

星载液晶试验仪的设计和力热性能研究

黄威^{1,2,3}, 侯俊峰^{1,2,3*}, 林佳本^{1,2,3}, 张洋^{1,2,3}, 邓元勇^{1,2,3}, 王海峰⁴¹中国科学院国家天文台, 北京 100101;²中国科学院太阳活动重点实验室, 北京 100101;³中国科学院大学, 北京 100049;⁴中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999

摘要 向列相液晶可变相位延迟器(LCVR)已逐渐成为空间偏振调制仪器的研究热点,然而,国内没有液晶器件在空间使用的经验,液晶器件在各种空间环境下的适应性如何尚未可知。因此,本团队设计了一套星载向列相液晶相位延迟测试系统,该系统不仅可以在地面的空间力、热模拟环境中测试 LCVR 的关键性能,还可以搭载在卫星上对 LCVR 的相位延迟稳定性进行在轨验证。本文首先阐述了 LCVR 相位延迟的测量方法并实现了光机电系统的优化设计,在此基础上,研究了 LCVR 在空间力、热模拟环境中的电光性能。研究结果表明:力学试验前后,LCVR 的电光性能未发生明显变化;在热试验中,LCVR 的相位延迟-电压曲线的稳定性在 0.185° 以内。本次试验发现 LCVR 的相位延迟-电压曲线随环境温度呈线性变化,该结果为未来星上数据校准提供了数据支持。最后,在长达 9 个月的不间断运行测试中,LCVR 的相位延迟-电压曲线长周期变化小于 1° ,标准偏差为 0.27° 。这表明该液晶试验仪长周期工作性能良好,可以满足在轨测试需求。

关键词 测量; 向列相液晶; 偏振调制; 相位延迟; 液晶电驱动

中图分类号 P171.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1704005

1 引言

向列相液晶可变相位延迟器(LCVR)是近 20 年来逐渐发展成熟的一种偏振调制器件,具有口径大、调制速度快($1\sim 20$ ms)、驱动电压低、光谱范围宽($350\text{ nm}\sim 2.5\ \mu\text{m}$)、质量轻、功耗低以及无旋转结构等优势,已被广泛应用于遥感、天文、液晶显示、激光通信、军事等领域^[1-6]。尤其是在太阳物理研究中,LCVR 是目前唯一可同时满足快速偏振调制和可调谐窄带滤光的低电压驱动的电光调制器件,被广泛应用在地基观测设备中^[7-10],VTT^[11]、THEMIS^[12]、SST^[13]、GREGOR^[14]、K-CoR^[15]和 FASOT^[16]等望远镜均使用 LCVR 进行偏振成像或谱测量。

相较于在地基偏振测量方面的迅猛发展,LCVR 在空间上的应用进展较为缓慢,这一方面是由于空间环境的复杂性,另一方面则是由于液晶材料的高分子特性增加了空间应用的风险。2005 年,西班牙国家太空科技研究所(INTA)的 Alvarez-Herrero 等^[17]在 SUNRISE、Solar Orbiter 太阳望远镜的设计中,针对 LCVR 型偏振分析器进行了大量研究,开展了 LCVR

的空间环境适应性试验,分析了 LCVR 在质子辐照、伽马辐照、紫外辐照、热循环、热真空、力学等环境试验前后光学性能的差异。在 2017 年立项的先进天基太阳天文台 ASO-S 卫星项目中,全日面矢量磁像仪(FMG)载荷采用中国工程物理研究院流体物理研究所自主生产的 LCVR 作为偏振调制器件,该卫星预计于 2022 年发射^[18];侯俊峰等^[19]针对该 LCVR 开展了各项地面环境模拟实验,获得了其在质子辐照、伽马辐照、紫外辐照、真空和高低温环境下的重要数据。Alvarez-Herrero、侯俊峰等的研究主要集中于 LCVR 在各种空间辐照、力热环境前后的功能和性能变化,以分析 LCVR 的空间适应性,但 LCVR 在各种空间环境模拟过程中,乃至真实太空复杂环境中的性能如何尚未可知。过程检测和监测是衡量一个新型器件能否适应空间环境,并真正应用到空间科学仪器中,获得高可靠、高质量数据的关键所在。

本文介绍了一套星载向列相液晶相位延迟测试仪器(下文简称为“液晶试验仪”)的设计和地面环境监测的试验情况,液晶试验仪将搭载某型号卫星,对 LCVR 调制时相位延迟-电压曲线的稳定性进行在轨验证。

收稿日期: 2021-12-10; **修回日期:** 2021-12-28; **录用日期:** 2022-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(11427901, 11773040, 11403047, 11427803)、中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA15320102, XDA15010800)、中国科学院仪器设备功能开发项目(116400CX03)

通信作者: *jfhou@bao.ac.cn

本文首先介绍液晶试验仪的相位测量原理和光机电系统的优化设计,然后介绍整机集成后进行的各项地面环境试验及试验结果。

2 测量原理

2.1 LCVR 的结构与工作原理

LCVR 由液晶分子、形成液晶分子容纳腔的玻璃基板、玻璃基板内表面附着的氧化铟锡(ITO)导电膜和取向膜等组成,基本结构如图 1(a)所示。本文 LCVR 采用的是向列相液晶分子材料,向列相液晶由长径比很大的棒状分子组成,具有类似于普通液体的流动性,分子不排列成层,能上下、左右、前后滑动,且只在分子的长轴方向上保持相互平行或近似

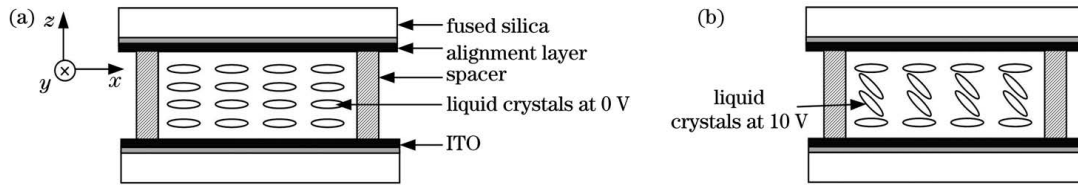


图 1 LCVR 的结构与工作原理。(a)驱动电压 $V=0\text{ V}$; (b)驱动电压 $V=10\text{ V}$

Fig. 1 Structure and principle of liquid crystal variable retarder (LCVR). (a) Driving voltage $V=0\text{ V}$; (b) driving voltage $V=10\text{ V}$

