

密级: \_\_\_\_\_

# 中国科学院研究生院

## 硕士学位论文

滤光器恒温控制系统设计

---

作者姓名: \_\_\_\_\_ 于佳 \_\_\_\_\_

指导教师: \_\_\_\_\_ 邓元勇研究员 \_\_\_\_\_

中国科学院国家天文台

---

学位类别: \_\_\_\_\_ 理学硕士 \_\_\_\_\_

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 \_\_\_\_\_

2012年5月

**The Design of Temperature Control**

---

**System for the Optical Filter**

---

**By**

**Yu Jia**

**A Dissertation Submitted to**

**Graduate University of Chinese Academy of Sciences**

**In partial fulfillment of the requirement**

**For the degree of**

**Master of Science**

**National Astronomical Observatories, Chinese Academy of**

**Sciences**

**May, 2012**

## 致谢

本课题的学位论文是在导师邓元勇研究员和胡柯良工程师的悉心指导下完成的。他们治学严谨，有着严肃的科学态度和精益求精的工作作风，使我受益匪浅。三年来，两位导师不仅在学业上给我以精心指导，同时还在思想、生活上给我以无微不至的关怀，在此谨向他们致以诚挚的谢意和崇高的敬意。

此外，我还要感谢在 A202 一起努力工作的林佳本工程师、曾真实验员和朱晓明同学。正是由于他们的帮助和支持，我才能克服一个一个的困难和疑惑，直至本文的顺利完成。最后我还要感谢培养我长大含辛茹苦的父母，谢谢你们！



## 摘要

**摘要：**本文研究的对象是双折射滤光器的恒温控制。这台滤光器是 35cm 太阳磁场望远镜的重要组成部分，主要用于观测太阳磁场的活动。滤光器中透光晶体材料的折射率对温度十分敏感，要求内部的温度稳定度要优于  $0.01^{\circ}\text{C}$ 。本文研究的主要内容有滤光器散热过程分析，控制器设计以及系统的调试分析：

1. 滤光器传热分析采用了热阻分析的方法，将稳态传热中的滤光器和空气之间的热对流等效为串联的热阻。利用该方法估计出了滤光器的等效热阻为  $0.3779\text{W}/^{\circ}\text{C}$ ，恒温控制器所需要的加热功率至少为  $20\text{W}$ 。经过实验发现，加热功率的理论值与实际环境下测量出的相差不大。
2. 在恒温控制器的设计上，本文采用了主流的单片机控制技术。主要成果有使用模拟开关 TS5A3166 扩增 ADS1232 测温的通道数目，解决了加热开关 75NF75 由于驱动电压不够容易烧片等问题。在控制算法上，本文在经典的 PID 控制方法的基础上进行了积分分离、抗积分饱和以及积分慢调的改进，取得了较为理想的控制效果。
3. 在系统的调试和分析上，本文搭建了一个便于操作的测试平台。以 FSH250 生化培养箱作为主要实验仪器，使用 LabVIEW 语言编写了上位机软件，可以直观地实时显示和记录滤光器均温层的温度。实地环境下的测试结果表明，本文的恒温控制器已经达到设计目标，为今后的相关科研工作如二维实时光谱仪的恒温控制积累了设计经验。

**关键词：**滤光器；高精度温控；热分析；ADuC7026；PID



# Abstract

**ABSTRACT:** This thesis introduces a temperature control system for the birefringent optical filter which is the major instrument of 35-cm Solar Magnetic Field Telescope. Given that the refractive index of crystal material in optical filter is sensitive to the change of temperature, the inner temperature of optical filter should be constant around 316K and the accuracy of the temperature control system should be under 0.01K. The thesis work is divided into three parts: thermal analysis for the optical filter, the design of the temperature control system, testing and verifying the control system in laboratory.

1. In order to analyze the steadystate heat transfer of the optical filter, thermal resistance is used to approximate the thermal convection between the filter and the air. The equivalent thermal resistance of the optical filter is approximately  $0.3779\text{W}/^{\circ}\text{C}$  and then the heat power of the temperature control system should be 20W at least. The result of relevant experiment shows acceptable deviation from the theoretical value.
2. The second part presents the hardware and software design of the temperature control system based on ADuC7026 single-chip microcontroller. The main achievements are increasing channels of ADS1232 using analog switch TS5A3166, the part of heating control using 75NF75 and hardware debugging and testing. The control algorithm has made some improvement on the classic PID control algorithm, and at the same time, the temperature control program supports some more intelligent algorithm running on the upper computer.
3. To test and verify the temperature control system, an effective test bench is built. The main facility used in this part is FSH250 that is a biochemistry incubator, and the front panel of LabVIEW software on the upper computer can display and record the inner temperature of the optical filter in real-time. The final result of this part has proved that the temperature control system fulfilled in this thesis work is flexible, efficient and valid.

**KEYWORDS:** Optical Filter; High-precision Temperature Control; Thermal Analysis; ADuC7026; PID





# 目录

<b>第一章 绪论</b> .....	<b>- 1 -</b>
1.1 课题背景 .....	- 1 -
1.2 国内外研究现状 .....	- 1 -
1.3 本文研究内容和章节安排 .....	- 2 -
1.3.1 研究内容 .....	- 2 -
1.3.2 主要挑战 .....	- 3 -
1.3.3 章节安排 .....	- 4 -
<b>第二章 滤光器的传热分析</b> .....	<b>- 5 -</b>
2.1 传热分析理论 .....	- 5 -
2.1.1 传热形式 .....	- 5 -
2.1.2 傅里叶导热定律 .....	- 6 -
2.1.3 导热微分方程 .....	- 6 -
2.1.4 导热问题的定解条件 .....	- 8 -
2.2 滤光器保温材料的制备 .....	- 10 -
2.2.1 材料选择指标 .....	- 10 -
2.2.2 柱面保温材料 .....	- 12 -
2.2.3 端面保温材料 .....	- 14 -
2.3 传热分析与参数估计 .....	- 15 -
2.3.1 稳态导热分析 .....	- 15 -
2.3.2 非稳态导热分析 .....	- 19 -
<b>第三章 PID 控制器理论和分析方法</b> .....	<b>- 23 -</b>
3.1 经典 PID 控制器 .....	- 23 -
3.1.1 PID 控制器的结构 .....	- 23 -
3.1.2 PID 各环节对控制系统的影响 .....	- 25 -
3.2 数字 PID 控制算法 .....	- 25 -
3.2.1 位置式 PID 控制算法 .....	- 25 -
3.2.2 增量式 PID 控制算法 .....	- 26 -
3.2.3 位置式 PI 算法的改进 .....	- 27 -

3.3 PID 控制参数的整定方法 .....	- 29 -
3.3.1 临界比例带法 .....	- 30 -
3.3.2 衰减曲线法 .....	- 31 -
3.3.3 控制系统的稳定性分析 .....	- 32 -
<b>第四章 恒温控制器的设计 .....</b>	<b>- 33 -</b>
4.1 经典恒温控制器的介绍和分析 .....	- 33 -
4.1.1 圆柱面温控电路分析 .....	- 34 -
4.1.2 端面温控电路分析 .....	- 35 -
4.1.3 经典恒温控制器的效果和评价 .....	- 36 -
4.2 本课题恒温控制器的硬件部分 .....	- 36 -
4.2.1 温度测量 .....	- 38 -
4.2.2 主控单片机 .....	- 43 -
4.2.3 加热部分 .....	- 45 -
4.2.4 通信部分 .....	- 46 -
4.2.5 存储部分 .....	- 47 -
4.3 恒温控制器的软件部分 .....	- 47 -
4.3.1 软件架构 .....	- 47 -
4.3.2 接口实现 .....	- 49 -
4.3.3 控制算法 .....	- 55 -
<b>第五章 系统调试 .....</b>	<b>- 57 -</b>
5.1 测试平台的搭建 .....	- 57 -
5.1.1 系统组装 .....	- 57 -
5.1.2 恒温箱 .....	- 59 -
5.1.3 测试软件的编写 .....	- 60 -
5.2 参数整定 .....	- 61 -
5.2.1 加热功率的测量 .....	- 62 -
5.2.2 临界比例带法整定 .....	- 63 -
5.2.3 响应时间的测量 .....	- 63 -
5.3 控制效果 .....	- 64 -
5.3.1 实验室控制效果 .....	- 64 -
5.3.2 现场调试 .....	- 66 -
<b>第六章 结论 .....</b>	<b>- 67 -</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>- 69 -</b>

作者简历 .....- 71 -

硕士期间研究成果 .....- 73 -



# 第一章 绪论

## 1.1 课题背景

太阳磁场望远镜是由我国科学家独立发明和研制的望远镜, 是进行太阳物理核心课题研究的重要仪器。对于基础科学而言, 太阳巨大的高温等离子体环境, 提供了地球上无法模拟的巨大的磁流体动力学实验室。太阳的一系列活动, 如耀斑、黑子、日冕物质抛射、日震等, 都与太阳磁场的活动变化息息相关。因此, 对太阳磁场进行观测和和研究具有重要意义<sup>[1][2][3]</sup>。

目前, 在怀柔太阳观测基地服役的磁场望远镜有 35cm 太阳磁场望远镜、三通道太阳磁场望远镜和全日面太阳磁场望远镜。35cm 太阳磁场望远镜是 1985 年组建完成的, 主要用于观测太阳光球和色球的局部矢量磁场和视线速度场; 三通道太阳磁场望远镜通过测量太阳大气不同高度上的 3 条光谱线得到太阳磁场和速度场的矢量图, 所选择的观测谱线是 MgI5173Å、FeI5247Å、5250Å; 全日面磁场望远镜是配备有万能滤光器的 10cm 望远镜系统, 这个系统能观测全日面矢量磁场、纵速度场和相应的光学图像。

本课题研究的对象是 35cm 太阳磁场望远镜的滤光器的恒温控制单元。滤光器中材料的折射率对温度要求敏感, 要求工作在 42℃左右的恒温环境下, 最长晶体要求的精度最高为 0.01℃, 次长晶体的温度要求为 0.02℃, 较短和最短晶体的温度要求精度为 0.04℃和 0.08℃, 因此在整个滤光器的晶体长度方向, 要求最大温差不超过 0.15℃。高精度温度控制是滤光器设计中的一个关键问题, 也是滤光器稳定工作的重要条件, 因此对滤光器热分析和高精度温控的研究对保证滤光器稳定工作具有重要的意义。

早期的滤光器恒温控制电路由于采用了模拟电子技术, 对设计人员的要求较高, 且器件参数的确定和调试过程往往需要丰富的工程经验; 同时, 电路完成后, 要改变控制参数一般需要更换电路元件。本课题采用了数字化的控制技术, 大大减小了器件对于控制效果的影响, 且参数的整定利用上位机软件即可完成, 无需更换元件, 过程简单, 易于操作, 并且对上位机支持更为智能化的控制算法。

## 1.2 国内外研究现状

温度控制起源于工业控制, 但其应用已经涉及社会生活和科研活动的各个领域。从上个世界 70 年代以来, 在工业过程控制和电子技术的有力推动下, 国外的温度控制系统取得了迅猛的发展, 如日本、美国、德国、瑞典等国都产生了一

系列商品化且性能优异的温度控制器。目前，智能化、参数自动优化、高精度及高稳定性是温度控制的主要挑战和发展方向。

在恒温控制系统的发展中，热结构设计有着主导地位。在保温设计方面，为了减小环境温度变化对控温系统的影响，常采用多级控温方法。在均温设计上，为了保持系统内部的温度场的均匀分布，常采用对称的机械设计，均温材料通常选择导热性很好的金属铝或铜等。目前美国氢原子钟的恒温控制达到  $10^{-4}\text{°C}$ ，在结构设计上采用了多等温炉和多控制区的方式使被控对象与环境的热流动和温度梯度最小化。整个恒温系统分为三个等温层，精度不一，内层恒温最高精度达到了为  $10^{-4}\text{°C}$ <sup>[4]</sup>。

在控制方案上主要经历了三个历史阶段<sup>[5]</sup>：基地式仪表、单元组合式仪表和微机控制阶段。前两个阶段需要研究人员有很好的工程经验，系统调试的工作量较大，适用于较为简单的系统，且控制精度不高。与此同时，系统元件的老化和噪声的影响也难以估计，目前许多的公司和科研机构更多地是采用微机控制的方案，这其中使用嵌入式系统的控制方案占了大部分，基于的硬件平台有 DSP<sup>[6]</sup>、FPGA<sup>[7]</sup>和单片机<sup>[8][9][10][11][12][13]</sup>等等。

在实际应用中，许多的学科领域都需要对温度进行精确控制，如生物工程中的恒温培养箱<sup>[14]</sup>，材料和冶金工程中的恒温炉<sup>[15][16]</sup>，光纤通信系统和实验物理中的半导体激光器<sup>[17][18][19][20][21]</sup>，计量领域的原子钟<sup>[4]</sup>，地学中的重力仪<sup>[22]</sup>，天文望远镜的滤光器<sup>[23][24][25][26][27]</sup>等。其中，意大利的 A. Merlone 在测量波尔兹曼常数<sup>[21]</sup>的实验中完成了对激光器  $10^{-4}\text{°C}$  的温度控制，国产 DZW 型重力仪也实现了同样的精度。通过对相关学科领域的温控方法进行研究，可以为本课题的顺利开展和突破创新提供了有力的参考。

对于双折射滤光器，要实现高精度恒温控制是比较困难的，所以，很多设计不得不转向自适应波带调节的方法，即通过对滤光器内部波片的实时测温来指导驱动电机实时矫正，防止观测波带发生偏移，如 2006 年发射的日美欧共同研制的 Hinode 太阳观测卫星。由此说明本课题对于滤光器高精度恒温控制的研究是有着重要意义的。

## 1.3 本文研究内容和章节安排

### 1.3.1 研究内容

本课题的主要设计目标是完成对滤光器内部温度的精确控制，使其长期稳定度优于  $0.01\text{°C/年}$ 。需要完成的工作主要有三个方面：温控材料的制备和组装、温度控制器的电路实现和对温控系统测试调试。本课题认真学习了 35cm 太阳磁

场望远镜恒温控制器的经典设计方案，尝试了新的全数字化的控制方法，取得了较为理想的实验效果。此外，由于原有的恒温控制器采用的是分立的模拟元件，故障处理和调试工作对维护人员有较高要求，而开发数字化的恒温控制器可以充分利用计算机来完成数据记录和参数调试等工作，方便了人员操作。

## 1.3.2 主要挑战

### 1.3.2.1 长期稳定性

滤光器对温度的长期稳定度要求较高，这对于控制器的设计提出了很高的要求。用于 35cm 太阳磁场望远镜的恒温控制器采用的是模拟的分立元件，测温 and 加热都采用的同一电桥。虽然铜线绕制的电桥具有很高的稳定度，但是控制器从温度信号的采集、处理以及最后反馈到可控硅加热开关，先后经历了多个分立元件，所以这些元器件的稳定度是原有的经典控制器的主要技术问题。本课题采用的是数字控制器，温度信号通过 AD 芯片转换成数字信号，后续的数字信号处理和加热控制基本不受器件噪声的影响，这样对于系统的长期稳定度构成影响的主要是测温元件和 AD 芯片。本设计沿用了电桥作为主要测温单元，同时采用了 PT100 作为端面的测温单元，选择了专用的 24 位 AD 转换芯片 ADS1232，能够满足系统的长期稳定性要求。

### 1.3.2.2 温控方案

35cm 太阳磁场望远镜的滤光器外形呈圆柱状，其原有的柱面温控方案有两个特点：一是加热和测温采用同一电桥。这样设计简化了设备，提高了恒温控制器的响应速度。此外，在滤光器的两个端面上，科研人员做了很好的保温工作，明显降低了端面对于整个系统温度分布的影响。本文在保留原有电桥测温的基础上，将加热和测温分开设计，便于加热功率的数字控制，同时对于两个端面采取了恒温控制，对柱面增加了第二级温度控制，最大程度地减小了环境温度对于滤光器的影响。二是测温的区域是整个圆柱体柱面而不是圆柱面上的某个点，对于对称的机械结构，点测温 and 面测温的效果没有太大差异。但是对于非对称的机械设计，面测温由于难以反映温度梯度，一般不被采用。本文在研究滤光器柱面测温的基础上，实验了点测温的方案，为日后的非对称设计的恒温控制做好准备工作。

### 1.3.2.3 控制算法

35cm 太阳磁场望远镜的滤光器的体积相对于半导体激光器的恒温腔等设备的体积要大,热惯性更大,系统的数学模型难以建立,难以决定恰当的控制算法。本文本着从简单到复杂的基本思路,采用经典的 PID 控制方案,试验了改进型的 PI 控制方法,取得了实验结果满足设计要求。此外,在设计上还保留了合理的参数接口,可以通过上位机简便地修改控制参数,这样做同 A. Merlone 等人的设计类似。复杂的控制算法交由上位机的控制软件完成,恒温控制器只作为执行器来使用,为后续相关天文设备如二维实时光谱仪的恒温控制打下基础。

### 1.3.3 章节安排

本文对 35cm 太阳磁场望远镜滤光器恒温控制系统的研究工作通过各章节介绍如下:

第二章介绍了热分析理论和滤光器温控设计方案,主要包括传热学的基本定理、滤光器的稳态和非稳态分析以及温控设备和材料的准备工作。

第三章介绍了经典的 PID 自动控制理论,包括 PID 控制器的构成、稳定性分析的方法和参数整定的经验和方法。

第四章详细介绍了恒温控制器的具体实现,包括对经典恒温控制器的研究和分析、全数字化设计方案的具体介绍、采用的改进型 PI 控制算法以及便于参数调试的软件接口。

第五章主要介绍了系统的总装调试工作,包括测试平台的搭建,参数的整定工作和实际环境下的测试。



## 第二章 滤光器的传热分析

本课题的控制对象从结构上呈现多层结构,内部是核心光路系统,由光学元件、机械传动部件构成,剩余空间由硅油密封;第二层即为均温层,是铝制的圆柱筒,均温层上埋有测温探头,均温层的表面密绕了用于测温的金属线,测温金属线外侧包裹一层加热膜;第三层为保温层,先后包裹着陶瓷纤维纸和聚氨酯泡沫两种保温材料。端面的保温材料采用的是泡沫玻璃材料。由于机械结构比较对称,均温层内部的温度梯度较小,便于恒温控制器的设计。

### 2.1 传热分析理论

滤光器系统热分析<sup>[25]</sup>和热设计决定了其主要的工作性能,在设计的时候,应该做充分的理论分析和推算,力求满足各项设计指标的要求,更好地估计滤光器应用在实际工作中的结果和可能存在的问题。由于滤光器的工作温度在 42℃左右,辐射的能量耗散相对于热传导和热对流来说可以忽略,因此,本文主要分析的是热传导和热对流对于滤光器温度的影响。

#### 2.1.1 传热形式

传热学是研究由温差引起的热能传递规律的一门科学。自然界和各种生活生产活动中到处存在着温差,所以热量的传递是一种极为普遍的物理现象。传热学与工程热力学之间有着密切的关系:分析任何的热量传递过程都要用到热力学第一定律,即能量守恒定律。无论是物体内部的热量传导还是不同物体之间的热量传递都必须遵守能量守恒定律。此外,热量传递过程的唯一动力就是温度差,热能总是从高温物体流向低温物体,这正是热力学第二定律所规定的基本内容。因此,工程热力学的第一、二定律是进行传热学研究的基础。

按照热传递过程中物质运动的特点,热量传递可分为基本方式:导热(热传导)、对流和热辐射。

- (1) **导热(热传导)** 在物体各部门之间不发生相对位移时,依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递过程。
- (2) **对流** 流动的流体与其相接触的固体表面,在二者具有不同温度时所发生的热量传递过程。
- (3) **热辐射** 当物体的温度高于绝对零度,物体由于具有一定温度而产生电磁波辐射过程。热辐射的电磁波是在物体内部微观粒子的热运动状态改变时激发出来的。同时,物体也不断吸取周围物体投射给它的热辐射,并将吸

收的辐射能重新转变为热能。

本课题的控制对象从内部到保温层都是固体材料，这部分的传热形式主要是热传导；保温层外部直接和空气接触，由于滤光器工作温度不高，且保温措施得当，使得保温层向外界辐射的热量相比对流要小得多，所以这部分的传热形式主要是对流。

## 2.1.2 傅里叶导热定律

热传导遵循傅里叶导热定律，其物理过程描述为单位时间内通过给定截面的热量与垂直于该截面上的温度变化率和截面面积成正比，即

$$\Phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x} \quad (2-1)$$

其中： $\Phi$  为热流量，单位为 W；

$A$  为垂直于热流方向上的截面面积，单位为  $\text{m}^2$ ；

$\frac{\partial t}{\partial x}$  为温度  $t$  在  $x$  方向上的变化率；

$\lambda$  为导热系数，是表征材料导热性能优劣的参数，单位为  $\text{W}/(\text{m K})$ ；

负号表示热量传递方向指向温度降低的方向。

此外，傅里叶定律也可以用热流密度  $q$  来表述：

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (2-2)$$

研究温度场的三维立体分布的情况时，三个方向上的单位矢量与该方向上的热流密度分量乘积合成热流密度矢量  $\vec{q}$ 。傅里叶定律一般形式的数学表达式通常用热流密度矢量写出，其形式为：

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}(t) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \vec{n} \quad (2-3)$$

式中  $\text{grad}(t)$  为空间某点的温度梯度， $\vec{n}$  为通过该点的等温线（面）上法向单位矢量。

## 2.1.3 导热微分方程

为了推算出导热物体的温度场的情况，需要借助能量守恒定律和傅里叶导热定律来列出温度场的数学表达式，成为导热微分方程。导热微分方程是所有导热物体温度场分布通用的方程，此外，还需要规定相应的初始时间和边界条件，即定解条件，用于解出导热微分方程。

直角坐标系下导热微分方程的推导过程：选取如图 2-1 所示的微元平行六面体作为能量流动的分析单元，设物体流过微元体的热流量为  $\Phi$ ，单位是  $\text{W}/\text{m}^3$ ，即单位时间内单位体积中流过微元体的热能。

