

液晶可变延迟器相位延迟-电压曲线精确快速标定

王刚, 侯俊峰, 林佳本, 王东光, 张鑫伟

引用本文:

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 Gang, HOU Jun-feng, LIN Jia-ben, 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0827>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

弹光和电光级联的组合相位调制型椭偏测量术

Phase-modulated ellipsometry combined photo-elastic modulation with electro-optic modulation
光学精密工程. 2016, 24(4): 690-697 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162404.0690>

液晶相控阵指向矢分布求解及其光束偏转

Solution of liquid crystal phased array director and its beam deflection
光学精密工程. 2018, 26(12): 2894-2901 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182612.2894>

"高分二号"上相机和星敏感器相对安装姿态的测量

High precision automatic measurement for alignment of camera and star-sensor in GF-2
光学精密工程. 2017, 25(11): 2931-2938 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172511.2931>

姿态匹配法测量船体变形角中时间延迟的补偿

Compensation of time delay in ship deformation measured by attitude matching
光学精密工程. 2015, 23(5): 1409-1415 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152305.1409>

单频激光干涉仪正交信号的高精度处理

High precision processing of quadrature signals for homodyne interferometer
光学精密工程. 2017, 25(9): 2309-2316 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172509.2309>

文章编号 1004-924X(2020)04-0827-07

液晶可变延迟器相位延迟-电压曲线精确快速标定

王 刚^{1,2,3}, 侯俊峰^{1,2,3*}, 林佳本^{1,2}, 王东光^{1,2}, 张鑫伟^{1,2,3}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 中国科学院 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)

摘要: 相位延迟-电压曲线的精确标定是向列型液晶可变相位延迟器能否实现高精度偏振测量的关键。为了提高液晶相位延迟的测量精度, 建立了一套精确高效的自动测量系统。首先, 提出了一种新的测量方法, 该方法综合了光强法、索累补偿器法以及等偏离测量技术, 可以解决现有方法测量精度低或效率低的问题。在此基础上建立了测量系统, 并利用 Labview 技术实现了系统的自动化测量, 进一步缩短了测量时间。最后, 对系统的测量误差、重复精度以及工作效率进行了实验验证。实验结果表明, 系统延迟测量误差小于 0.057 5%, 重复精度小于 0.019 7%, 可在 30 min 内完成 100 个延迟采样点的自动化测量。该系统适用于可见光范围内液晶可变延迟器相位延迟-电压曲线的精确标定。

关键词: 液晶相位可变延迟器; 相位延迟-电压曲线; 精确自动化标定; 索累补偿器法; 等偏离技术

中图分类号: TH744.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202804.0827

Accurate and fast calibration of liquid crystal variable retarder phase delay-voltage curve

WANG Gang^{1,2,3}, HOU Jun-feng^{1,2,3*}, LIN Jia-ben^{1,2}, WANG Dong-guang^{1,2}, ZHANG Xin-wei^{1,2,3}

(1. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

2. *Key Laboratory of Solar Activity, Beijing 100101, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: jfhou@bao.ac.cn*

Abstract: The accurate calibration of the phase-delay voltage curve is the key to achieving high precision polarization measurements using a nematic Liquid Crystal Phase Variable Retarder (LCVR). An accurate and efficient automatic measurement system was established to improve the accuracy of the liquid crystal retarder delay measurement. Firstly, a new measurement method was proposed, which combined the light intensity method, the Soleil compensator method, and the equal deviation measurement technology, to solve the problem of low measurement accuracy or the low efficiency of the existing methods. A measurement system was developed to overcome these challenges, and automated measurement of the system was realized by Labview technology, which further shortened the system measurement time. Finally, the experimental errors, repeatability, and the working efficiency of the

收稿日期: 2019-06-17; 修订日期: 2019-07-15.

基金项目: 中科院空间科学先导专项 (No. XDA04061002); 中科院空间科学先导专项预先研究项目 (No. XDA15010800); 国家自然科学基金面上项目 (No. 11773040)

system were verified experimentally. The experimental results show that the system delay measurement error is less than $0.0575\% \lambda$, the repeat accuracy is less than $0.0197\% \lambda$, and 100 delayed sampling points can be automatically measured in 30 minutes. The system is suitable for the accurate calibration of the phase delay-voltage curve of a liquid crystal variable retarder in the visible range.

