

硕士学位论文

<u>基于液晶波片的 H a 双折射滤光器的机械结构设计</u>

作者姓名:	张洋
指导教师:	王东光 研究员
-	国家天文台
学位类别:	工程硕士
学科专业:	光学工程
培养单位:	国家天文台

2015年 10 月

<u>Mechanical Structure Design of a H a birefingent filter</u> <u>based on Liquid Crystal Variable Retarder</u>

By

Zhang Yang

A Dissertation Submitted to

University of Chinese Academy of Sciences

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Master of Optical Engineering

National Astronomical Observatories

Chinese Academy of Sciences

October, 2015 Year

摘要

受地球大气扰动、吸收及背景辐射的影响,地基观测已经很难满足太阳物理 研究的需要,进入空间已成为天文观测的一大主流发展趋势,将传统观测设备小 型化、轻型化成为空间太阳仪器发展的一个新的研究内容。双折射滤光器是太阳 望远镜观测太阳磁场、监测太阳活动的重要部件,目前的滤光器需要使用多个电 机,通过机械旋转机构带动各晶体级中的偏振元件旋转来调整滤光器的透过波 长,其机械结构复杂,且要通过动密封与滤光器内的硅油接触,对空间运用的可 靠性存在巨大威胁。液晶技术的发展,使得利用液晶波片构建双折射滤光器成为 可能。基于液晶波片的双折射滤光器排除了旋转电机的使用,从而避免了油浸动 密封和旋转运动部件,大大提高了设备可靠性。同时还简化了机械结构、减轻载 荷重量、降低能耗、减小热控设计的难度、减少附加振动,实现了设备的小型化 和轻型化,适用于空间环境的使用。

液晶波片的应用给双折射滤光器空间化带来明显益处,本论文的主要目的是 为基于液晶波片的双折射滤光器地面原理样机的研制提供机械结构,包括设计、 加工和装配。主要工作和成果如下:

采用径向装配的结构设计,解决了因光学晶体外形尺寸不等带来的装配难问题;

2、首次以环形凹槽设计储存滤光器内的硅油匹配液,解决了因工作温度升降造成的硅油体积变化问题,该设计不仅体积小,也降低了漏油的风险;

3、采用 LEMO 真空插头,在紧凑的空间中解决了液晶波片驱动导线在密封结构 中引出的问题,取得了很好的密封效果;

4、利用 SolidWorks 软件进行三维建模,并通过计算机辅助设计,应用极值法实现误差分配。

5、完成的基于液晶波片滤光器的机械结构,与机械调节的滤光器相比,结构简单,体积小,质量轻,体积减小为机械调节滤光器的 1/3,重量减小为其 1/2,经 过初步测试实验,能够满足滤光器的使用要求。

Ι

本论文的完成为基于液晶波片滤光器地基原理样机提供了一套完整的机械 结构,研制中的相关技术可为该滤光器在地基应用提供技术支持,为空间应用提 供技术储备。

关键字 液晶波片 双折射滤光器 机械结构

ABSTRACT

Ground observation has been difficult to meet the needs of solar physics research, because of the factors of the Earth's atmospheric disturbance, absorption and background radiation. Then space observatory has become a mainstream trend. The conventional observation equipment miniaturization and weight reduction has become a new research in space solar instrument. The birefingent filter is an essential part of solar telescopes to observe solar magnetic field and monitor solar activities. Current filter need to use multiple motors to rotate the polarization element of each crystal stage to adjust transmission wavelength. However, such structure is complex, and especially the mechanical rotating parts have to contact with silicone oil in the inner filter through dynamic seal, which has difficult to use in space because of the low reliability. Since the manufacturing technology and market maturity of liquid crystal variable retarders (LCVRs), the LCVRs birefringnent filter was proposed. Without using rotary motors, this LCVRs birefingent filter improve the reliability applied in space. The last result shows that the LCVRs birefringnent filter uses a more simplified structure, smaller size and faster response speed (microsecond level). It also reduces energy consumption, the difficulty of thermal control design and additional vibration, to achieve the miniaturization and the weight of equipment. It is applicable to use in the space environment.

The birefringent filter obviously benefits from LCVRs. The thesis is main about designing the mechanical structure of the LCVRs birefringnent filter, applied in ground solar telescope, including design, machining and assemble. The main work and achievements are as follows:

1. Optical crystals are assembled in radial direction, solving the difficulty about the optical crystals unequal dimensions;

2. Design annular groove to save the silicone oil in this filter for the first time, solving the problem that silicone oil volume changes following the environment temperature change. It is not only make this filter smaller, but also reduce the risk of oil spills.

3. Achieved good sealing effect to use LEMO vacuum outlet in the compact space.

4. SolidWorks software has been used for three-dimensional modeling and using computer as aid design for uncertainty dimension tolerance. Extreme method is been applied in tolerance design .

5. Comparing with the filter in mechanical modulation, this filter structure based on LCVRs is simpler, smaller and lighter.

This thesis, based on LCVRs birefingent filter, provides a complete mechanical structure. The LCVRs filter applied as technical reference to Chinese ground-based astronomical instruments and technical reserves to space astronomical instruments.

摘 要	I
ABSTRACT	III
目 录	IV
第一章 绪论	1
1.1 双折射滤光器的发展	1
1.2 液晶波片双折射滤光器的研究现状	5
1.3 液晶波片双折射滤光器的研究意义	6
1.4 本论文的研究内容	6
第二章 基于液晶波片滤光器的工作原理	8
2.1 双折射滤光器光学原理	8
2.1.1 单级 Lyot 滤光器	8
2.1.2 多级 Lyot 滤光器	10
2.1.3 双折射滤光器相位调制方式	11
2.2 液晶波片	12
2.2.1 液晶波片的简介	12
2.2.2 向列液晶波片的电光调制原理	14
2.2.3 液晶波片特性函数拟合	15
2.3 液晶波片双折射滤光器的光学结构	18
2.4 小结	19
第三章 机械结构设计	20
3.1 机械设计总体要求	20
3.2 设计方案研究	21
3.2.1 光学元件的固定	21
3.2.2 密封设计	24
3.2.3 温度控制系统安装	26
3.2.4 外部结构设计	28
3.2.5 材料的选择	28
3.3 小结	30
第四章 计算机建模与辅助公差分析	31
4.1 SolidWorks 软件建模	31

4.2 计算机辅助公差设计	
4.2.1 公差设计基本概念	
4.2.2 计算机辅助公差分析方法	
4.2.3 计算机辅助公差分配	
4.3 滤光器公差设计	
4.4 小结	41
第五章 总结	
5.1 成果展示	
5.2 总结	
5.3 展望	
参考文献	
硕士期间发表的论文	
致谢	

第一章 绪论

1.1 双折射滤光器的发展

双折射滤光器是用于观测单色像的重要部件,是利用光经过晶体时的双折射效应,经多级偏振干涉达到滤光目的,即获取所需的单色像。在天文中,对各类天体的研究,主要还是依靠天文观测。观测仪器成像质量的好坏更能让我们了解 其各项属性,双折射滤光器在其中发挥着作用。从1938年至1944年间,Lyot 和Öhman分别单独发明开始,随着时间的流逝,双折射滤光器也在不断创新应 用。根据其光通道数,可以分为单通道和多通道滤光器,具体发展历程及相关原 理简介参见表格1.1.1。

自1968年南京天文仪器厂制造出中我国第一台双折射滤光器以来,我国已 经自主制造了多台双折射滤光器。上世纪80-90年代,国家天文台怀柔太阳观测 基地的太阳磁场望远镜达到了国际先进水平,其中双折射滤光器就是关键部件之 一。1984年,艾国祥和胡岳风提出了多通道双折射滤光器,并1994年成功应用 于怀柔太阳观测基地的太阳多通道望远镜上。它的投入使用,使得三维或多层次 太阳矢量磁场和视向速度场的同时观测成为现实,创造了太阳磁场和速度场同时 观测的历史。

本论文考虑的双折射滤光器主要应用于天文仪器。双折射滤光器的功能从开始的只能获得单一的天体单色像到通过调节波长装置观测获得不同时的光谱分布。其中调节波长的方式主要包括机械调节和电光调节。机械调节,较常用的是改变相位延迟晶体(如1/2 波片)与光轴的夹角而改变滤光器的出射波长或波带,在双折射滤光器应用初期,以机械调节为主;电光调节主要是利用光学晶体在电压或电场的作用下,改变自身折射率以达到相位延迟目的,从而改变出射波长或波带。因为电光调节只需改变电压即可调节,相比机械调节,方式简单,调制速度快。鉴于电光调制的优点,具有这种特性的晶体被逐渐研制出来,得以应用。例如 KD*P 晶体,以电压调制方式成功应用于国家天文台怀柔观测基地的 35cm 太阳磁场望远镜的偏振分析器上。但是其存在驱动电压高,视场效应,温度效应,制造技术难等缺点。近年来,液晶波片因其可低电压驱动,制造技术成熟等优点,成功应用于多处科研领域。而液晶波片在双折射滤光器上的使用,在国内尚属首次。本文讨论的则是利用液晶波片的电光特性,研制双折射滤光器。

名称		结构	优点	缺点	透过率公式($\mu = n_e - n_o$)	备注
单通道滤光器	Lyot	a) 備装片 ↓ 4 位 延迟 5 備装片 ↓ 4 位 延迟 5 ↓ 4 振 F ↓ 4 位 延迟 5 ↓ 4 振 F ↓ 4 仮 延迟 5 ↓ 4 振 F ↓ 4 の m ↓ 4 の m	结构简单、性能 优良、使用方便, 使用广泛	透过率低	n 级结构透过率: $\tau(\lambda) = \prod_{k=0}^{n-1} \cos^2(\pi \frac{2^k \mu d_0}{\lambda})$	1938-1944 年 Lyot-Ohman 分别单 独发明, 原理:当光入射,且 P ₁ //P ₂ 时,偏振光经 晶体双折射引起光程 差,在第二偏振片 P ₂ 产生干涉
	Evans	单级 Evans 代替两级 Lyot 滤光结构	透过率较 Lyot 高,使用广泛, 偏振片数量比 L 型少	各级之间不能够 严格匹配,增加 轻微外带散射光	当分开的两半晶片光轴交叉时透过 率为 $\tau_1(\lambda) = \sin^2(\pi \frac{\mu d_1}{\lambda}) \sin^2(\pi \frac{\mu d_2}{\lambda})$ 当分开的两半晶片光轴平行时透过 率为 $\tau_2(\lambda) = \cos^2(\pi \frac{\mu d_1}{\lambda}) \sin^2(\pi \frac{\mu d_2}{\lambda})$	1949 年 Evans 发明

表格 1.1.1 双折射滤光器发展及相应原理简介

多通道滤光器	Solc	P ₁ b ₁ b ₂ b ₃ b ₁ p ₂ P ₁ b ₁ b ₂ b ₃ b ₁ p ₂ I I I I Solc 滤光器结构 扇型级角差分布	透过率高	使用晶片量大、 调节宽视场和波 长较困难,应用 不多,仅在大气 外太阳紫外观测 中有重要作用	$\tau_{s}(\lambda) = \frac{t_{s}}{2} \left[\frac{\sin n\chi}{\sin \chi} \cos \chi \cdot \tan \alpha^{2} \right]^{2}$ $\nexists \pm \cos \chi = \cos \alpha \cdot \cos \pi \frac{\mu d_{0}}{\lambda}$	1954年后十余年, Sloc等发明,可与L 或E型滤光器结合使 用,但因轮廓不能严 格匹配会增加散射光
	Title 部分 偏滤 光器	2 2 0 2 0 4. 单片部分编集读光器	透过率较高,抑 制外带散射光, 较易实现调节波 长和宽视场	部分偏振片有剩 余双折射		1976 年 Title 提出, 仅 Title 本人使用过 这种滤光器
	视频 光谱 仪	P ₁ b BP	可获得两维同时 光谱,通道越多, 晶体用材越省	光热会引起最厚 级波带不稳,找 出部分克服办法	组合偏振光束分离器增加偏振度, 偏振度≥99.9%,出射偏振光传播方 向互相垂直,且光谱互补,即	1985-86, 艾国祥发 明, 应用于国家天文
	全透 射滤 光器		减少光量损失, 相对传统"半透 射"而言	元件和造价增加	$\tau_{\prime\prime}(\lambda) = \cos^{2}(\pi \frac{\mu \alpha}{\lambda}),$ $\tau_{\perp}(\lambda) = \sin^{2}(\pi \frac{\mu \alpha}{\lambda}), \tau_{\prime\prime} + \tau_{\perp} \equiv 1$	台怀柔太阳观测基地

