



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

博士/硕士学位论文

液晶器件在太阳磁像仪中的应用研究

作者姓名: _____ 黄威

指导教师: _____ 王东光 研究员 中国科学院国家天文台

学位类别: _____ 理学博士

学科专业: _____ 天文技术与方法

培养单位: _____ 中国科学院国家天文台

2022 年 6 月

**Application of Liquid Crystal Devices in Solar Magnetic
Field Measuring Instruments**

**A dissertation submitted to
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

Huang Wei

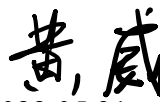
Supervisor: Professor Wang Dongguang

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences

June 2022

中国科学院大学
研究生学位论文原创性声明

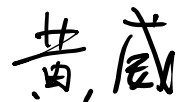
本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名： 
日 期：2022.05.31

中国科学院大学
学位论文授权使用声明

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

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名： 
日 期：2022.05.31

导师签名： 
日 期：2022.05.31

摘 要

太阳是离人类最近的一颗恒星，太阳上剧烈爆发的太阳活动与人类的生产生活密切相关，而这些剧烈的太阳活动的起源与太阳磁场的产生、演化等有重要联系，太阳磁场测量仪器（下文简称：磁像仪）是研究太阳活动的关键设备。传统的磁像仪大多属于地面设备，随着太阳磁场的研究逐渐深入，高时间分辨率、高空间分辨率、高偏振分辨率和连续的磁场观测是突破太阳发电机、辐射对流和日冕加热等难题的关键。但是地基磁像仪受制于大气湍流、背景辐射和地球自转等因素，极大的制约了上述难题的攻坚。相对的，空间磁像仪具有可连续观测、不受地球大气干扰等不可替代的优势。

目前应用最广泛的磁场测量理论是基于 Zeeman 效应，该方法首先测量太阳光夫琅和费磁场敏感谱线的斯托克斯参量，然后根据偏振辐射转移理论反演出磁场信息。在太阳磁像仪中，核心组件是实现快速偏振调制的磁分析器（下文简称：偏振分析器），和实现快速窄带透过波长调谐的滤光器（下文简称：滤光器），液晶调制技术是目前既满足快速偏振调制测量，又可以实现窄带调谐滤光的电光调制技术。向列液晶可调相位延迟器（Liquid Crystal Variable Retarder, LCVR）相较于传统方案可以大大缩短调制时间，进而提高时间分辨率，LCVR 是下一代磁像仪的技术突破点。此外，LCVR 的光学口径较大、调制速度快、驱动电压低、光谱范围宽、质量轻、功耗低和不含旋转结构等优势使其逐渐成为空间偏振调制仪器中的新热点。

（1）本文的第一项研究工作是：研究了液晶器件的物理特性并研制了一套液晶滤光器精密驱动系统，通过分析液晶器件物理特性及驱动信号要求，设计了精密脉冲信号驱动器、精密温控系统及滤光器波带控制系统。其中精密脉冲信号驱动器实现了优于 20 μ V 的信号输出精度，优于国外同类型产品 50 倍；精密温控系统针对小体积开放式的偏振分析器实现了 0.02 $^{\circ}$ C 以内的温控稳定精度，满足了液晶器件稳定工作的需要；液晶滤光器波带控制系统采用 LabView

设计，实现了多通道波待扫描和整机定标功能；以上系统均已在怀柔基地望远镜上开展了实测工作，获得了良好的数据结果。

(2) 本文的第二项研究工作是：研制了一套卫星搭载的液晶器件特性试验仪。LCVR 的高分子材料特性，它的空间适应性亟需通过卫星搭载进行实际验证，其中 LCVR 的相位调制稳定性是关键待测指标。本文通过对 LCVR 延迟测试系统的稳定性进行分析，在受限的设计下针对性地使用“零点”校准法，实现了稳定度高达 99.3% 的液晶驱动系统；使用变频误差控制温控法实现了 $35 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 的 LCVR 恒温控制精度。液晶试验仪设计完成后进行的力、热和电磁兼容环境试验结果表明：待测的 LCVR 和整机功能正常，液晶试验仪获取的数据可以真实反应待测 LCVR 的电光调制性能。目前，已经完成了所有空间环境试验并交付卫星，目前已完成卫星总装，预计 2022 年 7 月发射。同时，开展了地面老炼试验，对液晶器件及试验仪的长期工作稳定性进行了考核，状态稳定。

(3) 本文的第三项研究工作是：研究液晶器件在磁像仪中的应用与测试。ASO-S/FMG 是国内首个空间太阳磁场望远镜，首次使用液晶器件在空间开展磁场测量。本研究的过程中对液晶器件进行了严格的环境试验和电光性能测试，验证了液晶型偏振分析器在复杂空间环境下的工作稳定性，保证了偏振分析器正样产品的准时交付。在窄带液晶磁场滤光器的研究中，本文通过分析传统定标方案存在的缺点，设计了自动化快速整机标定方案，使得标定速度提高了 38 倍，并且避免了人工测量误差。经过整机定标后的磁场滤光器已成功获得磁图。

本课题成功实现了第一套完整的用于光学观测的国产化液晶控制系统；成功实现了国内第一套液晶空间稳定性测试设备的研制。本文从液晶控制电路设计出发，到液晶器件空间适应性研究，再到液晶器件在空间磁分析器中的实测应用，最后到液晶器件在地基磁场滤光器的试观测应用，为我国大力发展液晶器件，探索下一代空间磁像仪和大型地基磁像仪，积累了重要的测试数据和研制经验，为我国太阳物理发展拉开了新的帷幕。

关键词：向列液晶，太阳磁场，偏振分析器，窄带滤光器，空间探测

Abstract

The sun is the closest star to humans. The violent eruption of solar activity on the sun is closely related to the production and life of human beings. The origin of intense solar activity is closely related to the generation and evolution of the solar magnetic field. The measuring instruments of the sun's magnetic field are the key equipment for studying solar activity. Most of the traditional instruments belong to the ground equipment. With the deepening of the study of the solar magnetic field, high temporal resolution, high spatial resolution, high polarization resolution, and continuous magnetic field observations are the keys to breaking through difficult problems such as solar dynamo, radiative convection, and coronal heating. However, ground-based magnetometers are subject to factors such as atmospheric turbulence, background radiation, and the Earth's rotation, which greatly restrict the tackling of the challenge. In contrast, space magnetometers have irreplaceable advantages such as continuous observation and no interference from the earth's atmosphere.

The most widely used magnetic field measurement theory is based on the Zeeman effect. This method first measures the Stokes parameter of the Fraunhofer magnetic field sensitive spectral line of sunlight, and then inverts the magnetic field information according to the polarization radiation transfer theory. In the solar magnetic imager, the core components are the magnetic analyzer for fast polarization modulation and the optical filter for fast narrow-band transmission wavelength tuning. The liquid crystal modulation technology is currently not only suitable for fast polarization modulation measurement, but also narrow-band tuning filter. Electro-optical modulation of light. Compared with the traditional solution, the nematic liquid crystal adjustable phase retarder can greatly shorten the modulation time, thereby improving the time resolution. LCVR is the technological breakthrough point of the next-generation magnetic imager. In addition, the advantages of LCVR, such as large

optical aperture, fast modulation speed, low driving voltage, wide spectral range, light weight, low power consumption and no rotating structure, make it gradually become a new hot spot in spatial polarization modulation instruments.

(1) In this paper, the physical properties of liquid crystal devices are studied, and a precise driving system for liquid crystal filters is developed. This paper designs a precise pulse signal driver, a precise temperature control system and an optical filter band control system by analyzing the physical characteristics of the liquid crystal device and the requirements of the drive signal. The precision pulse signal driver achieves a signal output accuracy better than 20uV, which is 50 times better than similar foreign products. The precision temperature control system is aimed at the small-volume open-type polarization analyzer, and realizes the temperature control stability accuracy within 0.02℃, which meets the needs of the stable operation of the liquid crystal device. The liquid crystal filter waveband control system is designed with LabView, which realizes the multi-channel wave to be scanned and the whole machine calibration function. All of the above systems have been measured on the Huairou base telescope, and good data results have been obtained.

(2) In this paper, a set of satellite-mounted liquid crystal device characteristic tester is developed. The characteristics of LCVR's polymer materials and its space adaptability urgently need to be verified by satellites. The phase modulation stability of the LCVR is a key indicator to be measured. In this paper, the stability of the LCVR delay test system is fully analyzed. Targeted use of the "zero point" calibration method under the limited design achieves a liquid crystal drive system with a stability of up to 99.3%. The LCVR constant temperature control accuracy of $35 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ is achieved by using the variable frequency error control temperature control method. After the design of the liquid crystal tester is completed, the force, heat and electromagnetic compatibility environmental test results of the equipment show that the LCVR to be tested and the whole machine function normally. The data obtained by the liquid crystal tester can truly reflect the electro-optical modulation performance

of the LCVR to be tested. At present, the equipment has completed all space environment tests and delivered satellites, and the equipment is expected to be launched in July 2022. At the same time, the ground aging test is also carried out in this paper, and the long-term working stability of the liquid crystal device and the tester is evaluated. The results show that the equipment is in a stable state.

(3) This paper studies the application and testing of liquid crystal devices in magneto-imagers. ASO-S/FMG is the first space solar magnetic field telescope in China. The satellite is the first to use liquid crystal devices to measure magnetic fields in space. My job is to carry out strict environmental tests and electro-optical performance tests on liquid crystal devices, to verify the working stability of liquid crystal polarization analyzers in complex space environments, and to ensure the on-time delivery of the original polarization analyzer products. In the research of narrow-band liquid crystal magnetic field filter, this paper designs an automatic and fast whole-machine calibration scheme by analyzing the shortcomings of the traditional calibration scheme, which increases the calibration speed by 38 times and avoids manual measurement errors. The magnetic field filter after the calibration of the whole machine has successfully obtained the magnetic map.

This project successfully realized the first complete set of domestic liquid crystal control system for optical observation. In this paper, the first domestic liquid crystal space stability testing equipment has been successfully developed. In this paper, the design of the liquid crystal control circuit is carried out. In this paper, the research on the spatial adaptability of liquid crystal devices is carried out. In this paper, the actual measurement application of liquid crystal device in space magnetic analyzer is also carried out. In this paper, the experimental application of liquid crystal devices in ground-based magnetic field filters is carried out. These research works have accumulated important test data and development experience for my country to vigorously develop liquid crystal devices, explore the next generation of space magnetometers and large-scale ground-based magnetometers, and open a new curtain for the development of solar physics in my country.

Key Words: Nematic Liquid Crystals, Solar Magnetic Fields, Polarization Analyzers,
Narrow Band Filters, Space Detection

目 录

第 1 章	引言	1
1.1	太阳活动与磁场.....	1
1.2	液晶科学的发展.....	5
1.3	研究方向与意义.....	7
1.4	主要研究内容.....	8
第 2 章	液晶器件在磁像仪中的应用原理	9
2.1	偏振光学基础.....	9
2.1.1	偏振光的数学描述.....	10
2.1.2	Stokes 矢量表示法	12
2.1.3	Mueller 矩阵.....	13
2.1.4	常用偏振器件的穆勒矩阵.....	14
2.2	太阳磁场的测量原理.....	15
2.2.1	太阳光谱线的 Zeeman 效应.....	15
2.2.2	弱场近似下的偏振辐射转移方程.....	18
2.2.3	基于窄带偏振成像的磁场测量.....	20
2.3	液晶器件的工作原理.....	21
2.3.1	液晶的分类.....	21
2.3.2	向列液晶波片的电控原理.....	22
2.4	液晶型偏振分析器的工作原理.....	23
2.4.1	偏振分析器的调制原理.....	23
2.4.2	偏振分析器的分类.....	24
2.4.3	机械旋转波片法.....	25
2.4.4	KD*P 电光调制.....	26
2.4.5	LCVR 电光调制.....	28
2.5	液晶型窄带滤光器的工作原理.....	29
2.5.1	窄带滤光器的分类.....	30
2.5.2	偏振干涉滤光原理.....	30
2.5.3	液晶可调谐 Lyot 滤光器	33
2.6	本章小结.....	37
第 3 章	液晶电控系统设计	39

3.1 液晶器件的工作特点.....	39
3.2 多通道液晶驱动器设计.....	39
3.2.1 硬件系统框架.....	40
3.2.2 LCVR 驱动电路设计.....	41
3.2.3 硬件结构装调测试.....	46
3.2.4 软件设计.....	48
3.2.5 人机交互设计.....	49
3.3 液晶驱动器的测试.....	50
3.3.1 输出分辨率测试.....	50
3.3.2 上升时间测试.....	50
3.3.3 输出稳定性测试.....	52
3.4 多通道恒温控制器设计.....	55
3.4.1 温度采集方案.....	56
3.4.2 系统原理图设计.....	57
3.4.3 硬件设计与结构装调.....	58
3.4.4 软件控制框架.....	60
3.4.5 人机交互设计.....	62
3.5 恒温控制器性能测试.....	62
3.6 本章小结.....	64
第 4 章 星载液晶稳定性测试系统的设计	65
4.1 设计需求.....	65
4.2 最小化相位延迟测量.....	66
4.3 液晶试验仪的整机稳定性.....	68
4.3.1 LCVR 的驱动稳定性.....	68
4.3.2 LCVR 的温度稳定性.....	69
4.4 液晶试验仪的工作流程.....	69
4.5 液晶试验仪的光机设计.....	70
4.6 液晶试验仪电子学设计.....	71
4.6.1 LCVR 驱动系统.....	72
4.6.2 液晶恒温系统设计.....	76
4.7 环境试验与结果分析.....	78
4.7.1 力学冲击与振动试验.....	78

4.7.2 热实验.....	79
4.7.3 LCVR 的高低温重复性	81
4.7.4 高低温相位误差校准.....	83
4.7.5 电磁兼容试验.....	84
4.7.6 长周期监测实验.....	85
4.8 本章小结.....	86
第 5 章 LCVR 在磁像仪中的应用与测试.....	87
5.1 LCVR 在 FMG 偏振分析器中的应用	87
5.1.1 FMG 磁场测量系统简介	87
5.1.2 偏振分析器的光机组成.....	88
5.1.3 环境试验与结果分析.....	90
5.1.4 驱动器性能测试.....	95
5.2 LCVR 在地基磁场滤光器的应用	98
5.2.1 液晶滤光器的光机结构简介.....	98
5.2.2 滤光器定标系统设计.....	100
5.2.3 滤光器试观测.....	105
5.3 本章小结.....	107
第 6 章 总结与展望	109
6.1 工作总结.....	109
6.2 未来展望.....	110
参考文献.....	111
致 谢.....	115
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	117

第1章 引言

1.1 太阳活动与磁场

“天何所沓？十二焉分？日月安属？列星安陈？出自汤谷，次于蒙汜。自明及晦，所行几里？”这是中国古代爱国诗人——屈原被放逐时，在墙壁上写下的《天问》，抒发对于太阳每天要走多远的感慨^[1]！从中国神话的夸父逐日到北欧神话的太阳神——苏尔，展示出古人对太阳强烈的好奇心和求知欲，去探索这颗发光发热的“圆球”的奥秘。



图 1.1 漫画夸父逐日（引至 ZCOOL 网站）

随着现代科学的发展，人类对太阳的了解逐渐深入。根据现代天文观测表明，整个宇宙大约有 10 亿星系，银河系正是其中之一。处于银河系的边缘地带，有一个小的恒星系——太阳系。整个太阳系围绕银河系转动，太阳是一颗

恒星，处于太阳系的中心位置，占据了太阳系整体质量的 99.86%，围绕太阳运行的是行星，围绕行星运转的是各个行星自己的卫星，太阳系的布局如下图

1.2。从地球来看，地球绕太阳旋转的轨迹是一个类圆的椭圆轨道，类圆半径平均约为 1.5 亿公里，椭圆轨道的长半轴约为 1.521 亿公里，短半轴约为 1.471 亿公里^[2,3]。太阳是一个巨大球体，半径大致为 6.9×10^5 公里，由致密的等离子气体组成，总质量约为 1.9×10^{30} 公斤，其中大约 71% 的元素为氢元素，氦元素约占比为 27%，还有微量的碳、氮、氧、硅、镁、氖、铁、硫等^[4,5]。

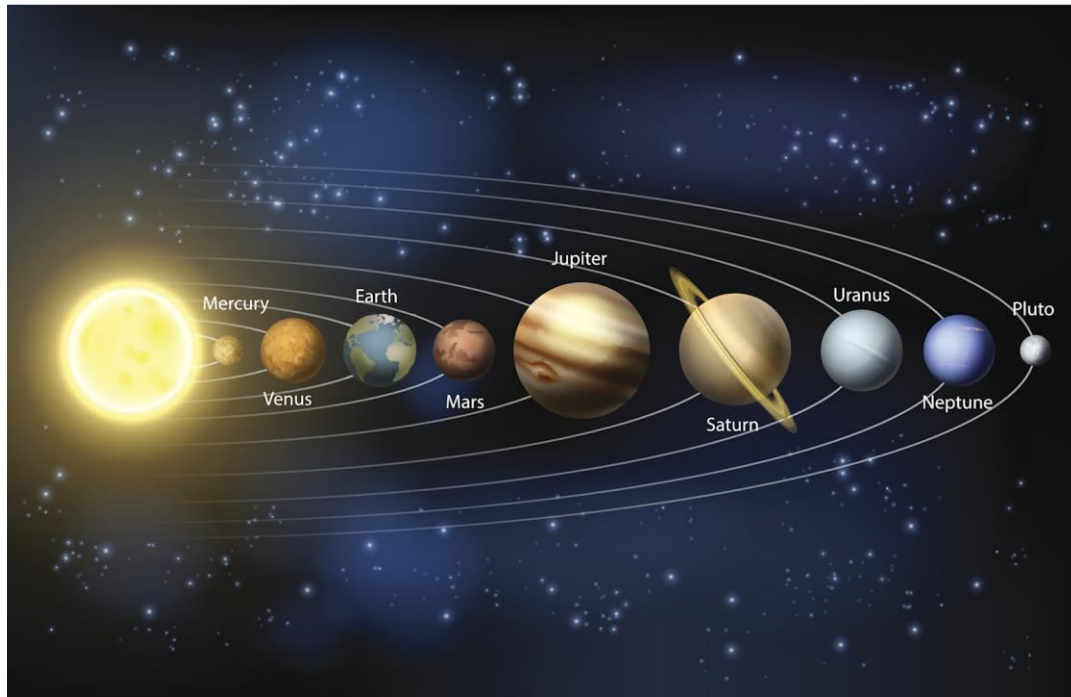


图 1.2 太阳系布局（引自 NASA 网站）

太阳的基本结构由内至外可以分为日核、辐射区、对流区、光球、色球和日冕，如下图 1.3 所示。日核中温度极高，密度极大，不停地进行氢核聚变反应^[6]。在辐射区，对日核发射的高能 γ 射线进行漫长的再吸收再辐射，逐渐转换为 X 射线、紫外线和可见光等低频辐射。在对流层中，太阳内部的能量以对流方式快速传输到外层，这些等离子气体的较差自转与湍流变化，使得太阳产生了磁场。在地球上，我们看到的光基本上是由光球层发出的，光球层可以看到一些光斑、黑子和米粒组织。色球层的亮度很弱，色球层的活动有谱斑、暗条、日珥、耀斑。日冕层是一个高温层，其温度高达百万摄氏度，日冕活动有日冕物质抛射（Coronal Mass Ejection, CME）等^[7-19]。

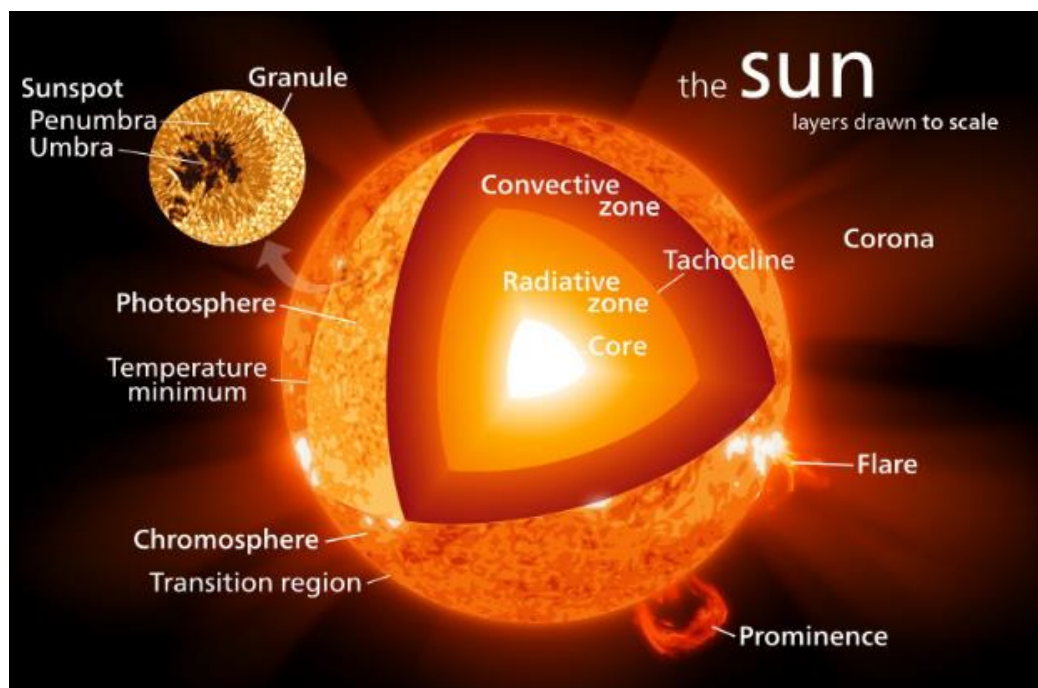


图 1.3 太阳结构（引自 Wikipedia Commons/kelvinsong）

太阳大气活动现象主要有：黑子、光斑、谱斑、耀斑、暗条（日珥）、CME 和射电爆等组成。现代太阳物理研究表明，太阳磁场是以上太阳大气活动的主要起因。这些活动中最醒目的要属太阳黑子，其它太阳活动如耀斑等也都出现在黑子附近，共同组成较大的太阳活动区。在太阳活动中，最剧烈的是耀斑，活动期间伴随着大量的射电爆发，太阳耀斑的前期、中期、后期都有重要的演化过程。在 CME 中，当日冕的磁场在很大的尺度下失去平衡，会产生长时间（最大可达数小时）的高速（最快超过数千公里每秒）日冕物质从太阳表面向外部抛射，一部分落回日面后，其余的部分进入太空环境中。连同耀斑和 CME 等太阳活动，朝向地球方向的太阳活动产生的高能电离辐射会引起地球电离层的剧烈变化，扰乱地球的磁场，同时这些干扰继续向地球内层大气传播，进一步影响平流层和对流层，对地面导航、电网、航空航天、卫星通信造成巨大破坏，这些太阳活动对日地空间安全带来威胁，示意图如下图 1.4 所示^[3,20-27]。最近一次来自 Space X 星链计划发射的一批卫星中，49 颗中有 40 颗未能到达预定轨道，最终坠入地球大气层焚毁，经过调查发现是由于在卫星部署过程中，出现较大的太阳风吹向地球，产生了地磁风暴，导致大批量卫星无法进入预定轨道。

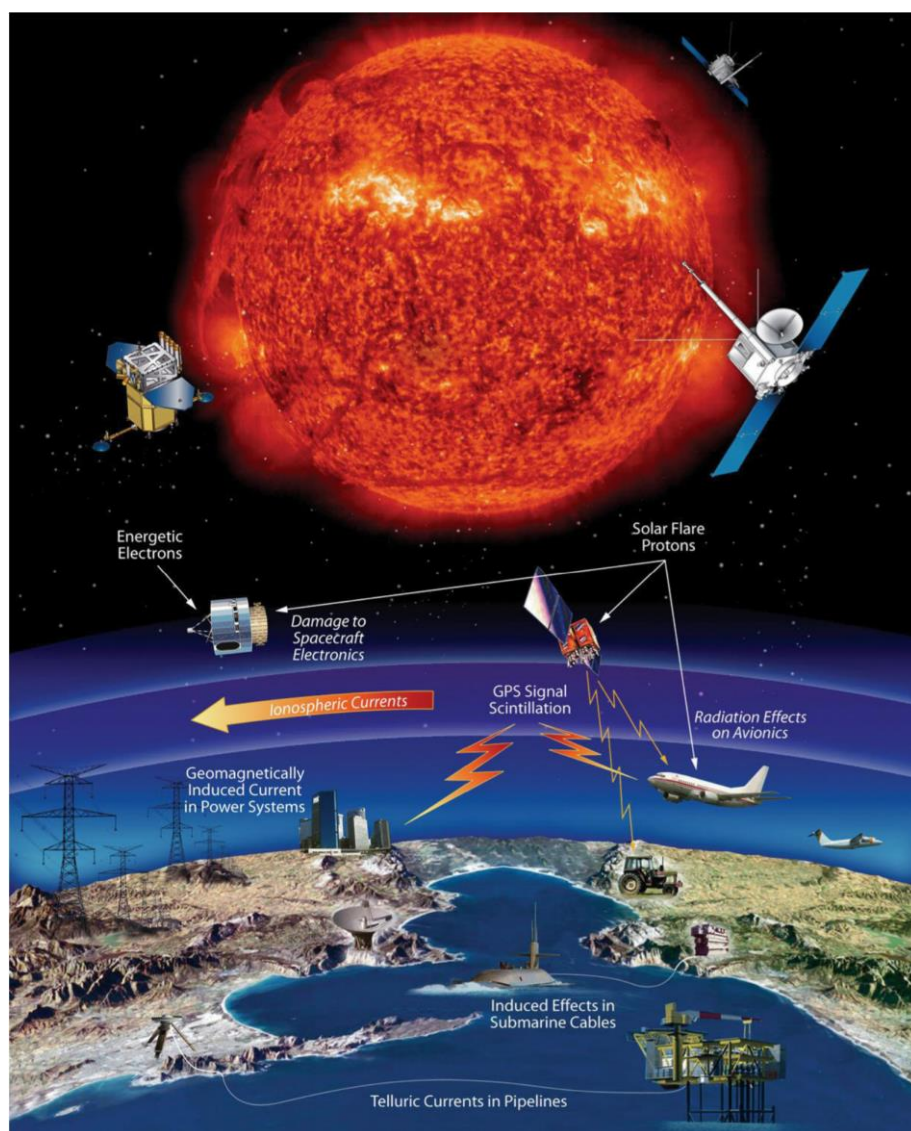


图 1.4 太阳活动对地球的影响 (引自 NASA 网站)

因此，对太阳磁场的深入研究，有助于科学家破解这些太阳活动的奥秘，对这些太阳活动形成有效预报，对于国计民生、国家安全等至关重要。1908 年，Hale 第一次发现太阳磁场，开启了人类对太阳磁场研究的先河，他利用 Zeeman 效应测得某个黑子具有 2000~3000 高斯的强磁场。按时间排序来说：1933 年，Lyot 发明第一台 Lyot 双折射滤光器，1938 年 Ohman 利用自己制作的 Lyot 滤光器获得了第一幅二维的太阳单色相；1949 年 Evans 对 Lyot 型滤光器的透过率进行了较大的改进，被后世称为“Evans 滤光器”。1952 年，Babcock 父子二人首次完成了光电磁像仪的设计，光电设备的加入大大提高了对太阳磁场的测量灵敏度，获得了 100 高斯以下的弱磁场测量数据；1960 年前苏联 Stepanov 发明了矢量磁像仪，它的原理与 Babcock 类似，但是经过更为精密的

设计；1968年，Beckers 利用双折射滤光器获得了视面内的太阳磁场图像，极大的改善了原有磁像仪的时间效率。1984年，我国著名太阳物理学家艾国祥等设计了怀柔太阳磁场望远镜，1996年，艾国祥等人又设计了多通道滤光器，实现了三维磁场的测量。随后的岁月，随着电子设备的发展，航空航天技术的进步，太阳磁像仪逐渐从地面往空间发展，试图摆脱地球大气的干扰，克服无法连续观测等限制。从1995年 SOHO（Solar and Heliospheric Observatory）卫星上天开始，到2006年日本 Hinode 卫星的发射；从2010年 SDO（Solar Dynamics Observatory）卫星的顺利入轨，到2018年帕克探针（Parker Solar Probe）的近日观测；从2020年欧空局发射的太阳轨道飞行器（Solar Orbiter）^[28-30]，到2022年我国即将发射的首颗太阳观测卫星 ASO-S（Advanced Space-based Solar Observatory）“先进天基太阳天文台”^[31-37]；对太阳磁场以及相关问题的研究已经进入了“空间纪元”。下一代磁像仪将朝着重量轻、体积小和调制速度快的空间磁像仪，和大口径、高偏振测量精度的地基磁像仪共同发展。向列相液晶可变相位延迟器（Liquid Crystal Variable Retarder, LCVR）具有口径大、调制速度快、驱动电压低、光谱范围宽、重量轻、功耗低和不含旋转结构等优势，是实现地基和空间磁像仪的关键器件。



图 1.5 ASO-S 卫星在轨运行示意图（引自 NSSC 网站）

1.2 液晶科学的发展

液晶从出现到大规模应用已经跨过一个多世纪。1854年德国的 Virchow 教授发现类似溶致液晶的磷脂类神经鞘具有双折射特性。另一位植物学家莱尼

泽在 1888 年进行苯甲酸酯研究时发现，当晶体态的苯甲酸酯加热到大约 145 摄氏度时，晶体态的苯甲酸酯逐渐融化成粘稠液体，且自身的颜色也变成白色，随后莱尼泽继续加热样品，当温度到达 178℃ 后，刚处于白色的粘稠液体变得透明。在这期间，莱尼泽发现处于中间状态的液体经过单光束照射后，会出现 2 条出射光，由于光学不是他擅长的领域，于是他向物理学家雷曼请教这一现象的根源。雷曼利用自己的研究优势，首次使用偏光显微镜对处于熔点中间的这一液体进行观测，证实了该状态的液体具备各向异性，并将其命名为“液晶”，因此雷曼被称为“液晶之父”。^[34,38]

又经过约半个世纪的发展，Heilmeyer 的发现使得液晶从被动器件成为电光器件，他根据液晶的光电效应，将液晶应用在温度采集等传感器方向。随着 60 年代电子科学技术和半导体行业的快速发展，液晶被用在显示技术方向，风靡至今的液晶显示器 LCD(liquid crystal display)成为了时代的产物。最近 30 年间，除了发展成熟的显示领域，液晶还大量应用在传感器、生物医学、光纤通信、空间光调制和可调谐滤波器等方向。如向列相液晶，由于其具有类似于单轴晶体的各向异性特性，可以制作相位延迟器、空间光调制器、可调光楔、调谐透镜和光栅等。利用液晶制作的光学器件可以替代传统的机械传动或者机械旋转结构，利用电光效应即可轻松替代传统机械设备耗时、笨重的操作，液晶的以上特点在遥感、天文和太阳物理领域应用十分广泛^[32,39-49]。



图 1.6 液晶 LCD 电视（引自 KONKA 网站）

液晶类的调制设备在太阳磁场测量中的主要优势包括：没有旋转的动部件、电光调制速度快、适应的光谱范围宽以及可以制作出较大的口径。早在1992年，美国国家天文台使用液晶制作了偏振分析器，并在望远镜上进行了使用。1997年 Elmore 等人使用液晶制作了液晶型可调谐滤光器，在高山天文台进行了近红外 1083 纳米波段的 He I 成像观测。1999 年，Ichimoto 等也随后研制出 530.3 纳米波段的 Lyot 液晶滤光器，实现了 0.1 纳米带宽的日面发射线成像观测。2007 年国家天文台张志勇等设计出国内第一台 1083 纳米波段的液晶偏振分析器。2015 年国家天文台怀柔太阳观测基地王东光等研制了 656.3 纳米的可调双折射滤光器，带宽最小达到 0.05 纳米。2018 年侯俊峰等人在我国首个空间太阳望远镜卫星 ASO-S 主载荷之一的 FMG 中，开展了液晶偏振分析器空间化应用的设计，对液晶器件的辐照等进行了细致的试验，卫星预计 2022 年发射。在液晶滤光器方面，国家天文台王刚博士在 2019 年研制了 5 级 $H\alpha$ 液晶滤光器的样机；国家天文台孙英姿等正在研制 0.02 纳米带宽的 Lyot 滤光器，预计于 2023 年投入观测使用。从国外到国内，从地面到空间，液晶器件在太阳磁场测量中占有了一席之地，是未来发展的大趋势。

1.3 研究方向与意义

本文主要研究向列液晶器件在太阳磁像仪中的应用，主要内容包括以下四个部分：

- 1.研究向列液晶器件的基本原理，开发用于光学实测的液晶控制系统，包括多通道液晶驱动器和高精度液晶恒温控制器；
- 2.研究液晶器件的空间适应性，并研究液晶星载控制系统电子学的设计方案，设计出用于真实星载环境的液晶特性测试系统。
- 3.研究液晶偏振分析器的工作原理，设计出用于实测的空间磁像仪的液晶偏振分析器；
- 4.研究窄带可调谐液晶滤光器的工作原理，设计出用于实测的磁场测量的窄带液晶滤光器系统。

本课题在是国内首次对液晶器件在太阳磁像仪中的系统性应用研究，课题的研究意义主要体现在以下四方面：

- 1.成功研制出国内首个用于光学实测的多通道高精度液晶驱动器和配套的软件系统，打破了国外的垄断；
2. 设计出我国首台液晶空间调制特性试验仪，积累了液晶电子学设计的经验，为液晶器件空间化的广泛应用提供数据支撑和研制经验；
- 3.研制了我国首台空间太阳磁场液晶型偏振分析器，为我国空间太阳磁场观测提供了高时间分辨率、高偏振灵敏度的调制设备；
4. 成功研制出目前我国首台带宽最窄的太阳磁场液晶滤光器，并在试观测中完成了标定、检测经验的总结，实现了磁图测量。

1.4 主要研究内容

本文的文章结构和研究内容安排如下：

第二章详细介绍了太阳磁场的测量原理和相关光学知识，然后介绍了偏振分析器和滤光器的工作原理，最后介绍了液晶器件的工作原理以及在太阳磁像仪中的应用原理。

第三章介绍了液晶电子学控制系统（下称：液晶电控系统）的设计目标，以及详细的软件、硬件设计，并给出相关技术指标测试。

第四章介绍了液晶器件星载电光调制稳定性测试仪（下称：液晶试验仪）的研制。根据星载电路的设计难点和系统稳定性的关键点，文中给出了详细的光机电设计。最后介绍了液晶试验仪的环境试验的结果分析。

第五章介绍了液晶器件在空间磁像仪的磁分析器中的实际应用。介绍了液晶偏振分析器的光学设计、结构设计，和环境试验结果分析。

第六章介绍了液晶器件在地基磁场滤光器中的实际应用。详细介绍了液晶滤光器的光学设计、结构设计以及在望远镜中的观测结果和分析。

第七章是对博士课题的总结与下一步的工作展望。

第2章 液晶器件在磁像仪中的应用原理

2.1 偏振光学基础

光波是一种横向的电磁波，具有波粒二象性，在真空中，光波以光速进行传播，传播时，电场矢量与磁场矢量均垂直于传播方向，二者之间互相正交，在传输过程与物质发生物理化学相互作用的过程中，电矢量占据主要作用，一般情况下使用电矢量代表光波的振动矢量（也叫光矢量），光的传播示意图如下图 2.1 所示。光波的横波特性说明电矢量是与光的传播方向垂直，但在三维空间上，在垂直与传播方向的平面内光矢量是任意取向的，如下图 2.2 所示。虽然光源发出的光矢量相对于传播方向的垂直面内是随机取向的，但是从统计学来看，光矢量出现在这个垂直面的概率是一致的话，那么我们称该光源发出的光波是自然光，光矢量的振动方向具有轴对称特性，自然光叫非偏振光。当该自然光入射到物体时，经过折射、反射等过程后，光矢量的轴对称平衡被打破，在垂直平面内光矢量的在各个方向出现的概率不同，这种非对称现象叫做偏振，这种类型的光波叫做偏振光。实际自然界中，光的偏振状态大致可以分为自然光、线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光和部分偏振光^[38]。

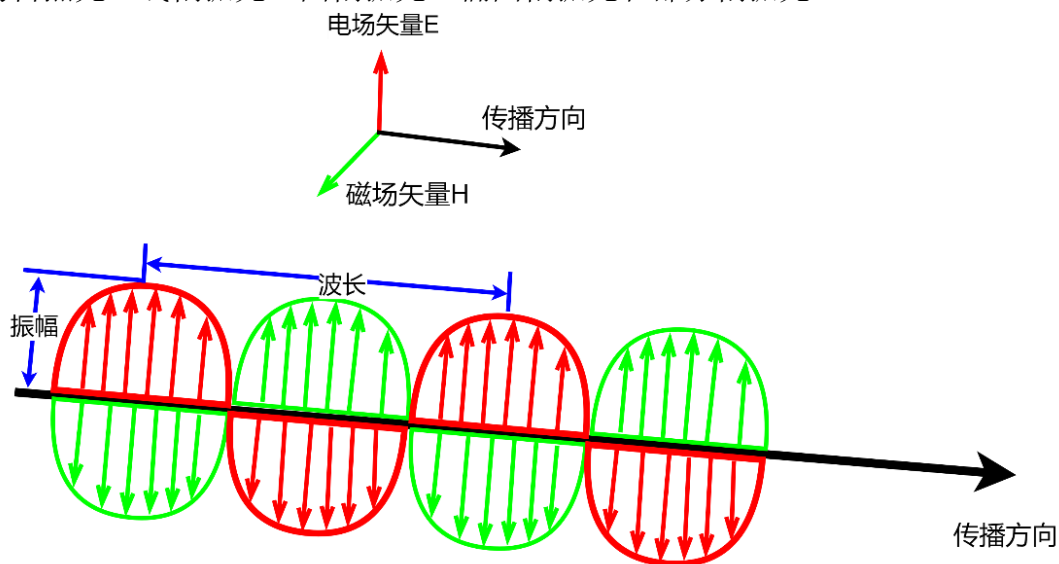


图 2.1 光的传播示意图

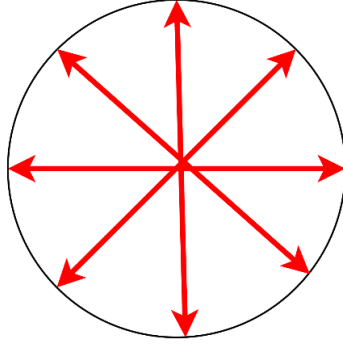
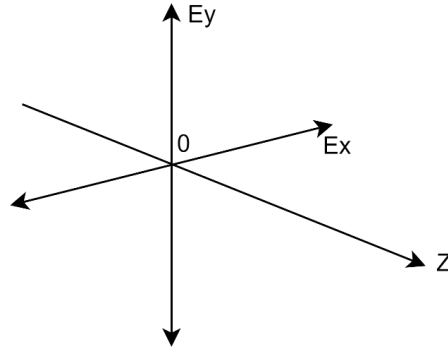


图 2.2 光矢量平面内的随机性

2.1.1 偏振光的数学描述

任何的一束单色光都可以使用平面波的公式(2.1)来表示，假设电磁波沿着 z 轴方向传播，如下图 2.3 所示：

$$E(z, t) = E_0 e^{i(\omega \cdot t - k \cdot z)} \quad (2.1)$$


 图 2.3 电磁光在 z 轴传播

那么电场 E 只在 x 、 y 方向存在分量：

$$E_x(z, t) = E_{0x} e^{i(\omega \cdot t - \delta_x - k \cdot z)} \quad (2.2)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} e^{i(\omega \cdot t - \delta_y - k \cdot z)} \quad (2.3)$$

$$E_z(z, t) = 0 \quad (2.4)$$

将公式(2.2)和(2.3)中，使用 $\tau = \omega \cdot t - k \cdot z$ 进行改写：

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\tau + \delta_x) \quad (2.5)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(\tau + \delta_y) \quad (2.6)$$

然后，对公式(2.5)和(2.6)左右分别除以 E_{0x} 和 E_{0y} ，并展开余弦函数：

$$\frac{E_x}{E_{0x}} = \cos \tau \cos \delta_x - \sin \tau \sin \delta_x \quad (2.7)$$

$$\frac{E_y}{E_{0y}} = \cos \tau \cos \delta_y - \sin \tau \sin \delta_y \quad (2.8)$$

将公式(2.7)、(2.8)左右两边分别乘以 $\sin \delta_y$ 、 $\sin \delta_x$ 后，等式相减；同理对公式(2.7)、(2.8)左右两边分别乘以 $\cos \delta_y$ 、 $\cos \delta_x$ 后等式相减：

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \sin \delta_y - \frac{E_y}{E_{0y}} \sin \delta_x = \cos \tau \sin(\delta_y - \delta_x) \quad (2.9)$$

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \cos \delta_y - \frac{E_y}{E_{0y}} \cos \delta_x = \sin \tau \sin(\delta_y - \delta_x) \quad (2.10)$$

将公式(2.9)左右分别取平方，将公式(2.10)左右分别取平方，然后将平方后的两式左右分别相加，令 $\delta = \delta_y - \delta_x$ ， δ 表示相位差：

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_x}{E_{0x}} \frac{E_y}{E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (2.11)$$

公式(2.11)从形式上看是一个类似椭圆的方程，在光束沿着 z 轴方向进行的过程中，该方程描述了一束单色光在任意一个时刻和任意一个地点，其波的传播轨迹是一个椭圆（偏振椭圆），单波长的光是完全偏振光。

(1) 在公式(2.11)中，当 $\delta = n\pi (n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$ 时，该椭圆方程会变成会简化为直线方程：

$$\frac{E_y}{E_x} = (-1)^n \frac{E_{0y}}{E_{0x}} \quad (2.12)$$

在这种情况下，光矢量（也称电矢量）的振动方向始终在平面 xy 当中，这种光叫做线偏振光（或平面偏振光），如下图 2.4 所示；当 $\delta = 0$ 时，平面偏振光的偏振方向的斜率是负值；当 $\delta = \pi$ 时，斜率会变为正值。特别的当 $E_{0y} = 0$ 时，该偏振光为 0° 方向的线偏振光；当 $E_{0x} = E_{0y} \neq 0$ 时，该偏振光为 $\pm 45^\circ$ 方向的线偏振光。