2.2 LCVR 电光性能稳定性的测量

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,

平行。分子间的短程相互作用力微弱,属于范德瓦耳斯力。这种分子长轴彼此相互平行的自发取向过程,使液晶产生了高度的双折射性,液晶分子的长轴方向决定了 LCVR 的光轴方向($+x$ 方向)^[19]。因此,当上下两层 ITO 导电膜之间的驱动电压 $V=0\text{ V}$ 时,如图 1(a)所示,正介电各向异性液晶分子长轴平行于 x 轴方向排列。此时, $+z$ 方向的双折射率最大,LCVR 的相位延迟量最大。如图 1(b)所示,当驱动电压达到 10 V 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驱动电压实现连续可调。

本文采用光强法测量液晶试验仪中 LCVR 的相位延迟-电压曲线,测量光路如图 2 所示。测量光路主要由光源系统、偏振调制系统和光电探测系统三部分组成。

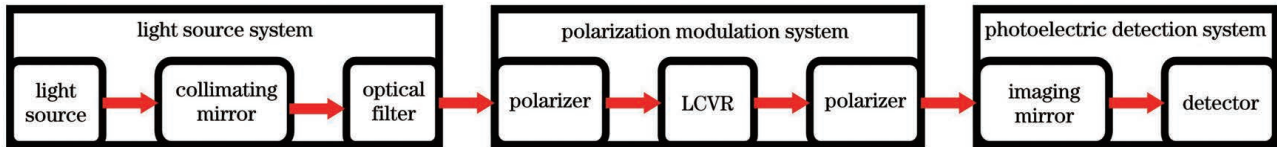


图 2 光路示意图

Fig. 2 Schematic of optical path

在该光路中,由光源产生光强为 I_{in} 的入射光,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,两片偏振片的透光轴相互平行,LCVR 的快轴与两片偏振片的透光轴成 45° 夹角。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 $\delta(V)$ 之间的关系为

$$I_{out}(V) = I_{in} \cos^2 \left[\frac{\delta(V)}{2} \right] + I_{bias}, \quad (1)$$

式中: I_{bias} 为探测本底,由系统杂散光及探测器噪声引起。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,通过分析式(1)可以发现,当相位延迟为 180° 和 360° 时,探测光强 $I_{out}(V)$ 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,就可以通过最大值、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:

1) 对原始探测光强-电压曲线进行归一化,归一化公式为

$$I' = \frac{I_{out} - I_{bias}}{I_{in}} = \cos^2 \left[\frac{\delta(V)}{2} \right], \quad (2)$$

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;

2) 根据式(2)计算得到归一化光强-电压曲线[如图 3(a)所示]后,进一步计算不同驱动电压下的相位延迟,即相位延迟-电压曲线,计算公式为

$$\delta(V) = 2 \arccos \sqrt{I'} + 2n\pi, \quad (3)$$

计算得到的相位延迟-电压曲线如图 3(b)所示。

光强法测量 LCVR 相位延迟-电压曲线的光机结构简单易于实现,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。该方法的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,本次试验着重关注相位延迟-电压曲线的稳定性,弱化了精度要求。此外,在数据分析过程中也关注归一化光

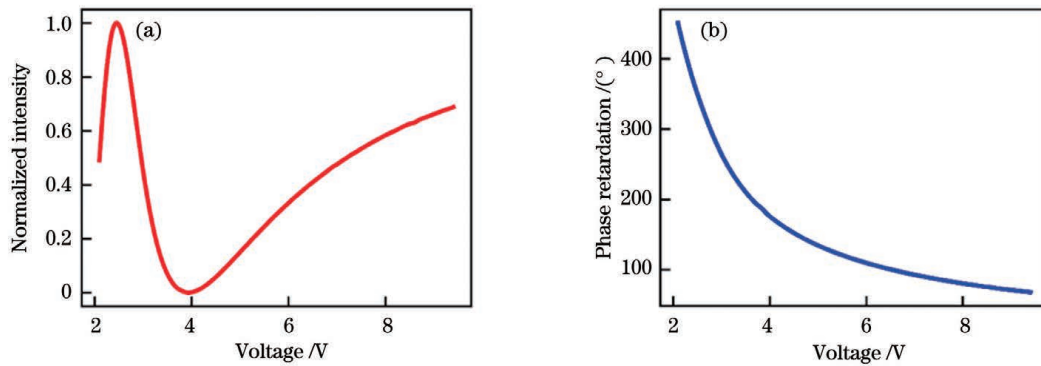


图 3 LCVR 的光电曲线。(a) 归一化光强-电压曲线;(b) 相位延迟-电压曲线

Fig. 3 Photoelectric curve of LCVR. (a) Normalized intensity-voltage curve; (b) phase retardation-voltage curve

强-电压曲线的变化,将归一化光强-电压曲线和相位延迟-电压曲线相互补充,确保了 LCVR 电光性能稳定性测量的可靠性。

3 液晶试验仪设计

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须小于 1.12 kg,峰值功率须小于 13 W(稳态功率小于 5 W),外包络须小于 189 mm×100 mm×72 mm。根据图 2 所示的 LCVR 测量光路示意图,对光源、偏振调制器和探测器三部分进行最小化光机设计,光机外

包络为 124 mm×43 mm×39 mm。光源采用微型发光二极管(LED),其直径为 0.5 cm,中心波长为 590 nm,带宽为 10 nm;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 ITO 和聚酰亚胺,盒厚为 5 μm;偏振片采用 CODIXX 公司的空间化产品,生产工艺与 ASO-S 卫星 FMG 载荷中 LCVR 的生产工艺相同;探测器采用 First Sensor 的硅光电二极管,其有效感光面积为 13 mm²,直径为 0.82 cm,590 nm 下的光谱响应度为 0.42 A/W@23 °C。液晶试验仪飞行件照片如图 4 所示。

