4.1 PI CCD.....                 | 42        |
| 4.4.2 HiRES.....                  | 45        |
| 4.5 终端控制系统的规范化建设.....             | 47        |
| 4.6 本章小结.....                     | 53        |
| <b>第 5 章 数据管理系统的研究与实现.....</b>    | <b>55</b> |
| 5.1 数据管理系统整体设计.....               | 55        |
| 5.2 观测数据归档和入库系统.....              | 57        |
| 5.3 观测数据在线预览和检查系统.....            | 60        |
| 5.4 观测数据离线检查系统.....               | 60        |
| 5.5 数据发布系统.....                   | 63        |
| 5.6 本章小结.....                     | 64        |
| <b>第 6 章 系统集成及统一调度.....</b>       | <b>65</b> |
| 6.1 观测调度相关的因素.....                | 65        |
| 6.2 观测调度辅助系统的研究.....              | 66        |
| 6.2.1 观测时间申请子系统.....              | 67        |
| 6.2.2 站址条件监测系统.....               | 69        |
| 6.2.3 观测日志辅助工具.....               | 71        |
| 6.2.4 用户星表导入系统.....               | 77        |
| 6.2.5 离线星表查询软件.....               | 78        |



|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 6.2.6 圆顶侧窗自动控制系统.....            | 82  |
| 6.3 统一的观测调度.....                 | 83  |
| 6.3.1 观测时间分配及完整观测流程.....         | 83  |
| 6.3.2 引力波事件后随观测调度.....           | 84  |
| 6.4 本章总结.....                    | 85  |
| 第 7 章 总结和展望.....                 | 87  |
| 参考文献.....                        | 89  |
| 附录一 TCS Sequencer 指令列表及功能说明..... | 95  |
| 附录二 简化后的 Gaia 星表信息说明.....        | 107 |
| 致 谢.....                         | 109 |
| 作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果.....     | 111 |



## 图目录

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 图 1.1 LAMOST 望远镜 .....               | 4  |
| 图 1.2 LAMOST 观测控制系统基本结构.....         | 5  |
| 图 1.3 利物浦望远镜.....                    | 5  |
| 图 1.4 利物浦望远镜的 RCS 系统结构.....          | 6  |
| 图 1.5 LCOGT 望远镜网络.....               | 6  |
| 图 1.6 BOOTES 望远镜网络.....              | 7  |
| 图 1.7 Subaru 望远镜圆顶（左）及望远镜主体（右） ..... | 8  |
| 图 1.8 DKIST 圆顶（左）及望远镜（右）示意图.....     | 9  |
| 图 1.9 LSST 望远镜（左）及其拼接 CCD（右）示意图..... | 10 |
| 图 2.1 丽江 2.4 米望远镜地理位置及圆顶.....        | 15 |
| 图 2.2 望远镜控制系统结构图.....                | 16 |
| 图 2.3 观测控制系统总体框架.....                | 19 |
| 图 2.4 OCS 硬件和软件的基本结构.....            | 20 |
| 图 2.5 观测控制系统完整的观测流程图.....            | 24 |
| 图 3.1 观测控制系统与望远镜观测控制系统的调度结构.....     | 26 |
| 图 3.2 更新前后的 TNT 程序流程图比较.....         | 28 |
| 图 3.3 状态信息数据库与各个应用软件的关系.....         | 29 |
| 图 3.4 状态信息数据库数据入库流程.....             | 30 |
| 图 3.5 目前的望远镜状态数据库实例.....             | 31 |
| 图 3.6 TCS Sequencer 系统结构.....        | 31 |
| 图 3.7 TCS Sequencer 程序运行机制.....      | 32 |
| 图 3.8 自动测光脚本程序.....                  | 34 |

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 图 4.1 观测终端在望远镜上的安装位置示意图.....                | 38 |
| 图 4.2 YFOSC 的序列指令控制程序结构图.....               | 39 |
| 图 4.3 高色散光谱仪控制系统结构.....                     | 40 |
| 图 4.4 LiJET 控制系统结构.....                     | 40 |
| 图 4.5 终端控制系统框架.....                         | 41 |
| 图 4.6 观测终端控制系统时序图.....                      | 42 |
| 图 4.7 PI CCD 序列控制系统结构.....                  | 43 |
| 图 4.8 PI CCD 控制程序的流程图.....                  | 44 |
| 图 4.9 HiRES 相机控制系统结构.....                   | 46 |
| 图 4.10 标准化的望远镜信息 FITS 头.....                | 49 |
| 图 4.11 FITS 头信息数据库结构.....                   | 50 |
| 图 4.12 添加望远镜信息后的 YFOSC 观测数据 FITS 头信息.....   | 50 |
| 图 4.13 添加望远镜信息后的 PI CCD 观测数据的 FITS 头信息..... | 51 |
| 图 4.14 YFOSC 的 FITS 头文件中 WCS 信息.....        | 53 |
| 图 5.1 数据管理系统框架结构图.....                      | 56 |
| 图 5.2 观测数据归档及入库流程.....                      | 57 |
| 图 5.3 观测数据分类.....                           | 58 |
| 图 5.4 观测数据检查流程图.....                        | 62 |
| 图 5.5 观测数据检索界面示例.....                       | 63 |
| 图 5.6 观测数据检索结果示例.....                       | 64 |
| 图 6.1 观测时间申请子系统业务流程图.....                   | 68 |
| 图 6.2 观测时间申请子系统顶层数据流图.....                  | 69 |
| 图 6.3 天文台址信息监测系统.....                       | 70 |
| 图 6.4 观测日志辅助工具系统架构图.....                    | 72 |

---

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 图 6.5 观测辅助工具运行的主界面.....     | 74 |
| 图 6.6 观测数据监听功能流程图.....      | 75 |
| 图 6.7 用户星表录入流程图.....        | 78 |
| 图 6.8 输出的查询文件的内容.....       | 80 |
| 图 6.9 星表查询软件用户界面.....       | 81 |
| 图 6.10 查询到的证认图.....         | 81 |
| 图 6.11 侧窗自动化控制硬件构架图.....    | 82 |
| 图 6.12 观测时间申请及观测实施完整流程..... | 83 |
| 图 6.13 引力波事件后随观测流程图.....    | 85 |



## 表目录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 表 4.1 HiRES 序列控制指令列表..... | 46 |
| 表 5.1 观测数据公共字段表.....      | 59 |
| 表 6.1 台址监测系统硬件设备列表.....   | 68 |
| 表 6.2 观测日志数据表格式.....      | 76 |





## 第1章 绪论

天文学是一门研究天体、宇宙的结构和发展的科学，它的发展离不开观测实验。天文研究所需要的观测数据需要通过天文观测获得，与其他自然科学的实验不同，天文观测只能通过被动接收信号的方式获得天体的信息，因而望远镜的口径对提高天文观测的能力有很大的影响。和大口径望远镜相比，2 米至 4 米口径的中型望远镜虽然在观测能力上比不上大口径的望远镜，但随着时域天文学研究的开展，中型望远镜依旧能开展多种科学课题的研究。尤其是随着巡天望远镜项目的开展、引力波事件<sup>[1][2]</sup>后随观测的需求，都要求望远镜能够在事件发生后快速地开展观测，相比于大口径望远镜，中型望远镜具有更好的机动性。在国内，目前通用型的中型光学望远镜依旧只有兴隆 2.16 米望远镜和丽江 2.4 米望远镜，对于国内天文观测而言，望远镜的观测时间已经变得非常宝贵，因此有必要从更高层次对望远镜的观测控制进行研究，研发一套覆盖望远镜控制、观测终端控制、数据采集和处理、观测结果反馈等完整过程的观测控制系统，从而提高望远镜的观测效率。

### 1.1 观测控制系统

观测控制系统（Observatory Control System, OCS）指的是一个大型的复杂软件系统，它负责将天文观测相关的望远镜、观测终端等资源有效地组织起来，通过合理的调度有效地完成观测的常规任务，例如：观测目标的选择、观测步骤的协调、观测中所涉及到的望远镜各组成部分的控制、数据的采集存储与处理、观测条件的监控等，从而获取高质量的观测数据。观测控制系统的概念最早是由 Gemini 望远镜的设计者们在 1995 年的 ADASS（Astronomical Data Analysis Software and System）第 5 届年会上明确提出的<sup>[3]</sup>。

观测控制是随着自动望远镜的出现而出现的<sup>[4]</sup>，因为无人值守的望远镜更需要有一定的规则来指导它的自动运行并获取有效数据。最初的观测控制是自动光电望远镜(Automated Photoelectric Telescopes, APT)实现的，但它只是简单的把要观测的目标预先写到程序中，然后由程序控制望远镜执行批量的曝光观测任务<sup>[5]</sup>。此后发展的自动望远镜大多都是针对特定的观测目的，由预先编写的程序来控制

望远镜运行并采集数据，并且慢慢地把天气情况的监测加入到了观测调度中，如 Carlsberg 子午环<sup>[6]</sup>，升级版的自动光电望远镜<sup>[7]</sup>。进入 21 世纪以后，随着计算机技术和网络技术的不断发展以及时域天文学研究的需求，建成了一批中小口径的程控自主天文台，并诞生了最早的一批满足时域天文学研究需求的全球程控自主天文台网络，与其对应的观测控制系统也得到了长足的发展。2009 年，在西班牙召开的第一届程控自主天文台国际研讨会上，对主要由中小型天文望远镜组成的程控自主天文台的各个发展阶段达成了共识，分为自动执行望远镜、远程操作望远镜、程控自主天文台和远程智能天文台这四个阶段<sup>[4][8]</sup>，而第四个阶段即由人工智能系统进行决策的程控天文台则是下一步努力的方向。

另一个方面，望远镜的口径始终是提高观测能力的主要手段，随着望远镜逐渐往巨型化方向发展，以及望远镜终端技术的不断发展，望远镜的软硬件组成变得越来越复杂，往往需要非常多的控制系统协同工作才能完成观测任务，这就使得早期功能单一的计算机辅助控制软件在功能实现上也变得捉襟见肘了。因而国内外众多的大口径望远镜都逐渐引入了建立在独立控制系统之上的观测控制系统，用它来协调和调度整个望远镜相关的各种独立的控制系统，部分或全部代替人工来完成复杂情况的分析和判断工作，在观测过程中进一步提高观测效率，减少人为操作失误带来的观测时间的损失，从而实现望远镜整体、高效地观测运行。

自动望远镜的不断发展、望远镜软硬件设备的不断复杂化、传感器技术的不断发展，逐渐促进了观测控制系统的发展。观测控制系统已经从最初的完成简单的批量观测控制，逐渐发展成涵盖望远镜各个方面的完整系统，成为核心控制部分，并逐渐向智能化方向发展，主要经历了如下几个阶段：1) 根据预先设置好的观测计划，控制望远镜执行批量的观测；2) 根据天气情况和设定条件自动控制望远镜和单一终端执行预先设定的观测任务；3) 根据多种传感器获取的天文台址信息（气象信息及视宁度、云量、天光背景等信息），从观测任务列表中选择最合适的观测任务，控制望远镜和对应的观测终端开展天文观测；4) 在程控自主天文台网络中，观测控制系统根据观测计划对全球的观测站点进行协调，根据各个节点的观测条件实施观测任务，并在观测结束之后对观测结果进行反馈以更新观测计划。

观测控制系统也具有专用性，不同科学目标、不同类型望远镜的观测控制系统的侧重点并不相同。对于光学望远镜而言，巡天望远镜的观测终端比较单一、

观测目的明确、数据量大，因此其观测控制系统侧重于观测计划的安排和大量观测数据的存储、处理相关的工作；通用型望远镜的观测终端丰富、观测任务繁多、数据量相对较少，因此其观测控制系统侧重于观测终端、观测任务根据观测条件的实时调度，在确定的观测条件下选择最佳的观测任务实施观测；太阳望远镜既有丰富的观测终端又会产生大量的观测数据，但观测任务相对简单，因此其观测控制系统侧重于观测终端的协调控制和大量观测数据的存储、处理相关的工作。因此，需要根据不同类型的望远镜及其科学目标，定制符合其观测需求的观测控制系统，最终才能逐步提高望远镜的整体观测效率。

## 1.2 观测控制系统的应用情况

目前国内大部分的望远镜都没有很好地应用观测控制系统，在中等口径望远镜中只有 LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopy Telescope) 望远镜应用了比较完整的观测控制系统<sup>[9]</sup>；在小口径望远镜方面则主要应用在需要远程或自动控制的安装在南极的望远镜中，如中国科技大学为南极的亮星巡天望远镜 (Antarctic Bright Star Survey Telescope, BSST) 基于 EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) 和 RTS2 (Remote Telescope System -2<sup>nd</sup> Version) 系统开发了能远程操控的观测控制系统，能在观测计划制定完成之后自主执行观测计划实施观测<sup>[10]</sup>；国家天文台也为南极巡天望远镜 (Antarctic Survey Telescope, AST3) 开发了能实现远程控制和自动巡天观测的控制系统，并将继续对其进行升级使其能更加自动化地实施观测<sup>[11]</sup>。此外，正在建设的云大 1.6 米多通道巡天望远镜 (Multi-channel Photometric Survey Telescope, Mephisto) 也在建设之初就考虑到了观测控制系统的应用。

在国际上，观测控制系统已经应用到众多的望远镜中，如实现自动观测的利物浦望远镜<sup>[12]</sup>，Subura<sup>[13]</sup>、Gemini<sup>[3][14]</sup>、JCMT (James Clerk Maxwell Telescope)<sup>[15]</sup> 等大口径望远镜，以及 BOOTES<sup>[4]</sup> (Burst Optical Observer and Transient Exploring System)、LCOGT<sup>[16]</sup> (Las Cumbres Observatory Global Telescope Network) 等望远镜观测网络中。正在建设中的 DKIST (Daniel K. Inouye Solar Telescope, 原为 Advanced Technology Solar Telescope - ATST) 和 LSST (Large Synoptic Survey Telescope) 都在建设之初就考虑了观测控制系统的研发<sup>[17][18]</sup>。

本节将对国内外部分望远镜及其观测控制系统的应用情况进行介绍。

### 1.2.1 LAMOST

LAMOST 望远镜，又名郭守敬望远镜，坐落在中国河北的兴隆天文观测基地（如图 1.1 所示），是一架中星仪式反射施密特望远镜，望远镜的主体由三部分组成：反射施密特改正板 MA，球面主镜 MB 和焦面，等效口径达到 4 米。在焦面上放置了 4000 根光纤，由光纤将天体的光传输到 16 台光谱仪上，通过 32 台 CCD（Charged Coupled Device）可以一次性获得 4000 条光谱数据。



图 1.1 LAMOST 望远镜

Figure 1.1 LAMOST

LAMOST 在建设阶段就对观测控制系统进行了设计和研发<sup>[9]</sup>，将观测控制系统作为整个系统运行的中枢神经，通过观测控制系统对多个子系统进行管理、协调和控制，使得整个望远镜可以有条不紊地按照观测计划进行光谱巡天观测。如图 1.2 所示，望远镜观测控制系统处在 LAMOST 软件系统中的核心位置，具有最高的控制级别，它通过望远镜控制系统控制望远镜 MA 机架、焦面机械结构和圆顶的运行，通过终端控制系统直接控制光谱仪 CCD 集群和光纤单元，对数据获取和在线处理子系统进行直接控制；而部分子系统（如导星系统、环境信息系统）则没有直接接入观测控制系统，由操作员手动控制，实现间接控制。

LAMOST 的观测控制系统是基于 CORBA（Common Object Request Broker Architecture）体系结构开发的，采用分层的体系结构以提高系统的松散耦合性、可扩展性和可维护性，并使用模型/视图/控制器的框架模式，提供了把用户接口和相关领域进行分离的模式。在通信上采用了异步通信的思想，自定义了一整套通信协议，为所有子系统建立统一的状态模型，通过流程控制与界面调用技术实现对复杂的观测流程的良好调度<sup>[19-25]</sup>。LAMOST 的观测控制系统是一套相对较

为复杂的控制系统，既要负责多个子系统的控制和天文观测的调度，也要兼顾状态信息的接收，任务繁重。经过多年的运行和完善，观测控制系统对 LAMOST 的观测程序优化和提高观测效率还是做出了贡献。

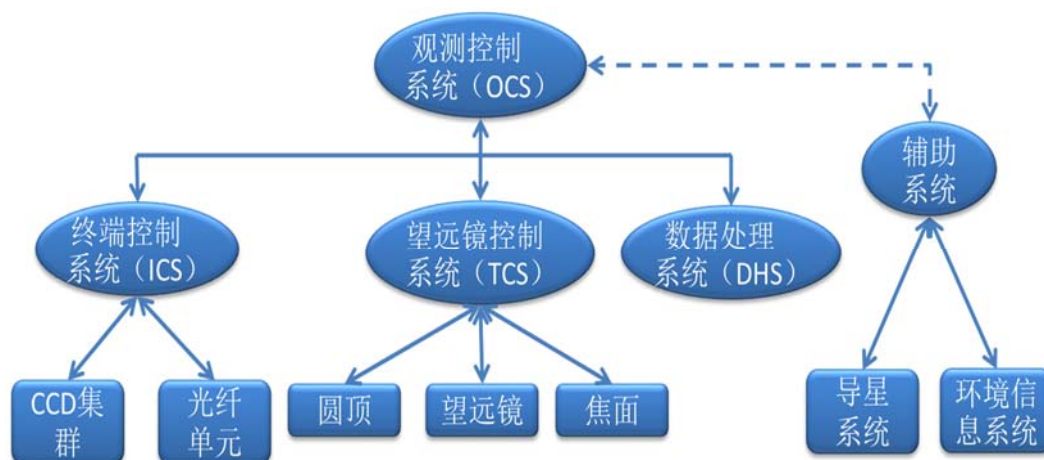


图 1.2 LAMOST 观测控制系统基本结构

Figure 1.2 Basic structure of observatory control system for LAMOST

### 1.2.2 利物浦望远镜和 LCOGT

利物浦望远镜坐落在西班牙加纳利群岛的拉帕尔玛（La Palma）岛上，是一架口径 2 米的全自动地平式望远镜（如图 1.3 所示），由英国 TTL（Telescope Technology Limited）公司研制，到目前为止仍然是世界上口径最大的全自动望远镜。



图 1.3 利物浦望远镜

Figure 1.3 Liverpool Telescope

利物浦望远镜在控制系统设计过程中采用了面向对象技术和分布式控制的思想，将整个系统分为望远镜控制系统(Telescope Control System, TCS)、终端控制系统(Instrument Control System, ICS)和机器人控制系统(Robotic Control System,

RCS)三个部分,由终端控制系统实施观测终端的控制,由机器人控制系统来实施观测控制<sup>[12][26-30]</sup>(如图 1.4 所示)。它通过一个调度程序从预先输入的观测目标数据库中提取观测目标进行观测,结合实时的大气状况(视宁度、大气消光等)来决定是观测科学目标还是观测标准星,并且在有机会源产生的时候能够及时响应并实施观测<sup>[31]</sup>。

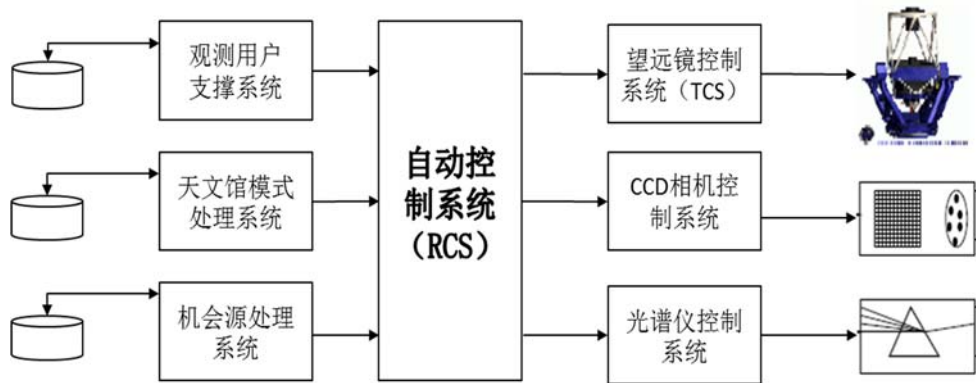


图 1.4 利物浦望远镜的 RCS 系统结构

Figure 1.4 System structure for RCS of Liverpool Telescope



图 1.5 LCOGT 望远镜网络

(图中绿色点为望远镜所在站点,黄色的点为 LCOGT 总部和运维中心)

Figure 1.5 LCOGT telescope network (In the figure, the green point refer to telescopes, the yellow point refer to headquarter and operation center of LCOGT)

国际上在观测控制系统方面发展的比较早也比较好的中等口径望远镜(2 米级)还有 LCOGT<sup>[16][32-35]</sup>计划中的 Faulks South 和 Faulks North 望远镜,这两架 2 米级望远镜也是英国 TTL 公司生产的,具有和利物浦望远镜类似的控制系统。如今, LCOGT 在全球已经建立了 8 个天文台站<sup>1</sup>(如图 1.5 所示),除了 2 架 2 米级望远镜外,还有 12 架 1 米和 10 架 0.4 米的望远镜,这些望远镜分布在地球的

<sup>1</sup> <https://lco.global/>

不同经度位置,从而实现 24 小时不间断观测的望远镜观测网络。LCOGT 的观测运行是由位于美国旧金山的总部进行调度的,每天会对观测计划进行调整,并同步更新到各个天文台的望远镜控制系统中,在观测结束后又会对整个数据库进行更新。目前,LCOGT 已经具备协调控制全球望远镜观测网络的能力,但是还需要很多的人工介入,未能实现完整的观测网络的自动化。

### 1.2.3 BOOTES

BOOTES 望远镜网络<sup>2</sup>是由西班牙安达卢西亚天文研究所提出并建设的全自动望远镜网络,其望远镜主要分布在西班牙南部、新西兰、中国、墨西哥、智利(在建)和南非(在建),如图 1.6 所示。每台望远镜的口径都是 0.6 米,在其卡焦位置配备了 EMCCD 相机,使用的滤光片组是统一的 g, r, i, Z, Y 滤光片。它的主要观测目标是在伽玛暴发生后能快速地对伽玛暴进行后随观测,最快的响应时间能达到秒级。

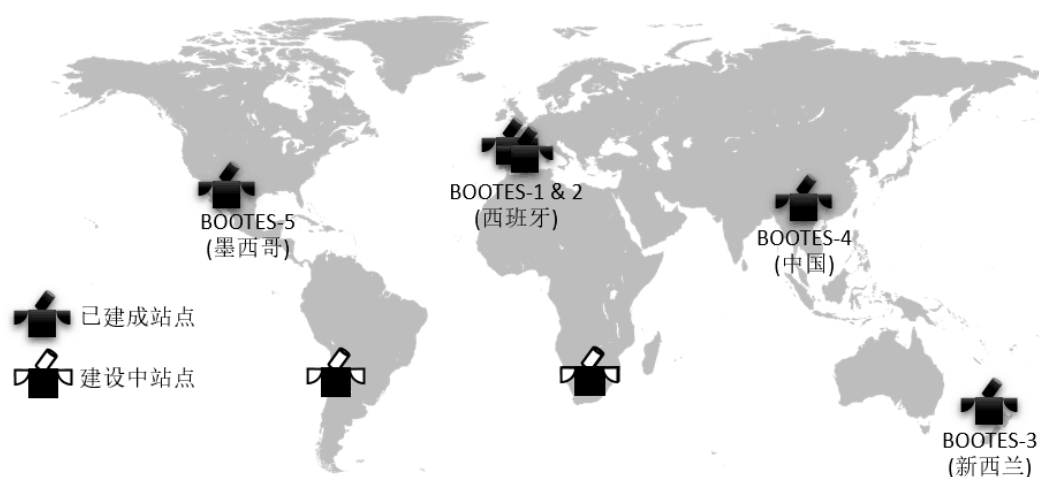


图 1.6 BOOTES 望远镜网络

Figure 1.6 BOOTES telescope network

BOOTES 望远镜运用 RTS2 系统实现了对整个自主天文台的管理<sup>[36]</sup>,包括对望远镜、观测终端、圆顶、滤光片等的控制,能根据天气情况开关圆顶,能对预先输入的观测目标进行调度并实施观测,基本实现了无人值守的全自动观测。RTS2 还提供了两种不同的观测调度模式,即优先级调度和队列调度:在优先级调度模式下系统会自动从可观测目标中选择优先级最高的目标进行观测而无需人为干预,观测者可以通过不同的奖励制度修改观测目标的优先级,但在实际观

<sup>2</sup> <http://bootes.iaa.es/>



测过程中却出现了同一目标由于奖励值设置太高而导致重复观测的问题；在队列调度模式下，系统提供了先入先出、循环、目标高度优先等基本的队列调度算法<sup>[37-39]</sup>，但观测队列需要人为设置且需要随着观测时间的改变而不断更新，因此也缺乏普遍性。虽然目前使用 RTS2 进行控制的望远镜口径都比较小，最大口径是位于 CAHA（Centro Astronómico Hispano-Alemán）的 1.23 米望远镜，观测终端也比较单一，观测目标则主要关注伽马暴观测<sup>[37][40]</sup>，但该系统下的观测目标调度模式值得借鉴并能应用到其他天文望远镜观测目标的调度中。

#### 1.2.4 Subaru

Subaru 望远镜（亦称昴星望远镜）是日本国家天文台在美国夏威夷建造的 8.2 米口径的光学望远镜（如图 1.7），望远镜主镜采用了薄镜面技术，在建成时是世界上最大的单镜面望远镜。

Subaru 望远镜的第一代观测软件系统（Subaru Observation Software System, SOSS）将系统划分为观测控制系统、数据获取系统、数据分析系统和数据库系统。观测控制系统由系统管理子系统、观测支撑子系统、观测调度子系统和日志系统构成，观测控制系统将所有的子系统集成到一起并提供一个统一的控制和观测界面，用户通过统一的界面访问所有的终端，而不需要关心各个终端的不同，这在降低使用难度的同时大大提高了观测效率<sup>[13][41]</sup>。但是由于分布式系统大而复杂的特性，以及使用了多种的通信机制带来的复杂性，该望远镜基于命令模式设计开发了第二代的观测控制系统<sup>[42-44]</sup>。

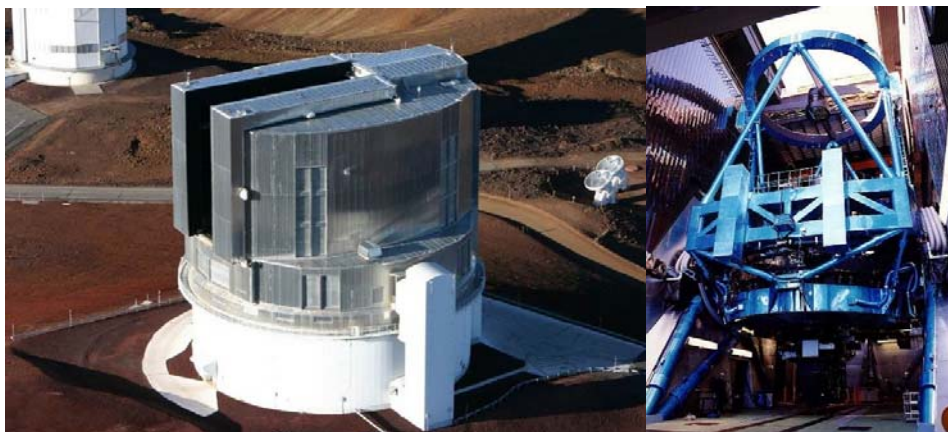


图 1.7 Subaru 望远镜圆顶（左）及望远镜主体（右）

Figure 1.7 Subaru telescope dome (left) and the telescope (right)



### 1.2.5 DKIST

DKIST 望远镜是将安装在美国夏威夷 Haleakala 天文台的太阳望远镜，它的口径是 4 米，建成后将成为世界上最大的太阳望远镜（如图 1.8 所示）。

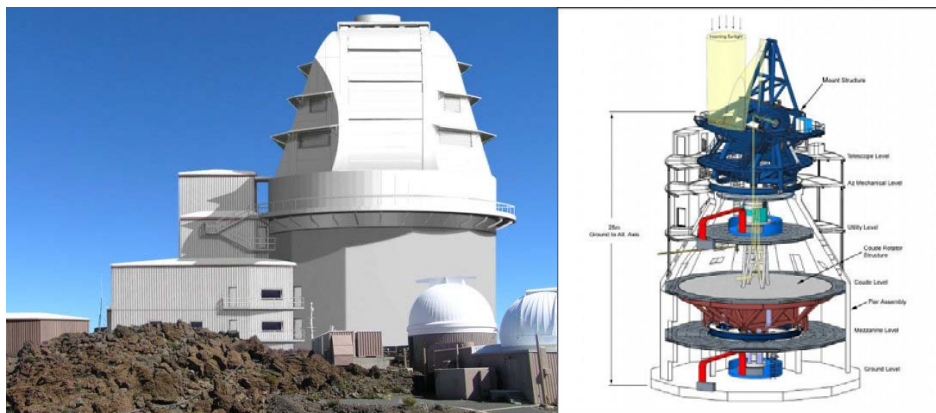


图 1.8 DKIST 圆顶（左）及望远镜（右）示意图

Figure 1.8 Schematic diagram for DKIST dome (left) and telescope (right)

DKIST 在设计的过程中就高度重视观测控制系统的研发，将软件系统作为整个望远镜的一个重要部分来进行建设，尤其是在观测控制系统方面，提出了很多新的设计思想<sup>[17][45]</sup>。与传统的观测运行模式不同，DKIST 采用了基于实验室风格的灵活观测运行模式，不再建设固定的观测终端设备，而是引入虚拟终端的思想，将系统中所有能够控制的部分划分成一个一个的组件，通过实验、虚拟终端和望远镜系统软件之间的相互作用实现观测。一次实验是根据科学家的观测需求而组织起来的观测计划，是观测运行的核心指导思想，主要由科学观测方案和虚拟终端的描述组成。虚拟终端则是根据科学家的某个观测实验需求而构建的观测终端，由系统中一个或多个组件组成，该组件可以是纯硬件的设备，也可以是纯软件的控制软件，大部分的组件是由硬件设备及其控制软件构成的。在观测过程中以实验的需求为依据选择不同的组件组织虚拟终端，相同的组件可以在不同的虚拟终端中进行复用，虚拟终端本身又可以作为一个组件并与其它组件组成更加复杂的观测终端设备，而且望远镜控制系统本身也可以作为一个组件来使用。

DKIST 的软件系统根据功能的不同划分成观测控制、望远镜控制、终端控制、数据处理和通用软件这五个主要功能，所有的软件都运行在一套公共服务软件框架（Common Service Frame, CSF）之上，并划分成四个主要的系统，即：观测控制系统、望远镜控制系统、终端控制系统和数据处理系统。观测控制系统主要负责对整个天文台进行管理，包括资源的分配、观测计划的调度和对系统状态的监控，提供用户控制接口，并对前面提到的虚拟终端进行管理。在整个观测流程

中,首先由科学家设计一个实验,根据实验的需求选择不同的组件组成一个虚拟终端,虚拟终端一旦建立之后就会注册到观测控制系统中,并可以像传统的终端设备一样来控制和使用;在观测开始之后,观测控制系统执行科学观测方案,将每个观测计划中的配置需求直接传递给虚拟终端,控制虚拟终端展开观测并获取所需要的观测数据。

DKIST 采用类似于软件系统研发的思想,将系统中可控的部件标准化为一个独立的组件,以组件/容器的模型为基础,引入虚拟终端的思想,依据不同的实验需求将不同的组件构建成虚拟终端,大大提高了整个系统的灵活性和可扩展性。同时,不同的虚拟终端也可以组成更加复杂的虚拟终端,甚至可以调用不同天文台的虚拟终端设备从而可以实现特殊的观测目标,在某种意义上也提高了望远镜的观测性能。DKIST 的观测控制系统采用分布式、标准化、分层的体系结构和虚拟终端的思想,基于现代天文台软件的需求进行研发,将在望远镜建成之后实现对观测设备的灵活控制和调度,大大提高观测效率。

### 1.2.6 LSST

LSST 是正在智利 Cerro Pachon 建设的口径 8.4 米的地基光学巡天望远镜,其视场达到 9.6 平方度,配备一台具有 3.2G 像素的拼接 CCD 相机(如图 1.9 所示)。

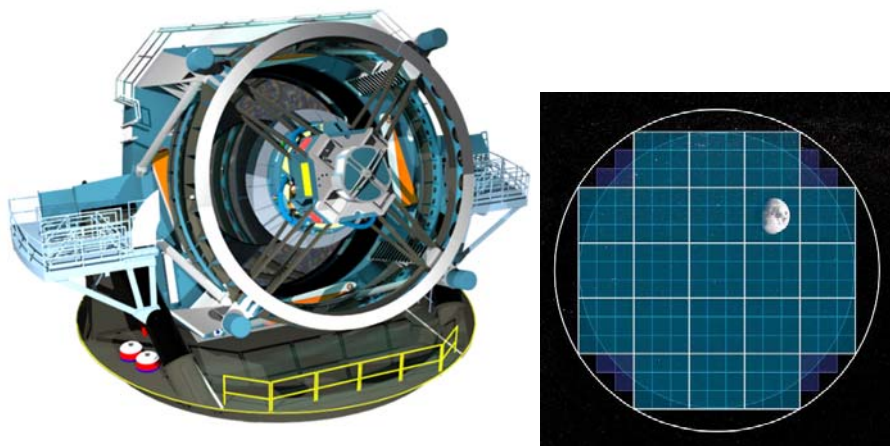


图 1.9 LSST 望远镜(左)及其拼接 CCD(右)示意图

Figure 1.9 Schematic diagram of LSST telescope (left) and the multi-chip CCD

LSST 在设计的时候也选择使用观测控制系统来实现整个望远镜的协调控制和观测的实施,LSST 的整体软件控制架构是以数据为中心的,而观测控制系统是其中最主要的组件。通过使用中间件技术和分布式控制架构,观测控制系统不

需要与望远镜的子系统建立独立的连接，而是通过数据分布式服务系统（Data Distribution Service, DDS）来进行通信，包括获取子系统的状态、向子系统发布命令等<sup>[18][46-48]</sup>，从而实施巡天观测任务并获取观测数据。

### 1.3 国内望远镜面临的问题

目前国内主要观测基地的大部分通用望远镜依旧运行在传统的观测模式下：即在每个观测季之前统一进行观测时间的申请和分配，观测用户在指定的日期到达观测地点并制定观测计划，通过观测助手操作望远镜和观测终端，由观测者提供观测目标、指定滤光片或者光栅、指定曝光时间实施观测计划获取观测数据。这种观测模式存在很多的缺点：1) 每次到现场观测的差旅开支很高，且有可能遇到天气不好的情况而无法获取足够有效的观测数据，观测性价比低。2) 会因为种种原因造成时间浪费：如 a. 由于对观测终端的性能不熟悉，观测计划制定不够优化，导致观测时间的浪费；b. 一些要求观测条件好的观测计划实际观测时的观测条件并不很好，而有些不要求观测条件好的观测计划却在观测条件极好的观测夜实施观测，导致观测条件极好的观测夜被浪费；c. 观测计划制定的灵活性不够，一旦在观测过程中遇到天气变化，不能对观测计划进行及时的动态调整，导致观测时间的浪费。

由于没有完整的观测控制系统，国内大部分通用型望远镜在观测的过程中受到了一些限制：1) 不能对观测目标进行预先安排，在观测过程中也不能根据观测条件的变化实时修改观测计划；2) 无法对伽玛暴、引力波事件等机会源的后随观测进行迅速的响应；3) 无法通过气象数据的变化对气象条件的变化进行预判，从而对观测计划进行调整；4) 望远镜运行维护成本以及观测成本较高。但是对于已经建成的望远镜，改善观测流程提高观测效率只能是在现有系统的基础上进行观测控制系统的集成开发，无法很好地从一个整体对观测控制系统进行考虑，只能基于现有系统的具体情况进行改造性研发，缺乏灵活性和标准化，研发难度也会增加。

因此，对于将建的望远镜，可以而且应该从望远镜设计阶段就将观测控制系统作为与望远镜主体、观测终端同等重要的系统，从顶层设计开始就对望远镜观测控制系统及其相关的子系统进行设计和分析，根据望远镜的科学目标和观测需求进行有针对性的研发，从而提高望远镜的观测效率、获取高质量的观测数据

