



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

# 博士学位论文

两维实时光谱仪精密温控系统空间化关键技术研究

作者姓名: 张鑫伟

指导教师: 邓元勇 研究员 中国科学院国家天文台

林佳本 研究员 中国科学院国家天文台

学位类别: 理学博士

学科专业: 天文技术与方法

培养单位: 中国科学院国家天文台

2020 年 9 月



**Research on Key Technology of Precision Temperature Control  
System for Two-dimensional Real-time Spectrometer in Space**

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

**By**

**Zhang Xinwei**

**Supervisor: Professor Deng Yuanyong**

**Professor Lin Jiaben**

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

**September, 2020**



## 中国科学院大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。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。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

张鑫伟

日期：

2020.8.31

## 中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院大学有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院大学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：

张鑫伟

导师签名：

邓宏 林佳本

日期：

2020.8.31

日期：

2020.8.31



## 摘要

本课题开展对两维实时光谱仪精密温控系统的空间化研究。两维实时光谱仪是以我国科学家发明的多通道双折射滤光器原理为基础，将滤光器八个通道的透过轮廓分布于一条太阳谱线的不同位置，可同时获取太阳磁场的二维图像和光谱信息的新一代太阳观测设备。两维实时光谱仪中有数百块双折射晶体，双折射晶体的双折射率对温度变化敏感，恒温稳定度需达到  $0.01^{\circ}\text{C}$  才能保证其精确稳定的工作。

针对两维实时光谱仪体积大、结构复杂的特点，以及在空间化应用的硬件限制条件下，本文提出了可空间化的多路温度测控方案。并完成了在地面可稳定运行的高精度温度控制系统，通过空间化的相关研究与设计，使该系统的理论分析与实现方法可以直接迁移到空间应用中。本论文的研究成果主要包含以下内容：

### （1）两维实时光谱仪温度场分析：

本课题的主要难点之一是两维实时光谱仪体积大、结构复杂，如何设计温控方案解决如此复杂结构的温控问题是本课题重点研究内容。本文首先建立两维实时光谱仪三维模型结构，在 ANSYS 热分软件中，施加必要热载荷及边界条件，对其温度场进行模拟分析。温度场分析主要包含两个方面：首先，分析两维实时光谱仪达到恒温稳定后的温度场，将温度场畸变较大的区域作为关键部位考虑；其次，综合考虑环境温度、热载荷施加方式对温度场的影响，提出优化热设计方案，确定了多通道温度控制方法。

### （2）温度传感器的标定：

温度传感器标定是实现多通道高精度温度控制系统的关键技术基础。本研究设计温度采集装置，采用非均匀采样方法处理数据，用多项式拟方法标定温度传感器。标定后，各温度传感器之间误差小于  $0.03^{\circ}\text{C}$ 。

### （3）空间多路温度测控系统：

在空间化的高精度温度控制系统中，采用低位 AD 器件实现高精度温度测量是主要难点。本课题通过研究传感器原理和空间高精度温度测量原理，首先设计了基于放大电路 + 可编程放大器 + 低分辨 AD 的多通道高精度温度测量电路；

其次，通过对比不同温控算法的特点，选用 PID 控制算法作为基础算法，并结合两维实时光谱仪传热特性，进行优化；最后，设计实现了以积分分离 PI 为核心算法的多通道温度控制软件。

#### （4）双通道温控系统试验测试：

通过针对两维实时光谱仪温控系统的空间化关键技术的研究，本课题完成了双通道温度控制系统，并开展测试实验。在三通道望远镜恒温改造中，温控精度优于  $0.01^{\circ}\text{C}$ ，并在外围增加二级恒温降低外界温度波动的影响；在 FMG 液晶偏振分析器项目中，通过热分析结果提出优化改进热设计方案，并设计实现了液晶偏振分析器在真空与非真空下的对比实验，实验结果均满足项目指标要求。通过在两个平台的系统测试实验与应用，证明了针对两维实时光谱仪开展的空间化高精度温控关键技术研究成果具有理论与实践价值。

**关键词：**两维实时光谱仪，温度控制系统，空间化，高精度测温，高精度温控，有限元热分析



## Abstract

In this project , the precision temperature control system of two dimensional real-time spectrometer using is studied for space. Based on the principle of multi-channel birefringence filter invented by Chinese scientists, the two-dimensional real-time spectrometer is a new generation of solar observation equipment, which can simultaneously obtain the two-dimensional image and spectral information of the solar magnetic field by distributing the transmission profiles of eight channels of the filter at different positions of a solar spectral line. There are hundreds of birefringent crystals in the two-dimensional real-time spectrometer. The birefringence index of the optical crystals is sensitive to temperature change, and its temperature stability should reach  $0.01^{\circ}\text{C}$  .

In view of the large volume and complex structure of two-dimensional real-time spectrometer, and under the hardware limitation of space application, this thesis proposes a multi-channel temperature measurement and control scheme for space. The high-precision temperature control system which can run stably on the ground is completed. The theoretical analysis and implementation method of the system can be directly transferred to space applications whose approach is targeted at research. The research results of this paper mainly include the following contents:

(1) Temperature field analysis of two dimensional real time spectrometer:

The 3D model structure of two dimensional real-time spectrometer is established. The thermal load and boundary conditions are applied to simulate and analyze the temperature field in ANSYS. The temperature field analysis mainly includes two aspects. There are two aspects in the analysis of temperature field: Firstly, when the temperature of the two-dimensional real-time spectrometer is stable, the region with large temperature distortion is considered as the key part. Secondly, with the influence of environmental temperature and thermal load on the temperature field analyzed, the optimal thermal design scheme is proposed, and the multi-channel temperature control method is determined.

(2) Calibration of temperature sensor:

The calibration of temperature sensor is the key technology foundation of multi-channel high-precision temperature control system. The temperature acquisition device is designed, and the polynomial fitting method is used to calibrate the temperature sensor. After calibration, the error of each temperature sensor is less than  $0.03^{\circ}\text{C}$ .

### (3) Multi-channel temperature measurement and control scheme in space:

In the high precision temperature control system for space, it is difficult to realize high-precision temperature measurement by low-resolution AD. By studying the principle of sensor and high-precision temperature measurement for space in the thesis, a multi-channel high-precision measurement circuit based on amplifier circuit and low-resolution is implemented with amplifier circuit、programmable gain amplifier and low resolution AD. The PID control algorithm is selected as the basic algorithm by comparing the characteristics of different temperature control algorithms. And the algorithm is optimized with the heat transfer characteristics of the two-dimensional real-time spectrometer considered. Multi-channel temperature control software is completed. Finally, a multi-channel temperature control software based on integral separation PI algorithm is designed.

### (4) Test of two-channel temperature control system:

Through the research on the key technology of two-dimensional real-time spectrometer temperature control system, the project completed the two-channel temperature control system, and the test experiment was carried out. In the three channel Telescope project, the temperature control accuracy is better than  $0.01^{\circ}\text{C}$ ; In addition, two-stage constant temperature is added to the periphery to reduce the influence of ambient temperature fluctuation. In the FMG liquid crystal polarization liquid crystals based Stokes polarimeter project, the optimized thermal design scheme is proposed by thermal analysis; And then, the comparative experiments of liquid crystal polarization liquid crystals based Stokes polarimeter in vacuum and non vacuum are designed, the experimental results meet the requirements of the need of the project. With the system tested and applied on the two platforms, it is proved that there is theoretical and practical value in the research of key technology of high-precision temperature control for two-dimensional real-time spectrometer.

**Keywords:** Two dimensional real-time spectrometer, Temperature control system, Space, High-precision temperature measurement, High-precision temperature control, Finite element analysis



## 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	4
1.3 本文研究内容和章节安排 .....	6
1.3.1 研究内容 .....	6
1.3.2 章节安排 .....	7
第 2 章 有限元热分析 .....	9
2.1 两维实时光谱仪中的传热形式 .....	9
2.2 两维实时光谱仪有限元模型 .....	10
2.3 热控方案的影响 .....	11
2.4 环境温度的影响 .....	16
2.5 多通道控制方案的确定 .....	18
2.6 本章小结 .....	21
第 3 章 高精度温度控制原理 .....	23
3.1 可空间化的高精度温度测量原理 .....	23
3.1.1 温度传感器原理 .....	23
3.1.2 空间高精度测温原理 .....	27
3.2 温度控制算法 .....	29
3.2.1 经典 PID 温度控制算法 .....	30
3.2.2 数字 PID 温度控制算法 .....	31
3.2.3 改进的数字 PID 温度控制算法 .....	32
3.3 本章小结 .....	33
第 4 章 温度传感器定标 .....	35
4.1 试验设计与装置 .....	35
4.2 数据处理 .....	36
4.3 方案验证 .....	38
4.4 本章小结 .....	38

第 5 章 高精度温度控制系统设计 .....	39
5.1 高精度温度控制系统总体设计 .....	39
5.2 硬件系统设计 .....	40
5.2.1 四路高精度温度读取电路 .....	41
5.2.2 主控单元电路模块设计 .....	45
5.2.3 加热驱动电路模块设计 .....	48
5.2.4 电源管理单元电路设计 .....	48
5.2.5 抗干扰设计 .....	51
5.2.6 双路高精度温度读取电路实现 .....	52
5.3 软件系统设计 .....	52
5.3.1 控制软件设计 .....	53
5.3.2 上位机温度监测软件 .....	55
5.4 本章小结 .....	59
第 6 章 系统联调测试 .....	61
6.1 基于三通道望远镜滤光器平台的恒温改造 .....	61
6.1.1 原有的三通道望远镜滤光器恒温系统设计 .....	61
6.1.2 双通道恒温控制系统 .....	63
6.1.3 二级恒温设计 .....	63
6.1.4 三通道望远镜运行结果 .....	66
6.2 基于液晶偏振分析器平台的测试研究 .....	67
6.2.1 液晶偏振分析器 .....	67
6.2.2 液晶偏振分析器有限元热分析 .....	69
6.2.3 光照对液晶波片温度场的影响 .....	71
6.2.4 液晶偏振分析器温控测试平台搭建 .....	74
6.2.5 温控实验 .....	76
6.2.6 液晶偏振分析器子系统——液晶搭载试验仪搭载平台测试实验 ..	79
6.2.7 实验结论 .....	82
6.3 本章小结 .....	82
第 7 章 总结与展望 .....	83
7.1 工作总结 .....	83
7.2 未来展望 .....	84
参考文献 .....	87
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果 .....	91
致谢 .....	93

## 图形列表

1.1 我国第一颗太阳观测卫星 ASO-S .....	3
1.2 两维实时光谱仪结构与传统滤光器结构比较。(a) 两维实时光谱仪结构, (b) 传统滤光器结构。 .....	6
2.1 两维实时光谱仪结构图。 .....	10
2.2 两维实时光谱仪模型图。 .....	11
2.3 加热膜贴附简单方案。 .....	12
2.4 简单加热方案的两维实时光谱仪温度场。 .....	12
2.5 简单加热方案的两维实时光谱仪光学晶体温度场。 .....	13
2.6 加热膜贴附复杂方案。 .....	13
2.7 复杂加热方案的两维实时光谱仪温度场。 .....	14
2.8 复杂加热方案的两维实时光谱仪光学晶体温度场。 .....	14
2.9 18°C 时两维实时光谱仪温度场 .....	16
2.10 18°C 时两维实时光谱仪光学晶体温度场。 .....	16
2.11 26°C 时两维实时光谱仪温度场 .....	17
2.12 26°C 时两维实时光谱仪光学晶体温度场。 .....	17
2.13 单区域热载荷时两维实时光谱仪温度场 .....	18
2.14 单区域热载荷时两维实时光谱仪内部温度场 .....	19
2.15 两维实时光谱仪加热区域划分。(a) 区域 1, (b) 区域 2, (c) 区域 3, (d) 区域 4。 .....	19
2.16 四路热载荷时两维实时光谱仪温度场 .....	20
2.17 四路热载荷时两维实时光谱仪内部温度场 .....	20
3.1 测温误差关于传感器阻值 $R$ 与导线阻值 $R_L$ 的曲面图。 .....	26
3.2 导线阻值 $R_L$ 一定时的测温误差曲线。 .....	26
3.3 电桥电路。 .....	28
3.4 模拟 PID 控制原理框图。 .....	31
4.1 温度传感器标定实验示意图。 .....	35
4.2 标准温度传感器与待标定温度传感器曲线图。 .....	36
4.3 采样后的温度曲线。 .....	37
4.4 误差与拟合曲线。 .....	37
5.1 系统总体设计框图。 .....	40

5.2 系统硬件设计框图。 .....	40
5.3 ADS7825 引脚图。 .....	41
5.4 四路电桥电路。 .....	43
5.5 电压跟随电路。 .....	43
5.6 放大电路。 .....	44
5.7 可编程放大电路。 .....	44
5.8 二阶有源滤波电路。 .....	45
5.9 ADS7825 电路原理图。 .....	46
5.10 STM32F103Vet6 主控芯片。 .....	46
5.11 STM32F103Vet6 最小系统板。 .....	47
5.12 AT24C08 电路图。 .....	47
5.13 MAX3232 电路图。 .....	48
5.14 加热驱动电路原理图。 .....	48
5.15 2.5V 电压源原理图。 .....	49
5.16 3.3V 电压源原理图。 .....	49
5.17 TPS76150 5V 电压源原理图。 .....	50
5.18 REF5050 5V 电压源原理图。 .....	50
5.19 $\pm 15V$ 电压源原理图。 .....	51
5.20 12V 电压源原理图。 .....	51
5.21 双通道测温电路 PCB。(a) 模型图, (b) 实物图。 .....	52
5.22 系统控制流程图。 .....	54
5.23 使用外部时钟进行转换和读取时序图。 .....	55
5.24 上位机温度监测软件。 .....	56
5.25 参数设置对话框。 .....	56
5.26 保存数据的 TXT 文档。 .....	57
5.27 数据保存流程。 .....	58
6.1 三通道望远镜。 .....	62
6.2 三通道望远镜滤光器结构图。 .....	62
6.3 三通道望远镜滤光器恒温稳态曲线。 .....	64
6.4 滤光器二级恒温结构。 .....	64
6.5 三通道二级恒温控制系统电气连接原理图。 .....	65
6.6 虹润 PID 温度控制器。 .....	65
6.7 三通道滤光器谱线轮廓图。(a) 5173 谱线, (b) 5247 谱线, (c) 5250 谱线。 .....	66
6.8 液晶偏振分析器结构图。 .....	68



6.9 加热膜尺寸图。 .....	68
6.10 偏振分析器温度场分布。 .....	70
6.11 LCVR 温度场分布。(a) LCVR 外侧面温度场分布, (b) LCVR 内侧面 温度场分布。 .....	70
6.12 底面加加热膜时 LCVR 温度场分布。(a) LCVR 外侧面温度场分布, (b) LCVR 内侧面温度场分布。 .....	71
6.13 LCVR 结构图。 .....	71
6.14 LCVR 结构简图。 .....	73
6.15 温度控制箱与真空试验箱。(a) 温度控制箱, (b) 真空试验箱。 .....	75
6.16 空气中液晶偏振分析器温度控制曲线。 .....	76
6.17 真空中液晶偏振分析器温度控制曲线。 .....	77
6.18 液晶偏振分析器温度控制曲线。 .....	78
6.19 空气中液晶偏振分析器分段温度控制曲线。 .....	78
6.20 真空中液晶偏振分析器分段温度控制曲线。 .....	79
6.21 液晶搭载试验偏振分析器组件整体结构示意图。 .....	80
6.22 液晶搭载试验测温电路原理图。 .....	80
6.23 真空 25℃ 时液晶试验仪温度控制曲线。 .....	81
6.24 真空-25℃ 时液晶试验仪温度控制曲线。 .....	81



## 表格列表

2.1 两维实时光谱仪主要材料传热参数。 .....	10
3.1 温度传感器对比表。 .....	24
3.2 温控算法对比。 .....	30
4.1 温度标定验证表。 .....	38
6.1 三通道滤光器恒温结构。 .....	63
6.2 2019 年 3 月 13 日三通道望远镜线心变化。 .....	67
6.3 液晶偏振分析器材料传热属性。 .....	69
6.4 DZF-6090C 真空干燥箱参数表。 .....	75
6.5 液晶偏振分析器温度控制统计表。 .....	77



## 第 1 章 绪论

### 1.1 研究背景

“天地玄黄，宇宙洪荒。日月盈昃，辰宿列张……”。认识这孕育人类生命的浩渺宇宙、轮回日月，是生活在东方的古代中国人从孩提懵懂时认知这个世界的开始。而西方的太阳崇拜随着太阳神赫利俄斯的故事口口相传，至今都深入每一代人心中。日出东方而作，日落西陲而息，这不是神话，它承载的是时间，是空间，也是生命。从太阳落下“神坛”（1543 年哥白尼著《天体运行论》），标志着近代科学的诞生，天文学已经过了近五百年的发展，人类对太阳的认识也逐渐明晰……

太阳是一个巨大的磁等离子体，其间的一切太阳活动现象和过程都和磁场相互作用密不可分，当今太阳物理的重大成就和主要困难都与太阳磁场的观测及理论研究有关 (Hughes 和 Proctor, 1995)。同时，太阳磁场通过其开放的磁力线结构，将其影响延伸到地球空间乃至太阳系边界，太阳磁相互作用导致的剧烈活动如耀斑和 CME(日冕物质抛射) 会借助这个磁场环境对人类社会生活，特别是航空航天、通讯等高科技领域及远距离输油输电产生灾害性影响。因此太阳磁场的观测研究不仅具有重要的科学意义，同时也具有重要的应用价值。

太阳磁场测量原理基于 Zeeman 效应。1896 年，Zeeman 在实验中把产生光谱的光源置于足够强的磁场中，磁场作用于发光体使光谱发生变化，一条谱线即会分裂成几条偏振化的谱线，这种现象被称为塞曼效应。1908 年，Hale 首次在太阳黑子观测的过程中发现单色光的分裂效应，并根据 Zeeman 效应推算出在太阳黑子中存在 2000 至 3000 高斯的强磁场。至今，太阳磁场望远镜利用 Zeeman 效应进行太阳磁场测量已成为太阳物理研究中最常用的技术手段之一。

目前国际上最先进的太阳磁场观测设备主要可以归为以下两类：一类设备以获取光谱信息为主要特点，典型代表是斯托克斯 (STOKES) 参数仪 (Azzam, 1982)，这类设备不仅具有较高的磁场测量精度，而且可以获得观测对象的温度、速度、密度等丰富的物理信息。但这类设备观测的是沿着光谱仪狭缝方向的线源信息，不能二维成像，对太阳这类需要高分辨率成像观测的目标而言具有很大局限性。另一类设备以二维实时成像为主要特色，其典型代表为双折射滤光器

型的视频磁像仪系统，这类系统特别适合对太阳磁场的形态演化进行观测研究，从而跟踪和理解太阳磁活动的成因等。但这类设备的光谱透过带单一，不能获取 STOKES 参数轮廓，因此所能诊断的物理信息较少，且在同等条件下磁场测量精度较前一类仪器有所不如。

上述两类仪器是目前太阳磁场测量最先进的主流设备，功能互补。双折射滤光器的发明与应用已大大促进了太阳活动区的单色观测，其透过的带宽以足以和太阳磁敏谱相比。但是，随着太阳物理研究的不断深入以及空间环境监测预报需求的不断增长，同时拥有光谱仪的“成谱”功能、滤光器的“成像”功能的需求越来越强烈。本项目拟研制的“两维实时光谱仪”(章海鹰, 2011)正是针对这一现状提出的。在保持传统滤光器型磁像仪特点的基础上，利用我国科学家发明的多通道滤光器原理，在一台仪器上同时获得观测目标的光谱轮廓和二维图像，实现太阳磁场观测中光谱仪优势和滤光器优势“谱-像一体化”的完美结合。项目研制完成，将形成新一代的太阳磁场观测设备，具有国际领先水平和独创性，且具有自主知识产权。

太阳望远镜作为一项复杂的光机电综合系统工程，对其设备性能提升要求是全方位的。随着对太阳物理的深入研究，太阳望远镜朝着大口径、多波段方向发展，并积极寻求空间化，以满足对太阳观测数据高时间分辨率、高空间分辨率的要求。在地基望远镜方面，代表性的设备包括已建成的美国 1.6m 口径 GST (Goode Solar Telescope) 望远镜 (Cao 等, 2010)、瑞典的 1m 口径 SST (1m-Swedish solar telescope) 望远镜 (Scharmer 等, 2003)、我国云南天文台的 1m 口径 NVST (New Vacuum Solar Telescope) 望远镜 (Gu, 2014)。在建的有美国 4m 口径 DKIST (Daniel K. Inouye Solar Telescope) 望远镜、我国用于中红外波段太阳磁场精确测量的 AIMS (Accurate Infrared Magnetic Field Measurements of the Sun) 望远镜等。但地面望远镜存在诸多无法消除的局限，地理环境、大气扰动、气候状况等因素均会不同程度地影响望远镜有效观测时长、观测数据质量。自上个世纪 90 年代末期以来，空间观测设备迅速发展，并逐渐占据太阳观测的主导地位。目前在轨运行的太阳探测卫星主要有 1995 年发射的 SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) 卫星 (Domingo 等, 1995)、2006 年发射的 Hinode 卫星 (Kosugi 等, 2007)、2010 年发射的 SDO (Solar Dynamics Observatory) (W. 等, 2012)、2013 年发射的 IRIS (The Interface Region Imaging Spectrograph) 卫星 (B De Pontieu,

2014), 以及最近发射的两颗空间太阳望远镜: 2018 年发射的帕克探针 (Parker Solar Probe) 和 2020 年发射的太阳轨道飞行器 (Solar Orbiter) (Marsch 等, 2002)。从上世纪 90 年代艾国祥院士提出自研空间太阳望远镜的项目 (SST, Space Solar Telescope) (Wang 等, 2000) 开始, 我国太阳物理界科学家已经为实现空间太阳观测倾注了近 30 年的不懈的努力。终于, 在 2018 年, 国内启动了第一颗空间太阳观测卫星——“先进天基太阳天文台” (Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S)(Gan 等, 2015) 项目, 如图 1.1, 预计 2021 年发射升空。该项目首次在同一颗卫星上实现太阳全日面矢量磁场、太阳耀斑高能辐射成像和 CME 的近日面的初发和传播的观测。ASO-S 卫星的发射将大大提升我国太阳物理发展水平。

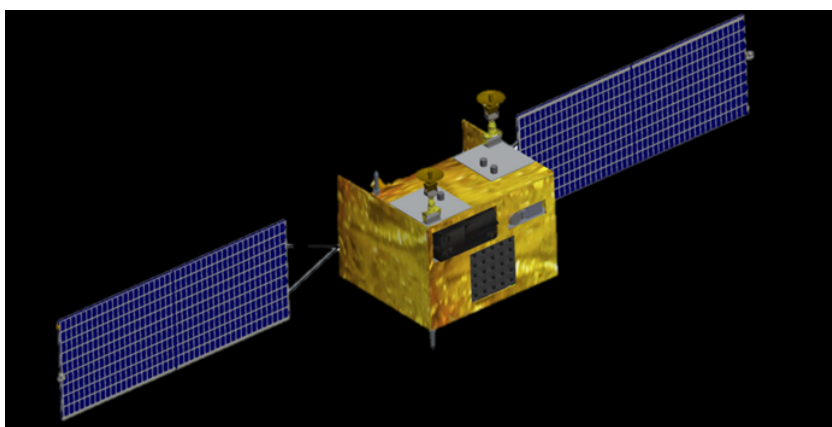


图 1.1 我国第一颗太阳观测卫星 ASO-S

Figure 1.1 The first solar observation satellite ASO-S of China.

为发挥新一代太阳观测设备的优势, 自两维实时光谱仪提出以来, 一直寻求空间化的机会。但仪器空间化对整个设备都提出了更高要求。两维实时光谱仪具有八个光学通道的复杂结构设计 (因此也称八通道滤光器), 最厚级及几个次厚级被八个通道所共用, 要求它们在选定的波长处的透过率同时为极大值, 并保持各级半宽为严格的  $2^n$  关系。为保证两维实时光谱仪中八通道各个干涉级之间的严格匹配, 除精密的光机结构设计外, 高精度恒温控制系统也具有同等重要的地位。温度波动会引起两位实施光谱仪中偏振元件误差, 使每个通道中各个晶体的透过谱线位置产生漂移, 透过带半宽发生微量变化, 造成各谱线不能按照预设关系严格匹配。因此, 要使两维实时光谱仪稳定工作在要求的窄带范围内, 达到预期观测目标, 就要求光学元件的温度稳定度必须控制在  $0.01^{\circ}\text{C}$  以内。仪器空间化的要求对高精度温控系统具有极大挑战, 因此本课题在高精度测温、保温、控

温、被控对象热分析等方面均开展了针对性的研究。

## 1.2 国内外研究现状

国内外对高精度温度控制系统均有研究。美国氢原子钟设计(彭科等, 2005)的恒温控制系统采用三级控温。由外至内精度逐步提高。最内层恒温精度达到了 $10^{-4}$  °C。但该系统结构设计复杂, 难以空间化。武汉地震局设计的高精度重力仪控温系统(吴艳霞等, 2008), 其稳定精度达到 0.0001°C。但是前提是系统要放在 0.1°C 恒温精度房间里。北京航空航天大学自动控制系(宋明刚等, 2001)采用 Fuzzy-PID 控制方法, 使以水或油为介质的恒温槽达到 0.01°C 的温控精度。恒温槽在结构形式上与复杂的滤光器相去甚远, 其恒温设计方案也不能直接应用于两维实时光谱仪。朱均超等(2018)等设计的高精度温控系统解决光学晶体产生的热沉积问题, 控制精度优于  $\pm 0.002$ °C。但半导体制冷器不能适用于结构复杂的控制对象。空间温度控制系统受限于空间环境, 在测控器件、结构设计、保温措施等方面均有不同程度的限制。针对空间液桥模型, 杨政秋等(2014)等设计了基于 DSP 变 PID 算法的空间温度控制系统。控制精度达到  $\pm 0.03$ °C, 但该研究使用 24 位模数转换器(AD)达到高分辨率的温度测量。24 位 AD 在空间应用中难以获取, 无法广泛应用。从可查的文献可以看出, 国内空间温控系统多针对空间相机(童叶龙等, 2012, 2014; 于涛等, 2015; 林克欢, 2017), 空间相机要求低温以保持其性能, 但控制精度要求均比较低, 温度波动均大于 0.1°C。

通过调研发现: 国内外针对不同结构设计的高精度温控系统均达到了较高精度。尤以美国氢原子钟和武汉重力仪的温控系统, 达到了 $10^{-4}$  °C 的超高精度, 但恒温结构都过于复杂, 在大型光学结构的空間化问题上难以采用。其它类型的温控系统精度稍低, 除温控对象与滤光器差别较大, 其在地面设计的电路设计原理亦不能直接迁移到空间应用系统中。从可查的文献看出, 国内空间化应用的温控系统多针对空间相机, 空间相机结构本身较小, 要求的恒温控制精度又比较低, 因此其借鉴意义不大。

在太阳观测设备方面, 温度控制系统也具有广泛的应用场景。美国亚利桑那大学 3.5m 的 WINY 望远镜, 采用液体冷却方式使得温控精度达到  $\pm 0.2$ °C。刘洋毅(2016)针对大口径地面太阳望远镜 CLST(中国大型地基太阳望远镜)的热光阑和主镜分别提出了高效制冷方案和模糊 PI 控制方式, 并在原理样机上展开试



验,平均温控误差分别达到了  $0.31^{\circ}\text{C}$  和  $0.288^{\circ}\text{C}$ 。在滤光器恒温控制方面,南京天仪厂(侯惠芳等, 1986)针对传统的圆柱形双折射滤光器设计实现了高精度温度控制系统,采用  $0.00002\Omega/^{\circ}\text{C}$  的锰铜丝作为加热与测温元件,锰铜丝采用双线无感绕法;使用模拟器件完成对温度测量与控制,并使用刻度为  $0.01^{\circ}\text{C}$  的水银温度计测试恒温状态,估读其温度控制精度达到  $\pm 0.005^{\circ}\text{C}$ 。该文还比较细致地研究了控制系统的电路设计、铜丝缠绕方式、保温设计等方面的滤光器温控问题,并达到了较高的控制精度。但受限于当时国内的电子学、控制工程等学科的发展水平,测试温度不能直观读出、控制形式采用模拟器件已经不适用于当前的发展趋势;且控制对象为结构相对简单的圆柱形滤光器,相较于结构复杂的两维实时光谱仪,差距较大。怀柔太阳观测基地从 2008 年开始,针对滤光器温控系统也做了一系列恒温控制实验。设计了以 ADuc7026 为主控芯片,24 位分辨率的 ADS1232 为高精度模数转换器,采用 PID 算法为控制系统,采用 PWM 驱动加热膜。李进开展了针对三通道望远镜滤光器恒温控制的初步研究,并在恒温筒上进行模拟控制实验,控制精度达到  $0.015^{\circ}\text{C}$ ;于佳在此基础上实现了两路温度读取、解决加热回路中 75NF75 的烧片问题等,在 PID 基础上进行了积分分离、抗积分饱和和积分慢调等研究,最后用在怀柔太阳磁场远镜(SMAT)滤光器上,实现了精度为  $0.01^{\circ}\text{C}$  的温度控制。

总之,在太阳观测设备方面,大型地基望远镜需要制冷系统维持低温减小光学镜面的形变;而滤光器需要主动加温来保证结构内部温度场恒定。在滤光器恒温控制方面,早在上世纪 80 年代就采用模拟器件完成了对简单对称结构的恒温控制设计;之后,怀柔太阳观测基地针对滤光器恒温控制系统有了新的研究发展。但截止目前,针对类似于具有复杂结构的两维实时光谱仪的空间化恒温控制系统研究很少,这也是本课题开展的前提及意义。

以往使用的滤光器(例如怀柔太阳观测基地的 35CM 磁场望远镜、SMAT 望远镜等)由于结构上只有一个通道,因此其外部结构设计多采用对称结构的圆柱状设计,如图 1.2b 所示,这种结构可以获取较好的恒温控制效果。怀柔太阳观测基地的三通道滤光器已经无法使用这种严格轴对称的圆柱体来实现结构设计,但是仍然可以采用长方体对称结构,实际使用过程中发现这种结构体的温控系统设计难度已经大大增加,采用原来应用与轴对称滤光器的温控方案,系统的稳定效果已经大大下降。而两维实时光谱仪(如图 1.2a 所示)有 8 个通道,如图且要

求各通道光程相同,因此无法采用上述的任何一种对称结构,同时两维实时光谱仪的体积( $660*660*150$ ,单位:毫米)远远大于传统的滤光器( $150*150*375$ ,单位:毫米),因此,其高精度温控系统设计的难度大大超过了以往的任何一个系统。不规则的形状和庞大的体积对温控系统的设计提出了巨大挑战,需要进行专门研究和实验。

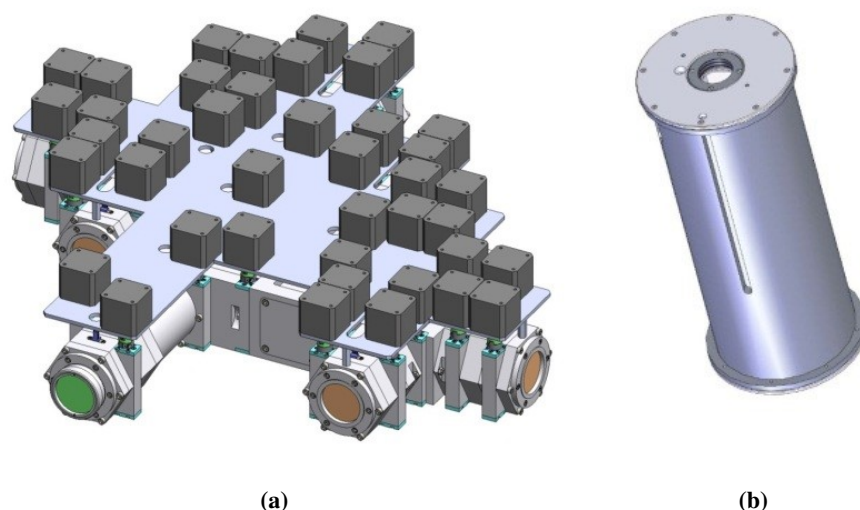


图 1.2 两维实时光谱仪结构与传统滤光器结构比较。(a) 两维实时光谱仪结构, (b) 传统滤光器结构。

Figure 1.2 Comparison structure of two-dimensional real-time spectrometer with traditional filter.(a) Two-dimensional real-time spectrometer, (b)Traditional filter.