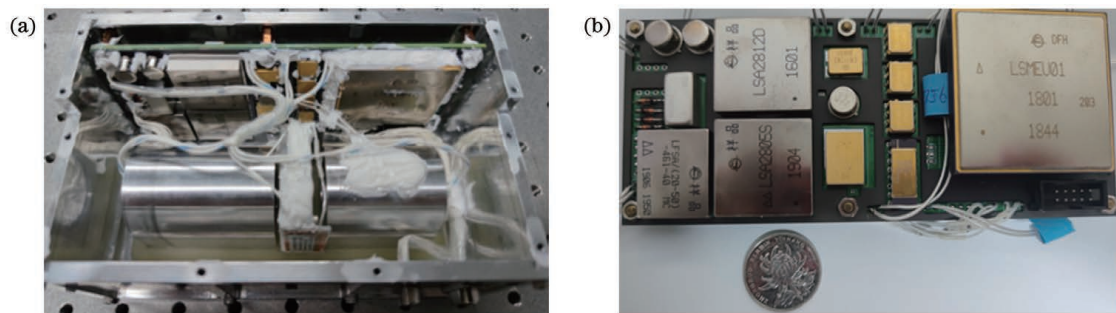


图 4 液晶试验仪飞行件。(a) 内部结构;(b) 内部电路板

Fig. 4 Flight phase of liquid crystal tester. (a) Internal structure; (b) printed circuit board

根据光机各部分的特点,电子学系统的主要功能包括电源保护与转换、LED 光源驱动、LCVR 电驱动、LCVR 恒温控制、探测器数据采集和星上数据处理与通信等。电源部分使用浪涌抑制电路,以提高安全性,开关电源和线性电源相结合的拓扑结构可将一次母线的 28 V 电源转换为后级所需的各种低纹波电源。光源采用恒流源供电,以提高 LED 的稳定性。LCVR 的驱动信号用微控制器集成的数模转换器(DAC)产生,初级信号经运算放大器转换为幅值可调的双极性对称方波后施加到 LCVR 上。根据液晶的温变特性^[20-22],为 LCVR 设计了 35 °C±0.4 °C 的恒温控制电路。微控制器的模数转换器(ADC)利用温度采集电路获取 LCVR 的当前温度,利用误差控制算法调整加热膜的实时加热功率,以实现恒温控制。光电探测器经硬件调制后,使用微控制器的 ADC 进行数据采集,获取当

前驱动电压下的光强-电压数据。电路系统的功能框图如图 5 所示。

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,采用 USB-CAN 控制仪和计算机模拟卫星的 CAN 总线通信)。液晶试验仪控制软件的在轨工作流程如图 6 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 s 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 0.1 V 的步长改变 LCVR 的驱动电压,驱动电压以 0.1 V 的

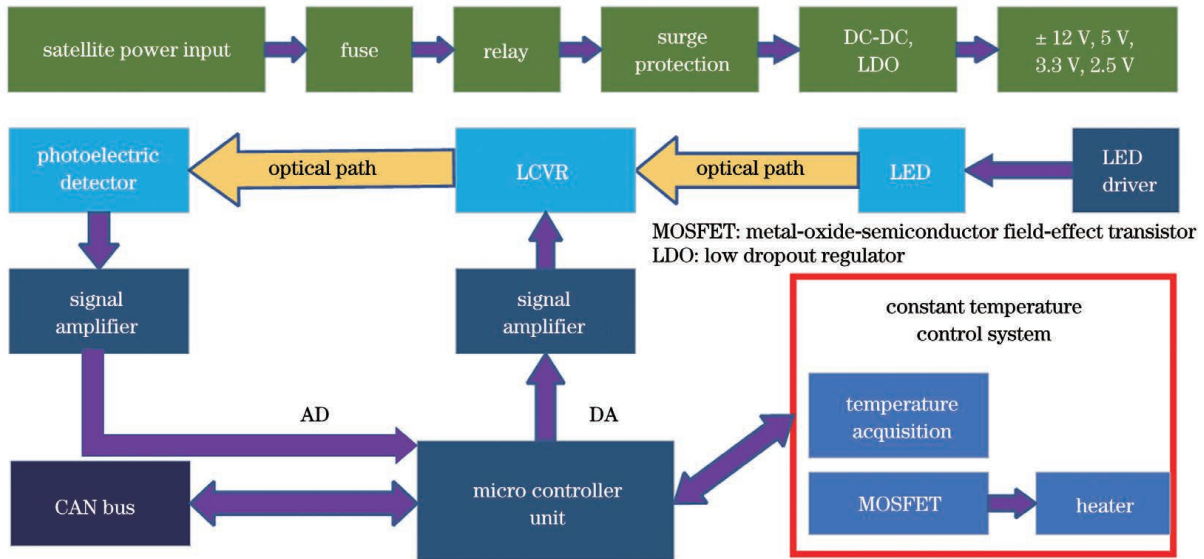


图 5 液晶测试仪的工作框图

Fig. 5 Working block diagram of liquid crystal tester

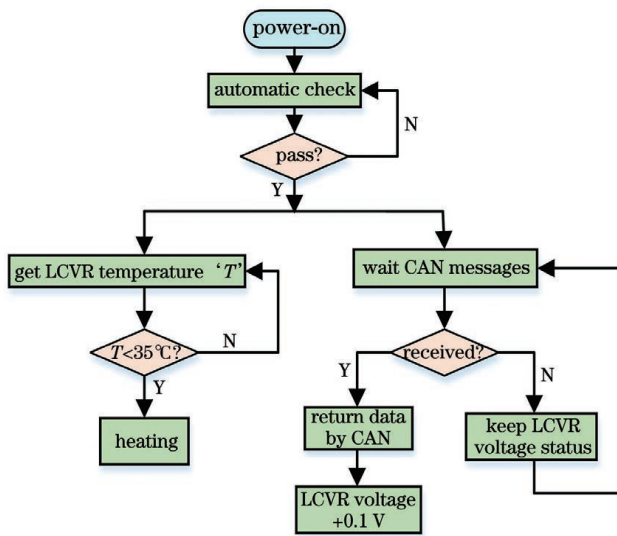


图 6 液晶测试仪在轨工作流程

Fig. 6 On-orbit workflow diagram of liquid crystal tester

步长在 0.9~7.2 V 之间循环增大(一个循环包含 63 个电压数据,耗时 63 s);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。

4 力热性能试验和分析

依据《CX-603 卫星环境试验要求》和中华人民共和国国家军用标准 GJB 1032—1990《电子产品环境应力筛选方法》,本团队对液晶测试仪进行了完整的力学冲击和振动、热冲击、热循环、热真空以及长达 9 个月的长周期监测试验,一方面验证液晶测试仪的可靠性,另一方面研究该 LCVR 在各种力热环境中电光性能与环境之间的关系,为液晶测试仪发射以后的数据定标、分析和处理提供数据支持。