提供基础。

## 1.4 论文主要研究工作

本文基于丽江 2.4 米望远镜对观测控制系统的关键技术展开研究，包括望远镜控制系统的智能化控制、观测终端基于信息融合技术的统一控制、观测数据处理及反馈的数据流技术等，主要完成了以下几个方面的研究工作：

- 1) **丽江 2.4 米望远镜观测控制系统的基础框架研究。**在对国内外望远镜观测控制系统进行研究的基础上，对丽江 2.4 米望远镜的现状进行深入分析，提出丽江 2.4 米望远镜观测控制系统的基础框架结构，并对系统中各个部分的功能进行详细的分析，概括出建设丽江 2.4 米望远镜观测控制系统需要完成的相关工作目标。
- 2) **望远镜控制系统的集成研究。**在没有望远镜控制系统源代码的前提下，对望远镜现有控制系统进行研究，完成望远镜网络通信接口的升级工作，解决获取望远镜状态信息和传输控制指令的问题，建立独立的望远镜状态数据库。基于序列控制的模式，对望远镜控制系统原有的控制指令进行二次开发，为观测控制系统实现对望远镜控制系统的控制和调度提供完整指令集。
- 3) **终端控制系统的研究与实现。**对丽江 2.4 米望远镜的主要观测终端及其控制系统进行研究，在此基础上提出适合该望远镜的终端控制系统。通过信息融合和集成控制等技术，基于序列控制的思想实现对 PI CCD 和高色散光谱仪的控制系统的升级改造工作，从而实现观测控制系统对包括 YFOSC 在内的三个主要观测终端的统一控制和调度。基于规范化和标准化建设的要求，针对观测数据统一管理的需求，在终端控制系统研发过程中定义了与观测数据有关的三个标准。
- 4) **数据管理系统的研究与实现。**天文观测数据始终是天文研究中的基础，也是天文望远镜观测运行的主要成果，获取高质量的观测数据是观测控制系统的主要目标。为丽江 2.4 米望远镜建立了包含存储、备份、预览、检查、预处理、入库归档和发布这七个模块的数据管理系统。根据不同的地理分布将数据管理系统划分成站内系统和站外系统，对应完成不同的工作。建立了完整的观测数据归档和入库的流程，通过跨网段的传输方式实

现观测数据的异地备份。建立了观测数据在线预览和检查系统以及离线检查系统,在观测过程中及时对观测数据进行检查,从而向观测控制系统提供反馈。

- 5) **系统集成与统一调度**。对观测调度相关的关键因素进行分析,在此基础上研发完成了一系列观测调度辅助系统,为观测控制系统各个部分的集成提供了很好的基础。基于此,为引力波事件后随观测建立了完整的观测调度模型,及时响应引力波事件并开展后随观测。

以上相关技术的研究,是建立丽江 2.4 米望远镜观测控制系统的基础,在以上各个子系统功能得到实现的基础上,才能建立较为完善的观测控制系统,实现对终端的统一控制和对观测计划的统一调度,从而提高望远镜观测效率,在有限的观测时间内获取高质量的观测数据。

## 1.5 论文章节安排

论文的章节安排如下:

第一章对观测控制系统及其在国内外望远镜中的应用情况进行了阐述,并对国内望远镜目前面临的问题进行了分析,并对本文基于丽江 2.4 米望远镜开展观测控制系统研究所需要完成的工作进行了阐述。

第二章对丽江 2.4 米望远镜控制系统的现状进行研究,概括出进行丽江 2.4 米望远镜观测控制系统研发所需要解决的问题,并对该望远镜的观测控制系统的整体框架结构进行了构建和分析。

第三章对丽江 2.4 米望远镜现有的望远镜控制系统进行分析,对其中无法满足观测控制系统研发需求的部分进行详细分析,对已经完成的望远镜控制系统的升级改造工作进行总结。

第四章对终端控制系统进行研究,针对丽江 2.4 米望远镜观测终端的现状,通过信息融合和序列控制技术实现多个观测终端的一体化控制,为观测控制系统的观测调度提供基础。

第五章对数据管理系统进行研究,针对丽江 2.4 米望远镜观测控制系统的需求,建立从数据采集、存储、备份到发布的整体的数据处理流程,并建立数据检查的机制,对数据质量进行检查并根据检查的结果进行反馈,从而协助进行观测计划的调整;同时通过对观测数据的长期监测发现望远镜观测性能的变化,从而

及时发现望远镜和终端等硬件设备潜在的问题。

第六章介绍观测控制系统的集成和统一调度，对已经完成的与观测调度相关的辅助系统进行详细阐述，之后通过引力波事件后随观测的整体流程对观测控制系统的统一调度进行描述。

第七章对目前已经完成的工作进行总结，并对下一步能够开展的工作进行展望。



## 第2章 丽江 2.4 米望远镜观测控制系统整体设计

丽江 2.4 米望远镜建成并投入运行已经超过十年，在取得一定成绩的同时也暴露出了一些影响观测效率的问题。为了保持该望远镜在将来的竞争力，首先需要对该望远镜控制系统的现状和存在的问题进行分析，在此基础上概括出实现观测控制系统研发所需要完成的主要工作目标，并设计建立观测控制系统的基础框架结构，以该望远镜为研究平台对观测控制系统的关键技术进行研究，并最终为其研发较为完善的观测控制系统。

### 2.1 丽江 2.4 米望远镜控制系统现状及存在的问题

丽江 2.4 米望远镜是由中国科学院、国家科技部、云南省三方联合资助的创新工程重大项目，是东亚地区口径最大的通用型光学望远镜，是我国七大天文学科学工程中第一个投入运行的观测设备，其地理位置及圆顶如图 2.1 所示。



图 2.1 丽江 2.4 米望远镜地理位置及圆顶

Figure 2.1 Location of Lijiang 2.4m telescope and the dome

自 2008 年投入观测以来，该望远镜已逐渐成为我国重要的天文观测研究平台之一。2012 年，该望远镜正式对国内外天文学家开放观测，此后先后安装了几台性能优良的终端设备，科学产出逐年增加，在高红移类星体的发现、活动星系核黑洞质量测量和内部结构研究、超新星发现和研究、恒星星震研究、伽玛暴、系外行星搜寻等研究领域开始发挥了重要作用。但是望远镜现有控制系统及观测

模式也对望远镜的观测效率带来了很多方面的限制，为观测控制系统的研发带来很多的难点。概括来讲，主要包含以下几方面的问题：

### 1. 望远镜控制系统未提供观测控制系统调度所需的接口

该望远镜在设计之初其生产厂商 TTL 公司就将其定义为“世界上最大口径的自动望远镜”<sup>[49]</sup>，因此该架望远镜从底层硬件到控制软件设计都考虑了自动观测的需求，但由于种种原因，最终并没有完成丽江 2.4 米望远镜的自动观测系统的研发，仅仅提供了望远镜控制系统（如图 2.2 是原有控制系统结构图，图中黄色框图部分就是未完成的工作，也是本文想建立的观测控制系统相关的部分）。

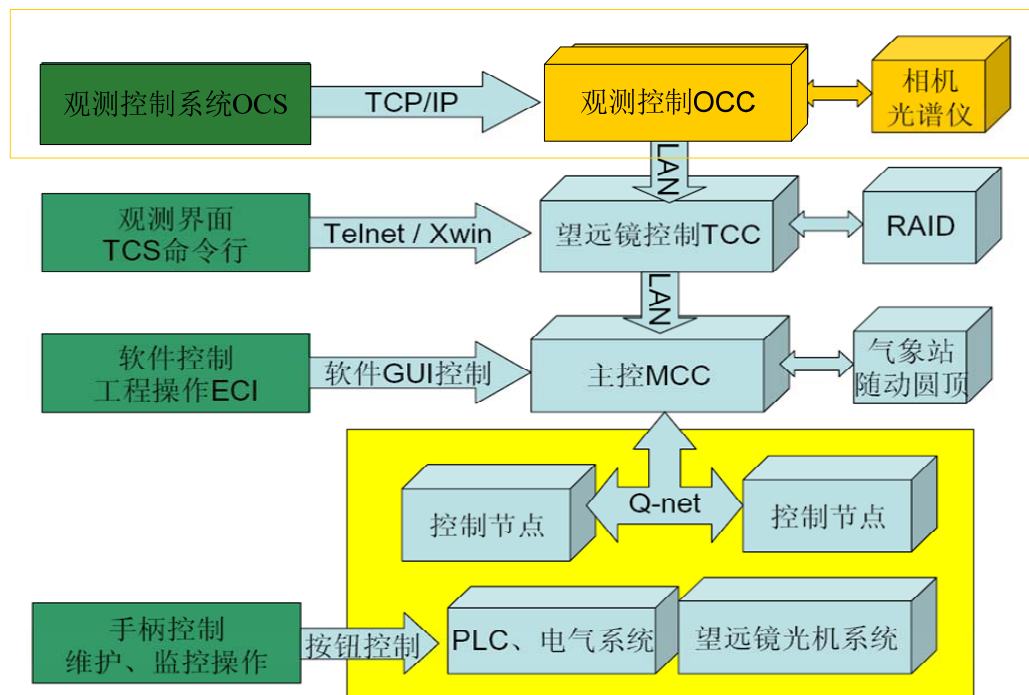


图 2.2 望远镜控制系统结构图

Figure 2.2 Structure of the telescope ccontrol system

从图中可以看出，望远镜采用了分布式的控制网络，对望远镜各个轴的运动和主镜的主动支撑进行实时的控制。各个控制节点由运行 QNX 实时操作系统的工控机组成，数据通信依靠独特的 Q-net 进行。主控计算机（Master Control Computer, MCC）是整个分布式控制系统的核心，负责向各个控制节点、圆顶、气象站等辅助设备分发控制命令并收集状态信息<sup>[49]</sup>。而在底层，望远镜的 PLC 系统已经将大部分的底层控制和状态信息集成到了数据库中，在底层实现了望远镜整体电控方面的安全防护，并向上层应用软件提供接口。这为观测控制系统的研发提供了基础。



从图中还可以看到, 丽江 2.4 米望远镜原有的控制系统与观测终端设备是脱节的, 望远镜控制系统并不能实现对观测终端的控制, 尤其是对于后来配置的观测终端更是无法直接接入到整个控制系统中进行控制, 只能通过其自带的控制软件进行观测数据的采集。每次观测都需要望远镜控制和观测终端控制配合才能实施, 这就会影响到望远镜进行天文观测的整体效率。

## 2. 终端控制系统相互独立, 未能建立完整的终端控制系统

经过多年的配置和完善, 丽江 2.4 米望远镜目前已经配备了多台观测终端, 包括云南暗弱天体成像光谱仪 (Yunnan Faint Object Spectrograph and Camera, YFOSC)、丽江系外行星探测器 (Li-Jiang Exoplanet Tracker, LiJET)、高色散光谱仪 (High Resolution Spectrograph, HiRES), 多色测光系统 (Multicolor Photometric System, PI CCD) 和中国丽江积分视场光纤光谱仪 (China Lijiang Integral Field Unit, CHILI), 使得 2.4 米望远镜具备了光学波段的成像、中低色散光谱、高色散光谱和积分视场光谱观测的能力。

得益于 2012 年配置完成的卡焦终端快速切换系统 (Rapid Instrument Exchanging System, RIES), 多台观测终端可以同时安装在丽江 2.4 米望远镜的卡焦侧口位置, 观测用户可以在观测的期间针对观测目标和天气的变化通过该系统进行观测终端的快速切换, 并能对同一个观测目标实现准同步的测光和光谱观测。基于此, 在同一晚上可以实现多种不同类型的观测任务<sup>[50-51]</sup>。但是该系统只是在望远镜硬件层面上实现了对观测终端硬件设备的切换, 即在一个观测夜中根据需求通过旋转安装在卡焦的平面反射镜完成望远镜光路的切换, 从而切换不同的观测终端进行观测。在观测终端的控制软件方面, 每个观测终端依旧使用独立的控制系统, 没有能够实现对所有观测终端的统一控制。

## 3. 原始观测数据管理方式不规范, 观测数据未能进行及时的检查

在观测终端曝光结束之后, 观测数据都在本地进行保存, 其后通过移动硬盘或者刻制光盘的模式进行存储和备份, 没有建立统一的观测数据管理系统。这种临时的观测数据管理方式存在着数据丢失的风险, 不便于观测数据的查询和使用, 也无法满足日益增长的观测数据的需求。而且, 在一次观测结束之后, 也不能对观测数据进行实时的检查, 无法获取观测数据的质量情况, 只能通过人为的判断决定观测是否成功。这在很大程度上受限于观测者的经验。

#### 4. 望远镜的观测模式仍以传统模式为主

丽江 2.4 米望远镜的观测模式仍以传统模式为主，在获得观测时间之后，用户需要来到观测站现场，在观测前进行观测计划的制定，在观测过程中需要观测用户与观测助手进行交互才能完成天文观测。在这种模式下，观测时间不能得到充分的利用，观测中难免存在沟通的失误，在出现机会源的时候也不能进行快速的响应，而需要通过人工来协调观测时间。

### 2.2 丽江 2.4 米望远镜观测控制系统的目标

针对前一节中描述的丽江 2.4 米望远镜的现状和存在的问题，在进行观测控制系统研发的过程中就需要解决存在的问题，达到如下的目标：

- 1) 通过观测控制系统实现对望远镜控制系统的控制，并能实时得到望远镜的运行状态，为观测运行调度提供准确的数据参考。
- 2) 通过观测控制系统能实现对所有观测终端的一体化控制，能监控所有观测终端的状态，以及终端上配置的光学元器件的情况，在进行观测调度的时候能选择合适的观测终端。
- 3) 建立完整的观测数据管理系统，涵盖观测数据存储、备份、归档到发布的完整流程，保证望远镜观测数据的安全性。与此同时，建立观测数据检查系统，在观测结束后就对观测数据进行检查，从中发现问题并及时通知运维团队进行望远镜、观测终端等的运维，保证望远镜的长期正常运行。
- 4) 改进望远镜的观测模式，请观测用户提前提交观测计划，并将观测计划入库，在观测调度过程中根据实际情况对观测目标进行调度，提高观测效率；建立对机会源观测的快速响应机制，能在发生机会源事件的时候尽快做出反应，在尽可能短的时间内开始观测，获取观测数据。
- 5) 提供丰富的观测控制所需的辅助信息，对所有的观测计划进行统一的管理，通过数据库对气象信息、云量信息、视宁度信息等进行统一管理，并能提供标准的观测日志，为观测数据的处理提供合理的依据。

### 2.3 丽江 2.4 米望远镜观测控制系统总体设计

观测控制系统是整个望远镜控制软件的核心部分，负责对望远镜观测运行中的各个部分进行协调和调度，包括望远镜控制系统、终端控制系统、数据处理系

统及为观测调度提供辅助信息的各个子系统。

丽江 2.4 米望远镜观测控制系统的整体设计结构如图 2.3 所示。

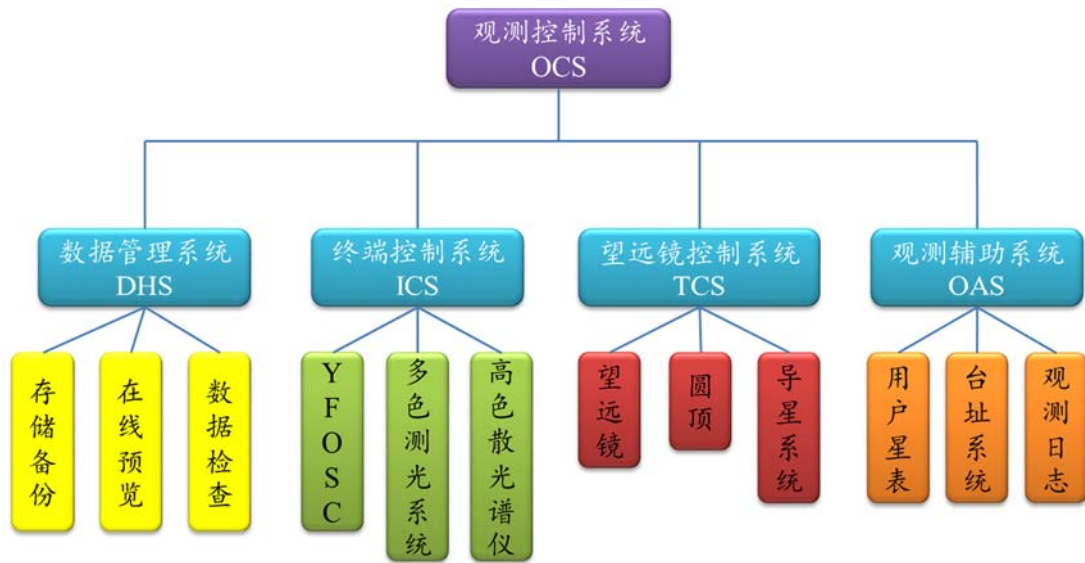


图 2.3 观测控制系统总体设计结构

Figure 2.3 Architecture of Observatory Control System

各个子系统的功能分别为：

- 1) **望远镜控制系统 (TCS)**：整个望远镜的控制核心，主要用于接收用户输入的指令，对观测目标的坐标进行计算得到望远镜的方位轴和高度轴的坐标，将结果传输给各个控制节点并进一步控制望远镜的机械和光学系统转动到要求指向的位置，控制天窗转动到合适的方位位置，指向目标后对观测目标进行跟踪。
- 2) **终端控制系统 (ICS)**：所有观测终端设备的控制中心，主要功能包括：监测所有观测终端的状态；接收从 OCS/观测用户输入的指令，将其传输给特定观测终端的控制系统执行该指令，在执行结束之后进行必要的反馈；对观测终端的配置进行实时监控；在曝光结束之后，将观测数据传输给数据管理系统。
- 3) **数据管理系统 (DHS)**：对所有的观测数据进行管理和处理，主要功能包括：在线对观测数据进行简单的处理并反馈一些与数据质量相关的简单结果；离线对所有的原始数据进行处理，将所有需要的元数据和一些关键的处理结果都存储到数据库中；将观测数据存储到数据中心的磁盘阵列中，并对原始数据进行异地备份从而保证观测数据的安全。
- 4) **观测辅助系统 (OAS)**：一系列辅助天文观测开展的子系统的集合，主要包括：

气象数据、云量信息、大气视宁度、天光背景等反应天文站址观测条件的信息的采集、入库和统计分析功能；观测时间申请、观测用户管理、观测时间申请书以及观测时间分配，观测日志处理等相关的功能。

- 5) **观测控制系统 (OCS)**：整个望远镜观测控制的顶层系统，主要包括：提供用户图形界面实现观测用户和各个子系统之间的交互；对所有通过观测时间申请，并通过时间分配委员会获得观测时间的观测用户的观测目标进行管理和调度，对所有的观测目标根据优先级和观测辅助系统提供的观测条件进行合理的调度，实现更高质量、更高效的天文观测；将数据库中所有与望远镜、观测终端、圆顶等相关的状态信息，所有天文台址信息以及观测目标等信息都在用户界面上进行显示；接收从数据处理系统反馈回来的观测数据质量信息，并在用户界面上进行显示；提供对观测数据进行预览的功能。

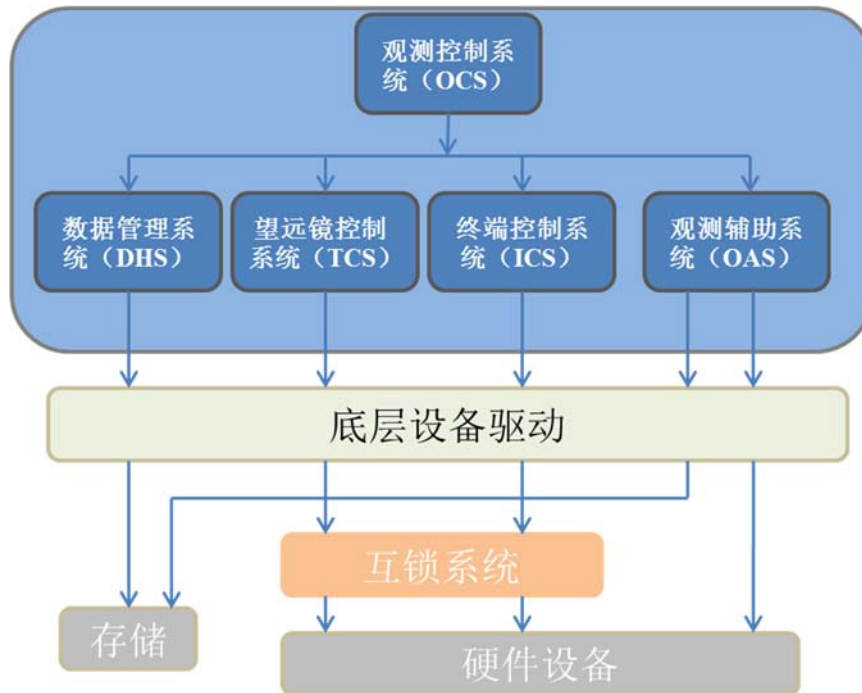


图 2.4 OCS 硬件和软件的基本结构

Figure 2.4 Basic structure between OCS hardware and sub-system

观测控制系统从底层硬件到顶层软件系统的结构如图 2.4 所示。观测控制系统居于整个软件系统的顶层，不需要直接与硬件设备进行交互，只需要知道硬件设备的状态，并对观测用户的观测指令针对各个子系统的不同接口要求进行翻译，从而对观测计划进行实施。所有的硬件设备之间有一套用于进行安全保护的全局互锁系统实现所有硬件设备的安全防护，所有的硬件设备通过各自的硬件驱动与各自的控制系统进行通信和交互。

由于丽江 2.4 米望远镜原有控制系统的限制及其他各个子系统的物理分布，望远镜观测控制系统只能在原有系统的基础上，采用分布式系统、分层的结构进行研究。如前所述，望远镜控制系统虽然没有实现自动化，但是其在设计的时候就考虑了自动化运行的需求，具备进行智能化控制改造的基础；观测终端的控制系统虽然相互独立，但部分观测终端提供了可供二次开发的开发包，部分观测终端提供了丰富的通信及控制指令集，可以在不了解底层硬件控制的情况下进行终端控制系统的研发；数据管理系统所涉及的观测数据在整个系统中都可访问，随着丽江站网络设备的不断升级，观测数据的自动存储、备份和异地备份的实现具备很好的技术基础；观测辅助系统中的各个子系统可以独立运行，部分子系统在望远镜运行之初就开始运行，只需要通过简单的配置修改就可以被观测控制系统所调用。基于此，望远镜观测控制系统的该设计方案是可行的。

此外，在进行观测控制系统设计的同时，对系统用户和新的观测模式也进行了初步设计，在以下部分进行描述。

### 2.3.1 系统用户

根据观测控制系统的功能，使用系统的用户的角色主要包括以下几种：

#### 1. 操作者 (Operator)

操作者主要通过观测控制系统操作望远镜、终端设备等观测资源，执行观测任务；根据观测需要对系统的配置进行更改之后，及时修改软件系统中的配置；并对仪器运行结果进行反馈。

#### 2. 观测者 (Observer)

观测者主要通过观测控制系统进行观测，包括多个阶段的任务，主要包括：观测时间的申请、观测计划的制定、观测数据的检查和观测结果的反馈。

#### 3. 科学家 (Scientist)

科学家用户主要是对观测控制系统产生的数据产品进行使用，使用观测数据进行科学研究，并根据数据处理的结果进行及时的反馈。协助建立观测控制系统中的专家系统，从而为以后的观测调度提供更合理的依据。

#### 4. 运维工程师 (Engineer)

运维工程师主要对观测控制系统相关的子系统的状态进行监控、对所有的硬件设备进行监控、定期对硬件设备进行巡检，对系统进行测试，并能及时根据前

三种用户的反馈对系统进行必要的升级改造。

### 5. 系统管理员 (Administrator)

系统管理员主要对观测控制系统进行管理，包括系统的配置文件、系统日志文件、系统后台数据库管理、观测计划和观测任务的管理等等。

## 2.3.2 观测模式

在观测控制系统开发完成之后，系统将在保留传统的观测模式的基础上，建立新的观测模式以适应观测控制系统的观测调度，主要包括：

### 1. 交互式

交互式与传统的观测模式类似，观测者在获得观测时间之后可以到望远镜现场，在现场将观测计划提前交给操作者。操作者根据观测者的观测任务，使用观测控制系统实施观测，并根据观测者对观测结果的反馈进行对应的操作，以获取观测者所需要的观测数据。

在这种观测模式下，观测者可以在现场对观测数据的质量进行判断，并实时对观测任务进行调整，有利于获取更高质量的观测数据。

### 2. 预先计划模式

预先计划模式类似于队列观测的模式，观测者在获取观测时间之后，在线提交详细的观测计划，系统管理员根据观测时间分配的结果，对观测者提交的观测计划进行合理的安排，并生成观测任务列表。在观测的时候，操作者只需要执行观测任务列表里安排的观测任务就可以实施观测。

在这种观测模式下，观测者不用到现场进行观测，节省了旅费、时间和精力，观测计划预先生成观测任务，观测效率会提高。但观测数据的质量只能靠操作者的粗略检查，可能会影响到最终的观测数据的质量。

### 3. ToO 模式

ToO 模式主要是实现对突发事件进行快速响应的一种观测模式，由于它对时间响应的特殊性要求，因此将它作为一种独立的观测模式。在引力波事件之后，如今需要快速响应的观测事件除了伽玛暴后随观测之外又多了引力波的后随观测，该观测模式将成为通用型望远镜不可或缺的观测模式。

在这种观测模式下，观测者也不用到现场，但是需要临时提交观测计划到观测控制系统，观测控制系统在监听到有该类事件发生的时候，快速生成观测任务，

判断系统目前的运行情况并作出响应，在影响最小的情况下实施观测。

## 2.4 基于观测控制系统的完整观测流程

在完成如前所述的观测控制系统相关的工作之后，基于观测控制系统实施一次完整的观测的流程如图 2.5 所示。整个过程基于“天文领域云”提供的观测时间申请平台，覆盖了观测数据产生的全过程，从观测时间申请开始，经过观测时间分配、观测实施、观测数据和观测日志入库、观测数据预处理等步骤，最终完成天文观测数据的归档和对外发布。具体流程描述如下：

- 1) 观测者提交的观测申请在通过评审之后，观测者在线提交观测计划，详细描述想要观测的目标的信息，包括坐标、观测模式、月相要求、曝光时间等详细的要求；
- 2) 在所有观测者都提交完成观测计划之后，调度系统根据每个观测申请项目的优先级对观测计划进行优先级的计算和排序，形成一个优先级队列；
- 3) 在观测开始前，观测调度系统从各个子系统获取当前的状态，如望远镜控制系统、观测终端控制系统提供的望远镜和观测终端的状态以及当前观测终端的配置情况，根据当前月相情况、天气情况、大气视宁度情况以及当前可用的观测时间等条件，对所有可以进行观测的目标根据调度算法进行打分，生成观测调度任务列表，并选择最佳的观测目标进行观测；
- 4) 曝光结束后，调度系统修改已经观测的目标的优先级；数据检查系统对观测数据进行初步的预览，并将检查的结果反馈给调度系统，调度系统针对观测数据的结果判断此次观测是否成功。如果成功，则进行后续的观测；如果不成功，则将该目标重新加入到调度任务队列中，根据调整后的优先级进入下一次的调度过程中。
- 5) 所有观测数据都实时同步到本地的存储设备中，并进行基本的入库操作；在观测结束次日，观测数据同步备份到异地的数据中心；观测者通过数据发布平台下载与自己的申请项目相关的观测数据。为了对观测者的原始观测数据进行保护，对所有的观测数据都提供了保护期，保护期内只有观测者本人可以下载相关的原始数据。超过保护期之后，观测数据才通过基于“天文领域云”的发布平台进行发布。

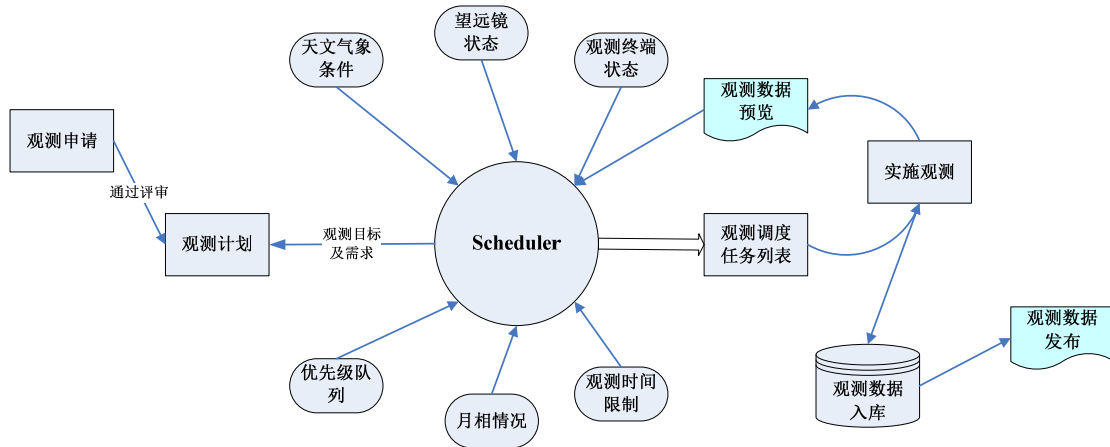


图 2.5 观测控制系统完整的观测流程图

Figure 2.5 Complete Observation Flow of the Observatory Control System

## 2.5 本章小结

本章首先对丽江 2.4 米望远镜的运行现状和存在的问题进行分析和研究，在此基础上对进行观测控制系统研发的相关工作目标进行了阐述。其次对丽江 2.4 米望远镜的观测控制系统的整体结构进行了设计，对观测控制系统中包含的各个部分的功能进行了描述，并对新的观测模式以及将会使用该观测控制系统的用户进行了定义。最后对基于观测控制系统实施一次完整的天文观测的整体流程进行了详细描述。



### 第3章 望远镜控制系统的集成研究

望远镜控制系统是整个望远镜主体控制的核心部分,为了实现观测控制系统对望远镜控制系统的控制和调度,望远镜控制系统必须能提供给观测控制系统一个控制接口,观测控制系统通过该控制接口进行指令的传输和望远镜状态的获取,从而能够实现从整体上对望远镜的控制。此外,为了满足自动化观测的需求,还需要对望远镜控制指令进行二次开发,使其能够被观测控制系统所应用并实现统一控制和调度。

#### 3.1 观测控制系统对望远镜控制系统的调度需求

观测控制系统在进行观测调度的时候,对望远镜控制系统具有两方面的需求,一方面观测控制系统需要将用户输入的请求或观测调度系统的请求翻译成望远镜控制系统的控制指令,并通过系统提供的通信接口下发给望远镜控制系统进行执行。望远镜坐标位置的计算和底层硬件的控制由望远镜控制系统进行处理,通过分布式控制的形式向各个控制节点发送控制指令控制望远镜本体的运动。另一方面观测控制系统也需要实时了解望远镜的运行状态,在控制指令执行的过程中,观测控制系统通过查询望远镜状态数据库获取望远镜的状态信息,并判断望远镜是否运动到位。

在进行望远镜控制系统集成研究的过程中,对这两方面的需求都要进行考虑,采用异步通信的思想,实现指令传输和状态信息查询的独立运行,观测控制系统在发送指令成功之后,不要求望远镜控制系统对执行结果进行反馈,继续执行其他任务;同时通过查询状态数据库获取望远镜状态,在望远镜准备完毕之后再实施观测。观测控制系统与望远镜观测控制系统的调度结构如图 3.1 所示。

为满足观测控制系统的控制和调度需求,望远镜控制系统需要提供如下几个方面的功能:

1. 基于 UDP 协议的网络通信接口:望远镜控制系统有独立的通信库,基于 UDP 协议进行数据的传输,对所有的控制节点都指定 IP 地址和端口号,所有数据都通过网络进行传输。在没有控制系统源代码的情况下,需要对望远镜控制系统的底层控制进行分析,建立能与其进行通信的网络通信接口,才能实现控制指

令的传输和望远镜状态数据的查询。

2. 独立的望远镜状态数据库：由于无法直接对望远镜控制系统后台的数据库进行访问，因而需要根据观测控制系统的需求建立独立的望远镜状态数据库，能从望远镜控制系统获取相关的状态数据，并能保证实时性。

3. 观测控制系统可调用的望远镜控制指令集：在对原有望远望远镜控制系统指令分析的基础上，对望远镜控制系统的控制指令进行了二次开发，开发了一套可以序列执行的望远镜控制指令，通过合理的序列指令组合就能实现望远镜的智能化控制。

此外，丽江 2.4 米望远镜采用的是随动圆顶，在望远镜指向目标的同时，圆顶也要随动指向观测目标。圆顶在底层是通过独立的 PLC 系统进行控制的，通过 RS485 线与主控计算机相连，在软件层面通过望远镜控制系统发送控制指令，由主控计算机发送给圆顶 PLC 系统并实现圆顶与望远镜的随动。在望远镜控制系统中已经具有完整的圆顶控制的指令，因而在进行序列指令研发的时候可以分析相关的圆顶控制指令并进行实现，就能实现圆顶的随动控制。

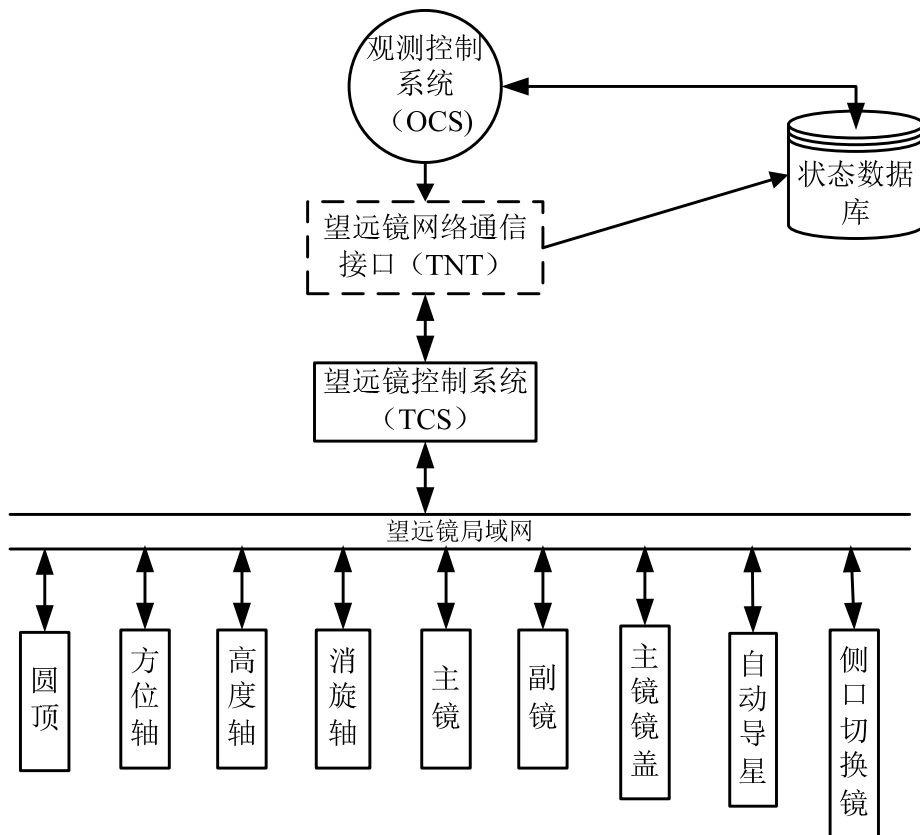


图 3.1 观测控制系统与望远镜控制系统的调度结构  
Figure 3.1 Scheduling Structure between OCS and TCS

### 3.2 望远镜网络通信接口的升级

丽江 2.4 米望远镜由英国 TTL 公司生产, TTL 公司并没有提供望远镜控制系统的底层代码, 整个控制系统是黑盒系统, 不能通过修改控制系统来实现望远镜控制系统智能化改造。TTL 公司仅仅提供了一个望远镜网络通信接口及用来对接口进行测试的程序 TNT<sup>[52-53]</sup> (Telescope Network Interface Tool)。在这之前该程序并未在 2.4 米望远镜上使用过, 在对其进行调试运行的时候发现该程序只提供了一个命令行形式的运行模式, 使用该接口程序获取望远镜信息的时候, 需要人为手动的输入指令。原有的接口程序完全不能满足网络调用的要求, 因此就有必要对其进行优化升级<sup>[54]</sup>。