	带通头滤器器		避免光照在最厚 晶体上,引起升 温和波带不稳			
	复晶多道光	在一级滤光器中采用几种晶体组成复合级,利用双折射色散的不同,在几个波长上获得严格的整数或半整数干涉级数,允许这几条谱线同时通过,然后用光谱滤光 片将这些谱线其分开	用材节省	复合材料不能用 太多,一般用于 2-3条谱线。最终 数据较粗难统 一,为加工调试 带来困难	适用于太阳单色像观测	1985年,苏定强和邵 联贞提出
透过率排名				Solc>Ev	vans>部分偏振光滤光器>Lyot	

1.2 液晶波片双折射滤光器的研究现状

液晶波片是近些年来新型的电光调制元件,可利用在液晶波片两端加驱动电压改变液晶分子排列方向,从而改变液晶波片的折射率,达到延迟相位的目的。液晶波片的驱动电压低,可在10V以内,响应速度快,在毫秒量级,鉴于这样的优势,液晶波片应用越来越多,技术也越来越成熟。九十年代末,国外天文学家将液晶波片应用于滤光器。2000年,美国大熊湖天文台(BBSO)利用基于向列液晶波片的近红外滤光器获得了近红外的太阳单色像。2004年,美国高山天文台(HAO)利用向列液晶波片将一台Hα滤光器改造为一个中心波长为1083nm的滤光器,用以观测日冕,如图1.2.1。其中,有黑色电极线引出的晶体即为向列液晶波片。



图 1.2.1 美国高山天文台研制的基于液晶波片双折射滤光器

2006年,国家天文台怀柔太阳观测基地成功研制了一台基于液晶波片的近 红外偏振分析器(图1.2.2)。但基于液晶波片的双折射滤光器在我国天文领域 还是空白。本文是介绍研制基于液晶波片的双折射滤光器的机械结构设计工作。



图 1.2.2 近红外偏振分析器

1.3 液晶波片双折射滤光器的研究意义

随着太阳物理研究的深入,对太阳观测的波段、视角及分辨率的要求也随之 提高,传统的地基观测也随着时代的发展,不断的更新设备,改进图像处理处理 方法,提升地基观测能力。但因地球大气吸收、扰动、背景辐射及观测基地环境 如天气等问题的影响,渐渐难以满足上述要求。而空间观测在观测频段、空间及 能量分辨率极限,可观测时段等诸多方面,较传统的地基观测有着无法企及的优 势。因此在天文观测方面,进入空间观测已经成了主流趋势。随着我国的经济和 科技的发展,空间观测也成为了我国天文观测的一个新的发展发向。其中,太阳 观测占据了重要一席,太阳及太阳磁场的成像观测则是主要科学目标,双折射滤 光器是实现太阳观测的重要手段,也是天文仪器的重要部件。

与地基观测相比,空间观测对仪器的可靠性、体积、质量及响应速度等有更 高要求。双折射滤光器应用于空间仪器上就必须解决这些问题。国内双折射滤光 器多为机械调制式,其波片旋转方式为旋转电机带动齿轮传动,就我国目前航空 航天技术而言,空间电机以及运动件的可靠性不高。并且运动件的存在,对其密 封要求更高,增加了设计难度,机械加工难度。因此需寻找更合适的调制方式来 改进双折射滤光器。

电光调制滤光器具有调制速度快,机械结构相对机械调制滤光器简单等特点。电光调制不存在机械传动,可提高滤光器的空间可靠性,可作为空间研制方向。本论文选择液晶波片作为电光调制晶体。纵观国内外研究,液晶波片已经有较成熟的制作技术和市场,并成功应用于多处科研领域,但是基于液晶波片的双折射滤光器还未应用于我国天文领域。研制液晶波片双折射滤光器,有助于改进原有双折射滤光器结构,提高滤光器响应速度,最终提高太阳望远镜的时间分辨率。将传统的观测设备小型化、轻型化及改善其空间可靠性,为液晶波片双折射滤光器在天文仪器上的使用做技术参考,为空间观测仪器做预研。

1.4 本论文的研究内容

本论文的主题是基于液晶波片调制的双折射滤光器的机械结构设计,已知主 要滤光系统光学结构,根据光学结构和总体使用要求来进行机械结构的设计,制 图,制造及装配,本论文详细介绍了这些步骤。

第一章介绍了双折射滤光器的发展历程,在我国仪器上的使用情况,以及液 晶波片的研究现状和研究意义。

第二章主要介绍了双折射滤光器的光学原理,以及几种相位调制方式。相位 调制方式的不同,决定了其相应机械结构的复杂程度的不同。同时也介绍了液晶 波片的基础知识和工作原理。随后介绍了本论文中用的液晶波片的曲线拟合方程 的选择过程。最后,给出了液晶波片双折射滤光器的光学系统结构尺寸。

从原理上更清楚的认识到,机械调制的双折射滤光器的不足,和基于液晶波 片的双折射滤光器低电压调制的实质优点,阐明了基于液晶波片的双折射滤光器 在地基太阳仪器上应用的可行性,可为空间应用做预研。 第三章根据光学设计明确液晶波片双折射滤光器的技术要求,从光学元件固定、密封、温控及材料选择几个方面综合考虑,给出设计方案。设计原则是首先 满足设计要求,其次结合已有滤光器机械结构对比设计,对细节问题进行计算改 进。

第四章在设计方案的指导下,利用 SolidWorks 软件进行三维建模。并利用 计算机进行辅助公差设计。介绍了计算机辅助公差设计方法,详细介绍了极值法 和蒙特卡洛法,通过实例计算,选择极值法作为本结构公差设计方法。

第五章总结研制液晶波片双折射滤光器的进展情况。经过机械装配,并与机 械调制双折射滤光器机械结构进行对比,液晶波片滤光器具有体积小,质量轻等 优点,达到了设计要求。为液晶波片应用于地基双折射滤光器提供了技术参考, 为应用于空间滤光器提供了技术储备。

第二章 基于液晶波片滤光器的工作原理

双折射滤光器发展多年,有着成熟的理论知识。本章主要介绍了 Lyot 双折 射滤光器的光学原理,以及几种相位调制方式。相位调制方式的不同,决定了其 相应机械结构的复杂程度的不同。对双折射滤光器工作原理的理解,有助于对机 械设计要求的理解,同时从原理上更清楚的认识到,机械调制的双折射滤光器的 不足,和基于液晶波片的双折射滤光器低电压调制的实质优点。

介绍了液晶波片的基础知识和工作原理,体现出液晶波片电光调制的优势。 随后介绍了本论文中使用的液晶波片曲线拟合方程的选择过程。最后,给出了液 晶波片双折射滤光器的光学系统结构尺寸。

2.1 双折射滤光器光学原理



2.1.1 单级 Lyot 滤光器

图 2.1.2 单级 Lyot 滤光器原理

双折射滤光器是基于多级偏振干涉的原理,以达到窄带和高精细度的滤光要求。图 2.1.1、图 2.1.2 所示为单级 Lyot 双折射滤光器原理示意图。^{P1}、^{P2}为两 片正交的偏振片中间为双折射晶体,晶体的光轴方向与偏振片的透振方向成 45 度角。入射光经过第一片偏振片后成为一束偏振光,其电矢量用^{Ē1}表示,方向 沿^{P1}方向。此光线在晶体中传播过程中,由于晶体的双折射作用,可沿晶体的快 轴e和慢轴o方向分解为非常光e光和寻常光o光,它们在晶体中的传播速度不 同,其两个分量电矢量分别表示为^Ēe与^Ēo:

其中 A_e, A_o 为振幅值, α 为 \overline{E}_1 与e轴的夹角, δ_e, δ_o 分别为e光和o光经过晶体的位相。

光束经过第二片偏振片时,只有沿 P_2 方向的振动分量才能透射。将电矢量 \overline{E}_e 与 \overline{E}_e 在该方向的分量记作 \overline{E}_{e2} 与 \overline{E}_{o2} :

$$\begin{cases} \bar{E}_{e^2} = A_{e^2} e^{i\delta_e} = A_e \cos\beta \cdot e^{i\delta_e} = A_1 \cos\alpha \cos\beta \cdot e^{i\delta_e} \\ \bar{E}_{o^2} = A_{o^2} e^{i\delta_o} = A_o \sin\beta \cdot e^{i\delta_e} = A_1 \sin\alpha \sin\beta \cdot e^{i\delta_e} \end{cases} \quad \text{ (2)}$$

其中 β 为 P_2 与e轴夹角。 \overline{E}_{e^2} 与 \overline{E}_{o^2} , P_2 在方向相干叠加电矢量 \overline{E}_2 与光强 I_2 可以表示为:

$$\begin{cases} \vec{E}_2 = A_1 \cos \alpha \cos \beta \cdot e^{i\delta_e} + A_1 \sin \alpha \sin \beta \cdot e^{i\delta_e} \\ I_2 = \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_2^* = A_1^2 \cos(\alpha - \beta) - A_1^2 \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin^2 \frac{(\delta_e - \delta_o)}{2} \end{cases} \quad & \& \ensuremath{\mathbb{R}}\xspace{-1.5ex} (3) \end{cases}$$

e光和o光在晶体中的传播位相差 δ 可以表示为:

$$\delta = \delta_e - \delta_o = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o)d \qquad \qquad & \& \mbox{$\overset{\frown}{$x$}$} \ (4)$$

其中 n_e, n_o 分别为e光和o光在晶体中的折射率, d为晶体的厚度。在要求 $\alpha = \frac{\pi}{4}, \beta = -\frac{\pi}{4}$ 的条件下强度分布为:

从上式可见, 当 $\frac{\pi d}{\lambda}(n_e - n_o) = (m + \frac{1}{2})\pi$ 时, 光强取得最大值。如果双折射晶体参数确定后, 晶体的厚度由下式决定:

可以使得所需要的波长的光取得极大值,即得到相干增强,从而达到滤光的目的。

2.1.2 多级 Lyot 滤光器



图 2.1.3 三级 Lyot 滤光器示意图

由于单级的偏振干涉不能同时满足窄带(透过波长带宽 0.1Å)和高精细度(大于 100)的滤光要求。可以采用多级 Lyot 滤光器组合偏振干涉(见图 2.1.3),下面的斜线代表晶体或波片的光轴方向。前一级的 Lyot 结构的出射偏振片可以作为下一级 Lyot 结构的入射偏振片。通过公式(5)、(6)可以看出,选择各级滤光器的晶体厚度分别为*d*, 2*d*, 4*d*,…,可以使得每一级的波长的取得极大值,最终所需要的波长的光干涉增强,其它的光干涉相消,从而达到滤光的目的,满足观测要求。图 2.1.4 是各级滤光器的透过曲线示意图。整个滤光器的曲线是它们的乘积(见图 2.1.4 第四条曲线)。

$$I = A_1^2 \prod_{m=0}^{N} \sin^2 \frac{2^{m-1} \pi d}{\lambda} (n_e - n_o), \quad m = 1, 2, 3 \cdots$$

其中:N为滤光器中Lyot级个数,d为最薄双折射晶体厚度。



图 2.1.4 三级滤光器偏振干涉透过曲线示意图

2.1.3 双折射滤光器相位调制方式

双折射滤光器实际使用时,存在两个问题,会影响其最终的出射波长或波带, 发生谱线漂移,影响观测结果。一个原因是双折射晶体的加工误差,从公式(7) 可以看出,晶体的厚度与所需波长是有相关的,如果晶体厚度发生改变,那么最 终滤光器的使用波长也会发生改变,即谱线漂移。实际加工中,晶体厚度并不能 完全保证无误差;另一个原因是温度变化,会改变晶片长度和折射率,引起波带 位移。这两个问题的后果均是引起波带漂移,针对这两个问题,解决方法是,一 是加入相位延迟元件,对谱线漂移进行相位调制;二是提供稳定的恒温环境,使 得温度对滤光器的谱线漂移影响降到最小。其中相位调制方式包括声光调制、机 械调制和电光调制。

声光调制是利用各向异性晶体在声光互相作用下的反常布拉格衍射效应制成的电可调谐滤光器,能够根据施加的射频信号频率的不同对入射复色光进行衍射得到特定波长的单色光,达到调制目的。