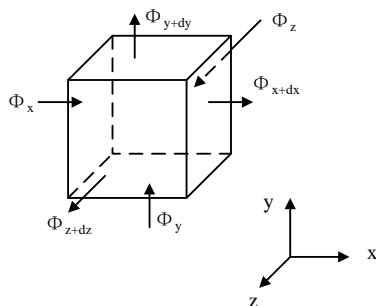


图 2-1 直角坐标系下的微元体

空间中任意方向的热流量  $\Phi$  可以分解为三个坐标方向的热流分量  $\Phi_x, \Phi_y, \Phi_z$ 。

根据傅里叶导热定律，通过  $x = x, y = y, z = z$  三个微元表面流入微元体的热流量为：

$$\begin{cases} \Phi_x = -\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} dydz \\ \Phi_y = -\lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} dxdz \\ \Phi_z = -\lambda_z \frac{\partial t}{\partial z} dxdy \end{cases} \quad (2-4)$$

同理，通过  $x = x + dx, y = y + dy, z = z + dz$  三个微元表面流出的热流量可以分别表示为：

$$\begin{cases} \Phi_{x+dx} = \Phi_x + \frac{\partial \Phi}{\partial x} dx = \Phi_x + \frac{\partial}{\partial x} \left( -\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} dydz \right) dx \\ \Phi_{y+dy} = \Phi_y + \frac{\partial \Phi}{\partial y} dy = \Phi_y + \frac{\partial}{\partial y} \left( -\lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} dxdz \right) dy \\ \Phi_{z+dz} = \Phi_z + \frac{\partial \Phi}{\partial z} dz = \Phi_z + \frac{\partial}{\partial z} \left( -\lambda_z \frac{\partial t}{\partial z} dxdy \right) dz \end{cases} \quad (2-5)$$

设导热物体的内热源为  $\dot{\Phi}$ ，单位为  $\text{W}/\text{m}^3$ ，代表物体单位时间内单位体积中产生或消耗的热能，导出微元体内部热源生成热  $\Phi_V$  为：

$$\Phi_V = \dot{\Phi} dxdydz \quad (2-6)$$

$\rho, c, \tau$  分别为导热物体的密度、比热容和时间，则微元体内能的增量  $\Delta E$  为：

$$\Delta E = \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} dx dy dz \quad (2-7)$$

由能量守恒定律可知，在任一时间间隔内流入微元体的总热流量、微元体内生成热的和与流出微元体的热流量、微元体内能增量的和相等，即：

$$(\Phi_x + \Phi_y + \Phi_z) + \Phi_v = (\Phi_{x+dx} + \Phi_{y+dy} + \Phi_{z+dz}) + \Delta E \quad (2-8)$$

将式(2-4)(2-5)(2-6)(2-7)代入式(2-8)，可以得到：

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi} \quad (2-9)$$

(2-9)就是直角坐标系下导热微分方程的一般形式，对于传热系统的稳态和非稳态分析就是建立在此微分方程的基础之上。此外，根据具体情况，式(2-9)还可以有多种简化形式，详见文献[28][29]。

直角坐标系的导热微分方程能够方便用于分析端面的散热问题，对于滤光器柱面散热的分析，应采用圆柱坐标系，相应的微元体如图(2-2)

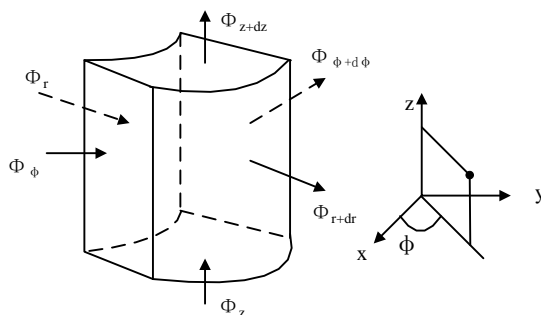


图 2-2 圆柱坐标系下的微元体

利用能量守恒定律和傅里叶导热定律，同样可以推出圆柱坐标系下的导热微分方程(2-10)，具体步骤不再赘述。

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_r r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda_\varphi \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi} \quad (2-10)$$

## 2.1.4 导热问题的定解条件

导热微分方程是描述导热过程共性的数学表达式。求解导热问题，实质上是对导热微分方程式的求解过程。由微积分的知识可知，微分方程的解分为通解和特解。通解即为解的一般形式，而特解是微分方程在限定条件下的解，是唯一的表达形式。因此为了得到导热物体确切的温度分布，需要求出微分方程的特解。导热微分方程的限定条件，又称定解条件，对于一般导热问题而言，定解条件由以下四方面的内容组成<sup>[28]</sup>。其中几何条件和物理条件无论对于稳态导热还是非稳

态导热都是必须的，此外求解非稳态导热过程还需要初始条件和边界条件，而稳态导热过程只需要边界条件。

### 1. 几何条件

几何条件指参与导热过程的物体的几何尺度、形状。

### 2. 物理条件

物理条件指导热物体的主要物理参数和物理特征，例如物体的导热系数是否各向异性、有没有内热源存在、是否均匀分布等。

### 3. 时间条件

对非稳态导热来说，必须知道导热过程开始时刻物体内的温度场分布情况，即初始条件：

$$t|_{\tau=0} = f(x, y, z), T \text{ 为时间} \quad (2-11)$$

### 4. 边界条件

常见的导热问题的边界条件可以归纳为三类：

#### (1) 第一类边界条件

规定沿导热物体边界面上的温度值，如式 2-12。最简单的典型例子是边界温度保持常数，即  $t_w = \text{常量}$ 。

$$t_w = f(x, y, z, \tau) \quad \tau > 0 \quad (2-12)$$

#### (2) 第二类边界条件

给定导热物体边界面上的热流密度，即

$$q_w = -\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_w = f(x, y, z, \tau) \quad \tau > 0 \quad (2-13)$$

式中  $n$  代表边界面某处的外法线方向，该热流密度沿边界面可以是空间位置 and 时间的函数。最简单的形式为规定热流密度保持定值，即  $q_w = \text{常数}$ 。

#### (3) 第三类边界条件

规定了边界面上导热物体与周围流体之间的对流传热情况，即

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_w = h(t_w - t_f) \quad (2-14)$$

式中  $h$  代表物体与周围流体之间的表面传热系数， $t_f$  代表周围流体的温度。

最简单的形式为  $h = \text{常数}$ ， $t_f = \text{常数}$ 。

此外实际工程中还会遇到两类边界条件：辐射边界条件和界面连续条件。

#### (4) 辐射边界条件

规定了导热物体表面与周围流体之间的辐射传热情况，即

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_w = \varepsilon \sigma (t_w^4 - t_f^4) \quad (2-15)$$

式中  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ， $\varepsilon$  为导热物体表面的发射率， $t_f$  为周围流体环境的温度。

### (5) 界面连续条件

在实际工程中，常会遇到不均匀材料，或者多种不同材料的导热情况，如图 2-3。通常的假定是材料的接触良好，在材料的分界面上满足温度与热流密度连续的条件：

$$\left( \lambda \frac{\partial t}{\partial n} \right)_I = \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial n} \right)_{II} \quad (2-16)$$

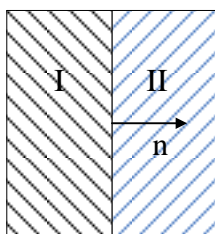


图 2-3 不同材料的界面条件

## 2.2 滤光器保温材料的制备

滤光器用到的保温材料是多种多样的，早期的滤光器<sup>[24][25]</sup>多采用隔热毡，泡沫塑料，夹布胶木等保温材料，随着材料技术的突飞猛进，一大批新型保温材料应运而生。目前市场上的保温材料大致可分为三类：有机材料（如稻草、甘蔗纤维、木屑、木纤维及其制品等），无机合成材料（如膨胀珍珠岩、陶瓷纤维、泡沫玻璃、玻璃棉、聚苯乙烯、聚氯乙烯、聚氨脂等）和金属类保温材料（如铝板、铝箔复合板等）。本设计经过大量市场调查，综合以往保温材料选型的经验和教训，最终选取了陶瓷纤维纸、聚氨酯泡沫和泡沫玻璃三种保温材料。

### 2.2.1 材料选择指标

由于滤光器要长期工作在恒温环境，保温层的设计上应重点考虑保温层的寿命和保温的效果，因此，均匀度好，保温性能优良且稳定性好的保温材料是本课题的首选。结合滤光器实际的工作环境，本设计给出了滤光器保温材料选型的指

标参考如下：

- **导热系数足够小** 材料的导热系数的大小决定了其保温性能的优劣，导热系数越小，材料的导热能力越差，保温性能越好。影响材料导热系数的因素有很多，如工作温度、孔隙特征、容重大小、材料粒度、填充气体等等。同时应结合实际保温对象来确定保温材料，文献[22]采用的杜瓦瓶是一种十分理想的保温方案，但是由于滤光器是柱体结构，所以杜瓦瓶不能适用。所以，本设计主要查阅了管道类的保温材料<sup>[36]</sup>，如聚苯乙烯泡沫、聚氨酯泡沫等。
- **寿命长，耐硅油腐蚀** 由于滤光器要一年四季不间断工作，无论是光学元件，电路元件还是保温材料都要有几年或十几年的使用寿命。影响滤光器的保温材料稳定性的主要有两方面因素：受潮和硅油腐蚀。（1）绝大多数的保温绝热材料都具有多孔结构，容易吸湿。材料吸湿受潮后，其导热系数增大。由于水的导热系数比空气的导热系数大 20 倍左右，如果保温材料在使用中吸附了大量水分，势必会极大影响保温的效果，所以在选型的时候，优先选择憎水型的保温材料。（2）尽管滤光器的核心光路系统中有各种密封措施，但随着密封圈的老化，均温层内的硅油有可能出现渗漏，从而影响测温、加热线路和保温材料。早期的太阳磁场望远镜多使用聚苯乙烯泡沫塑料作为保温材料，该材料虽然有导热系数小、重量轻、易于加工、耐潮湿等优点，但是极易被硅油腐蚀，如图 2-4。所以在选型的时候，应优先选择耐硅油腐蚀的保温材料，如聚氨酯材料。



图 2-4 硅油腐蚀聚苯乙烯

- **质地轻，易于加工** 滤光器最终要放入望远镜的镜筒后端，由转台的大功率电机带动转动，因此重量轻的保温材料能够节省能源，减小驱动电机的负载，所以常选用多孔结构、质地轻便的保温材料。此外，保温材料的材质应便于加工成型，方便科研人员进行相关保温、测温实验。

- **均匀性好** 滤光器铝制均温层会将加热膜的热量均匀的导入到内部的核心光学系统中，所以保温层除了减小加热膜的热量散失，还要保证散热均匀。如果热量在保温层某个局部的积累过多，势必会大大影响均温层的均温能力。因此在选型的时候，尽量选择孔隙小，质地均匀的保温材料。

## 2.2.2 柱面保温材料

由于恒温控制的核心部分就是对于柱面部分的恒温控制，所以以往滤光器保温的多采用两层保温材料。如早期的 35cm 太阳磁场望远镜<sup>[25]</sup>，其第一层保温使用了隔热毡，质地较软有弹性，容易实现与加热部分的紧密接触，以减小边界处的温度变化；第二层保温使用了聚苯乙烯泡沫，质地较硬，便于系统组装。然而，目前市场上的保温材料在性能上已经超越隔热毡，而且聚苯乙烯泡沫也有易被硅油腐蚀的问题。所以本设计综合考虑 2.2.1 中的指标要求，选取了陶瓷纤维纸和聚氨酯泡沫作为柱面的保温材料。

**陶瓷纤维纸** 陶瓷纤维纸如图 2-5，是一种纤维状轻质耐火材料，用于滤光器的第一层保温。该材料质地柔软，易于切割加工，具有耐高温，热稳定性好，导热率低、比热小及耐机械震动等优点。由于陶瓷纤维纸采用了固态纤维与空气形成的混合结构，所以具有较高的气孔率和较大气孔孔径与表面积，使得其具有优良的隔热性能。因而，陶瓷纤维纸在机械、冶金、石油、玻璃、电子等行业都得到了广泛应用。其部分性能参数如表 2-1：

技术性能	单位	指标
密度	$\text{g/cm}^3$	0.25
导热系数	$\text{W/m}\cdot\text{K}$	0.075
比热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	0.2

表 2-1 陶瓷纤维纸参数





图 2-5 陶瓷纤维纸实物图

**聚氨酯泡沫** 聚氨酯泡沫如图 2-6，是一种保温性能非常优越的绝热材料，在众多领域都得到广泛运用，如冷库、石化罐体、冶金等。参考表 2-2 可以看出聚氨酯泡沫有很低的导热系数，而且其吸水率和抗压强度都十分适于本设计的第二层保温。此外，该材料孔隙较小，且孔隙大小均匀，不容易出现热量局部不均的现象。在加工过程中，发现聚氨酯泡沫很容易进行切割打磨如图 2-7，这也是本课题选用该材料的原因。

技术性能	单位	指标
密度	$\text{g/cm}^3$	0.06
导热系数	$\text{W/m}\cdot\text{K}$	0.016-0.027
比热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	2475.2
闭孔率	%	$\geq 97$
吸水率	$\text{Kg/m}^2$	$\leq 0.2$
抗压强度	$\text{Mpa}$	$\geq 200$

表 2-2 聚氨酯材料参数



图 2-6 聚氨酯泡沫实物图



图 2-7 聚氨酯泡沫打磨

### 2.2.3 端面保温材料

为保证其滤光器内部恒温，在圆柱面上密绕了锰铜和纯铜线作为电桥，由于电桥测温的单元是整个的圆柱体柱面，不能够很好地反应轴向上的温度梯度，如果两个端面的散热不同，势必影响滤光器内部的温度场分布，但是从柱面测得的温度可能没有变化，所以必须采取端面保温，以尽量减小端面散热对于滤光器恒温控制的负面影响。由于泡沫玻璃有很好的弹性，且导热系数低，可以方便地填充滤光器端面到外壳的空间，所以被选作本课题的端面保温材料。

**泡沫玻璃** 泡沫玻璃如图 2-7 是一种以玻璃为主要原料，掺入适量发泡剂，通过高温隧道窑炉加热焙烧和退火冷却加工处理后制得，具有均匀的独立密闭气隙结构的新型无机绝热材料。该材料通常含有许多直径 1~2mm 的气泡结构，具有重量轻、导热系数小、防水、绝缘、防火、耐腐蚀、机械强度高特性，被广泛用于保温、化工、隔音、防水材料、军工产品等领域。部分性能参数如表 2-3：

技术性能	单位	指标
密度	$\text{g/cm}^3$	1.3
导热系数	$\text{W/m}\cdot\text{K}$	0.058
比热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	1000
吸水率	$\text{Kg/m}^2$	$\leq 0.2$

表 2-3 泡沫玻璃参数



图 2-7 泡沫玻璃实物图

## 2.3 传热分析与参数估计

对物体传热过程的分析一般分为两个部分：稳态导热分析和非稳态导热分析。稳态导热分析即研究系统在稳态工作条件下的温度场分布情况，此时导热物体中各点的温度不随时间而变。同理，非稳态导热分析主要研究工作条件变动时的温度场分布情况。具体对于本设计的滤光器，稳态分析主要用于估计滤光器在不同环境温度下稳定工作时的加热功率，以便于后续的电路设计参数的确立。而非稳态分析主要研究滤光器温控系统的相应时间，以便于确定温控器的 PID 控制参数。

### 2.3.1 稳态导热分析

文献[25]中介绍了早期的太阳磁场望远镜滤光器的稳态散热分析，对于本课题有着重要的指导意义。文献[25]只分析了一层保温的散热模型，而且保温层的内外两侧都视为对流散热，这与滤光器实际工作的情况是有所差距的。因此，本设计重新考虑了散热的边界条件和多层结构等问题，运用等效热阻的方法估算出了更为接近实际的散热模型。

滤光器的整体结构如 2-8，热量的流动主要考虑两个方向：一个是柱面向外的热量流动，另一个是两个端面向外的热量流动。所以保温层可以视为两块平板型和一个圆筒型的散热问题。

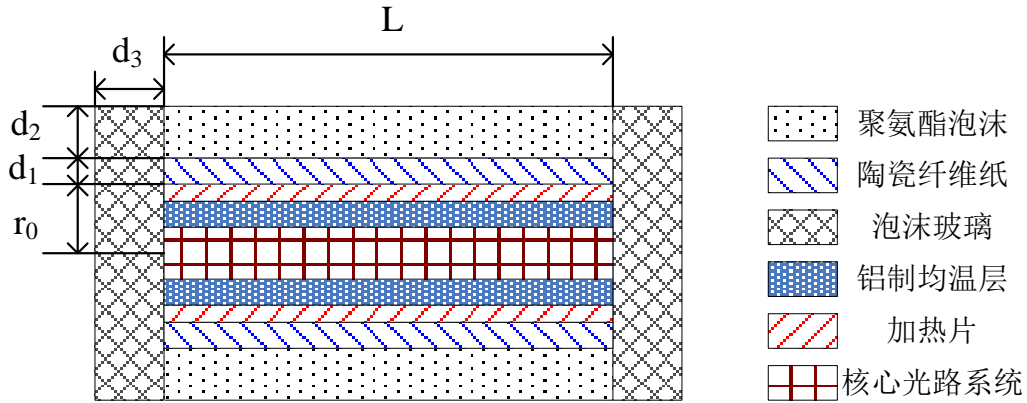


图 2-8 滤光器纵截面

### 2.3.1.1 圆筒壁散热

为了便于数学推导，本设计先考虑单层圆筒壁的散热问题，将聚氨酯泡沫和陶瓷纤维纸视为一种材料，导热系数为常数  $\lambda$ 。设保温材料的厚度为  $d = d_1 + d_2$ ，采用圆柱坐标系  $(r, \varphi, z)$ ，由于滤光器的长度较长，忽略轴向的温度梯度，则二维的导热问题可以简化为沿半径方向的一维导热问题。所示式 2-10 可以化简为：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) = 0 \quad (2-17)$$

由于滤光器进入稳态之后均温层的温度变化很小（通常  $< 0.01^\circ\text{C}$ ）所以保温的圆筒壁内侧和外侧均可视为温度恒定，即满足第一类边界条件：当  $r = r_0$  时， $t = t_0$ ；当  $r = r_0 + d$  时， $t = t_1$ 。至于圆筒壁的外侧还应该考虑与周围空气的对流热交换，进入稳态后可以视为环境温度不发生变化，即满足第三类边界条件：

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_w = h(t_1 - t_f) \quad (2-18)$$

对式 2-17 进行两次积分，得到通解为：

$$t = c_1 \ln r + c_2 \quad (2-19)$$

将第一类边界条件带入式 2-19 中，解得：

$$t = t_0 + \frac{t_1 - t_0}{\ln\left(\frac{r_0 + d}{r_0}\right)} \ln(r / r_0) \quad (2-20)$$

把式 2-20 代入傅里叶定律得到：

$$q = -\lambda \frac{dt}{dr} = \frac{\lambda}{r} \frac{t_0 - t_1}{\ln\left(\frac{r_0 + d}{r_0}\right)} \quad (2-21)$$

式 2-18 和式 2-21 相等，可以消去  $t_1$ ，进而得到热流量  $\Phi$  的数学表达式：

$$\Phi = Aq = 2\pi r L q = \frac{2\pi L(t_0 - t_f)}{\frac{1}{h(r_0 + d)} + \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{r_0 + d}{r_0}\right)} \quad (2-22)$$

### 2.3.1.2 热阻的引入

式 2-22 就是单圆筒保温壁考虑内侧温恒、外界环境温度恒定的情况下的热流量公式。如果处理复杂情况的传热过程，如多层结构用微分方程推导，运算量大，容易出错，传热学引入了热阻的方法来简化运算的复杂度，即温差与热流量的比值，对于多层结构，可以十分直观地认为是热阻的串联。

由式 2-21 推导单圆筒在两侧恒温条件下的热阻  $R_1$ ：

$$\Phi = 2\pi r L q = \frac{2\pi \lambda L}{\ln\left(\frac{r_0 + d}{r_0}\right)} (t_0 - t_1)$$

$$R_1 = \frac{\Phi}{t_0 - t_1} = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{r_0 + d}{r_0}\right)}$$

由式 2-18 推导单圆筒外壁与周围环境对流换热情况下的热阻  $R_2$ ：

$$\Phi = 2\pi(r_0 + d)Lq = -\lambda \frac{dt}{dr} \cdot 2\pi(r_0 + d)L = 2\pi(r_0 + d)Lh(t_1 - t_f)$$

$$R_2 = \frac{\Phi}{t_1 - t_f} = 2\pi Lh(r_0 + d)$$

由此得到  $R_1$   $R_2$  串联后的总热阻是  $R = R_1 + R_2 = \frac{\Phi}{t_0 - t_f}$  与式 2-22 的结果完全一致。

有了热阻的引入，图 2-8 的保温结构便能够方便地推导出来，推导过程不再赘述。相对于式 2-22 中两个热阻串联的情况，图 2-8 相当于三个热阻的串联，即：

$$\Phi_{\text{柱面}} = R(t_0 - t_f) = \frac{2\pi L(t_0 - t_f)}{\frac{1}{h_1(r_0 + d_1 + d_2)} + \frac{1}{\lambda_1} \ln\left(\frac{r_0 + d_1}{r_0}\right) + \frac{1}{\lambda_2} \ln\left(\frac{r_0 + d_1 + d_2}{r_0 + d_1}\right)} \quad (2-23)$$

其中,  $L$ 为滤光器柱面长度, 值为 40cm;

$t_0$ 为滤光器内部均温层的温度, 值为 42°C;

$t_f$ 为滤光器外部空气温度, 值可变;

$r_0$ 为陶瓷纤维纸保温层的内径, 值为 7.5cm;

$d_1$ 为陶瓷纤维纸的柱面厚度, 值为 6mm;

$d_2$ 为聚氨酯泡沫的柱面厚度, 值为 2.2cm;

$\lambda_1$ 为陶瓷纤维纸的导热系数, 值为 0.075W(m K);