力学试验和热试验条件如表 1、2 所示,除了力学冲击和振动由于试验条件受限未进行过程监测外,其余所有试验均为过程测试。

表 1 力学试验条件

Table 1 Mechanical test conditions

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

表 2 热试验条件
Table 2 Thermal test conditions

Types of thermal test	Atmospheric pressure /Pa	Temperature range /°C	Temperature-rise rate / (°C · min ⁻¹)	High or low temperature stay time /h	Cycles
Thermal shock	1.0	-30~+50	5	2	18
Thermal cycle	1.0	-25~+25	3	6	8
Thermal vacuum	<1.3×10 ⁻³	-25~+25	>1	6	3.5

4.1 力学冲击与振动试验

在力学冲击和振动试验过程中,液晶试验仪不上电,待各项力学试验完成后,再上电测试。图 7 中给出了力学试验前后 LCVR 的归一化光强-电压曲线、相位延迟-电压曲线,可以看出试验前后的归一化光强-

电压曲线高度重合,试验前后的相位延迟-电压曲线也高度重合。通过分析力学试验前后的实际数据可知,在全电压范围内相位延迟的平均标准偏差小于 0.1°,说明试验前后该 LCVR 的稳定性以及液晶试验仪的各项性能均无明显变化。

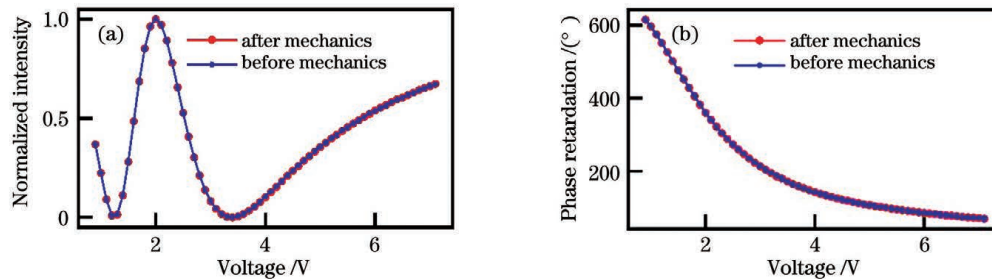


图 7 力学试验前后的数据。(a)归一化光强-电压曲线;(b)相位延迟-电压曲线

Fig. 7 Data before and after mechanical test. (a) Normalized intensity-voltage curve; (b) phase retardation-voltage curve

4.2 热试验的整体分析

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,首先对全程的试验数据进行分析。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成图,如图 8(a)~(c)所示。图中的 4 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值。

在所有的热试验中,随着环境温度升高,光源电流平均升高 0.05 mA,探测器采集的电压平均减小 1 V。LED 光源是半导体器件,随着环境温度升高,漏电流增大,同时 LED 将电能转化成光能时也会发热,温度越高,转化成光能的能力越低,因此光强减小。根据试验结果,探测器的输出电压会随着温度升高而减小,最终导致温度升高时,虽然光源电流增加,但探测器的效率和光源发光效率都减小了^[23]。系统中其他器件(如偏振片)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 °C,但热冲击试验中 LCVR 的稳定温度最高只能达到 32 °C(未能达到预设的 35 °C,如图 8(a)画圈部分所示),这一现象是由环境温度过低和液晶试验仪加热功率受限导致的。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,本次热试验结果显示各器件性能良好,系统工作正常。液晶试验仪位于卫星舱内,舱内温度范围为 -10~10 °C,该温度范围内

LCVR 可正常恒温工作。综上,液晶试验仪通过了热冲击、热循环和热真空试验。

为了便于后续 LCVR 的稳定性分析,将上述三个试验的高低温进行分区:将热冲击时 LCVR 温度(32 °C)短暂的稳定区间以 H1~H17 标注于图 8(a)中;对于 LCVR 温度稳定(35 °C)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 8(b)、(c)中。下文所述高温或者低温均指温度稳定的区间。

4.2.1 LCVR 的高低温重复性

为了分析 LCVR 在高温、低温下的相位延迟重复性,将三个试验中 LCVR 的归一化光强和相位延迟分别绘制成图,如图 9 所示(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,相位延迟测量的准确性取决于归一化光强最大值和最小值的准确性。分析图 7(a)可以发现电压 2.1~3.5 V 基本覆盖归一化光强从最大值到最小值变化的整个范围,而且,覆盖了变化率从小(2.1 V)到大(2.7 V)再到小(3.5 V)的全过程,因此选择这两个最值附近的电压点(最大值 2.1 V 和最小值 3.5 V)以及中间电压点(中间电压值为 2.7 V)的归一化光强和相位延迟数据绘图,能够反映 LCVR 在整个电压范围内的性能变化。图中所有数据(归一化光强和相位延迟)均为当前值与该曲线平均值的差值,横轴为各试验中高温和低温的时间编号。