Key words: liquid crystal phase variable retarder; phase delay-voltage curve; precise automated calibration; compensator method; equivalent deviation technology

1 引言

液晶相位可变延迟器(Liquid Crystal phase Variable Retarder, LCVR)具备响应速度快、驱动电压低以及对偏振光的相位延迟随驱动电压连续可调等优点^[1],在遥感测量、激光调制以及光谱分析等领域有着广泛的应用^[2-4]。近年来,液晶型观测仪器在太阳物理研究领域的应用越来越多,例如用于日冕观测的液晶型可调谐滤光器^[5-6]、可见光及红外波段的液晶偏振分析器^[7-8],以及用于太阳光球观测以及太阳磁场测量的液晶型滤光器等。

在 LCVR 实际应用过程中,主要通过调节驱动电压从而改变液晶双折射率,进而实现对偏振光相位延迟的调制。所以,LCVR 相位延迟-电压曲线的标定精度是影响液晶型仪器偏振测量精度的关键因素。目前,最为常用的液晶相位延迟标定方法是基于斯托克斯矢量的光强法^[9-11]。该方法根据测量系统的输出光强值以及光强与相位延迟的理论关系计算出相位延迟结果。这种方法测量速度快、光路结构简单,但受光源稳定性、偏振器件的偏振度以及杂散光等因素的限制,难以实现相位延迟的高精度测量^[12]。除此之外,相关研究人员还提出了基于索累补偿器的标定方法^[13]、基于旋转四分之一波片补偿法^[14]、基于 Stokes 参量测量仪的测量方法^[15]、以及基于偏振三角干涉仪^[16]等相位延迟标定方法。其中,索累补偿器法的测量精度最高,满足液晶型太阳观测仪器研制的高精度定标需求。但是,LCVR 的相位延迟与电压呈非线性关系,需要通过多点测量才能实现相位延迟-电压曲线的标定。而传统的索累补偿器法中需要人工调整补偿器件,实际测量效率较低,不适用于多点相位延迟标定。为了解决该问题,本文提出了综合光强法、索累补偿器法及等偏离测量补偿法的相位延迟标定系统,并实现了

测量系统的自动化控制。该系统可完成 LCVR 相位延迟-电压曲线的高精度快速标定。

2 测量方法及原理

首先对不同电压下液晶的相位延迟进行快速测量,初步确定相位延迟区间,缩小相位延迟补偿范围,在此基础上使用补偿法及等偏离技术对相位延迟精确标定。

2.1 液晶相位延迟快速测量

由于液晶相位延迟-电压曲线的非线性特性,需要对多个相位延迟点进行标定,以获得充分的采样数据,从而拟合出较为理想的曲线。若直接采用索累补偿法测量,则在每一个未知相位延迟进行测量时都需要进行 $0 \sim 2\pi$ 的相位延迟补偿,严重影响测量效率。本文在对液晶相位延迟精确标定前,先选用光强法实现对液晶相位延迟的快速定位,以缩小相位延迟补偿范围。图 1 为相位延迟快速测量方法的光路示意图,以起偏器 P1 的偏振方向为 x 轴,LCVR 光轴方向与 x 轴夹角 θ 为 45° ,检偏器 P2 偏振方向与 x 轴平行, z 轴为光传输方向。根据偏振光传输理论,透射光强 I_{out} 与入射光强 I_{in} 之间有如下关系:

$$I_{out} = \frac{1}{4} I_{in} (1 + \cos \delta), \quad (1)$$

其中 δ 为 LCVR 的相位延迟。从式(1)中可知,

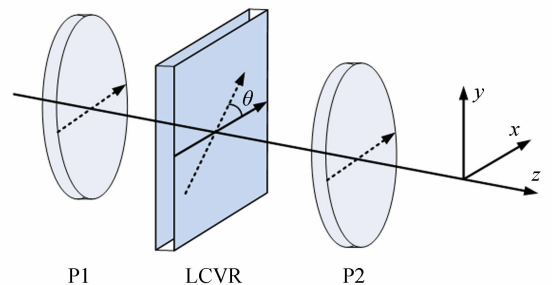


图 1 光强法光路示意图

Fig. 1 Layout of light intensity method

当 $\delta = 2k\pi$ 时可探测到最大透射光强 $I_{\max} = 1/2I_{in}$ 。控制液晶驱动电压幅值,测得 $0 \sim 10$ V 间隔 0.1 V 下的透射光强 I_{out} ,取最大值 I_{\max} ,带入式(1)即可计算出相位延迟量。