$\lambda_2$ 为聚氨酯泡沫的导热系数, 值为 0.022 W(m K);

$h_1$ 为聚氨酯泡沫对外界空气的对流散热系数, 值为 11.63W/(m<sup>2</sup> ·°C)。

### 2.3.1.3 端面散热

端面散热问题可以近似为一维平板问题, 只考虑垂直与端面方向的散热。设垂直于端面的方向为  $x$  方向, 则  $y$  和  $z$  方向的热量分量视为 0, 由此式 2-9 可以化简为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) = 0 \quad (2-24)$$

由文献[28]可知平板型导热物体在两侧恒温条件下的热阻表达式为:

$$R_3 = \frac{d_3}{\lambda_3 A} \quad (2-25)$$

同样也可以得到平板型导热物体与周围环境对流换热情况下的热阻  $R_4$  :

$$R_4 = \frac{1}{h_2 A} \quad (2-26)$$

由此可以得到端面散热的热流量的表达式:

$$\Phi_{\text{端面}} = \frac{A(t_0 - t_f)}{\frac{1}{h_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} \quad (2-27)$$

其中：A 为端面的面积，值为  $0.038\text{m}^2$ ；

$h_2$  为泡沫玻璃对外界空气的对流散热系数，值为  $11.63\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ；

$d_3$  为泡沫玻璃的端面厚度，值为  $3\text{cm}$ ；

$\lambda_3$  为泡沫玻璃的导热系数，值为  $0.058\text{W}/(\text{m K})$ 。

由式 2-23 和式 2-27 可以得到滤光器的总的散热量：

$$\Phi = \Phi_{\text{柱面}} + 2\Phi_{\text{端面}} = R_{\text{等效}} \Delta t, \quad \text{其中 } \Delta t = t_0 - t_f \quad (2-28)$$

带入参数的值可以算出等效的热阻值大小为  $0.3779\text{W}/^\circ\text{C}$ 。

由能量守恒定律可知，滤光器温度稳定后的加热功率等于总的散热量  $\Phi$ ，可以看出稳定后的加热功率与滤光器内外温差成正比，比例系数为等效的热阻。滤光器内部温度要求稳定在  $42^\circ\text{C}$  左右，如果外界最低温度为  $-10^\circ\text{C}$ ，则可以估算出需要的最大加热功率为： $20.41\text{W}$ ，这对于确定温控器加热部分的设计有着重要意义。

### 2.3.1.4 电路参数设计

文献[24][25]的恒温控制电路采用的加热电源是交流电，由于其设计思路是加热和测温用同一电桥线圈，部分限制了加热电压的设计范围，其交流电压值分别为  $72$  伏和  $80$  伏。根据生物常识，人体对于高于  $36$  左右的电压会有触电的感觉。由于本设计的测温 and 加热时分开设计，加热电阻和电压有灵活的设计范围。所以最终选取的加热电压为直流  $24$  伏，加热电阻为  $8\Omega$ ，加热的功率为  $72\text{W}$ ，能够满足滤光器在最大温差下的功率需求。同时，根据文献[25]的分析， $72\text{W}$  的加热功率能够在室温条件下，一小时之内将滤光器加温到  $42^\circ\text{C}$  左右，方便科研人员的调试工作。

### 2.3.2 非稳态导热分析

文献[31]中详细介绍了温控箱数学模型的推算过程，基于此模型，恒温箱非稳态导热过程可以通过频率分析得出在环境温度变化的条件下恒温箱的温度响应情况。图 2-14 的结构图类似于本课题的滤光器结构，不同点在于，其加热部分到恒温箱的热量传递是通过空气的对流换热来实现的，而本课题的滤光器是通过铝制均温筒来完成热量传递。恒温箱为了减小加热到恒温的延迟，缩小系统的相应时

间，往往在内部安装风扇，加速恒温箱内的空气流动，如后文在测量滤光器加热功率的实验中将要提到的生化培养箱 FSH250。而本课题中的铝制均温层和其内部的核心光路系统边界效应更为明显，特别是光路系统结构复杂，很难用数学公式描述光路中各个元件的导热过程。因此，除了利用恒温箱模型来粗略估计滤光器的响应时间，本课题设计主要借助于实验来确定系统参数。

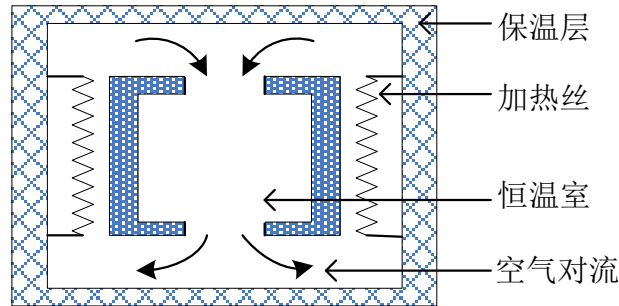


图 2-14 恒温箱结构图

**恒温箱模型的推导过程：**图 2-15 形象描述了恒温箱的热量传递过程，由于恒温箱内空气对流速度通常远快于恒温箱的散热速度，所以把加热室和恒温室视为一个整体考虑。

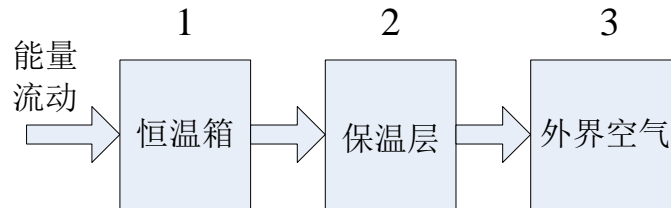


图 2-15 恒温箱能流图

根据传热学的理论，列出如下方程组：

$$\begin{cases} \dot{\Phi} - \Phi_{12} = C_1 \frac{dT_1}{dt} \\ \Phi_{12} = R_{12}(T_1 - T_2) \\ \Phi_{12} - \Phi_{23} = C_2 \frac{dT_2}{dt} \\ \Phi_{23} = R_{23}(T_2 - T) \end{cases}$$

其中， $\dot{\Phi}$  为加热丝产生的内热源功率；

$T_1, T_2, T$  分别表示恒温箱，保温层和外界空气的温度；

$C_1, C_2$  分别表示恒温箱和保温层的比热；

$R_{12}$  表示恒温箱到保温层之间的等效热阻；

$R_{23}$  表示保温层到外界空气之间的等效热阻；

$\Phi_{12}$  表示恒温箱到保温层传导的热流量；



$\Phi_{2,3}$ 表示恒温箱到保温层传导的热流量。

为了简化处理,令 $T_{d1} = T_1 - T$ ,表示恒温箱与外界环境温度的差值;令 $T_{d2} = T_2 - T$ ,表示保温层与外界环境温度的差值。则上述方程组可以化简为:

$$\begin{cases} \dot{\Phi} - \Phi_{12} = C_1 \frac{dT_{d1}}{dt} + C_1 \frac{dT}{dt} \\ \Phi_{12} = R_{12}(T_{d1} - T_{d2}) \\ \Phi_{12} - \Phi_{23} = C_2 \frac{dT_{d2}}{dt} + C_2 \frac{dT}{dt} \\ \Phi_{23} = R_{23}T_{d2} \end{cases}$$

由于外界气温在控温过程中为缓慢变化的过程,所以可以作进一步简化处理,令 $dT/dt = 0$ ,对方程组在零初始条件下作拉氏变换,得到:

$$\begin{cases} \dot{\Phi}(s) - \Phi_{12}(s) = C_1 s T_{d1}(s) \\ \Phi_{12}(s) = R_{12}[T_{d1}(s) - T_{d2}(s)] \\ \Phi_{12}(s) - \Phi_{23}(s) = C_2 s T_{d2}(s) \\ \Phi_{23}(s) = R_{23}T_{d2}(s) \end{cases}$$

由上述方程组化简可以得到恒温箱的传递函数为:

$$G(s) = \frac{T_{d1}(s)}{\dot{\Phi}(s)} = \frac{C_2 s + R_{12} + R_{23}}{(sC_1 + R_{12})(sC_1 + R_{12} + R_{23}) - R_{12}^2} \quad (2-29)$$

式 2-29 可以改写为:

$$G(s) = \frac{K(s + s_1)}{(s + s_2)(s + s_3)} \quad (2-30)$$

式 2-30 是恒温箱频域响应的一般表达式,有一个零点 $s_1$ ,两个极点 $s_2, s_3$ 。实际应用中还需要借助大量的系统响应实验来最终确定参数 $K, s_1, s_2, s_3$ 的具体值,通常用的方法是最小二乘拟合,如文献[19][20]。温控对象的传递函数知道以后,结合 PID 控制器的传递函数,便可以构造出整个温度控制系统的传递函数。于是,由环境温度的变化作为输入量能够方便地估算出温控系统的控温效果。由于,滤光器的机械构造远复杂于恒温箱,因此,系统的非线性等不确定因素更为突出,除了用系统函数来估算输出,还应需要实验来标定相关的参数。



## 第三章 PID 控制器理论和分析方法

在工程实际中，应用最为广泛的调节器控制规律是比例、积分微分控制，简称 PID 控制，又称 PID 调节。PID 控制一种偏差驱动的调节方法，具有结构简单、稳定性好、可靠性高和调节方便等优点。

PID 控制器问世至今已经有近 70 年的历史。早期的 PID 控制器主要用于模拟控制系统中。从上世纪 70 年代以来，随着微电子技术和计算机技术的迅猛发展以及工业过程控制的需要，数字 PID 技术开始得到广泛应用。

当被控对象的精确数学模型难以确定、结构和参数不能完全掌握的情况下，系统控制器的结构和参数必须依靠经验和现场调试来确定，这时最适用的控制技术就是 PID 控制。本课题中滤光器的核心光路系统结构复杂而精密，热量传递的数学模型难以确定，需要大量的实验来调试和验证控制效果，所以结构简单，容易实现的数字 PID 控制成为了优先考虑的方案。

### 3.1 经典 PID 控制器

#### 3.1.1 PID 控制器的结构

模拟 PID 控制系统原理框图如图 3-1 所示，系统由模拟 PID 控制器和被控对象组成。其中 PID 控制器由比例环节、积分环节、微分环节三部分组成。PID 控制器是一种线性控制器，它根据给定值  $r(t)$  与实际输出值  $y(t)$  构成控制偏差。

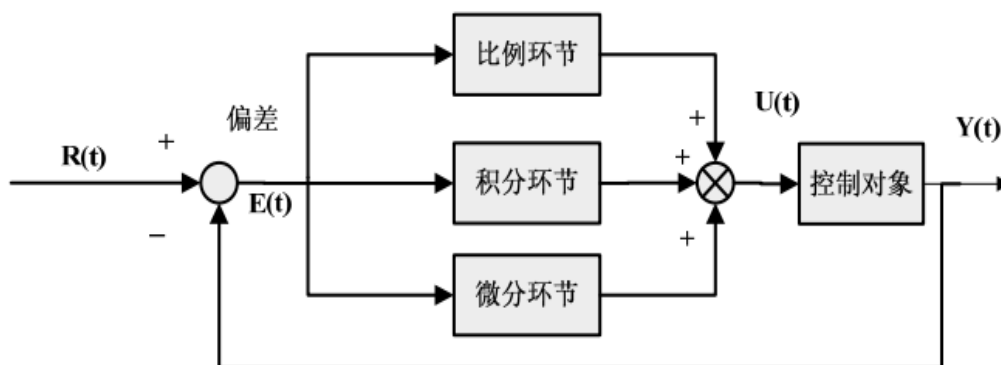


图 3-1 模拟 PID 控制系统原理框图

PID 控制器的控制量  $U(t)$  是偏差  $E(t)$  的比例、积分和微分的线性组合，其控制规律的数学表达为：

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3-1)$$

式中,  $e(t)$  为系统偏差,  $e(t) = r(t) - y(t)$

$K_p$  是比例系数;

$T_I$  是积分时间常数;

$T_D$  是微分时间常数。

式 (3-1) 也可写成:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3-2)$$

式中,  $K_p$  是比例系数;

$K_I$  是积分系数,  $K_I = K_p / T_I$ ;

$K_D$  是微分系数,  $K_D = K_p T_D$ 。

式 (3-1) 和式 (3-2) 对应的传递函数写成 s 域的表达式为:

$$H(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I \cdot s} + T_D \cdot s \right) = K_p + K_I \cdot \frac{1}{s} + K_D \cdot s$$

PID 控制器的三个环节在控制系统中的具体作用如下:

- (1) 比例环节 能够及时地反映控制系统的偏差信号  $e(t)$ , 只要偏差存在, 控制器就会立即产生调节作用, 以减小偏差。对于本课题的温控系统, 只要测温点的温度与设定值有偏差, 就会产生相应比例的加热或散热功率, 以减小测温点与设定值的偏差。
- (2) 积分环节 能够消除静差, 提高系统的无差度。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。对于本课题的温控系统, 积分环节能够逐渐累计加热功率, 逐渐消除测定值和设定值之间的误差。
- (3) 微分环节 能够及时地反映偏差信号的变化速率, 并且能够在偏差信号变得太大之前, 在控制系统中引入一个有效的早期修正信号, 从而加快系统的动作速率, 减小调节时间。对于本课题的温控系统, 微分环节能够用于抵抗外界环境温度的突变情况, 能够及时地调节加热或散热功率。

### 3.1.2 PID 各环节对控制系统的影响

控制系统闭环传递函数的极点分布决定了系统的特性和运动形式,包括系统自由运动的模态,系统单位阶跃响应的动态性能。而闭环传递函数的零点虽然并不影响自由运动的模态,但是它们却影响各运动模态在系统响应中所占的比重,从而也影响系统响应曲线的形状。

在系统中增加比例环节,会减小系统的阻尼比 $\xi$ 。在不影响系统稳定性的前提下,比例系数越大,系统的过渡过程越快,响应速度越高,稳态误差越小。

在系统中增加积分环节,会给系统增加零极点。零极点的作用是消除或减小系统的稳态误差,改善系统的稳态性能。

在系统中增加微分环节,会给系统增加负实数零点,从而产生超前的相位角,增加系统的相位裕量,提高了系统的阻尼程度,改善了系统的动态性能。由于微分环节是与输入偏差的变化率成正比,在稳态的时候基本不起作用,所以不能够单独使用。

## 3.2 数字 PID 控制算法

实际的数字系统中控制是一种采样控制,系统是根据采样时刻的偏差值来计算控制量。所以,连续 PID 控制算法不能直接使用,需要采用离散化处理,使用数字 PID 控制器。数字 PID 控制算法通常又分为位置式 PID 控制算法和增量式 PID 控制算法。

### 3.2.1 位置式 PID 控制算法

为了得到位置式 PID 控制算法的数学表达式,需要对模拟 PID 的数学表达式进行离散化处理。具体为,以一系列的采样时刻点 $kT$ 代表连续时间 $t$ ,以求和代替积分,以增量代替微分,得到近似的数学变换如下:

$$t = k \cdot T, k = 0, 1, 2, \dots$$

$$\int_0^t e(t) dt \approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{j=0}^k e(j) \quad (3-3)$$

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (3-4)$$

式中: $T$ 是采样周期。

从表达式可以看出,要想保证足够的近似精度,采样周期 $T$ 必须足够短,为

了书写方便，把  $e(kT)$  写成  $e(k)$ ，表示第  $k$  个采样点。将 (3-3) (3-4) 带入式 (3-1) 中，得到离散 PID 的表达式为：

$$u(k) = K_p \{e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)]\} \quad (3-5)$$

或者

$$u(k) = K_p \{e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)]\} \quad (3-6)$$

式中： $k$  是采样序号， $k=0,1,2,\dots$ ；

$u(k)$  是第  $k$  次采样时刻得到的系统输出值；

$e(k)$  是第  $k$  次采样时刻得到的偏差值；

$e(k-1)$  是第  $k-1$  次采样时刻得到的偏差值；

$K_I$  是数字 PID 算法的积分系数， $K_I = K_p T / T_i$ ；

$K_D$  是数字 PID 算法的微分系数， $K_D = K_p T_D / T$ 。

由于控制系统的输出  $u(k)$  是直接控制执行单元，所以  $u(k)$  的值和执行机构的位置是一一对应的，通常称 (3-5) (3-6) 为位置式 PID 控制算法。本课题采用的执行加热的方式是 PWM（脉宽调制），利用温度的测定值和设定值之间的差值直接计算出 PWM 的占空比，来控制功率管的开关。所以位置式 PID 是本课题的采用的基本算法，图 3-2 给出了位置式 PID 恒温控制系统的示意图。

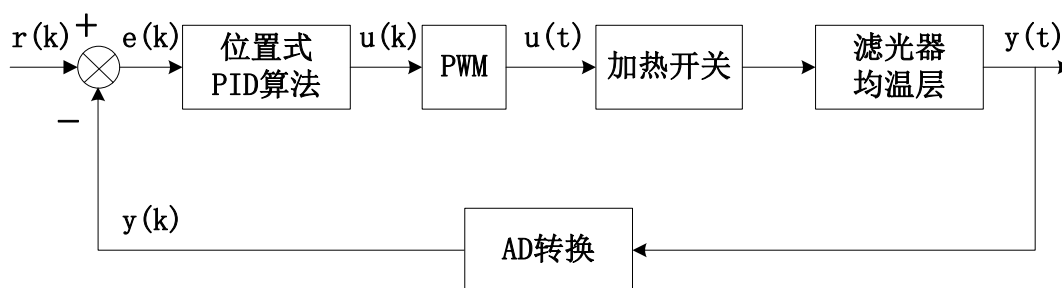


图 3-2 位置式 PID 恒温控制系统

### 3.2.2 增量式 PID 控制算法

当执行单元需要的是控制量的增量时，可以由 (3-6) 推导出增量式 PID 控制算式，具体如下：

$$\begin{cases} u(k) = K_p \{ e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \} \\ u(k-1) = K_p \{ e(k-1) + K_I \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_D [e(k-1) - e(k-2)] \} \end{cases}$$

两式相减可得：

$$\Delta u(k) = K_p \Delta e(k) + K_I e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (3-7)$$

其中， $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$  (3-8)

由式 (3-7) 可以进一步改写式 (3-9) 为：

$$\Delta u(k) = A e(k) - B e(k-1) + C e(k-2) \quad (3-9)$$

式中： $A = K_p (1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_D}{T})$ ；

$$B = K_p (1 + \frac{2T_D}{T}) ;$$

$$C = K_p T_D / T。$$

式 (3-7) 和式 (3-9) 都可被视为增量式 PID 控制算法的数学表达式。从表达式上可以看出，输出量的计算除了需要采样周期、比例系数、积分时间常数、微分时间常数外，只需要前后三次测量值的偏差，这与位置式 PID 需要累计所以测量值偏差不同，需要的计算量更小。

增量式 PID 控制算法的应用取决于控制量的类型，例如步进电机就是典型的增量驱动的设备，通常采用增量式 PID 来控制步进电机的转动，进而调节执行单元（如控制阀门）的运动，图 3-3 给出了增量式 PID 电机控制系统的示意图。

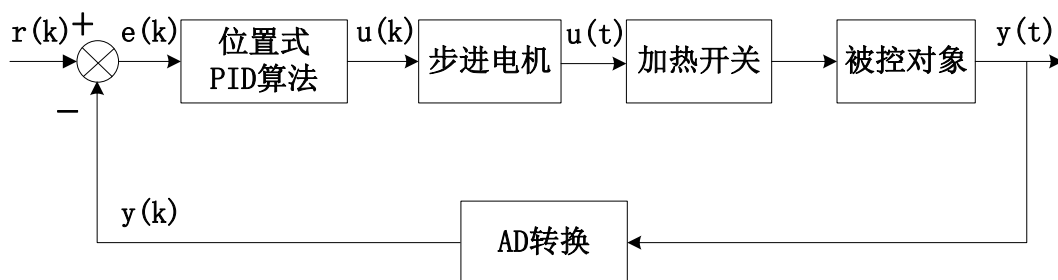


图 3-3 增量式 PID 电机控制系统

### 3.2.3 位置式 PI 算法的改进

本课题的被控对象热阻大，具有慢时变、大时滞的特点；而且滤光器是安装

在望远镜镜筒后端的舱室里，空气对流小，即环境温度的变换较为迟缓。所以微分环节的控制作用不明显，故本课题只采用了 PI 算法，更有利于参数的调整和系统的快速稳定。PI 控制的特点很适合惯性较大的控制对象，具体分析为：

- (1) PI 的比例环节起到粗调的效果，积分环节起到细调的效果。当存在偏差的时候，比例环节会立即产生调节作用，克服干扰，然后积分环节经过一段时间逐渐产生了明显的调节作用，以缩小比例环节稳定后的余差。所以 PI 可以理解为及时的比例调节和随后的积分调节的有效组合。
- (2) PI 的调节可以视为一种  $K_p$  不断调整的比例作用。系统从某一较大偏差值向设定值运动过程中可以看作  $K_p$  的值不断增大的调节过程。对于本课题的恒温控制，滤光器要稳定到某一温度，必然对应了一个加热的平衡功率；而这个平衡功率正比于测温点和设定值的差值，比例系数就是  $K_p$ ，所以系统温度在向设定值运动的过程，加热的功率基本不变，而差值在缩小，对应的  $K_p$  可视为逐渐变大。

第二章确定的最大加热功率为 72W，利用文献[25]方法，可以近似估计出系统从启动到稳定所需要的时间为半个小时（环境温度 20℃）。在此基础上，积分常数的确定会出现困难，如果过大，则很容易积分值饱和，即积分后的功率超过最大加热功率；如果过小，在系统启动阶段虽然可以防止饱和，但系统的跟踪能力会下降，抗干扰性变差，稳定性会受到影响。所以本课题对积分环节做了三项改进：

### 积分分离

在通常的 PID 控制系统中，积分环节的加入的目的是消除残差，提高精度。当控制系统出现较大扰动或者大幅度改变给定值时，会造成 PID 运算的积分积累，从而出现超调或长时间波动的现象。对于滤光器恒温系统，由于设定值和外界温差一般较大，且系统惯性大，很容易引起超调，应当采取积分分离措施。具体实现为：当偏差  $e(k)$  大于某一阈值  $\beta$  时，取消积分作用；当偏差  $e(k)$  小于该阈值时，开启积分环节。