机械调制是通过机械旋转相位延迟波片,改变其与光路光轴夹角达到延迟相位的目的。图 2.1.5 为单级机械调制式双折射滤光器示意图,通过旋转 1/2 波片达到相位调制的目的。



图 2.1.5 单级宽视场机械调制双折射滤光器示意图

电光调制主要是利用晶体在电场作用下折射率发生改变的特性而达到调谐 相位的目的。目前常用电光调制的晶体有 KD*P 晶体和液晶波片。KD*P 电光调 制晶体已经成功应用于多台太阳磁场望远镜,但其因加工难度大,需几千伏电压 作为驱动电压,没有成熟市场等原因,让人们需要寻找新型电光调制元件取而代 之。而液晶波片具有低电压驱动,市场成熟,终端使用方便等优点,使得很多光 学仪器计划或者正在使用这种新型光学元件。

对液晶波片调制原理将在小节 2.2.2 中以向列液晶波片为例详细介绍。

2.2 液晶波片

2.2.1 液晶波片的简介

液晶波片(液晶相位延迟器)是一种新型的可控相位延迟器。通过控制加在 液晶两边的电压,可以改变液晶分子的排列方式而改变液晶波片的双折射系数, 从而改变通过液晶波片光的相位差。因此液晶波片的功能也因液晶分子的排列方 式的不同而有很大的区别,具体优缺点和实际应用可见表 2.2.1。

表格 2.2.1 液晶的分类

液晶:介于固态与液态之间,具有液体的流动性和晶体的各向异性结构。按凝集构造分为以 下几类

名称	结构图	结构	优缺点
近晶型(smectic)	Semctic 液晶相	二度空间的层状规则 性排列,各层内分子 的长轴互相平行	液晶分子粘度较大, 对外界的响应不很灵 敏,多用于光记忆材 料上
向列型(nematic)	Nema 1 C	以长轴方向平行排列	粘度小,响应速度快, 应用最广泛,制作的 波片响应速度在 ms 毫秒级
胆甾(zai)型 (cholesteric,也叫做 旋光性向列液晶)	Cholesteric 液晶相	多层向列型液晶堆积 形成,层与层之间相 互平行,相邻层面之 间的长轴方向存在一 个角度	相邻长轴取向的层面 之间距离随着温度变 化而变化,因此产生 不同波长的选择性反 射,产生不同颜色, 常用于温度感测器
铁电液晶 (Ferroelectric Liquid Crystal; FLC,强诱 电性液晶)	$\begin{array}{c} & & & \\ & & & & \\ & & & \\ & & & & \\ & & & \\ & & & & \\ & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\$	具有自发分极,加外 电场时,自发分极的 指向会跟随反转的液 晶材料	自发极化值会加快其 对外加电场的响应速 度,制作的液晶波片 响应速度在微秒级

制作液晶波片的方法是在相距几微米的两个光学基底中间注入液晶材料,常用的液晶材料主要是铁电液晶和向列液晶。经比较,铁电液晶虽然响应速度快, 但是调制过程中其分子会强烈自发极化,使得铁电液晶波片光轴发生变化,而且 铁电液晶波片的光轴对温度变化极其敏感,制作出的液晶波片延迟量与设计值差 异较大。

向列液晶波片响应速度在毫秒级,与 CCD 曝光和读出时间相当。今年来向 列液晶波片制作技术较成熟,目前已有现成的成品可以买到,并且能做到高精度 相位延迟连续可调。本论文滤光器中的液晶波片即选用的向列液晶波片。

2.2.2 向列液晶波片的电光调制原理

向列液晶波片是在两基底之间注入液晶材料,液晶分子之间是各向异性的,构成了单轴的双折射液晶层。如图 2.2.1 所示,在不加电场时,液晶分子长轴平行于基底表面排列,此时波片获得最大延迟量。当波片两端加电压时,在电场作用下,液晶分子长轴向电场方向倾斜,随着电压的增加,长轴与基底的夹角增大,波片的延迟量减小。电压是连续可调的,因此,改变驱动电压可以使液晶波片的相位延迟连续可调。



图 2.2.1 向列液晶波片调制原理

通过实验室测量获得五块液晶波片每升高 0.1V 的延迟相位,见图 2.2.2。从 图中可以看出在低电压条件下,液晶波片可以做到 0-2 π 范围内的相位延迟。并 且在 1-5V 电压范围内,液晶波片延迟相位随着电压增加而变小的变化明显。



图 2.2.2 五块液晶波片驱动电压与延迟角度示意图

利用计算机软件可以对所获数据进行函数拟合,当已知驱动电压大小时,根据函数拟合方程式,可以计算出该驱动电压下的延迟相位。但是从图 2.2.2 也看出,五条曲线不是完全重合的,因此,要对每一块液晶波片曲线进行函数拟合。

2.2.3 液晶波片特性函数拟合

从小节 2.2.2 中可以得到,液晶波片具有随驱动电压改变其延迟相位相应发 生改变的特性。利用这个特性,可以根据电压大小控制延迟相位,达到滤光器相 位调制的目的,因此需要知道液晶波片的特性函数。实验室获得数据只是离散的 点图,需对所获数据进行函数拟合。

本论文主要采用 MATLAB2013a 自带的 Curve Fitting Tool 来求得拟合函数,并分析其可靠性。见表 2.2.2。

名称	类型	基础型	是否可用
Custom Equations 自定义类型	用户自定 义类型		否
Exponential 指数拟合	2 种	ae^{bx} , $ae^{bx} + ce^{dx}$	否, 拟合方 差太大
Fourier 傅里叶拟合	7种	$a_0 + a_1 \cos w_1 x + b_1 \sin w_1 x + \cdots$ $+ a_8 \cos w_8 x + b_8 \sin w_8 x$	是
Gaussian 高斯拟合	8种	$a_1 e^{-(\frac{x-b_1}{c_1})^2} + \dots + a_8 e^{-(\frac{x-b_8}{c_8})^2}$	是
Interpolant 插值拟合	4 种	Linear , nearest neighbor , cubic spline , shape-preserving	否
Polynomial 多项式拟合	9种	$p_1 x^9 + p_2 x^8 + \dots + p_9 x + p_{10}$	是
Power 幂拟合	2 种	ax^b , $ax^b + c$	否
Rational 有理数拟合	6种	Linear、quadratic、cubic、4-5degree、constant	否
Smoothing Spline	取决于 p	用前后相邻的3个点之间的二次多项式	否

表格 2.2.2 MATLAB 拟合工具箱提供的函数拟合类型

平滑拟合		(a+bx+cx ²)进行拟合,使得曲线穿过所有的点。但该关系式只在相邻的3个点上有效, 在整体上无法得出相应的关系式。	
Sum of Sin Function 正弦函数拟合	8种	$a_1 \sin(b_1 x + c_1) + \dots + a_8 \sin(b_8 x + c_8)$	是
Weibull 韦伯拟合	1种	$abx^{b-1}e^{-ax^b}$	否

因为 MATLAB 本身自带的函数种类较多,而且有拟合程度较好的函数,因此并不使用自定义函数拟合。通过初步观察可以判断拟合曲线与实际测量点之间的拟合程度是否可应用到本次拟合中(参见表 2.2.3),然后再通过各个拟合的函数的方差(SSE)、R-square 等判断函数拟合的优劣。

拟合类 型	SSE	RM SE	R-Sq uare	拟合图			
傅立叶 7 阶拟合	29.9 912	0.6 011	1.0	350 300 250 200 9 150 0 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10			
高斯 8 阶拟合	1713 .1	4,7 168	0.999 1	350 300 200 200 200 200 200 200 20			
多项式9 阶拟合	967. 1646	3.2 601	0.999 5	350 300 250 250 100 50 0 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10			
正弦 8 阶拟合	24.7 447	0.5 669	1.0	350 300 200 200 200 50 0 0 1 2 300 200 - 0 1 2 300 - 1 2 300 - 1 2 300 - 1 2 300 - 1 305 - 1 - - - - - - - - - - - - -			

表格 2.2.3 液晶波片 H13195 曲线函数拟合

MATLAB 中判断拟合程度的名词解释

一、SSE(和方差, The sum of squares due to error) 该统计参数计算的是拟合数据和原始数据对应点的误差的平方和,计算公式:

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} \omega_i (y_i - \hat{y}_i)^2$$

SSE 能反应一个数据的离散程度, 越接近于 0, 说明模型选择和拟合更好, 数据预测也越成功。

二、RMSE(均方根, Root mean squared error) 该统计参数,也叫回归系统的拟合标准差,是 MSE 的平方根,计算公式:

$$RMSE = \sqrt{SSE/n} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \omega_i (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

三、R-square(确定系数, Coefficient of determination) "确定系数"是定义为 SSR 和 SST 的比值,故

$$R - Square = \frac{SSR}{SST} = \frac{SST - SSE}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

(1)SSR: Sum of squares of the regression,即预测数据与原始数据均值之差的平方

和, 公式:
$$SSR = \sum_{i=1}^{n} \omega_i (\hat{y}_i - \overline{y})^2$$

(2)SST: Total sum of squares, 即原始数据和均值之差的平方和,公式:

$$SSR = \sum_{i=1}^{n} \omega_{i} (y_{i} - \overline{y})^{2}$$

"确定系数"是通过数据的变化来表征一个拟合的好坏。由上面的表达式可以知道"确定系数"的正常取值范围为[01],越接近1,表明方程的变量对 y 的解释能力越强,这个模型对数据拟合的也较好。

从表格 2.2.3 中可以看出,正弦函数方差 SSE 为 24.7447,为最低,确定系数 R-square 值为 1, 拟合程度的名词解释中可以得到正弦函数拟合较好。实验中,液晶波片的工作电压范围内,延迟量与驱动电压是点对点的关系,并不是一条连续线。在实际应用中,应根据实际需要对其进行可控调节,对这些点图做拟合函数,得到的拟合函数方程可以用于调节液晶波片相位。但是存在的问题是,液晶波片的工作电压范围内,延迟量与驱动电压并不是严格对应的,存在一定误差。而实际应用时,希望延迟量与驱动电压是严格对应的,即液晶波片的延迟量与驱动电压关系还未严精确定标,如何稳定驱动电压与延迟量的关系,目前还在实验探索阶段。本小节的目的在于提出可以利用 MATLAB 拟合曲线函数的方法,在后续需要拟合曲线函数时可以借鉴使用。

2.3 液晶波片双折射滤光器的光学结构

本文所涉及的双折射滤光器由 5 级宽视场 Loyt 结构组成。每一级采用典型的宽视场可调谐 Lyot 结构,即将单级晶体等分为二,光轴与偏振轴成±45°, 且相互垂直,实现宽视场的功能(见图 2.3.1)。由于温度变化和晶体延迟误差 带来的谱线漂移,在每一级 Lyot 结构加入一个可调节相位延迟的液晶波片。



图 2.3.1 单级液晶 Lyot 滤光系统

光学结构并未按照公式(7)中的规律来排列,而是把双折射晶体厚度最厚的 Lyot 级放在中间,其它级按照厚度均匀放在两边,因为每一级 Lyot 结构之间 是相乘的关系,即使调整他们之间的位置,只要保证每一级 Lyot 的结构不发生 改变,实际上并不会影响总体的滤光效果。这样做的原因是,晶体厚度越厚,对 温度的敏感性越大,温度的变化会引起双折射晶体的折射率的变化,会产生晶体 相位延迟误差,引起谱线漂移。将厚度最厚的晶体放在中间是减小温度对其的影响,使温度对整体光路影响相当。

滤光器滤光系统光学元件排列如图 2.3.2 所示:



图 2.3.2 滤光系统光学元件示意图

其中: P-偏振片; B-冰洲石; H-1/2 波片; LCVR-液晶波片(标注为最厚一级 Lyot 结构,其余排列情况类似)。

为获得窄带滤光,在入射端加一个干涉滤光片。

这台双折射滤光器共有 38 片光学元件,其中液晶波片边长为 37mmx37mm,每个液晶波片有两根电极线(图 2.3.3),双折射晶体及偏振片边长为 32mmx32mm,

封油玻璃为 \$ 38mm, 封窗玻璃为 \$ 35mm, 干涉滤光片为 \$ 50mm。



图 2.3.3 液晶波片实物图

2.4 小结

本章主要介绍了双折射滤光器的光学原理,以及三种相位调制方式,详细说 明了液晶波片的工作原理及对其实验室测量的驱动电压和相位延迟关系做了曲 线函数拟合,选择出较适合的拟合函数,为以后液晶波片精确定标做拟合时提供 参考。最后介绍了应用在本滤光器的光学结构及光学元件尺寸。理解滤光器的工 作原理有助于机械结构设计方案的构思。