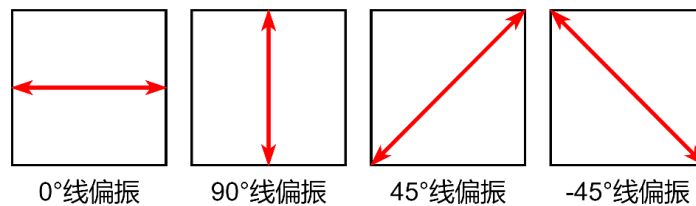


图 2.4 线偏振光

(2) .在公式(2.11)中, 当 $E_{0x} = E_{0y} = E_0, \delta = \frac{n\pi}{2} (n = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots)$ 时:

$$E_x^2 + E_y^2 = E_0^2 \quad (2.13)$$

此时, 偏振椭圆方程简化为圆的表达式, 光矢量在垂直于传播方向的平面内的轨迹变成圆形, 这种状态的偏振光称为圆偏振。当相位偏差 $\delta = \frac{\pi}{2}$ 时, 从人眼看 (-z 方向, 逆光传播) 光矢量的按照顺时针转动, 称为右旋圆偏振; 同理, 当 $\delta = \frac{3\pi}{2}$ 时, 从人眼看 (-z 方向, 逆光传播) 光矢量的按照逆时针转动, 称为左旋圆偏振, 如下图 2.5 所示。

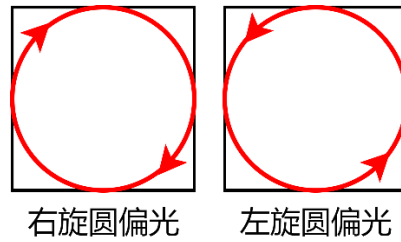


图 2.5 圆偏振光

2.1.2 Stokes 矢量表示法

为了便于描述偏振光, 英国物理学家斯托克斯 (G. G. Stokes) 在 1852 年提出使用四个参量 (S_0, S_1, S_2, S_3) 来表述偏振光的偏振态信息。这四个斯托克斯矢量通常被称为斯托克斯矢量, 斯托克斯矢量不是真正的矢量, 因为它们不作为矢量进行变换或旋转。可将斯托克斯参量作为矢量叠加, 来模拟非相干光束的叠加。斯托克斯参量也可由穆勒矩阵通过矩阵-矢量乘法进行操作。因此, 将斯托克斯参量称为斯托克斯矢量是可行的, 但它们不是真正的矢量。斯托克斯参量可以表征非偏振光、部分偏振光和偏振光, 用斯托克斯参量可以描述光波的状态, 如相干性等^[50]。Stokes 参量的表述形式如下:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_H + P_V \\ P_H - P_V \\ P_{45} - P_{135} \\ P_R - P_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

公式(2.14)中, S_0 是光束的总辐照度。 S_1 为水平(0°)偏振光通量分量(P_H)与垂直(90°)偏振光通量分量(P_V)之差。当 $S_1 = 0$ 时, 水平线偏振器测得的光通量与垂直线偏振器测得的光通量相等。因此, S_1 度量了水平偏振超过垂直偏振的程度, 如果 $P_V > P_H$, S_1 为负。类似地, S_2 是 45° 偏振光通量(P_{45})与 135° 偏振光通量(P_{135})之差。最后, S_3 度量了右旋(P_R)与左旋(P_L)圆偏振光通量之差。在遥感和天文学中, 斯托克斯参量也经常被标记为 I, Q, U 和 V 。简单来说, I 表示光波的总强度; $\pm Q$ 表示线偏振光水平或者垂直的程度; $\pm U$ 表示线偏振光与

Q 成 ± 45 度的程度； $\pm V$ 表示圆偏振光左旋或者右旋的程度。

斯托克斯矢量 I、Q、U、V 与公式 (2.11) 之间的关系如下：

$$\begin{aligned} I &= |E_{0x}|^2 + |E_{0y}|^2 \\ Q &= |E_{0x}|^2 - |E_{0y}|^2 \\ U &= 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta \\ V &= 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta \end{aligned} \quad (2.15)$$

公式(2.15)中， E_{0x} 和 E_{0y} 分别表示电场在 x、y 平面振幅的分量； δ 表示其在 x、y 方向上的相位差。

当 $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$ 时，满足该关系的光束称为完全偏振光，太阳光就是完全偏振光；当 $I^2 > Q^2 + U^2 + V^2$ 时，满足该关系的光束称为部分偏振光。将四个参量分别处以 I 进行归一化，下表 2.1 给出常见光束的 Stokes 表示^[51]。

表 2.1 基本偏振态及其斯托克斯参量

偏振类型	符号	斯托克斯参量
水平线偏振	H	(1,1,0,0)
垂直线偏振	V	(1,-1,0,0)
45° 线偏振	45	(1,0,1,0)
135° 线偏振	135	(1,0,-1,0)
右旋圆偏振	R	(1,0,0,1)
左旋圆偏振	L	(1,0,0,-1)
非偏振光	U	(1,0,0,0)

2.1.3 Mueller 矩阵

Mueller 矩阵（穆勒矩阵）提供了一种表征样品所有偏振特性的系统方法：二向衰减、延迟和退偏。穆勒矩阵的基本定义是：将一组入射斯托克斯参量与出射斯托克斯参量联系在一起的 4×4 矩阵。

穆勒矩阵的引入扩展了可以描述的偏振现象的范围。琼斯方法仅适用于非退偏、相互作用的情形；所有完全偏振的入射态都以完全偏振的形式出射。事实上，对于大多数光学系统，如透镜、望远镜、显微镜和光纤系统来说，无退偏的相互作用是理想情况，许多光学系统工作在非常接近于无退偏的条件。

当存在退偏时，偏振光变成部分偏振的，偏振度降低。在显微镜或望远镜中，这种退偏情况通常与诸如污垢、指纹、划痕或不良光学膜层等缺陷有关。穆勒矩阵，而不是琼斯矩阵，更适合表征这些缺陷的偏振效应。但更普遍的情况是，当偏振光从任何物体散射时，如油漆、纸张、灰尘、岩石、塑料等，偏振度会降低，并出现一些退偏。因此，穆勒矩阵扩展了可以描述的光与物质相互作用的范围。

穆勒矩阵 M 是一个 4×4 的矩阵，它通过矩阵矢量乘法将入射斯托克斯参量 S 转换为出射斯托克斯参量 S' ：

$$S' = M \cdot S = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

一系列偏振元件的效应或相互作用可以通过它们各自的穆勒矩阵 M_q 的矩阵相乘来描述，其中 q 是元件顺序的序数。遇到的第一个元件的穆勒矩阵位于相乘的矩阵序列的最右端，最后一个元件的穆勒矩阵 M_Q 位于矩阵乘积的最左侧。

$$M = M_Q \cdot M_{Q-1} \cdot M_{Q-2} \cdots M_2 \cdot M_1 = \prod_{q=1}^Q M_{Q-q+1} \quad (2.17)$$

因此，利用简单的矩阵乘法运算就可以很容易地计算出元件序列偏振效应的性质。在计算穆勒矩阵的级联时，可以使用矩阵乘法的结合律，对于相邻的矩阵可以任何顺序组合相乘。

$$(M_3 \cdot M_2) \cdot M_1 = M_3 \cdot (M_2 \cdot M_1) \quad (2.18)$$

2.1.4 常用偏振器件的穆勒矩阵

下面给出本文需要使用的偏振器件的穆勒矩阵形式，对于 0° 方位角的部分线偏振片，其形式为：

$$M_{p_0} = \frac{\tau_p}{2} \begin{pmatrix} 1 & p & 0 & 0 \\ p & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{1-p^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{1-p^2} \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

公式(2.19)中， p 为线偏振度， τ_p 为透射率。当 $p=1$ 时，该偏振片为完全线偏振片，当自然光经过偏振片后会变成线偏振光。

延迟器是将入射光进行垂直分解，分解后的光束仍然是偏振光，两束偏振光在延迟器内产生了一定的光程差（相位差），从延迟器出射后合并为一束光，使得原光束增加了一定的相位延迟，因此这类延迟器也叫做相位延迟器，理想的相位延迟器不改变光束的强度和偏振度，其实际附加的相位延迟取决于工作波长。对于零方位角的延迟器表达式如下：

$$M_{R_{\lambda,0}} = \tau \begin{pmatrix} 1 & -\cos 2\psi & 0 & 0 \\ -\cos 2\psi & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin 2\psi \cos \delta & \sin 2\psi \sin \delta \\ 0 & 0 & -\sin 2\psi \sin \delta & \sin 2\psi \cos \delta \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

在公式(2.20)中， ψ 为二项色角， δ 为相位延迟量。当 $\psi = 45^\circ, \delta = 90^\circ$ 时的相位延迟器是 $1/4$ 延迟波片；当 $\psi = 45^\circ, \delta = 180^\circ$ 时的相位延迟器为半波片（也成为 $1/2$ 波片）。

当偏振器件经过旋转角度 θ 后，其穆勒矩阵会发生变化，具体如下：

$$M' = R(\theta) \cdot M \cdot R(-\theta) \quad (2.21)$$

其中， M' 为旋转后偏振器件的穆勒矩阵， M 为偏振器件在 0° 方位角时的穆勒矩阵。 R_θ 为旋转矩阵，表示如下：

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & -\sin 2\theta & 0 \\ 0 & \sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

2.2 太阳磁场的测量原理

在太阳活动中，我们主要研究在低层大气中的太阳活动，在这些低层大气中，充斥着太阳磁场，对这些活动区域的磁场测量将有助于解开相关太阳活动起源、演化和消亡等众多太阳物理难题。当太阳光是自然光（完全偏振光），当太阳光经过大气的磁场后，根据 1896 年的 Zeeman 效应，光束会分裂为具有其它偏振态的单色光，单色光分裂的裂距与所经过的磁场强度有关。在选取合适的辐射转移模型的情况下，通过测量太阳光的 Stokes 参数，可以反演出谱线的裂距，进而计算出相关的磁场量。

除了低层太阳大气的 Zeeman 效应外，在高层大气中还可以使用 Hale 效应计算磁场信息。1924 年德国物理学家 Hale，在弱场散射偏振测量时发现了该效应。较弱的磁场会导致线偏振光产生退偏和偏转，Hale 效应在高层太阳大气的弱磁场中敏感度更高，因此更适合弱太阳磁场的测量。目前，Hale 效应的相关应用与知识准备还在初步应用阶段，在太阳磁场测量领域，基于 Zeeman 效应的磁场测量仍占据主导地位，本文也主要介绍基于 Zeeman 效应的磁场测量研究。

2.2.1 太阳光谱线的 Zeeman 效应

对于太阳的光谱线，在发生 Zeeman 效应时，有纯发射线 Zeeman 效应、纯吸收线 Zeeman 效应以及夫琅和费谱线 Zeeman 效应。

2.2.1.1 纯发射线的 Zeeman 效应

在原子物理中，如下图 2.6 左半部分，在没有外部磁场的情况下（ $B=0$ ），

一个原子从 K2 能级（高能级）往 K1 能级（低能级）跃迁时，会产生波长为 λ_0 的单波长光；在图 2.6 右半部分，当该原子处于 B1 不等于 0 的磁场中时，原子的能级产生量子化，此时从高能级往低能级跃迁时会产生三分裂子线： π 线（波长仍为 λ_0 的线偏振，偏振方向平行于 B）；蓝端的 σ_v 波长为 $\lambda_0 - \Delta\lambda$ ，纵向观测（观测视向平行于 B 的反方向）时 σ_v 为左旋圆偏振；红端的 σ_r 波长为 $\lambda_0 + \Delta\lambda$ ，纵向观测时 σ_r 为右旋圆偏振。

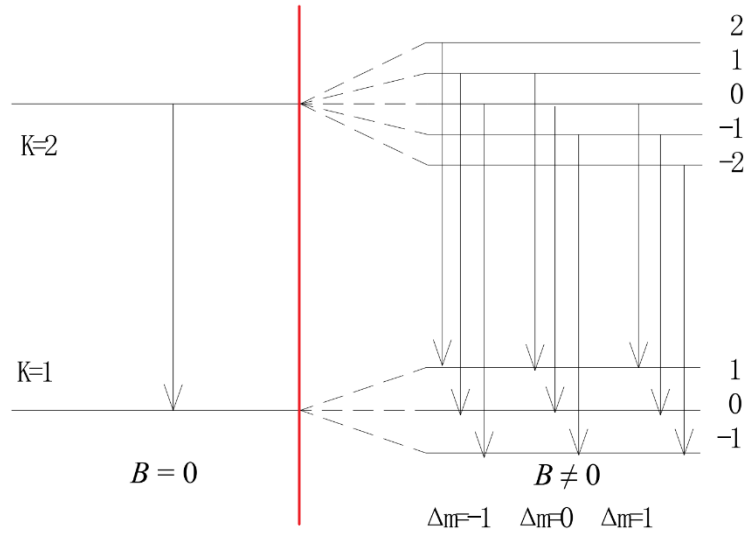


图 2.6 Zeeman 效应原子跃迁示意图

Zeeman 裂距与太阳磁场的关系如下：

$$\Delta\lambda = 4.67 \times 10^{-13} g \lambda^2 B \quad (2.23)$$

在公式(2.23)中， g 为朗德因子， λ 为 $B=0$ 时的波长（单位 $\text{\AA}$ ），在纵向观测时， π 线无法观测到，只能看到圆偏振光。在横向观测时（观测视向与 B 垂直），三条分裂线均可被观测， π 线与 B 的方向平行，两条 σ 线与 B 垂直，如下图所示。 $\Delta\lambda$ 称为 Zeeman 裂距。

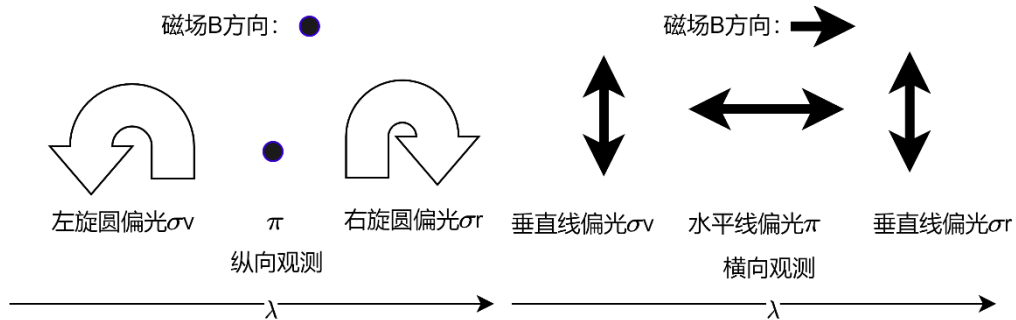


图 2.7 纯发射线 Zeeman 效应

2.2.1.2 纯吸收线的 Zeeman 效应

对于反常 Zeeman 效应，在吸收型气体磁场中，由于这些气体原子磁矩的存在，入射光经过也会发生 Zeeman 分裂，三条偏振光分别为： Δ_v 、 π 和 Δ_r ，波长依次表示为： $\lambda_0 - \Delta\lambda$ 、 λ_0 、 $\lambda_0 + \Delta\lambda$ 。纵向观测（观测视向平行于 B 的反方向）时 σ_v 为右旋圆偏振， σ_r 为左旋圆偏振， π 线无法观测。在横向观测时（观测视向与 B 垂直），三条分裂线均可被观测， π 线与 B 的方向垂直，表现为线偏振；两条 σ 线与 B 平行，表现为部分线偏振，如下图 2.7 所示。

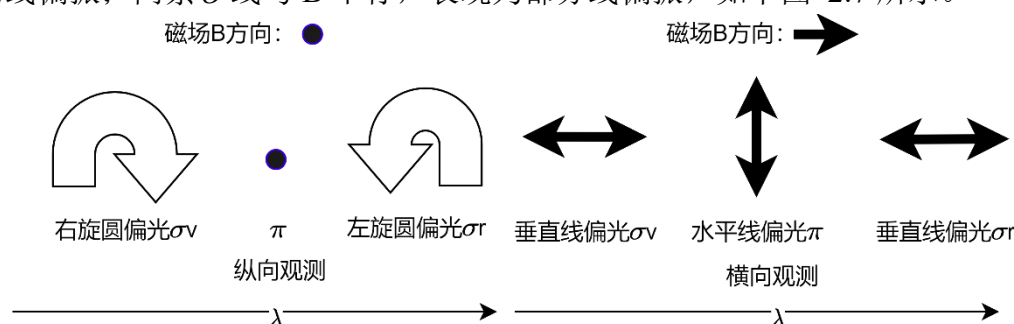


图 2.8 纯吸收线 Zeeman 效应

2.2.1.3 夫琅和费 Zeeman 效应

1814 年，德国物理学家约瑟夫-夫琅和费（Joseph von Fraunhofer）利用自制的光谱仪对太阳发出的光谱进行观测，除了传统的彩色带外，他还观测到 576 条暗线，如下图 2.9 所示，这些暗线被称为夫琅和费线，这些谱线在太阳的大气中经过反复的吸收和发射过程，与纯吸收和纯发射的光谱线不同。夫琅和费谱线的偏振状态与纯吸收线的偏振态较为接近，由于 Zeeman 分裂产生的三条子线都是部分偏振的状态，三条子线的裂距与磁场的关系可以使用公式 (2.23) 进行计算。

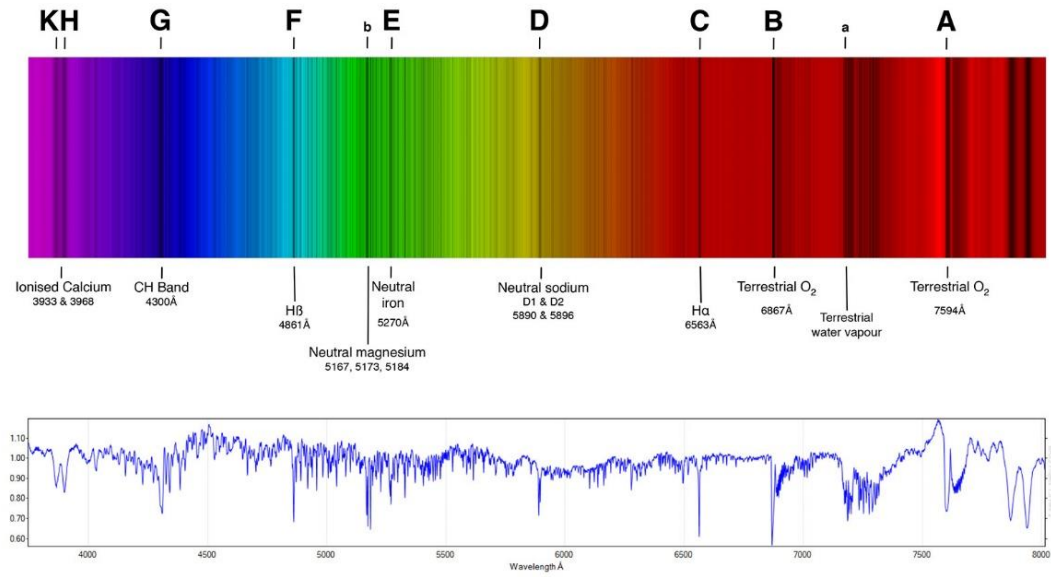


图 2.9 夫琅和费光谱图（引自 jazzistentialism 网站）

在表 2.2 中，给出了纯发射线、纯吸收线和夫琅和费谱线下的 Zeeman 效应偏振对比。

表 2.2 不同光谱线 Zeeman 效应的偏振态

谱线类型	纯发射线	纯吸收线	夫琅和费谱线
纵向观测	σ_v 左旋圆偏光	右旋圆偏光	部分右旋圆偏光
	π 看不见	看不见	看不见
	σ_r 右旋圆偏光	左旋圆偏光	部分左旋圆偏光
横向观测	σ_v 垂直于 B 的线偏振	平行于 B 的线偏振	平行于 B 的线偏振
	π 平行于 B 的线偏振	垂直于 B 的线偏振	垂直于 B 的线偏振
	σ_r 平行于 B 的线偏振	平行于 B 的线偏振	平行于 B 的线偏振

2.2.2 弱场近似下的偏振辐射转移方程

1956 年，太阳物理学家 Unno 做了一系列的假设与近似求解，得到了 Stokes 参数方程的求解方法。其中，这些假定条件包括：当太阳磁场较弱时，在较小的 Zeeman 分裂下太阳大气具有较为均匀的磁场；太阳谱线的线和连续吸收系数的比例与光学的深度不具备相关性等。因此他得到的斯托克斯偏振辐射转移方程，将 Faraday 函数和 Faraday-Voigt 进行泰勒展开后可以写为：

$$\mu \frac{dI}{d\tau} = [1 + \eta_0 H(a, v)](I - B_T) + \eta_0 v_H \cos \gamma H'(a, v)V - \eta_0 \left(\frac{v_H \sin \gamma}{2}\right)^2 H''(a, v)(Q \cos 2\chi + U \sin 2\chi) \quad (2.24)$$

$$\mu \frac{dQ}{d\tau} = [1 + \eta_0 H(a, v)]Q - \eta_0 \left(\frac{v_H \sin \gamma}{2}\right)^2 H''(a, v)(I - B_T) \cos 2\chi \quad (2.25)$$

$$\mu \frac{dU}{d\tau} = [1 + \eta_0 H(a, v)]U - \eta_0 \left(\frac{v_H \sin \gamma}{2}\right)^2 H''(a, v)(I - B_T) \sin 2\chi \quad (2.26)$$

$$\mu \frac{dV}{d\tau} = [1 + \eta_0 H(a, v)]V + \eta_0 v_H H'(a, v)(I - B_T) \cos \gamma \quad (2.27)$$

根据公式(2.24)和公式(2.27)可以计算出:

$$V(v, \tau) = v_H \cos \gamma \frac{\partial I}{\partial v} \quad (2.28)$$

在公式(2.28)中纵向磁场 ($B_{\parallel}$) 与 $v_H \cos \gamma$ 成正相关, 将公式(2.28)改写为:

$$B_{\parallel} \propto -V \left(\frac{\partial I}{\partial v}\right)^{-1} \quad (2.29)$$

在公式(2.24)、公式(2.25)和公式(2.26)中, 联立可得:

$$Q = -\left(\frac{v_H \sin \gamma}{2}\right)^2 \frac{H''(a, v)}{H'(a, v)} \frac{\partial I}{\partial v} \cos 2\chi \quad (2.30)$$

$$U = -\left(\frac{v_H \sin \gamma}{2}\right)^2 \frac{H''(a, v)}{H'(a, v)} \frac{\partial I}{\partial v} \sin 2\chi \quad (2.31)$$

进一步的, 可以将公式(2.30)和公式(2.31)简化为:

$$(Q^2 + U^2)^{1/2} = \left(\frac{v_H \sin \gamma}{2}\right)^2 \frac{H''(a, v)}{H'(a, v)} \frac{\partial I}{\partial v} \quad (2.32)$$

$$\frac{U}{Q} = \tan 2\chi \quad (2.33)$$

由于横向磁场 ($B_{\perp}$) 成正相关关系, 进一步可以得到:

$$B_{\perp} \propto (Q^2 + U^2)^{1/4} \left(\frac{\partial I}{\partial v}\right)^{-1/2} \quad (2.34)$$

因此, 经过公式(2.29)和公式(2.34), 可以得到磁场与斯托克斯参数之间的关系:

$$B_{\parallel} = C_{\parallel} V \quad (2.35)$$

$$B_{\perp} = C_{\perp} (Q^2 + U^2)^{1/4} \quad (2.36)$$

$$\chi = 0.5 \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{U}{Q} \right) \quad (2.37)$$

$$\gamma = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{B_{\perp}}{B_{\parallel}} \right) \quad (2.38)$$

公式(2.35)和公式(2.36)中， $C_{\parallel}$ 和 $C_{\perp}$ 为相应的定标系数。

为了分析该方法下，横向和纵向磁场的灵敏度关系，假定观测波长在 $5250.2 \text{ \AA}$ 处，在没有碰撞加宽的情况下（ $I(v) = 1 - (1 - I_0) \exp(-v^2)$ ），横向磁场在 Q 的方向时（ $\chi = 0$ ）， $\Delta\lambda_D = 0.07$ ， $\Delta\lambda_H = 4.67 \times 10^{-13} \lambda^2 g B$ ，朗德 g 因子（ $g = 3$ ）时，可以计算出：

$$B_{\perp} = 70 \sqrt{B_{\parallel}} \quad (2.39)$$

在公式(2.39)中，对于太阳磁场测量，纵向磁场的灵敏度远远高于横向磁场的灵敏度，其中主要的原因是由于 Zeeman 效应的测量原理和多普勒加宽引起的。假设纵向磁场灵敏度为 1 高斯时，横向磁场灵敏度为 70 高斯；当纵向磁场的灵敏度为 10 高斯时，横向磁场灵敏度为 221 高斯。

2.2.3 基于窄带偏振成像的磁场测量

基于 Zeeman 效应进行磁场测量时，在下图 2.10 左半部分当裂距 $\Delta\lambda$ 足够大时（与蓝翼或者红翼分裂线的谱线宽度 $\Delta\lambda_D$ 相比），可以直接测量出由于磁场产生的裂距宽度，进而利用公式(2.23)直接计算出太阳磁场 B 。但是，实际情况下，由于 B 较小和多普勒加宽等，导致如下图 2.10 右半部分中，蓝翼和红翼的谱线宽度 $\Delta\lambda_D$ 与有效裂距 $\Delta\lambda$ 相近时，仪器设备无法分辨两条分裂线之间的裂距，无法利用 Zeeman 的公式(2.23)直接计算出磁场，需要利用偏振辐射转移理论，通过测量 Stokes 参量，来反演出太阳大气磁场 B 。

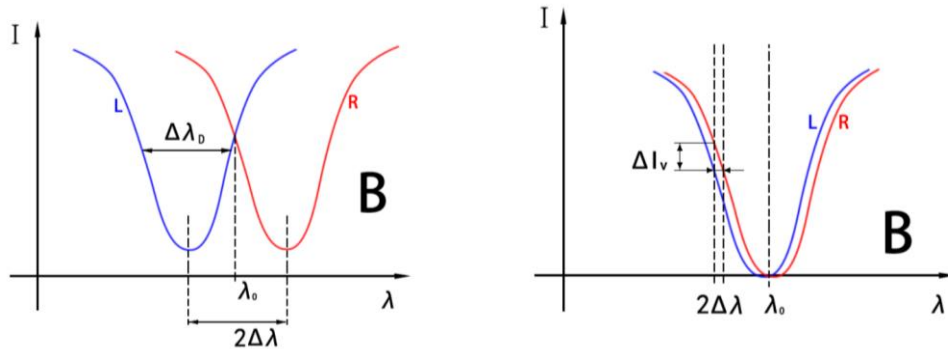


图 2.10 磁场直接测量（左）与间接测量（右）

在进行矢量磁场测量时，主要采用滤光器型或者光谱仪型磁像仪。滤光器型磁像仪利用双折射滤光器选出极窄的波带点（滤光器的带宽为 0.01nm ），然后使用偏振分析器测量出 Stokes 参数的 I 、 Q 、 U 和 V ，利用公式(2.35)和公式(2.36)反演出磁场。滤光器型磁像仪的工作特点是具备较高的时间分辨率和空间分辨率，可以在短时间获得较大日面空间的矢量磁图。对于光谱仪型的磁像仪，使用最小二乘法测量斯托克斯的轮廓来计算磁场，可以获得高精度的磁场，可以用于精确磁场测量，但是它的缺点是时间分辨率和空间分辨率比滤光器型磁像仪低，只能逐点扫描来获取大范围日面区域的磁场。本文主要介绍基于滤光器的磁像仪。

在下图 2.11 中，太阳光经过望远系统被探测器采集，结果是白光像；在望远系统和探测器的中间级，增加一套滤光器系统之后，在探测器上可以采集到单色像；在上述的基础上，在滤光器前加入偏振系统后，在探测器上就可以得到对应的偏振像，再经过磁场反演之后即可获得所测量的太阳磁场信息。

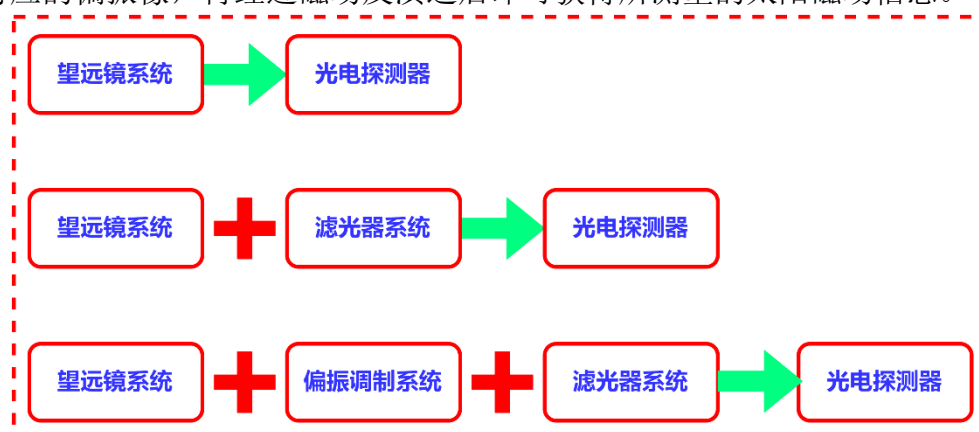


图 2.11 太阳磁场测量概念图

2.3 液晶器件的工作原理

本文的主要研究内容是液晶器件在太阳磁像仪中的应用研究，根据液晶调制技术的特点，开展液晶器件在窄带偏振成像系统中的应用研究（窄带偏振成像系统包括：偏振分析器、窄带可调谐滤光器）。

2.3.1 液晶的分类

部分晶体在熔化的过程中，会经过某个中间的过渡状态，该状态下具有流动性的同时兼具晶体原有的各向异性特征，不会直接从固态变为各向同性液

体，我们称这种具有有序性的液体叫做液晶。液晶大致可以分为 2 个不同的类别：热致液晶和溶致液晶，这主要是根据两种液晶的形成方式与成分的不同来进行划分。热致液晶常见的是只有一个分子类型，工作在特定的温度范围内时呈现出液晶相；而溶致液晶是由化合物和相关溶剂按照一定配比调制出液晶相。目前，热致液晶中的棒状分子类型大量应用于显示成像方向，分为：近晶相液晶、向列相液晶和胆甾相液晶，三种类型的液晶排列模型如下图 2.12 所示 [52-54]。近晶相液晶的分子排列规则，分子间的排序与晶体类似，具有有序性，分子在所在的层内能自由移动，但不能上下层之间移动。胆甾相液晶的空间结构类似一个螺旋，每层分子沿着法线组成螺旋结构，分子层之间相互平行。向列相液晶的液晶分子排列与近晶相比较类似，但是分子不分层，分子可以上下左右前后滑动，分子在长轴方向保持互相平行，这些长轴的平行取向过程使得液晶产生高度的双折射性。由于液晶分子具备较好的可移动性，对外界的响应比较敏感，因而得到大量的使用，本文的液晶材料也选择向列相液晶材料。

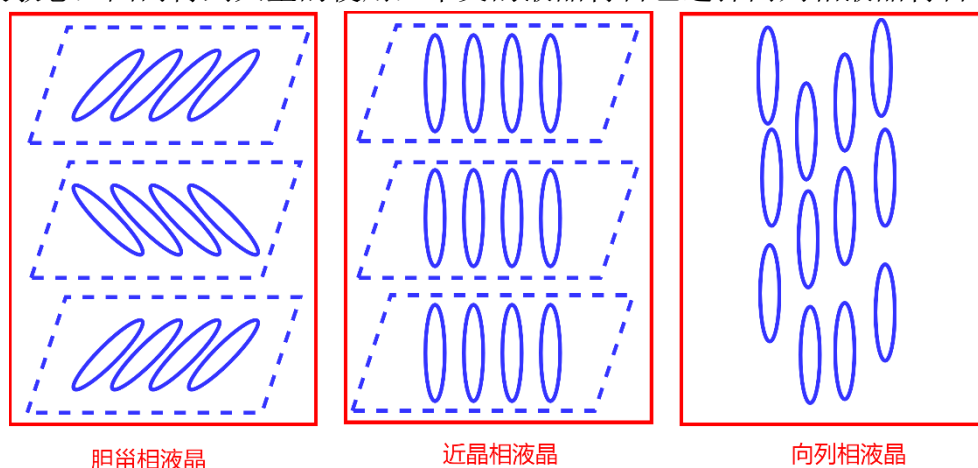


图 2.12 胆甾相、近晶相、向列相液晶的结构

2.3.2 向列液晶波片的电控原理

本文使用的向列相液晶可变相位延迟波片（nematic Liquid Crystal Variable Retarder, LCVR）由向列液晶分子、形成液晶分子的容纳腔的玻璃基板、玻璃基板表面附着的 ITO（Indium Tin Oxide，氧化铟锡）导电膜、取向膜等组成，其基本结构如下图 2.13 所示。本文的 LCVR 材料为 5CB(PP5CN)，其中导电膜采用氧化铟锡，取向膜为聚酰亚胺材质，液晶盒厚为 5 μm 。当上下两层 ITO 导电膜之间的驱动电压 $V=0$ 伏特时，如图 2.13 (a)所示，正介电各向异性液晶分

子指向矢沿着长轴平行排列，并且平行于 xy 平面，此时， $+z$ 方向的双折射率最大，LCVR 的相位延迟量最大；随着驱动电压逐渐增大，液晶分子指向矢绕 y 轴向 z 方向倾斜， $+z$ 方向的双折射率逐渐减小；如图 2.13 (b)所示，当驱动电压达到 10V 时，液晶分子趋于 z 方向， $+z$ 方向的双折射率接近于零。双折射率随驱动电压的增加连续减小，使得 LCVR 的相位延迟随之减小。因此，LCVR 的相位延迟可以通过改变其驱动电压实现连续可调^[55-60]。

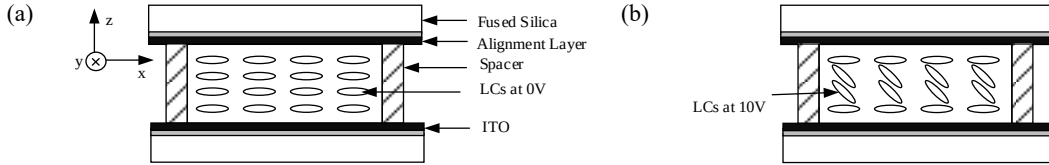


图 2.13 LCVR 的结构与工作原理。(a) 驱动电压=0V；(b) 驱动电压=10V

2.4 液晶型偏振分析器的工作原理

在滤光器型磁像仪中，偏振分析器用于实现太阳光的 Stokes 各参量的测量，偏振调制系统一般放置于滤光器系统之前，这样可以防止太阳光经过滤光器后产生附加偏振。

2.4.1 偏振分析器的调制原理

在图 2.11 的磁场测量系统中，后端探测器为光电探测器，如 CCD、CMOS 等，它们的特点是只对入射光的光强度（ I 分量）敏感，常规探测器无法直接获取 Q 、 U 和 V 分量，当一束光入射到探测器时，其响应如下：

$$I_{means} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = I \quad (2.40)$$

其中，入射光 S_{in} 的 Stokes 参量为 $S = [I \ Q \ U \ V]^T$ 。由公式(2.40)可知，探测器只能获取入射光的强度信息 I ，因此偏振分析器需要调制器和检偏器两部分。其中，偏振调制器（延迟器）需要将入射光斯托克斯参量的 Q 、 U 和 V 进行相互调制，然后利用检偏器（偏振片）将调制后的 Q 、 U 和 V 偏振分量调制输出到 I 光强分量上，用于探测器识别。其调制过程如下图所示：

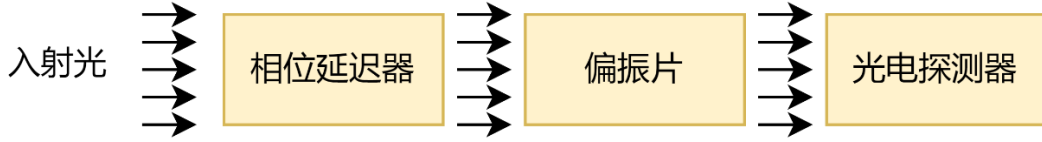


图 2.14 偏振分析器的工作原理

在图 2.14 中，调制一次后，探测器可以获得一组包含 QUV 分量的强度信息，对于入射光 S_{in} 包含四个未知数，从线性代数的数学上来分析，四个未知数至少需要四个线性独立的方程才可以解出未知数，因此偏振调制器需要至少执行 4 次线性独立的入射光调制，才可以测量出入射光 S_{in} 的四个斯托克斯参量，进而利用公式(2.35)和公式(2.36)反演出太阳磁场信息。偏振分析器的调制数学表达如下：

$$I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = MS_{in} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & m_{n3} & m_{n4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

公式(2.41)中， I_n 为偏振分析器在第 n 个线性调制下，在探测器上获取的与 QUV 相关的强度信息。除了采用上述的四次线性调制（简称四态调制）外，还有采用六态调制的方法，在实际测量中，假设一幅图片数据曝光时间与总时间数值相等，那么对于信噪比而言，四态调制与六态调制是相等的，本文中的偏振分析器采用四态调制方式。

2.4.2 偏振分析器的分类

根据上述的偏振分析器工作原理，按照调制的方式来分类，可以分为机械传动调制、电光器件调制和压电器件调制，这些调制方式中，可以改变光轴或者延迟量，或者同时改变。比如波片旋转法为传统的机械调制方案，过程主要是改变光轴。比如电光器件调制方案中的 KD*P 和 LCVR 则是改变波片的相位延迟量。

此外还可以根据偏振分析器所经过的光路数量来分类，包括单光束偏振分析器和双光束偏振分析器。双光束调制是采用偏振分光棱镜将光束正交分解，如图 2.15 所示，使用两个检偏器和探测器同时获取偏振信息，双光束调制方式提高了输出信号的信噪比，由于同时测量节约时间，降低了大气视宁度和图像

抖动的影响，但是会导致能量损失 50%，降低了信号强度，同时双光路设计可能会增加光路之间的相差，降低了偏振精度的同时也增加了系统复杂性与成本。

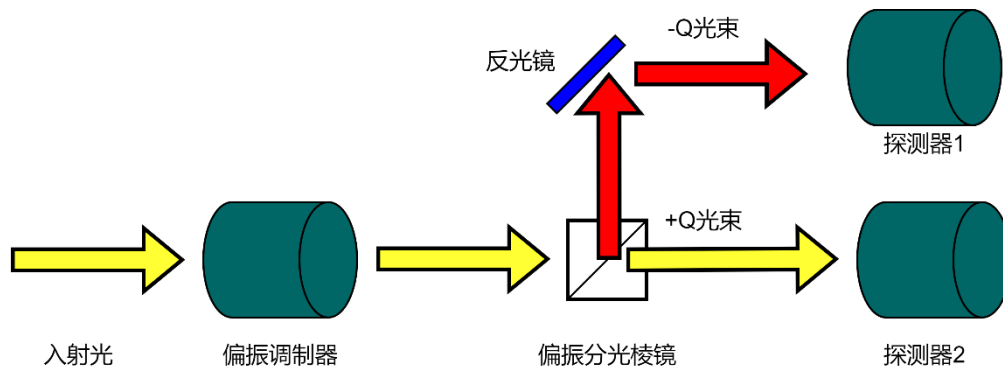


图 2.15 双光束偏振调制

如图 2.16 所示，单光束调制使用单一轴向的检偏器（偏振片）来检偏，而偏振调制器分时间来调制两个正交的偏振量。

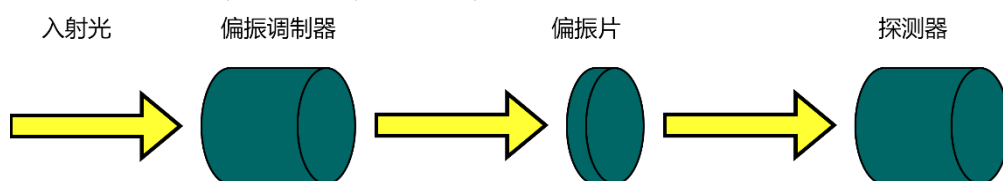


图 2.16 单光束分时偏振调制

2.4.3 机械旋转波片法

机械传动调制一般是使用促动器和机械传动结构改变偏振分光棱镜、相位延迟波片或者偏振片的光轴。对于偏振分析器，主要是使用旋转波片法。其基本原理如下图 2.17 所示，通过旋转延迟波片的不同角度，产生四个线性独立的光强输出，进而解出 Stokes 参量。

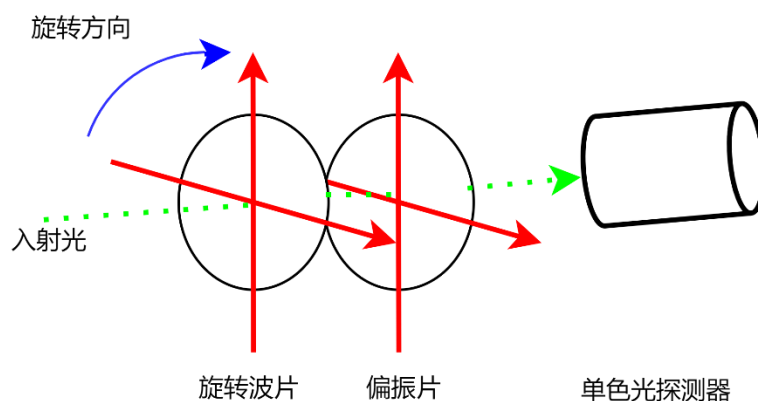


图 2.17 旋转波片法

在图 2.17 中，偏振片的透光轴与 x 轴平行，角度为 0° 入射光 S_{in} 经过延迟波片和偏振片后，进入探测器，出射光 S_{out} 为：

$$S_{out} = M_r \cdot M_p \cdot S_{in} \quad (2.42)$$

在公式(2.42)中， M_r 为旋转波片的穆勒矩阵（见公式(2.43)），使用 θ 表示波片光轴与 x 轴的角度， Δ 表示波片的相位延迟。

$$M_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cos \Delta & \sin 2\theta \cos 2\theta (1 - \cos \Delta) & -\sin 2\theta \sin \Delta \\ 0 & \sin 2\theta \cos 2\theta (1 - \cos \Delta) & \sin^2 2\theta + \cos^2 2\theta \cos \Delta & \cos 2\theta \sin \Delta \\ 0 & \sin 2\theta \sin \Delta & -\cos 2\theta \sin \Delta & \cos \Delta \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

在公式(2.42)中， M_p 为旋转波片的穆勒矩阵（见公式(2.44)），使用 “+” 表示偏振片与 x 轴平行，使用 “-” 表示偏振片与 y 轴平行。

$$M_p = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \pm 1 & 0 & 0 \\ \pm 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

因此，将公式(2.43)和公式(2.44)带入公式(2.42)中，出射光 S_{out} 的光强表达式可以表示为：

$$I_{means\pm} = \frac{I_{out} \pm Q_{out}}{2} = \frac{1}{2} I_{in} \pm \left(\frac{1 + \cos \Delta}{2} + \frac{1 - \cos \Delta}{2} \cos 4\theta \right) \frac{1}{2} Q_{in} \pm \frac{1 - \cos \Delta}{2} \sin 4\theta \frac{1}{2} U_{in} \mp \sin \Delta \sin 2\theta \frac{1}{2} V_{in} \quad (2.45)$$