丽江 2.4 米望远镜的控制系统在底层建立了基于 UDP 的通信协议, 所有接入到控制系统中的控制节点都需要满足网络通信协议的要求, 为此专门配置了一台服务器用来运行该网络通信接口程序, 并根据其通信配置文件 Cil.map 中所定义的服务器名和对应的 UDP 端口号。在无法改变望远镜底层控制的前提下, 使用配置文件中预定义的“occ”作为服务器名, 对应的端口号是: 13023, 并安装配置一系列用于通信的库文件才实现通过该接口程序与望远镜控制系统的通信。

我们基于 C/S 运行模式对该网络通信接口进行了升级, 该服务器则作为观测控制系统与望远镜控制系统进行通信的中间服务器。图 3.2 中对升级前后的网络通信接口程序的流程进行了对比, 升级后的接口程序在运行的时候充当服务器端, 首先允许查询望远镜状态信息的客户端程序与其建立 UDP 连接, 然后接收客户端程序中发送过来的指令信息, 并将该指令转发给 TCS, 之后接收 TCS 的反馈信息, 并将得到的信息转发给客户端程序。在该运行模式下的接口程序就可以自动接收符合 UDP 协议的数据包, 不需要人为干预<sup>[54]</sup>。

在完成网络通信接口的升级工作之后, 将该程序加入到 Linux 操作系统的开机运行程序中, 保证该程序在操作系统运行之后就能自动运行, 从而可以满足观测控制系统运行时的需求。

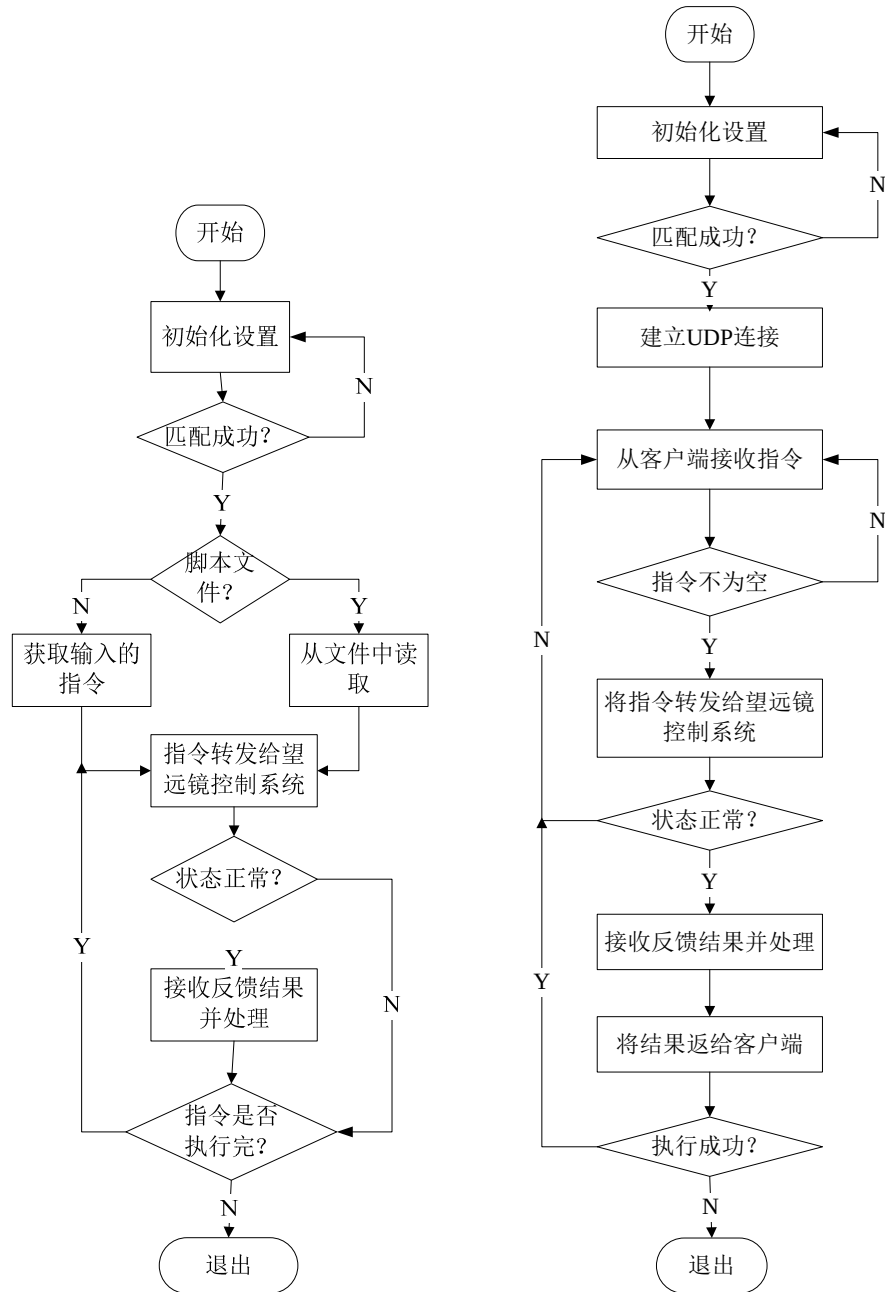


图 3.2 更新前（左）和更新后（右）的 TNT 程序流程图比较

Figure 3.2 Flow chart of TNT programs before (left) and after (right) updating

### 3.3 望远镜状态数据库的实现

丽江 2.4 米望远镜的控制系统中有一个非常庞大的状态信息数据库<sup>[55]</sup>(Status DataBase, SDB), 运行在望远镜的主控计算机上(MCC)用来保存望远镜中所有能测量到的位置信息、传感器信息、读数值等详细的信息。状态数据库一方面从控制系统中各个不同的应用软件获取工程数据信息, 是整个控制系统的状态信息的服务器, 一方面又为控制系统中各个不同的应用软件提供所需要的状态信息。

通过与运行在监控计算机（Supervisory Control Computer，SCC）上的心跳进程（Continuous Heartbeat，CHB）配合运行，在遵循望远镜的状态模型的情况下，完成对整个望远镜所有软件进程的状态的分配。图 3.3 显示了状态信息数据库，心跳进程与控制系统中其他软件之间的关系。

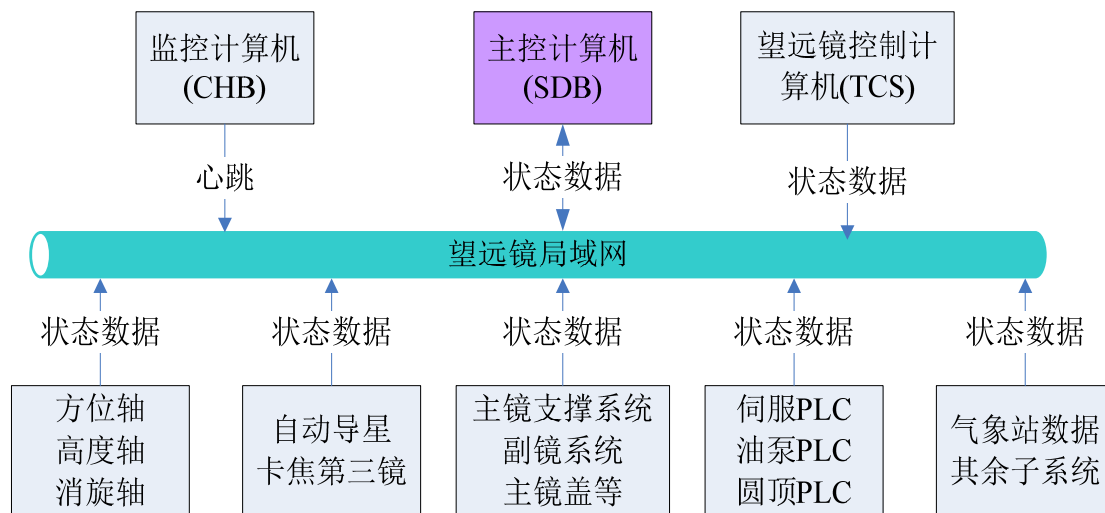


图 3.3 状态信息数据库与各个应用软件的关系

Figure 3.3 Relationship between the status database and application software

丽江 2.4 米望远镜的状态数据库中保存了非常完备的工程数据，除了给控制系统提供实时的状态信息之外，还给望远镜的运维、故障分析和排除提供了详细的工程数据。SDB 中存储了数百个各种类型的数据信息，包括各个运动节点上的各个传感器、读数值、伺服控制以及 TCS、SPLC（Service Programmable Logical Controller）、OPLC（Oil Programmable Logical Controller）等子系统的所有工程状态信息，可以说是整个控制系统的的核心。然而，由于望远镜厂商并没有提供数据库访问的接口，也没有提供望远镜状态数据库的设计结构与其中的关键词含义，我们只能通过平时的工作不断积累对 SDB 数据库的理解。SDB 数据库中详细的数据信息为望远镜的高度轴非线性调整、望远镜运动轴的校准、望远镜平衡的调校等都提供了详细的分析数据，对望远镜的运维而言是非常重要的，对观测控制系统的开发也非常重要。

由于无法直接访问望远镜的数据库系统，因此只能通过升级后的网络通信接口访问望远镜控制系统获取望远镜的状态信息。经过对望远镜控制系统的指令进行分析，发现通过“SHOW”指令可以查询到望远镜的三个运动轴、主副镜、自动导星、观测目标天文信息（赤经赤纬、偏移量、运动速度等）、气象数据、世界时信息等关键的状态信息，基本上能够满足观测用户在进行观测数据处理时对望

望远镜状态信息的要求。为此专门开发了用来进行望远镜状态信息获取和处理的程序，用来实现望远镜状态信息数据获取、拆分、入库的处理<sup>[54]</sup>，其具体流程如图 3.4 所示：

- 1) 客户端程序每隔 5 秒钟通过网络通信接口向望远镜控制系统发送批量的查询指令；
- 2) 网络通信接口将批量的查询指令转发给望远镜控制系统，并将查询得到的结果反馈给客户端程序；
- 3) 客户端程序对收到的信息根据固定的分隔符“》|《”进行拆分，提取其中的具体状态信息数据，并进行标准化处理；
- 4) 数据库操作程序将处理后的望远镜状态信息数据存入到数据库中，供其他程序调用。

已经实现的望远镜状态信息数据库是在 MySQL 数据库系统<sup>[56]</sup>下建立的，由于“SHOW”指令只能查询到有限的状态信息，因此目前的数据库是能够满足观测控制系统和终端控制系统使用需求的简化版望远镜状态数据库。为了保证系统运行过程中对实时性的要求，采用了分层式的思想对数据表进行设计，建立了两个结构相同的数据表（如图 3.5 所示），其中有一个表（TCSStatusNow）只保留一条最新的信息，为所有程序提供实时的状态信息，减少数据量提高访问速度；在另一个表（TCSStatusRecent）中则对状态信息进行归档保存，并定期将数据表中的信息转存到存储设备中。此外，对数据库进行网络访问的设置，使其可以通过网络远程访问，并通过在数据库中设定可访问的客户端地址和用户账号保证安全性。

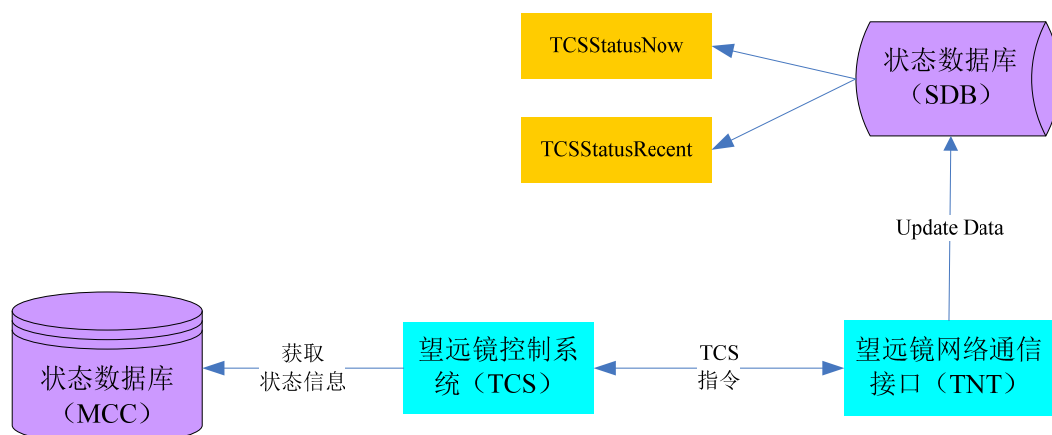


图 3.4 状态信息数据库数据入库流程

Figure 3.4 Storage flow of the status database

Structure

SQL

Search

Query

Export

Import

Operations

Privileges

|                          | Table           | Action |  |  |  |  |  | Records    | Type   | Collation         | Size     |
|--------------------------|-----------------|--------|--|--|--|--|--|------------|--------|-------------------|----------|
| <input type="checkbox"/> | TcsStatusNow    |        |  |  |  |  |  | 1          | MyISAM | latin1_swedish_ci | 4.0 KiB  |
| <input type="checkbox"/> | TcsStatusRecent |        |  |  |  |  |  | 17,057,808 | MyISAM | latin1_swedish_ci | 12.5 GiB |

图 3.5 目前的望远镜状态数据库实例

Figure 3.5 Example of current telescope status database

### 3.4 望远镜控制指令的二次开发

望远镜控制系统提供了一系列的控制指令，也提供了命令行控制界面，用户可以输入相应的控制指令实现对望远镜的各个部分的控制，但是却不能直接与观测控制系统进行融合控制。而网络通信接口实现的功能比较简单，通过它控制望远镜反而变得更加复杂，而且需要操作人员重新学一套不如原有控制系统方便的控制方法。为了满足观测控制系统的需求，需要对望远镜控制指令进行二次开发。

通过对望远镜满足观测需求的所有控制指令进行分析，总结出所有指令运行的机制及运行结束后望远镜的状态信息，为每条控制指令建立与状态信息对应的关系。在对 2.4 米望远镜的主要观测终端 YFOSC 的序列控制模式进行分析和研究之后，对望远镜控制指令进行了二次开发，开发了一整套望远镜的序列控制指令集（即 TCS Sequencer，控制指令的详细描述请参考附录一）。望远镜序列控制系统的结构如图 3.6 所示。

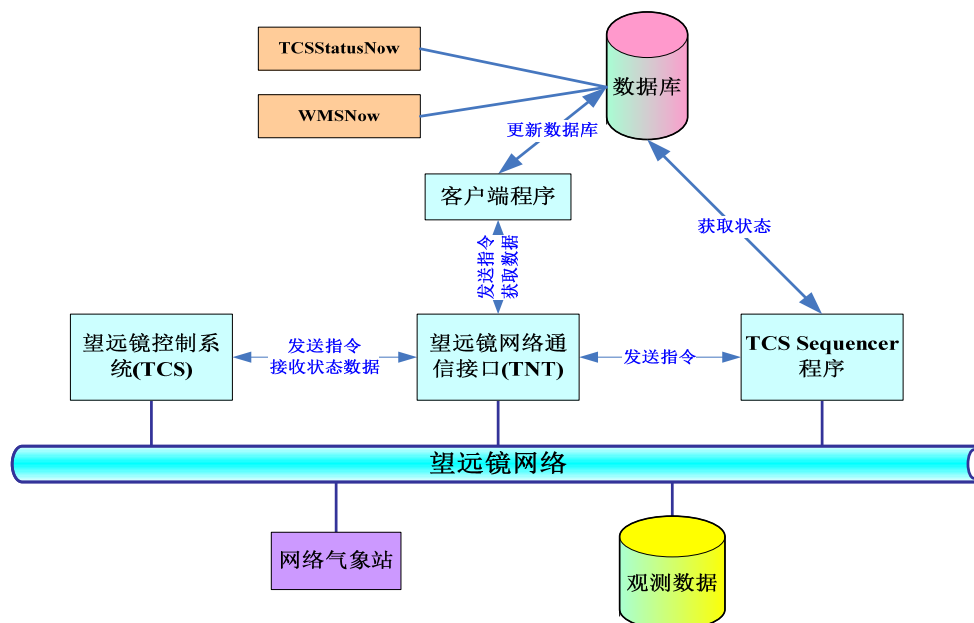
图 3.6 TCS Sequencer 系统结构<sup>[54]</sup>

Figure 3.6 System structure of TCS Sequencer

TCS 序列控制指令集是基于 C 语言开发的,且是针对望远镜控制指令逐条进行开发的。TCS 序列控制程序的运行机制可以通过如图 3.7 来表示。程序执行的时候会将 TCS 指令通过网络通信接口程序发送到 TCS,然后由 TCS 控制望远镜执行相应的动作,与此同时望远镜状态信息数据库会不断更新。在指令发送成功之后,序列控制程序就会去查询数据库以确定指令是否得到了执行,如果查询到的结果是已经成功执行就会顺利退出,否则就会报错并退出。在此过程中,所有关键性的步骤信息都会以日志的形式写入到日志文件中<sup>[54]</sup>。

在整个系统的后台,有两个数据库分别保存望远镜的状态信息和气象数据信息,为了使序列控制指令能够访问后台的数据库,在 C 语言下专门开发了用来进行数据库访问的库文件:libTcsStatusDBFuncs.so。该文件实现所有的数据库查询的操作,在 Sequencer 程序中只需要包含该库文件,就可以通过很简单的方法查询数据库中的状态信息。

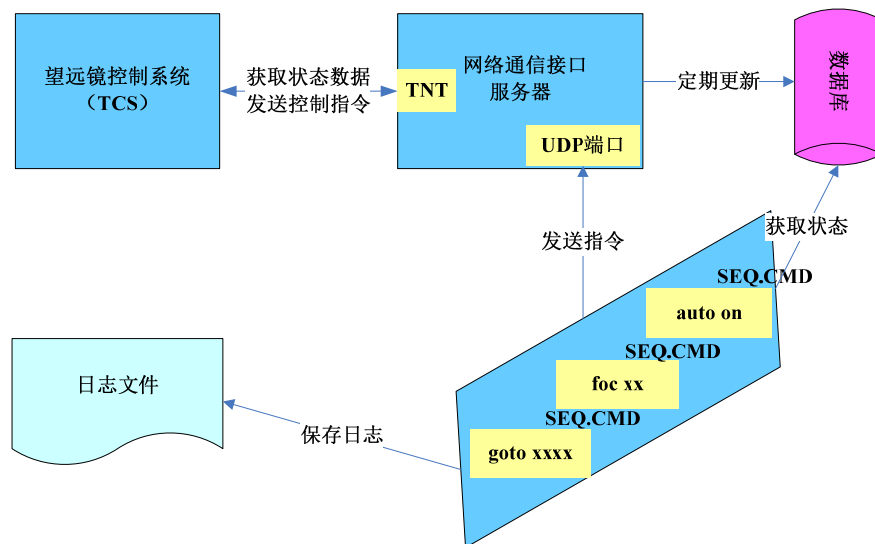


图 3.7 TCS Sequencer 程序运行机制

Figure 3.7 Operating mechanism of TCS Sequencer

### 3.5 已完成工作的运行情况

目前,望远镜网络通信接口运行正常,通过它能进行望远镜控制指令的传输和望远镜状态信息的获取,能够满足观测控制系统的需求。新创建的望远镜状态数据库已经被 YFOSC、LiJET 等观测终端所使用,为观测数据的 FITS 头提供了详细的信息,已经成为观测控制系统后台数据库的重要组成部分。但是对于整个控制系统而言,当前状态信息数据库中的状态信息只是整个控制系统状态信息中



很少的一部分,尤其是很多对望远镜运维相关的丰富的传感器信息都无法通过网络通信接口获得,从而严重制约了观测控制系统对望远镜状态的全面监控,在很多时候无法做出预判,也就影响到了观测效率。该部分的工作还没有完全完成,还需要花费极多的时间对原有的望远镜状态数据库进行深入的分析并逐步建立详细的状态数据库。

在 TCS 序列控制指令系统方面,编译完成的序列控制指令可以安装到观测控制系统所在的计算机上,并进行简单的配置,就能使用序列控制指令对望远镜进行控制。在测试过程中,我们将序列控制指令安装到 YFOSC 的控制计算机上,实现了望远镜与 YFOSC 的一体化控制。在此基础上,将望远镜的序列控制指令与 YFOSC 的序列控制指令进行组合,实现了自动化的测光观测,如图 3.8 展示了一个简单的自动测光脚本程序。在进行测光观测的时候,观测用户只需要提供观测目标信息和对应的观测波段、曝光时间的需求,通过序列控制指令将观测中需要执行的所有步骤写入到自动测光脚本程序中,在观测过程中直接运行该程序就能实现自动化的测光观测。该运行模式具有很好的扩展性,经过简单的修改就能应用到观测控制系统中,观测控制系统可以根据用户的观测需求自动生成对应的观测脚本或观测序列,在观测过程中只需要执行脚本程序或观测序列就能实现自动的测光观测,从而实现望远镜控制系统的智能化控制。

基于 TCS 序列控制指令,我们对光谱观测的自动化观测也做了一些初步的研究,开发了用来将目标源导入到狭缝的中心位置的脚本程序 (slitoffset),该脚本可以通过对配置文件中的狭缝的中心位置和目标源位置的对比,计算两者的偏差值,根据底片比例尺计算望远镜需要微调的值(角秒),并通过调用望远镜序列控制程序 offby 来实现望远镜的微调,最终实现将目标源导入到狭缝中心位置的目的。不过目前光谱观测还没有实现完全的自动化,这也将是下一步工作的重点。

### 3.5 本章总结

望远镜控制系统的智能化控制是观测控制系统成功运行的基础,观测控制系统只有在具有控制望远镜和监控望远镜状态的基础上才能实现对望远镜的调度。丽江 2.4 米望远镜的控制系统虽然在底层已经有一定的自动化设计,但是并没有实现智能化,且我们并没有望远镜的源代码。

通过对唯一提供的网络通信接口的研究,完成了对该接口的升级改造,使其

可以支持网络访问并作为客户端与望远镜控制系统之间通信的桥梁，进行控制指令和运行状态的交互。在此基础上建立了简化版的望远镜状态数据信息库，为观测调度提供实时的望远镜状态，为观测控制系统的运行提供基础。为了实现望远镜控制系统的智能化控制，还对望远镜的控制指令进行了二次开发，研发了能与观测控制系统进行融合的序列控制指令。在完成这些工作之后，将望远镜控制系统从原来的黑盒系统改造成支持其他程序调用的白盒系统，能通过序列控制指令的合理组合实现对望远镜控制系统的智能化控制。

```

#!/bin/tcsh

# Point to a target
tcs.gocast f20+15
tcs.mirr_open
sleep 30

# Start movement of all wheels & mirror at the background
# Need to 'wait_yfosc_ready' for all movements
yfosc.yfub 0 &
yfosc.aperture 0 &
yfosc.filter 0 &
yfosc.grism 0 &
yfosc.mirror 0 &
wait_yfosc_ready
yfosc.object "f20_JB" # Please add object_name
yfosc.yfua 2 # JB
wait_yfosc_ready
yfosc.mexpose 1 3 # Used for multi-expose: mexpose exptime counts

yfosc.object "f20_JV" # Please add object_name
yfosc.yfua 3 # JV
wait_yfosc_ready
yfosc.mexpose 1 3 # Used for multi-expose: mexpose exptime counts

yfosc.object "f20_JI" #Please add object_name
yfosc.yfua 4 # JI
wait_yfosc_ready
yfosc.mexpose 1 5 # Used for multi-expose: mexpose exptime counts

yfosc.object "f20_JR" #Please add object_name
yfosc.yfua 0
yfosc.filter 1 # JR
wait_yfosc_ready
yfosc.mexpose 1 5 # Used for multi-expose: mexpose exptime counts

# Point to another target
tcs.goto s1 21 20 30 15 25 35 j2000
sleep 30

# Point to another target
tcs.goto s2 22 00 31 16 26 36 j2000
sleep 30

# End of the demonstration
tcs.park_zen
tcs.az 0
tcs.rot_mount 123
tcs.mirr_close
#tcs.opera_off
    
```

指向目标

终端准备

执行测光观测

指向其他目标

结束观测

图 3.8 自动测光脚本程序

Figure 3.8 Script for auto photometry observation

## 第4章 终端控制系统的研究与实现

在望远镜建设完成之后，天文台站往往会根据天文学家的不同科学目标，向不同的生产厂商定制或购买不同的观测终端来满足天文学家的观测要求。观测终端类型多样，导致其控制系统也呈现多样性，其控制系统运行的操作平台也因厂商的不同而不同。这就使得观测用户及观测助手需要熟练掌握不同操作系统平台下的不同终端的控制，望远镜的维护人员也需要熟悉不同的操作系统、程序开发语言的特性，才能维护好终端设备。

为了实现观测控制系统对所有观测终端的统一控制和调度，需要为配备的所有观测终端设备研发一套实现统一控制的终端控制系统（ICS）。观测控制系统不需要知道各个观测终端的具体控制实现，只需要将观测终端的控制指令发给终端控制系统，由终端控制系统对控制指令进行翻译，并向下转发。此外，终端控制系统建立统一的数据库系统保存所有观测终端的运行状态信息，并定期对其状态进行更新，观测控制系统通过查询数据库来确定观测终端的状态。

### 4.1 国内外终端控制系统发展的现状

终端控制系统主要对望远镜的观测终端进行控制，随着望远镜的复杂化与设备的多样化，望远镜配备的终端设备也越来越丰富。为了实现望远镜的自主观测，观测终端的控制也需要实现自动化，因而终端控制系统也得到了发展。一般来讲，终端控制系统与望远镜的类型有一定关系，如功能单一的专用型望远镜的终端控制系统往往比较简单，而具有多种观测终端的通用型望远镜的终端控制系统就会复杂的多。

在小型望远镜方面，由于大部分小型望远镜的功能都比较单一，因此其终端控制系统往往会集成到望远镜控制系统或自主观测控制系统中，如国际上应用比较广泛的小型望远镜控制系统 ACP（Astronomy Control Protocol）、RTS2、ATIS(Automatic Telescope Instruction Set)、OCAAS(Observatory Control and Astronomical Analysis Software)、ASCOM (Astronomy Common Object Model)、INDI(Instrument Neutral Distributed Interface)等，均能实现终端设备与望远镜的控制<sup>[8]</sup>，而不用单独开发终端控制系统。基于前面所述的控制系统研发的小型望远

镜或望远镜网络，如 HATSouth、TAT，BOOTSE、SONG、AST3 等这些小型望远镜都实现了远程或程控自主控制。

如前所述，在望远镜观测控制系统发展较早的利物浦望远镜和 LCOGT 望远镜网络，其观测控制系统就由 TCS、ICS、RCS 这三个部分组成，由 ICS 实施对异构的观测终端的统一控制和调度，完成预定的观测任务，真正实现了 2 米级望远镜的自动观测<sup>[16]</sup>。利物浦望远镜自动观测系统采用了面向对象的设计思路，其对控制系统和仪器设备的接口有着明确清晰的定义，对程序的更新和终端设备的更新换代提供了很大的便利<sup>[27]</sup>，且大大降低了观测终端的运维成本和新终端接入系统的控制软件开发成本<sup>[57]</sup>。在夏威夷的 8.2 米 Subaru 望远镜的控制系统，则是设计成通过核心调度进程来调度观测终端，用户通过统一的界面访问所有的终端，而不需要关心各个终端的不同，在其第二代的观测控制系统中<sup>[13][41]</sup>，其观测流程更是能够做到“边运行边修改”<sup>[44]</sup>，这在降低使用难度的同时提高了观测效率。此外，欧南台的 VLT(Very Large Telescope)望远镜则是通过进程和消息机制对望远镜和终端设备进行控制<sup>[58]</sup>；美国的 GBT(Green Bank Telescope)望远镜则通过模块化的设计思想，对每个硬件设备进行控制<sup>[59]</sup>；印度的 IUCCA(Inter-University Center for Astronomy and Astrophysics)望远镜开发了一套望远镜终端控制系统(Telescope Instrument Control System, TELICS)，通过一个专用的硬件控制设备对所有终端设备进行控制<sup>[60]</sup>；正在建设中的 DKIST（原 ATST）望远镜也已经在设计过程中就引入了终端设备控制系统来对所有的观测终端进行统一控制<sup>[17][45]</sup>。而与此不同的是坐落在西班牙的北欧光学望远镜（Nordic Optical Telescope），它使用的是基于序列控制指令的终端控制系统，在不改变观测终端原有控制系统的基础上，基于通信接口开发一套完整的序列控制指令对观测终端进行控制，也能达到实施高效观测的目的<sup>[61]</sup>。

在国内，NVST 多通道高分辨观测系统采用了分布式、多终端的系统部署方式和松耦合的软件架构。其中，软件架构借鉴了 ACS(ALMA Common Software)的做法，采用了顶层架构以及基于容器组件的技术/功能架构<sup>[62]</sup>。多个容器分担了中央调度服务器的角色，避免了如 RTS2 的单一服务器负载过大的问题。郭守敬望远镜（LAMOST）使用 CORBA 架构完成了望远镜的集成控制<sup>[19]</sup>，观测控制系统采用命令驱动模型，内部使用基于发布—订阅模式的消息总线在组件间进行通讯，外部使用套接字与各个子系统通讯。LAMOST 的终端控制系统为三大焦

面仪器控制的总称,包括光纤定位控制、光谱仪控制、CCD控制。在 CCD 的控制方面: LAMOST 使用 32 台 CCD 相机进行同步的光谱拍摄, CCD 由 CCD 探测器和 CCD 控制器 UCAM(Universal Camera)组成,相机集中控制(CCDMaster)位于观测控制系统和 32 台相机控制器之间,用于实现观测控制系统与 CCD 间的命令状态汇总转换。近期,为了对所有的 CCD 相机进行更好的控制, LAMOST 的运维团组基于 RTS2 系统研发了一套 CCD 控制系统,通过运用 RTS2 中状态较少、实现复杂度低的相机控制类 Rts2Camd 实现了 CCD 集群的虚拟化,为最终建立基于 RTS2 的观测控制系统提供了很宝贵的经验<sup>[63]</sup>。

由此可见,所有望远镜都有特定的观测终端,且观测终端类型多样,所能实现的观测任务也不相同,终端控制系统所需要实现的功能也不尽相同,因而需要在借鉴其他望远镜的成功经验,针对每台望远镜的不同观测终端情况进行终端控制系统的研发。

## 4.2 丽江 2.4 米望远镜的主要观测终端及其控制系统

与专用的巡天望远镜的特定终端不同,通用光学望远镜的观测终端可以覆盖更多的观测需求,如丽江 2.4 米望远镜目前的观测终端就能覆盖测光观测、中低色散光谱观测、高色散光谱观测和积分视场光谱观测等多种类型的天文观测需求,对应地配备了多台的观测终端: YFOSC, PI CCD, LiJET, 高色散光谱仪和 CHILI<sup>[64]</sup>。通过使用望远镜卡焦快速切换系统,所有这些观测终端可以“永久”地安装在望远镜的卡焦位置<sup>[50-51]</sup>,通过平面反射镜进行望远镜光路的切换,最终实现观测终端在硬件层面的随时切换,如图 4.1 为各终端设备在望远镜上的安装位置<sup>[51]</sup>。

丽江 2.4 米望远镜目前存在的问题是在建设初期,受经费的限制,并没有为望远镜研发统一的观测终端控制系统,更加没有能够实现利物浦望远镜类似的终端控制系统。如今在望远镜上配备的所有观测终端都是在后期逐步进行安装和配备的,每台观测终端都由不同的供应商提供,控制系统的结构、控制系统运行的操作系统平台、控制软件开发平台和控制模式等等都不相同。因此有必要对所有终端的控制现状进行分析,研究一套可以满足所有观测终端控制需要的终端控制系统,实现对所有观测终端的一体化控制。

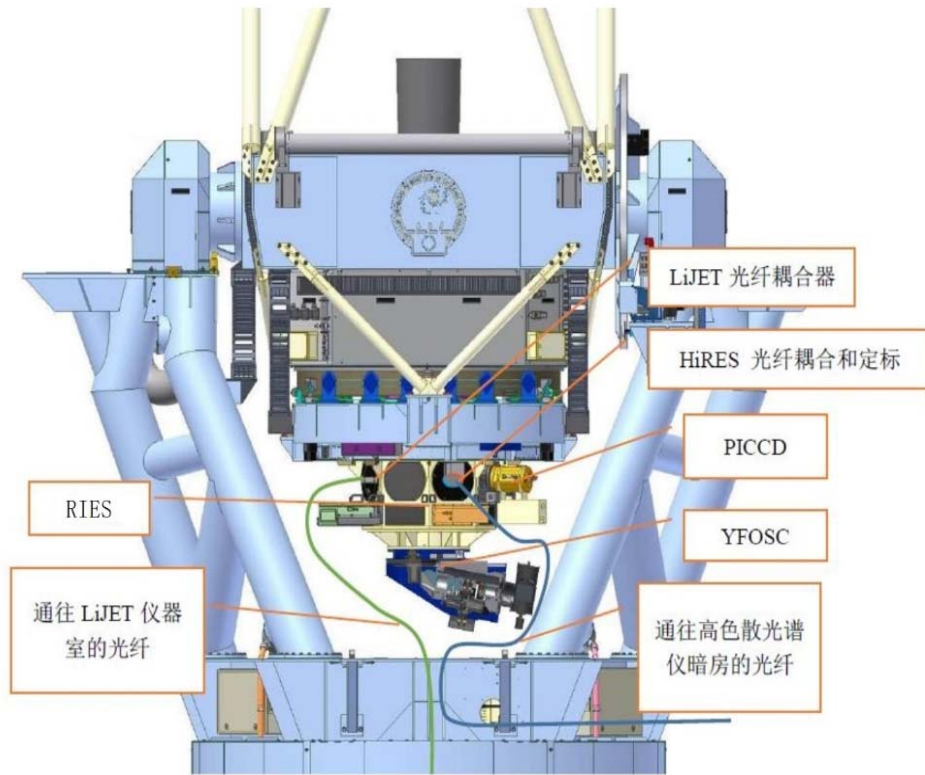

 图 4.1 观测终端在望远镜上的安装位置示意图<sup>[51]</sup>

Figure 4.1 Schematic diagram for the installation position of the instruments on the telescope

#### 4.2.1 YFOSC

YFOSC 的控制软件是基于 TCL/TK<sup>[65]</sup>和 SOAP<sup>[66-67]</sup>架构开发的,通过统一的用户界面对所有转动机构和调焦机构进行控制。所有光学元件的配置文件都写入到对应的配置文件中,所有光学元件和 CCD 的状态信息都保存在数据库中,在曝光结束的时候,系统会查询数据库并从中读取所需要的信息用来写入到最终的观测数据的 FITS 头文件中。

YFOSC 的控制软件运行在 Linux 系统下,对应的版本是 Ubuntu10.01,所使用的数据库是 MySQL 数据库。除了用户界面以为, YFOSC 的控制软件还提供了完整的光谱仪转动机构和 CCD 相机的序列控制指令,并且可以通过脚本程序将序列控制指令编写到一起,从而实现批量的观测任务的实施。YFOSC 的序列控制指令程序结构如图 4.2 所示。

YFOSC 还设计了对观测数据进行预处理的功能,曝光结束之后,观测数据直接备份到后处理服务器上,然后通过调用后处理服务器上的程序对观测数据进行显示,方便用户对观测质量进行实时的监控,在观测数据得到实时备份的同时也给用户提供了检查数据质量的平台,从而方便用户及时调整观测计划。