第三章 机械结构设计

研制的液晶波片双折射滤光器所要实现的功能是通过调制液晶波片正常观测H a 波段太阳像。从整体功能系统上来看,滤光器主要分为三大部分:光学结构、机械结构和电控系统。光学结构和电控系统有相应的人员设计研制,由于本滤光器在设计机械结构时,光学元件的数量及尺寸大小、公差配合形式都已经确定,所以在本论文中只是介绍了光学原理及光学结构,对其光学设计和电控系统部分不做详细讨论。本论文更侧重的是如何设计安装这些光学元件的机械结构,并使机械结构满足总的设计要求,即需满足光学元件固定精度、密封、温控安装等要求。

本章主要详细介绍机械设计方案的设计过程。总体设计思路,如图 3.1.1 所示,首先提出总体设计要求,从设计要求中提炼出滤光器所要满足的功能,这些功能对机械结构如形状、位置、安装等有怎样的约束。提出设计构思,给出设计设计方案,设计方案需考虑所有因素,但设计方案并不是完全确定结果,而是利用计算机软件进行三维建模,在建模过程中反复完善的。三维建模后进行计算机辅助公差设计,满足总设计要求,最终给出零件工程图进行加工制造,最后装配、检查,对问题零件或结构进行修整。



图 3.1.1 机械结构设计流程

3.1 机械设计总体要求

滤光器最终目的是能够在怀柔基地太阳天文望远镜上进行正常观测,所以滤 光器安装空间由望远镜确定,并且望远镜上已有固定滤光器底座,需要根据底座 尺寸来确定本滤光器的外形结构及尺寸。滤光器安装在太阳望远镜 H α 通道后箱 体上,望远镜在赤经、赤纬两个方向上任意转动。

滤光器机械结构的最终目的是保证光学系统的正常运行,即在重力等外力作 用下以及温度变化状态下,结构变形在允许公差范围内,使光学元件保持在其标 称位置和方向。

设计要求

为使滤光器能正常工作,其机械结构需满足以下要求:

- 1) 保证各光学元件空间位置准确相互平行度: ±2'; 晶体光轴的方位角:±3';
- 2) 需将5个液晶波片的电极线引出到滤光器之外;
- 3)为消除光在光学元件界面上的反射损失,光学元件浸在折射率相近的硅油中,

防止硅油泄露和污染变色,避免气体进入晶体工作面,损害成像质量; 4)工作温度:42℃,温度波动误差:±0.01℃,温度状态可实时监控; 5)满足已有安装空间尺寸和质量要求,并方便安装和拆卸。

3.2 设计方案研究

设计方案的确定非常重要,决定了后续计算机建模的思路和步骤。从 3.1 总 体要求中,可以得到:

首先,整体上,滤光器除自身重力影响外,不受其它外部作用力。因此只需 考虑滤光器安全牢固固定在望远镜上即可。由于滤光器调制方式为液晶波片电光 调制,内部不存在机械运动件,所以滤光器工作时处于静平衡状态,对结构件强 度、疲劳等要求降低。

其次,滤光器的外部安装固定方式及尺寸大小已经确定,在进行外部结构设 计时只需按照这些来进行设计即可。

最主要构思的是滤光器内部结构。主要约束条件为:准确定位光学元件,使 光学元件浸泡在硅油中并密封无外漏,各电极线(包括液晶波片和温控系统)的 引出,各结构件材料的选择。

对于以上内容,将在下文进行详细介绍。

3.2.1 光学元件的固定

由 2.3 节介绍的滤光器光学结构可以得到:

滤光系统的晶体尺寸并不完全同一,即液晶波片尺寸为37mm*37mm,而其 它晶体尺寸为32mm*32mm,并且每个液晶波片带有两根电极线,这就要求滤光 器内部晶体室不能作为一个完整结构体,需要设计为分体式组合结构。从晶体的 安装方式考虑,主要有轴向安装和径向安装。

轴向安装——晶体安装方式为晶体室的轴向方向,例如机械调制方式的分级 安装。图 3.2.1 显示的是 H a 机械调制双折射滤光器轴向安装示意图,即图的上 部分是待安装晶体,晶体按照箭头方向顺序依次从下向上装配,图下部分是安装 工具和一级晶体室。这个 H a 双折射滤光器晶体室为八级 Lyot 结构,图 3.2.2 为 这八级(未画出机械旋转结构)的晶体室结构,每一级的晶体安装方式为轴向安 装,每两级之间由螺钉连接,并由定位销定位。





图 3.2.1 轴向装配示意图



图 3.2.2 H a 滤光器晶体室示意图

如果选择这种结构,那么液晶波片滤光器需要分为五级,并由螺钉连接和定 位销定位。由图 3.2.2 可以看出,每一级晶体轴向尺寸并不相同,因此每一级的 尺寸不同,为保证定位要求和各级配合,增加了公差设计量。

径向安装——例如美国高山的 Chotel 滤光器(图 1.2.1),即从径向方向分为 两部分组合安装。液晶波片双折射滤光器采用径向安装方式,可分为两分体组合 形式。连接方式为螺钉连接。分体数量上的减少的同时,也减少了定位销的使用, 每级之间的公差设计量减少。难点是在半圆柱的金属材料上如何切削尺寸不一的 矩形凹槽,并且保证凹槽中心在同一高度上。铣刀可以铣出矩形,但铣刀对矩形 边缘不能切割出径向方向的直角,解决方案是对直角边钻孔,使其不影响波片的 安装,如果不钻孔则建议采用电火花,电火花加工精度可达 0.1mm,成本较高。

因此,光学元件的安装方式选择为径向安装,晶体室设计为两个半圆柱体组 合安装。

液晶波片电极线的引出方式的确定。美国高山 Chotel 滤光器从一侧引出,因为其光学元件之间靠粘性为 100000cs 的硅油连接,而液晶波片滤光器使用的是粘度为 165-185mm²/s 的硅油,相比而言,本滤光器使用的硅油的流动性更强,如果采用类似一侧引出,则对电极线接口的密封性要求严格,同时接口与晶体室之间密封要求更严格。且从一侧引出,电极线会影响连接处表面配合,连接处表面配合不平会影响晶体室内晶体光轴方向,对观测不利,因此此方式对晶体室两分体连接处密封要求更高。考虑本滤光器使用的硅油流动性较强的特点,可采用套筒密封结构(具体设计见小节 3.2.2),可将液晶电极线从晶体室一侧打孔引出,避免从晶体室两分体连接处引出。

光学元件之间靠硅油连接,硅油厚度不能完全确定,因此晶体室凹槽尺寸公差设计上,需对硅油厚度留有余量。具体设计方案为,如图 3.2.3 所示,以最厚一级 Lyot 结构的液晶波片为基准,液晶波片的凹槽厚度①为正公差,其前后晶体的凹槽尺寸厚度②为负公差。这样当实际装配时,加上硅油厚度,晶体厚度②比光学尺寸稍大可以使晶体边缘位于液晶波片的凹槽中,而并不影响液晶波片的安装。同时凹槽③一端留有 1-3mm 的余量,确保光学元件完整安装后可根据余量安装合适厚度的填充玻璃,填充玻璃大小为 32mm*32mm,只起填充作用,不影响整体光学结构。





光学元件的轴向固定。采用径向安装光学元件,则需要考虑其轴向固定。由 于采用套筒密封结构,则可以利用套筒盖子进行轴向固定,具体思路为:在滤光 系统两端分别加大于光学晶体外接圆的圆形光学填充玻璃,套筒盖子的通光口径 大于滤光光学元件边长,并小于此圆形光学填充玻璃直径,用套筒盖子端面压住 圆形光学填充玻璃,这样既不直接接触滤光光学元件,又间接从轴向固定整体光 学元件。

对于其它需要轴向固定的玻璃,可以在不影响光路通光情况下,优先选择螺 纹压圈固定。压圈固定,可以使玻璃均匀受力,且 2-3 圈螺纹就可牢固固定。

3.2.2 密封设计

实际工作中,所有光学元件之间由折射率与晶体折射率相近的硅油作为介质 连接在一起,减少光学元件表面反射和面形误差,保证光学成像质量。但硅油流 动性强,且易受温度变化而体积膨胀或收缩。当硅油泄露,空气进入滤光器内部, 气泡会影响光路成像质量。因此滤光器所有滤光光学元件要浸入硅油中,并且无 外漏。

因此结构设计上必须确保密封性良好。为保证密封可靠性,在设计时全部采 用端面密封。而由于液晶波片的引出,难以做到晶体室的自密封,因此设计使用 套筒结构,整体的密封设计即可简化为晶体室套筒和两端盖子的密封。套筒和两 端盖子形成一个密封的圆柱体,使其密封线长度缩短,易于维护。而液晶波片电 极线可用插座引出,因此需选用密封性好的插座。这种结构下,主要密封的地方 有:套筒盖与套筒之间密封,套筒盖通光孔的密封,液晶波片插座的密封。下面 将对这些密封结构进行详细讨论。

流体泄露公式:

古

定平行平板见的缝隙流量:
$$Q = \frac{bh^3}{12\eta L} \Delta P$$
 公式(8)

同心环缝管中的轴向缝隙流量: $Q = \frac{\pi dh^3}{12\eta L} \Delta P$ 公式 (9)

其中: b, 缝宽; h, 缝高; L, 缝长; d, 轴的直径; η , 流体的动力粘度; Δ P, 压强差。

因为硅油粘度 n 确定,由公式(8)、(9)可以看出,要减少漏油量,即减 小Q值,就要减小b、d、h 和 △ P,增大L。可采取如下措施:

1、提高研磨接合面的位形公差精度,降低接合面的表面粗糙度,以减小b和h。

2、在确保光学元件的定位及其它相关功能的正常使用下,减小晶体室圆柱 半径,以减小d。

3、减小压强差,对其做补偿设计。具体设计思路如下:

光学元件不仅要全部浸入硅油中,而且要保证硅油在光学元件之间流动畅 通,所以在晶体室晶体凹槽一侧设计一个矩形通槽,可以贯穿整个光路。安装时, 实验室的温度为 20℃,而滤光器的工作温度为 42℃,因此,密封后的滤光器在 工作状态时,硅油体积会随温度变化而有细微变化。

根据 3.2.1 小节中的结构方式建模后利用 solidworks 软件可估算体积的功能,

采用体积相减,即晶体室体积减去光学元件组合后的体积,估算出装配后晶体室 缝隙中硅油体积约为1.82x10⁴mm³,硅油膨胀系数为8.4x10⁴/℃,以升高20℃估 算,硅油体积变化约为305.76mm³。因此硅油体积变化的因素不能忽视。

滤光器开启时,会从环境温度升高到42℃,此时升温会使硅油膨胀而溢出; 滤光器所在的望远镜为露天工作,一旦恒温装置工作异常,温度有可能下降几十 度,当温度降低时,硅油收缩体积变小,使空气进入腔体,光路中出现气泡。为 避免气泡进入光学元件之间,影响成像质量。因此要设计针对硅油体积变化的结 构,补偿压强差引起的缝隙泄露。

对此结构可参考机械调制式双折射滤光器。如图 3.2.4.