在公式(2.45)中，包含了四个斯托克斯参量（ I_{in} 、 Q_{in} 、 U_{in} 、 V_{in} ），因此通过改变波片的角度，就可以获得四个方程，求解出入射光的斯托克斯参数。旋转波片法的光机结构与原理简单，光学器件成熟，容易实现，但是调制的速度取决于电机带动波片旋转的速度，对大气湍动和望远镜的自动跟踪精度与稳定度相关。

2.4.4 KD*P 电光调制

电光调制法中的 KD*P 调制属于改变相位延迟的方法，这种调制方法需要使用调制速度较快的电光器件，在下图 2.18 的示意图中，电光调制器件 KD*P 的初始方位角为 $\pi/4$ ，偏振片的透光轴角度为 0 度，通过在 KD*P 晶体两端施加 1000V 左右的直流高压电源，可以使得 KD*P 快速产生 90° 或者 -90° 的相

位延迟。同时配合两片四分之一波长的波片（光轴分别为 45° 和 0° ），通过插入或者拔出入射光路，即可完成调制。

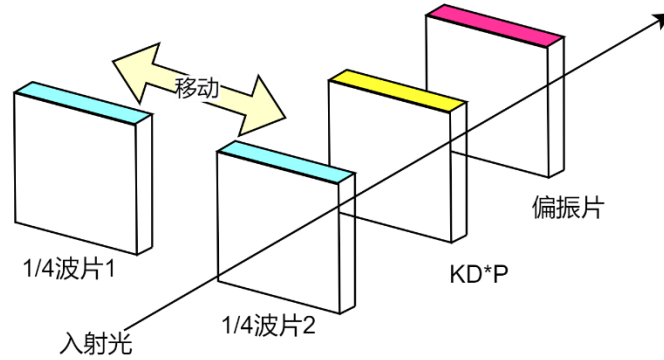


图 2.18 KD*P 电光调制法

整个调制光路的数学描述为：

$$S_{out} = M_{\lambda/4} \cdot M_{KD^*P} \cdot M_p \cdot S_{in} \quad (2.46)$$

公式(2.46)中， $M_{\lambda/4}$ 为四分之一波片的穆勒矩阵， M_{KD^*P} 为KD*P晶体的穆勒矩阵， M_p 为偏振片的穆勒矩阵，带入公式(2.46)，可以得出探测器获取的出射光强表达式：

$$I_{out} = \frac{1}{2} I_{in} \pm \frac{1}{2} (Q_{in} \sin 2\theta \sin \Delta + U_{in} \cos 2\theta \sin \Delta - V_{in} \sin 2\theta \sin \Delta) \quad (2.47)$$

公式(2.47)中， θ 为四分之一波片的光轴方位角， Δ 为四分之一波片的相位延迟。在实际工作中，KD*P调制法各器件的工作状态如下表2.1所示：

表 2.3 KD*P 调制器件的偏振状态

待测 Stokes 分量	1/4 波片光轴角	KD*P 延迟量	偏振片透光轴夹角
$(I_{in}+Q)/2$	45°	-90°	0°
$(I_{in}-Q)/2$	45°	90°	0°
$(I_{in}+U)/2$	0°	90°	0°
$(I_{in}-U)/2$	0°	-90°	0°
$(I_{in}+V)/2$	无	-90°	0°
$(I_{in}-V)/2$	无	90°	0°

KD*P 电光调制法具有调制速度快，结合有效的多幅图像叠加去噪的计算机处理，可以较大地减小大气扰动的干扰，该方案在太阳望远镜使用较为广泛。但是 KD*P 晶体自身容易潮解，由于加工工艺的限制，很难做到大口径，同时高达几千伏特的驱动电压，极大地增加了应用风险，也导致导电膜极易发黑造成导电能力下降甚至失效，尤其是对于空间太阳望远镜，这一缺陷无法弥

补。相对的，LCVR 这一新兴的电光延迟器件正在地面以及空间偏振调制领域崭露头角。

2.4.5 LCVR 电光调制

LCVR 型偏振分析器是将 LCVR 波片作为相位延迟调制工具，取代传统的旋转机构等，本文使用的 LCVR 典型电压——相位延迟曲线如图 2.19 所示。

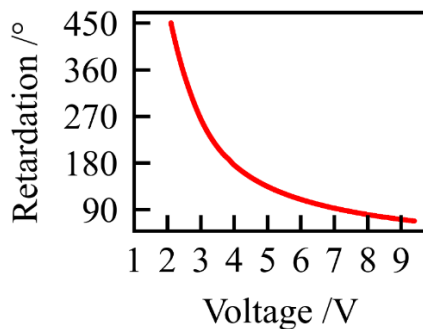


图 2.19 LCVR 电压——相位延迟曲线

在图 2.19 中，LCVR 的相位延迟随着驱动电压的增加而非线性连续减小，在 2V~10V 的电压区间，相位延迟连续变化 360° 以上，可以通过改变驱动电压实现相位延迟的连续可调。LCVR 的特点是驱动电压低、功耗小、有效的工作波长宽，透过率较高，口径相较于 KD*P 可以做的较大。典型的双 LCVR 偏振分析器由两片 LCVR 和一片偏振片构成，如下图 2.20 所示。

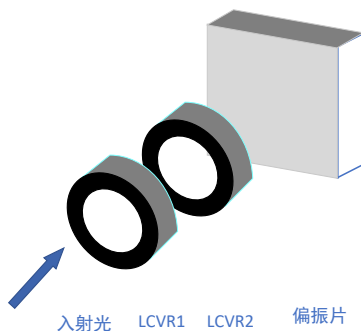


图 2.20 LCVR 偏振分析器

在图 2.20 中，LCVR1 的光轴与偏振片的透光轴相同，第二片 LCVR2 的光轴与 LCVR1 的光轴成 45° 夹角，通过调节 LCVR1 和 LCVR2 的驱动电压，实现不同的相位延迟组合，即可实现对偏振光的调制，具体调制方案如下表 2.4 所示。

表 2.4 LCVR 型偏振分析器调制方案

LCVR1		LCVR2		待测量
光轴/°	延迟量/°	光轴/°	延迟量/°	
0	0	45	0	+Q
	0		180	-Q
	90		90	+U
	90		270	-U
	0		90	-V
	0		270	+V

在表 2.4 中，当 LCVR1 的相位延迟等于 0 度，LCVR2 的相位延迟等于 0 度或者 180 度时，可以测量出 $\pm Q$ 的偏振分量。当 LCVR1 的相位延迟等于 90 度，LCVR2 的相位延迟等于 90 度或者 270 度时，可以测量出 $\pm U$ 的偏振分量。当 LCVR1 的相位延迟等于 0 度，LCVR2 的相位延迟等于 90 度或者 270 度时，可以测量出 $\pm V$ 的偏振分量。该方案下，在几伏特的电压下，在几十毫秒内就可以快速实现入射光的 Stokes 参量的全测量，实现了毫秒级的测量速度，大大的提高了偏振分析器的时间分辨率，且自身没有额外的机械旋转或者传动结构，大大简化了光机设计与电控系统的设计，在大型地基太阳望远镜和空间太阳望远镜有极大的应用价值。

2.5 液晶型窄带滤光器的工作原理

滤光器，顾名思义就是滤除非目标波段外的光，只让需要透过波段的光波经过滤光器，在激光、卫星通信、遥测遥感和天文中都有广泛的应用（也称作滤波器）。根据前文 Zeeman 效应测量太阳磁场，除了偏振分析器用于解析太阳光的 Stokes 参数外，还要求用于测量 Stokes 参数的光束波长在 Zeeman 分裂线（ $\lambda_0 - \Delta\lambda$ ）处。在光球层进行磁场测量时，望远镜观测的太阳谱线大多数时候是夫琅和费谱线，这些谱线的带宽都非常小，其半高全宽基本上在 0.03nm 以内。并且在这一范围内，光束的偏振信号随着波长快速改变。因此，这就对滤光器的滤光性能提出极高的要求，如果要测量太阳磁场，滤光器的通带必须限制在 0.01nm 的范围内。

2.5.1 窄带滤光器的分类

基于以上带宽的挑战，在光学成像型的滤光器中，研制的难度巨大。满足用于太阳磁场测量的窄带滤光系统主要有 Solc 双折射滤光器、F-P 腔滤光器、Lyot-Michelson 滤光器和 Lyot 双折射滤光器^[38]。

Solc 型双折射滤光器使用了最少的偏振片，同时实现了 Lyot 滤光器的同等指标。理论上 Solc 型双折射滤光器只需要使用两片偏振片，它的透过率相较于 Lyot 双折射滤光器有很大的提升。但是 Solc 型双折射滤光器只能在单一波长点观测，同时为了最大程度的拓宽自由光谱的范围，在 Solc 型双折射滤光器的设计中，大量使用了双折射晶体，大大的限制了波长调谐的能力，因此在太阳窄带滤光上使用较少。

Fabry-Perot 腔滤光器（简称 F-P 腔）最早在 1867 年提出，它的基本原理是利用多光束的干涉效应实现窄带滤光。F-P 滤光器的透过率较高，而且在进行谱线扫描时速度很快，成像的分辨率较高，可以实现快速波带扫描。但是 F-P 滤光器的视场较小，无法获取大区域的日面信息。

Lyot-Michelson 滤光器是由美国人迈克尔逊在 1881 年发明的，是光学领域典型的干涉型仪器（通常也称为“迈克尔逊干涉仪”）。迈克尔逊干涉仪不使用双折射晶体，主要依靠高反射率、低损耗的平面反射镜来实现干涉滤光。Lyot-Michelson 滤光器具有较大的观测视场，能实现可调谱线的扫描，但是自身的透过率较低。

Lyot 型双折射滤光器最早是由法国科学家 Lyot 进行设计的，它的基本原理是使用偏振光干涉效应。该类型的双折射滤光器通常由多个单元构成，在太阳的低层、高层大气的窄带成像观测中有较多的应用，包括光球、色球和日冕等观测。它的特点是可实现大视场、全日面到日冕的观测，但是透过率较低。但是对于大视场的全日面磁场测量，Lyot 是较优的选择，这也是本文的滤光器主要的研究类型。

2.5.2 偏振干涉滤光原理

对于 Lyot 双折射滤光器，实现窄带滤光的核心原理的偏振光束的干涉。当两束具有相干特性的光束叠合在一起后，输出的单光束的强度呈现出重新排列

的现象叫做干涉，当两束同频光波之间存在稳定的相位差、且它们的振动分量互相平行就可以产生基本的干涉现象。

在均匀的介质中，一束光波入射后，其传播方向是各向同性的。但是在双折射晶体，光在各个方向上，其传播的速度各不相同。当一束光入射到双折射晶体中，会折射出两束同频的光波，其中一束光波符合光的折射定律的称为寻常光（简称 o 光），其在晶体中传播对应的折射率为 n_o ；另外一束光波不符合折射定律，当入射光的角度不同时，其对应的折射率 n_e 也在变化，该光束称为非常光，也叫做 e 光。如下图 2.21 所示，入射光垂直于双折射晶体表面入射，如果晶体的光轴与入射表面不平行，光束在出射后会分离为两束偏振光；如果晶体的光轴与入射表面互相平行，那么入射晶体后折射的两束光波（o 光和 e 光）的传播方向相同，o 光和 e 光的振动方向垂直。

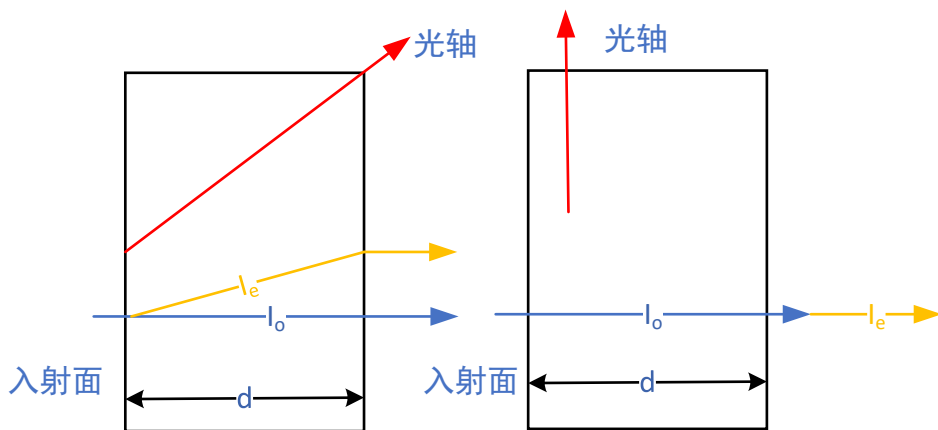


图 2.21 双折射晶体中光束的传播特点

在图 2.21 的右半部分，在晶体中，两束折射光的折射率均不相同，在垂直光轴入射时，在厚度为 d 的双折射晶体中，两束光经过晶体后会产生固定的光程，产生的光程差 Δs 为：

$$\Delta s = d(n_o - n_e) \quad (2.48)$$

假设入射光的波长等于 λ ，那么当光束经过双折射晶体后，寻常光和非寻常光之间的有效相位差值 δ 为：

$$\delta = \frac{2\pi d(n_o - n_e)}{\lambda} \quad (2.49)$$

此时经过双折射晶体的两束线偏振光的振动方向互相垂直，振动频率相等，它们之间产生的相位差固定为 δ ，为了满足偏振干涉的条件，需要使用偏

振片检测出出射光 o 光和 e 光之间相互平行的分量，使用下图 2.22 所示的偏振干涉光路示意图。

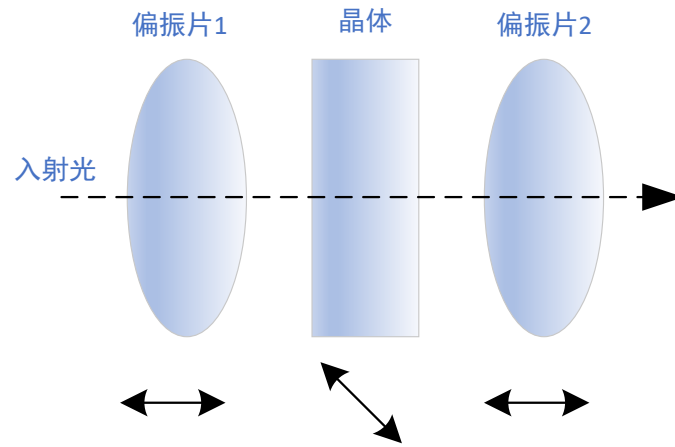


图 2.22 偏振干涉光路示意图

在图 2.22 中，双折射晶体放置于两片偏振片之间，偏振片 1 与偏振片 2 的透光轴互相平行，晶体的光轴与偏振片 1 的透光轴成 45° 夹角。偏振片 1 用于产生完全的线偏振光，偏振片 2 用于检出经过双折射晶体后 o 光和 e 光中相互平行的分量，用于产生偏振光干涉。在偏振片 2 上，将出射光 o 光和 e 光进行直角分解，如下图所示：

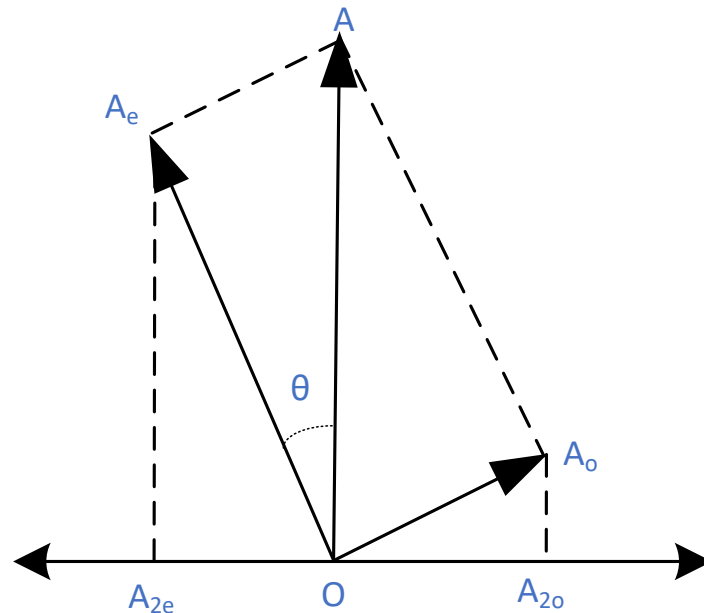


图 2.23 偏振光干涉的直角坐标分解

在图 2.23 中，o 光和 e 光在偏振片透光轴方向产生平行分量 A_{2e} 和 A_{2o} ， θ

为双折射晶体光轴与偏振片 2 的夹角。使用光电探测器在偏振片 2 获取输出光强，则输出表达式为：

$$I_{out} = I_{in} \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\pi d(n_o - n_e)}{\lambda} \quad (2.50)$$

在公式(2.50)中，将输出光强进行归一化作为纵轴，将入射光的波长量作为横坐标，可以得到偏振光干涉的透过带轮廓，如下图 2.24 所示的本文所用的某个 LCVR 的透过轮廓。在图 2.23 中的 θ 等于 45 度时，干涉信号的振幅可以达到最大值。

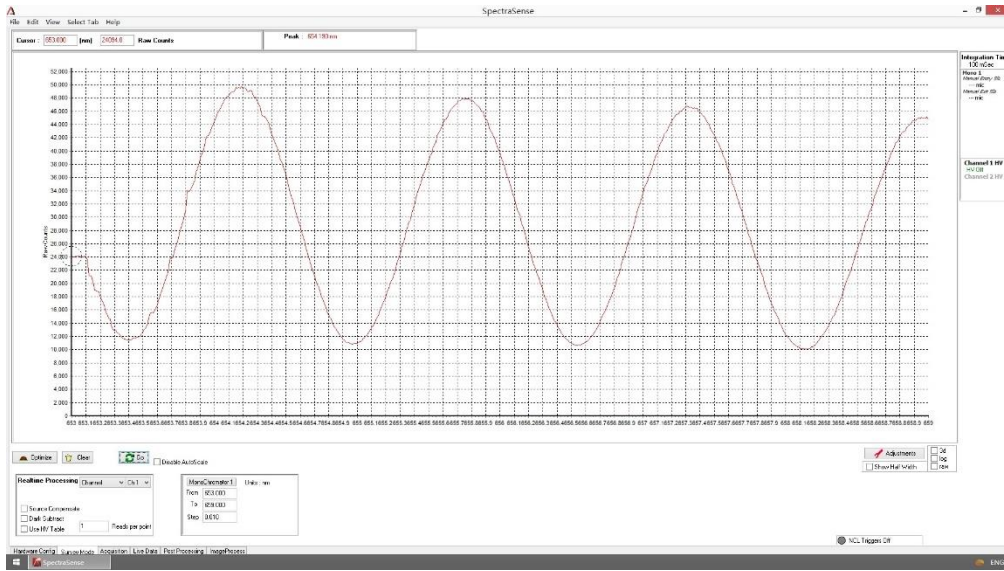


图 2.24 偏振光干涉的实测透过带轮廓

2.5.3 液晶可调谐 Lyot 滤光器

一级 Lyot 滤光器的基本结构与偏振干涉图 2.22 一致，为了实现窄带滤光，太阳磁像仪中的滤光器一般由 7 级串联组成。如图 2.25 所示，将双折射晶体放置于透光轴平行的偏振片之间，晶体的光轴与偏振片的透光轴成 45 度夹角。从第一级到第七级晶体的厚度以 2 的指数关系增加，所有双折射晶体的双折率均一致。

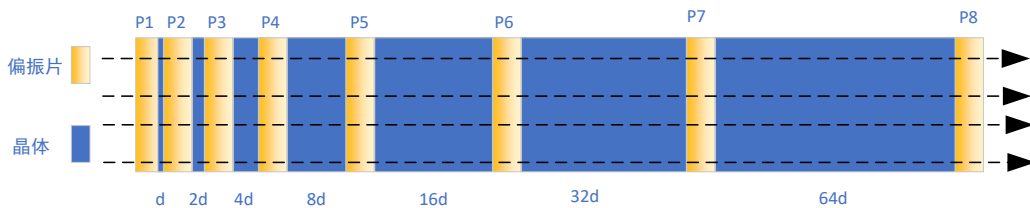


图 2.25 基本型 7 级 Lyot 滤光器示意图

在图 2.25 的基本型 7 级 Lyot 滤光器中, 根据偏振光学理论, 最终输出的偏振光透过率为每一级滤光器相乘, 输出数学表达式如公式(2.51)所示, 7 级滤光器的输出光谱图如图 2.26 所示。

$$\frac{I_{in}}{I_o} = \cos^2\left[\frac{2^0 d\pi(n_o - n_e)}{\lambda}\right] \cos^2\left[\frac{2^1 d\pi(n_o - n_e)}{\lambda}\right] \dots \cos^2\left[\frac{2^6 d\pi(n_o - n_e)}{\lambda}\right] \quad (2.51)$$

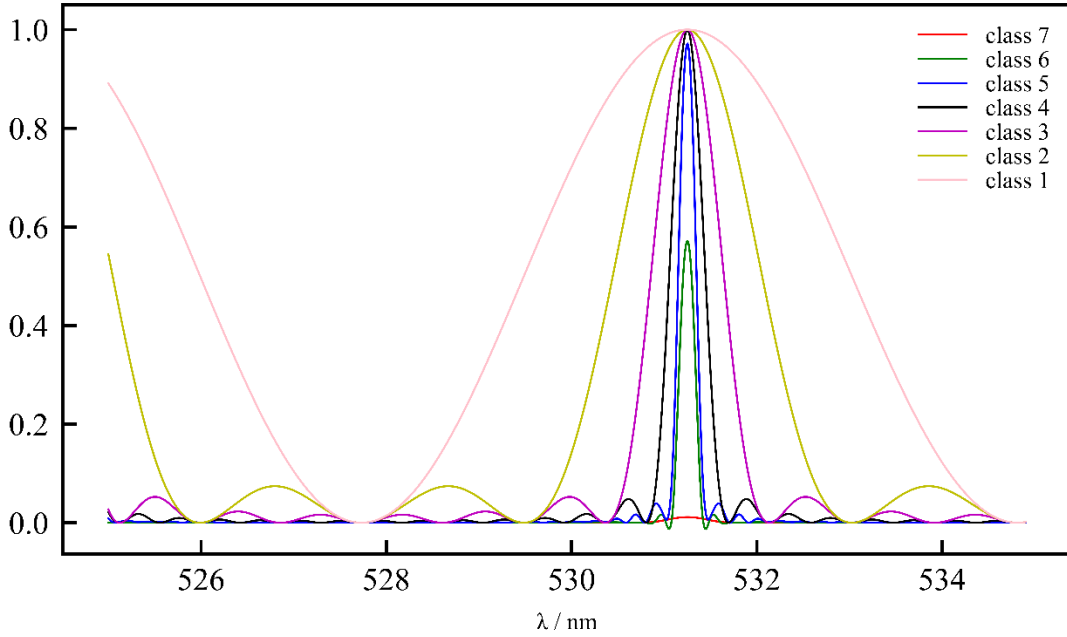


图 2.26 基本型 7 级滤光器光谱输出图

为了实现双折射滤光器的透过波长调谐能力, 可以采用直接法或者间接法。间接调谐法有四分之一波片补偿法和旋转二分之一波片法。四分之一波片法是通过在图 2.22 中的晶体与偏振片 2 之间插入一片四分之一波片, 再旋转偏振片 2 实现透过波长的调节, 如下图 2.27 所示。该方法中由于旋转了偏振片 2 的方位角, 在多级滤光器中, 后续所有器件的方位角都要随之改变, 因此无法使用。

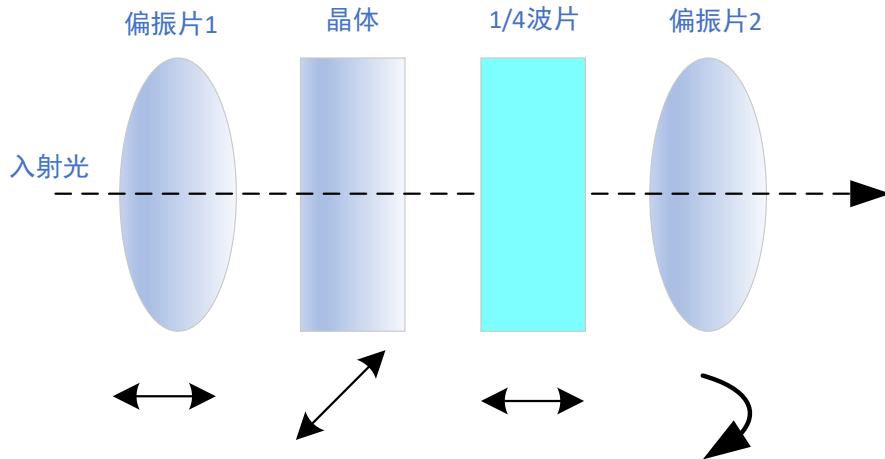


图 2.27 四分之一波片法

为了改进四分之一波片法的缺陷，可以通过在图 2.27 中的四分之一波片与偏振片 2 之间插入一个二分之一波片，通过旋转二分之一波片的方位角来替代偏振片 2 的旋转，进而实现透过波长的调节，如下所示。旋转二分之一波片法结构清晰，在工程上容易实现，但是该方法依赖于电机驱动波片旋转，多级电机精确闭环控制会增加电路设计难度，而且电机磨损后的滤光器难以维护。

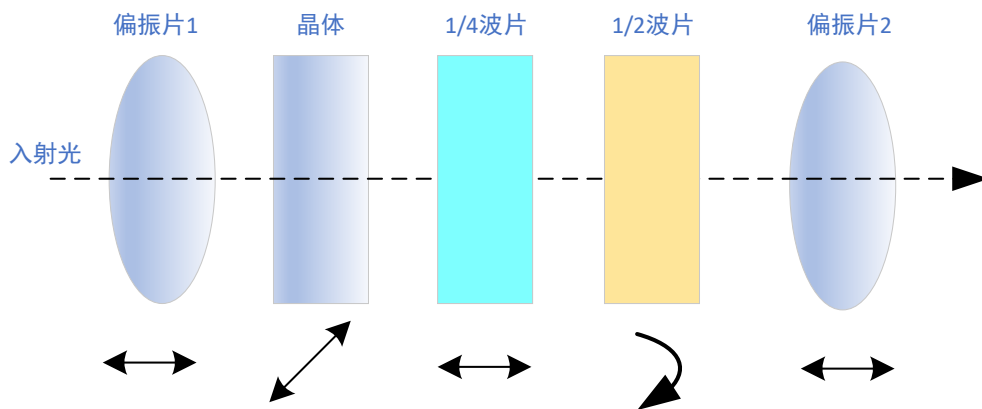


图 2.28 旋转二分之一波片法

直接调谐法有光楔法、温控法和电光晶体法。光楔法是采用两块斜劈的光楔晶体，使用机械传动上下移动光楔，进而直接改变双折射晶体的有效厚度 d ，实现透过波长的移动，调谐原理如图 2.29 所示。该方法对结构设计要求较高，加工难度大，难以应用于多级滤光器的调谐。

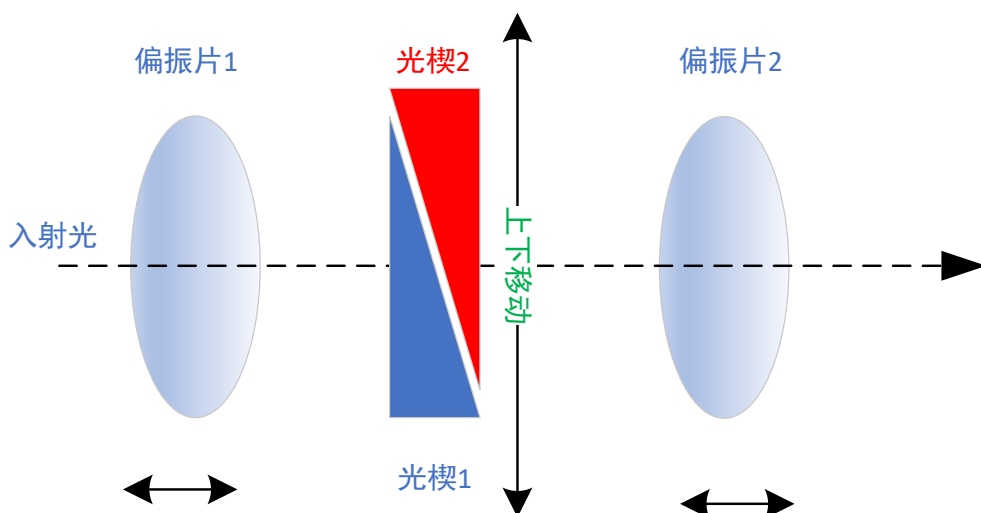


图 2.29 光楔调谐法

除了光楔法，双折射晶体的双折射率会随着外界温度发生变化，进而直接改变光程差，实现透过波长的调节。但是该方法在多级滤光器中难以精确实现每一级晶体的温度控制，而且温度定标系数可能存在较大的误差，很少在双折射滤光器中使用。此外，还可以使用电光晶体，如 KD^*P 和 LCVR 通过改变驱动电压信号，直接改变有效相位延迟，实现透过波长的调谐。本课题中液晶滤光器的设计出发点是利用 LCVR 替代旋转的二分之一波片，实现波长可调谐。

如图 2.30 所示，一级 LCVR 可调谐滤光器结构与旋转二分之一波片法类似，主要的改变是使用 LCVR 电控波片替换了传统的电机旋转二分之一波片的机械结构，极大的减小了滤光器的体积与重量，同时 LCVR 是超低功耗器件，几乎不存在物理磨损，LCVR 毫秒级的调制速度相对于旋转法电机秒级的转动速度，可以实现更快速度的波带扫描与调谐，这些优势使得 LCVR 型可调谐滤光器在空间太阳磁场测量设备上有巨大的应用潜力。

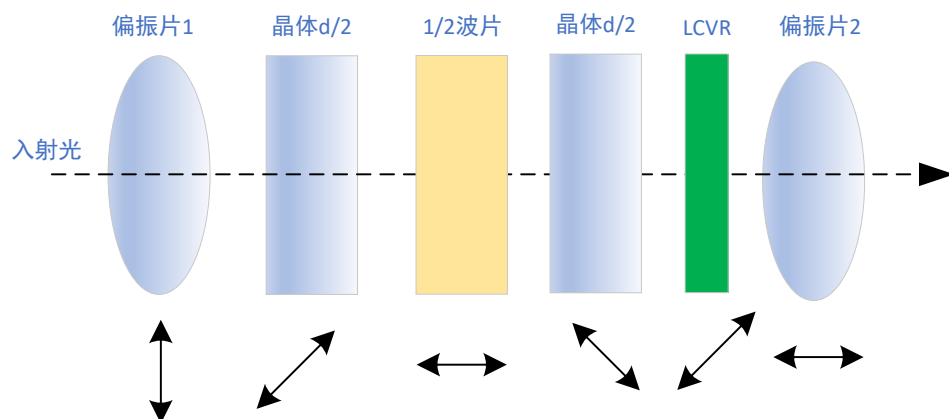


图 2.30 一级 LCVR 可调谐滤光器结构示意图

2.6 本章小结

本章首先介绍了偏振光学的数学描述方法，给出使用 Stokes 参量来表示一束光的数学表达式，给出了常用偏振器件的穆勒矩阵。接着详细介绍了基于弱场近似下的偏振辐射转移测量磁场的方法，分析了纯发射线、纯吸收线和夫琅和费谱线不同的 Zeeman 效应。最后针对太阳磁像仪的两大核心设备偏振分析器和窄带滤光器的基本原理与设备分类进行了阐述，并根据 LCVR 器件的特点，介绍了 LCVR 在两大核心设备中应用原理。

第3章 液晶电控系统设计

本文使用向列液晶相位延迟波片，该 LCVR 工作于磁像仪中的偏振分析器和可调谐窄带滤光器中。首先，研制液晶玻片相位调制精密脉冲驱动信号源，保证液晶器件相位精确调制；同时，为了实现仪器模块稳定工作，需要研制液晶滤光器精密温控系统，保证液晶玻片处于极稳定的温度环境下减小温漂引致的相位漂移。

3.1 液晶器件的工作特点

LCVR 为电光器件，根据液晶的电场效应，当在 LCVR 的两个导电电极施加电压时，LCVR 的相位延迟会随之改变，由于 LCVR 的结构类似于平板电容器，LCVR 属于超低功耗器件。在 LCVR 中，如果为 LCVR 施加直流电压，长期的直流电压会导致液晶分子永久性降解，使得 LCVR 逐渐失效，对于向列型液晶波片，自身对电场的方向不敏感，相位延迟的变化只会跟随电场强度大小变化，因此 LCVR 的驱动信号波形为对称交流方波信号^[61-64]。

除了正确的 LCVR 驱动信号外，液晶分子是温度敏感型的，需要工作在稳定的温度环境下，在某些特殊应用场合下，液晶器件可以用作温度计。在磁像仪中，偏振分析器和窄带滤光器都安装在望远镜镜筒后方，为了保证望远镜拥有较好的视宁度，一般望远镜的选址都在高山或者湖泊，且正常工作时，处于室外环境中，导致温度温差变化大，本文使用的 LCVR 工作在 35 摄氏度，需要为 LCVR 提供恒温控制，防止温度变化导致有效相位延迟漂移。

3.2 多通道液晶驱动器设计

目前，用于光学成像的液晶控制器完全依赖国外进口，国内还没有类似的商业产品可供选择，目前主要依赖 Meadowlark 公司的 D3050 等系列控制器，这些产品在实验室实测过程中驱动器兼容性差、输出通道数少（ ≤ 4 通道）、控制精度受限（ $\geq 1\text{mV}$ ）和售价高昂的缺陷逐渐暴露出来，因此开发一套具备自主知识产权、可用于实际观测的多通道、高精度的液晶控制器迫在眉睫。本文设计的液晶驱动器包含九个通道，可以同时驱动 7 级液晶滤光器和偏振分析器

工作。

在磁像仪的应用中，对于 7 级的磁场滤光器 0.1 埃的带宽，最窄级的光谱自由程为 0.2 埃（对应 360° 的相位变化），那么一般 0.02 埃的谱线扫描精度对应的相位变化为 36° ；最宽级的带宽为 6.4 埃，光谱自由程为 12.8 埃（对应 360° 的相位变化），那么一般 0.02 埃的谱线扫描精度对应的相位变化为 0.5625° ；本文使用的 LCVR 产生 1° 的相位改变电压最大变化为 5mV，因此，用于滤光器的液晶驱动器的输出分辨率应该大于 2.8mV。对于液晶偏振分析器， 1° 的相位变化会带来至少 0.017 的偏振串扰，ASO-S/FMG 的偏振串扰设计为优于 0.015（对应相位的输出精度为 0.89° ），那么对于 LCVR 的输出电压精度要实现优于 0.015 以上的偏振串扰，输出精度需要达到 4.45mV，为了获得更佳的效果，一般精度需要提高到设计的三分之一以上（1.48mV）。对于输出稳定度应该与输出精度保持在同一个数量级。

3.2.1 硬件系统框架

在本文的多通道液晶驱动系统中，系统的主要功能模块包括：电源转换系统、系统监控与保护模块、驱动信号调制模块、高稳定度参考源模块、输出信号监测模块、异步通信模块和核心控制器部分，驱动器设计框架如下图 3.1 所示。

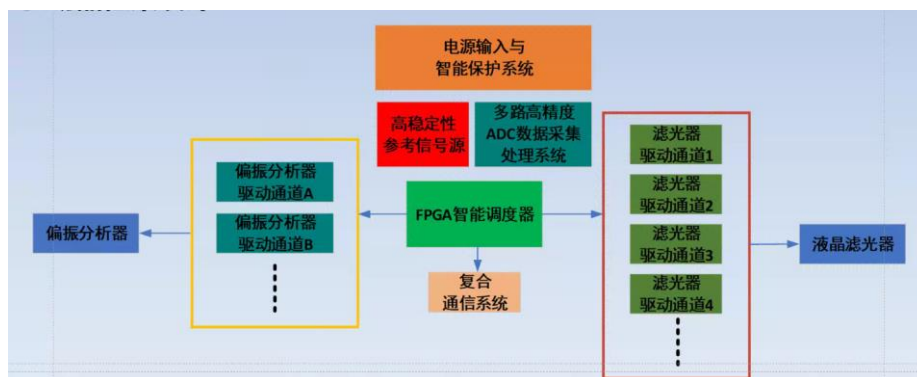


图 3.1 多通道液晶驱动系统框架

在图 3.1 中，电源输入与智能保护系统的主要功能是将外部输入电源转换为后级子系统中需要的电压，同时提供过流过压检测保护功能，保证核心器件的安全性。系统的核心是 FPGA 控制器，主要负责控制各个液晶输出数模转换通道调制出需要的电压信号，控制模数转换来判断输出信号是否符合预期，以

此实现闭环跟踪输出，除此之外控制器还需要控制复合通信系统实现人机交互与远程异步通信。为了让数模转换器可以正确稳定输出液晶驱动信号，还需要为数模转换器提供高稳定度的参考信号源。

3.2.2 LCVR 驱动电路设计

3.2.2.1 电源电路设计

在液晶驱动控制系统中，电源部分是整个系统工作的基本保障，如果电源系统异常，将导致整个驱动系统无法正常工作，甚至导致 LCVR 损坏。根据望远镜中的供电状态，驱动器采用 220 伏特交流供电，首先需要使用 AC-DC 转换，将高压交流电转换为低压直流电。在系统中，各个芯片模块的供电需求为：FPGA 控制器（2.5V/0.5A，3.3V/0.25A）、参考信号源（12V/0.1A）、模数转换器（ADC：3.3V/0.1A， $\pm 12\text{V}/0.1\text{A}$ ）、数模转换器（DAC：3.3V/0.1A、 $\pm 12\text{V}/0.1\text{A}$ ），通信系统（5V/0.2A）。因此电源系统主要需要产生 $\pm 12\text{V}$ 、5V、3.3V 等电源。除了考虑最终输出电压外，还需要考虑系统的电源效率、输出纹波等，比如给 ADC 和 DAC 的模拟通路供电的 $\pm 12\text{V}$ ，为了保证输出信号的质量，需要采用线性电源供电，因此电源系统还需要产生 $\pm 15\text{V}$ 电压用于线性压降到 $\pm 12\text{V}$ 。电源系统的拓扑架构如图 3.2 所示。

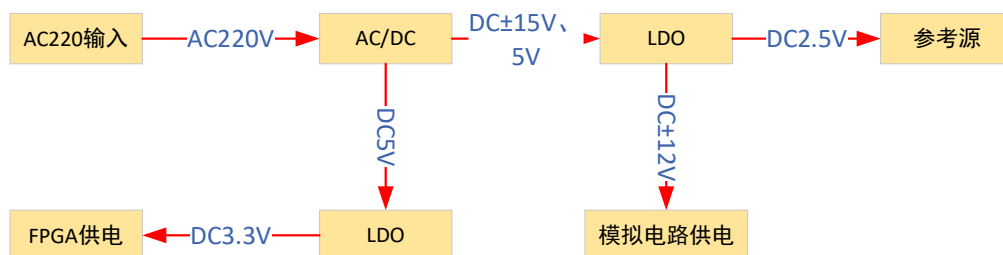


图 3.2 液晶驱动器电源拓扑结构

上图 3.2 的拓扑结构中，电源系统的实际方案为：首先使用 RH-88 三输出 AC-DC 模块，将市电 220V 转换为 $\pm 15\text{V}$ 和 5V 的低压直流电源，使用开关电源技术，最大限度提高电源的工作效率；再使用 LM7812 和 LM7912 将 $\pm 15\text{V}$ 转换为 $\pm 12\text{V}$ 的线性电源，为模拟信号通路供电；最后使用 LM1086-3.3 将 5V 转换为 3.3V 的线性电源为数字芯片提供优异可靠的电源。电源部分的电路原理图如图 3.3 所示。

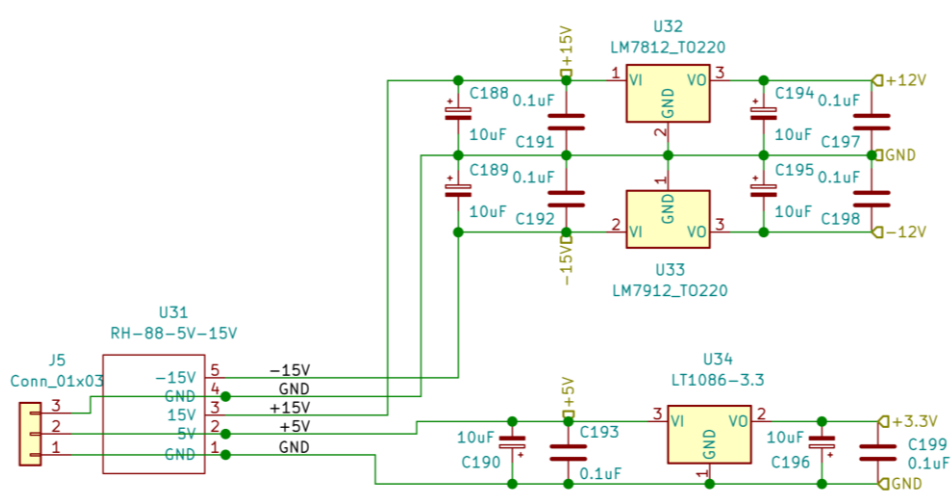


图 3.3 液晶驱动器电源部分原理图

3.2.2.2 参考信号源电路设计

对于 DAC 器件，为了输出准确、稳定的模拟信号，需要给 DAC 提供低温漂的参考信号。参考源芯片的特点是具有长周期的稳定性、低温度漂移和低输出噪声。本文选用目前商业芯片中性能最好的 LTZ1000 稳压信号源，LTZ1000 是一款超稳定的温度可控基准源。LTZ1000 提供 7.2 V 电压输出低至 $1.2 \mu\text{V}_{\text{pp}}$ 的输出噪声、 $22 \mu\text{V}/\sqrt{\text{KHz}}$ 的长期稳定性和 $0.05 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 的温度漂移。

LTZ1000 内部包含一个植入式齐纳基准二极管、一个用于恒温控制的加热电阻器和一个测温晶体管。外围电路组成的系统可以设置 LTZ1000 的工作电流和工作温度。LTZ1000 除了自身具有极高的温度稳定外，通过自带的恒温系统，可以让 LTZ1000 的工作温度稳定在设置的区间，进一步提高基准源的稳定性，因此 LTZ1000 可以提高的配置灵活性，以及保持最佳的长期稳定性和低噪声输出，其外围电路如下图 3.4 所示。