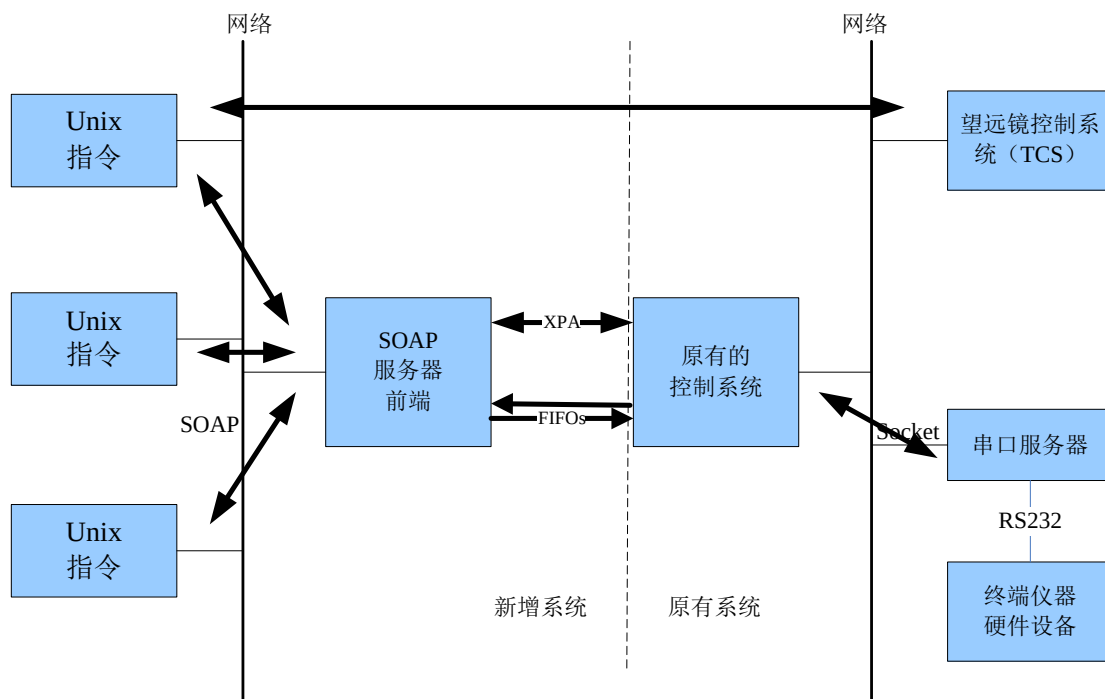


图 4.2 YFOSC 的序列控制指令程序结构图

Figure 4.2 Structure of the Sequencer control system for YFOSC

#### 4.2.2 PI CCD

PI CCD 是商业化的产品，其控制软件运行在 Windows 操作系统平台下，且使用比较复杂，曝光获得的图片也未能保存成 FITS 格式。但是它提供了访问接口，可以通过 Windows 系统下的 MaximDL 软件对其进行控制，并可以将滤光片也集成到 MaximDL 软件中，从而实现对 PI CCD 和滤光片的统一控制，提高了观测效率<sup>[51]</sup>。在这种控制模式下，虽然简化了控制，但却无法获取比较详尽的望远镜及观测终端的状态信息，其观测数据的 FITS 头信息也不够完整。

#### 4.2.3 高色散光谱仪

高色散光谱仪的控制系统由两部分组成，即控制光谱仪的软件和控制终端相机的软件（如图 4.3 所示）。光谱仪控制软件运行在 Windows 操作系统平台下，使用 C++ 语言进行开发，终端相机控制软件运行在 Linux 操作系统平台下（系统版本是：Fedora 13，后来升级为 CentOS 6），也是使用 C++ 语言进行开发。此外，还有很多控制软件使用的是厂家提供的软件，如定标灯的控制、狭缝移动的控制、光子计数器（Photomultiplier tube, PMT）的控制都是通过独立的控制软件进行的，操作非常繁琐和复杂，严重影响了观测效率。而且，光谱仪相关的状态信息没有保存到数据库中，终端相机的相关状态信息则是保存在了 PostgreSQL 数据

库中。

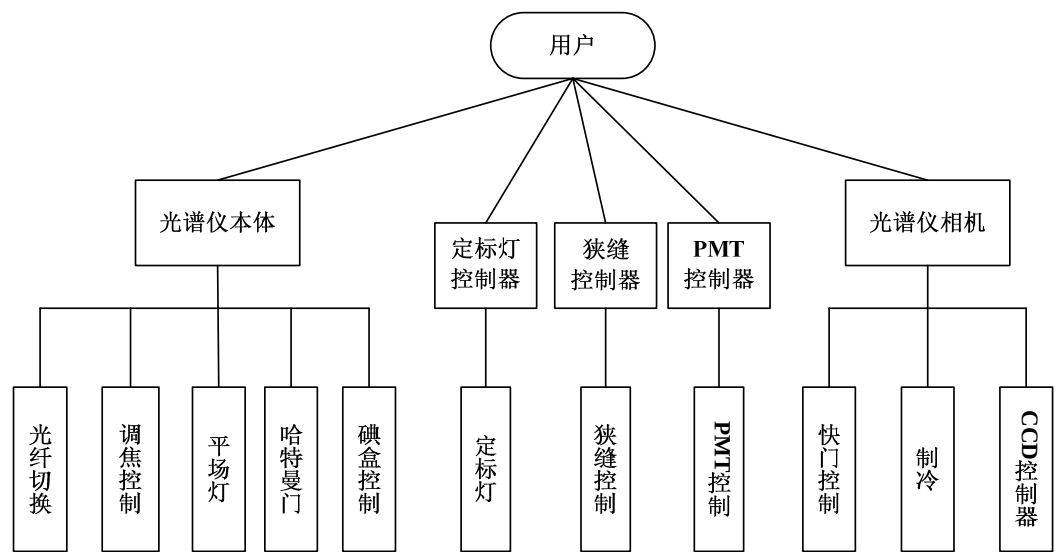


图 4.3 高色散光谱仪控制系统结构  
Figure 4.3 Structure of HiRES control system

4.2.4 LiJET

LiJET 的控制软件运行在一台 SUN 服务器上，是用 JAVA 语言编写的。该控制软件通过网络和串口服务器与光谱仪的各个部分进行通信，其控制软件的结构如图 4.4 所示。由于物理上各个部分之间比较分散，因此其控制通信都是通过局域网的 TCP/IP 协议来实现的。

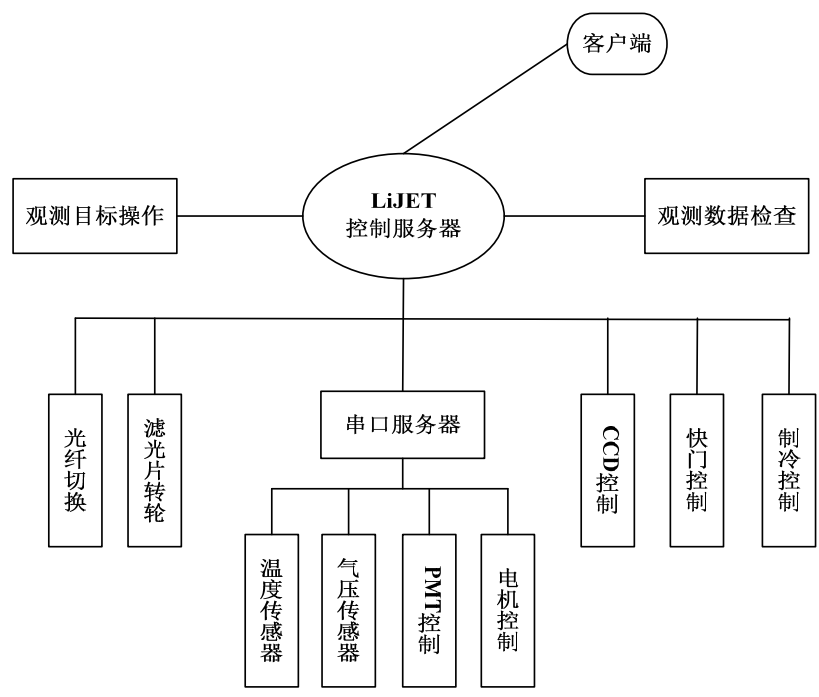


图 4.4 LiJET 控制系统结构  
Figure 4.4 Structure of LiJET control system



LiJET 的控制软件提供了比较友好的控制界面，所有的状态信息也保存在 MySQL 数据库中，用户在控制界面上就可以查看所有机构的状态信息。为了满足观测数据 FITS 头信息的需求，它还专门设计了客户端程序用来访问望远镜状态信息数据库，然后写入到观测数据的 FITS 头中。

### 4.3 丽江 2.4 米望远镜终端控制系统设计

从 4.2 节的介绍中可以知道目前丽江 2.4 米望远镜的主要观测终端中，YFOSC 已经实现了基于序列控制指令的控制模式，对底层硬件的控制比较统一，通过简单的配置操作就能够与观测控制系统进行集成。PI CCD 是商业化的产品，没有提供 Linux 操作系统下的控制程序，也没有提供底层的控制指令。LiJET 的控制软件也比较统一，能对底层硬件实现统一的控制，但是 LiJET 的控制系统封装性比较高，且没有提供控制指令。高色散光谱仪的控制最为分散，光谱仪本体和 CCD 相机的控制相互独立，除此之外还有很多零散的设备。鉴于丽江 2.4 米望远镜观测终端的控制系统的独立性，其本身控制系统的封装性，决定采用与 YFOSC 类似的序列控制系统的模式进行其他观测终端的控制系统的研发，从而形成统一的终端控制系统。终端控制系统的整体结构如图 4.5 所示。

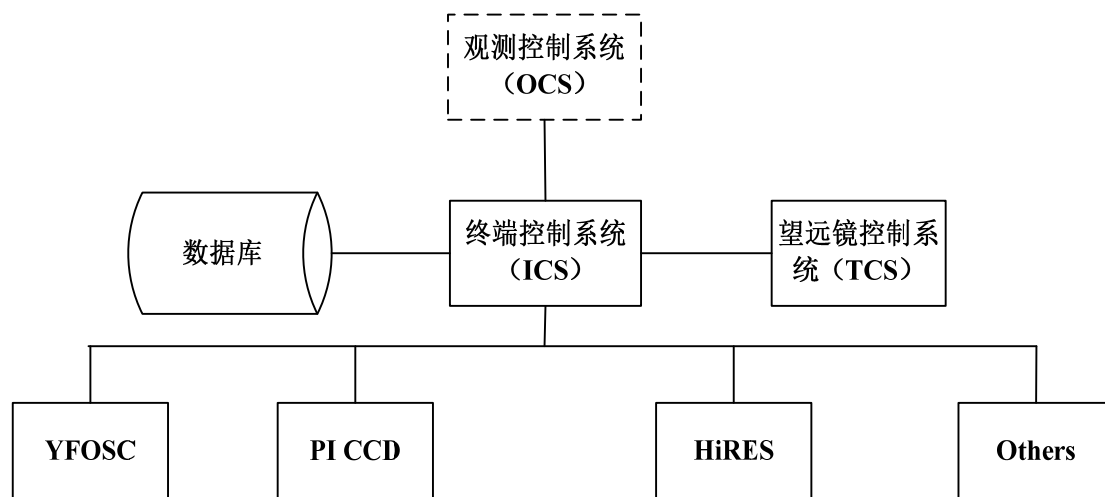


图 4.5 终端控制系统架构

Figure 4.5 Frame for the instrument control system

基于序列指令控制的模式，不会影响到观测终端底层的控制，而只需要观测终端的控制系统能够提供序列指令控制开发所需要的控制指令，这相对容易实现。此外，终端控制系统还需要建立统一的数据库，在每个观测终端自带的数据库基础上，用来对各个观测终端的状态信息进行整合，从而使得终端控制系统能够实

时了解终端的运行状况，并能为观测控制系统提供实时的终端状态信息。观测控制系统对观测终端的调度则通过序列控制指令来实现，首先对用户请求或观测调度系统产生的对观测终端的需求进行翻译，根据具体的观测终端的要求翻译成对应的控制指令，然后转发给特定的观测终端实施观测。在此过程中，观测控制系统通过查询数据库获取终端运行的情况。终端控制系统的时序图如图 4.6 所示。

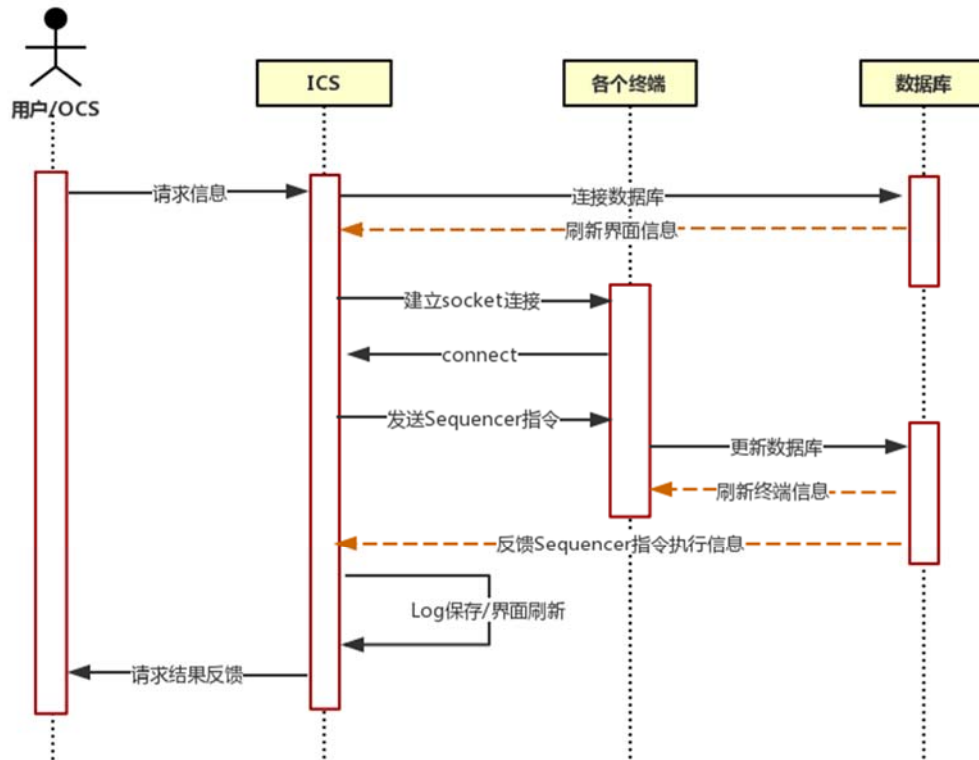


图 4.6 观测终端控制系统时序图

Figure 4.6 Sequence chart for instrument control system

#### 4.4 终端控制系统的实现

在本文的研究过程中，主要实现了 PI CCD 和 HiRES 这两个观测终端基于序列控制的控制系统，将 YOFSC、PI CCD 和 HiRES 三者都集成到终端控制系统中进行统一控制和调度。其中，PI CCD 控制系统的研发工作是由本文作者与陈林颢共同合作完成的。

##### 4.4.1 PI CCD

PI CCD 原有的控制系统运行在 Windows 系统下，通过 ASCOM 插件的使用

实现了 PI CCD 与滤光片程序的集成控制，但是没有提供 Linux 系统下的控制程序，也没有提供相应的控制指令集，只提供了在 Linux 系统下的开发包。为了实现观测控制系统对 PI CCD 的统一控制和调度，利用厂家提供的软件开发包，基于序列控制指令的思想重新开发了一套可以在 Linux 平台下运行的控制系统<sup>[68-69]</sup>。基于序列控制指令的 PI CCD 控制系统结构如图 4.7 所示。

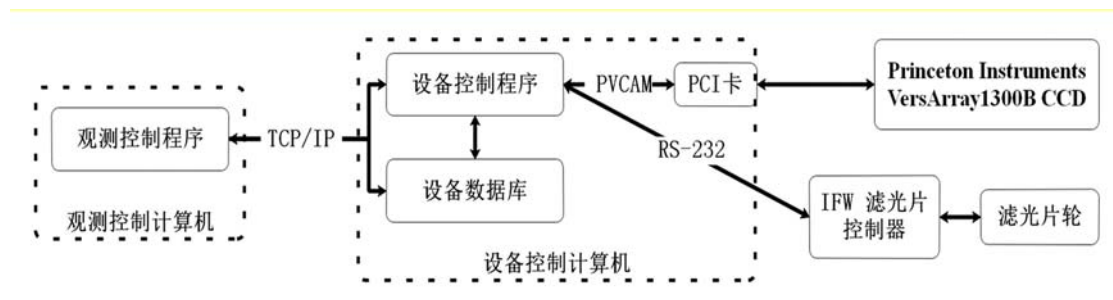


图 4.7 PI CCD 序列控制系统结构

Figure 4.7 Structure of PI CCD sequencer control system

在进行基于序列控制指令的 PI CCD 控制系统的开发过程中，将整个系统划分成了三个模块，即：PI CCD 硬件控制模块、序列控制指令模块和数据库模块，分别描述如下：

### 1. 硬件控制模块的实现

在进行序列控制指令开发之前，首先需要完成 PI CCD 相关硬件设备在 Linux 操作系统下的控制程序的研发。受限于 PI CCD 相机驱动程序开发包 PVCAM 2.7 对 Linux 操作系统内核的要求，硬件控制程序在 ReaHat 5.6 平台下进行开发，采用 C 语言进行开发。

硬件控制程序需要实现 4 个方面的功能：

- 1) 硬件设备的控制：通过 CCD 驱动程序实现对 CCD 相机的控制，通过串口通信实现对滤光片转轮的控制，对所有与观测相关的控制指令进行实现，如曝光、快门控制、制冷温度设置等等。
- 2) 观测数据的采集与封装：通过调用 CFITSIO 包，对 PI CCD 曝光结束后产生的裸数据根据天文界要求的 FITS 格式进行封装，并对生成的观测数据的文件名进行规范化，统一以设备代码+年+月+日+编号的形式进行编号，满足整个观测控制系统中观测数据统一命名的需求。
- 3) 支持网络通信：硬件控制程序能够支持网络通信，从而满足终端控制系统对其通过序列控制指令进行控制的需求。

- 4) 能与数据库进行实时交互：在运行的过程中能实时对数据库中终端状态相关的数据表进行更新，并在生成观测数据的时候能够从数据库中获取 FITS 头文件中所需要的全部内容，丰富 FITS 头的信息。

硬件控制程序的主体流程如图 4.8 所示。

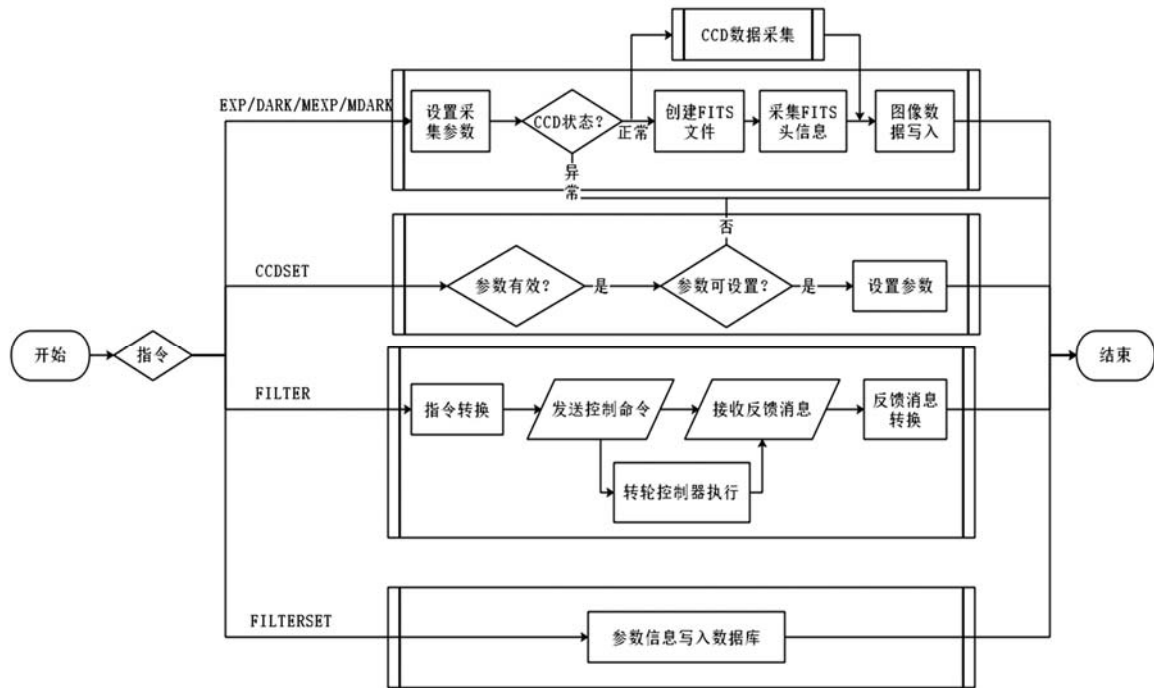


图 4.8 PI CCD 控制程序的流程图<sup>[69]</sup>

Figure 4.8 Flow chart of PI CCD control system

## 2. 序列控制指令模块的实现

在硬件控制程序实现的基础上，针对控制程序已经实现的所有控制指令，进行序列控制指令的实现。PI CCD 的硬件部分只有 CCD 和滤光片转轮两部分，因此序列控制也包含这两部分。对 CCD 的控制主要包括采集数据和设置 CCD 相关参数的指令，对滤光片的控制则主要是转动滤光片到要求的位置。采用与 TCS Sequencer 程序类似的方法，对所有控制指令进行了序列控制指令的实现。

## 3. 数据库模块的实现

在进行数据库设计的过程中，通过对系统中涉及到的各项数据进行归类，将数据类型分为状态数据和属性数据，其中状态数据主要记录硬件设备相关的状态信息，包括 CCD 的实时状态、实时参数和滤光片的实时参数。属性数据则包含 CCD 的基本信息数据、CCD 读出速度与读出噪声数据、网络通信的端口、滤光片的具体参数等等。

PI CCD 控制系统的数据库基于 MySQL 进行开发, 运行在 Linux 平台下。在数据库中还可利用触发器实现系统参数的同步更新, 如在滤光片的设置发生改变的时候, 实时更新滤光片数据表中的对应的配置, 同时也就为终端控制程序提供新的配置信息, 从而保证各个部分的信息的一致性。

如今, 该套系统已经成功地在 2.4 米望远镜上运行, 通过测试可以实现对 PI CCD 的控制需求, 能正常实施观测。此外, 也能很容易地与观测控制系统进行融合, 通过观测控制系统实现对它的控制和调度。

#### 4.4.2 HiRES

与 PICCD 不同, HiRES 是定制的观测终端, 由于光谱仪本体部分和 CCD 相机部分由不同的研发团队进行研发, 因而其系统结构更加复杂, 其控制系统也更加离散 (如 4.2.3 节中所介绍)。在进行终端控制系统的集成开发的过程中, 只能对 HiRES 的不同部分进行独立的分析, 逐步实现基于序列控制的控制系统。

HiRES 的 CCD 相机控制部分是基于 TCL/TK 进行开发的, 通过 CTalk 与底层的相机控制器的 USB 驱动进行通信, 从而控制 CCD 相机进行曝光和数据采集。在相机控制系统中, 由于图形界面与底层的硬件设备无法直接通信, 只能通过中间件进行指令的传输, 因此无法将反馈信息直接返回给图形界面。为了将反馈信息显示到用户图形界面, 在研发的过程中将所有的结果和事件信息都存入到数据库中, 并设置一个对所有的信息进行监控的监视器, 当数据库中相关的值发生变化时, 就将变化结果反馈给用户图形界面 (如图 4.9 所示)。

基于 HiRES 相机控制系统的异步通信的基础和通过数据库触发控制和状态变化的思想, 对数据库中与观测相关的数据表进行了分析, 对其中可以进行设置并能反应状态变化的关键词进行分析, 概括出与所有关键词控制相关的参数, 并使用 Linux 系统下的脚本程序开发完成了序列控制指令集。目前已经完成的序列控制指令如表 4.1 所示, 序列指令在执行的时候通过对不同的数据表中的关键词进行修改来实现对相机控制器的控制。

HiRES 的光谱仪本体是在 Windows 系统下基于 MFC 架构使用 C++ 语言开发完成的, 目前这部分的功能已经被封装在可执行文件中, 且没有提供源代码和通信协议, 因而目前这部分的序列控制指令开发工作还没有完成。此外, 系统中还有多个离散的子系统, 如狭缝控制、温度和气压控制、光子计数器控制、定标灯

控制等都是通过独立的设备进行控制的，没有集成到光谱仪控制系统中。在接下来的工作中，将对所有这些子系统的通信协议进行分析，基于序列控制的思想完成控制的改造，最终于 CCD 相机的序列控制指令进行组合，实现 HiRES 的融合控制。

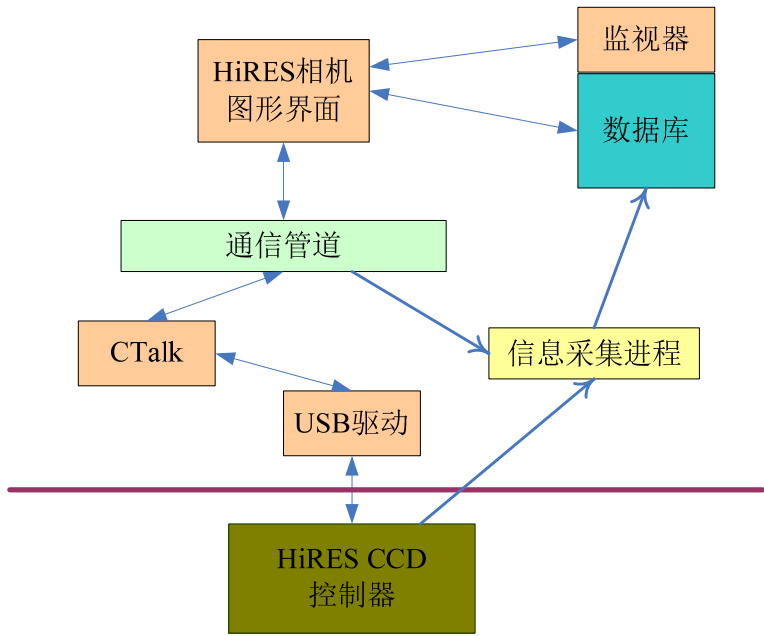


图 4.9 HiRES 的相机控制系统结构

Figure 4.9 Structure of HiRES CCD control system

表 4.1 HiRES 序列控制指令列表

Table 4.1 Sequencer control command list for HiRES

| 终端    | 指令        | 参数               | 功能说明                                                                               |
|-------|-----------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| HiRes | abort     |                  | 中断一次曝光                                                                             |
| HiRes | addtime   | t, 0<t<9999.99   | 在曝光的过程中增加曝光时间                                                                      |
| HiRes | bin       | 0,1,2            | 以 2 <sup>n</sup> 的模式设置 CCD 控制器的并读模式<br>0 - binning 1, 1 - binning 2, 2 - binning 4 |
| HiRes | cover     | N                | Set up the column over scan to n for ccd image.                                    |
| HiRes | dark      | t, 0<t<9999.99   | 采集一幅曝光时间为 t 的本底/暗场数据, t=0 时是本底<br>曝光时间的单位是 0.01s<br>设置成功后, 曝光时间会在用户界面上显示           |
| HiRes | exposure  | t, 0<t<9999.99   | 采集一幅曝光时间为 t 的观测数据<br>曝光时间的单位是 0.01s<br>设置成功后, 曝光时间会在用户界面上显示                        |
| HiRes | gain      | 0,1,2            | 设置 CCD 的增益值                                                                        |
| HiRes | mdark     | t, n             | 采集多幅曝光时间为 t 的本底/暗场数据                                                               |
| HiRes | mexposure | t, n             | 采集多幅曝光时间为 t 的观测数据                                                                  |
| HiRes | object    | Text             | 将 FITS 头中的 OBJECT 关键字的值设为<text>                                                    |
| HiRes | readspeed | Fast:Medium:Slow | 设置 CCD 的读出速度                                                                       |
| HiRes | readout   |                  | 中断当前曝光, 关闭 CCD 的快门并读出数据                                                            |

表 4.1 HiRES 序列控制指令列表（续）

Table 4.1 Sequencer control command list for HiRES (Continued)

| 终端    | 指令      | 参数 | 功能说明                                                                |
|-------|---------|----|---------------------------------------------------------------------|
| HiRes | resetxy |    | 对 CCD 的参数进行重设，包括并读的值设为默认的 1，增益的值设为默认的 0，窗口大小设置为最大的窗口大小，窗口起始位置设置为默认值 |
| HiRes | rover   | n  | 设置 CCD 图像中用来作为 overscan 的行数为 n                                      |
| HiRes | xbeg    | n  | 设置 X 方向的起始位置为 n                                                     |
| HiRes | xsize   | n  | 设置 X 方向的窗口大小为 n                                                     |
| HiRes | ybeg    | n  | 设置 Y 方向的起始位置为 n                                                     |
| HiRes | ysize   | n  | 设置 Y 方向的窗口大小为 n                                                     |

#### 4.5 终端控制系统的规范化建设

为了实现观测控制系统中所有观测数据及其 FITS 头文件的统一，便于观测数据管理系统对观测数据进行更好的管理，也为观测数据的归档和发布提供方便，我们针对观测终端产生的观测数据进行了一些标准化的建设工作。主要包括观测数据统一的命名规则，观测数据统一的 FITS 头信息和观测数据 WCS 信息的标准。分别描述如下：

##### 1. 观测数据统一命名规则

在传统的商业化观测终端的控制软件中，通过观测终端获取的观测数据的命名方式往往采用数字编号进行命名，如果使用滤光片，则将滤光片作为文件名的后缀进行命名。在这种命名方式下，如果不同观测夜观测相同的目标，产生的观测数据的文件名就会重复，这对观测数据的管理和处理都造成了多种不便，尤其是在数据量越来越大的情况下更是不方便。也有些观测终端采用将观测数据曝光的时刻作为文件名进行命名，这样能够保证观测数据命名的唯一性，但是在文件名中由于带有冒号而无法直接在 Windows 下直接使用，也给观测数据的管理和处理造成不便。

为了便于对观测数据的统一管理，在终端控制系统中对观测数据的文件名采用了统一的命名规则，通过文件名最开头的两个字母区分不同的观测终端，年份和月份使用一个字母表示，日期使用 2 位数字表示，最后 4 位数字表示观测的编号，即：

终端名 (2 个字母) + 年 (一个字母) + 月 (一个字母) + 日 (两位数字)  
+ 编号 (4 位数字) .fits

如：YFAa010001.fits 指的是使用 YFOSC 在 2017 年 1 月 1 日拍的第一幅数据。

年和月都通过字母表示，年份的字母编号从观测终端开始运行的年份为开始基准点，按照 26 个英文字母 a,b,c...A,B,C...的顺序自动增加，可以保证观测终端运行 52 年而文件名不出现重复。月份的字母编号则从 a 开始，每个月自动增加，每年使用 12 个字母，不会出现重复。日期则根据当前的日期以两位数字进行编号，也不会出现重复。如果有必要，也可以采用大写字母表示月份的编号，从而又可以保证观测终端再运行 52 年而不出现文件名的重复。这样的命名方式既能保证观测数据文件名的唯一性，也完全能够覆盖观测终端的生命周期。

该命名方法的具体实现如下所示：

*Begin*

*获取当前时间：Tt；*

*将当前时间转换成格林威治时间：TM；*

*从配置文件中读取当前终端的前缀：prefix；*

*IF TM->tm\_hour < 4*

*Tt -= 4\*60\*60;*

*TM = gmtime(&Tt);*

*Tt += 4\*60\*60;*

*# 为了保证观测夜的观测数据命名的统一性，在中午 12 点前的数据使用前一天的日期编号，北京时与格林威治时间相差 8 个小时，因此需要减去 4 个小时。*

*END IF*

*# 格林威治时间中的 tm\_year 是以 1900 为起点计算的，如 2000 年的 tm\_year 值为 100。假设观测终端是 2010 年开始运行，则其开始运行的时间点为 110，运行 26 年后的年份是 2036 年，tm\_year 值为 136。*

*IF TM->tm\_year < 136*

*年月日编号 pre = ('a' + TM->tm\_year - 110) + ('a' + TM->tm\_mon) + ('0'*  
*+ (TM->tm\_mday / 10)) + ('0' + (TM->tm\_mday % 10));*

*ELSE*

*年月日编号 pre = ('A' + TM->tm\_year - 136) + ('a' + TM->tm\_mon) + ('0'*  
*+ (TM->tm\_mday / 10)) + ('0' + (TM->tm\_mday % 10));*

*获取下一个文件的编号：fileno;*



得到最终文件名:  $filename = prefix + pre + fileno;$

END

在观测终端控制系统中, 已有终端的前缀已经进行了统一, 其中 YF 表示 YFOSC, PI 表示 PI CCD, HR 表示 HiRES。当前, 该命名方式已经在 YFOSC 和 PI CCD 中得到实现, 并将逐步应用到终端控制系统中的其他观测终端中。

## 2. 观测数据统一的 FITS 头信息

为了在观测数据的 FITS 头中显示相同的望远镜信息, 设计并研发了统一的望远镜状态信息 FITS 头格式, 通过运行在望远镜状态数据库服务器上的程序作为服务器端, 将望远镜的信息进行标准化, 然后提供给各个向它请求数据的观测终端, 写入到观测终端的 FITS 头中。标准化的望远镜信息如图 4.10 所示。

```

The return info is:
-----
TELESCOP= '2.4m Telescope      ' / 2.4m Telescope at Gaomeigu
SOURCE   = '                    ' / Source name
RA       = 135.65635833333334 / RA of the Source in degrees
DEC      = +37.162194444444445 / DEC of the Source in degrees
EPOCH    = 2000.000 / Same as Equinox
EQUINOX   = J2000 / Equinox of position
TELERA   = 135.65635861111113 / Telescope RA in degrees
TELEDEC  = +37.162191666666665 / Telescope DEC in degrees
FOCUS    = 19.6 / Telescope Second Mirror Focus(mm)
AZIMUTH  = -63.0077 / Azimuth of Telescope in degrees
ALTITUDE = 50.9681 / Altitude of Telescope in degrees
ROTANGLE = -57.6144 / Rotator postion
AIRMASS  = 1.288147 / Airmass
AIRTEMP  = 7.22 / AIR temperature from WMS
HUMIDITY = 0.96 / Humidity from WMS
PRESSURE = 685.00 / Pressure from WMS
WINDSPD  = 0.00 / Wind speed from WMS
WINDDIR  = 0.00 / Wind direction from WMS

Already successfully send info to client!
-----

```

图 4.10 标准化的望远镜信息 FITS 头

Figure 4.10 Formalized telescope information for the FITS header

在标准的望远镜信息中, 包含了数据处理所需要的所有信息, 分别是: 望远镜名称、观测目标的名称、观测目标的赤经和赤纬值、观测目标的历元、望远镜实际指向的赤经和赤纬值、望远镜焦点、方位轴的位置、高度轴的位置、消旋轴的位置、大气质量以及一系列的气象数据(温度、相对湿度、气压、风速和风向), 都以规范的格式保存。

在终端控制系统中, 建立统一的 FITS 头信息数据库, 用独立的数据表对标准化的望远镜信息和气象信息进行保存, 每个观测终端也有独立的 FITS 头信息数据表, 在产生观测数据的时候, 终端控制系统会同时查询相关的数据表, 并对不

