



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

博士学位论文

向列型液晶波片在双折射滤光器中的应用研究

作者姓名: 王刚

指导教师: 邓元勇 研究员 中国科学院国家天文台

林佳本 正高级工程师 中国科学院国家天文台

学位类别: 理学博士

学科专业: 天文技术与方法

培养单位: 中国科学院国家天文台

2020 年 6 月

Research on Application of Nematic Liquid Crystal Variable
Retarder in Birefringent Filter

A dissertation submitted to the
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Natural Science
in Astronomy Technology and Methods

By

Wang Gang

Supervisor: Professor Deng Yuanyong

Professor Lin Jiaben

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences

June, 2020

中国科学院大学 学位论文原创性声明

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

作者签名：王刚

日期：2020.4.28

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

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

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：王刚

日期：2020.4.28

导师签名：邓宏斌 林佳本

日期：2020.4.30

摘 要

太阳物理是一门以观测为基础的自然学科，通过对太阳磁场和太阳爆发活动的高分辨观测能够极大的推动该学科的研究工作。随着太阳物理研究的深入，需要对太阳大气中的各类活动现象进行多波段、多视角和高分辨率的长周期连续不间断观测。地基观测由于地球自转，地球大气扰动、吸收和背景辐射等因素的影响，已经很难满足上述要求。空间观测具备地基观测无可比拟的优势，进入空间逐渐成为太阳物理研究的发展趋势。双折射滤光器是太阳成像观测望远镜中的核心设备。利用向列型液晶波片替代原有旋转波片结构，可避免使用动密封结构以及机械运动部件，不但可以大幅提高设备可靠性，而且可以降低设备的能耗以及重量，更加适合空间环境的使用。因此，空间化液晶型双折射滤光器的相关研究是当前太阳观测仪器技术发展的热点方向之一。

本论文通过理论分析论证并结合实验实测的方法，对单元液晶器件的性能、标定方法、以及液晶型双折射滤光器整机系统的设计和相关技术展开了系统性的研究工作。本研究的部分技术方法已经应用在 ASO-S 卫星 FMG 载荷的液晶型偏振分析器鉴定件研制工作当中。同时，研究过程中所积累的数据及经验也可对未来空间液晶型双折射滤光器的研制提供充分、有效的技术支持。本课题所开展工作的主要内容和创新成果如下：

1. 开展了液晶型双折射滤光器光学设计及关键误差源研究工作

根据液晶波片的工作原理完成了液晶滤光器的光学设计工作，给出了滤光器具体设计指标参数。针对液晶波片相位延迟不稳定性以及光轴不稳定性等关键误差源进行定量分析。

2. 开展了液晶波片相位延迟电压定标方法研究工作

提出了一种新的基于索累补偿器的自动化测量方法，并设计完成了基于该方法的光学实验平台及配套电子学软硬件系统。实验结果表明，该方法的系统测量相对误差差（测量精度）小于 $0.0575\%\lambda$ ，重复精度小于 $0.01197\%\lambda$ 。为课题中向列型液晶波片的相位延迟电压曲线精确测量提供了一种可行的技术方案。

3. 开展了液晶型双折射滤光器外场效应研究工作

针对液晶滤光器性能受外场环境的影响程度展开了相关研究工作。研究结

果表明：1) 液晶波片相位延迟量稳定性所带来的滤光器波长偏移小于 0.005nm；2) 在 0.01 摄氏度的温度波动范围下，液晶滤光器波长偏移小于 0.00035nm；3) 液晶波片的光轴特性对滤光器性能无明显影响；4) 在质子辐照过程中，液晶波片相位延迟量变化明显。

4. 完成了液晶型双折射滤光器原理样机设计研究工作

完成了液晶波片的研制工作，并实现了制备流程的闭环控制；完成滤光器机械结构设计并进行光机结构装调；完成电子学系统设计，包括液晶驱动器软硬件设计以及滤光器波带整移软件设计。

5. 完成了液晶型双折射滤光器关键参数测试工作

针对本课题研制的液晶滤光器整机关键参数进行了实验测量。结果表明各项性能基本满足液晶滤光器设计指标，其中仅透过带宽参数受探测器分辨率影响与设计指标略有差异；完成液晶滤光器试观测方案设计，已经具备投入试观测的条件。但受疫情的影响，导致试观测工作推迟进行。

本课题首次针对液晶型双折射滤光器开展了从元器件级到系统级的全方位研究。本课题研究首次完成用于太阳色球全日面观测的液晶型双折射滤光器原理样机一台，完成液晶波片相位延迟高精度、自动化标定系统一套，完成液晶型双折射滤光器控制系统一套。相关方法、数据以及结论可为空间型液晶双折射滤光器的研制提供经验，对推动我国空间太阳观测仪器的发展有重要意义和价值。

关键词：太阳磁场，空间太阳观测仪器，向列型液晶波片，液晶型双折射滤光器

Abstract

Solar physics is a natural discipline based on observations. The high-resolution observation of the solar magnetic field and activities can greatly promote the research work of this discipline. With the deepening of solar physics research, it is necessary to carry out long-term continuous uninterrupted observations of various wave phenomena, multi-view angles and high resolutions in various activities in the solar atmosphere. Ground-based observations have been difficult to meet the above requirements due to the influence of the earth's rotation, earth's atmospheric disturbance, absorption, and background radiation. Space observation has unparalleled advantages of ground-based observation, and entering space has gradually become the development trend of solar physics research. The birefringent filter is the core device in the solar imaging observation telescope. Using the nematic liquid crystal variable retarder (LCVR) to replace the original rotating wave plate structure can avoid the use of dynamic sealing structure and mechanical moving parts, not only can greatly improve the reliability of the equipment, but also can reduce the energy consumption and weight of the equipment, and is more suitable for the use of space. Therefore, the research on spatialized liquid crystal birefringence filters is one of the hotspots in the development of solar observation instruments.

In this thesis, through theoretical analysis and demonstration, combined with experimental measurement methods, systematic research work has been carried out on the performance and calibration methods of the unit liquid crystal device, as well as the design and related technologies of the liquid crystal birefringence filter system and related technologies. Part of the technical methods of this study have been applied to the development of the identification component of the liquid crystal polarization analyzer loaded by the ASO-S satellite FMG. At the same time, the data and experience accumulated during the research process can also provide sufficient and effective technical support for the future development of the spatial liquid crystal birefringence filter. The main contents and innovations of the work carried out in this topic are as follows:

1. Research work on the optical design and key error sources of liquid crystal birefringence filters

According to the working principle of the LCVR, the optical design of the liquid crystal filter is completed, and the specific design index parameters of the filter are given. Quantitative analysis of key error sources such as LCVR phase delay instability and optical axis instability.

2. Research on the calibration method of LCVR phase delay voltage

A new automatic measurement method based on cable compensator is proposed, and the optical experiment platform and supporting electronic software and hardware system based on this method are designed and completed. The experimental results show that the relative error difference (measurement accuracy) of the system measurement of this method is less than $0.0575\% \lambda$, and the repeat accuracy is less than $0.01197\% \lambda$. It provides a feasible technical solution for the accurate measurement of the phase delay voltage curve of the LCVR in the subject.

3. Development of external field effect of liquid crystal birefringence filter

Relevant research work has been carried out on the degree to which the performance of the liquid crystal filter is affected by the external field environment. The research results show that: 1) the wavelength shift of the filter caused by the stability of the phase retardation of the LCVR is less than 0.005nm ; 2) the wavelength shift of the liquid crystal filter is less than 0.00035nm under the temperature fluctuation range of 0.01 degrees Celsius; 3) The optical axis characteristics of the LCVR have no significant effect on the performance of the filter; 4) During the proton irradiation, the phase retardation of the LCVR changes significantly.

4. Completed the design and research work of the principle prototype of the liquid crystal birefringent filter

Completed the development of the LCVR, and realized the closed-loop control of the preparation process; completed the mechanical structure design of the optical filter and adjusted the optical and mechanical structure; completed the electronic system design, including the hardware and software design of the LCD driver and the filter wave. With shift software design.

5. Completed the test of key parameters of liquid crystal birefringence filter

The key parameters of the whole liquid crystal filter developed by this subject were measured experimentally. The results show that the performance basically meets the design index of the liquid crystal filter. Among them, only the transmission bandwidth parameter is slightly affected by the resolution of the detector and is slightly different from the design index. . However, affected by the epidemic, the trial observation work was postponed.

This subject is the first comprehensive research on the liquid crystal type birefringent filter from the component level to the system level. This subject research is the first to complete a liquid crystal type birefringent filter prototype for the full-day observation of the solar chromosphere, complete a LCVR phase delay high-precision, automatic calibration system, and complete the liquid crystal type birefringent filter control A set of systems. Relevant methods, data and conclusions can provide experience for the development of space-type liquid crystal birefringence filters and are of great significance and value to the development of space solar observation instruments in China.

关键词：Solar magnetic field, Space solar observation instrument, Nematic liquid crystal retarder, Birefringence filter based on liquid crystal variable retarder

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 课题研究目的与意义	4
1.3 课题主要研究内容	5
第 2 章 基于偏振光干涉原理的双折射滤光器	7
2.1 偏振光的传输	7
2.1.1 偏振光的数学描述	7
2.1.2 偏振光的 Stokes 参量	8
2.1.3 偏振器件的 Mueller 矩阵	10
2.1.4 偏振光的干涉	11
2.2 滤光器的分类	14
2.2.1 双折射滤光器	14
2.2.2 Michelson 滤光器	16
2.2.3 Fabry-Perot 滤光器	17
2.3 双折射滤光器透过波长调谐方法	18
2.3.1 直接调谐方法	18
2.3.2 间接调谐方法	19
2.4 本章小结	21
第 3 章 液晶型双折射滤光器光学设计及误差源分析	23
3.1 液晶的分类	23
3.1.1 胆甾型液晶	23
3.1.2 近晶相型液晶	24
3.1.3 向列型液晶	25
3.2 向列型液晶波片工作原理	26
3.2.1 液晶的取向有序性	26
3.2.2 液晶的各向异性	27
3.2.3 取向膜的锚定效应及预倾角	27
3.2.4 液晶波片的电控双折射效应	28
3.2.5 液晶波片的驱动原理	29
3.3 液晶型双折射滤光器光学设计	30
3.3.1 基本单元结构及工作原理	30

3.3.2 整机光学结构设计及参数指标	31
3.4 液晶型双折射滤光器误差源影响分析	33
3.4.1 液晶波片相位延迟误差影响分析	33
3.4.2 液晶波片方位角误差影响分析	34
3.5 本章小结	35
第 4 章 液晶波片相位延迟高精度定标方法研究	37
4.1 几种常用的波片测量方法	37
4.1.1 光强法	37
4.1.2 光谱扫描法	39
4.1.3 谢奈尔门补偿法	40
4.1.4 索累补偿器法	40
4.2 基于索累补偿法的快速高精度自动定标方法	44
4.2.1 光学平台搭建	45
4.2.2 索累补偿器自动控制	46
4.2.3 等偏离法自动化实现	46
4.2.4 快速相位延迟标定	48
4.2.5 快速自动化标定系统软件开发	49
4.2.6 系统测量结果及误差分析	51
4.3 本章小结	53
第 5 章 外场环境对液晶型双折射滤光器的影响研究	55
5.1 相位延迟稳定性	55
5.2 光轴特性	57
5.3 温度效应	58
5.4 视场效应	59
5.5 响应时间	60
5.6 空间环境辐照效应	60
5.6.1 质子辐照实验	61
5.6.2 伽玛射线辐照实验	64
5.6.3 紫外辐照实验	66
5.7 本章小结	69
第 6 章 液晶型双折射滤光器原理样机系统设计	71
6.1 液晶波片的制备与检测	71
6.1.1 液晶波片结构	71
6.1.2 液晶波片制备流程	71

6.1.3 液晶波片性能参数初检	72
6.2 滤光器机械结构设计	74
6.2.1 液晶波片加固结构	74
6.2.2 滤光器晶体室结构设计	74
6.2.3 滤光器密封结构设计	75
6.2.4 滤光器外部固定结构设计	76
6.3 滤光器光机装调	76
6.4 滤光器电子学控制系统设计	77
6.4.1 液晶驱动器硬件电路设计	77
6.4.2 液晶驱动器嵌入式软件设计	79
6.4.3 液晶驱动器性能测试	80
6.4.4 滤光器波带调制软件设计	82
6.4.5 滤光器高精度温控系统	84
6.5 本章小结	84
第 7 章 液晶型双折射滤光器性能参数测量	85
7.1 滤光器单级性能测量	85
7.1.1 测量平台	85
7.1.2 高精度光谱仪标定	86
7.1.3 基于最小二乘法的数据拟合	86
7.1.4 滤光器单级带宽测量结果	89
7.2 滤光器整机性能测量	90
7.2.1 测量平台	90
7.2.2 透过中心波长标定	91
7.2.3 透过带宽测量	91
7.2.4 自由光谱范围测量	92
7.2.5 稳定性测量	92
7.2.6 波带整移功能验证	93
7.3 滤光器试观测方案设计	94
7.3.1 $H\alpha$ 全日面色球望远镜	94
7.3.2 试观测方案设计	94
7.4 本章小结	95
第 8 章 总结与展望	97
8.1 工作总结	97
8.2 未来工作展望	98

参考文献	99
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	103
致谢	105

图形列表

2.1 线偏振光时刻迹	8
2.2 椭圆偏振光时刻迹	9
2.3 光束在双折射晶体中的传播	12
2.4 偏振光干涉光路	12
2.5 偏振光干涉分解坐标系	13
2.6 偏振光干涉对应凹槽曲线	14
2.7 Lyot 双折射滤光器基本结构	14
2.8 Evans 双折射滤光器基本结构	15
2.9 Solc 双折射滤光器基本结构	16
2.10 Michelson 滤光器基本结构	17
2.11 Fabry-Perot 滤光器基本结构	18
2.12 光楔法原理示意图	19
2.13 四分之一波片补偿法	20
2.14 旋转二分之一法光路示意图	21
3.1 胆甾型液晶分子空间排列示意图	24
3.2 近晶相型液晶分子空间排列示意图	25
3.3 向列型液晶分子空间排列示意图	26
3.4 向列型液晶分子空间指向矢	26
3.5 取向膜对液晶分子的锚定作用	28
3.6 液晶分子在电场下的受力分析	28
3.7 液晶分子极化效应示意图	30
3.8 基本单元光学结构设计	31
3.9 液晶型滤光器整机光学结构	32
3.10 液晶波片光轴变化对滤光器透过轮廓的影响模拟结果	35
4.1 光强法测试系统光路图	37
4.2 谢奈尔门补偿法系统光路图	40
4.3 索累补偿器结构示意图	42
4.4 索累补偿法光学系统示意图	42
4.5 等偏离法示意图	44
4.6 自动化索累补偿法控制系统	45
4.7 控制系统实物展示图	45

4.8 传统索累补偿器产品	46
4.9 自动化等偏离法原理图	47
4.10 液晶相位延迟初步标定软件设计流程图	49
4.11 液晶相位延迟精确标定软件设计流程图	50
4.12 液晶相位延迟精确标定软件用户界面	51
4.13 二分之一波片延迟量测量位置	52
4.14 液晶波片相位延迟-电压曲线	53
5.1 长周期相位延迟稳定性测量数据曲线图	55
5.2 电子学设备通断电稳定性测量曲线图	56
5.3 液晶波片光轴测量光路原理图	57
5.4 液晶波片光轴随外场变化曲线图	58
5.5 相位延迟与温度间关系曲线（全范围）	58
5.6 相位延迟与温度间关系曲线（局部放大）	59
5.7 不同入射角与相位延迟量间关系曲线	59
5.8 响应时间测量原理示意图	60
5.9 质子辐照实验相位延迟测量结果	62
5.10 质子辐照实验透过率测量结果	63
5.11 伽玛辐照实验相位延迟测量结果	65
5.12 伽玛辐照实验透过率测量结果	66
5.13 紫外辐照实验相位延迟测量结果	67
5.14 紫外辐照实验透过率测量结果	68
6.1 液晶波片结构示意图	71
6.2 液晶波片加工流程	72
6.3 液晶波片实物图	73
6.4 液晶波片加固结构	75
6.5 滤光器晶体室结构	75
6.6 滤光器密封结构	76
6.7 滤光器外部固定结构	76
6.8 液晶滤光器光机装调效果图	77
6.9 液晶驱动器硬件设计原理图	78
6.10 液晶驱动器控制箱	79
6.11 液晶驱动器数据走向示意图	80
6.12 液晶驱动器输出信号波形	80
6.13 驱动信号上跳沿数据	81
6.14 驱动信号下降沿数据	81

6.15 驱动信号过冲幅值	82
6.16 液晶滤光器波带调制数据处理过程	83
6.17 液晶滤光器波带调制软件用户界面	83
7.1 滤光器单级结构测量平台示意图	85
7.2 滤光器单级结构测量平台效果图	86
7.3 高精度光谱仪定标数据	87
7.4 基于最小二乘法的数据拟合结果	87
7.5 不同液晶波片相位延迟电压曲线标定结果对比	88
7.6 液晶波片相位延迟电压曲线标定数据差值图	88
7.7 液晶型双折射滤光器单级透过轮廓带宽测量数据	89
7.8 滤光器整机性能测量平台结构示意图	90
7.9 滤光器透过中心波长标定	91
7.10 滤光器透过带宽测量结果	92
7.11 滤光器自由光谱范围	92
7.12 滤光器自由光谱范围	93
7.13 波带整移功能验证	93

表格列表

2.1 特殊偏振态的斯托克斯矢量	9
3.1 不同温度下的热致液晶形态	23
3.2 液晶型滤光器光学设计指标	32
3.3 液晶型滤光器滤光单元参数及光学件材料表	33
3.4 液晶波片方位角误差对滤光器透过率的影响	35
4.1 Z825B 型高精度伺服电机参数	47
4.2 自动化控制系统测量数据	52
4.3 液晶波片相位延迟测量数据	53
4.4 不同测量方法时间效率对比	53
5.1 质子辐照样品及测量参数	61
5.2 质子辐照剂量列表	62
5.3 质子辐照实验液晶响应时测量间数据表	63
5.4 伽玛射线辐照样品及测量参数	64
5.5 伽玛辐照剂量列表	64
5.6 伽玛辐照实验液晶响应时测量间数据表	65
5.7 紫外辐照样品及测量参数	67
5.8 紫外辐照实验液晶响应时测量间数据表	68
6.1 液晶波片制作材料及相关参数	72
6.2 液晶波片外部尺寸测量结果	73
6.3 液晶波片面型测量结果	73
6.4 液晶波片透过率测量结果	74
6.5 EP4CEL5FL7C 芯片参数	78
6.6 液晶驱动器纹波测量数据	82
7.1 液晶型滤光器单级滤光单元实测数据	90
7.2 怀柔观测基地全日面色球望远镜光学参数	94

第 1 章 绪论

1.1 引言

我国先秦古籍《山海经》曰“东海之外，甘泉之间，有羲和之国。有女子名羲和，为帝俊之妻，是生十日，常浴日于甘渊。”将太阳作为东海神灵，加以供奉。古希腊诗人赫西俄德在《神谱》一书中描述“太阳神（赫利俄斯）每日乘着四匹火马所拉的日辇在天空中驰骋，从东至西，晨出晚没，令光明普照世界。”太阳与人类的生产生活息息相关，它是世间万物能量的源泉。古人以神话人物的方式刻画太阳，一方面体现了璀璨的人类文明，另一方面也表达出古时人们对太阳的崇敬之心。但对于自然的敬畏并没有阻挡人类探索未知的脚步，自公元十四世纪文艺复兴开始，近代科学逐渐从古典哲学体系中剥离出来^[1]，登上了历史的舞台。对于太阳的研究也有了更坚实理论基础和更先进的观测仪器，经过一代又一代天文学家的努力，我们在逐渐揭开太阳这颗炙热星球的神秘面纱。

太阳由内致外的结构大致可以分为日核、辐射层、对流层及太阳大气。目前我们仅能够对太阳大气进行直接的观测。在太阳大气中处处存在着强度、方向、形态各异的磁场。太阳的各类活动现象例如耀斑爆发、日冕物质抛射、太阳风暴等等均与太阳磁场的时间演化以及空间分布存在着密切的联系。所以太阳磁场也被认为是太阳物理研究过程中最为关键的物理量之一^[2]。太阳磁场测量原理基于 Zeeman 效应。1896 年 Zeeman 在实验中发现化学物质燃烧发出的单色光在磁场的作用下会发生状态的改变，后被证明是原子在外磁场中的发射谱线发生了分裂^[3]。1908 年，Hale 在对太阳黑子观测的过程中发现单色光明显的分裂效应，并根据 Zeeman 效应推算出太阳黑子存在强磁场，磁场强度在 2000 至 3000 高斯^[4]。至今，基于 Zeeman 效应并利用望远镜进行太阳磁场测量已成为太阳物理研究中最常用的技术手段之一。双折射滤光器是太阳磁场测量望远镜中的一类关键设备。第一台双折射滤光器是由法国太阳物理学家 Lyot 于 1933 年设计研制^[5]，随后的 1938 年 Ohman 也独立研制出同类型的滤光器^[6]，现称之为 Lyot-Öhman 型双折射滤光器。1949 年，Evans 在 Lyot-Öhman 滤光器的基础上研制出一种新型的设计方案，该设计的最大优势是可以提高滤光器的一个重要的设计指标（透过率），后被称为 Evans 滤光器^[7]。1952 至 1955 年间，Babcock 等

人利用光电原理解决了黑子区域外弱磁场的测量问题^[8],使得后续科学家能对太阳全日面磁场进行研究。1954 年后的十余年间, Solc 等人对滤光器的设计方式持续改进,进一步地提高了滤光器的透过率指标^[9,10]。1968 年, Babcock 首次使用窄带双折射滤光器型望远镜对太阳光球以及太阳黑子的磁场进行测量,得到了太阳视面的磁场数据,实现了太阳磁场的成像观测,极大地提高了太阳磁场望远镜的时间分辨率^[11]。上个世纪 80 年代中期,我国太阳物理学家艾国祥等人完成了国内首台双折射滤光器的设计,并第一次实现了太阳磁场的自主化测量^[12]。同时期,艾国祥院士提出了多通道滤光器的概念,在九十年代初期研制成功并运行至今^[13,14]。多通道太阳磁场望远镜可以同时获得多个波段的太阳矢量磁图,从而实现太阳磁场的三维测量。

随着对太阳物理的深入研究,需要对太阳大气中的各类活动现象进行多波段、多视角、多尺度以及更高分辨率的观测,这对观测仪器提出了更高的要求。在地基方面,望远镜的设计继续朝着大口径、多波段的方向发展。目前代表性的设备包括已建成的美国大熊湖天文台的 1.6m 口径 GST (Goode Solar Telescope) 望远镜^[15]、瑞典的 1m 口径 SST (1m-Swedish solar telescope) 望远镜^[16]、我国云南天文台的 1m 口径 NVST (New Vacuum Solar Telescope) 望远镜^[17]。以及在建的 4m 口径 DKIST (Daniel K. Inouye Solar Telescope) 望远镜、我国用于中红外波段太阳磁场精确测量的 AIMS (Accurate Infrared Magnetic Field Measurements of the Sun) 望远镜,和正在规划的 8m 口径 ASO-G (Advanced Ground-based Solar Observatory) 望远镜等等。自上个世纪 90 年代末期以来,空间观测设备迅速发展,并逐渐占据太阳观测的主导地位。目前在轨运行的太阳探测卫星主要包括 1995 年发射的 SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) 卫星^[18]、2006 年发射的 Hinode (原名 Solar-B) 卫星^[19]、2010 年发射的 SDO (Solar Dynamics Observatory)^[20]、2013 年发射的 IRIS (The Interface Region Imaging Spectrograph) 卫星^[21],以及最近发射的两颗有望开启空间探测新纪元的空间太阳望远镜 2018 年发射的帕克探针 (Parker Solar Probe) 和 2020 年发射的太阳轨道飞行器 (Solar Orbiter)^[22]。我国太阳物理学家艾国祥院士早在 90 年代就提出了自研空间太阳望远镜的项目 (SST, Space Solar Telescope)^[23],计划搭载口径 1m 的光学望远镜,但由于某些因素该项目最终未能正式立项。在国内太阳物理界科学家的不懈努力下,国内第一颗空间太阳探测卫星“先进天基太阳天文台”(Advanced Space-based Solar

Observatory, ASO-S)^[24] 项目已于 2018 年正式启动, 计划在第 25 个太阳活动周前发射。该项目首次在同一颗卫星上实现太阳全日面矢量磁场、太阳耀斑高能辐射成像和 CME 的近日面的初发和传播的观测。在这里也祝愿此项目顺利开展, 使得我们国内空间太阳探测实现零突破, 为日后太阳物理的发展做出更多的贡献。

空间探测的优势使得空间天文观测成为未来发展的一大主流趋势, 与地基观测设备所需突破的技术难点有所不同, 空间观测仪器需要在实现传统观测设备性能的同时要大幅提高仪器的安全性、可靠性, 尽量缩减仪器的体积和重量, 降低仪器空间化的难度及风险。前文中说明双折射滤光器是实现太阳磁场成像测量的核心设备。传统地基双折射滤光器需要使用多个步进电机作为驱动源, 通过机械传动结构控制滤光器中偏振光学元件的旋转, 从而调整滤光器的通过带中心波长, 实现对太阳大气不同层次的成像观测, 复杂的机械结构使得滤光器的体积与质量较大。此外, 为了匹配光学元件的折射率, 需在滤光器内部填充硅油并对仪器进行真空密封。机械传动结构的动密封结构增加了仪器空间化的风险。所以在保证滤光器性能的前提下如何降低滤光器空间化的风险, 是目前国内外相关领域的研究热点之一。上世纪八十年代就有科学家提出可以在滤光器中使用电光器件, 如 KDP、ADP 或者液晶材料等替代机械旋转方案, 实现透过波长的调整^[25]。但由于导电材料透过率较低的问题没有被很好的解决, 所以这种方案并没有被实现。近年来, 随着液晶相关的快速发展, 使用向列型液晶材料制成的液晶可变相位延迟器(文中简称液晶波片)在众多领域得到广泛的应用。液晶波片属于电光元件, 对透过液晶波片偏振光的相位延迟可随外加电场的变化连续可调, 与此同时液晶波片还具备低压调制、视场角较大、响应时间短等优点, 使用液晶波片代替双折射中旋转波片既可去掉复杂的机械旋转结构, 减小设备体积, 也可解决由传动结构带来的滤光器密封性问题, 可极大地提高空间化应用的可靠性。除此之外随着太阳物理研究的深入, 科研人员迫切希望实现太阳磁场成像、成谱同时观测, 从而掌握更多的未知量, 发现新的物理现象。目前一般认为有望实现成像、成谱同时观测的仪器形式包括两种: 一种是光纤阵列 + 光栅光谱仪; 另一种是二维实时光谱仪。但是, 这两类仪器都有制约性能的关键技术需要攻关, 仪器研制完成并投入实测使用尚待时日。而液晶器件及液晶型双折射滤光器技术的发展, 可以为成像成谱准实时观测提供一种切实可行的方案。鉴于液

晶波片的优势，自上世纪九十年代末，国外天文学家开始了液晶波片在 Lyot 滤光器中的应用研究。美国大熊湖天文台（BBSO）研制的近红外滤光器成功使用了向列液晶波片的调节方式，并于 2000 年获得了近红外的太阳单色像^[26]。2004 年，美国高山天文台（HAO）将一台 $H\alpha$ 滤光器改造为用于观测日冕的中心波长为 1083nm 的滤光器（CoMP），利用向列液晶波片实现了透过波长的调节。2011 年 Fineschi 等人完成了用于太阳日冕观测的液晶型滤光器的研制。^[27]。值得关注的是，已于 2020 年发射的 Solar Orbiter 卫星以及计划在 2022 年发射的 ASO-S 卫星中均才用了液晶型偏振分析器的结构设计，进一步推进了空间液晶型双折射滤光器的研究进度。2003 年，中国科学院国家天文台怀柔基地开始着手液晶波片的性能研究工作，2006 年底成功研制了一台基于液晶波片的近红外偏振分析器^[28]。2015 年开展了空间化液晶滤光器研制的先导课题，并取得了一定的进展。2019 年成功研制了空间化液晶偏振分析器鉴定件。但目前我国的太阳物理领域中，仍然没有可实际应用于太阳色球测量的液晶型双折射窄带滤光器。

综上所述，开展向列型液晶波片在双折射滤光器中的应用研究不仅是国内外新型观测设备的主要研究方向之一，而且是我国未来空间太阳观测技术的一项重要重要的技术手段。

1.2 课题研究目的与意义

本课题是针对向列型液晶波片在双折射滤光器中的应用而开展的相关研究工作，课题的研究目的包括以下四点：

1. 对向列型液晶波片的电光特性进行深入探究，全面掌握液晶型双折射滤光器各项性能；
2. 建立一套完善、可靠、高精度的液晶波片相位延迟-电压曲线定标方法，搭建测量平台，实现自动化系统设计；
3. 完成用于太阳色球测量的液晶型双折射滤光器全系统设计工作。
4. 对液晶型双折射滤光器原理样机关键性能指标进行详细测试，把握原理样机存在的问题及缺陷；完成基于液晶双折射滤光器的 $H\alpha$ 望远镜的试观测方案设计。

本课题是我国首次对向列型液晶波片在天文用 Lyot 型双折射滤光器中的应用而开展的系统性研究。课题研究意义主要包括以下四个方面：

1. 对液晶双折射滤光器关键误差源进行了定量分析，夯实了液晶型双折射滤光器的研制的理论基础；
2. 针对液晶波片的电光性能进行了全方面的实验测量，对将其应用在双折射滤光器中所存在的问题及缺陷加以改进，进一步提高了液晶双折射滤光器研制的可行性；
3. 研究过程中积累大量液晶波片的测量数据，逐步完备液晶波片测量方法、结构设计经验、液晶型双折射滤光器波带控制方法以及滤光器控制系统相关软硬件产品。为未来应用于空间磁场观测的液晶型双折射滤光器的提供了详实的理论基础和技术经验。
4. 完成了液晶型双折射滤光器原理样机全系统的设计，为实现太阳成像成谱准实时观测、短时标太阳活动现象运动学与热力学参数提供了一种可行、有效的技术手段。

1.3 课题主要研究内容

本文在第二章主要介绍了滤光器的分类以及对应的基本结构和工作原理。从偏振的角度对经典 Lyot 型双折射滤光器的基本特性进行阐述。

第三章主要介绍了液晶型双折射滤光器的工作原理、光学结构设计方案、设计参数以及关键误差源分析研究结果；

第四章主要介绍了液晶波片相位延迟曲线定标方法。研究了一种自研的高精度快速的液晶波片相位延迟电压曲线定标方法；介绍了系统各部分设计的理论依据和技术实现方法。建立了对应测量平台并对实际测量结果进行分析。

第五章主要介绍了液晶型双折射滤光器在外场环境下的效应分析结果，并给出了液晶波片相位延迟稳定性、光轴特性、温度效应、视场效应以及响应时间对滤光器各项性能影响程度的研究结果；

第六章主要介绍了液晶双折射滤光器系统设计的相关工作。包括液晶波片制备流程、滤光器机械结构设计和电子学系统控制软硬件的设计。

第七章主要介绍了在实验室对液晶型双折射滤光器整机光谱性能测量的结果，包括液晶型双折射滤光器最为关键的稳定性、透过带宽、自由光谱范围等指标参数实测结果。从光学的角度对滤光器波带整移控制系统进行功能性验证。此外，在本章中完成液晶型双折射滤光器试观测实验的方案设计，为下一步实验提

供可参考方案。

第八章是对博士工作的总结以及对未来工作的展望。

第2章 基于偏振光干涉原理的双折射滤光器

双折射滤光器是太阳成像测量望远镜中的核心设备，本课题所开展的是新型器件在双折射滤光器中应用的相关研究工作，所以，首先需要掌握经典双折射滤光器的基本工作原理。本章将对双折射滤光器所涉及的相关背景知识进行详细介绍，从数学的角度阐述了滤光器的基本工作原理及特性，为后续章节所展示的相关研究做好理论铺垫。

2.1 偏振光的传输

光波是电磁波中的一部分，具备波动特性，光波矢量的振动方向与传播方向垂直。光源发出的光波矢量在垂直于光波传播的方向上取向随机。从统计平均的角度上来讲，光波振动方向出现在任意方向上的几率均等，即振动方向具备轴对称性，称种类型的光波为自然光（非偏振光）。当自然光经过某些物体表面反射或者透射后，振动方向失去了轴对称性。称这种非对称现象为偏振，而具备偏振现象的光波为偏振光。根据偏振光不同的性质，可将其分为线偏振光、椭圆偏振光或圆偏振光。偏振光的干涉是双折射滤光器实现窄带滤光的基础理论。本节对偏振光的状态以及偏振光和偏振光学器件的数学描述方式进行简要介绍。

2.1.1 偏振光的数学描述

偏振光的电矢量可以用垂直于视向平面内两个正交方向振动分量之和来表示。从三维空间来看，光沿 Z 轴方向传播，电矢量分量分别在 XOZ 平面及 YOZ 平面上，振动分量表达式为：

$$\begin{aligned} E_x &= a_x \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} Z + \varphi_x \right) \\ E_y &= a_y \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} Z + \varphi_y \right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

其中的 a 为振幅， ω 为角频率， λ 是波长， φ 是相位。偏振光的分类根据的是其参考面迹的形状，即时刻迹在 XOY 平面上的投影曲线。为求出该曲线需要将

式2.1中的 Z 变量和 t 变量消掉。为此，令 $\tau = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} Z$ 则式2.1可变换为式2.2:

$$\begin{aligned}\frac{E_x}{a_x} &= \cos\tau \cos\varphi_x - \sin\tau \sin\varphi_x \\ \frac{E_y}{a_y} &= \cos\tau \cos\varphi_y - \sin\tau \sin\varphi_y\end{aligned}\quad (2.2)$$

取 $\delta = \varphi_y - \varphi_x$ 并进行转换运算可将 τ 消掉，最终得到关系式:

$$\left(\frac{E_x}{a_x}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{a_y}\right)^2 - \frac{2E_x E_y}{a_x a_y} \cos\delta = \sin^2\delta \quad (2.3)$$