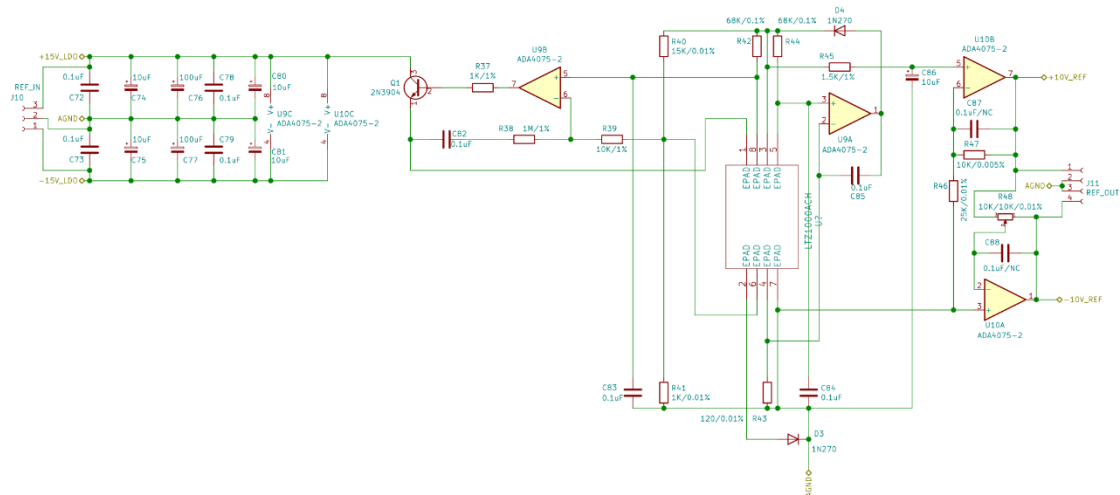


图 3.4 LTZ1000 稳压源电路原理图

在图 3.4 中 Q1 为功率三极管，负责为 LTZ1000 提供加热回路的热功率；U9 的是双通道运算放大器，负责将 LTZ1000 输出的 7.2V 电压转换为±10V 的双极性参考源，提供给 DAC 芯片；U10 作为输出电压跟随器，负责将双极性参考电压进行缓冲，提供带负载的能力。

3.2.2.3 液晶驱动信号发生电路设计

作为液晶驱动信号的核心输出器件，DAC 的输出分辨率、更新速率决定了驱动信号的输出精度和信号上升下降时间，本文选用市面综合性能最高的 AD5791 双极性 DAC 芯片，只有一个输出的通道，该通道可以输出比特数达到 20 位分辨率的模拟信号，该芯片自身的输出通道中不包含缓冲器件。AD5791 的供电电压不超过 30 伏特，可以采用双极性电源为模拟通路供电。AD5791 的正负基准输入最大基本与系统电源供电一致。AD5791 的输出精度在 20 位的分辨率下，最高精度约为正负 1 LSB（最小比特位），具有较高的线性输出的单调性，该芯片的微分非线性(DNL)因为器件的设计工艺优良，可以达到正负 1 LSB。AD5791 的数字通信端口为 SPI 串行通信，SPI 的时钟运行速度在通信端口电压为 5V 时可以承受 35 兆赫兹的速度。当芯片从关机状态开始加电后，芯片的通道电压输出会自动默认钳位输出到 GND，直到 SPI 建立首次通信连接后，才恢复到自定义的初始输出电压。AD5791 的电压输出结构是将两个数模转换器进行拼接后，合成为 20 位的 DAC，其基本结构如图 3.5 所示。

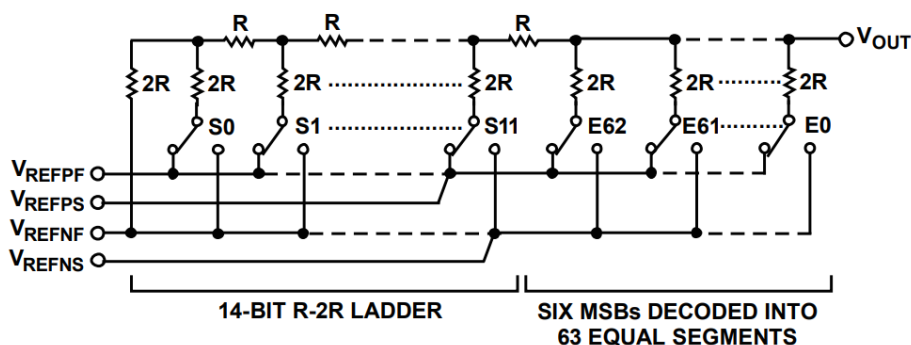


图 3.5 AD5791 双 DAC 梯形架构（引自 ADI 网站）

在图 3.5 中，AD5791 将主机 SPI 传送的 20 位 DAC 数据的高 6 位进行相关译码后，带动六十三个电子转换开关 E0~E62，其中每一个电子转换开关连接着一个电阻，相应的这 63 个电阻可以通过控制连接到正负参考信号。DAC 的数据码低 14 位的主要功能是控制梯形电阻网络，用于输出设定的电压。

根据 AD5791 的基本工作原理，外围电路包括参考源输入缓冲检测电路、电压输出缓冲电路，电源原理图如下图 3.6 所示。

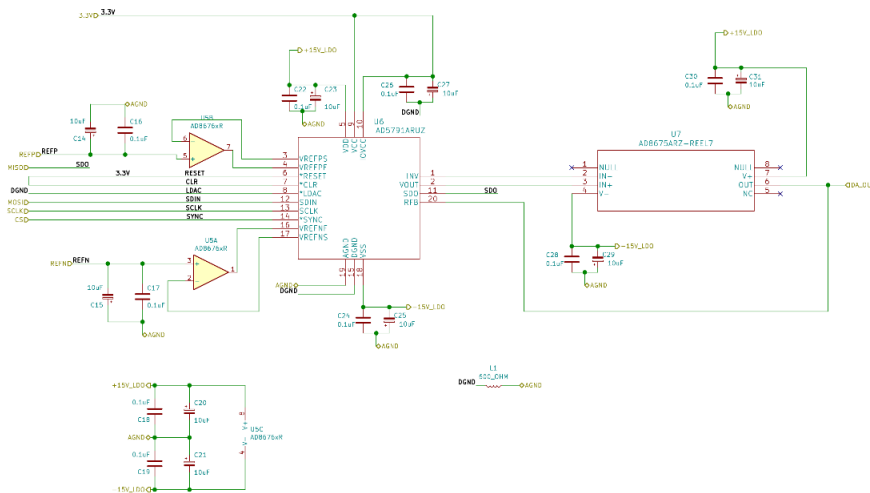


图 3.6 AD5791 驱动电路原理图

3.2.2.4 反馈信号采集电路设计

为了实时监测系统的工作电源是否正常，液晶输出信号是否与预期一致，需要为系统添加信号检测回路。这里主要采用高分辨率的 ADC 芯片用作数据采样，本文选用 AD4115 芯片。AD4115 是一款低功耗、低噪声、24 位 Σ - Δ 型模数转换器(ADC)，它集成了一个模拟前端 (AFE)，支持全差分或单端高阻抗($\geq 1\text{ M}\Omega$)的双极性 $\pm 10\text{ V}$ 电压输入。AD4115 还集成了关键的模拟和数字信号调

理模块，可为使用的每个模拟输入通道配置八种单独的通道设置。对于完全稳定的数据，AD4115 的最大通道扫描速率为 6.2 kSPS ($161 \mu s$)。嵌入式 2.5 V、低漂移($5 \text{ ppm}/^\circ \text{C}$)带隙内部基准电压源（带输出基准电压缓冲器），可减少外部元件数量。数字滤波器提供了灵活的设置，包括以 27.27 SPS 输出数据速率实现 50 Hz 和 60 Hz 同时抑制。用户可根据应用中每个通道的需求选择不同的滤波器设置。自动通道定序器使 ADC 能够在每个使能的通道之间进行灵活切换。AD4115 的精密性能通过集成 ADI 公司专有的 iPassives™ 技术而实现。AD4115 出厂时已进行校准，可实现指定的高精度。AD4115 采用单电源供电，因而便于在电气隔离的应用中使用。标准的工作温度范围为 -40°C 至 $+105^\circ \text{C}$ 。AD4115 采用 40 引脚、 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ LFCSP 封装，其内部结构如下图 3.7 所示。

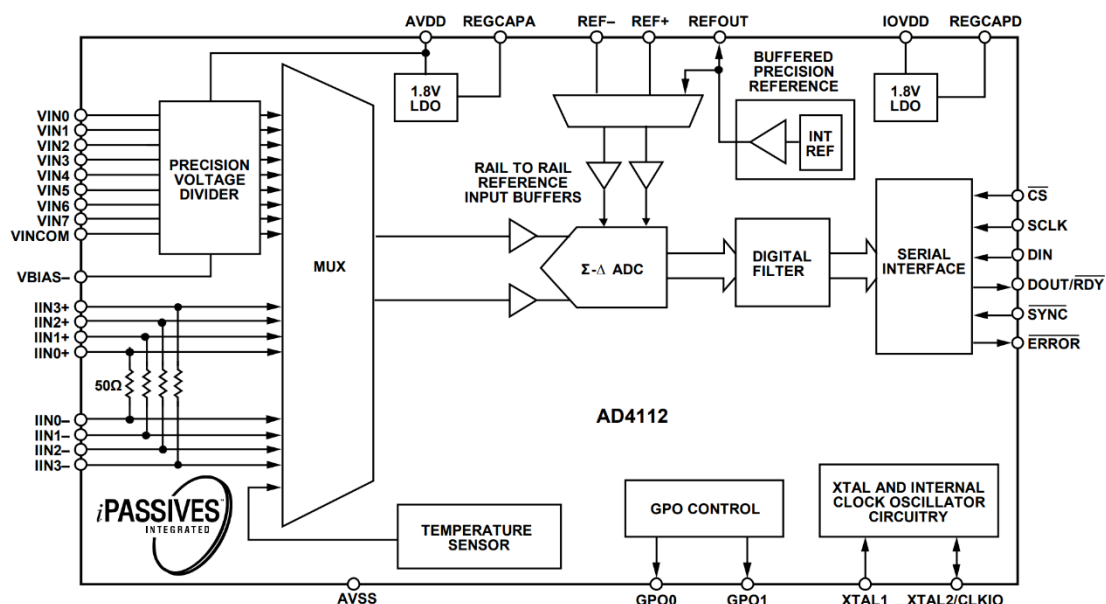


图 3.7 AD4115 内部结构（引自 ADI 网站）

为了给 AD4115 提供更好的模拟性能，除了为模拟通路提供线性电源外，本文使用数字全隔离芯片 ADUM5411，将数字 SPI 通信端口进行隔离，AD4115 可以获得最佳的信噪比，AD4115 的 16 通道数据采集电路如下图 3.8 所示。

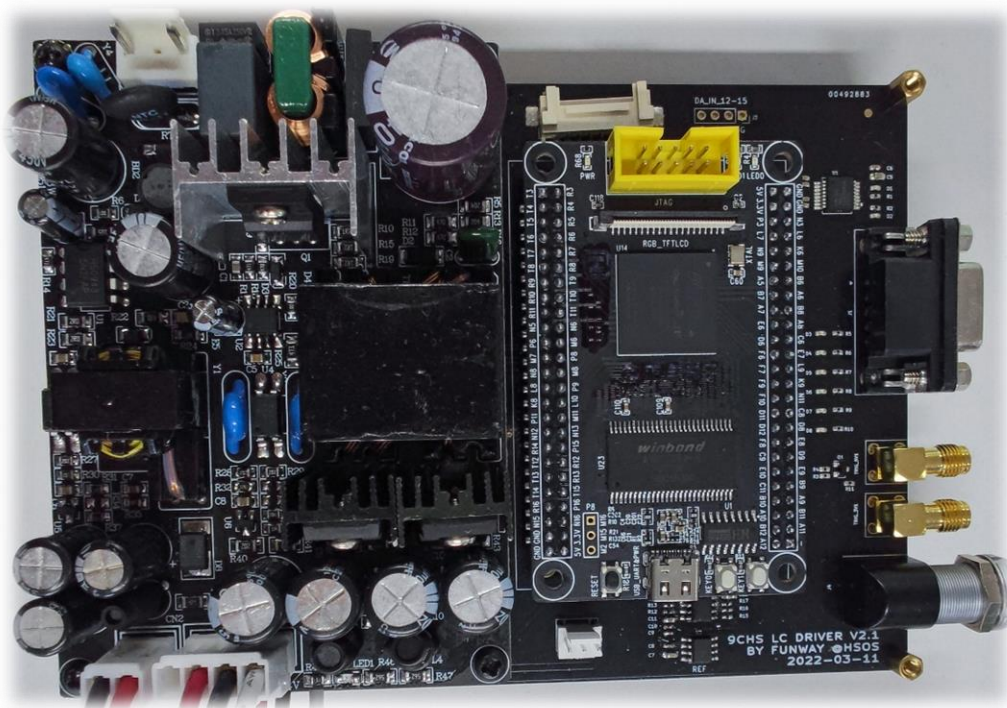


图 3.10 液晶驱动电路板 V2.0

为了增加整机结构的稳定性，根据液晶驱动电路板 2.0 的尺寸设计了高强度铝合金机箱。机箱结构采用 3D 建模软件设计，增加人机交互触摸屏设计，以及 PWM 温控变速散热风扇，机箱设计图纸模型如下图 3.11 所示。

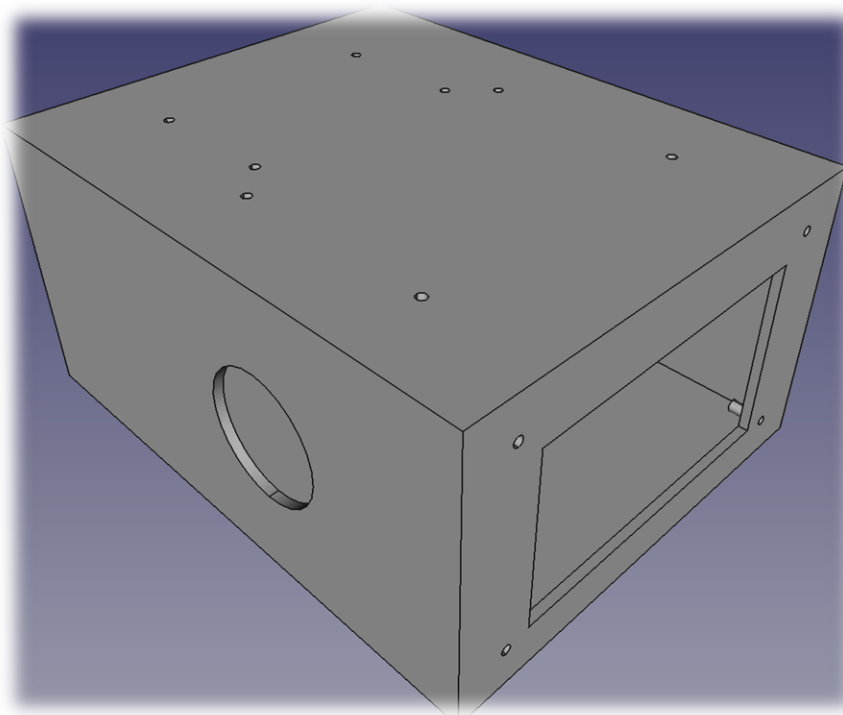


图 3.11 液晶驱动器机箱设计模型

完成图纸设计后，机箱采用高强度铝合金进行加工，机箱表面采用原色金属氧化喷砂处理，防止氧化，增加使用寿命。多通道液晶驱动器装调后的实物如下图 3.12 所示。

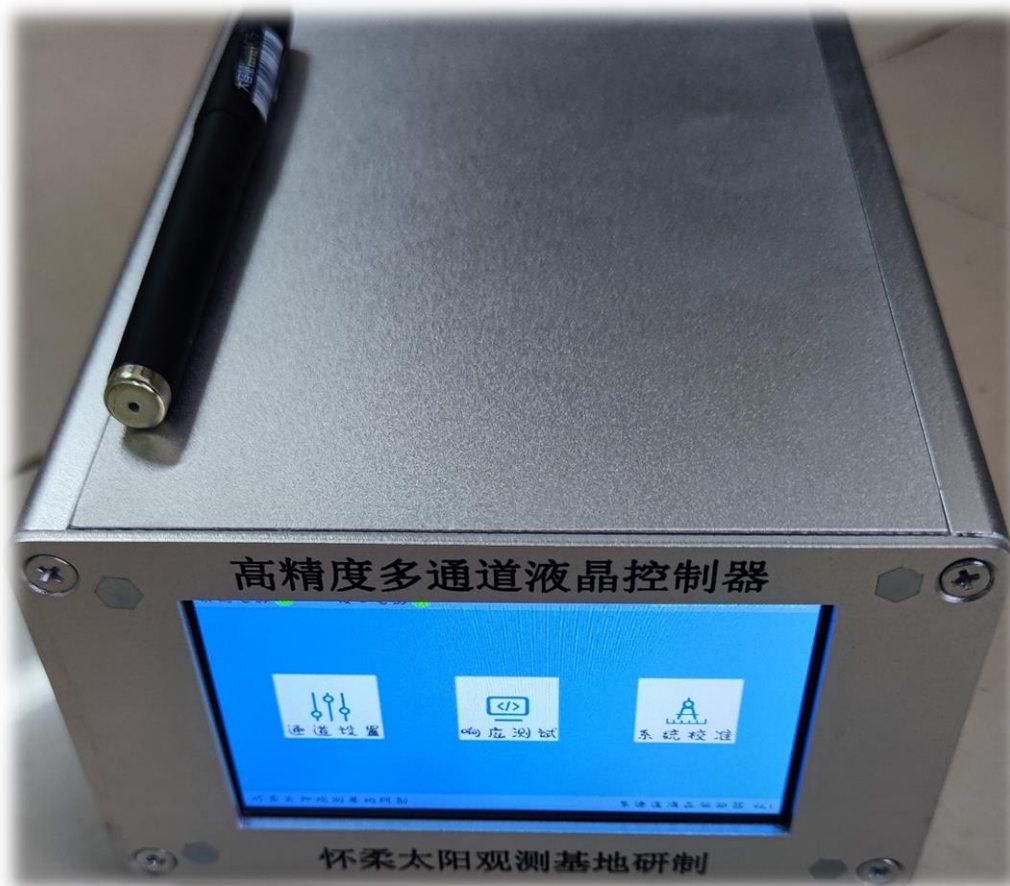


图 3.12 装调完成的液晶驱动器整机

3.2.4 软件设计

在完成机电系统设计装调后，液晶驱动系统的底层软件设计主要采用 C+Verilog 的形式编写。底层软件采用 Quartus 集成开发环境设计，在液晶驱动系统中，9 个通道的液晶输出均采用 SPI 数字接口与 FPGA 连接；液晶驱动信号双极性方波的调制，利用 Verilog 并行运行的特点进行设计，通过 Altera 的 Avalon 总线将上层 NIOS 内核的控制指令下发到底层的 Verilog 逻辑功能区。在 Avalon 总线上层，采用 C 语言编程，主要实现内部总线通信、外部数据的数据交互、人机交互界面指令解析、系统状态监控、ADC 与 DAC 闭环输出控制，软件系统的执行流程图如下图 3.13 所示。

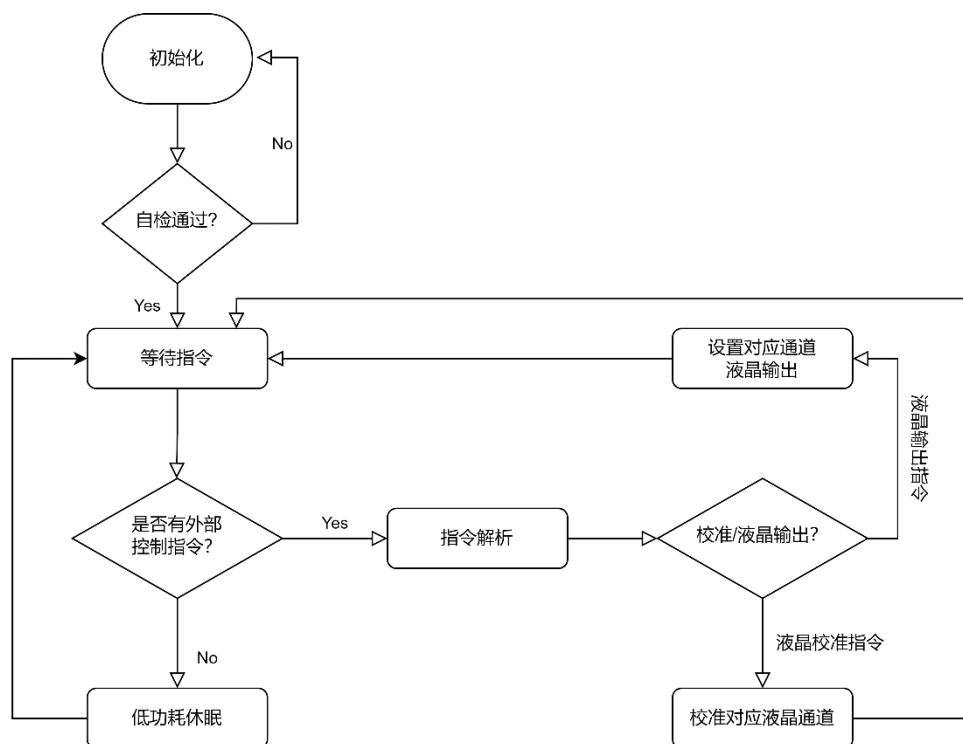


图 3.13 液晶驱动系统软件控制流程图

3.2.5 人机交互设计

为了实现液晶驱动系统的离线控制能力，在主机 PC 出现故障时，能及时接管控制权限，实现液晶输出的保护等功能，除了使用串行总线进行外部控制，液晶控制器额外增加了触摸显示器，可以实现通道电压校准、液晶响应时间测试，以及通道输出极性控制等。该系统采用 4.5 英寸电容触摸显示器，显示分辨率为 480*800。人机交互界面可以独立运行，相当于一台小型 PC，正常运行模式下，人机交互系统用作状态监视与输出显示，不输出控制信号，由主机 PC 的望远镜控制系统统一调配。当主机临时离线时，或者需要主动离线控制时，人机交互界面可以自动或者手动切换到离线模式，实现液晶输出控制，人机交互主界面如下图 3.14 所示。

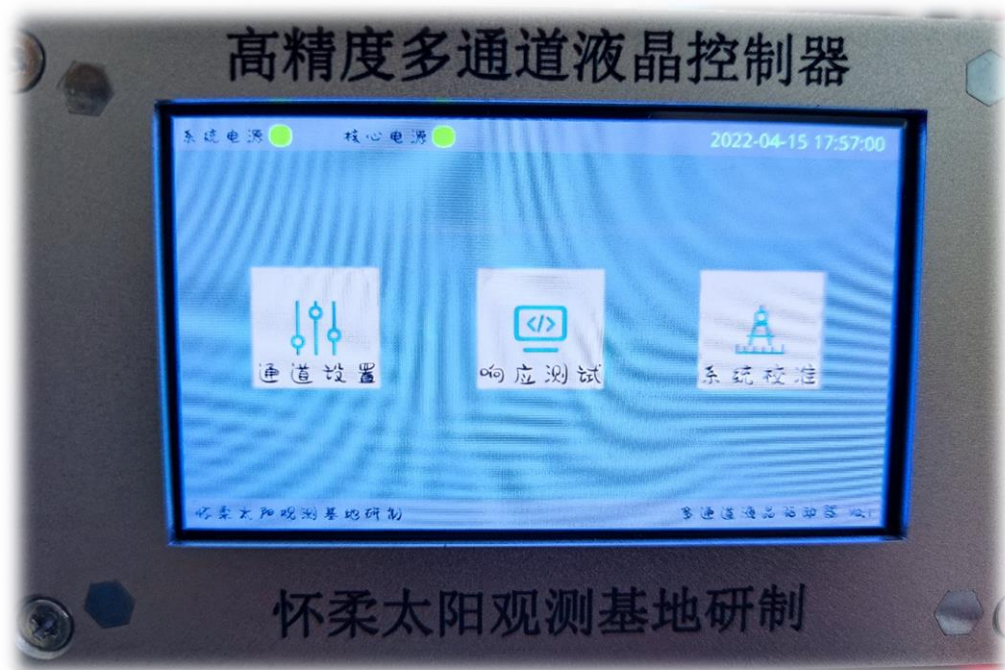


图 3.14 人机触摸显示器主页面

3.3 液晶驱动器的测试

完成软硬系统联合调试后，接下来需要进行整机的输出分辨率测试、信号上升时间测试、输出稳定性测试等。

3.3.1 输出分辨率测试

对于 AD5791 的 20 位输出系统，参考电源的供电电压为 $\pm 10\text{V}$ ，那么理论上最低输出为 1LSB 为：

$$1\text{LSB} = \frac{R_+ + (-R_-)}{2^{20}} = \frac{20\text{V}}{1048576} = 19\mu\text{V} \quad (3.1)$$

公式(3.1)中， R_+ 为 10V， R_- 为-10V。理论上，系统的输出分辨率为 19 微伏特，但是由于参考电压的输出偏差，运算放大电路的不对称性，实际的输出分辨率会有偏差，采用 KEYSIGHT 公司的 3458A 八位半万用表进行测试并进行数据计算，实际输出的 1LSB 为 19.036 μV 。

3.3.2 上升时间测试

对于液晶驱动信号来说，它的典型特征是双极性方波交流信号，信号沿的跳变时间会影响液晶的响应时间，过长的信号沿跳变时间会改变该时间段内的

液晶有效电场，进而产生相位误差。本文使用 RIGOL 公司的 MSO8000 系列 2GHz 的示波器测试方波信号的沿跳变时间，测试结果如下图 3.15 所示。



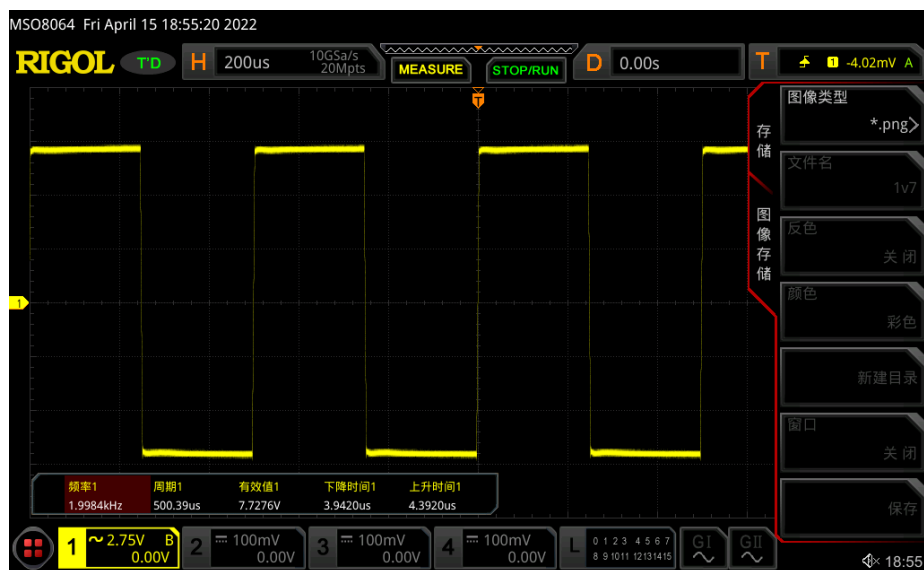


图 3.15 输出电压信号 1V、3V、5V 和 7V 的沿跳变时间测试

如图 3.15 所示，展示了液晶驱动信号在 1V、3V、5V 和 7V 的上升下降时间测试图，由于篇幅有限，未完整展示 1V~9V 的所有测试数据，以图表形式展示在表 3.1 中：

表 3.1 液晶驱动器沿跳变时间测试

输出电压/V	信号频率/KHz	下降时间/us	上升时间/us
1	1.9983	0.516	0.566
2	1.9984	1.024	1.124
3	1.9983	1.526	1.674
4	1.9983	1.978	2.180
5	2.0031	2.512	2.766
6	1.9984	2.980	3.300
7	2.0031	3.482	3.846
8	1.9984	3.942	4.392
9	1.9983	4.462	4.968

在表 3.1 中，可以看出 LCVR 驱动电压从 1V 增加到 9V 时，平均沿跳变时间从 0.541us 逐渐增加到 4.715us，这是由于 DAC 的梯形电阻网络特性与外部缓冲放大器建立时间共同决定的，本文中，最大建立时间 4.5us 完全满足系统设计要求。

3.3.3 输出稳定性测试

对于液晶驱动系统，精密的电路设计与低温漂参考源的使用，可以较大的

改善驱动信号的输出漂移和输出误差。但是，系统环境温度变化以及各种元器件的综合温度响应各不相同。因此，输出稳定性测试是衡量液晶驱动系统好坏的关键指标。该项指标采用 KEYSIGHT 公司的 3458A 八位半万用表进行测试，由于交流信号的直接测量原理上和设备上都存在较大难点，在实际测试输出信号时，通过设置液晶驱动系统输出直流信号进行测试。主要测试电压点包括 0V、 $\pm 5\text{V}$ 和 $\pm 9\text{V}$ 。0V 的输出测量可以获取液晶驱动信号的直流分量是否符合要求， $\pm 5\text{V}$ 的输出测量是系统输出的中间量程， $\pm 9\text{V}$ 测试是系统的满量程测量。通过设计 NI 的 Labview 上位机控制万用表每隔 1 分钟采集一次数据，将 1000 组数据存储到文件系统中，上位机采集界面如下图 3.16 所示。

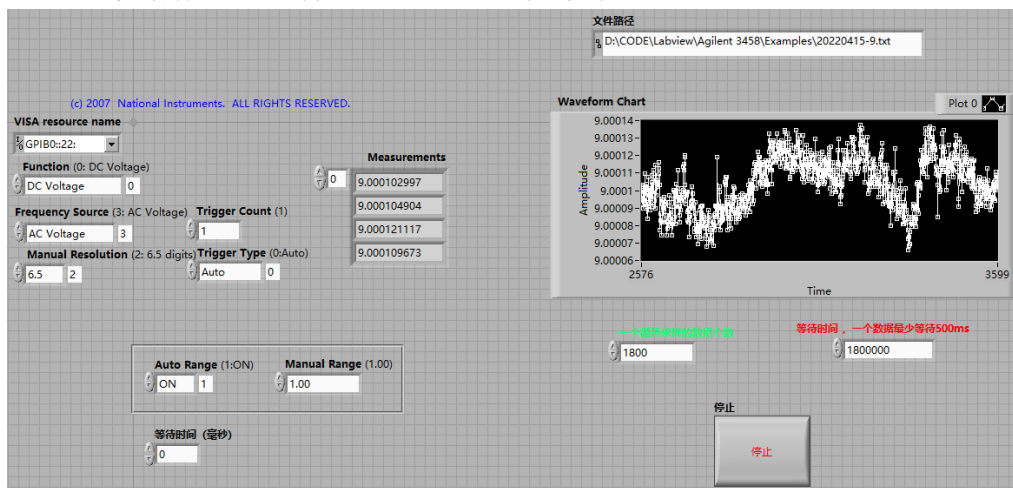


图 3.16 稳定性测试上位机控制界面

经过数据处理与后期图形绘制，最终结果如下图 3.17、图 3.18、图 3.19、图 3.20 和图 3.21 所示。

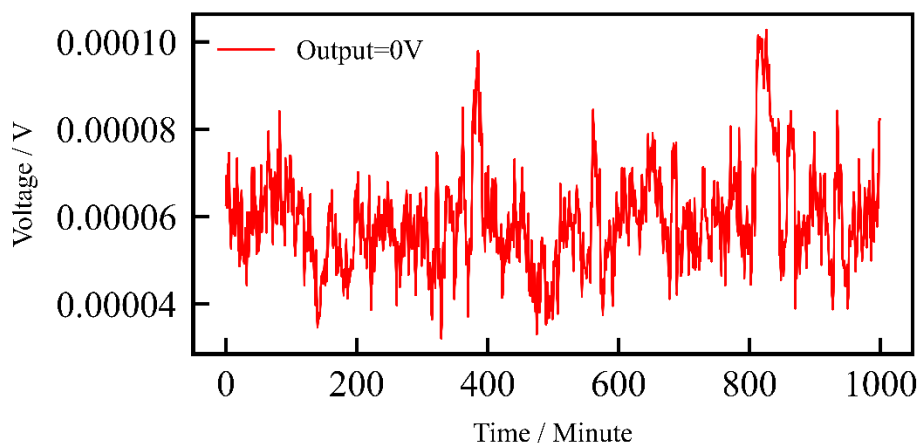


图 3.17 输出 0V 的稳定性测试

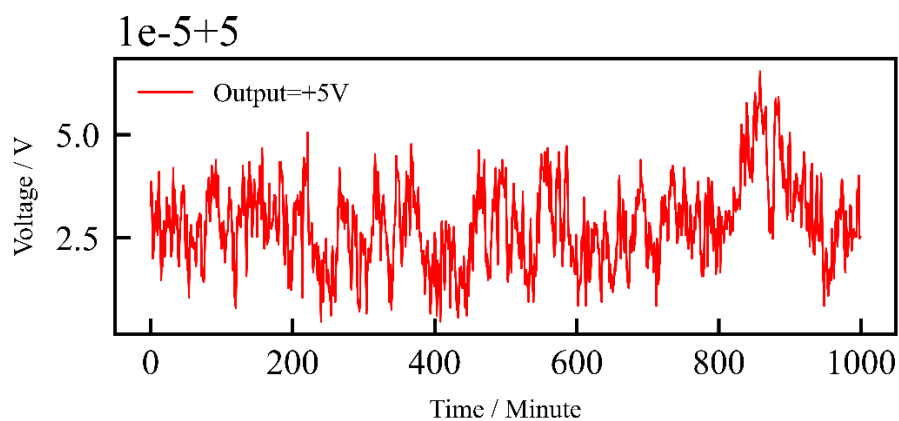


图 3.18 输出+5V 的稳定性测试

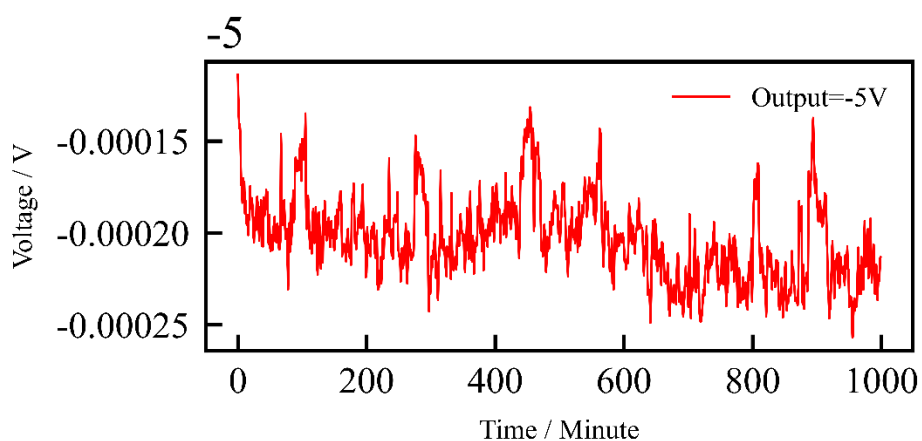


图 3.19 输出-5V 的稳定性测试

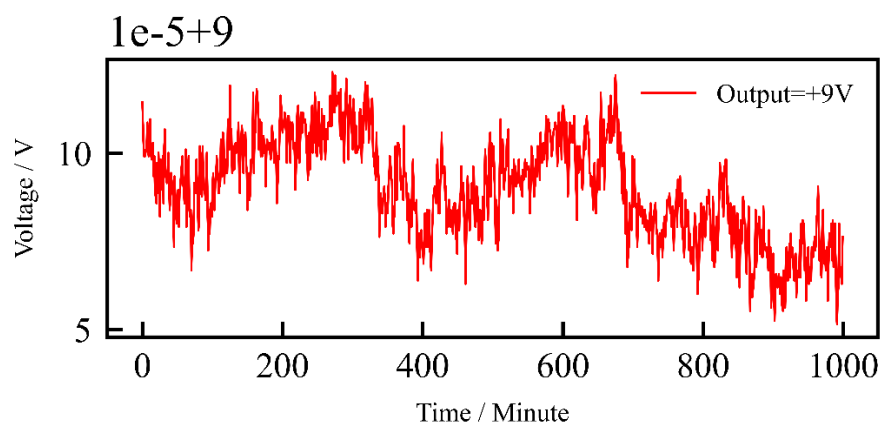


图 3.20 输出+9V 的稳定性测试

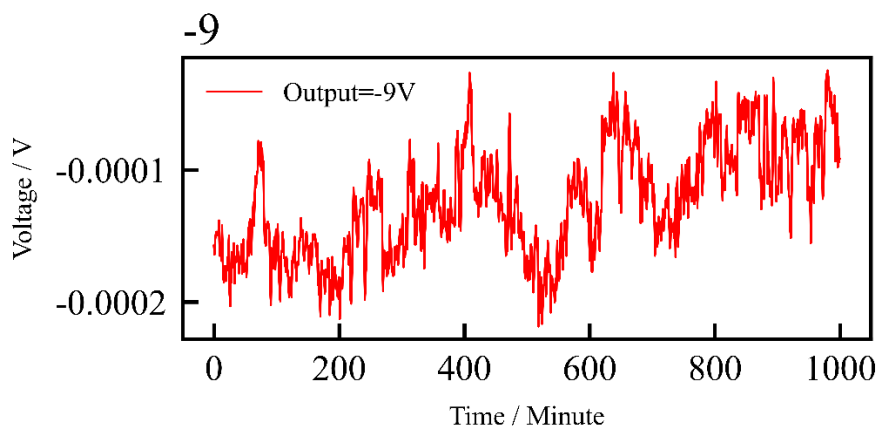


图 3.21 输出-9V 的稳定性测试

在图 3.17、图 3.18、图 3.19、图 3.20 和图 3.21 中，不仅可以看出数据稳定度高，还可以看出数据的输出准确性也很高。

图 3.17 中，在输出 0V 时，数据的标准偏差为 1.143×10^{-5} ，可以分析出液晶驱动系统在工作时，直流分量在几十微伏的范围，性能优异。

图 3.18 中，在输出 +5V 时，数据的标准偏差为 1.016×10^{-5} ；图 3.19 中，在输出 -5V 时，数据的标准偏差为 2.254×10^{-5} ，可以看出系统输出 $\pm 5V$ 直流电时，稳定度很高，而其正负电压的对称性非常好，可以极大地保证液晶有效电场几乎不变。

图 3.20 中，在输出 +9V 时，数据的标准偏差为 1.431×10^{-5} ；图 3.21，在输出 -9V 时，数据的标准偏差为 4.196×10^{-5} ，可以看出在系统输出 $\pm 9V$ 直流电时，虽然接近输出满量程区间，但是稳定度仍保持在较高的水平，除了输出 -9V 的标准偏差比其它四组数据稍微偏大，但是数据尺度仍保持在同一水平（ 10^{-5} ）。同样的，即使在接近满量程输出的情况下，正负电压的对称性仍然很高，保证了液晶相位延迟的稳定性。

整体来看，可以得出液晶驱动系统电压输出分辨率、输出准确度、输出稳定度都非常高，完全满足需求。

3.4 多通道恒温控制器设计

LCVR 是温度敏感性器件，当 LCVR 温度变化 1 摄氏度，其相位延迟大约变化 1 度，因此，LCVR 需要工作在恒定的温度环境下。在本文的磁像仪应用

环境中，偏振分析器和滤光器均放置在望远镜箱体内，在室外环境下，箱体内的温度一年大约在 $-5^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$ 之间变化。本文将根据所使用的液晶分子特点，结合磁像仪的环境温度变化，设定 LCVR 工作在 $42\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。由于该目标温度远高于最大环境温度 25°C ，可以采用主动加热被动散热的方式实现 LCVR 的恒温运行。

3.4.1 温度采集方案

在 LCVR 恒温控制器中，核心功能是实现高精度的温度采集。目前，在市场上常用的测温元器件有模拟器件（热电偶、NTC/PTC 热敏电阻和热电阻等）、数字器件（数字温度计）^[65-70]。热电偶和热电阻相较于热敏电阻，其自身的灵敏度比较低，在温控系统这一惰性单元中，低灵敏度和高延迟会降低控温精度，因此本文选择热敏电阻作为测温元件。热敏电阻包括正温度系数和负温度系数的热敏电阻。本文选择负温度系数的热敏电阻，其测量温度与自身电阻之间的关系如下：

$$\frac{1}{T} = A + B\ln(R) + C[\ln(R)] \quad (3.2)$$

在公式(3.2)中，A、B 和 C 为厂家给出的热敏电阻校准常数。为了增加测温系统的灵敏度和对称性，可以采用如下所示的惠斯通桥式测温电路。

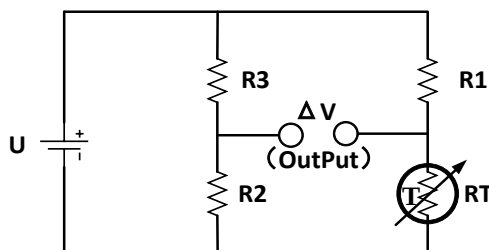


图 3.22 热敏电阻测温原理

在图 3.22 的测温电路中， R_1 、 R_3 阻值应尽可能相等，桥臂的输出电压 ΔV 为：

$$\Delta V = \frac{R_2}{R_2 + R_3} U - \frac{R_T}{R_T + R_1} U \quad (3.3)$$

对公式(3.3)进行变换， R_T 为：

$$R_T = R_1 \frac{R_2 U - \Delta V (R_2 + R_1)}{R_1 U + \Delta V (R_2 + R_1)} \quad (3.4)$$

在公式(3.4)中,为了提高数据采集系统的分辨率和测量温度的区间,可以将下桥的电阻阻值设定与目标温度附近热敏电阻的阻值基本一致,使用可编程增益的运算放大器实现动态放大采集的模拟量,使得放大后的模拟量尽量覆盖模数转换器的采集范围,增大有效分辨率。

3.4.2 系统原理图设计

一套完整的恒温控制系统除了上节的温度采集部分,还包括:模拟数字转换电路、参考电压发生器、主控制器、通信模块和功率驱动单元。主控制器控制模数采集单元获取热敏电阻的温度,通过软件算法将目标温度与实测温度的差值映射到功率控制器,驱动加热单元按照设定的功率加热,实现恒温控制。

本文选用的模数转换器(ADC)为24位的AD7794,内部集成稳压信号源,具有6路差分输入,芯片内部通过模拟选通开关,将所测量的输入通道接入内部的可编程增益运算放大器的管脚,将放大后的信号直接送入模数转换单元进行数据转换,该芯片支持可编程的滤波器和更新率,实现芯片级滤波。虽然AD7794集成了参考电压发生器,但是精度和稳定度不适合高精度温控应用,需要外置参考电压源,使用ADR4525参考电压芯片为AD7794提供参考信号。使用KiCAD设计的温度采集电路如下图3.23所示。