同的数据表中的信息进行融合,通过后台配置文件的设置生成该观测终端的标准化 FITS 头文件。该过程如图 4.11 所示。

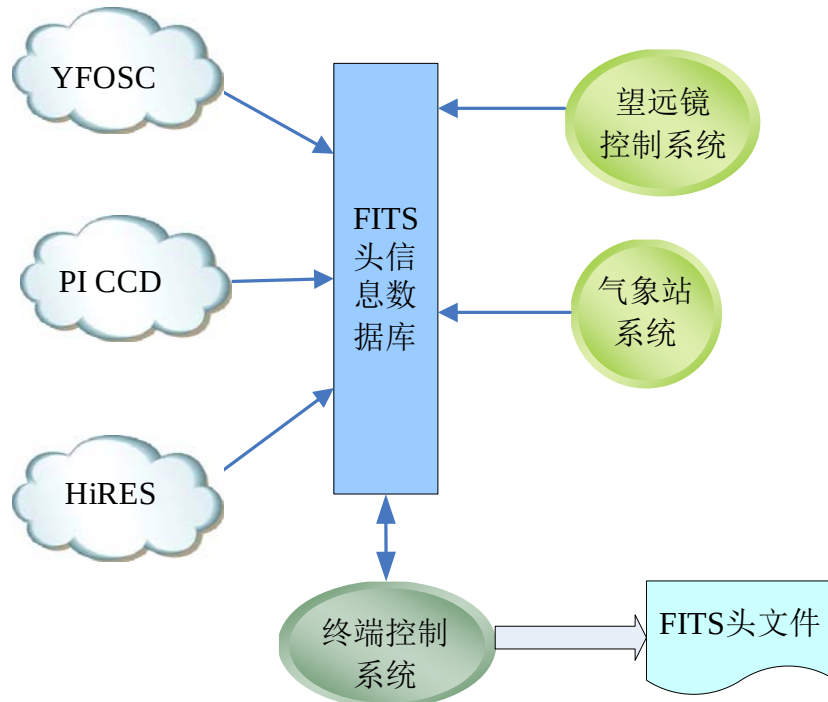


图 4.11 FITS 头信息数据库结构

Figure 4.10 Structure of FITS header database

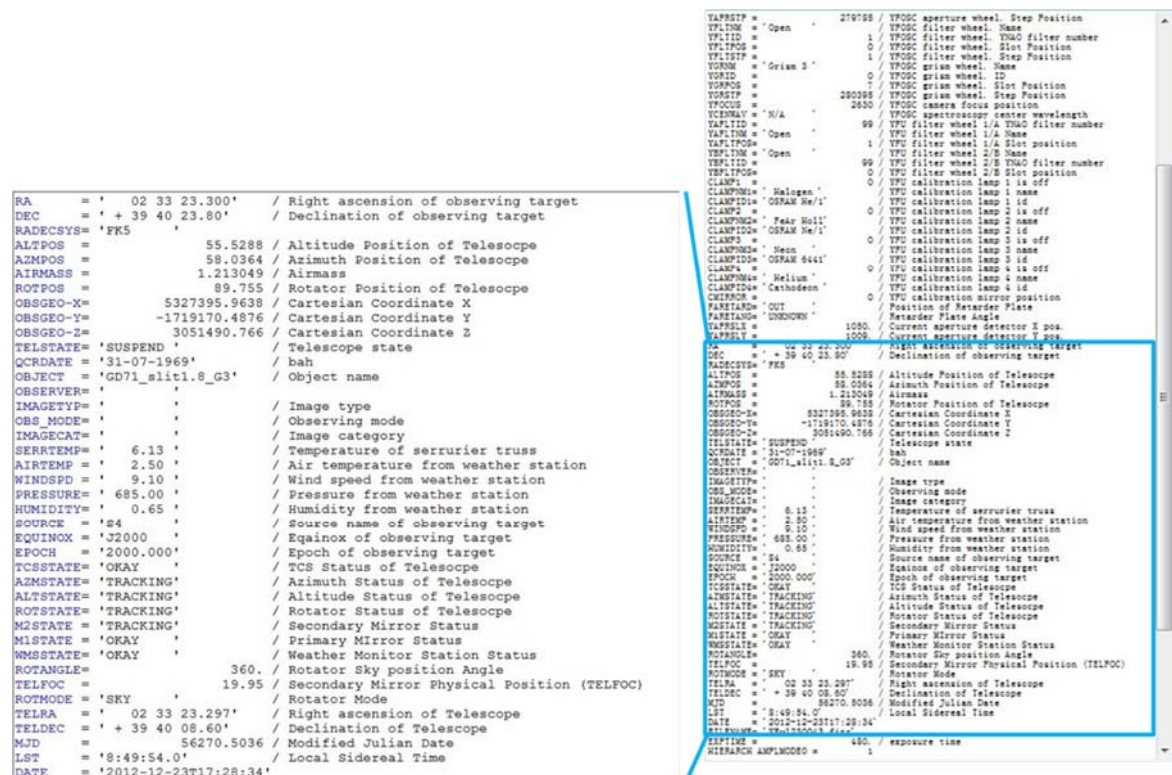


图 4.12 添加望远镜信息后的 YFOSC 观测数据 FITS 头信息

Figure 4.12 FITS header of YFOSC after add the telescope information

通过如上所述的工作,目前已经将望远镜状态信息和气象信息添加到 YFOSC 和 PI CCD 的观测数据的 FITS 头文件中,添加相关信息后的 FITS 头文件如图 4.12 和图 4.13 所示。在下一步的工作中,还需要继续添加其他与观测相关的信息,如观测辅助系统中提供的云量、视宁度、天光背景等信息,逐步丰富观测数据的 FITS 头文件信息,从而方便观测用户对观测数据的处理,也更好地对观测数据的质量进行判断。此外,也需要逐步完成终端控制系统中其他观测终端的 FITS 头文件的标准化建设。

```

SIMPLE = 1 / file does conform to FITS standard
BITPIX = 16 / number of bits per data pixel
NAXIS = 2 / number of data axes
NAXIS1 = 1340 / length of data axis 1
NAXIS2 = 1300 / length of data axis 2
EXTEND = 1 / FITS dataset may contain extensions
COMMENT FITS (Flexible Image Transport System) format is defined in 'Astronomy
COMMENT and Astrophysics', volume 376, page 359; bibcode: 2001AA...376..359H
BZERO = 32768 / offset data range to that of unsigned short
BSCALE = 1 / default scaling factor
TIME-STA = 19:56:16.513 / Start time of observation.
DATE-STA = 2017-10-27 / Date of observation start.
FILENAME = PI20171027T195616.fits
ACQ_MODE = NORMAL / Type of CCD Exposure.
AIRMASS = 1.076937 / Airmass
AZMSTATE = WARNING / Azimuth Status of Telescope
ALTSTATE = WARNING / Altitude Status of Telescope
ROT_MODE = SKY / Rotator Mode
ROTSTATE = TRACKING / Rotator Status of Telescope
AZMPOS = 64.5235 / Azimuth Position of Telescope
ALTPOS = 68.2161 / Altitude Position of Telescope
ROTPOS = 47.757 /
M2STATE = TRACKING / Secondary Mirror Status
M1STATE = OKAY / Primary Mirror Status
AIRTEMP = 0.00 / Air temperature from weather station
SEKTEMP = 11.93 / Temperature of serrurier truss
WINDSPD = 0.00 / Wind speed from weather station
PRESSURE = 0.00 / Pressure from weather station
HUMIDITY = 0.00 / Humidity from weather station
TELSTATE = WARN / Telescope state
TCSSTATE = OKAY / TCS Status of Telescope
WXSSTATE = SUSPEND / Weather Monitor Station Status
ROTANGLE = 359.9999 / Rotator Sky position Angle
EQUINOX = J2000 / Equinox of observing target
EPOCH = 2000.000 / Epoch of observing target
MJD = 58053.4974 / Modified Julian Date
TELDEC = +335755.00 / Declination of Telescope
TELRA = 223505.500 / Right ascension of Telescope
LST = 75626 / Local Sidereal Time
DATE-OBS = 2017-10-27 19:55:28 / Date of Observation
SET-TEMP = -110 / [C]CCD temperature setpoint
CCD-TEMP = -110 / [C]CCD temperature at start of exposure
GAIN = 2 / Gain of readout in electron per ADU
PORT = 0 / CCD readout port
OBSERVER = hugh / Observer's name
OBJECT = NGC7318 / Object
FILTER = clear / Filter used when taking image
READSPEED = 17.420 / [s]CCD readout speed
X-BEGIN = 0 / Start point of x-axis in CCD
Y-BEGIN = 0 / Start point of y-axis in CCD
X-SIZE = 1340 / Size in X-axis of CCD
Y-SIZE = 1300 / Size in Y-axis of CCD
XBINNING = 1 / Binning Factors in Width
YBINNING = 1 / Binning Factors in Height
EXPOSURE = 30.0 / [ms]Exposure time
INSTRUME = PI VersArray 1300B / CCD used in Observation
X-MSIZE = 1340 / Max size in x-axis of CCD
Y-MSIZE = 1300 / Max size in y-axis of CCD
XPISIZE = 20 / [um]Pixel size of ccd in x-axis
YPISIZE = 20 / [um]Pixel size of ccd in y-axis
COOLMODE = Liquid nitrogen / CCD cooling method
TIME-END = 19:57:04.213 / End time of observation (After readout).
END

```

图 4.13 添加望远镜信息后的 PI CCD 观测数据的 FITS 头信息

Figure 4.13 FITS header of PI CCD after add the telescope information

### 3. 观测数据添加 WCS 信息

在天文研究中,所有目标星的坐标都是通过世界坐标系(World Coordinate System, WCS)来进行标定的,但如果在 FITS 头中没有包含必要的信息,观测数据中就只能通过图像坐标系(Pixel Coordinate System)来对数据中的星进行标定,这样就会使得观测数据中星的坐标因不同的观测终端而千差万别,从而也给观测数据的处理带了很多麻烦。

为了对所有的观测图像中的星的坐标进行统一化,需要将一些计算 WCS 信息所需要的值写入到 FITS 头中,才能最终实现。这个处理过程可以描述为:

1) 使用终端设备采集一幅图片, 检查采集到的图片与实际情况的夹角, 记为 ROTOFFSET, 其单位是弧度。

2) 计算该终端在 X 方向和 Y 方向上的底片比例尺, 记为 SCALE1 和 SCALE2。能通过多种方法计算得到底片比例尺, 最简单的计算方法是根据理论的公式(如公式(1)所示) 进行计算<sup>[70]</sup>。

$$\text{比例尺} = \frac{206265''}{f \text{ (mm)}} = \frac{206265''k}{f(\text{mm}) * 1000} (''/\text{pixel}) \quad (1)$$

其中,  $f$  是望远镜结合该观测终端的焦距,  $k$  是 CCD 芯片的像元大小(单位为  $\mu\text{m}$ ), 206265''对应的是 1 弧度对应的角秒值。对于 YFOSC 而言, 丽江 2.4 米望远镜的焦比是 F/8, YFOSC 本身是一个焦比为 0.513 的缩焦器, 综合得到的焦比是 F/4.1, 因此可以计算得到焦距  $f = 2400(\text{mm}) * 4.1 = 9840$ 。根据其像元大小  $13.5\mu\text{m}$  可以计算得到底片比例尺约为  $0.283''/\text{pixel}$ , 且由于像元在 X 和 Y 方向的尺寸相同, 因此 SCALE1 和 SCALE2 的值也相同。

由于 FITS 头中的 WCS 信息对精度的要求不是太高, 因此使用如上计算方法获得的底片比例尺的精度已经能够满足要求, 如果要计算精确的底片比例尺, 需要通过天体测量的办法进行精确的计算才能得到<sup>[71]</sup>。此外, 还有一种通过对已知角距离的双星进行实测计算底片比例尺的办法<sup>[72]</sup>, 通过多个目标的实测数据进行底片比例尺的统计计算。

3) 旋转望远镜的卡焦, 同时利用观测终端进行曝光, 在获取的观测数据中, 通过计算获取观测终端的芯片上与光轴中心对应的坐标, 记为终端光轴中心的参考坐标 CRPIX1 和 CRPIX2;

4) 从望远镜状态数据库中, 获取观测目标的赤经和赤纬坐标, 记为: CRVAL1 和 CRVAL2, 赤经和赤纬的值以度数表示;

5) 在实际的观测过程中, 读取观测终端并读的值(记为 xbin 和 ybin), 通过如下的公式(2)(3)计算实际的底片比例尺和实际的参考位置进行计算, 并根据公式(4)计算得到 WCS 所需要的 CD1\_1, CD1\_2, CD2\_1 和 CD2\_2 这四个值。

$$\begin{aligned} \text{SCALE1} &= \text{SCALE1} * \text{xbin} \\ \text{SCALE2} &= \text{SCALE2} * \text{ybin} \\ \text{CRPIX1} &= \frac{\text{CRPIX1}}{\text{xbin}} \end{aligned} \quad (2)$$



$$\text{CRPIX2} = \frac{\text{CRPIX2}}{y_{\text{bin}}} \quad (3)$$

通过矩阵计算就得到确认 WCS 所需要的，其计算方法为：

$$\begin{aligned} \text{CD11} &= \text{SCALE1} * \cos(\text{ROTOFFSET}) \\ \text{CD12} &= -\text{SCALE2} * \sin(\text{ROTOFFSET}) \\ \text{CD21} &= \text{SCALE1} * \sin(\text{ROTOFFSET}) \\ \text{CD22} &= \text{SCALE2} * \cos(\text{ROTOFFSET}) \end{aligned} \quad (4)$$

将以上所有的这些信息写入到 FITS 头文件中，就可以在获取的数据中有较为准确的 WCS 信息。

目前，在 YFOSC 观测数据的 FITS 头文件中已经完成了 WCS 信息的添加工作（如图 4.14），并已经通过测试能够提供正常的值，已经在为引力波事件的后随观测提供相应的服务。后续将逐步对望远镜的其他观测终端进行 WCS 信息的添加。

```
CRVAL1 = 213. / RA at reference point
CRVAL2 = 17.65 / DEC at reference point
CUNIT1 = 'deg' / Unit of first axis
CUNIT2 = 'deg' / Unit of second axis
CRPIX1 = 782.4 / Reference pixel on first axis
CRPIX2 = 915.1 / Reference pixel on second axis
CD1_1 = -7.916667E-05 / Transformation matrix for primary WCS
CD1_2 = -0. / Transformation matrix for primary WCS
CD2_1 = -0. / Transformation matrix for primary WCS
CD2_2 = 7.916667E-05 / Transformation matrix for primary WCS
```

图 4.14 YFOSC 的 FITS 头文件中 WCS 信息

Figure 4.14 WCS information in the FITS header of YFOSC

## 4.6 本章小结

终端控制系统是观测控制系统的重要组成部分，尤其是对于通用型望远镜而言，由于其配备的观测终端数量较多，观测能力齐全，但操作复杂，因此需要开发终端控制系统来对观测终端进行统一的控制，提高观测效率。本章中首先对国内外终端控制系统的典型例子进行研究，其次对丽江 2.4 米望远镜现有的终端设备的控制系统结构进行了分析。在此基础上，对丽江 2.4 米望远镜的终端控制系统进行基础框架的设计和分析，并使用与 YFOSC 类似的序列控制模式实现对 PI CCD 和 HiRES 的 CCD 控制系统的序列控制系统的开发。

针对后期观测数据的统一管理、归档和发布，定义了三个观测终端控制系统需要遵循的规范，包括观测数据文件名的统一标准、FITS 头信息中望远镜信息

的统一标准和 FITS 头中 WCS 信息的标准。目前，第一个标准在 YFOSC 和 PI CCD 中已经得到实现，第二个标准在 YFOSC, PI CCD 和 LiJET 中得到了实现，第三个标准则仅仅在 YFOSC 中得到实现。在今后有新的观测终端接入观测控制系统的过程中，也需要遵守这里定义的针对观测数据的标准。此外还要求新安装的观测终端需要具备完整的控制指令集，且能通过网络进行控制，从而可以很容易针对控制指令集进行序列控制指令的开发，顺利将新安装的设备融合到终端控制系统中。

## 第5章 数据管理系统的研究与实现

天文观测数据是天文望远镜观测运行的成果，也是天文学家赖以研究天文学的关键基础，在天文观测中从很早就已经在使用统一的 FITS 文件保存观测数据了<sup>[73]</sup>。天文观测数据最重要的就是第一手的原始数据，保证观测数据的安全、提供便利的数据访问方式，就是数据管理系统所需要完成的工作。

光学望远镜是最传统的天文望远镜，根据它的不同科学目标可以分为专用型巡天望远镜和通用型光学望远镜。巡天望远镜由于其科学目标确定，往往会产生大量的观测数据，如 LAMOST 望远镜就是专用的光谱巡天望远镜，通过在焦面上放置的 4000 根光纤，可以同时获取 4000 个天体的光谱，如今已经获得了上千万条的光谱数据，截止目前已经发布了 6 期的巡天数据，数据量达到几百 TB。计划中的云大 1.6 米多通道巡天望远镜（Mephisto），其视场达到 2.6 度\*2.6 度，三个通道同时采集数据，曝光时间 20 秒左右，预计每晚产生 3TB 左右的观测数据，一年可以产生近 3PB 的观测数据<sup>[74]</sup>。

通用型望远镜由于需要覆盖的科学目标比较广，很多项目为了能获取观测目标更细致的信息，往往采用更长的曝光时间。因此，通用型望远镜的观测数据数据量不会太大，但是观测数据的类型却随着观测类型的不同而不同。最简单的，可以分为测光数据和光谱数据，测光数据和光谱数据的文件大小并不同，甚至是同一台终端设备的观测数据的大小也不同。此外，由于通用型望远镜往往配备多台观测终端，由于终端控制系统的不统一导致观测数据多种多样。因而，对于通用型望远镜来说，观测数据的统一化、标准化管理，统一保存也成了主要任务。

### 5.1 数据管理系统整体设计

数据管理系统主要对观测数据进行管理，主要包括数据存储模块、数据异地备份模块、数据预览模块、数据检查模块、数据预处理模块、数据入库模块和数据发布模块，其整体设计结构如图 5.1 所示。

数据管理系统从物理分布来说可以分为站内系统和站外系统两个部分。其中站内系统主要负责观测数据采集之后的本地存储、数据预览、数据检查、观测日志数据及观测数据元数据入库等相关的工作；站外系统则主要负责观测数据的异地备份存储、观测数据的预处理、对观测数据的详细信息进行入库，并最终实现

观测数据的在线发布。

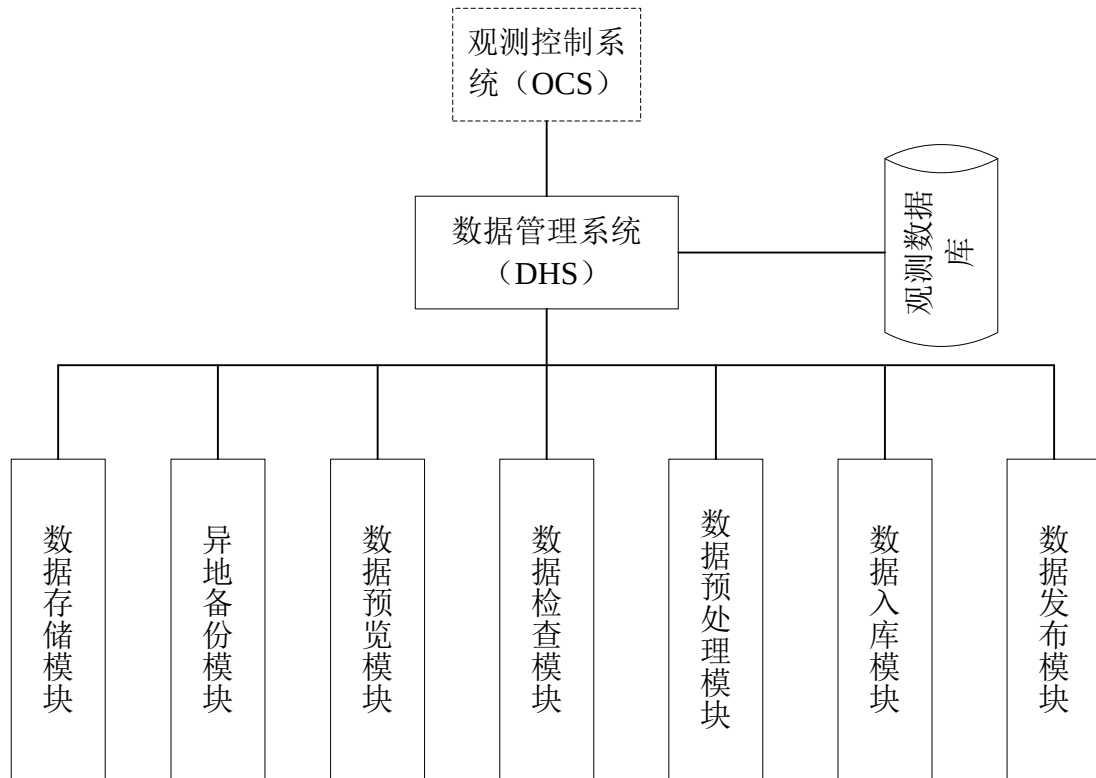


图 5.1 数据管理系统整体设计结构图

Figure 5.1 Frame structure of the data management system

各个模块的功能描述如下：

- 1) 数据存储模块：主要负责观测数据的本地存储，在观测数据获取之后将数据直接存入到本地存储设备中；
- 2) 异地备份模块：主要负责观测数据的异地备份工作，在观测结束之后将数据备份到异地的存储设备中，从而保证观测数据的安全性。
- 3) 数据预览模块：主要负责对观测数据的预览，在曝光结束之后，对观测数据进行预览，从而协助观测者对观测数据检查，保证观测数据的质量符合观测要求。
- 4) 数据检查模块：主要负责对观测数据的检查，在观测结束之后对观测数据进行批量的检查，并生成完整的检查报告。
- 5) 数据预处理模块：主要负责对观测数据进行预处理，包括本底、平场的叠加和处理，并对观测数据进行简单的预处理。
- 6) 数据入库模块：主要负责观测数据相关信息的入库归档工作，将数据存入到数据库中，为后期的数据发布提供基础。



- 7) 数据发布模块：主要负责观测数据的发布工作，对处理后的观测数据进行管理，并最终通过统一的平台进行数据发布。

要对观测数据进行有效的管理，就需要针对这些模块进行各个部分的实现，以站内和站外不同处理的需求对观测数据流程中的各个部分进行有效的管理。

## 5.2 观测数据归档和入库系统

观测数据归档和入库系统主要实现了观测数据存储、备份、入库这三个模块的功能。为了对 2.4 米望远镜的不同观测终端产生的观测数据进行统一的管理，首先需要对所有望远镜的 FITS 数据进行分析，并提取其中相同或相似的内容作为元数据的关键词建立起元数据库；然后建立数据存储中心，对望远镜所有的原始观测数据进行归档和存储；对观测数据和观测日志进行预处理，提取元数据然后自动存入到数据中心中，并通过领域云平台实现观测数据异地备份。

观测数据归档及入库的具体流程如图 5.2 所示。

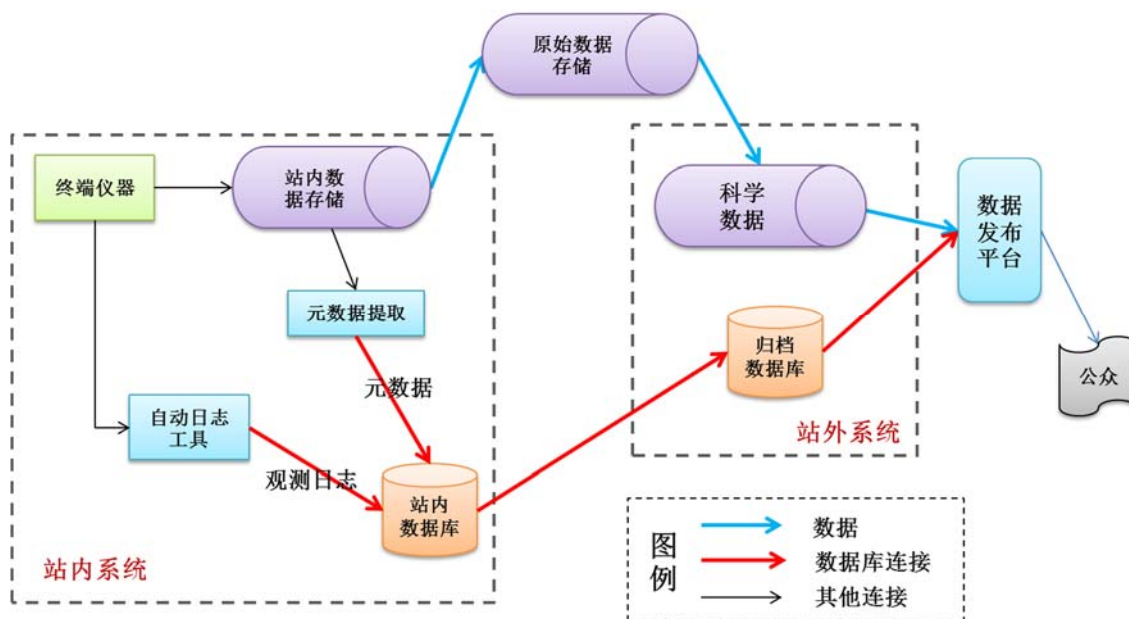


图 5.2 观测数据归档及入库流程

Figure 5.2 Flow chart of observation data archiving

在站内系统中，使用本地磁盘阵列完成观测原始数据的实时存储，在观测数据产生后就直接与观测时间申请书的编号进行绑定，将观测日志和原始数据的元数据进行入库。使用观测日志辅助工具对观测数据进行观测日志记录的同时，还对观测数据进行初步的检查，如果观测日志记录中有不正确的地方，则通过观测日志记录工具进行修改，并将修改的结果提交到数据库中，在进行数据预处理的

时候将根据观测日志的内容，对观测数据的 FITS 头文件中的内容进行修改。

在站外系统中，使用磁盘阵列存储观测数据，并在丽江的数据中心对观测数据进行预处理，包括本底、平场数据的合并，对原始数据进行简单的本底、平场的校正等。之后，再将预处理后的科学数据通过网络传输到“天文领域云”的归档中心进行归档。观测日志和元数据则直接通过数据库同步到“天文领域云”平台，最后通过领域云平台向所有人进行观测数据的公开。

站内系统与站外系统之间，使用电信提供的专线进行数据传输，带宽只有 6Mbps，因此仅能满足目前丽江 2.4 米望远镜的数据量。在丽江城的数据中心与领域云平台之间的数据传输，采用的是科技网，传输速度能达到 20Mbps，能够保证及时地将观测数据上传到领域云平台上。

在对原始观测数据进行入库的过程中，首先对原始观测数据进行分类。按照总体分类，可以分为测光和分光数据、BIAS 和平场数据；而按照科学目标进行二次分类的时候，又可以把测光和分光数据细分为：GRB、恒星（年轻/年老/巨星/矮星）、超新星、AGN（BLAZAR/QUASAR/）、小行星、双星、星团、星系等，如图 5.3 所示。

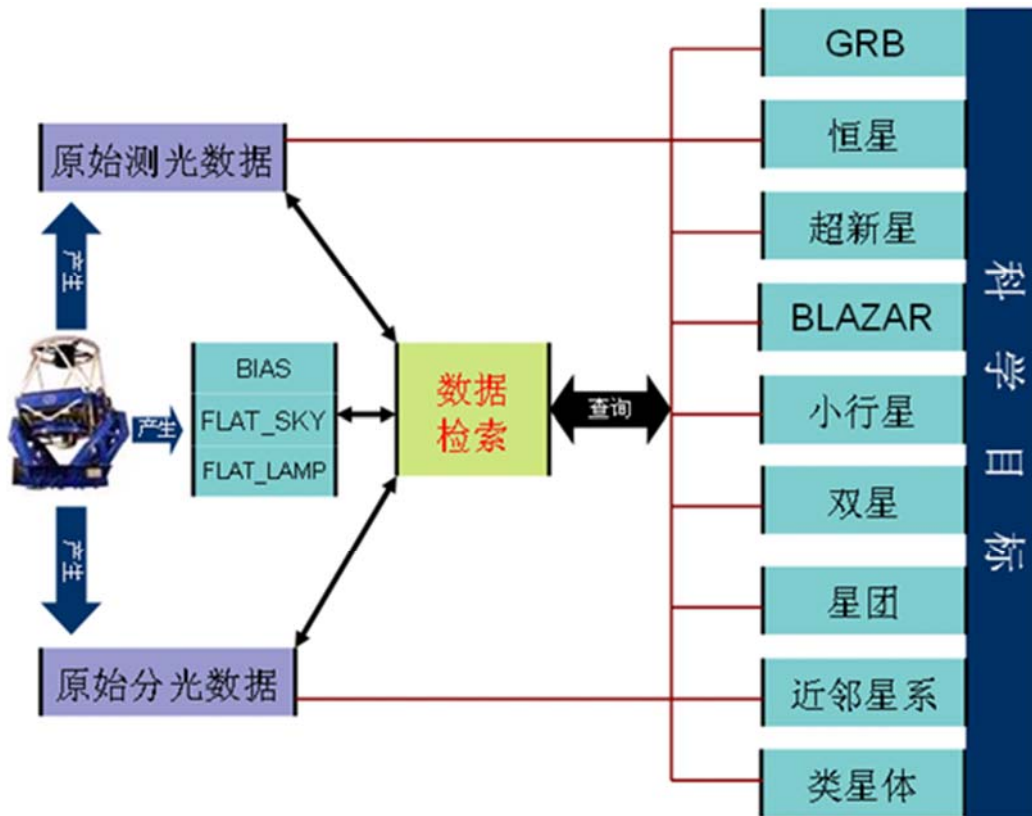


图 5.3 观测数据分类

Figure 5.3 Classification of observation data

虽然有多个不同的观测终端,但是为了在入库的时候实现多观测数据的分类,根据所有终端产生的观测数据的 FITS 头信息进行关键信息的提取,所提取的公共字段部分如表 5.1 所示。

表 5.1 观测数据公共字段表

Table 5.1 Table of the common information for the observation data

| 名称         | 类型  | 对应 FITS 头 | 备注             |
|------------|-----|-----------|----------------|
| ID         | 整型  | 无         | 编号, 主键, 唯一, 自增 |
| DATETIME   | 时间  | DATETIME  | 入库时间           |
| FILENAME   | 字符  | FILENAME  | 原始 FITS 文件名    |
| BITPIX     | 整型  | BITPIX    | CCD 的位数        |
| EXPTIME    | 浮点数 | EXPTIME   | 曝光时间           |
| CCD_TEMP   | 浮点数 | CCDTEMP   | CCD 的实际温度      |
| FOCALLEN   | 浮点数 | TELFOCUS  | 望远镜焦点          |
| OBJECT     | 字符  | OBJECT    | 观测目标源的名称       |
| TELESCOPE  | 字符  | TELESCOP  | 望远镜的名称         |
| INSTRUMENT | 字符  | INSTRUME  | 观测终端的名称        |
| OBSERVER   | 字符  | OBSERVER  | 观测用户           |
| DATE_OBS   | 字符  | DATE-OBS  | 观测日期           |
| FILTER     | 字符  | YFLTNM    | 所使用的滤光片信息      |
| GRISM      | 字符  | YGRNM     | 使用的光栅信息        |
| WEATHER    | 字符  | WEATHER   | 天气情况           |
| OBJECT_RA  | 字符  | RA        | 观测目标源的赤经坐标     |
| OBJECT_DEC | 字符  | DEC       | 观测目标源的赤纬坐标     |
| AIRMASS    | 浮点数 | AIRMASS   | 观测目标源的大气质量     |
| NOTE       | 字符  | 无         | 备注信息           |

目前已经实现的丽江 2.4 米望远镜的观测数据归档及入库的流程描述如下(以 YFOSC 为例):

- 1) 曝光结束之后,数据从 CCD 控制器写入到终端控制系统所在的控制计算机的硬盘上;
- 2) 数据写入完成,实时备份到预处理服务器;
- 3) 预处理服务器运行数据预处理程序,调用该数据,通过 DS9 显示,以便用户检查数据质量;
- 4) 同时,观测日志辅助工具对观测数据的 FITS 头文件中的内容进行检查,提取该元数据存入到数据库中,并对有错的 FITS 头数据进行修改,修改结果同样保存到数据库中;
- 5) 持续执行步骤 1-3,直到所有的观测结束(即第二天天亮或因天气影响而无法观测);
- 6) 观测数据从预处理服务器同步到丽江城数据中心的磁盘阵列中;
- 7) 观测数据从丽江城数据中心的磁盘阵列同步到“天文领域云”的数据服

务器中；元数据库中的信息也直接同步到领域云的数据服务器中；

8) 对观测数据进行归档；

9) 对观测数据根据虚拟天文台的标准进行处理，处理完成之后，通过“天文领域云”平台进行发布。

### 5.3 观测数据在线预览和检查系统

为了保证观测质量，也为了在进行光谱观测的时候能够快速将目标星导入到狭缝中，基于 PyRAF 进行了观测数据在线预览和检查系统的开发。目前所提供的观测数据检查的功能主要包括：display-start, display, imexam, hicut, lowcut, zscale, killdisplay 这些比较简单的数据检查功能。

曝光开始前，可以通过 display-start 程序在预处理服务器的客户端上启动用来打开观测数据的 DS9 工具。曝光结束后，观测数据实时同步到预处理服务器上，同时通过 display 程序将观测数据显示在 DS9 界面上，之后就可以通过 hicut, lowcut, zscale 等程序调整图像的显示效果，通过 imexam 对观测数据的质量进行检查。在进行光谱观测的时候，也可以通过 imexam 获取目标比较准确的坐标信息，从而提高将目标导入狭缝中的速度。

观测结束之后，可以通过 killdisplay 程序关闭在客户端运行的 DS9 工具，退出系统。

目前，该流程还没有能够实现自动化，因为实际观测过程中存在的情况多种多样，无法实现统一的标准化处理。在接下来的工作中，将逐步将在线数据检查系统进行自动化升级，使其可以更好地与观测控制系统进行融合。

### 5.4 观测数据离线检查系统

观测数据检查系统的作用主要是对观测终端得到的各种类型的观测数据进行质量的检查，根据经验值和正常的值判断各种类型的数据是否正常，从而反应出观测终端是否正常运行，比如本底数据如果出现大的波动，则很可能在拍摄本底的某个环节存在问题，或者观测终端有些问题，此时系统就会通知望远镜的运维团队对观测终端进行检查。

以丽江 2.4 米望远镜的主力设备 YFOSC 的观测数据的检查为例，主要的工作流程如下所示，在检查过程中只记录错误信息，生成错误日志，对于正常数据

不记录到日志文件中。

- 1) 观测结束后, 观测数据及时从本地存储设备备份到数据检查服务器上;
- 2) 系统自动读取观测数据, 如果无法读取, 极大的可能是备份过程中出现问题, 需要重新备份一次观测数据;
- 3) 如果多次备份仍旧无法正确读取, 极有可能通信网络或存储设备出现故障, 则生成一条错误记录, 写入到错误日志中, 通知运维团队对观测终端进行检查;
- 4) 读取观测数据 FITS 头文件后, 根据头文件信息, 将数据分为测光数据和光谱数据两大类: 其中测光数据包括: 本底、各波段的平场和科学数据; 光谱数据包括: 本底、对应各光栅和狭缝组合的定标灯数据 (平场灯谱和波长定标灯谱)、科学数据 (观测目标和流量定标星的光谱数据);
- 5) 对本底数据进行检查, 统计其中值和方差, 与系统记录的正常值进行对比 (如 YFOSC 的本底的中值和方差的正常值分别 20100 和 30), 如果偏离太大, 则生成一条错误记录, 写入到错误日志中, 并通知运维团队进行人工确认;
- 6) 对测光数据中的平场数据进行检查, 统计其均值, 检查其均值是否在 CCD 的线性区内; 如果不在线性区内, 丢弃该平场数据; 如果在线性区内, 则再对其进行分区统计均值, 并对各个分区的均值进行对比, 如果各区均值相当, 则表示平场数据正常且可用, 如果各区均值偏差太大, 则生成错误记录, 写入到错误日志中, 并通知运维团队对观测终端进行检查;
- 7) 对测光数据中的科学数据进行检查, 分区统计其中值, 判断天光背景是否均匀, 如果均匀, 则测光数据正常; 如果不均匀, 则生成一条错误记录, 写入到错误日志中, 并通知运维团队人工确认;
- 8) 对光谱数据中由各光栅和狭缝组合的定标灯数据进行检查, 在固定像素范围内计算其平均值, 与以往正常的值进行比较, 如果变化显著, 则生成错误记录, 写入到错误日志中, 并通知运维团队检查定标灯是否损坏, 狭缝、光栅是否安装不正确等;
- 9) 对光谱数据中的光谱科学数据进行检查, 在空间方向上统计其是否存在亮峰, 如果没有亮峰则怀疑在观测过程中该目标是否已经漂移出狭缝, 系统生成一条错误记录, 写入到错误日志中, 并通知运维团队进行人工检查。

- 10) 在完成对所有观测数据的检查之后, 生成一个完整的错误日志报告, 发送给运维团队, 由运维团队对检查结果进行评估, 并在白天对出现的问题进行检查和解决, 保证望远镜观测任务的正常进行。