图 3.2.4 Ha 机械式滤光器硅油缓冲室的安装

从图 3.2.4 中可以看出,机械调制双折射滤光器调节硅油体积装置为外置一个油壶,作为硅油缓冲室。此装置的优点是可以清晰的看到油壶内硅油的体积变化,缺陷是占用外部体积,需独立再加工油壶。

在液晶波片双折射滤光器中,由于没有旋转电机及传动装置,相比传统滤光器,硅油体积变化小,考虑硅油体积变化因素,在套筒盖子与晶体室接触一段挖一个环形凹槽,可存储少量硅油,作为硅油缓冲气室,补偿硅油因温度变化而引起的体积变化,避免硅油溢出和气泡的进入。利用 SolidWorks 估算开槽体积约为 1947.5mm³,大于膨胀体积 305.76mm³约六倍,有充足空间来调节硅油变化体积。同时在盖子上开孔,可从外部填充硅油,并用 O 型圈密封此孔。这种设计减少了油壶的外部使用,减少了使用体积,不用再设计加工油壶,同时也降低了漏油的风险。

由于液晶波片代替了传统的机械旋转 1/2 波片,即用电压驱动方式代替了步 进电机驱动,整个滤光器都是静密封,因此大大简化了密封结构设计。需要密封 的地方为,套筒两端与套筒盖子端面密封和盖子的自身密封,液晶波片电极线接 口密封。对于液晶波片可以将所有电极线汇集在一个插座上从套筒盖子一端引 出。插座的选择很关键,既要自身密封性好,又要保证插头与盖子之间的密封性 好。真空插座有着较好的密封性,本结构中的选用原则是首先密封性好,可做到防止硅油泄露,其次体积小,插座在滤光器中占用体积应越小越好。经过对比,根据插座选用手册,选择了雷莫 EEG 型 10 芯真空密封插座(图 3.2.5),防护等级为最高的 IP68 型,即可做到完全自密封,外部结构有自带 0 型圈,能做到与外部端面完全密封。并且有配套的插头,插头与插座有自锁功能,安全可靠。体积较小,为设计结构节约空间,减小滤光器体积和质量。



图 3.2.5 雷莫 EEG 真空插座结构图

其它密封都为端面静密封。对于静密封,选用0型圈即可达到密封目的。选用0型橡胶密封圈有如下优点:

a、密封结构简单,安装部位紧凑;

b、有自密封作用,密封性能好,静密封时可做到没有泄露;

c、0型圈及沟槽尺寸可参照相关国家标准设计,便于外购。

3.2.3 温度控制系统安装

温度变化,会改变晶体长度和折射率,引起波带位移。怀柔太阳望远镜置放 于室外,而怀柔一年四季温度变化大,甚至一天之内温度变化可达到 10 到 20℃, 大的温差会带来谱线漂移,对观测造成不利,因此需提供稳定的恒温环境,使得 温度对滤光器的谱线漂移影响降到最小。恒温温度的选择要高于室外一年中最高 温度,且温度不易过高,影响其它材料使用效果和寿命。所以设计要求中,恒温 环境温度为 42℃±0.01℃。温度控制系统的安装也是机械结构设计的一部分,因 为要留给温度控制系统充足的空间,并且安装其相应的温控元件。

温度控制系统包括,加温、测温、保温三个部分。加温分两个部分,一个是 对晶体室的加温,将加热膜或者迷绕电阻丝安装在晶体室套筒上(无论何种加热 方式,并不影响机械结构设计),通过热传递方式加热;另一个是对滤光器两端 面的加温,即在端面的固定板上安装加热板,减小滤光器两端面外部空气温度与 滤光器内部温度差异,同时为减小两端面温度对滤光器的影响,在滤光器两侧设 计有装入隔热玻璃的隔热装置。

Hα机械式双折射滤光器的测温方式是将温度计置入晶体室,如图 3.2.6,其 中红色部分为温度计,温度计底端位置为滤光器中部,保证滤光器最厚晶体部位 温度精度,距离晶体边缘位置 16.5mm。这种结构的缺陷是温度计精度低,且温



度计要引出晶体室时要保证接口处完全密封。这增加了机械加工难度。

图 3.2.6 H a 机械式滤光器晶体室剖面图

本论文研制滤光器的测温采用 3 个温度传感器轴向均匀分布在滤光器晶体 室套筒上。2.3 小节中说明了为使光学元件温度分布均匀,调整了各级 Lyot 结构 顺序,把最厚的双折射晶体放在中部。在设计恒温控制电路的时候,将以此为依 据,合理安排控温点,即首先保证最厚晶体部位的温控精度。此次温度探测传感 器选用 pt100 传感器(图 3.2.7),测温点选择均匀分布在晶体室套筒壁上,即中 部一个测温点,靠近两端分别两个测温点,共计三个测温点。固定方式可在套筒 壁上开槽埋入测温元件,测温元件距离液晶波片边缘位置约 15mm,小于机械式 置入温度计距离晶体的位置。这种测温方式一可以节约空间,二测温元件更靠近 光学元件,使测温更加可靠且不影响密封。



图 3.2.7 温度传感器和羊毛毡

其中图的上部和左下为 pt100 传感器实物图与人民币 5 角硬币对比图, 右下为 10mm 厚羊毛毡

保温采用陶瓷纸、羊毛毡等保温元件,需考虑保温元件的空间安装尺寸,预 留约 30-40mm 厚度空间。

3.2.4 外部结构设计

滤光器要求使用在怀柔观测基地的太阳望远镜上,因为在望远镜上使用过滤 光器,因此该位置上已经有滤光器固定装置,并且滤光器在太阳望远镜上使用多 年,其固定方式牢固稳定。为避免拆装固定结构,减少设计工作量,所以在原装 置上固定本滤光器。即本滤光器的外部固定方式是已知的,并且空间大小在一定 范围内,利用原有结构,在其基础上进行改造,以适合本滤光器的大小。对固定 底座及原固定装置进行二次利用,减少了机械加工量,节约了成本。



图 3.2.8 滤光器固定底座示意图

图 3.2.8 所示为滤光器固定底座示意图。图中白色部分固定在望远镜箱体上, 灰色部分则靠螺钉与底部固定。设计原则是滤光器径向方向要与圆形孔配合,轴 向方向不能发生位移。

外部材料要求:保温性能好,机械加工性强,硬度大,密度小,避免使用金属材料。

3.2.5 材料的选择

审查滤光器设计要求,对材料进行初步选择很重要。因为对于温度、密封等 要求,将限制材料的选择范围。对材料的选择,可以对滤光器的重量和尺寸等进 行估计,有助于发现矛盾之处,以进一步改进结构设计。同时,本次结构设计使 用软件为 SolidWorks,可以在建模同时输入材料,对其进行结构分析。

材料的选择原则是参考先前使用的滤光器材料。因为以前使用过的滤光器的 材料都是经过时间和实际使用后获得肯定的,但是新型材料随之科学技术的发展 而发展,很多新型材料在某一方面或者多方面的性能有了很大的突破和提高,在 这个基础上,可以寻找性能相当的材料与传统滤光器材料进行对比,从而选择出 最适合本滤光器的材料。 以晶体室为例。较常使用的材料为铝合金 7A04(LC4),该铝合金属于超 硬铝,有良好的耐磨性,常用于航空航天。以 7A04 铝合金为基准,找同系列常 用材料及光机常用材料进行对比,找出适合本滤光器的材料。材料对比见表 3.2.1.

材料(棒 材、T6)	密度 kg/m³	热导率 ₩/(m*℃)	比热 J/(kg*℃)	线膨胀系数 /10-6*℃	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	备注
7A04 铝合金 (LC4)	2800- 2850	155 (20℃) 159 (100℃)	921(100°C)	22.0 (−50 [~] 20℃) 23.1 (20 [~] 100℃)	471	530	GB/T 3191-1998 HB 5202-1982,高强度棒 材
7A05	2780	137 (20℃)	875 (20℃)	21.4 (−50 [~] 20℃) 23.1 (20 [~] 100℃)	317	372	有应力腐蚀倾向
7A09 (LC9)	2800	159 (50℃) 163 (100℃)	888 (50℃) 904(100℃)	22.0(20 [~] 100℃) 23.1(20 [~] 125℃)	435	500	GB/T 3191-1998 HB 5202-1982,高强度棒 材,板材性能较 7A04 好,棒材性能相近
7075 (T7351 0)	2800	130 (20℃)	796 (25℃) 879 (50℃) 921(100℃)	21.6 (−50 [~] 20℃) 23.4 (20 [~] 100℃)	331	469	对应力腐蚀敏感,多 为板材,选用数据为 矩形棒材
2A12 (LY12)	2700	165	921(100℃)	21.1 (−50 [~] 20℃) 22.9 (20 [~] 100℃)	380 (20℃)	520 (20℃)	有时也作为套筒材料 (挤压型棒材 T4)
以上几种为常用超硬铝牌号下铝合金的参数,数据摘自《铝合金应用手册》,林钢,林慧国,赵玉 涛主编,机械工业出版社,2006.7A04(LC4)为滤光器常用铝合金							

表格 3.2.1 铝合金材料对比

从表 3.2.1 可以看出,7A04 导热性能较好,硬度大,其它滤光器使用中,不 污染硅油,机加工性好,比较适合本滤光器。同样,其它零件材料选择参考本方 法,综合考虑设计要求,对液晶波片双折射滤光器的材料选择见表 3.2.2.

表格 3.2.2 液晶波片双折射滤光器零件材料

名称	材料	选取理由			
晶体室		a、与光学元件接触,与晶体的膨胀系数相近,套筒与晶体室使用 同一材料有利于避免因温度变化而产生的应力问题,该铝合金线膨			
套筒	7A04 铝合金	胀系数为 22. $0x10^{6}/C$ (-50 [~] 20℃时) , 23. $1x10^{6}/C$ (20 [~] 100℃ 时); 室温环境下冰洲石晶体的主热膨胀系数为平行光轴 26. $6x10^{6}/C$ 垂直光轴-5. $6x10^{6}/C$.			
套筒盖		20.0x10 / C、亚直元福 5.0x10 / C; b、与硅油兼容性好,长期使用,不污染硅油; c、导热性好,导热系数大,达到热平衡的速度较快;			
		d、密度小,机械加工性能好;			
0型圈	氟橡胶	氟橡胶在硅油中溶胀率较小;			
固定支架	机械用高 强度酚醛 层压布板 3206	对于两端固定滤光器部分,要求为非金属,热膨胀系数小,保温性 能好,机械加工性好。可在塑料材料中选取,对其选用方法: 1、热固性的比热塑性的热稳定性好; 2、热固性塑料里机械性能好的为酚醛类、环氧类; 3、在常用材料里,层压布板比纸板机械性能和热性能好; 4、经对比,在布板里选出两种常用的,即3026,3240; 5、可用密度较小的3026(1.3-1.5g/cm ³)。			
硅油	275 号 选用与光学元件折射率(1.57)接近的,中昊晨光超高真空扩散泵 硅油 油 275,折射率为 1.5765-1.5785。				

其中铝合金需要进行无色氧化处理,不发黑的原因是避免表面黑色氧化层脱 落,污染硅油,进入光路,影响成像。螺纹连接处的螺钉均选择不锈钢螺钉。

3.3 小结

双折射滤光器在我国天文望远镜上成功应用多年,可以对比参照一些滤光器的结构。本章在已知光学结构及光学元件尺寸的情况下,根据滤光器总体结构设计要求,参考怀柔基地原有 H α 机械调制双折射滤光器机械结构进行对比设计。 主要从晶体安装、密封、温控安装、外部安装、结构材料等五个方面具体进行方案研究,重点分析了晶体安装方式和硅油密封及其体积变化问题,通过内置凹槽 来调节硅油体积变化,最后选择出最适合本滤光器的机械结构方案。

第四章 计算机建模与辅助公差分析

根据第三章中的设计要求和设计方案,可以快速在 SolidWorks 中建模。采 用自下而上的方式建模,即根据设计方案先绘制每个零件的模型,然后组装为装 配体。建模可以立体看到模拟图,可以对设计方案中有不足或改进的地方进行直 接修改。

4.1 SolidWorks 软件建模

常用三维设计软件有 AutoCAD、ProE、UG、SolidWorks 等,它们的共同特 点是利用一些基本的几何元素,如矩形、园等,通过一系列几何操作,如平移、 旋转、拉伸等来构建复杂的几何物体。鉴于 Solidworks 功能强大、易学易用和技 术创新三大特点,选用 SolidWorks 作为本机械结构设计软件。SolidWorks 能够 提供不同的设计方案、减少设计过程中的错误以及提高产品质量。本次机械结构 设计使用软件为 SolidWorks(2014 版)。

第三章详细介绍了滤光器设计方案,对其中设计难点、重点等进行了讨论, 根据设计方案,对本滤光器建模,下面各图为 SolidWorks 三维建模效果图。



图 4.1.1 SolidWorks 滤光器建模内部示意图

图 4.1.1 左上为晶体室与晶体之间的配合,右上为晶体室之间的配合及与两端套筒盖的配合,其中凹槽中的孔为液晶波片电极线引出孔,为使电极线在插座

处有足够的空间汇集,在晶体室一侧靠近液晶波片真空插座方向切除部分,留出 空间。图下方为测温传感器的安装位置,两端为隔热装置和干涉滤光片装置。



图 4.1.3 滤光器与底座配合示意图

图 4.1.2 与图 4.1.3 展示了滤光器外部结构,及固定方式。为减少固定底座设 计、安装,在原有固定结构上对本滤光器进行外部结构设计。原有结构的材料在 应用过程中性能稳定,因此在加工时,部分结构可以使用原固定结构的材料进行 二次加工,对其进行改造后应用于本滤光器。原材料及结构的再次利用,减少机 械加工量,降低了成本。