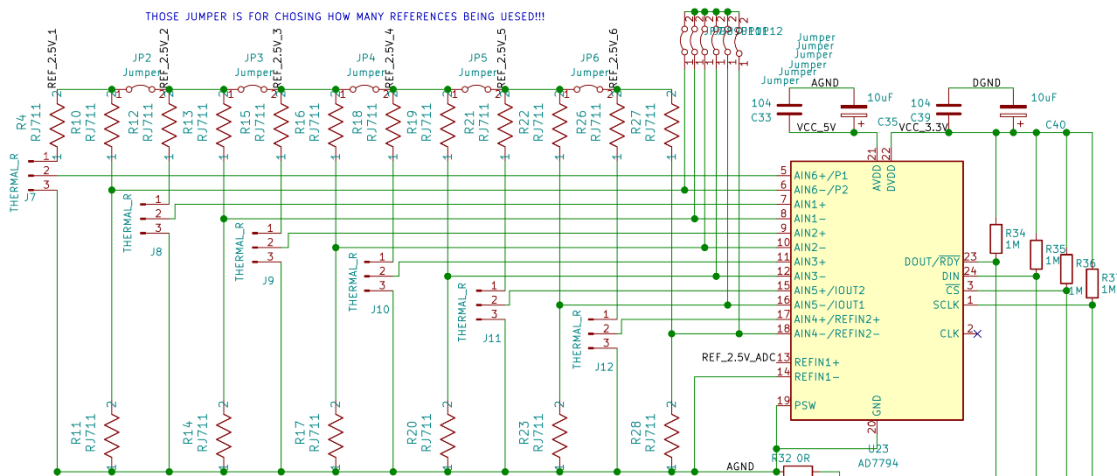


图 3.23 六通道差分温度采集电路原理图

核心控制器本文选用ST公司的STM32系列芯片,该系列芯片外围电路简单,内部集成了SPI控制器可以与AD7794直接连接,同时内部的多路定时器可以直接产生PWM(脉冲宽度调制)波形,用以功率器件驱动加热膜工作。在一些低要求场合,STM32可以不需要外围电路即可工作,可以极大的节省电

路板面积，减小设计成本。STM32 最小系统原理图的设计如下所示。

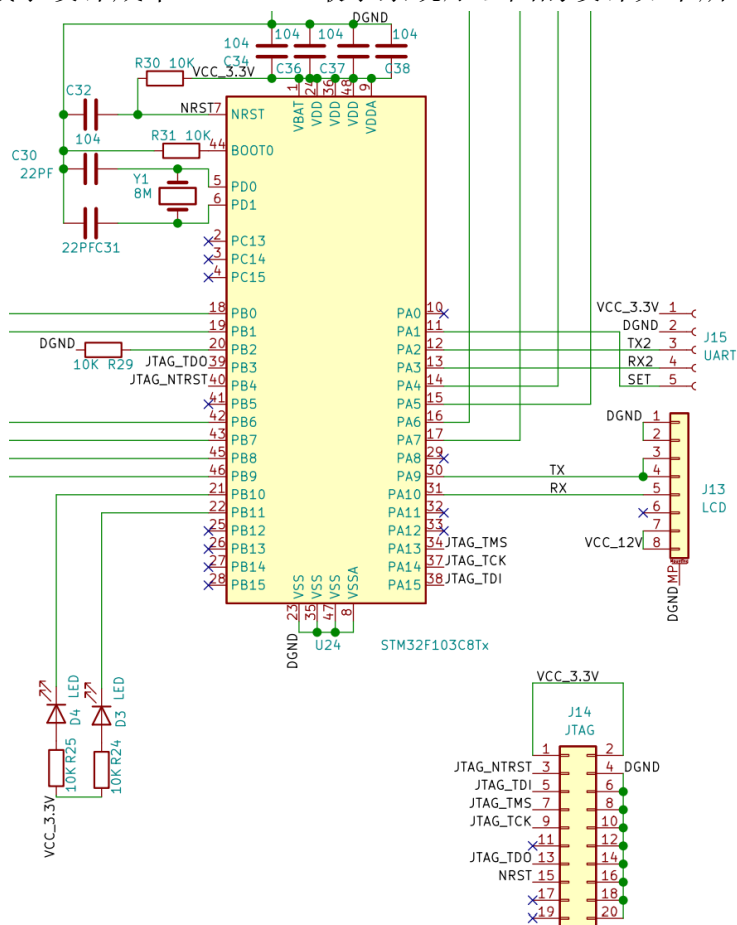


图 3.24 STM32 最小系统电路原理图

3.4.3 硬件设计与结构装调

在完成恒温控制电路原理图设计后，在进行 PCB 电路板设计时，主要需要将功率加热部分与模拟温度采集部分分开布置，由于功率加热部分的电流消耗大，需要使用额外加粗的布线，防止线路升温导致电路板损坏。经过布局改进的 PCB 图纸如下图 3.25 所示，设计完成的 PCB 板 3D 示意图如图 3.26 所示，经过 PCB 加工后，焊接调试后的电路板如下图 3.27 所示。

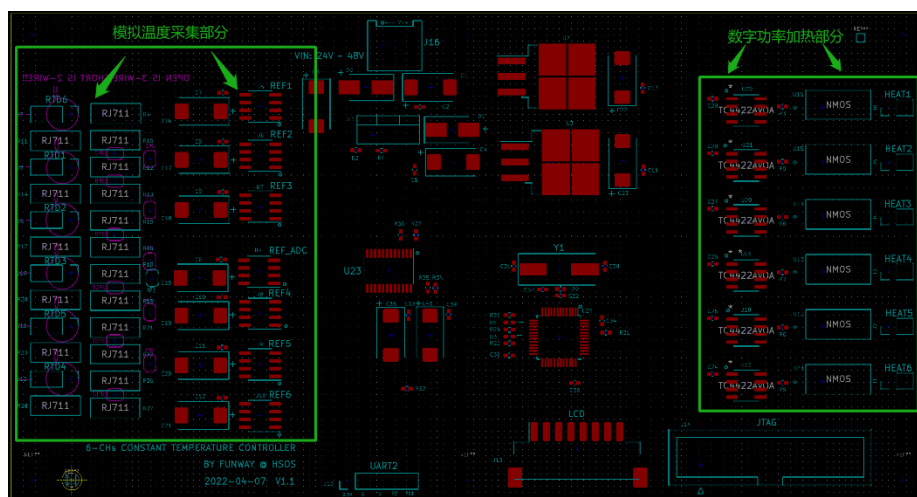


图 3.25 模拟数字回路分离布局的 PCB 图纸

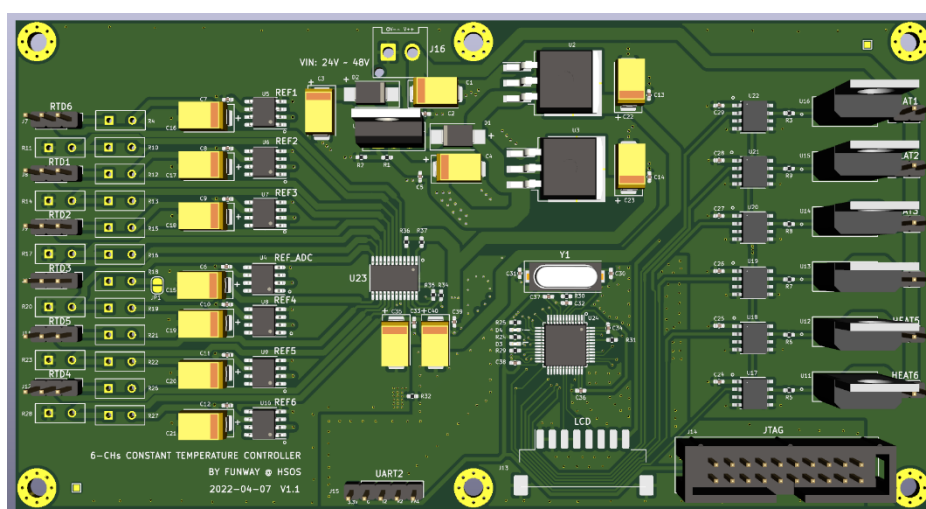


图 3.26 恒温控制 PCB 3D 示意图

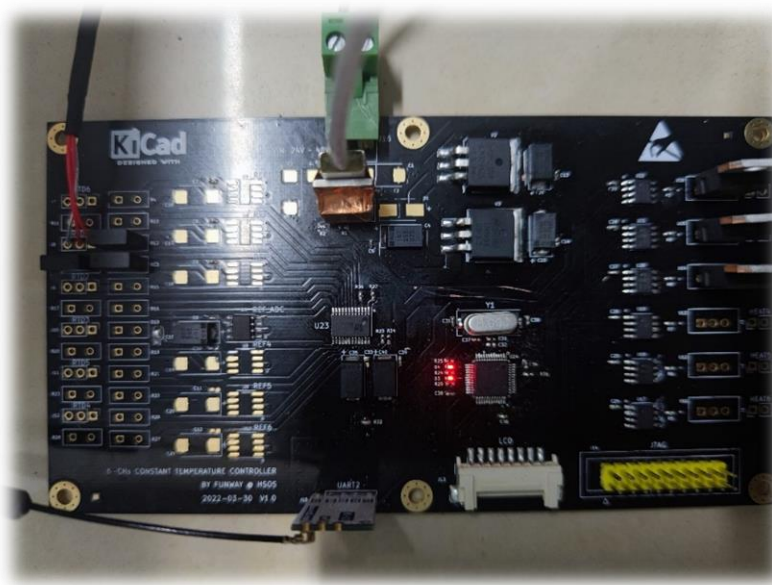


图 3.27 恒温控制电路板实物图

在完成硬件电路焊接调试后，使用 CAD 制图软件设计了恒温控制系统的机箱图纸，如下图 3.28 所示。整机采用与液晶驱动控制系统相同的工艺，整机采用铝合金加工，并在外表面进行氧化喷砂处理，实物图如下图 3.29 所示。

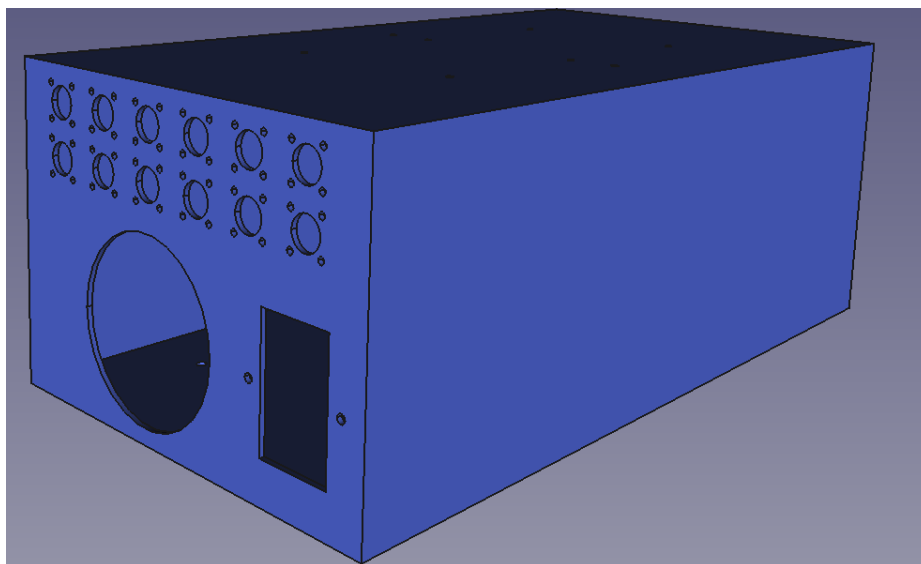


图 3.28 恒温控制机箱 3D 模型

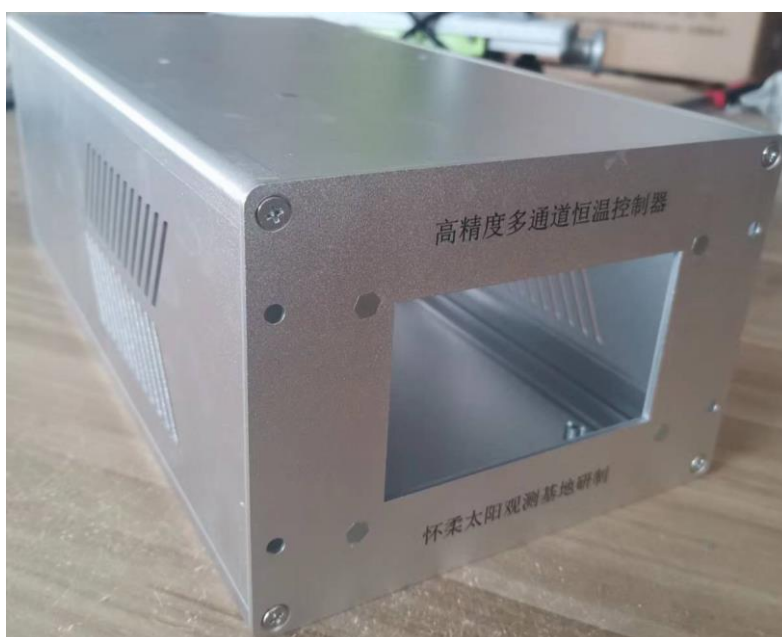


图 3.29 液晶恒温控制机箱实物

3.4.4 软件控制框架

LCVR 恒温控制系统的工作流程是：系统上电后，首先判断传感器是否在线，如果传感器断开连接则报警；然后控制器根据目标温度与实际温度的差值，使用 PID 算法计算出当前加热膜需要的实际功率，通过控制功率 MOS 管

的 PWM 中的脉宽；最终实现加热量的精确闭环恒温控制。软件系统的工作流程如图 3.30 所示。

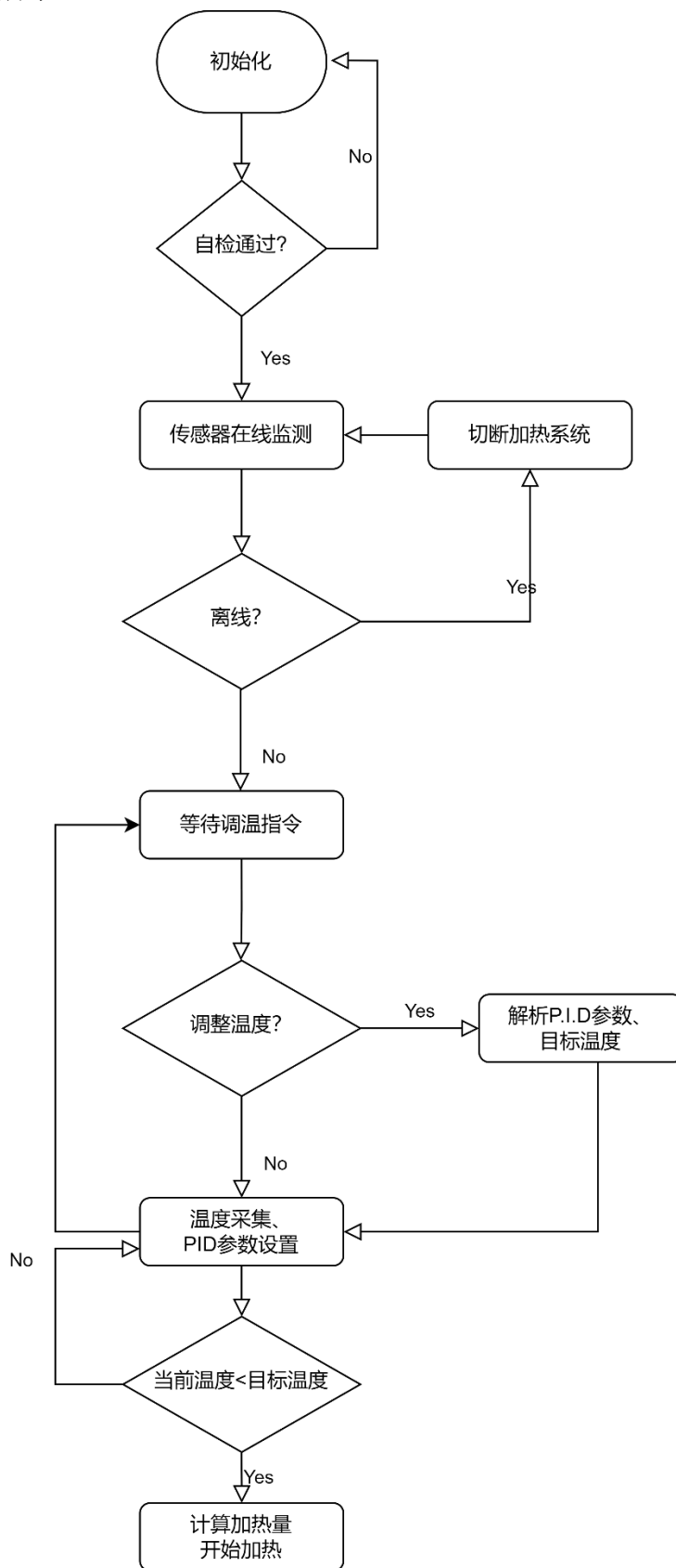


图 3.30 液晶恒温系统软件流程图

3.4.5 人机交互设计

液晶恒温控制器一般情况下工作在在线模式，系统通过串行总线定时上报实时温度与报警信息，望远镜控制系统可以在线监测滤光器和偏振分析器是否工作在目标温度，以此来判断是否执行磁场数据采集工作。这种模式下，望远镜主机系统一般不会主动调整恒温控制器的目标温度，为了防止人为意外误设目标温度，外部控温接口一般会设置高级权限或者使用密码口令，以防意外的高温导致波片、液晶、偏振片等损坏。

除了在线工作，液晶控制器也可以工作在离线模式，通过人机交互界面设定目标温度、加热功率、升温曲线、传感器校准和 PID 参数调整等高权限工作。正常情况下，人机交互界面只显示实时温度信息与报警状态。本文使用 480*800 的 4.5 英寸电容触摸显示器，实现离线控制相关功能，主界面如下所示。



图 3.31 恒温控制机器人机交互界面

3.5 恒温控制器性能测试

恒温控制器的主要性能测试是恒温控制的精度，这一指标直接决定了偏振分析器与滤光器的工作状态是否正常。此外，恒温控制器的恒温稳定时间也是需要的考量的指标。在该测试中，将加热膜与热敏电阻包裹在 3 公斤重的铜棒上，模拟滤光器的圆柱形结构，在外层敷设保温海绵，设定目标温度为 35℃，初始室温 20℃。每隔 1 分钟记录一次实时温度，将六天的测试数据绘制于图

3.32 中。另外，测试系统从室温到稳定温度的速度，如下图 3.33 所示。

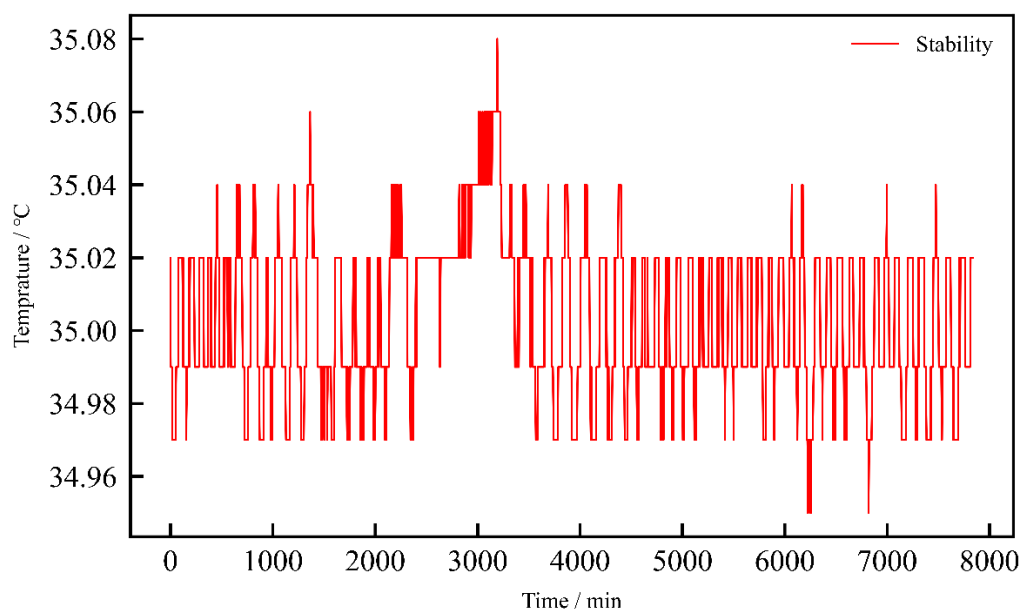


图 3.32 恒温长周期稳定性测试

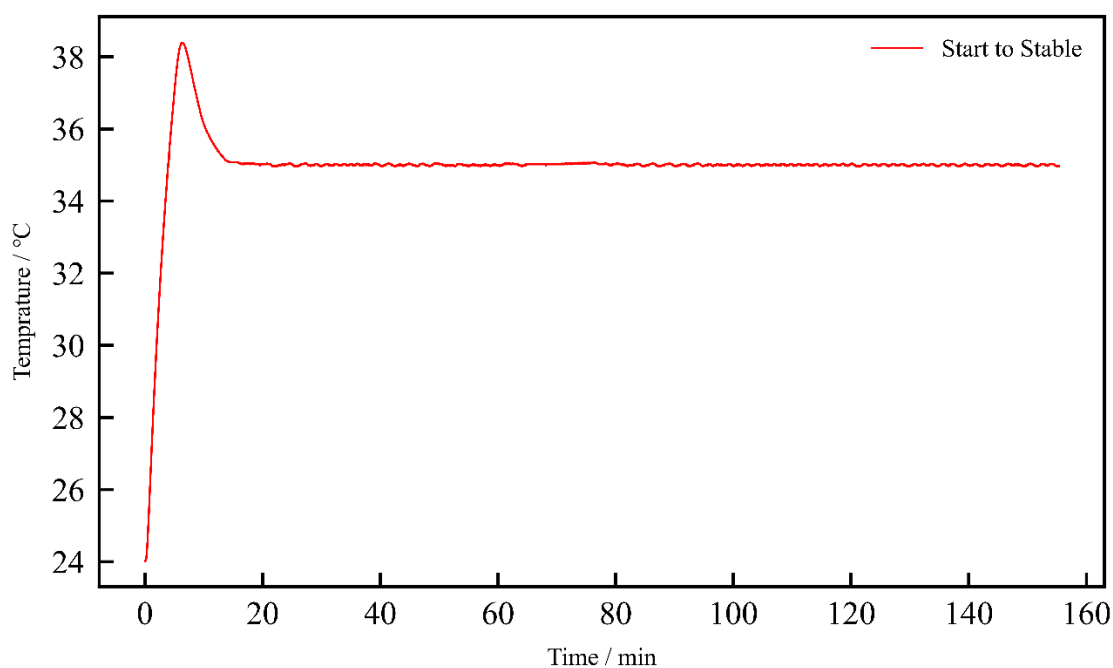


图 3.33 恒温控制器启动速度

根据图 3.32 的结果，可以看出恒温控制系统从室温 20 摄氏度稳定到目标温度 35 摄氏度用时为 15 分钟。在长达六天的稳定测试中，最大恒温温度偏差为 0.12℃，温度标准偏差为 0.021，可以达到 35 ± 0.1 摄氏度的恒温精度。

3.6 本章小结

本章介绍了 LCVR 电控系统的两大核心组件：液晶驱动系统和液晶恒温控制系统，因为 LCVR 正常工作需要合适的驱动电压和稳定的工作温度。文中详细介绍了 LCVR 驱动信号的产生原理以及如何使用芯片实现所需功能，根据设计好的电路板设计出可靠的机械结构与实用的人机交互界面。对于恒温控制器，文中首先介绍了温度采集传感器的种类，以及实用的测温方案，在对 PCB 进行设计时，根据不同电路的功能进行了区域划分，最大限度保障模拟电路的可靠性。经过各项指标测试，液晶驱动器和恒温控制器完全满足使用需求。

第4章 星载液晶稳定性测试系统的设计

4.1 设计需求

LCVR 具有口径大、调制速度快、光谱范围宽、质量轻、功耗低以及无旋转结构,在空间磁像仪等设备中具有较大优势。液晶波片是液晶型磁像仪能否实现高灵敏度磁场测量的核心部件。然而,目前国内尚未有液晶波片在空间使用的先例。欧航局的 Solar Orbiter 太阳卫星使用了液晶波片,并在地面做了大量的空间环境实验,但该卫星发射时间一再推迟,该卫星发射后液晶波片在空间的真正性能仍未对外发布。而且,地面的空间环境试验条件虽然可以模拟真空、热、力学、辐照等在轨环境,但无法准确模拟液晶材料在空间的使用环境。地面环境试验问题集中体现在五个方面:

(1) 地面辐照试验均为加速试验。速率不同测量结果不同,这类试验可以判断液晶是否损坏、是否完全不可用,但很难作为液晶波片完全可用的依据;

(2) 辐照试验均为非原位测量。液晶波片属于电光调制器件,有一定恢复能力,非原位测量无法判断液晶正常工作状态的性能;

(3) 充放电效应无法测试。液晶波片为低压电光调制(10V 以内),在轨高能电子等引起的充电效应可能直接改变液晶波片的实际负载电压,从而影响偏振调制性能。但地面充放电效应测试对象一般为几百伏乃至上千伏的高压状态,低压情况地面很难测量;

(4) 地面辐照试验中,质子、电子辐照光源均为非连续能谱,然而真实空间环境均为连续能谱,在此情况下的地面辐照试验是否能准确反应液晶材料的性能尚未可知;

(5) 真实空间环境为各种力、热、辐照等环境的综合效应,地面很难进行这种综合试验。此外,液晶材料是一种处于固-液态之间的混合态,空间微重力环境可能会导致液晶材料泄漏,使得液晶波片受损而完全失去偏振调制功能。

总而言之,液晶作为一种新材料新器件,国际上缺乏与空间环境相互作用的数据和理论机理,用已有的传统的地面辐照条件或方式进行液晶波片的空间环境模拟试验,其试验结论是有效可信,亦或完全偏离了实际的工作状态,这

是值得担心的一点。液晶波片作为我国 ASO-S 太阳观测卫星 FMG 载荷的首飞器件以及地面空间环境试验的局限性，增大了 FMG 载荷的在轨应用风险。如何验证液晶波片在空间使用的性能以最大限度的减小乃至规避风险，是 FMG 载荷需要解决的问题之一。

因此，通过开展液晶波片在真实星载环境下的光电性能稳定性测试，为 ASO-S 卫星 FMG 载荷的抗辐照液晶偏振调制器的研制和方案优化提供数据支持。液晶波片光电性能（即延迟—电压曲线）的稳定性是其最重要参数，直接决定液晶波片是否能够有效应用于 FMG 载荷的高灵敏度、高稳定性磁场测量。因此，综合重量、体积、功耗以及成本等因素，本文将光电性能的稳定性作为液晶搭载的主要任务。液晶搭载试验不仅对 ASO-S 卫星能否成功实现既定科学目标意义重大；而且，液晶器件的应用领域非常广泛，搭载试验对偏振成像、空间光调制器技术、光谱成像、液晶显示等技术在天基领域中的应用具有引领作用，前瞻性强。

4.2 最小化相位延迟测量

相位延迟—电压曲线是表征 LCVR 电光性能的最重要参数。综合考虑试验装置的体积、功耗及可靠性等，本文采用光强法测量星载液晶性能测试系统（下文简称：液晶测试仪）中 LCVR 的相位延迟—电压曲线，测量光路如图 4.1 所示，主要由光源系统、偏振调制系统和光电探测系统三部分组成。

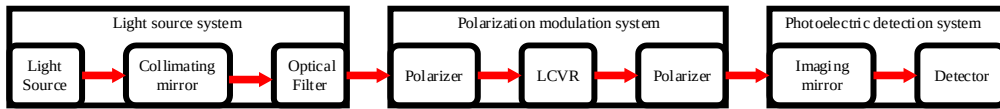


图 4.1 液晶测试仪光路示意图

在该光路中，由光源产生光强为 I_{in} 的入射光，依次经过准直镜、滤光片、偏振调制系统和成像镜后，由探测器接收。偏振调制系统包括两片偏振片和一片待测的 LCVR，两片偏振片透光轴相互平行，LCVR 的快轴与两片偏振片的透光轴夹角为 45° 。根据偏振光学理论，探测器接收的探测光强 $I_{out}(V)$ 与 LCVR 的相位延迟 $\delta(V)$ 之间有如下关系：

$$I_{out}(V) = I_{in} \cos^2 \frac{\delta(V)}{2} + I_{bias} \quad (4.1)$$

其中, I_{bias} 为探测本底, 由系统杂散光及探测器噪声引起。公式 (1) 中, 由于存在两个附加未知参数 (I_{in} 和 I_{bias}), 因此无法通过探测光强直接获得电压 V 对应的相位延迟。尽管如此, 通过公式 (1) 可以发现, 当相位延迟为 180° 和 360° 时, 探测光强 $I_{\text{out}}(V)$ 分别达到最小值和最大值。因此, 一旦获得 LCVR 在不同驱动电压下的探测光强值, 则可以通过最大值、最小值间接确定 I_{in} 和 I_{bias} , 从而实现相位延迟—电压曲线的测量。具体计算流程如下:

- a) 对原始探测光强—电压曲线进行归一化, 如公式(4.2)所示, 此时默认探测光强的最大、最小值分别对应 LCVR 的 360° 、 180° 相位延迟;

$$I' = \frac{I_{\text{out}} - I_{\text{bias}}}{I_{\text{in}}} = \cos^2 \frac{\delta(V)}{2} \quad (4.2)$$

- b) 根据公式(4.2)计算的归一化光强—电压曲线, 如图 4.2 (a); 根据公式(4.2)进一步可以计算不同驱动电压的相位延迟关系, 即相位延迟—电压曲线, 图 4.2 (b) 所示。

$$\delta(V) = 2\arccos\sqrt{I'} + 2n\pi \quad (4.3)$$

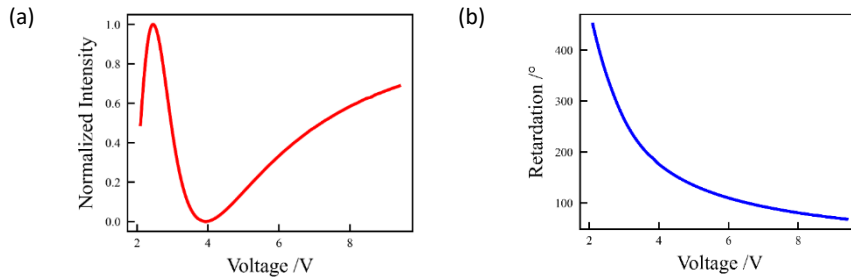


图 4.2 LCVR 的光电曲线。(a) 归一化强度—电压曲线; (b) 相位延迟—电压曲线

光强法测量 LCVR 相位延迟—电压曲线的光机结构简单易实现, 测量速度较快。而且由于采用了归一化处理, 很大程度上降低了光源、探测器、整机环境的变化对数据可靠性的影响。缺点是相位延迟的测量准确性依赖于最大值、最小值的准确性, 因此本试验中着重关注相位延迟—电压曲线的稳定性, 从而弱化了精度要求。此外, 在数据的分析研究中, 同时也关注光强—电压曲线的变化, 利用光强—电压曲线和相位延迟—电压曲线两者互为补充, 确保了进行 LCVR 电光性能稳定性测量时的可靠性。

4.3 液晶测试仪的整机稳定性

整机的稳定性直接决定了所采集的 LCVR 相位延迟—电压曲线的真实性，因此在设计时需要提高光机和电路系统的稳定性。整机的稳定性主要受光源、探测器和 LCVR 工作条件的影响，其中偏振片、滤光片和其它光机部分的稳定性高，随外界的变化在本文中可以忽略。光源和探测器是半导体器件，自身的电光/光电稳定性较高，如光源短周期的变化率一般在 0.5% 以内，规范的电路设计和数据校准可以提高光源和探测器的稳定性和数据可靠性，对整机稳定性的影响可以忽略。LCVR 的工作条件包括：为 LCVR 提供稳定的驱动电压和为 LCVR 提供稳定的恒温环境，二者的变化是影响整机稳定性的主要因素。

4.3.1 LCVR 的驱动稳定性

LCVR 是电光器件，驱动电压的稳定度会直接影响 LCVR 的实际响应。根据液晶的直流效应和电场效应，LCVR 的驱动信号一般为交流方波，典型的 LCVR 驱动信号如图 4.3 所示，信号的实际输出频率为 f_{out} ，峰峰值为 v_1-v_2 。

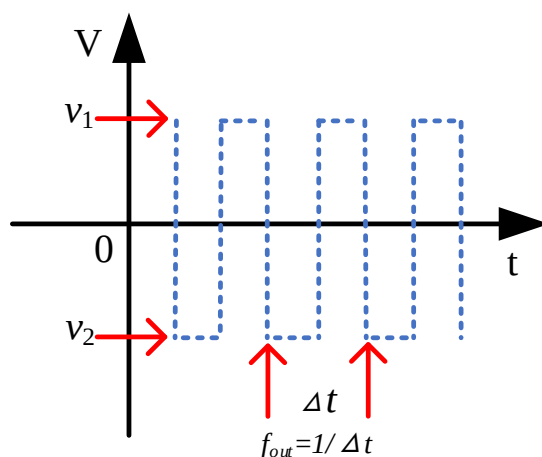


图 4.3 LCVR 的驱动波形

在图 4.3 中，正电压 v_1 和负电压 v_2 理论上应该与设定值 v_{set} 数值上相等，由于电子电路的非线性误差，三者不完全相等，导致施加在 LCVR 的实际电压不等于预设值，使得 LCVR 产生相位漂移。定义 LCVR 驱动系统的幅值稳定度为 w_{out} ，计算关系为：

$$w_{out} = 1 - \frac{|v_{set} - v_1|}{v_{set}} - \frac{|v_{set} + v_2|}{v_{set}} \quad (4.4)$$

除了电压幅值需要稳定外，液晶分子的电导率会随着驱动信号的频率 f_{out} 变化，导致相同驱动电压幅值下，不同的 f_{out} 也会使得 LCVR 产生相位漂移。由于外部电磁干扰等因素，实际信号的频率 f_{out} 与设定频率 f_{set} 之间会存在误差，定义 LCVR 驱动系统的频率稳定度为 w_{freq} ，计算关系为：

$$w_{freq} = 1 - \frac{|f_{set} - f_{out}|}{f_{set}} \quad (4.5)$$

那么，LCVR 驱动系统的整体稳定度 w_{driver} 为：

$$w_{driver} = w_{out} \times w_{freq} \quad (4.6)$$

4.3.2 LCVR 的温度稳定性

液晶具有温变特性。在液晶态下，液晶分子之间的粘性等参数会随着工作环境温度发生变化，导致 LCVR 有效相位漂移。在相同的驱动电压和频率下，LCVR 的工作温度每变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，LCVR 的相位延迟变化约 1 ° 。因此，需要使 LCVR 工作于稳定的温度下。根据 FMG 载荷中 LCVR 的恒温要求，将 $35 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为本文中 LCVR 的恒温指标。

4.4 液晶试验仪的工作流程

根据航天产品设计要求，需要在设计开始前制定液晶试验仪的工作流程。液晶试验仪在轨工作时，由卫星提供电源和上电开机信号，卫星利用 CAN 总线进行遥测通信（注：地面测试时，采用直流稳压电源模拟卫星提供的一次母线电源，USB-CAN 控制仪和电脑模拟卫星的 CAN 总线通信）。液晶试验仪的控制软件在轨工作流程如图 4.4 所示：卫星开启液晶试验仪后，进行设备自检。首先，根据热敏电阻获取的温度值对液晶波片进行加热，当液晶波片的温度达到设定温度时，停止加热，利用被动散热和加热实现动态热平衡。LCVR 进入恒温后，液晶试验仪通过 CAN 总线接收卫星每隔 1 秒发送一次的遥测指令；正确解析遥测指令后，液晶试验仪利用 CAN 总线返回采集数据，然后以 0.1V 的步长改变 LCVR 的驱动电压，驱动电压以 0.1V 的步长在 $0.9\text{V} \sim 7.2\text{V}$ 之间循环增加（一个循环 63 个电压数据，耗时 63s）；如果没有接收到 CAN 指令，则液晶保持现有状态不变；如此往复。

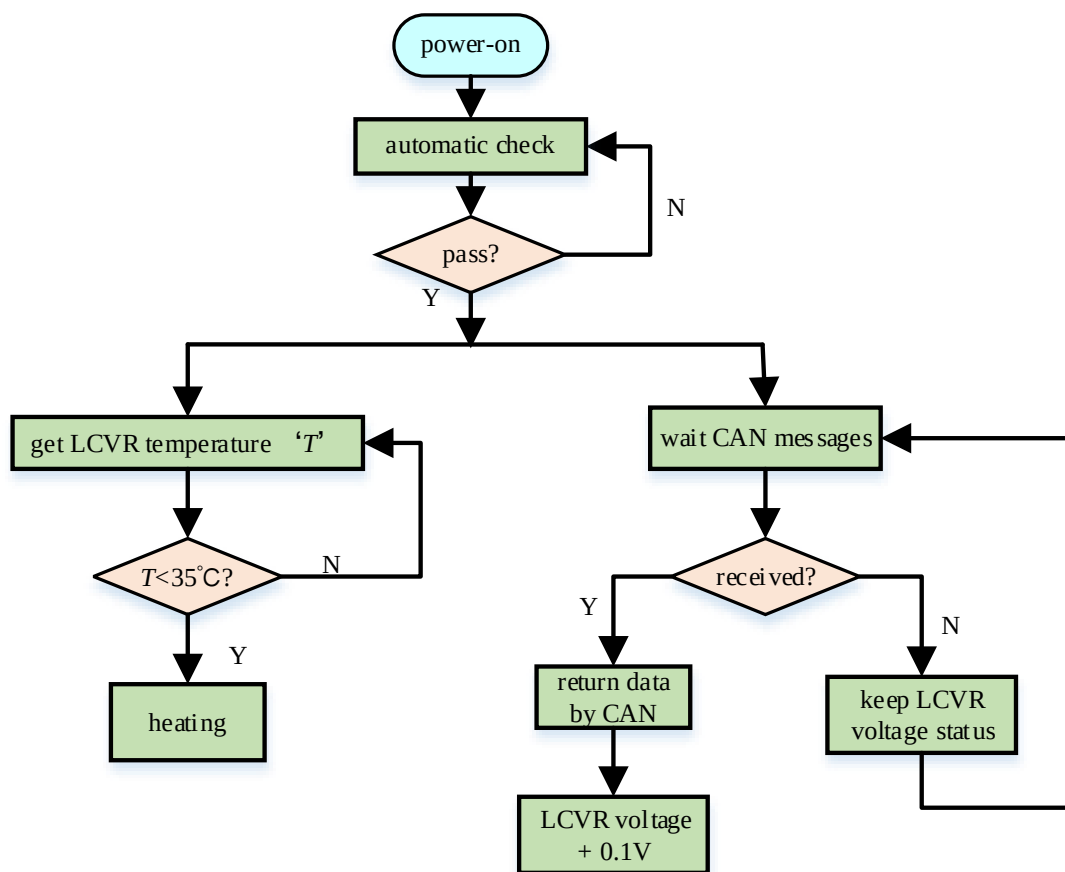


图 4.4 液晶试验仪在轨工作流程

4.5 液晶试验仪的光机设计

液晶试验仪包括光机和电子学两部分，根据所搭载卫星 CX-6(03)的设计限制，液晶试验仪的整机质量小于 1.12Kg，峰值功率小于 13W（稳态功率小于 5W），外包络小于 189mm×100mm×72mm。根据图 4.5 LCVR 的光机框架示意图，对光源、偏振调制器和探测器三部分进行了最小化光机设计，光机外包络为 124mm×43mm×39mm。光源采用微型发光二极管（LED）（直径 0.5cm、中心波长 590nm、带宽 10nm）；偏振调制器中的 LCVR 由中国工程物理研究院流体物理研究所研制，向列相液晶分子材料为 5CB(PP5CN)，导电膜和取向膜分别为氧化铟锡（ITO）和聚酰亚胺，盒厚 5μm；偏振片采用 CODIXX 公司的空间化产品，生产工艺与 ASO-S 卫星 FMG 载荷的 LCVR 相同；探测器采用 First Sensor 的硅光电二极管（有效感光面积 13mm²、直径为 0.82cm、590nm 的光谱响应度为 0.42A/W@23℃）。设计完成的光机的实物图如图 4.6 所示。

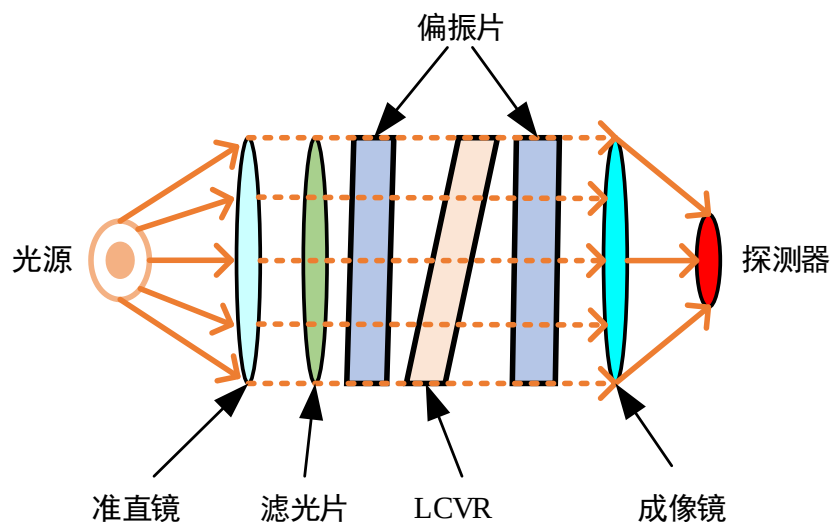


图 4.5 空间 LCVR 光机框架示意图

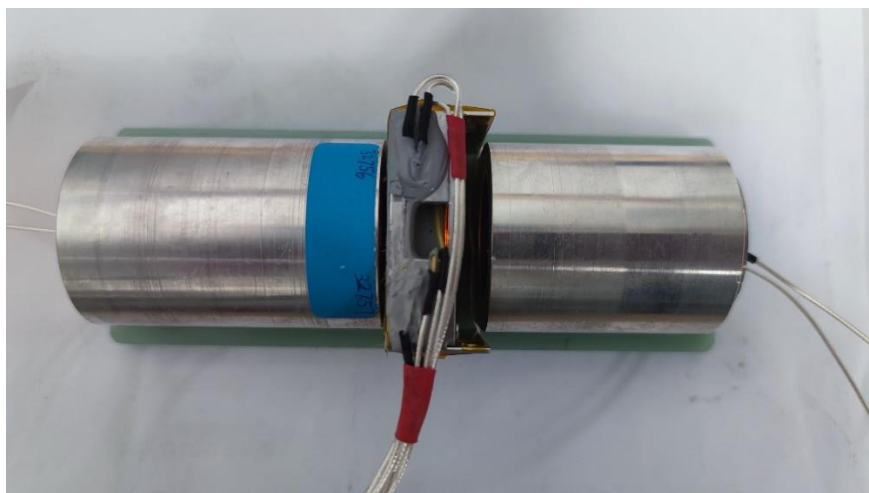


图 4.6 液晶测试仪光机实物图

4.6 液晶测试仪电子学设计

空间 LCVR 相位延迟测试系统由光机和电路组成，由于所搭载卫星的设计限制，整机的尺寸最大为 $18.9\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 7.2\text{ cm}$ ，除去最小化设计的光学与机械结构（ $12.4\text{ cm} \times 4.3\text{ cm} \times 3.9\text{ cm}$ ）后，电路系统设计空间十分有限。因此，进行电子学设计时要平衡空间、体积、重量、安装方式、散热、功耗（峰值功率 $<15\text{ W}$ ，平均功率 $<5\text{ W}$ ）的限制。