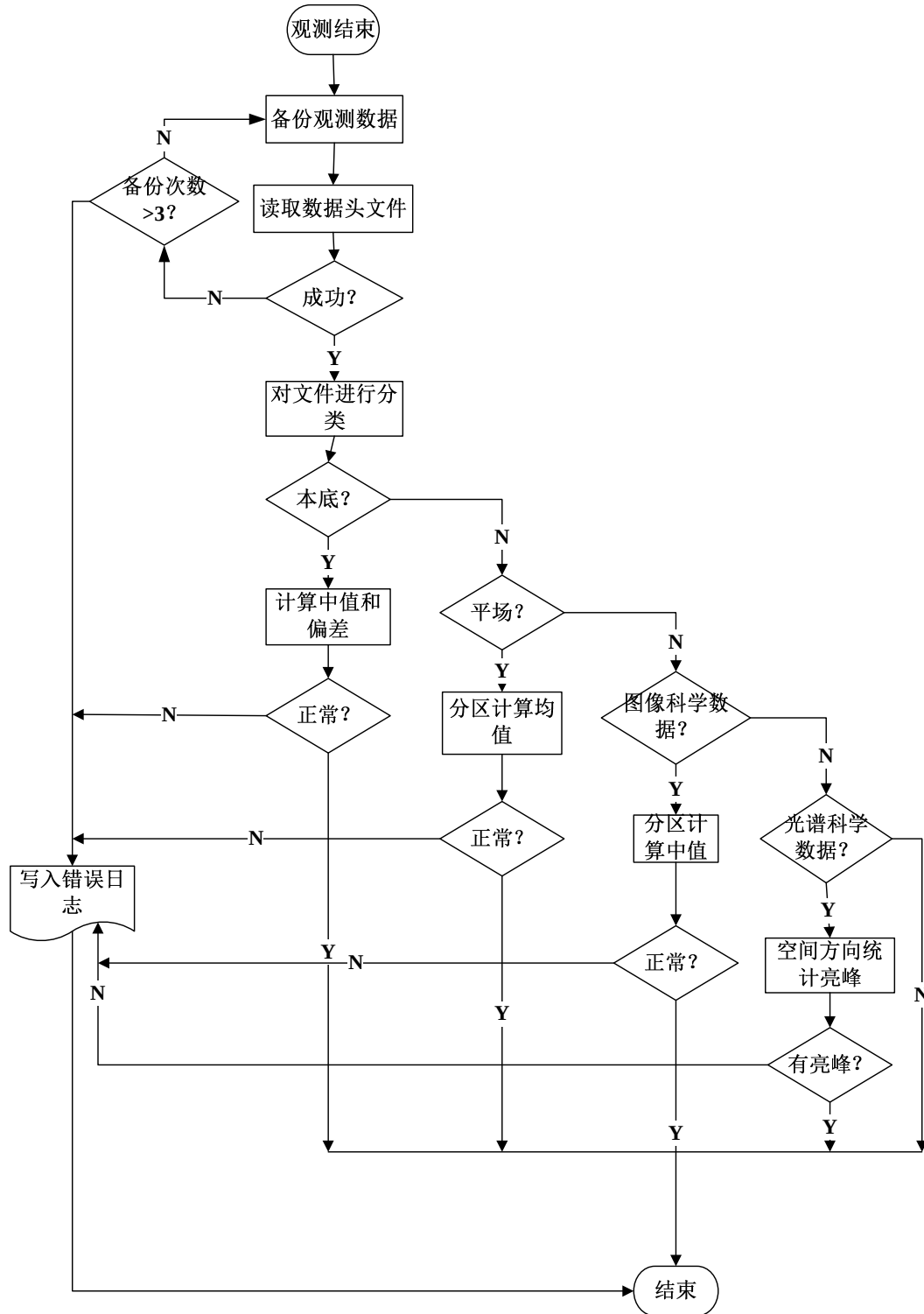


图 5.4 观测数据检查流程图

Figure 5.4 Flow chart of the observation data checking system

数据检查系统工作流程图如图 5.4 所示。建立数据检查系统的初衷是为了保

证观测数据的可用性，因为曾经出现过与观测终端相关的多种故障：1) 观测终端控制器通信板卡出现问题，导致观测数据不正常；2) 观测终端真空度不正常，导致本底数据不正常；3) 由于光纤损坏，导致观测数据采集不正常，不能得到完整的观测数据；4) 在观测过程中由于疏忽忘记关闭定标灯，导致观测数据不可用等等。为了及时了解观测终端的运行状态，以及从侧面判断望远镜的运行状态，特意建立了这一套数据检查系统。该系统是基于 IDL 进行编写的，运行在 Linux 平台下，目前已经配置在丽江 2.4 米望远镜观测平台上自动对观测数据进行检查。

## 5.5 数据发布系统

数据发布系统主要实现对已过保护期的观测数据的公开发布，并提供相应的观测数据检索功能。观测数据检索的途径是多元化的，根据用户的习惯主要按照观测者姓名、观测目标、观测日期、星等范围、赤经赤纬、测光和分光、科学目标等进行检索。如图 5.5 所示，检索界面是基于天文研究者使用习惯进行设计。

### Position Constraints

|                                       |                                                                                                               |                                                                                                                                           |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <input type="radio"/> Rectangle       | min<br>ra <input type="text"/><br>dec <input type="text"/>                                                    | (max 10 square degrees)                                                                                                                   |
|                                       | max<br>ra <input type="text"/><br>dec <input type="text"/>                                                    |                                                                                                                                           |
| <input type="radio"/> Cone            | center<br>ra <input type="text"/><br>dec <input type="text"/><br>solve name: <input type="text"/> Solve       | radius <input type="text"/> arcsec                                                                                                        |
| <input type="radio"/> Proximity       | list of ra,dec[,radius] (max 100 obj)<br><input type="text"/><br>#ra, dec, sep<br>313.16483333,-17.34269444,2 | Default radius<br><input type="text"/> arcsec<br>or Upload File ( <a href="#">Sample</a> )<br><input type="button" value="选择文件"/> 未选择任何文件 |
| <input checked="" type="radio"/> None | No position constraint                                                                                        |                                                                                                                                           |

### Output

Format:

图 5.5 观测数据检索界面示例

Figure 5.5 Sample of the searching frame

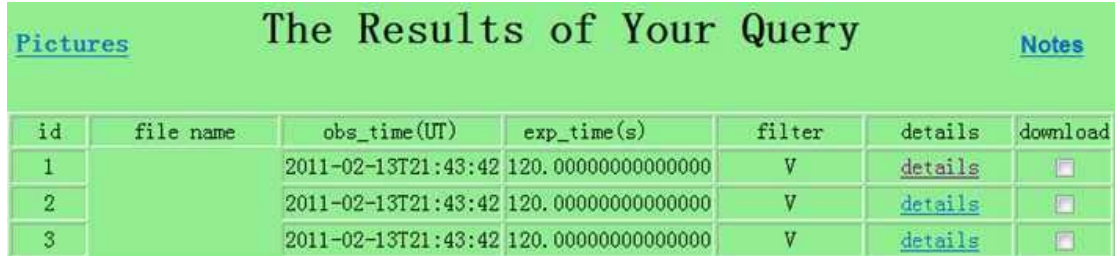
提供两种方式的检索方式对后台的观测数据数据库进行查询，即精确检索和范围检索，检索结果的示例如图 5.6 所示。

### 1. 精确检索:

完全匹配前台检索界面所传过来的字符串或数字对后台数据库相关表格进行查询。

## 2. 范围检索:

其对象主要是针对数据库表格中含有数字的字段(而这些字段的值有可能是以字符串格式存储在表格中的)进行,比如: OBJCTRA = '26 42 32' 和 OBJCTDEC = '+ 00 17 07.20', 因为检索中需要用到按这两个字段值范围检索, 故在范围检索的时候要做属性转换以便能够查找用户自定义范围内的数据。范围检索字段有: 目标源的赤经+目标源的赤纬, 大气质量, 观测时间, 入库时间。



| The Results of Your Query |           |                     |                    |        |                         |                          |
|---------------------------|-----------|---------------------|--------------------|--------|-------------------------|--------------------------|
| id                        | file name | obs_time(UT)        | exp_time(s)        | filter | details                 | download                 |
| 1                         |           | 2011-02-13T21:43:42 | 120.00000000000000 | V      | <a href="#">details</a> | <input type="checkbox"/> |
| 2                         |           | 2011-02-13T21:43:42 | 120.00000000000000 | V      | <a href="#">details</a> | <input type="checkbox"/> |
| 3                         |           | 2011-02-13T21:43:42 | 120.00000000000000 | V      | <a href="#">details</a> | <input type="checkbox"/> |

图 5.6 观测数据检索结果示例

Figure 5.6 Sample of the searching result

## 5.6 本章小结

在天文大数据时代, 如何对大量的数据进行有效的管理, 及时对观测数据进行处理并发布处理结果, 成为了观测数据管理系统的主要需求。而如何通过观测数据的质量检查结果, 提示观测控制系统调整观测计划, 获取更高质量的观测数据, 是在线观测数据检查系统所需要实现的功能。本章首先介绍了观测数据管理系统的整体设计结构; 在此基础上对丽江 2.4 米望远镜的观测数据自动归档和入库流程的实现进行了详细的描述; 此后, 对观测数据在线预览和检查系统, 以及观测数据离线检查系统的实现进行了详细的阐述。

遗憾的是丽江 2.4 米望远镜目前还没有建立观测数据处理的流水线, 这就使得观测数据不能在观测结束之后及时得到处理, 这将是下一步观测数据管理系统工作的重点。



## 第6章 系统集成及统一调度

在完成望远镜控制系统的改造、终端控制系统的研发和数据管理系统的研究之后,就能通过观测控制系统实现对与天文观测相关的这几个部分实施统一的控制和调度。在进行观测的过程中,还需要一些辅助的系统提供数据信息支持才能实现整体的调度,如观测期间实时的气象信息、视宁度情况、云量情况等等。本章将先介绍观测调度相关的主要因素,并介绍目前已经为观测调度开发完成的各个观测辅助系统,并对在此基础上已经实现的针对机会源的后随观测调度进行阐述。

### 6.1 观测调度相关的因素

观测调度相关的因素有很多,不同类型天文望远镜中与观测调度相关的影响因素比较类似,主要包括:气象数据、视宁度、云量情况、月相情况、望远镜、观测终端(包括滤光片、光栅、狭缝等)、观测计划等。

在实际的观测过程中,影响观测调度的因素会动态变化,因此对观测调度的影响会更大。

对于通用型望远镜而言,可以根据望远镜使用的焦点情况对望远镜进行调度,如使用的是卡焦焦点、主焦焦点还是耐焦焦点,如果是专用的望远镜一般只需要使用一个焦点且焦点切换比较复杂,因此可以只考虑一个焦点。

观测终端设备分为测光观测设备和光谱观测设备,因此需要根据实际的用户需求进行调度,随时监控观测终端的状态,在接收到观测调度命令的时候根据需求查询终端的状态,如果状态正常,则返回正常,如果有异常就及时报告,并反馈给调度系统。

月相要求主要用来区分灰夜和非灰夜,并根据不同的月相进行不同的天文观测,如在灰夜可以进行测光或者比较暗的观测目标的观测,在非灰夜就要在安排观测目标的时候就需要考虑观测目标离月亮的距离、观测目标的星等,以避免观测不成功造成观测时间的损失。

天文气象数据也是在调度中需要考虑的关键数据,如视宁度情况用来对观测目标、狭缝的选择进行调度;云量情况和全天相机可以用来对观测天区进行调度,

在有薄云的情况下可以选择没有云的天区进行观测，充分利用有限的观测时间。此外，还可以对历史数据进行统计分析，利用机器学习，对可能出现的天气状况进行预测，从而可以有针对性地调整观测策略。

## 6.2 观测调度辅助系统的研究

为了实现全生命周期的观测调度，系统还需要提供一系列的观测调度辅助系统为观测调度进行服务，从而保证观测调度系统可以做出最优的选择来实施天文观测。目前已经逐步研发完成的辅助系统包括：观测时间申请子系统、站址条件监测系统、观测日志辅助工具、用户星表导入系统、离线星表查询软件、圆顶侧窗自动控制系统。其功能主要包括：

观测时间申请子系统：主要是提供给用户进行观测时间申请、提交观测时间申请书的平台，同时给观测时间的评委提供在线的观测时间评审的平台，在评委打分结束之后，由时间分配委员会对通过评审的观测时间申请书进行时间的分配，形成观测申请数据表，为后面制定服务于观测控制系统的观测计划提供基础。

站址条件监测系统：对天文台站的站址条件进行监测，监测的数据包括气象数据、视宁度数据、云量数据、天光背景数据等，将所有数据都存储在数据库中，供观测调度系统、望远镜控制系统等访问和使用。

观测日志辅助工具：该工具用于自动记录观测日志信息，在曝光结束观测数据产生之后，该工具自动提取观测数据的 FITS 头信息中的关键信息，并形成一条观测记录，该观测记录与观测数据以及观测用户的申请书相关，从而可以为用户提供准确的观测日志，为后期的观测数据管理提供更多的便利。

用户星表导入子系统：该子系统主要用于将用户输入的观测目标信息翻译成望远镜控制系统能够识别的用户星表，用户星表中用户只需要提供观测目标的名称、赤经坐标、赤纬坐标和历元，就可以生成符合系统要求的用户星表；用户也可以通过文件批量提交观测目标，经过系统转换为规范的用户星表。该子系统有助于观测控制系统制定符合望远镜控制系统需求的观测计划列表，提高运行效率。

离线星表查询软件：基于 Gaia 发布的星表开发了一套离线的星表查询软件，配置在高美古 2.4 米望远镜观测室内服务器上，从而方便观测用户进行星表的查询，尤其是在有 ToO 观测的时候能够及时离线查询到星表进行观测，确保观测数据的有效性。

圆顶侧窗自动控制系统：对圆顶的侧窗和风机进行自动化控制，通过获取的站址条件信息对观测条件进行判断，根据预先设置好的阈值条件，在允许的情况下自动打开侧窗和通风系统，从而保证圆顶视宁度的状况，提高观测数据的质量。该子系统为观测控制系统实现对圆顶侧窗的调度提供了基础。

### 6.2.1 观测时间申请子系统

观测时间申请子系统主要为天文观测者和望远镜运维管理者提供一套处理在线观测时间申请相关工作的平台，在尽量不改变传统观测时间申请的工作流程的前提下，建立一套观测时间申请、审批等全数字化的软件系统，即：从用户提交申请书、科学委员会评审申请书、到时间分配委员会分配观测时间都在本系统内进行。目前该套系统已经基于“天文领域云”平台实现了全阶段的在线操作。

观测时间申请子系统的功能主要包括<sup>[49]</sup>：望远镜开放时间申请管理、望远镜科学委员会成员管理、观测时间申请在线填写、附件上传和下载、观测时间申请书的形式审查、评审专家的确定、观测时间申请书的评审任务分配、在线对观测时间申请书进行评审和打分、对历史观测时间申请情况进行查询和统计。

观测时间申请子系统的主要业务流程如下所示：

- 1) 望远镜管理员设定望远镜观测时间申请开放时间，设定可申请的观测季的时间段，并上传望远镜及其可用的观测终端的说明文档、性能说明文档以及观测时间申请书正文的模板。
- 2) 在开放期内，申请者用户在线填写观测时间申请书的简表，并以附件的形式上传观测时间申请书的正文文档（为防止格式变化限定为 PDF 格式）。如果有必要，在开放期内申请者用户可以多次修改自己的申请书，系统以用户最后一次提交的结果为准。
- 3) 开放申请期结束后，由望远镜管理员统一对所有提交的申请书进行形式审查。对没有通过形式审查的观测时间申请书，系统会发邮件给申请者用户提醒未通过的原因。
- 4) 对于通过形式审查的观测时间申请书，望远镜管理员根据观测时间申请书的主要内容，指定相关一至多名的评审专家对相应的观测时间申请书进行评审和打分。
- 5) 评审专家登陆系统后，能看到分配给他的观测时间申请书，并可以在线对

观测时间申请书进行评审和打分。

- 6) 评审和打分结束后，系统自动计算出各个时间申请书所获得的平均分，望远镜时间分配委员会根据各个申请的得分并综合考虑其他客观因素（如观测时间的限制、仪器设备的限制、自然气象条件的限制等等）来分配观测时间。
- 7) 望远镜管理员在时间分配委员会完成观测时间分配后，在线确认观测时间的分配情况，并将结果提交到系统，系统则自动将结果以电子邮件形式通知申请者用户。
- 8) 此外，为了基于“天文领域云”平台中以观测时间申请书 ID 为依据对观测数据进行管理的功能特点，本系统还提供了数据下载的接口，供申请者用户在观测结束之后可以通过观测时间申请书 ID 下载自己的观测数据。

观测申请子系统的主干业务流程图如图 6.1 所示：

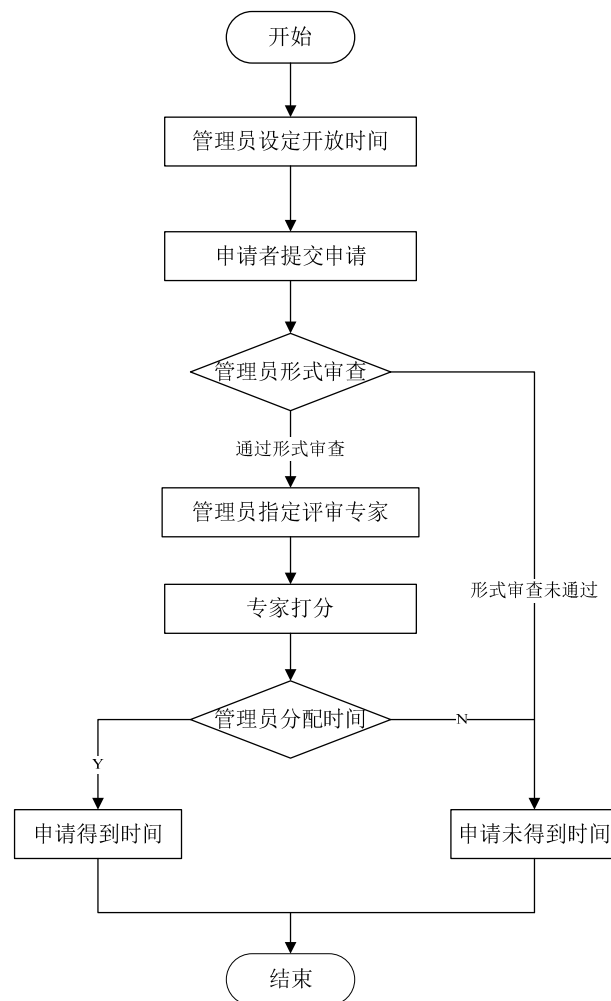


图 6.1 观测时间申请子系统业务流程图

Figure 6.1 Business flow chart of the time application system

观测时间申请子系统的顶层数据流图如图 6.2 所示：

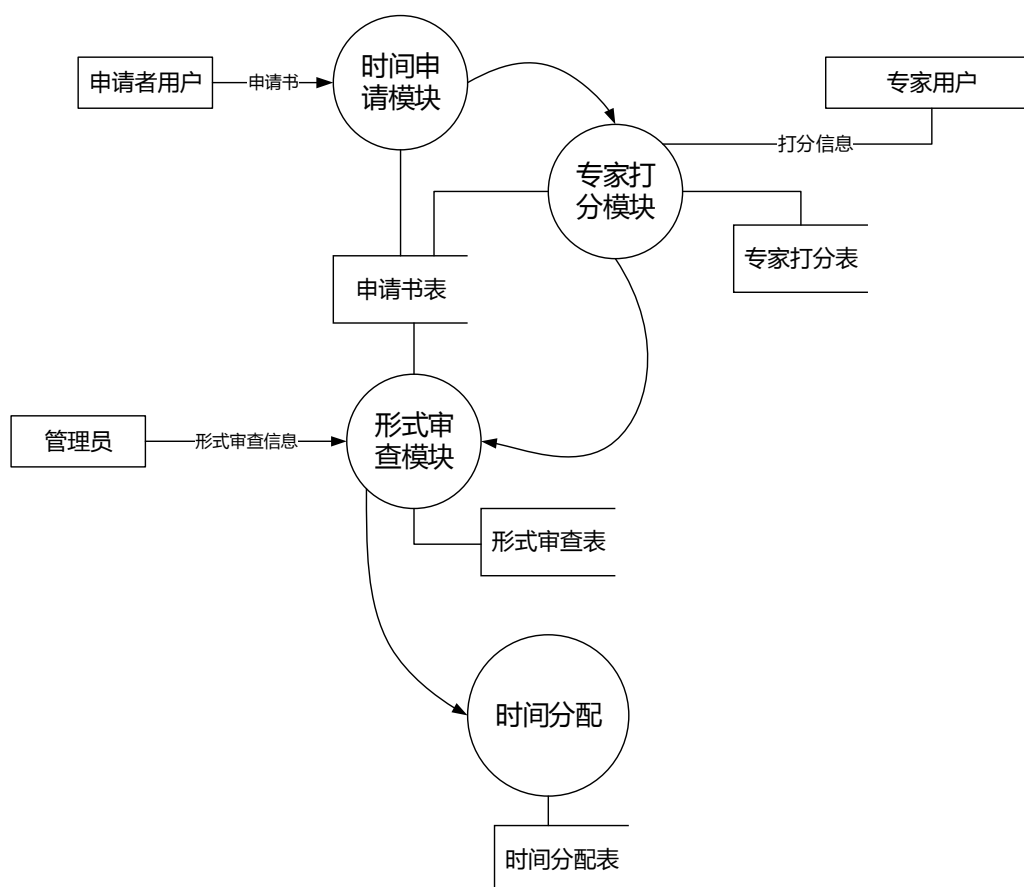


图 6.2 观测时间申请子系统顶层数据流图

Figure 6.2 Top level data flow of the time application system

### 6.2.2 站址条件监测系统

台址信息监测系统，是指对一个光学天文台站(固定或候选) 进行长期的大气参数测量和仪器设备监控的一套系统。通过该系统所获取的数据，将为“衡量一个天文光学台址的观测条件”提供科学依据，为程控自主天文台的正常运行提供数据支撑<sup>[75]</sup>。较为完善的光学天文台址信息监测系统需要采集的参数如图6.3所示，该系统由天文气象站和天文监测站组成，分别实现对气象条件、天文观测条件的监测和天文设备运行状态的监控。

天文监测站是对天文设备和全天云量信息进行在线监视的系统，望远镜的观测用户、操作人员和维护人员都可以通过视频或图像的方式，对望远镜的位置信息、望远镜的转动状态、圆顶的转动状态和当前位置信息，以及全天云量覆盖和分布情况进行了解，从而可以根据实际的云量情况调整观测目标或停止观测以保护望远镜和仪器设备的安全。

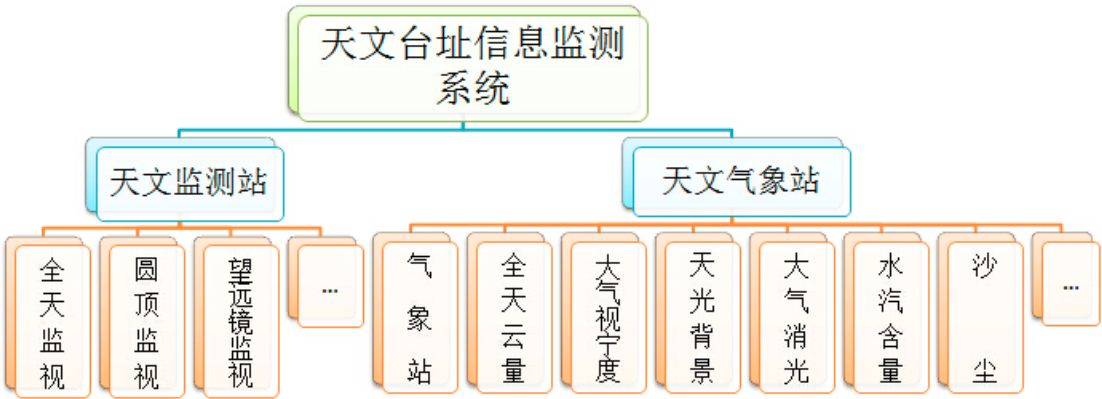


图 6.3 天文台址信息监测系统

Figure 6.3Astronomical site monitoring system

天文气象站是一个相对较新的概念，它有别于传统的气象站，是专门针对天文观测所需，结合最新的硬件、技术和工具等组合在一起的一个系统<sup>[76-77]</sup>。天文气象站所采集的参数包括：气象六要素（温度、相对湿度、气压、风速、风向、降水量）、大气视宁度、天光背景、大气消光、云量、水汽含量、沙尘、太阳辐射、紫外辐射等。通过这些详细的天文气象信息，在观测的时候可以及时对观测计划进行调整，提高观测效率；通过对历史数据的统计分析，还可以为观测计划的制定提供参考依据，对天文气象条件的变化做出一定的预判，为观测调度系统提供完善的数据支撑。

表 6.1 台址监测系统硬件设备列表

Table 6.1 Device list used in the site monitoring system

| 序号 | 设备名称     | 设备型号                | 设备用途                           | 采集软件               |
|----|----------|---------------------|--------------------------------|--------------------|
| 1  | 气象站      | DAVIS, VantagePro   | 气象六要素：温度、相对湿度、风速、风向、气压和降水      | 自主开发，基于 Linux 系统   |
| 2  | 云量计      | Cloud Sensor III    | 全天云量（0~10）                     | 自主开发，基于 Linux 系统   |
| 3  | 全天相机     | 自主研制                | 采集全天图像信息                       | 自主开发，基于 Windows 系统 |
| 4  | 监控相机     | Axis 1365, Axis1354 | 实时监控台站各个圆顶及望远镜的运行状态            | ASIX 自带            |
| 5  | 天光背景计    | SQM-LE              | 天光背景数值。单位：Mag/asc <sup>2</sup> | 自主开发，基于 Linux 系统   |
| 6  | 大气视宁度监测仪 | 自主研制                | 大气视宁度参数 r0。                    | 自主开发，基于 Linux 系统   |

丽江站目前已经建立起了比完善的天文台址监测系统，其硬件部分划分为三个子系统，分别是：1) 大气参数测量系统（气象站，大气视宁度监测仪）；2) 全天信息采集系统（全天相机、天光背景和全天云量信息采集设备）；3) 圆顶和望远镜视频监控系统。所有使用的信息采集设备或传感器的信息如表 6.1 所示。

如今，该套天文台址监测系统已经在线运行，为丽江 2.4 米望远镜的观测调度提供了完善的数据支持，也将为计划建设的云大 1.6 米望远镜以及丽江站上的多台小口径程控/远程望远镜提供数据支持。

### 6.2.3 观测日志辅助工具

观测日志辅助系统旨在对观测日志进行自动化的记录，帮助望远镜观测人员摆脱琐碎的手写记录观测日志的工作，将望远镜观测日志的管理流程化、自动化，简化观测助手在观测中的操作，减少因人工疏忽而导致的失误。通过观测日志辅助系统，可以实现观测数据的自动录入、查询、打包下载及相关辅助功能，为观测日志的管理提供了高可靠性、高自适应性的服务。其研发目标是在不修改原始 FITS 文件的基础上，集监听功能和查询功能于一体，对 FITS 头信息进行必要的修正，将 FITS 头信息与补充的信息整合成一条观测日志存入到数据库中，供后期观测数据处理过程中进行使用。

#### 1. 系统功能及设计

该系统需要实现的主要功能包括：

- 1) 在曝光结束观测数据保存到硬盘之后，系统读取该观测数据文件的 FITS 头信息，并将信息写入到数据库中，同时在观测日志辅助系统的前台界面显示；
- 2) 在观测日志辅助系统的前台界面中，用户可以对采集到的记录进行检查，添加信息或修改出错的信息，并提交更新数据库；
- 3) 在观测的时候可以选择不同观测用户的不同观测时间申请书的编号，使得观测数据与观测用户的编号联系在一起，便于观测数据的管理；
- 4) 能根据观测用户的用户名或者观测时间申请书编号，对观测数据进行查询、打包和下载，同时可以生成规定格式的观测日志文件；
- 5) 将常用的观测用户固定在前台界面上显示，方便观测期间的操作；
- 6) 在前台界面显示系统运行状态及用户操作相关的运行情况，以确保该辅

助系统的正常运行；

- 7) 用户可以对观测日志记录进行批量的提交, 如果没有修改, 默认就使用从 FITS 头中读取的信息, 并保存到数据库中。

在进行系统研发的过程中, 采用了分层式的系统架构方案, 将系统的整体架构分为了四层, 即: 视图层、控制层、服务层和数据层 (如图 6.4 所示)。其中:

- 1) 视图层: 主要负责显示监听到的观测数据 FITS 头中对应的观测日志信息, 接受用户的监听控制和对观测日志内容的修改操作, 以及显示当前软件运行的状态信息和用户的操作记录。
- 2) 控制层: 介于前台界面和后台数据库之间, 主要负责接受视图层产生的用户请求并路由到服务层, 调用服务层的处理程序, 并将服务层处理的结果返回给视图层。
- 3) 服务层: 主要完成系统软件与数据层之间的交互, 并为控制层提供调用所有相关服务所需要的接口, 各个服务之间也根据需要进行相互的调用。该层主要包含六类服务, 即: 文件监听服务、数据导出服务、FITS 服务、日志服务、Log 文件服务、配置服务。
- 4) 数据层: 对应于系统所涉及的所有相关的数据文件, 包括望远镜的观测数据 (原始 FITS 文件)、系统运行的配置文件和保存在数据库中的结构化数据。主要负责响应服务层的请求, 对请求进行处理, 并返回结果。

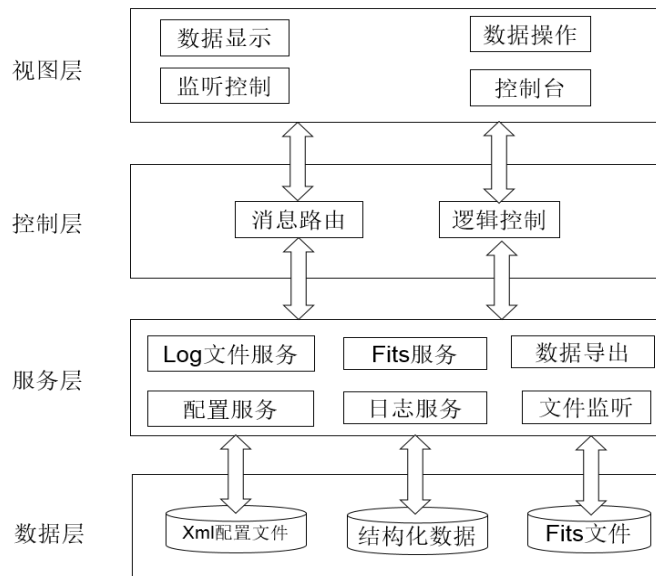


图 6.4 观测日志辅助工具系统架构图

Figure 6.4 System structure of the observation log tool



结合系统的架构图可知，系统所需要实现的所有功能需要不同层次之间的程序进行配合才能完成，为了提高安全性，各层之间彼此相互独立，且不能跨层次进行调用。

## 2. 系统实现

在进行系统实现的过程中，采用了模块化的思想对系统的所有功能进行实现，根据主要功能将系统划分成了界面显示模块、数据监控模块、数据查询模块、数据导出模块、系统日志模块和系统配置模块这六个功能模块进行实现。

### 1) 系统研发和运行环境

该观测日志辅助系统是在 Ubuntu13.10 操作系统平台上进行研发和运行的，采用的编译环境是 JDK 1.7 (Java Development Kit 1.7)，采用的编程语言是面向对象的 Java 语言<sup>[78]</sup>，后台使用的数据库是 PostgreSQL 数据库系统<sup>[79]</sup>。在系统中调用了几个开源的 Java 开发包：

- Commons-compress-1.8.jar<sup>[80]</sup>：apache 出品，主要实现对用户查询得到的原始观测数据进行打包的功能；
- Dom4j-2.0.00-ALPHA-2.jar：是 dom4j.org 出品的一个开源的 XML 解析包，性能优越、功能强大。
- jxl.jar：来自 Java Excel 开源项目，用于实现读取 Excel 文件的内容、创建新的 Excel 文件和更新已经存在的 Excel 文件。
- postgresql-9.3-1101.jdbc4.jar：为 Java 语言提供与 PostgreSQL 数据进行连接的数据库中间件。

### 2) 界面显示模块

界面显示模块是使用 Java 的图形界面库 Swing<sup>[81]</sup>开发完成的，最终运行的效果如图 6.5 所示。如图所示在该用户界面中包含了不同的功能区，主要包括：

① **观测日志显示区**：当曝光结束有新数据文件产生之后，系统读取 FITS 文件的 FITS 头信息，并在该区域显示，用户可对该区域的数据进行修改。

② **数据监控操作区**：提供了选择观测用户的 Proposal ID，开始监听，停止监听，观测日志记录修改之后的提交，添加长期观测项目的用户及其 proposal ID 等功能。

③ **数据查询、数据导出操作区**：用于进行观测数据的查询和导出操作，输入起止时间和观察者然后点击‘查询’就可以进行查询；查询结束之后，用户可以



改。

在查询的时候，用户需要提供观测数据覆盖的时间段和观测项目负责人的信息（负责人姓名，对应的数据库字段是：Observer）进行查询，查询的结果除了显示在用户界面上，也会保存在缓存中以便生成所需要的观测日志文件。

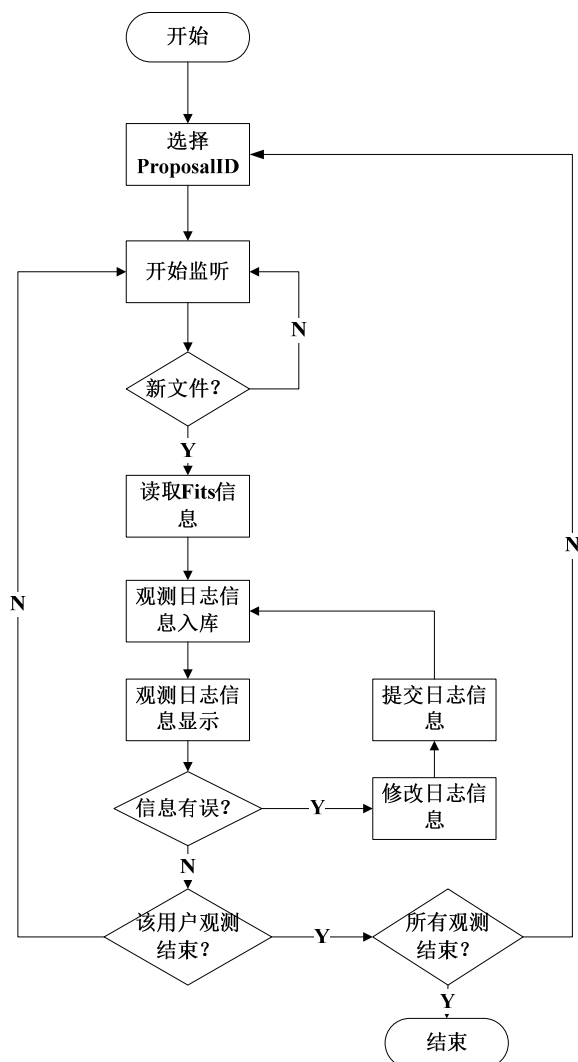


图 6.6 观测数据监听功能流程图

Figure 6.6 Flow chart of the observation data monitoring function

## 5) 数据导出模块

数据导出模块实现了对用户查询到的观测数据的结果进行导出的功能，该模块可以同时导出观测数据和对应的观测日志，从而直接将两部分的文件打包给观测用户就可以进行观测数据的处理。

观测数据通过后台的打包程序将检索到的结果进行打包，并压缩；观测日志则通过后台的 Excel 处理软件生成与观测数据对应的观测日志文件；最后都输出到指定的目录中。

## 6) 系统日志模块

系统日志模块将所有的日志信息划分为软件状态日志、软件操作日志和错误信息日志这三种类型。其中：

软件状态日志：将日志的输入流接口重新定向到 Swing 的文本框组件中进行实时显示，从而显示软件运行的状态，此部分的日志不会以文件的形式保存。

软件操作日志：记录软件的主要运行状态，观测数据生成的时间以及用户操作软件的信息，该类日志信息可以在发现观测日志有误的时候对当时的情景进行复现。

错误信息日志：用于记录软件在运行过程中出错的具体信息，从而可以协助研发者更好地定位软件的错误位置。

软件操作日志和错误信息日志都按天生成一个新文件，系统中主要通过 Log4jUtil 类完成对系统日志的管理，通过一个独立的线程将必要的日志信息写入到日志文件中。

表 6.2 观测日志数据表格式

Table 6.2 Format of the observation log database table

| 名称             | 类型    | 对应 FITS 头 | 备注                                |
|----------------|-------|-----------|-----------------------------------|
| filename       | 字符    |           | 主键，唯一，FITS 文件名                    |
| object         | 字符    | OBJECT    | 观测目标名                             |
| ra             | 浮点数   | RA        | 观测目标赤经值                           |
| dec            | 浮点数   | DEC       | 观测目标赤纬值                           |
| instrument     | 字符    | INSTRUME  | 观测终端(YFOSC, PICCD, LiJET 或 HiRES) |
| Observer/PI_ID | 字符    | OBSERVER  | 关联 proposal 表中的用户 ID              |
| ProposalID     | 字符    | 无         | 关联 Proposal 表中的申请书 ID             |
| ObvervationID  | 字符    | 无         | 观测 ID，手动录入                        |
| StartUTC       | 时间    | DATE-OBS  | 观测数据曝光开始时间                        |
| ExposureTime   | 整数(秒) | EXPTIME   | 观测数据曝光时间                          |
| Filter         | 字符    | YFLTNM    | 所使用的滤光片名称                         |
| YFUA           | 字符    | YAFLTNM   | YFUA 转轮上对应的光学元件名                  |
| YFUB           | 字符    | YBFLTNM   | YFUB 转轮上对应的光学元件名                  |
| Slit           | 字符    | YAPRTNM   | 狭缝转轮上的狭缝的名称                       |
| Grism          | 字符    | YGRNM     | 光栅转轮上的光栅的名称                       |
| telFocus       | 浮点数   | TELFOCUS  | 望远镜的焦点                            |
| instFocus      | 浮点数   | YFOCUS    | YFSOC 的焦点                         |
| AG             | 浮点数   | 无         | 自动导星焦点                            |
| FWHM           | 浮点数   | 无         | 半高全宽值，手动输入                        |
| obsType        | 字符    | 无         | 观测类型(pho, spe 或 unk)              |
| Remark         | 字符    | 无         | 备注信息，手动录入                         |
| archflag       | 布尔    | 无         | 是否已导出归档                           |