2.2 液晶相位延迟精确标定

为提高系统的测量精度,在相位延迟快速测量的基础上,采用基于索累-补偿器法对 LCVR 的相位延迟电压进行精确标定。图 2 为索累补偿法光路示意图。 x 轴为 P1 偏振方向,LCVR 光轴与 x 轴夹角 θ_1 为 45° 。索累补偿器快轴与 x 轴夹

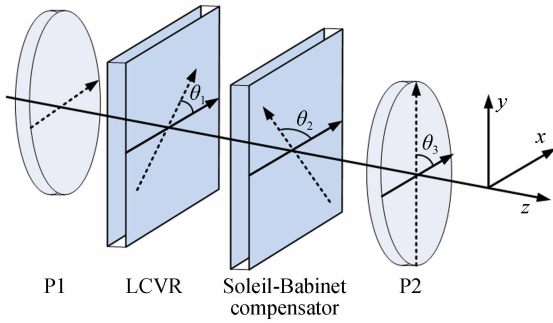


图 2 索累补偿法光路示意图

Fig. 2 Optical path of Soleil compensation method

角 θ_2 为 135° ,与 LCVR 光轴正交。P2 偏振方向与 x 轴夹角 θ_3 为 90° ,与 P1 正交。系统透射光强与液晶相位延迟 δ_1 、补偿器相位延迟 δ_2 间的关系为:

$$I_{out} = I_{in} \sin^2 \left(\frac{\delta_1 - \delta_2}{2} \right). \quad (2)$$

当 $\delta_1 = \delta_2$ 时,系统透射光强最小,即可以通过计算消光状态下索累补偿器的相位延迟从而得到 LCVR 的相位延迟量。索累补偿器由可移动光楔 MW、固定光楔 FW 及固定平面波片 FP 组成,其相位延迟量 δ_2 与 MW 沿 x 轴方向相对于原点的移动量 D 的关系为:

$$\delta_2 = \frac{\tan(\alpha\mu)}{\lambda} D, \quad (3)$$

其中: α 为光楔倾角; $\mu = n_e - n_o$,为光楔双折射率。当波长 $\lambda = \lambda_0$ 时,相位延迟 δ_2 与 D 间为线性关系。为避免对双折射率 μ 的直接测量,在实际使用时一般采用相对测量方式,测量原理如式(4)所示:

$$\delta_2 = \frac{D_{SBC} - D_0}{D_{\lambda_0} - D_0}. \quad (4)$$

当补偿器件以及测量环境不变时,补偿器相

位延迟为 0 和 λ_0 产生消光时对应的光楔移动量 D_0 和 D_{λ_0} 为常量。根据插入 LVCR,测得消光时光楔的移动量 D_{SBC} (暗点位置)即可计算出液晶当前的相位延迟量。

2.3 基于等偏离法的暗点位置测量

由式(4)可知,索累补偿法的测量精度主要受消光点(暗点)位置测量准确度的影响,本文采用测量精度更高的等偏离法对暗点进行精确定位。实现原理如图 3 所示,图中圈点为暗点附近的实际采样数据。根据式(2)及式(3)可知,理论上透过光强与光楔移动距离是关于暗点对称的函数,但在实际测量中无法准确采集出暗点位置导致左右区域采样点不对称。为解决该问题,在实际操作过程中首先选取光强最小值左边区域附近的采样点,并记录它们对应的光楔位置 D 。然后在最小值右边区域选取相同数量的采样点,对它们进行三次样条插值处理。在处理后的数据中查找出与左边区域采样点光强值相等对应的位置 D' ,计算 D 和 D' 的平均值即可准确得出暗点位置。