电路系统功能有驱动 LED 光源和 LCVR，采集环境温度、LCVR 温度和光电探测器的输出电压，以及实现电源转换、数据处理和星上通信，电路框架如图 4.7 所示。

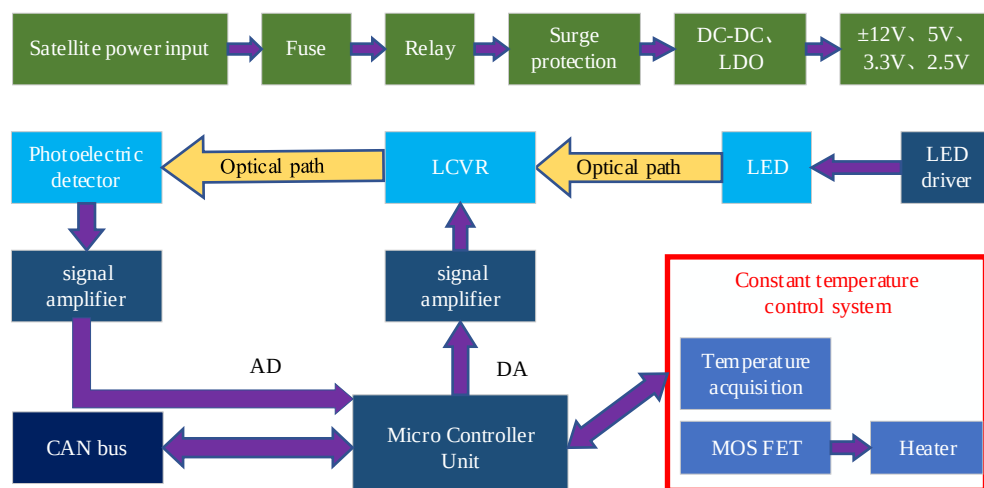


图 4.7 液晶试验仪的工作框图

该电路方案中，使用电子元器件均为航天等级的陶瓷封装或者金属封装，导致元器件的体积与质量都较大，因此需要采用高集成度的主控制器来提高空间利用率。主控制器选用西安微电子技术研究所的嵌入式星载管理单元—LSEMU01，该芯片外包络尺寸为 $4.6\text{ cm} \times 4.6\text{ cm} \times 1.06\text{ cm}$ ，芯片核心为增强型 8051 内核，集成的 2 路 CAN2.0B 总线收发器和驱动器用于星载通信，集成多路 12 位模数转换器（ADC）用于探测器数据采集和温度采集等，集成的 11 位数模转换器（DAC）和定时器用于产生 LCVR 的驱动信号。根据电路功能确定电路方案和主控芯片选型后，接下来根据整机稳定性分析结果，对 LCVR 驱动和恒温控制进行详细设计。

4.6.1 LCVR 驱动系统

在上文的系统稳定性分析中，LCVR 驱动的稳定性和是整机稳定性的关键变量，根据公式(4.6)，电压驱动系统的稳定度包括：幅值稳定度 w_{out} 和频率稳定度 w_{freq} 。由于 LSEMU01 集成的 DAC 极性和输出范围都需要二次调制，电压驱动系统首先产生幅值可调的双极性直流信号，然后将其调制为固定频率的交流方波，实现 LCVR 的驱动。

4.6.1.1 双极性可调直流电压的产生

为了产生幅值可调的双极性直流电压信号，首先使用 LSMEU01 集成的 DAC 输出单极性信号，再经过精密运算放大电路转换为双极性可调直流电压信号。DAC 的原始电压输出范围 V_{DAout} 为 $0\text{V} \sim 2.5\text{V}$ ，经由 LSMEU01 内部集成的

一级放大电路（放大倍数为 A_1 ），放大为 $0\text{ V}\sim 5\text{ V}$ 的可调信号后，从 LSMEU01 管脚输出。然后使用图 4.8 的外置二级放大电路实现极性转换和信号放大（输出范围达到 $-10\text{ V}\sim 10\text{ V}$ ）。

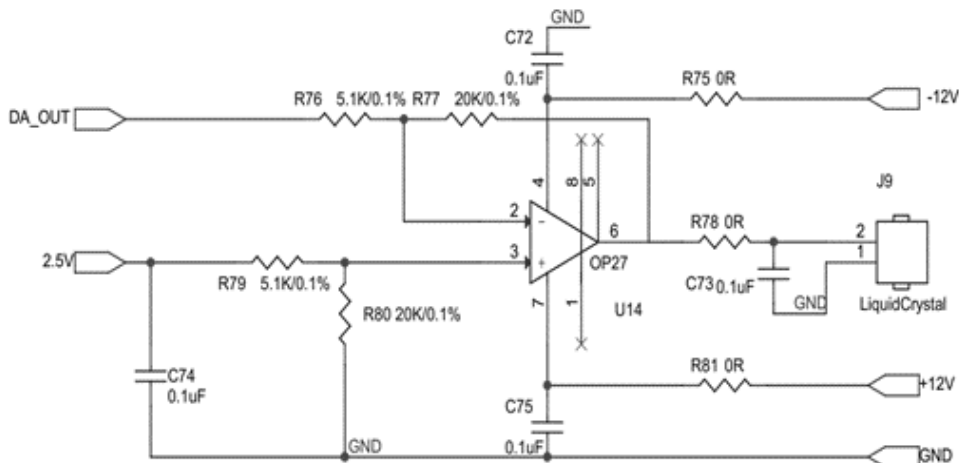


图 4.8 驱动信号极性转换放大电路

该放大电路中，使用低温漂（0.1%精度）的金属薄膜电阻作为反馈电阻，提高了正负电压的对称精度，同时使用单运放的电路方案也减小了电路板面积。如图 4.8，LSMEU01 的 DAC 输出管脚连接到 DA_OUT 端口，驱动信号从 J9 端口输出到 LCVR。LCVR 驱动系统的理论输出精度为：

$$1(\text{LSB}) = \frac{2.5}{2^{11}} \times A_1 \times A_2 = 9.77\text{mV} \quad (4.7)$$

其中芯片内部的一级放大倍数 $A_1=2$ ，外置二级放大电路的放大倍数 $A_2=4$ ，J9 端口的输出电压 v_{out} 与 DAC 的输入数据码 N （范围： $0\sim 2047$ ）关系为：

$$v_{out} = 10 - A_1 \times A_2 \times \frac{2.5}{2^{11}} \times N \quad (4.8)$$

4.6.1.2 高精度频率调制器的设计

实现了符合电压范围的双极性直流信号后，需要使用高精度的频率调制器，将该直流信号按照固定频率（LCVR 一般为 2 KHz ）调制为交流方波。LSMEU01 控制器集成的 16 位硬件定时器，可以产生固定时间间隔的定时器中断，在该中断中依次设置 DAC 输出幅值相等、极性相反的电压，即可产生所需频率的双极性方波。比如，当输出频率 2 KHz 、幅值为 5 V （代表峰峰值为 10 V ）的 LCVR 驱动信号时，设置定时器每间隔 $250\mu\text{s}$ 进入一次定时器中断，在

该中断程序中依次设置 DAC 输出+5V 和-5V，实现交流方波调制。

在 LSEMU01 中共有 14 个不同类型的中断信号源（ADC 中断、定时器中断、CAN 总线收发中断等）。在微控制器的中断管理系统中，高优先级的中断可以打断低优先级的中断，同等优先级的中断按中断发生顺序依次执行。为了保证输出信号频率的准确性，需要将该频率发生的定时器，设置为最高优先级以防止被打断。当 LCVR 的驱动信号频率越高，该定时器中断的时间间隔就越小，会导致其它的中断信号无法实时响应，导致如 CAN 总线收发错误等系统异常。经过理论计算和长周期测试，将 LCVR 的驱动信号频率从 2 KHz 降低到 600 Hz 后，整机可以稳定工作。

4.6.1.3 DAC “零点” 校准

LCVR 驱动电路中，DAC 芯片的输出非线性和放大器及阻容器件的离散性，导致实际输出电压与理论输出电压值之间存在误差，必须对输出电压进行校准。传统的校准方法为：分别向 DAC 写入两组数据码 N_1 、 N_2 ，使用高精度台式电压表测量最终的输出电压 U_{O1} 、 U_{O2} ，分别代入公式(4.9)，计算出 A 和 B 的值。

$$u_o = A - \frac{B \times N}{2047} \quad (4.9)$$

但是，该校准方法依赖电压表的测量精度，同时微小的测量误差会使得 A 和 B 的值发生较大变化，导致校准失败。

为了减小测量误差带来的影响和对高精度电压表的依赖，根据 LCVR 驱动信号的输出特点，本文提出更实用的固定精度“零点”校准法，方法如下：

(1)首先找出 DAC 的实际“零点”，精确的“零点”可以减小交流信号中的直流偏置，防止 LCVR 产生直流电降解。利用理论输出公式和普通精度电压表，先粗略找出 DAC 输出在 0V 附近的数据码 N，再微调 N 值，记录在 0 V 正负变化量最小的 N 值，记为输出“零点”： N_{0V} 。

(2)然后，找出 LCVR 的驱动电压循环递增 0.1V 对应的数据码 N，利用(1)的方法，找出在 0.1 V 左右变化最小的 N 值，记为输出调整基数： $N_{0.1V}$ 。

在循环调整 LCVR 驱动电压时，只需要在上一次 N 值的基础上加上 $N_{0.1V}$

的值即可。

理想的 N_{0V} 为 1024, 经过“零点”校准后, 最终的实际 N_{0V} 为 1094, 理论值与实际值存在较大的误差。采用 Fluke 17B 和 Victor 86E 两款检验合格的普通精度电压表, 对校准后的正负直流电压进行测量, 结果如表 4.1 所示。

表 4.1 正向与负向输出测量(单位: V)

v_+	Device		v_-	Device	
	Fluke	Victor		Fluke	Victor
0.5	0.499	0.4990	-0.5	-0.488	-0.4882
1.0	0.997	0.9978	-1.0	-0.997	-0.9978
1.5	1.497	1.4981	-1.5	-1.497	-1.4975
2.0	1.995	1.9970	-2.0	-1.995	-1.9963
2.5	2.493	2.495	-2.5	-2.493	-2.494
3.0	2.992	2.994	-3.0	-2.992	-2.993
3.5	3.490	3.492	-3.5	-3.490	-3.492
4.0	3.990	3.991	-4.0	-3.990	-3.991
4.5	4.480	4.490	-4.5	-4.480	-4.491
5.0	4.980	4.998	-5.0	-4.980	-4.991

根据表 4.1 的数据, 由公式(4.4)可以计算出各电压点的正负幅值稳定度 w_{out} , 如表 4.2 所示。

表 4.2 输出稳定度 w_{out}

v_{set}	Device: V_{pp}		v_{set}	Device: V_{pp}	
	Fluke	Victor		Fluke	Victor
± 0.5	0.9740	0.9744	± 3	0.9946	0.9956
± 1	0.9940	0.9956	± 3.5	0.9942	0.9954
± 1.5	0.9960	0.9970	± 4	0.9950	0.9955
± 2	0.9950	0.9966	± 4.5	0.9911	0.9957
± 2.5	0.9944	0.9956	± 5	0.9920	0.9978

使用 Fluke 17B 测试的平均稳定度为 0.99203, 使用 Victor 86E 测试的平均稳定度为 0.99392, 两款仪器测试的平均幅值稳定度 w_{out} 为 0.99298。

完成 LCVR 输出电路校准后, 需要测量输出信号的频率稳定度, 理论上由最高优先级定时器设计的频率发生器, 调制的信号频率稳定度应该较高。在实际测试时, 使用 Rigol-MSO8064 示波器每隔 60 分钟记录 10 组驱动波形的平均频率值, 预设的输出频率为 600 Hz, 8 次的测试结果如下表 4.3 所示。

表 4.3 频率稳定度 w_{freq} (单位: Hz)

Times	f_{out}	Times	f_{out}
1	599.99	5	599.99
2	599.99	6	599.99
3	600.00	7	599.99
4	600.00	8	600.00

根据公式(4.5), 平均频率稳定度 w_{freq} 为 0.99999。根据公式(4.6), LCVR 驱动系统的稳定度 w_{driver} 为 0.99296。

4.6.2 液晶恒温系统设计

影响整机稳定性的另一个重要因素是 LCVR 的工作温度，本文搭载所卫星的舱内温度范围是 $-10^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ ，因此需要为 LCVR 提供稳定的工作温度环境（温度变化 1°C 以内）。由于卫星舱内温度远低于 LCVR 的正常工作温度（ 35°C ），恒温控制系统通过主动加热和被动散热实现动态恒温。恒温控制系统包括温度采集单元、LCVR 加热单元和温差计算单元。温差计算单元由 LSMEU01 的 PWM 控制器和定时器构成，温差计算单元获取 LCVR 的当前温度后，计算出 LCVR 加热单元当前需要的加热功率，实现 LCVR 的自动恒温控制。

4.6.2.1 MF-61 自发热分析

在实际环境中，热敏电阻的功率会随着不同的环境温度而变化。热敏电阻在不同的环境温度下其电阻值不同，因此流过热敏电阻的电流也不同，自发热产生的温度也不同，热敏电阻的自发热温度会叠加到环境温度中，产生测量误差。MF61 的热耗散常数 μ 为 $0.4\text{ mW}/^{\circ}\text{C}$ ，耗散常数 μ 的定义为：

$$\mu = \frac{P}{T_{\text{sense}} - T_{\text{env}}} \quad (4.10)$$

式中， P 为 MF61 的实际功率， T_{sense} 为 MF61 采集的温度， T_{env} 为当前环境实际温度，MF61 在当前功率下的自发热温度为： $\Delta T = T_{\text{sense}} - T_{\text{env}}$ 。液晶试验仪使用的测温原理与上文恒温控制器的设计原理一致，在图 3.22 中，当环境实际温度为 $T^{\circ}\text{C}$ 时， ΔT 自发热为：

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{U}{R_T - R_1}\right)^2 \times R_T}{\mu} = \frac{U^2 \times R_T}{\mu \times (R_T + R_1)^2} \quad (4.11)$$

在图 3.22 中，假设供电电压 U 为 5 V ，采用的低温漂限流电阻 R_1 阻值为 $3000\ \Omega$ 。由 R-T 函数可知， R_T 的温度为 25°C 时的零功率电阻约为 $3900\ \Omega$ ， ΔT_{25} 应该为 5.12°C 。 R_T 的温度为 0°C 时的零功率电阻约为 $2222\ \Omega$ ，对应的 $\Delta T_0 = 3.49^{\circ}\text{C}$ ，在较大待测环境温度差下，MF61 自发热会引入较大的误差。根据公式(4.11)，如果减小 U 或者增大 R_1 ，可以减小 ΔT 引起的误差。

本文中，为了降低热敏电阻自发热引起的测温误差，电压 U 减小至 2.5

V。为了提高恒温系统在 LCVR 工作温度范围（35 °C）的测温精度，桥臂电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 选择为与 $T=35$ °C 时热敏电阻的阻值相近的值。当 $T=35$ °C 时，热敏电阻的阻值为 2679.5 Ω ，电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 应取值为 3 K Ω 。根据公式(4.10)，35 °C 时 ΔT 自发热温度为 1.3 °C，在设置 LCVR 的目标温度时应加上该温度值进行温度标定。当 LCVR 处于恒温工作状态下，若 $T=36$ °C 时， $\Delta T=1.29$ °C； $T=34$ °C 时， $\Delta T=1.30$ °C，在 35 ± 1 °C 的恒温状态下，自发热引起的温度误差为 0.005 °C，可以忽略自发热引入的温度差。

4.6.2.2 加热单元设计与恒温测试

LCVR 的光机结构示意图如图 4.9 所示，两片加热膜串联后固定于两侧，在平衡升温速度与系统最大功率的限制后，加热单元的最大功率为 10 W。

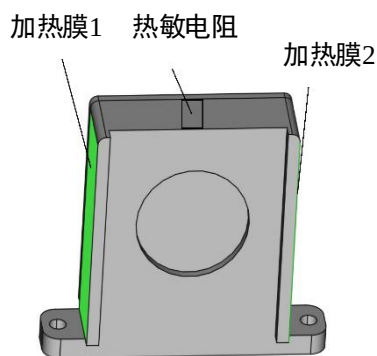
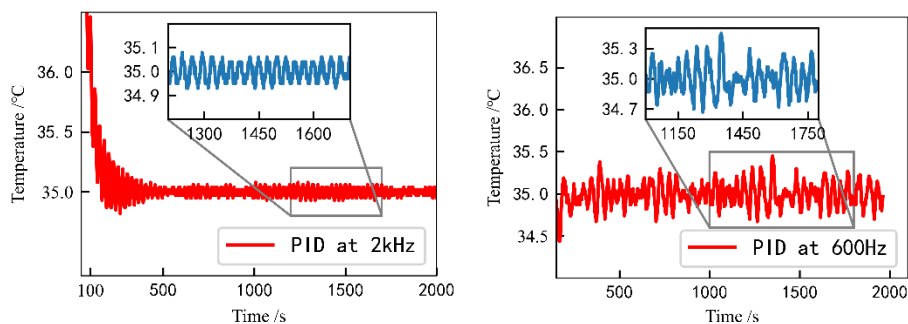


图 4.9 LCVR 光机加热示意图

LCVR 光机结构较大，从加热片发热到温度传递至 LCVR 上会产生一定的时间延迟，比例积分微分误差控制法（PID）和变频驱动法的结合，可以较好地提高该类惰性系统的实时响应。经过测试，较高的 PID 温控算法调度速度可以提高温控精度，但由于 LCVR 驱动系统占用了 LSMEU01 较大的实时计算资源，最终温控算法执行速度为 60 Hz，图 4.10(a)、(b)展示了 LSMEU01 温控算法分别以 2 KHz 和 60 Hz 工作时 LCVR 的恒温精度。当温控算法以 2 KHz 全速运行（关闭系统其它功能），LCVR 的恒温精度达到 35 ± 0.1 °C；温控算法以 60 Hz 的速率运行时（整机正常工作），LCVR 的恒温精度为 35 ± 0.3 °C，满足 35 ± 1 °C 的设计要求。



(a) PID 运行在 2KHz (b) PID 运行在 60Hz

图 4.10 不同温控频率下的恒温控制精度

最终设计完成的电路系统的实物如图 4.11 所示，外包络为 $15.1\text{ cm} \times 6.2\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$ 。

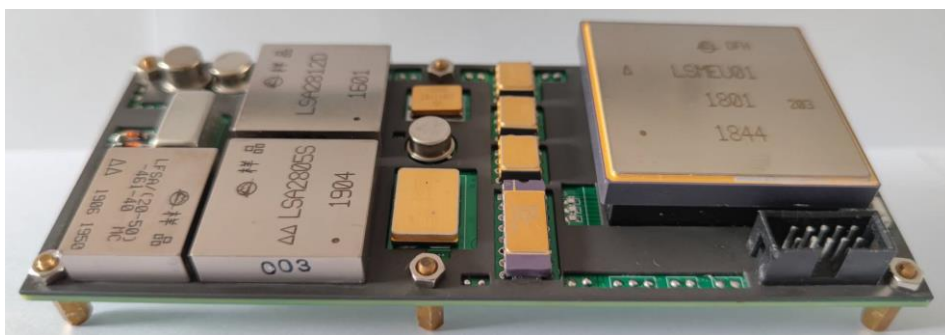


图 4.11 电路系统实物图

4.7 环境试验与结果分析

根据《CX-603 卫星环境试验要求》和《GJB1032-90 电子产品环境应力筛选方法》，液晶试验仪进行了完整的力学冲击和振动、热冲击、热循环、热真空和长达 9 个月的长周期监测试验。一方面可以验证液晶试验仪的可靠性，另一方面可以研究该 LCVR 在各种力热环境过程中的电光性能与环境之间的变化关系，为液晶试验仪发射以后的数据定标、分析和处理提供数据支持。

4.7.1 力学冲击与振动试验

运载火箭在发射过程中，瞬时重力加速度剧增，产生的冲击力从几个 g 到十几个 g 不等。同时火箭发动机在点火时，会产生短时的低频振动，火箭上升过程中也会产生随机振动，这些力学冲击对整机的力学设计与结构装调提出了较高的要求。在电路系统中，一些质心较高的器件如磁保持继电器、电压转换器、电源滤波器等高大器件，采用在电路板背面的引脚上焊接额外的直连导线

的方式，防止焊盘受力脱落，导致电路系统失效等情况发生。

为了验证以上措施的有效性，进行了完整的振动试验（正弦振动 XYZ 方向 11.9 G，随机振动 XYZ 方向 18 G）、应力筛选试验（XYZ 方向频率范围 20 Hz~2000 Hz）和力学冲击试验（XYZ 方向 1000 g）。试验过程中，设备不上电，力学试验条件如下表 4.4。

表 4.4 力学试验条件

Types	Random vibration /Hz			Sine vibration /Hz				Mechanic impact /Hz	
	20~100	100~600	600~2000	5~8	8~30	30~60	60~100	100~500	500~5000
Power spectral density	3/dB • oct ⁻¹	0.04/g ² • Hz ⁻¹	6/dB • oct ⁻¹	22 mm	7/g	16/g	15/g	12/dB • oct ⁻¹	1000/g
Direction	X、Y、Z			X、Y、Z				X、Y、Z	
Duration	4~5/min			5/min				2/times	

力学冲击和振动试验过程中，液晶试验仪不上电，等待各项力学试验完成后，再上电测试，图 4.12 中将所有力学试验后的 LCVR 光强—电压曲线、相位延迟—电压曲线与试验前进行对比，可以看出试验前后的归一化光强—电压曲线和相位延迟—电压曲线各自高度重合。通过分析力学试验前后的实际数据，在全电压范围内的相位延迟平均标准偏差小于 0.1°，说明试验前后该 LCVR 的稳定性和液晶试验仪的各项性能无明显变化。

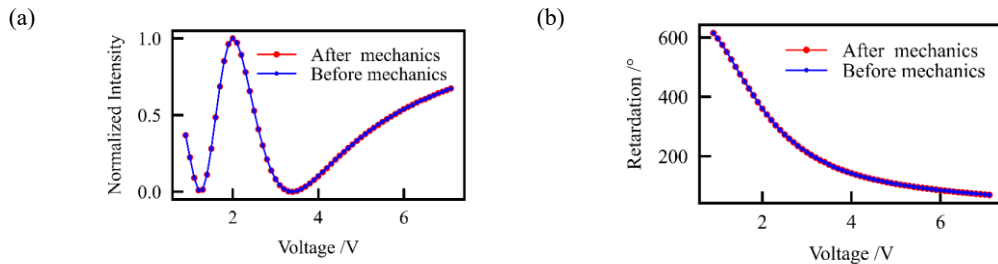


图 4.12 力学试验前后数据对比。(a) 归一化光强—电压曲线对比；(b) 相位延迟—电压曲线对比

4.7.2 热实验

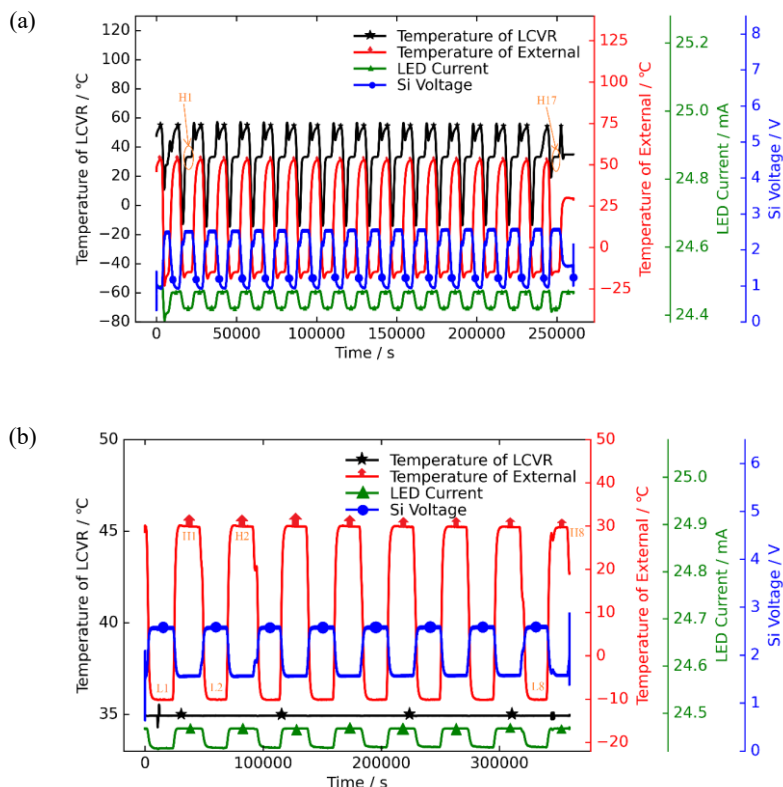
热试验是为了验证电路系统在极端温度条件下能否正常启动与工作，验证光电系统能否达稳定的热平衡。首先进行标准大气压的极端高低温冲击筛选试验（试验温度 -30 °C~+50 °C，19 个循环周期，温变速率 5 °C/分钟），验证设备的极端温度承受能力。然后进行标准大气压的温度循环试验（试验温度-

25℃~+25℃，13个循环周期，温变速率3℃/分钟），初步验证设备在工况温度下的运行情况。最后进行真空环境的温度循环试验（-25℃~+25℃，3.5个循环周期，温变速率大于1℃/分钟），进一步验证电路板在模拟星载环境下的热平衡，热试验条件如下表4.5所示。

表 4.5 热试验条件

Types of thermal test	Atmospheric pressure / Pa	Temperature range / °C	Rate / °C • min ⁻¹	High/Low temperature stay time / h	Cycles
Thermal shock	1.0	-30~+50	5	2	18.0
Thermal cycle	1.0	-25~+25	3	6	8
Thermal vacuum	$<1.3 \times 10^{-3}$	-25~+25	>1	6	3.5

为了研究热试验过程中各部件随着试验温度的整体变化规律，首先对全程的数据进行分析。液晶试验仪的热试验依次为：热冲击、热循环和热真空，将全程的LED光源电流、LCVR的驱动电压、LCVR温度、环境温度和光电探测器的电压强度值，随时间的变化绘制于图4.13的（a）热冲击、（b）热循环和（c）热真空中。图中的四条Y轴从左到右依次为：LCVR的温度、环境温度、LED电流和硅光电探测器的电压强度值。



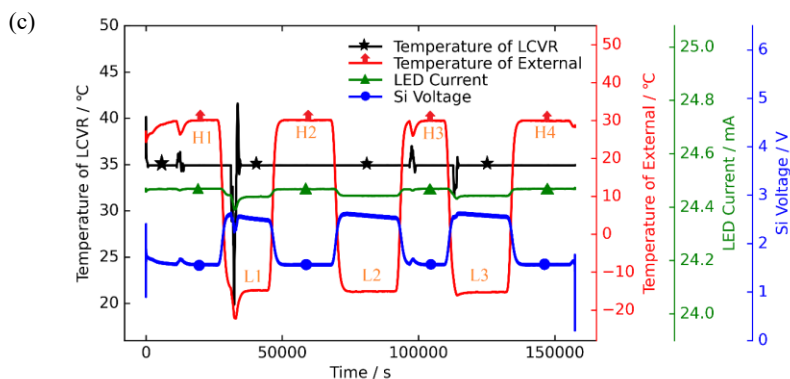


图 4.13 热试验整体曲线。(a) 热冲击；(b) 热循环；(c) 热真空

在所有热试验中，光源电流随着环境温度升高而升高（约 0.05mA），探测器采集的光强电压随着环境温度的升高而减小（约 1V）。LED 光源是半导体器件，环境温度升高，漏电流增大，同时 LED 将电能转化成光时也会发热，温度越高转化成光的能力越弱，导致光强减小。同时，根据实验结果探测器的输出电压也会随着温度升高而减小，最终导致上图中温度升高时，虽然光源电流增加，但是最终探测器的效率和光源发光效率都减小了。系统中其它器件如偏振片等带来的变化可以忽略。此外，在热循环和热真空试验中，LCVR 的恒温系统可以稳定加热到 35℃；但是热冲击试验中 LCVR 的稳定温度最高只能达到 32℃（未能达到预设的 35℃，如图 4.13（a）画圈部分所示），这一现象是由于环境温度过低和液晶试验仪加热功率受限制导致的。热冲击试验是为了发现和剔除设备中有潜在缺陷的元器件和工艺，但是该试验中各器件性能良好，系统工作正常，同时，液晶试验仪位于卫星舱内，舱内温度范围为-10~10℃，该温度下 LCVR 恒温工作正常，三个试验全部通过。

为了便于后续 LCVR 的稳定性分析，将三个试验的高低温进行分区；将热冲击时 LCVR 温度短暂的稳定区间（32℃时）以 H1~H17 标注于图 4.13（a）中；对于 LCVR 温度稳定（35℃）的热循环和热真空试验，将环境温度在高温和低温时的稳定区间分别以 H 和 L 依次编号，标注于图 4.13 的（b）、（c）中（下文的高温或者低温均指温度稳定的区间）。

4.7.3 LCVR 的高低温重复性

为了分析 LCVR 分别在高温、低温时的相位延迟重复性，将三个试验中 LCVR 的归一化强度值和相位值，在高温、低温时的数据分别绘制于图 4.14 中

(注：热冲击试验只有短暂高温稳态数据，不含低温数据)。在光强法中由于相位测量的准确性，取决于归一化强度最大值和最小值的准确性。分析图 4.12 (a) 可以发现电压 2.1V-3.5V 基本覆盖归一化强度从最大值到最小值变化的整个范围；而且，覆盖了归一化强度的变化率从小（2.1V 时）到大（2.7V 时）再到小（3.5V 时）的全过程，因此选择这两个最值附近的电压点（最大值 2.1V、最小值 3.5V）和中间电压点（中间电压 2.7V）的强度和相位数据进行绘制，能够反应 LCVR 在整个电压范围的性能变化。图中所有数据（强度、相位）均为当前 Y 的值减去该曲线平均值后的差值，横轴为各试验中高温和低温的时间编号。

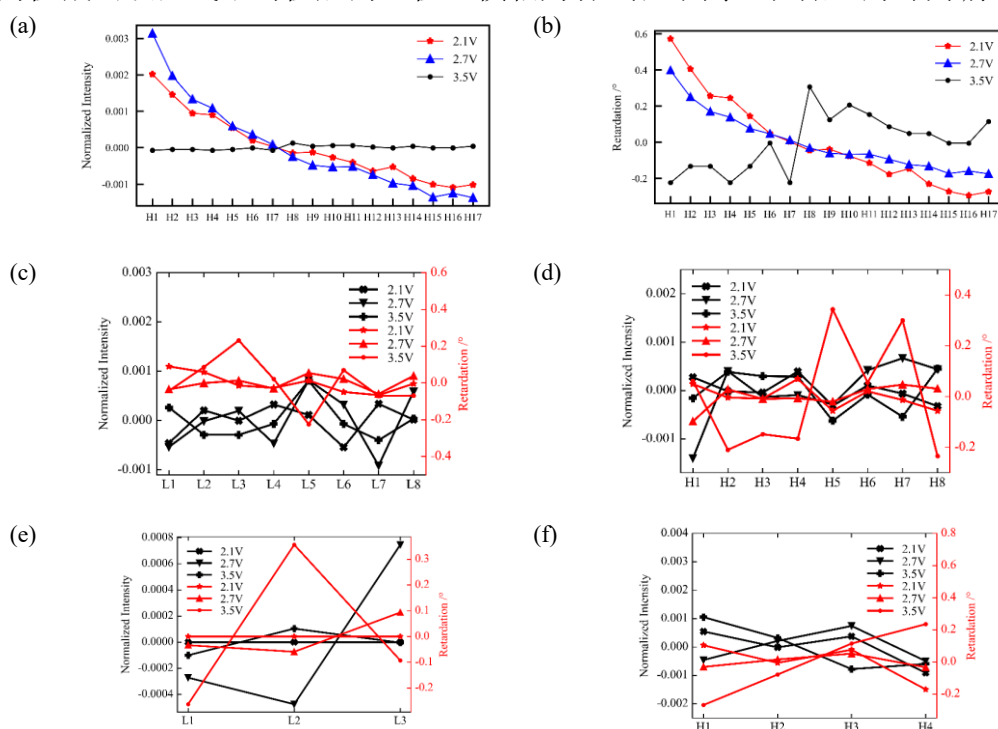


图 4.14 温度试验中归一化强度和相位的高低温度重复性。(a)(b) 热冲击试验；(c)(d) 热循环试验；(e)(f) 热真空试验

所有温度试验中，在高温或者低温时，归一化光强和相位在回到同一温度条件后都具有较好的重复性。从数据看，热冲击试验中，LCVR 在高温稳定区间三个电压曲线的相位标准偏差平均为 0.185° ；热循环试验中，高低温的相位标准偏差平均为 0.099° ；热真空试验中，高低温的相位标准偏差平均为 0.132° 。说明当 LCVR 达到一致的温度条件时，其可重复性和光电调制稳定性较好。

4.7.4 高低温相位误差校准

从图 4.13 的光电传感器的电压值可知, 虽然 LCVR 在高温或者低温稳定区间时的稳定度高, 但是高温到低温的变化过程中, 环境温度的剧烈变化会导致 LCVR 的强度-电压曲线 (或相位-电压曲线) 发生偏移, 由于星上卫星舱内不是完全恒温的环境, 因此 LCVR 的数据偏移规律与环境温度的变化关系是星上数据校准的重要依据。由于 LCVR 在任一高温或者低温具有较好的重复性, 因此将热循环和热真空试验中低温时的相位延迟-电压曲线 (L_1) 减去高温时的曲线 (H_1) 后的差值, 绘制于图 4.15 的 (a)、(b) 中。可以看出, 两幅图的变化趋势都是随着驱动电压增加逐渐减小, 热循环中高低温最大相差约为 7.5° , 热真空时最大相差约为 15° (约为前者的两倍)。

由于两个温度试验的相差曲线不同, 无法较好的拟合出相位延迟随环境温度变化的关系, 同时 LED 和探测器的温变曲率也未知, 无法利用元器件进行单项校准。但是理论上, 半导体器件的发光效率和光电转换效率与温度之间是线性关系, 将所有变化量看作一个整体变量, 那么当 LCVR 恒温工作时, 其相位延迟-电压曲线随环境温度应保持线性变化。本文选择与星载环境更接近的热真空试验数据进行验证, 方法如下:

(a) 首先将图 4.15 (b) 高低温相位差值曲线按温差进行等比例划分 (由图 4.13 (c) 可知, 低温 T_L 平均为 -15°C , 高温 T_H 平均为 30°C , 温差 $\Delta T = T_H - T_L = 45^\circ\text{C}$)。

(b) 然后, 利用已知的高低温相位延迟-电压曲线 (高温曲线为 P_H 、低温曲线为 P_L), 来预测环境温度 T 分别为 -10°C 、 0°C 、 10°C 和 20°C 时的相位延迟-电压曲线 $P_{\text{predicted}}$, 数学计算关系如下:

$$P_{\text{predicted}} = (P_L - P_H) \times \frac{(T_H - T)}{\Delta T} + P_H \quad (4.12)$$

(c) 最后, 将四个不同温度下的预测曲线、实际曲线和两条曲线的差值分别绘制于图 4.15 (c)、(d)、(e) 和 (f)。

图 4.15 中, 四个不同环境温度下的预测曲线与实际曲线基本重合, 其相位的差值散点数据均小于 1° , 说明液晶试验仪中的相位延迟-电压曲线随环境温度是线性变化。同时使用液晶试验仪在任意两个环境温度下的相位延迟-电压实测曲线, 可以预测任意温度下的曲线, 且该预测误差满足大多数的光学系

统的需求，该方法可以用于星上数据校准。

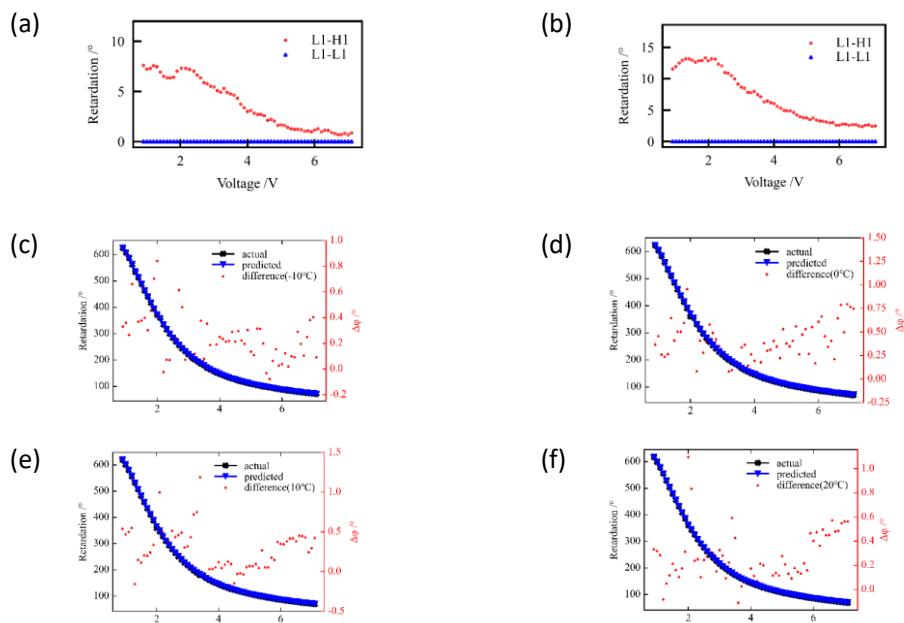


图 4.15 高低温相位误差校准。(a) (b) 热循环与热真空时高低温相位差值；(c) (d) (e) (f) 环境温度分别在 -10°C 、 0°C 、 10°C 和 20°C 时相位延迟-电压曲线的预测值与实际值的对比

4.7.5 电磁兼容试验

除了热学和力学试验要求外，电路系统还需要较好的电磁兼容能力。电路系统首先需要保证自身产生的电磁信号不会影响卫星和其它载荷的正常工作，也需要具有较好抗电磁干扰能力，防止其它载荷影响其正常工作。本文的电磁兼容设计主要包括：连接器均采用高等级器件，印制电路板的关键电路采用单点接地，电路的模拟系统和数字系统单独接地等，尽量减小传导与耦合产生的电磁干扰。

在 EMC 试验中，设备放置于微波暗室，并开机运行。如图 4.16(a)所示，在 $1\text{ GHz}\sim 20\text{ GHz}$ 频段范围内，设备的各项结果均在红色标准线以下，符合测试要求。如图 4.16(b)所示，在 $200\text{ MHz}\sim 1\text{ GHz}$ 频段范围内，部分信号点超过了红色标准线，对各个超标频率点进行采样分析后，发现这些频率点的间隔为 16 MHz ，推测是 LSMEU01 使用的 16 MHz 有源晶振产生的。虽然采取了严格的晶振电路电磁防护措施，但该时钟信号仍可能经过电路板产生传导电磁干扰，或者通过 CAN 总线的接插件形成天线辐射。这些超标信号在电路设计时可

以采用金属屏蔽罩覆盖、合理的电路接地和整机密封等方式减小其信号强度，但是 EMC 治理是系统性的工程，以上措施也可能带来其它干扰。同时，EMC 试验一般在整机设计完成后进行，因此，与卫星总体确认这些超标的频率信号不会影响卫星的正常工作。

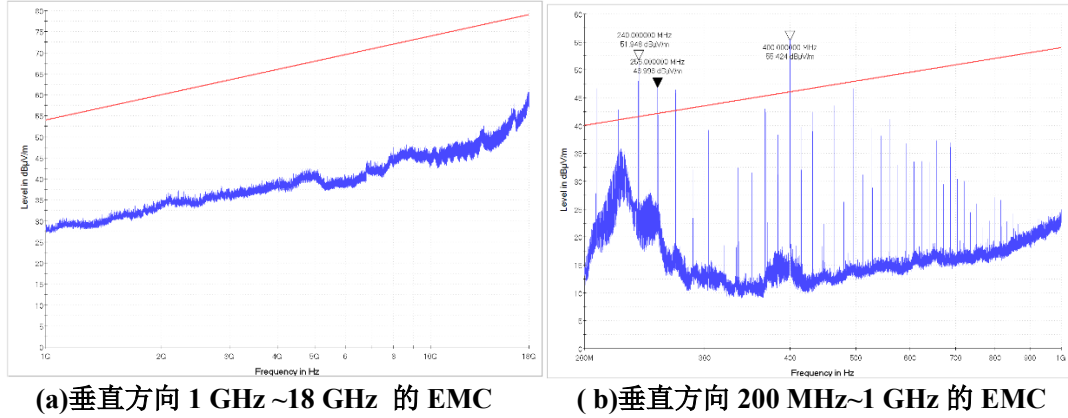


图 4.16 EMC 试验

4.7.6 长周期监测实验

为了验证液晶试验仪在星载环境下相位延迟的稳定性，需要地面 LCVR 的长周期稳定性数据作对比。在 9 个月的连续测试中，每个月抽取一组数据（每月 15 号夜间凌晨），每组数据中选择连续半个小时的归一化强度和相位，将 2.1V、2.7V 和 3.5V 曲线的 Y 值分别减去各自曲线的均值，并绘制于图 4.17 中。从图中可以看出，在 9 个月的时间归一化的强度变化为 0.006，相位变化小于 1° ，三条相位延迟曲线的标准偏差的均值为 0.27° ，说明液晶试验仪长周期运行下稳定度高，该待测 LCVR 在地面环境下的光电性能稳定。