两维实时光谱仪温控系统的关键问题是:在严苛的空间环境中,在电子学器件选型受限的条件下,依旧实现异型结构体的精密的、稳定的温控系统设计。本课题在研究过程中,将对复杂结构的温控方法,空间化的高精度的温度测量技术等深入研究,这些研究的成果都可以推广到工业、农业、生物医药等应用领域,尤其是部分高精尖的温度控制领域及空间化温控应用中。

### 1.3 本文研究内容和章节安排

#### 1.3.1 研究内容

本课题针对两维实时光谱仪展开高精度温度控制系统空间化研究,使其在空间中实现温度长期稳定,在设定温度下,温度稳定度优于  $0.01^{\circ}\text{C}$ 。两维实时光谱仪是新型的太阳观测仪器(章海鹰, 2011),针对这一新设备,为实现高精度温

度控制，需要从原理分析、工程实践综合分析其中的研究内容与细节。因此，为完成这一目标，本课题将研究内容分为以下四个部分：高精度热结构设计，多路高精度温度控制算法，多路高精度温度测量方法，温度传感器标定。

1. 高精度热控方式研究: 恒温控制的本质即对热传递的控制，理论上，如果对物体的热量传递方式及大小进行精确控制，就可以使温度控制对象的温度维持在需要的范围内。但特定的物体有着特定热量的传递模式，因此，研究热量传递过程对实现高精度温度控制有着重要作用。在真空环境，结构的传热特性不同于地面，本研究主要通过有限元热分析 (Ma 等, 2012) 手段，来解决两维实时光谱仪复杂结构的热设计问题，提出并优化热控方案。

2. 可空间化的高精度温度测量方法: 高精度温度测量是温度控制的关键前提，温度测量不准确、分辨率低，就无法实现对温度准确、精密地得控制。在空间环境，受高分辨 AD 使用限制，无法采用常规设计方案。因此，研究可空间化的高精度测温方法尤为重要，该内容又具体包含温度传感器原理以及小信号测量方案设计等内容。

3. 高精度温度控制算法: 温度控制算法是温度控制系统的核心 (郝用兴 等, 2013)，针对不同的被控对象，选用合适的控制算法十分重要。因此，本文要通过对比多种温度控制算法特性，分析其中优劣，选择简单可靠，控制效果满足需求的控制算法。

4. 温度传感器标定: 温度传感器标定是多路温度控制方案实现的基础，在同一温控系统内，不同温度传感器之间误差过大会增大被控目标温度场不均匀性，严重时可能导致温控系统无法稳定，因此，需要通过温度传感器相对定标，减小各传感器之间的测量误差，为实现多通道高精度温控奠定基础。

### 1.3.2 章节安排

本文研究内容主要通过以下几个章节展开介绍：

第一章：论述本课题的研究内容和意义，通过介绍国内外温度控制研究历史与现状，了解本课题需要研究的主要内容和关键技术，最后介绍本文的章节安排。

第二章：通过传热原理，分析在空间环境两维实时光谱仪的传热特性；建立两维实时光谱有限元模型，对比在不同热控方案、不同外界温度下的温度场，并最终确定多通道温度控制方案为本课题的温控策略。

第三章：本章主要研究空间化的高精度温度控制原理。高精度温度控制原理包含温度测量原理和温度控制算法。温度传感器是温控系统的核心前端，通过比较不同传感器特点，选用具有高灵敏度的热敏电阻作为感温元件，针对选用的热敏电阻推导高精度测温原理；通过对比不同温度控制算法特点，选用 PID 算法作为主控算法，并针对本课题进行优化设计。

第四章：温度传感器标定是实现多通道温度控制的关键基础，本章采用简便的实验设计方案，实现了温度偏差小于  $0.03^{\circ}\text{C}$  的温度标定工作。

第五章：本章主要介绍高精度温度控制系统的软硬件实现方案，主要包括高精度测温电路设计、温度控制软件和监测软件的实现。

第六章：设计基于三通道望远镜与 FMG 液晶偏振分析器的恒温测试实验。在三通道望远镜滤光器项目实验应用中，恒温精度达到  $0.01^{\circ}\text{C}$ ，满足了两维实时光谱仪高精度温度控制的精度需求；在 FMG 液晶偏振分析器实验中，在真空环境与非真空环境的进行温控实验，实验结果均优于项目要求；并设计了液晶搭载实验，证实了实现的温控系统在高低温真空环境下依旧保持良好的稳定性。

第七章：总结全文，对本课题内容进行整体分析，提出在课题进展中可以优化设计的内容，并对高精度温控系统的未来发展进行展望。

## 第2章 有限元热分析

本课题研究对象是两维实时光谱仪，因此，对其热学结构特性分析研究是课题得以顺利开展的首要前提，直接关系到温控系统的具体设计形式。

高精度的温控目标即维持被控目标温度场不变，其核心是保证被控对象的边界温度稳定，当两维实时光谱仪的外边界温度一定时，其内部温度场即可视为确定。但两维实时光谱仪体积大、结构复杂，属于半开放的非对称结构设计，即光学器件设计必要的通光口径，该位置的温度场变化无法确定。传统的热分析方法，导热分析解法与数值解法已经不能处理如此复杂的传热问题。因此，本章内容借助于有限元热分析软件 ANSYS Workbench，来分析两维实时光谱仪在不同条件下的温度分布，进而指导实现并优化复杂结构的热设计方案。

Workbench 是 ANSYS 公司开发的协同仿真环境 (Geni, 2018)，解决产品研发过程中 CAE 软件的异构问题。Workbench 仿真平台能对复杂机械系统的结构静力学、结构动力学、刚体动力学、流体动力学、结构热、电磁场以及耦合场等进行分析模拟 (贾东升, 2010)。与传统仿真软件有所不同，Workbench 具有客户化、集成化、参数化三大特点，在数字化工程背景下，Workbench 给产品研发、学术研究带来革命性的变化。

### 2.1 两维实时光谱仪中的传热形式

传热学 (杨世铭 等, 2006) 是研究由温度差异引起能量转移物理现象的学科。热传递广泛存在于自然界和人类生产生活中。热量传递的基本方式主要有三种：热传导，热对流和热辐射。在实际的传热过程中，这三种方式往往是伴随着进行的。

热传导 (杨世铭 等, 2006) 是在物体内部依靠微观运动的传热现象，在固体、液体、气体中均可发生。热对流是发生在流体中热传递现象，其主要特点是只能发生在流体 (气体和液体) 之中，且必然同时伴有流体本身分子运动所产生的导热作用。热辐射发生在一切高于绝对零度的物体中，温度越高，热辐射能力越强。相同物体的热辐射能力在真空最强，在空气中的热辐射能力较弱。

当两维实时光谱仪在地面使用时，热辐射作用较弱，热传递形式主要为物体

内部的热传导以及与外界空气直接的热对流；在太空环境中，两维实时光谱仪的传热形式为热传导和热辐射。

## 2.2 两维实时光谱仪有限元模型

两维实时光谱仪具体结构如图2.1所示，其主要结构部件是由非对称的机械支撑结构，数百块光学晶体，填充硅油，40 多个电机等组成的。在有限元分析软件中建立详细的模型十分复杂，细小结构对温度场影响有限，且结构部件越多，使得仿真分析计算量大大提升，热分析效率降低。因此，本文采用 ANSYS Workbench 完成对两维实时光谱仪的三维简化建模，忽略结构中的复杂的机械连接部件，只保留机械结构与光学元件，结构模型如下图2.2。

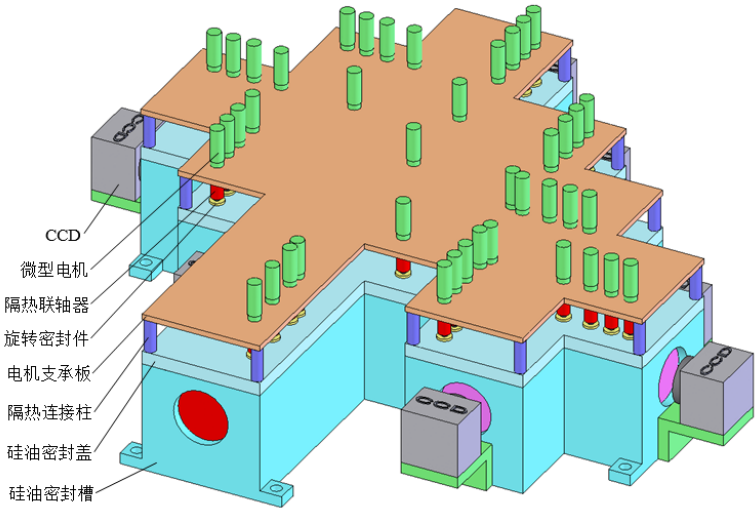


图 2.1 两维实时光谱仪结构图。

Figure 2.1 Structure of two dimensional real time spectrometer.

在热分析中，对物体进行一系列的热学参数设置，主要材料参数见下表2.1：

表 2.1 两维实时光谱仪主要材料传热参数。

Table 2.1 Main material heat transfer parameters of two dimensional real time spectrometer.

材料名称	比热	密度	导热系数
光学晶体	890	2300	1.4
铝合金	880	2700	146
隔热材料	3000	20	0.04



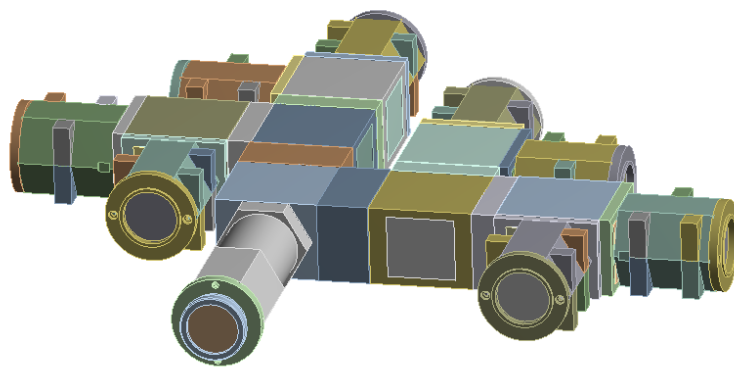


图 2.2 两维实时光谱仪模型图。

Figure 2.2 Two dimensional real time spectrometer model.

在两维实时光谱仪空间化高精度温控系统中，不同的热控设计、外界环境，与温控系统的稳定性密切相关。通过有限元热分析手段，可以直观有效地比较多种条件下两维实时光谱仪温度场变化，制定合理的热设计方案以满足系统整体热设计要求。

### 2.3 热控方案的影响

不同的热控形式会导致两维实时光谱仪有不同的恒温表现，与温度场分布的均匀性、稳定性密切相关。本方案设计两种加热膜贴附方式，第一种贴附面少，结构相对简单；第二种贴附面多，结构相对复杂。通过热分析，评估简单、复杂方式下对温度场的分布特点，进而决定采用哪种形式。

方案一：覆盖主要覆盖两维实时光谱仪的上、下两个大面以及面积较大的侧面，如下图2.3所示。设置表面热载荷温度为  $35^{\circ}\text{C}$ ，真空环境温度为  $22^{\circ}\text{C}$ 。其外部温度场如下图所示2.4所示，内部光学结构温度场如下2.5所示，结构中温度最低点出现在光谱仪进光口与出光口，温度范围均为  $32.898^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ ，最大温差为  $2.102^{\circ}\text{C}$ 。

方案二：将光谱仪各进光路与出光路结构中的面积较大的面也贴附加热膜，新增后加热面如下图所示2.6所示。其外部温度场如下图所示2.7所示，内部光学结构温度场如下2.8所示，温度范围为  $34.018^{\circ}\text{C}\sim 35.007^{\circ}\text{C}$ ，最大温差为  $0.989^{\circ}\text{C}$ 。

对比图2.5和图2.8，可看出当加热面较多时，两维实时光谱仪的温度场均匀性得到明显改善，结构中最高温与最低温的差值也显著减小。因此，仅采用复杂

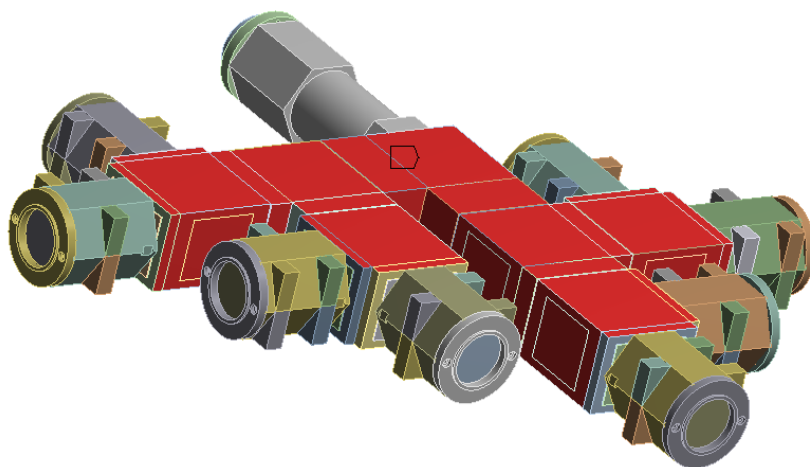


图 2.3 加热膜贴附简单方案。

Figure 2.3 Simple scheme of heating film attachment.

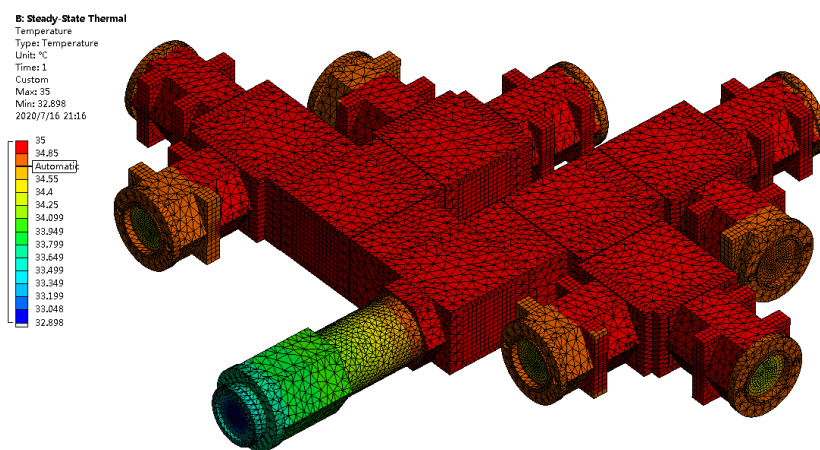


图 2.4 简单加热方案的两维实时光谱仪温度场。

Figure 2.4 Temperature field of two dimensional real time spectrometer with simple heating scheme.



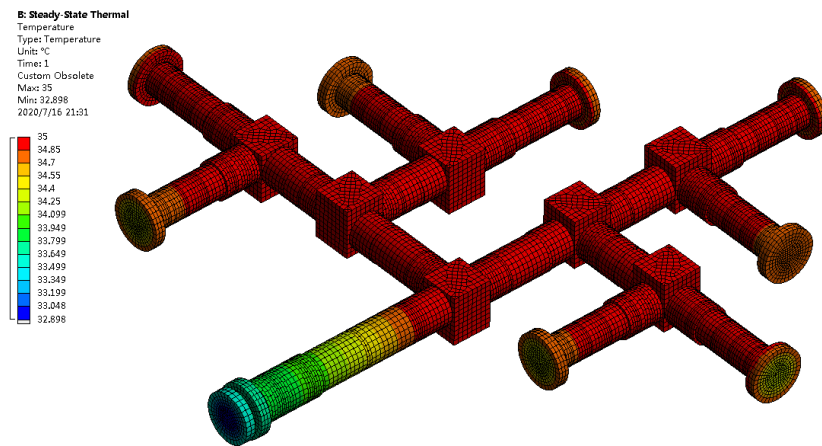


图 2.5 简单加热方案的两维实时光谱仪光学晶体温度场。

Figure 2.5 Optical crystal temperature field of two dimensional real time spectrometer with simple heating scheme.

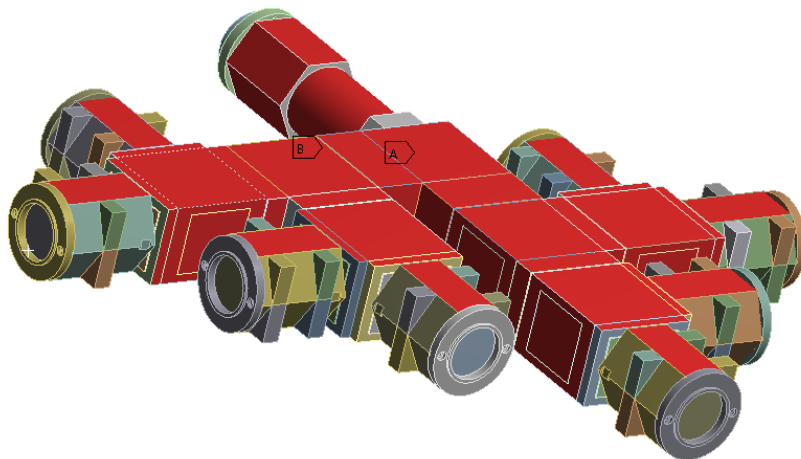


图 2.6 加热膜贴附复杂方案。

Figure 2.6 Complex scheme of heating film attachment.

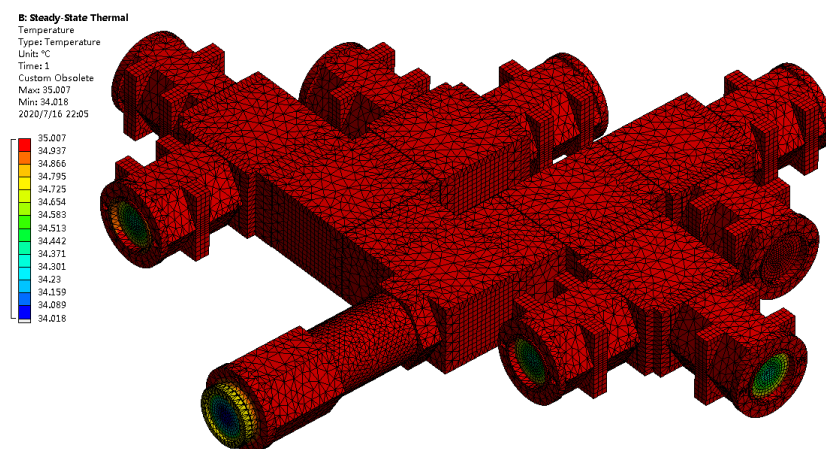


图 2.7 复杂加热方案的两维实时光谱仪温度场。

Figure 2.7 Two-dimensional real-time spectrometer temperature field with complex heating scheme.

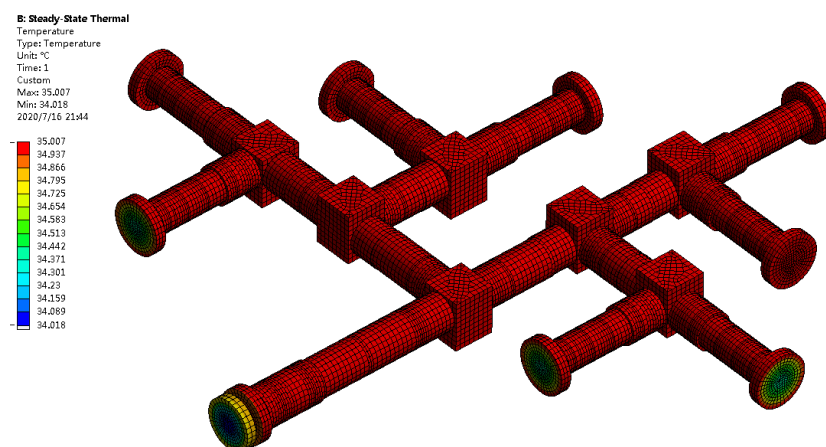


图 2.8 复杂加热方案的两维实时光谱仪光学晶体温度场。

Figure 2.8 Temperature field of optical crystal in two dimensional real time spectrometer with complex heating scheme.

方案分析之后不同情况下的温度分布特性。

## 2.4 环境温度的影响

外界温度变化会改变结构的热辐射强度，从而引起温度场的变化。在太空环境，卫星为两维实时光谱仪提供一个相对稳定的外部环境，假设外部温度变化范围为  $18^{\circ}\text{C} \sim 26^{\circ}\text{C}$ 。分析当真空中环境不同时，对两维实时光谱仪温度场的影响。在上节  $22^{\circ}\text{C}$  的温度场分析基础上，又分析两维实时光谱仪在  $18^{\circ}\text{C}$  和  $26^{\circ}\text{C}$  时的温度场分布。

当环境温度为  $18^{\circ}\text{C}$  时：两维实时光谱仪温度场如下图2.9所示，内部光学晶体温度场如下图2.10所示，温度范围为  $33.789^{\circ}\text{C} \sim 35.009^{\circ}\text{C}$ ，最大温差  $1.22^{\circ}\text{C}$ 。

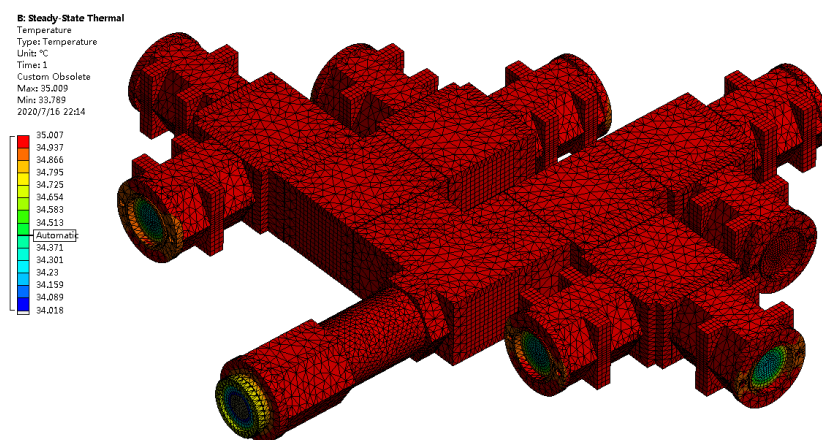


图 2.9  $18^{\circ}\text{C}$  时两维实时光谱仪温度场

Figure 2.9 Temperature field of two dimensional real time spectrometer at  $18^{\circ}\text{C}$ .

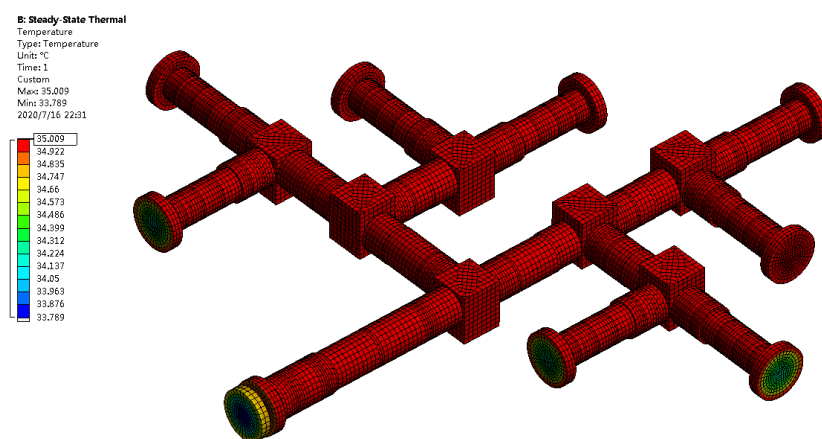


图 2.10  $18^{\circ}\text{C}$  时两维实时光谱仪光学晶体温度场。

Figure 2.10 Optical crystal temperature field of two dimensional real time spectrometer at  $18^{\circ}\text{C}$ .

当环境温度为  $26^{\circ}\text{C}$  时：两维实时光谱仪温度场如下图2.11所示，内部光学晶体温度场如下图2.12所示，温度范围为  $34.307^{\circ}\text{C}\sim 35.0^{\circ}\text{C}$ ，最大温差为  $0.693^{\circ}\text{C}$ 。

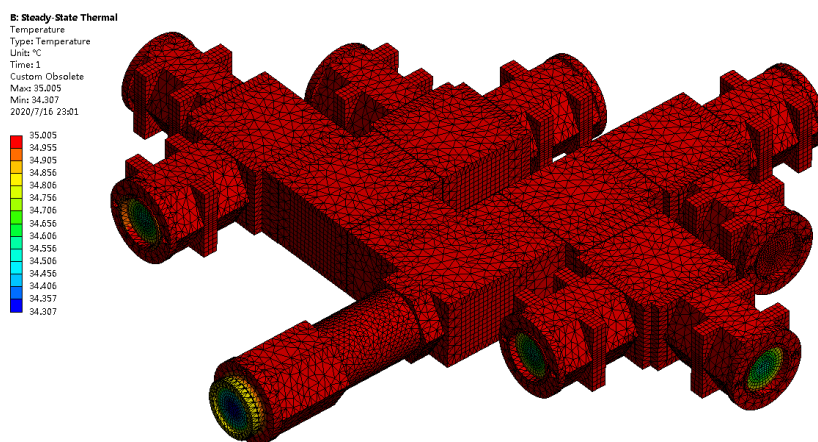


图 2.11  $26^{\circ}\text{C}$  时两维实时光谱仪温度场

Figure 2.11 Temperature field of two dimensional real time spectrometer at  $26^{\circ}\text{C}$ .

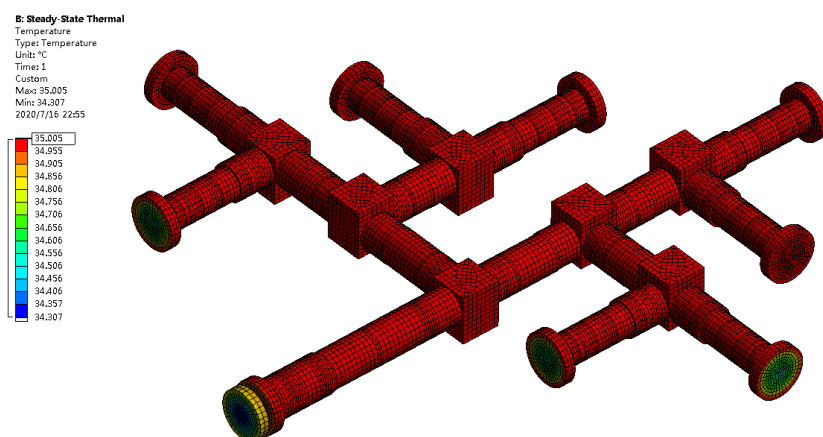


图 2.12  $26^{\circ}\text{C}$  时两维实时光谱仪光学晶体温度场。

Figure 2.12 Optical crystal temperature field of two dimensional real time spectrometer at  $26^{\circ}\text{C}$ .