积分分离的阈值  $\beta$  的确定需根据具体的控制对象及控制要求， $\beta$  值过大，达不到积分分离的目的，系统同样会出现超调或波动的现象； $\beta$  值过小，控制系统很难跳出积分分离区，即系统很难稳定在阈值以下的范围波动。因此，在后期进行的参数整定工作，需要实验来确定  $\beta$  值的大小。



## 抗积分饱和

积分饱和是指由于长时间的正或负偏差累计或者偏差较大的时候，控制系统输出的控制量超出了执行单元的控制极限的现象。本课题中的滤光器由于其机械结构的特点，不能使用半导体制冷器（TEC），所以，不能产生负功率，即主动散热。因此，采用的加热单元的功率范围是 0~72W。

在系统启动阶段，由于初始偏差较大，加热时间较长，很容易使得积分的功率超过最大功率输出，在系统温度首次超过设定值之后，由于系统惯性大，且没有主动散热，系统温度会长时间保持在设定值以上，就会出现长时间的负偏差的积累，最后系统输出的控制量很容易出现小于 0W 的现象，因此必须采取必要的抗积分饱和的措施。具体实现为：计算  $u(k)$  时，先判断  $u(k-1)$ ，若  $u(k-1) > u_{\max}$ ，则只积累负偏差；若  $u(k-1) < u_{\min}$ ，只积累正偏差。与  $\beta$  值类似， $u_{\max}$  大小的确定同样关乎系统的控制能力和稳定性，也需要参数整定工作来最终确定。

## 比例快调，积分慢调

积分分离和抗积分饱和在文献[17]有相关介绍，这两种方法的主要目的是保证控制系统的稳定性，对于实际的控制效果的影响不大。如果按照式 3-6 的方式来进行控制，则比例和积分的控制节奏是同步进行的，然而，本课题在实验过程中发现：如果引入可调的积分步长，控制的效果会更为理想。考虑到本课题的控制对象，热惯性大，因此积分的调节步长要大于比例调节，简言之，比例快调，积分慢调。

## 3.3 PID 控制参数的整定方法

PID 控制器的参数整定<sup>[17][18]</sup>即为设置和调整控制器的参数，使得控制系统的过渡过程达到令人满意的品质。具体来讲就是确定最合适的比例度、积分时间和微分时间。迄今为止，国内外对于 PID 参数整定方法的研究已经有几十年的历史，提出了很多参数整定方法，大致可以分为理论算法和工程整定法。理论算法通常要先对系统的参数模型进行辨识，通常应用在较为简单的控制对象上，如第二章提到的恒温箱模型；对于数学模型难以确定的情况往往采用的是工程整定法，这也是本设计采用的整定方法。

工程整定法最常用的主要有四种方法：临界比例带法、衰减曲线法、动态参数法和经验法。本文对常用的临界比例带法和衰减曲线法（4:1）进行如下介绍：

### 3.3.1 临界比例带法

临界比例带法又称边界稳定法，其要点是将调节器设置成纯比例作用，将系统投入自动运行并将比例带由大到小改变，直到系统产生等幅振荡为止。这时控制系统处于边界稳定状态，记下此状态下的比例带值，即临界比例带  $\delta_K$  以及振荡周期  $T_K$ ，然后根据经验公式计算出调节器的各个参数。可以看出临界比例带法无需知道对象的动态特性，直接在闭环系统中进行参数整定。

临界比例带法的具体步骤是：

- (1) 将调节器的积分时间置于最大，即  $T_i \rightarrow \infty$ ；置微分时间  $T_d = 0$ ；置比例带  $\delta$  于一个较大的值。
- (2) 将系统投入闭环运行，待系统稳定后逐渐减小比例带  $\delta$ ，直到系统进入等幅振荡状态。一般振荡持续 4~5 个振幅即可，试验记录曲线如图 3-4 所示：

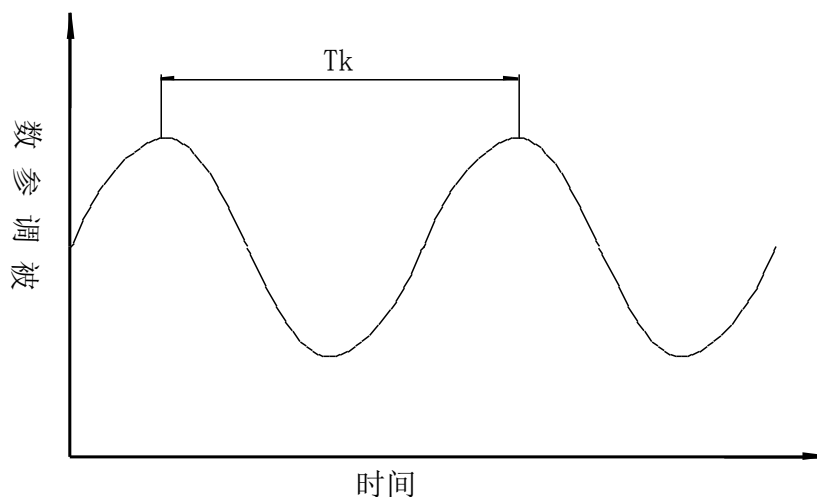


图 3-4 等幅振荡曲线

- (3) 根据记录曲线得到振荡周期  $T_K$ ，此状态下的调节器比例带为  $\delta_K$ ，然后按表 3-1 计算出调节器的各个参数。

规律	$\delta$	$T_i$	$T_d$
P	$2\delta_K$	$\infty$	0
PI	$2.2\delta_K$	$0.85T_K$	0

表 3-1 临界比例带法计算公式 ( $\psi = 0.75$ )

- (4) 将计算好的参数值在调节器上设置好，作阶跃响应试验，观察系统的调

节过程，适当修改调节器的参数，直到调节过程满意为止。

### 3.3.2 衰减曲线法

衰减曲线法<sup>[17]</sup>是在总结临界比例带法基础上发展起来的，它是利用比例作用下产生的 4:1 衰减振荡 ( $\psi = 0.75$ ) 过程时的调节器比例带  $\delta_s$  及过程衰减周期  $T_s$ ，据经验公式计算出调节器的各个参数。

衰减曲线法的具体步骤是：

- (1) 置调节器的积分时间  $T_i \rightarrow \infty$ ，微分时间  $T_d = 0$ ，比例带  $\delta$  为一稍大的值；将系统投入闭环运行。
- (2) 在系统处于稳定状态后做阶跃扰动试验，观察控制过程。如果过渡过程衰减率大于 0.75，应逐步减小比例带值，并再次试验，直到过渡过程曲线出现 4:1 的衰减过程。记录下 4:1 的衰减振荡过程曲线，如图 3-5 所示，在曲线上求取  $\psi = 0.75$  时的振荡周期  $T_s$  结合此过程下的调节器比例带  $\delta_s$ ，按表 3-2 计算出调节器的各个参数。

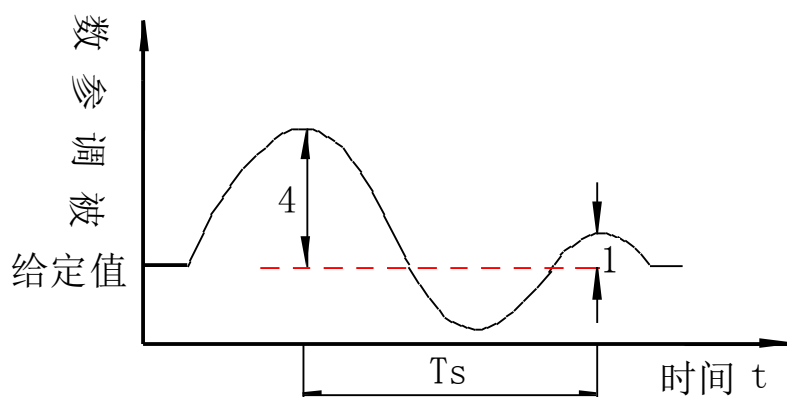


图 3-5 4:1 衰减调节过程曲线

$\psi$	规律	$\delta$	$T_i$	$T_d$
0.75	P	$\delta_s$	$\infty$	0
	PI	$1.2\delta_s$	$0.5T_s$	0

表 3-2 衰减曲线法计算公式

- (3) 按计算结果设置好调节器的各个参数，做阶跃扰动试验，观察调节过程，适当修改调节器参数，到满意为止。

与临界比例带法一样，衰减曲线法也是利用了比例作用下的调节过程。从表

3-2 可以发现，对于  $\psi = 0.75$ ，采用比例积分调节规律时相对于采用比例调节规律引入了积分作用，因此系统的稳定性将下降，为了仍然能得到  $\psi = 0.75$  的衰减率，就需将  $\delta_s$  放大 1.2 倍后作为比例积分调节器的比例带值。

### 3.3.3 控制系统的稳定性分析

**稳态误差** 稳态误差是指在稳态条件下输出量的期望值与实际值之间的差，稳态误差的大小是衡量控制系统稳态性能的重要指标。就本课题而言，滤光器其稳定工作需要的温度环境为  $42^{\circ}\text{C}$  左右，最大限度地减小稳态误差是主要的挑战。因此，需要高分辨率的测温元器件，精确可控的加热功率，相对小的响应时间，以保证滤光器能够全年不间断地正常观测。

**系统稳定性** 系统稳定性是指系统在扰动消失后，由初始偏差状态恢复到原平衡状态的性能。线性定常系统的稳定性取决于闭环极点的分布，而闭环极点的分布仅和系统的结构与参数有关，所以，线性定常系统的稳定性仅和系统的结构与参数有关，而与初始条件和输入信号无关。文献[17][18]利用闭环系统的阶跃扰动，详细地分析了比例和积分系数的选择对于零极点分布的影响，进而直观地说明了零极点不同分布时系统的响应情况。当闭环系统的传递函数出现共轭复根，随着积分时间的减小，振荡现象越来越明显。本设计在积分环节加入了积分分离和抗积分饱和的方法就是为了缩短系统进入稳态的时间，防止系统落入振荡状态。

## 第四章 恒温控制器的设计

滤光器的温度控制是一种较为典型的非线性控制，对于非线性控制，相关控制理论仍在不断发展，很多场合更需要工程经验的辅助。目前在恒温控制器的研制方面，国外处于领先水平，ILX Lightwave, WAVELENGTH, THORLABS, MCSHANE, LINEAR, TECHNOLOGY 等几家公司在恒温控制器领域都有十分成熟的产品。图 4-1 是 ILX Lightwave 公司的 LDT-5900 系列的温度控制器，主要应用于半导体激光器的恒温控制，支持多种测温方式如热敏电阻、IC 和 RTD 传感器。



图 4-1 LDT-5900 温度控制器

目前市场上的温度控制器正向数字智能化的方向发展，许多的测温方式都已经成功集成到控制器中，方便用户选择；加热功率控制的方式一般采用的是脉宽调制（PWM）方式。本课题吸收了早期滤光器采用电桥测温的成功经验，借鉴了现代温度控制器的控制手段，成功完成了基于电桥和 PT100 测温的数字式恒温控制器，经实地环境的测试，本设计的控制器取得了较为理想的控制效果。

### 4.1 经典恒温控制器的介绍和分析

在单片机技术出现之前，早期的滤光器恒温控制器多采用模拟技术。在电路设计的过程中，特别考虑了增益大小、检测迟滞、零点漂移等一系列问题。许多恒温控制器采用了测温元件与加热元件分开设计的思路，虽然在某些应用领域取得了很好地控制效果，但是考虑到滤光器对控温效果的苛刻要求，测温与加热分开的设计思路在应用上受到了部分限制。

高精度的恒温控制器需要有高的增益放大器，如果测温元件与加热元件分开设计，加热器中温度的任何变化都要经过一定的延迟后才能被测温元件所探测到，由于温度检测的迟滞，放大器的增益不能够做得很高，否则会造成系统的

稳定。南京天文仪器厂在滤光器的恒温控制器上有长达几十年的设计经验，其采用模拟技术的高精度恒温控制器一般都将测温元件和加热元件做成一体，这样做基本能够消除检测的延迟。

### 4.1.1 圆柱面温控电路分析

文献[24]按照滤光器在半小时内提升  $42^{\circ}\text{C}$  来估算每个桥臂需要的最大加热功率约为  $45\text{W}$ ，选定的交流电压为  $72\text{V}$ ，可以算出每个桥臂的电阻值约为  $30\Omega$ 。电桥臂选取了两种材料，用电阻温度系数为  $0.00002\Omega/^{\circ}\text{C}$  的漆包锰铜线作为电桥的基准桥臂，用电阻温度系数为  $0.0039\Omega/^{\circ}\text{C}$  的高强度漆包铜线作为电桥的测温桥臂。电桥臂采用双层绕制，如图 4-2，紧贴铝桶壁用的是高强度漆包铜线双股均匀密绕两只可变桥臂，在可变桥臂上敷一层薄的聚酯薄纸，然后再在薄纸上面用锰铜丝均匀密绕两个基准桥臂。

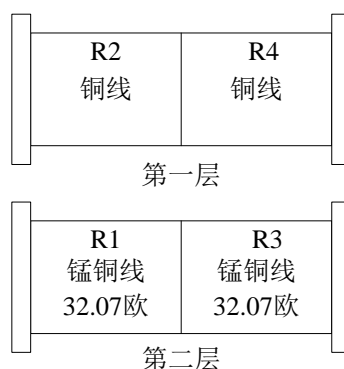


图 4-2 电桥绕制

在电桥臂绕制完成后，为了能够调节恒温值，在电桥的相邻两臂之间串接了一个镍镉丝绕制的总电阻为  $0.8\Omega$  的电位器，以便电桥能够在  $37^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$  的温度范围内都能够达到平衡。

图 4-3 是一种应用多年的滤光器恒温控制电路，主要包括电源、电桥、放大电路、相敏检波电路和可控硅触发电路几个部分。电桥的激励电流对于检测和加热采用时间划分的方法，在交流电源过零小区间内，把直流电压送到电桥作为激励电源，在被控对象温度偏低时，电桥的输出信号能够点火双向可控硅管，将交流电馈电到加热桥臂上，用过零检测器在交流电过零的一个小区间内开断加热电源，而将低压直流电激励电桥，电桥输出信号经过直流放大后再经逻辑电路去控制双向可控硅管的控制极，以调节电源周波的通断来达到控制加热功率的目的。

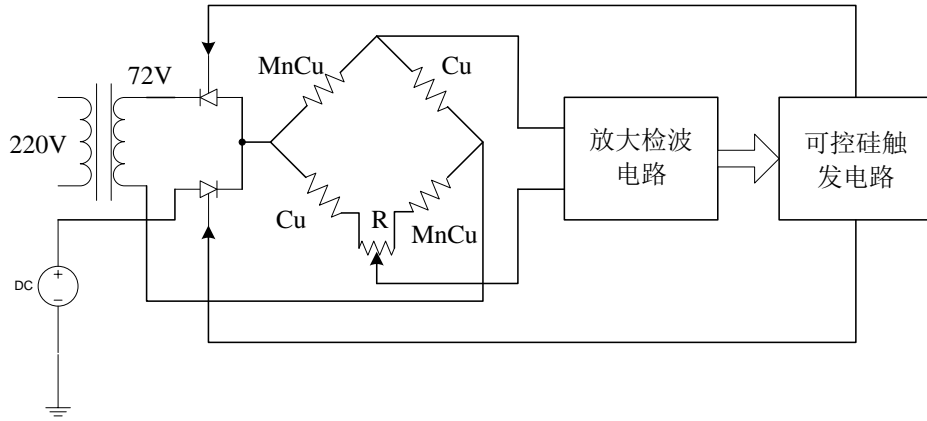


图 4-3 柱面控温电路示意图

在不同外界温度下，滤光器的热耗也不同，图 4-3 中的电路是根据加热电桥输出大小不同的温差信号来控制加热电路中可控硅的导通角，以达到新的外界温度下的热平衡。所以这种误差驱动的控制电路实质是一种比例调节，由第三章的分析可知，比例调节存在稳态误差，所以在早期的电路设计中采取了两种措施来减小稳态温差：

- 1 调整前置放大电路的放大倍数，在输出相等加热功率的条件下，放大倍数越大，温度误差信号就越小。
- 2 文献[24]中采用了辅助加热电路。该电路除了能让控制电路自启动之外，更为重要的作用是将不同环境温度下反馈的加热功率自动补偿到加热电桥上。该电路能够实时地补偿加热功率，以适应外界环境温度的变化，在控制方式是实质是一种积分调节，能够有效地减小稳态误差。

#### 4.1.2 端面温控电路分析

由于光学结构上的考虑，滤光器的两端不能像圆柱面那样用聚氨酯泡沫全部覆盖，如果端面温度偏差过大，滤光器的工作温度仍然有可能不稳定。为此，文献[24]分别在滤光器的两个端面加装了两套简易的恒温控制电路。如图 4-4，该电路设计得相对简单，采用了测温和加热分开设计的思路，选取了热敏电阻作为测温元件，检测出来的误差信号经过放大、检波后去触发可控硅管，来控制加热电阻丝的加热功率。

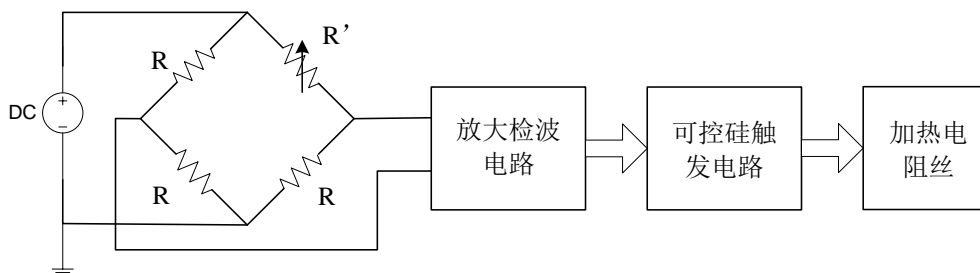


图 4-4 端面控温电路示意图

### 4.1.3 经典恒温控制器的效果和评价

为了检测滤光器温度控制的实际效果,应当有测温仪器实时地记录显示滤光器在各种环境下的温度变化。早期的滤光器测温由于科研条件的限制,多采用的是高分辨率的水银温度计,读数的时候采用的是读数显微镜来观察温度计的变化。在装配调试阶段,文献[24][25]中的温控结果已经能够达到  $0.005^{\circ}\text{C}$  的波动范围,并最终实现了全年无故障地天文观测。

经典的高精度恒温控制电路采用的是半波工作方式,即半波测温和半波加热。这样设计一方面提高了电路的调节效率,另一方面使得相敏判温电路设计起来十分容易。采用半波工作,使电路中的电容器有足够的放电恢复时间,避免可能产生的信号积累误差,这样,不仅使电路的调节功能灵敏快速,而且提高了调节精度。

## 4.2 本课题恒温控制器的硬件部分

本课题在恒温控制器的硬件部分主要工作包括芯片的选型和电路结构的设计,以及实际的电路制板和电路调试。恒温控制器被安置在紧挨滤光器的望远镜镜筒的后端,测温单元与模数转换芯片之间线上电阻的影响可以忽略;电源和串口的控制线通过航空插头与观测室的上位机和电源相连。本课题的恒温控制器按照功能可以分为六个部分:主控单片机,以及测温、加热、通信、存储和电源五个单元,如图 4-5:

1. 主控单片机采用的是美国 ADI 公司生产的 ADuC7026<sup>[34]</sup>。该芯片集成了多种接口,通过端口复用技术可以方便地完成温度数据采集,加热功率控制,环境参数的存储以及与上位机通信等多项任务
2. 测温单元分为两个部分:温度传感器和模数转换。滤光器的端面温度传感器采用的是铜线绕制的电桥,柱面的测温使用了热敏电阻 PT100;模数转换芯片是 24 位的 ADS1232。测温单元主要实现温度到电压值的转换,并将转换后的数据通过 SPI 接口传给主控单片机
3. 通信单元采用的是 MAX489 芯片,主要用于传输温度值和控制参数到上位机,该芯片基于 RS485 串行接口协议,具有传输距离远<sup>[35]</sup>,抗干扰能力强等优点,能够方便解决本课题中控制器与上位机的长线通信问题
4. 存储单元采用的是 AT24C64 芯片,主要用于控制器状态的定时存储。由于滤光器要全年工作,其环境温度四季变化显著,不同的环境温度需要的加热功率也不尽相同。所以,对控制器状态,特别是加热功率的值



进行定时存储可以有效减小系统断电后重新调试的麻烦。

5. 加热单元选择的是 75NF75 大功率管作为加热开关，由于 75NF75 的驱动电压较高，ADuC7026 输出的 3.3V 电压不能满足驱动要求，因此需要增加 TC4422 这样的驱动芯片。开关节奏的控制是通过 ADuC7026 输出的 PWM 来完成的。
6. 电源部分输出 5V 和 3.3V 直流电压，用来驱动控制电路板上的各个芯片。

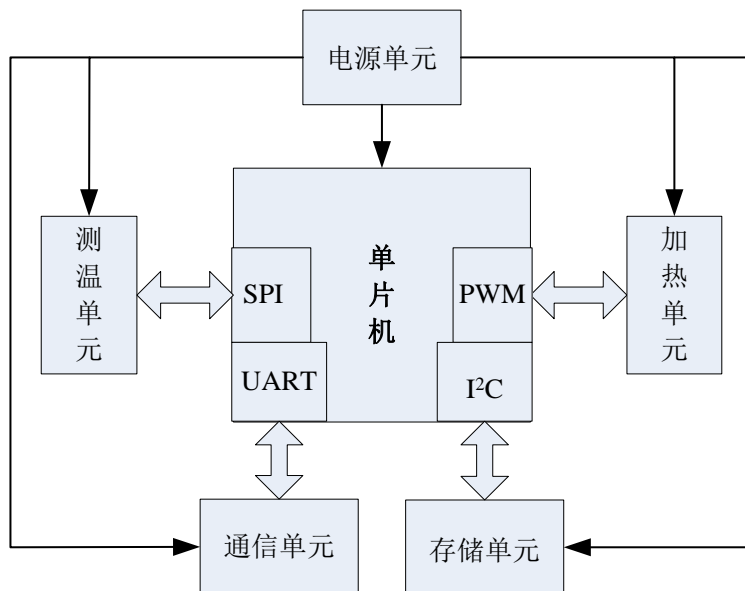


图 4-5 恒温控制器硬件架构图

图 4-6 是本设计最终完成的恒温控制器电路板。主控单片机 ADuC7026 处于电路板的中央部分，左上角的区域为电路板的电源单元，左下部分为测温单元，通信单元处于主控单片机的下方，加热单元位于单片机的右侧区域，而存储单元位于电路板的右下角。