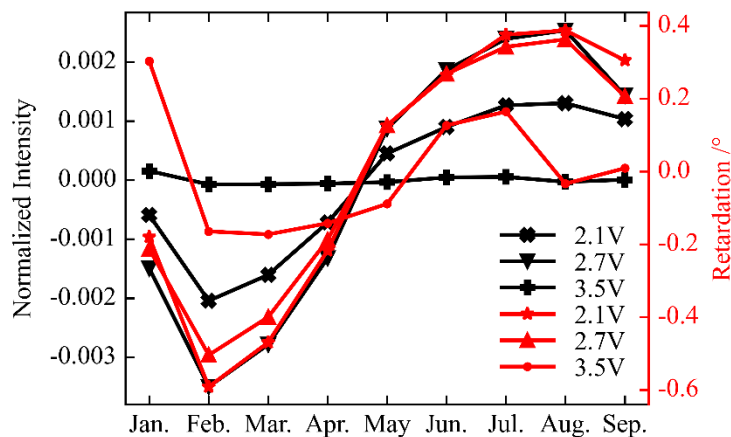


图 4.17 长周期监测下归一化强度、相位随时间的变化

4.8 本章小结

本章介绍了 LCVR 这一首飞器件的空间化光电性能测试载荷的设计与测试。在受限条件下,实现了光源发生系统、液晶调控系统、高精度液晶恒温系统和低噪声光电探测系统的集成化、微型化设计。详细介绍了星载 LCVR 的相位延迟—电压曲线的测量方法,分析了整机中影响 LCVR 相位延迟稳定性测量的关键因素,主要包括 LCVR 驱动信号的幅值和频率的稳定性、LCVR 工作温度的稳定性。根据稳定性分析的结果,对电子学系统进行了详细设计,液晶驱动系统的稳定度达到 99.3%,液晶恒温控制精度最高达到 $35\pm0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。最后对整机进行了力、热和电磁兼容试验,结果符合航天设备试验要求。通过长周期监测试验,说明电子学系统功能稳定、性能正常,待测的 LCVR 电光调制性能良好。目前,整机正在卫星总体集成测试,预计 2022 年 7 月发射。

第5章 LCVR 在磁像仪中的应用与测试

在太阳磁场测量仪器中，核心器件是窄带滤光器和偏振分析器，二者结合实现窄带偏振成像。本章的研究内容是基于侯俊峰等人研制的 FMG 偏振分析器和孙英姿等人研制的窄带滤光器，开展 FMG 偏振分析器的环境试验与驱动器测试，以及液晶滤光器的定标与试观测。

5.1 LCVR 在 FMG 偏振分析器中的应用

5.1.1 FMG 磁场测量系统简介

ASO-S 卫星是中国科学院空间科学战略性先导科技专项中第二批确定的科学实验卫星之一，ASO-S 的三个主要载荷之一的全日面矢量磁像仪（Full-disc vector Magneto Graph，简称 FMG）用于观测太阳全日面矢量磁场。ASO-S 将首次实现在卫星上观测太阳全日面矢量磁场，预计于 2022 年下半年发射。FMG 将以高时间分辨率、高空间分辨率和高灵敏度开展全日面太阳矢量磁场测量，FMG 载荷的外形如下图 5.1 所示。

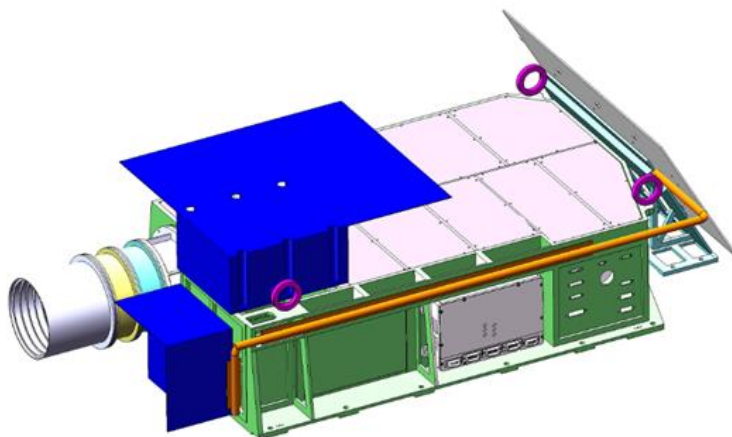


图 5.1 FMG 结构模型

FMG 的磁场测量方式为：使用机械旋转波片实现窄带滤光，以及使用两级 LCVR 实现偏振测量。LCVR 的优势是重量轻、功耗低、低压驱动、没有机械传动部件，这些优势在空间设备严格限制体积重量、功耗，以及强调安全性的环境下，液晶型偏振分析器在减小载荷重量的同时，低压驱动的特点也能保证航天产品的安全（相较于数千伏特高压的 KD*P 偏振调制）。因此，文章根据国

家天文台侯俊峰等人设计的液晶型偏振分析器正样件，开展其环境试验和驱动器性能测试，下文介绍设计完成的偏振分析器的光机系统组成。

5.1.2 偏振分析器的光机组成

如图 5.2 所示的光路图，FMG 载荷的偏振分析器由偏振调制器和偏振分光棱镜两部分组成。偏振调制器包含两个向列液晶波片（LCVR1、LCVR2）和两片封窗玻璃。第一个向列液晶波片 LCVR1 的快轴方位与 s 光方向一致，处于垂直方向，设为 0 度；第二个液晶波片 LCVR2 的快轴方位与 LCVR1 夹角为 45 度。首先通过改变电压实现对两个液晶波片的相位调制，然后通过后期数据的解调和标定获得来自太阳的真实偏振信号（Stokes 参数 I、Q、U、V）。该偏振分析器无旋转机构，结构简单，偏振调制速度快，极大的提高了磁场测量的灵敏度。由于向列液晶波片对温度敏感，因此，需要给向列液晶波片研制单独的温控，方案阶段的研制结果要求温控为 $35^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，一方面保证了向列液晶波片相位延迟的稳定性；另一方面保证了向列液晶波片响应时间在 50ms 以内。偏振调制器中封窗确保向列液晶波片的温度稳定，且有益于地面的定标测试。

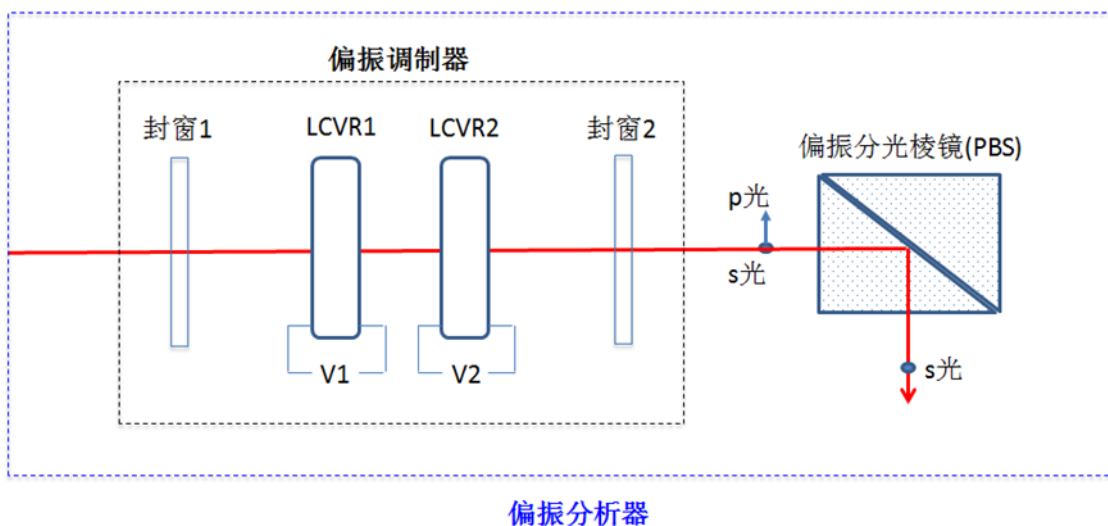


图 5.2 偏振分析器光路图

在图 5.2 中，光束经过偏振调制器调制后，再通过偏振分光棱镜将 s 光和 p 光分开，p 光进入后续的四象限探测器用于稳像系统控制；s 光进行后续的 Lyot 滤光器，用于太阳全日面矢量磁场测量。根据 FMG 科学观测需求，偏振

分析器为全偏振模式，全偏振模式对偏振分析器的偏振参数要求如表 5.1 所示

表 5.1 用于矢量磁场测量的全偏振模式

LCVR1		LCVR2		偏振片角度	待采集的信号
方位角/ $^{\circ}$	延迟量/ $^{\circ}$	方位角/ $^{\circ}$	延迟量/ $^{\circ}$	方位角/ $^{\circ}$	
0	0	45	0	0	$0.5*(I+Q)$
0	0	45	180	0	$0.5*(I-Q)$
0	90	45	90	0	$0.5*(I+U)$
0	90	45	270	0	$0.5*(I-U)$
0	0	45	90	0	$0.5*(I+V)$
0	0	45	270	0	$0.5*(I-V)$

偏振分析器分为偏振调制器和偏振分光棱镜两部分。其中偏振分光棱镜放置在光学系统中。偏振调制器光学元件分布如图 5.3 所示，其中 LCVR 的外形尺寸为 46mm*40mm*9.2mm，封窗玻璃尺寸为 $\varnothing 37\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 。

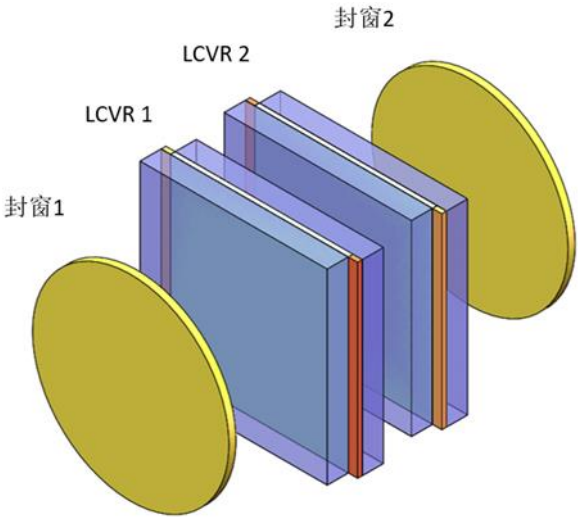


图 5.3 偏振调制器光学元件

偏振调制器结构如图 5.4 所示，体积为 $110 \times 54 \times 116\text{mm}^3$ ，重量约 900g（不含螺钉），它包括两个可变延迟的液晶波片及温度控制系统。

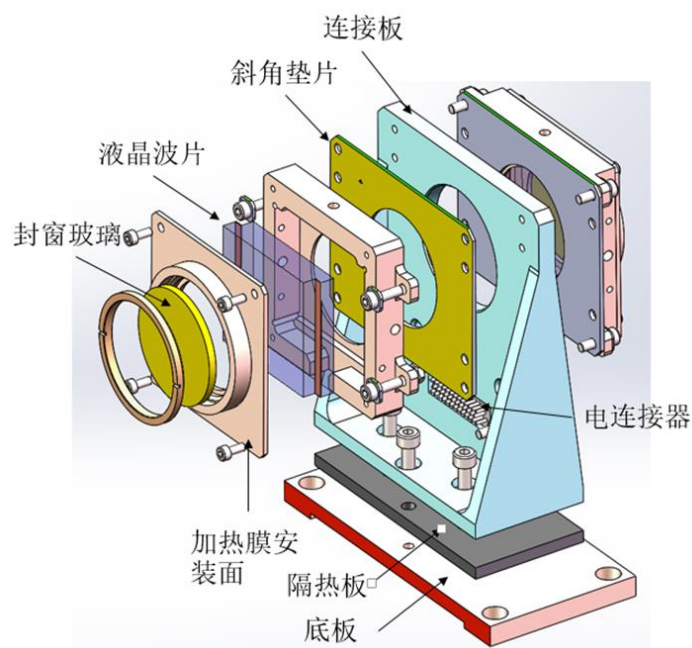


图 5.4 偏振调制器结构示意图

偏振调制器的正样件如下图 5.5 所示。

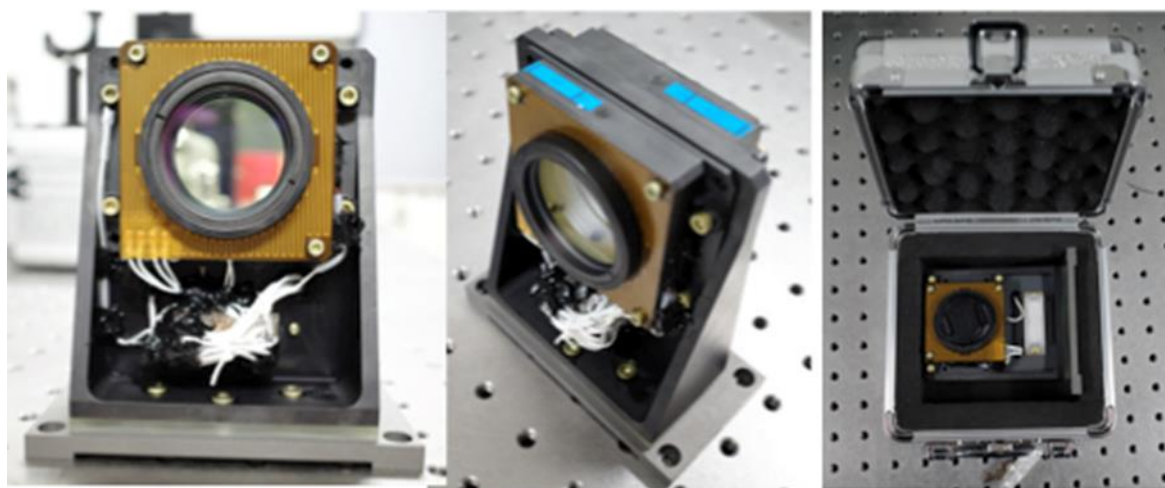


图 5.5 偏振调制器实物

5.1.3 环境试验与结果分析

在偏振调制器的正样设计完成后，本文开展了该正样件产品的应力筛选试验。根据 ASO-S 卫星的试验大纲，试验内容包括力学试验和温度循环试验，以此初步检验偏振调制器适应空间复杂环境的能力。

5.1.3.1 力学试验

力学试验的主要目的是验证偏振调制器经过各种力学试验环境后，各项光

电性能是否正常，试验条件如下表 5.2 所示。

表 5.2 随机振动试验条件

频率范围/Hz	功率谱密度	总均方根加速度	试验方向	试验时间
20~100	+3dB/oct			
100~600	0.04g ² /Hz	6.23gr.m.s	X、Y、Z 三轴向	5min/轴向
600~2000	-6dB/oct			

力学试验在航天五院北京卫星环境工程研究所进行，力学试验中测试了两组偏振调制器。其中 Z01-1 为正样交付件，Z01-2 为辅助测量件。四个力学传感器分别用于两组偏振调制器顶部和底部的振动测量，其中 1#、2# 分别用于 Z01-1 的底部、顶部振动测量；3#、4# 分别用于 Z01-2 的底部、顶部振动测量。此外，Z01-1 偏振调制器底部增加了隔热垫，保持与将来装机的工作状态一致；Z01-2 偏振调制器底部直接与振动平台连接。力学传感器、隔热垫的安装如下图 5.6 所示。整个测试流程为 x、y、z 方向依次振动，每个方向进行扫频—随机振动—再扫频。

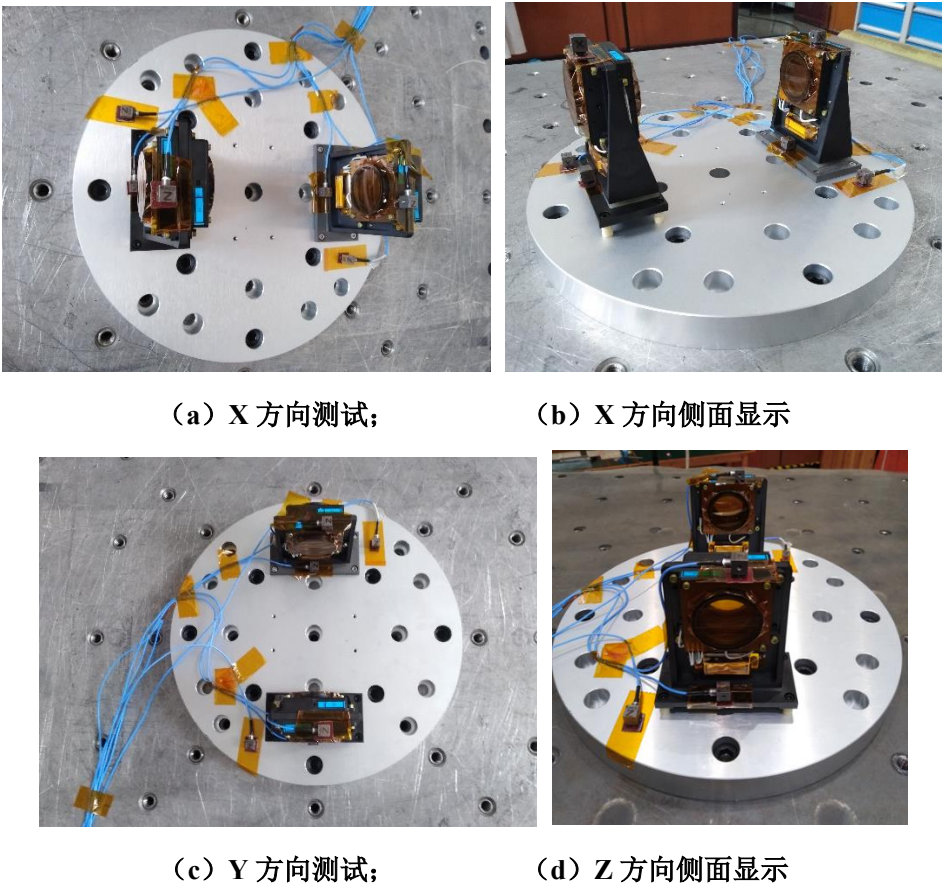


图 5.6 力学试验

力学试验 XYZ 三个方向的扫频结果如下图 5.7、图 5.8 和图 5.9 所示。其

中，x 方向的振动最大；而且，Z01-1 正样件底部加隔热垫片后，一阶振动频率从 413Hz 降低到 236Hz。三个方向的力学随机振动后，观察偏振调制器的 LCVR 和封窗玻璃外观良好，LCVR 内部清晰无破损。

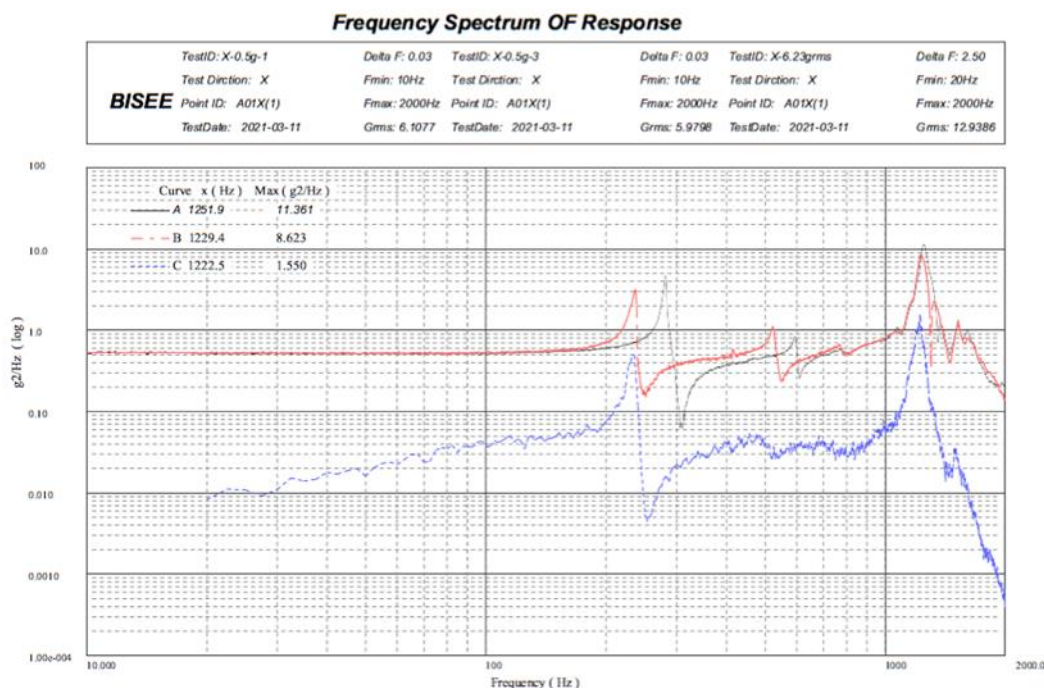


图 5.7 x 方向随机振动前后扫频：测量点 1#，对应 Z01-1 底部

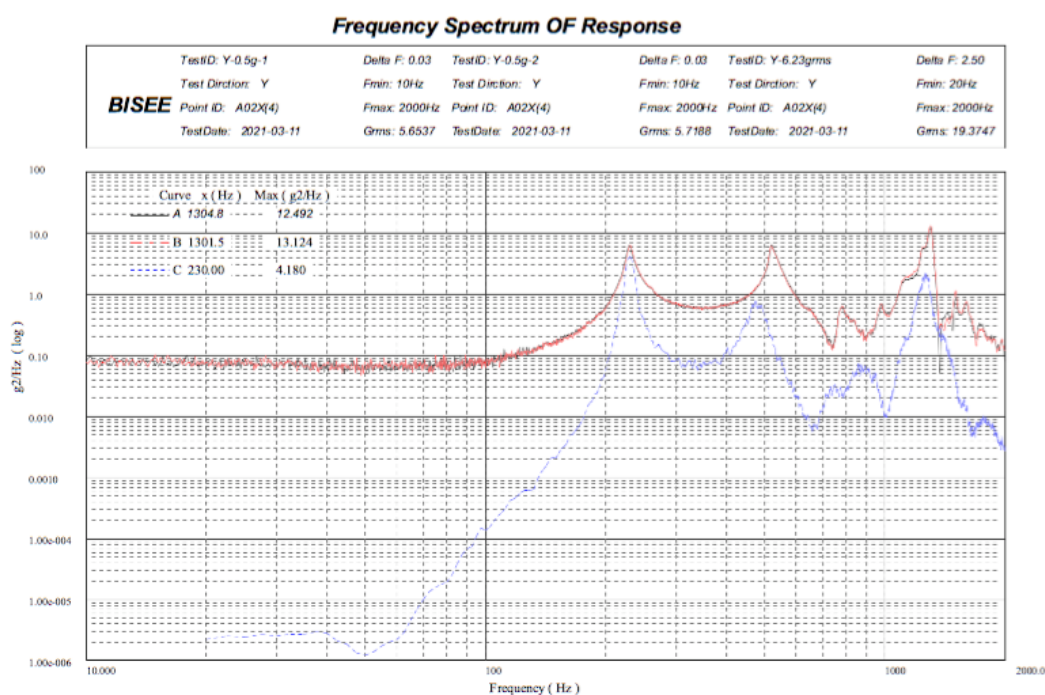


图 5.8 y 方向随机振动前后扫频：测量点 2#，对应 Z01-1 顶部

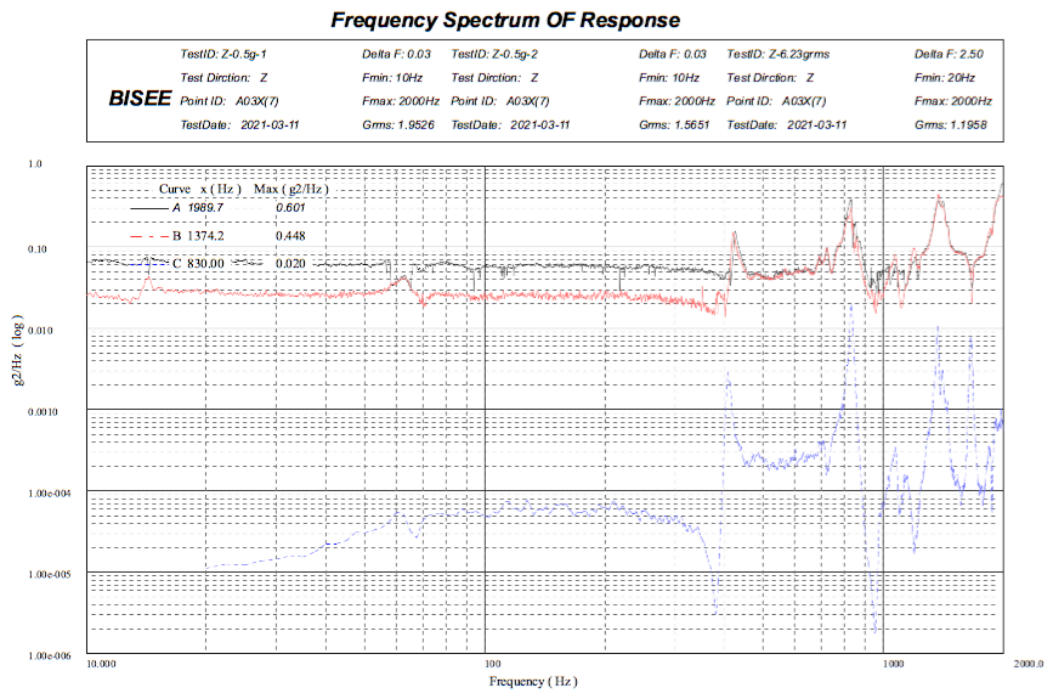


图 5.9 z 方向随机振动前后扫频：测量点 3#，对应 Z01-2 底部

5. 1. 3. 2 温度循环实验

温度试验的目的是考验航天产品在环境温度快速变化时，自身性能是否发生破坏性变化，能否正常工作。试验采用快速温变高低温试验箱，温度循环试验的温度范围： $-10.0^{\circ}\text{C}\sim+55.0^{\circ}\text{C}$ ；温度控制箱的升降温速率： $\geq 5.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ；在试验过程中高低温的保持时间：低温保持 2h，高温保持 1.5h；整个温度循环的次数为 16 次。温度循环试验在中科院空间科学中心进行了热循环试验，如下图所示。

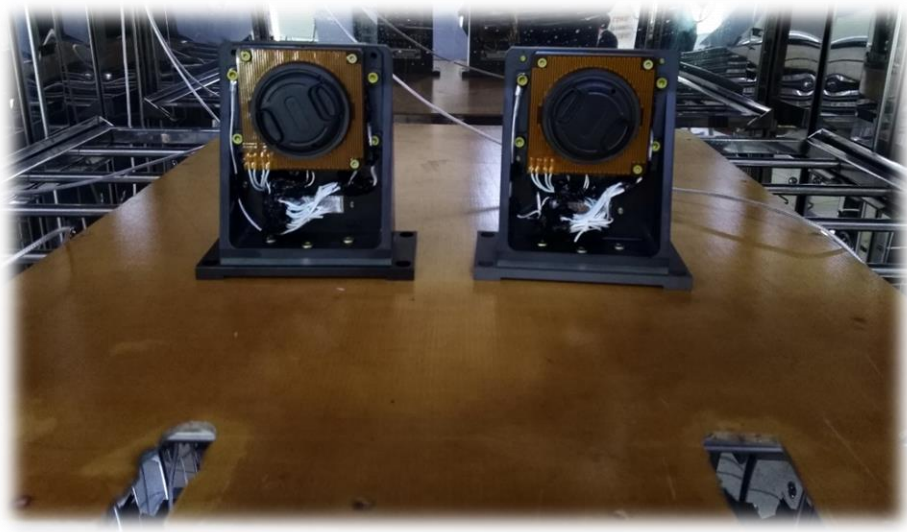


图 5.10 热循环试验现场图

温度循环试验结束后，偏振调制器外观无破损、液晶内部没有产生气泡，试验前后光学性能没有明显变化。

5.1.3.3 环境试验结果分析

在经过环境试验后，需要对偏振调制器 Z01-1 的电光性能进行测试，主要测试偏振调制器内部两片 LCVR 热试验前、热试验后、力学试验前后的相位延迟—电压曲线是否变化。如下图 5.11 和图 5.12 所示，测试结果表明，应力筛选试验前后，偏振调制器内两片 LCVR 光电性能未发生明显变化，各项性能趋于稳定，偏振调制器的电光性能无明显变化，验证了偏振调制器设计可靠，满足交付条件。

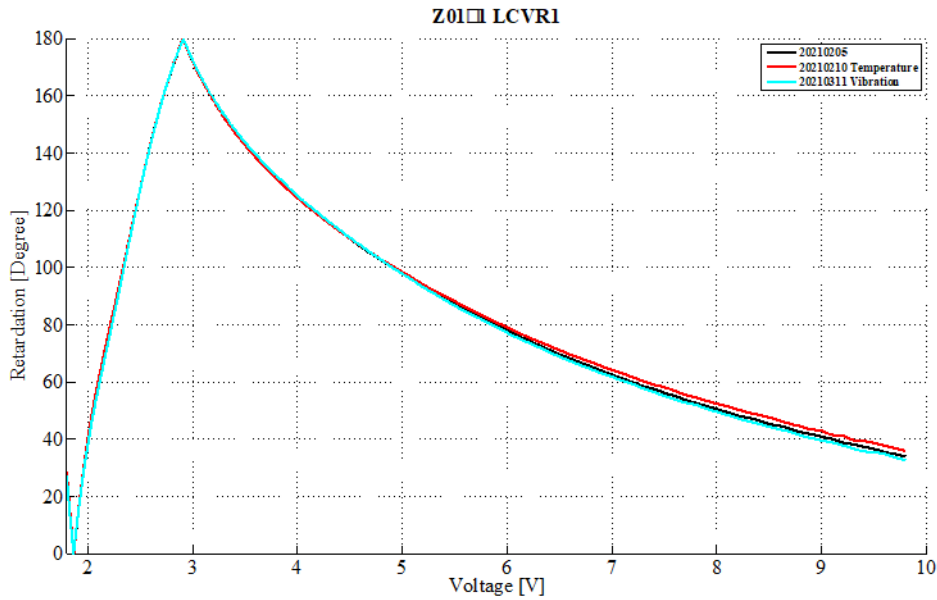


图 5.11 偏振分析器 LCVR1 的相位延迟—电压曲线

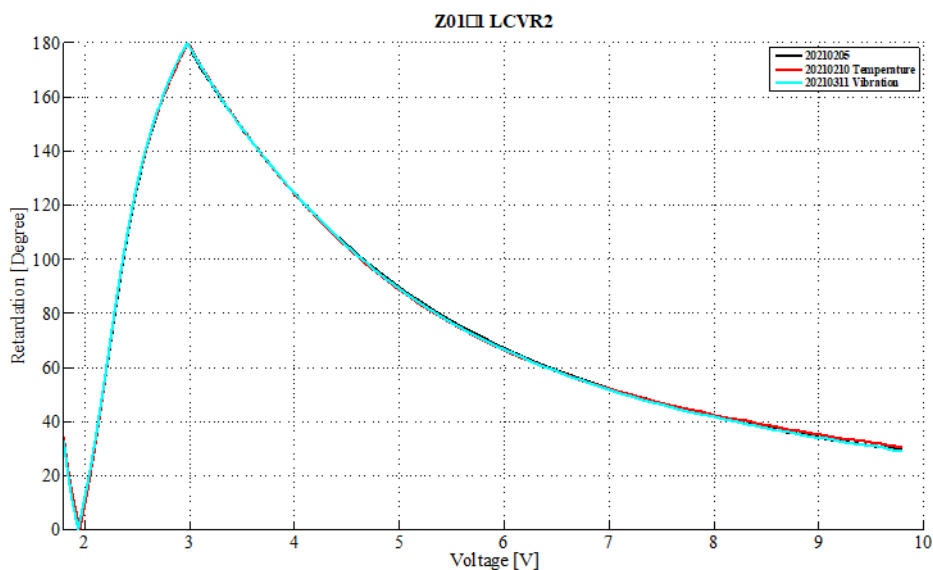


图 5.12 偏振分析器 LCVR2 的相位延迟—电压曲线

5.1.4 驱动器性能测试

在完成偏振调制器的应力筛选试验后，本文对中国航天九院第 771 研究所研制的偏振调制器的控制器进行性能测试，以验证该设备可以较好的驱动偏振调制器进行工作。主要测试内容包括：输出电压的准确性、输出信号频率、输出信号沿跳变时间，测试时对两片 LCVR 的驱动输出通道均进行监测。

首先开展了输出电压准确性的测试，驱动电压的幅值直接决定了 LCVR 的有效相位延迟量。测试时，通过星务软件分别设置偏振分析器调制为+Q

（LCVR1：3.65V、LCVR2：2.42V）模式、-Q（LCVR1：3.65V、LCVR2：3.35V）模式、+U（LCVR1：6.34V、LCVR2：2.80V）模式、-U（LCVR1：6.34V、LCVR2：5.95V）模式、+V（LCVR1：3.87V、LCVR2：2.91V）模式、-V（LCVR1：3.87V、LCVR2：6.60V）模式。使用 RIGOL MSO8000 系列示波器进行测试，使用示波器的有效面积计算值进行数据记录，Q 模式下的测试画面如下图 5.3 所示，将 10 次测试采集的电压平均值和波形频率平均值录于下表 5.3。

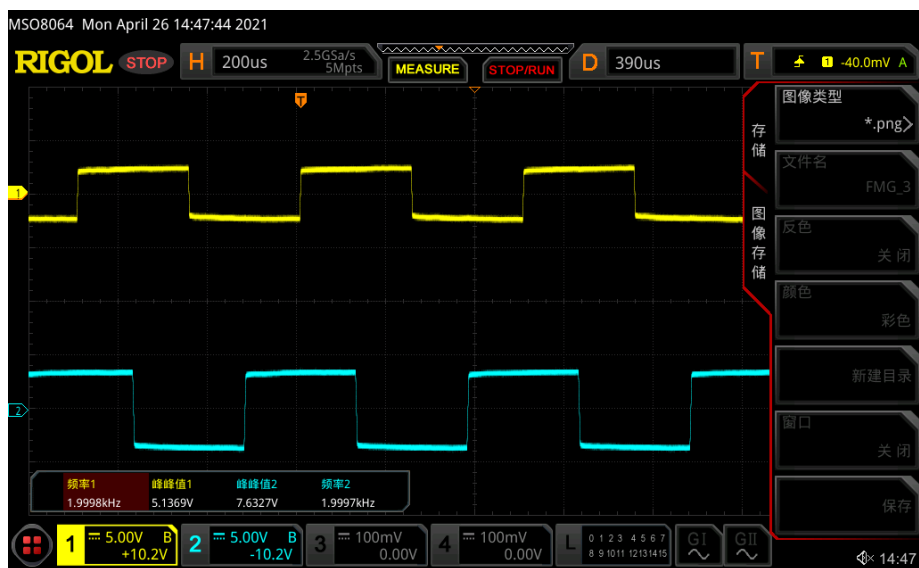


图 5.13 Q 模式下驱动器频率与电压测试

表 5.3 偏振分析器驱动器输出电压与频率测试

调制模式	LCVR1		LCVR2		实测频率/KHz
	设定值 / V	测量值 / V	设定值 / V	测量值 / V	
+Q	3.6500	3.6509	2.4200	2.4205	1.9998
-Q	3.6500	3.6499	3.3500	3.3496	1.9999
+U	6.3400	6.3398	2.8000	2.7992	1.9997
-U	6.3400	6.3399	5.9500	5.9508	1.9999
+V	3.8700	3.8702	2.9100	2.9104	1.9997
-V	3,8700	3.8701	6.6000	6.5993	1.9998

从表 5.3 可知，在所有调制模式下，驱动器的电压输出准确度平均达到 99.97%，频率准确度平均达到 99.9%，与本文设计的液晶驱动器性能基本保持一致。完成以上两项测试，还需要测试驱动信号的沿跳变时间，确保驱动器的输出性能不会影响液晶的响应时间。使用 RIGOL MSO8000 系列示波器的时间测量工具，分别测试两个信号通道方波的上升沿时间和下降沿时间，测试画面如下图 5.4 所示，从 1V 到 9V 的 10 次测试平均值如下表 5.4 所示。

表 5.4 沿跳变时间测试

输出电压/V	下降时间/us	上升时间/us
1	1.88	2.46
2	3.82	4.21
3	5.12	6.03
4	7.42	8.31
5	8.99	9.43
6	11.21	12.06
7	12.97	13.84
8	14.51	15.74
9	14.98	15.89

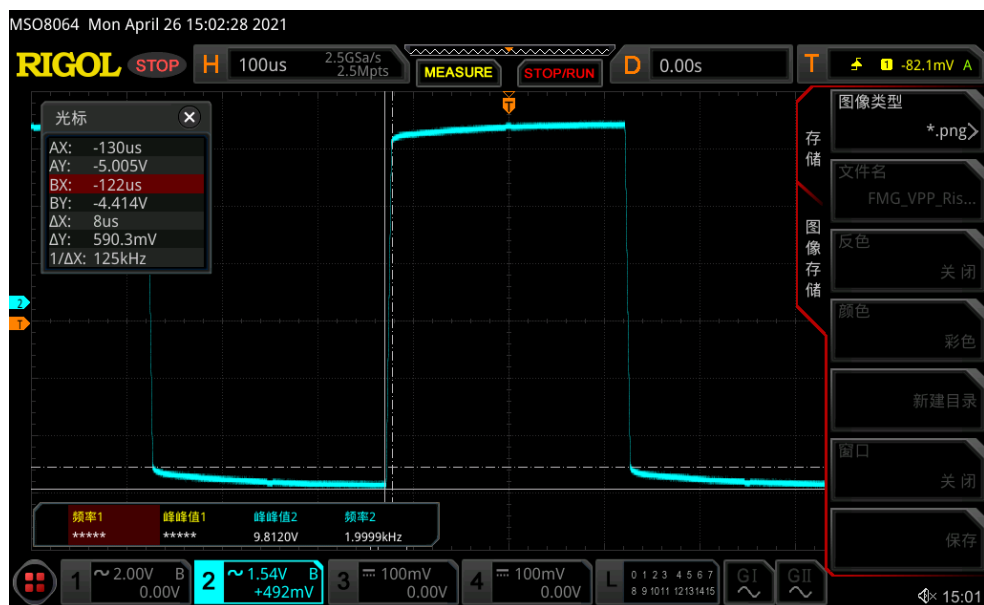
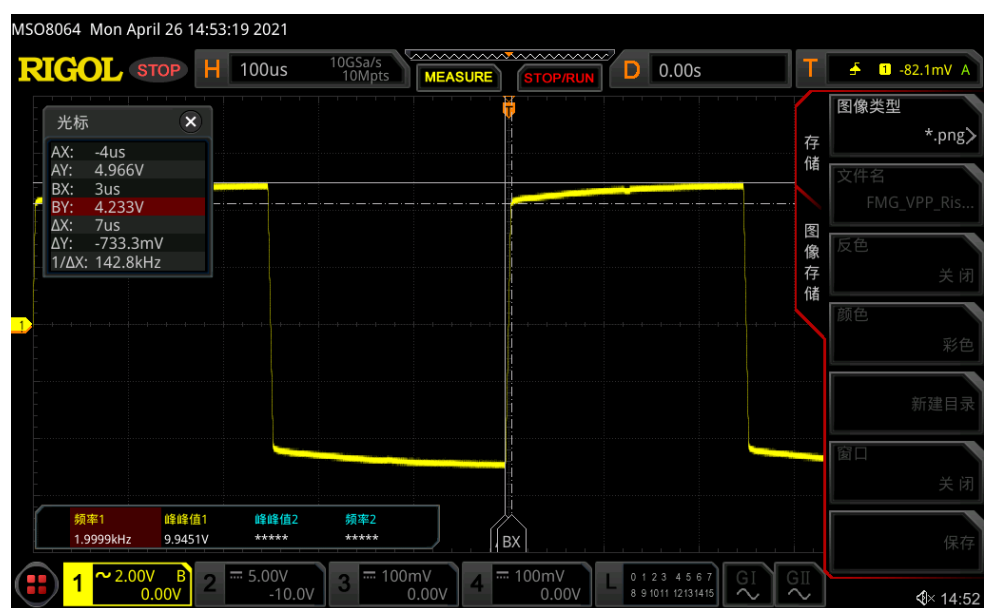


图 5.14 LCVR 驱动器的 1 通道、2 通道上升沿时间测试

根据表 5.4 的数据结果,在驱动器接近满量程输出时,最大沿跳变时间约为 16 μ s,远远小于液晶响应时间(ms 级),符合设计需求。整体来看,根据输出电压、频率和沿跳变时间的测试结果可以看出,偏振调制器的驱动器性能稳定,输出信号符合 FMG 的 LCVR 调制需求。

5.2 LCVR 在地基磁场滤光器的应用

子午工程二期是“十三五”国家大科学基础工程。该工程的主要目标是用于灾害性空间天气的监测,保障航空航天、军事、卫星通信的安全。在该工程中,孙英姿等人在国内首次将液晶器件用于全日面矢量磁像仪的滤光器中,该磁像仪采用 7 级 Lyot 液晶滤光器和 KD*P 偏振分析器实现磁场的测量,用于全日面太阳磁场监测、速度场监测和色球活动的监测,可以提供以下观测数据:

1) 光球层 FeI λ 5324.19 $\text{\AA}$ 全日面矢量磁图、色球层 H β λ 4861.34 $\text{\AA}$ 全日面纵向磁图;

2) 光球层 FeI λ 5324.19 $\text{\AA}$ 、色球层 H β λ 4861.34 $\text{\AA}$ 的全日面速度场图;

3) 光球层 FeI λ 5324.19 $\text{\AA}$ 、色球层 H β λ 4861.34 $\text{\AA}$ 的全日面单色像图。

磁场滤光器的技术指标为:滤光器带宽 0.1 $\text{\AA}$ 、滤光器级数 7 级、LCVR 数量 7 片。

5.2.1 液晶滤光器的光机结构简介

滤光器是磁像仪的核心部件,采用基于 Lyot 的双折射滤光器作为分光系统,它的最大优点是可以直接得到太阳二维图像,将观测效率提高到几分钟的量级,因而获得二维单色像及磁图的时间分辨率远远高于光谱仪型,对于太阳预报及监测研究极为有利,极大的提高了时间分辨率。从结构上划分,滤光单元由偏振光学系统、LCVR 电光系统、恒温系统和干涉滤光片等组成,滤光器的剖面组件如下图 5.15 所示,滤光器单级实物如下图 5.16 所示。