结合上节两维实时光谱仪在  $22^{\circ}\text{C}$  时的温度场分析，可以明显得出，在设定温度低于环境温度的情况下，当外界温度低时，光谱仪温度场不均匀性增大；外界温度高时，温度场均匀性变好。因此，在具体保温措施实施时，需要对温度漂移较大的位置着重保护。

## 2.5 多通道控制方案的确定

在高精度温度控制领域，常用的加热形式有两种：加热丝和加热膜。加热丝多采用铜丝，缠绕复杂，不适合体积巨大、结构复杂的两维实时光谱仪。因此本课题采用加热膜作为加热元件，聚酰亚胺薄膜电热膜(彭方汉等, 2014)具有十分优秀的绝缘强度、抗电强度、热传导效率和稳定性。已经广泛应用于加热领域并能够获得相当高的温度控制精度，并成熟应用在了在航天领域。

假设在理想条件下，一片加热膜可以看作时均匀产热的发热面，即单位面积的热功率相等。以此为前提，在真空环境温度为  $22^{\circ}\text{C}$ ，当在如图2.8所示的所有加热面中施以  $0.0222\text{mw}/\text{m}^2$  的相同的热载荷时，两维实时光谱仪温度场分布如下图2.13所示，内部温度场如下图2.14所示。从图中可以看出，当所有加热面都采用同一功率加热时，其温度场分布均匀性要远低于图2.7所示温度场，温度范围在  $32.898^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$  之间，最大温差为  $2.102^{\circ}\text{C}$ ，大于图2.7中  $0.982^{\circ}\text{C}$  温差。即：若两维实时光谱仪采用单通道温度控制方式，温度控制均匀性较差。

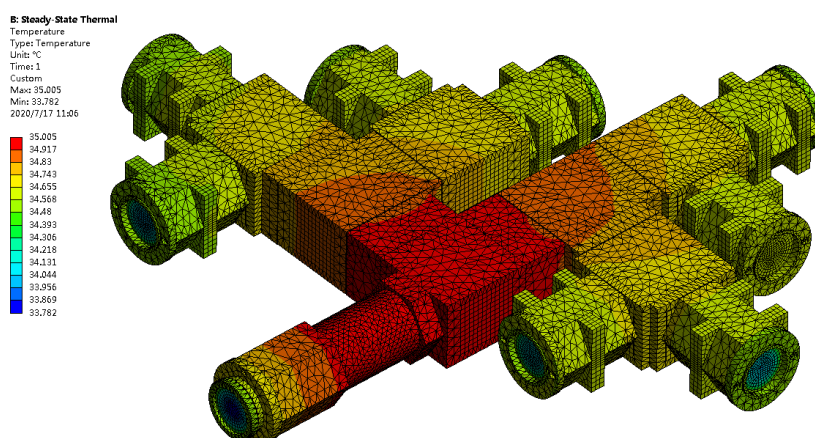


图 2.13 单区域热载荷时两维实时光谱仪温度场

Figure 2.13 Temperature field of two dimensional real time spectrometer under single region thermal load.

为了改善两维实时光谱仪温度场分布，从图2.13可以看出，两维实时光谱仪温度场表面大致分为四个颜色区块（红、橙、黄、绿），根据温度颜色标注区分的不同温度范围，可以将加热膜贴附位置分为四个区域，每个区域采用独立温度控制通道。若在四个区域分别施加不同的热载荷，可以提高其温度场均匀性。如下图2.15为四个加热区域的划分方式。

通过多次试验分析，当四个加热区域分别以不同功率加热时，会使两维实时

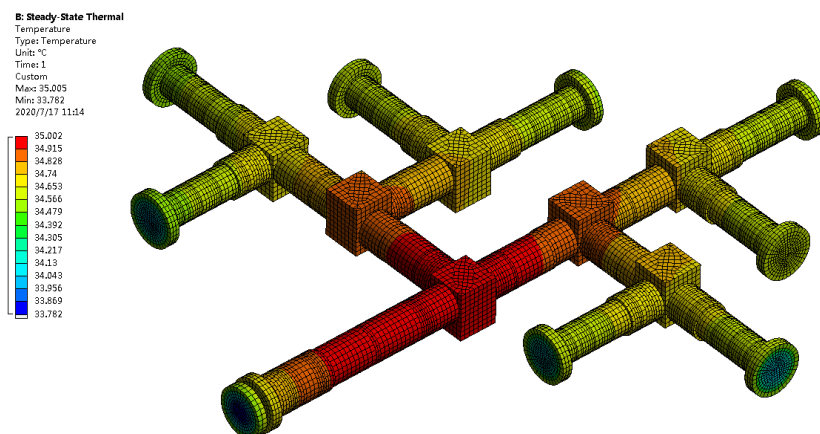


图 2.14 单区域热载荷时二维实时光谱仪内部温度场

Figure 2.14 Internal temperature field of two-dimensional real-time spectrometer under single region thermal load.

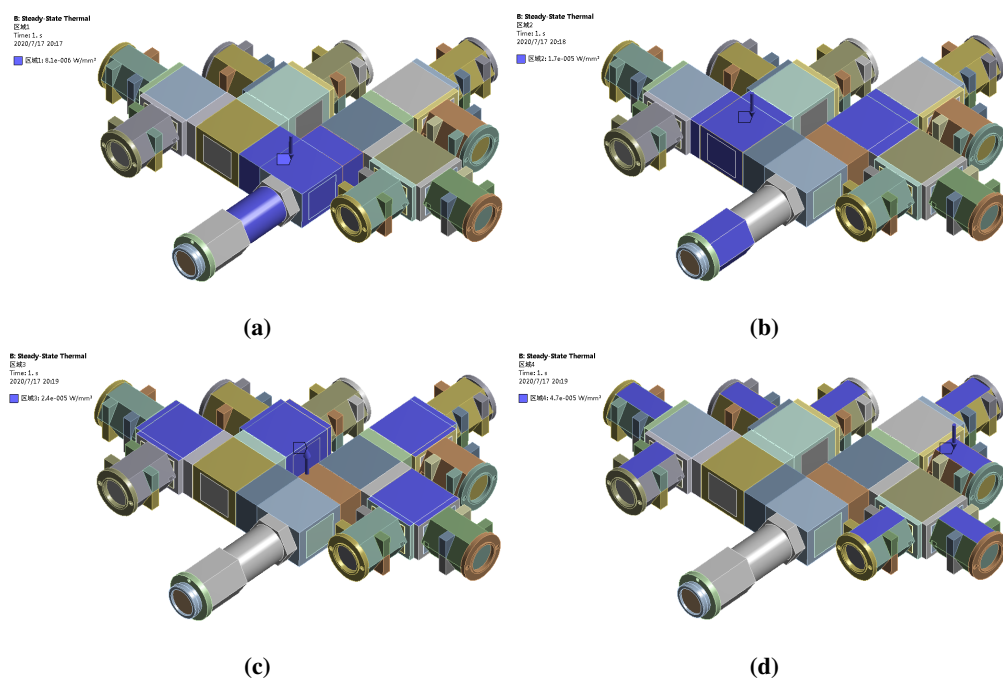


图 2.15 二维实时光谱仪加热区域划分。(a) 区域 1, (b) 区域 2, (c) 区域 3, (d) 区域 4。

Figure 2.15 Heating region division of two dimensional real time spectrometer.(a) Area 1, (b)Area 2, (c)Area 3,(d)Area 4.



光谱仪的温度场均匀性变好，如下图2.16为温度场分布，温度范围在  $33.678^{\circ}\text{C}$ ~ $35.136^{\circ}\text{C}$ ，最大温差为  $1.458^{\circ}\text{C}$ ，小于采用单一载荷时的  $2.102^{\circ}\text{C}$ ，温度分布均匀性得到改善。从下图2.17对比图2.8也可以看出，在四路加热模式下，内部晶体的温度场也更加均匀。

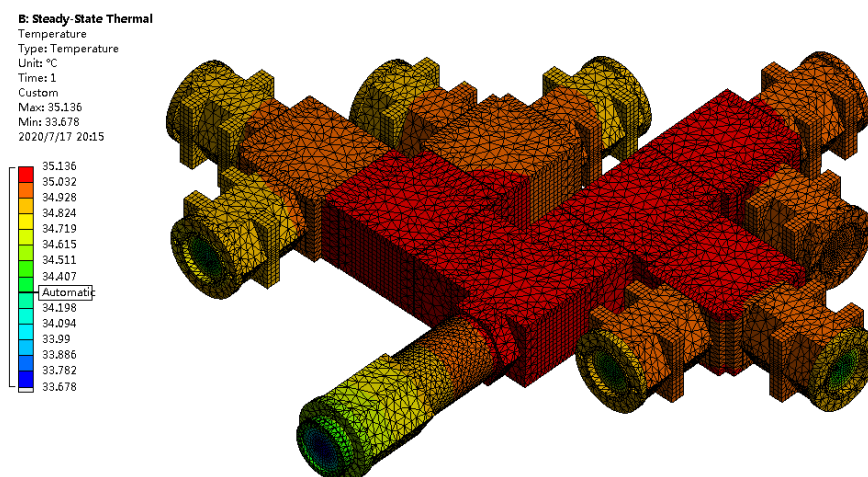


图 2.16 四路热载荷时两维实时光谱仪温度场

Figure 2.16 Temperature field of two dimensional real time spectrometer under four thermal loads.

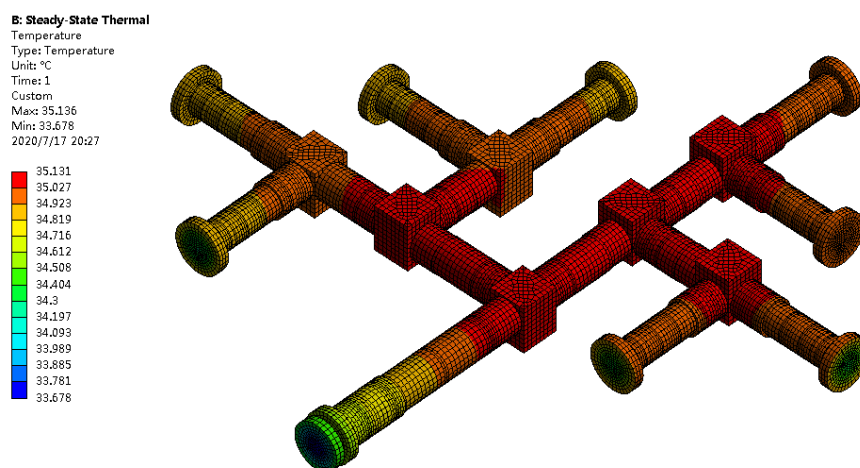


图 2.17 四路热载荷时两维实时光谱仪内部温度场

Figure 2.17 Inner temperature field of two dimensional real time spectrometer under four thermal loads.

因此，基于以上分析，本课题拟定四通道温度测量与控制策略，四个测温控温区域即采用如图2.15方式划分，从而实现两维实时光谱仪高精度温度控制。



## 2.6 本章小结

本章通过分析三种基本热传递原理，结合两维实时光谱仪空间应用的环境特点，确定两维实时光谱仪的传热方式主要为热传导和热辐射。并针对其特殊结构采用 ANSYS 软件进行了有限元热分析，形成如下结论：1) 设计优化的热控方案可以明显改善、提高系统温控稳定精度；2) 外界温度变化会对光谱仪稳定精度产生明显影响——指导保温层热实施方案；3) 形成四路温控策略——通过划分温控区块的温度控制方式可以显著提升温度场均匀性。在上述分析指导下，课题开展了后续的电子学系统、智能化控制算法等的研究工作。



## 第3章 高精度温度控制原理

高精度温度控制原理是实现两维实时光谱仪高精度温度控制系统的理论支撑。结合经典控制理论和两维实时光谱仪热分析结果,研究认为高精度温度控制系统主要包含四大部分:温度测量读取、温度控制算法、温控输出形式以及热设计方案。本章将主要围绕前两个内容进行展开讨论。

为实现高精度温度测量,首先,研究分析温度传感器特性,不同类型的温度传感器适合的使用场景不同,采用最合适的温度传感器,是获得高精度温度数据的根源;其次,高精度的温度读取电路是高精度测温的关键一环,设计可空间化的高精度温度数据读取电路是精密温度读取实现的主要途径;第三,温度控制算法是实现系统温度稳定的核心,通过对比研究,选择足够简单稳定、稳态误差小的积分分离 PI 算法,这是实现空间环境下长时间恒温稳定的关键。

### 3.1 可空间化的高精度温度测量原理

高精度温度测量是本课题实现的重要基础。本节研究在空间使用环境限制条件下,实现高精度温度测量的原理。高精度温度的测量离不开温度传感器自身特性与温度读取电路设计方案。为实现可空间化的高精度温度测量电路,课题从原理角度对这两方面内容进行分析研究。

#### 3.1.1 温度传感器原理

温度是国际单位制中 7 个基本物理量之一,在工业生产与生活中,温度是一必不可少的物理参量(贾伯年, 2007)。在不同场合,需要使用不同的温度传感器完成测量任务。不同的温度传感器之间特性差异巨大。因此,研究了解各类温度传感器的特性,是解决实际生产生活中相关任务时必不可缺的环节。针对两维实时光谱仪,本课题分析对比了各类温度传感器的优缺点,挑选合适的类型,来保证高精度的温度测量,进而实现高精度温度控制。

常用的温度传感器类型有热电偶、热敏电阻、热电阻、数字温度传感器几种类型(陈慧明, 2004)。不同类型温度传感器的各项特性均有差异,其对比表如下表3.1(刘畅生, 2005)所示:

通过上表对比,不同温度传感器均有优缺点。在两维实时光谱仪高精度温控

表 3.1 温度传感器对比表。

Table 3.1 Temperature sensor comparison table.

种类	测温范围	精度	线性度	灵敏度	功耗	电路系统
热电偶	-267~2316	好	好	差	低	复杂
热敏电阻	-100~500	依赖校准	最差	最好	高	与精度要求有关
热电阻	-250~750	最好	好	差	高	复杂
数字温度传感器	-55~200	好	最好	好	低	最简单

问题中，温度传递本身具有很大的延迟效应，该特性不利于控制效果的稳定。传感器灵敏度过低将加重这一趋势，因此，灵敏度是其中重要的参数。热敏电阻在众多种类的温度传感器中灵敏度最高，因此被本课题选择作为温度传感器。

热敏电阻有以下主要特点 (刘继民 等, 2011):

- 灵敏度较高，电阻温度系数要比金属大  $10\sim 100$  倍以上，能检测  $10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度变化；
- 工作温度范围宽，常温器件适用于  $-55\sim 315^{\circ}\text{C}$ ，高温器件适用温度高于  $315^{\circ}\text{C}$ （目前最高可达到  $2000^{\circ}\text{C}$ ），低温器件适用于  $-273\sim -55^{\circ}\text{C}$ ；
- 体积小，能够测量小尺寸结构内的温度；
- 使用方便，电阻值可在  $0.1\sim 100\text{k}\Omega$  间任意选择；
- 易加工成复杂的形状，可大批量生产；
- 稳定性好、过载能力强。

分析两维实时光谱仪高精度温控系统的使用特点，以及结合热敏电阻温度传感器的特性。可以发现，热敏电阻十分契合本课题的使用需求。首先，高灵敏度使得高精度温度测量易于实现；其测温范围也包含温控点；小体积意味着可以嵌入仪器表面而对仪器本身的机械、热学特性的影响降到最低；电阻值方便选取对后续电路设计放宽了要求；良好的稳定性可以满足空间环境的使用需求。对于热敏电阻的缺陷，即测温精度可以依赖于电路设计来提高。

按照温度系数不同，热敏电阻可分为正温度系数热敏电阻器（PTC）和负温度系数热敏电阻器（NTC）。PTC 在温度越高时电阻值越大，NTC 在温度越高时电阻值越低，它们同属于半导体温度传感器器件。

本文选取美国生产的一款 Dale01T1002 型 NTC 热敏电阻，该款温度传感器

具有稳定性高,热容量小,灵敏度高等优点。其电阻-温度 (R-T) 曲线满足 Steinhart-Hart 方程 (Equation, 1999), 如式3.1。式中, A, B, C 均是常数。

$$1/T = A + B \ln(R) + C[\ln(R)] \quad \dots (3.1)$$

(1) 引线长度影响分析:

热敏电阻温度传感器是电阻型温度传感器,在实际使用温度测量时,温度测量引线往往有几米到数十米长,如此长的引线足以对温度测量引起偏差,因此,本文接下来将通过计算分析,估计引线长度对此款热敏电阻的影响特点。首先,记 Steinhart-Hart 方程为  $S(R)$ , 则求得的温度比实际温高摄氏度:

$$f(t) = \Delta T = S(R + R_L) - S(R) \quad \dots (3.2)$$

求关于  $R$  和  $R_L$  的偏导:

$$\frac{\partial f}{\partial R_L} = \frac{\partial S(R + R_L)}{\partial R_L} + 0 \quad \dots (3.3)$$

$$\frac{\partial f}{\partial R} = \frac{\partial S(R + R_L)}{\partial R} - \frac{\partial S(R)}{\partial R} \quad \dots (3.4)$$

存在极值需满足极值必要条件:

$$\frac{\partial f}{\partial R} = \frac{\partial S(R + R_L)}{\partial R_L} = 0, \frac{\partial f}{\partial R_L} = \frac{\partial S(R + R_L)}{\partial R} - \frac{\partial S(R)}{\partial R} = 0 \quad \dots (3.5)$$

而:

$$\frac{\partial S(R + R_L)}{\partial R_L} = -S^2(R + R_L) \left( \frac{C_2}{R + R_L} + \frac{3 * C_3 \ln^2(R + R_L)}{R + R_L} \right) < 0 \quad \dots (3.6)$$

且:

$$\frac{\partial^2 S(R)}{\partial^2 R} = 2 * S^3(R) \left( \frac{C_2}{R} + \frac{3 * C_3 \ln^2 R}{R} \right)^2 + S^2(R) \left[ \frac{C_2}{R^2} + \frac{3 * C_3 \ln R}{R^2} (\ln R - 2) \right] \quad \dots (3.7)$$

$$\frac{\partial^2 S(R)}{\partial^2 R} > 0 \quad \dots (3.8)$$

$$\frac{\partial S(R + R_L)}{\partial R} \neq \frac{\partial S(R)}{\partial R} \quad \dots (3.9)$$

所以,该方程的极值在只能在边界点上,如下图3.1 是  $f(t)$  关于  $R$ 、 $R_L$  的曲面图。为方便观察,取  $R_L$  的几个典型值,绘制曲线图如下图3.2。从图中可以看

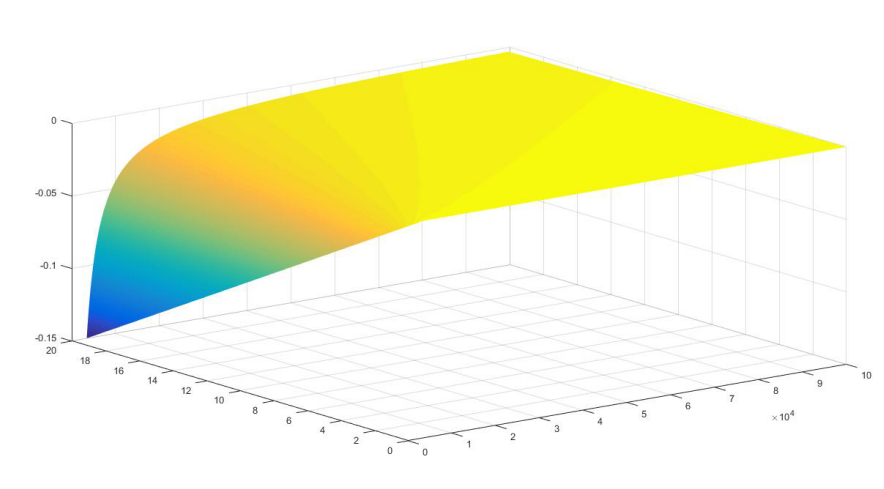


图 3.1 测温误差关于传感器阻值  $R$  与导线阻值  $R_L$  的曲面图。

Figure 3.1 Surface graph of Temperature measurement error about sensor resistance  $R$  and conductor resistance  $R_L$ .

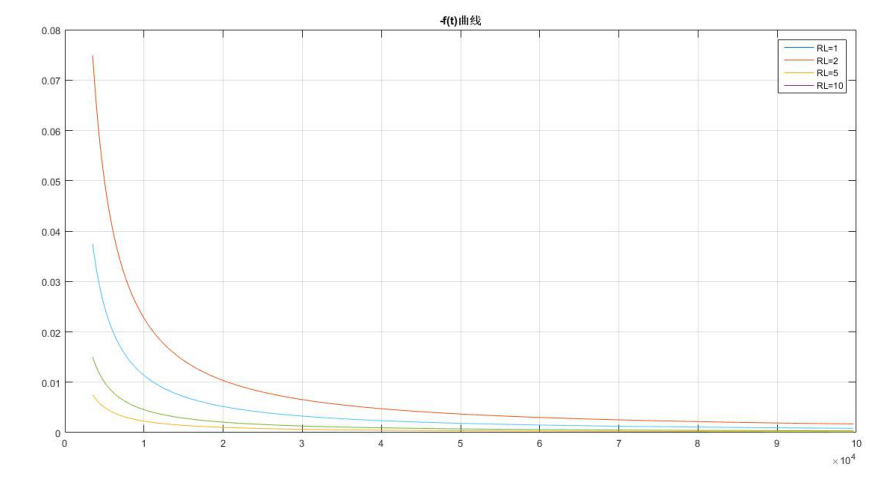


图 3.2 导线阻值  $R_L$  一定时的测温误差曲线。

Figure 3.2 The error curve of temperature measurement when the resistance of conductor  $R_L$  is fixed .

出，NTC 型热敏电阻温度越低（传感器阻值越大），引线越短（线缆阻值越小）时，温度传感器测温误差越小。

### （2）自热效应影响分析：

热敏电阻为电阻型温度传感器，当其通过电流，由于自身阻值消耗一定功率从而发热，这种现象为温度传感器的自热效应(张洁天 等, 2002)。自热效应会引起温度测量误差，影响高精度温度测量结果。假设通过热敏电阻  $r$  的电流为  $i$ 、表面积为  $s$ ，温控过程达到平衡后，温控对象单位面积的热功率为  $P$ ，为防止自热效应对温度测量影响过大，应当满足式3.10：

$$\frac{i^2 * r}{s} \ll P \quad \dots (3.10)$$

因此，为了减小热效应，可以从减小  $i$  和增大  $s$  入手，减小  $i$  的方式即减小参考电压；增大  $s$  的本质即是为提高温度传感器的散热速率，当传感器选定时，无法改变其表面积，因此，在使用温度传感器时，可以均匀充分地涂导热硅胶等导热材料，减小温度传感器与测温点的热阻，从而提高其散热效率。

### 3.1.2 空间高精度测温原理

高精度温度测量是高精度温度控制的前提，当传感器选定后，测温精度依赖于测温电路设计。在地面应用时，24 位高分辨率的 AD 器件应用十分普遍，甚至有 32 位 AD 器件可以选择，所以，在地面实现高精度温度测量相对简单。但在空间应用中，受限于空间器件仅有低位 AD 可以选择，采用常规方案无法满足本课题的高精度测温需求。因此，本节内容从电路原理角度分析，来讨论如何提高温度测量精度以满足本课题空间化应用的使用需求。

对于热敏电阻型温度传感器，高分辨率的温度测量即等价于高分辨率的阻值测量。高分辨的阻值测量又进一步转化为对电压的测量。为实现在空间环境的微小电压变化的测量，设计在 AD 前辅以放大电路，来实现对微小信号的采集。

本文采用的温度传感器是负温度系数热敏电阻，其  $R$ - $T$  曲线如公式3.11 所示，其中  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  均是常数。

$$T = \frac{1}{a + b * \log r + c * (\log r)^3} - d \quad \dots (3.11)$$

将该传感器接入等臂电桥如图3.3电路中，若电桥参考电压为  $V_{ref}$ ，桥臂阻

值为  $R$  电桥输出电压  $u$  大小为:

$$u = V_{ref} \left| 0.5 - \frac{r}{R+r} \right| \quad \dots (3.12)$$

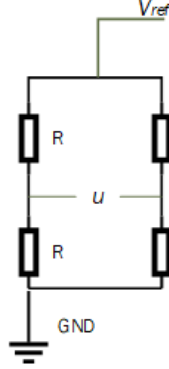


图 3.3 电桥电路。

Figure 3.3 Bridge circuit.

当传感器由于温度变化较小量  $\Delta t$  引起阻值变化  $\Delta r$  时, 电桥输出电压变化约为:

$$\Delta u = V_{ref} \frac{\Delta r R}{(R+r)(R+r+\Delta r)} \approx V_{ref} \frac{\Delta r R}{(R+r)^2} \quad \dots (3.13)$$

经过放大电路放大  $A$  倍, AD 输入端的电压变化量为  $\Delta u$ , AD 量程为  $U_R$ , 为满足足够精度的温度测量,  $A$  应满足的不等式为:

$$A V_{ref} \frac{|\Delta r| R}{(R+r)^2} \geq \frac{U_R}{2^B} \quad \dots (3.14)$$

同时为满足一定量程的温度测量, 应满足如下不等式:

$$A u \leq U_R \quad \dots (3.15)$$

由公式 3.14、3.15 得, 即  $A$  满足:

$$\frac{U_R}{2^B} \frac{(R+r)^2}{V_{ref} |\Delta r| R} \leq A \leq \frac{U_R}{V_{ref} \left| 0.5 - \frac{r}{R+r} \right|} \quad \dots (3.16)$$

因此, 当放大倍数  $A$  增大时, 测温精度提高, 测温量程变窄; 放大倍数  $A$  减小时, 测温精度下降, 测温量程变宽。当选择可编程放大器 (PGA) 时, 使  $A$  根据输出电压  $u$  动态变化, 在控温点附近采用高倍放大, 保证足够的温度测量精度, 在其它温度附近采用低倍放大, 保证足够的测温量程。

总之, 为提高电路分辨率与测温量程, 可以采用以下几个手段:



- 桥臂电阻与传感器控温点对应阻值相近
- 适当提高电路放大倍数
- 采用可编程集成运算放大器
- 选用宽输入电压的 AD 器件

为进一步提高测温精度，可以采用三线制接法来减小引线电阻对测温准确度的影响。在如上的电桥电路中，三线制的测温误差为式3.17，其中  $i$  是偏置电流， $R_T$  是传感器阻值， $R$  是和  $R_T$  串联的桥臂阻值， $r$  是导线电阻：

$$V_{ref} \frac{r + R_T}{R + 2r + R_T} - ir - V_{ref} \frac{R_T}{R + R_T} = V_{ref} \frac{rR - rR_T}{(R + 2r + R_T)(R + R_T)} - ir \quad \dots (3.17)$$

从该式可知  $R_T$  越接近  $R$  时，误差越小。

二线制误差为：

$$V_{ref} \frac{2r + R_T}{R + 2r + R_T} - V_{ref} \frac{R_T}{R + R_T} = V_{ref} \frac{2rR}{(R + 2r + R_T)(R + R_T)} \quad \dots (3.18)$$

当  $R > R_T$  时，二线制误差减去三线制误差可得：

$$\begin{aligned} V_{ref} \frac{2rR}{(R + 2r + R_T)(R + R_T)} - \left( V_{ref} \frac{rR - rR_T}{(R + 2r + R_T)(R + R_T)} - ir \right) &> 0 \\ &= V_{ref} \frac{rR + rR_T}{(R + 2r + R_T)(R + R_T)} + ir \end{aligned} \quad \dots (3.19)$$

当  $R < R_T$  时，二线制误差减去三线制误差为：

$$V_{ref} \frac{3rR - rR_T}{(R + 2r + R_T)(R + R_T)} - ir > 0 \quad \dots (3.20)$$

从本章前式3.12 分析，为提高测温分辨率，从上式可知  $R_T$  越接近  $R$  时，测温电路分辨率越高，因此有， $3R > R_T$ 。即二线制测温误差永远大于三线制误差。因而，在电路设计，采用三线制接法会减小长线测温带来的测量误差。

### 3.2 温度控制算法

温度控制算法是实现系统高精度温度控制的核心。算法决定着对系统温度控制的好坏，主要评判标准有超调量、调节时间、稳态误差等。对于本研究课题，我们首要关注的指标是系统的稳态误差，在满足稳态误差要求的前提下，再优化其它控制效果。

常用温控算法包括：PID、模糊控制、神经网络、大林算法 (师玉宝, 2001)、Simith 预估控制，以及一些复合温度控制算法：Fuzzy-PID、神经网络 PID、模糊神经网络、遗传 PID 及广义预测等 PID 算法 (杨启伟 等, 2005)。其中部分算法的特性对标表如表3.2所示。

表 3.2 温控算法对比。

Table 3.2 Temperature calibration verification table.