图 4-6 恒温控制电路板实物图

## 4.2.1 温度测量

温度测量是温度控制中的重要环节，要达到高精度的温度控制，一般要求获得高于控制精度 10 倍以上测量精度<sup>[7]</sup>，并且滤光器的控温还需要很高的长期稳定度，在测温方案的选择上，要充分考虑测温方案的有效性和可行性。

### 4.2.1.1 测温方案

恒温控制器所采用的测温方案一般可分为接触式和非接触式，具体的划分如图 4-7 所示。本课题参考了以往的设计经验<sup>[7][23][24][25]</sup>，主要研究电气式的温度传感器。温度是非电量信号，电气式温度传感器的作用是将温度信号转化为电信号。常用的温度传感器大致分为热电偶、热电阻、热敏电阻和半导体温度传感器几种。它们的特点和性能对比<sup>[7]</sup>如表 4-1 所示。

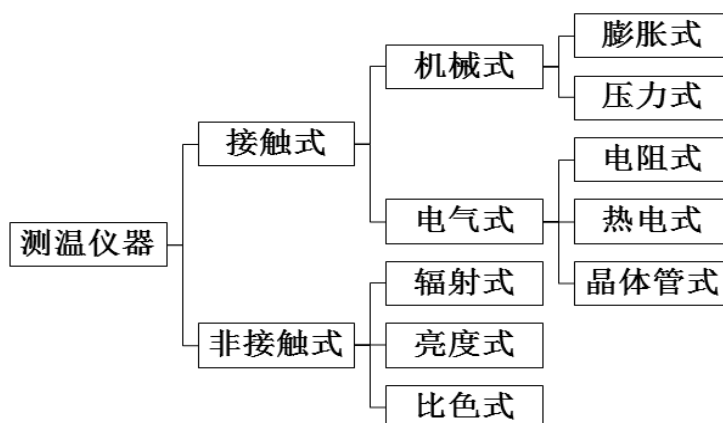


图 4-7 测温方案的分类

种类	测温范围	精度特点	电路特点
热电偶	-184℃~2300℃	精度高、可重复性好	需要冷端补偿
热电阻	-200℃~850℃	精度高、线性度好	需要精确的激励电流
热敏电阻	0℃~100℃	线性度差	需要激励电流
半导体	-55℃~150℃	线性度: 1℃, 精度: 1℃	需要激励电流

表 4-1 电气式测温方式对比

热电偶是温度测量仪表中常用的测温元件，其测温范围广，相对于其他方式，热电偶能够测试较高温度。其原理是两种不同金属一端相接，分处不同温度环境，由于材料的热电效应产生了热电动势。

热电阻温度传感器是基于金属导体的电阻值随温度的增加而增加这一特性来进行温度测量的。常用的热电阻材料有铂、铜、镍等。相对于热电偶，热电阻的线性度好、精度更高。

热敏电阻是电阻随温度变化的半导体元件，分为正温度系数热敏电阻(PTC)和负温度系数热敏电阻(NTC)。热敏电阻的优点是灵敏度高，但线性度差。

半导体温度传感器利用PN结电压的温度特性制成，优点是采用集成电路工艺，成本低、集成度高，但线性度差，易受生产工艺的影响。

根据上文四种温度传感器性能的对比和滤光器的高精度测温要求，热电阻和热敏电阻较符合要求。但是热敏电阻的非线性使温控部分更为复杂，通常需要对其进行补偿；而热电阻温度传感器的线性度好，可以方便的根据传感器反馈的温度偏差进行PID控制。

#### 4.2.1.2 测温电路分析

本课题采用的电桥测温和PT100测温都是热电阻式温度传感器，这两种测温方式都是基于金属电阻，因为金属的阻值相对于其他测温方式有更好的稳定度，且电阻率相对恒定，即有很好的线性度，所以被广泛应用到温度测量系统中。

##### 柱面测温

本文对柱面测温采用的是双变化桥臂的电桥电路，如图4-8，电桥的输出电压如式4-1所示。相对于单变化桥臂的电桥测温，双变换桥臂的电桥对温度的敏感度要大一倍。

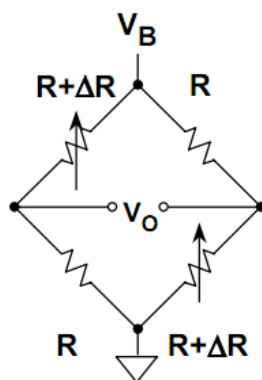


图 4-8 双变化桥臂的电桥

$$V_o = \frac{V_B}{2} \left[ \frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right] \quad (4-1)$$

桥臂的电阻值越大，线上电阻的电流越小，且电桥自身的发热量越小，对测温精度的影响就越小。但是由于滤光器柱面空间的限时，桥臂的阻值被最终选定在80Ω左右。电阻丝的绕制与文献[24]的方法相似，第一层绕制测温桥臂如图4-9，第二层绕制基准桥臂如图4-10，两层电阻丝之间用绝缘导热橡胶进行隔断，

防止可能出现的短路问题。

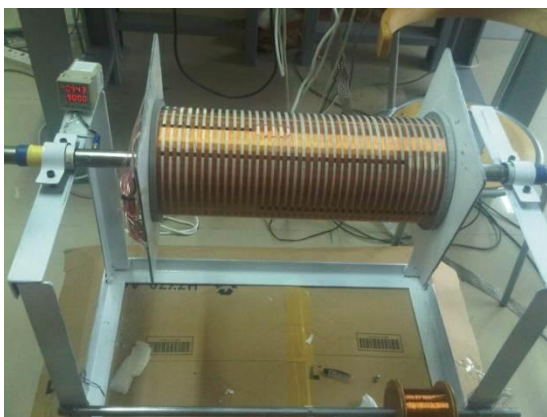


图 4-9 测温桥臂的绕制

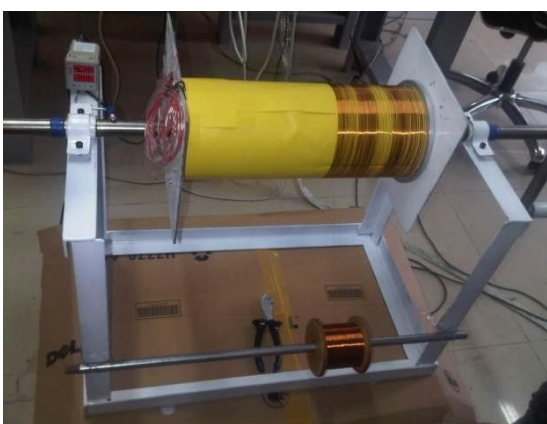


图 4-10 基准桥臂的绕制

### 端面测温

本课题对端面控温的精度要求不高，端面的测温方式相对简单，采用的是 PT100 测温电阻与基准电阻 PTF56 串联分压的方式，如图 4-11，温度变化时产生的测量电压如式 4-3。

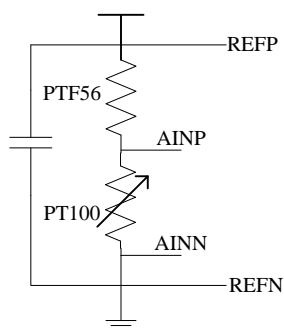


图 4-11 端面测温电路图

$$\begin{cases} U_{pt100} = \frac{R_{pt100}}{R_0 + R_{pt100}} \times U_{REF} \\ U_{pt100} = U_{REF} \times V_{data} \div 2^{24} \end{cases} \quad (4-2)$$

$$R_{pt100} = \frac{R_0 \times V_{data}}{2^{24} - V_{data}} = 100 + T \times \rho \quad (4-3)$$

### AD 位数的确定

把参数值代入式 4-1 中得到式 4-4, 如果要识别出  $0.001^\circ\text{C}$  的温度变化, 即  $\Delta T$  为  $0.001^\circ\text{C}$  时, 电桥的输出电压约为  $0.0000039\text{V}$ 。要分辨这样小的电压值, 要求 AD 有较高的分辨率, 如式 4-5, 解得 AD 的位数应不低于 19 位, 所以本设计选用了 24 位的 ADS1232 芯片。

$$V_o = \frac{V_B}{2} \left[ \frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right] = \frac{3.3}{2} \left[ \frac{80.12 \times 0.0039 \Delta T}{80.12 + \frac{80.12 \times 0.0039 \Delta T}{2}} \right] \quad (4-4)$$

$$2^N \geq \frac{3.3}{0.0000039} \quad (4-5)$$

图 4-12 是测温电路的模数转换部分, 由于 ADS1232 是 24 位 AD 芯片, 量化精度很高, 极易收到噪声的干扰, 所以在其模拟和数字的信号线上都加入用于滤波的电容。ADS1232 本身有两个通路的转换接口, 本设计只使用了第二通道 AINP2 和 AINN2, 第一通道作为扩展通路。为了测量柱面和端面三个测温点, 本设计使用了模拟开关 TS5A3166 实现端口复用, 但是在切换通道的时候, 必须先对 ADS1232 进行复位才能够正确输出。

由如下电桥输出的电压值可以看出, 本设计的电压分辨率优于  $0.000001\text{V}$ , 能够分辨到  $0.001^\circ\text{C}$ , 满足设计要求。

Bridge: 0.0306213  
 Bridge: 0.0306213  
 Bridge: 0.0306212  
 Bridge: 0.0306212  
 Bridge: 0.0306212  
 Bridge: 0.0306212  
 Bridge: 0.0306212  
 Bridge: 0.0306213  
 Bridge: 0.0306213  
 Bridge: 0.0306213  
 Bridge: 0.0306213  
 Bridge: 0.0306213

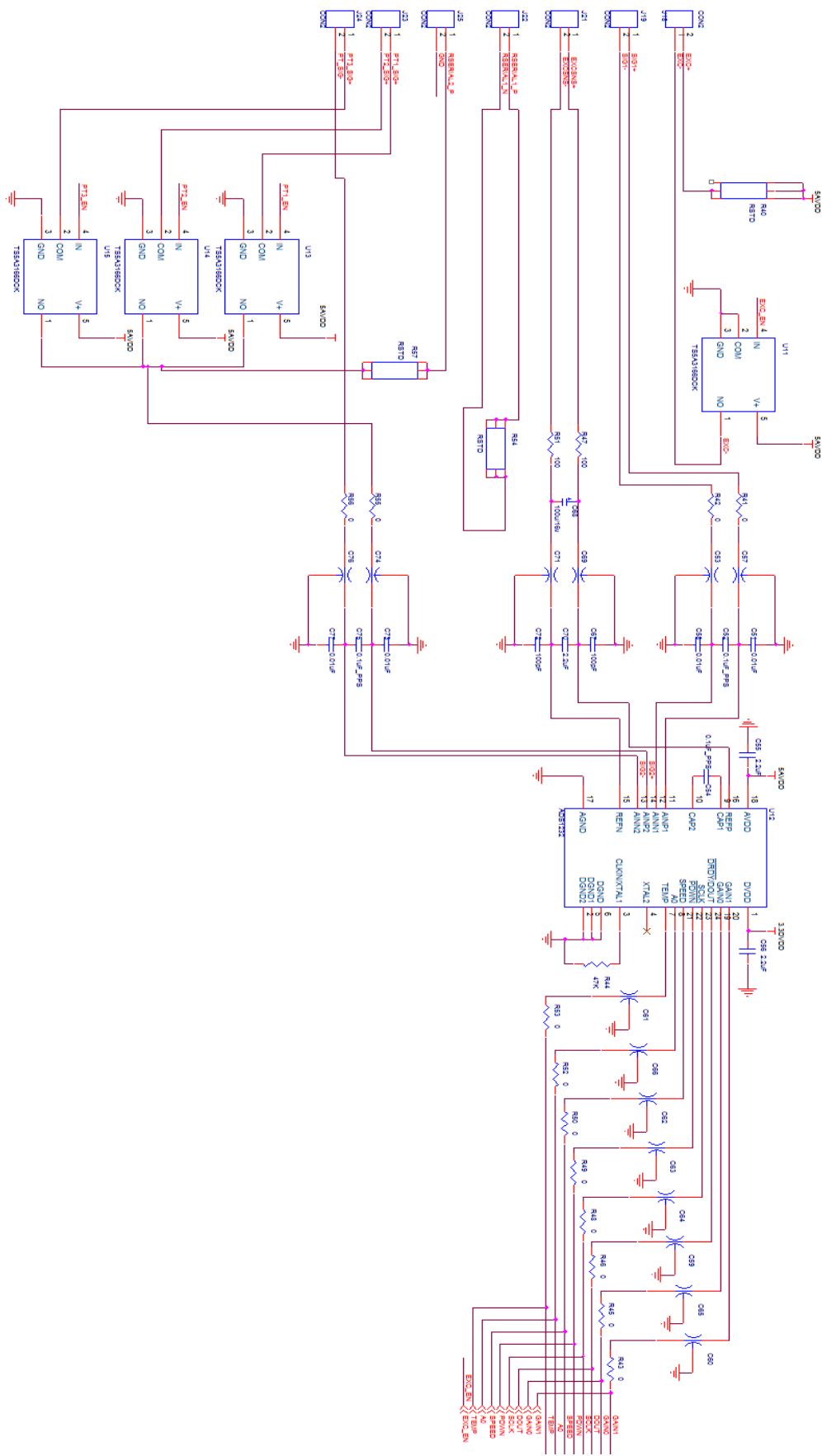


图 4-12 模数转换电路

## 4.2.2 主控单片机

ADuC7026 如图 4-13 是一款基于 32 位 ARM7TDMI 内核的微控制器。片内集成了 64KB 的高速 FLASH 存储器和 8KB 的 SRAM，其中 FLASH 中有 62KB 的用户空间，其余 2KB 用于出厂时的引导和配置程序。指令代码能够在 ARM 或 Thumb 两种模式下运行，代码的执行效率高，且功耗极低。另外，ADuC7026 具有多达 40 个通用输入输出端口（GPIO），并且大部分端口都可以被复用为其他接口功能，如 SPI、I<sup>2</sup>C、PWM、AD 等。该芯片最为突出的功能是片内集成了多达 16 路的 12 位模数转换器，最高采样速率可达 1MSPS，再加上 4 个外部的中断源，使其十分适用于工业控制、医疗诊断、数据采集、ATM 机等。

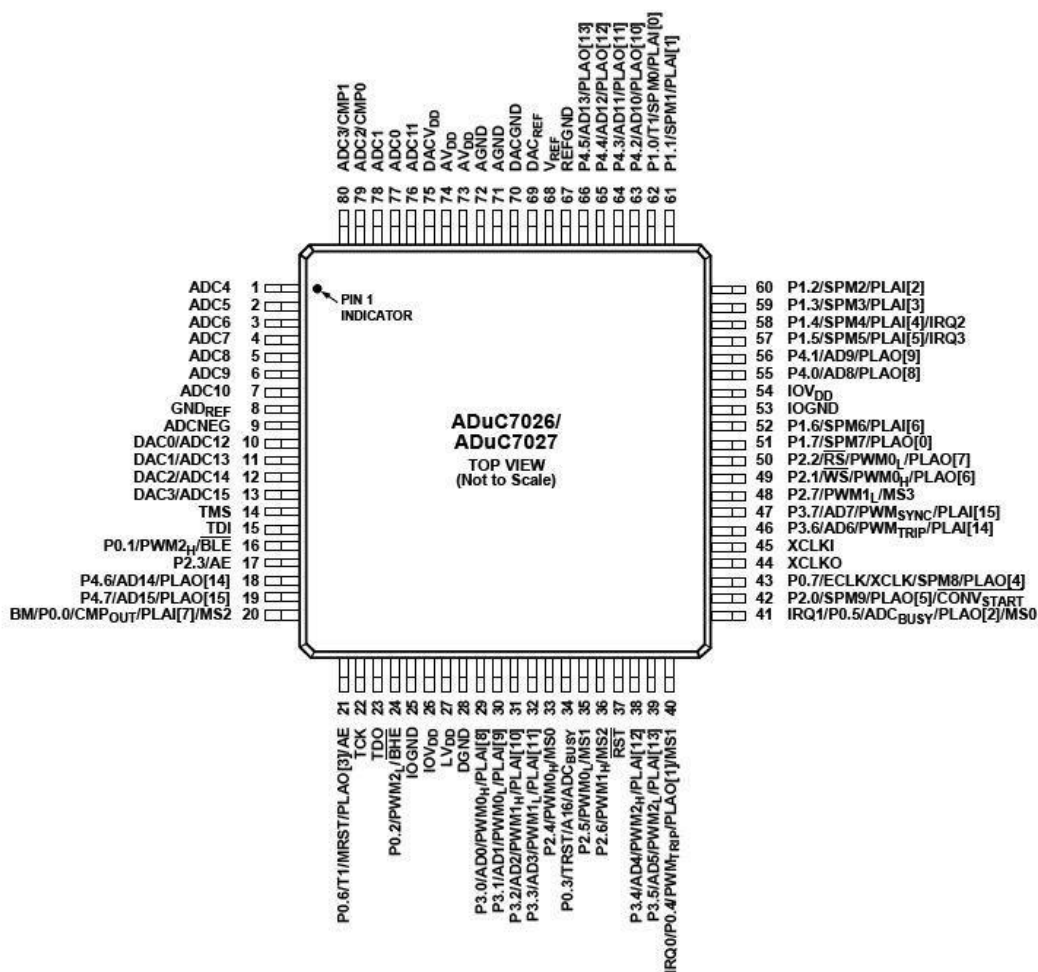


图 4-13 ADuC7026 芯片引脚图

### 4.2.2.1 参数指标

- 16 通道 12 位 ADC，最高采样速率为 1MSPS，可以工作在全差分、伪差分、及单端三种模式，4 通道 12 位 DAC；

- 片内电源参考、温度传感器以及电压比较器；
- 带有自平衡片内振荡器，同时支持外部晶振；
- 外部时钟源最高可达 44MHz；支持可编程分频；
- 64KB 片内 Flash/EE 存储器，8KB 片内 SRAM 存储器；
- 支持串行下载以及 JTAG 调试；
- 支持软件触发重编程；
- 2 个 UART 接口；2 个 I<sup>2</sup>C 接口；1 个 SPI 接口；
- 40 个 GPIO；
- 4 个定时器，其中包括一个唤醒定时器和一个看门狗定时器；
- 三相 16 位 PWM 发生器；
- 片内可编程逻辑阵列 PLA；
- 外部存储器接口，高达 512KB；
- 支持 32 位 RISC；
- JTAG 接口支持程序下载和调试。

#### 4.2.2.2 器件选择的原因

对于 ADuC7026 的选型除了上文所述的其支持多种接口，便于灵活搭建小型系统之外，更多地看重 ADI 公司在模拟器件上的优良性能。该公司的主要芯片产品，特别是模拟器件已经在业内赢得了很高的知名度。结合本课题的研究特点，该器件的优势为：

- 有多达 16 通道的模数转换，对以后的多点控温研究有着重要意义。本课题所研究的控温对象可以近似对称结构，测温点并不需要很多，但如果遇到非对称结构时，就必须采用多点测温。所以，选择 ADuC7026 可以为后续研究打下基础。
- 本课题的温控器计划布置三个测温点，一个在柱面上，另外两个各自在端面上。柱面上的测温精度要求更高，可以使用 SPI 接口与专用 AD 芯片（ADS1232）来完成高精度温度测量；端面由于距离核心光学元件较远，其控温精度也较低，可以使用 ADuC7026 自带的 AD 转换。
- ADuC7026 自带的三对 PWM 接口可以输出占空比可调的方波，以此来控制加热开关。加热与测温一样，也分为三部分，分别在柱面和两个端面。这样正好能够利用三对 PWM 端口来完成精度很高的加热功率控制。
- ADuC7026 集成了两个 I<sup>2</sup>C 接口。由于 I<sup>2</sup>C 接口是线与型的接口形式，通信线只有两条，便于节省端口。除了利用 I<sup>2</sup>C 接口来访问支持该接口的存储器，还可以在将来的系统扩展中得到应用。例如，可以采用数字



集成的温度传感芯片作为测温单元，如 DS1624，利用 I<sup>2</sup>C 接口同时挂接多个测温芯片来实现多点测温<sup>[32][33]</sup>。

### 4.2.3 加热部分

功率控制方法的分类：电压调节式和占空比调节式。电压调节式是根据公式  $P=U^2/R$ ，热负载的两端所加电压越高，功率就越大；占空比调节式采用的加热电压一般为恒定的，通过调节加热电压的作用时间来改变加热功率，在某一加热周期内，占空比越大，该周期的平均加热功率就越大。

早期基于模拟技术的加热功率控制<sup>[24]</sup>多采用控制可控硅的导通角来调节加热的长短，是一种占空比调节式的功率控制，控制的精度上主要取决于可控硅器件。目前的数字式温度控制器如上文提到的 LDT-5900 采用了脉宽调制技术（PWM）控制加热电流源的电流输出，进而控制加热的功率，是一种典型的电压调试式的功率控制。由于加热功率完全来自电流源，功率越高对电流源的要求也越高，成本也越高，所以脉宽调制的电流源主要应用在功率较小的场合，如半导体激光器的恒温控制。

本设计采用的是 PWM 控制加热开关闭合时间的方法来控制加热功率，是典型的占空比调节式的功率控制。利用 PWM 端口输出的占空比可调的脉冲作为加热开关的使能端；占空比越大，开关导通的时间就越长，反之则越短。