根据式2.3可知，当两偏振分量相位差 σ 等于 0 或 π 时，合成的偏振光参考面迹为一条直线，称该状态的偏振光为线偏振（或平面偏振）。当两偏振分量相

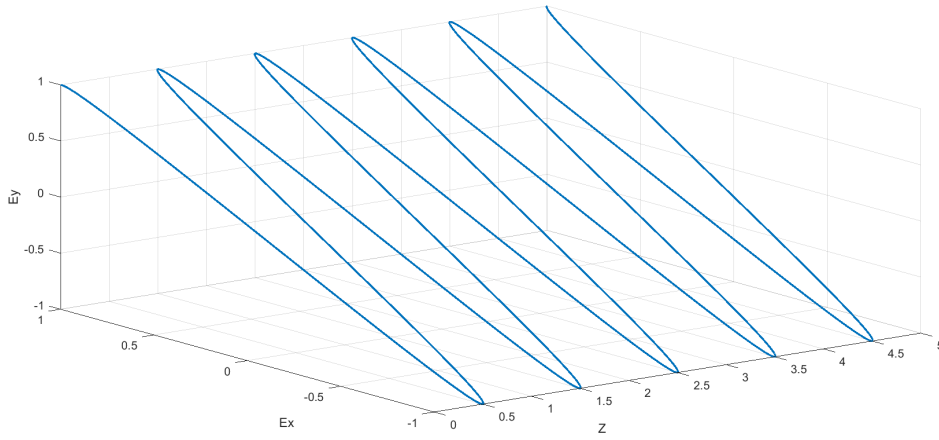


图 2.1 线偏振光时刻迹

位差 σ 为 0 或 π 以外其他数值时，合成的偏振光参考面迹为椭圆，称该状态的偏振光为椭圆偏振光。

特别的是如果满足条件 $a_x = a_y$ 且 $\delta = \pm\frac{\pi}{2}$ 时，偏振光参考迹面变为圆。所以说线偏振和圆偏振是椭圆偏振的特殊状态^[29]。

2.1.2 偏振光的 Stokes 参量

为了简化偏振光的运算处理，1852 年斯托克斯（George Gabriel Stokes）提出使用四个参量来描述偏振光的强度及偏振态。参量定义如下：

$$\begin{cases} S_0 = \langle |E_x|^2 \rangle + \langle |E_y|^2 \rangle \\ S_1 = \langle |E_x|^2 \rangle - \langle |E_y|^2 \rangle \\ S_2 = \langle 2E_x E_y \cos\delta \rangle \\ S_3 = \langle 2E_x E_y \sin\delta \rangle \end{cases} \quad \dots (2.4)$$

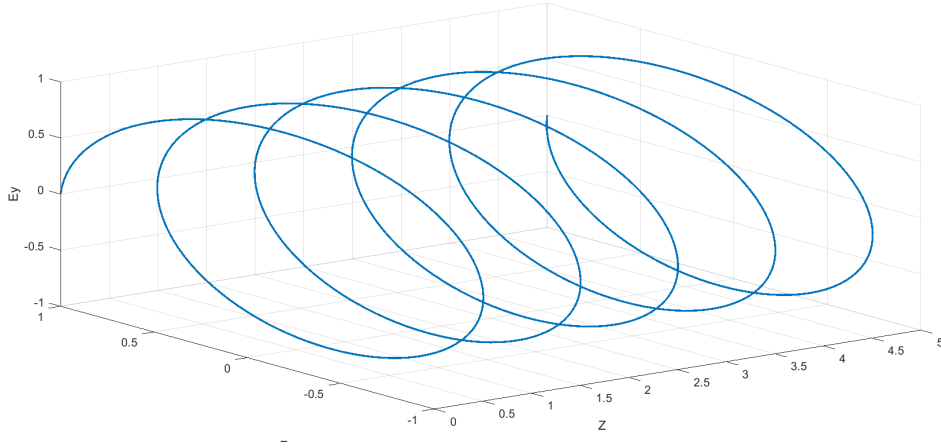


图 2.2 椭圆偏振光时刻迹

其中的 δ 为偏振分量的相位差， $S_0 \sim S_3$ 组成的列矩阵称为斯托克斯参数。斯托克斯参数均具有光强度的量纲，可通过搭建对应的光路对每一个参数进行测量，从而测得光束的偏振态。 S_0 为偏振光的总强度， S_1 表示的是 X 轴方向线偏振光分量， S_2 为 45° 方向线偏振光， S_3 表示右旋偏振光分量。当 S_0 与其它三个分量存在如下关系时：

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (2.5)$$

则表述的为完全偏振光，若：

$$S_0^2 > S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (2.6)$$

则为部分偏振光。用 S_0 分别除四个参量可以得到将入射光取为单位强度的归一化斯托克斯矢量。在表2.1中给出了特殊偏振态对应归一化后的斯托克斯矢量。

表 2.1 特殊偏振态的斯托克斯矢量

自然光	水平线偏振	垂直线偏振	45° 线偏振	-45° 线偏振	左旋圆偏振	右旋圆偏振
$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$

2.1.3 偏振器件的 Mueller 矩阵

上一小节中说明斯托克斯矢量可以表示任意偏振光的状态。当一束偏振光在经过某偏振器件后偏振态发生变化，出射偏振光仍可以使用四维列矩阵表示。那么从矩阵运算的角度而言，偏振器件可以使用一个 4×4 的转换矩阵 M 来表述，称该矩阵为 **Mueller 矩阵**。**Mueller 矩阵**可以极大简化偏振光在通过特性偏振器件后的状态变化分析过程，在下文对滤光器原理进行分析时也会经常使用到 **Mueller 矩阵**进行计算。本小节将给出部分常用偏振器件的 **Mueller 矩阵**^[30]。

$$M = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{pmatrix}$$

完全偏振片，自然光在经过偏振片后会变为线偏振光，偏振面方向与偏振片的方位角有关，当方位角为 0° 时（ P_0 表示），对应的 **Mueller 矩阵**如下所示：

$$P_0 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

直线相位器，可以改变入射偏振光正交分量之间相位差的光学元件，一般由石英、云母等材料制成。方位角为 θ 相位延迟为 Δ 直线相位器的 **Mueller 矩阵**为：

$$R_{\Delta, \theta} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (1 - \cos\Delta) \sin^2 2\theta & 1 - (1 - \cos\Delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin\Delta \sin 2\theta \\ 0 & 1 - (1 - \cos\Delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & 1 - (1 - \cos\Delta) \cos^2 2\theta & \sin\Delta \sin 2\theta \\ 0 & \sin\Delta \sin 2\theta & -\sin\Delta \cos 2\theta & \cos\Delta \end{pmatrix}$$

$\frac{1}{4}$ 波片，特指相位延迟 $\Delta = \frac{\pi}{2}$ 的直线相位器，常用 Q_θ 表示。方位角 θ 为 45° 的 $\frac{1}{4}$ 波片 **Mueller 矩阵**为：

$$Q_{45^\circ} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

半波片 ($\frac{1}{2}$ 波片), 与 $\frac{1}{4}$ 波片类似, 半波片特指相位延迟 $\Delta = \frac{\pi}{2}$ 的直线相位器, 常用 H_θ 表示。方位角为 θ 半波片的 Mueller 矩阵为:

$$H_\theta = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 4\theta & \sin 4\theta & 0 \\ 0 & \sin 4\theta & -\cos 4\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

一般偏振光学系统中包含多个偏振元件, 当入射光通过偏振系统后, 其斯托克斯矢量会经过一系列的线性变化。中间的过程可以看做系统的 Mueller 矩阵 M_{total} , 该矩阵为所有元件 Mueller 矩阵的乘积, 可将其描述为:

$$M_{total} = M_n \times M_{n-1} \times M_{n-2} \times \dots \times M_2 \times M_1 \quad (2.7)$$

以上即为双折射滤光器分析过程中常用元器件的 Mueller 矩阵。采用 Stokes 矢量结合 Mueller 矩阵的方式对偏振光学系统进行分析, 可极大简化理论分析过程。

2.1.4 偏振光的干涉

偏振光干涉是滤光器实现窄带滤光的基本原理。两列相干波的迭加而引起的强度重新分布的现象叫做波的干涉。光波是有方向的矢量波, 若要实现光波的干涉需要满足以下三个条件^[31]:

1. 频率相同;
2. 存在相互平行的振动分量;
3. 两列波存在稳定的相位差;

光波入射至双折射晶体时会折射出两束振动频率相等的线偏振光, 其中符合折射定律的偏振光称为寻常光 (简称 o 光), 折射率用 n_o 表示。另一束偏振光的折射率随入射角度而变化, 称为非寻常光 (简称 e 光), 折射率用 n_e 表示。双折射晶体表面与光轴方向不平行, 垂直于表面入射的光束在晶体中会发生分离; 沿光轴方向对晶体进行切割, 晶体中的寻常光和非寻常光传播方向一致, 振动方向相互垂直。这里需要引入一个光学领域中的基础概念——光程。光程的定义是光在介质中传播几何路径与该介质折射率的乘积。双折射晶体中的 o 光和 e 光的折射率不同, 假定晶体的厚度为 d , 光束垂直于晶体光轴方向 (切割方向) 入

射，那么晶体内部的两束光便存在光程差：

$$l = d(n_o - n_e) \quad (2.8)$$

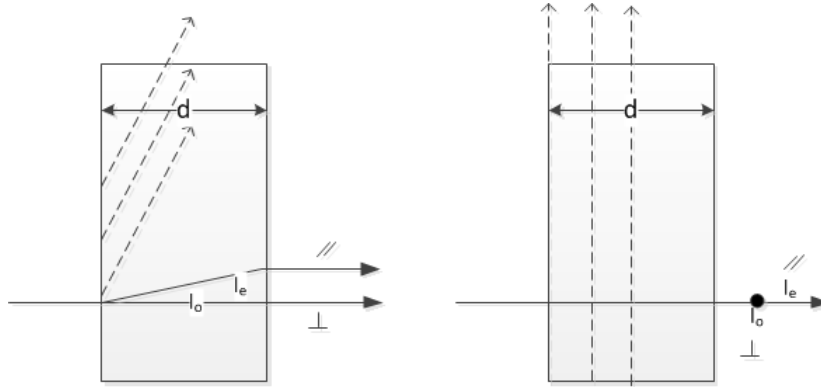


图 2.3 光束在双折射晶体中的传播

根据式2.8，波长为 λ 的偏振光在双折射晶体中分解的 o 光和 e 光所产生的相位差 δ 为：

$$\delta = \frac{2\pi d(n_o - n_e)}{\lambda} \quad (2.9)$$

根据上文可知偏振光在双折射晶体中产生振动频率相同，相位差固定的两束线偏振光，但由于两束光振动方向相互垂直，所以需要在晶体出射位置放置一片偏振片，以得到满足干涉条件的相互平行的振动分量。偏振光干涉的光路如图2.4 所示。偏振片方向相互平行（或垂直），双折射晶体置于偏振片之间且光轴

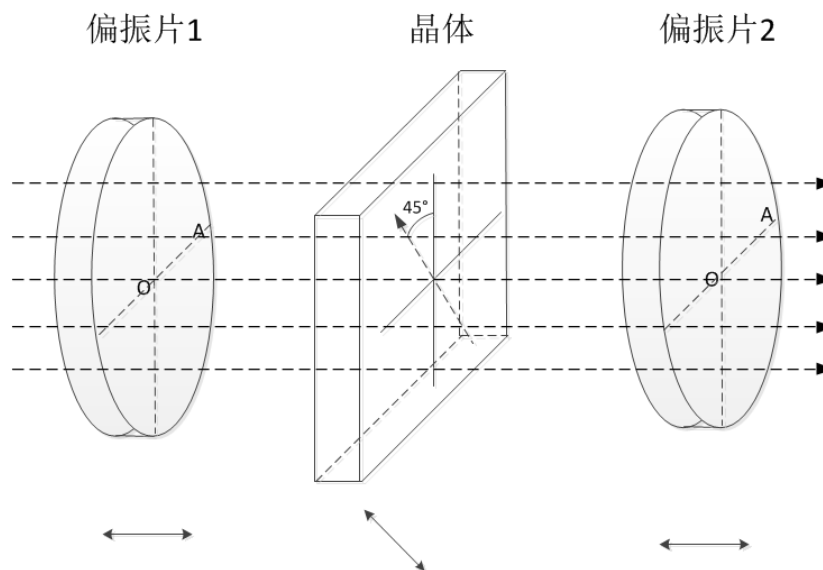


图 2.4 偏振光干涉光路

方向与偏振片方向成 45° 夹角。o 光和 e 光存在振动方向平行的分量 A_{2e} 和 A_{2o} ，如图 2.5 所示，在经过偏振片 2 后会形成干涉效应。根据经典干涉原理^[31] 可得到

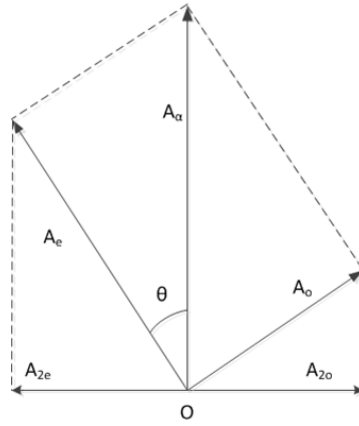


图 2.5 偏振光干涉分解坐标系

出射光强 I_o 与入射光前 I_{in} 之间的关系：

$$\begin{aligned} I_{out,\parallel} &= \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\pi d}{\lambda} (n_o - n_e) \\ I_{out,\perp} &= \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\pi d}{\lambda} (n_o - n_e) \end{aligned} \quad (2.10)$$

除使用解析函数外，使用 Mueller 矩阵也可以很快推导出出射光的强度以及偏振态，过程如下所示：

$$S' = P_{1,0} \cdot R_{\Delta,45} \cdot P_{2,0} \cdot S_0 \quad (2.11)$$

根据 2.1.3 小节中的内容将个偏振元件对应的 Mueller 矩阵带入到式 2.11 中可得到出射光斯托克斯参数为：

$$S' = \begin{pmatrix} \frac{1}{4}(1 + \cos\Delta) \\ \frac{1}{4}(1 + \cos\Delta) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

S_0 为偏振光的光强参数，将上式得到的结果进行变换，亦可得到与式 2.10 相同的结果。图 2.6 为偏振光干涉形成的近似于余弦平方函数的凹槽曲线。横坐标为波长，纵坐标为归一化后的透过光强。

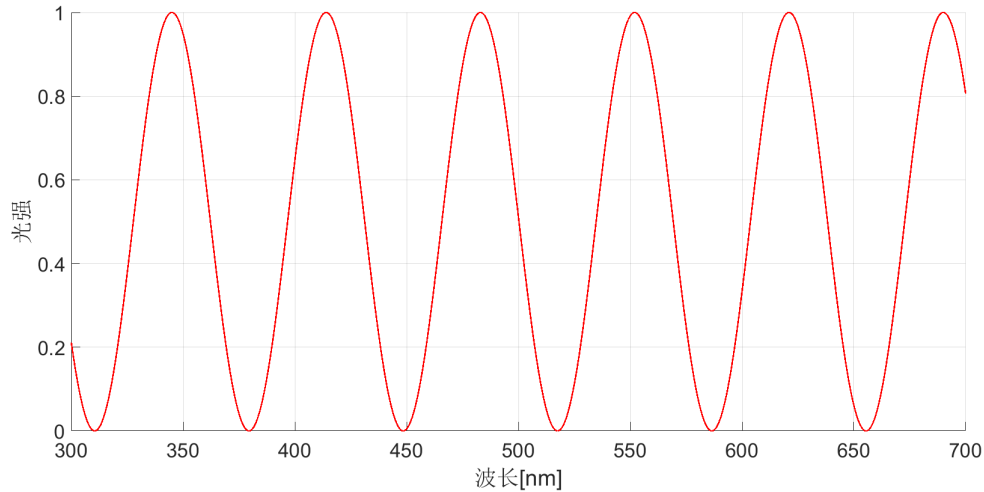


图 2.6 偏振光干涉对应凹槽曲线

2.2 滤光器的分类

滤光器是通信^[32]、激光^[33]、遥感^[34]、天文学^[35]等领域中的重要光学设备。与电子学领域中的带通滤波器功能类似，滤光器可对非目标波段的光束进行过滤，仅透过带宽很窄的波带，从而生成一定意义上的单色光。本节对太阳观测领域所使用的几类滤光器的基本结构和原理进行说明，重点介绍本课题所涉及的 Lyot 型双折射可调谐滤光器的原理及基本特性。

2.2.1 双折射滤光器

双折射滤光器是使用双折射晶体实现窄带滤光的一类仪器的统称。最早的双折射滤光器是由法国天文学家 Lyot 设计的。之后，许多位科学家根据 Lyot 滤光器的基本原理，设计出了多种其它类型的双折射滤光器，本小结对几类经典的双折射滤光器的基本结构和工作原理进行介绍。

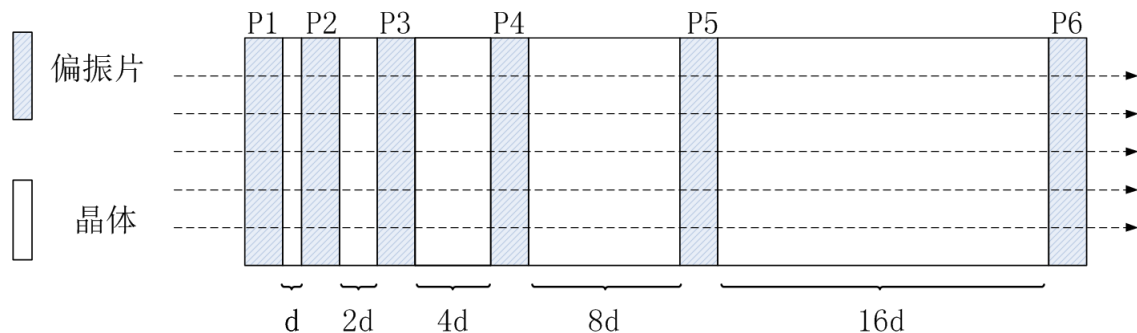


图 2.7 Lyot 双折射滤光器基本结构

Lyot 双折射滤光器。 Lyot 滤光器的基本单元与上一节中图2.4所示的结构一致，为了实现窄带滤光，滤光器通常由 5 至 8 级基本滤光器单元串联组成。如图2.7所示，双折射晶体介于两方向平行的偏振偏振之间，且光轴方向与偏振片成 45° 夹角。第一级至第五级的双折射晶体双折射率一致，厚度以 2 倍的关系递增。滤光器的透过率 T 与波长 λ 之间的关系如式2.13

$$\tau = \cos^2 \left(\frac{2^0 d \pi}{\lambda} \mu \right) \cos^2 \left(\frac{2^1 d \pi}{\lambda} \mu \right) \dots \cos^2 \left(\frac{2^k d \pi}{\lambda} \mu \right) \quad (2.13)$$

式中 μ 等于晶体双折射率 $(n_o - n_e)$ ， d 为最薄级晶体厚度， k 等于滤光器总级数减 1。Lyot 滤光器的优点是结构简单，但由于所使用的偏振片数量较多，导致滤光器整体透过率较低。

Evans 双折射滤光器。 1949 年，John W. Evans 在 Lyot 滤光器的基础上提出了一种新型滤光器的设计方案，即“split element filter”，后被普遍称为 Evans 滤光器。与 Lyot 滤光器不同，Evans 滤光器每一单元级中包含三块双折射晶体，如图2.8 所示。其中的 m 和 q 晶体被称为 Evans 旁级，两晶体光轴方向正交，且与偏振片方向成 45° 夹角。 p 晶体为中间级，光轴方向与偏振片方向垂直。晶体对

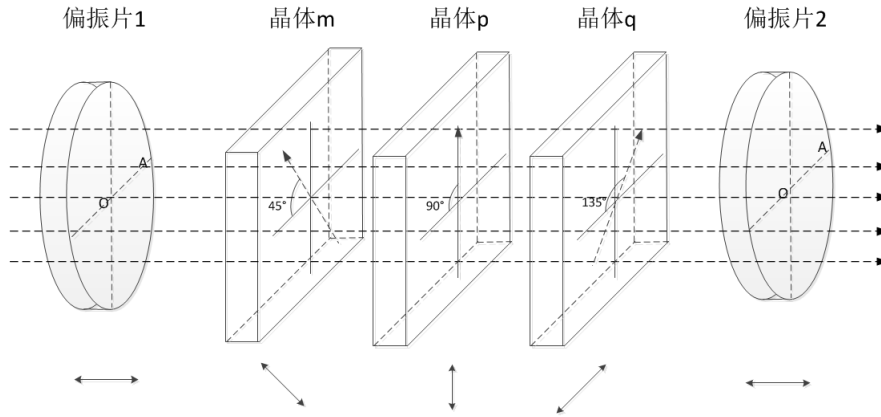


图 2.8 Evans 双折射滤光器基本结构

应的延迟分别用 δ_m 、 δ_p 和 δ_q 表示。滤光器设计参数需满足式2.14:

$$\begin{aligned} \delta_i &= 2\delta_m = 2\delta_q = 2^{r_i-1}\delta_0 + \frac{1}{2} \\ \delta_p &= 2^{r_p-1}\delta_0 + \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (2.14)$$

其中 r_i 、 r_p 分别为旁级和中间级在滤光器中对应的级次。参数 δ_0 为基本延迟量，该参量决定滤光器透过中心波长。单级 Evens 透过率为：

$$\tau = \cos^2 (2^{r_i-1} \delta_0 \pi) \cos^2 (2^{r_p-1} \delta_0 \pi) \quad (2.15)$$

对比式2.15和式2.13可知 Evens 滤光器单级滤光单元可实现 Lyot 两级单元的滤光效果^[36,37]。且减少使用一片偏振片，从而提高滤光器的透过率。但是 Evans 滤光器设计难度大，对器件参数误差要求严格。

Solc 双折射滤光器。Solc、Fredga^[38]、Shurcliff 等人提出了一种在使用偏振片最少的条件下实现等效 Lyot 滤光器的方案。该方案在方向平行或垂直的偏振片之间方式多片厚度相等，方位角不同的双折射晶体，各个晶体之间的方位角以等距 ($\alpha_1 = \alpha, \alpha_2 = 2\alpha \dots$) 增加。Solc 滤光器基本结构如图2.9所示：滤光器透过率

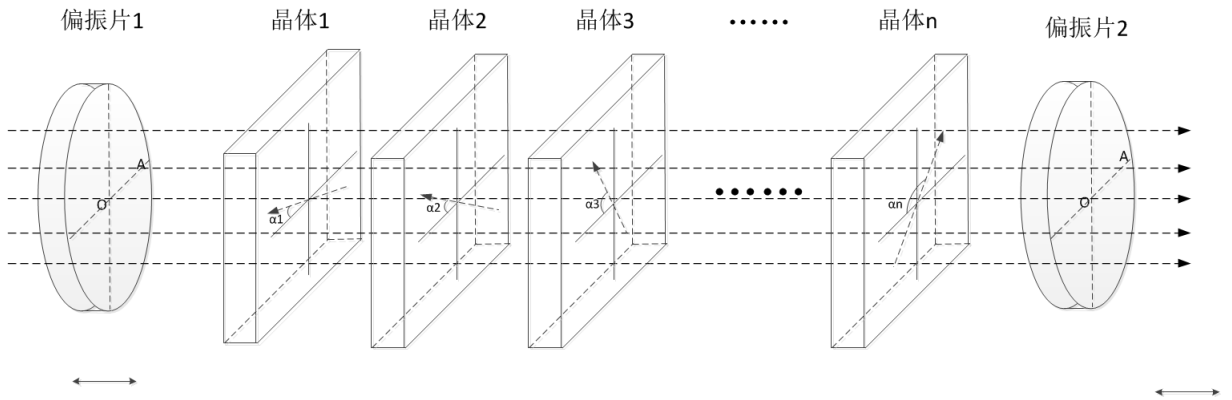


图 2.9 Solc 双折射滤光器基本结构

解析表达式为：

$$\tau(\lambda) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin n\chi}{\sin \chi} \cos \chi \tan^2 \alpha \right]^2 \quad (2.16)$$

其中的参数 χ 与晶体的厚度，双折射率以及波长有关。

$$\cos \chi = \cos \alpha \cos \pi \frac{\mu d_0}{\lambda} \quad (2.17)$$

理论上 Solc 滤光器仅使用两片偏振片，所以透过率远高于 Lyot 型和 Evans 型滤光器。但是为了获得较大的自由光谱范围，需要使用大量的双折射晶体，对透过波长调节装置的设计增加了非常多的困难。基于此原因，Solc 滤光器在天文研究领域并没有被较为广泛得应用。

2.2.2 Michelson 滤光器

Michelson 滤光器是光学中经典的干涉仪器，常称之为 Michelson 干涉仪。该仪器 1881 年由美国物理学家 A.A.Michelson 发明的，最初是用来研究”以太”的漂移，后在各个光学领域得到了广泛的应用和改进^{[39][35]}。Michelson 干涉仪的基本结构如图2.10所示。 M_1 和 M_2 是两片相互垂直的高反射率、低损耗的平面

反射镜。 G_1 和 G_2 是两块与反射镜成 45° 角的平板玻璃，它们的厚度以及折射率完全一致，且表面严格平行。其中的 G_1 后表面镀有半透半反的金属膜层，称为分束镜（Beam Splitter）。入射光经过 G_1 后，一部分光（称之为反射光束）反射至 M_2 镜，再被 M_2 镜反射至 G_1 ，最终透射至光幕上。另一部分光束（称之为透射光束）则经 G_1 透射，通过 G_2 至反射镜 M_2 ，再反射后通过 G_2 和 G_1 反射面最终到达光幕上。 G_2 称作补偿镜，其作用是保证 G_1 反射光束透射光束在到达光幕前所经过玻璃的路径长度一致。图中 M_2' 为 M_2 镜的虚像，透射光束等效为经 M_2' 反射至光幕之上。两束光的振动方向及频率相同且存在固定为相位延迟量，满足干涉条件。在光幕上对不同波长的光进行强度重新分布，形成干涉条纹，从而达到滤光效果。与双折滤光器不同的是，Michelson 滤光器中并未使用双折射晶体。

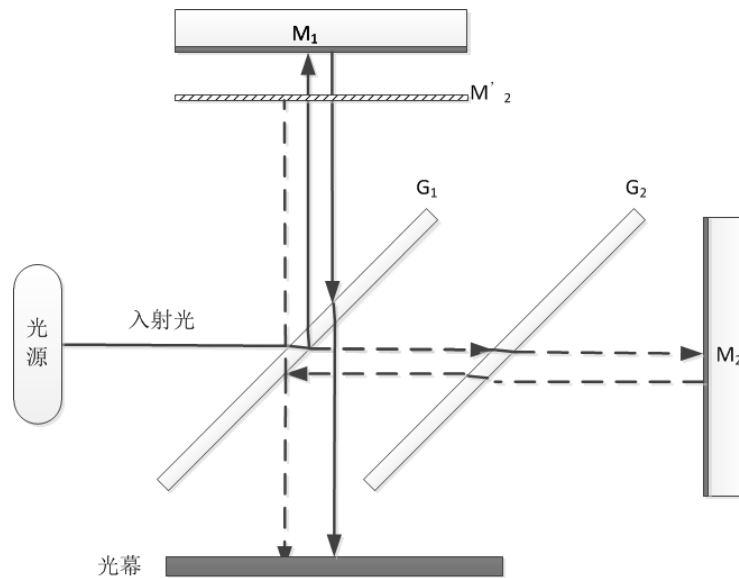


图 2.10 Michelson 滤光器基本结构

2.2.3 Fabry-Perot 滤光器

1867 年，法国物理学家 Charles Fabry 和 Alfred Perot 根据多光束干涉原理设计出了用于高分辨率光谱分析的仪器，Fabry-Perot 滤光器（以下简称 F-P 滤光器）。1899 年 Fabry 首次提出可以将其应用在望远镜上进行宇宙微光探测，之后的数十年 F-P 滤光器在天文领域中得到了较为广泛的应用。由于 F-P 滤光器具备实时窄带滤光能力，所以在较多的太阳观测望远镜中也配备了 F-P 型滤光器，以实现高分辨的太阳成像观测^{[40][41][42]}。F-P 滤光器的基本结构如图 2.11 所示。光

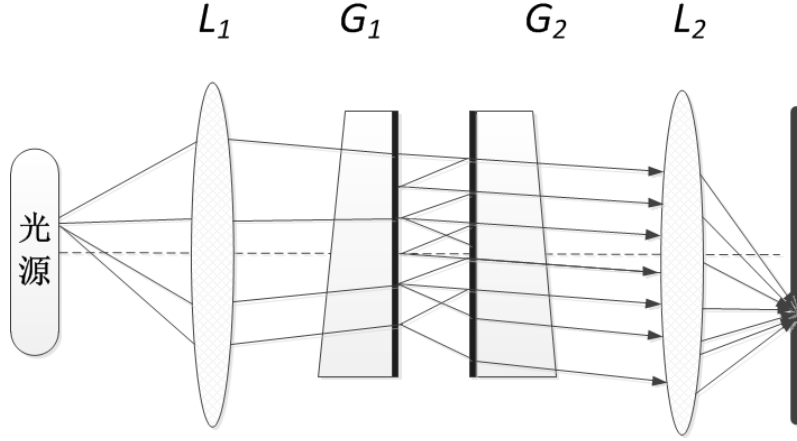


图 2.11 Fabry-Perot 滤光器基本结构

源发出的光束经过 L_1 透镜后变为平行光。 G_1 、 G_2 是两块精密的平行玻璃板，相对表面镀金属膜以提高其反射率、降低光波在表面的损耗。光束在两块玻璃板中的腔体内部发生多重干涉，后经过透镜 L_2 将重新分布的不同波长的光束汇聚到屏幕上形成等距干涉条纹，从而达到滤光效果。F-P 滤光器在太阳物理领域属于一个重点的研究方向，本文仅对其基本原理进行概述，以阐述天文用滤光器的主要分类，文中不再做更加细致的阐述。

2.3 双折射滤光器透过波长调谐方法

透过波长可调谐是双折射滤光器在实际应用中所必备的功能。波长调谐方法从其调整方式上可大致分为两类。一类可以概括为直接调整法，这类方法在概念上很好理解，但是在实际实现上难度很大；另一类是间接调整法，相较而言更好实现，但是理论分析上存在一定的难度^{[25][43]}。本节将对这两类方法的原理进行阐述。

2.3.1 直接调谐方法

根据前文可知，单级 Lyot 滤光器透过带轮廓可由下式表达：

$$\tau = A \cos^2 \frac{\pi d}{\lambda} (n_o - n_e) \quad (2.18)$$

通过一定的控制方式，直接改变晶体厚度 d 或者晶体双折射率 $(n_o - n_e)$ 均可改变滤光器的透过轮廓中心波长，这一类方法统称为直接调整法。实现的方式包括：

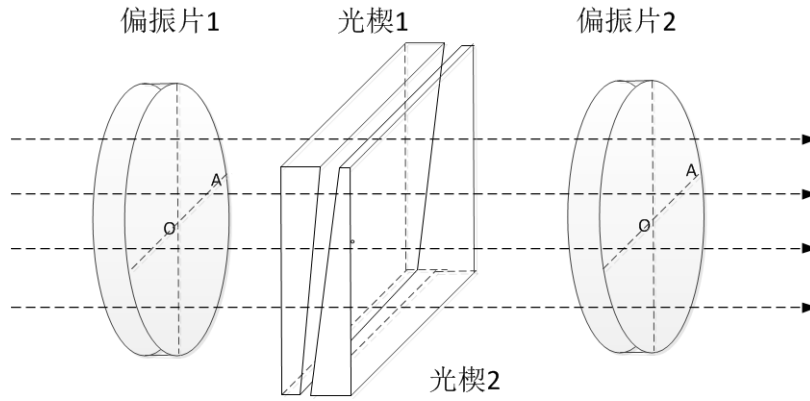


图 2.12 光楔法原理示意图

1. 光楔调整法。将双折射晶体制作成两块斜劈状光楔，通过移动两块光楔的相对位置改变光束通过晶体的总厚度，从而实现透过带中心波长的调谐。如图2.12所示，光楔1和光楔2的内表面在移动的过程中应该保证完全贴合。该方法理论上是可以调整式2.18中晶体厚度变量 d 的，但是由于对结构设计的要求复杂度较高，难度较大，并不适用于多级串联的Lyot滤光器透过带的调整。但该方案的原理适用于另一类光学测量仪器——Soleil-Babinet补偿器，在下文对液晶相位延迟测量的过程中主要使用该仪器。

2. 温度控制法。双折射晶体的厚度 d 和双折射率 $(n_o - n_e)$ 均会随总金额外界环境温度的变化而改变，所以通过对温度的控制也可以实现对滤光器透过波长的调整。但是使用这种方法存在两个主要的问题：一是分离式高精度温控的实现途径非常困难；二是对温度与晶体双折射率之间关系标定的难度很大。所以温度控制的方式一般也不在双折射滤光器中使用。

3. 电光晶体法。某些电光晶体存在电控双折射效应，即通过改变其所在的电场强度可以实现对双折射率的调节。例如KDP材料、液晶材料等等。使用电光晶体替代原有双折射晶体从而实现波长调谐是一个很好的设计方案，但需要解决透过率以及晶体稳定性等一系列问题。本文所研究的内容即将液晶材料应用在双折射滤光器中，并实现对滤光器透过波长的调整。后续章节会对该方法进行详细的介绍。