控制算法	优点	缺点	应用场合
传统 PID 控制	结构简单，稳态误差小	鲁棒性差，适应性慢	线性温控对象
模糊控制	超调量小，鲁棒性强	调节时间长	纯滞后，参数 时变，非线性系统
大林控制	无超调	调节时间长，有稳态误差	——
神经网络控制	鲁棒性强，响应速度 快，抗干扰能力强	调节时间长	多变量、多参数 非线性与时变系统
Fuzzy-PID 控制	适应性强	控制规则复杂	大滞后系统
模糊神经网络控制	动态响应快，鲁棒 性强，稳定性好	调节时间长， 算法复杂	控制参数变化的系统

从表中可以对比得出，传统 PID 温度控制结构简单、稳态误差小的特点已经可以契合本课题的使用重点。在两维实时光谱仪空间化应用中，温控过程作为其中一环，在保证系统正常稳定运行的前提下，应当尽量减小 CPU 开销，即采用结构相对简单的算法来实现；且空间卫星为两维实时光谱仪提供的基础环境温度，使得星上外界温度扰动小，对温控算法的鲁棒性要求也有所降低。因此，PID 控制算法相比于近来兴起的智能化温控算法，在两维实时光谱仪空间化应用中具有很大优势。

### 3.2.1 经典 PID 温度控制算法

PID 控制算法使用历史已有近 80 年。最早的 PID 控制器采用模拟电子器件实现。从上世纪计算机技术发展以来，数字 PID 控制方式占据主流，得到广泛应用。PID 控制算法适用于控制模型难以确定的场合。本课题使用的两维实时光谱仪结构复杂复杂，控温精度要求高，传递函数难以确定，因此选用 PID 控制方式十分契合。

PID 控制 (刘金琨, 2004) 原理框图如下图3.4所示, PID 控制算法由比例环节、积分环节、微分环节组成。

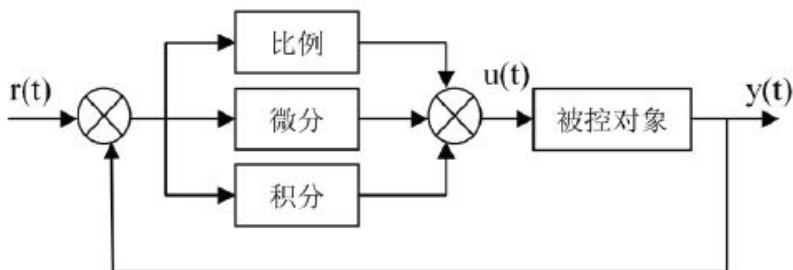


图 3.4 模拟 PID 控制原理框图。

Figure 3.4 Block diagram of analog PID control principle.

PID 控制方程数学表达形式如下式3.21(王划一等, 2009) 所示,  $u(t)$  为控制量,  $e(t)$  为输入输出偏差,  $K_p$  是比例系数,  $T_i$  是积分时间常数,  $T_D$  是微分时间常数。

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_b e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad \dots (3.21)$$

传递函数为:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad \dots (3.22)$$

观察 PID 控制中各环节的物理意义, 可以体会其中不同功能特性:

**比例环节:** 即时成比例地输出控制系统的偏差信号, 当偏差不为 0, 控制器立即产生控制作用以减小误差。当偏差为 0 时, 控制作用也为 0。

**积分环节:** 可以消除静差, 积分作用的强弱取决于积分时间常数,  $T_i$ ,  $T_i$  越大, 积分作用越弱, 反之则越强 (王卫平, 2004)。

**微分环节:** 预测控制系统变化方向, 提前加入控制信号, 从而加快系统的动作速度, 减小调节时间。

### 3.2.2 数字 PID 温度控制算法

将模拟 PID 控制方式进行离散化变换后, 就可以得到数字 PID, 数字 PID 以微控制器或计算机为运算核心, 通过软件具体实现, 结合适当的外部执行机构, 完成对控制对象的控制目标。

在实际应用中，PID 控制算法分为两种：位置式和增量式。两种方式是通过不同的数学变换得以实现，在算法实现上，也表现不同。

(1) 位置式 PID 控制 (李亚文 等, 2016):

对上式3.21模拟连续 PID 表达式离散化，得到下式：

$$u(k) = K_P \left\{ e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad \dots (3.23)$$

式中： $k$  是采样序号， $k=0, 1, 2, \dots$ ； $u(k)$  是系统输出； $e(k)$  和  $e(k-1)$  为前后两次偏差值； $K_P$  是比例系数； $K_I$  是积分系数； $K_D$  是微分系数。

在表达式3.23中，输出量  $u(k)$  直接反应执行机构的输出量，即与执行单元的位置一一对应，因此称为位置式 PID 控制算法。本项目中将以位置式 PID 控制方式为基础算法，输出 PWM，来进行高精度温度控制。

(2) 增量式 PID 控制算法 (严晓照 等, 2006):

通过对位置式 PID 控制算法进行变形，可以得到增量式 PID 控制表达式，具体方式如下：

$$\begin{cases} u(k) = K_P \left\{ e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \right\} \\ u(k-1) = K_P \left\{ e(k-1) + K_I \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_D [e(k-1) - e(k-2)] \right\} \end{cases} \quad \dots (3.24)$$

两式相减：

$$\Delta u(k) = K_P \Delta e(k) + K_I e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad \dots (3.25)$$

其中， $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ 。

如上式3.25为增量式 PID 数字算法的表达式，从式可以看出，增量式 PID 控制算法输出为变化量，仅通过前后三次的测量偏差，计算量较小。增量式 PID 算法通常用于如步进电机等增量驱动设备。

### 3.2.3 改进的数字 PID 温度控制算法

基础 PID 控制算法为工业生产生活中的控制提供了解决方案，但对于不同的被控对象，对基础 PID 控制算法进行合理调整改进，可以更好的完成控制任务。根据不同的控制过程，可以采用不同类型的 PID 控制方法。常用的有 P 控制、PD 控制、PI 控制、PID 控制等 (李瑶瑶, 2017)。

在本课题中，两维实时光谱仪是一个结构复杂，大尺寸的温控对象，因此，具有热阻大，时间延迟长的特点；其次，结合两维实时光谱仪空间化的使用需求，在太空中，两维实施光谱仪在一个温度比较恒定的真空环境中，即环境温度变化比较缓慢而且幅度较小，所以微分控制效果不明显。且项目目标对恒温稳定度要求高，对系统的动态性能要求相对较低，微分控制意义也不大，因而，本课题采用 PI 控制算法，即公式3.26 所示。同时使得参数调整比较少。

$$u(k) = K_P \left\{ e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) \right\} \quad \dots (3.26)$$

为了进一步优化算法，本项目采用积分分离 PI 温控方式。在 PID 控制中，积分环节的作用主要是消除静态误差，提高控制精度。但在过程的启动、结束或大幅度增减设定值时，短时间内系统输出很大的偏差，会造成 PID 运算的积分积累，致使控制量超过执行机构可能允许的最大动作范围所对应的极限控制量，引起系统较大的超调，甚至引起系统较大的振荡。为了克服这一问题，采用积分分离的方式，具体方法是当被控量与设定值偏差较大时，取消积分作用；当它们误差较小时，引入积分控制，提高控制精度 (汪性武, 2003)。

在本课题中，如公式3.27所示，当设定温度远大于实际温度时，也就是当温差大于某一值  $a$  时，温控系统以一个恒定最大功率  $P$  加热；当实际温度超过设定温度一定值  $b$  时，则将加热功率为置为 0；当温差较小时则使用 PI 控制算法。

$$U(t) = \begin{cases} P & \delta > a > 0 \\ PI & a \geq \delta \geq -b \\ 0 & \delta < -b < 0 \end{cases} \quad \dots (3.27)$$

温控算法输出的控制量为 0 1 之间的浮点数，即为脉冲宽度调制 (PWM) (Wu 等, 1990) 占空比。PWM 控制方式被广泛应用于温度控制领域，用以驱动加热丝、TEC 等。通过提高 PWM 的脉冲频率，可以满足高精度温度控制的需求。

### 3.3 本章小结

本章内容主要从原理角度分析了两维实时光谱仪高精度温度控制系统空间化应用时面临的主要难题。通过对传感器原理的分析研究，对比多种温度传感器特点，挑选热敏电阻作为系统测温元件，可以实现高精度温度测量；并分析热敏

电阻在使用时的长线影响、自热效应等问题；通过高精度测温原理分析，设计放大器 +PGA+ 低分辨率 AD 的电路原理，并通过计算分析，总结出电路中元件参数的选择原则；通过对多种智能温控算法对比分析，选择 PID 温控算法作为基本算法，并结合本项目的温控特点，确定使用积分分离 PI 算法来实现高精度温度控制的任务。

本章研究内容解决了高精度温度控制系统中的关键核心原理问题，也是高精度温度控制系统设计（第 5 章内容）开展的原理基础。

## 第4章 温度传感器定标

两维实时光谱仪复杂的结构决定了其温控方案必须使用四通道温控方案，多通道高精度的温控前提是各温度测量值的绝对准确。因此，温度传感器标定是实现两维实时光谱仪高精度温度控制的重要前提（本章内容的具体完成是在实现多路温度测量基础上实现的）。

在实际应用过程中，多路温度测量准确性不仅依赖于个体温度传感器的差异，还与其后的温度传感器调理电路密切相关，在不同温度测量通道电路设计、电路干扰等因素是无法保证一致的，也会导致相同温度传感器在相同的温度环境中得到不同的温度读数。因此，本章开展的温度传感器定标工作是对整个传感器电路的标定。使得在仪器使用中，多路温度测量保证相对准确性。

传感器标定主要分为相对定标法和绝对定标法。相对定标是将两个以上温度传感器的测温误差降到某一范围。绝对定标是将温度传感器与符合国家计量检验温度计的测温偏差降到某一范围。在本课题中，我们重点关注的两维实时光谱仪中温度场的一致性，而对其绝对温度准确度要求较低，因此，本文采用相对定标法。

### 4.1 试验设计与装置

以两路传感器为例，将两路温度传感器都置于温度为  $50^{\circ}\text{C}$  的大热水槽中，传感器于水槽中对称位置，且两路传感器距离小于  $1\text{cm}$ ，以保证其所处温度场一致。开启测温电路开始测温，记录温度数据，温度更新频率为  $1\text{s}$ 。实验装置示意图如图4.1所示。热水在室内环境中自然降温，测得其两路降温曲线。当温度降到接近室温时，停止记录。

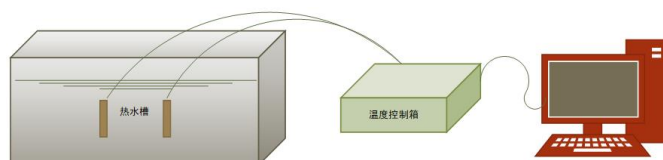


图 4.1 温度传感器标定实验示意图。

Figure 4.1 Schematic diagram of temperature sensor calibration experiment.

标准温度传感器选用数字温度传感器 DS18B20(ZHOU 等, 2011)。该温度传感器输出的是数字信号, 具有体积小, 硬件开销低, 抗干扰能力强, 精度高的特点。在使用时, 仅需将主控芯片的通用型之输入输出 (GPIO) 进行相应配置即可读出温度数据。DS18B20 测温误差小于  $1^{\circ}\text{C}$ , 具有一定的准确性, 满足了本项目的使用需求。

## 4.2 数据处理

将记录好的温度数据绘制曲线图, 采用自然降温的方法采集温度数据, 随着热水槽温度与室温越来越接近时, 水槽的降温速度越来越缓慢。如图4.2曲线为记录的自然降温曲线。

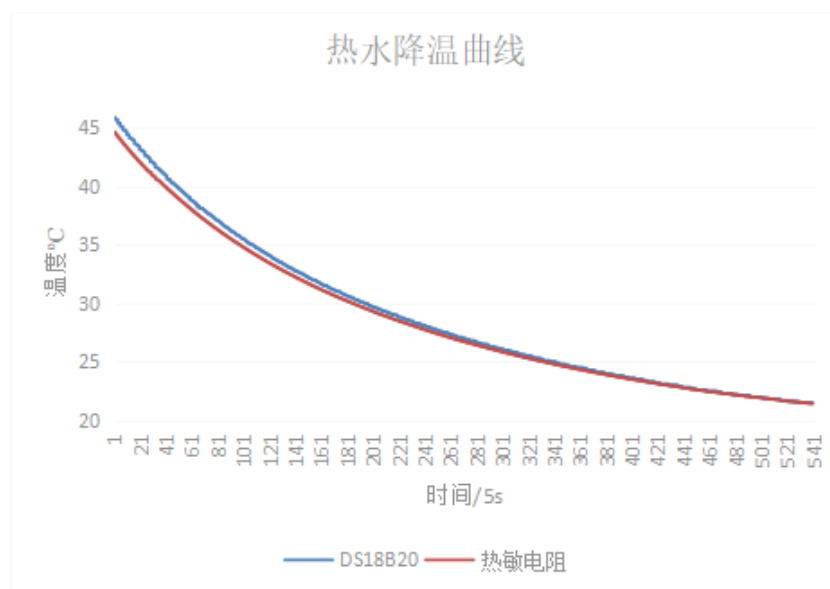


图 4.2 标准温度传感器与待标定温度传感器曲线图。

Figure 4.2 Curves of standard temperature sensor and temperature sensor to be calibrated.

数据处理方法: 首先对数据进行三次拟合, 对标准温度传感器元数据曲线在温度方向进行均匀采样, 得到对应的测温时间, 再以该时间点采样待标定温度传感器曲线。这样获得两组新的数据。新数据曲线图如下4.3所示:

温度传感器定标本质即: 拟合非标准传感器与标准传感器之间的误差曲线。因此, 使用多项式拟合算法拟合该差值曲线, 直观看来, 随着标准温度器温度上升, 待标定传感器的偏差越来越大, 最大误差超过  $1.2^{\circ}\text{C}$ , 但误差线性度较好, 可以用多项式拟合的方法进行误差拟合。对该误差曲线进行一次拟合, 拟合方程为式4.1,  $R^2 = 0.995$ 。



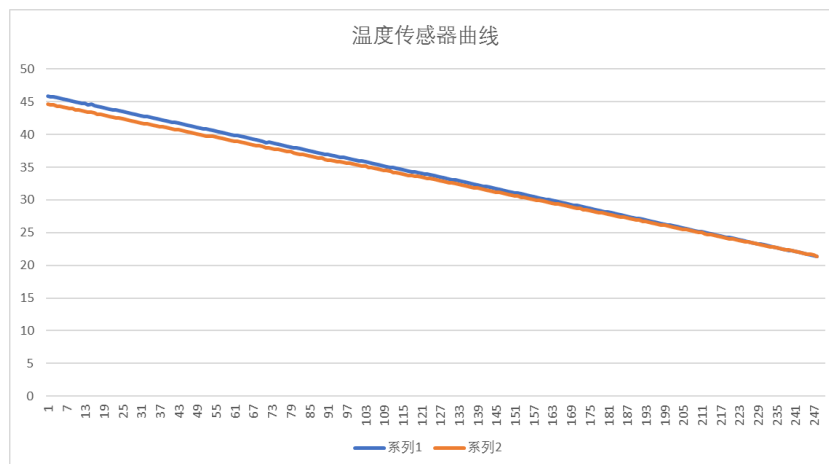


图 4.3 采样后的温度曲线。

Figure 4.3 Temperature curves after sampling.

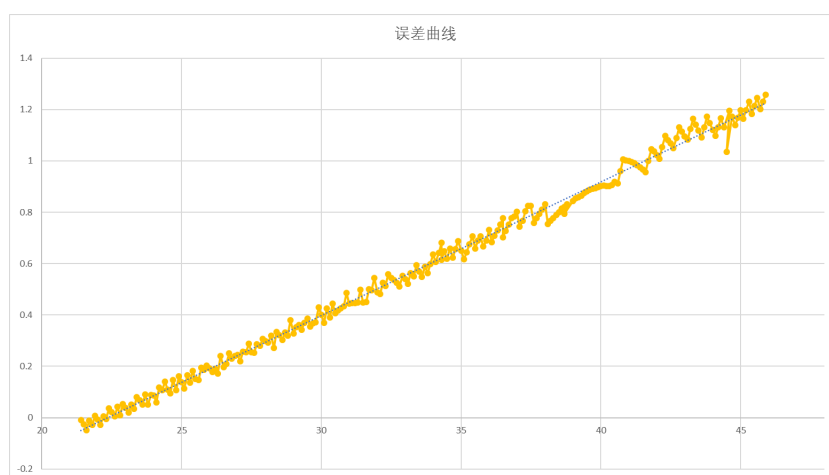


图 4.4 误差与拟合曲线。

Figure 4.4 Error and fitting curves.

$$y = 0.052x - 1.1626 \qquad \dots (4.1)$$

4.3 方案验证

选用线性拟合结果代入热敏电阻 R-T 方程校准，将标定后的温度传感器与标准温度计放入水槽中，测试温度传感器与标准温度传感器直接的误差，测量其中五个温度点并记录，表4.1为测量数据表，可以看出，标定后温度传感器的测温准确性大大提升，最高温差小于 0.03℃。

表 4.1 温度标定验证表。

Table 4.1 Temperature calibration verification table.

传感器		温度			
DS18B20	25.00	30.00	40.00	45.00	50.00
热敏电阻	24.982	29.991	40.018	45.176	50.272

4.4 本章小结

本章主要介绍了温度传感器电路标定方法，设计简易的实验设备测定数据，并标定传感器。最后通过试验示例，验证了标定后的温度传感器温度测量偏差显著降低，标定后温度传感器温度与标准温度计温度偏差小于 0.03℃。温度传感器标定是多路温控的关键基础，该工作的完成是多通道温度控制方式实现高精度温度控制的重要保障。

## 第 5 章 高精度温度控制系统设计

本文通过第 2 章有限元热分析, 解决了两维实时光谱仪在热结构设计方面的疑问, 确定两维实时光谱仪采用四通道温度控制方案; 在第 3 章, 通过对高精度温度测量电路原理研究, 采用放大器 +PGA+ 低位 AD 实现高精度测温电路方法, 并得出其中关键参数的选用原则; 通过对传感器原理分析, 选择热敏电阻作为温度敏感元件, 并对其高精度测温方法进一步研究; 通过第 4 章介绍的温度传感器的标定工作, 减小多个温度传感器间的测量偏差, 为保证两维实时光谱仪内部温度场一致性奠定基础。因此, 基于以上工作, 本章内容着手于实现高精度温控的软硬件系统。

### 5.1 高精度温度控制系统总体设计

两维实时光谱仪温控系统采用四通道温度采集电路设计方案, 包含硬件电路系统、软件系统部分, 以及必要保温措施等设计。系统总体设计组成框图如下图所示。本节内容主要围绕两维实时光谱仪的软硬件系统展开。

硬件电路部分主要由主控芯片电路、高精度温度测量电路以及加热驱动电路组成; 软件部分包含两个方面, 在微处理器 (MCU) 中的温度控制软件以及上位机上的控制监测程序; 两维实时光谱仪外围热设计包含加热膜施加方案, 传感器布置位置及保温层设计等。位于两维实时光谱仪中的温度传感器经引线将模拟温度信号传入测温电路, 再经 AD 转换将数字温度信号传入主控芯片, 主控芯片经一系列处理计算输出 PWM 控制策略, 经加热驱动电路将 TTL 电平升压增流驱动加热膜实现对两维实时光谱仪的温度控制; 在 PC 端的温度监测软件完成温控状态监测、数据记录、参数设置等功能, 软件通过 RS232 串口与主控芯片实现数据交互。

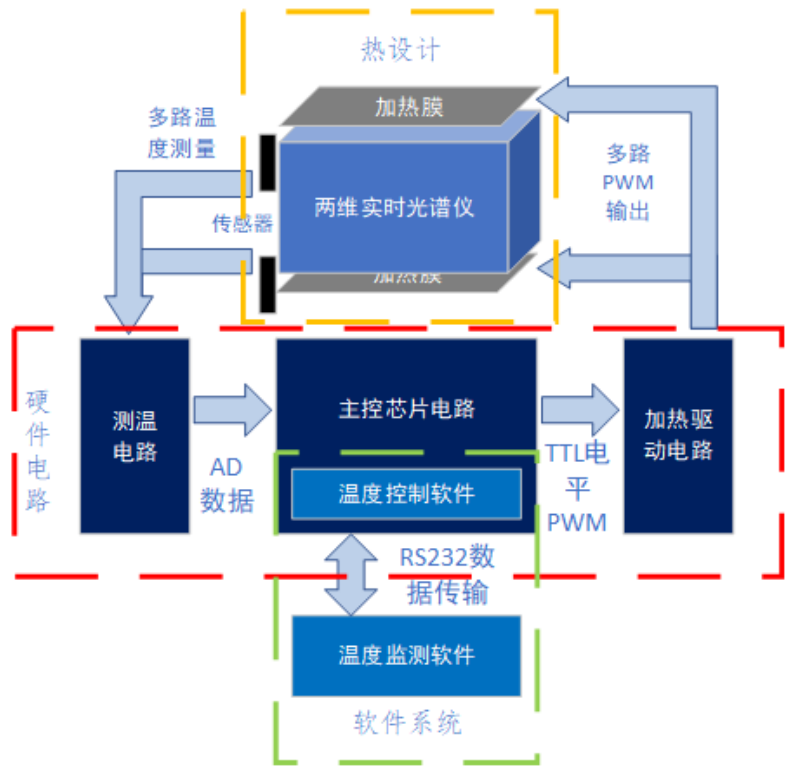


图 5.1 系统总体设计框图。

Figure 5.1 Block diagram of system.

5.2 硬件系统设计

如下图5.2所示是两维实时光谱仪温控系统的硬件电路框图，控制电路主要包括温度采集模块、主控单元模块、加热驱动电路模块、电源管理模块组成。

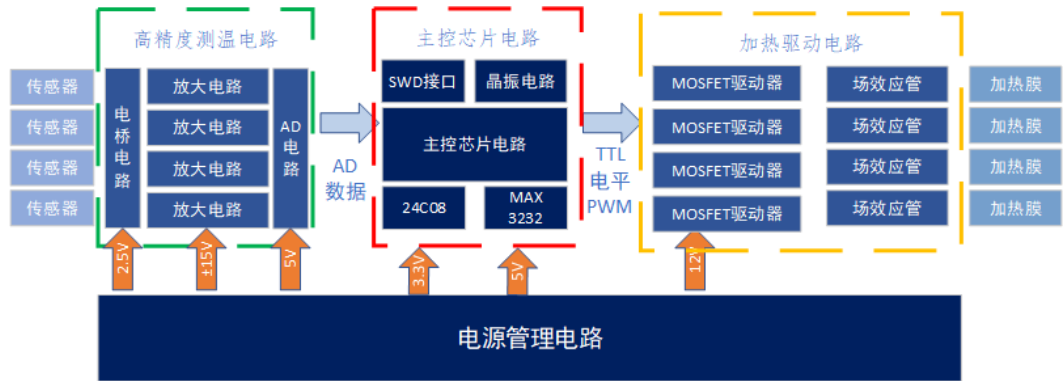


图 5.2 系统硬件设计框图。

Figure 5.2 Block diagram of system hardware.

### 5.2.1 四路高精度温度读取电路

基于第 3 章内容，在空间高精度温度读取电路原理设计中，最核心的器件为 AD 和集成运放。设计采用 16 位模数转换器 ADS7825(张原峰 等, 2002)，该芯片是 Burr-Brown 公司生产的有四路差分模拟输入通道的高性能 AD 器件，芯片引脚图如图 5.3 所示。该芯片主要性能参数 (Burr-Brown, 1997) 如下：

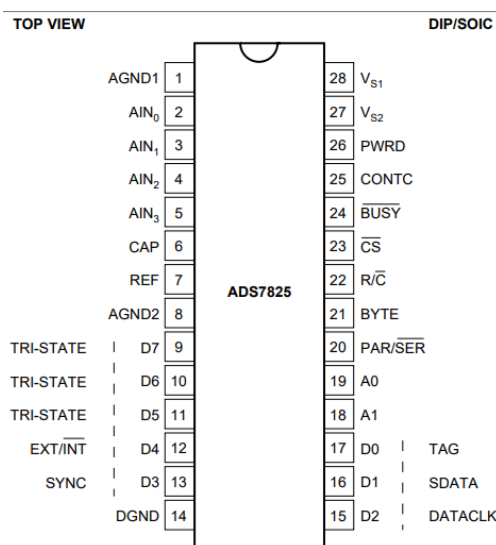


图 5.3 ADS7825 引脚图。

Figure 5.3 ADS7825 pin diagram.

- 正 5V 单电源供电模式
- 最大采样频率为 40KHz
- 并行串行两种数据输出模式
- $\pm 10V$  宽范围输入电压
- 串行并行输出模式
- 转换误差  $\pm 2.0LSB$

在四通道温度采集电路中，用到 17 只集成运算放大器，选用高速高精度集成运放 OPA602(BABU 和 MALAKONDAIAH, 2004; Burr-Brown, 1987)。其只要特性如下所列：

- 宽带：6.5MHz
- 转换率：35V/us
- 低偏移：最大  $\pm 250\mu V$
- 低偏压电流：最大  $\pm 1pA$

- 快速建立时间：1 $\mu$ s 至 0.01

可编程集成运算放大器选用 PGA205(翟俊祥, 1999), PGA205 外围电路简单, 仅需几个电容即可, 可将芯片 6、7 脚直接与主控芯片 GPIO 相连, 通过 GPIO 对 PGA 设置放大倍数。该 PGA(Burr-Brown, 1993) 主要特性为:

- 放大倍数  $G=1、2、4、8$
- 低偏移电压: 最大 50 $\mu$ V
- 低偏移电压漂移: 0.25 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C
- 低输入偏置电流: 最大 2nA
- 低静态电流: 典型值 5.2mA

为实现空间高精度的温度采集, 选择低温漂、高精度的精密电阻作为电桥桥臂, 四路温度采集电路使用相同的设计; 桥臂输出电压接入由精密集成运放组成的仪用放大电路, 作为一级初步放大; 再接入可编程放大器, 可编程放大器通过 PIN 脚动态修改放大倍数, 以适应不同区段的测量需求; 再接入二阶低通有源滤波电路滤除电路高频噪声; 最后四路模拟信号经 16 位 AD 转换, 获取高分辨的温度采集。

多路测温电桥设计: 在多路温度测量时, 为了提高温度采集精度, 减小外界温度波动导致桥臂电阻温漂带来温度测量误差, 课题选用了温漂为 0.01% ppm 的 Vishay 高精度电阻器。更小的温漂意味着更高的价格, 如果 4 路温度测量电路均采用独立的电桥电路, 将用 12 只高精密电阻, 为简化电路设计, 降低系统成本, 4 路测温电路共用一组桥臂, 这样仅使用 6 只高精度电阻器, 如下图 5.4 电路所示。

电压跟随电路 (雷杰锋 等, 2019) 设计: 如图 5.5, 电压跟随器是共集电极电路, 信号从基极输入, 射极输出, 故又称射极输出器。基极电压与集电极电压相位相同, 即输入电压与输出电压同相。这一电路的主要特点是: 高输入电阻、低输出电阻、电压增益近似为 1。

放大电路设计: 如图 5.6, 采用同相并联型差动放大输入级, 可以有效的抵制共模输出、失调、及漂移, 消除偏置电流, 如图右侧为双端输入单独输出的放大级, 可进一步抑制左侧两个放大器输出的共模信号。

可编程放大电路设计: 将前级放大电路的输出信号接入 5 脚 ( $V_{in+}$ ), 输出电压输入低通滤波电路中。电路原理图如下 5.7 所示。PGA205 采用  $\pm 12V$  电压供

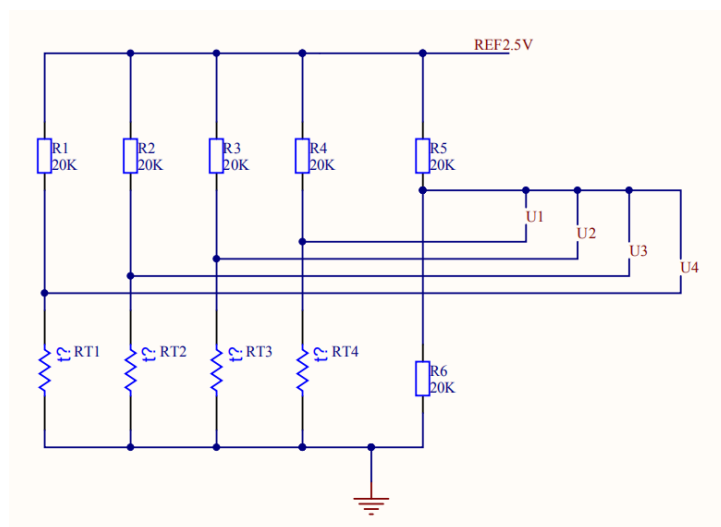


图 5.4 四路电桥电路。

Figure 5.4 Four Bridge circuits.

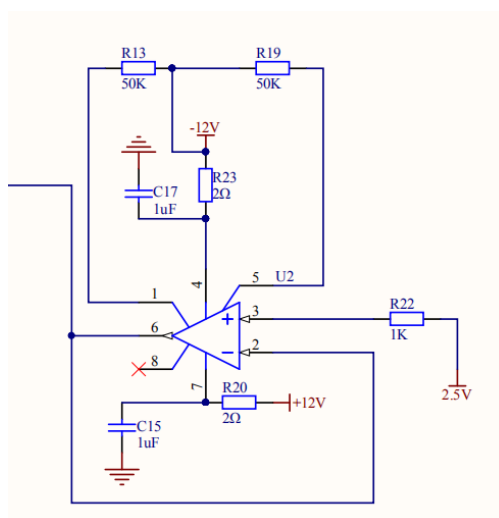


图 5.5 电压跟随电路。

Figure 5.5 Voltage following circuit.

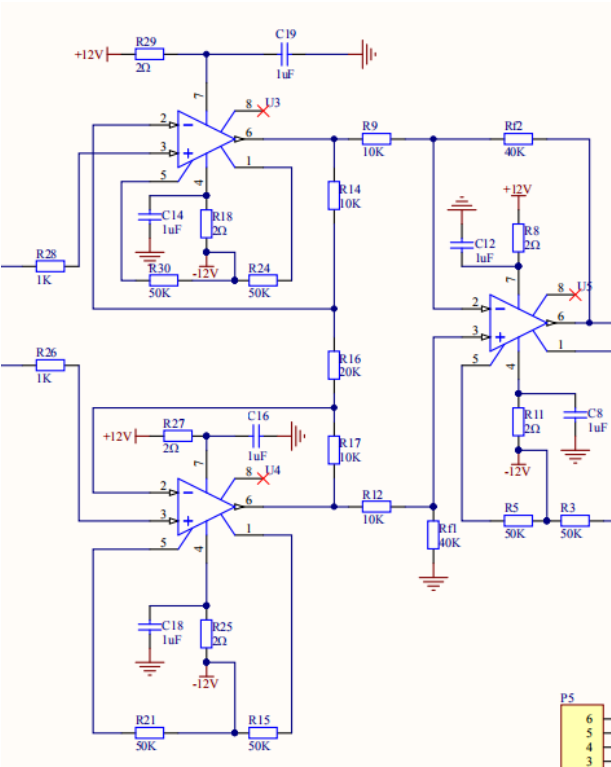


图 5.6 放大电路。

Figure 5.6 Amplifier circuit.