在所有热试验中,高温或者低温时的归一化光强

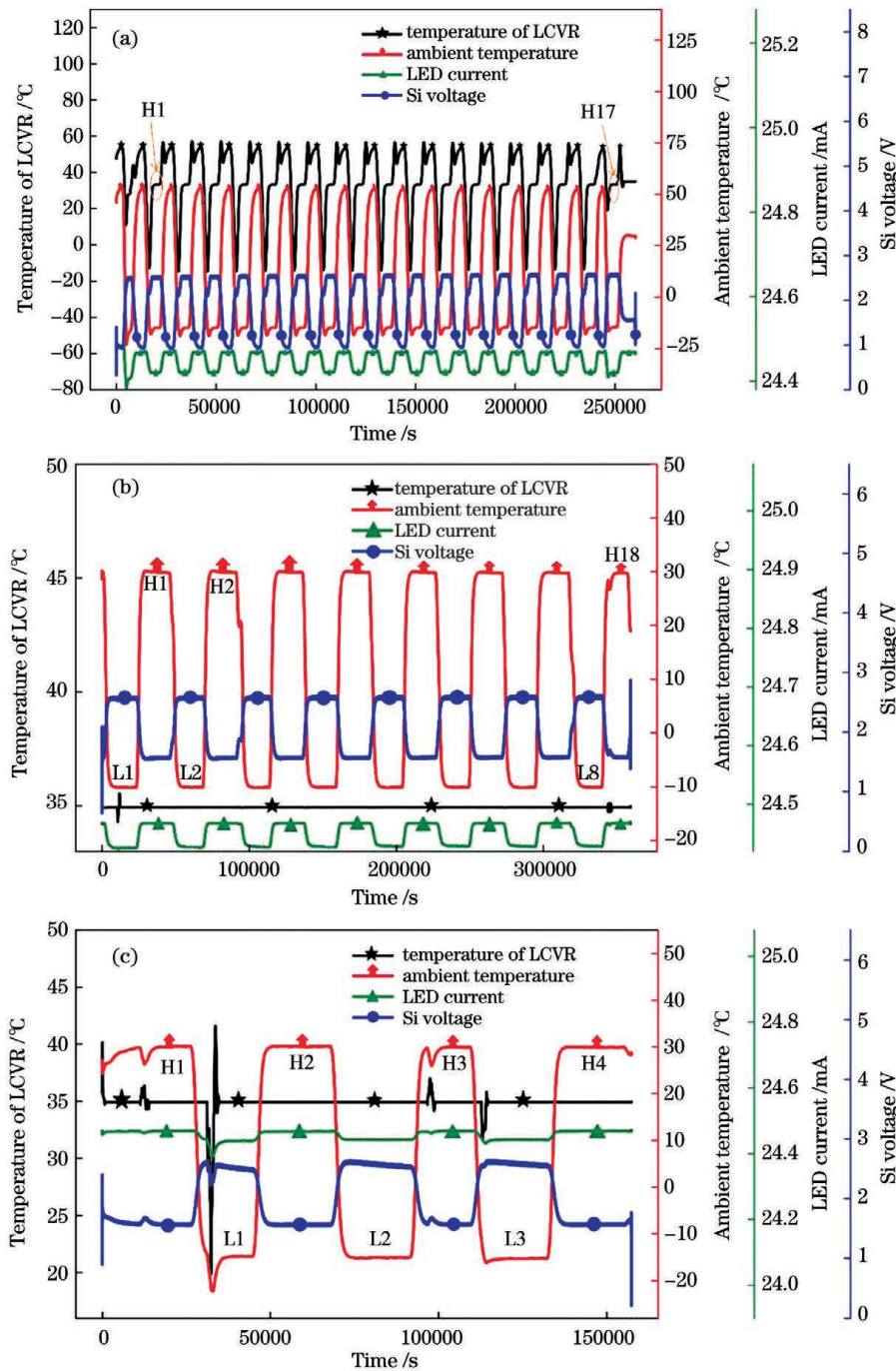


图 8 热试验整体曲线。(a)热冲击试验;(b)热循环试验;(c)热真空试验

Fig. 8 Whole curves of thermal tests. (a) Thermal shock test; (b) thermal cycle test; (c) thermal vacuum test

和相位在回到同一温度条件后都具有较好的重复性。在热冲击试验中,LCVR 在高温稳定区间的相位标准偏差的平均值为 0.185° ;在热循环试验中,LCVR 在高低温下的相位标准偏差的平均值为 0.099° ;在热真空试验中,LCVR 在高低温下的相位标准偏差的平均值为 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。

4.2.2 高低温相位误差校准

从图 8 中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的稳定度高,但是在从高温到低温变化过程中,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。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区间具有较好的重复性,因此将热循环和热真空试验中低温下的相位延迟-电压曲线(L_1)减去高温下的相位延迟-电压曲线(H_1)后得到的差值,绘制于图 10(a)、(b)中。可以看出,两幅图的变化趋势都是相位延迟随着驱动电压增加而逐渐减小,热循环试验中高低温下的相位延迟最大相差约为 7.5° ,热真空试验中高低温下的相位延迟最大相差约为 15° (约为前者的两