2.3.2 间接调谐方法

1. 四分之一波片补偿法。在双折射晶体后插入与晶体光轴成 45° 的四分之一波片，将不同波长光束对应的椭圆偏振率、方位角不同的椭圆偏振光补偿为方位角不

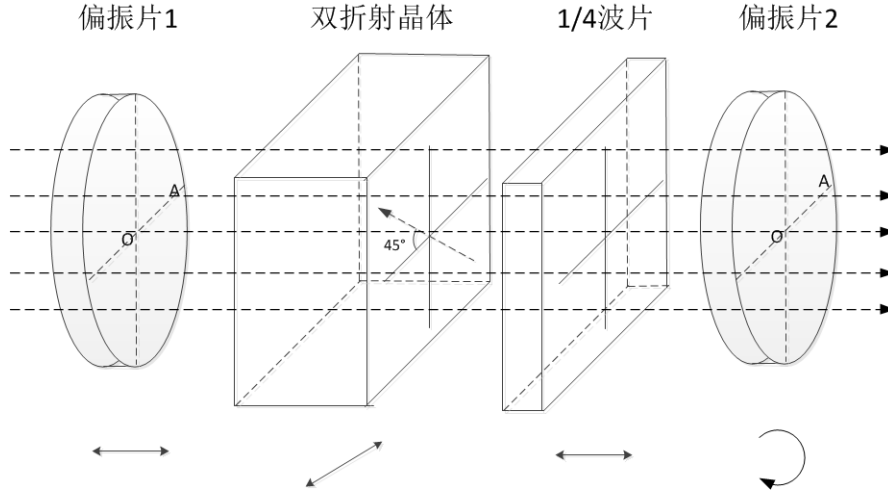


图 2.13 四分之一波片补偿法

同的线偏振光，再通过旋转检偏器角度实现透过波带中心波长的调整。图2.13为该方的光路示意图。该光路的 Mueller 矩阵表达式为2.19。

$$S' = P_{2,\theta} \cdot Q_0 \cdot R_{\Delta,45} \cdot P_{1,0} \quad (2.19)$$

根据2.1.3节中的内容将对应器件的 Mueller 矩阵带入上式并进行简单的矩阵运算，可得到出射光的斯托克斯参数中的光强参数：

$$S'_0 = \cos^2(\theta - 2\Delta) \quad (2.20)$$

根据式2.21可以得到 P_2 旋转角度 θ 与双折射晶体延迟量 Δ 满足以下关系式时：

$$\theta = \frac{\Delta}{2} \quad (2.21)$$

透过光强达到最大值。我们定义最大光强对应的波长为透过带中心波长，将

$$\Delta = \frac{\pi d}{\lambda} (n_o - n_e)$$

带入到式2.21后即可得到偏振片旋转角度与透过带中心波长的关系。

$$\theta = \frac{1}{2} \frac{\pi d}{\lambda} (n_o - n_e) \quad (2.22)$$

其中的 d 和双折射率 $(n_o - n_e)$ 是双折射晶体的固有属性。该方法可以用在单级 Lyot 滤光器的透过波带调谐以及双折射晶体相位延迟量的测量（谢奈尔门补偿法）中，但是对于图2.7所示的多级 Lyot 滤光器而言，第一级偏振片的调整会导致后面所有 Lyot 的光学元件的方位角都随之变化，无法实际应用。所以，在该方法的基础上又提出了一种间接调整方式。

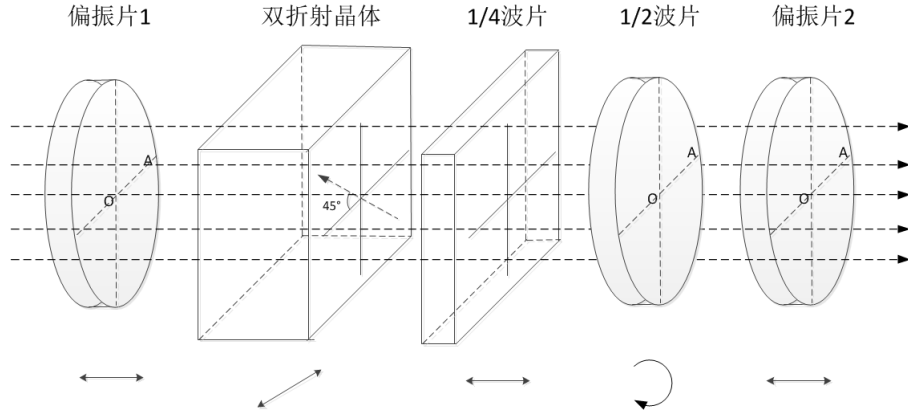


图 2.14 旋转二分之一法光路示意图

2. 旋转二分之一法。为了解决四分之一波片补偿法带来的问题，在四分之一波片后插入一块用于旋转偏振面的二分之一波片，从而在保证偏振片角度固定的前提下实现透过波带中心波长的调整。图2.14为该方法的光路示意图。同样以 Mueller 的方式表示 此光路可得式2.23:

$$S' = P_{2,0} \cdot H_{\theta} \cdot Q_0 \cdot R_{\Delta,45} \cdot P_{1,0} \quad (2.23)$$

采用与上文相同的分析方式最终可以得到二分之一波片旋转角度与透过带中心波长的关系为:

$$\theta = \frac{\pi d}{\lambda} (n_o - n_e) \quad (2.24)$$

二分之一旋转波片法是 Lyot 型双折射滤光器应用最为广泛的波长调谐方法，在结构设计中多采用步进电机为驱动源，通过机械传动结构带动波片旋转，从而实现透过带波长的调整。本课题即在这种经典结构的基础上，对利用向列型液晶波片替换旋转二分之一波片结构所产生的问题进行相关的研究。

2.4 本章小结

本章首先对偏振光的定义进和分类方法行了解释；对双折射滤光器的理论基础——偏振光干涉的原理，进行了相关的介绍。阐述了目前天文学常用滤光器的分类，并对各类仪器的基本工作原理进行分析；介绍了滤光器理论分析的基本方法；利用斯托克斯矢量和 Mueller 矩阵的方法对滤光器透过波长调谐原理进行分析。为下文所涉及的内容进行了相关的理论铺垫。

第3章 液晶型双折射滤光器光学设计及误差源分析

液晶波片（又称液晶可变相位延迟器）具备响应速度快、结构简单、相位延迟连续可调等优点，近几年在光学测量领域得到广泛的应用。利用液晶波片替代经典双折射滤光器中的二分之一旋转波片结构不但可以明显提高滤光器透过波长调制速率，而且大大降低滤光器空间化的风险。本章节首先对目前常用液晶材料的种类进行介绍，着重阐述课题选用的向列型液晶波片分子结构以及工作原理。然后完成液晶型双折射滤光器光学结构的初步设计，包括滤光器晶体级数以及各项关键参数。最后对液晶型双折射滤光器的关键误差源进行理论分析，并得出相应结论，为后续章节中对液晶波片特性的研究提供重要的参考依据。

3.1 液晶的分类

液晶是介于各向同性液体和晶态固体之间的中间相^[44] 总体可以将其分为两大类：溶致液晶和热致液晶，目前在各领域通常使用的是热致液晶，即在不同温度下分子的形态及物理性质不同。各温度范围内热致液晶 的形态及特性如表3.1

表 3.1 不同温度下的热致液晶形态

温度范围	$\leq T_1$	$T_1 \sim T_2$	$\geq T_2$
物理形态	固态	液晶态	液态
物理性质	各向异性	各向异性	各项同性

所示。其中的 T_1 称为熔点， T_2 称为澄清点。温度在 T_1 、 T_2 之间时，热致液晶分子表现为液晶态。不同材料液晶的熔点和澄清点的值也有所不同。常见的液晶分子成细长棒状结构，常以椭球作为液晶分子的物理研究模型。按照分子的排列状态，热致液晶又可分为胆甾型液晶、近晶相液晶和向列型液晶。下面对这三类液晶的分子排序特点进行简要介绍。

3.1.1 胆甾型液晶

胆甾型液晶（Cholesteric Liquid Crystals）又称螺旋状液晶，是被最早发现的液晶种类，因其来源于胆甾醇衍生物而得名^[45]。胆甾型的分子空间分布如图3.1所

示。该类型液晶具备以下特点：

1. 按照液晶分子的指向将其分为多个层面，每一个层面的分子取向大体一致；
2. 从垂直于平面个的方向看，每一层液晶分子之间存在固定的旋转角度，旋转方向可以为左旋也可以为右旋。以 360° 为一个旋转周期，将旋转周期对用的分子层距离定义为螺距；
3. 不同材料制成的胆甾型液晶分子螺距有所不同，同材料类型的液晶分子螺距会随外场条件变化而变化，例如环境温度、电场强度、电场方向等等。

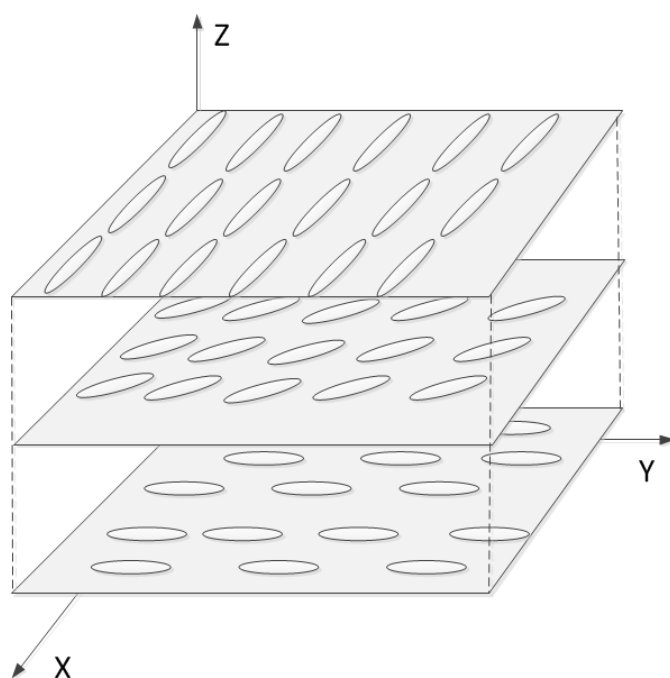


图 3.1 胆甾型液晶分子空间排列示意图

胆甾型液晶具备独特的光学性质、例如圆偏振二色性、旋光性等等，在液晶显示技术上有着特殊的应用意义。

3.1.2 近晶相型液晶

近晶相型液晶（Smectic liquid crystal）又称层状液晶，分子排列方式与晶体近似，因此而命名^[46]。近晶相型液晶分子空间排列以层有序分布，称为二维有序。分子长轴方向趋近一致，如图3.2所示。液晶分子质心在层内无序，可以自由移动。但由于材料粘度较大，分子无法跃层移动。通常的工作温度范围较低。当温度升高时，粘度会随之下降，不同层间分子会进行无规律跨层运动，性质与向

列型液晶近似，其特点是具备正双折射率的光学特性，在显示领域也有着较为独特的应用。

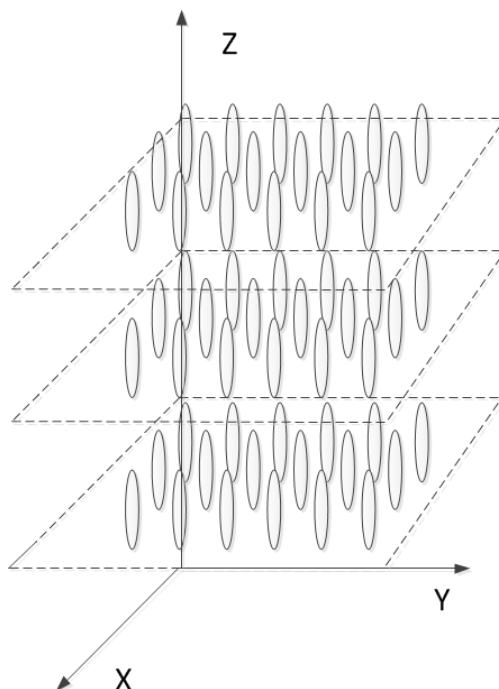


图 3.2 近晶相型液晶分子空间排列示意图

3.1.3 向列型液晶

向列型液晶（Nematic liquid crystal）又称丝状液晶，其分子排布与近晶相型液晶相似，长程指向矢有序、在空间中趋于相互平行。不同的是向列型液晶没有分层结构（如图3.3所示），也就是说分子的重心在空间分布完全无序，亦称之为二维有序。向列型液晶具备与典型的单光轴晶体相似的光学特性，且分子指向矢受外加电场的影响，是目前应用最为广泛的一种液晶类型^[47]。本课题采用该类液晶材料所制作的液晶波片，完成新型双折射滤光器的研制工作。

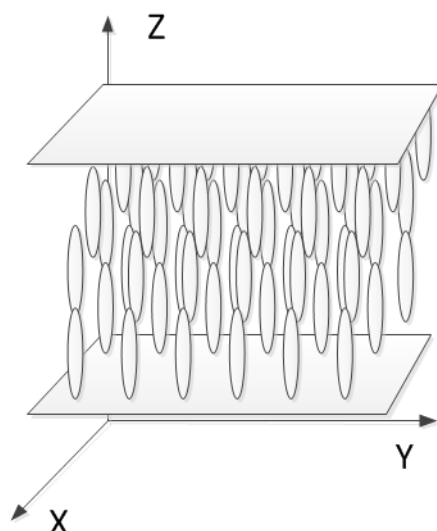


图 3.3 向列型液晶分子空间排列示意图

3.2 向列型液晶波片工作原理

3.2.1 液晶的取向有序性

取向有序性是向列型液晶最为重要的物理性质，向列型液晶的众多物理性质均与液晶分子的指向矢量有关。通常在对液晶分子进行物理性质分析时以细长棒状结构作为物理模型。从微观的角度来看，液晶分子存在热运动以及分子间的相互挤压，所有的分子长程方向不可能完全一致。但从统计学的角度分析，液晶分子的长程指向在某一方向的概率占主导，以此方向作为液晶分子的指向矢，用单位矢量 $\vec{n}_{x,y,z}$ 表示并称该特性为指向有序性。当液晶分子指向矢由于某外场条件而发生变化时，液晶的光学性质、电学性质也会随之发生改变，从而达到可调可控的效果^{[48][49]}。

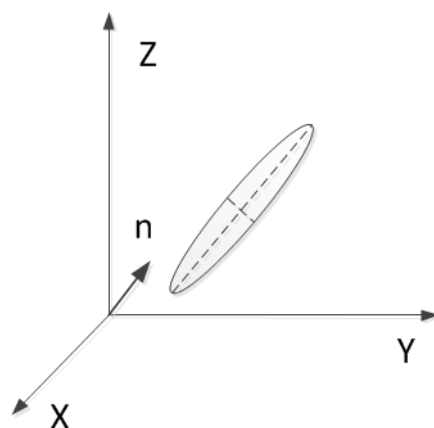


图 3.4 向列型液晶分子空间指向矢

3.2.2 液晶的各向异性

由于液晶分子结构的不对称性以及取向有序性，使得分子在不同方向上所表现出的物理性质有所不同，称该特性为各项异性。液晶的各项异性主要体现在两个方面：介电各向异性和折射率各向异性。

介电矢量通常以 $\vec{\epsilon}$ 表示，将平行于指向矢的分量定义为 ϵ_{\parallel} ，垂直于指向矢方向的分量定义为 ϵ_{\perp} 。液晶对于外部电场的响应取决于两分量差值的符号和大小。定义 $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ 。根据 $\Delta\epsilon$ 的符号可以将向列型液晶分为两类。当 $\Delta\epsilon > 0$ 时，液晶分子指向在电压驱动下会趋近于与电场方向平行，称该类型液晶为正性晶体，用符号 N_p 表示。反之当 $\Delta\epsilon < 0$ 时，液晶分子指向在电压驱动下会趋近于与电场方向垂直，称该类型液晶为负性晶体，用符号 N_n 表示。本课题所使用的向列型液晶为 N_p 型。

光学各项异性体现在液晶双折射率的变化。液晶的折射率一般使用折射率椭球表达，椭球对称轴与液晶分子指向矢方向一致。光波波矢的法向平面与椭球切除椭圆形剖面，椭圆的长轴代表寻常光折射率，短轴代表非寻常光折射率。当液晶分子指向矢在外场作用下发生偏转时，非寻常光的路径发生变化，从而导致 o 光和 e 光的光程发生改变，在宏观上体现为双折射率的变化。

3.2.3 取向膜的锚定效应及预倾角

液晶波片导电膜与液晶之间有一层取向膜层，其主要作用是固定液晶的初始方向。液晶分子的指向矢是相互平行的，但其初始指向可以为任意方向。为了使得液晶分子指向矢方向可控，在液晶层与导电膜层间的临界面镀有摩擦刻划后的透明膜层，如图3.5所示，该膜层被称为取向膜或配向膜。由于液晶分子在边界面上的锚定作用，使得分子初始指向矢与取向膜沟槽方向一致，且该方向即为液晶波片的光轴方向。所以可以通过控制取向膜的摩擦方向来制作不同光轴方向的液晶波片。

向列型液晶分子在电场的作用下会发生旋转，为了保证每次加载电压后液晶的旋转方向一致，镀取向膜层时，在垂直于沟槽方向的取向膜存在一定的角度，称该角度为预倾角。

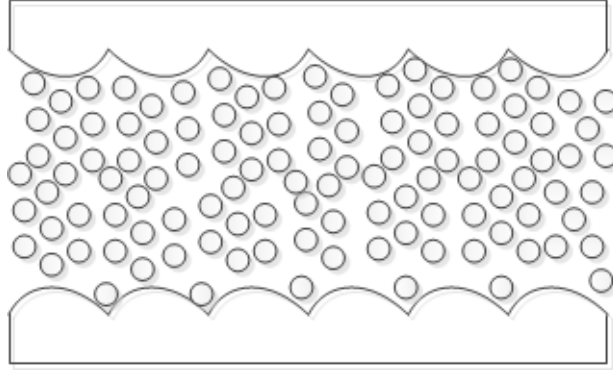


图 3.5 取向膜对液晶分子的锚定作用

3.2.4 液晶波片的电控双折射效应

液晶分子呈细长棒状结构，分子长轴的平均方向相互平行，称之为取向有序性。由于取向有序，液晶分子具备各向异性的物理性质。其中的介电各向异性体现在电场强度及方向对液晶分子取向的影响，光学各向异性则决定了其双折射效应。当无外加电场时，液晶分子的取向决定于取向膜的锚定作用，使得分子长轴平行于玻璃基板。外加电场后，液晶分子中的电子会受到正电荷的吸引而向正电极方向移动形成电子云，从而产生电偶极矩，如图3.6所示。将与分子长轴平

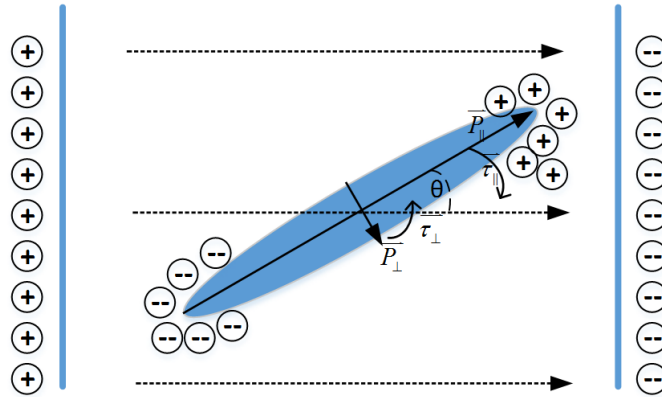


图 3.6 液晶分子在电场下的受力分析

行方向的偶极矩分量定义为 \vec{P}_{\parallel} ，垂直方向定义为 \vec{P}_{\perp} 。在电场与偶极矩的作用下产生转动力矩 $\vec{\tau}_{\parallel}$ 和 $\vec{\tau}_{\perp}$ ，力矩大小如式3.1所示。电偶极矩与电场强度成正比关系式3.2，其中 ϵ_0 为介电常数， χ 为电化率。

$$\begin{aligned}\vec{\tau}_{\parallel} &= \vec{P}_{\parallel} \times \vec{E} \\ \vec{\tau}_{\perp} &= \vec{P}_{\perp} \times \vec{E}\end{aligned}\tag{3.1}$$

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (3.2)$$

根据式3.1和式3.2可得出转动力矩与电场强度之间的关系为式3.3。

$$\begin{aligned} \vec{\tau}_{\parallel} &= \epsilon_0 \chi_{\parallel} E^2 \cos(\theta) \sin(\theta) \\ \vec{\tau}_{\perp} &= \epsilon_0 \chi_{\perp} E^2 \cos(\theta) \sin(\theta) \end{aligned} \quad (3.3)$$

由于 $\vec{\tau}_{\parallel}$ 与 $\vec{\tau}_{\perp}$ 力矩方向相反，且 $\vec{\tau}_{\parallel}$ 大于 $\vec{\tau}_{\perp}$ 。将两方向的转动力矩相减可得净旋转力矩为式3.4。

$$\vec{\tau} = \frac{11}{2} \epsilon_0 (\chi_{\parallel} - \chi_{\perp}) E^2 \sin(2\theta) \quad (3.4)$$

式中可知，液晶分子的净旋转力矩正比于电场强度的平方。当分子的净旋转力矩大于液晶分子弹性性能时，分子长轴向与玻璃基板垂直的方向旋转。当偏振光入射至液晶内部时，分解为寻常光（o 光）和非寻常光（e 光）。由于液晶分子具备光学各向异性，不同的旋转角度使得 o 光和 e 光产生不同的相位差，从而改变出射偏振光的偏振态，进而实现对偏振光的调制，称该特性为电控双折射性。

3.2.5 液晶波片的驱动原理

根据5.5小节的内容可知，液晶分子在电场下发生偏转，从而改变其光学双折射率。在实际使用过程中，利用导电线缆将液晶驱动器输出的电压信号连接至液晶波片柔性电极上，在通过柔性电极将电压信号加载至液晶波片的导电膜层上。液晶分子本身具备较高的电阻率，根据图6.1所示结构可知，高阻抗的液晶层同导电膜层共同形成类似电容的电场效应。通过调节液晶驱动器输出电压的大小，实现对电场强度的控制，从而改变液晶波片的双折射率，最终体现为液晶波片对偏振光相位延迟量的调整。

目前通常选择频率固定的交流可调方波电压信号作为液晶波片的驱动信号。主要的原因包括以下三点：

1. 电阻分压效应，液晶及取向膜均不属于理想绝缘体，在使用直流电压驱动时，将液晶层及两取向膜层等效为电阻模型（3.5）。取向膜电阻阻值 R_{OL} 约为液晶层电阻阻值 R_{LC} 的 1000 倍。根据串联电阻分压原理，当施加直流电压时，液晶层两端的电压 V_{LC} 约为驱动输出电压 V_{DC} 的 $\frac{1}{2000}$ ，无法驱动液晶分子。

$$V_{LC} = \left[\frac{R_{LC}}{(R_{OL} + R_{LC} + R_{OL})} \right] V_{DC} \quad (3.5)$$

2. 直流残留效应，液晶波片制程中无法将液晶完全钝化，即会残留可移动带电离子。当加载直流电压时，离子会被摄取在截面处，从而形成内部电场，影响液晶电光性能；使用交流电压驱动时，可使带电离子的运动净距离为零，从而消除直流残留效应。交流电压驱动中的一个重要的概念是极性反转。当外加电压改变时，电场方向相反，液晶分子产生的电偶极矩方向也相反。如图3.7所示，当电场反相时，对液晶分子产生的净力矩方向没有改变。由于液分子上的电子云可随电场立即变化，且由于液晶分子存在粘滞效应，电子云转换速率远高于液晶分子旋转速率。所以强度相等、方向相反的电压驱动不会影响力矩对液晶分子的作用。

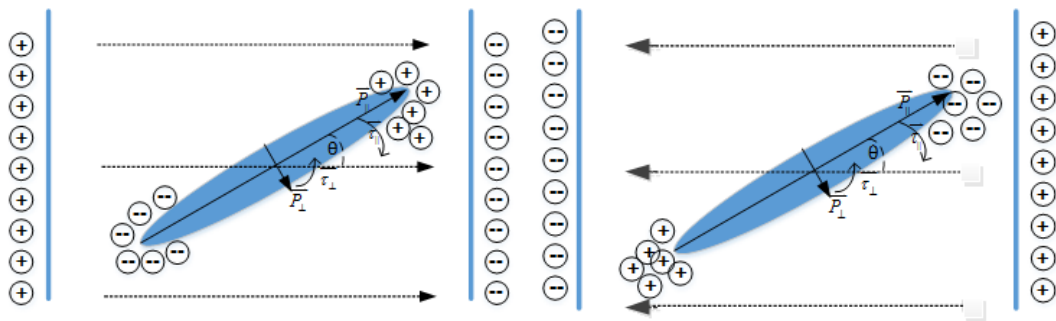


图 3.7 液晶分子极化效应示意图

3. 液晶分子长时间处于直流电场中，其某些物化性质有可能发生改变，从而影响液晶波片的相关性能。

综上所述，液晶波片的驱动电压信号使用交流方波信号。本课题所设计的液晶驱动器产生的信号为 2kHz 的方波信号，信号占空比为 50%，可调范围为 $0 \sim \pm 10V$ 。

3.3 液晶型双折射滤光器光学设计

3.3.1 基本单元结构及工作原理

液晶型双折射滤光器基本理论仍是依托于偏振光的干涉效应。与经典滤光器不同，液晶滤光器在透过波带调制功能的实现上利用的是液晶波片的电控双折射原理。这一改进极大的提高了滤光器的工作效率以及空间化可靠性，相关点已在上文详细说明。本课题所设计的液晶型滤光器基本结构如图3.8所示：其中两偏振片偏振方向平行。以起偏方向为参考零位，沿光线传播方向分别为：光轴为 45 度的双折射晶体、光轴为 90 度的二分之一波片（656.3nm）、光轴为 135 度

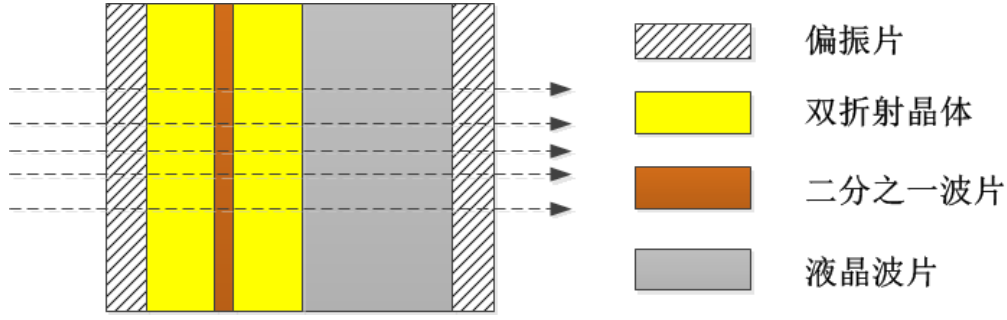


图 3.8 基本单元光学结构设计

的双折射晶体以及光轴为 45 度的液晶波片。结构中的两片晶体双折射率以及厚度完全相同，与二分之一波片组合构成宽视场结构。在计算时可以等效为一个整体，晶体厚度为两片晶体之和。该结构的斯托克斯矢量可以用式3.6表示。

$$S' = P_{1,0} \cdot R_{\delta_1,45} \cdot LCV R_{\delta_2,45} \cdot P_{2,0} \quad (3.6)$$

利用 Mueller 矩阵可计算出输出光强与输入光强的关系为：

$$I_{out} = \frac{1}{2} I_{In} \cos^2 (\delta_1 + \delta_2) \quad (3.7)$$

其中的晶体延迟量 δ_1 为两块晶体延迟量之和，当晶体材料、厚度以及环境温度确定值， δ_1 为常量。液晶波片的相位延迟量 δ_2 与驱动电压成非线性函数关系 $\delta_2(v)$ 。一般的，我们利用归一化后的形式表述滤光器的透过率轮廓：

$$T = \cos^2 \left[\frac{\pi d_0 (n_o - n_e)}{\lambda} + \delta_2(v) \right] \quad (3.8)$$

根据式3.8可知，透过率最高时对应的波长随液晶波片驱动电压的大小而变化。利用该原理实现对液晶滤光器透过波长的调谐。

3.3.2 整机光学结构设计及参数指标

本课题所设计的液晶型滤光器应用于 $H\alpha$ 波段太阳单色像测量，该仪器的具体设计指标如表3.2所示。

滤光器整机光学结构由五级 Lyot 基本滤光单元构成，图3.9为光学结构示意图。为了更好的体现各级滤光单元的组成结构，示意图中的光学件之间均留有间隙，在实际设计中各个光学器件表面相互贴合，并填充硅油，以减少由于折射率不匹配带来的影响。按照半宽由窄到宽（晶体由厚到薄）的顺序可将滤光单元由第一级至第五级依次编号。光学设计主要特点包括以下几个方面：

表 3.2 液晶型滤光器光学设计指标

指标	设计参数
中心波长	656.3nm
半高全宽 ($FWHM$)	0.05nm
自由光谱范围 (FSR)	0.8nm
波长调节范围	$\pm 0.2nm$
波长调节分辨率	待研究
透过率	$\geq 10\%$

1. 由于第一级单元的透过带宽最窄，所以在设计中将其置于结构的中心位置，以减少由于端面热交换带来的透过带漂移问题；
2. 每一级滤光单元均包含宽视场设计结构；
3. 在滤光器两端安装隔油玻璃以及隔热玻璃，一方面实现滤光器内部硅油密封，另一方面减少光学件与外界环境的热交换；

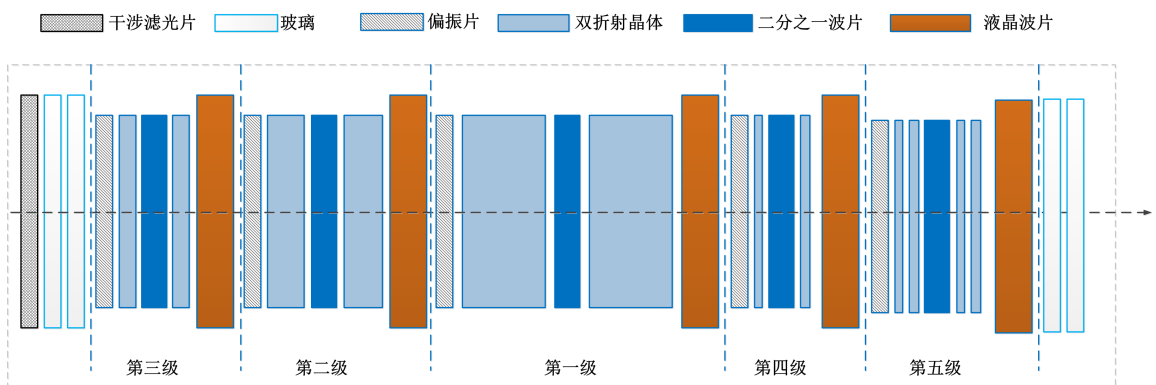


图 3.9 液晶型滤光器整机光学结构

4. 第五级滤光单元晶体理论厚度最薄，为了减少光学件机加工的难度，使用了两片光轴正交晶体的结构设计，利用快慢轴 o 光、e 光相消原理得到带宽最宽的晶体级。

滤光器各级参数以及光学件材料如表 3.3 所示。滤光器的半宽参数取决于第一级晶体级的半宽，而自由光谱范围则由第五级晶体级半宽决定。下面将给出半宽以及自由光谱范围的计算公式，具体推导过程可参见文献^[50]。

1. 半高全宽 ($FWHM$):

表 3.3 液晶型滤光器滤光单元参数及光学件材料表

级次	材料	延迟量	FSR[nm]	FWHM[nm]
第一级	石英	5866	0.1	0.05
第二级	石英	2933	0.2	0.1
第三级	石英	1466	0.4	0.2
第四级	石英	733	0.8	0.4
第五级	石英	366	1.6	0.8
干涉滤光片	—	—	0.2	—
二分之一波片	冰洲石	—	—	—
偏振片	HN42HE	—	—	—
封油玻璃	K9	—	—	—
隔热玻璃	K9	—	—	—

$$\Delta\lambda_{FWHM} \approx 0.886 \left[\frac{\lambda_0^2}{2^n (n_o - n_e) d} \right] \quad (3.9)$$

其中的常数“0.886”为半宽色散改正因子。

2. 自由光谱范围 (FSR):

$$\Delta\lambda_{FSR} = \frac{\lambda_0^2}{d (n_o - n_e)} \quad (3.10)$$

3.4 液晶型双折射滤光器误差源影响分析

通过对液晶波片工作原理以及液晶滤光器设计原理的分析研究可知，利用液晶波片替换原有旋转波片结构的最大误差量来自于液晶分子固有的液体流动性质所带来的光学性能不稳定性。而其中液晶波片相位延迟量和光轴的不稳定性是液晶型滤光器中最为关键的两个误差源。本节将对这两个主要误差源所带来的影响进行分析。

3.4.1 液晶波片相位延迟误差影响分析

根据上节内容中的式3.9以及式3.10可知，液晶波片相位延迟变化会使得液晶滤光器透过带中心波长发生变化，但对自由光谱范围以及透过带宽无明显影

响。由式3.8可知，当液晶相位延迟量 δ 与波长 λ 存在以下关系时 ($k = 1, 3, 5 \dots$)，透过率处于最大值点：

$$\frac{\pi d_0 (n_o - n_e)}{\lambda} + \delta_2 = \frac{k \cdot \pi}{2} \quad (3.11)$$

现假设液晶相位延迟量为 δ_0 时对应的中心波长为 λ_0 ，当液晶相位延迟量变化至 δ_1 时对应中心波长为 λ_1 。则根据式3.11可以得到透过带中心波长偏移量与液晶相位延迟量存在以下关系：

$$\delta_1 - \delta_0 = \frac{\pi d_0 (n_o - n_e) (\lambda_1 - \lambda_0)}{\lambda_1 \lambda_0} \quad (3.12)$$

进一步的，由于在滤光器实际使用过程中，波长调谐范围远小于目标波长，所以在计算过程中令 $\lambda_0 \lambda_1 \approx \lambda_0^2$ ，并将上式简化为：

$$\Delta_\lambda = \frac{\lambda_0^2}{\pi d_0 (n_o - n_e)} \Delta_\delta \quad (3.13)$$

根据式3.13即可得出单级滤光器透过带中心波长与液晶电压延迟变化量之间成近似线性变化关系。对于带宽为 0.05nm 的五级滤光器而言，透过带波长整移 0.05nm 时，对应第一级液晶相位延迟变化 90 度，第二级变化 45 度 … 依次以二倍的关系递减，第五级变化 5.625 度。从中可以得出，滤光器带宽最宽（晶体厚度最薄）级中的液晶相位延迟量变化对滤光器整机作用最为明显。在后续对液晶滤光器受外场影响的相关研究中可以依据液晶波片相位延迟量稳定性的测量结果以及式3.13，对第五级透过带波长变化量进行分析，从而确定液晶滤光器波长整移的最高分辨率。