滤光器内部装配体结构图如下:





图 4.1.4 液晶波片双折射滤光器装配图

其中: 1, 2-晶体室; 3-光学元件; 4,10-封油玻璃; 5, 6-LEMO--EEG 真空插座 (电极线线未画出); 7-滤光器套筒; 8,9-套筒盖子; 11,12-压圈; 13-隔热装置; 14~17-螺钉; 18~21-O 型密封圈; 22-干涉滤光片装置

图 4.1.4 为滤光器内部结构剖面图,图中清楚地展示出晶体的固定方式,晶体 室之间的连接关系,整体的密封结构,硅油的油槽及硅油体积缓冲槽,两端的隔 热装置和干涉滤光片装置结构。关于晶体室和晶体室套筒之间的定位靠定位销定 位,隔热玻璃和干涉滤光片的固定方式为压圈螺纹固定。

4.2 计算机辅助公差设计

公差设计是已知零件的设计公差或装配体的配合公差,按照尺寸链传递误差 的方法计算公差,并验证是否满足装配要求。尺寸链常用的分析方法是图解法和 计算法。在尚未利用计算机进行公差分析前,主要计算方式为手工根据数学理论 模型计算,这种计算方式需要花费较长时间且精度不高。今年来随着计算机辅助 公差设计的深入研究,越来越多实用,可操作性强,精度高的设计方法被应用。 本论文主要使用的是计算机蒙特卡洛公差设计方法,具体方法将在 4.2.2 中介绍。

4.2.1 公差设计基本概念

1、公差(Tolerance)和配合(Fit)

机械加工时,加工工件尺寸等要求并不能无误差的完成,公差是指工件基本 参数的变动范围,加工结果在这个变动范围内都属于合格件,即能满足工件互换 或配合的要求。标准公差按照精度分为20个等级。每个等级中孔轴偏差又有不 同的划分,见图4.2.1,以满足不同配合要求。公差包括尺寸公差、位形公差和 表面粗糙度等。



图 4.2.1 基本偏差示意图

配合是指基本尺寸相同的,相互结合的孔和轴公差带之间的关系。配合有基 孔制和基轴制,分为间隙、过渡和过盈配合。可根据配合关系、功能等来决定零 件的具体公差。根据实际需求,优先选用常用孔轴配合。已知公差等级和配合关 系,可利用计算机自带公差插件计算公差。

2、公差链(Tolerance Chain)

在机械装配或零件加工过程中,由互相连接的尺寸形成的封闭的尺寸组成为 公差链,也称尺寸链。在公差尺寸中构成封闭环的每个尺寸成为链环,链环分为 封闭环和组成环。封闭环是指在加工或装配过程中最后形成的一环,它的误差是 所有组成环误差的累积与综合;组成环是指尺寸链中除封闭环之外的所有尺寸, 它的误差大小只是由加工方法和设备决定,不受其它环影响。组成环分为增环和 减环,增环是指当组成环(增环)增大时,封闭环也增大;减环是指组成环(减 环)增大时,封闭环减小。



图 4.2.2 尺寸链示意图

如图 4.2.2 所示, A₀为封闭环, A₁、A₂为组合环, 且 A₁为增环, A₂为减环。 尺寸链一定是封闭的, 且各组成环间的尺寸关系是相互关联的, 其中一个发生改变, 其它的也相应会改变。

尺寸链的建立方式:

首先,确定保证的尺寸,即组成环,定位封闭环;

其次,从封闭环起,按照零件结构或装配表面关系,依次画出尺寸关系,作 为组成环,直到尺寸终端回到封闭环。

3、公差设计(Tolerance Design)

公差设计,包括公差计算、分析和分配。公差计算是指在己知尺寸公差条件 下推导计算未知公差大小;公差分析为验证公差是否满足要求;公差分配是指优 化公差设计,使公差的选择满足装配功能要求的同时,能减小加工成本。根据尺 寸链计算封闭环或者组成环的公差,通过公差分析来验证公差是否满足要求,未 满足则重新修改公差,直到复合要求为止。然后利用公差分配来优化公差设计。

4、公差设计函数

根据尺寸链的各环关系,确定公差函数关系。设 n 为尺寸链中已知组成环和 封闭环的个数; x₁、x₂…x_n是相互独立的已知的组成环和封闭环尺寸及偏差,y 为 欲求解的封闭环或组

成环的尺寸及偏差,则公差函数为: $y = f(x_1, x_2...x_n)$

公差函数是计算机进行公差设计的依据。

4.2.2 计算机辅助公差分析方法

目前计算机辅助公差分析方法主要分为两种:极值法和统计公差法。极值法 是从零件可加工的极限尺寸出发计算待求公差,即已知所有组成环的最值求解封 闭环的最值。统计公差法是利用概率论与数理统计理论进行公差分析与计算,即 统计公差法不是完全互换性出发,在各组成环尺寸误差的分布规律已知的条件 下,把求解封闭环及其公差问题,当作一个随机变量的统计量处理。统计公差法 有很多算法,包括概率法、田口实验法和卷积法、蒙特卡洛模拟法等等。本论文 主要利用方法为极值法和蒙特卡洛法。

1、极值法

极值法从零件部件的完全互换性出发,根据各环尺寸的极限尺寸求解封闭环的极限尺寸。如图 4.2.3。



图 4.2.3 孔轴极限偏差示意图

极值法的基本公式:

封闭环的基本尺寸:
$$A_0 = \sum_{i=1}^n \xi_i A_i$$

其中: A₀-封闭环基本尺寸; n-组成环的个数; A_i-第 i 个组成环的基本尺寸; ξ_i-第 i 组成环的传递系数,对于线性尺寸链,增环ξ_i=1,减环ξ_i=-1. 此公式可作为公差设计函数。

封闭环公差:
$$T_0 = \sum_{i=1}^n \xi_i T_i$$

其中: To-封闭环的公差; Ti-组成环的公差

极值法是尺寸链计算的一种封闭环的极值:

极大值: $ES_0 = A_0 + T_0/2$

极小值: $EI_0 = A_0 - T_0/2$

极值法最简单的方法,计算的是极端情况下也可以互换或装配,而实际尺寸 链当中的各环的尺寸公差是随机变量,按极值法计算可以保证其零件的互换性或 配合的正确性。因此极值法主要适用于要求保证完全互换、公差等级高、组成环 环数较少的尺寸链,如孔与轴的配合,以及公差较宽松,如工艺尺寸链的计算。

2、蒙特卡洛法

蒙特卡洛方法实质上是随机抽样或统计试验的方法,是以概率论数理统计为 基础,通过对随机变量的统计试验、随机模拟来求解数学物理、工程技术问题近 似解的数值方法。它的主要思想是:当所求解问题是某种随机事件出现的概率, 或者是某个随机变量的期望值时,通过某种"实验"的方法,以这种事件出现的 频率估计这一随机事件的概率,或者得到这个随机变量的某些数字特征,并将其 作为问题的解。即已知组成环尺寸误差的分布规律,把求解封闭环及其公差的问 题,当作随机变量的统计量问题来处理。

一般情况下,运用蒙特卡洛方法模拟各环的尺寸值,在尺寸链中,将各组成 环在加工中获得的尺寸作为在公差范围内符合尺寸误差分布规律的随机变量,封 闭环由组成环尺寸值决定,可作为随机变量的函数。其流程图见图 4.2.4。



图 4.2.4 蒙特卡洛方法程序图

组成环尺寸 (公差)随机数的产生

首先产生(0,1)上均与分布的随机数,该随机数在高级程序语言中可以很 方便的利用,其中 Excel 的随机数公式是 RAND()。已知组成环尺寸(公差)的 分布规律,根据计算公式,将其换算成符合组成环分布规律的随机数。各分布规 律下的随机数换算公式见表 4.2.1。

对组成环进行 n 次模拟计算,利用公差设计函数对封闭环进行求解,得到封闭环的 n 个尺寸子样(A₀₁, A₀₂,…, A_{0n}),在此基础上对其进行计算。

封闭环的尺寸(公差)计算

封闭环的基本尺寸:
$$A_0 = \overline{A}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_{0i}}{n}$$

封闭环 n 个子样标准偏差:
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(A_{0i}-\overline{A}_{0})^{2}}$$

封闭环尺寸公差: T=6 σ =6 $\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(A_{0i}-\overline{A}_{0})^{2}}$ (采用 6 σ 法则,取 97.32%

置信水平)

封闭环的极值:

极大值: $ES_0 = A_0 + T_0/2$

极小值: $EI_0 = A_0 - T_0/2$

常用分布	概率密度函数 $f(x)$	随机抽样 X
均匀分布	$\begin{cases} 1/(b-a), & a \le x \le b \\ 0, & \ddagger c \end{cases}$	X = (b-a)R + a
标准正态分 布	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{x^2}{2}\right), -\infty < x < \infty$	$R_{\rm N} = \sqrt{-2\ln R_{\rm i}}\cos(2\pi R_{\rm 2})$
正态分布	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], -\infty < x < \infty$ $-\infty < \mu < \infty, \sigma > 0$	$X = \mu + \sigma R_{N}$
Log 正态分 布	$\begin{cases} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi x}} \exp\left\{-\frac{\left[\ln x - \mu\right]^2}{2\sigma^2}\right\}, & x > 0\\ 0, & x \le 0\\ -\infty < \mu < \infty, \sigma > 0 \end{cases}$	$X = e^{(\mu + \sigma R_w)}$
三角分布(辛 普森分布)	$\begin{cases} \frac{4(x-a)}{(b-a)^2}, & a \le x \le \frac{(a+b)}{2} \\ \frac{4(b-x)}{(b-a)^2}, & \frac{(a+b)}{2} \le x \le b \end{cases}$	$X \approx \begin{cases} a + (b-a)\sqrt{0.5R} , & 0 < R < 0.5 \\ b - (b-a)\sqrt{0.5R} , & 0.5 < R < 1 \end{cases}$
指数分布	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} , x \ge 0, \lambda > 0$	$X = -\frac{1}{\lambda} \ln R$
Weibull 分布	$\frac{c}{b}\left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1}\exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)\right]^{c}$ $x \ge a > 0, \ b > 0, \ c > 0$	$X = a + b(-\ln R)^{1/c}$
$eta_{{ m f}{ m f}{ m f}{ m f}}$	$\frac{(N+1)!}{n!(N-n)!}x^{n-1}(1-x)^{N-n}, 0 \le x \le 1$	产生随机数, $R_1 \le \le R_s \le \le R_{N+1}$ 一般抽样为 $X = R_{n+1}$

表格 4.2.1 常用蒙特卡洛模拟的随机抽样

4.2.3 计算机辅助公差分配

公差分配,即在对零件或装配体的尺寸大小、几何形状、材料性能、加工方 法和制造成本等各方面进行全面对比后,对零件尺寸或装配体配合公差进行合理 分配。公差设计可以有很多不同的公差分配方案,一般情况下,以制造成本最低 为主要原则。但是本滤光器研制主要要求是精度要满足要求,而且不是批量产品, 因此首先应满足功能需求,其次在此基础上同时考虑降低成本要求。

目前计算机辅助公差分配的方法主要分两类,一类是传统的分配方法,如等 公差法、等精度法、等影响法、等工艺能力法等;另一类是基于优化技术的分配 方法,如公差一成本模型、优化分配法和线性规划法等。传统的公差分配方法主 要是将影响公差的因素等分化,对公差欠缺较全面的考虑。而本滤光器采用传统 方法进行公差分配的情况下,在不同位置的公差,都必须遵循满足公差等级要求 高的接触面的公差要求,这样会增加制造成本,实际使用上并不会有明显改观。 因此本滤光器采用优化分配法进行公差分配。 优化分配法是指各组成环的精度不相等,可对精度等级高的组成环提高公差 等级,对精度等级低的组成环,可适当放宽公差,降低公差等级。

4.3 滤光器公差设计

以晶体室1为例,进行公差设计,其余参考此过程。



图 4.3.1 晶体室 1 的尺寸链图

其中,图中单位均为 mm。

如图所示,图中以晶体室晶体凹槽厚度为尺寸链,其中确定尺寸和公差已经标明,A₀为封闭环尺寸。在3.2.1 小节中已经阐述过,液晶波片凹槽尺寸厚度取正公差,而其它晶体元件凹槽厚度取负公差。液晶波片厚度为14.6mm,凹槽厚度尺寸为_{14.6⁴⁰⁵}mm,公差为0.3mm。其余尺寸公差未给出,将在公差分配时给出。