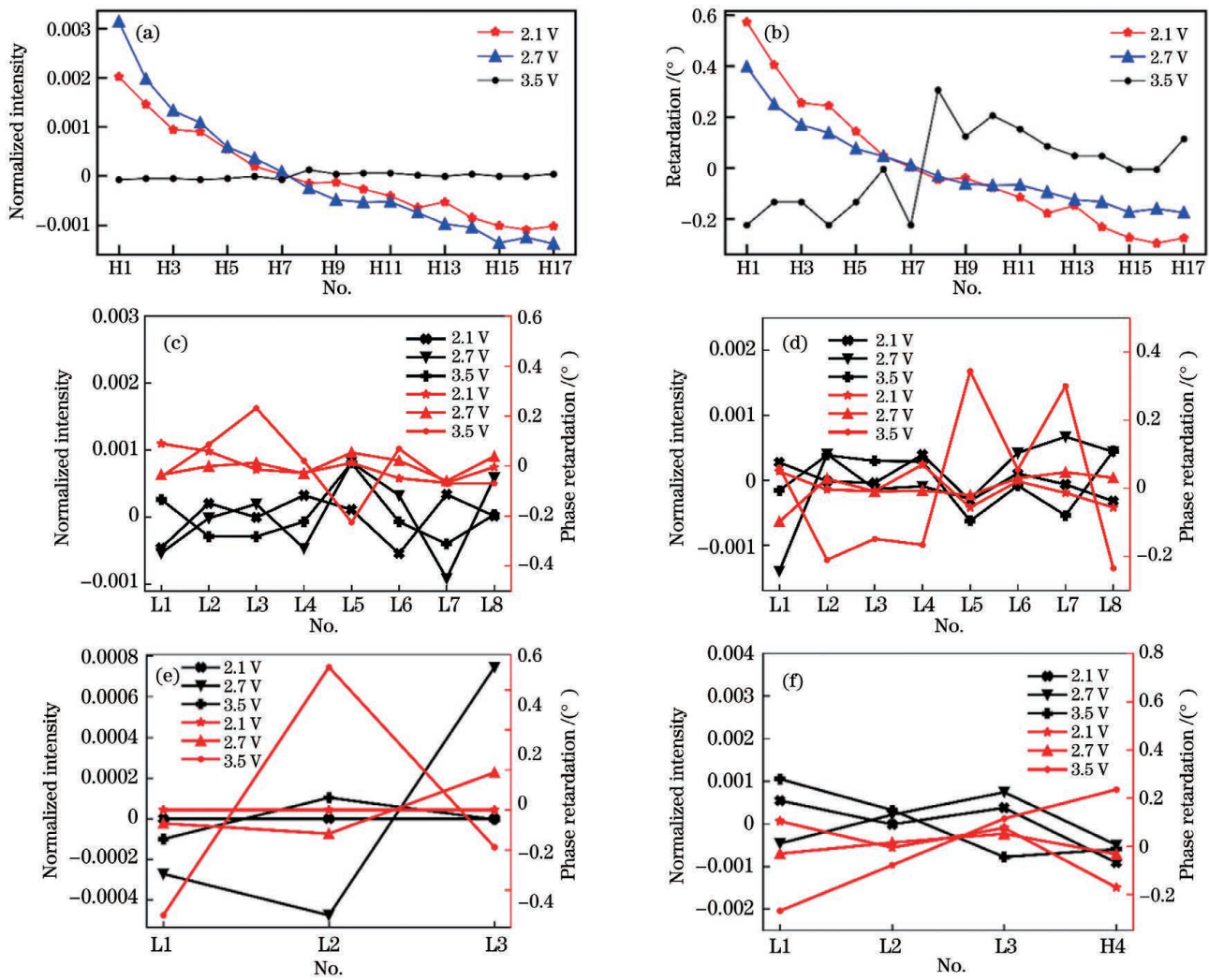


图 9 高低温热试验中归一化光强和相位延迟的重复性。(a)(b)热冲击试验;(c)(d)热循环试验;(e)(f)热真空试验

Fig. 9 Repeatability of normalized intensity and phase retardation in high or low thermal test. (a)(b) Thermal shock test; (c)(d) thermal cycle test; (e)(f) thermal vacuum test

倍)。

热循环试验和热真空试验的相位差值曲线不同,因此无法较好地拟合出相位延迟随环境温度的变化,而且 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都与温度呈线性关系,将所有变化量看作是一个整体,那么,当 LCVR 恒温工作时,其相位延迟-电压曲线随环境温度变化而线性变化。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:

1) 将图 10(b)中高低温相位差值曲线按温差进行等比例划分[由图 8(c)可知低温 T_L 平均为 $-15\text{ }^\circ\text{C}$, 高温 T_H 平均为 $30\text{ }^\circ\text{C}$, 温差 $\Delta T = T_H - T_L = 45\text{ }^\circ\text{C}$];

2) 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) 预测环境温度 T 分别为 $-10, 0, 10, 20\text{ }^\circ\text{C}$ 时的相位延迟-电压曲线 $P_{\text{predicted}}$, 计算公式为

$$P_{\text{predicted}} = (P_L - P_H) \times \frac{(T_H - T)}{\Delta T} + P_H, \quad (4)$$

3) 将 4 个不同温度下的预测曲线、实际曲线以及两条曲线的差值分别绘制成图,如图 10(c)~(f)所示。

由图 10(c)~(f)可以看出,4 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° 。这说明液晶试验仪的相位延迟-电压曲线随着环境温度线性变化。利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光学系统的要求,因此该方法可以用于星上数据校准。

4.3 长周期监测试验

为了验证液晶试验仪在星载环境下相位延迟的稳定性,需要用地面 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 日夜间到凌晨),在每组数据中选择连续 0.5 h 的归一化光强和相位延迟,将 2.1、2.7、3.5 V 曲线的 y 值分别减去各自曲线的均值,并绘制于图 11 中。从图 11 中可以看出,在 9 个月的时间内,归一化光强的变化为 0.006,相位延迟的变化小于 1° ,三条相位延迟