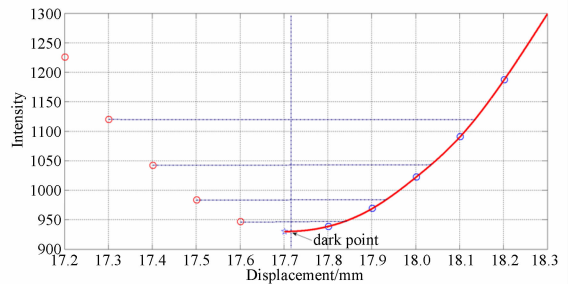


图 3 等偏离法测量原理

Fig. 3 Principle of equivalent deviation method

3 实验装置与自动化控制

3.1 实验装置

根据第 2 节所述原理,搭建测量 LCVR 相位延迟-液晶标定平台,平台结构示意图如图 4 所示。该平台采用配有稳压电源的 110 W EKE 宽带卤素灯作为系统光源,入射光经过光纤束及准直镜后转换为准直度小于 0.5° 、光斑小于 6.4 mm 的准直光束。后经起偏器、液晶波片、补偿器以及检偏器,最终由光纤光谱仪接收。

系统中所使用的起偏器以及检偏器消光比大于 $10\ 000 : 1$,使用由直流伺服电机驱动的中空旋

转位移台控制偏振片光轴角度, 旋转角度的双向重复精度为 $\pm 0.1^\circ$ 。为了减小环境温度波动产生的 LCVR 相位延迟测量误差, 设计专用恒温筒, 并采用自研高精度温控系统将待测样品所处环境的温度波动控制在 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 以内。采用由索雷博公司生产的 SBC-VIS 型索累补偿器作为补偿器件, 可实现 365~800 nm 波段, $0\sim 2\pi$ 相位延迟的连续可调。使用 Z825B 型高精度私服马达替换标准千分尺, 实现索累补偿器的电控调节。探测器为海洋光学生产的 USB2000+ 型光栅光谱仪, 其中配备了微型光栅以及线阵 CCD, 可探测 300~1 100 nm 波长处的光强值。

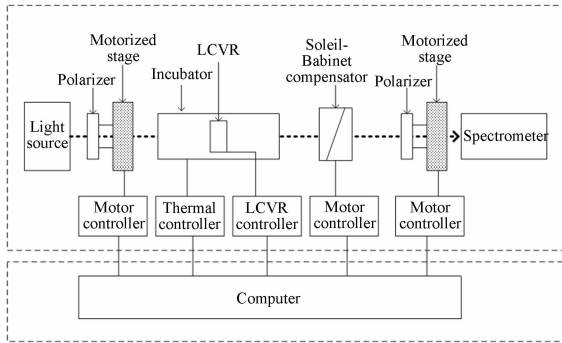


图 4 液晶可变延迟器相位延迟测量平台

Fig. 4 Measuring platform for phase delay of liquid crystal variable retarder

3.2 自动化控制

结合 Labview 控制技术以及 MATLAB 数据处理技术实现全部测量过程的自动化控制。从功能上可以将控制系统分为两个部分。第一部分为 LCVR 相位延迟快速测量, 其控制流程如图 5 所示。首先, 将起偏器 P1 及检偏器 P2 的偏振方向调至水平, LCVR 光轴为 45° 。对 $0\sim 10\text{ V}$, 间隔 0.1 V 驱动电压下的输出光强进行探测, 得到光强-电压数据。根据式(1)将光强-电压数据转换为相位延迟-电压数据并存储至外部数据库。

第二部分为基于补偿法的 LCVR 相位延迟-电压自动化定标, 其流程如图 6 所示。首先读取光强法所测量的数据, 根据式(4)将相位延迟-电压数据转换为位移-电压数据, 存入缓存中。测量过程中以缓存中的数据为参考量, 缩小索累补偿器的扫描范围。采用等偏离法精确定位暗点, 对不同电压下补偿器移动光楔的位移量进行修正,