电，外围仅需四个电容，A0、A1 脚直接与主控芯片 GPIO 相连。

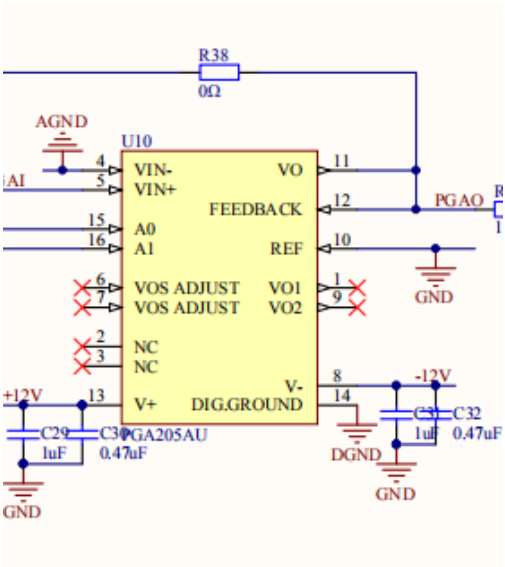


图 5.7 可编程放大电路。

Figure 5.7 Programmable amplifier.

低通滤波器设计：采用有源滤波电路设计二阶低通滤波器 (梅永, 2017)，滤



波电路原理图如图5.8。二阶有源滤波电路截止频率关系式如下5.1，电路中，电阻和电容均选取相同的 R。

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{R_2 R_4 C_2 C_3}} = \sqrt{\frac{1}{R^2 C_2 C_3}} \quad \dots (5.1)$$

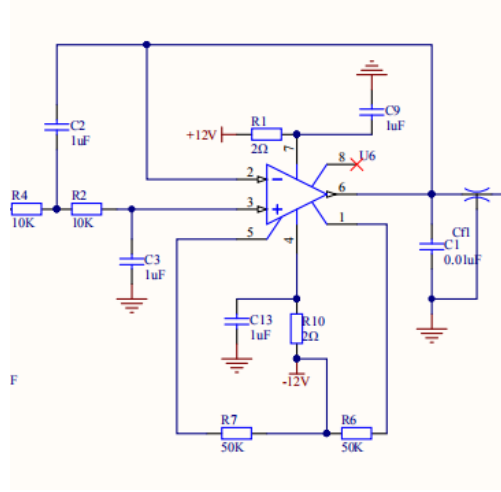


图 5.8 二阶有源滤波电路。

Figure 5.8 Active filter circuit.

ADS7825 电路：如图5.9所示，ADS7825 使用 5V 供电，2.5V 参考电压两种电压源形式，本研究采用 ADS7825 的串行通信模式，因此  $\overline{PAR/SER}$  接地。ADS7825 属于模拟数字器件，因此分有数字地和模拟地，在 PCB 设计时，对其分别接地。如下是 AD 电路原理图。

### 5.2.2 主控单元电路模块设计

主控芯片采用 ARM 系列芯片 stm32f103vet6(Dang 和 Chen, 2014)，STM32F 系列属于中低端的 32 位 ARM 微控制器，该系列芯片是意法半导体（ST）公司出品，其内核是 Cortex-M3。该系列芯片按片内 Flash 的大小为 512K，可以满足基本参数的存储需求。芯片集成定时器 Timer，CAN，ADC，SPI，I2C，USB，UART 等多种外设功能。在本研究中，主要用到 UART，I2C、定时器、看门狗定时器、PWM 和 GPIO 等，STM32F103Vet6 芯片引脚图如下5.10(STMMicroelectronics, 2018) 所示：

主控芯片电路采用 ARM 系列芯片 stm32f103vet6 的最小系统板(Feiyanlingyu, 2014)，如图5.11所示。stm32f103vet6 最小系统板包含了基础功能，主要有：晶振



电路、USB 电源管理电路和 USB 接口；带有 SWD 仿真调试下载接口，该接口最少使用 3 根线就可以完成调试下载任务；型号为 AT24C08 的 EEPROM 方便核心板进行数据存储。

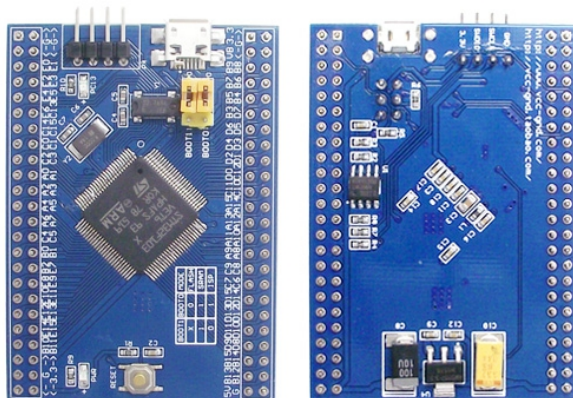


图 5.11 STM32F103Vet6 最小系统板。

Figure 5.11 STM32F103Vet6 Minimum system board.

AT24C08(郭震 等, 2017) 芯片共 1K 字节存储量，在芯片使用时，数据均为浮点数，1 个浮点数占用 4 个字节，因此该芯片可存入 256 个浮点数，满足课题使用需求。AT24C08 通过 SCL 和 SDA 总线与主控芯片相连。AT24C08 具有体积小、引脚少、功耗低、工作电压宽等特点，高数据传输速率为 400KHz 和 IIC 总线兼容，擦除次数在 100 万次左右，数据存储可大 100 年。如下图 5.12 是其电路连接原理图：

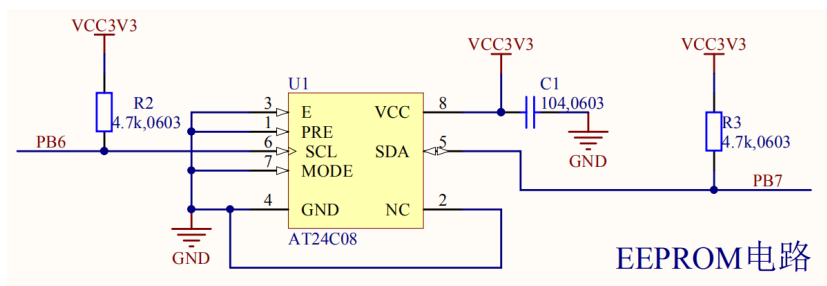


图 5.12 AT24C08 电路图。

Figure 5.12 AT24C08 circuit.

主控芯片外围电路还包括串口通信电路设计，通信接口采用 MCU 的 UART 接口，芯片选用 MAX3232 芯片，该芯片采用 3.3V 电源供电，MAX3232 外围电路简单，仅需 4 个 0.1uF 的电容。电路连接如图 5.13 所示。通新街口采用 STM32F103Vet6 的 UART 接口，波特率设置为 9600。

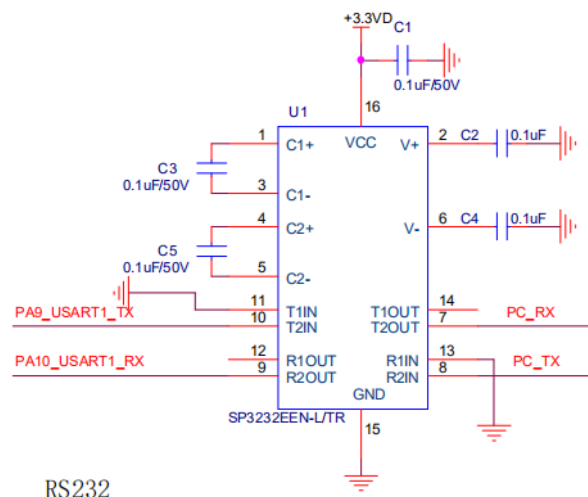


图 5.13 MAX3232 电路图。

Figure 5.13 MAX3232 circuit.

### 5.2.3 加热驱动电路模块设计

加热驱动电路的主要作用是将主控芯片输出的 TTL 电平的 PWM 进行升压增流，以满足高精度温度控制的功率需求。加热驱动电路主要有金氧半场效晶体管 (MOSFET) 驱动芯片、场效应管 75NF75 和肖特基二极管 SR540 等组成。主控芯片产生的 3.3V PWM 经过 TC4422 芯片变为 12V 的 PWM 波，可以完成对场效应管的开关控制。其电路原理如下5.14所示。

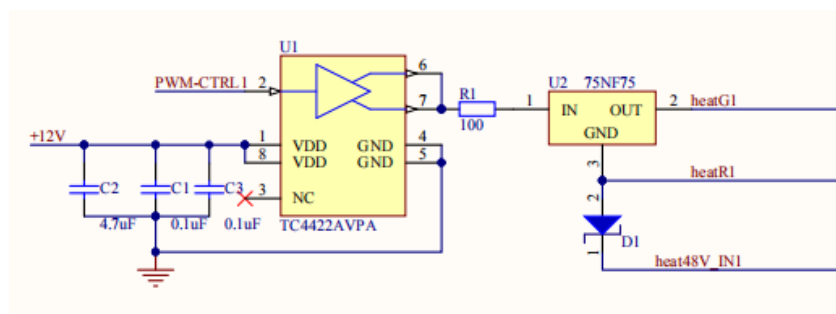


图 5.14 加热驱动电路原理图。

Figure 5.14 Heating drive circuit.

### 5.2.4 电源管理单元电路设计

电源电路是整个系统的能源供应。电源扰动会直接影响温度测量的稳定性和准确性，从而关系到高精度温控是否能实现。本设计中的电源电路主要包含

三部分：驱动主控芯片的 5V 和 3.3V 电压源，驱动测温电路板集成运放的  $\pm 15\text{V}$  电压、和 2.5V 高精度参考电压，加热驱动电路 MOSFET 12V 驱动电压源。每个电压源实现均连接有发光二极管，一是可以方便观察电路系统的电压工作状态，其次是电路断电后，为电路中的充电电容提供放电回路。

如下图5.15所示是 2.5V 参考电压源电路原理图，输入电压为 5V，2.5V 电压源是电桥电路的参考电压，因此其稳定性十分重要。课题选用高精度精密基准电压源，输出电压为  $2.5\text{V} \pm 25\text{mV}$ ，4.5V~40V 的宽范围输入电压，输出电流为 10mA。

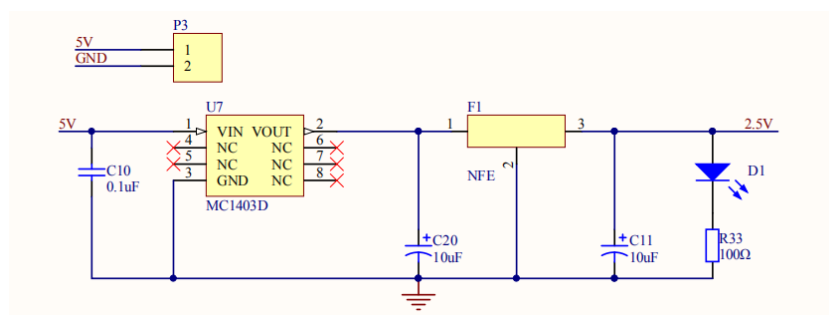


图 5.15 2.5V 电压源原理图。

Figure 5.15 Schematic diagram of 2.5V voltage.

下图5.16是 3.3V 电压电路图,3.3V 电压采用 TPS77133 芯片实现,为 STM32F103Vet6 和通信芯片 MAX3232 提供电压。

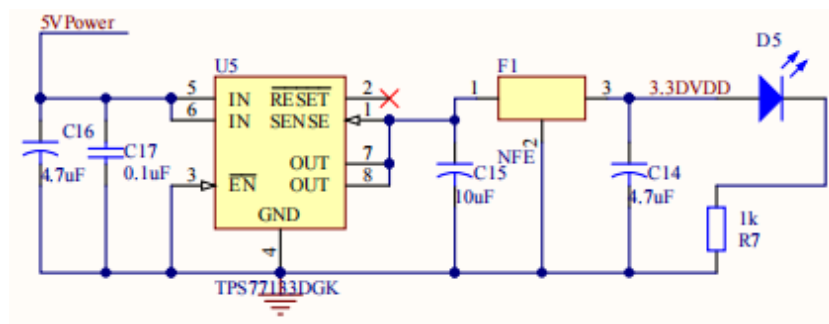


图 5.16 3.3V 电压源原理图。

Figure 5.16 Schematic diagram of 3.3V voltage.

下图5.17和5.18为 5V 电压电路，5V 电压采用两种芯片实现，图5.17采用 TPS76150(Instruments, 2001b) 芯片实现,用来给主控芯片供电;图5.18采用 REF5050 (Instruments, 2001a)，为 ADS7825 供电。REF5050 是低噪音，低温漂，长期稳定的精密电压基准。

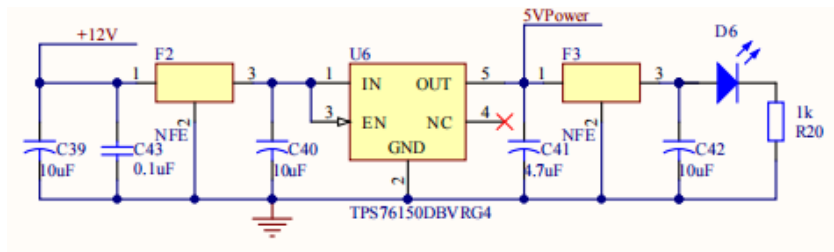


图 5.17 TPS76150 5V 电压源原理图。

Figure 5.17 Schematic diagram of 5V voltage.

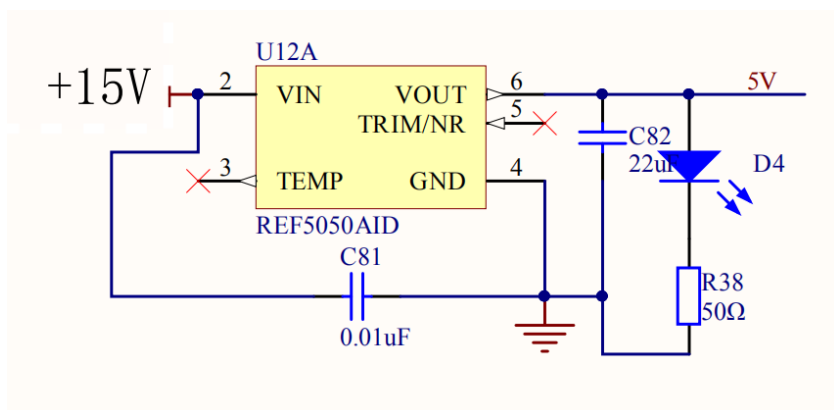


图 5.18 REF5050 5V 电压源原理图。

Figure 5.18 Schematic diagram of 5V voltage.

$\pm 15\text{V}$  电压源给双电源供电的集成运放 OPA602 供能，选用 L7815 和 L7915 的同系列芯片实现。

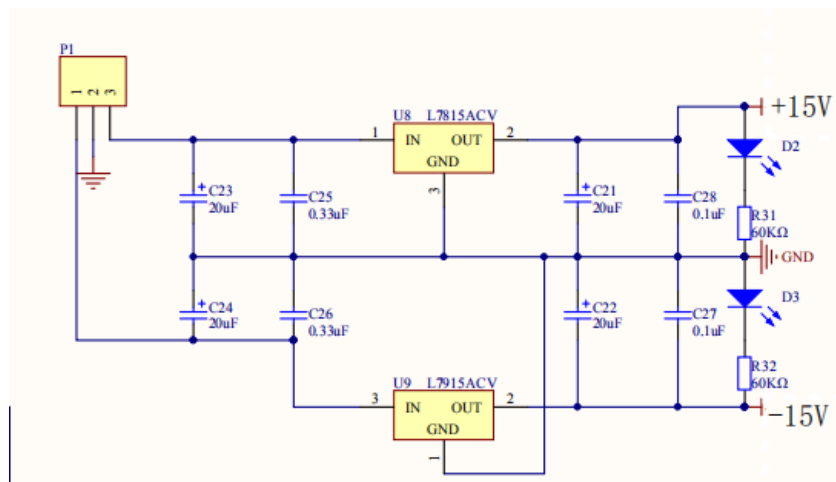


图 5.19  $\pm 15\text{V}$  电压源原理图。

Figure 5.19 Schematic diagram of  $\pm 15\text{V}$  voltage.

下图5.20是 12V 稳压电路原理图。选用 L18M12 芯片。

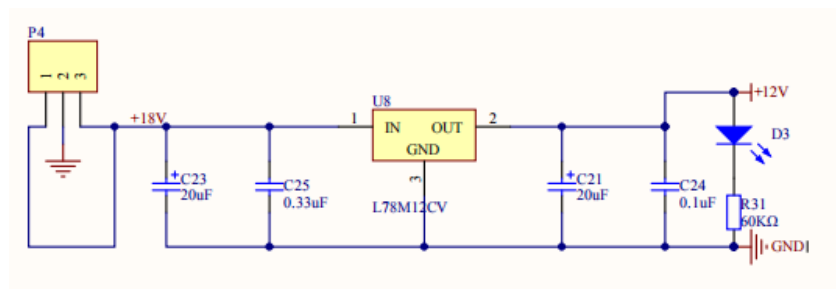


图 5.20 12V 电压源原理图。

Figure 5.20 Schematic diagram of 12V voltage.

### 5.2.5 抗干扰设计

在电路设计中，高精度温度读取电路的核心是 AD 芯片，AD 属于模拟数字芯片，应防止其模数串扰；且 PWM 加热频率最高达 2000Hz，也极易干扰到模拟信号测量；电路中的最高电压 36V(加热回路电压)，最低电压 2.5V，高电压也容易对低电压形成干扰。因此，在 PCB 设计中，主要考虑以下防干扰措施：

1. 模拟数字信号抗干扰设计：在 PCB 设计中，模拟电路和数字电路分别居于电路板的两端，模拟地和数字地分离，中间用磁珠连接单点接地。在温度读取电路中，为防止模拟信号间的信号串扰，温度电压信号线平行分布，走线尽量减



短，线宽也适当加宽，且使该温度模拟信号线均单层铺设，防止跨版引入信号干扰。为进一步减弱大电压对温度采集电路干扰的风险，温度采集电路设计独立板块，AD 将转换的数字信号通过杜邦线与主芯片电路连接。

2. 电源抗干扰设计：本系统中有 36V,  $\pm 12V$ , 5V, 3.3V, 2.5V 多种大小的直流电压，为了保证各电压的稳定，在开关电源输出，电源芯片输入输出端都采用了多电容并联的消噪电路。

3. 敷铜设计：在 PCB 设计时，为提高散热能力，提高地线阻抗，增强机械强度，对 PCB 顶层与底层均敷铜，在敷铜时，通过调整布线，减小孤岛面积，使得敷铜面积达到最大。

#### 5.2.6 双路高精度温度读取电路实现

以上，本课题完成了基于放大电路 +PGA+ 低位 AD 的可空间化的四路高精度温度控制电路原理设计，并根据当前的恒温测试平台（在第 6 章内容会详细介绍），首先实现了双通道测温电路。如下图 5.21 所示。

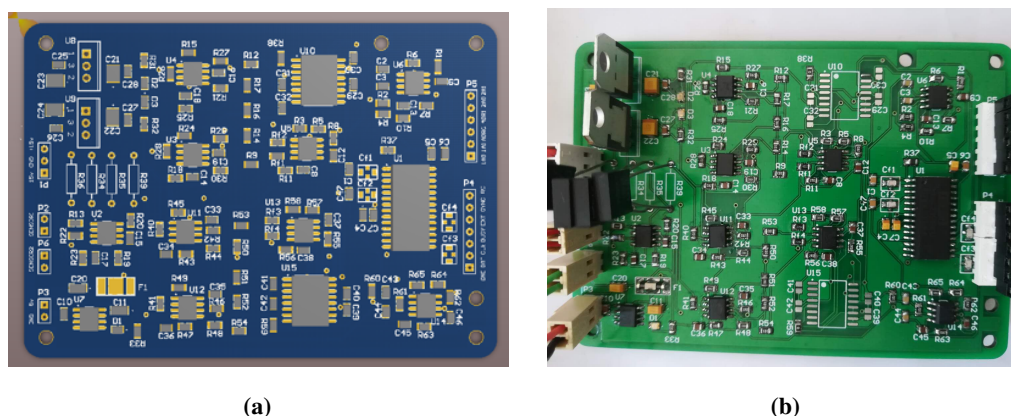


图 5.21 双通道测温电路 PCB。(a) 模型图，(b) 实物图。

Figure 5.21 Dual channel temperature measurement circuit PCB.(a) Model diagram, (b) Physical picture.

### 5.3 软件系统设计

两维实时光谱仪中软件系统主要包含两大部分，分别是 MCU 中温度控制软件设计和上位机计算机中的可视化温度监测软件。MCU 控制软件是控制系统的核心，可独立运行，实现对两维实时光谱仪的温度控制，同时，也可接受通过串口发送来的上位机指令数据；上位机软件负责对控制过程的实时监测，数据通过



串口从 MCU 传入，进行处理显示。

### 5.3.1 控制软件设计

MCU 控制软件是温度控制系统的核心，核心功能是实现多路高精度温度的采集与控制。MCU 控制软件包含两个流程：主程序和中断程序。

主程序流程图如图5.22所示，当硬件启动时，首先对必要的功能初始化、包括对 AD 芯片、IIC 以及通信芯片、中断、定时器等进行初始化设置；第二步从 AT24C08 芯片中读取温控参数，包括各个通道的 P、I 参数、温度设定值等；接着对各通道参数赋值。随后，系统进入温度控制主循环。系统首先对第一个通道的 AD 数据采集，采集时对数据进行判断，根据 AD 返回值的范围重新确定 PGA 放大倍数，然后再进行累积采集，当数据集够一个滤波数组时，对该组数据排序，去掉若干极大极小值，再对数据取平均得到滤波后的 AD 数据；将该 AD 数据进行解析，求出对应的电压值，再根据电路原理求解对应的传感器阻值，之后，根据 Steinhart-Hart 方程求解温度数值；最后，将解析的温度数据传入 PID 温度控制算法中，求解对应的控制量，该控制量即为输出 PWM 的占空比。程序运行至此，已经完成第一个通道的一次温度控制输出，主程序最后会判断通信 Flag 和定时器大小确定是否进入通信处理程序和串口输出温度数据功能。当一路的温度控制流程结束后，程序切换测温通道，进行另一路的温度测控流程。如此，主控程序实现多路温度循环测量与控制。

中断流程功能比较简单，实现串口数据缓存与定时器功能。当通信功能接收到来自 RS232 的数据时，自动跳入中断服务，将端口缓存数据转存入数组，并置位串口通信标志位 FLag，退出中断；定时器中断实现对时间的定时管理。

在程序功能实现时分析处理了以下细节问题：

**ADS7825 芯片驱动：**ADS7825 有串行通信和并行通信两种模式，本文采用串行通信方式，使用外部时钟，由主控芯片产生周期为 4us 的时钟。使用外部时钟，读取 AD 数据遵循下图5.23为时序图。

**具有滞回特性的 PGA 切换方法：**在 PGA 切换放大倍数时，如果采用直接切换方式会导致在切换临界点时频繁动作，会引入测量误差，影响流程正常进行。因此我们采用具有滞回特性的温度切换方式。滞回特性是施密特触发器的主要特点，施密特触发器有两个稳定状态，但与一般触发器不同的是，施密特触发器

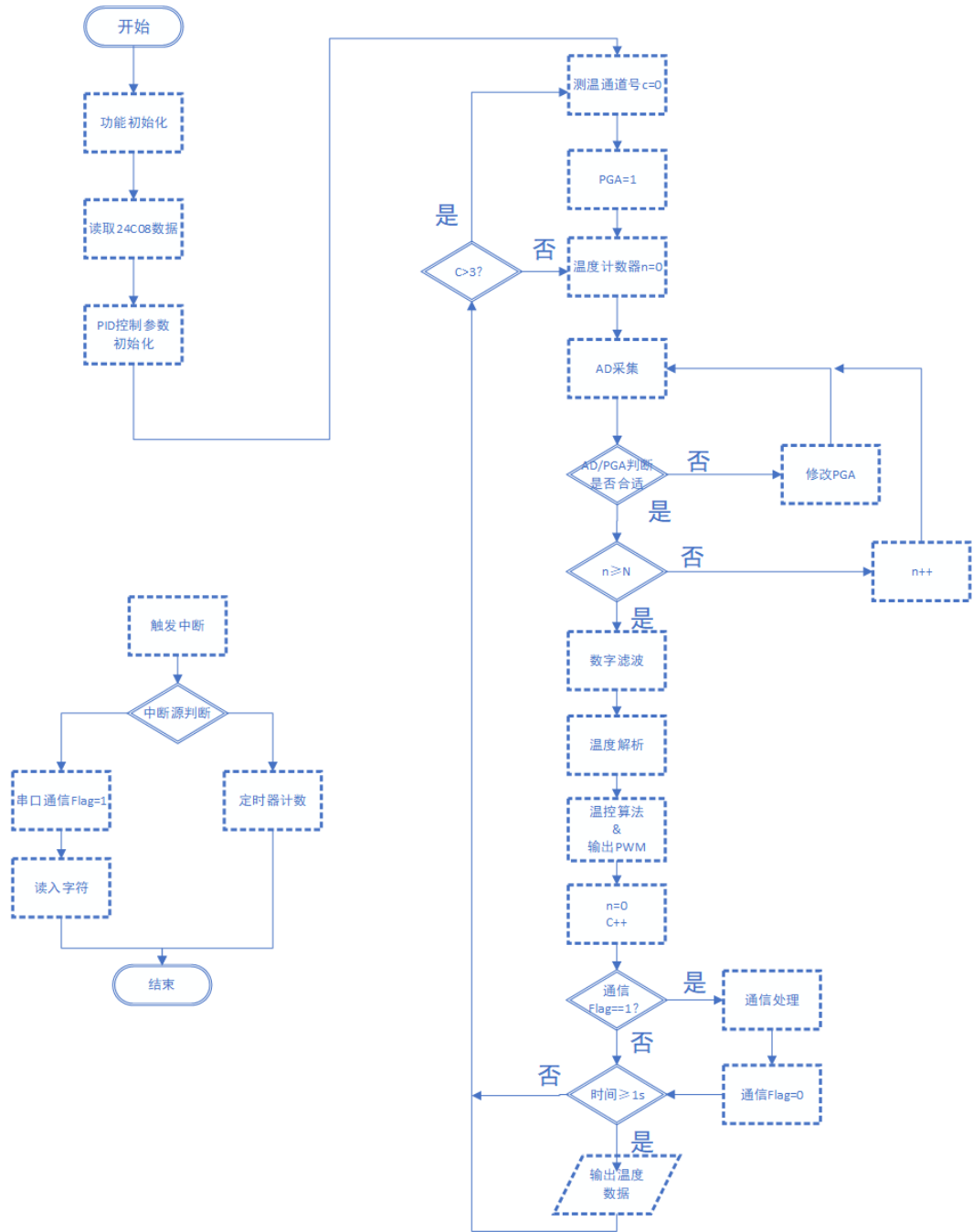


图 5.22 系统控制流程图。

Figure 5.22 System control flow chart.

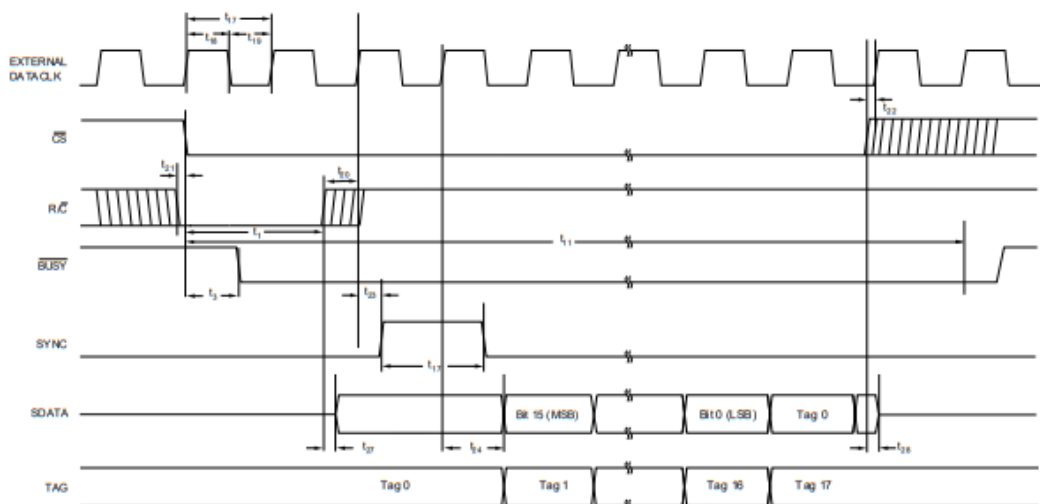


图 5.23 使用外部时钟进行转换和读取时序图。

Figure 5.23 Conversion and Read Timing with External Clock ( $\overline{\text{EXTINT}}$  HIGH). Read During Conversion (Previous Conversion Results).