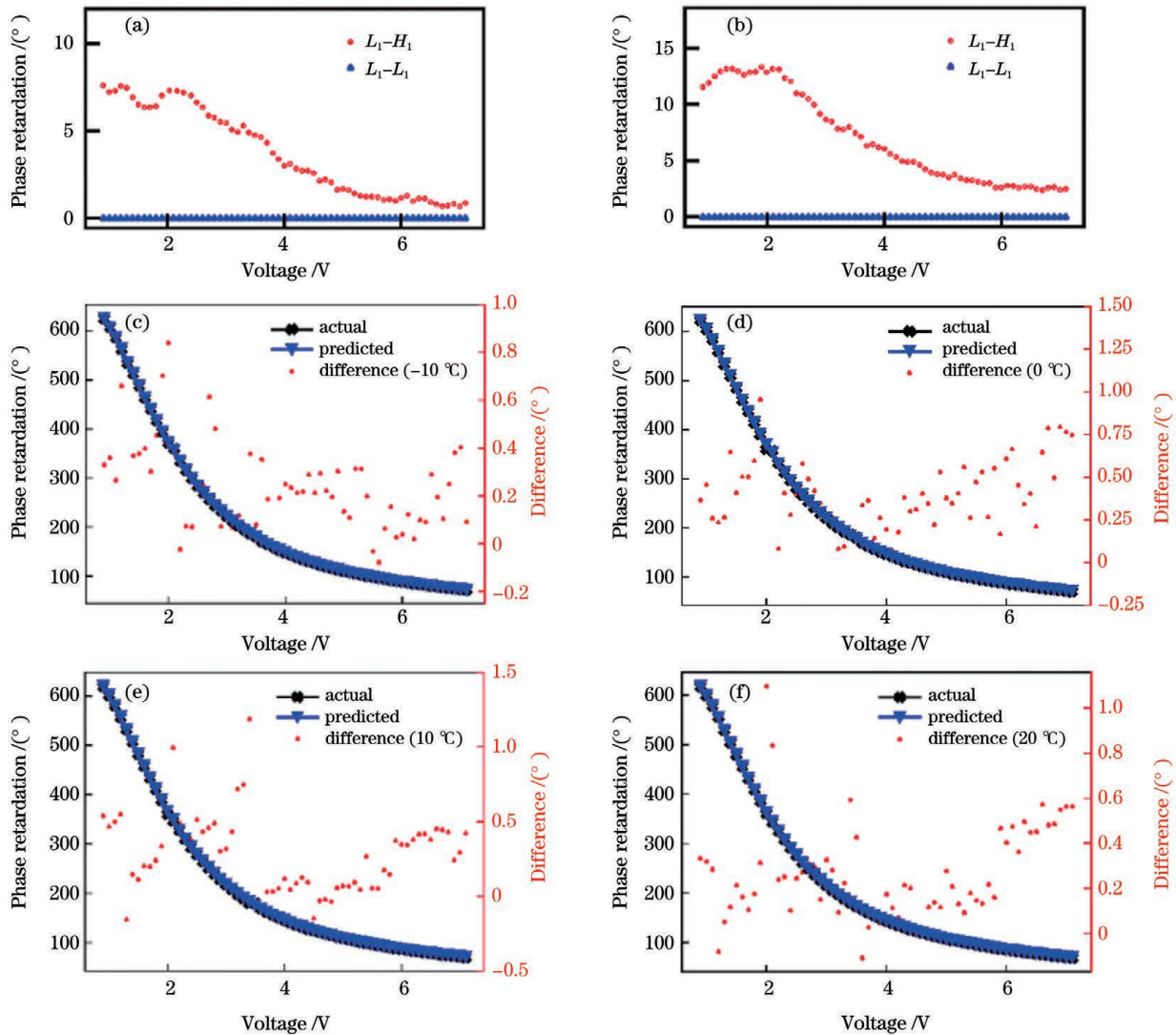


图 10 热实验中的数据校准。(a)热循环试验中高低温下相位延迟的差值;(b)热真空试验中高低温下的相位延迟的差值;
(c)~(f)环境温度分别为-10、0、10、20 °C时,相位延迟-电压曲线的预测值与实际值的对比

Fig. 10 Data calibration in thermal test. (a) Difference of phase retardation between high and low temperatures in thermal cycle test; (b) difference of phase retardation between high and low temperatures in thermal vacuum test; (c)–(f) comparison between predicted and actual phase retardation-voltage curves when ambient temperature is -10, 0, 10 and 20 °C

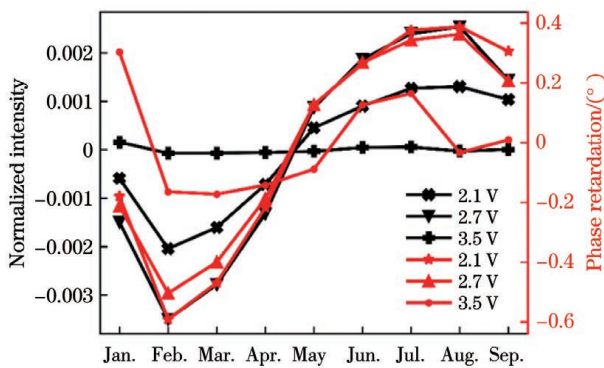


图 11 长周期监测下归一化光强和相位延迟随时间的变化
Fig. 11 Variations of normalized intensity and phase retardation with time under long period monitoring

曲线的标准偏差的平均值为 0.27°。这说明液晶试验仪长周期运行下的稳定度高,该待测 LCVR 在地面环

境下的电光性能稳定。

5 结 论

本文介绍了液晶器件的基本工作原理及其在空间偏振光谱成像观测中的应用。为了验证液晶波片在空间环境下相位延迟调制的稳定性,本团队设计了一套小型化液晶搭载测试系统,对整机进行了完整的力学和热学试验,并对试验进行全程监测。在热试验中,当 LCVR 处于同一温度下时,电光性能具有较好的重复性。同时,热真空试验数据说明液晶试验仪中的 LCVR 的相位延迟-电压曲线与环境温度保持线性变化,该结论可以用于星上数据校准。在 9 个月的长周期运行测试中,相位延迟的变化约为 1°,相位标准偏差的平均值为 0.27°,说明液晶试验仪和待测的 LCVR 均性能良好。目前,整机已经完成卫星要求的各项环

境试验与测试工作,等待交付卫星集成发射。

在液晶试验仪设计过程中,由于设计受限,整机未增加保温措施,因此相位延迟-电压曲线会随环境温度发生变化,同时,LED 和光电探测器随环境温度的变化曲线还有待进一步测量。在后续的搭载系统设计中,可以为整机增加恒温装置或者保温层,防止环境温度变化导致 LCVR 的相位延迟-电压曲线漂移。

参 考 文 献

- [1] 刘晓凤, 彭丽萍, 赵元安, 等. 液晶光学器件的近红外激光损伤研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0100002.
Liu X F, Peng L P, Zhao Y A, et al. Research progress on near-infrared high-power laser damage of liquid crystal optical devices[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0100002.
- [2] 段雨飞, 李峰, 杨直, 等. 基于液晶空间光调制器进行光谱调制的飞秒啁啾脉冲放大系统[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1101001.
Duan Y F, Li F, Yang Z, et al. Femtosecond chirped pulse amplification system with liquid crystal spatial light modulator for spectral modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1101001.
- [3] 刘言军, 蔡文锋, 李焯, 等. 液晶随机激光: 原理与研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1201006.
Liu Y J, Cai W F, Li Y, et al. Liquid crystal random laser: principles and research progresses [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1201006.
- [4] 王刚, 侯俊峰, 林佳本, 等. 液晶可变延迟器相位延迟-电压曲线精确快速标定[J]. 光学精密工程, 2020, 28(4): 827-833.
Wang G, Hou J F, Lin J B, et al. Accurate and fast calibration of liquid crystal variable retarder phase delay-voltage curve[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(4): 827-833.
- [5] 刘铁诚, 胡敬佩, 朱玲琳, 等. Sellmeier 模型表征混合液晶双折射率色散的实验研究[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0804002.
Liu T C, Hu J P, Zhu L L, et al. Experimental study on birefringence dispersion for liquid crystal mixture by Sellmeier model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0804002.
- [6] Cao Z L, Peng Z H, Xuan L, et al. Design and fabrication of 2 kHz nematic liquid crystal variable retarder with reflection mode[J]. Liquid Crystals, 2020, 47(6): 870-881.
- [7] Gupta A K, Fatima A, Nishchal N K, et al. Phase imaging based on modified transport of intensity equation using liquid crystal variable retarder with partial coherent illumination[J]. Optical Review, 2020, 27(1): 142-148.
- [8] Zhang Y, Xuan J B, Zhao H J, et al. Integrated spectral phase delay calibration technique for a liquid crystal variable retarder used in wide-bandwidth working channel[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 186-192.
- [9] 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): 12038-12048.
- [10] Yan T Y, Zhang C M, Zhang J R, et al. High resolution channeled imaging spectropolarimetry based on liquid crystal variable retarder [J]. Optics Express, 2018, 26(8): 10382-10391.
- [11] Soltau D. Instrumental polarization effects of the German vacuum tower telescope (VTT) at Tenerife[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2265: 463-467.
- [12] Mein P, Rayrole J. Themis solar telescope [J]. Vistas in Astronomy, 1985, 28: 567-569.
- [13] Medwadowski S J. Structure of the spectroscopic survey telescope (SST) [J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2199: 366-375.
- [14] Volkmer R, von der Lube O, Soltau D, et al. Optical and thermal design of the main optic of the solar telescope GREGOR [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5179: 270-281.
- [15] Thompson W T, St Cyr O C, Burkepile J T, et al. Automatic near-real-time detection of CMEs in Mauna Loa K-Cor coronagraph images[J]. Space Weather, 2017, 15(10): 1288-1299.
- [16] Song Z M, Qu Z Q. A novel scanning method applied to new-style solar telescope based on autoguiding system[J]. Advances in Astronomy, 2018, 2018: 4575679.
- [17] Alvarez-Herrero A, Martinez-Pillet V, del Toro Iniesta J C, et al. The IMAx polarimeter for the solar telescope SUNRISE of the NASA long duration balloon program [J]. EPJ Web of Conferences, 2010, 5: 05002.
- [18] Deng Y Y, Zhang H Y, Yang J F, et al. Design of the Full-disk Magneto Graph (FMG) onboard the ASO-S[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(11): 157.
- [19] Hou J F, Wang D G, Deng Y Y, et al. Interference effect on the liquid-crystal-based Stokes polarimeter [J]. Chinese Physics B, 2020, 29(12): 124211.
- [20] 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.
Jiang J J, Zhang D Y, Li J F. Liquid crystal variable retarder development and electric-control retardation measurement [J]. Laser Technology, 2011, 35(5): 652-655.
- [21] 李君. 手性液晶旋光效应的热光与电光特征研究与验证[D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 64-72.
Li J. Research and verification on thermo optic and electro optic characteristics of chiral liquid crystal's rotatory effect [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 64-72.
- [22] 杨登科, 吴诗聪. 液晶器件基础[M]. 郭太良, 周雄图, 译. 北京: 科学出版社, 2016: 301-302.
Yang D K, Wu S T. Fundamentals of liquid crystal devices[M]. Guo T L, Zhou X T, Transl. Beijing: Science Press, 2016: 301-302.
- [23] 刘刚艳. 基于 CCD 校准用 LED 光源热稳定性的研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2011: 62-63.
Liu G Y. Study of thermal stability of LED light source used for CCD calibration [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2011: 62-63.