3.4.2 液晶波片方位角误差影响分析

在课题的预先研究中发现液晶波片的光轴会随驱动电压以及外场温度发生变化，为了掌握该性质随液晶滤光器性能的影响程度，开展了相关误差分析工作。由于利用 Mueller 矩阵直接计算非特殊方位角器件的过程较为复杂，所以在本课题中采用 Matlab 数值模拟的方法对不同方位角下液晶滤光器透过轮廓的变化程度进行研究。研究过程中，将液晶波片的方位角参量作为变量，对液晶滤光器的透过轮廓进行模拟分析，模拟结果如图3.10所示。从图中可以看出，液晶波片方位角的误差基本不会造成滤光器透过中心波长的偏移，但会影响整体轮廓的对称性以及透过率。其中透过率与光轴偏移量的对应关系如表3.4所示。

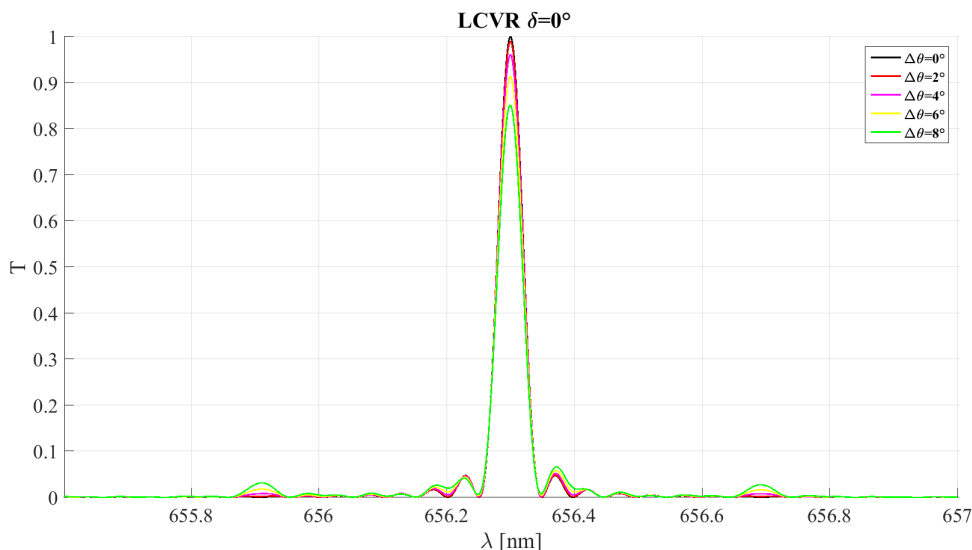


图 3.10 液晶波片光轴变化对滤光器透过轮廓的影响模拟结果

表 3.4 液晶波片方位角误差对滤光器透过率的影响

方位角误差量	滤光器透过率
0 度	1
2 度	0.99
4 度	0.96
6 度	0.915
8 度	0.85

3.5 本章小结

本章节首先介绍了当前常用液晶材料的种类以及对应液晶分子的结构特点。接着，对本课题选用向列型液晶波片的取向有序性、光学各向异性以及介电常数各项异性等主要特性进行概念阐述以及原理性分析，以说明向液晶波片的工作原理。然后，在国家天文台王东光老师空间先导课题的基础上完成了液晶型双折射滤光器光学结构的设计，并对液晶滤光器的设计原理、关键参数指标进行阐述。最后，根据液晶波片的光学特性开展了液晶型双折射滤光器关键误差源的分析，得出液晶相位延迟以及光轴变化量与滤光器透过轮廓之间存在的变化关系，为课题后续的研究提供关键的理论依据。

第4章 液晶波片相位延迟高精度定标方法研究

液晶型双折射滤光器透过波长的控制需要对每一级液晶波片的相位延迟电压曲线进行高精度标定。所以，对于液晶波片相位延迟电压曲线定标方法研究是本课题的关键工作内容之一。本章首先介绍几种常用的波片测量方法，并对其优缺点进行分析。然后重点阐述本课题所提出的高精度液晶波片相位延迟自动化定标方法，对该方法的测量原理、平台构成以及测量误差分析进行详细介绍。为液晶波片特性研究以及滤光器整机定标提供了有效的技术手段。

4.1 几种常用的波片测量方法

4.1.1 光强法

光强法是通过测量系统透过光强值，并根据理论公式计算待测样品相位延迟量的一类方法的总称。通常，光强法所采用的测试系统光路如图4.1所示。光束的传播方向为Z轴、水平方向为X轴、垂直方向为Y轴。系统中的起偏器、待测样品以及检偏器表面均平行于XoY平面，且偏振方向或光轴与XoZ平面分别成 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 夹角。一般的，在使用光强法是需要提供单色光光源（例如激光器），或者具备滤光能力的探测器（光谱仪等），以实现目标波长下的晶体相位延迟测量。

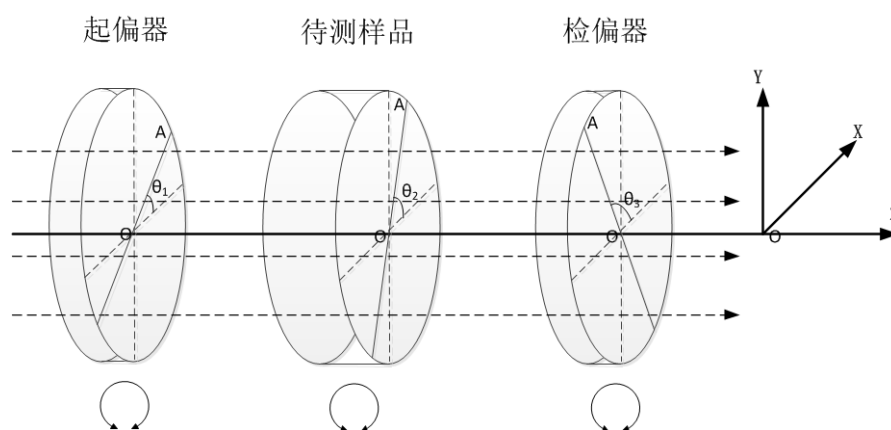


图 4.1 光强法测试系统光路图

其中的起偏器及检偏器均为完全偏振片。通常使起偏器偏振方向与X轴平行，即 θ_1 为0度。通过Mueller运算可以得到出射光强 I_o 与入射光强 I_{In} 和晶体延迟量

δ 的关系为式4.1:

$$I_o = \frac{1}{2} I_{In} \left[\cos^2 \theta_3 + \sin 2(\theta_3 - \theta_2) \sin 2\theta_2 \sin^2 \frac{\delta}{2} \right] \quad (4.1)$$

下面将对几种较为常用的光强法进行介绍。

旋转待测样品法, 是将起偏器与检偏器调整至固定角度, 通过旋转待测样品方位角从而计算得到样品相位延迟的一种方法。对式4.1中的 θ_2 进行求导可得:

$$I_o' = \frac{1}{2} I_{In} \sin^2 \frac{\delta}{2} \sin 2(2\theta_2 - \theta_3) \quad (4.2)$$

根据式4.2可知, 当 $2\theta_2 - \theta_3 = k\pi$ ($k = 0.1.2 \dots$) 时, 输出光强 I_o 可取到极值。由此可得当 $\theta_2 = \frac{1}{2}\theta_3$ 时, 输出光强值最大:

$$I_{max} = \frac{1}{2} I_{In} \left(\cos^2 \theta_3 + \sin^2 \frac{\delta}{2} \right) \quad (4.3)$$

当 $\theta_2 = \frac{1}{2}\theta_3 + \frac{\pi}{4}$ 时, 可得到最小光强值:

$$I_{min} = \frac{1}{2} I_{In} \left(\cos^2 \theta_3 - \cos^2 \frac{\delta}{2} \right) \quad (4.4)$$

测量过程中, 驱动待测样品等角度旋转, 获得离散数据, 在通过线性插值的方法可以得到较为准确的输出光强最大值及最小值。为了避免对光源输出光强的直接测量, 可根据式4.3、式4.4运算得到样品延迟量为:

$$\delta = 2 \arcsin \sqrt{\frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min} \tan^2 \theta_3}} \quad (4.5)$$

称这种测量方式为旋转待测样品法。该方法的不确定度主要来源于光强极值测量误差以及检偏器旋转角度的定位误差。具体误差分析的过程及结果可参阅文献^{[51][52]}。

旋转检偏器法的测量原理与旋转样品法相近, 不同之处在于样品光轴 θ_2 与起偏器偏振方向成固定角度 (45°), 通过旋转检偏器并根据理论计算得出样品延迟量。此方法适用于结构无法旋转的样品的延迟量测量 (例如样品配置恒温结构)。在应用此方法时, 通常取检偏器 θ_3 的角度为 0° 和 90° 的光强值, 将对应的角度值带入式4.1中可得:

$$\begin{aligned} I_{\parallel} &= \frac{1}{2} I_{in} \cos^2 \frac{\delta}{2} \\ I_{\perp} &= \frac{1}{2} I_{in} \sin^2 \frac{\delta}{2} \end{aligned} \quad (4.6)$$

进一步的可以通过对式4.6运算得到待测样品的延迟量:

$$\delta = 2\arctan\sqrt{\frac{I_{\perp}}{I_{\parallel}}}$$

旋转偏振片的方法同样具备测量速度快, 结构简单的优点, 但测量精度仍会受到光源波动、旋转角度误差的影响^[53]。可以通过多角度测量或者多次拟合的方式降低系统所带来的测量误差^[54]。

电控双折射法。由于液晶波片的双折射率可以通过驱动电压的大小来控制, 这种性质称为电控双折射性^[55]。在对液晶的相位延迟量进行测量时, 可以利用电控双折射性质, 对驱动电压工作范围内的离散电压点对应的输出光强进行测量, 并通过 **Mueller** 矩阵算得出射光的斯托克斯参量与电压之间的对应关系, 最终对离散数据进行插值, 计算得出不同电压下液晶波片相位延迟量^[56]。该方法亦属于光强法的一种实现形式。这种方法的优势在于测量速度快, 无需旋转光学器件的角度。本文主要利用了该方法开展了液晶波片特性在外场下的变化效应相关研究工作。

4.1.2 光谱扫描法

光谱扫描法是一种常用的测量晶体特殊相位延迟量的方法^[57]。与光强法不同, 光谱扫描法是利用波片相位延迟与入射波长之间的函数关系。测量光路同样是将待测波片置于起偏器与检偏器之间。在使用光谱法时需要利用波长可调的单色仪或者光谱仪设备, 从而实现对不同波长的光束强度测量。晶体相位延迟量与波长之间的关系为:

$$\delta = \frac{2\pi d (n_o - n_e)}{\lambda}$$

将 δ 看做自变量为 λ 的函数 $\delta(\lambda)$ 根据 **Mueller** 矩阵运算可以得到出射光强与波长之间的关系为式:

$$I_o(\lambda) = \frac{1}{2}I_{In} \left\{ \sin^2 \frac{\delta(\lambda)}{2} [\cos^2(2\theta_2 - \theta_3) - \cos^2\theta_3] + \cos^2\theta_3 \right\} \quad (4.7)$$

根据 θ_2 、 θ_3 以及输入输出光强值即可得到不同波长下的待测样品延迟量。但由于无法测量输出光强 I_{In} 的准确值, 所以光谱扫描法更多用于观测输出光强随波长的变化规律。特别的是当待测样品在目标波长下的延迟量为 π 时 (一般称之为半波片) 对式4.7中的延迟量 δ 求导的值为零, 即在测量结果中光强-波长曲线的极值点对应点对应的延迟量为 π 。并且经分析可得当 θ_2 为 45 度、 θ_3 为 0° 时得到的测量结果精确度最高。所以可通过该方法对半波片进行较为精确的标定。

4.1.3 谢奈尔门补偿法

谢奈尔门补偿法与上述方法明显的区别是需要在测量系统中插入一块四分之一波片作为补偿器件，其测量系统示意图如下：以起偏器偏振方向为参考光学

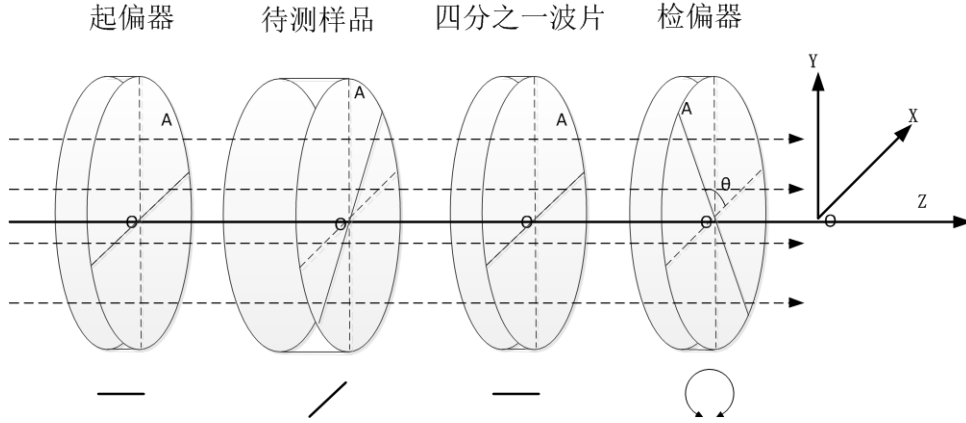


图 4.2 谢奈尔门补偿法系统光路图

零位，待测样品方位角为 45 度，四分之一波片光轴方向与起偏器平行，出射光处为可旋转的检偏器。用矢量式表示该光路为：

$$S' = P_{\theta} \cdot Q_0 \cdot R_{45} \cdot P_0 \quad (4.8)$$

利用 Mueller 矩阵进行分析可知经过起偏器的线偏振光在通过延迟量不同的待测波片后转换为椭圆度不同的椭圆偏振光，再经过四分之一波片后被补偿为方位角不同的四分之一波片，通过旋转检偏器的方位角可以得到周期性的消光点，此时检偏器的角度 θ 与待测波片延迟量的关系为：

$$\delta = 2\theta \quad (4.9)$$

通过对检偏器角度的精确测量即可得到待测波片的相位延迟，称该方法为谢奈尔门补偿法。与该方法原理相似的还有旋转四分之一波片法，不同之处在于检偏器的角度是固定的，通过旋转四分之一波片的方位角得到消光点，再通过计算得到待测波片的相位延迟。谢奈尔门补偿法的系统不确定度来自于消光点位置的测量以及旋转角度的精确定位。

4.1.4 索累补偿器法

索累补偿器法是一种精度较高的波片延迟测量方法，在测量中需要使用到高精度的光学仪器，即索累补偿器。本课题在该方法的基础上开展了高精度自动

化定标方法的研究。本小节将对索累补偿器的原理、构造、使用方法以及索累补偿器法测量的误差进行详细分析。

索累补偿器工作原理及误差分析。索累-巴比涅（Soleil-Babinet）补偿器（下文简称索累补偿器）是一种可以在一定波长范围内实现 $0 \sim 2\pi$ 之间任意相位延迟量可调的零级相位器件^[58,59]，在光谱测量以及偏振光学中得到广泛的应用。其基本结构如图4.3所示，它由两块具有相同楔角的光楔以及一块石英波片构成。其中的短光楔与波片固定连接，称为固定光楔。长光楔固定在平行导轨上，可在图示箭头方向进行移动，称为移动光楔。平面波片与两块光楔的双折射率相同，光轴角度相互垂直，其作用是将相位延迟点补偿至小于等于零度的范围。偏振光束经过索累补偿器后的相位延迟量如下式所示：

$$\delta = \frac{2\pi (n_o - n_e) (t_1 + t_2 - t_3)}{\lambda_0} \quad (4.10)$$

其中的 t_1 为光通过点移动光楔对应的厚度， t_2 为固定光楔对应的厚度， t_3 为补偿波片的厚度。又有 t_1 与移动光楔对应原点位移的距离 l 以及光楔角度 α 存在以下关系：

$$t_1 = l \tan(\alpha) \quad (4.11)$$

根据式4.10、4.11可知，当光学件参数、波长以及外界环境固定时，索累补偿器延迟量与移动光楔位移距离成线性关系。对 l 参数进行调整时可以得到正、负以及零相位延迟量^[60]。

索累补偿器的误差源主要来自于一下三个方面：

1. 千分尺精度。补偿器的移动光楔通常以千分尺为驱动源，但千分尺丝杠本身存在一定的机械误差，这项误差会带来索累补偿器中移动光楔位移量的定位误差，从而影响仪器精度。
2. 仪器中的光楔在生产的加工的过程中会存在楔角、斜胚的加工误差以及光学表面的面型差，从而影响仪器精度。
3. 光楔表面不平行以及机械安装的精度会造成晶体光轴不平行，从而带来一定的误差。

目前市面上已有成熟的索累补偿器商业产品，在利用该方法时一般可直接购买该仪器，产品出厂时会提供仪器的误差范围，在本文中不对其误差值进行详细分析。

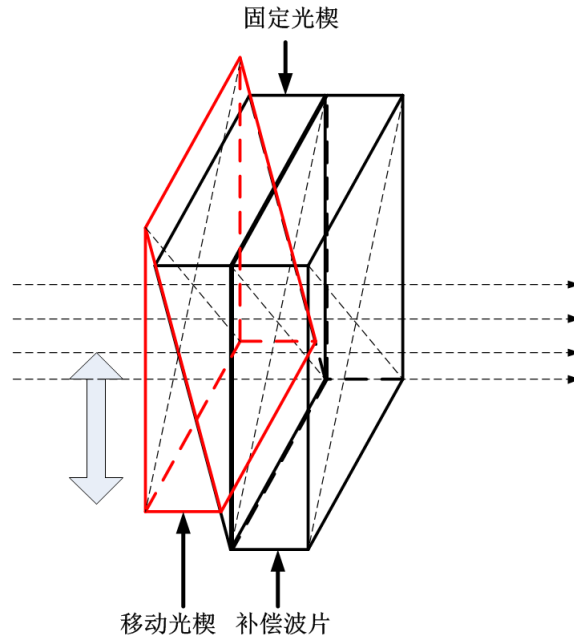


图 4.3 索累补偿器结构示意图

基于索累补偿法的波片延迟测量。图4.4是由索雷博（Thorlab）公司提供的索累补偿法测量光学平台示意图^[61]。系统包括起偏器、待测样品、索累补偿器以及检偏器四个光学元件。下面具体介绍索累补偿法的测量步骤。

1. 光学零位标校。首先将待测样品以及索累补偿器移出光路，以起偏器偏振方向为参考零位，旋转检偏器角度至消光位置（出射光强度最弱），此时起偏器与检偏器方向正交。

2. 将索累补偿器移入光路，并使其光学面与偏振片平行，此时出射光强度增强。旋转索累补偿器方位角，直至出射光再次消光位置。此时索累补偿器的光轴方向与起偏器偏振方向相同。记该位置为索累补偿器的光学零点位置。

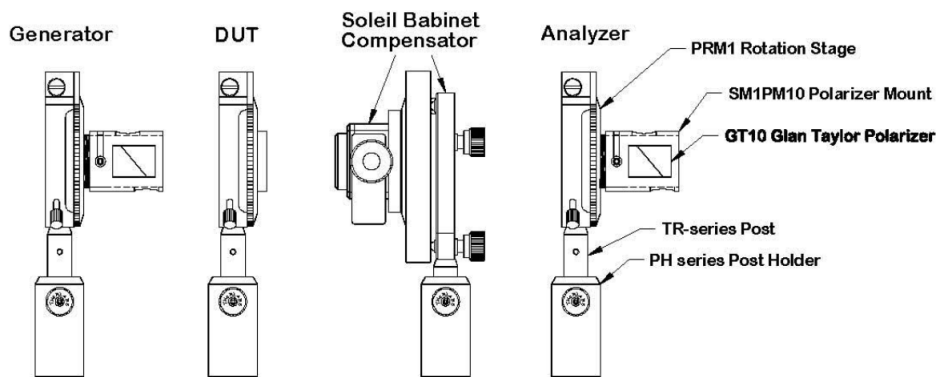


图 4.4 索累补偿法光学系统示意图

3. 旋转索累补偿器方位角，使其光轴方向与光学零点方向成 45° 夹角。此时系统出射光光强增强。通过旋转千分尺的方式控制索累补偿器的延迟量，至系统消光点，此时索累补偿器相位延迟量为零，记千分尺当前位置为 D_0 。在此基础上继续朝同方向旋转千分尺，待出射光强先变强、再减弱直至再次消光时，此时索累补偿器的相位延迟量等于待测波长量 λ_0 ，记此时千分尺位置为 D_λ 。根据上文可知，索累补偿器延迟量变化与光楔移动量存在线性关系，在完成波长标定后可根据光楔移动的相对位置计算出对应相位延迟量。

4. 插入待测样品 (DUT)，并使其光轴与补偿器光轴正交。由于待测样品快慢轴与索累补偿器快慢轴方向相反，此时可得到样品和补偿器的总延迟量：

$$\delta_{total} = \delta_{DUT} - \delta_{Soleil} \quad (4.12)$$

5. 在 $D_0 \sim D_\lambda$ 的范围内继续调整索累补偿器千分之直至系统再次消光，此时待测样品相位延迟量与索累补偿器延迟大小相等，符号相反，记录此时的位置为 D_{cal} 。根据式4.11即可计算得到待测样品的相位延迟量。

$$\delta_{DUT} = 2\pi\lambda_0 \left[1 - \frac{D_{cal} - D_0}{D_\lambda - D_0} \right] \quad (4.13)$$

基于等偏离法的暗点测量。根据上文所述，索累补偿法需要多次测量消光点（暗点）的位置，暗点的测量误差直接影响该方法的精确度。在实际测量过程中，暗点附近离散光强点的变化量很小，无法通过直接读取光强的方式精确定位暗点所在的位置。为了提高暗点测量的精度，本文采用等偏离法实现对暗点位置的精确标定。

等偏离法是利用周期性函数的对称性实现光强最小值（暗点）处位置精确标定的方法。根据图4.4所示可知测量系统的矢量表示式为：

$$S' = P_{90} \cdot SBC_{135} \cdot R_{45} \cdot P_0 \quad (4.14)$$

利用 Mueller 矩阵计算可得系统出射光强为：

$$I_{out} = \frac{1}{2} I_{in} \sin^2 (\delta_{DUT} - \delta_{Soleil}) \quad (4.15)$$

将式4.2带入式4.15可知系统出射光强与索累补偿器光楔移动距离成正弦平方关系（如图4.5所示）。暗点附近区域光强点关于暗点位置偶对称。测量过程中在右区域范围内取与左区域采样点 D_1 、 D_2 、 D_3 对应光强值相等点 D'_1 、 D'_2 、 D'_3 。根

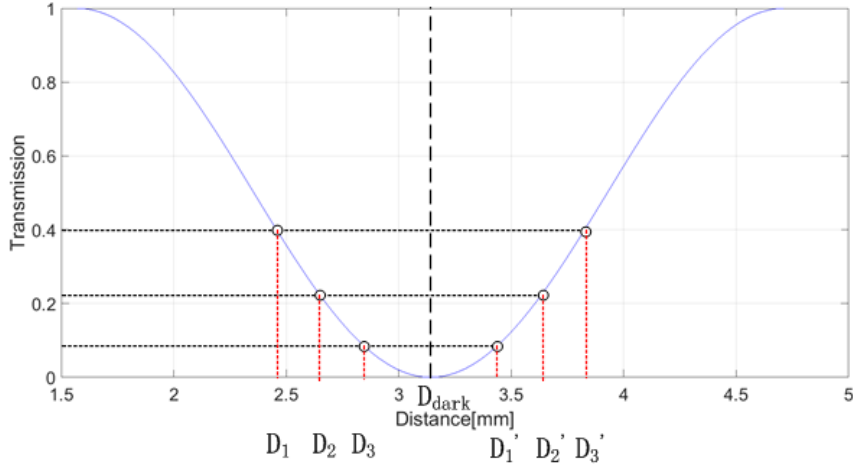


图 4.5 等偏离法示意图

据对称性可以精确计算出暗点位置为：

$$D_{dark} = \left(\frac{D_1 + D'_1}{2} + \frac{D_2 + D'_2}{2} + \frac{D_3 + D'_3}{2} \right) \setminus n \quad (4.16)$$

其中 n 为采样点个数。一般地，采样点个数越多，得到的测量结果越准确。在进行实测时，由于偏振片偏振度、偏振元件光轴方位角度以及探测器暗电流等非理想条件的影响，导致测得的系统出射光强值不为零，但上述条件并不会影响暗点对应光楔移动量测量值的准确性，相关参考文献^[62]中有具体说明。索累补偿法测量晶体相位延迟量的主要误差来自于索累补偿器仪器本身。

4.2 基于索累补偿法的快速高精度自动定标方法

根据第二章的内容可知，Lyot 型滤光器利用的是多级偏振光干涉原理实现窄带滤光。传统旋转二分之一波片型滤光器每一级的透过波长变化与波片旋转角度成近似线性变化，所以可在滤光器设计完成后实现透过线心波长位置标定工作。而由于液晶波片的相位延迟量与驱动电压变化量时非线性的变化关系，所以在液晶型滤光器的设计过程中需要对每一级的液晶波片相位延迟-电压曲线进行精确标定。在上小节所介绍的方法中，索累补偿器法的测量精度最高，满足液晶型滤光器研制的高精度定标需求。但是，传统的索累补偿器法中需要人工调整补偿器件，实际测量效率较低，不适用于液晶波片相位延迟电压曲线的多点标定。为了解决这个问题，本文在索累补偿器的基础上，实现了测量系统的自动化控制。该系统可完成 LCVR 延迟-电压曲线的高精度快速标定。本节将着重介绍实现索累补偿法自动化控制的具体方法。

4.2.1 光学平台搭建

首先, 根据索累补偿法的测量原理搭建相关测量系统, 图4.6为自动化索累补偿法控制系统示意图。采用配有稳压电源的 150W EKE 宽带卤素灯作为系统光

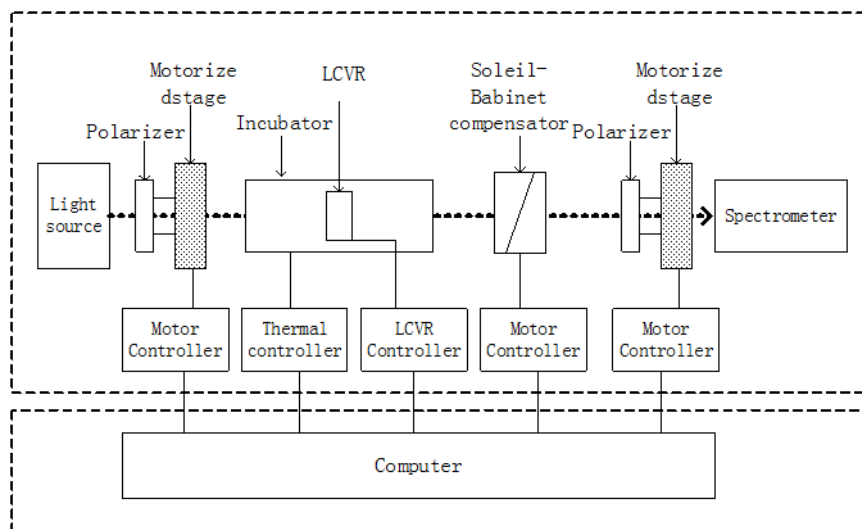


图 4.6 自动化索累补偿法控制系统

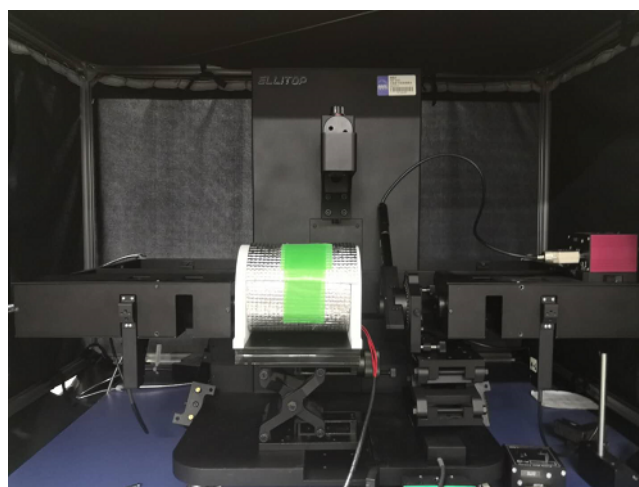


图 4.7 控制系统实物展示图

源, 入射光经过光纤束及准直镜后转换为准直度小于 0.5° 、光斑小于 6.4mm 的准直光束。然后经起偏器、液晶波片、补偿器以及检偏器等偏振器件, 最终由光纤光谱仪接收。系统中所使用的起偏器以及检偏器消光比大于 $10000:1$, 使用由直流伺服电机驱动的中空旋转位移台控制偏振片光轴角度, 旋转角度双向重复精度为 $\pm 0.1^\circ$ 。为了减小环境温度波动造成 LCVR 相位延迟测量的误差, 课题设计了专用恒温筒, 并采用自研的高精度温控系统将待测样品所处环境温度波动范

围控制在 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 以内。采用由索雷博公司生产的 SBC-VIS 型索累补偿器作为补偿器件, 可实现 365-800nm 波段范围类 $0-2\pi$ 相位延迟连续可调。使用 Z825B 型高精度伺服马达替换标准千分尺, 实现索累补偿器的电控调节。探测器为海洋光学生产的 USB2000+ 型光栅光谱仪, 其中配备了微型光栅以及线阵 CCD, 分辨率为 0.4nm, 可探测 300nm-1100nm 波长处的光强值。

4.2.2 索累补偿器自动控制

为了实现对索累补偿器的自动控制, 本课题对目前的补偿器产品结构进行了改进。图4.8为本课题采购的由索雷博公司生产的 SBC-VIS 型索累补偿器。该产品利用高精度数显千分尺作为补偿器移动光楔的驱动源, 通过手动旋转的方式调节光楔相对位移量。课题在该产品的基础上, 利用 Z825B 型高精度伺服电



图 4.8 传统索累补偿器产品

机替换千分之结构, 实现电控调节索累补偿器的功能。该款伺服电机指标参数如表4.1 所示。选用索雷博公司的 KIM001 产品作为高精度伺服电机的驱动器。该驱动器提供一路独立的电机控制通道, 以及 USB 通信端口, 可连接计算机远程驱动电机旋转并获取电机当前位置。具备机械回零、相对运动、绝对位置运动、速度更改、运动模式选择等功能。与此同时, 产品支持基于 Visual Studio、Labview 等编程环境的二次开发功能, 并提供了较为丰富的程序例程, 方便模块化集成系统的开发^[63]。本课题使用 Labview 软开平台实现对索累补偿器的自动控制。

4.2.3 等偏离法自动化实现

4.2节中叙述了利用等偏离法实现暗点精确定位的基本原理。在原有的实验室测量系统中, 为了实现该方法, 对系统的接收端电路设计了较为复杂的稳点电

表 4.1 Z825B 型高精度伺服电机参数

Item #	PIA25
Travel	25 mm
Typical Step Sizea	20 nm
Maximum Step Sizeb	<30 nm
Step Size Adjustabilityc	≤30%
Maximum Step Frequencyd	2000 Hz
Backlash	None
Maximum Axial Preload	25 N
Velocity	2 mm/min (Typical)
	<3.5 mm/min (Maximum)

路，以保证光强读出数据的稳定性。同时在测量过程中需要人为干预，通过对千分尺的反复微调，找出光强值近似相等的对称点。这种方式存在的问题是测量效率较低，在液晶波片相位延迟曲线进行多点定标的过程中需要耗费较大的时间和人力，同时无法有效避免人工重复操作而带来的操作误差。本课题根据计算机数字采样的特点，提出了一种基于容差机制的计算方式，可以很好的实现等偏离法自动化运算，显著提高了暗点识别的效率和准确性。下面将介绍具体实现方法。

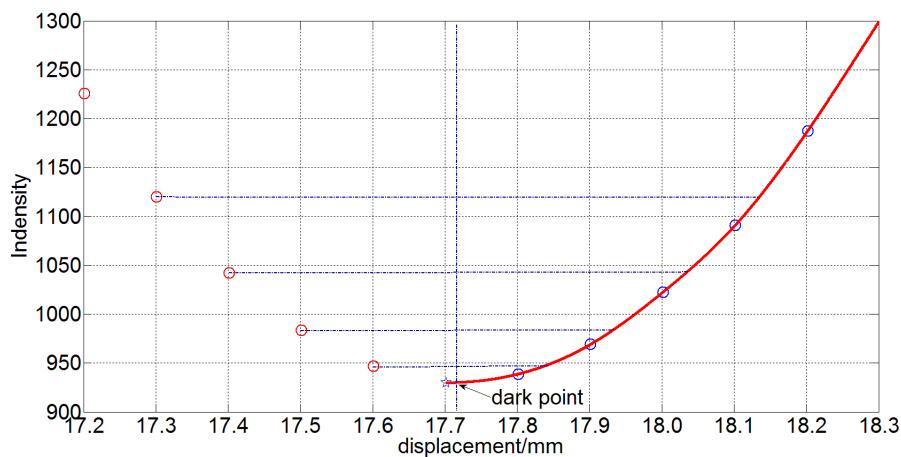


图 4.9 自动化等偏离法原理图

图4.9中的圈点为暗点附近的实际测量数据，横坐标为光楔绝对位置，纵轴为

光谱仪测量的光强值。采用等距测量方式进行离散采样，位移间隔量为 0.1mm。从图中可以看出最小值点附近范围采样数据点并不对称，所以无法直接利用等偏离法计算暗点位置。需要对数据进行以下处理：

1. 定位最小值点位置，取出左区域范围 n 个采样点 d_1 、 $d_2 \cdots d_n$ 作为参考数据；
2. 取出右区域范围 $n+2$ 个数据点（包含最小值点），并对这个数据做三次样条插值处理，插值间隔 0.001mm；
3. 在插值后的数据中找出与 d_1 、 $d_2 \cdots d_n$ 的光强差值在 $\pm\Delta_d$ 范围内对应的数值点，并将其光楔位移量的均值作为 d_n 的对称点 d'_n ；
4. 利用式4.16计算可以得出暗点精确位置。

在软件设计时需要将上述步骤中的采样点个数 n 以及容差范围值 Δ_d 设置为可输出变量，在测量过程中需要对其进行微调，以保证方法运行的有效性。本课题利用 Labview 软件开发平台结合 MATLAB 函数计算实现了基于等偏离法自动暗点标定系统的软件设计。