采用电位触发方式，其状态由输入信号电位维持；对于负向递减和正向递增两种不同变化方向的输入信号，施密特触发器有不同的阈值电压。在切换 PGA 放大倍数时，对于负向递减和正向递增两种不同变化方向的 AD 变化形式，软件根据不同的节点切换倍数，从而避免了频繁切换放大倍数导致的测温跳变现象。

输入电压在 0V 附近时的处理方法：当输入电压为 0 时，16 位 AD 输出为  $2^{15}$  附近，一组滤波数组中会有正负两种值，即存在 0X1xxx 和 0X0xxx 两种类型的数据，在滤除数据时，应选择 0X1xxx 的“较大值”和 0X0xxx 的较大值。如不做特殊处理，会导致测量温度在该点波动很大，影响正常使用。

除此，为了方便系统使用与调试，MCU 软件采用中断方式开通串口通信功能，通过不同指令，可以分别设置各个通道的 PID 参数、数据传输模式，方便实现不同通道的差异化温度控制。设置的参数会同步更新保存到 AT24C08 芯片中。

### 5.3.2 上位机温度监测软件

上位机可视化监测软件采用 MFC 实现，微软基础类库 (MFC) (侯俊杰, 2001) 是微软公司提供的的一个类库，以 C++ 类的形式封装了 Windows API，并且包含一个应用程序框架，使得应用程序开发简单快捷，大大方便了开发人员使用。

上位机软件主要功能是实现与控制电路之间的通信与实时的温度显示，软件采用单对话框模式设计，主面板主要实现温度数据实时显示，与曲线的实时绘制，数据更新频率为 1s，如图5.24所示。

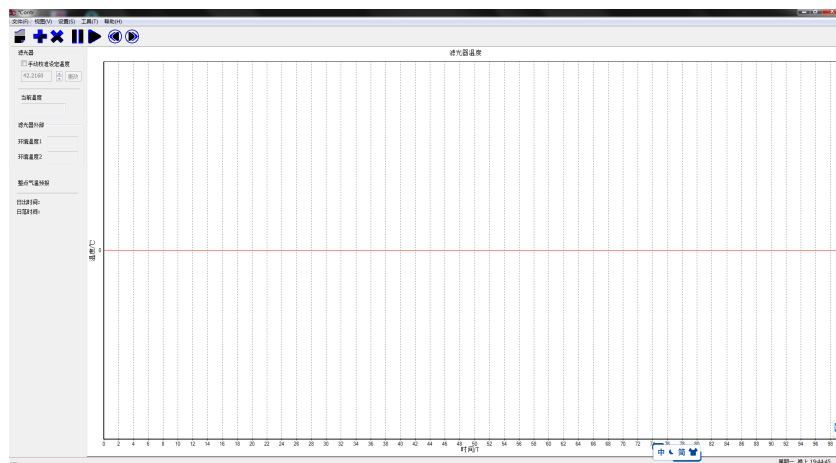


图 5.24 上位机温度监测软件。

Figure 5.24 Host computer temperature monitoring software.

本监测软件为方便科研使用，还有如下智能化设计：

1. 串口自动检测功能：自动筛选并列出可用串口号，如果只有一个可用串口，则建立连接；如果没有可用串口，则弹出提示信息。
2. 参数设置功能：该程序还配有设置控制软件控制参数，包括设定温度，参数 P、I、D 等。

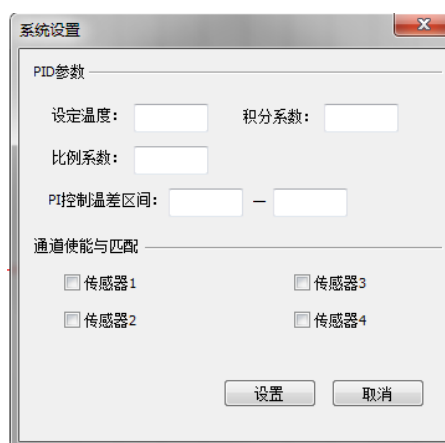


图 5.25 参数设置对话框。

Figure 5.25 Parameter setting dialog box.

3. 数据保存功能：该功能分为图像保存和源数据保存两种。图像保存：软

件实现了当前温度曲线截取保存功能，并自动生成当前截图时间的文件名；源数据保存：将数据保存到 txt 文档，具有以下设置功能，数据保存时间间隔设置，数据点选择，数据长度设置等。在 txt 数据头中，自动生成记录时间，测温通道，采样间隔等信息，方便数据管理查询。如下图5.27是数据保存流程，下图5.26是保存的 txt 文件示意图。

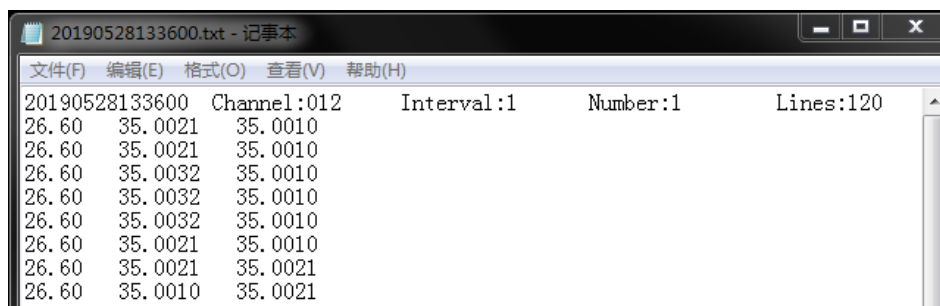


图 5.26 保存数据的 TXT 文档。

Figure 5.26 Data saving of TXT document.

4. 网络天气预报功能：从网页抓取当天的气温数据并每小时更新，显示日出日落时间为地面观测人员观测提供观测参考依据。

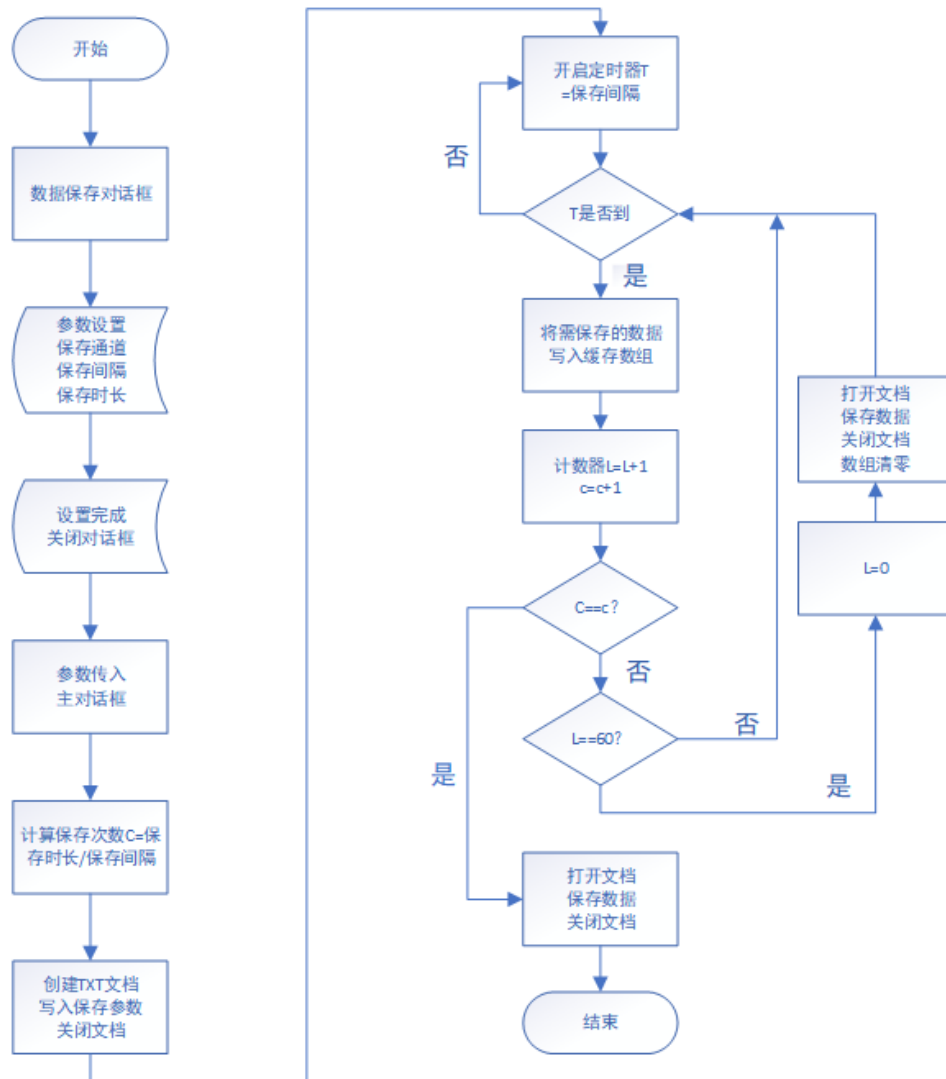


图 5.27 数据保存流程。

Figure 5.27 Data saving process.

## 5.4 本章小结

本章基于高精度温度控制原理（第 3 章）内容，主要介绍了两维实时光谱仪温控系统的实现。首先完成了高精度温控电路实现，包含高精度温度的采集电路与 PWM 加热电路的设计；其次，实现了基于以积分分离 PI 算法为核心的温度控制流程设计，实现了基于 MFC 的上位机监测软件。整套系统经过初步测试，均可稳定正常工作。因此在下一章，开展了整个系统温度控制实验与测试项目。





## 第6章 系统联调测试

在上一章完成软硬件系统设计及第4章温度传感器标定的基础上,本章开展相关温度测试。但两维实时光谱仪当前正处在原理样机调试测试阶段,尚不具备恒温试验的条件。因此,本课题设计了基于怀柔太阳观测基地三通道望远镜与ASO-S FMG液晶偏振分析器为平台的测试实验,三通道望远镜滤光器体积大、结构相对复杂,FMG液晶偏振分析器则应用在真空环境中。因此,两个测试平台的互补试验分别证明了本研究设计实现的高精度温控系统针对大体积、结构复杂、且有空间化需求的两维实时光谱仪具有理论与应用价值。

### 6.1 基于三通道望远镜滤光器平台的恒温改造

怀柔三通道望远镜(申基等, 2008)(如图6.1)是我国独创的,世界唯一的,能同时测量太阳上不同层次、不同尺度的视频矢量磁场、速度场,以及通过光谱扫描获得光谱线轮廓和Stokes参数轮廓的,高时间、高空间分辨率、高灵敏度和适当光谱分辨率的,高科学含量的综合望远镜,是目前世界上具有领先水平的最强大的综合功能的太阳望远镜系统之一(李进, 2011)。三通道望远镜主要用于太阳物理的基础研究,日地关系应用基础研究以及太阳活动对空间环境和通讯骚扰预报等应用研究。

三通道滤光器是该望远镜的核心光学部件,其恒温控制系统经过多年的运行,控制精度逐渐降低,观测效果变差。尤其在冬季时,由于昼夜温差巨大,增加了三通道滤光器表面散热速率,增强了内部温度场的不均匀性,使得观测效果进一步恶化,谱线漂移严重时可达 $0.1\text{\AA}$ ,测得的磁场在早晨、傍晚时效果很差,无法满足科研使用需求。

因此本项目要求通过改造恒温控制系统,改善三通道望远镜恒温控制效果。同时,以此为契机,可以测试多通道恒温控制系统的温控效果。

#### 6.1.1 原有的三通道望远镜滤光器恒温系统设计

如下图6.2为三通道望远镜滤光器结构图(李进, 2011)。

由于三通道望远镜复杂的机械结构设计,原有三通道滤光器恒温控制系统加热形式采用底面、两个侧面的恒温控制形式,即顶面(安装有17个电机)、前



图 6.1 三通道望远镜。

Figure 6.1 Three Channel Solar Telescope.

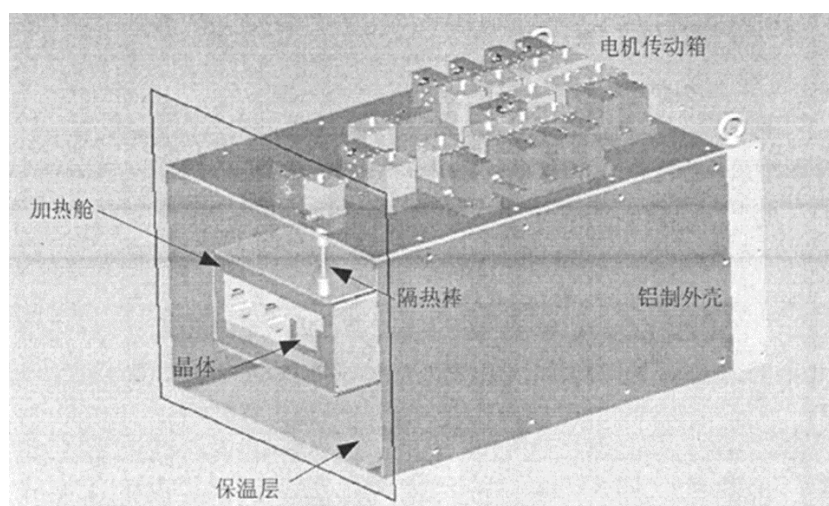


图 6.2 三通道望远镜滤光器结构图。

Figure 6.2 Structure diagram of three channel telescope filter.

后端面 (设有通光孔径) 未安装加热膜。原有的温度控制系统采用两个温控箱对底面和两个侧面分别控温的形式。具体热控方式见下表6.1所示。从该表中可以分析得出：三通道温度控制出现不稳定的原因除了系统老化以外，还在恒温结构设计方面存在一定不足，即长方体六个面的滤光器内核只有三个面采用了控温、保温措施。这种恒温措施很难满足室外运行的大体积的三通道滤光器的恒温需求，对环境变化抵抗力较弱，外部温度变化易引起内部温度漂移，导致太阳图像质量降低。因此本项目为了进一步解决这一问题，还增设了滤光器外围增加二级恒温措施。

表 6.1 三通道滤光器恒温结构。

Table 6.1 Constant temperature structure of three channel filter.

位置	加热膜	保温层	传感器	控制箱
底面	有	有	1 个表面传感器	1 个
两个侧面	有	有	1 个表面传感器	1 个
两个端面	无	无	无	无
顶面	无	无	2 个内部传感器	无

### 6.1.2 双通道恒温控制系统

更换双通道恒温控制系统，该系统采用液晶偏振分析器相同的设计。系统设定温度为  $42.216^{\circ}\text{C}$ ，调试温控参数，温控系统控制稳定度达到  $0.01^{\circ}\text{C}$ 。如下图6.3曲线为温控稳态时三通道温度控制曲线。图中为 1000s 内的恒温状态曲线，温度采样频率为 1s。通道一温度范围为  $42.2112\sim 42.2188^{\circ}\text{C}$ ，最大温度偏差为  $0.0076^{\circ}\text{C}$ ，平均温度  $42.21497^{\circ}\text{C}$ ；通道二温度范围为  $42.2129\sim 42.2180^{\circ}\text{C}$ ，最大温度偏差  $0.0051^{\circ}\text{C}$ ，平均温度  $42.21542^{\circ}\text{C}$ 。两通道恒温控制均优于滤光器恒温控制  $0.01^{\circ}$  的温控需求。

### 6.1.3 二级恒温设计

原有三通道恒温设计采用三面加热方式，难以抵御外界温度变化。三通滤光器结构复杂，如果在滤光器结构上增加二级恒温会面临拆卸光学机械结构等复杂工程问题，因此在外围增加二级恒温结构。二级恒温的主要目标是为三通道滤光器外界提供一个相对稳定的恒温条件，因此，需要的恒温精度较低，本次项目改造计划将温度波动范围控制在  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  内。

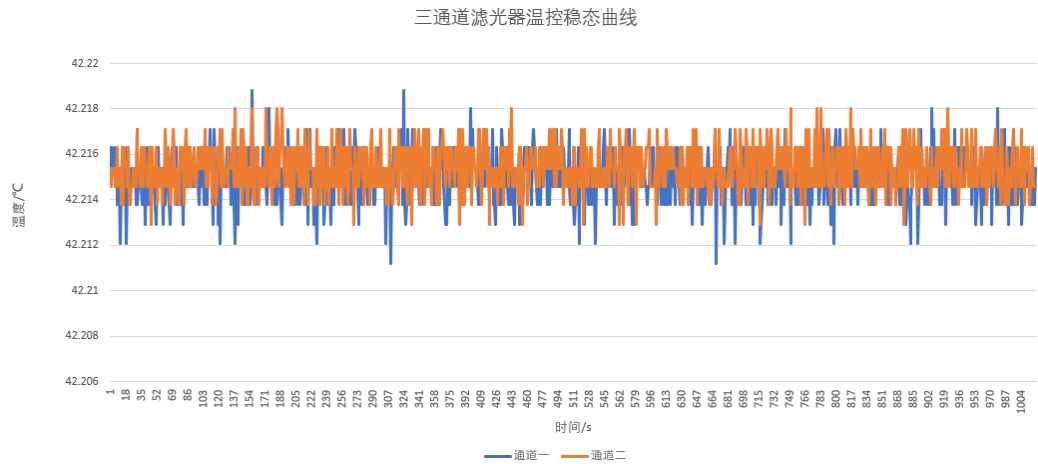


图 6.3 三通道望远镜滤光器恒温稳态曲线。

Figure 6.3 Constant temperature curve of three channel telescope filter.

二级恒温控制系统结构设计如下图6.4所示，在滤光器外围上面、两个侧面包围双层铝板，加热膜贴于双层铝板间，加热膜采用 220V 交流电驱动加热，加热膜总阻值约  $74\Omega$ ，最大功率约 650 瓦，可以满足冬季时的观测需求。双层铝板设计可以有效避免大电流对望远镜系统的电磁干扰，Pt100 温度传感器贴在铝板上。

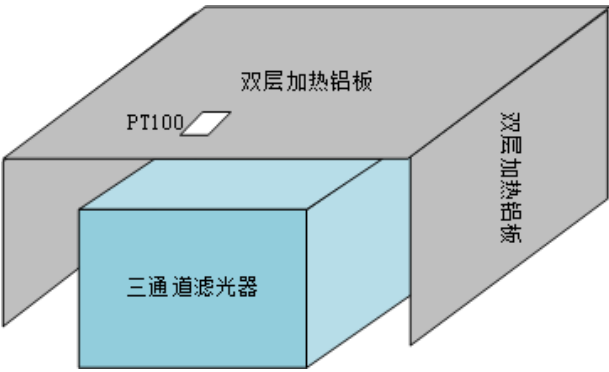


图 6.4 滤光器二级恒温结构。

Figure 6.4 Two stage constant temperature structure of filter.

如下图6.5为控制系统电气连接原理图。从图中可以看出，系统的控制结构主要有四个：PID 控制器，固态继电器，Pt100 温度传感器和加热负载(加热膜)。

PID 控制器选用虹润 PID 控制器，如下图6.6所示，该款控制器采用智能化设置，控制温度精度最好可达  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ，使用 Pt100 作为温度传感器，输出 12V 开关控制信号，可控制固态继电器的开关状态。

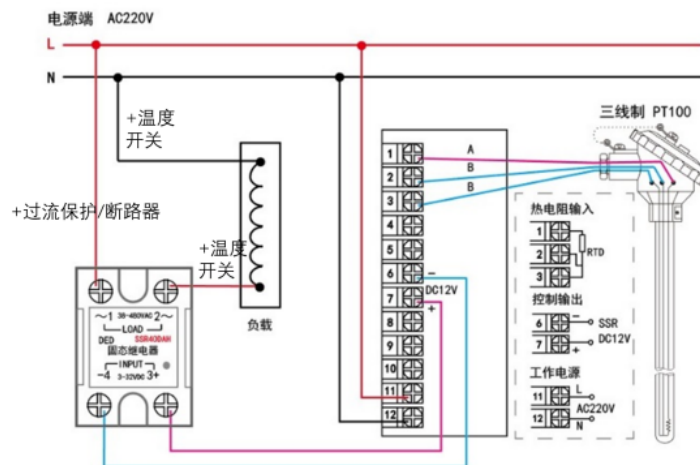


图 6.5 三通道二级恒温控制系统电气连接原理图。

Figure 6.5 Electrical connection schematic diagram of two stage temperature control system.



图 6.6 虹润 PID 温度控制器。

Figure 6.6 HongRun PID temperature controller.

固态继电器 (SSR)(Yanling 等, 2003), 是由微电子电路, 分立电子器件, 电力电子功率器件组成的无触点开关。固态继电器的输入端用微小的控制信号, 达到直接驱动大电流负载。

加热回路采用 220V 交流电压, 为了保证电路电器安全, 首先在加热回路串联保险丝作为过流保护, 其次串联温度开关防止铝板温度过高。

制作控制板, 设定控制器温度为  $39^{\circ}\text{C}$ , 低于滤光器恒温温度  $42.216^{\circ}\text{C}$ 。温控范围在  $39\pm 0.7^{\circ}\text{C}$  之间。

#### 6.1.4 三通道望远镜运行结果

如下图6.7为 2019 年 3 月 13 日 (冬末春初) 的三通道波带扫描轮廓图。记录并测试三通道望远镜的在一天内的波带线心变化, 记录在下表6.2中。从表中可以看出, 三条谱线在一天内的漂移量大大减小, 远小于系统改造前的  $0.1\text{\AA}$ 。

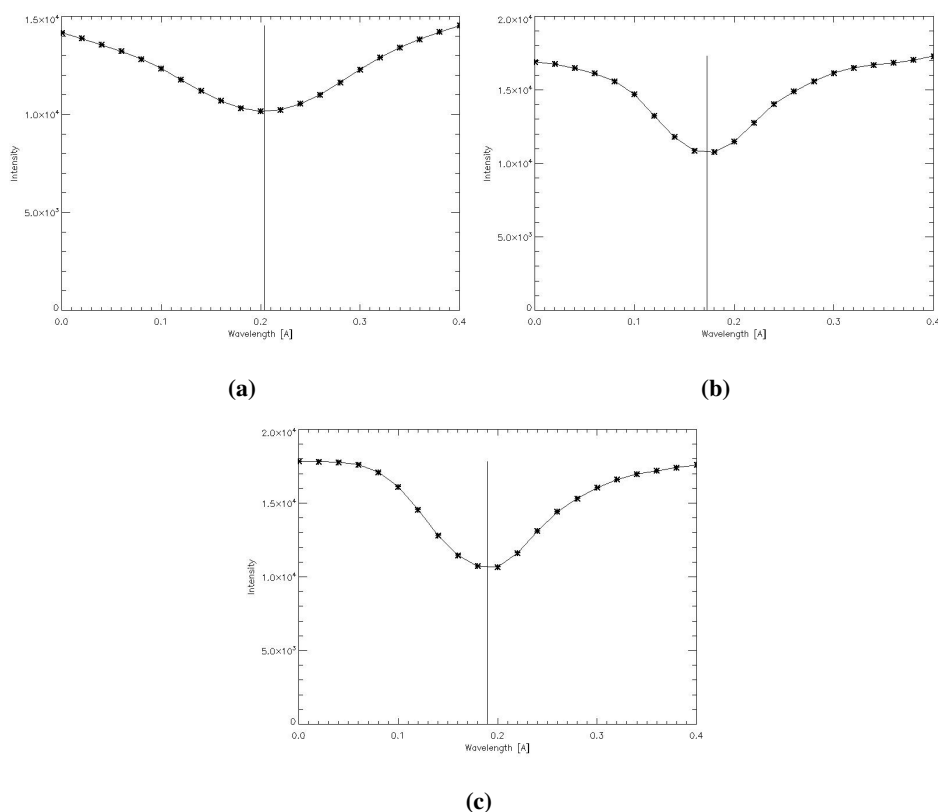


图 6.7 三通道滤光器谱线轮廓图。(a) 5173 谱线, (b) 5247 谱线, (c) 5250 谱线。

Figure 6.7 Spectrum profiles of three channel telescope filter.(a) Spectrum 5173, (b) Spectrum 5247, (c) Spectrum 5250.



表 6.2 2019 年 3 月 13 日三通道望远镜线心变化。

Table 6.2 Line center change of three channel telescope on March 13, 2019.

谱线	早上线心/ $\text{\AA}$	下午线心/ $\text{\AA}$	漂移量/ $\text{\AA}$
5173	-0.79	-0.77	+0.02
5247	-0.23	-0.20	+0.03
5250	-0.31	-0.29	+0.02

## 6.2 基于液晶偏振分析器平台的测试研究

### 6.2.1 液晶偏振分析器

液晶型偏振分析器是新一代太阳磁场望远镜中的关键设备，我国第一颗空间太阳观测卫星——先进天基太阳天文台 (ASO-S)(Gan 等, 2015) 中的磁场测量将采用该种设计偏振分析器。ASO-S 卫星，是我国科学家提出的研究太阳耀斑、日冕物质抛射 (CME) 和太阳磁场的太阳观测卫星。该项目是中国科学院空间战略先导科技专项第二批确定的科学实验卫星，预计 2021 年发射。其中，全日面矢量磁像仪 (FMG)(Deng 等, 2019) 是 ASO-S 卫星的三个主要载荷之一，将以高时空分辨率、高磁场灵敏度测量全日面的光球磁场 (林元章, 2000)。

FMG 载荷液晶型偏振分析器的核心光学元件是两片具有相同结构的液晶波片 (LCVR)，LCVR 相位延迟对温度敏感，温度每变化  $0.1^{\circ}\text{C}$ ，相位延迟变化  $0.09^{\circ}$ 。因此，维持偏振分析中 LCVR 的恒温环境至关重要，关系科学产出数据的准确有效性。FMG 偏振分析器温控指标要求在真空环境  $22\pm 2^{\circ}\text{C}$  的条件下，控制温度在  $35^{\circ}\text{C}$ ，温度波动不大于  $0.1^{\circ}\text{C}$ (Deng 等, 2019)。

为完成液晶偏振分析器的温控任务，系统采用两通道测温控温方案，可以有效检验多通道温控系统的工作性能。空间化的偏振分析器对重量、隔热都有严格的要求，因此在结构主体与底座间增加隔热垫，为了进一步的减少热传导，在底座接触面设计骨架结构减少接触面。除主体结构外，两片液晶所处位置对称，封窗玻璃，加热膜、温度传感器也对称放置，对称化的结构设计减小了两块液晶波片温度场差异，有利于温度场均匀稳定。因此，两块液晶波片 (LCVR) 在偏振分析器中所处位置完全对称，因而设计两路相互独立控制回路，分别对两块 LCVR 进行恒温控制。偏振分析器设计结构如图 6.8 所示。(值得注意的是：液晶偏振分析器正样结构会在外表面包覆 10 单元多层、多层外面膜为黑色渗碳膜，来削弱

热辐射影响。但在本课题实验阶段，液晶偏振分析器尚在初样阶段，结构没有保温措施。这会对温控的稳定性造成一定影响。)

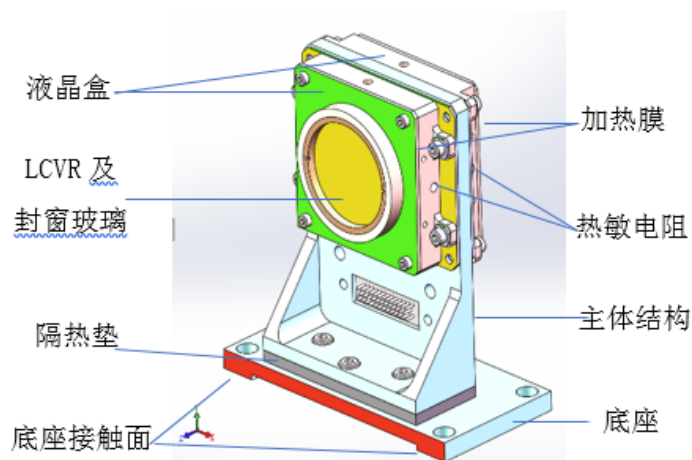


图 6.8 液晶偏振分析器结构图。

Figure 6.8 Structure of liquid crystals based Stokes polarimeter.

液晶偏振分析器加热结构采用完全相同的两片加热膜，贴在上图6.8指定的位置，加热膜尺寸图如下6.9所示。加热膜尺寸取液晶盒最大表面，面积约  $1830\text{mm}^2$ ，加热膜阻值为  $48\pm 1\Omega$ ，每路加热电源为 12V，加热最大功率为 3W。

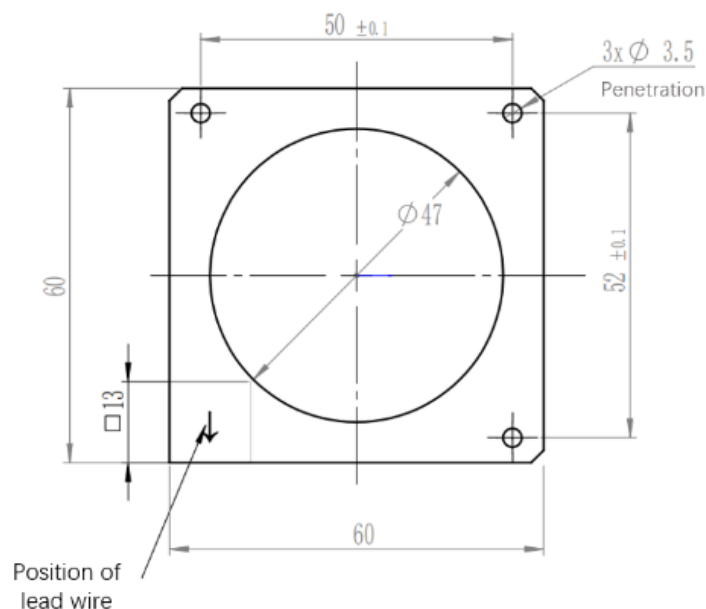


图 6.9 加热膜尺寸图。

Figure 6.9 the Dimensional drawing of heating film.