根据式(4)推导出精确延迟量。最终完成 LCVR 延迟-电压曲线的精确标定。

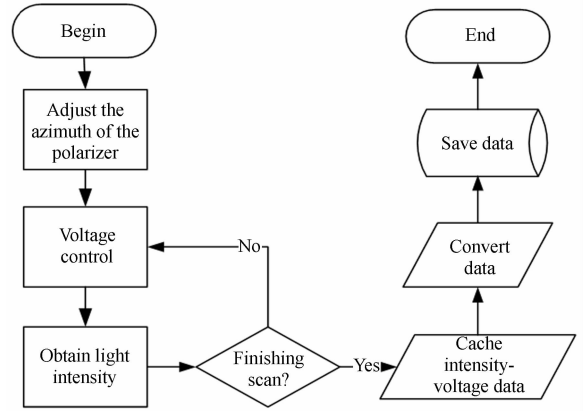


图 5 相位延迟快速测量流程

Fig. 5 Flow chart of automatic measurement for light intensity method

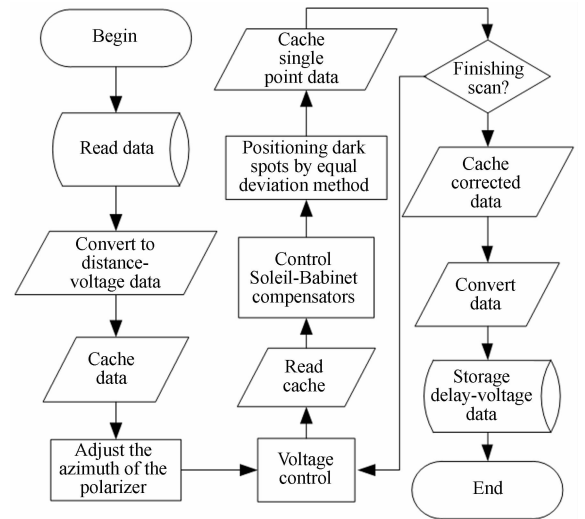


图 6 补偿法自动化测量流程图

Fig. 6 Flow chart of automatic measurement for compensation method

4 实验结果与分析

4.1 暗点定位方法对比

本文采用等偏离法实现暗点位置的精确定位。为验证该方法的有效性, 分别采用等偏离法以及最小值法对同一相位延迟对应的暗点位置进行重复测量, 结果如图 7 所示。从图中可以看出, 等偏离法(圈点)的暗点测量结果的重复精度远高

于插值法的测量精度(星点)。进一步地,将实验测得的 D_0 (5.446 mm) 和 D_{λ_0} (10.355 mm) 代入式(4),可得到两种定标方法对晶体相位延迟的测量结果。通过计算可得 10 次测量数据的 PV 分别为 $0.019\% \lambda$ (等偏离法) 和 $5.57\% \lambda$ (最小值法),表明等偏离法可有效提高液晶相位延迟测量的精确度。

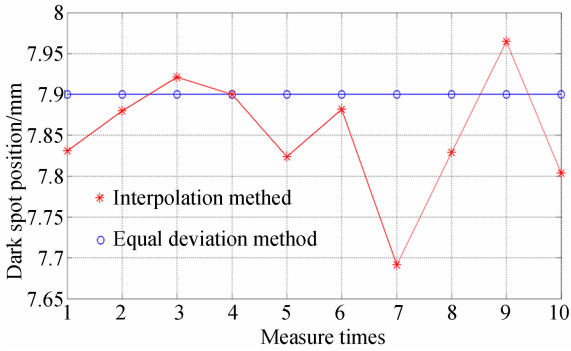


图 7 暗点定位方法对比

Fig. 7 Comparison of different methods for dark point location

4.2 系统测量精度及重复精度

液晶波片对偏振光的相位延迟受外场环境的影响较大。在对液晶相位延迟进行测量时,液晶自身的电光特性以及测量系统的误差均会造成测量数据的波动。为了剥离液晶特性的影响,本文对性质相对稳定的标准二分之一波片不同空间位置的相位延迟进行重复测量,进而得出系统的测量误差以及重复精度,如表 1 所示。从测量结果可知,系统相位延迟测量的相对误差(测量精度)小于 $0.0575\% \lambda$,重复精度小于 $0.01197\% \lambda$ 。