4.2.4 快速相位延迟标定

索累补偿法是一种高精度的晶体延迟标定方法，但若直接利用该方法对液晶波片相位延迟-电压曲线进行多点定标（采样点大于 100 个）时，测量效率较低。主要原因是对未知延迟测量时，需要在较大范围内调整索累补偿器的光楔位移量，尤其在使用计算机实现自动化测量时，需要在每个延迟量测量时均需进行 $0-2\pi$ 全范围扫描。以本课题所选用的索累补偿器为例，在 656.3nm 全波长对用光学位移量在 18mm 左右，间隔 0.1mm 进行扫描测量需完成对 181 个相位延迟量的测量，从而计算出一个待测样品延迟量，耗时在 3min 左右。为了提高液晶波片的标定效率，本课题提出了一种新的测量方式。即首先利用测量速度快，但精确度一般的光强法对液晶波片相位延迟曲线进行初步标定。然后根据标定结果缩小索累补偿法光楔移动范围，在小范围内在对个电压对应的相位延迟量进行精确测量，这种方法可以极大地提高液晶相位延迟-电压曲线的测量效率。效率对比结果将在下文中加以展示。

4.2.5 快速自动化标定系统软件开发

本课题结合 Labview 控制技术及 MATLAB 数据处理技术实现全部测量过程的自动化控制。从功能上可以将控制系统分为以下两个部分。

第一部分是利用光强法实现液晶相位延迟电压曲线的快速测量，图4.10为软件工作流程图。

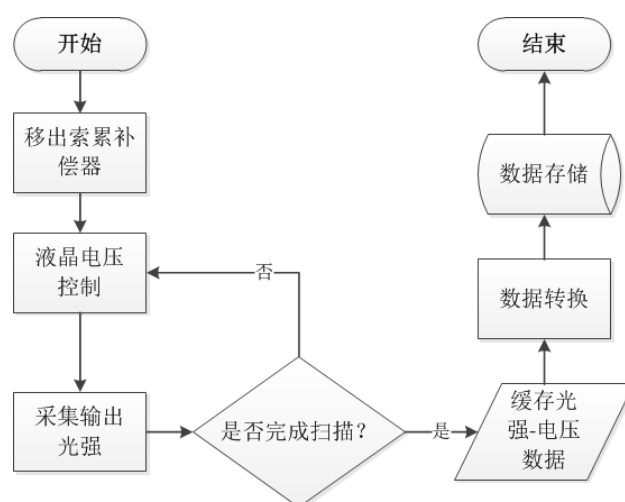


图 4.10 液晶相位延迟初步标定软件设计流程图

第二部分即为索累补偿法精确标定软件的设计。软件从主要功能方面可以划分成三个模块：

1. 数据转换模块。该模块的作用是根据快速定标结果，计算出不同驱动电压下对应索累补偿器光楔移动范围。首先，从数据库读出快速定标后的液晶相位延迟-电压曲线数据。然后根据式4.15中的函数关系计算出对应的光楔位移量。最后对位移-电压数据进行缓存，以方便后续程序的调用。

2. 液晶驱动电压扫描控制模块。该模块用于设置驱动电压扫描间隔、扫描频率以及判断是否结束循环体。

3. 相位延迟精确标定模块。该模块即对上文所述的索累补偿法自动化进行实现。首先读出数据转换模块缓存的位移电压曲线。然后设置固定的扫描范围，对暗点附件的数据进行离散采样测量。最后根据索累补偿法原理实现对应电压下的相位延迟量进行精确定位。

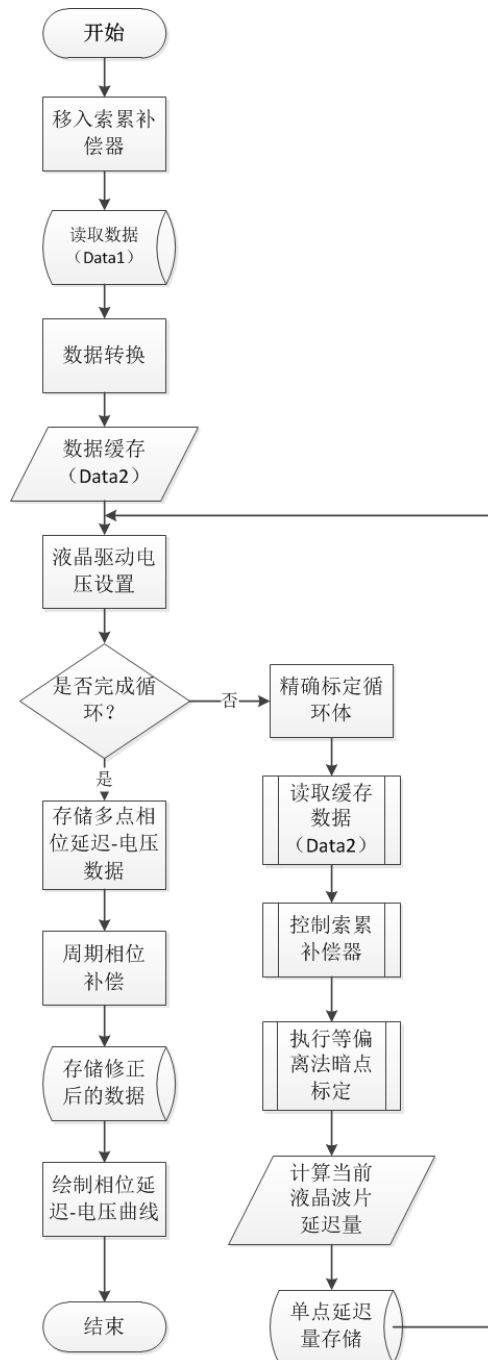


图 4.11 液晶相位延迟精确标定软件设计流程图

图4.12为自动标定软件用户界面。软件功能模块分为以下几个部分：

1. 光谱仪设置模块：功能包括曝光时间设置、波长设定、数据平均次数设定以及数据平滑次数设定；
2. 电机控制模块。功能包括电机回零功能启停、电机旋转速度设置、电机绝对运动位置设定、电机相对运动间隔步数设定以及电机当前位置显示；
3. 系统设置模块。包括索累补偿法取点数设置、循环次数设定以及容差值

设定功能；

4. 液晶驱动模块。包括液晶初始驱动电压设置，扫描间隔电压设置、通道数设置以及当前驱动电压显示功能；

5. 数据模块：包括相关数据处理功能以及最终测量数据显示功能。

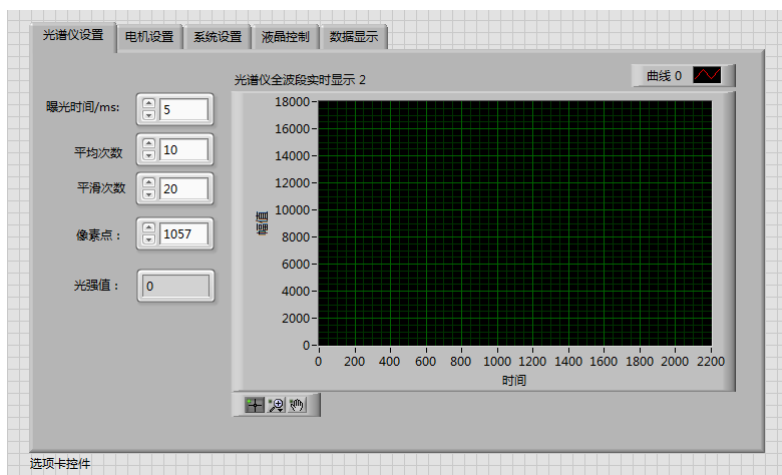


图 4.12 液晶相位延迟精确标定软件用户界面

4.2.6 系统测量结果及误差分析

为了验证基于索累补偿法的自动化控制系统性能，本课题开展了相关的验证实验，本节将对实验测量的结果以及系统误差的分析结果进行展示。

1. 系统测量精度及重复精度。由于液晶波片的相位延迟量受外场环境因素影响较大，为了剥离液晶自身的光电特性带来的测量误差，本课题通过对由中国计量院标校后的二分之一波片（656.3nm）延迟量进行测量，从而验证测量系统的各项性能。对二分之一波片的五个不同位置点进行多次重复测量，位置选择如图所示：

表4.2为利用自动控制系统测量二分之一波片的数据，通过对数据的分析可以得到系统相位延迟测量相对误差差（测量精度）小于 $0.0575\%\lambda$ ，重复精度小于 $0.01197\%\lambda$ 。

2. 液晶相位延迟-电压标定结果。该实验的测量环境温度为 35°C ；液晶波片驱动电压测量范围为 0-10V；驱动电压测量间隔为 0.1V。图4.14是利用自动控制系统实现的液晶波片相位延迟-电压曲线标定结果。其中的蓝色星点为快速标定后的曲线，红色圈点为精度标定后的曲线。对比可以利用索累补偿法进行精确标定后的曲线变化更加平滑，符合液晶波片相位延迟随驱动电压连续性变化的特

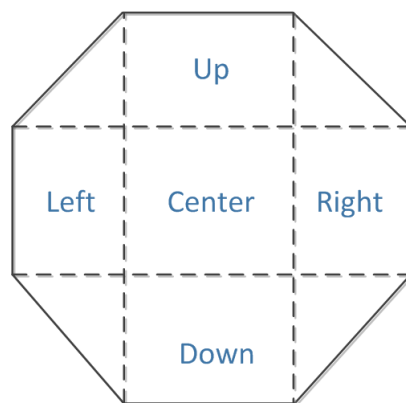


图 4.13 二分之一波片延迟量测量位置

表 4.2 自动化控制系统测量数据

Measure Times							
Position	1	2	3	4	5	Average/ $[\lambda]$	RMS/ $[\lambda]$
Up	0.5004722	0.5006111	0.5005833	0.5005833	0.5005	0.5005278	0.0000621
Center	0.4998333	0.4998056	0.5000833	0.50001	0.49988	0.4999139	0.0001130
Down	0.5004167	0.5006389	0.5005	0.5007222	0.50066	0.5005722	0.0001197
Left	0.4994444	0.4995833	0.4996667	0.4995556	0.49972	0.4995056	0.0001000
Right	0.5005556	0.50075	0.5006944	0.5006111	0.50075	0.500575	0.0000933

性。

为了检测系统对液晶波片测量的稳定性,本实验对液晶波片的延迟进行了多次测量,并选取延迟量为 0.25λ 、 0.5λ 、 0.75λ 和 λ 的四个测量点进行比较分析,表4.3为实验测量结果。以第一次测量结果为参考点,对数据进行分析可知:测量结果的 PV 值小于 $0.54\%\lambda$, RMS 小于 $0.26\%\lambda$;液晶波片电光效应特性存在一定程度上的不稳定性。

3. 除以上实验外,本课题还将自动化测量系统的工作效率与之前测量方式的工作效率进行了对比,结果如表4.4 所示。从对比结果可知,本课题所提出的测量方法可以显著提高液晶波片相位延迟电压曲线的标定效率。

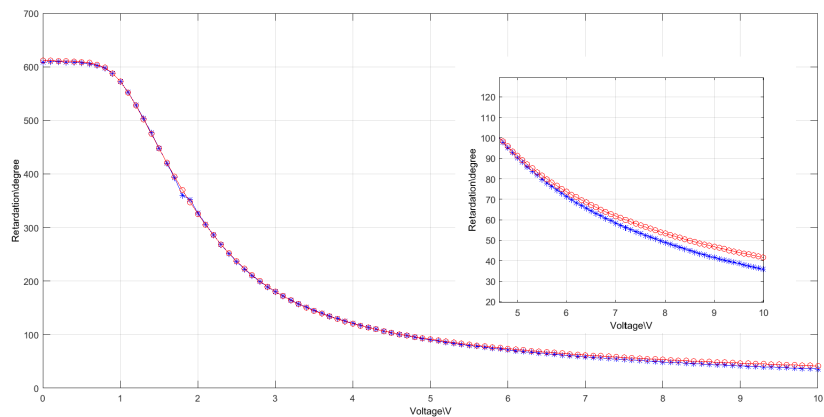


图 4.14 液晶波片相位延迟-电压曲线

表 4.3 液晶波片相位延迟测量数据

Measure Times							
Voltage	1	2	3	4	5	PV/ λ	RMS/ λ
5.059V	0.25	0.2492	0.2496	0.2504	0.2489	0.0015	0.0024
3.005V	0.5	0.4982	0.4991	0.5016	0.4992	0.0034	0.0026
2.291V	0.75	0.7514	0.7502	0.7485	0.7486806	0.0029	0.0018
1.844V	1	1.0025	1.0020778	0.9971333	1.0024111	0.0054	0.0023

表 4.4 不同测量方法时间效率对比

测量方法	单延迟点标定时间	曲线标定时间
人工操作	3min	7~8h
索累补偿法	1.5min	2.5h
光强法 & 索累补偿法	20s	0.5h

4.3 本章小结

本章首先对目前常用的波片延迟测量方法的工作原理以及优缺点进行了简要介绍。通过对比分析，采用精度较高的索累补偿法作为本课题液晶相位延迟精确定标的基本方法。针对传统索累补偿法测量效率低的问题，提出了一种切实可行的全自动测量方案。设计了相关的实验系统以及软硬件支持平台，利用虚拟仪器（Labview）软件开发技术实现了对测量系统的自动控制。着重介绍了测量系统的设计原理以及各个模块所实现的具体功能。在文章的最后对自动测量系统

的各项性能进行实验测试，并得到系统相位延迟测量相对误差（测量精度）小于 $0.0575\%\lambda$ ，重复精度小于 $0.01197\%\lambda$ 的结论。该系统的设计为课题中向列型液晶波片的相位延迟电压曲线精确测量提供了一种可行的技术方案。除此之外，该系统也可以作为其他晶体或液晶波片延迟量标定的通用测量平台。为液晶波片在其他仪器中的应用提供了较有力的技术保障。

第5章 外场环境对液晶型双折射滤光器的影响研究

液晶型双折射滤光器的性能主要受液晶波片光电特性的影响，本章利用上一章节所提出的测量方法对液晶波片的电光特性开展了大量的研究工作，包括液晶波片的稳定性、光轴特性、温度效应、视场效应等等。并根据实验结果分析了外场环境对液晶型双折射滤光器的性能影响程度以及滤光器相关控制系统的设计要求。除此之外，得益于先进天基太阳天文台（ASO-S）的支持，本课题开展了液晶波片空间环境辐照实验，获得了在质子辐照、伽玛辐照以及紫外辐照环境下液晶波片电光性能变化的实验结果，为空间化液晶滤光器的研究积累了宝贵数据。

5.1 相位延迟稳定性

液晶是介于晶体与液体性质之间的中间态，液晶波片的相位延迟量会受电场强度、温度等外界条件的影响，而对于滤光器而言，稳定的透过波带是仪器必备的参数指标。本课题将液晶波片应用至双折射滤光器中，需要对液晶的稳定性进行长时间重复测量，积累相关有效数据，并利用第三章滤光器误差源分析结果计算出液晶波片稳定性对液晶型双折射滤光器性能的影响程度。针对液晶波片稳定性，课题主要进行的测量试验包括一下两个方面：

1. 长周期相位延迟稳定监测。在温度保持相对恒定的环境下对应的相位延

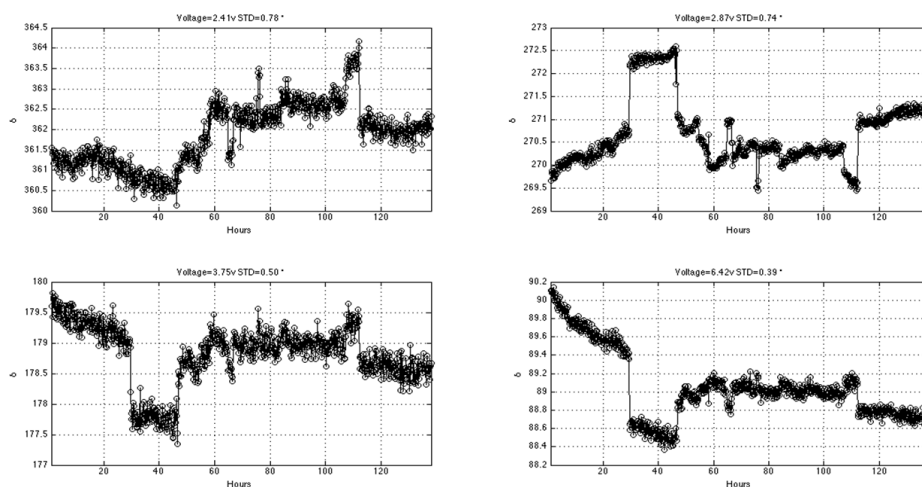


图 5.1 长周期相位延迟稳定性测量数据曲线图

迟进行长周期测量。测量总时间为 140 小时，数据采集时间间隔为 1 小时共 141 组数据。每组数据中取出相位延迟为 90° 、 180° 、 270° 以及 360° 四个相位延迟点并进行相关数据分析工作。图5.1为长周期稳定性测量结果。经统计，在 140 小时内液晶相位延迟变化量 PV 值 ≤ 2 度，考虑到延迟变化的随机属性，其标准差 (STD) 在 0.5 度范围以内。

2. 电子学设备断电测量。除了对液晶波片长周期稳定性测量外，本课题还进行了电子学设备通断电的延迟测量稳定性的相关实验。实验方式是，每一天测量十组左右的相位延迟数据，测量间隔为 1 小时，时间跨度在 10 小时。在完成当天测量任务后关闭所有电子学设备，包括液晶驱动器、温度控制器、光源以及光纤光谱仪。间隔超过 12 小时后重新开启所有设备，再进行一天的数据测量。图5.2为实验测量结果。在该方法下测得液晶相位延迟的标注差 STD 小于 0.5° 。

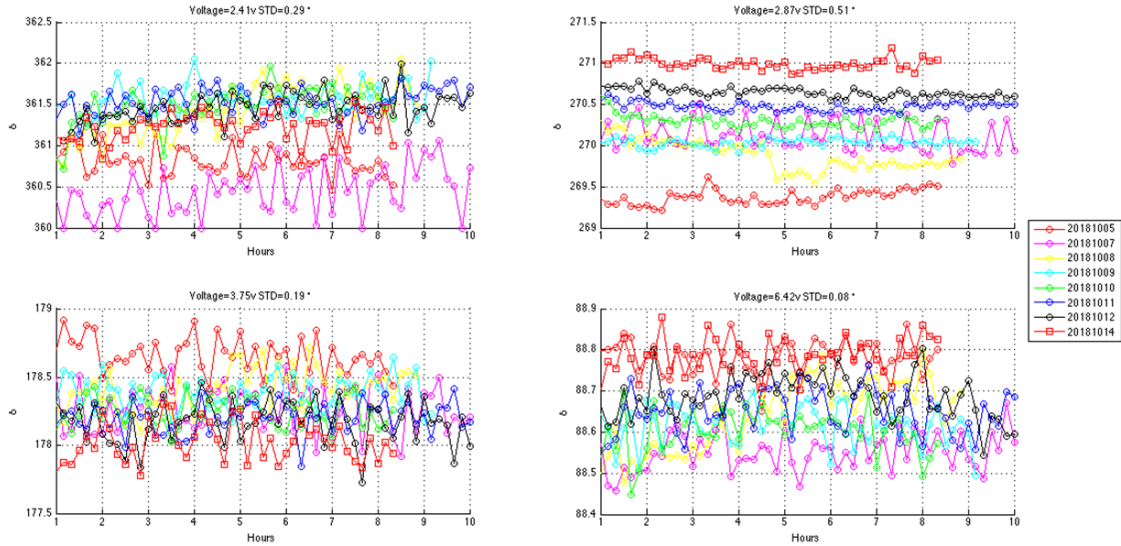


图 5.2 电子学设备通断电稳定性测量曲线图

根据第三章液晶双折射滤光器误差源影响分析结果可知，滤光器透过带轮廓与液晶波片相位延迟量存在以下关系：

$$\Delta_{\lambda} = \frac{\lambda_0^2}{\pi d_0 (n_o - n_e)} \Delta_{\delta}$$

其中带宽最宽一级的影响最为明显，将第五级结构相关参数带入上式可以得出液晶波片相位延迟变化 0.5 度时，对应透过带中心波长偏移 0.0044nm。综合相位延迟不稳定性以外的其他因素，本课题所研制的液晶双折射滤光器透过波长最高调谐分辨率应在 0.005nm 左右。

5.2 光轴特性

在对液晶波片光电特性进行测量时，发现液晶波片的光轴会受驱动电压和外界温度影响。课题设计了相关的实验，对光轴受外场条件变化的影响程度做了定量测量及分析。

1. 测量原理。当入射光拍照你很方向与晶体光轴方向一致时，晶体内部分解的 o 光和 e 光将不会产生光程差，双折射晶体对线偏振光的相位延迟为零。光

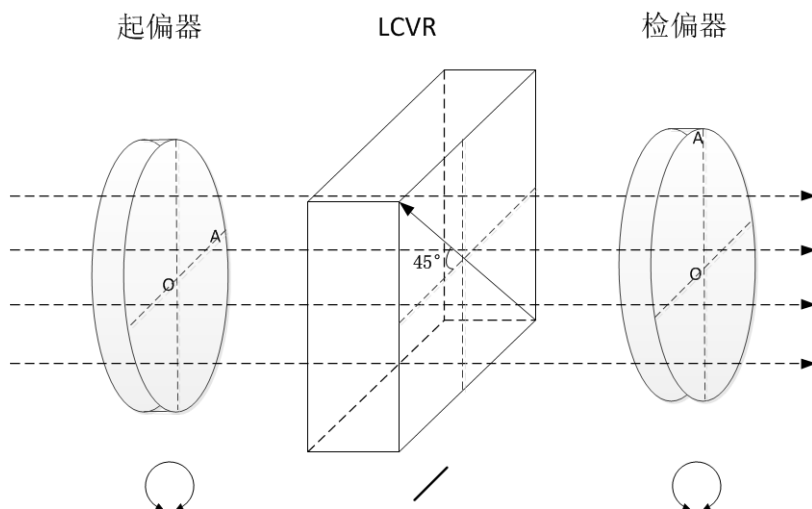


图 5.3 液晶波片光轴测量光路原理图

轴测量光路原理图如图5.3所示。液晶光轴为 45 度，起偏器与检偏器方向成 90 度，且两偏振片均安装在中空旋转台上，可由步进电机控制偏振片方位角进行旋转。在测量过程中需保证两偏振片以相同间隔同步旋转，且偏振方向始终成 90 度夹角。以水平方向为初始位置，当起偏器偏振方向与液晶波片光轴方向一致时，探测器测量到最低光强。

2. 测量平台搭建及软件设计。利用 Labview 平台开发了可以实现全自动化的液晶光轴方位测量软件，并且利用等偏离法实现高精度的暗点识别功能。软件功能及核心算法与第四章高精度相位延迟定标方法相近。

3. 测量结果。图5.4所示的是液晶光轴随驱动电压以及外界环境温度变化的曲线图。经分析可知在电压驱动范围内液晶光轴最大变化角度为 1 度。

根据第三章的研究结果以及本实验的数据可知，外场环境下液晶光轴的变化对液晶滤光器透过轮廓以及中心波长造成的影响可以忽略。本研究所设计的自动光轴检测系统可适用于双折射晶体光轴角度的高精度标定。

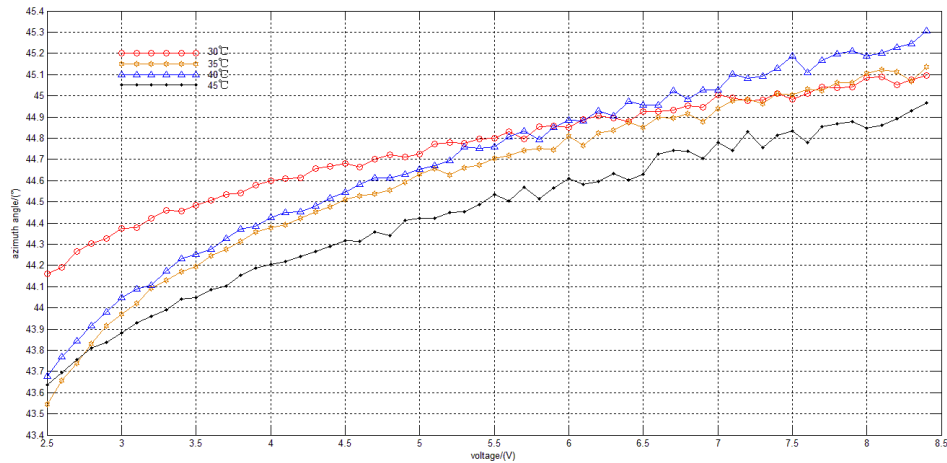


图 5.4 液晶波片光轴随外场变化曲线图

5.3 温度效应

温度是除电压外的另一个对液晶相位延迟量有较大影响的重要物理参数。外界环境温度的变化影响液晶分子的热力学参数，从而使得相同电场强度下液晶相位延迟量发生变化。在上一节稳定性的实验中利用恒温结构和仪器始终保持温度的相对恒定。本节内容将展示不同温度下相位延迟-电压曲线的测量结果。

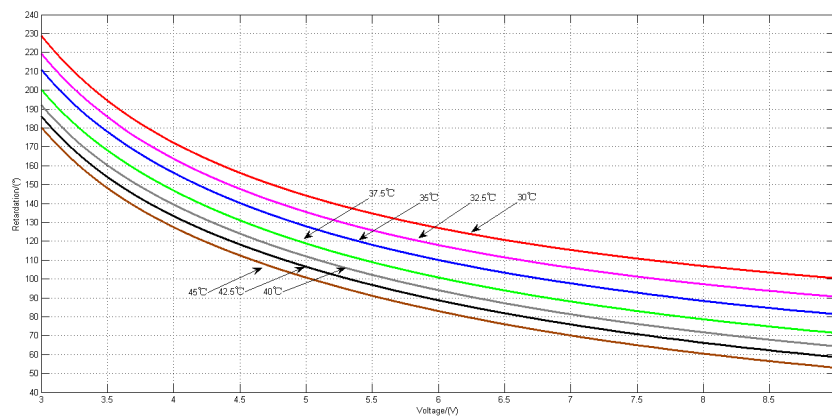


图 5.5 相位延迟与温度间关系曲线（全范围）

图5.5、5.6为不同温度下测得的相位延迟-电压曲线。测量范围为 30 摄氏度~45 摄氏度，间隔 2.5 摄氏度。从数据中可以得出液晶的相位延迟随温度升高而产生非线性的变化，延迟随温度变化量的最大值为 4 度每摄氏度，且随电压升高温度效应逐渐变小。本课题所应用的温度控制系统可将环境温度波动范围控制在 ± 0.01 摄氏度以内，可得受环境温度的影响可能带来的液晶波片延迟波动量小

于 0.04 度，对应液晶滤光器透过轮廓偏移 0.00035nm，满足滤光器使用需求。

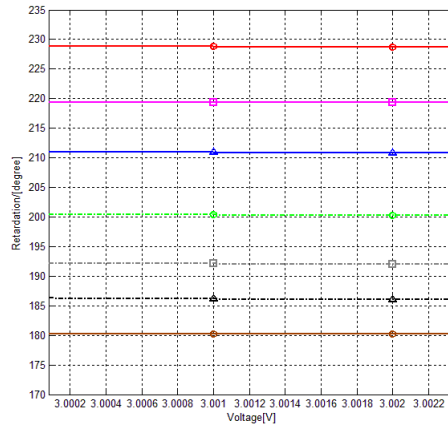


图 5.6 相位延迟与温度间关系曲线（局部放大）

5.4 视场效应

视场效应相关实验是为了探究不同入射光角度对液晶相位延迟变化的影响。实验过程中在将液晶波片结构安装在旋转台上，通过步进电机对液晶波片的切

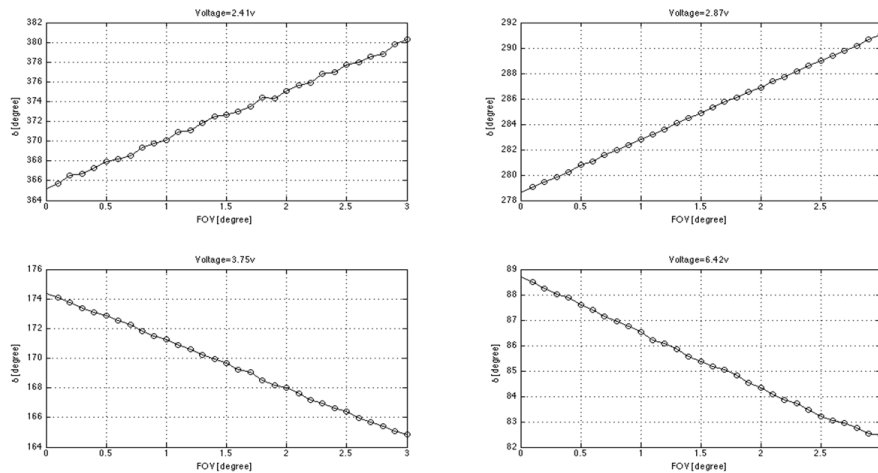


图 5.7 不同入射角与相位延迟量间关系曲线

斜角度进行控制。图5.7为不同入射角的相位延迟测量结果。入射角度范围在 0 至 3 度，间隔 0.1 度。测量延迟点为 90 度、180 度、270 度和 360 度。根据测量结果可以得到入射角每变化 1 度，液晶波片相位延迟最大变化 4 度。当液晶滤光器放置在望远镜中的平行光路中时，可以降低视场效应所带来的影响，实测数据

需在液晶滤光器型望远镜试观测实验中得出。

5.5 响应时间

根据节所述液晶波片工作原理可知，液晶分子的指向矢会随外部驱动电压强度改变而发生旋转。受液晶材料粘滞度以及环境温度的影响，液晶分子旋转并保持光学性能稳定需要一定量的时间延迟，称该时间延迟为响应时间。液晶波片的响应时间直接影响液晶型滤光器波带调制的时间。本课题对响应时间参数进行相关的实验测量。

1. 测量原理。液晶波片环境温度为 42.216 摄氏度。将液晶驱动器设置为双电压状态可调输出模式，电压状态切换频率固定。将光纤光谱仪曝光调至最短（3ms）利用对光路输出光强进行不间断测量，读取两光强稳定状态之间的时间间隔，作为液晶波片响应时间测量数据（如图5.8所示）。

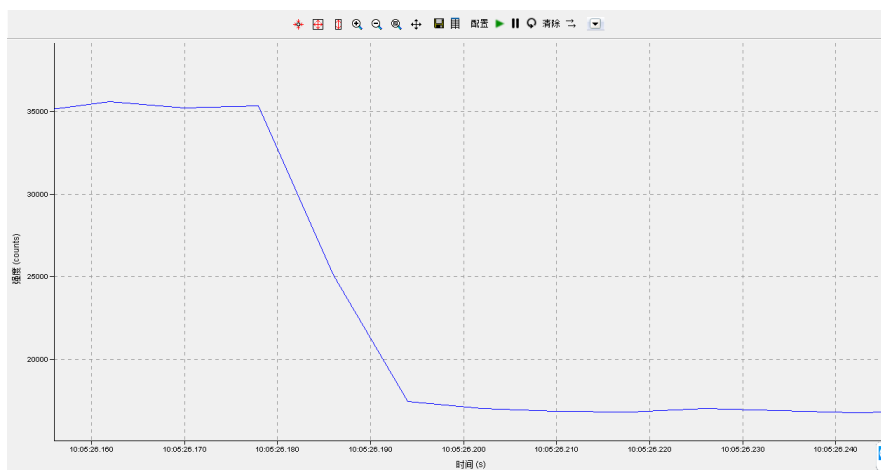


图 5.8 响应时间测量原理示意图

2. 测量结果。本课题所选用的液晶波片在 42.216 摄氏度的工作温度下,2V~10V 驱动电压范围内任意工作电压状态切换，液晶波片光学响应时间 $\leq 30\text{ms}$ 。根据该实验结果，并考虑到电子学控制控制系统所带来的响应延迟，预计在最佳工作状态下，液晶滤光器透过波长调谐时间可控制在 50ms 以内。

5.6 空间环境辐照效应

液晶型双折射滤光器较传统旋转波片滤光器最大的优势在于未来的仪器空间化应用。本课题得益于 AOS-S 项目的支持，对液晶波片进行了相关的空间化

测试实验。先进天基太阳天文台（Advanced Space-based Solar Observatory,ASO-S）是由中国物理协会发起的针对第 25 个太阳活动峰研究而发起的空间项目^[64]。该卫星平台上设计有三个有效载荷，其中的全日面矢量磁像仪（Full-disc Magneto-Graph,FMG）的设计任务由国家天文台怀柔太阳观测基地承担。该仪器的科学任务是高时间分辨率、高空间分辨率、高磁场分辨率的太阳磁场测量。在 FMG 望远镜中首次应用了液晶型偏振分析器以实现提高设备的偏振灵敏度。液晶偏振分析器由两片液晶波片组成，由于目前尚未有液晶波片的空间应用经验，为了保证仪器空间应用的可靠性，对液晶波片进行了相关的空间环境辐照实验。同时，也为未来液晶双折射滤光器的空间化应用积累了珍贵的有效数据。本小结将展示相关实验的测量方法所获得的结果及结论。

5.6.1 质子辐照实验

质子实验辐照设备使用的是中国原子能科学研究院的 100MeV 紧凑型回旋加速器。质子能量为 100MeV，质子在辐照区域的均匀度优于 90%。实验所采用的样品以及测量参数如表 5.1 所示。辐照总剂量节点、剂量速率以及辐照时间如表所示 5.2。

表 5.1 质子辐照样品及测量参数

样品编号	样品名称	在线加电	相位延迟	响应时间	透过率
1#	液晶波片	×	√	√	√
2#	液晶波片	×	√	√	√
3#	液晶波片	√	√	√	√

实验过程中对辐照前、辐照中间节点以及辐照后的液晶波片参数进行了测量，并得到一下实验结果及结论：

1. 液晶相位延迟变化。液晶波片延迟量测量结果如图 6.8 所示。根据测量数据可得出以下结论：1) 辐照量低于 $10 \times 10^{10} P/cm^2$ 时相位延迟量变化速率较快，高于该剂量后相位延迟变化趋缓；2) 在相同辐照剂量下，加电液晶样品相位延迟量受辐照影响更为明显；3) 辐照期间，加电液晶样品相位延迟最大变化量为 11.1%，该值约为离线测试液晶样品变化量的两倍。4) 结束辐照后液晶相位延迟量在三天时间内基本恢复到辐照前状态，说明质子辐照对液晶波片光学性能未