Design and Mechanical and Thermal Properties of Spaceborne Liquid Crystal Tester

Huang Wei^{1,2,3}, Hou Junfeng^{1,2,3*}, Lin Jiaben^{1,2,3}, Zhang Yang^{1,2,3}, Deng Yuanyong^{1,2,3}, Wang Haifeng⁴

¹National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

²Key Laboratory of Solar Activity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China

Abstract

Objective The nematic liquid crystal variable phase retarder (LCVR) has the advantages of a large aperture, fast modulation speed, low driving voltage, wide spectral range, lightweight, low power consumption, and no rotating structure, and it is the only low-voltage polarization modulator that can realize fast imaging and spectral observation in the solar physics research area. LCVR develops quickly in ground-based observation equipment but slowly in space applications. Alvarez-Herrero, Hou Junfeng, and others have studied the performance changes of LCVR before and after various space irradiation, as well as mechanical and thermal tests, but its performance in the spaceborne environment is still unknown. Thus, it is critical to validate its space adaptability via satellite-carrying and ground process monitoring tests. This paper describes the design and ground environment monitoring test of a set of spaceborne liquid crystal phase retardation testing instruments (hereinafter referred to as liquid crystal tester). The liquid crystal tester will carry a specific type of satellite to test the phase retardation modulation stability of the LCVR.

Methods LCVR consists of liquid crystal (LC) molecules, a glass substrate with an LC holding cavity, an indium tin oxide (ITO) conductive film attached to the glass substrate's inner surface, and an oriented film (Fig. 1). The retardation of the LCVR can be continuously adjusted by changing the voltage on the ITO film (Fig. 3). The light intensity method was used to measure the retardation-voltage curve for the LC tester, considering volume, power consumption, and reliability (Fig. 2). The light source generated incident light in this optical path, which was received by the detector after passing through the collimating mirror, optic filter, polarization modulation system, and imaging mirror in turn. The normalized intensity-voltage curve can be calculated and converted into a retardation-voltage curve using polarization optics theory.

Results and Discussions After the design of the flying part of the LC tester was completed (Fig. 4), the ground environment test was carried out. Before and after the mechanical test, the retardation-voltage curve of the LCVR did not change significantly (the average standard deviation (STD) $< 0.1^\circ$). In the thermal test, the current of the light source increased with increasing ambient temperature (~ 0.05 mA) (Fig. 8), but the intensity of the detector decreased (about 1 V), suggesting that the decrease in detector detection efficiency is greater than the increase in light source intensity. The retardation-voltage curve had good temperature repeatability when the LC tester was kept at the same temperature (the maximum retardation STD was 0.185°). When the difference between the retardation-voltage curves at high and low temperatures was compared, the maximum difference of the thermal cycle was approximately 7.5° , and that of thermal vacuum was approximately 15° [Fig. 10 (a) and Fig. 10 (b)]. The difference between the predicted retardation-voltage curve and the actual curve at different ambient temperatures was less than 1° using the linear compensation method. To calibrate the data over the entire temperature range, any 2 retardation-voltage curves at known ambient temperatures could be used. The normalized intensity change of the LCVR during the 9-month continuous test was 0.006, the retardation change was $< 1^\circ$, and the mean STD was 0.27° (Fig. 11).

Conclusions In this paper, a set of minimized liquid crystal carrying test systems is designed to validate the stability of LCVR retardation modulation in space. The flying part of the LC tester passed all mechanical and thermal tests, and the entire thermal test process was monitored. The monitoring data show that the retardation-voltage curve has good temperature repeatability when the LC tester is in the same temperature environment. The retardation-voltage curve changes linearly with ambient temperature when in different ambient temperatures, which can be used for on-orbit data calibration. After 9 months of longterm stability testing, the change in retardation is about 1° , and the mean value of retardation STD is 0.27° , indicating that both the liquid crystal tester and the LCVR perform well.

Key words measurement; nematic liquid crystal; polarization modulation; phase retardation; liquid crystal electric driver