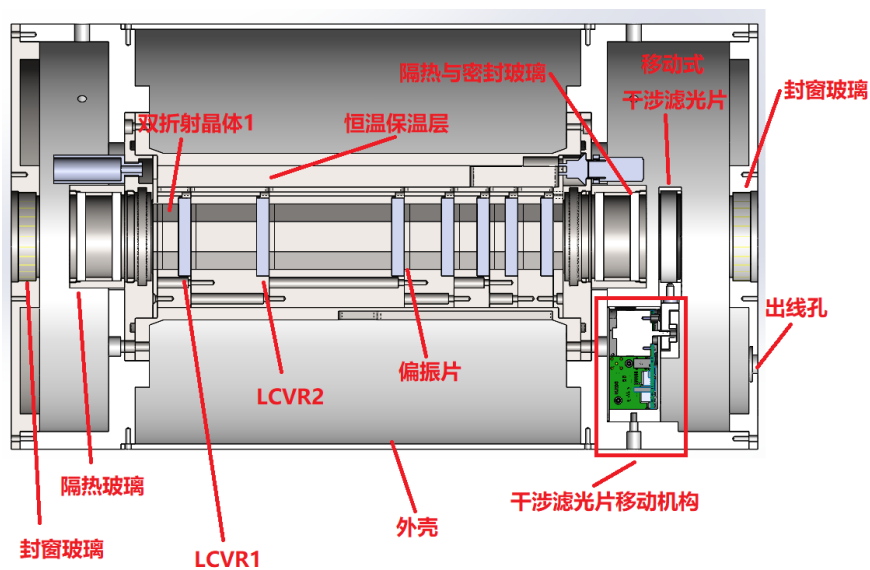


图 5.15 液晶滤光器组件剖面图



图 5.16 7 级液晶滤光器各单级实物

为了保证液晶滤光器工作温度稳定，需要在外层增加加热膜、保温层和隔热层。滤光器加装加热膜、保温层和隔热层之后，实物如下图 5.17 所示。



图 5.17 装配完成的液晶滤光器实物

5.2.2 滤光器定标系统设计

磁场滤光器经过实验室光机装调后，除了在实验室进行单级 LCVR 标定外，由于多级滤光器之间的相互作用和元器件加工、装配误差等，还需要进行整机装配后的整体各级滤光器液晶电光曲线标定。

传统的整体标定方法中，为了提高标定速度需要两名操作员，其中一人在 A 计算机设置待标定级数的滤光器的 LCVR 电压，另一名操作员控制 B 计算机在设置完后同步使用面阵 CCD 采集光强数据。该方法依赖于两名操作员的默契程度，由于人为操作误差，容易导致设定的电压数据与采集的强度数据不匹配，使得数据错位。一级 LCVR 以 0.01V，从 0V 增加到 10V 需要调整电压并采集图像数据 1000 次，在熟练操作的情况下，一次需要 5s，那么完成单级滤光器定标需要 82 分钟。

如果采用室内光源，1.5 小时的采集时间勉强可以接受，但是 Lyot 滤光器的低透过率会使得采集的图像数据信噪比大幅度下降，造成定标误差；如果采用定天镜的太阳光，那么 1.5 小时内太阳光的强度由于云层等会有较大的不规则波动，导致采集数据无法使用，因此必须缩短光电采集的时间，提高液晶驱动器与图像采集器的同步速度。

为了实现自动化电光曲线测量，本文对光谱房的测试光路进行了重新设计，标定实验在国家天文台怀柔太阳观测基地的光谱房进行，使用室外定天镜进行引光，现场设备主要包括：平行光管、减光板、反射镜、液晶滤光器、多

通道液晶驱动器、液晶恒温控制器、可调光栅、线阵 CCD 和数据采集计算机，测试现场如下图 5.18 所示。

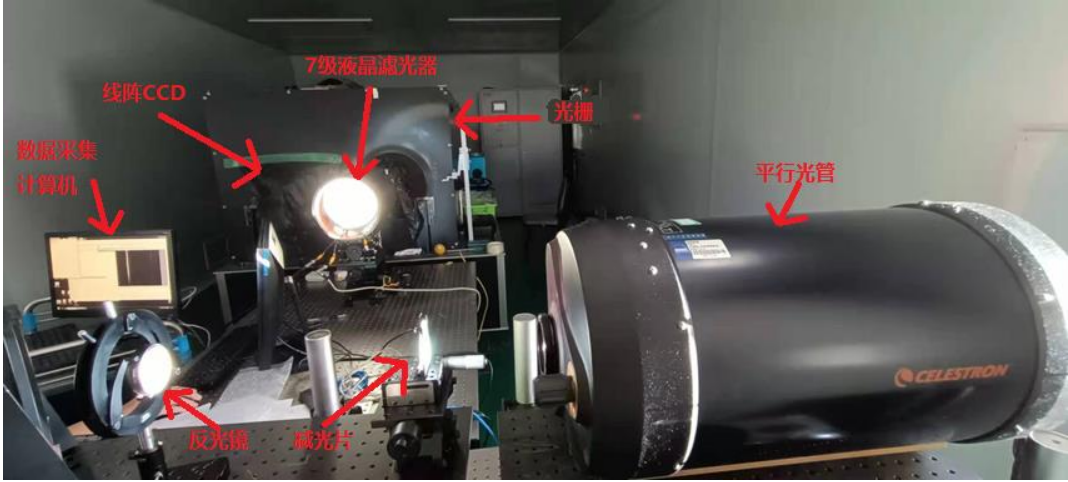


图 5.18 滤光器标定测试

由于现有光谱房的图像传感器 DALAS 公司的面阵 CCD 没有可用的开放软件包，通过换用 ALPHALAS 公司的线阵 CCD (S3600-D) 后，可以使用 LabView 的开发接口获取图像数据。S3600 包含的基于 LabView 的 API 接口如下图 5.19 所示。

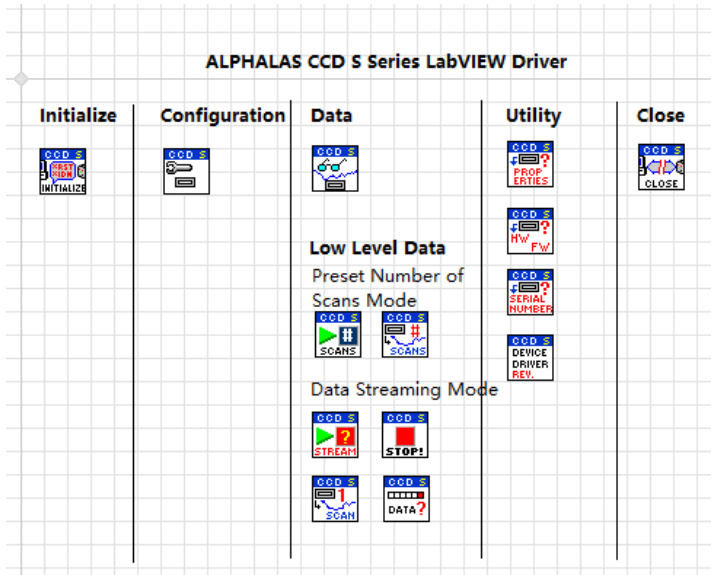


图 5.19 S3600-D 线阵 CCD 的 LabView 接口

在图 5.19 中，基于高层次的 CCD 数据获取的流程是：初始化、CCD 配置、获取数据、关闭设备。其中初始化子 VI 负责将 CCD 的 USB3.0 高速接口自动配置到 LabView 的输入端口；CCD 配置子 VI 包括曝光时间、叠加帧数、触发模式、暗电流偏置的设置；数据获取子 VI 可以直接读出配置完成并触发后

的一维线阵强度数据；关闭设备子 VI 负责安全关闭 CCD，防止进程占用。

为了与本文开发的多通道液晶驱动器联合实现自动标定数据采集，本文开发了基于 VISA 的 LabView 驱动程序，如下图 5.20 所示。初始化子 VI 完成串口 VISA 的端口初始化，并将所有输出通道设置为 0V；关闭子 VI 负责安全关闭串口，并将所有输出通道设置为 0V；简单插值子 VI 负责从电压——延迟曲线标定后的文本文件读取所需要设置的相位并转换为电压数据；设置电压子 VI 负责将各个液晶驱动通道设定为目标电压值；相位适配负责将滤光器波带整移过程中在 $0\sim 360^\circ$ 范围内的限位数据转换到该区间，进一步输出到简单插值子 VI。



图 5.20 多通道液晶驱动器 LabView 驱动子 VI

完成液晶驱动软件和 CCD 驱动软件的准备工作后，为了尽量使得定标过程中太阳光强基本不变，需要进一步缩短数据采集时间，根据前期的数据定标流程进行优化。具体为：在液晶数据变化剧烈的低压区（ $0\sim 4\text{V}$ ），驱动电压点步进值为 0.02V ，在液晶数据变化缓慢的高压区（ $4\sim 10\text{V}$ ），驱动电压步进值增大为 0.1V 。定标软件系统的工作流程是：液晶驱动器间隔固定时间从 0V 到 10V ，按照电压步进值递增设置液晶通道 1，其余 6 级滤光器的液晶统一设定为 0V ，每次设置电压后 CCD 经过曝光自动存储当前光强数据；然后依次从液晶通道 1 到液晶通道 7，LabView 软件界面如下图 5.21 所示，核心程序如下

图 5.22 所示。

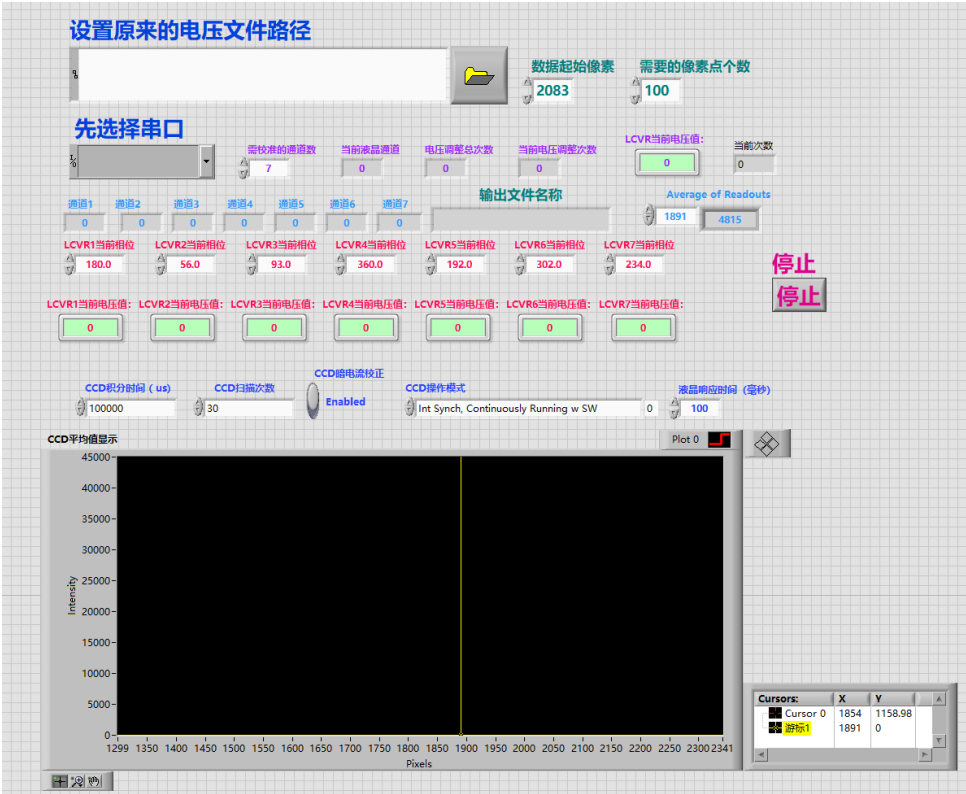


图 5.21 基于 LabView 的液晶滤光器整机自动定标软件界面

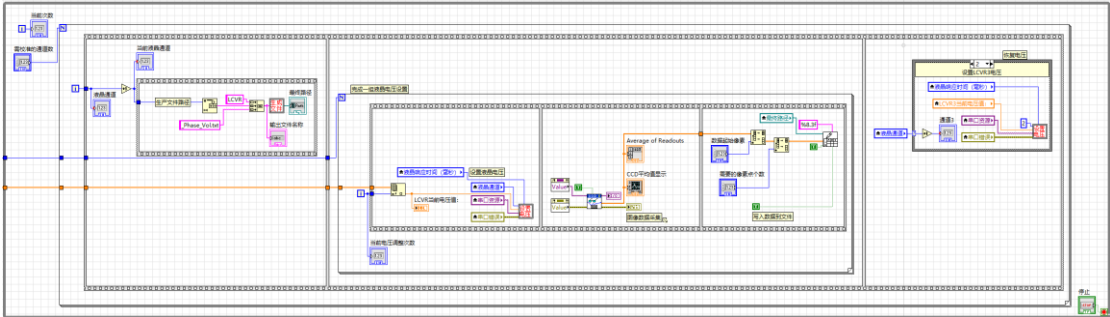


图 5.22 电压标定 LabView 核心程序

使用上述的定标模式，CCD 曝光时间 80ms，叠加 5 张，液晶响应时间设置为 50ms，完成一组 LCVR 定标的 260 个数据约需要 130 秒，完整整组滤光器定标测试耗时 15 分钟，相较于原来手动定标 7 组需要耗时 572 分钟相比，该自动化定标方案时间效率提高了 38 倍，极大的减小了太阳光被云层等干扰等情况，提高了测量效率的同时，也提高了数据质量。由于篇幅原因，图 5.23 展示了部分整机定标前后的 LCVR 电光曲线变化，可以看出整机定标与原始的单片液晶定标有数据差异。

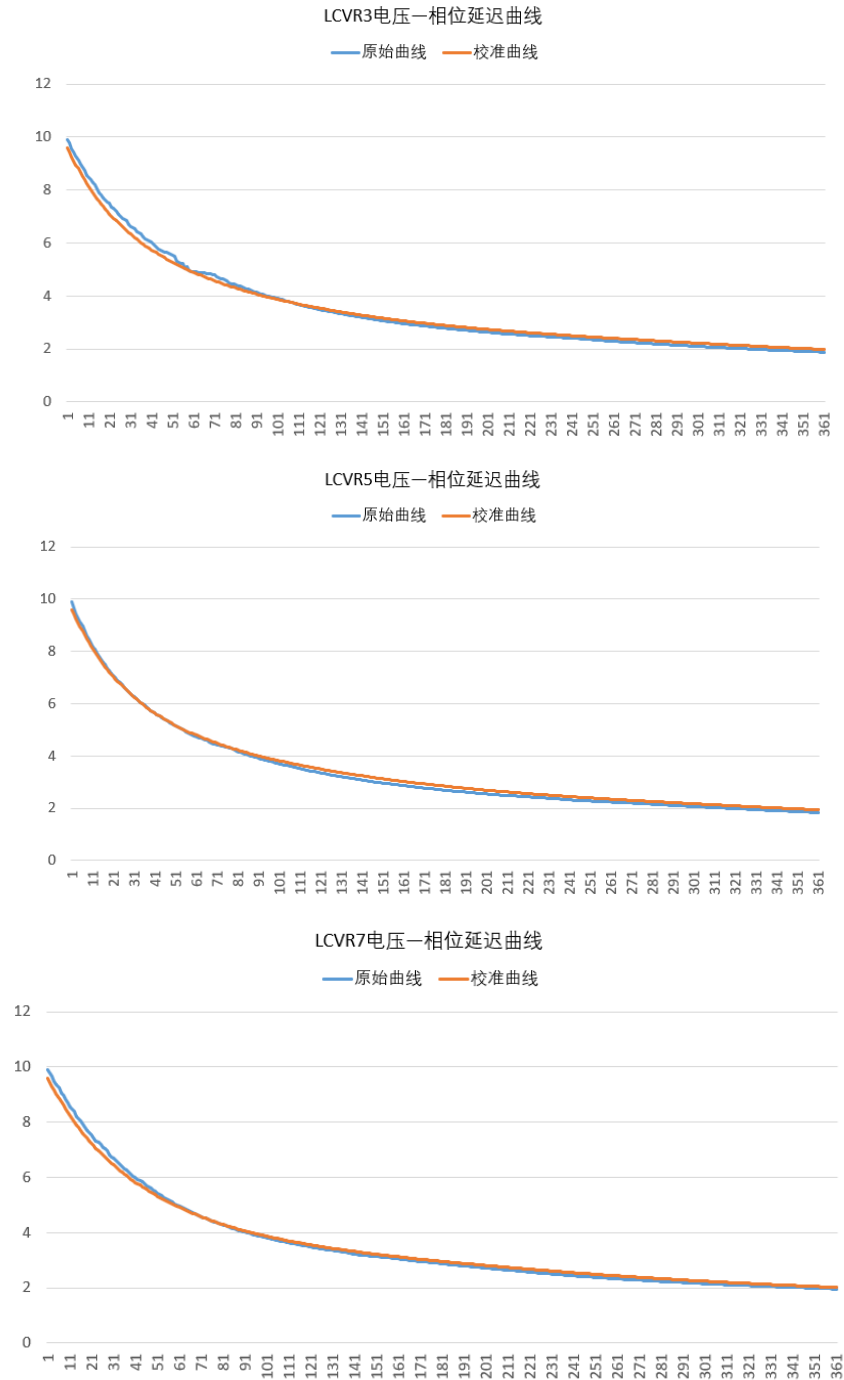


图 5.23 整机定标前后部分 LCVR 电光曲线变化

在完成整机定标后，本文设计了波带整移扫描程序，用于获取太阳光谱数据，基于 LabView 的软件界面如下图 5.24 所示。

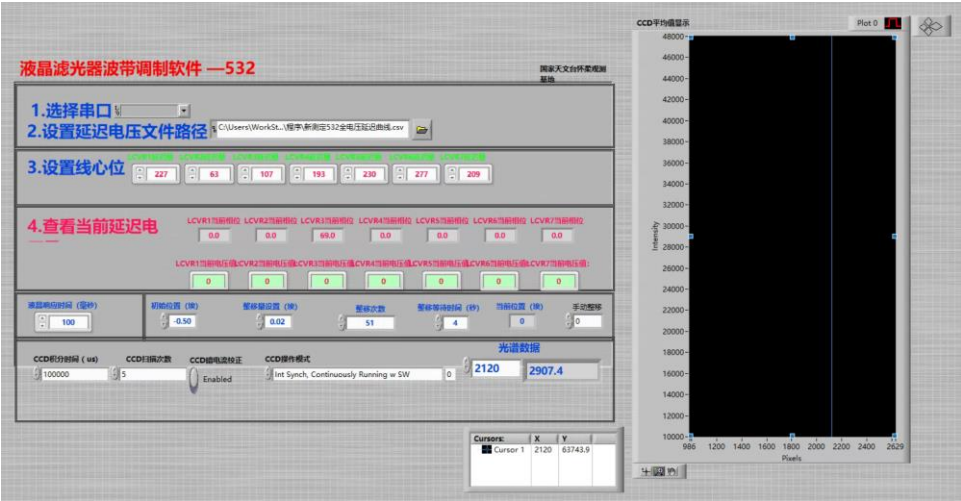


图 5.24 523nm 波段滤光器谱线扫描 LabView 程序界面

获取的太阳光谱轮廓如下图 5.25 所示。

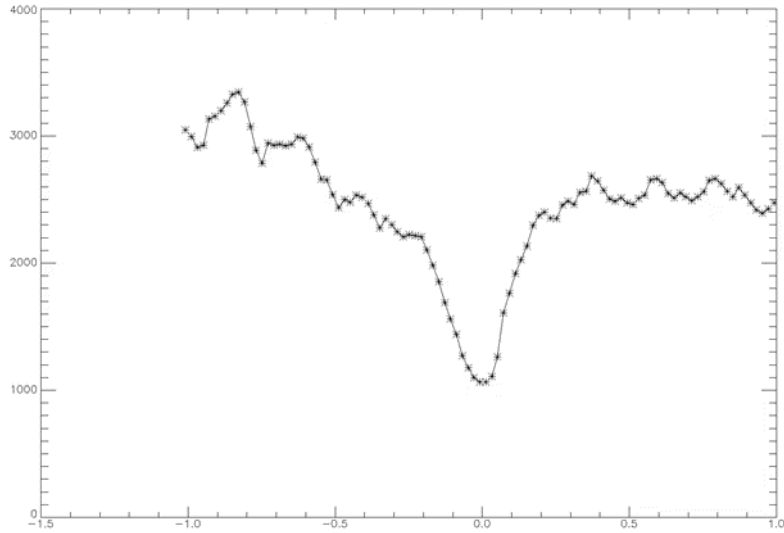


图 5.25 整机定标后 532nm 谱线扫描

5. 2. 3 滤光器试观测

完成滤光器的整体标定后，需要通过实际的试观测验证滤光器的窄带滤光性能是否符合要求。将滤光器放置到怀柔太阳观测基地的 SM 望远镜进行试观测，测试时使用 SM 望远镜原有的 KD*P 电光偏振分析器，配合多通道液晶驱动器进行窄带 Stokes 参数测量，测试现场如下所示。



图 5.26 在 SM 望远镜进行磁场试观测

试观测时，首先进行了一组谱线轮廓的扫描，验证上一节滤光器定标结果是否准确。扫描结果如下图 5.27 所示。

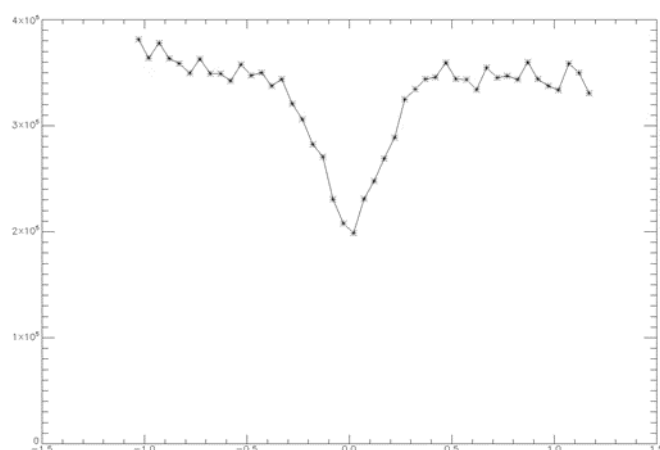


图 5.27 滤光器在 SM 望远镜扫描 532.4nm 谱线轮廓

图 5.27 的扫描结果与图 5.25 基本一致，液晶滤光器工作正常，性能好。打开面阵 CCD 配合 KD*P 进行磁图采集结果如下图 5.28 所示。从图像中可以比较清晰的分辨出太阳活动区域以及其它较为精细的结构，说明该液晶滤光器基本完成设计目标。

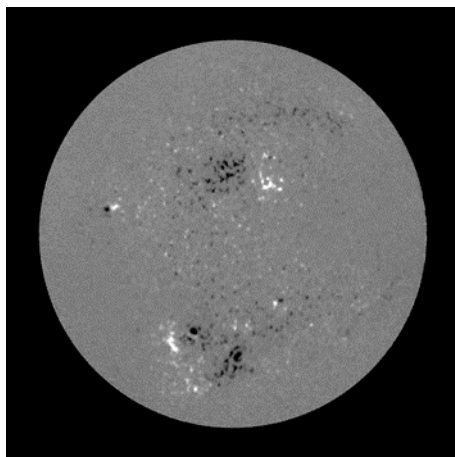


图 5.28 液晶滤光器在 SM 望远镜采集全日面磁图

5.3 本章小结

本章介绍了液晶器件在空间磁分析器和地基磁场滤光器中的实际应用与测试。文中首先介绍了 FMG 偏振调制器的工作原理与基本结构，并在此基础上完成了偏振调制器的环境试验和偏振调制器驱动器的性能测试，结果表面偏振调制器满足空间恶劣环境的使用要求，驱动器的信号质量满足 LCVR 的工作要求。然后介绍了子午工程二期磁场滤光器的系统结构与工作方式，针对性的设计了一套自动化快速滤光器整机定标方案，解决了原有单级分离定标存在误差和耗时的问题，将时间效率提高了 38 倍。经过整机定标后的滤光器在不同光学系统获得了基本一致太阳光谱轮廓，并成功获得了磁图。

第6章 总结与展望

太阳物理是一门依赖观测设备的学科，太阳磁场与太阳活动的相互作用关系、演化进程的深入分析需要高时间分辨率、高空间分辨率、高偏振分辨率和连续时间观测的太阳磁像仪。为了获取高偏振分辨率和连续时间观测，磁像仪正经历从地面到空间的跨越式发展，液晶器件在磁像仪空间化的过程中扮演着重要角色。液晶器件具有无旋转机构、调制速度快、口径大、光谱范围宽、重量轻、功耗低等优势。液晶器件调制速度快的优点可以缩短空间磁像仪中偏振分析器和窄带滤光器的调节时间，获得更高的时间分辨率；液晶器件重量轻、功耗低、无旋转机构可以较大的减小相关部件设计的重量和体积，进而将空间设备十分有限的资源留给诸如大口径的光学成像组件，进而提高磁像仪的空间分辨率；同时，空间磁像仪的自身特点也正好可以实现连续的太阳观测。因此，本文是将液晶器件逐步应用到空间磁场望远镜的进一步探索。本章将对课题的研究成果进行总结，并给出下一步的研究展望。

6.1 工作总结

本文从液晶器件的电子学控制系统、空间特性测试仪以及液晶器件在磁像仪中的应用三方面展开工作，课题的研究成果和结论如下：

1.完成多通道高精度液晶控制器、多通道液晶恒温控制器的研究与设计。首先根据液晶器件的特点和工作特性，将液晶电控系统分割为液晶驱动器和液晶恒温器两部分。在液晶驱动器的研制中，给出了液晶电光控制的原理和详细的电路实现；在液晶恒温器中，根据液晶工作温度的需求，给出了液晶恒温控制的详细实现方案。设计完成的液晶驱动器和液晶恒温控制器各项参数达到预期，并成功应用于磁像仪的实际试观测，观测数据良好。

2.根据液晶器件空间化应用的需求，开展了液晶器件在空间环境下电光调制稳定性的研究。本文主要研究了如何设计一套测试系统可以真实反应液晶器件在空间环境下的电光性能，主要工作有：详细分析了测试系统中可能影响液晶电光性能真实性的因素、根据分析结果完成了液晶试验仪的正样设计、对正

样件进行完整的力学、热学和电磁兼容学等试验。根据液晶试验仪的环境实验数据和地面稳定性测试数据，整机的性能稳定、工作性能良好，具备发射条件，目前正在卫星总体集成测试，预计 2022 年 7 月发射。

3.开展了液晶器件在偏振分析器和窄带滤光器中的应用研究。基于 FMG 的偏振分析器开展了环境试验，验证了偏振分析器的光机电性能。同时，基于“子午工程二期”的全日面矢量磁像仪中的磁场滤光器，开展了自动化快速标定系统的设计，通过试观测验证了滤光器的窄带滤光性能。

6.2 未来展望

本课题是国内首次基于液晶器件在太阳磁场测量中的应用研究，系统性地开展了电子学、结构装调和系统测试的全面工作。但是由于研究时间有限和疫情带来的限制，课题中还存在一些有待完善和进一步研究的方面，具体如下：

1.液晶控制系统的稳定性需要长时间测试。本文研制的液晶驱动器和液晶恒温器在有限测试时间内性能稳定，各项指标优异，但是在磁像仪的长期观测中，整个液晶控制系统还需要进一步的监测，以确保该系统满足长期、稳定和高性能的观测需求。同时，望远镜的协同控制软件还有待进一步开发。

2.星载液晶电光性能测试系统还需要卫星发射后的测试数据进行验证。由于各项因素导致卫星发射时间大幅度后延，使得现有的地面测试数据缺乏实际的星载环境运行数据做对比。该项工作需要等到卫星发射后，继续开展相关的工作。

3.针对 FMG 中的偏振分析器，还需要卫星发射后的观测数据进行系统验证。由于其它因素，ASO-S 卫星的发射时间推迟，偏振分析器的定标、试观测计划推迟，虽然进行大量地面热学、力学、电磁兼容学和磁试验等，但是偏振分析器的实际星载运行性能还需要下一步的研究。

4.液晶滤光器和液晶偏振分析器还未完成系统联试。由于疫情，导致加工延误，本文中还未实现液晶型磁像仪的联合测试工作，虽然进行了空间型液晶偏振分析器和地基窄带液晶滤光器的测试分析工作，但是二者结合的液晶型磁像仪还需要进一步研究。

参考文献

- [1] 王逸. 楚辞章句补注·楚辞集注[M]. 湖南:岳麓书社, 2013.
- [2] 祝高飞. 基于大数据的太阳暗条自动提取的方法研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2020.
- [3] 赵翠. 基于怀柔全日面单色像的太阳黑子高精度自动识别研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2016.
- [4] 林元章. 太阳物理导论[M]. 北京:科学出版社, 2000.
- [5] STENFLO J O. Solar Magnetic Fields[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1994, 189.
- [6] 杨潇. 光球活动区磁非势性及其关联耀斑[D]. 北京:中国科学院大学, 2010.
- [7] 肖江. 太阳望远镜高时空分辨率终端系统研制[D]. 北京:中国科学院大学, 2009.
- [8] 苏江涛. 太阳矢量磁场测量[D]. 北京:中国科学院大学, 2004.
- [9] 阮桂平. 太阳矢量磁场测量[D]. 北京:中国科学院大学, 2007.
- [10] 陈洁. 太阳跨赤道日冕环的研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2007.
- [11] 白先勇. 太阳活动区的矢量磁场测量定标研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2007.
- [12] 徐海清. 太阳活动区磁场螺度的统计研究和发电机理论[D]. 北京:中国科学院大学, 2009.
- [13] 郭娟. 太阳活动区磁场结构与耀斑-日冕物质抛射的定量研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2006.
- [14] 敦金平. 太阳活动区磁场测量和非势特征研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2002.
- [15] 李小波. 太阳黑子运动磁结构观测研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2012.
- [16] 张枚. 太阳大气中磁场空间结构的研究[D]. 北京:中国科学院大学, 1999.
- [17] 玄伟佳. 太阳磁场望远镜中双折射滤光器的性能分析与测试[D]. 北京:中国科学院大学, 2009.
- [18] 刘锁. 太阳磁场外推方法的应用研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2011.
- [19] 赵明宇. 太阳表面交叉螺度研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2012.
- [20] 包星明. 日冕物质抛射和太阳表面活动研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2006.
- [21] 胡新华. 日面活动特征的高速图像处理与识别系统研制[D]. 北京:中国科学院大学, 2007.
- [22] 谢文彬. 双带耀斑分离运动与磁场的关系研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2009.
- [23] 郝娟. 螺度的光球测量和日冕响应探讨[D]. 北京:中国科学院大学, 2011.
- [24] 宋永亮. 活动区磁螺度与耀斑期间磁场变化的观测研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2016.
- [25] 张印. 光球磁场变化和太阳活动现象的关系[D]. 北京:中国科学院大学, 2007.
- [26] 王栋. 光谱仪型和滤光器型太阳光球磁场观测的对比研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2010.
- [27] 杨尚斌. 浮现活动区磁螺度研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2009.
- [28] CASTIM, FINESCHI S, CAPOBIANCO G, et al. Metis/Solar Orbiter polarimetric visible light channel calibration[C]//KARAFOLAS N, SODNIK Z, CUGNY B. International Conference on Space Optics — ICSO 2018. Chania, Greece: SPIE, 2019: 119.
- [29] CAMPOS-JARA A, GARCÍA PAREJO P, ÁLVAREZ-HERRERO A. Optimization of the response time measuring method for liquid crystal variable retarders[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2019, 37(6): 062930.
- [30] PAREJO P G, ÁLVAREZ-HERRERO A, URIBE-PATARROYO N, et al. UV radiation effects on Liquid Crystal Variable Retarders for aerospace applications[J]. 2019: 4.
- [31] 邓元勇, 甘为群, 颜毅华, 等. 太阳磁场探测现状与展望[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 230–236.
- [32] DENG Y-Y, ZHANG H-Y, YANG J-F, et al. Design of the Full-disk MagnetoGraph (FMG) onboard the ASO-S[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(11): 157.
- [33] HOU J-F, WANG H-F, WANG G, et al. Irradiation study of liquid crystal variable retarder for Full-disk Magneto-Graph payload onboard ASO-S mission [J]. Chinese Physics B, 2020,

- 29(7): 074208.
- [34] 侯俊峰, 邓元勇, 王东光, 等. 液晶调制技术在太阳磁场探测中的应用及展望[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(3): 296–304.
- [35] ALVAREZ-HERRERO A, GARCÍA PAREJO P, LAGUNA H, et al. Polarization modulators based on liquid crystal variable retarders for the Solar Orbiter mission[C]//SHAW J A, LEMASTER D A. San Diego, California, United States: 2015: 96130I.
- [36] ÁLVAREZ-HERRERO A, PAREJO P G, SILVA-LÓPEZ M. Fine tuning method for optimization of liquid crystal based polarimeters[J]. Optics Express, 2018, 26(9): 12038.
- [37] ANTONUCCI E, ROMOLI M, ANDRETTA V, et al. Metis: the Solar Orbiter visible light and ultraviolet coronal imager[J]. Astronomy & Astrophysics, 2020, 642: A10.
- [38] 王刚. 向列型液晶波片在双折射滤光器中的应用研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2020.
- [39] FINESCHI S, CAPOBIANCO G, MASSONE G, et al. Liquid crystals Lyot filter for solar coronagraphy[C]//FINESCHI S, FENNELLY J. San Diego, California, USA: 2011: 814808.
- [40] DROUILLARD II T F, SEARCY P A, DAVIS S R, et al. Polarimetry using liquid crystal variable retarders[C]//JABBOUR G E, RANTALA J T. San Jose, CA, United States: 2004: 86.
- [41] GLADISH J C, DUNCAN D D. LCVR-based polarimetry: calibration issues[C]//KIRKPATRICK S J, WANG R. San Francisco, California: 2010: 756609.
- [42] GLADISH J C, DUNCAN D D. Spectral imaging polarimeter based on liquid crystal technology[C]//TUCHIN V V, DUNCAN D D, LARIN K V, et al. San Francisco, California, USA: 2012: 82220X.
- [43] GUPTA N, SUHRE D R. Acousto-optic tunable filter imaging spectrometer with full Stokes polarimetric capability[J]. Applied Optics, 2007, 46(14): 2632.
- [44] HU C, XIE P, HUO S, et al. A liquid crystal variable retarder-based reflectance difference spectrometer for fast, high precision spectroscopic measurements[J]. Thin Solid Films, 2014, 571: 543–547.
- [45] HU DONGMEI, LIU QUAN, YU LINTAO, et al. LCVR phase retardation characteristic calibration method using the LSSVM model[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(5): 0517004.
- [46] HUO S, HU C, LI Y, et al. Optimization for liquid crystal variable retarder-based spectroscopic polarization measurements[J]. Applied Optics, 2014, 53(30): 7081.
- [47] LIN Y, REN H, WU S. Polarisation-independent liquid crystal devices[J]. Liquid Crystals Today, 2008, 17(1–2): 2–8.
- [48] NAEMURA S. Electrical Properties of Liquid-Crystal Materials for Display Applications[J]. MRS Proceedings, 1999, 559.
- [49] MONTES I, BRUCE N C, LÓPEZ-TÉLLEZ J M. Polarization characterization of liquid-crystal variable retarders[C]//CREATH K, BURKE J, ALBERTAZZI GONÇALVES A. San Diego, California, United States: 2016: 996014.
- [50] 赵祥杰. 液晶相位控制阵列关键技术及其应用[D]. 中国工程物理研究院, 2014.
- [51] 张志勇. 近红外偏振分析器研制[D]. 北京:中国科学院大学, 2007.
- [52] 陈莉. 基于液晶的激光偏振调制与自适应稳光技术[D]. 长春理工大学, 2017.
- [53] 陈曦. 基于液晶的激光偏振参数调制与解调技术研究[D]. 长春理工大学, 2012.
- [54] 孔勇. 可调谐式液晶延迟器的研究[D]. 曲阜师范大学, 2001.
- [55] 漆明春. 液晶电控波片的光电特性研究及其应用[D]. 电子科技大学, 2014.
- [56] 吴树高. 液晶型圆偏振调制的研制[D]. 浙江大学, 2006.
- [57] ZHAO X, BERMAK A, BOUSSAID F, et al. Liquid-crystal micro polarimeter array for visible linear and circular polarization imaging[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Paris, France: IEEE, 2010: 637–640.
- [58] XU K, YANG Y, HE Y, et al. Liquid crystal retarder modulation for generating real time non-uniformly polarized beams[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(3): 572.
- [59] WOŹNIAK W A, KURZYNOWSKI P, DROBCZYŃSKI S. Adjustment method of an imaging Stokes polarimeter based on liquid crystal variable retarders[J]. Applied Optics, 2011, 50(2): 203.
- [60] URIBE-PATARROYO N, ALVAREZ-HERRERO A. Determination of the molecular tilt profile of a liquid crystal under applied electric field by generalized transmission

- ellipsometry[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(6): 1188.
- [61] 郭弘扬, 杜升平. 驱动电压对向列型液晶调制相位的影响[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(12): 28–31.
- [62] 霍树春, 胡春光, 沈万福, 等. 基于单偏振器的液晶相位延迟器光电特性[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(1): 68-71+77.
- [63] 江继军, 张大勇, 李剑峰. 液晶可变延迟器研制及其电控相位延迟测量[J]. 激光技术, 2011, 35(5): 652–655.
- [64] 王宁, 李国华, 云茂金. 液晶电控双折射特性的研究[J]. 中国激光, 2002(12): 1064–1066.
- [65] 曹旻. 工业热电阻温度计的选型探索[J]. 仪器仪表用户, 2021, 28(2): 100–103.
- [66] 戴义保, 陈多磊. 高精密温度测量的研究与实现[J]. 自动化仪表, 2003(3): 24–27.
- [67] 胡鹏程, 时玮泽, 梅健挺. 高精度铂电阻测温系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 988–995.
- [68] 胡晓敏, 童长青, 吴浩, 等. 基于 NTC 热敏电阻的 0.5 mK 测温仪关键技术研究[J]. 电工技术, 2022(2): 51–54.
- [69] 胡晓敏, 童长青, 吴雨翠, 等. 精密信号调理对测温不确定度的影响分析[J]. 自动化仪表, 2021, 42(10): 43-45+51.
- [70] 金伟正. 实用四线制 PT100 测温电路研究[J]. 电子测量技术, 2000(2): 27–28.

致 谢

“我还是当初那个少年，没有一点点改变”，这首歌唱出了在追求知识的道路上的不忘初心。晃眼过去，人生已经过去了快三分之一。记忆中刚开始上学还是穿着雨鞋走在村后那条泥泞的道路上又蹦又跳，到现在双脚踏在怀柔水库这依山傍水的人间仙境。现在，在求学的这条路上即将走到终点，但是学习仍不能停止。一路走来，有太多人的鼓励与支持，在此一并向一路走来给予帮助和关怀的恩人表示感谢。

首先，本文的研究工作离不开侯俊峰高级工程师、林佳本正高级工程师、邓元勇研究员和王东光研究员四位学业恩师和人生导师的帮助。正是恩师们的谆谆教导，使我在完成博士学业的道路上得以坚持下来。感谢侯老师在论文选题迷茫阶段给予的耐心指导，感谢林老师在学业困惑时给予答疑解惑，感谢王老师在人生迷茫时给予的关心帮助，感谢邓老师在就业工作时给予的无私帮助。在此，道一句老师们辛苦了！

然后感谢怀柔大家庭的各位。王薏站长如母般的贴心指导，在人生规划、职业选择给予的启迪。感谢张鼎波、王建和汪国萍在工作和生活上的帮助。感谢阮文东、苏海奇、荆帅、杨桂莲在工作上给予的各项帮助，在初到怀柔的两个月，涨了10斤这事大家都有“责任”（偷笑.jpg！2333.....在怀柔站实在是吃得好、睡得香、学得快），再次表示感谢。

感谢怀柔组的各位教职工。早已退休的张洪起研究员，每天早早的在八点20就能在校门口碰上可敬的张老师，期待您的新书！感谢张玫研究员、苏江涛研究员、林刚华研究员、李文显研究员、杨尚斌老师、张志勇老师、包兴明老师、王晓帆老师、孙英姿老师、张洋师姐、杨潇师姐、白先勇师兄、宋永亮师兄、王丙祥在学习、生活和工作给予的帮助。感谢段帷老师在生活、工作的各种照顾。感谢孙文君师兄的（玉米饼、海底捞自嗨锅、虾条.....）各种投喂，在跳绳445575个后，体重依旧坚挺的情况下，孙师兄当居首功。

感谢怀柔组的师兄师姐、师弟师妹们。感谢：张鑫伟师兄、王刚师兄、郭晶晶师姐、白阳师兄、佟立越师兄、王全师兄；李鑫师妹、胡子尧师弟、郑州

师弟、高碧源师妹、郭思璠师妹；沈宇樑、吴伟；还有胡兴和朱晓明这两位好兄弟。感谢大家给予的帮助，生活的一丝一微皆发自于心，受之于体，当记在心中！

还要感谢带我来北京求学的刘崎老弟，将我招入天文台的马怀宇老师，在学生工作岗位无私奉献的李响老师、艾华老师，谢谢大家！

最后感谢生我养我的父母，人生过半，你们辛苦了，往后家就由我来抗！以及已经相识 6 年，从同学、恋人到亲人的妻子，不远千里来到北京，每日做好饭菜等我回家，你的美丽、善良和支持，是我坚持完成学业的强大动力，往后余生，共同携手！

谨以此文献给所有爱我的人和我爱的人，寥寥文字，感恩之心，无以言表！

2022 年 6 月

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历:

2012 年 09 月——2016 年 06 月, 在四川轻化工大学自动化与电子信息技术学院获得学士学位;

2016 年 09 月——2019 年 06 月, 在成都理工大学信息与通信学院获得硕士学位;

2019 年 06 月——2022 年 06 月, 在中国科学院国家天文台攻读博士学位。

获奖情况:

2021 年 06 月 获 2021 年中国科学院大学“三好学生”。

已发表(或正式接受)的学术论文:(书写格式同参考文献)

- 1.中国激光(EI): 星载液晶试验仪的设计和力热性能研究, 第一作者, 正式接受, 2022;
- 2.液晶与显示(中文核心): 空间用 LCVR 相位延迟测试系统的电子学设计, 第一作者, 正式接受, 2022;
3. 光谱学与光谱分析(SCI): 面阵傅里叶变换光谱仪高速采集系统设计与实现, 第九作者, 2022。

参加的研究项目及获奖情况

1. 中科院先导专项 A-先进天基太阳天文台(ASO-S)卫星全日面矢量磁像仪(FMG);
- 2.国家重大科技基础设施-子午工程二期—全日面矢量磁像仪建设、全日面磁场-色球望远镜改造;
- 3.国家自然科学基金-用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统(AIMS);
- 4.国家天文台-太阳极紫外探测器性能评估研究;
- 5.国家天文台-太阳磁像仪空间自校正稳像观测方法的研究;
- 6.中科院空间科学先导专项预先研究-紫外压电型偏振调制器的设计、仿真和实验研究。