### 6.2.2 液晶偏振分析器有限元热分析

当偏振分析器处在恒温状态时，系统的导入热等于导出热。除加热膜产生的稳定热流外，偏振分析器导入热还包含太阳光照射到 LCVR 上产生的热效应以及来自环境的热辐射。在真空中，导出热以热传导和热辐射形式进行。因此，在满足空间结构强度设计要求下，减小结构与箱体的接触面、设置隔热板，来降低热传导影响。同时，通过表面发白或为结构表面施加防辐射材料，降低热辐射作用。

使用 ANSYS 对偏振分析器做热分析，如下表是热分析材料导热相关参数表6.3。如图6.10为其在 22°C 真空环境时的温度场分布，从图中可以看出，偏振分析器顶端温度较高，底部温度较低。温度分布范围为 22.0~35.004°C。

表 6.3 液晶偏振分析器材料传热属性。

Table 6.3 Heat transfer properties of materials for liquid crystals based Stokes polarimeter.

材料	构件名称	密度 $g/cm^3$	导热率 $W/m \cdot K$	辐射率
JGS1 玻璃	液晶波片	2.2	1.951	0.85
TC4/M	结构件主体	4.5	7.995	0.85
环氧板 3240	隔热板	1.8	0.2	0.2
铝合金	接插件	2.8	60.5	0.85
铜	导电铜条	8.92	64	—
聚酰亚胺	加热片	—	—	0.85

观察图6.11右侧图，LCVR 最低温度出现在波片内侧（朝里一侧）最底部，该位置由于存在导线出口，导致散热功率较大。偏振分析器通光口径如图中白色圆环内所示，该区域的温度变化是关注的重点，温度范围在 34.397~34.862°C 内。根据热分析结果显示，LCVR 在垂直于底面方向存在一定的温度梯度，如箭头所示。根本原因是：若以 LCVR 几何结构为中心，偏振分析器上下结构为非对称设计，导致上下两个面散热速率不一致。因此，为减小该方向的温度梯度，可选择加强顶部散热或减少底部散热两种方式，即重新设计对称型的偏振分析器结构或考虑为 LCVR 底部增加加热膜。

当为 LCVR 底部增加 35°C 加热膜时，其在竖直方向的温度梯度减小明显，如下图6.12所示。LCVR 通光口径处温度范围为 34.724~34.848°C，温度不均匀性

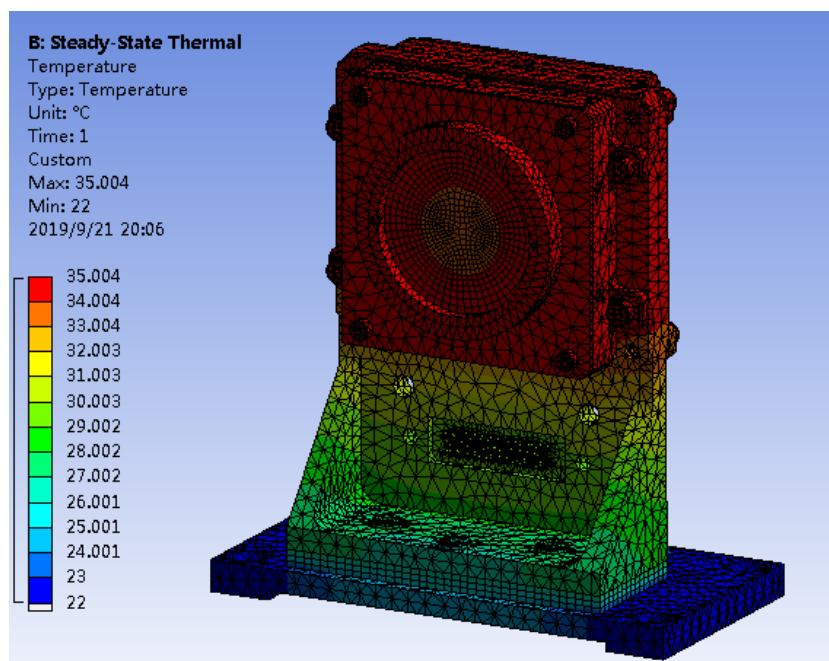


图 6.10 偏振分析器温度场分布。

Figure 6.10 Temperature distribution of liquid crystals based Stokes polarimeter.

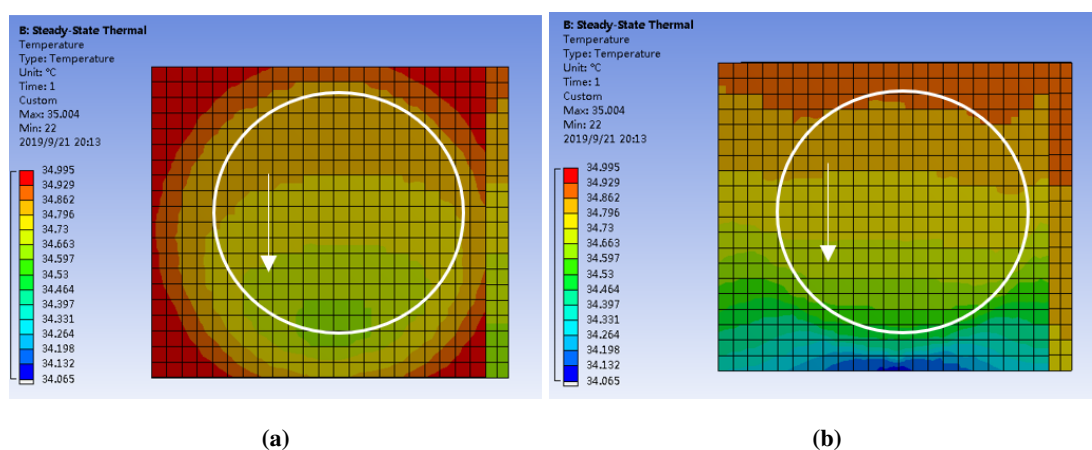


图 6.11 LCVR 温度场分布。(a) LCVR 外侧面温度场分布，(b) LCVR 内侧面温度场分布。

Figure 6.11 Temperature distribution of LCVR.(a) Temperature distribution of Outer side of LCVR, (b) Temperature distribution of internal side of LCVR.

为  $0.124^{\circ}\text{C}$ ，远小于之前的  $0.465^{\circ}\text{C}$ 。可以预见，当为 LCVR 左侧面和右侧面施加  $35^{\circ}\text{C}$  加热膜时，LCVR 温度场将更均匀，但同时，也会带来更加复杂的结构设计。

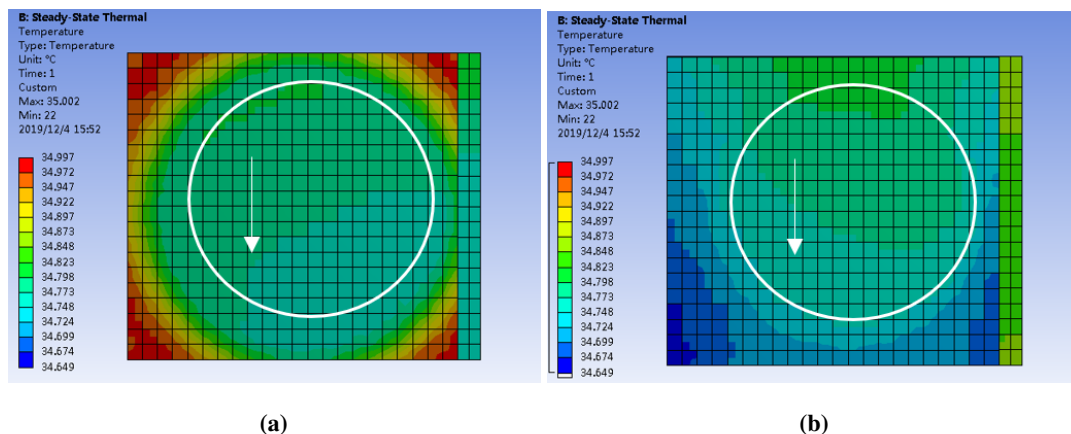


图 6.12 底面加加热膜时 LCVR 温度场分布。(a) LCVR 外侧面温度场分布，(b) LCVR 内侧面温度场分布。

Figure 6.12 Temperature distribution of LCVR with heating film on the bottom.(a) Temperature distribution of Outer side of LCVR, (b) Temperature distribution of internal side of LCVR.

### 6.2.3 光照对液晶波片温度场的影响

由于非对称的复杂结构设计，热传导和热辐射分析多依赖于有限元方法，但光的热效应在一定的理想假设下，可以得到近似的解析解。

当光照射穿过 LCVR 时，会在内部产生一定热效应从而影响 LCVR 温度场。LCVR 结构 (Herederio 等, 2007) 如下图6.13所示，波片中间的是液晶材料，从最内层到两侧对称分布透明的氧化铟锡电极、亚胺层、熔融石英基板，以及最外层的减反射膜。因此，LCVR 是由 5 种材料构成的 9 层复合结构实现的。

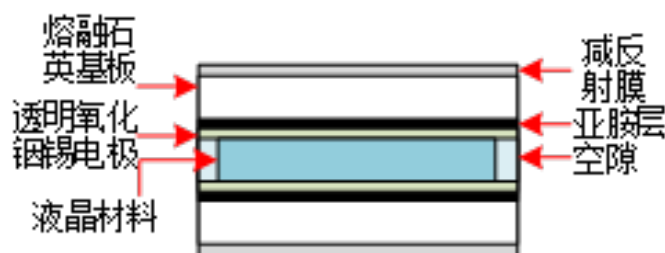


图 6.13 LCVR 结构图。

Figure 6.13 Structure diagram of LCVR.

光在半透明均匀介质中传播时，介质中光的衰减率与光的强度成正比， $\alpha$  是光的吸收系数， $I_0$  是初始光强， $I$  是透过  $x$  的光程得到的光强度，若光束在晶体内部仅有透射，则有：

$$\frac{dI}{dx} = -\alpha I \quad \dots (6.1)$$

积分得：

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad \dots (6.2)$$

公式6.2即为光在半透明介质中  $x$  位置处的光照强度，则，光在  $x$  位置损失的光强为：

$$dI = -\alpha I_0 e^{-\alpha x} dx \quad \dots (6.3)$$

假设损失的光强度均已热能形式耗散，则折合为光在  $x$  截面， $t$  时间内产生的热能  $Q$ ：

$$dQ = -dI * st = st\alpha I_0 e^{-\alpha x} dx \quad \dots (6.4)$$

即由光照形成的内热源强度为：

$$\Phi_x = \frac{dQ}{tdv} = \frac{dQ}{stdx} = -\alpha I_0 e^{-\alpha x} \quad \dots (6.5)$$

为简化模型，忽略环境热辐射及 LCVR 自身热辐射。则稳态时，导热系数为  $\lambda$  的介质的导热微分方程满足：

$$\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{\Phi_x}{\lambda} = 0 \quad \dots (6.6)$$

且导热流密度函数在无穷远处降至 0，因此有：

$$\lim_{x \rightarrow \infty} -\lambda \frac{dt}{dx} = 0 \quad (6.7)$$

解得：

$$t = \frac{I_0}{a\lambda} e^{-\alpha x} + c \quad \dots (6.8)$$

因此，稳态时，光照对均匀介质的温度场产生的影响如式6.8所示。此时 LCVR 内部温度从入射面到出射面呈由高到低分布，在理想情况下，温度场分布按照自然常数负指数方程分布。

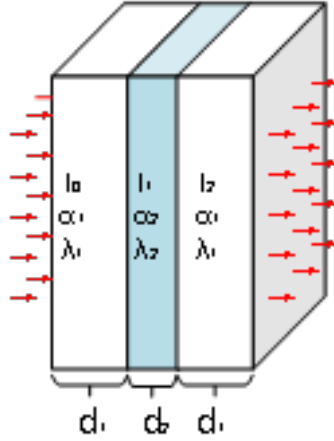


图 6.14 LCVR 结构简图。

Figure 6.14 Three-layer structure diagram of LCVR.

为简化传热问题，忽略其中厚度很薄的氧化铟锡电极、亚胺层，将 LCVR 转化为三层结构模型。三层结构如下图6.14所示，为入射到  $x$  层的光强， $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为外侧熔融石英基板和中部液晶材料的光吸收系数和导热系数。

则各层温度场表示为：

$$t_1 = \frac{I_0}{\alpha_1 \lambda_1} e^{-\alpha_1 x} + c_1 \quad \dots (6.9)$$

$$t_2 = \frac{I_1}{\alpha_2 \lambda_2} e^{-\alpha_2 x} + c_2 \quad \dots (6.10)$$

$$t_3 = \frac{I_2}{\alpha_1 \lambda_1} e^{-\alpha_1 x} + c_3 \quad \dots (6.11)$$

在接触面的导热流密度连续，因此光强关系：

$$I_1 = I_0 e^{-\alpha_1 d_1} \quad \dots (6.12)$$

$$I_2 = I_1 e^{-\alpha_2 d_2} = I_0 e^{-\alpha_1 d_1 - \alpha_2 d_2} \quad \dots (6.13)$$

在接触面，温度场均连续，即：

$$t_1|_{x=d_1} = t_2|_{x=0} \quad \dots (6.14)$$

$$t_2|_{x=d_2} = t_3|_{x=0} \quad \dots (6.15)$$

假设初射边界温度为  $T$ ：

$$t_1|_{x=0} = T \quad \dots (6.16)$$

根据式6.12 ~6.16 约束条件，可以解得 LCVR 的温度场：

$$t(x) = \begin{cases} \frac{I_0}{\alpha_1 \lambda_1} e^{-\alpha_1 x} + \frac{-I_0}{\alpha_1 \lambda_1} + T & d_1 > x \geq 0 \\ \frac{I_1}{\alpha_2 \lambda_2} e^{-\alpha_2(x-d_1)} + \frac{I_0}{\alpha_1 \lambda_1} + \frac{I_1}{\alpha_1 \lambda_1} + \frac{-I_1}{\alpha_2 \lambda_2} + T & d_1 + d_2 > x \geq d_1 \\ \frac{I_2}{\alpha_1 \lambda_1} e^{-\alpha_1(x-d_1-d_2)} + \frac{-I_0}{\alpha_1 \lambda_1} + \frac{I_1}{\alpha_1 \lambda_1} + \frac{-I_1}{\alpha_2 \lambda_2} + \frac{I_2}{\alpha_2 \lambda_2} + \frac{-I_2}{\alpha_1 \lambda_1} + T & 2d_1 + d_2 \geq x \geq d_1 + d_2 \\ \dots & \dots \end{cases} \quad (6.17)$$

根据能量守恒，光照损失的热功率  $Q$  即为 LCVR 增加的内能，则式6.18表示， $T_0$  为 LCVR 初始温度， $c$  是物体比热容， $m$  为物体质量。

$$Q = \frac{cm}{2d_1 + d_2} \int_0^{2d_1+d_2} (t(x) - T_0) dx \quad \dots (6.18)$$

基于以上推论，在得知 LCVR 中各材料物性特征、LCVR 初始温度、光照强度的条件下，可以由式6.17描述 LCVR 在垂直光照下的温度场。因此，在偏振分析器前加隔热玻璃，选择比热容、密度较小的基板材料，减小 LCVR 厚度，是降低 LCVR 光热效应、维持其温度场纵向均匀的主要手段。

#### 6.2.4 液晶偏振分析器温控测试平台搭建

测试实验在实验室内完成。测试设备主要包括控制箱，用于完成真空试验的真空箱，温控监测计算机，液晶偏振分析器等。

##### (1) 温度控制箱

温控箱硬件系统与软件控制系统采用上一章节设计成果，其核心部件为测温电路与控制电路、以及为电路提供基本直流电压的开关电源，温控箱如下图6.15a所示：

##### (2) 真空箱

采用深圳三利公司生产的 DZF-6090C 真空箱空箱，如下图6.15b，该真空箱温度控制采用微电脑智能数字技术制造，具有工业 PID 自整定和四位双 LED 窗指示功能，操作简洁方便，可以满足小型仪器的真空电气试验需求。真空箱可引出 32 芯线缆，满足测试任务。真空箱的具体参数如下表6.4。

##### (3) 计算机

本实验使用一台计算机监测温控过程，常见的 Windows 操作系统计算机均可满足使用需求。监测软件可稳定运行在 Windows 7、Windows 10 系统之上。计算机需配备至少一个通用串口接口。计算机中需安装温度监测软件。

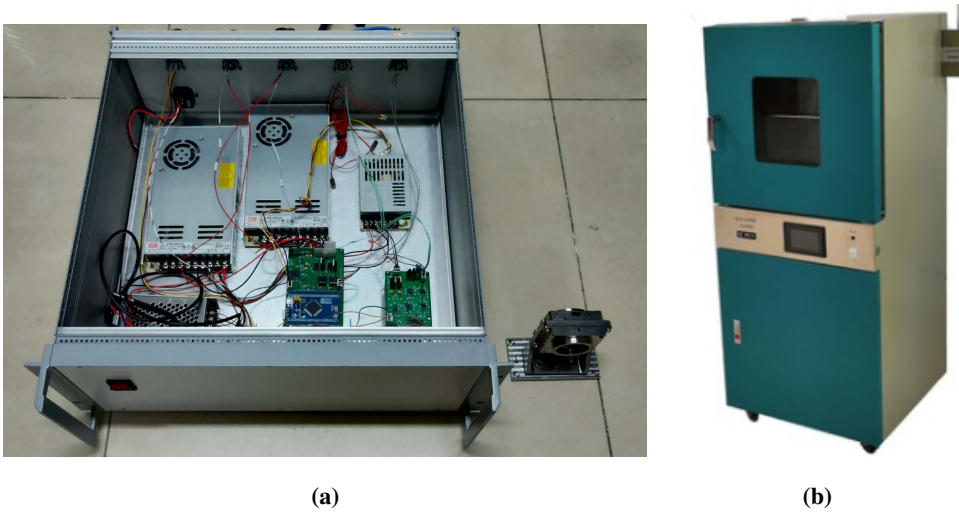


图 6.15 温度控制箱与真空试验箱。(a) 温度控制箱，(b) 真空试验箱。

Figure 6.15 Temperature control box and Vacuum drying oven.(a) Temperature control box, (b) DZF-6090c vacuum drying oven.

表 6.4 DZF-6090C 真空干燥箱参数表。

Table 6.4 Parameter table of DZF-6090C vacuum drying oven.

型号	DZF-6090C
工作室尺寸 (长 × 宽 × 高)mm	450×450×450
配搁板数	2
控温范围	RT+10~200℃，RT：环境温度
温度分辨率	0.1℃
温度波动	±1℃
电源电压	220V、50Hz
消耗功率	1400W
真空度	< 133Pa
定时范围	1~999min

### 6.2.5 温控实验

#### (1) 35°C 时温控实验及对比

在非真空与真空环境下进行温度控制实验。在室内环境温度下 (22°C) 和在真空环境下 (22°C, 100pa), 设定温度为 35°C, 分别做三次温度控制实验测试系统稳定性。如图6.16和6.17所示, 分别是液晶偏振分析器在空气中与真空中的两通道温度控制曲线。从图中可以看出, 温控系统两通道曲线并不完全同步, 其原因是两路加热膜电阻值存在误差, 导致加热功率不同, 同时两片 LCVR 在结构设计上也不能保证严格对称, 这使得温控曲线在上升、超调阶段出现较明显的差异。但温度恒定后, 两路温度均趋于平稳。

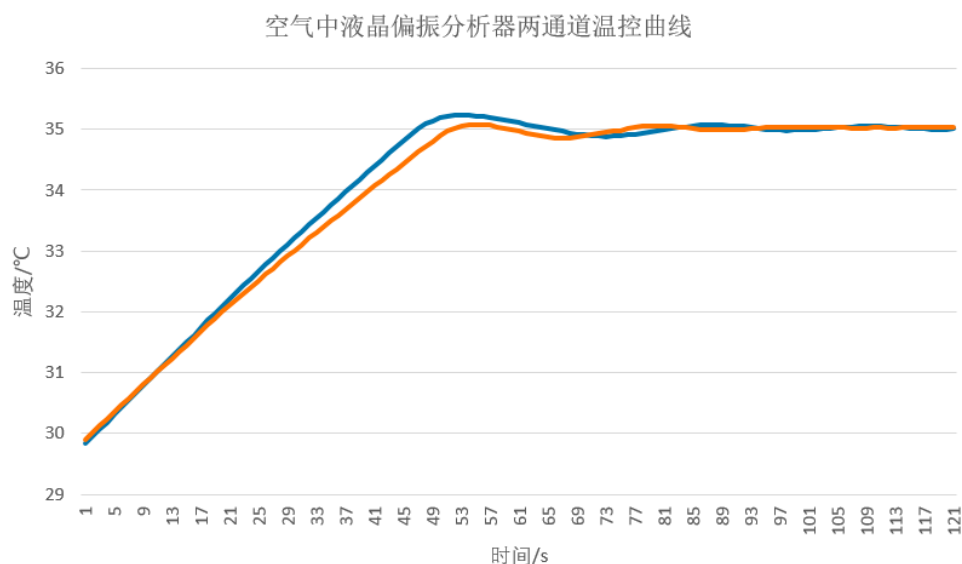


图 6.16 空气中液晶偏振分析器温度控制曲线。

Figure 6.16 Temperature control curve of liquid crystals based Stokes polarimeter in the air.

分别取真空中与空气中一路温度控制曲线作对比, 绘制曲线如图6.18所示。从该图看出, 当外界环境由空气变为真空时, 温度控制曲线出现明显不同, 其原因在于由于环境够改变, 导致液晶偏振分析器主要传热方式由热对流变为热辐射, 导致散热速率改变从而改变了温控特性。控制特性统计表如表6.5所示。由表可见, 在空气中, 该温度控制系统运行稳定, 重复性高, 从 30°C 首次升至 35°C 耗时均为 51s, 经过三次波动达到平稳, 平稳时间在 51~54s 内, 最大偏差为 0.0152°C。在真空中, 从 30°C 首次升至 35°C 耗时均为 50~52s, 经过三次波动达到平稳, 平稳时间在 62~65s 内, 最大偏差为 0.0250°C。



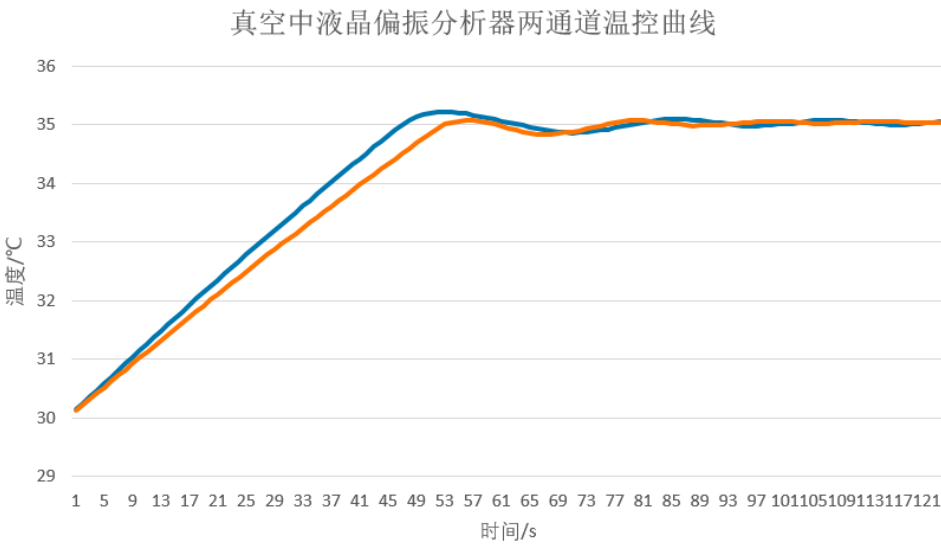


图 6.17 真空中液晶偏振分析器温度控制曲线。

Figure 6.17 Temperature control curve of liquid crystals based Stokes polarimeter in the vacuum.

表 6.5 液晶偏振分析器温度控制统计表。

Table 6.5 Statistical data of temperature control experiment of liquid crystals based Stokes polarimeter.

实验 类型	次数	上升时间/s (30~35 °C )	平稳 时间/s	平均 温度/°C	最大 偏差/°C
在空气中	1	51	51	35.0452	0.0141
	2	51	54	35.0345	0.0152
	3	51	52	35.0464	0.0152
在真空中	1	54	65	35.0473	0.0236
	2	55	62	35.0482	0.0217
	3	54	63	35.0478	0.0250

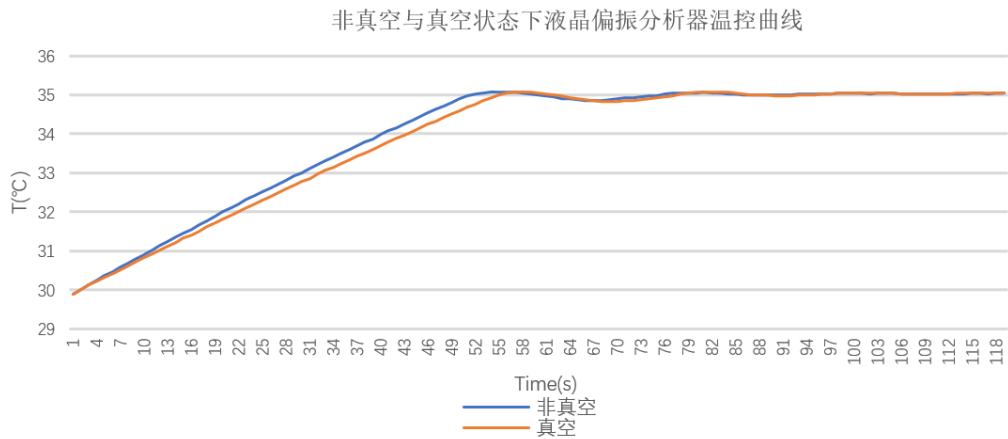


图 6.18 液晶偏振分析器温度控制曲线。

Figure 6.18 Temperature control curve of liquid crystals based Stokes polarimeter.

(2) 分段温控实验

为了进一步分析温控箱系统的温度控制稳定性，且同时满足液晶偏振分析器在地面的定标需求（液晶偏振分析器定标时，要求设置不同的温度测试光学特性）。因此，在空气与真空环境中，分别做分段温度控制实验，控制曲线如下图6.19与6.20所示。温度控制范围为 29~46℃，共 18 个温度设置点，从图中可以看出，从更改设定温度开始，液晶偏振分析器温度经过升高、超调、震荡最终均趋于平稳，平稳后温度波动范围都小于 0.1℃。

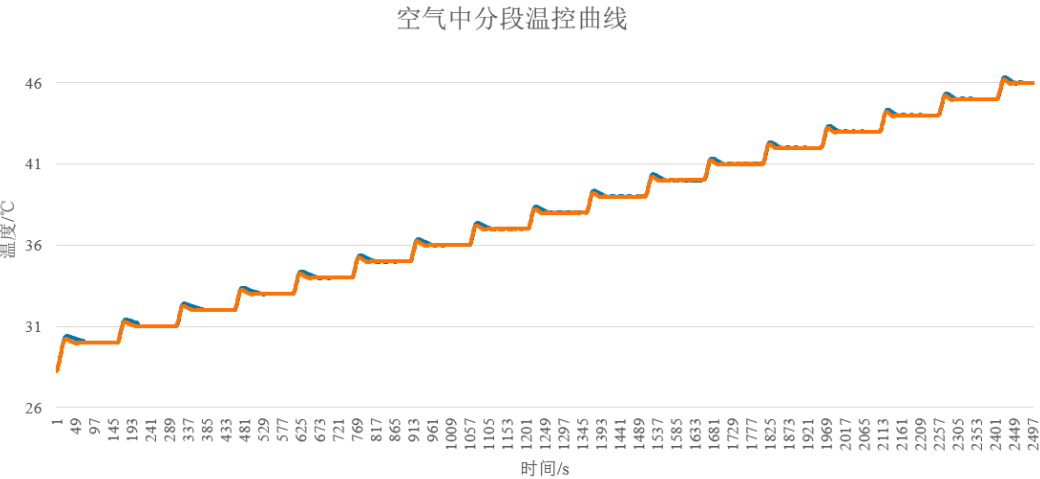


图 6.19 空气中液晶偏振分析器分段温度控制曲线。

Figure 6.19 Sectional temperature control curve of liquid crystals based Stokes polarimeter in the air.

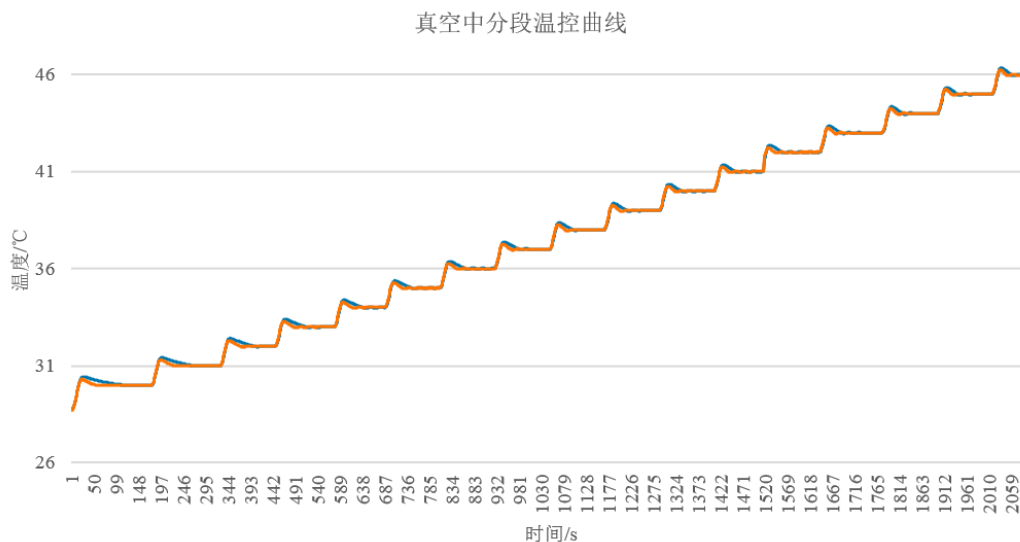


图 6.20 真空中液晶偏振分析器分段温度控制曲线。

Figure 6.20 Sectional temperature control curve of liquid crystals based Stokes polarimeter in the vacuum.