表 5.2 质子辐照剂量列表

辐照次数	辐照总剂量节点 [P/cm^2]	辐照剂量速率 [P/cm^2]	辐照时长
第 1 次	5×10^{10}	2×10^7	2h5min
第 2 次	10×10^{10}	2×10^7	2h5min
第 3 次	20×10^{10}	2×10^7	4h10min
第 4 次	50×10^{10}	2×10^8	1h15min
第 5 次	100×10^{10}	2×10^8	2h5min

造成破坏性影响。

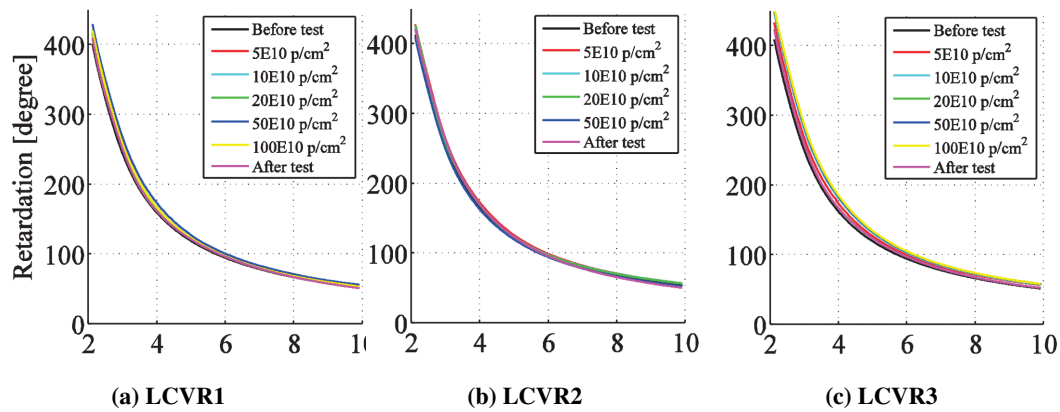


图 5.9 质子辐照实验相位延迟测量结果

2. 液晶波片响应时间。表5.3为各辐照剂量节点的液晶波片响应时间测量结果。从数据可以看出在不同辐照剂量下测得的响应时间变化在 15ms 左右，综合考虑到测量环境以及设备所带来的误差，可以得出液晶波片的响应时间在 $100 \times 10^{10} P/cm^2$ 质子辐照量内没有明显变化。

3. 液晶波片透过率。图5.10为不同辐照剂量节点对液晶波片透过率的测量结果。透过率随波长成非周期性变化，初步研究认为是由于液晶波片内部膜层折射率不匹配而造成的多光束干涉现象，后需会通过改进液晶加工工艺的方式解决，目前已经制作出改进后的实验片，性能提升明显。通过对比各辐照节点的测量结果可得出液晶波片的透过率经质子辐照后未出现明显变化的结论。

表 5.3 质子辐照实验液晶响应时测量间数据表

辐照剂量 P/cm^2	LCVR1		LCVR2		LCVR3	
	上升沿 [ms]	下降沿 [ms]	上升沿 [ms]	下降沿 [ms]	上升沿 [ms]	下降沿 [ms]
0	15	31	15	31	31	31
5×10^{10}	31	31	16	32	31	31
10×10^{10}	32	31	31	46	32	15
20×10^{10}	32	15	32	16	31	15
50×10^{10}	15	15	16	16	16	31
100×10^{10}	16	16	-	-	31	15

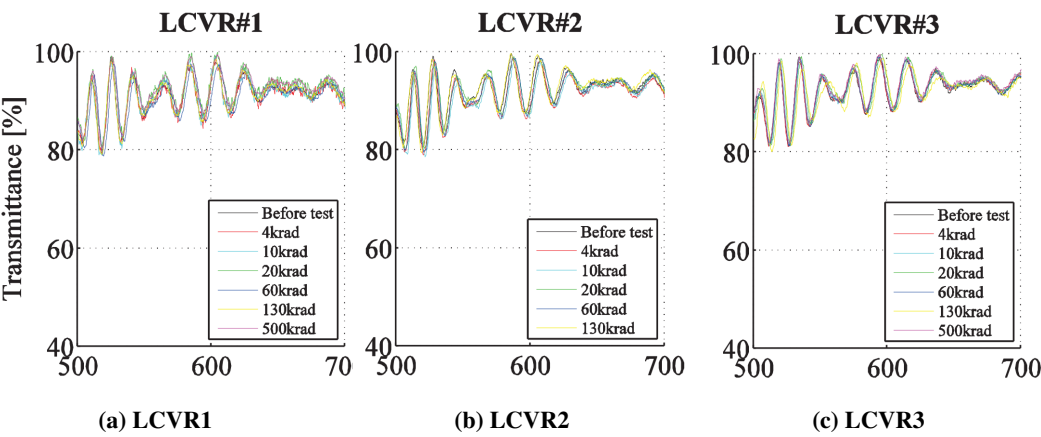


图 5.10 质子辐照实验透过率测量结果

5.6.2 伽玛射线辐照实验

伽玛射线辐照实验采用的是北京大学的 Co60 射线源。实验所采用的样品以及测量参数如表5.4所示。累计辐照总剂量节点、剂量速率如表5.5 所示。

表 5.4 伽玛射线辐照样品及测量参数

样品编号	样品名称	在线加电	相位延迟	响应时间	透过率
1#	液晶波片	×	√	√	√
2#	液晶波片	×	√	√	√
3#	液晶波片	√	√	√	√
4#	液晶波片	√	√	√	√

表 5.5 伽玛辐照剂量列表

辐照次数	辐照总剂量节点 [Krad]	辐照剂量速率 [Krad/h]	辐照时长
第 1 次	4Krad	5Krad/h	48min
第 2 次	10Krad	5Krad/h	1h12min
第 3 次	20Krad	5Krad/h	2h
第 4 次	60Krad	36Krad/h	1h6min
第 5 次	130Krad	5Krad/h	2h
第 5 次	500Krad	50Krad/h	1h3min

1. 液晶波片相位延迟变化。伽玛辐照实验液晶波片样品延迟量测量结果如图6.8 所示。根据测量数据可得出以下结论：在最大 500Krad 剂量的伽玛辐照后，液晶延迟变化仅为 2.7%；在线加电测量样品与离线测量样品在相同辐照量下延迟变化差别不明显。

2. 液晶波片响应时间。表5.6 液晶伽玛辐照实验所测得的液晶波片响应时间数据。响应时间数据仍集中体现在 16 毫秒和 31 毫秒两个数值上。得出的结论是在 500Krad 剂量以内的伽玛辐照对液晶波片的光电响应时间无明显影响。

3. 液晶波片透过率。图 8 给出了伽玛辐照试验所用 4 组液晶波片试验件的透过率曲线图。仪器测量误差约为 10%。辐照期间所有液晶波片试验件的透过率

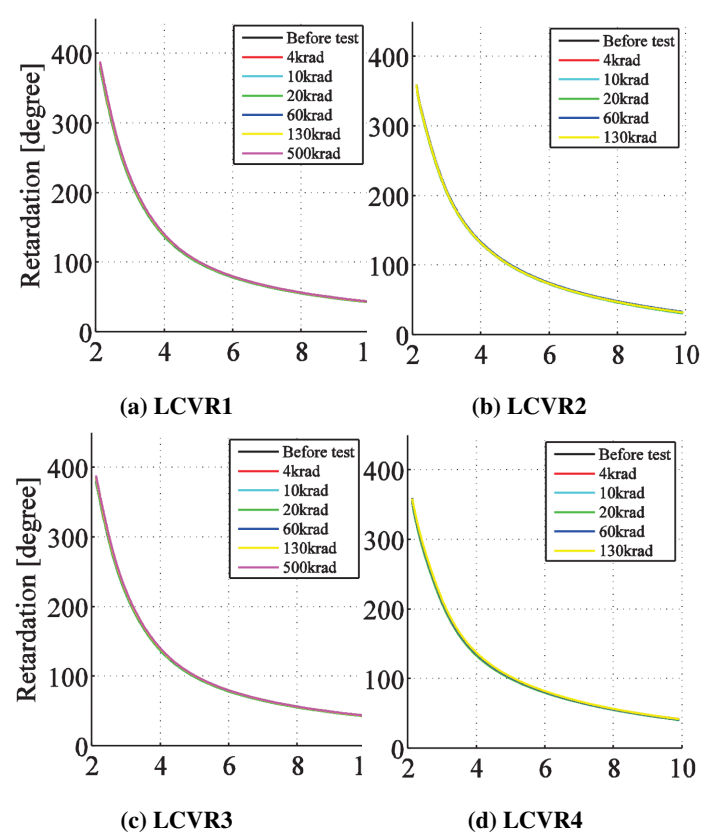


图 5.11 伽玛辐照实验相位延迟测量结果

表 5.6 伽玛辐照实验液晶响应时测量间数据表

辐照剂量 Krad	LCVR1[ms]		LCVR2[ms]		LCVR3[ms]		LCVR4[ms]	
	上升沿	下降沿	上升沿	下降沿	上升沿	下降沿	上升沿	下降沿
0	16	46	47	31	31	31	31	16
4	15	31	15	32	15	16	31	16
10	16	46	15	46	15	32	16	16
20	30	46	16	16	16	31	31	16
60	15	46	15	16	16	15	31	16
130	15	31	31	31	16	31	31	16
500	16	46	-	-	16	31	-	-

无规律性变化，且波动范围小于 10%。可得出在 500Krad 辐照剂量范围内，液晶透过率无明显变化。

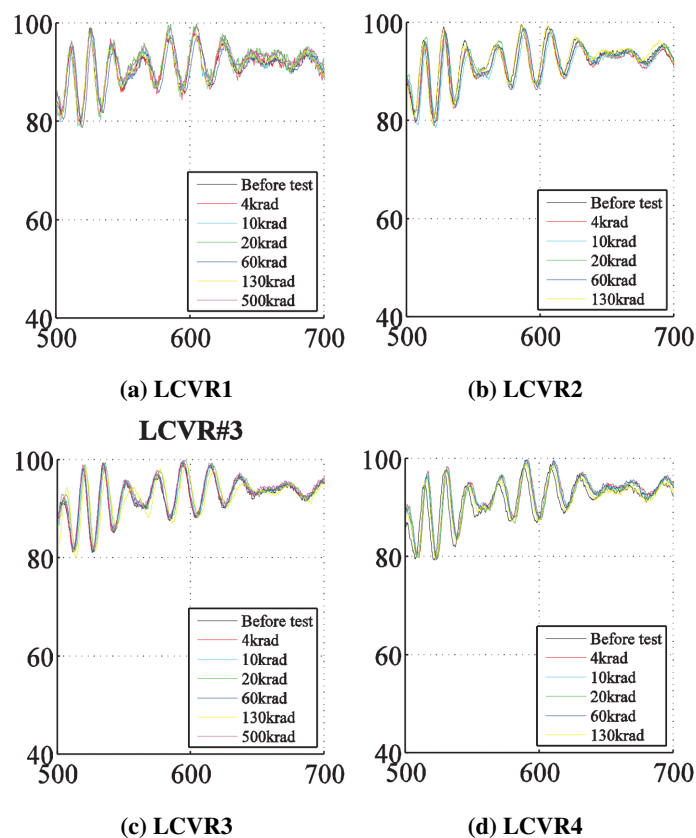


图 5.12 伽玛辐照实验透过率测量结果

5.6.3 紫外辐照实验

紫外辐照的实验目的是测试不同波长范围内紫外辐照效应对向列液晶波片的延迟-电压曲线、响应时间和透过率的影响程度。本实验采用的两个不同宽度波段的紫外辐射源进行相关测试。其中的其中 200nm~400nm 波长连续紫外辐照源选用哈尔滨工大学设备，系统在 200nm-400nm 采用 3 倍加速，剂量节点分别为 0.25ESH、0.5ESH、0.75ESH、1ESH、2ESH、5ESH；320nm-390nm 波长紫外辐照光源选用国家天文台提供的美国生产的 INTELLI-RAY 400 Watt UV Flood 紫外光源，辐照度为 $100\text{mw}/\text{cm}^2$ ，在 320-390nm 波段相当于 8.5 倍加速，剂量节点分别为 2.8ESH、5.6ESH、8.5ESH、11.3ESH、14.1ESH、16.9ESH；

1. 液晶波片相位延迟。图5.13为不同紫外辐照剂量的液晶波片样品测量结果。在整个辐照过程中，1# 试验件的相位延迟变化量小于 6%，2# 试验件的相位延迟变化量小于 6.7%，3# 试验件的相位延迟变化量小于 3.6%；4# 试验件的相位

表 5.7 紫外辐照样品及测量参数

样品编号	辐照波段	在线加电	相位延迟	响应时间	透过率
1#	200nm ~ 400nm	×	√	√	√
2#	200nm ~ 400nm	×	√	√	√
3#	200nm ~ 400nm	×	√	√	√
4#	320nm ~ 390nm	×	√	√	√

延迟变化量小于 5.4%；辐照期间，相位延迟呈现增大再减小的趋势；液晶在紫外辐照期间，电压—延迟曲线无剧烈变化，电光性能无损坏；

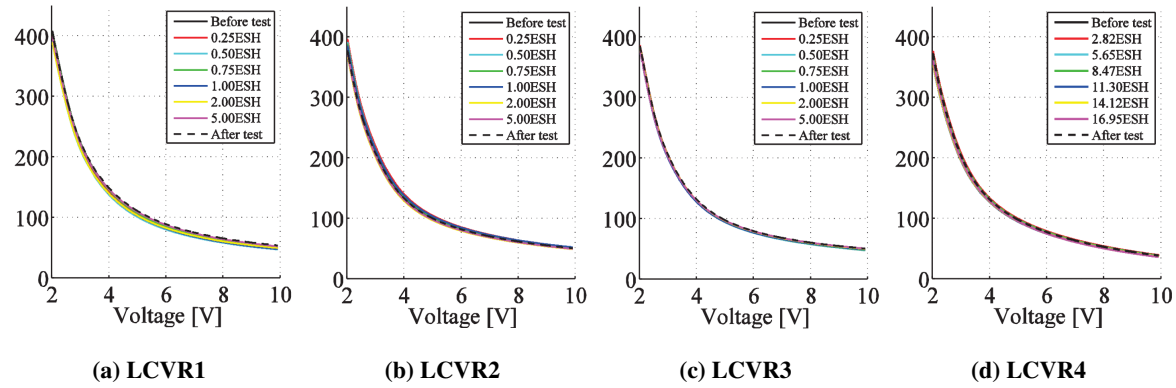


图 5.13 紫外辐照实验相位延迟测量结果

2. 液晶波片响应时间。表5.8展示的是液晶波片紫外辐照实验所测得的液晶波片响应时间数据。可以得出的结论是在 5ESH 剂量以内的紫外辐照对液晶波片的光电响应时间无明显影响。

3. 液晶波片透过率。图5.14为不同紫外辐照剂量下的液晶波片透过率曲线图。液晶波片试验件的透过率在 200-400nm 紫外辐照累计剂量不大于 5ESH 的情况下无明显变化；320-390nm 波段，16.9ESH 剂量范围内液晶波片的透过率亦无明显变化。

表 5.8 紫外辐照实验液晶响应时测量间数据表

辐照剂量 ESH	LCVR1		LCVR2		LCVR3	
	上升沿	下降沿	上升沿	下降沿	上升沿	下降沿
0	15	31	16	31	15	31
0.25	15	31	15	32	14	31
0.5	16	31	16	31	13	31
0.75	15	31	15	32	14	31
1	16	32	15	32	15	31
2	15	31	15	31	8	15
5	16	31	16	32	14	30

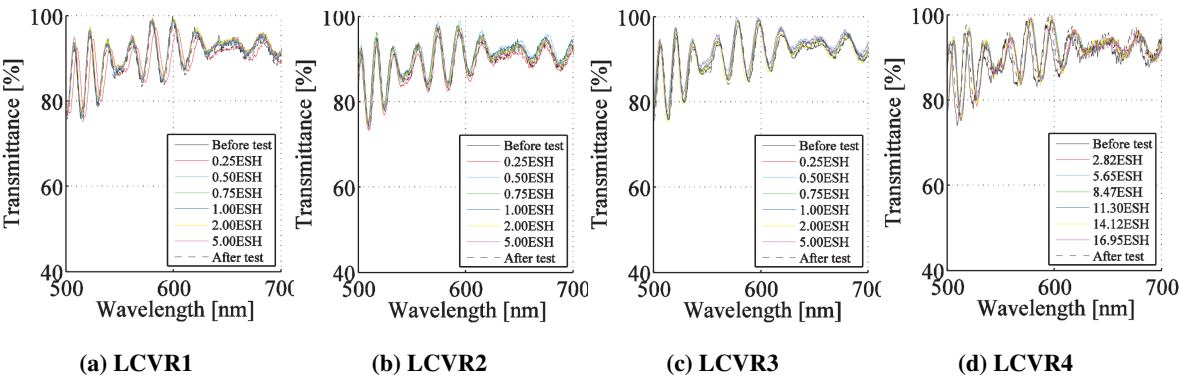


图 5.14 紫外辐照实验透过率测量结果

5.7 本章小结

本章主要研究的是外场环境对液晶型滤光器的影响程度及分析。首先,展开了液晶波片相位延迟量在不同外场环境下的变化量相关实验,并根据实验结果得出以下结论:

1. 液晶波片相位延迟稳定性在 0.5 度以内,对应滤光器透过带中心波长稳定性为 0.0044nm 以内。综合考虑其他因素的影响,本课题所研制的液晶滤光器透过波长最高调谐分辨率应为 0.005nm;

2. 液晶波片光轴随外场环境的变化量在 1 度以内,对液晶型滤光器的影响可以忽略;

3. 液晶波片温度效应约为 4 度 / 摄氏度,本课题所应用的温度控制系统可将环境温度波动范围控制在 ± 0.01 摄氏度以内,对应液晶滤光器透过轮廓偏移范围为 0.00035nm,满足滤光器使用要求;

4. 在最佳工作状态下液晶滤光器透过波长调谐时间可缩短至 50ms 以内;

除了外场效应研究外,本章开展了相关液晶波片空间环境辐照实验,并根据实验结果得出以下结论:

1. 空间环境辐照主要对液晶波片相位延迟量产生影响,对其光电响应时间以及透过率等性质影响较小。

2. 相较于伽玛辐照以及紫外辐照环境,质子辐照对液晶相位延迟量的影响最为明显;在质子辐照过程中,带电液晶样品的相位延迟最大变化量为 11.1%,约为不带电样品的两倍;

3. 伽玛辐照环境对液晶波片相位延迟影响程度最低,在辐照量低于 29krad 时,相同驱动电压下液晶相位延迟测量值最大变化量为 1%;

4. 在完成质子辐照或紫外辐照试验后的一段时间内辐照液晶样品的相位延迟变化量逐渐变小,直至基本恢复至辐照前的状态。初步推定辐照环境主要影响的是液晶波片的内部电场,从而造成相同驱动电压下液晶相位延迟量测量值的变化,而液晶分子自身物化性质并未受到影响。

本章所开展的相关研究及结论对于液晶滤光器的研制以及空间化设备的研制具有重要的参考价值。

第6章 液晶型双折射滤光器原理样机系统设计

本研究的最终目标是研制出一台可以应用到实际观测当中的液晶型双折射滤光器，在完成对部件级元器件的相关研究工作后，课题如期开展了液晶波片研制、滤光器机械结构以及电子学系统的设计工作。本章将对系统设计的原理、过程、以及研制结果进行详细介绍。

6.1 液晶波片的制备与检测

高质量的液晶波片加工生产需要使用专用设备，并且要求在千级超净室中完成整个过程。为了解器件的生产工艺，本课题在研究过程中参加了整个制备流程，并对成品进行实时监测，实现了液晶波片生产质量的闭环控制。

6.1.1 液晶波片结构

图6.1为液晶波片的横切剖面示意图，波片由外至内分别为石英玻璃基板、导电膜层、取向膜层以及向列型液晶层。使用导电银胶将柔性电极固定在导电膜层裸露部分，从而实现电性能的连接。液晶波片制作所使用的材料的种类、折射

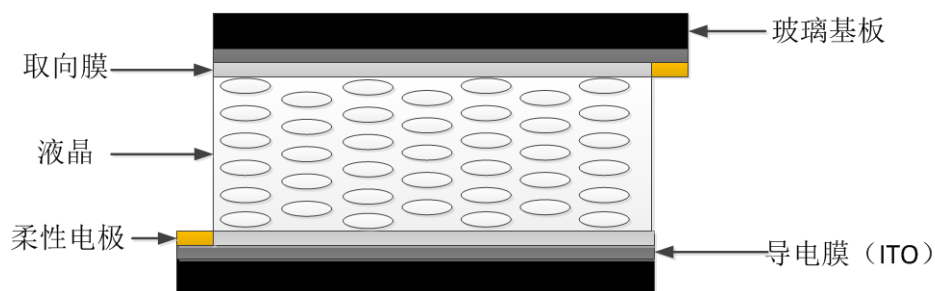


图 6.1 液晶波片结构示意图

率、以及厚度如表6.1所示。为保证波片的面型参数，玻璃基板选用的是 5mm 厚度的熔石英材料；导电膜选用的是光透过率较高的氧化铟锡。取向膜的材料是聚酰亚胺。液晶材料双折射率为 0.26。

6.1.2 液晶波片制备流程

图6.2是液晶波片的加工流程图，在制作过程应严格保证制作环境的洁净度。

表 6.1 液晶波片制作材料及相关参数

结构	材料	折射率	厚度
玻璃封盒	熔石英	$n_o = 1.46$	5mm
导电膜 (ITO)	氧化铟锡	$n_o = 2.0$	50nm
取向膜	聚酰亚胺	$n_o = 1.5$	300nm
液晶层	向列型液晶材料	$n_o = 1.5, n_e = 1.76$	5um
柔性电极	铜	\	0.3mm

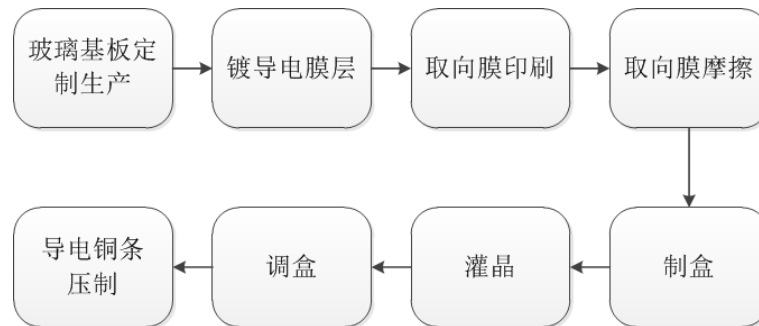


图 6.2 液晶波片加工流程

图6.3为液晶波片制备完成的实物图。液晶波片有效通光口径为 36mm、厚度为 10mm、高度为 40mm、宽度 46mm。

6.1.3 液晶波片性能参数初检

在液晶波片加工完成后对波片的外部尺寸、面型以及透过率进行了初步检验，并筛选出性能较高的器件应用在液晶滤光器的设计中。下文中将展示相关测量数据。

1. 液晶波片外形尺寸误差直接影响到后期液晶滤光器的光机装调工作，所以在制片完成后对成品的尺寸进行了检测，并筛除加工误差较大的产品。检验工具使用的是经过计量标校的千分尺，分辨率为 0.02mm。表6.2为终选波片的外形尺寸测量结果。

2. 面型是光学器件的重要重要指标，使用 Zygo 干涉仪对液晶波片成品面型进行检测，测量环境温度为 24 摄氏度，湿度 49%。表6.3为面型重要指标 PV 值和 RMS 值的测量结果。

3. 使用分光光度计对液晶波片透过率进行测量。测量环境温度为 24 摄氏度，

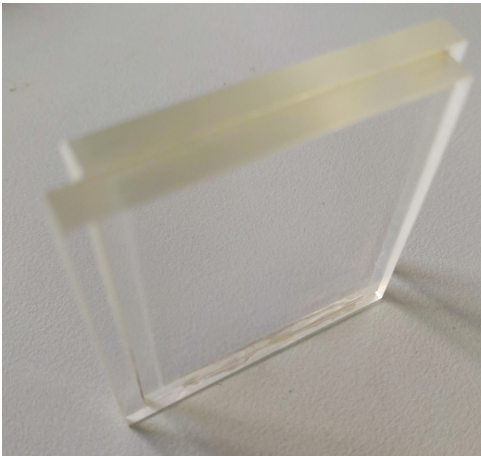


图 6.3 液晶波片实物图

表 6.2 液晶波片外部尺寸测量结果

编号	宽度（mm）	高度（mm）	厚度（mm）
LCVR-F-190819001	45.9	40.12	10.06
LCVR-F-190819002	46.06	40.1	10.08
LCVR-F-190819003	46.1	40.22	10.06
LCVR-F-190819004	45.96	40.08	10.08
LCVR-F-190819005	46.08	40.08	10.08

表 6.3 液晶波片面型测量结果

编号	PV 值 (λ)	RMS 值 (λ)
LCVR-F-190819001	0.072	0.016
LCVR-F-190819002	0.079	0.022
LCVR-F-190819003	0.055	0.014
LCVR-F-190819004	0.062	0.019
LCVR-F-190819005	0.042	0.01

湿度 49%，测量范围 655nm~657nm，间隔 0.04nm（仪器最高分辨率）。表6.4为透过率测量结果。结果表明该批次液晶波片透过率 >86%。

表 6.4 液晶波片透过率测量结果

编号	654.99nm	656.01nm	657.01nm
LCVR-F-190819001	89.5	87.77	86.93
LCVR-F-190819002	91.9	92.95	92.48
LCVR-F-190819003	92.33	92.67	91.68
LCVR-F-190819004	92.71	91.75	89.90
LCVR-F-190819005	91.11	88.79	86.25

6.2 滤光器机械结构设计

本课题完成了滤光器各部分机械结构的设计、加工相关工作。本节将对部分设计内容进行展示。

6.2.1 液晶波片加固结构

本课题选用的液晶波片采用柔性电极的方式实现驱动信号与导电膜层间的电连接，在使用过程中出现柔性电极断裂的情况，从而导致液晶波片功能失效。为了提高设备的可靠性及稳定性，设计定制了用于保护液晶波片柔性电极的加固结构，图6.4为结构示意图。结构主体采用分离式设计，利用螺钉实现结构的固定。在液晶波片柔性电极处有凸起结构设计，减少由于拉扯造成柔性电极脱落的风险。在液晶波片出线处设计有导线凹槽，在完成结构安装后凹槽处填充绝缘硅胶，对导线以及电连接处起到保护作用。利用此结构设计最大程度上降低柔性电极受外力拉扯造成断裂的风险。

6.2.2 滤光器晶体室结构设计

在本课题中首次对晶型双折射滤光器的研制开展进行系统性的研究工作，为了实现对滤光器各个基本单元的光谱性能测试，在晶体室设计中采用分离式设计。晶体室机械结构示意图如图6.5所示，每一级基本 Lyot 单元均可独立拆分，有利于开展相关实验。在晶体室的一侧设计了定位条，实现对每一级结构的准确定位。另一侧设计有凹槽结构，在进行晶体内部硅油填充时，利用该凹槽实现硅油的流动。

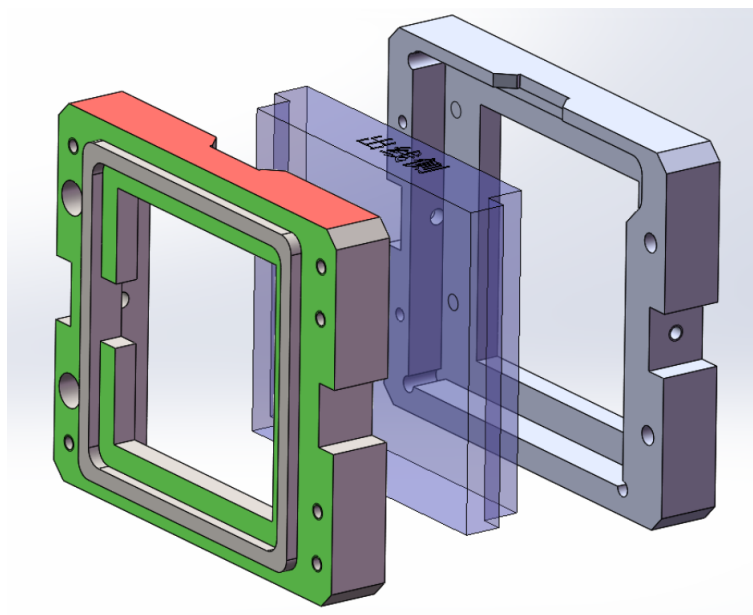


图 6.4 液晶波片加固结构

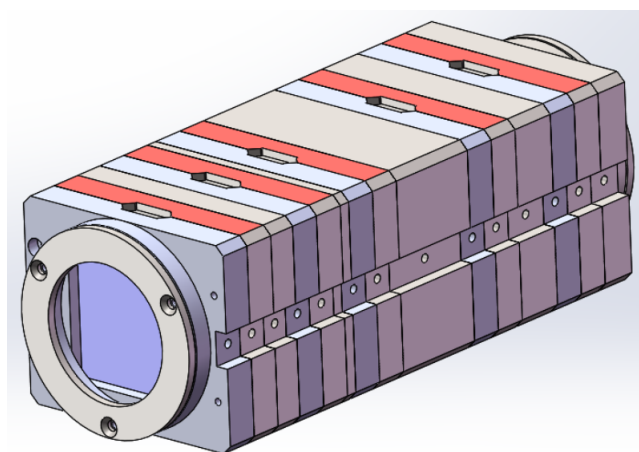


图 6.5 滤光器晶体室结构

6.2.3 滤光器密封结构设计

滤光器中利用不同类型的光学器件配合实现窄带滤光，为了避免器件之间折射率不配带来的问题，一般会在晶体室中填充硅油，并利用真空罐抽取硅油中存在的气泡，所以在结构设计中需要有对应的密封结构。图6.6为液晶滤光器密封结构示意图。与传统旋转型滤光器结构不同，液晶滤光器不需要使用复杂的机械传动动密封设计。利用 O 形密封圈以及真空插头的方式即可实现对晶体室内部硅油的精密封。这种密封方式结构更为简单，可靠性以及空间化安全性更改高，极大的降低了硅油泄露的风险。

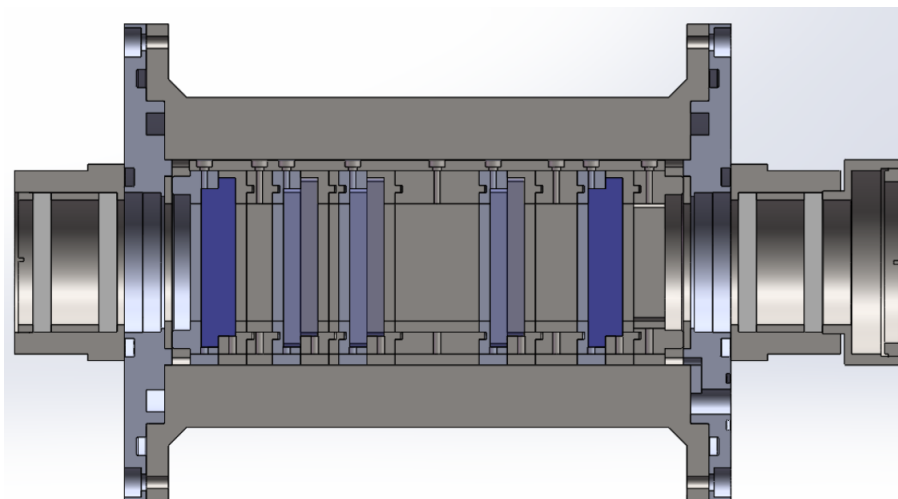


图 6.6 滤光器密封结构

6.2.4 滤光器外部固定结构设计

本课题所设计的液晶型滤光器计划在国家天文台怀柔太阳观测基地 $H\alpha$ 望远镜中进行试观测。6.7为滤光器的外部固定结构示意图，该结构用于实现滤光器与望远镜镜体之间的机械连接。需要对望远镜的成像尺寸、中心高度、机械连接端口进行匹配设计。

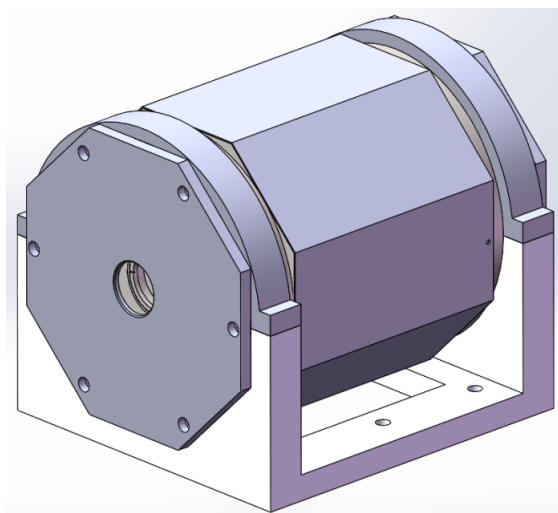


图 6.7 滤光器外部固定结构

6.3 滤光器光机装调

在完成滤光器结构设计后，课题进行了光机结构装调相关工作，本小结简单展示液晶滤光器光机装调过程中的实际效果图。装调后的滤光器储存约为

$\varphi 120\text{mm} * 300\text{mm}$ 。

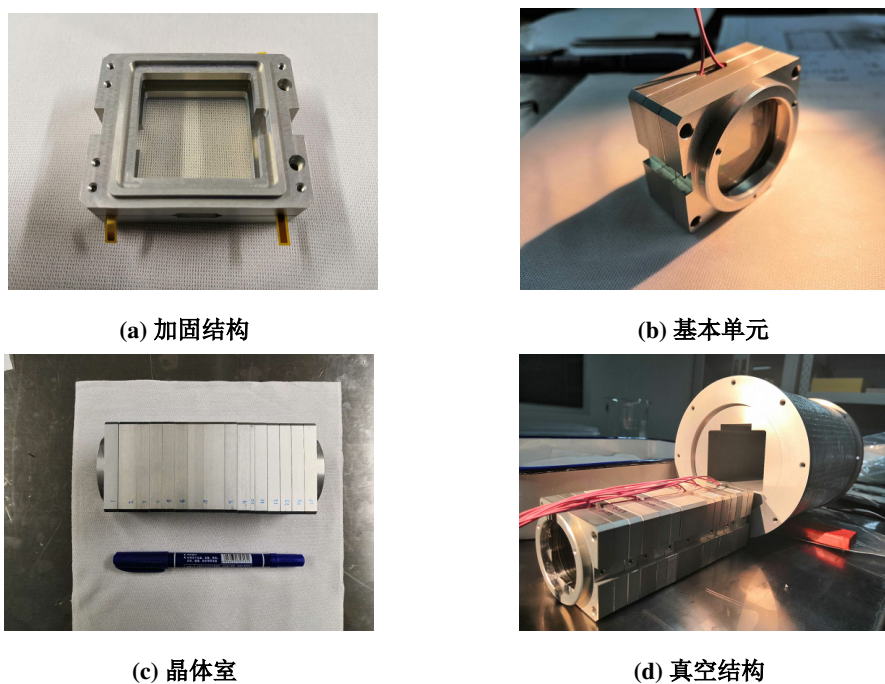


图 6.8 液晶滤光器光机装调效果图

6.4 滤光器电子学控制系统设计

液晶滤光器电子学控制系统与以往的传统旋转型滤光器完全不同，本课题针对液晶的驱动方式，研制了滤光器全系统的电子学相关控制系统。本节将对部分关键的软硬件设计进行介绍。