加热单元的电路图如图 4-14，ADuC7026 输出的 PWM 输出电压仅为 3.3V，不能直接驱动 75NF75 大功率管。因为 75NF75 作为加热的开关，工作在线性区和截止区，如果栅极电压较低，75NF75 很容易进入饱和区，芯片的发热量会急剧增大，甚至可能烧毁芯片。所以需要 TC4422 来完成驱动电压的转换。二极管 D3 的作用是消除开关关断后加热膜的电感效应可能带来的不良影响。

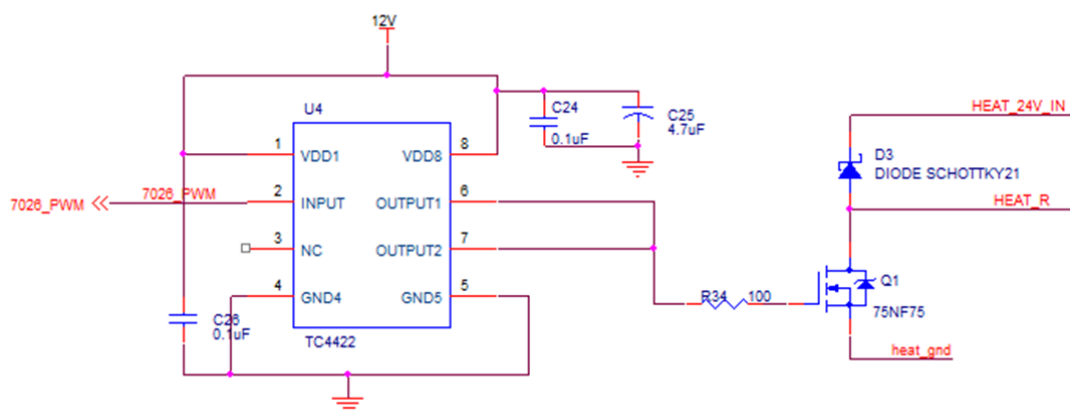


图 4-14 加热单元电路图

此外，由加热电路图可以看出如果加热单元的器件出现故障，如果不采取

有效措施，可能加热开关不会正常关断，所以，为了保护加热线路，防止控制器件失灵引起的持续加热，甚至火灾，在加热膜上串联一个温度开关。在高于 55℃ 的情况下，温度开关自动关断加热回路，直到温度降至 55℃ 以下，该开关再自动闭合。

### 4.2.4 通信部分

通信部分主要采用的是 ADuC7026 的通用异步串口 UART。UART 是一个全双工的、通用的、异步接收/发送器，遵循一个非同步的协议，支持不同的字节长度、停止位和奇偶校验位。由于其传输协议简单有效，通常被广泛应用于单片机与上位机的通信。本设计考虑到望远镜与观测室有几十米的距离，若采用 PC 机上自带的 RS232 接口，信号传输距离小，且易受噪声干扰，因此选用的是 RS485 的串行传输协议，中间进行两次转换：上位机的 RS232 转成 RS485 如图 4-15 的转换器和单片机的 UART 串行数据传输转成 RS485 的差模传输方式如图 4-16。



图 4-15 串口转换器

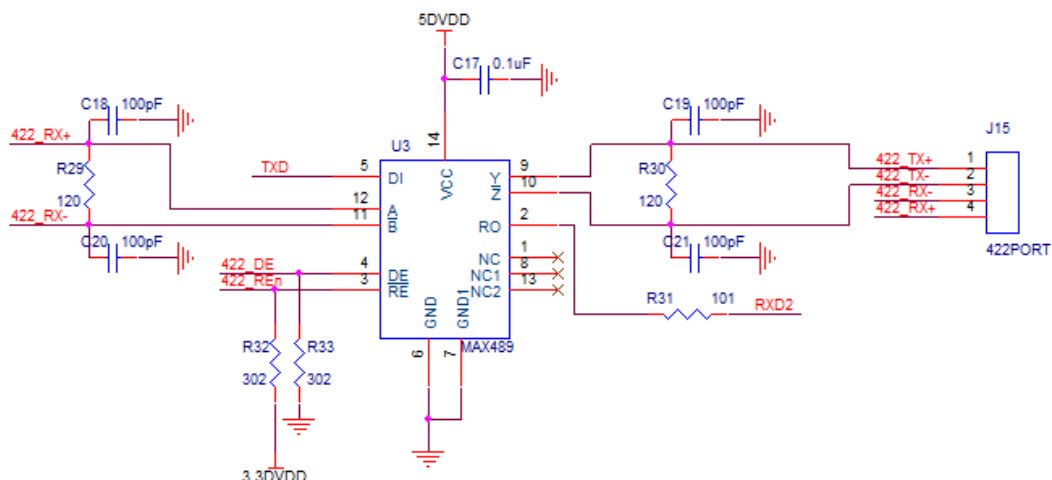


图 4-16 通信部分的电路图

## 4.2.5 存储部分

由于滤光器总体的热容较大，调试的过程中可能出现程序重新加载或者断电的情况，如果控制参数相对固定，那么每次调试会有大量时间用于等待滤光器温度进入稳态。所以在软件设计上，加入了可以实时调节控制器参数的接口，在硬件上加入了 EEPROM 来定时存储控制器参数和加热功率。这样，一旦控制器断电重启，断电前的状态可以重新加载，就可以大大缩短滤光器温度重新稳定的时间。

本设计采用的是 AT24C64，该芯片是一个 64KB、串行、低功耗 CMOS EEPROM 芯片，能够提供稳定的数据存取。由于 AT24C64 支持标准的 I<sup>2</sup>C 接口，能够很方便地集成到 ADuC7026 的控制系统中，其两根通信线能够很大限度地减小 I/O 端口的使用数量，具体电路如图 4-17，AT24C64 作为从机，其 A0、A1、A2 引脚接地，从而从机的读地址为 0xA1，写地址为 0xA0。

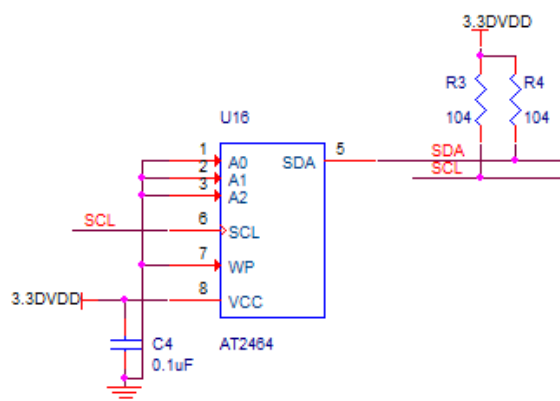


图 4-17 存储器电路图

## 4.3 恒温控制器的软件部分

恒温控制器的主要完成两方面工作：控制算法的实现和各个外设的调度。控制算法部分主要处理温度数据，利用 PID 控制策略推断出所需的加热功率。外部设备的调度首先需要编写主控单片机对外部设备的初始化函数，初始化函数只在单片机上电之后执行一次；然后要编写单片机对外部设备的读写函数，来方便控制时的调度。

### 4.3.1 软件架构

本设计主控单片机控制程序的架构如图 4-18，分为两个部分：主函数和中断处理。主函数实现的操作较多，首先在系统启动之后，要先对端口进行配置，使

之具有特定功能，对本设计使用到的相关寄存器进行初始化，如与 UART、SPI、PWM、I<sup>2</sup>C 接口相关的寄存器，与中断相关的寄存器，PLL 时钟设置等；在读入存储器 AT24C64 的控制参数后，函数进入 while 循环中，该循环中主要执行 AD 数据的读取和处理，PI 控制算法，状态输出和状态存储。在主函数执行过程中，如果有中断被触发，则处理器转向中断处理程序。本设计主要用到的中断源是串口中断和定时器中断，分别执行串口数据读取和 PWM 加热控制的操作。

主函数中 AD 数据的处理和 PI 控制算法是本课题的主要研究内容：

- ADS1232 数据输出的频率为 80Hz，即每秒钟会产生 80 个温度数据，然而本课题的控制对象由于热惯性较大，并不需要很快的控制节奏，同时按照 80Hz 读取的数据噪声较大，对于控制器的稳定性有不利影响，所以经过实验发现 50 点的平滑滤波无论是对于减小噪声和减缓控制节奏（约 1.6Hz）上都有很好的效果；
- PI 控制算法主要是根据第三章对于 PI 控制方法的三个改进来实现的，主要实现的目标有二：系统能在各种可能的非稳定状态自动进入稳态和系统处于稳态时达到<0.01℃温度波动。

中断处理函数中通信协议的定义和定时器中断的周期是主要研究内容：

- 通信协议要力求简洁易懂，便于解析，且参数的调节范围要广，分辨率要高；
- 定时器中断的周期决定了 PWM 加热控制的节奏，考虑到系统的热惯性较大，加热和测温的节奏在 1Hz~2Hz 的速率下有较好的实验效果。

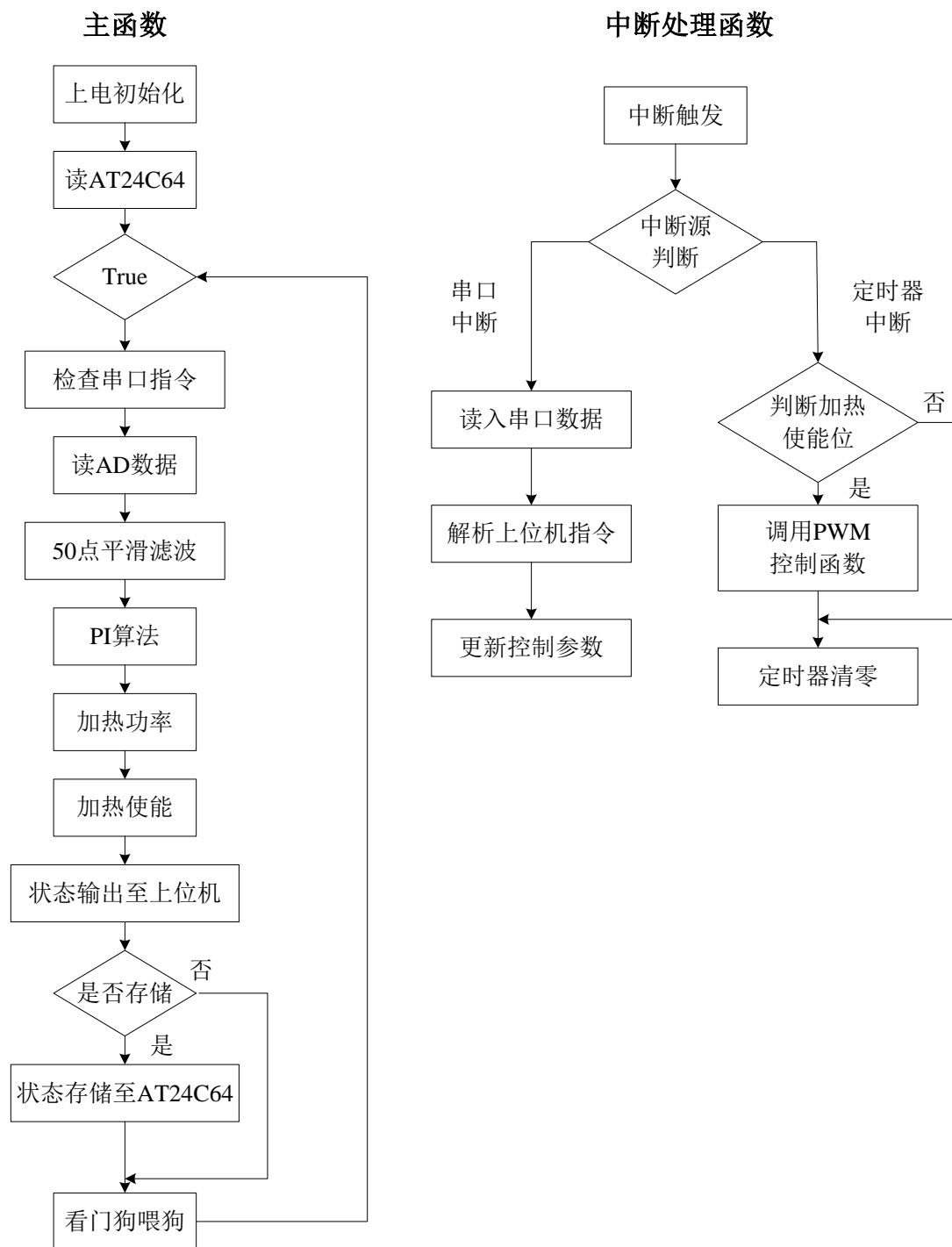


图 4-18 单片机程序流程图

### 4.3.2 接口实现

本设计用到的接口有四种：串行外设接口（SPI）、脉冲宽度调制（PWM）、内部集成电路总线接口（I<sup>2</sup>C）和通用异步收发器（UART）。编写响应的接口函数需要对每种接口有较为深刻的了解，此外还需要参考 ADuC7026 的用户手册

中对各个接口的寄存器描述。编写接口函数时要充分考虑代码的可移植性，方便后续相关科研工作的灵活应用，例如 I<sup>2</sup>C 接口函数不仅可以用于本设计中对存储器的访问，也可以用于对支持该接口的其他设备如集成温度传感器 DS1624 的访问。

### 4.3.2.1 SPI 接口

ADuC7026 的 SPI 接口用于主从机通信，在芯片上有四个引脚 MISO、MOSI、SCL、CS 与 SPI 有关：

- MISO 的功能是将以字节为单位的串行数据由主机传到从机。它是一个单向信号。器件作主机时，其作为数据输入端；器件作从机时，作为数据的输出端。
- MOSI 与 MISO 一样亦是单向信号，将数据从主机传输到从机，所不同的是器件为主机时，其为输出端；器件作从机时，为输入端。
- SCL 即串行时钟输入、输出，引脚信号为数据的时钟信号，由主设备产生，且只在有数据传输时被激活。ADuC7026 通过 SCL 同步发送及接收数据，8 个 SCL 周期传输一个字节数据，SCL 时钟周期决定了发送数据的速率。
- CS 片选输入用于控制芯片是否被选中，当 CS 引脚输入一个低电平信号时，SPI 端口开始发送和接收 8 位的数据知道结束为止。CS 使得我们能够将多个 SPI 设备连接在一条总线上。

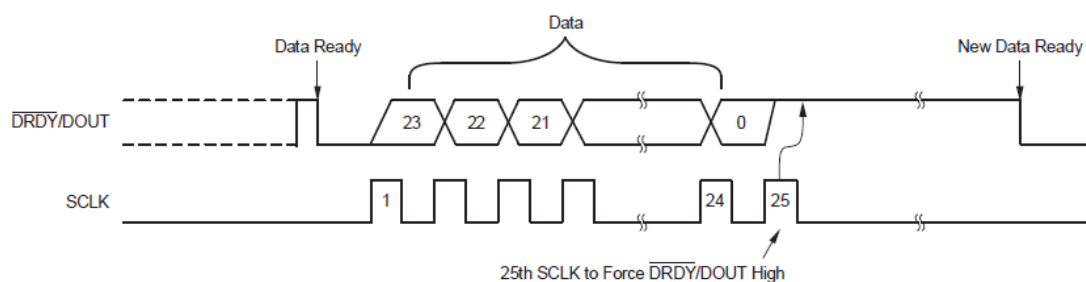


图4-19 ADS1232 数据读取时序

由ADS1232的用户手册可知，芯片的DOUT用于输出转换后的电压值，其数据准备好的标志是DOUT出现低电平，详见图4-19。在DOUT数据准备好之后，在SCLK端向ADS1232输入采样时钟，则DOUT端会相应地在时钟的上升沿输出数据，在24位的数据输出完之后，SCLK端应再输入第25个时钟，能够将DOUT端的输出强制拉高，然后等待下一次数据的到来。

如下是ADS1232的数据读取函数，本文采用的是查询式的数据读取，即使用while循环不断查询DOUT端的状态知道出现低电平再开始采样。其中，程序中出

现的ADuC7026InputBit和ADuC7026OutputBit函数实现的功能是在ADuC7026的任意端口进行读写操作，代码如下：

```
unsigned long int ReadADS1232(void)
{
    char i;
    unsigned long int Data=0;
    while(ADuC7026InputBit(ADS1232_DOUT)==1){} //数据准备好
    for(i=0;i<24;i++) //读取转换的24位数据
    {
        ADuC7026OutputBit(ADS1232_SCLK,1)
        Data=Data<<1;
        Data|=ADuC7026InputBit(ADS1232_DOUT);
        ADuC7026OutputBit(ADS1232_SCLK,0);
    }
    ADuC7026OutputBit(ADS1232_SCLK,1); //第25个SCLK时钟，强制DOUT
    ADuC7026OutputBit(ADS1232_SCLK,0); //为高电平，等待下一次数据。

    return Data;
}
```

#### 4.3.2.2 PWM 接口

ADuC7026 内置有一个灵活的、可编程的三相脉宽调制（PWM）波形发生器。PWM 发生器可以在 6 个 PWM 输出引脚（PWM0H、PWM0L、PWM1H、PWM1L、PWM2H 和 PWM2L）上产生三对 PWM 信号，即三个高端驱动信号和三个低端驱动信号。

PWM 转换频率由 PWM 周期寄存器 PWMDAT0 控制；PWM 开关的死区时间由一个 10 位读/写寄存器 PWMDAT1 控制；PWM 输出信号的占空比由三个 16 位的读/写占空比寄存器控制：PWMCH0、PWMCH1 和 PWMCH2，这些寄存器中的值共同决定了 PWM 端口产生的脉冲的周期和占空比。文献[34]中列出了 PWM 的高低端输出占空比的公式：

$$d_{0H} = t_{0HH} / t_s = \frac{1}{2} + \frac{PWMCH0 - PWMDAT1}{PWMDAT0} \quad (4-6)$$

$$d_{0L} = t_{0LH} / t_s = \frac{1}{2} - \frac{PWMCH0 + PWMDAT1}{PWMDAT0} \quad (4-7)$$

由图4-20可以看出，在单更新模式下，PWM高端输出的占空比范围是50%～

100%，PWM低端输出的占空比范围是0%~50%，为了能够让一端输出达到0%~100%的范围需要使用交越功能。

输出控制单元由一个9位的寄存器PWMMEN控制，该寄存器的第8、7、6位为交越功能控制位，分别使能0H/0L、1H/1L、2H/2L。对于任何一对PWM信号一旦使能交越模式，定时单元的PWM高端和低端信号就会相互转换。这样PWM的高端和低端都能够输出占空比范围为0%~100%的脉冲信号。

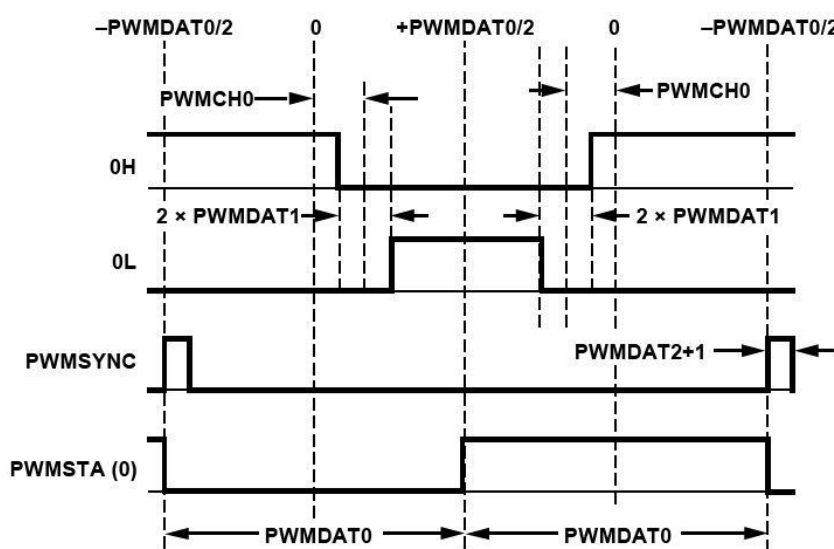


图4-20 单更新模式下的PWM时序图

```
//PWM初始化
void PWMInit()
{
    GP3CON = 0x11111111;    // 配置PWM为输出
    PWMCON = 0x0001;

    PWMDAT0 = PWM_PERIOD;  // PWM_PERIOD=0x1000;
    PWMDAT1 = 0x00;        // 死区时间

    PWMCFG = 0x00;
    PWMCH0 = 0xFFFF - PWM_PERIOD/2; // 设置占空比寄存器的值
    PWMMEN = 0x00;         // 使能PWM
}

//PWM占空比设置
void PWMSet(unsigned int pluse)
{
    if (pluse<32768) {      //高端输出占空比小于50%
        PWMMEN|=0x100;    //使能交越功能
        PWMCH0 = PWM_PERIOD/2-(pluse*PWM_PERIOD)/65536; //配置占空比寄存器
    }
    else {                  //高端输出占空比大于50%

```



```

PWMEN&=0x0ff;           //禁用交越功能
PWMCH0 = (pluse*PWM_PERIOD)/65536-PWM_PERIOD/2;
}
}

```

### 4.3.2.3 I<sup>2</sup>C 接口

I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit) 即内部整合电路, 是飞利浦公司提出并开发的一种新型两线制串行通信系统, 通过 I<sup>2</sup>C 接口控制器不仅可以与另一个主控制器进行通信, 而且可与其它具有标准 I<sup>2</sup>C 接口的元件进行通信, 如 EEPROM、RAM、LCD 等。一个标准的 I<sup>2</sup>C 接口有两条线, 串行数据线 SDA 和串行时钟线 SCL, 它们按照“线与”方式进行配置。