对 A₀的尺寸及公差求解可用 4.2.2 小节中的计算方法。分别用极值法和蒙特 卡洛方法对其求解,进行对比。

极值法:

封闭环基本尺寸: $A_0 = \sum_{i=1}^n \xi_i A_i$

=170- (5*2+13.6+17.4+28.96+8.7+13.06+14.6*5) =5.28

封闭环公差:
$$T_0 = \sum_{i=1}^n \xi_i T_i = 0.05 - 0.3 \times 5 = -1.45$$

若封闭环与其它未给公差等级相同,则 T=1.45/8=0.18125。对其进行公差分 配,晶体室晶体凹槽公差选为 0.1,其余可不标记,在工程图中标明选择基本偏 差为 f (精密级)加工即可。

蒙特卡洛法:

首先确定基本偏差为f(精密级),±0.1,即公差为0.2。随机数的选择为总尺寸选择标准正态分布,其余尺寸选择(0,1)区间均匀分布。利用 Excel 表格进行蒙特卡洛公差设计,其中循环次数为100次。根据4.2.2小节公式计算得,见图4.3.2。

S	Т	U	V	Ŵ	Х	Y	Z	AA	AB	AC	AD
								ŧ	讨闭环输	出区	
(0,1)均匀 分布随 机数	A10=13.06	(0,1) 均匀 分布随 机数	A11=14.6	(0,1)均匀 分布随 机数	A12=5	标准正 态分布 随机数	A13=170	AO	均值	标准差	公差
0.2943	13.018853	0.2638	14.17915	0.5421	5.0084	-0.5381	170.016	7.19102227	7.0585	0.2226	1.3358
0.6406	13.08811	0.8781	14.36344	0.2925	4.9585	0.30202	170.03	7.04038766			
0.4956	13.059112	0.1134	14.13402	0.7637	5.0527	-0.08	170.024	6.83761158			
0.0111	12.962217	0.998	14.3994	0.5265	5.0053	0.283	170.03	6.75691342			
0.5495	13.069907	0.7169	14.31507	0.0786	4.9157	-1.2054	170.004	6.92032476			
0.9392	13.147838	0.6911	14.30733	0.8041	5.0608	0.58226	170.035	6.97225449			
0.794	13.118805	0.5171	14.25513	0.2093	4.9419	0.75101	170.038	7.23357209			
0.6383	13.087653	0.9833	14.39498	0.917	5.0834	-0.2804	170.02	7.06205127			
0.6775	13.095509	0.4659	14.23976	0.6357	5.0271	-0.7895	170.011	7.08683436			
0.8866	13.137311	0.6457	14.29371	0.6928	5.0386	0.75971	170.038	6.97824203			
0.7887	13.117742	0.3523	14.20569	0.8299	5.066	-0.382	170.018	6.91586477			
0.9629	13.152581	0.0836	14.12509	0.1542	4.9308	2.14139	170.063	7.09355485			
0.8254	13.125087	0.184	14.1552	0.1148	4.923	-1.4098	170	7.25882547			
0.4488	13.049764	0.1701	14.15102	0.2358	4.9472	-1.0223	170.007	7.37058091			
0.2706	13.01413	0.866	14.35981	0.2129	4.9426	0.37464	170.032	7.21624109			
0.029	12.965794	0.586	14.27581	0.9279	5.0856	-1.0444	170.007	7.09723898			
0.5918	13.078352	0.4813	14.24438	0.3726	4.9745	-0.6062	170.014	6.82138679			
0.5848	13.076956	0.9099	14.37296	0.6526	5.0305	0.93926	170.042	6.99007114			
0.9616	13.152317	0.9706	14.39117	0.8394	5.0679	1.04408	170.043	7.22691938			
0.7101	13.10201	0.9149	14.37446	0.6575	5.0315	-0.0903	170.023	6.78275221		(

图 4.3.2 蒙特卡洛法求解封闭环

即用蒙特卡洛方法求得, A₀=7.0585,公差为 T₀=1.3358。

与极值法相比,蒙特卡洛方法求得封闭环尺寸偏差较大,公差较接近。蒙特 卡洛方法只是对生成零件尺寸值的预测,并不能完全确定值,当随机数发生改变, 最后所求得的值也随之发生变化。蒙特卡洛方法适合大量产品生产使用,并且这 些产品尺寸或公差符合一定分布规律,但不适合本滤光器的公差设计。因此在后 续为保证尺寸互换性和配合性本论文设计主要选择极值法。

4.4 小结

本章在第三章的方案研究基础上,利用 SolidWorks 软件进行计算机三维建模,并展示了建模成果。另一方面,详细介绍了本滤光器机械结构设计中利用的计算机辅助公差设计方法--极值法和蒙特卡洛方法,并举例说明极值法较为适合应用于本滤光器尺寸公差设计。

第五章 总结

5.1 成果展示

本文简要介绍了双折射滤光器的工作原理,为后续滤光器机械结构设计提供 理论依据。对液晶波片种类及调制原理做了详细介绍,确定液晶波片应用于双折 射滤光器的可行性,并对液晶波片驱动电压和延迟相位关系做了初步曲线拟合函 数工作,为其将来精确定标提供一种方案。

在已知光学结构尺寸信息情况下,根据设计要求对其进行机械结构设计。结构设计中具体讨论了光学元件的固定、密封设计、温控系统的安装、外部结构设计及材料的选择等设计方案,滤光器主体结构为晶体室和晶体室套筒,设计特点包括:光学元件固定为径向固定,轴向由套筒盖与晶体室两端机械配合固定;液晶波片所有电极线汇集至真空插座处引出,简化液晶波片引出结构;针对硅油因温度变化产生的体积变化,在套筒盖一侧留有足够空间的环形凹槽;在已有固定装置条件下,对原有结构进行二次利用,设计改造后应用于本滤光器。

结合设计方案利用 SolidWorks 软件进行计算机三维建模。对比了计算机辅助公差设计方法中的极值法和蒙特卡洛方法,最终选择极值法。

根据第四章的公差分析,对设计模型绘制零件和装配体工程图,依据设计工程图进行机械加工。加工零件及装配体实物图如图 5.1.1-5.1.3,可结合第四章中SolidWorks 建模效果图进行对比。



图 5.1.1 滤光器内部机械结构实物图

其中,左上为套筒盖子,盖子上插座为液晶波片插座;左下为晶体室;右边为套筒,套筒壁上凹槽为测温元件放置位置。



图 5.1.2 滤光器内部装配体实物图

其中左侧为入射光方向,左侧盖安装有干涉滤光片装置和隔热装置,右侧盖安装 有隔热装置。套筒壁上凹槽为测温元件放置位置。

密封测试

以填充玻璃或废弃偏振片等替代滤光器光学元件填满滤光器晶体室,如图 5.1.3 所示,以螺钉固定晶体室,安装晶体室套筒,同时安装密封圈和端盖玻璃, 固定有液晶波片插座一端套筒盖,随后将硅油灌至满晶体室与套筒盖接触面,固 定有凹槽的端盖。



图 5.1.3 内部填满玻璃的晶体室

晶体室充满硅油后,竖放和横放各静置 48 小时(图 5.1.4),均未发现漏油现象。 因此在室温条件下,密封设计可达到使用要求。



图 5.1.4 晶体室充满硅油的滤光器

恒温 42℃下的密封情况

在滤光器套筒壁凹槽处放置测温传感器,用加热膜包裹(图 5.1.5),同时串联 一个同等级的加热膜,用以客观测试温度升温情况,限制升温速度,避免因加热 膜升温过快但滤光器实际并未达到恒温情况出现。随后包裹泡沫保温层,将其连 接至恒温控制箱上,接通电源后,通过液晶显示屏观察温度情况。滤光器温度密 封测试图见图 5.1.6.



图 5.1.5 滤光器安装测温与加温装置

其中, 黄色为绝缘隔热材料, 用以隔绝交叠的加热膜



图 5.1.6 滤光器 42℃恒温下密封性能测试

对滤光器内部结构由室温 22℃加温至 42℃(图 5.1.7),温差为 20℃,滤光器在竖放与横放状态下各静置 48 小时,并未发现漏油,因此密封设计达到使用要求。



图 5.1.7 加温测试



图 5.1.5 滤光器实物图

其中,由于采用原有固定方式,因此在以前用的滤光器外部结构上进行改进,并 且大部分使用的是前滤光器的固定结构材料,减少设计工作量和机加工工作量, 节约了成本。

图 5.1.6, 5.1.7 中双折射滤光器为怀柔基地太阳望远镜上使用过的 H α 机械 调制双折射滤光器。与机械旋转 1/2 波片双折射滤光器(图 5.1.6,图 5.1.7)相 比,基于液晶波片的双折射滤光器的机械结构(图 5.1.1-5.1.3)得到简化,接合 面减少,螺钉及定位销孔减少,消除动密封的复杂影响,同时也减少了密封设计 强度,缩减了滤光器整体尺寸,半径从 45mm 减小到 32mm,长度从 277mm 减 小到 170mm,体积减小了 2/3。



图 5.1.6 机械调制双折射滤光器

其中,图中上部为旋转 1/2 波片装置,左下为单级 Lyot 结构滤光器,右下为七级 Lyot 拼接后的滤光器晶体室整体实物图。



图 5.1.7 机械调制滤光器外部结构图

机械调制滤光器是通过旋转电机带动齿轮旋转,齿轮与齿轮之间配合,带动 1/2 波片旋转,整个结构复杂,且多级配合,增加设计量,增加了连接螺钉和销 的数量。旋转电机(图 5.1.7 蓝色箭头所指)的使用增加了外部体积。这在空间 观测中会降低仪器的可靠性。基于液晶波片的双折射滤光器减少了旋转玻片及旋 转电机的使用,减少了油壶的使用,简化了机械结构,减小附加震动,减轻了载 荷重量,降低能耗。达到了小型化和轻型化的目的,为液晶波片应用于双折射滤 光器提供了可行方案,也为将来运用到空间天文望远镜提供基础研究。具体关于 两者的对比可参见表 5.1.1。

H α 波长双折射滤光器	机械调制滤光器	液晶波片滤光器
调制方式-调制元件	机械旋转调制-1/2 波片	低电压驱动调制-液晶波片
响应速度	秒级	毫秒级
Lyot 滤光结构级数	8级	5级
滤光器晶体室体积/mm ³	Φ90*277	Ф 64*170
晶体室重量 (不含光学元件)	4kg	1.9kg
测温方式	内置温度计	外置温度传感器
硅油体积缓冲室	外置油壶	内置环形凹槽

表格 5.1.1 两种滤光器机械结构对比

5.2 总结

本论文首次完成了基于液晶波片的双折射滤光器的机械结构设计,可以满足滤光器的使用要求。主要工作和成果如下:

1、采用径向装配的结构设计, 解决了因光学晶体外形尺寸不等带来的装配难问题;

2、首次以环形凹槽设计储存滤光器内的硅油匹配液,解决了因工作温度升降造成的硅油体积变化问题,该设计不仅体积小,也降低了漏油的风险;

3、采用 LEMO 真空插头,在紧凑的空间中解决了液晶波片驱动导线在密封结构 中引出的问题,取得了很好的密封效果;

4、利用 SolidWorks 软件进行三维建模,并通过计算机辅助设计,应用极值法实现误差分配。

基于液晶波片滤光器的结构设计,与机械调节的传统滤光器相比,体积为 Φ64x170mm³,重量为1.9kg(不含晶体),经过初步测试实验,满足滤光器的 使用要求。论文的完成将为该种滤光器在地基应用提供技术支持,为空间应用提 供技术储备。

5.3 展望

基于液晶波片的滤光器是首次在我国研制,在将来的光机电联调中,还会遇 到很多具体技术或工程问题,本论文拟合得到的液晶波片的驱动电压和延迟相位 函数关系还有待精确定标,滤光器在光学元件安装后,还要进行电控、温控系统 的研制以及试观测。

本论文的结构设计满足了液晶波片双折射滤光器的使用要求,但是在加工工 艺和材料选择方面还有待进一步研究,如材料表面处理后的杂散光如何抑制,是 否可改用其它表面处理方式;目前的保温材料的加工性能不是很好,可以再寻找 成型性更好的绝热材料、以及外形更小的测温探头。