6.4.1 液晶驱动器硬件电路设计

本文在第三章中对液晶波片的工作原理进行了详细说明，根据其原理以及滤光器的工作需求，对自主研制的液晶滤光器驱动器设计提出以下功能规范：

1. 可输出频率为 2kHz 的交流方波信号；
2. 输出电压幅值可调，范围为 $0 \sim \pm 10V$ ；
3. 电压输出幅值调节分辨率高于 1mv；
4. 跳变沿时间小于 20 微秒；
5. 输出纹波小于 5mv；
6. 可实现 8 路驱动信号同步输出；

根据以上设计需求，本课题对目前主流的嵌入式处理器进行筛选，最终确定使

用 FPGA 作为主控单元，实现对驱动器的嵌入式系统硬件设计。FPGA（Field — Programmable Gate Array，现场可编辑逻辑阵列）。其内部包括大量的可编程逻辑单元，用户可以通过改变配置信息对其功能进行定义，以满足设计的功能需求。与传统的数字电路系统相比，FPGA 具有可编程、高度集成、高速和高可靠性等优点^[65]。利用 FPGA 可以很好得实现多路驱动信号同步输出功能。课题

表 6.5 EP4CE5FL7C 芯片参数

参数	值	单位
逻辑单元数 (LE)	15408	个
嵌入式存储器大小	504	Kbt (Kilo-bit)
嵌入式存储器	56*18*18	个
用户输出 输出端口	343	个
最高运行速度	100	Mbps (Million bits per second)

所采用的 FPGA 芯片为 Altera 公司推出的 Cyclone IV 系列处理器，具体型号为 EP4CE5FL7C。芯片主要参数如表6.5所示。

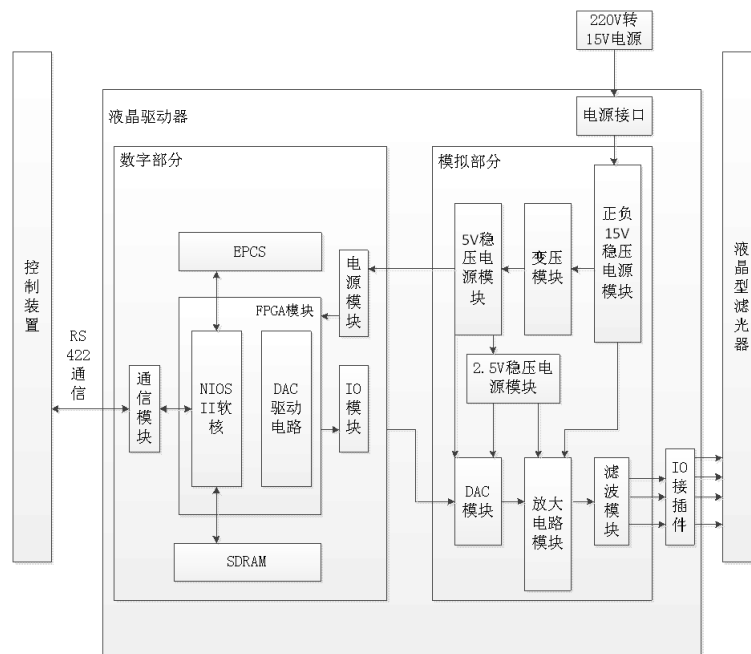


图 6.9 液晶驱动器硬件设计原理图

图6.9为硬件驱动电路设计原理图。按照功能实现，可以将电路分为主控模块、通信模块、数字模拟转换模块、信号放大模块、电源模块以及输出输出端口

模块几个部分。下面对各个模块的主要功能进行简要介绍。

1. 主控模块即以 FPGA 为核心的最小处理系统，系统除微控制器外还包括晶振、寄存器、快闪存储器、调试芯片等。在本设计中主要实现通信信号的编译码、电压数据的计算和存储、数字驱动信号信号生成等主要功能，是电路的核心模块。

2. 通信模块主要实现对上位机（计算机）通信信号电平的匹配，从而实现上位机与驱动电路的双向数据传输。

3. 数字模拟转换模块的作用是将主控模块生产的数字信号转换为模拟信号，实现单边方波信号幅值控制。

4. 信号放大模块将数字模拟转换模块的输出信号调制为液晶驱动所需的驱动信号（ $0 \sim \pm 10V$ 电压输出）。

5. 电源模块主要是为电路中不同的功能模块提供所需的稳定电源，可以降低外部电网对驱动电路信号的干扰。

6. 输出输出模块用于与外部负载器件的电连接。

图6.10为焊接装调后的驱动器控制箱。



图 6.10 液晶驱动器控制箱

6.4.2 液晶驱动器嵌入式软件设计

在硬件平台上采用 $C + verilog$ 的混合编程方式完成了嵌入式软件程序的开发设计。系统数据走向如图6.11 所示。驱动器主控模块在接收到上位机发送的指令后，首先对自定义的指令集进行解码，主要参数包括输出频率、输出通道号以及输出电压幅值。然后对电压幅值数据进行数据转换与存储。通过内置的

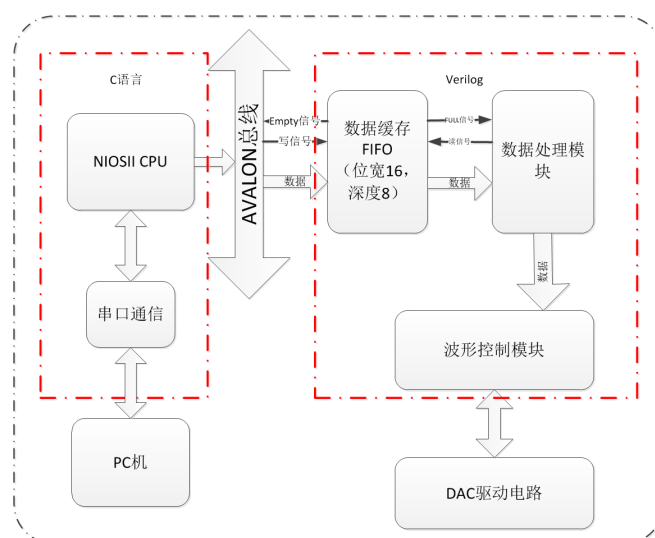


图 6.11 液晶驱动器数据走向示意图

AVALON 总线将处理后的数据传输至缓存中。外部电路在接收到缓存电路发出的 FULL 信号后读出相关数据。根据数据中的参数生成驱动电路所需的控制信号，对不同通道的输出参数进行设置。利用 FPGA 进行开发的主要优势在于其并行的执行能力，可实现对多路液晶的同步控制，缩减波带调制的时间，从而提高滤光器的时间分辨率。

6.4.3 液晶驱动器性能测试

在完成液晶驱动器的软硬件设计工作后，课题开展了驱动器性能参数的相关测试。测试设备为泰克 TDS2000 型示波器，最高采样频率可达 125M/s，主要的测量数据包括以下几个方面：

1. 输出信号波形。图6.12为采集的波形数据，横坐标为采样点数，纵坐标为电压幅值，经计算可得波形频率为 2kHz。

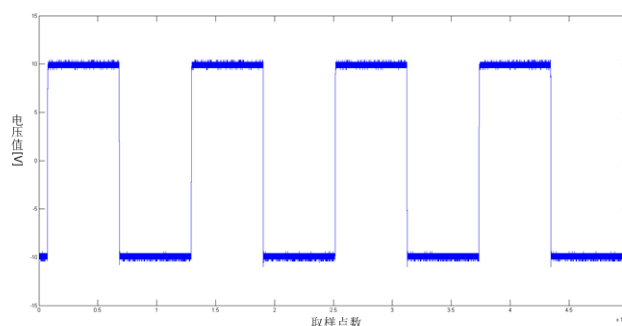


图 6.12 液晶驱动器输出信号波形

2. 输出信号跳变沿测量数据。图6.13、图6.14分别为驱动器输出信号上跳沿

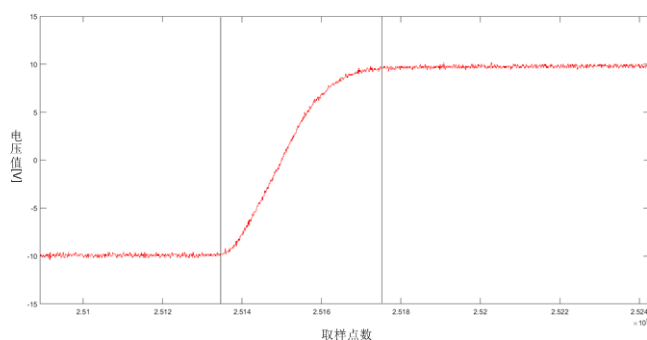


图 6.13 驱动信号上跳沿数据

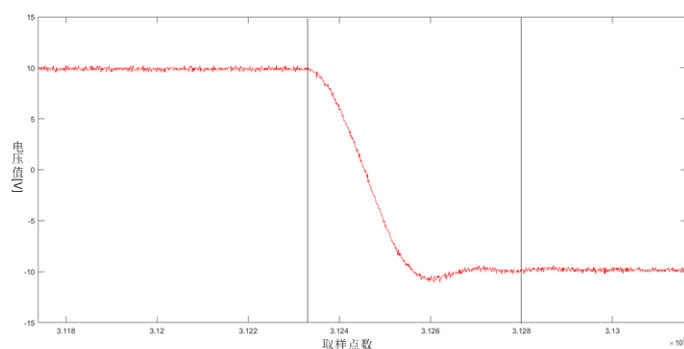


图 6.14 驱动信号下降沿数据

与下降沿的测量数据。跳变沿时间的计算方式为：

$$JumpTime = \frac{1}{f} * N \quad (6.1)$$

其中的 f 为示波器的采样频率，本实验设置的频率为 $125MHz/s$ 。 N 为跳变沿内的采样点数。经计算可得驱动信号上跳沿时间为 4 微秒，下降沿时间为 4.5 微秒，满足设计需求。

3. 过冲幅值测量数据。从图6.15中可以看到在信号上跳变处存在较为明显的过冲现象，幅值大小约为 500mv。由于持续时间在微秒量级，所以对液晶的光学响应影响很小。但在后续的工作中需要对该电路进行改进，以消除过冲的现象。

4. 纹波测试。实验中对幅值为 $\pm 1V$ 和 $\pm 10V$ 以及输出信号的纹波进行测量分析，结果如表6.6 所示：

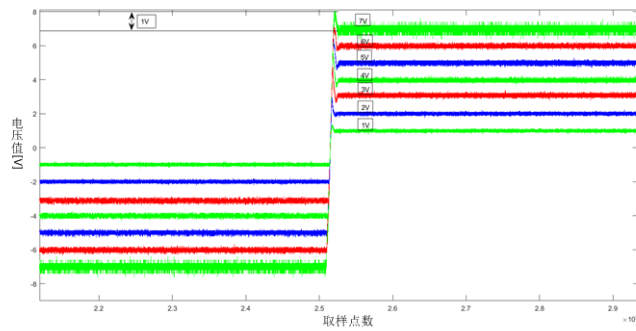


图 6.15 驱动信号过冲幅值

表 6.6 液晶驱动器纹波测量数据

电压	极性	均值	标准偏差	电压偏置
1V	正电压	0.9954V	0.0513	-0.0001V
	负电压	-0.9955v	0.0502	
10V	正电压	9.8757V	0.1533	-0.1V
	负电压	-9.9765V	0.1607	

为了实现多路液晶的同步控制，本实验开展了液晶驱动器设计的相关研究工作，并已经初步实现了 8 路液晶的同步控制功能，但驱动器输出信号相关指标测试并不完善，有待后续做进一步研究。

6.4.4 滤光器波带调制软件设计

液晶波片相位延迟与驱动电压间成非线性关系，目前无法用拟合函数对其关系进行精确描述。所以在对液晶相位延迟的调制仍基于实测数据。为了提高液晶滤光器的波带调制分辨率，需对液晶波片实测数据进行预处理。处理过程如图 6.16 所示。首先得到实测的原始数据（零级数据）。然后对零级数据进行周期补偿修正得到一级数据。在其基础上进行插值操作，得到二级数据。最后对数据进行转置处理，从而得到最终的三级数据。根据三级数据可以快速准确的定位不同相位延迟量对应的驱动电压值。

液晶滤光器波带调制软件设计仍是基于 Labview 开发平台，实现上位机软件控制界面的编写。软件的功能主要包括以下几个方面：

1. 线心位置设定，可输入线心定标后的各级液晶波片驱动电压值，并对其进行存储，作为初始参数；

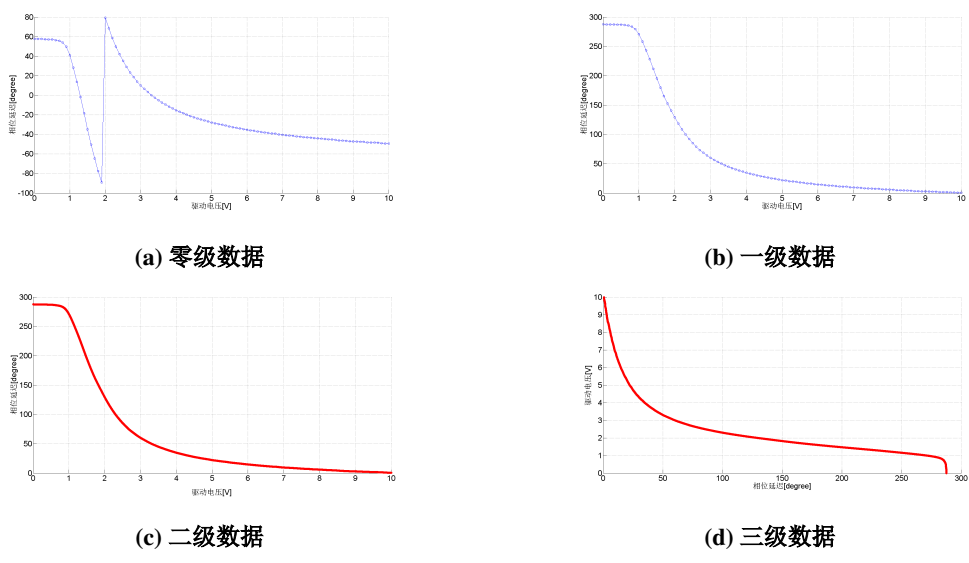


图 6.16 液晶滤光器波带调制数据处理过程

- 2. 波带整移量设置，可根据使用需求设定液晶滤光器透过带波长偏移量（以线心位置 656.3nm 为参考点）；
- 3. 插值方法以及插值因子设定。通过对该参数的设定可以改变数据插值的方式以及插值点数；
- 4. 初始参数文件配置，读取各级液晶波片标定的相位延迟-电压初始数据；
- 5. 各级液晶波片当前驱动电压以及相位延迟量显示；

图6.17为开发完成后的液晶滤光器波带调制软件用户界面。

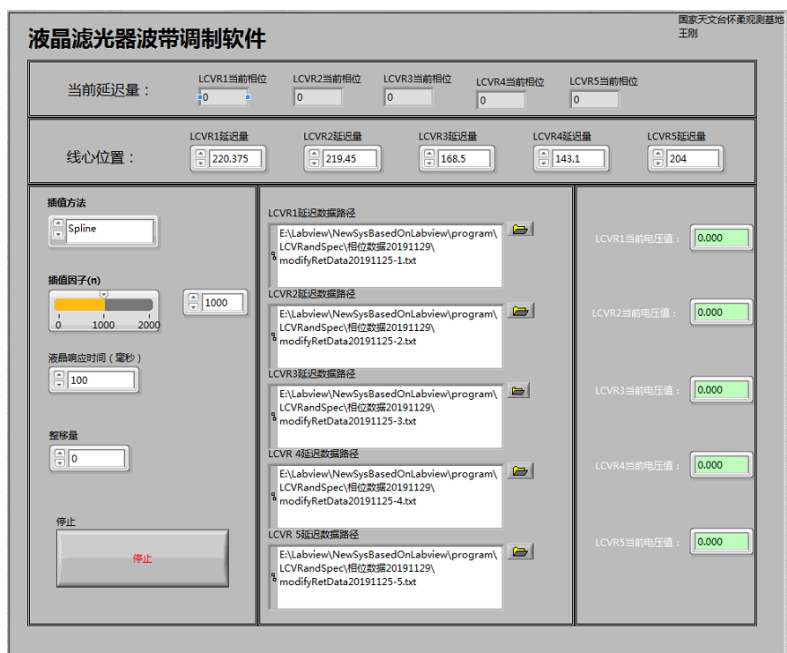


图 6.17 液晶滤光器波带调制软件用户界面

6.4.5 滤光器高精度温控系统

温控系统是滤光器电子学系统的重要组成部分。本课题选用国家天文台怀柔观测基地自研的高精度温度控制系统。该系统可在 42.216 摄氏度的工作温度下将温度波动范围控制在 ± 0.01 摄氏度以内，满足本课题使用需求。此外，该温控系统已在实际观测设备中运行多年，具备较高的稳定性以及可靠性。

6.5 本章小结

本章主要对液晶滤光器系统研制过程与相关结果进行详细说明。主要内容包括以下几个方面：

1. 完成了液晶波片制备以及性能初检相关工作，实现了液晶波片制备过程的闭环控制。
2. 完成了滤光器机械结构设计，包括液晶波片加固结构设计、液晶滤光器晶体室、保温结构以外固定结构的设计。
3. 完成了滤光器电子学控制系统设计，包括液晶驱动器软硬件设计及相关实验结果；透过波带调制系统软件设计原理及用户界面展示。

课题研究至此已经基本完成了液晶型双折射滤光器原理样机全系统的初步设计，在后续章节中将对滤光器的光学性能实验结果进行展示。

第7章 液晶型双折射滤光器性能参数测量

相较于滤光器在其他领域的应用，太阳成像测量滤光器最主要的特征在于其极窄的透过带宽（通常在 0.05nm 以下），这也对滤光器透过波长稳定性提出了更高的要求。除此之外，滤光器还必须具备自由光谱范围内透过波长快速调节的功能。本章节对课题所研制的液晶滤光器的透过带宽、中心波长、自由光谱范围、稳定性、以及透过波长调节功能等关键参数进行了详细的测量。最终结果表明，此液晶型双折射滤光器的各项性能基本满足设计要求，且已具备试观测所需要的各项条件。下面，将对实验过程中所采用的方法以及实验结果进行详细介绍。

7.1 滤光器单级性能测量

本课题首次对液晶型双折射滤光器进行系统性的研究工作。为了深入了解滤光器的各项性能，在晶体室结构设计过程中采用了分离式设计，以方便对每一级 Lyot 基本单元的光谱参数进行测试，获得详细的实验数据。本小节将展示滤光器单级测量的过程以及实验结果。

7.1.1 测量平台

首先搭建实验测量光学平台，图7.1为滤光器单级测量试验光学平台结构示意图。采用稳定性较高的卤素灯作为系统光源，利用积分球及平行光管减小光源

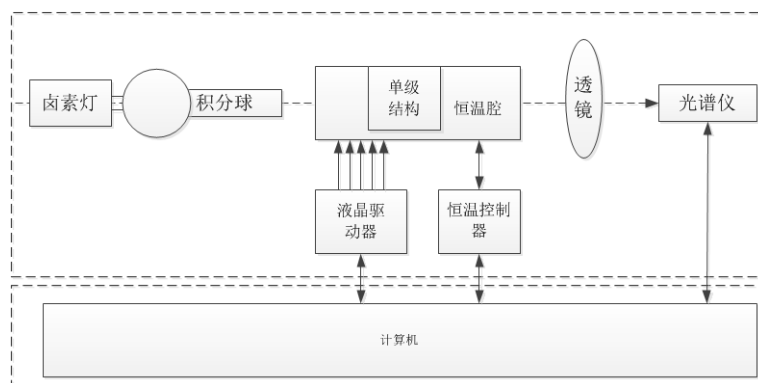


图 7.1 滤光器单级结构测量平台示意图

的发散角度。设计了专用的恒温结构，降低外部环境温度波动带来的测量误差。

接收端选用的是高分辨率便携式光栅光谱仪，分辨率约为 0.03nm。由于光谱仪的入射孔径远小于光源光斑尺寸，所以在光谱仪前方插入一块短焦透镜，以提高系统的信噪比。实验全过程在超净室中完成，尽量避免灰尘对光学表面的影响。图7.2为实验平台的实际效果图。

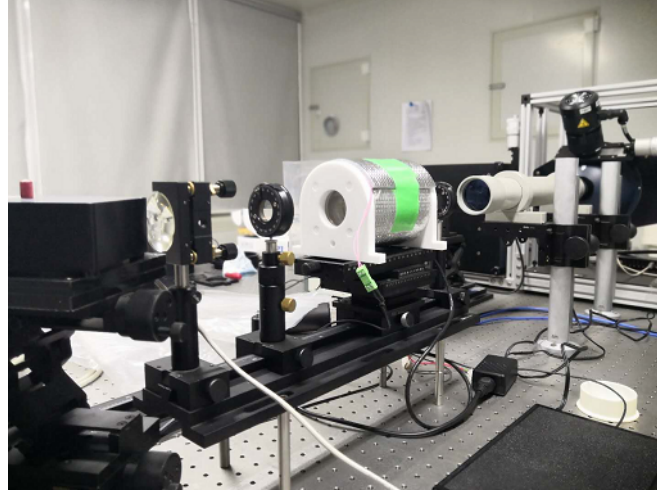


图 7.2 滤光器单级结构测量平台效果图

7.1.2 高精度光谱仪标定

在上述实验平台中，接收端的光谱仪是影响实验测量结果精度的关键器件。除销售商的产品出厂检测外，本课题还利用标准太阳光谱对光谱仪进行了定标。图7.3为定标结果。第一幅图为 BASS2000 网站提供的标准太阳谱线，第二幅为使用光谱仪实测的太阳谱线数据。通过对两组数据对比可得光谱仪标定误差在其最高分辨率（0.03nm）内，性能参数满足本课题的使用需求。

7.1.3 基于最小二乘法的数据拟合

根据上文液晶型双折射滤光器的工作原理的相关叙述，可知滤光器单级理论透过率轮廓应为近似余弦平方的凹槽函数。但在实验测量的过程中给，受光源以及环境温度等因素影响，很难从实测数据中直接得出相关参数。所以需要对该数据进行拟合处理。

根据滤光器单级的透过轮廓函数得出拟合函数为：

$$T = \cos^2 [\pi * \mu / (\lambda * 10^6) + R] \quad (7.1)$$

其中未知参数 μ 为晶体双折射率 $n_o - n_e$ 与晶体厚度 d 的乘积， λ 为波长， R 为液晶波片相位延迟量。将光谱仪测得的光强-波长数据做归一化处理后代入上式，

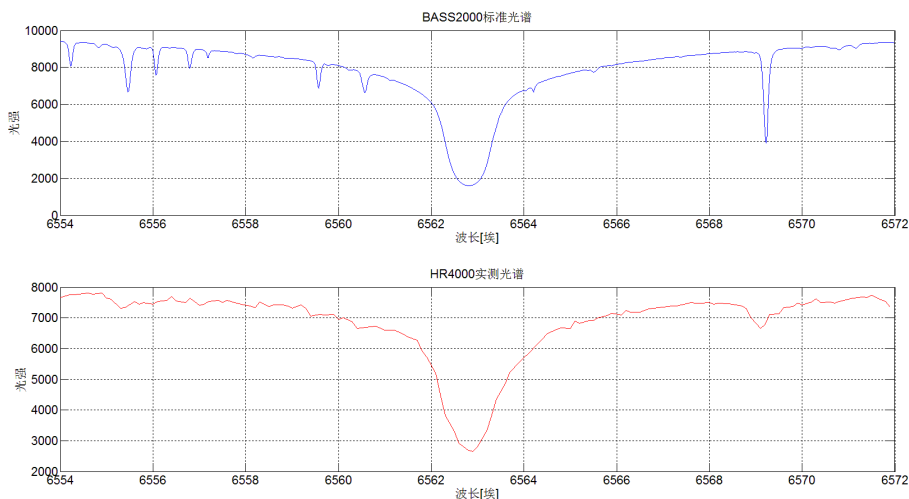


图 7.3 高精度光谱仪定标数据

并利用 MATLAB 软件自带的最小二乘拟合函数进行拟合处理，即可得到上述未知参量。7.4为拟合后的结果。

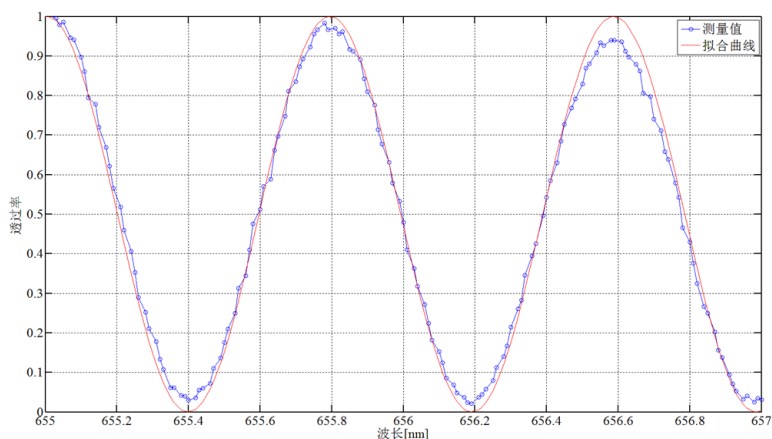


图 7.4 基于最小二乘法的数据拟合结果

其中的蓝色圈点为对实测数据归一化得到的数据，红色线为拟合出的透过率轮廓。从图中可以看出，最小二乘法对单级结构中的液晶相位延迟量 R 有着非常好的拟合效果。

进一步地，可以通过控制液晶驱动电压值在 $0 \sim 10V$ 的电压范围内，间隔 $0.1V$ 进行扫描。利用函数拟合的方式可以得到每一个驱动电压点下对应的液晶波片相位延迟量 R 。通过这种办法我们也可以准确的得到液晶波片相位延迟与驱动电压之间的关系，并绘制出相位延迟电压曲线。将拟合法的测量结果与课题

研究过程中提出的高精度液晶波片相位延迟-电压标定方法所得到的测量数据进行对比, 可得到如下的对比结果:

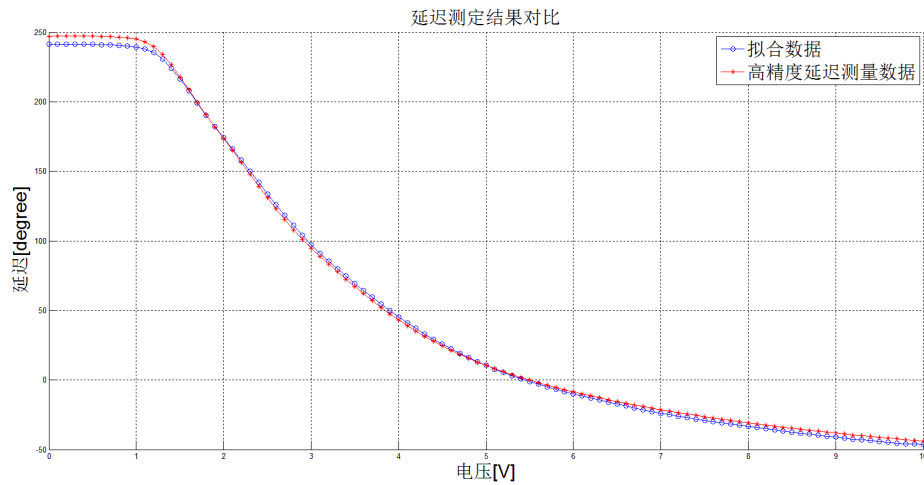


图 7.5 不同液晶波片相位延迟电压曲线标定结果对比

图7.5为两种测量方法得到的定标曲线。从图中可以看出在 1.5V 驱动电压以下, 两种方法得到的数据有一定的差异。在驱动电压高于 1.5V, 两组数据有着较好的一致性。为了量化数据间的差异, 对两组数据进行差值处理, 可得到图7.6的结果。进一步分析可得, 在驱动电压高于 1.5V 的条件下, 两种测量方法的标定结果 PV 值小于 3 度。该结果也相互印证了两种测量方法的准确性以及有效性。而上述所提及的 1.5V 界限值接近于液晶波片在该工作温度下的阈值电压, 所以该实验得到的结果也符合液晶波片阈值电压以下电光性能不稳定的特性。

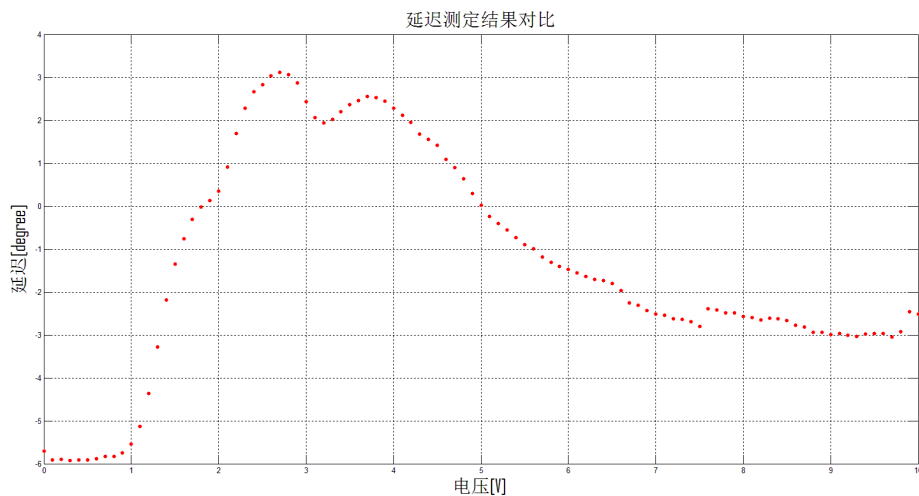


图 7.6 液晶波片相位延迟电压曲线标定数据差值图

7.1.4 滤光器单级带宽测量结果

在完成测量平台搭建以及测量方法验证工作后，课题对液晶滤光器每一级的透过率轮廓进行测量。图7.7为五级液晶单元的测量结果。通过对实验数据的

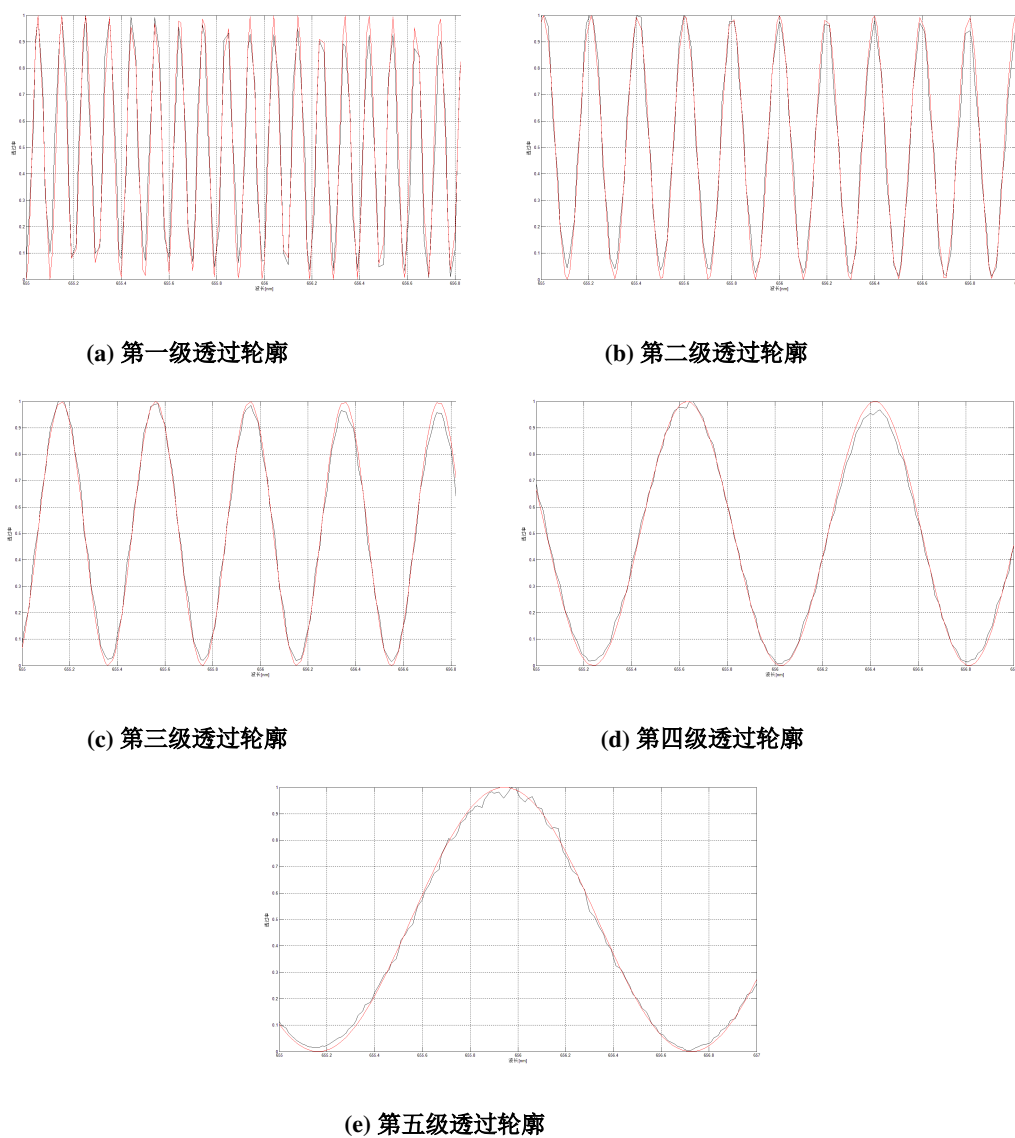


图 7.7 液晶型双折射滤光器单级透过轮廓带宽测量数据

分析可得出一下结论：

1. 各级滤光单元半高全宽实测值与光学设计理论值在误差范围内一致；
2. 各级滤光单元自由光谱范围实测值与光学设计理论值在误差范围内一致；
3. 拟合得到的结果与实测数据基本吻合，具备较高的可信度；