#### 6.2.6 液晶偏振分析器子系统——液晶搭载试验仪搭载平台测试实验

液晶偏振分析器件的核心光学部件为两片液晶波片，液晶波片是 FMG 载荷能否实现高灵敏度磁场测量的最核心部件。然而，目前世界上尚未有液晶波片在空间使用的先例。地面的空间环境试验条件虽然可以模拟真空、热、力学、辐照等在轨环境，但无法准确模拟液晶材料在空间的使用环境。液晶作为一种新材料新器件，国际上缺乏与空间环境相互作用的数据和理论机理，用已有的传统的地面辐照条件或方式进行液晶波片的空间环境模拟试验，其试验结论是有效可信亦或完全偏离实际工作状态。因此，项目组设计了液晶搭载实验来测试液晶波片性能，并通过了一系列的空间环境测试。

如下图6.21所示是设计搭载的核心光学部件偏振分析器组件，该部件主要包括 1 片液晶波片、2 片偏振片、1 组（2 片）加热膜和 1 个热敏电阻组成。由此可看出，在液晶搭载项目中，液晶偏振分析器组件仅相当于 FMG 液晶偏振分析器的部分（一半）结构，搭载试验恒温波动范围也仅要求  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。恒温设计仅采用一路测温控温方式实现，且搭载试验对硬件尺寸更加严苛的限制，恒温精度要求低，因此测温电路仅采用仪用放大器 AD524 实现（取消两维实时光谱仪电路原理中的 PGA 与滤波电路环节）一路温度测量，如下图6.22所示为测温电路原理图。系统采用 51 内核的 LSMEU01 作为主控芯片，使用 LSMEU01 集成的 12

位 AD 通道实现温度采集，利用定时器产生约 70Hz 的 PWM 驱动加热膜。温度控制算法则采用积分分离 PI 算法。

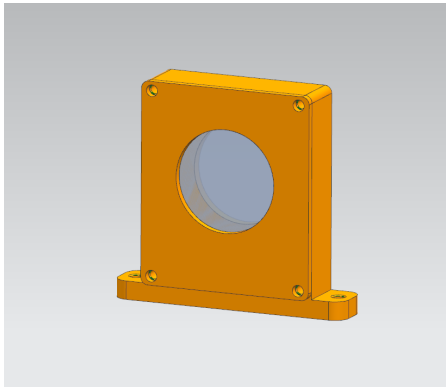


图 6.21 液晶搭载试验偏振分析器组件整体结构示意图。

Figure 6.21 Structural diagram of polarization analyzer assembly for on board test.

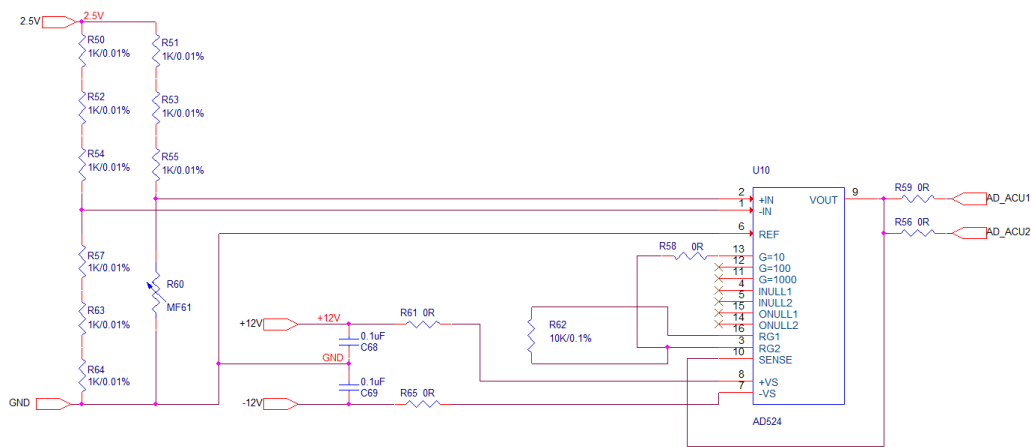


图 6.22 液晶搭载试验测温电路原理图。

Figure 6.22 Schematic diagram of temperature measurement circuit for on board test.

如下图6.23和6.24是液晶搭载在分别在  $\pm 25^{\circ}\text{C}$  时的温度控制曲线。25 $^{\circ}\text{C}$  时，温度控制范围在 34.909~35.059 $^{\circ}\text{C}$  之间，温度最大波动为 0.150 $^{\circ}\text{C}$ 。-25 $^{\circ}\text{C}$  时，温度控制范围为 34.867~35.081 $^{\circ}\text{C}$  之间，温度最大波动为 0.214 $^{\circ}\text{C}$ 。通过液晶搭载在真空环境下控制特性对比可以看出，在低温环境下，控制精度有所降低。但无论在  $\pm 25^{\circ}\text{C}$  条件下，温控系统均能达到控制目标。

从光学结构设计及恒温测控电路角度看，液晶搭载试验仪及其恒温设计系统是 FMG 液晶偏振分析器温控系统的简化子系统，其恒温精度也低于 FMG 液晶偏振分析器达到的 0.03 $^{\circ}\text{C}$ 。但通过在真空中  $\pm 25^{\circ}\text{C}$  环境下的测试实验，证实

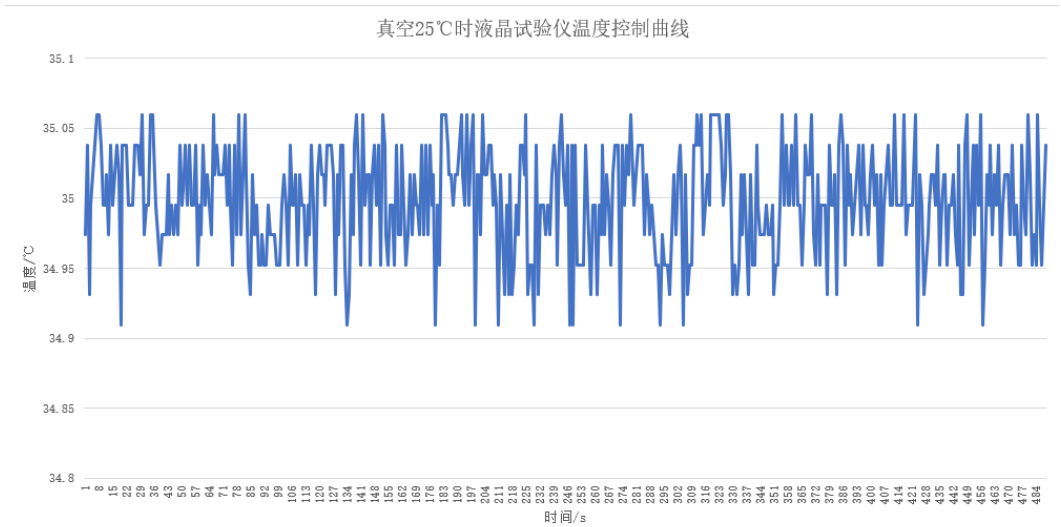


图 6.23 真空 25℃ 时液晶试验仪温度控制曲线。

Figure 6.23 Temperature control curve of liquid crystal tester at 25℃ vacuum.

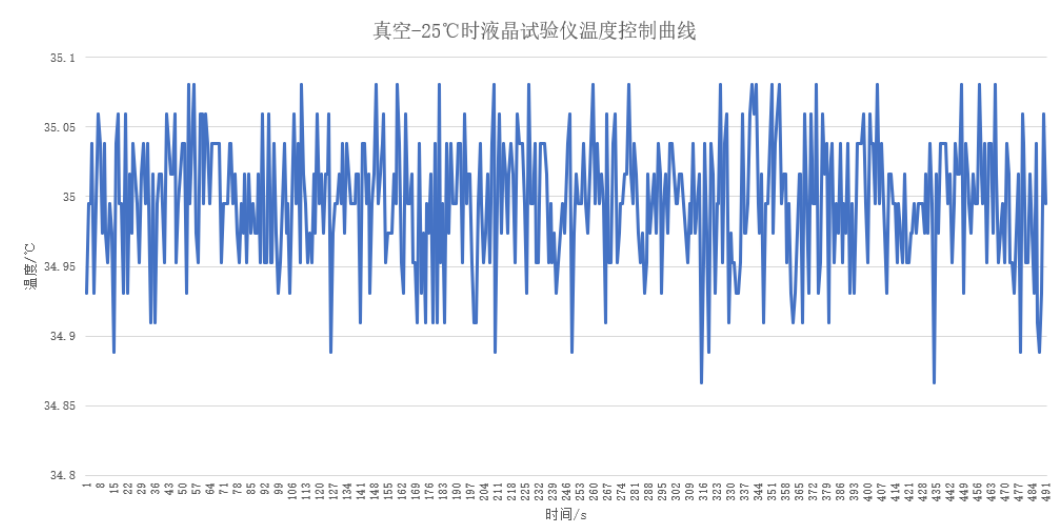


图 6.24 真空-25℃ 时液晶试验仪温度控制曲线。

Figure 6.24 Temperature control curve of liquid crystal tester at -25℃ vacuum.

了系统在极端低温环境下依旧可以保持相当的稳定性。通过完成本次搭载试验，也证实基于两维实时光谱仪实现的高精度温控系统，在找到合适地空间器件条件下，即可实现其空间化应用。

### 6.2.7 实验结论

通过以上实验可知，无论在空气还是真空环境下，该温控系统均达到了液晶偏振分析器  $0.1^{\circ}\text{C}$  的温控要求。并通过多次试验证实了系统的稳定性与重复性。

本节内容主要介绍了高精度温控系统的验证实验的测试平台及实验结果，通过在空气中与真空中的三次实验，验证了恒温控制系统的稳定性，满足液晶偏振分析器的恒温控制需求，无论在空气还是真空中，温控恒温精度均优于  $0.03^{\circ}\text{C}$ ，远优于项目  $0.1^{\circ}\text{C}$  指标要求。并通过液晶搭载试验仪的真空  $\pm 25^{\circ}\text{C}$  温控试验，证实了该系统的健壮性。

由于液晶偏振分析器没有保温措施，本实验恒温波动最小为  $0.0152^{\circ}\text{C}$ ，尚不满足两维实时光谱仪  $0.01^{\circ}\text{C}$  恒温要求，但在三通道滤光器恒温控制改造中，恒温精度优于  $0.01^{\circ}\text{C}$ 。

## 6.3 本章小结

本章主要介绍了空间化高精度温控系统的验证实验的测试平台及实验结果。

在三通道望远镜恒温控制系统中，更换温控系统，使两路温度控制均达到  $0.01^{\circ}\text{C}$  恒温指标要求。验证了本温控系统的长期稳定性，结果也满足了两维实时光谱仪  $0.01^{\circ}\text{C}$  恒温指标。在 FMG 液晶偏振分析器温控测试实验中，通过在空气中与真空中的三次实验及分段温控实验，验证了恒温控制系统的稳定性，恒温精度均达到  $0.03^{\circ}\text{C}$ ，优于液晶偏振分析器的恒温控制需求，并通过液晶搭载项目验证了系统在高低温真空环境下的恒温稳定性。

三通道滤光器与 FMG 液晶偏振分析器有着不同的机械结构特点：三通道滤光器结构复杂，体积大，应用于地面室外望远镜系统；而液晶偏振分析器具有结构相对简单，体积小的特点，应用于空间。两个测试平台互为补充，可以证实：本课题设计的基于两维实时光谱仪高精度完成的双通道温控系统已基本满足空间化复杂结构的高精度恒温控制使用需求。

## 第7章 总结与展望

太阳活动与人类的生产生活息息相关,关注太阳研究就是关注人类发展。太阳磁场与太阳活动有密不可分的因果关系。从1908年,美国天文学家海耳等在威尔逊山天文台(现称海耳天文台),利用光谱线的塞曼效应测量太阳黑子的磁场,到现在已经有百年多历史,太阳磁场观测发展出成谱与成像的两种设备,但同一设备无法兼顾二者优势。两维实时光谱仪正是顺应这一需求而提出的新一代的太阳观测设备,它可以同时得到带有光谱信息的观测图像,实现太阳磁场的“三维”观测。两维实时光谱仪具有国际领先水平和独创性、并且具有自主知识产权。仪器建设完成可望在太阳物理观测领域取得重大进展,并在空间环境监测预报等国家战略绣球方面发挥重要作用。

因此,本课题开展了关于两维实时光谱仪在高精度恒温控制方面的需求应用研究。本章将对本课题研究成果做总结,并分析工作中的不足,展望空间化高精度温控系统的发展趋势。

### 7.1 工作总结

本文主要针对两维实时光谱仪空间化温控系统关键技术展开研究。在空间环境中,实现具有大体积、复杂结构的两维实时光谱仪高精度恒温控制是本课题的难点。为了解决之一难题,本课题采用热分析手段,创新性地提出了复杂结构高精度温控划分方案,针对不同区域采用不同的控制策略;并设计了可空间化的基于放大电路+PGA+低位AD的高精度温度测量电路。实现的温控系统在三通道望远镜滤光器与FMG液晶偏振分析器等项目平台开展测试应用,并在液晶搭载项目上实现了部分空间化应用,其系统精度与稳定度均得到了检验。本课题在研究过程中的主要成果主要包含以下几个方面:

#### (1) 复杂结构的多通道温控确定方法

为制定大体积、结构复杂的两维实时光谱仪温控策略,本课题首先建立两维实时光谱仪结构的三维模型,并在ANSYS Workbench中分析了两维实时光谱仪在空气和真空环境下传热特性。分析了在不同加热策略下的温度场分布,通过在同一加热流密度下的温度场分析,划分两维实时光谱仪温控区域,确定了多通道

温度控制的方案。

### （2）空间化高精度多路温度测控原理与方法

在高精度温控系统的空间化应用中，受限于低分辨率 AD 器件，采用常规方案无法实现高精度温度测量。本课题通过高精度温度控制系统通过分析温度传感器原理，选择热敏电阻作为高精度温度测量传感器；通过理论计算分析，得出电路设计中器件参数的选择原理；并设计实现了基于放大器 +PGA+ 滤波电路 + 低位 AD 的可空间化的温度测量电路。

### （3）温度传感器标定

温度传感器标定是实现多通道温度控制的关键技术基础。课题研究中设计实现了温度传感器的相对标定方法，标定后，不同温度传感器间的测量偏差小于  $0.03^{\circ}\text{C}$ 。

### （4）空间化高精度温控系统的验证

得益于怀柔太阳观测基地三通道望远镜以及课题组的 ASO-S FMG 项目，本课题分别在三通道太阳望远镜滤光器、FMG 液晶偏振分析器上开展了测试实验与应用。在三通道滤光器恒温控制系统中，温控精度达到  $0.0076^{\circ}\text{C}$ ，优于三道望远镜项目设计需求以及本课题的  $0.01^{\circ}\text{C}$  指标要求；在液晶偏振分析器测试平台，分别进行在空气中与真空的测试与对比实验，证明了温控系统在真空与非真空环境下均实现了良好的控制稳定性与重复性。三通道滤光器体积大，结构复杂；液晶片真分析器结构小，应用在空间环境。通过两个平台的测试实验，证实了空间化高精度温控系统关键技术针对两维实时光谱仪这种大体积、复杂结构的仪器具有理论与实用价值。

## 7.2 未来展望

本研究针对复杂结构的光学仪器开展多通道温度控制系统空间化研究。研究过程中依然存在可以改进的方向，主要可以从以下几个方面进行完善：

（1）由于时间原因和实验环境限制，针对两维实时光谱仪设计的空间化高精度温控系统未能在该项目上进行实验验证。虽然温控原理与系统已经经过一系列的测试与验证，但移植到两维实时光谱仪时，通过调试系统可否稳定运行、能否达到预期效果，仍存在一定风险。

（2）本课题建立了两维实时光谱仪的简单结构模型，并在 ANSYS workbench



中对结构进行仿真热分析,由于仿真带来的误差,在实际操作中,测试结果与仿真结果会存在一定偏差。

(3) 由于本课题未能实现在两维实时光谱仪上的相关恒温控制实验,后续还需要针对该设备进行针对性的温控实验设计与调试等工作。

(4) 复杂结构的高精度温度控制系统是某些精密仪器的关键需求,多通道测控方案是实现该目标的主要手段。理论上,测控通道越多,对复杂结构的温度控制也就越精确。因此,在实现尽量多路测控的基础上,设计足够简单的温控系统也是未来发展的方向。同时,空间化的高精度温度控制系统的实现,对增强我国的太空研究实力大有裨益。



## 参考文献

- 陈慧明. 深海传感器信号处理与集成系统研制[D]. 浙江大学, 2004.
- 郭震, 冯梦丹. 基于 FPGA 的 AT24C08 驱动设计[J]. 微处理机, 2017(2).
- 郝用兴, 苗满香, 罗小燕. 机电传动控制[M]. 华中科技大学出版社, 2013.
- 侯惠芳, 明长荣. 滤光器恒温控制电路[J]. 北京天文台台刊, 1986, 02(3):239-244.
- 侯俊杰. 深入浅出 MFC[M]. 华中科技大学出版社, 2001.
- 贾伯年. 传感器技术[M]. 东南大学出版社, 2007.
- 贾东升. 锤式破碎机数字化设计关键技术研究[D]. 河北工业大学, 2010.
- 雷杰锋, 黄生祥, 柯建源, 等. 采用电压跟随结构的精密电流检测系统设计[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(03):73-76.
- 李进. 三通道滤光器热分析及高精度温控的研究[D]. 北京交通大学, 2011.
- 李瑶瑶. 基于模糊内模 PID 控制理论的柴油机转速控制研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2017.
- 李亚文, 翟金玲, 彭晓邦. 一种位置式 PID 控制的四旋翼飞行器的设计与实现[J]. 自动化与仪器仪表, 2016, 000(7):96-97.
- 林克欢. 卫星产品高精度温度控制方法研究及实现[D]. 哈尔滨工业大学, 2017.
- 林元章. 太阳物理导论[M]. 科学出版社, 2000.
- 刘畅生. 传感器简明手册及应用电路: 温度传感器分册[M]. 西安电子科技大学出版社, 2005.
- 刘继民, 沈颖, 赵淑萍. 高精度热敏电阻温度传感器的技术改进及使用特点[J]. 冰川冻土, 2011 (4):765-771.
- 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真. 第 2 版[M]. 电子工业出版社, 2004.
- 刘洋毅. 大口径地基太阳望远镜主动温控技术研究[D]. 中国科学院研究生院 (光电技术研究所), 2016.
- GENI M. ANSYS Workbench 18.0 工程应用与实例解析[M]. 2018.
- 梅永. 有源二阶低通滤波器灵敏度和噪声的优化设计[J]. 信息技术, 2017(4).
- 彭方汉, 殷亚州, 耿利寅, 等. 聚酰亚胺薄膜型电加热回路耐高温试验研究[J]. 航天器环境工程, 2014, 031(1):42-46.
- 彭科, 等. 氢原子钟高精度恒温系统设计[D]. 中国科学院研究生院 (上海天文台), 2005.
- 申基, 胡柯良, 林佳本, 等. 怀柔太阳观测基地三通道太阳望远镜局域网内远程观测终端系统设计[J]. 天文研究与技术: 国家天文台台刊, 2008(03):281-287.
- 师玉宝. 大林算法在纯滞后控制系统中的应用研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2001(04):6-7.
- 宋明刚, 樊尚春. 一种高精度温度控制的复合方法及其应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(5):560-563.

- 童叶龙, 李国强, 余雷, 等. PI 控制在空间相机精密控温上的应用[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(4):42-49.
- 童叶龙, 李国强, 余雷, 等. 高热流 CCD 器件散热与精密控温技术[J]. 航天返回与遥感, 2014, 35(5):46-53.
- 王划一, 杨西侠. 自动控制原理. 第 2 版[M]. 国防工业出版社, 2009.
- 王卫平. 余热利用中央空调自动控制系统的设计研究[D]. 湖南大学, 2004.
- 汪性武. 基于积分分离 PID 控制的柔性臂振动控制[C]//第八届全国振动理论及应用学术会议. 2003.
- 吴艳霞, 胡国庆, 蒋幼华, 等. 高精度重力仪的恒温控制系统[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(5):133-135.
- 严晓照, 张兴国. 增量式 PID 控制在温控系统中的应用[J]. 南通大学学报 (自然科学版), 2006, 5(4):48-51.
- 杨启伟, 陈以. 常用温度控制法的对比[J]. 兵工自动化, 2005, 24(6):86-88.
- 杨世铭, 陶文铨. 传热学 (第 4 版) [Heat Transfer][M]. 高等教育出版社, 2006.
- 杨政秋, 李响, 席隆. 基于 PID 的空间精密温控研究[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(8):143-146.
- 于涛, 王永成, 代霜, 等. 基于温度水平的空间相机主动热控系统[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1):249-253.
- 翟俊祥. PGA204/205 可编程增益放大器的原理和应用[J]. 电子设计工程, 1999, 000(5):36-38.
- 章海鹰. 两维实时光谱仪研制进展[C]//中国天文学会 2011 年学术年会手册. 2011.
- 张洁天, 贾宏博, 任磊. 铂电阻温度传感器的自热效应[J]. 传感器与微系统, 2002, 21(12):13-14.
- 张原峰, 高彦, 王彦文. ADS7825 模数转换芯片及其在高速数据采集系统中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2002, 10(6):403-406.
- 朱均超, 豆梓文, 李嘉强, 等. 高精度大范围的光学晶体温度控制系统[J]. 光学精密工程, 2018, 26(7):1604-1611.
- AZZAM R M A. Division-of-amplitude photopolarimeter (doap) for the simultaneous measurement of all four stokes parameters of light[J]. Journal of Modern Optics, 1982, 29(5):685-689.
- B DE PONTIEU J R L, A M Title. The interface region imaging spectrograph (iris)[J]. Solar Physics, 2014, 289(7):2733-2779.
- BABU G S, MALAKONDAIAH K. Microcomputer based system for measurement of potassium ion[J]. Iete Technical Review, 2004, 21(6):403-408.
- BURR-BROWN. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa602.pdf>[M]. On-line Resources, 1987.
- BURR-BROWN. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pga205.pdf>[M]. On-line Resources, 1993.
- BURR-BROWN. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads7825.pdf>[M]. On-line Resources, 1997.

- CAO W, GORCEIX N, COULTER R, et al. First light of the 1.6 meter off-axis new solar telescope at big bear solar observatory[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2010, 7733(6):773330-773330-8.
- DANG C, CHEN X. Design of water level control system based on arm[J]. Electronics World, 2014.
- DENG Y Y, ZHANG H Y, YANG J F, et al. Design of the full-disk magnetograph (fmg) onboard the aso-s[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(11):157.
- DOMINGO V, FLECK B, POLAND A I. The soho mission: An overview[J]. Solar Physics, 1995, 162(1-2):1-37.
- EQUATION S H. Steinhart-hart equation[J]. Language, 1999.
- FEIYANGLINGYU. <http://www.vcc-gnd.com/>[M]. On-line Resources, 2014.
- GAN W, DENG Y, LI H, et al. Aso-s: advanced space-based solar observatory[C]//Solar Physics and Space Weather Instrumentation VI: volume 9604. International Society for Optics and Photonics, 2015: 96040T.
- GU Z L J X B Z. New vacuum solar telescope and observations with high resolution[J]. Research in Astronomy Astrophysics, 2014(6):705-718.
- HEREDERO R, URIBE-PATARROYO N, BELENGUER T, et al. Liquid-crystal variable retarders for aerospace polarimetry applications[J]. Applied optics, 2007, 46(5):689-698.
- HUGHES D W, PROCTOR M R E. Magnetic fields in the solar convection zone: Magnetoconvection and magnetic buoyancy[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1995.
- INSTRUMENTS T. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ref5050.pdf>[M]. On-line Resources, 2001a.
- INSTRUMENTS T. <https://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/tps761.pdf>[M]. On-line Resources, 2001b.
- KOSUGIT, MATSUZAKI K, SAKAO T, et al. The hinode (solar-b) mission: An overview[J]. Solar Physics, 2007, 243(1):3-17.
- MA J, KONG F, KOVACEVIC R. Finite-element thermal analysis of laser welding of galvanized high-strength steel in a zero-gap lap joint configuration and its experimental verification[J]. Materials Design, 2012, 36(Apr.):348-358.
- MARSCH E, ANTONUCCI E, BOCHSLER P, et al. Solar orbiter, a high-resolution mission to the sun and inner heliosphere[J]. Advances in Space Research, 2002.
- SCHARMER G B, BJELKSJÖ K, KORHONEN T K, et al. The 1-meter swedish solar telescope[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2003, 4853:341-350.
- STMICROELECTRONICS. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103ve.pdf>[M]. On-line Resources, 2018.
- W., DEAN, PESNELL, et al. The solar dynamics observatory (sdo)[J]. Solar Physics, 2012.

- WANG D, AI G, SUN C, et al. Optical design of polarimeter for space solar telescope[C]//Uv, Optical, Ir Space Telescopes Instruments. 2000.
- WU R, DEWAN S B, SLEMON G R. A pwm ac-to-dc converter with fixed switching frequency[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1990, 26(5):880-885.
- YANLING L, ZHAO Y, XU J I, et al. Solid-state relay based automatic voltage stabilizing device for distribution transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003.
- ZHOU, ZHI-WEI, LI, et al. Temperature monitoring system based on ds18b20[J]. Annual Report of China Institute of Atomic Energy, 2011.

## 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

张鑫伟, 山西省祁县人, 中国科学院国家天文台博士研究生。

### 教育情况

2011 年 9 月至 2015 年 6 月, 山东大学控制科学与工程学院, 本科, 专业: 自动化。

2015 年 9 月至 2020 年 9 月, 中国科学院国家天文台, 博士, 专业: 天文技术与方法。

### 已发表 (或正式接受) 的学术论文:

1. Research in Astronomy and Astrophysics (SCI): Research on the principle of space high-precision temperature control system of liquid crystals based stokes polarimeter, 第一作者, 已接收, 2020.
2. 天文研究与技术 (中文核心), 全日面太阳磁场望远镜精密温控系统研制, 第一作者, 已录用, 2020.
3. 天文研究与技术 (中文核心): 基于 FPGA 的多轴步进电机控制系统, 第四作者, 已录用, 2019.
4. 光学精密工程 (EI): 液晶可变延迟器相位延迟-电压曲线精确快速标定, 第五作者, 已录用, 2019.

### 联系方式

通讯地址: 北京市朝阳区大屯路甲 20 号国家天文台 A 座

邮编: 100101

Email: zhangxinwei15@mailsucas.edu.cn

### 参加的研究项目及获奖情况:

ASO-S 全日面矢量磁像仪。

用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统（AIMS）。



## 致 谢

白驹过隙, 日光荏苒。转眼间, 我的五年研究生生涯已经接近尾声, 回顾在中国科学院大学、国家天文台这最后的学生时代, 对我来说, 是一份莫大的财富。在此毕业之际, 我谨向所有关心、支持和帮助过我的老师、同学、朋友和家人们表示诚挚的感谢以及美好的祝愿。

本课题的学位论文是在邓元勇研究员和林佳本研究员的指导下完成的。邓老师循循善诱, 在百忙中还对我的课题进展、论文写作中给予我关键性的指导和建议, 使我的思维更加开阔, 使我的研究更加严谨。林老师在生活和学业中都给我无微不至的关怀与帮助。他有科学家严谨的治学态度, 又有工程师丰富的实践经验, 在课题进展的各个环节都给予了我充分的帮助, 使我从稚嫩逐渐走向成熟。在此, 我向两位导师致以最崇高的敬意和最衷心的祝福。

特别感谢侯俊峰、王丙祥、汪国萍老师在我课题进展、测试实验等过程中提供的宝贵建议和倾力帮助。此外, 感谢王东光、张洋、杨尚斌、包星明、孙英姿和北京师范大学的毛信杰教授等各位老师在我课题研究过程中的帮助。感谢孙文君、白先勇师兄、杨潇师姐, 给予我大哥哥大姐姐般的关心与帮助。

然后, 感谢张洪起、张枚、苏江涛、林刚华、张志勇、王晓帆老师、宋永亮师兄、罗琳、曾真等, 在我博士期间的工作、学习中所给予的帮助。

感谢怀柔太阳观测站王蕙站长, 张鼎波师傅, 感谢站上的荆帅、王建、阮文东、王立东各位师傅, 在怀柔太阳观测基地开展课题实验时给予我充分的帮助; 同时感谢站上的杨桂莲阿姨、苏海奇师傅, 在怀柔基地时对我生活中的帮助。

感谢研究生处的马怀宇老师、艾华、李响老师, 在处理学生事务时给予的热心帮助。

特别感谢一起度过研究生生涯的师兄、师姐、师弟、师妹: 郭晶晶、王刚、袁飞、佟立越、朱晓明、柯子博、于鹏达、祝高飞、白阳、王全、吴玮、胡兴、黄威、沈宇樑、陈垂裕、王强、荀辉、王雅琦、周明尧、李鑫, 在学习和生活中互相交流帮助, 与你们一起的时光是丰富而多彩的。感谢你们, 在学习上或在生活中给予我帮助和支持, 才使我克服一个又一个疑惑与困难。

再一次感谢怀柔太阳观测基地团组的每一位老师和同学, 感谢怀柔大家庭!

最后，感谢永远在背后支持我的父母、姐姐和家人们，谢谢你们！

谨以此文献给所有关心和帮助过我的人们！