在经费允许的条件下,在光学元件安装前,可以进行空间适用性试验,如机 械振动、热循环、UV 辐射、真空和辐照试验的性能检测方法与仪器。

参考文献

- [1] Loyt. B. Ann. Astrophys[J], 1944, 7, 31.
- [2] 艾国祥.双折射滤光器及其在天文学中的应用[J].天文学进展,1987, Vol. 5, No. 4, 317-329.
- [3] 王敬山, 艾国祥, 何凤宝等. 太阳多通道双折射滤光器. 1995.
- [4] 艾国祥,胡岳风.多通道双折射滤光器—— I.原理和视频光谱仪[J].中国科学(A辑),
 8, 1986.
- [5] 艾国祥,胡岳风.多通道双折射滤光器──Ⅱ.原理和视频光谱仪[J].中国科学(A辑),
 9,1986.
- [6] 苏定强, 贾正明. 中国天文光学仪器的进展[J]. 天文文献情报, 1992, Vol. 5, No. 2, 1-5.
- [7] AI Guoxiang. Progress in space solar telescope[J]. Advances in Space Research, 1998, 21, 305-314.
- [8] Deng Yuanyong, Zhang Hongqi. Progress in Space Solar Telescope[J]. Science in China Series G:Physics, Mechanics & Astronomy, 2009, Vol. 52, No. 11, 1655-1659.
- [9] C. Denker, J. Ma, J. Wang. IRIM An Imaging Magnetograph for High-Resolution Solar Observations in the Near-Infrared. Astronomische Nachrichten, Vol. 324, No. 4, pages 332 - 333, 2003
- [10] Elmore, Card. ChroTel Helium-I Lyot Filter, Technical report, 2005.
- [11] 张志勇. 近红外偏振分析器研制[D]. 中国科学院研究生院, 2007.
- [12] Zhang Zhiyong; Deng Yuanyong; Wang Dongguang; Sun Yingzi; Cao Wenda. Near-infrared HeI 1083nm Stokes polarimeter based on liquid crystal variable retarders, Proc. SPIE, 2005, 5901: 377~388.
- [13] 张志勇,邓元勇,王东光等.基于液晶波片的近红外偏振分析器[J].中国激光,2010, Vol. 37, No. 3:696-702.
- [14] 宋国锋. 太阳磁场测量技术与仪器的研究[D]. 北京理工大学, 1999.
- [15] 曹星烨. 基于液晶可调谐的宽光谱窄带 Lyot 型滤光器片 [D]. 浙江大学, 2008.
- [16] Paul R. Yoder, Jr. Opto-Mechanical System Design, 3rd[M]. 光机系统设计(第三版),周海宪,程云芳,译.北京:机械工业出版社,2008.
- [17] 烟村洋太郎,实际设计研究会.机械设计实践[M].王启义,监译,周德信,闻喜仁,陆 子男等,译.北京:机械工业出版社,1998.
- [18] 杨世模.0.1A和Ha滤光器结构设计[EB].南京天文仪器研制心.

http://sun.bao.ac.cn/smct/2.pdf.

- [19] 张锐,程灏波,杨世模等.空间太阳望远镜中的Ha双折射滤光器的设计[J].清华大学 学报(自然科学版),2005,Vol 45,No.5,654-657.
- [20] 华家骏,刘冠群.双折射滤光器的密封技术.
- [21] 李廷.太阳观测用 0.15Å双折射滤光器结构[J]. 仪器仪表学报, 1986, Vol. 7, No. 2, 141-148.
- [22] 李挺, 倪厚坤. 双折射滤光器的机械结构[J]. 北京天文台台刊, 1986, 8, 136-143.
- [23] 林钢,林慧国,赵玉涛主编.铝合金应用手册[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [24] 王文广主编. 塑料材料的选用(第二版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [25] 胡玲. 双折射晶体温度效应及其传感应用[D]. 武汉:武汉理工大学, 2015.
- [26] 李红霞. 双折射晶体与偏光器件的温度特性[D]. 山东: 曲阜师范大学, 2003.
- [27] Zeng Z. D., H. Y. Shen et al. Measurement of the refractive index and thermal refractive index coefficient of Nd :YAP crystal[J]. Appl. Opt., 1990, Vol. 29, No. 9, 1281-1290.
- [28] Gorach, Ghosh. Sellmeier coefficients and dispersion of thermo-optic coefficients for some optical glasses[J]. Appl. opt., 1997, Vol, 36, No. 7, 1540-1546.
- [29] Gorach, Ghosh. Temperature despersion in KTP for Nonlinear Devices[J]. IEEE Pho. Tech. Letter, 1995, Vol. 7, No. 1, 68-70.
- [30] Gorach, Ghosh. Sellmeier coefficients for the birefingent and refractive indexes of ZnGep:nonlinear crystal at different temperature[J]. Appl. Opt., 1998, Vol. 37, No. 7, 1205-1212.
- [31] Tang Zhou, Jinfeng Zhang, et al. Measurement of the thermo-optic coefficient of a barium fluoride single crystal[J]. Appl. Opt., 1994, Vol. 33, No. 13, 2620-2623.
- [32] David W. R., M. D. Brian, et al. Temperature dependent index of refraction changes in BaTi0[J]. Optics Letter, 1991, Vol. 16, No. 17, 1295-1297.
- [33] Zeng Z. D., H. Y. Shen, et al. Measurement of refractive indices and thermal refractive index coefficients of the Ti:Mg:LiNbO₃ crystal[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 1993, Vol. 10, No. 3, 551-553.
- [34] 徐浩, 沈鸿元, 等. Ti:Mg:LINbO₃晶体的折射率温度系数表示式[J]. 激光枝术, 1995, Vol. 19, No. 1, 1-6.
- [35] 玄伟佳, 王东光, 邓元勇, 等. 双折射滤光器的误差分析与性能优化[J]. 光学精密工程,

2010, Vol. 18, No. 1, 52–59.

- [36] 玄伟佳, 王东光, 邓元勇, 等. 光线追迹法在双折射滤光器误差分析中的应用[J]. 光 学精密工程, 2008, Vol. 16. No. 5, 771-777.
- [37] 李挺, 倪厚坤. 双折射滤光器机械结构设计[Z]. 南京天文仪器厂.
- [38] 华兆铭, 王亚男, 屈元根, 等. 太阳精细结构望远镜[J]. 天文学报, 1990, Vol. 31. No. 2, 174-180.
- [39] 杨世模. 0. 1Å和 H α 滤光器的结构设计[Z]. 南京天文仪器研制中心.
- [40] 成大先. 机械设计手册(第五版), 第一卷[M]. 北京: 化学工业出版社(第五版). 2013.
- [41] 成大先. 机械设计手册(第五版), 第二卷[M]. 北京: 化学工业出版社(第五版). 2013.
- [42] 成大先. 机械设计手册(第五版), 第三卷[M]. 北京: 化学工业出版社(第五版). 2013.
- [43] 成大先. 机械设计手册(第五版), 第四卷[M]. 北京: 化学工业出版社(第五版). 2013.
- [44][43] 成大先.机械设计手册(第五版),第五卷[M].北京:化学工业出版社(第五版).2013.
- [45] 林钢,林慧国,赵玉涛主编.铝合金应用手册[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [46] 袁贵星. 计算机辅助统计公差设计的研究[D]. 天津: 天津科技大学. 2009.
- [47] 庞学慧等. 互换性与测量技术基础[MI. 北京:国防工业出版社, 2007.
- [48] 王兆证. 计算机辅助尺寸公差设计的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2002
- [49] 方红芳.计算机辅助工序尺寸及其公差设计[M].(第一版).上海:中国纺织大学出版社, 2000.
- [50] 武一民,周志革等.公差分析与综合的进展[J].机械设计,2001,(2):4-5.
- [51] 张阳. 计算机辅助设计公差分析探讨[J]. 航天制造技术, 2002, (6): 30-34.
- [52] 单篙麟. 统计尺寸公差在尺寸链中的应用[J]. 机械科学与技术, 1994, (3):14-16.
- [53] 刘超. 计算机辅助公差分析与设计计算研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [54] 刘之生. 尺寸链理论及应用[M]. 北京:兵器工业出版社. 1990.
- [55] 方红芳,吴昭同.用统计抽样法产生统计公差分布研究[J].工程设计.1996(增刊): 383-387.
- [56] 王可冲.用蒙特卡洛法解尺寸链问题[J].华东工学院学报.1999(1):58-62.
- [57] 柳海强主编. 简明机械制图手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

硕士期间发表的论文

张洋, 王东光, 孙文君.基于液晶波片的双折射滤光器的机械结构设计[J].科学技术与工程, 2015,11.8.

致谢

时光流逝,不知觉已到硕士毕业之际。短短三年多硕士生活,却让我感受太 多太多,以至于有些情感我无法用文字来表达出来。能完成这样一份硕士论文, 对我自己来说,无疑是莫大的收获。从对机械设计的一无所知,到懵懵懂懂,到 想要放弃,最后坚持到完成,这中间一切的人一切事,都让我迅速成长。

最最要感谢的是我最最尊敬的恩师王东光研究员。要感谢王老师的地方太多 了太多了。王老师是我进入机械设计领域的领路人,学习上总是耐心指导,并没 有因为我曾经一度不思进取的糟糕状态而放弃我,总在我迷茫不知该如何进展课 题时及时给予指导。俗话说,授之以鱼不如授之以渔,王老师也正是这样做的, 是她教会了我如何面对问题,解决问题,单是思维方式的改变就足以让我受益终 生。王老师无论在科研中还是平日生活中都是我学习的榜样,科研上,纵观全局, 一丝不苟,事必躬亲;生活中,自强自立,乐观开朗,言传身教。希望自己能汲 取一点点能量作为源泉,作为自己以后工作和生活的动力。

感谢怀柔基地主任邓元勇研究员,感谢张洪起老师,感谢张枚研究员,感谢 苏江涛研究员,感谢林刚华研究员,感谢姜杰研究员,虽然并没有给我多么直接 的帮助,但是他们在自己的领域中科学严谨,努力的科研精神给我树立了非常好 的榜样,耳濡目染,如有些许体会为我受用,已是我莫大的荣幸。

感谢国家天文台研究生部的所有老师,特别是杜红荣老师、艾华老师、马怀 宇老师,在研究生期间给予全力支持。

感谢林佳本高级工程师、曾真、郭晶晶在论文课题中电控等方面给予的帮助, 感谢孙文君在实验方面的帮助。感谢在一起工作学习的师兄、师姐们:张志勇、 侯俊峰、杨尚斌、高裕、刘锁、赵辉、李坦达、王晓帆、孙英姿、徐海清、杨潇、 赵翠、陈洁、郭娟。感谢在研究生办公室一起奋斗的师兄师妹们:宋永亮、白先 勇、Priya、魏烨艳、张小敏。非常感谢张小敏师妹作为我的毕业答辩秘书。感 谢王绚、孙文君在行政上的帮助。

感谢怀柔站基地的所有人。你们亲如一家人的氛围时时刻刻温暖了我,我很 喜欢大家在一起工作的时候,各司其职,团结友爱,井井有条。亲切美丽的王薏 站长,善解人意的汪国萍老师,风趣幽默的张鼎波师傅,踏实敬业的阮文东师傅, 聪明能干的包亚东师傅,勤劳热心的杨桂莲师傅、王立东师傅,荆帅,感谢你们, 感谢让怀柔站在我记忆里最直接的感觉是欢乐。

感谢曾经的室友赵欣、杨一曼,住在一起的日子,让我觉得我们并不只是同 学,而是姐妹,一起庆祝我们每一次成长,在我挫折的时候鼓励我,支持我,感 谢你们。感谢一起学习的研究生伙伴们:吴俊霖、丁春雨、余业钊。感谢我的好 友邓彦彦、朱江瑞、刘彬,在精神上的鼓励和在生活上的照顾。

感谢文中使用参考文献的所有作者,通过你们我学习了很多专业知识,在你 们的基础研究上,能顺利开展我的硕士论文工作。

感谢父母对我这个不孝孩子的纵容。对父母,对家人,与其说心怀感恩,其 实心怀愧疚才是最真实的感受。树欲静而风不止,子欲养而亲不待。我想说对不 起,我连最简单的陪伴都做不到,可这样的话简直苍白无力。到目前为止,已经 读书 27 载,家人,老师,学校,一直呵护着我成长,没有经历过所谓残酷的社 会,没有承担过多少家庭责任。多少年了,我一直朝前走,爸爸妈妈,姐姐弟弟, 全家人做的只是默默地支持。感谢你们,是我生活的意义。