- **有效 (ACK) /无效 (NACK) 应答** ACK 信号与 NACK 信号同在第 9 个时钟脉冲时产生, 当 SDA 线为低时认为是一个 ACK 信号; 当 SDA 线为高电平时认为是一个 NACK 信号。在数据传输时, ACK 或 NACK 信号始终由接收方产生, 但 ACK 所需的时钟脉冲却由主机产生。
- **从机地址** 在 I<sup>2</sup>C 总线通信过程中, 应用系统中往往会有多个从机, 但总线在同一时刻只能被一个主机和从机占用, 因此在通信过程中需要设定主机与从机的通信地址。每一个 I<sup>2</sup>C 都有一个唯一的 7 位标识符, 即从机地址。在通讯时, 主机会发送的一字节的数据中前七位为地址数据, 如果该地址数据与从机地址匹配, 从机就会产生一个 ACK 信号。
- **起始/停止条件** 如图 4-21, 每一个数据传输时都会产生一个起始条件, 起始条件产生时, SCL 线处于高电平状态, 同时 SDA 线上高电平转向低电平。当接收到的信号为 NACK 时会产生一个停止条件, 此时 SCL 线处于高电平, 而 SDA 线上的低电平转换为高电平。

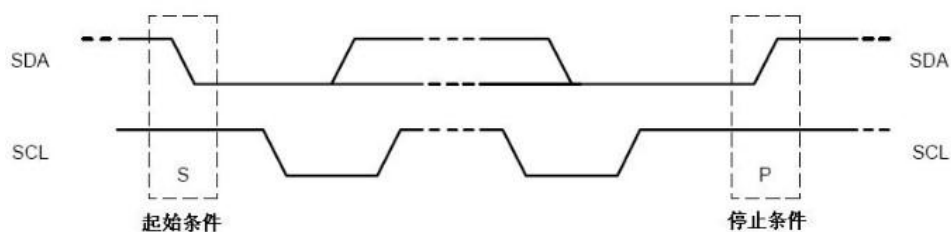


图 4-21 I<sup>2</sup>C 时序图

接口程序的编写, 需要参考 ADuC7026 的用户手册。主要用到的寄存器有 I2CxADR、I2CxMTX、I2CxCNT、I2CxMSTA, 其中 x 可以取 0 或 1。下文的程

序实现的功能就是发送指定地址和等待接受。具体发送的地址值是多少以及接受数据的长度需要参照 AT24C64 的用户手册。

//发送子程序定义

```
void I2C_write(unsigned char Sads,unsigned char Dads)
{
    I2C1ADR = Sads;
    I2C1MTX =0x00;
    I2C1MTX = Dads;
    while ((I2C1MSTA & 0x40 ) == 0x00){ }
}
```

//接收子程序定义

```
void I2C_read(unsigned char Sads,unsigned char Dads)
{
    Delay_ms(100);
    I2C1CNT = count;
    I2C1ADR = Sads + 1;
    while ((I2C1MSTA & 0x40 ) == 0x00){ }
}
```

#### 4.3.2.4 UART 接口

该部分主要完成对串口发送和接受程序的编写，涉及端口的初始化设置、串口数据的读操作和写操作。ADuC7026中与UART接口相关的寄存器共有12个，在编写相应函数的时候，需要仔细研究手册中对于每个寄存器的说明。串口的初始化设置主要是完成波特率的设置，文献[34]对此有详细的介绍；对于串口的发送使用库函数printf就可以十分方便地实现数据输出到上位机；至于串口的接收函数需要根据预先定义的协议规则来编写。

每一次串口数据的传入必然引起一次串口中断，上位机传入主控单片机中的数据就是相关的操作指令。在本设计中，该操作指令相对简单，即为PID控制器的比例常数、积分系数、积分步长、加热功率等，为了今后相关工作的扩展，本设计定义了20个字节长度的指令数组，即程序中的CmdBuf矩阵，具体的串口接收函数如下：

```
__irq void IRQ_Handler(void)
{
    if (IRQSIG & UART_BIT)           //判断是否中断为串口中断
    {
        if(0x01==(COMSTA0 & 0x01))
        {
            tempchar = COMRX;//读取串口接收寄存器COMRX的数据
        }
    }
}
```

```

    if(pReceiveBuf >= ReceiveBuf + 20)
    {
        pReceiveBuf = ReceiveBuf + 19;
    }
    *pReceiveBuf = tempchar;
    if(tempchar=='\n') //收到回车表示接收完一条命令，置新命令标志位
    {
        pReceiveBuf = ReceiveBuf; //将缓冲区数据复制到命令数组
        CmdBuf[0] = ReceiveBuf[0];
        CmdBuf[1] = ReceiveBuf[1];
        CmdBuf[2] = ReceiveBuf[2];
        CmdBuf[3] = ReceiveBuf[3];
        NewCmdFlag = 1; //置位串口命令标志NewCmdFlag
    }
    else
        pReceiveBuf++;
}
return ;
}

```

### 4.3.3 控制算法

为了实现 3.2.3 中提出的改进型的 PI 控制器，控制软件在设计上需要考虑的参数有比例系数、积分系数、启动积分环节需要的误差值、抗积分饱和上下限和本文引入的积分步长，这些系数都被定义为全局变量，以便于串口中断程序的对于调节参数的修改。改进型 PI 控制算法的部分代码的详细解释如下：

/\*代码中的相关变量的含义为：temp 为当前温度值，tempGoal 为目标温度值，maxError 为积分上限，Integral 为当前积分值，PIDCalc 函数用于计算积分饱和时的控制器输出，Integral\_step 为积分步长，sum\_tmpError 为在积分间隔内积累的误差总量，PIDtune 函数用于计算积分不饱和时的功率输出。

```

*/
tmpError=tempGoal-temp; //计算当前测定值与目标值的误差量
if(tmpError>maxError) //温差大于积分上限时，停止积分
{
    Integral_power= maxError;
    PIDCalc(&tmpPID,temp); //积分停止后的比例调节
}

```

```
if(tmpError<minError) //温差小于积分下限时，停止积分
{
    Integral_power = minError;
    PIDCalc(&tmpPID,temp);
}
if(minError <tmpError && tmpError< maxError)
{
    Integral_power=PIDCalc(&tmpPID,temp);
    Integral_step++; //积分步长加 1
    if(Integral_step <stepGoal) //积分步长未达到设定值
    {
        sum_tmpError+=tmpError; //积分间隔内的误差积累
    }
    if(Integral_step == stepGoal) //当积分达到设定步长时，积分有效
    {
        PIDtune(&tmpPID,tempGoal,Heat_start+sum_tmpError*Ki,Kp,Kd);
        //计算出 PI 调节下的控制器输出
        Integral_step =0;
    }
}
```

## 第五章 系统调试

在恒温控制器完成之后，需要对其实际控制效果进行全面的调试，以便于验证设计的有效性。主要的工作有测试平台的搭建和 PID 控制参数的整定，最终实现的目标是一个恒温稳定度优于  $0.01^{\circ}\text{C}$  的自动调控的便于扩展的恒温控制系统。

### 5.1 测试平台的搭建

测试平台是用于测试和验证恒温控制器对于滤光器实际控制效果的实验环境，包括测试软件和温度可调的实验箱。测试软件主要完成对串口数据的接收和发送，实际运行时，数据接收占据了主要时间，要求测试软件能够实时直观地显示温度的变化情况；同时，利用第四章定义的接口规范，可以灵活地调节控制器的参数。

#### 5.1.1 系统组装

在测试实验之前，首先要完成对滤光器恒温测温、保温和加热等部件的组装。在图 4-10 的测温电桥外侧包裹一层加热膜，加热膜分为三段，紧贴铝制均温层的柱面，保证热量的快速传递；加热膜要完全覆盖整个柱面，以保证传热的均匀，减小轴向的温度梯度，如图 5-1 所示：

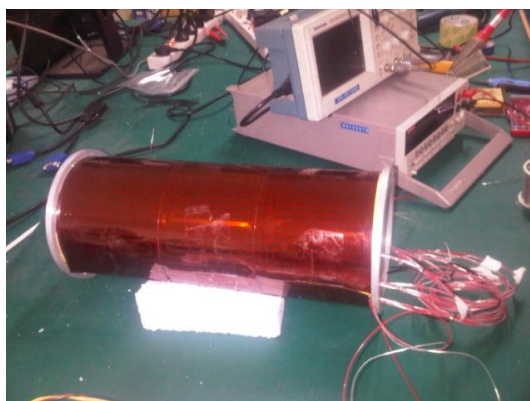


图 5-1 柱面加热膜

在加热膜的外侧绕制两周陶瓷纤维纸，如图 5-2 所示，由于该材料质地相对松散，容易撕裂，绕制过程既要保证紧贴加热膜，以便减小接触面的温度梯度，又不能用力过猛，损坏纤维纸。

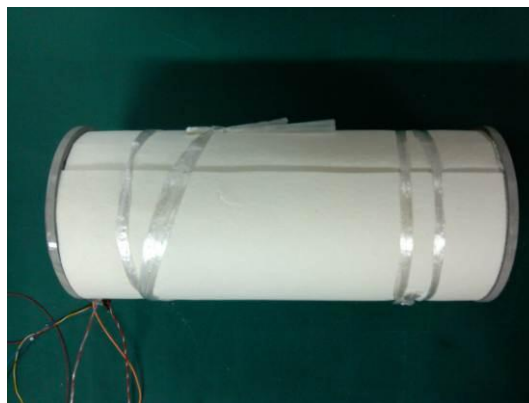


图 5-2 柱面陶瓷纤维纸保温层

在陶瓷纤维纸的外侧拼接两段聚氨酯泡沫材料，如图 5-3。该部分由锉刀细致打磨，保证其能够刚好嵌入到放置的铁质外壳内。聚氨酯泡沫保温层除了有很好的保温效果之外，由于其质地较硬，在装配过程中不易损坏，从而保护内部的陶瓷纤维纸。



图 5-3 柱面聚氨酯泡沫保温层

端面的加热材料也是选用的加热膜。为了保证热量均匀传递，加热膜被安置在铜板，如图 5-4。其中温度开关串联在每一条加热回路中，在加热膜温度过高时能够自动切断电源，防止引发事故。



图 5-4 两个端面的加热膜

在端面加热铜板的外侧塞入泡沫玻璃保温层如图 5-5，泡沫玻璃除了保温效果好，还由于其良好的弹性，能够将加热的铜板牢牢固定在滤光器的两个端面上。

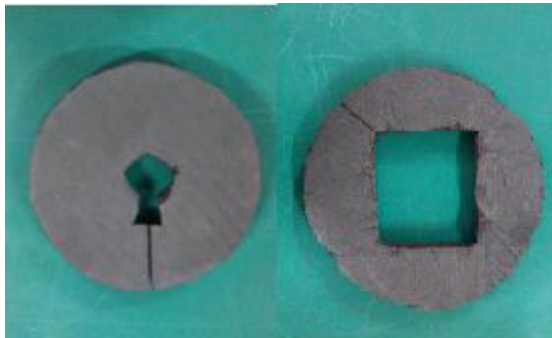


图 5-5 端面泡沫玻璃保温层

将滤光器加热、保温器件组装到铁质外壳内，如图 5-6。在铁壳的柱面部分再加装三片加热膜和两层陶瓷纤维纸作为二级恒温。由于铁壳的良好均温性能和保温层的良好保温效果，二级恒温的控制精度不需很高，经过实验测定， $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  温度变化速度对于本设计的恒温控制器不构成不良影响。

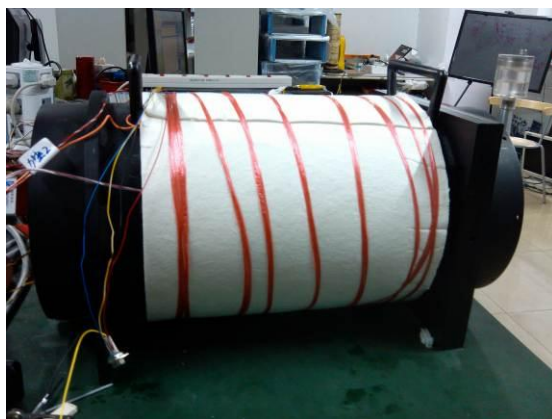


图 5-6 滤光器组装完成

### 5.1.2 恒温箱

由于滤光器的环境温度变化较大，冬季最低气温能达到 $-10^{\circ}\text{C}$ ，夏季最高气温能达到 $40^{\circ}\text{C}$ 。为了保证滤光器在全年都能够正常用于观测，必须在实际运行前进行多次实验，不断优化设计参数，所以，需要恒温箱来提供适当的温度环境。本设计选取了北京中科富祺科技公司的 FSH250 生化培养箱用于测试滤光器恒温控制系统，如图 5-7。该设备在本设计中有多项用途：首先通过测量滤光器在不同温度下的平衡功率，检验理论热阻推导的合理性；其次可以测量滤光器在温度阶跃变化时的响应时间，以便于 PID 控制器积分步长的确立；最后，利用该仪器可以测试恒温控制系统的跟踪能力，即滤光器在变温环境下的控温效果。



图 5-7 生化培养箱

FSH250 生化培养箱采用了空气强制循环 (BTC) 平衡来调节温度, 可以快速地进行降温升温操作, 且均匀度较好。其空气循环装置使用了离心式风机; 测温元件采用了铂电阻 PT100; 加热部分采用了镍铬合金电热丝作为加热器; 散热部分采用了全封闭压缩机所组成的单级式制冷系统。主要的技术指标如下:

- 温度范围:  $4\sim 50^{\circ}\text{C}$ ;
- 温度波动度:  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ;
- 温度均匀度:  $< 2^{\circ}\text{C}$ ;
- 温度偏差:  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

### 5.1.3 测试软件的编写

上位机测试软件的编写使用的是美国国家仪器公司研制开发的 LabVIEW 语言, 不同于其他计算机编程语言常采用的文本编写代码的方式, LabVIEW 使用的是图形化编辑语言 G 语言编写程序, 产生的程序是框图的形式。

本设计使用的是 LabVIEW 8.6 软件进行测试软件的开发, LabVIEW 8.6 帮助中提供了很多的开发范例, 如串口、声音和网络等。本文在串口范例 Advanced Serial Write and Read.vi 的基础之上进行了二次开发, 以完成与下位主控单片机的数据交换。

图 5-8 的程序是范例中对于串口的设置部分, 包括端口选择、波特率、数据长度、奇偶校验、停止位和流控制等。由于串口的设置规则相对固定, 本设计将该部分直接移植到测试软件中, 缩短了开发周期。



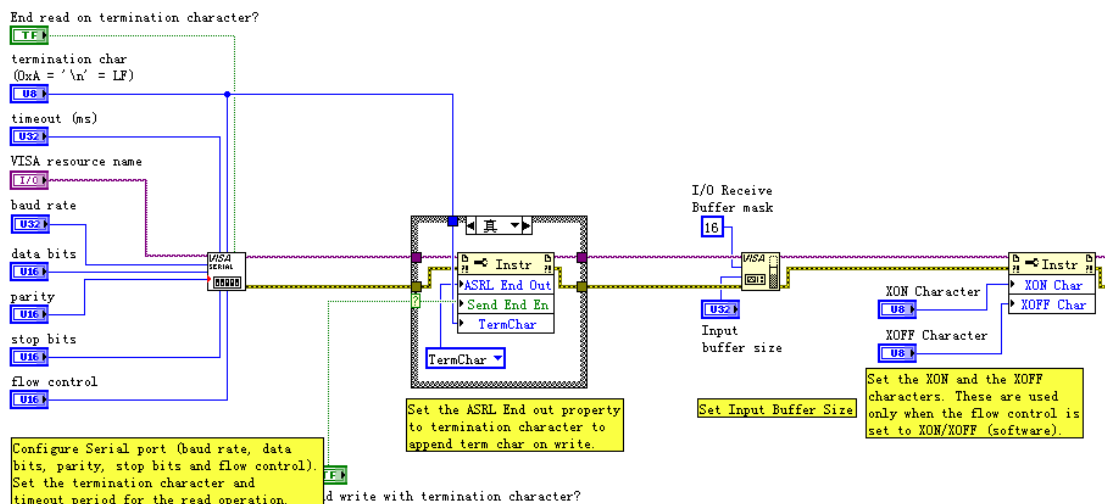


图 5-8 串口读取范例的串口设置部分

图 5-9 是测试程序的主体部分，读写部分在一个 while 循环中顺序执行，由各自的开关控件进行触发。本文定义串口发送的命令格式为比例系数、加热功率和积分系数各自由两个字节表示，然后拼接成六字节的指令发送给主控单片机进行解析。三个参数的数值范围是：00.00~99.99。串口接收的数据有均温层和端面的温度、当前的加热功率等数据，测试程序对按照预定顺序对读入的字符串进行解析，在前面板上实时显示各项数据的变化情况。

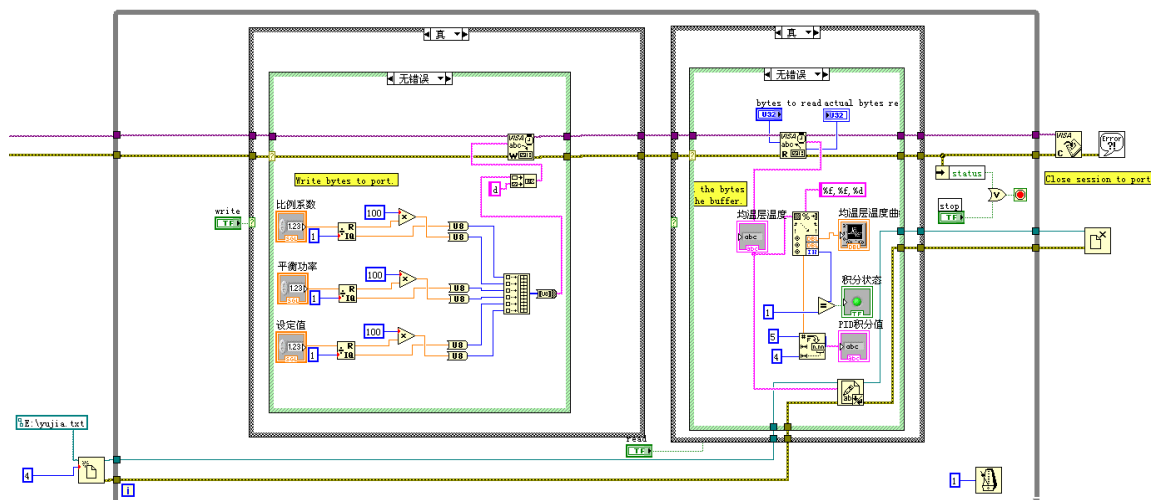


图 5-9 数据的接收和发送部分

## 5.2 参数整定

本设计参数整定的过程就是通过实验的手段修正设计参数的过程。参数的整定是保证日后滤光器正常工作的重要前提，也是为以后相关课题的研究打下基础。例如，在参数整定过程中发现将积分的步长延长，温度控制的效果相对于比例积分同步调节要更好。

## 5.2.1 加热功率的测量

第二章针对滤光器的稳态导热进行了定量分析，利用式 2-28 可以得到滤光器在不同温差条件下的散热功率大小。但设备在实际运行过程中，由于保温、加热的不均匀性和滤光器内部机械结构不对称等因素，滤光器稳态散热的理论分析可能会存在某些偏差，需要用实验来进行验证和分析，所以本课题设计了加热功率的测量实验。

该实验在生化培养箱中进行，培养箱设定不同的环境温度来测量加热功率的情况。根据对北京市夏季历史最高温度的分析，滤光器的工作温度应该设置在 44℃ 左右，所以在实验过程中，控制器的目标温度被定为 44℃，比例系数为 3，控制方式采用的是纯比例控制，则稳态误差值正比于温差，也正比于加热功率。如图 5-10、5-11、5-12：

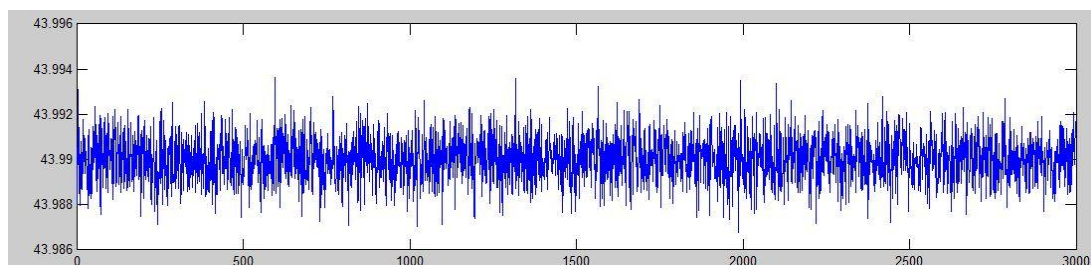


图 5-10 温差为 10℃ 的控制效果

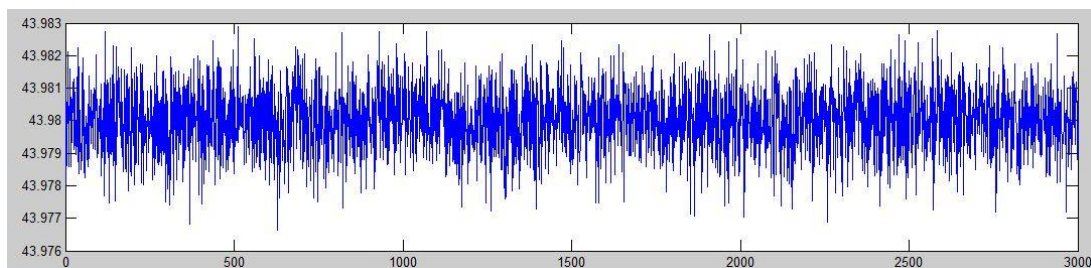


图 5-11 温差为 20℃ 的控制效果

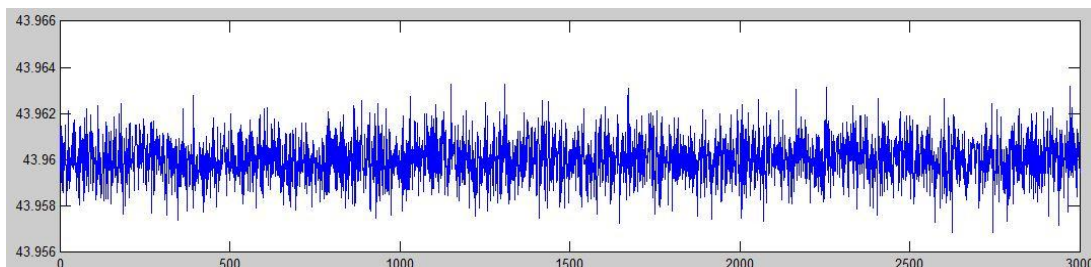


图 5-12 温差为 36℃ 的控制效果

图 5-10、图 5-11 和图 5-12 温度的稳定值约为 43.99℃、43.98℃ 和 43.96℃，可以推算出加热的功率约为 3.86W、7.21W 和 15.26W，由此可以计算出三个温差条件下的热阻为 0.386 W/℃、0.3605 W/℃ 和 0.423W/℃。对比第二章推导的 0.3779 W/℃ 的理论热阻，实验的结果偏差不大，且温差和加热功率也近似成正