## 7) 系统配置模块

系统配置文件保存在 xml 文件中，系统软件运行有两个相关的 xml 文件，用户可以通过修改这两个配置文件更新系统的配置，当再次打开软件运行的时候就可以使用更新后的配置。其中：

① **configure.xml**：保存系统运行相关的配置信息，包括数据库连接、数据库账号、要监听的目录、观测数据和观测日志输出目录。

② **longterm.xml**：保存在 2.4 米望远镜长期有观测项目的用户信息，包括观测用户的姓名和观测用户申请书的编号（Proposal ID），目前最多只能配置 6 个观测用户的信息。该功能还可以应用到机会源（ToO）观测中，当有 ToO 观测发生的时候，可以通过修改配置文件临时建立一个观测信息，并实时在软件的界面上显示，便于观测日志记录的准确性。

目前，该系统已经在丽江 2.4 米望远镜上运行使用，且很方便就能导出观测数据和观测日志，大大降低了手工记录日志的工作量及出错的概率。此外，该系统还与“天文领域云”相联系，与“天文领域云”系统上的观测时间申请系统和数据管理系统进行协调工作，下一步可以实现从观测时间分配到观测数据获取的完整观测数据生产周期。

### 6.2.4 用户星表导入系统

用户星表导入系统主要用来实现将观测用户的观测列表转化为望远镜控制系统所能识别的用户星表文件，该文件的格式为：

| 星名/编号        | 赤经坐标 (hh mm ss.ss) | 赤纬坐标 (dd mm ss.ss) | 历元    |
|--------------|--------------------|--------------------|-------|
| MS190330i000 | 12 45 50.16        | +45 17 54.20       | J2000 |

目前该子系统可以根据用户的输入自动生成用户星表，在用户星表产生之后通过 FTP 上传到望远镜控制系统的星表目录下。在观测的时候，用户只需要在控制窗口下先通过“include 用户星表名”导入用户星表，然后输入“gocat 星名”就可以指向目标，简化操作，缩短目标转换的时间，提高观测效率。对于曝光时间较短而观测目标较多的观测任务，该模式能大大提高观测效率，也能避免人工输入坐标的时候出错等情况。

用户星表导入系统的流程如图 6.7 所示。

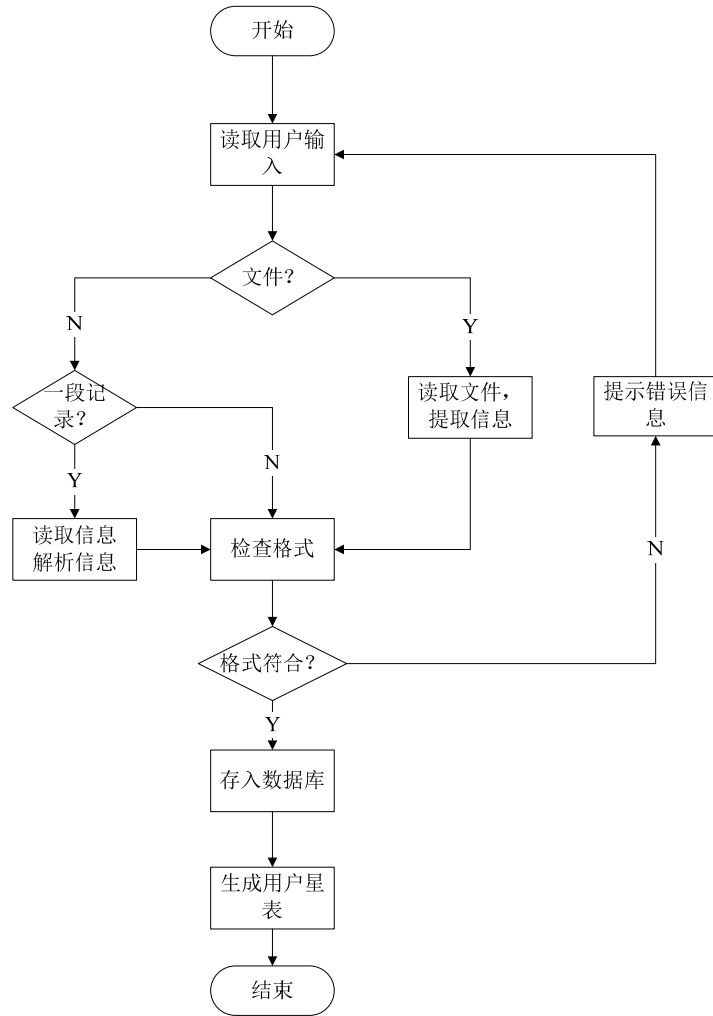


图 6.7 用户星表录入流程图

Figure 6.7 Flow chart of the user catalogue import system

### 6.2.5 离线星表查询软件

离线星表查询软件是基于 Gaia 星表开发的一套能够离线查询观测证认图的查询软件，该软件主要用来根据用户输入的条件对星表数据库进行检索，并输出检索的结果。

#### 1. 软件功能描述

该软件主要基于数据库进行相关操作，其主要功能包括：

- 1) 将简化后的 Gaia 星表数据入库，系统中仅使用了 Gaia 星表中亮于 17 等的星（共 164336651 颗星），并对星表进行了简化（简化后的星表格式参考附录二）。
- 2) 根据用户输入的任意天区和视场，基于 Gaia 星表数据库进行检索。

- 3) 根据用户输入的星等范围, 对检索结果进行划分。
- 4) 将检索结果显示在表格中, 并按照星等从亮到暗排序。
- 5) 用户可以根据自己的需求, 选择是否保存检索的结果到指定的文件中, 文件名由用户自行输入, 在文件中检索结果按照星等从亮到暗排序。
- 6) 绘制用户所查询区域的星图。
- 7) 在星图上显示检索的赤经和赤纬范围。
- 8) 输出各个星等范围内星数目的统计。

除此之外, 基于该软件开发过程中建立的星表数据库, 还可以对某个视场内的星数概率进行统计, 从而为观测设备的研发、望远镜的建设等提供一定的数据分析支持。

## 2. 系统实现

在进行系统研发的过程中, 根据主要功能将系统划分为数据库模块、数据查询与统计模块和界面显示模块。其中数据库模块主要实现简化的 Gaia 星表的入库并提供基本的数据库操作功能; 数据查询与统计模块主要根据用户输入的信息进行数据库的查询, 并对查询的结果进行统计并反馈给用户; 界面显示模块主要对查询的结果进行显示, 并根据查询的结果绘制证认图。

### 1) 系统研发和运行环境

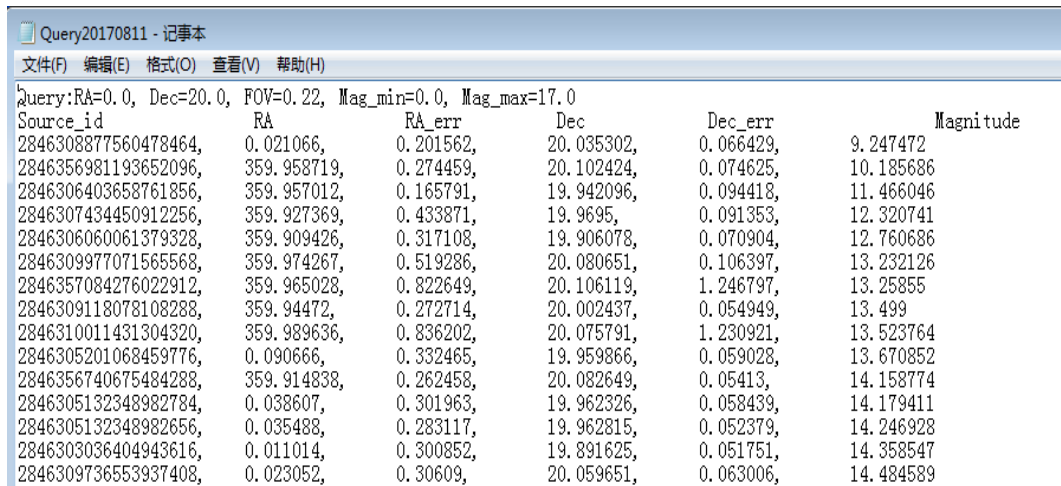
离线星表查询软件是在 Windows 7 操作系统平台上进行研发和运行的, 采用的编译环境是 Eclipse 和 JDK 1.8, 采用的编程语言是 Java 语言, 后台使用的数据库是 MySQL 数据库系统, 在系统中调用了与数据库操作相关的 Java 开发包: mysql-connector-java-5.1.40.jar。

### 2) 数据库模块

数据库模块主要对数据库进行操作, 包括创建数据库、星表数据入库和数据库查询操作, 大部分的工作都在后台完成。为了将大量的星表数据进行入库, 在系统开发前期主要关注于 Gaia 星表的入库工作, 批量化地从原始星表文件中读取信息, 对读取的信息进行检查和标准化, 然后写入到数据库中。在完成星表数据入库操作之后, 可以将星表数据导出成标准的数据库文件, 从而在重新进行该软件的部署的时候就可以直接拷贝星表数据, 大大减少星表数据入库所消耗的时间。此外, 对数据库创建和查询等相关操作进行标准化, 在配置软件的时候只需要进行简单的配置修改就能够实现数据库系统的建设。

### 3) 数据查询与统计模块

数据查询与统计模块主要根据用户输入的查询条件通过 JDBC 对星表数据库进行查询操作,并将查询得到的结果根据星等进行统计。查询条件主要是视场的范围(视场中心赤经赤纬坐标和视场大小)和星等范围(最小和最大星等),用户可以限定查询的条件,也可以使用系统默认的查询条件进行查询。为了方便用户操作,赤经和赤纬坐标允许三种不同的输入格式:①度数值:hh.mm;②时分秒或度分秒中间采用冒号分隔:hh:mm:ss.ss;③时分秒或度分秒中间采用空格分隔:hh mm ss.ss。对查询的结果根据星等进行排序,并显示在界面的列表中,如果用户想保存查询的结果也可以通过点击界面上的“保存”按钮将查询结果保存到如图 6.8 所示的查询结果文件中。



| Query:RA=0.0, Dec=20.0, FOV=0.22, Mag_min=0.0, Mag_max=17.0 |             |           |            |           |           |
|-------------------------------------------------------------|-------------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Source_id                                                   | RA          | RA_err    | Dec        | Dec_err   | Magnitude |
| 2846308877560478464,                                        | 0.021066,   | 0.201562, | 20.035302, | 0.066429, | 9.247472  |
| 2846356981193652096,                                        | 359.958719, | 0.274459, | 20.102424, | 0.074625, | 10.185686 |
| 2846306403658761856,                                        | 359.957012, | 0.165791, | 19.942096, | 0.094418, | 11.466046 |
| 2846307434450912256,                                        | 359.927369, | 0.433871, | 19.9695,   | 0.091353, | 12.320741 |
| 2846306060061379328,                                        | 359.909426, | 0.317108, | 19.906078, | 0.070904, | 12.760686 |
| 2846309977071565568,                                        | 359.974267, | 0.519286, | 20.080651, | 0.106397, | 13.232126 |
| 2846357084276022912,                                        | 359.965028, | 0.822649, | 20.106119, | 1.246797, | 13.25855  |
| 2846309118078108288,                                        | 359.94472,  | 0.272714, | 20.002437, | 0.054949, | 13.499    |
| 2846310011431304320,                                        | 359.989636, | 0.836202, | 20.075791, | 1.230921, | 13.523764 |
| 2846305201068459776,                                        | 0.090666,   | 0.332465, | 19.959866, | 0.059028, | 13.670852 |
| 2846356740675484288,                                        | 359.914838, | 0.262458, | 20.082649, | 0.05413,  | 14.158774 |
| 2846305132348982784,                                        | 0.038607,   | 0.301963, | 19.962326, | 0.058439, | 14.179411 |
| 2846305132348982656,                                        | 0.035488,   | 0.283117, | 19.962815, | 0.052379, | 14.246928 |
| 2846303036404943616,                                        | 0.011014,   | 0.300852, | 19.891625, | 0.051751, | 14.358547 |
| 2846309736553937408,                                        | 0.023052,   | 0.30609,  | 20.059651, | 0.063006, | 14.484589 |

图 6.8. 输出的查询文件的内容

Figure 6.8 Content of the file for query result

### 4) 界面显示模块

界面显示模块是使用 Java 的图形界面库 Swing 开发完成的,在开发的过程中将其划分成两个不同的功能区,即:用户操作和查询结果显示区(如图 6.9)和星表认证图显示区(如图 6.10),其中:

**用户操作和查询结果显示区:**当用户输入查询条件,并点击“确定”按钮后,系统通过数据查询和统计模块进行相应的查询操作,对查询得到的结果进行排序,并将结果显示到列表中。

**星表认证图显示区:**在进行查询的时候,记录用户输入的查询条件,即赤经坐标、赤纬坐标、视场大小,根据这些查询条件对认证图显示区的比例尺进行计算。由于查询得到的结果使用的是赤道坐标,属于球面坐标系,要在认证图中显



示,就必须对其进行转换,主要是要对赤经坐标进行转换。转换的公式如下所示:

$$\text{deltaRA} = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(\text{fov}/2)}{\cos(\text{dec})}\right) \quad (5)$$

其中,  $\text{deltaRA}$  是转换后的赤经坐标值,  $\text{dec}$  是输入的赤纬坐标值,  $\text{fov}$  是输入的视场大小。在证认图中,不同星等的目标星以不同大小的圆表示以区分亮度,同时将查询范围和不同星等范围内星的数目显示在该界面中。

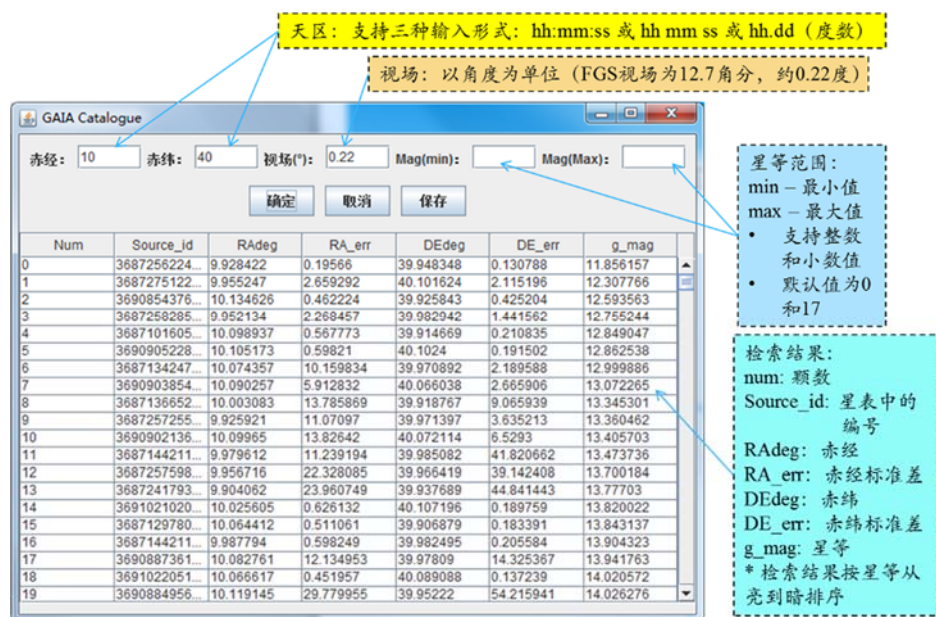


图 6.9 星表查询软件用户界面

Figure 6.9 User Interface of the catalogue query software

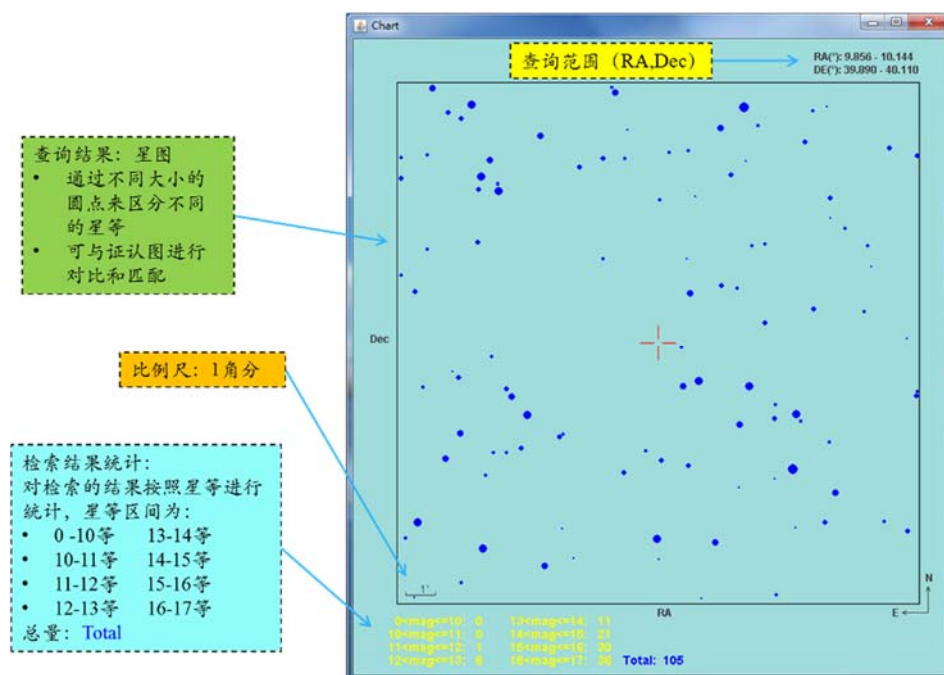


图 6.10 查询到的证认图

Figure 6.10 Finding chart queried from the catalogue query software

目前, 该套离线星表查询软件已经配置在丽江 2.4 米望远镜的观测平台中, 能够在没有网络或网络状况不佳的时候提供证认图查询的功能, 协助天文观测。今后, 将考虑对该系统进行升级改造, 使其可以更好地融入到观测控制系统的观测调度中。

### 6.2.6 圆顶侧窗自动控制系统

丽江 2.4 米望远镜的圆顶是超半球结构的天窗式圆顶结构, 此种结构的圆顶被证明能产生相对封闭的圆顶内的大气环境, 从而导致圆顶视宁度的出现, 影响到观测的质量。为了改善封闭环境下的圆顶视宁度, 在圆顶建设之初就预留了 16 扇与望远镜主镜高度相同的大面积侧窗, 以求在观测前打开侧窗后能最大限度地 将主镜周围的热空气快速排走以达到内外平衡。然而由于受限于经费, 在最初的建设期间, 所有的侧窗都是机械式手动操作的, 不仅在操作的时候存在高空风险, 而且对天气的变化也不能及时进行响应, 因此有必要对其进行自动化控制的改造。

为了实现圆顶侧窗的自动化控制, 需要先对侧窗进行机械和电控的改造: 将 16 扇侧窗根据物理位置的分布分成 8 组来进行控制, 每个控制节点控制两扇侧窗的开关; 将侧窗的机械结构从原来的滑轮悬拉式改为导轨平滑式, 降低侧窗运动过程中的阻力, 从而降低侧窗开关对电机和嵌入式控制系统的要求<sup>[82]</sup>。侧窗的硬件控制系统结构采用了基于 STM32 的嵌入式控制板实现控制和无线网络通信的功能, 也可以通过 USB 转串口或者手柄控制来实现本地的调试和控制。该控制系统的硬件架构如图 6.11 所示。

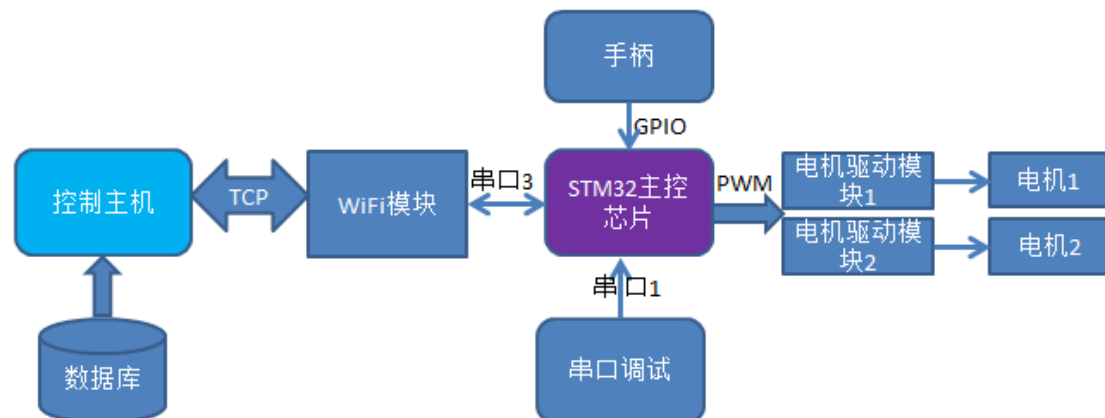


图 6.11 侧窗自动化控制硬件构架图

Figure 6.11 Hardware structure of the slide automatic control system

如图 6.11 所示, 侧窗控制系统由控制主机、无线通信模块、CH340G 模块、

手柄控制模块、主控芯片、电机驱动模块、电机模块和外围辅助电路组成。控制主机是整个控制系统的核心组件，作为服务器端向嵌入式控制板发送命令并接收下位机返回的状态信息，从而实现对所有侧窗的开关的控制。此外，控制主机还通过网络访问望远镜状态数据库，从中读取实时的气象数据，实现如下功能：1) 根据风速和风向数据选择要打开的侧窗，从而在观测过程中降低空气气流对望远镜的影响；2) 根据实时的湿度和风速的值，对比系统设定的风速和湿度的阈值，对所有侧窗进行打开或关闭的操作。

目前，圆顶侧窗自动化控制系统已经基本上研发完成，并将在下一步完成在丽江 2.4 米望远镜圆顶上的安装和调试工作，在此之后将其投入到实际的观测运行中。

### 6.3 统一的观测调度

#### 6.3.1 观测时间分配及完整观测流程

和传统的观测时间分配不同，为了实现高效的观测调度，首先需要将观测时间申请分成两个阶段：第一个阶段是提交观测时间申请书并进行专家评审，根据评审情况对所有的申请进行分级处理；第二个阶段则对第一阶段分级结束的申请书进行观测信息的提取，将申请书中与观测相关的信息（如观测目标、观测条件要求、观测终端等）存入到观测目标数据库中。在观测时间分配结束之后，由观测调度助手与观测用户提前进行联系，逐步制定详细的观测计划，最终将完成的观测计划数据存入到观测计划数据库中，供观测调度系统调用(如图 6.12 所示)。

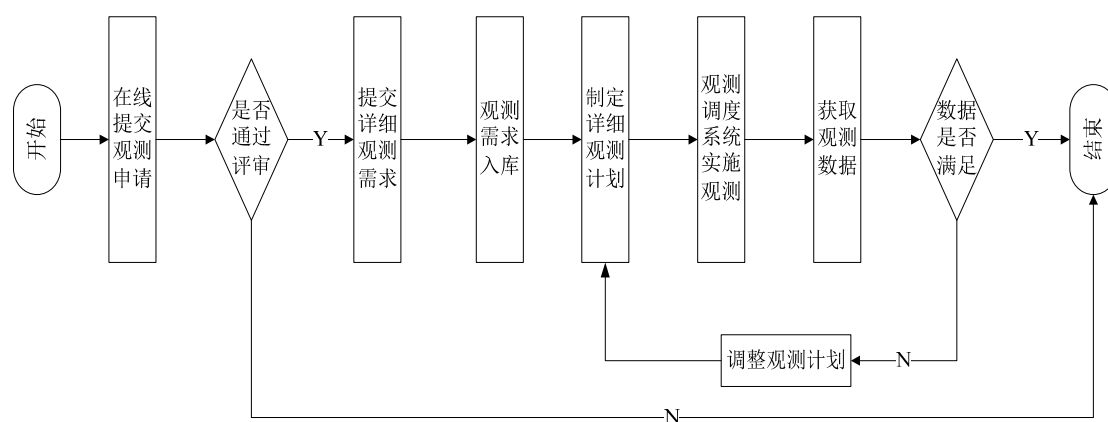


图 6.12 观测时间申请及观测实施完整流程

Figure 6.12 Complete procedure for observing time application and observing implementation

在这种时间申请和分配模式下,虽然观测用户需要经过两轮工作才能完成观测时间的分配,且需要提前制定观测计划,但一旦完成了观测计划的制定,如果不出意外,观测调度算法基本上可以根据不同优先级观测目标的要求完成观测计划的实施,且可以保证重点项目的实施。从望远镜的整体运行效率角度而言,相较于目前的观测模式肯定是会提高的。此外,用户还能根据观测效果进行实时的反馈,方便望远镜运行维护人员及时响应问题、解决问题、优化观测计划,获取质量更高的观测数据。

### 6.3.2 引力波事件后随观测调度

与伽玛暴的后随观测类似,在引力波事件发生之后,也需要尽快对该事件进行后随观测。基于原有的伽玛暴后随观测的经验,为了能在引力波事件后尽快进行后随观测,为其建立了更加优化的调度模型。

首先为了满足观测过程中对网速的要求,在丽江高美古观测站配置了一台独立的服务器用于接收引力波事件的观测列表和观测数据,该服务器配了两个网卡分别接在外部网络和望远镜局域网内。在监听到引力波事件之后,对全天可能的星系区域进行排序,并根据发生的概率进行排序,得到观测列表。观测列表生成之后,立即通过网络下载星表文件,同时通过用户星表导入系统,将观测列表转换成望远镜控制系统能识别的用户星表,并上传到望远镜控制系统指定的目录下。在此之后观测控制系统对当前的观测情况进行判断,如果曝光开始的时间小于 10 分钟,则中断当前的观测,立即切换到引力波事件的后随观测;如果曝光开始的时间大于 10 分钟,且结束时间小于 10 分钟,则等待此次曝光结束,再进行引力波事件的后随观测;如果曝光时间开始大于 10 分钟,但是可以通过多幅叠加进行观测,则也可以中止当前曝光,立即切换到引力波事件的后随观测。

观测结束后,观测控制系统立即将观测数据同步到服务器上,通过服务器上的数据处理软件对观测数据进行处理,尽快得到观测数据的处理结果。如果处理结果中显示有特别的结果,则继续使用望远镜对该区域进行更加精细的观测。在观测结束、数据处理完成之后,将观测的结果向 GCN 进行发布。

引力波事件后随观测的完整流程如图 6.13 所示。

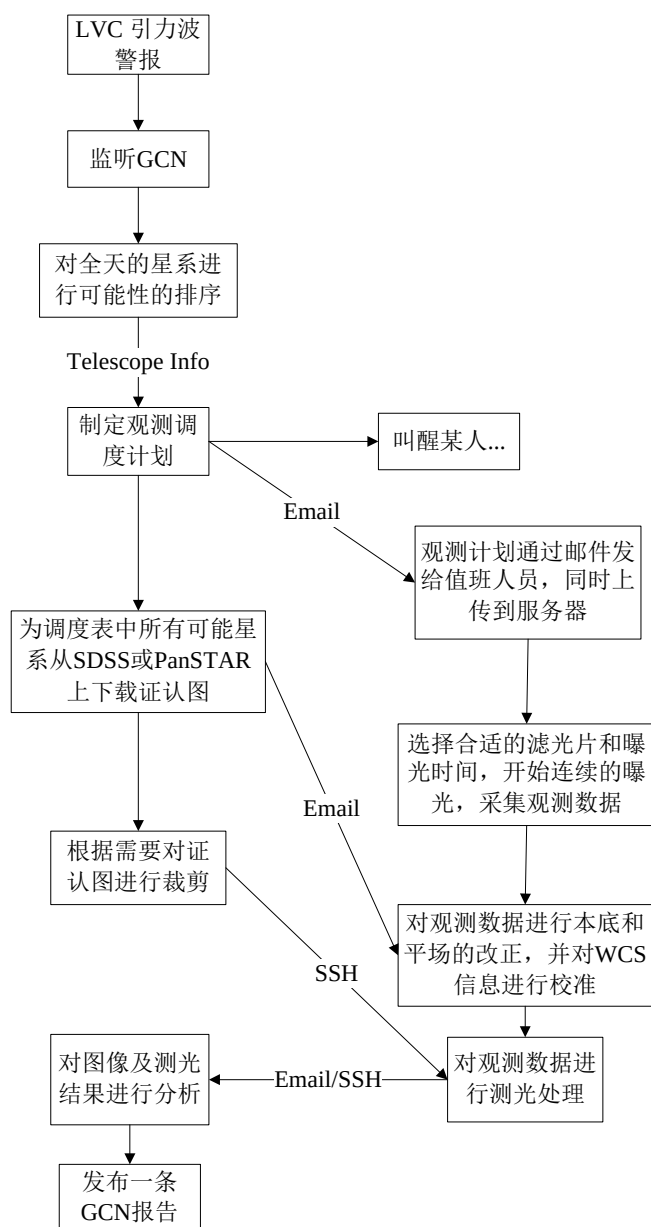


图 6.13 引力波事件后随观测流程图

Figure 6.13 Flow chart of follow-up observation for the GW events

## 6.4 本章总结

观测控制系统在实施观测调度的过程中,除了需要对望远镜控制系统、终端控制系统进行控制和调度之外,还需要一系列的观测调度辅助系统进行辅助。本章首先介绍了与观测调度相关的重要因素,在进行观测调度系统设计的过程中都需要考虑这些因素。其次对所有已经研发完成的观测调度辅助系统进行详细的描述。最后基于目前已经完成的工作,建立了从观测时间分配到获取观测数据的完整流程,并为引力波事件后随观测建立了完整的观测调度模型,能及时对引力波事件进行响应。



## 第 7 章 总结和展望

观测控制系统指的是一个大型的复杂软件系统，它与天文观测的各个阶段都息息相关，根据观测需求对望远镜、观测终端等资源进行有效的调度，从而使得有限的望远镜观测时间的利用率达到最高，获取更高质量的天文研究所需要的观测数据。在当前望远镜逐渐往巨型化发展的大趋势下，中小型望远镜需要提高其观测效率以保持竞争力。然而，国内中型望远镜大部分还运行在传统的观测模式下，除了天气条件、观测条件外，很多时候观测效率更多的是受人为的影响。

作为国内目前口径最大的通用型光学望远镜，丽江 2.4 米望远镜配备的观测终端能够覆盖光学波段从测光、中低色散光谱到高色散光谱的观测，能开展的科研课题越来越多，望远镜的观测时间越来越宝贵。本文以丽江 2.4 米望远镜为研究平台，对观测控制系统的核心技术进行了深入分析和研究。主要完成了如下几方面的工作：

1. 完成了丽江 2.4 米望远镜观测控制系统的整体设计：基于该望远镜控制系统的现状，分析其中存在的问题，并建立观测控制系统的整体框架。

2. 完成了丽江 2.4 米望远镜控制系统的智能化改造：在没有源代码的情况下，对望远镜网络通信接口进行升级改造，完成望远镜状态数据库的研发，基于序列控制指令的望远镜控制系统指令的二次开发，实现望远镜控制系统的智能化控制。到目前为止，有至少 30 个测光观测的课题通过自动测光脚本程序实施测光观测，有效观测数据量提高约 5%，降低了人为误操作概率。

3. 基于序列控制思想，实现了 PI CCD 和高色散光谱仪控制系统的基于序列指令控制的控制系统，实现了多个终端的信息融合和一体化控制，通过统一的方式实现观测终端的控制。

4. 定义了三个与观测数据相关的标准，即：观测数据文件名统一命名标准、观测数据头文件中望远镜信息统一标准和观测数据头文件中 WCS 信息统一标准。

5. 基于“天文领域云”平台为丽江 2.4 米望远镜观测数据的存储、管理、归档和发布建立了统一的系统，保证原始数据的安全。将观测数据的管理与观测者的时间申请书相联系，对所有的观测数据设置了保护期，从而保证观测数据能成为观测者的第一手资料。到目前为止，已经有超过 10TB 的观测数据通过该系统实

现自动化的存储、备份和异地存储。

6. 对观测控制系统中已完成的各个子系统进行集成, 基于此为引力波事件后随观测建立完整的观测调度流程, 投入到实际观测中。研发完成了一系列协调观测控制系统运行的观测辅助系统。

虽然目前已经完成了丽江 2.4 米望远镜观测控制系统相关的部分工作, 但还未能完成该系统的全部研发工作, 也还未能形成完整的观测调度。在观测终端控制方面, 还有几个终端没有集成到终端控制系统中; 在观测实施方面, 光谱观测还没有能够实现自动化; 在观测数据管理方面, 缺乏观测数据自动处理的 pipeline 程序; 等等。所有这些问题都有待在下一步的工作中逐步解决和完成, 逐步提高丽江 2.4 米望远镜的观测效率, 充分利用有限的观测时间获取更多的高质量观测数据。

此外, 本文研究的内容可以应用到国内已经建成或将要建设的中型望远镜中, 如一米真空太阳望远镜 (NVST)、云大 1.6 米多通道巡天望远镜 (Mephisto)、南极 2.5 米红外巡天望远镜等, 通过观测控制系统的应用, 提高望远镜的观测效率, 获得高质量观测数据, 最终提高科学产出。



## 参考文献

- [1] LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Fermi GBM, INTEGRAL, et al. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2017, 848(2): L12. DOI: 10.3847/2041-8213/aa91c9
- [2] 凤凰网. 人类首次发现双中子星碰撞出的引力波[N/OL], 2017-10-16.  
[http://news.ifeng.com/a/20171016/52663786\\_0.shtml](http://news.ifeng.com/a/20171016/52663786_0.shtml)
- [3] Kim G, Shane W. The Design of the Gemini Observatory Control System [J]. ASP Conference Series, 1996, Vol 101: 347-355.
- [4] Castro-Tirado A J. Robotic Autonomous Observatories: A Historical Perspective [J]. Advances in Astronomy, 2010, Volume 2010, Article ID 570489. DOI:10.1155/2010/570489
- [5] Genet R M. Introduction to automatic photoelectric telescopes (APTs) [J]. International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communication, 1986, 25: 1-25.
- [6] Helmer L, Morrison L V. Carlsberg Automatic Meridian Circle [J]. Vistas in Astronomy, 1985, 28: 505-518. DOI: 10.1016/0083-6656(85)90072-8
- [7] Baliunas S, Boyd L J, Genet R M, et al. Automatic photoelectric telescope III the Mount Hopkins Site [J]. International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communication, 1985, 22: 47-54.
- [8] 崔辰州, 李建, 蔡栩, 范玉峰, 等. 程控自主天文台网络的发展[J]. 天文学进展, 2013, 31(2): 141-159. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.02.02
- [9] 赵永恒. LAMOST 观测控制系统[J]. 天体物理学报, 2000, B12: 89-95.
- [10] Zhang G Y, Wang J, Tang P Y, et al. An Autonomous Observation and Control System Based on EPICS and RTS2 for Antarctic Telescopes [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 455(2):1654-1664. DOI: 10.1093/mnras/stv2299
- [11] Hu Y, Ma B, Hu K. The AST3 Controlling and Operating Software Suite for Automatic Sky Survey[C]. Proceedings of SPIE, 2016, Vol. 9913 99130M-1. DOI: 10.1117/12.2231851
- [12] Steele I A, Smith R J, Rees P C, et al. The Liverpool Telescope: Performance and First Result [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5489: 679-692. DOI: 10.1117/12.551456
- [13] Kosugi G, Sasaki T, Aoki T, et al. SUBARU Observation Control System [J]. Proceedings of SPIE, 1997. DOI: 10.1117/12.278829
- [14] Lemoine-Busserolle M, Roth K C, Carrasco E R, et al. Observing GRBs and Supernovae at Gemini Observatory as Target of Opportunity (ToO)[J]. Proceedings of the International Astronomical Union, 2011, 7(S279):345-346. DOI: 10.1017/s1743921312013270
- [15] Rees N P, Economou F, Jenness T, et al. JCMT Observatory Control System [J]. 2002. DOI: 10.1117/12.461306
- [16] Brown T, Baliber N, Bianco F B, et al. Las Cumbres Observatory Global Telescope Network [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2013, 125: 1031-1055. DOI:

- 10.1086/673168
- [17] Goodrich B D, Warmpler S B. Software Controls for the ATST Solar Telescope [J]. SPIE Proceedings, 2004, 5496: 518-527. DOI: 10.1117/12.550711
- [18] Angeli G Z, Schumacher G, Delgado F, et al. The Large Synoptic Survey Telescope OCS and TCS models[J]. Proceeding of SPIE, 2010, 7738:77381E. DOI: 10.1117/12.857379
- [19] 罗阿理, 田园, 宋静, 等. LAMOST 观测控制系统设计与实现[J]. 科研信息化技术与应用, 2012, 3(4): 76-85. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7673.2011.03.011
- [20] 朱利平, 王坚, 黄鲲, 等. OCS 命令调度的设计与实现[J]. 中国科技大学学报, 2007, 37(6): 670-674. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2778.2007.06.017
- [21] 刘光曹, 王坚, 董健, 等. LAMOST 望远镜的流程控制与界面调用技术[J]. 中国科技大学学报, 2010, 40(9): 946 – 950. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2778.2010.09.012
- [22] 董健. 大型天文望远镜观测控制系统框架研究[D]. 合肥: 中国科技大学博士论文, 2011.
- [23] 王坚, 金革, 黄鲲, 等. LAMOST 观测控制系统消息总线的设计与实现[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(3): 268-271. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2006.03.004
- [24] 王坚. 大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜 (LAMOST) 观测控制系统的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.
- [25] 邓小超. 大型望远镜异构控制系统的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [26] Steele I A. The Liverpool Telescope [J]. Astronomische Nachrichten, 2001, 322:307-310. DOI: 10.1002/asna.200410271
- [27] Fraser S N, Steele I A. Object Oriented Design of the Liverpool Telescope Robotic Control System [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4848:443-454. DOI: 10.1117/12.461333
- [28] Steele IA, Carter D. Control Software and Scheduling of the Liverpool Robotic Telescope [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3112: 222-233. DOI: 10.1117/12.278824
- [29] Smith R J , Clay N R , Fraser S N , et al. Switching the Liverpool Telescope from a Full-Service Operating Model to Self-Service [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7737. DOI: 10.1117/12.856523
- [30] 卫守林. 分布式天文海量数据处理与控制研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [31] Steele I A. The Liverpool Robotic Telescope [J]. New Astronomy Reviews, 2001, 45(1-2):45-47. DOI: 10.1016/s1387-6473(00)00126-3
- [32] Shporer A, Brown T, Lister T, et al. The LCOGT Network [J]. Proceedings of the International Astronomical Union, 2010, 6(S276):553-555. DOI: 10.1017/s1743921311021193
- [33] Hidas M G, Hawkins E, Walker Z, et al. Las Cumbres Observatory Global Telescope: A homogeneous telescope network [J]. Astronomische Nachrichten, 2010, 329(3):269-270. DOI: 10.1002/asna.200710950
- [34] Hawkins E, Baliber N, Bowman M, et al. Scheduling Observations on the LCOGT Network[C]. Observatory Operations: Strategies, Processes, & Systems III. International Society for Optics and Photonics, 2010. DOI: 10.1117/12.857756

- [35] Pickles A, Hjelstrom A, Boroson T, et al. LCOGT Network Observatory Operations[C]. Observatory Operations: Strategies, Processes, & Systems V. International Society for Optics and Photonics, 2014. DOI: 10.1117/12.2055215
- [36] Kubanek P, Jelinek M, Nekola M, et al. RTS2: A Powerful Robotic Observatory Manager [J]. Proceeding of SPIE, 2006, 6274. DOI: 10.1117/12.672045
- [37] Kubanek P. RTS2 - The Remote Telescope System [J]. Advances in Astronomy, 2010, Volume 2010, Article ID 902484, 9 pages. DOI:10.1155/2010/902484
- [38] Kubanek P. Genetic Algorithm for Robotic Telescope Scheduling [D]. Spain: Universidad de Granada, 2010.
- [39] Kubanek P, Peck A B, Seaman R L, et al. RTS2: Meta-queues Scheduling and its Realisation for FLWO 1.2m Telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8448:844811. DOI: 10.1117/12.926839
- [40] Kubanek P, Castro-Tirado A J, Cunniffe R, et al. Operating a Global Network of Autonomous Observatories[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7740. DOI: 10.1117/12.857222
- [41] Sasaki T, Kosugi G, Noumaru J, et al. Observation Control System for the Subaru Telescope and its User Interface[J]. Proceeding of SPIE, 998, 3349:427-434. DOI: 10.1117/12.316518
- [42] Jeschke E, Bon B, Inagaki T, et al. A Framework for the Subaru Telescope Observation Control System Based on the Command Design Pattern [J]. Proceeding of SPIE, 2008, 7019:701900. DOI: 10.1117/12.788073
- [43] Noumaru J. Observation and Observatory Operation Systems for Subaru Telescope [J]. Proceeding of SPIE, 2000, 4010. DOI: 10.1117/12.392488
- [44] Jeschke E, Radziwill N M, Bridger A, et al. Lessons Learned Deploying a Second Generation Observation Control System for Subaru Telescope [J]. Proceeding of SPIE, 2010, 7740:77400F. DOI: 10.1117/12.856524
- [45] Johansson E M, Goodrich B, Radziwill N M, et al. Simultaneous Control of Multiple Instruments at the Advanced Technology Solar Telescope[J]. Proceeding of SPIE, 2012, 8451:84510J. DOI: 10.1117/12.926441
- [46] Chiozzi G, Guzman J C, Daly P N, et al. LSST OCS status and plans[J]. Proceeding of SPIE, 2016, 9913:99132O. DOI: 10.1117/12.2232025
- [47] Plank C, Oberhauser B, Mechtler K, et al. The influence of endosome-disruptive peptides on gene transfer using synthetic virus-like gene transfer systems [J]. Journal of Biological Chemistry, 1994, 269(17):12918-24. DOI: 10.1006/bbrc.1994.1573
- [48] Mills D, Schumacher G, Lotz P. LSST communications middleware implementation[C]. Ground-based and Airborne Telescopes VI, 2016. DOI: 10.1117/12.2233099
- [49] 王传军. 2.4 米望远镜远程观测系统用户管理及观测申请子系统的设计与实现[D]. 昆明: 中国科学院云南天文台, 2008.
- [50] Fan Yu-Feng, Bai Jin-Ming, Zhang Ju-Jia, et al. Rapid instrument exchanging system for the Cassegrain focus of the Lijiang 2.4-m Telescope[J]. Research in Astronomy and Astrophysics,

- 2015, 15(6): 918-928. DOI: 10.1088/1674-4527/15/6/014
- [51] 范玉峰. 中型望远镜观测系统集成[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [52] Fraser S N. Robotic Control System Software Design Document [Z]. Liverpool, 2002.
- [53] TTL. Telescope Control System Network Interface Control Document [Z]. Liverpool, 2007.
- [54] 王传军, 范玉峰, 易卫敏. 丽江 2.4 米望远镜 TCS Sequencer 程序的设计与开发[J]. 天文研究与技术, 2013, 10(4): 378-385. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7673.2013.04.008
- [55] TTL. 2.0m Telescope SDB Tool for Data Extraction User Guide [Z]. Liverpool, 2005.
- [56] DuBois P. MySQL Cookbook (中文版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [57] Mottram C J, Steele I A, Morales L. Design of Low Cost and Reliable Instrumentation for Robotic Telescopes [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5492:677-688. DOI: 10.1117/12.551337
- [58] Gilli B, Stepp L M. Workstation Enviroment for VLT [J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2199:1026-1033. DOI: 10.1117/12.176161
- [59] Prestage R M, Constantikes K T, Hunter T R, et al. The Green Bank Telescope [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(8):1382-1390. DOI: 10.1109/jproc.2009.2015467
- [60] Srivastava M K, Ramappakash A N, Burse M P, et al. TELICS-A Telescope Instrument Control System for Small/Medium Sized Astronomical Observatories [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2009, 121(884): 1112-1119. DOI: 10.1086/644648
- [61] Nordic Optical Telescope. Guide to the ALFOSC Sequencer [N/OL].  
<http://www.not.iac.es/instruments/alfosc/SEQ/alfosc-seq.html>.
- [62] 陈宇超, 金振宇, 杨磊. NVST 多通道高分辨观测系统软件设计[J]. 天文研究与技术, 2016, 13(1): 75-81. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7673.2016.01.009
- [63] Tian Y, Wang Z, Li J, et al. LAMOST CCD camera-control system based on RTS2[J]. RAA 2018, 18(05): 71-84. DOI: CNKI:SUN:TTWL.0.2018-05-006
- [64] 李欢, 郝蕾. 中国丽江积分视场光纤光谱仪分辨能力实验室测试结果[J]. 天文学进展, 2017, 35(2): 255-266. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8349.2017.02.07
- [65] Ousterhout J K, Jones K, 著. 张元章, 译. Tcl/Tk 入门经典(第 2 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [66] Snell J, Tidwell D, Kulcbenko P, 著. 胡军, 译. SOAP Web 服务开发[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [67] Brogden B, 著. 高春蓉, 谷宇, 岳阳, 等译. SOAP 与 Java 编程指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [68] 陈林颢, 王传军, 范玉峰, 等. 丽江 2.4 米望远镜多波段测光观测控制系统的设计与开发[J]. 天文研究与技术, 2018, 15(4): 441-447.
- [69] 陈林颢. 丽江 2.4 米望远镜多波段测光控制系统设计与开发[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [70] 谭徽松, 李银柱, 金振宇. 实测天体物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

- [71] Durham University. Plate Scale and Focal Lengths: A Tutorial and Worked Example [N/OL].  
[https://community.dur.ac.uk/physics.astrolab/plate\\_scale Updating.html](https://community.dur.ac.uk/physics.astrolab/plate_scale Updating.html)
- [72] Muller R J, Cersosimo J C, Centeno D, et al. Using the Separation of Double Stars to Obtain the Plate Scale of a Telescope with a CCD Camera Attached [J]. *Journal of Double Star Observations*, 2008, 4(3): 100-102.
- [73] 崔辰州, 于策, 肖健, 等. 大数据时代的天文学研究[J]. *科学通报*, 2015, 60 (5-6) : 445-449. DOI: 10.1360/n972014-00839
- [74] 云南大学. 多通道测光巡天望远镜-Mephisto 白皮书[R]. 昆明: 云南大学, 2018.
- [75] 辛玉新, 王传军, 范玉峰, 等. 丽江站台址信息监测系统[J]. *天文学进展*, 2017, 35(3): 367-380. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8349.2017.03.06
- [76] Vernin J. Mechanism of formation of optical turbulence (Invited Speaker)[J]. *ASP Conference Series, Astronomical Site Evaluation in the Visible & Radio Range*, 2002, 266:2.
- [77] Radu A A, Angelescu T, Curtef V, et al. An astroclimatological study of candidate sites to host an imaging atmospheric Cherenkov telescope in Romania [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, 422(3):2262-2273. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.20771.x
- [78] Bruce Eckel. *Java 编程思想(第 4 版)*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [79] 彭智勇. *POSTGRESQL.数据库内核分析*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [80] Apache Commons. *Apache Commons Compress* [N/OL].  
<http://commons.apache.org/proper/commons-compress/index.html>
- [81] 王鹏, 何昀峰. *Java Swing 图形界面开发与案例详解*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [82] 王德清, 丁旭, 伦宝利, 等. 丽江 2.4 米望远镜的圆顶侧窗自动化控制系统[J]. *天文研究与技术*, 2019.



## 附录一 TCS Sequencer 指令列表及功能说明

本附录部分对 TCS Sequencer 的指令及功能进行详细的说明。

### 1. agfilter

功能：设置自动导星滤光片的位置。

格式：agfilter state

默认：无

示例：agfiter in

参数：

state: in 将滤光片移入到光路中。

Out 将滤光片移出光路

说明：在使用该指令之前，应该已经通过 ins 指令选择了所需要使用的自动导星设备。

### 2. agfoc

功能：设置自动导星的焦点位置。

格式：agfilter position

默认：无

示例：agfoc 12.5

参数：

position: 在 0.00 到 25.00 之间的数值，单位是 mm。

说明：在使用该指令之前，应该已经通过 ins 指令选择了所需要使用的自动导星设备。

### 3. agrad

功能：将自动导星的平面反射镜移动到一个位置。

格式：agrad [position|centre]

默认：无

示例：agrad 23

参数：

**position:** 在 0.00 到 93.0 之间的数据，单位是 mm

**Centre:** 由观测终端确定的视场中心。

说明：在使用该指令之前，应该已经通过 ins 指令选择了所需要使用的自动导星设备。

如果使用 **agrad centre**，则将自动导星移动到当前终端设备的中心位置。如果在这个指令之前没有通过 ins 指令选择合适的终端，则会返回一个错误。该 **centre** 值可以通过修改 TCS 中的配置文件进行修改。

#### 4. alt

功能：将高度轴转到指定位置，并停止高度轴

格式：alt angle

默认：无

示例：alt 80.23

参数：

**angle:** 在高度轴范围 20.00 到 95.00 之间的数值，单位是度 (°)。

说明：如果在方位轴和消旋轴在跟踪的时候输入该指令，则 TCS 会执行该指令，且这两个轴会停止运动。

#### 5. auto

功能：锁定或解锁自动导星的闭环跟踪功能。

格式：auto state

默认：无

示例：auto on

参数：

**state: on** 锁定自动导星的闭环跟踪功能。

**off** 解锁自动导星的闭环跟踪功能。

说明：auto on 指令向自动导星发送一个请求，在导星视场内找一颗合适的星进行闭环跟踪。

auto off 指令将自动导星闭环跟踪功能关闭，停止导星。

#### 6. az

功能：将方位轴转动到指定的位置，并停止方位轴。



格式: azimuth angle

默认: 无

示例: az 157.34

参数:

**angle:** 在方位轴范围-180 到+360 之间的数值, 单位是度 (°)。

说明: 如果在方位轴和消旋轴在跟踪的时候输入该指令, 则 TCS 会执行该指令, 且这两个轴会停止运动。

## 7. calib

功能: 更新指向模型中的一组指向系数。

格式: calib solution

默认: calib new

示例: calib new

参数:

**solution:** **new** 执行一系列的指令来进行一次短的指向定标, 在 **new** 后面需要加上 **auto** 来指明该指令将调用自动导星来进行指向定标数据的采集。

**full** 使用系统星表内所有可见的星 (达到 400 颗) 来做指向定标, 生成一个指向定标文件。

说明: calib new auto 指令会启动一个自动的指向序列, 来对选定的 7 颗星进行严格的指向测量, 从而用来更新方位轴和高度轴的编码带扫描头零点位置, 同时测量方位轴的校准误差。

## 8. diff\_rates

功能: 输入赤经和赤纬的特殊跟踪速度

格式: diff\_rates rate\_in\_ra rate\_in\_dec

默认: 无

示例: diff\_rates 0.02 0.3

参数:

**rate\_in\_ra:**  $\pm 100.00[\text{seconds/second}]$

**rate\_in\_dec:**  $\pm 100.00[\text{arcseconds/second}]$

说明：该指令一般在进行小行星、彗星等非恒星目标的时候使用，使用该指令前应该通过 `source` 指令输入观测目标的赤经和赤纬坐标，指向该指令之后需要输入 `next` 指令是该指令得到执行。

## 9. dome

功能：将圆顶转动到指定位置，并停止运动。

格式：dome angle

默认：无

示例：dome 155.34

参数：

angle: 圆顶转动的范围 0.00 到 360.00 之间的数值，单位是度 (°)。

说明：该指令是用来转动圆顶到指定的位置，是由圆顶控制系统所执行的，如果圆顶控制系统没有正常工作，则该指令不会得到正确执行。

## 10. encl

功能：用来打开或关闭圆顶的天窗

格式：encl state

默认：无

示例：encl open

参数：

state: open      打开

close      关闭

说明：该指令是用来打开或关闭圆顶的天窗，由圆顶控制系统执行，如果圆顶控制系统没有正常工作，则该指令不会得到正确执行。

## 11. foc

功能：将副镜的调焦机构移动到指定的位置，并停止运动

格式：foc position

默认：无

示例：foc 20.5

参数：

position: 副镜机构可以移动的范围：± 30.00，单位为 mm。

说明：在使用该指令前，最好将焦点补偿的功能关闭。

## 12. gocat

功能：从系统星表或用户星表中根据观测目标的名称进行检索，并获取观测目标的坐标，将坐标发给望远镜控制系统并指向该目标。

格式：gocat name

默认：无

示例：gocat star001

参数：

**name:** 将要指向的目标的名称，特指在星表中的名称。

说明：在进行检索的时候，先检索用户星表，然后检索系统星表。系统星表是望远镜控制系统自带的，用户星表需要根据固定的格式预先输入到望远镜控制系统中。

## 13. goto

功能：将望远镜指向一个目标，并跟踪这个观测目标。

格式：goto name ra dec equinox

默认：无

示例：goto HD12345 12 34 56.78 +34 55 23.34 J2000

参数：

**name:** 要指向的观测目标的名称的字符串，不能超过 20 个字符。

**ra:** 观测目标的赤经值，格式：ra\_h(0-23) ra\_m(0-59) ra\_s(0.0-59.99)。

**dec:** 观测目标的赤纬值，格式：dec\_d(0-89) dec\_m(0-59) dec\_s(0.0-59.99)。

**equinox:** 指定观测目标的坐标系的历元，可选值为：B1950, J2000 和 APPARENT

说明：TCS 会根据转动时间的多少来选择合适的方式转动望远镜的三个轴到指定位置，指令的格式一定不能输错。

## 14. include

功能：从星表文件中读取一个用户星表文件。

格式：include name

默认：默认的路径是用户星表的路径，默认的文件扩展名为.CAT。

示例：include user\_cat.CAT

参数：

**name:** 输入的用户星表的名称，不能超过 132 个字符。

说明：用户星表需要预先提交到望远镜控制系统中，且星表文件的格式需要符合望远镜控制系统所要求的格式。

## 15. ins

功能：指定望远镜控制系统使用特定的观测终端，该指令可以根据配置文件中的值对焦平面、消旋轴、焦点偏差、第三镜的位置和自动导星进行配置。

格式：ins instrument

默认：无

示例：ins yfosc

参数：

**instrument:** 在望远镜控制系统的 INS 配置文件中配置的观测终端的缩略名。

说明：该指令根据 INS 配置文件中的一系列配置对多个机构进行设置，在使用该指令之前需要确定 instrument 在 INS 配置文件中有对应的配置。

## 16. mirr

功能：打开或关闭主镜盖。

格式：mirr state

默认：无

示例：mirr open

参数：

**state:** open 打开 或 close 关闭

说明：无

## 17. next

功能：驱动望远镜指向指定的观测目标，该观测目标的坐标通过 source 指令输入。

格式：next

默认：无

示例: next

参数: 无

说明: 在执行该指令之前, 要指向的观测目标的信息需要已经通过 source 指令输入, 否则该指令不会得到执行。

### 18. offby

功能: 根据输入的偏移量移动望远镜, 从而使得图像上的数据也能对应地移动。

格式: offby arc offset\_ra offset\_dec

默认: 无

示例: offby arc 12.6 -11.2

参数:

offset\_ra:  $\pm 3600.00$  arcseconds

offset\_dec:  $\pm 3600.00$  arcseconds

说明: 该指令中赤经和赤纬的偏移值的单位都是角秒, 在使用的时候一定要注意。

### 19. opera

功能: 启动整个望远镜为观测做准备, 或在观测结束的时候关闭望远镜使其进入待命状态。

格式: opera state

默认: 无

示例: opera on

参数:

state: on 启动或 off 关闭

说明: 该指令会导致 TCS 向 MCS 发送一个状态改变的请求, 在执行 opera on 指令后, 系统状态会变为 Okay 或 Warning; 执行 opera off 指令后, 系统状态会变为 STANDBY。

### 20. park

功能: 停止望远镜运动。

格式: park position

默认: 无

示例: park zenith

参数:

position: zenith (高度轴为 90 度, 方位轴和消旋轴都未指定)

说明: 特定的停止位置的值是预先在 TCS 的配置文件中设定好的。

## 21. rot mount

功能: 将消旋转动到某个特定的位置, 并停止运动。

格式: rot mount angle

默认: 无

示例: rot mount 157.3

参数:

angle: 消旋轴可以转动的范围:  $\pm 240.00$ , 单位度 ( $^{\circ}$ )。

说明: 注意消旋轴的 mount 范围是-240 度到+240 度, 在使用的时候一定要注意。

## 22. rot sky

功能: 将消旋根据指定的值转动到指定的 sky 位置。

格式: rot sky angle

默认: 无

示例: rot sky 90

参数:

angle: 可以使用的范围是 0.00 到 360.00, 单位度 ( $^{\circ}$ )。

说明: 在使用 rot sky 之前, 需要确定消旋位置不会超过其运行的范围。

## 23. rot float

功能: 消旋轴处在 float 的模式, 从而可以根据天空角进行校准, 减少消旋轴需要转动的距离。

格式: rot float

默认: 无

示例: rot float

参数: 无

说明: 无

## 24. show

功能: 显示通过关键词指定的部分的详细信息。

格式: show topic

默认: 无

示例: show autoguider

参数:

**topic:** **astrometry** 显示用户可修改的天体测量参数, 如波长、气压、温度、相对湿度等。

**autoguider** 显示当前使用的自动导星, 及其当前的位置、焦点等。

**calibrate** 显示高度轴误差、方位轴误差和方位轴的校准值, 以及上次进行指向校准之后的整体误差。

**catalogue** 提供一个路径显示所有的用户星表。

**focal** 显示当前选择的消旋轴的信息, 如卡焦或耐焦。

**instrument** 显示当前选择的观测终端及对应的自动导星。

**mechanisms** 显示所有主要机械结构的状态信息。

**meteorology** 显示当前的气象条件信息。

**source** 显示当前跟踪的观测目标的信息。

**state** 显示望远镜和 TCS 的状态以及目前的观测模式。

**time** 用不同格式显示当前的时间信息。

**version** 显示当前的 TCS 的版本信息。

说明: 无

## 25. source

功能: 输入一个观测目标相关的信息数据到可编辑的数据区域

格式: source name ra\_h ra\_m ra\_s dec\_d dec\_m dec\_s equinox

默认: 无

示例: source HD123 12 34 56.45 +11 23 45.00 J2000

参数:

**name:** 观测目标的名称, 不超过 20 个字符

**ra\_h:** 0-23, 单位是小时

**ra\_m:** 0-59, 单位是时分

**ra\_s:** 0.00-59.99, 单位是时秒

dec\_d:        ±89, 单位是度  
 dec\_m:        0-59, 单位是角分  
 dec\_s:        0.00-59.99, 单位是角秒  
 equinox:      B1950, J2000 和 APPARENT

说明：该指令需要配合 diff\_rates 和 next 指令进行使用，一般在进行小行星、彗星等非恒星目标观测的时候才会使用。

## 26. stop

功能：停止某个指定的机械机构。

格式：stop mechanism

默认：无

示例：stop all

参数：

|                |                |
|----------------|----------------|
| mechanism: all | - 所有下面列出的机械结构  |
| agfocus        | - 当前使用的自动导星的焦点 |
| agprobe        | - 当前使用的自动导星的位置 |
| altitude-      | 高度轴            |
| azimuth        | - 方位轴          |
| dome           | - 圆顶           |
| enclosure      | - 所有天窗         |
| focus          | - 副镜的调焦驱动      |
| fold           | - 折光镜          |
| rotator        | - 消旋轴          |

说明：如果使用 stop all 指令，则所有允许接收指令的机械结构都会被停止。

## 27. track met

功能：开启或关闭望远镜的气象补偿

格式：track met state

默认：无

示例：track met on

参数：



state: on – 开启或 off – 关闭

说明：在观测开始之后就需要开启气象补偿，在望远镜从故障状态恢复的时候也需要重新启动一次。

## **28. track dome**

功能：开启或关闭圆顶跟踪

格式：track dome state

默认：无

示例：track dome on

参数：

state: on – 开启或 off – 关闭

说明：在指向观测目标之后就需要启动圆顶跟踪，从而保证圆顶的位置与望远镜的位置始终保持一致。如果圆顶控制系统出故障并恢复，则需要重新启动圆顶跟踪。

## **29. track foc**

功能：开启或关闭望远镜的焦点补偿

格式：track foc state

默认：无

示例：track foc on

参数：

state: on – 开启或 off – 关闭

说明：在观测开始之后就需要开启焦点补偿，在望远镜从故障状态恢复的时候也需要重新启动一次。



## 附录二 简化后的 Gaia 星表信息说明

从 Gaia 星表中我们选取了亮于 17 等(G 波段)的星,并筛选出了六列数据。六列数据分别为星名(**SOURCE\_ID**)、赤经(**RA**)、赤经标准差(**RA\_ERROR**)、赤纬 (**DEC**)、赤纬标准差 (**DEC\_ERROR**)、G 波段平均星等 (**PHOT\_G\_MEAN\_MAG**)。参考历元为 2015 (儒略年),参考架为 ICRS (International Celestial Reference System)。具体描述如下表所示:

| 列名                     | 说明       | 数据类型                   |
|------------------------|----------|------------------------|
| <b>SOURCE_ID</b>       | 星的编号     | long                   |
| <b>RA</b>              | 赤经       | double, Angle[deg]     |
| <b>RA_ERROR</b>        | 赤经标准差    | double, Angle[mas]     |
| <b>DEC</b>             | 赤纬       | double, Angle[deg]     |
| <b>DEC_ERROR</b>       | 赤纬标准差    | double, Angle[mas]     |
| <b>PHOT_G_MEAN_MAG</b> | G 波段平均星等 | double, Magnitude[mag] |



## 致 谢

光阴似箭。从入学到现在，六年时间匆匆飘过。回想起当年从大巴车上下来，见到丽江玉龙雪山，投入到丽江 2.4 米望远镜的建设开始到现在，已经走过了十三个年头。岁月蹉跎，十几年的发展，丽江天文观测站也从一台 2.4 米望远镜逐渐发展成拥有大大小小十几台望远镜的南方天文观测基地。新奇、兴奋、渴求，是最初加入望远镜建设时候的心情，正是有这种信念的支撑才让我能忘却高海拔缺氧的艰苦环境，才让我能一呆就超过了一纪。博士生涯就要结束，但为丽江站建设而努力的激情并没有结束，我会为了最初选择来丽江站工作的初心而不断努力下去。

在过去六年的学习和工作里，有繁忙工作的重担，有生活压力的重负，也有获得成功的喜悦，复杂的心情难于一一抒发，唯有感激之情，溢于言表。首先要感谢我的导师王锋教授，在博士求学期间对我的学习、工作的悉心教导，从论文的选题、课题的研究开展到论文的撰写，每一个环节都包含着导师严谨治学的态度。王老师具有非常深厚的理论基础，在计算机技术、网络技术、数据处理技术等多方面都有丰富的实践经验，王老师的博学、一针见血的分析往往让我的工作能够豁然开朗，他努力、奋进、豁达的人格魅力也让我受益匪浅。王老师的夫人邓辉教授是我本科时期的老师，王老师与其夫人共同投身科研教育事业，相互扶持，相濡以沫的科研贤伉俪作风也深深影响着我。师恩重若泰山，难以抒怀，唯有牢记一生。

在丽江站工作的十几年里，时刻能够感受到丽江站这个团组融洽的氛围、“严谨求实，勤奋自强”的求学和工作的态度，让我能无后顾之忧地开展工作，所有这些都得益于丽江天文观测站的首席科学家白金明研究员。特别感谢白金明研究员，感谢他一直以来就对我的工作、学习、生活等各个方面的关心和帮助。在我经济困难的时候他鼎力支持，在我工作困惑的时候他努力解惑，为我的人生奋斗目标指明了方向，以他孜孜不倦求学的态度影响着我；他用个人的人格魅力影响了丽江站整个团组的所有人，凝聚起整个团组一起走过丽江 2.4 米望远镜建成初期那段艰苦的时期，使得丽江天文观测站逐渐成为国内天文界不可或缺的重要研

究平台。

感谢范玉峰研究员，你我从 2006 年开始共事，一起调望远镜、一起装设备、一起解决问题，你的工作态度深深影响着我，正是因为和你共事才让我得到了这样的成长。很怀念最初的那段时光，感谢你在我生活困难的时候对我的无私支持，愿我们能继续共事，将丽江观测站打造成国内一流的观测平台。

特别感谢季凯帆研究员、邢丽峰研究员、毛基荣研究员、熊定荣、张西亮、辛玉新、王建国、卢开兴、王晓丽、余晓光等同事在我毕业论文编写期间给予的无私帮助。

感谢团组内常亮、伦宝利、石晶、张居甲、业凯、许良、丁旭、易卫敏、郑向明、冯元杰、和寿圣等同事，正是有你们在工作上和生活中的大力支持，才能让我顺利走到这一步，真心感谢。感谢曾经一起在丽江 2.4 米望远镜工作过的茶光伟老师、李建老师、彭松泉老师、李维华老师、陈东老师、王雪利师姐和蒋露坤老师，感谢你们对我工作和生活上的帮助，也感谢各位老师对我人生态度的影响，让我知道做人是一切的根本。

感谢胡景耀研究员、商朝晖研究员、罗阿理研究员和熊耀恒研究员在博士期间给予的一些指导。感谢崔辰州研究员、何勃亮、肖健在毕业论文编写期间给予的帮助，感谢所有虚拟天文台和天文领域云的同事。感谢人教处赵秋老师和王德良在学习上提供的各种便利，感谢王德清、王宇、陈林勰等研究生在工作中提供的帮助。

感谢我的夫人邓菁菁一直以来对我学习和工作的支持和理解，与我携手解决各种困难，虽磕磕绊绊但不离不弃。感谢女儿汤圆，你的到来给我们的生活增加了甜蜜，给我带来莫大的勇气。感谢我的父亲对我的严格要求，让我可以长大成人，也希望我的努力能告慰您的在天之灵。感谢我的母亲对我默默的支持，她虽然目不识丁却识得大体，从未向儿子要求什么，一直在包容儿子的任性，在这里儿子要向您道歉，衷心地一声对不起。

在此，向所有帮助过、关心过我的领导、老师、同学和朋友表示由衷的感谢。

衷心感谢在百忙之中评阅论文和参加答辩的各位专家、教授。

2019 年 6 月

## 作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

### 作者简历:

2001 年 09 月 – 2005 年 07 月, 在昆明理工大学信自学院计算机科学与技术系获得学士学位。

2005 年 09 月 – 2008 年 07 月, 在中国科学院云南天文台获得硕士学位。

2013 年 09 月 – 2019 年 06 月, 在中国科学院云南天文台攻读博士学位。

### 工作经历:

2008 年 09 月 – 2010 年 03 月, 中国科学院云南天文台, 助理工程师

2010 年 03 月 – 2015 年 05 月, 中国科学院云南天文台, 工程师

2015 年 05 月 – 至今, 中国科学院云南天文台, 高级工程师

### 已发表(或正式接受)的学术论文:

#### 第一作者:

- [1] Chuan-Jun Wang, Jin-Ming Bai, Yu-Feng Fan, et al. Lijiang 2.4 Telescope and its Instruments [J]. Research in Astronomy and Astrophysics. (已接收)
- [2] Chuan-Jun Wang, Ding-Rong Xiong and Jin-Ming Bai, Optical multi-color monitoring of the BL Lacertae Object S5 0716+714 with BOOTES-4[J]. Astrophysics and Space Science, 2019, 364:83.
- [3] 王传军, 王德清, 肖健, 等. 丽江 2.4 米望远镜观测日志辅助系统的设计与研发[J]. 天文研究与技术. (已接收)
- [4] Chuan-Jun Wang, Xi-Liang Zhang, Yu-Xin Xin, et al. Astrometric results of the mutual events between the Galilean satellites during 2014-15[J]. Planetary and Space Science, 2019. (已在线发表)
- [5] Chuan-Jun Wang, Lin-Xie Chen, Yu-Feng Fan, et al. The Concept Design of Observation Control System for Lijiang 2.4-meter Telescope [C]. RevMexAA. (已接收)
- [6] 王传军, 范玉峰, 易卫敏. 丽江 2.4 米望远镜 TCS Sequencer 程序的设计与开发[J]. 天文研究与技术, 2013, 10(04): 378-385.

**通讯作者:**

[1] 辛玉新, 王传军\*, 范玉峰, 等. 丽江站台址信息监测系统[J]. 天文学进展, 2017, 35(3): 367-380. (通讯作者)

**参与作者:**

[1] 崔辰州, 李建, 蔡栩, 等. 程控自主天文台网络的发展[J]. 天文学进展, 2013,31(2): 140-159.

[2] Wei-Min Yi, Chuan-Jun Wang, Yu-Feng Fan, et al. Proposal of photometric reverberation mapping with BOOTES-4[J]. RMxAC, 2014, 45(1): 135-138.

[3] Fan Yu-Feng, Bai Jin-Ming, Zhang Ju-Jia, et al. Rapid instrument exchanging system for the Cassegrain focus of the Lijiang 2.4-m Telescope [J]. RAA, 2015, 15(6): 918-928.

[4] 范玉峰, 辛玉新, 白金明, 等. 丽江站 BOOTES-4 综述[J]. 天文研究与技术, 2015, 12(1): 78-88.

[5] 陈林颢, 王传军, 范玉峰, 等. 丽江 2.4 米望远镜多波段测光观测控制系统的设计与开发[J]. 天文研究与技术, 2018,15(4): 441-447.

[6] 王德清, 丁旭, 伦宝利, 等. 丽江 2.4 米望远镜的圆顶侧窗自动化控制系统[J]. 天文研究与技术, 2019, 已接收.

**申请或已获得的专利:**

1. 发明专利, 一种天文光谱仪自动曝光系统及其控制方法, 余晓光, \*常亮, 范玉峰, 辛玉新, 王晓丽, 张居甲, 王传军, 白金明, CN201610925927.5
2. 发明专利, 一种基于杨氏双缝干涉理论检测望远镜成像质量的方法, \*常亮, 王建国, 王传军, 辛玉新, 范玉峰, 白金明, 伦宝利, CN201611007630.7
3. 实用新型, 一种便携式全天信息采集系统, 辛玉新, 范玉峰, 伦宝利, 王传军, 常亮, 白金明, CN201520686520.2
4. 实用新型, 一种小型天文望远镜调焦器控制装置, 丁旭, 和寿圣, 王传军, 伦宝利, 辛玉新, 范玉峰, CN201820899947.4



**参加的研究项目情况:**

1. 丽江 2.4 米望远镜控制系统逆向分析和建模研究, 国家自然科学基金联合基金项目, U1631127, 44 万, 2017 年 1 月-2019 年 12 月, 在研, 项目负责人。
2. 星系中心的中等质量黑洞研究, 国家自然科学基金面上项目, 11473062, 90 万元, 2015 年 1 月-2018 年 12 月, 在研, 参加。
3. 丽江 2.4 米望远镜队列服务器观测和机会源快速响应研究, 国家自然科学基金青年科学基金项目, 11303092, 2014 年 1 月-2016 年 12 月, 已结题, 参加。
4. 姿轨控分系统星数概率分析, 横向课题, 12 万, 2017.06-2018.06, 项目负责人。
5. 望远镜观测服务, 横向课题, 20 万, 2017.05-2017.12, 项目负责人。