表7.1为各级单元的实测结果。

表 7.1 液晶型滤光器单级滤光单元实测数据

晶体级数	半高全宽 (FWHM)[nm]	自由光谱范围 (FSR)[nm]
第一级	0.05	0.1
第二级	0.1	0.2
第三级	0.2	0.4
第四级	0.4	0.8
第五级	0.8	1.6

7.2 滤光器整机性能测量

滤光器整机光谱性能测试是液晶型双折射滤光器进行实际观测应用前的一项关键工作，其目的是对滤光器的各项光学性能进行标定检测，以保证试观测的成功率。本课题在实验室中对研制的新型液晶双折射滤光器整机光学性能开展了全方面的光学实验，测量内容包括滤光器透过带宽、中心波长、自由光谱范围、波带整移功能实验效果以及液晶滤光器的长周期稳定性。本节将对相应的实验测量结果进行阐述。

7.2.1 测量平台

滤光器整机光学测量平台较单级结构测量平台主要有以下两个方面的改动：

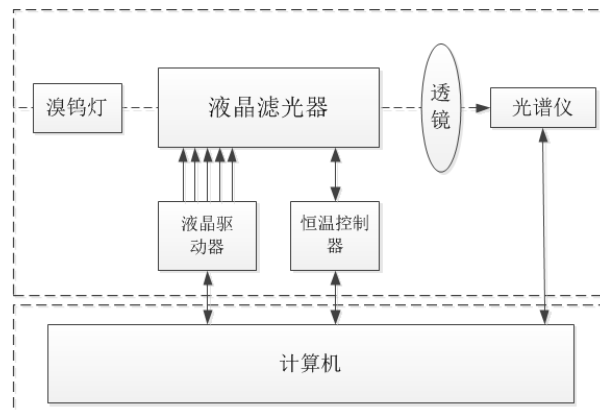


图 7.8 滤光器整机性能测量平台结构示意图

1. 更换光源。由于滤光器由五级基本单元组成，其透过率远低于单级结构的透过率。所以将卤素灯替换为强度更高的溴钨灯，并去掉积分球以及平行光管

结构，以增加光源强度。

2. 替换恒温结构。为了提供稳定的工作温度，课题设计了专用的滤光器恒温结构。所以在对滤光器整机进行测量时去掉了恒温结构，利用滤光器自身的恒温以保证稳定性。

图7.8为滤光器整机测量的光学平台结构示意图。

7.2.2 透过中心波长标定

滤光器在望远镜中进行实测时需要以工作波长为光学参考点，对工作波段范围内的波长点进行观测。试观测前需对每级滤光单元的相位延迟进行调整，以保证透过中心波长与工作波长一致。本课题所设计的是应用于 $H\alpha$ 波段太阳观测的双折射滤光器，工作波长为 656.3nm。图7.9中展示的是中心波长定标后的滤光器透过轮廓。

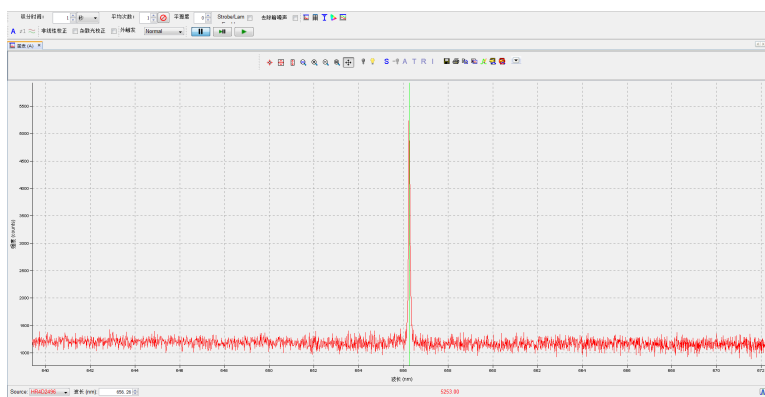


图 7.9 滤光器透过中心波长标定

从测量结果可知，经线心定标后的液晶滤光器透过带中心波长为 656.28nm，考虑到测量平台中的光栅光谱仪最高分辨率为 0.03nm，可以认为该设备定标后的中心波长满足设计要求。

7.2.3 透过带宽测量

透过带宽是指滤光器透过轮廓的半高全宽。图7.7为滤光器透过轮廓的测量结果。图中的蓝色星点曲线是根据上文中单级测量的数据计算出的理论透过轮廓，红色圈点是根据实测的数据绘制出的轮廓曲线。通过对比分析可知：滤光器透过轮廓实测曲线与理论计算值吻合度较好、在未完全压掉的次级大处（未完成最终的滤光器定标工作）有较好的匹配性；实测透过轮廓带宽有略微展宽现

象（理论值为 0.05nm，实测值为 0.065nm），初步判断是由于光谱仪分辨率限制以及滤光器光学元件折射率不匹配（未填充硅油）造成的。

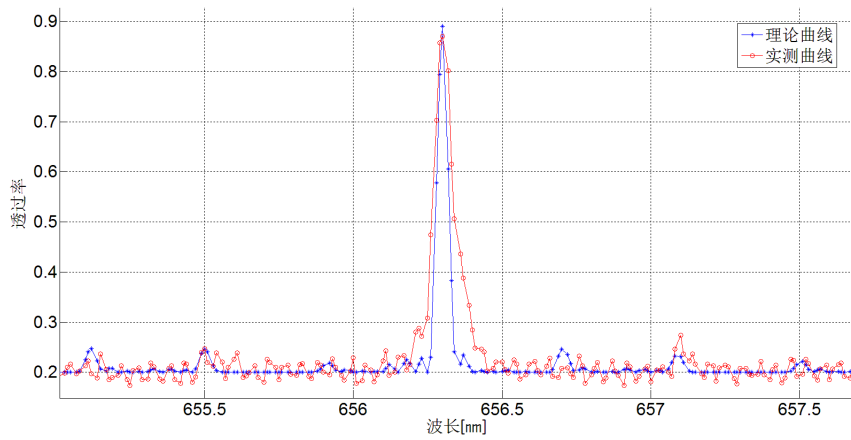


图 7.10 滤光器透过带宽测量结果

7.2.4 自由光谱范围测量

图7.11为滤光器自由光谱范围测量结果。从数据中可以得到三个透过率极大值点对应的波长分别为 654.7nm、656.3nm 以及 657.9nm，周期间隔为 1.6nm。自由光谱范围测量结果与设计指标一致。

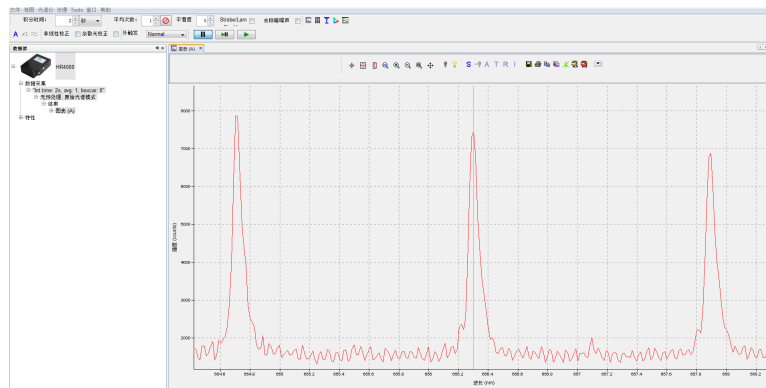


图 7.11 滤光器自由光谱范围

7.2.5 稳定性测量

由于液晶自身存在一定的不稳定性，在滤光器整机装机完成后对滤光器透过轮廓数据进行长周期监测，以验证滤光器自身的稳定性。在本课题器件共采集了超过 100 组的有效数据。下面将展示最具有代表性的几组数据。该数据的测量时长为 15 天，测量数据分为两组，第一组在环境不变的条件下持续测量五天，

第二组数据在测量前将所有电控设备关闭（包括温控、液晶驱动器以及光源），间隔四天后重新开机。图7.12为两组共十次的采集数据，从数据上可知，滤光器未出现新生次级大且透过中心波长始终处于656.3波长位置点。说明透过带宽为0.05nm的液晶型滤光器稳定性可以满足使用要求。

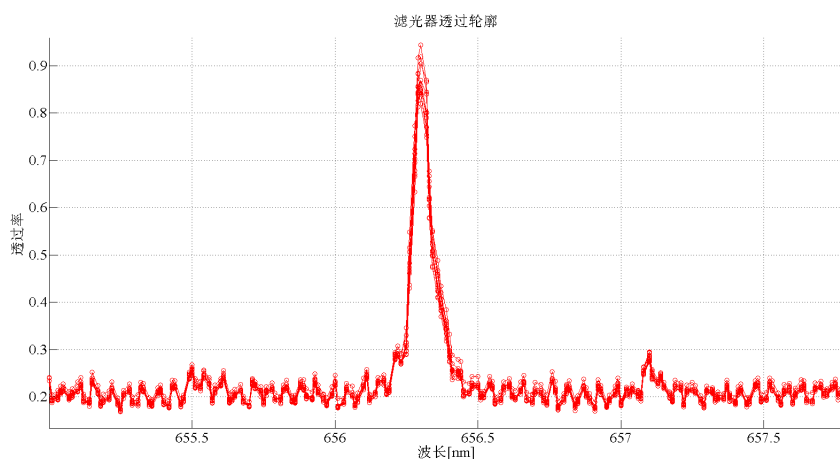


图 7.12 滤光器自由光谱范围

7.2.6 波带整移功能验证

透过波带整移是滤光器的关键功能设计之一。在本文中的上一章节介绍了波带整移软件的设计。本小结中对该软件的实现效果进行了验证。图7.13为实测数据，扫描范围为 $\pm 0.1\text{nm}$ ，间隔0.05nm。整移过程未出现新生次级大，验证了波带整移方法及软件的有效性。

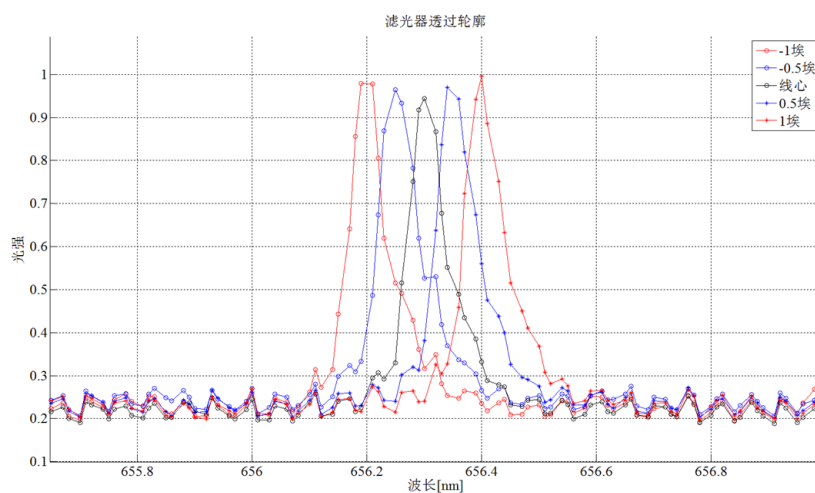


图 7.13 波带整移功能验证

7.3 滤光器试观测方案设计

根据上节内容可知,本课题所研制的液晶型双折射滤光器各项光谱性能指标已达到试观测的条件。利用望远镜观测太阳色球全日面像可以对滤光器的光学性能进行更深入的测量。目前课题已初步选定实验所需的太阳望远镜,并完成了试观测的方案设计。但受疫情的影响,使得实验无法按照原定进度开展。本节将对试观测的方案进行介绍,在本课题结束后可按该方案进行液晶型滤光器试观测的相关工作。

7.3.1 $H\alpha$ 全日面色球望远镜

试观测实验计划采用国家天文台怀柔太阳观测基地的 $H\alpha$ 色球望远镜。该台望远镜于一九九八年研制成功并投入试观测^[66]。其参数设计指标如下表所示:望远镜主体光路采用的是折射式设计。光路中设有准直系统,入射光线经过物镜

表 7.2 怀柔观测基地全日面色球望远镜光学参数

设计指标	参数值
工作波长	656.3nm
视场	32 角分
带宽	$\pm 3.2\text{nm}$ 可调
物镜口径	140mm
焦距	1400mm

成像后由准直镜将其转换为平行光,液晶滤光器放置于该平行光路中,以减少视场效应所带来的影响。该望远镜目前处于停止观测状态,本课题在滤光器机械结构设计时留有可与此台望远镜兼容的机械接口,可在完成滤光器整机结构状态后直接利用此望远镜进行试观测相关实验。

7.3.2 试观测方案设计

液晶滤光器试观测计划进行的相关实验以及实验方案包括以下几个方面:

1. 太阳谱线轮廓扫描实验。在滤光器自由光谱范围内以一定的波长调谐间隔对不同波长点处的太阳单色像进行采集,利用图像处理程序绘制出光强随波长的变化曲线,并将数据与太阳标准谱线进行对比分析。从而验证液晶滤光器窄

带滤光效果以及波长调谐软件的功能有效性。

2. 太阳全日面色球像测量。根据谱线轮廓扫描结果将滤光器调至中心波长位置 (656.3nm)，对全日面色球像进行采集。为后续滤光器光学性能分析相关工作积累有效数据。

3. 液晶滤光器型望远镜试运行。在完成上述实验并得到有效实验数据以及结论后，进行长周期试观测实验。进行多日、多时段的太阳轮廓扫描以及色球全日面像的采集，以验证液晶滤光器的稳定性。为液晶滤光器型色球望远镜的常规观测积累经验。

除上述实验外，可以利用液晶滤光器进行其他相关实验，出于对博士课题时间以及工作量等因素的考虑。在本课题中将不做详细设计及讨论。

7.4 本章小结

本章主要展示了课题研制的液晶型双折射滤光器在实验室中的光谱性能测量结果。包括单级 Lyot 单元的透过轮廓带宽的测量方法及实验数据、基于最小二乘法拟合的液晶波片相位延迟量测量结果、以及滤光器整机透过带宽、透过带中心波长、自由光谱范围、稳定性和波带整移功能的测量数据。其中整机透过带宽实验结果与设计指标略有差异，经分析有可能是由于光栅光谱仪分辨率略低以及整机未做折射率匹配从而带来的测量误差。计划在试观测前再对该指标进行测量。除整机带宽外，上述所有实测得到的参数指标均与设计指标一致。该液晶滤光器光谱性能已初步满足使用要求。在条件允许的情况下课题将进行试观测相关实验。在本章最后一节的内容中对液晶滤光器试观测实验的方案进行了相关说明。

第8章 总结与展望

太阳在现代天体物理研究中有着其他天体无法取代的意义，太阳物理的研究方法及相关结论可以为其他恒星研究提供重要的参考依据。同其他天文物理学相同，太阳物理的研究首先是基于观测。随着对太阳物理更为深入的研究，进入空间的天文观测已经成为一大主流的发展趋势。目前用于太阳物理研究的光学仪器主要包括以光栅光谱仪为代表的光谱仪，以及以双折射滤光器为代表的单色仪。液晶型双折射滤光器较传统滤光器而言，波长调制速度更快，设备空间化可靠性更高、体积更小、能耗更低，更加适用于设备空间化。基于上述优势，本课题开展了“向列型液晶波片在双折射滤光器中的应用研究”相关工作，成功研制了国内首台用于太阳色球全日面测量的液晶型双折射滤光器。本章将对本课题研究过程中所取得的阶段性进展进行总结，并对下一步研究的工作进行展望。

8.1 工作总结

本课题的研究内容主要集中于液晶型双折滤光器研制及应用相关研究工作上，课题所取得的进展以及创新主要包括以下四个方面：

1. 完成了液晶型双折射滤光器系统性研究工作

对液晶波片工作原理进行了细致的研究，参与了液晶波片设计、加工、制备的全过程，并参与生产工艺的迭代改进。对液晶型双折射滤光器关键误差源进行研究，并得出了定量分析结果。对液晶型双折射滤光器受外场环境的影响程度进行研究，结果表明本课题所选用的液晶波片各项性能满足应用于太阳色球观测的液晶型双折射滤光器的研制需求。

2. 开展了液晶波片空间环境辐照实验

得益于光家天文台 FMG (Full-disc MagnetoGraph) 项目的支持，本课题开展了液晶波片空间环境辐照实验。实验内容包括质子辐照、伽玛辐照以及紫外辐照实验。实验结果表明空间辐照环境会对液晶波片的电控双折射性产生一定的作用，其中质子辐照环境的影响最为明显。在后续的空间化液晶滤光器研制任务中可以根据本课题所得到的实验数据及结论进行更为深入的研究。

3. 实现了液晶型双折射滤光器原理样机的设计及研制

完成了液晶滤光器光学系统、机械结构以及电子学系统的设计工作。完成了液晶滤光器的光机装调及软硬件调试工作。成功研制了用于太阳色球测量的液晶型双折射滤光器原理样机。

4. 完成了液晶型双折射滤光器整机性能测量及试观测方案设计

在实验室对液晶型滤光器光谱性能以及控制系统进行了详细的测量。测量结果表明本课题所研制的新型滤光器各项性能指标均满足设计要求，具备试观测所需的各项条件。完成了液晶型滤光器试观测的方案设计，为基于液晶型滤光器的 $H\alpha$ 全日面色球望远镜试观测做好准备。

8.2 未来工作展望

本课题首次开展了应用于太阳色球观测的液晶型滤光器研制工作，其中的很多研究内容均属探索性工作。综合课题期间的研究内容，仍存在以下的问题有待做进一步的研究：

1. 液晶波片的稳定性以及透过率待进一步提升。目前所研制的液晶波片相位延迟稳定性在 2 度范围内波动，单级液晶透过率高于 85% 且随波长变化。为了实现后续用于太阳磁场测量的液晶滤光器的研制工作，需要对液晶波片制备工艺过程进行进一步的改进。

2. 液晶波片光学性能改进工作。本课题所制备的液晶波片未采用宽视场设计，在后续工作中需开展宽视场液晶波片的研制工作。

3. 液晶驱动器硬件电路设计有待改进。在本课题中所研制的液晶驱动器已实现对驱动电压的可调控制。但在同步信号输出以及输出电压波形整定方面存在的问题仍需进一步研究。

4. 液晶滤光器试观测及常规观测相关工作。受疫情影响，在本课题期间未能进行液晶型双折射滤光器试观测的相关工作。后续需根据本课题所设计的试观测方案进行相关的实验测量工作。

参考文献

- [1] 汪胤. 文艺复兴时期哲学对近代科学起源的影响[J]. 上海交通大学学报(哲学社会科学版)(03):68-71+77.
- [2] 刘煜, 张洪起, 包曙东. 太阳磁场观测研究[J]. 天文学进展(1):34-44.
- [3] ZEEMAN, P. The effect of magnetisation on the nature of light emitted by a substance[J]. Nature, 55(1424):347-347.
- [4] HALE G E. Solar vortices and the zeeman effect[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1908, 20(121):220.
- [5] LYOT B. Solar vortices and the zeeman effect[J]. Comptes Rendus, 1933, 197(1593).
- [6] ÖHMAN Y. A new monochromator[J]. Nature, 1938, 141(3563):291.
- [7] EVANS J W. The birefringent filter; a correction[J]. J Opt Soc Am, 1949, 39(5):412.
- [8] BABCOCK H W, BABCOCK H D. The sun's magnetic field, 1952-1954[J]. Astrophysical Journal, 1955, 121(4):349.
- [9] ŠOLC I. Chain bi-refrangent filters[J]. 1959, 9(2):237-249.
- [10] SOLC I. Birefringent chain filters[J]. 1965, 55(6):621-625.
- [11] BECKERS J M. High-resolution measurements of photosphere and sunspot velocity and magnetic fields using a narrow-band birefringent filter[J]. Solar Physics, 1968, 3(2):258-268.
- [12] 艾国祥, 胡岳风. 太阳磁场望远镜的工作原理[J]. 天文学报(02):91-98.
- [13] 艾国祥, 胡岳风. 多通道双折射滤光器—多通道头及多通道望远镜[J]. Chinese Journal of Astronomy&astrophysics(04):63-69.
- [14] 李挺, 毛伟军, 陆海天, 等. 中国出口双折射滤光器[J]. 天文学进展(3):331-335.
- [15] CAO W, GORCEIX N, COULTER R, et al. First light of the 1.6 meter off-axis new solar telescope at big bear solar observatory[J]. 2010, 7733(6):773330-773330-8.
- [16] SCHARMER G B, BJELKSJÖ K, KORHONEN T K, et al. The 1-meter swedish solar telescope [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2002, 4853:341-350.
- [17] LIU Z, XU J, GU B Z, et al. New vacuum solar telescope and observations with high resolution [J]. 天文和天体物理学研究 (Research in Astronomy and Astrophysics) , 014(6):705-718.
- [18] DOMINGO V, FLECK B, POLAND A I. The soho mission: An overview[J]. Solar Physics, 162(1-2):1-37.
- [19] KOSUGI T, MATSUZAKI K, SAKAO T, et al. Thehinode(solar-b) mission: An overview[J]. Solar Physics, 243(1):3-17.

- [20] PESNELL W D, THOMPSON B J, CHAMBERLIN P C. The solar dynamics observatory(sdo) [J]. Solar Physics, 275(1-2):3-15.
- [21] The interface region imaging spectrograph(iris)[J]. Solar Physics, 289(7):2733-2779.
- [22] E., MARSCH, , et al. Solar orbiter, a high-resolution mission to the sun and inner heliosphere [J].
- [23] WANG D, AI G, SUN C, et al. Optical design of polarimeter for space solar telescope[J]. 2000.
- [24] GAN A, DENG Y, LI H, et al. Aso-s: Advanced space-based solar observatory[C]//SPIE Optical Engineering & Applications. 2015.
- [25] TITLE A M, ROSENBERG W J. Tunable birefringent filters[J]. Optical Engineering, 1982, 20(6):815-823.
- [26] DENKER C J, MA J, WANG J, et al. Irim: An imaging magnetograph for high-resolution solar observations in the near-infrared[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2003, 4853:223-234.
- [27] FINESCHI S, CAPOBIANCO G, MASSONE G, et al. Liquid crystals lyot filter for solar coronagraphy[J]. 2011.
- [28] 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(03):90-96.
- [29] 新谷隆一, 范爱英, 康昌鹤. 偏振光[J]. 北京: 原子能出版社, 1994.
- [30] SHURCLIFF W A. Review of publications- polarized light, production and use[J]. Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, 1962.
- [31] 赵凯华. 新概念物理教程. 光学[M]. 2004.
- [32] NIEDERER G, HERZIG H P, SHAMIR J, et al. Tunable, oblique incidence resonant grating filter for telecommunications[J]. 2004, 43(8):1683-94.
- [33] KIM C S, JIN U K. Multiwavelength switching of raman fiber ring laser incorporating composite polarization-maintaining fiber lyot-sagnac filter[J]. Appl Opt, 2004, 43(15):3151-3157.
- [34] BLAND-HAWTHORN J, VAN BREUGEL W, GILLINGHAM P R, et al. A tunable lyot filter at prime focus: a method for tracing supercluster scales[J]. Astrophysical Journal, 563 (2):611-628.
- [35] MUDGE J, TARBELL T. In situ calibration of tunable filters: Lyot and michelson[J]. Appl Opt, 53(22):4978.
- [36] 王庆, 吴福全, 郭丽娇, 等. Evans 双折射滤波器特性分析[J]. 激光杂志(03):12-13.
- [37] 邓元勇, 艾国祥, 王敬山. Evans 滤光器视场的亮度不均匀性[J]. 天文学报, 1993(1):38-44.
- [38] FREDGA K, HöGBOM J A. Errata: "a versatile birefringent filter"[J]. 1971, 21:249.
- [39] 姚建永, 张森, 王臻, 等. 光纤迈克尔逊干涉仪的理论与应用分析[J]. 仪表技术与传感器, 2007(5):23-25.
- [40] KENTISCHER T, SCHMIDT W, SIGWARTH M, et al. Tesos, a double fabry-perot instrument for solar spectroscopy[J]. Astronomy and Astrophysics, 1998, 340(2):569-578.

- [41] CAO W, DENKER C J. Characteristic evaluation of a near-infrared fabry-pérot filter for the infrared imaging magnetograph (irim)[J]. 2004, 5171:307-315.
- [42] BAZIN C, KOUTCHMY S. Photometric properties of new solar h alpha commercial fabry-perot etalons. application to the analysis of the chromospheric fringe[J]. 2012, 74:2-13.
- [43] TITLE A M, ROSENBERG W J. Improvement in birefringent filters 5: Field of view effects [J]. Applied Optics, 1979, 18(20):3443-3456.
- [44] PITT K. The physics and chemistry of liquid crystal devices[J]. Microelectronics Journal, 1983, 14(6):119-119.
- [45] KAHN, J. F. The molecular physics of liquid-crystal devices[J]. Physics Today, 35(5):66-74.
- [46] GRAY G W, GOODBY J. Smectic liquid crystals : textures and structures[J]. Leonard Hill, 1984.
- [47] LU, KANGHUA. Determination of the physical properties of an arbitrary twisted-nematic liquid crystal cell[J]. Optical Engineering, 33(8):2704.
- [48] YANG F Z. From crystal optics to liquid crystal optics-the development of optical techniques for studying liquid crystal physics[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2016, 31(1).
- [49] GURALNIK I R, SAMAGIN S A. Electrophysics of a modal multichannel liquid-crystal wavefront corrector[J]. Quantum Electronics, 32(4):362-366.
- [50] 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(04):58-70.
- [51] 孙英姿, 王东光, 张洪起, 等. 红外波片相位延迟的测试方法及精度分析[J]. 光学学报, 2006(5):685-688.
- [52] 孙英姿, 王东光, 张志勇, 等. 波片相位延迟的光强测量法研究[J]. 天文研究与技术(1): 78-86.
- [53] 张志勇, 邓元勇, 王东光, 等. 几种波片位相延迟测量方法的比较[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11).
- [54] 谷耀辉, 张燕, 焦翔, 等. 相对角度法测量波片相位延迟量[J]. 中国激光(9):177-182.
- [55] 张颖, 赵慧洁, 周鹏威, 等. 液晶相位可变延迟器的光电特性研究[J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(3):17-20.
- [56] 王伟, 李国华, 薛冬. 液晶电控双折射率与电压关系的研究[J]. 光学学报, 2004, 24(7).
- [57] 胡建明, 曾爱军, 王向朝. 基于光弹调制技术的波片相位延迟量测量方法[J]. 光学学报, 2006, 26(11).
- [58] .BORN M, .WOLF E. Principles of optics[M]. 2006: 688-690.
- [59] 王军, 陈磊, 尹嘉懿, 等. 一种标定 Soleil-Babinet 补偿器的新方法[J]. 中国激光(11):249-253.
- [60] 李庆祥, 贾惠波, 王泽民. 高精度索列尔补偿器及其标定[J]. 光学技术, 1982.

- [61] THORLABS. Sbc-vis and sbc-ir soleil-babinet compensator user guide[EB/OL]. <https://www.thorlabs.de/drawings/d7d0ade254bd00c9-CC3D6177-F372-DCD8-C336F42197AF9D1F/SBC-VIS-Manual.pdf>.
- [62] 王东光. 太阳空间望远镜偏振分析器的设计与研制[Z]. 2003.
- [63] THORLABS. Kim001 1-channel inertia piezo motor controller[EB/OL]. <https://www.thorlabschina.cn/drawings/da79400f3428aefa-32702312-A912-F226-C0DF6D3BD6326835/KIM001-Manual.pdf>.
- [64] ZHANG, ... A G D L W. Aso-s: Advanced space-based solar observatory[C]//SPIE Optical Engineering + Applications. 2015.
- [65] TESSIER R. Frontier: A fast placement system for fpgas.[C]//1999.
- [66] 宋国峰, 艾国祥, 邓元勇. 全日面太阳色球磁场望远镜[J]. 光学技术(01):211-213.

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历

基本情况

王刚，男，吉林省白山市抚松县人，1992年3月出生，已婚。本科期间获得校级科技创新奖一次，“五四优秀共青团员”荣誉称号一次；硕士研究生期间获得校二等奖学金一次；博士期间获得中国科学院大学2019-2020学年“三好学生”荣誉称号一次。

教育情况

2010年9月至2014年6月，合肥工业大学计算机与信息学院，本科，专业：通信工程。

2014年9月至2016年6月，北京交通大学电子信息工程学院，硕士，专业：集成电路工程。

2017年9月至2020年6月，中国科学院国家天文台，博士，专业：天文技术与方法。

研究兴趣

精密仪器测控，偏振光学测量。

联系方式

通讯地址：北京市朝阳区大屯路甲20号国家天文台A座A206

邮编：100101

Email: gwang@nao.cas.cn

已发表 (或正式接受) 的学术论文:

1. 光学精密工程 (EI): 液晶可变延迟器相位延迟-电压曲线精确快速标定, 第一作者, 已录用, 2019.
2. 天文研究与技术 (中文核心): 基于 FPGA 的多轴步进电机控制系统, 第一作者, 已录用, 2019.
3. 中国物理 B(SCI): Irradiation study of Liquid Crystal Variable Retarder For the Full-disk Magneto-Graph payload onboard ASO-S mission, 第三作者, 已录用, 2020.

申请或已获得的专利:

发明专利: 一种液晶驱动器、扫描控制系统以及该系统的控制方法, 已受理.

参加的研究项目及获奖情况:

1. 中国科学院空间先导二期项目子课题 “液晶型偏振分析器研制及空间化应用”;
2. 中科院条财局仪器设备功能开发创新项目 “液晶型可调相位延迟器(LCVR)电光性能精确测量平台研制”;
3. 北京师范大学天文系-太阳塔改造项目;
4. 国家气象局空间环境监测望远镜控制系统升级项目;

致 谢

二十二年前，嘴里哼着“小二郎背着书包上学堂”，第一次踏入那个被称为学校的地方，那时的我还是懵懵懂懂，并不知道“知识”二字的含义，也未曾想会在求学的道路上走得如此遥远；十六年前，第一次真正体会到学习所带来的乐趣，而这种快乐还仅仅是出于长辈的夸奖与赞赏；十三年前，第一次离开家门，离开父母。遵循自己的意愿，去到离家 20 多公里的县级高中，在那个群山环绕的地方度过了那三年弥足珍贵的求学时光。还记得曾指着那连绵的山峦，跟母亲说我一定会越过这片山峰，去到我想去的地方。十年前，实现了曾经的愿望，第一次背起行囊、踏上火车去到了我从未到过的南方，度过了永生难忘的四年时光，也让我对更加广阔的世界充满了渴望。六年前，再次背起行囊，回到了离家更近的北方。在这里，我收获得到的真挚的爱情，同时也极其幸运的来到了国家天文台怀柔太阳观测基地，踏入了真正意义上的科研领域。现如今，在博士学业即将结束之际，回顾这几年的学习历程，每一步都离不开怀柔基地各位师长所给予的关怀与帮助。借此机会，向各位老师表达最为诚挚的敬意及衷心的感谢。

首先，要特别感谢林佳本研究员、侯俊峰高级工程师、邓元勇研究员以及王东光研究员四位恩师。感谢各位老师对学生的信任与理解；感谢各位老师在学习和生活中所基于的无私帮助；感谢各位老师点亮了我人生路途中的那一盏盏明灯，指引着我扬帆起航，令我在困惑迷茫之际能冲破壁障，勇往直前。

感谢怀柔太阳观测站王薏站长以及台站王建、张鼎波、汪国萍、荆帅、阮文东、苏海奇、王立东、杨桂莲等后勤保障工作人员。感谢你们让我在这里感受到家一样的关怀与温暖；感谢你们为了维护怀柔基地这个大家庭的安定、和谐而做出的努力和奉献；

然后，感谢张洪起研究员、张玫研究员、苏江涛研究员、林刚华研究员、杨尚斌老师、张志勇老师、包兴明老师、姜杰老师、王晓帆老师、杨潇师姐、孙英姿师姐、白先勇师兄、宋永亮师兄、罗琳、王炳祥、曾真等，在我博士期间的工作、学习中所给予的帮助。

感谢曾经在一起并肩作战的电子学团队：朱晓明、郭晶晶、袁飞、柯子博、于鹏达、佟立越、白杨、胡兴、黄威。感谢能有你们一起在这段时间里的相互帮

助、相互交流、一起成长。

特别感谢张扬、孙文君、张鑫伟、周明尧等人在本课题研究过程中的机械设计、温度控制设计、光机结构装调方面所提供的帮助，感谢中国工程研究院流体物理研究所王海峰老师、骆永全老师在液晶波片制备工作中给予的帮助，使得此课题得以顺利开展。

此外，要特别感谢我的硕士研究生指导老师骆丽教授，正因为有您的帮助，我才能得到可以继续进修学业的宝贵机会。

最后，要感谢我的父母，我美丽、大方、善良的妻子，我即将出世的宝宝，和我所有的家人。是你们让我的生命变得完整，是你们让我拥有了不断前行的力量。

谨以此文献给所有爱我的人和我爱的人，愿往后余生，岁月静好。