比。

## 5.2.2 临界比例带法整定

根据 3.3.1 中介绍的临界比例带参数整定法，只使用比例环节进行控制。由于本课题的温控系统没有主动散热机制，所以如果温度高于设定值，则停止加热，比例环节在此时不起作用。将培养箱中的温度设为某一定值，比例系数从大到小进行改变，测定滤光器在不同比例系数下达到稳态时候的温度曲线，直到温度曲线近似为等幅振荡为止，如图 5-13。这时控制系统处于边界稳定状态，记下此状态下的振荡周期约 1 分钟（每秒输出三个点）比例带约为 1，然后根据经验公式计算出 PI 调节器的比例系数约为 2.2，积分时间常数约为 50。

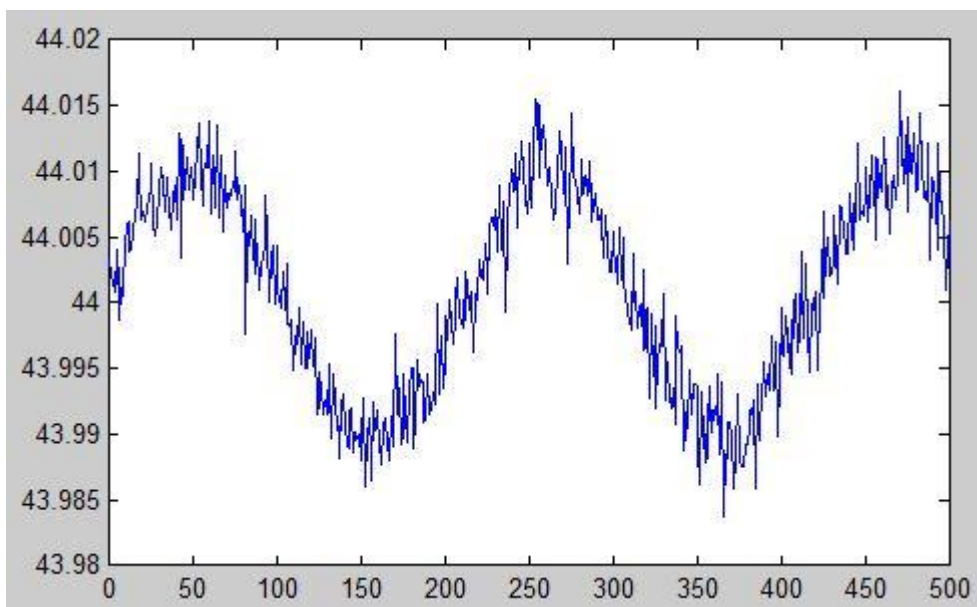


图 5-13 等幅振荡的温度曲线

本设计最终确定的比例系数为 3，略高于临界比例带整定的结果；积分开启的门限为 43.9~44.1℃；积分值的积分范围为 0.1~0.7，以防止积分饱和。参数整定之后，系统的稳定性有所提高，温度的控制效果也有了改善。

## 5.2.3 响应时间的测量

本设计定义的滤光器响应时间是指从外界环境温度发生阶跃变化到该变化被电桥感知所经历的时间，该参数的测量对于本文引入的积分步长有很好的指导意义。实验仍然使用生化培养箱，具体操作是：将培养箱的温度调节到高于室温的某一值，当箱内的滤光器温度变化进入稳定状态时立即停止加温，并打开培养箱快速进行通风，这样箱内的温度会迅速下降至室温。图 5-14 是外界环境温度骤减 5℃ 的情况下恒温控制的温度输出情况，降温时间约为 3 秒。

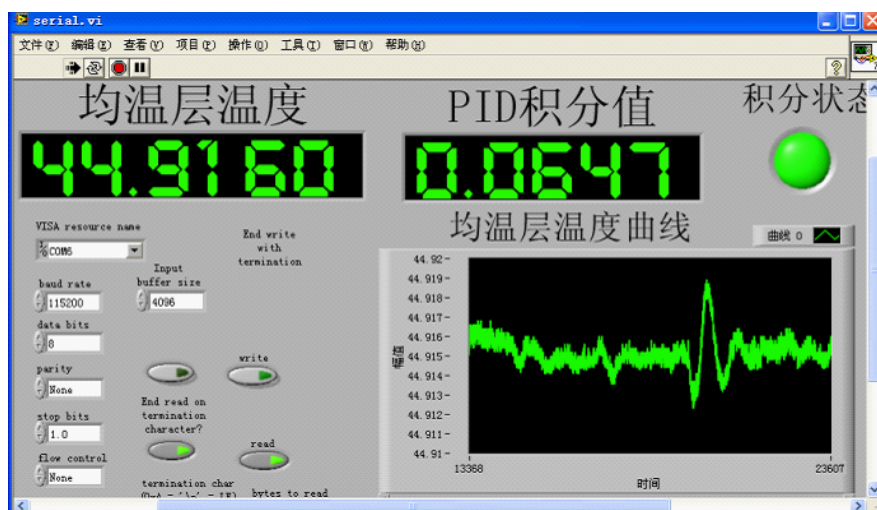


图 5-14 5℃阶跃响应下的温度变化

几次实验结果发现，滤光器的响应时间约为 1 分钟，所以积分步长的选取应该小于 1 分钟。因为如果步长选择过大，那么对于温度变化的积累量会减小，系统的跟踪能力会变差，对系统的稳定性和控制效果可能有产生不良影响。

## 5.3 控制效果

本设计在进行参数整定的过程中，主要的实验场所是生化培养箱。由于体积限制，实验中没有加入端面恒温 and 二级恒温，所以这两项需要在工作台和实地进行实验。其中在实验室的工作台上测试控制的效果主要实验两部分内容：端面和柱面外壳加温或降温过程对于控制器效果的影响和驱动滤光器内波片转动的四个步进电机转动过程中对于控制器效果的影响。

### 5.3.1 实验室控制效果

在实验室中进行了多次加温和电机传动的实验，结果发现加温降温过程如图 5-15 和电机传动过程对于滤光器的温度影响都在  $0.002^{\circ}\text{C}$  以下。在不加任何干扰，滤光器仅在室温变化的影响下，恒温控制器能够将温度控制在  $0.002^{\circ}\text{C}$  以下，如图 5-16 所示：

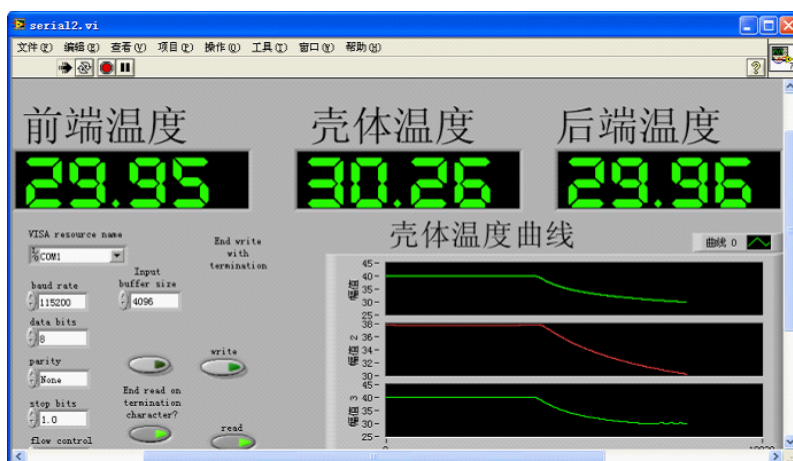


图 5-15 壳体和端面的降温实验

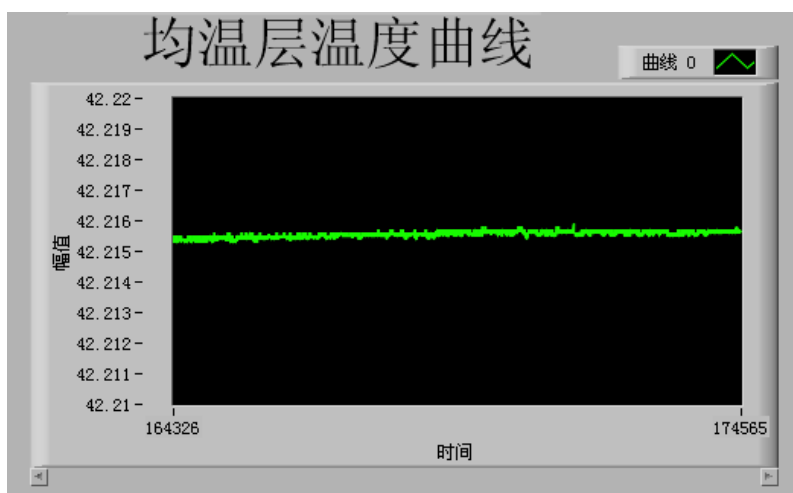


图 5-16 实验室环境下的控制效果

对于本课题控制效果的检验主要是利用了 LCTM-D4 高精度石英晶体温度测量仪来完成的，如图 5-17。该设备是由北京廉康立言公司开发的，经国家计量部门标定的测温仪器。但由于其没有支持数据输出的接口，检验工作是人工记录的方式完成的，结果表明本设计已经实现  $0.01^{\circ}\text{C}$  的精确控温。



图 5-17 LCTM-D4 型石英晶体温度测量仪

### 5.3.2 现场调试

本课题的滤光器自 5 月 1 日开始在怀柔太阳观测基地进行调试，到 5 月 3 日，滤光器被成功安置到望远镜的舱室内，并随即进行了电机和 KDP 高压部分的试调工作，如图 5-18：

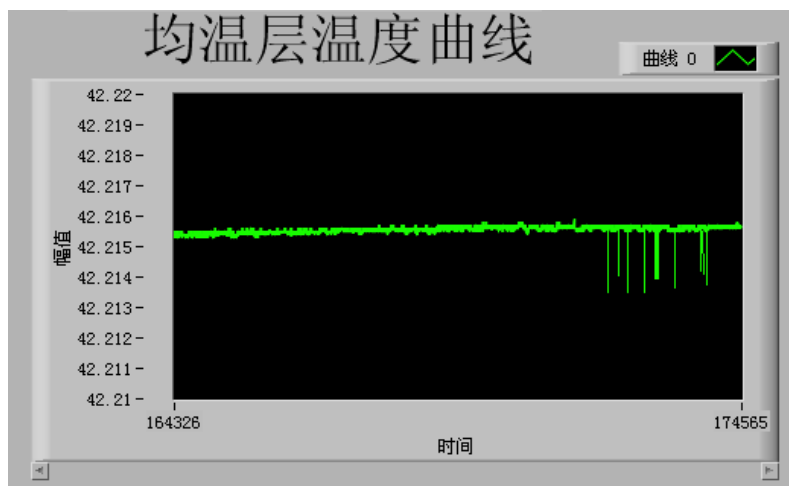


图 5-18 怀柔太阳观测基地试调效果

初步的测试结果表明：波片的驱动电机对于恒温控制器的控制效果基本不够成影响；但 KDP 高压部分在开启的瞬间对于温度的测量值是有所影响的，即图 5-18 中的毛刺现象，通过上位机记录的温度数据发现，每次高压开启，温度的测量值都会减小千分之二三，持续时间约为 2 秒，通过本文中采用的延长积分步长和多点平均的方法可以大大减小 KDP 高压部分的影响。此外，本课题另一项重要指标——长期稳定度还需要在怀柔太阳观测基地做进一步测量，已检验本设计的实际控制效果。

## 第六章 结论

本课题主要完成对 35cm 太阳磁场望远镜的双折射滤光器进行高精度的温度控制。本课题所做的工作较为全面，涉及到保温材料的市场调研、选型和制备，滤光器散热过程的理论分析，恒温控制器的电路实现和控制程序的编写和调试，以及滤光器温控系统的装配和调试等诸多方面，取得了一些成果，收获了许多经验，加深了对控制原理、传热学等理论知识的理解。

第二章重点分析了滤光器的稳态导热过程，结合文献[28][29]对于传热学理论的详细阐述以及文献[25]对于滤光器散热模型的理论公式，本文详细推导了第三类边界条件下的导热微分方程的解，并将其灵活等效成串联热阻的形式，很好地完成了热传导与热对流共存条件下的散热分析。利用热阻的方法推算出了恒温控制器的加热功率，为恒温控制器加热部分的设计提供了有力参考，并且估算的结果在第五章也得到了有力验证。

第三章详细介绍了本课题恒温控制器所用到的 PID 控制算法，根据控制对象的特点，选择了位置式的 PI 控制算法。尽管在文献[17]中提及了 PI 控制算法的两种改进：积分分离和抗积分饱和，但并没有做相应的验证工作。本文不仅在控制器中实现了这两项改进，也提出了延长积分步长的方法。经过多次实验，本文的“比例快调，积分慢调”控制方法取得了很好的控制效果。

第四章详尽描述了基于 ADuC7026 的恒温控制器设计过程，利用 ADuC7026 自身集成的多种接口搭建了一个集温度采集、数据传输、加热控制和状态存储于一体的小型控制系统。在控制器的架构上，本文着重考虑了调试和控制的灵活性，如在控制软件的编写上预留了上位机的控制接口，除了控制器自身的改进型 PI 控制算法，还支持上位机的更为复杂高效的控制算法。

第五章主要介绍了本课题设计的验证工作，包括系统组装和调试的结果。本课题在测试实验的设计上，吸收了相关的实验经验，提高了参数整定的效率，如测试响应时间来指导积分步长的确定工作。

本课题所研究的对象是双折射滤光器，结构较为对称。对该设备恒温控制的研究工作可以为将来非对称设备（如二维实时光谱仪）的恒温控制打下了基础，积累了工程经验。

由于受研究时间和环境的限制，本课题目前的研究内容存在着不足，需要在以后的研究中进一步完善：

本文介绍的非稳态热分析是针对半导体激光器的恒温控制，被用作文献[14][15][16][17]的理论基础。由于滤光器内部的机械结构相比激光器的恒温腔要复杂的多，因此，系统响应函数应会有所差别。后续工作可以在基于文献[7]的

基础上进行有限元分析，利用 ANSYS 热分析软件进行建模和仿真。

本课题采用的控制算法是改进型的 PI 控制算法，实现方法简单有效，但不一定是最优的控制算法。一些先进的控制方法，如文献[7]中实现的模糊控制，可能有更为理想的控制效果。后续的研究工作可以利用本设计预留的控制接口在上位机上试验其他的控制算法，而让本设计的恒温控制器只充当一个执行器。

电路的设计上还有少许不足，如没有对恒温控制器到滤光器之间连线所带来的干扰进行估计，此外，相对于控制电路板的其他部分本设计的加热部分电压和电流都比较大，应加入光耦等元件进行隔断。

本课题所用的参数整定的方法主要是经验和试验的方法，具有一定的盲目性。今后可以先利用系统辨识的方法拟合出系统的传递函数，利用 Matlab 等软件进行仿真分析。另外，对于滤光器内部存在的其他热源，文献[7]对太阳光通过滤光器在光路上产生的功率进行了定量分析，后续的工作还应分析波片的驱动电机转动时产生的热量。



## 参考文献

- [1]. Wang Dongguang, AI Guoxiang, SUN Caihong et al.. Optical Design of Polarimeter for Space Solar Telescope[C]. Proc. SPIE, 2000, 4013: 616~624.
- [2]. 艾国祥,胡岳风,李挺,何凤宝,侯惠芳,顾振雷,倪厚坤.双折射滤光器.北京天文台台刊.1986.
- [3]. 王敬山,艾国祥,何凤宝,邓元勇,毛伟军,宋国锋,张斌,倪厚坤,章海鹰,叶祥明.太阳多通道双折射滤光器.光学技术.1995 增刊
- [4]. 彭科.氢原子钟高精度恒温系统设计[学位论文].上海.中国科学院上海天文台.2004.
- [5]. 韩大平.神经网络与PID复合算法的研究在焦炉温度控制中的应用[学位论文].沈阳.东北大学.2005,3:20-30.
- [6]. 董钊,高伟,甘玉泉.基于DSP的高精度恒温控制系统设计.电子器件.2009.
- [7]. 李进.三通道滤光器热分析及高精度温控的研究[学位论文].北京.北京交通大学.2011.
- [8]. 陈铁强,李克天,刘吉安,印波,蔡召虎.基于AT89S52单片机的PID恒温控制系统的开发和实验研究.电机工程技术.2009.
- [9]. 刘凯辉.基于ATmega128的智能恒温控制系统的设计.信号与信息处理.2011.
- [10]. 刘海峰,葛良全,曾国强,张庆贤,李勇.基于L4960的恒温控制系统的设计.核电子学和探测技术.2009.
- [11]. 张宝伟.基于PID算法的高精度温度控制系统.电子质量.2010.
- [12]. 李善寿,方潜生,肖本贤,汪小龙.基于单片机的恒温控制器的设计和实现.计算机技术与发展.2008
- [13]. 陈乾定.基于单片机的恒温控制系统的设计与实现.科技咨询.2008
- [14]. 刘冰,黄学进,李晋川,邹远文.用于生物舱细胞培养的小型恒温箱的研制.制冷与空调.2011
- [15]. 徐晓.基于恒温炉智能模糊PID控制器设计.湖南科技学院学报.2008.
- [16]. 徐志良,张永,陈建勋.由89C51构成的恒温炉控制器.仪表技术与传感器.2001.
- [17]. 尹振红.PID控制器稳定性分析及其在恒温控制器中的应用[学位论文].长春.吉林大学.2005
- [18]. 李艳娟.高稳定度恒温控制模块的设计与制作[学位论文].长春.吉林大学.2008.
- [19]. 吴戈.高稳定性恒温控制平台的设计与制作[学位论文].长春.吉林大学.2006.
- [20]. 纪天南.高稳定度恒温控制器模块方案设计与实验论证[学位论文].长春.吉林大学.2002.
- [21]. A. Merlone · F. Moro · A. Castrillo · L. Gianfrani Design and Capabilities of the Temperature Control System for the Italian Experiment Based on Precision Laser Spectroscopy for a New Determination of the Boltzmann Constant Int J Thermophys (2010) 31:1360–1370

- [22]. 吴艳霞, 胡国庆, 蒋幼华, 张道忠, 朱小平. 高精度重力仪的恒温控制系统. 大地测量与地球动力学. 2008.
- [23]. 陆海天. 太阳多通道望远镜滤光器恒温电控设计. 光学技术. 1995 增刊
- [24]. 候惠芳, 明长荣. 滤光器恒温控制电路. 北京天文台台刊. 1986.
- [25]. 顾震雷. 滤光器恒温过程分析. 北京天文台台刊. 1986.
- [26]. 张斌, 艾国祥, 王敬山. 多通道太阳望远镜滤光器恒温控制改进. 光学技术. 1995 增刊
- [27]. S. Tomczyk · G.L. Card · T. Darnell · D.F. Elmore R. Lull · P.G. Nelson · K.V. Streander · J. Burkepille R. Casini · P.G. Judge An Instrument to Measure Coronal Emission Line Polarization Solar Phys (2008) 247: 411–428 DOI 10.1007/s11207-007-9103-6
- [28]. 陶文铨. 传热学. 西安. 西北工业大学出版社. 2006.
- [29]. 杨世铭, 陶文铨. 传热学. 北京. 高等教育出版社. 2006.
- [30]. 余建祖, 高红霞, 谢永奇. 电子设备热设计及分析技术. 北京航空航天大学出版社. 2008
- [31]. 苏卫东, 任思聪, 刘升才. 温控箱数学模型的建立及其自适应 PID 控制. 中国惯性技术学报. 1995.
- [32]. 徐劲松, 高玉, 袁海波. 基于 DS1624 的多点温度监测系统. 时间频率学报. 2007
- [33]. 夏继强, 满庆丰, 王主军, 郭学礼. 高精度数字温度传感器 DS1624 及其应用. 电子技术应用. 1999.
- [34]. 孙来军等. ADuC7026 原理与应用. 电子工业出版社. 2009.
- [35]. 黄国栋, 戴义保. 基于 RS422A 现场总线的温控网络系统. 微计算机信息. 2004
- [36]. 常僊宇, 张金花, 王小安, 林莉. 常见保温材料密度与导热系数关系的研究. 工程质量. 2009.

## 作者简介

于佳，山东乳山人，本科就读于北京交通大学电子科学与技术专业。硕士期间就读于中国科学院国家天文台，研究方向是天文技术与方法。



## 硕士期间研究成果

本人在硕士期间参与了多项科研工作，主要包括南极天文观测站的建设、10 厘米磁场望远镜的电机控制系统、高精度磁分析器系统的定标与偏振补偿研究和 35 厘米磁场望远镜的恒温控制系统。在南极天文观测站的建设中，主要完成了基于 GPS 的高精度校时系统，完成论文两篇；在 10 厘米磁场望远镜的控制系统中，主要完成了上位机程序的编写和硬件调试工作；在高精度磁分析器系统的定标与偏振补偿的研究中，独立负责数据采集系统和电机控制等工作，发表论文一篇；35 厘米磁场望远镜的恒温控制系统负责控制器电路的设计和实现，并以此为基础完成了毕业论文。

发表的论文如下所示：

1. 于佳,胡柯良,邓元勇,商朝晖.基于 LinuxPPS 的高精度校时系统实现.天文研究与技术.2012 年第一期
2. 于佳,邓元勇.基于 GPSD 的高精度校时系统.现代电子技术. 2012 年第七期
3. 侯俊峰,于佳,王东光,邓元勇,张志勇,孙英姿.自校准法测量波片相位延迟.中国激光. 2012 年第四期