4.3 液晶相位延迟点测量结果

表 2 所示为不同驱动电压下的液晶波片相位延迟测量结果。在保证测量装置及测量环境不变的前提下,以第一次测量结果为参考标准,对相位延迟为 $0.25\lambda, 0.5\lambda, 0.75\lambda$ 以及 λ 对应的 4 个电压点进行重复测量。由数据(表 2)可知:测量结果的 PV 值小于 $0.54\lambda\%$,RMS 小于 $0.26\lambda\%$ 。本测量结果表明,液晶波片的电光效应特性存在一定程度上的不稳定性。

表 1 相位延迟测量系统的精度测量结果

Tab. 1 Accuracy of proposed phase delay measuring system

Position	Retardation/ λ					Average/ λ	RMS/ λ
	1	2	3	4	5		
Up	0.500 472 2	0.500 611 1	0.500 583 3	0.500 583 3	0.500 5	0.500 527 8	0.000 062 1
Center	0.499 833 3	0.499 805 6	0.500 083 3	0.500 01	0.499 88	0.499 913 9	0.000 113 0
Down	0.500 416 7	0.500 638 9	0.500 5	0.500 722 2	0.500 66	0.500 572 2	0.000 119 7
Left	0.499 444 4	0.499 583 3	0.499 666 7	0.499 555 6	0.499 72	0.499 505 6	0.000 100 0
Right	0.500 555 6	0.500 75	0.500 694 4	0.500 611 1	0.500 75	0.500 575 0	0.000 093 3

表 2 液晶波片相位延迟测量结果

Tab. 2 Measurement result for phase delay of LCVR

Voltage/V	Retardation/ λ					PV/ λ	RMS/ λ
	1	2	3	4	5		
5.059	0.25	0.249 2	0.249 6	0.250 4	0.248 9	0.001 5	0.002 4
3.005	0.50	0.498 2	0.499 1	0.501 6	0.499 2	0.003 4	0.002 6
2.291	0.75	0.751 4	0.750 2	0.748 5	0.748 680 6	0.002 9	0.001 8
1.844	1.00	1.002 5	1.002 077 8	0.997 133 3	1.002 411 1	0.005 4	0.002 3

4.4 相位延迟-电压曲线测量结果

图 8 为液晶相位延迟-电压曲线测量结果。测量环境温度为 35 ℃,驱动电压为 0~10 V,测量间隔为 0.1 V,共计 100 个数据点。从图 8 中可以看出,实测曲线具备较好的平滑度,符合液晶波片相位延迟随驱动电压连续变化的特性。

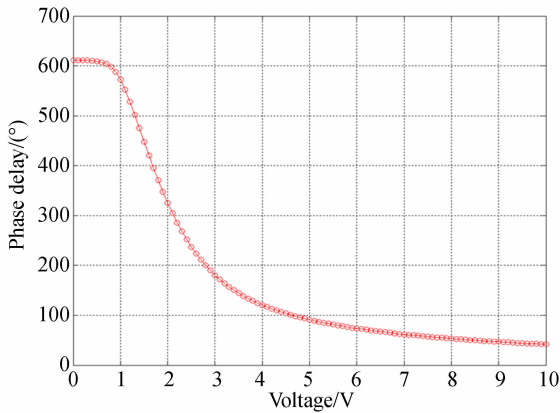


图 8 相位延迟-电压曲线
Fig. 8 Delay-voltage curve

4.5 测量效率对比

表 3 中分别为常用的索累补偿法、自动化补偿法以及本文提出的综合自动化测量方法测量 LCVR 相位延迟时所需的时间。从表 3 可以看出,本文所设计的系统可在保证测量精度的前提下

表 3 不同相位延迟测量方法的测量时间

Tab. 3 Time to locate dark point by different phase delay measurement methods

Methods	One sampling point	Curve calibration
Classical	3 min	7~8 h
Automation	1.5 min	2.5 h
Pretreatment & Automation	20 s	0.5 h

参考文献:

- [1] SHANG X B, TAN J Y, WILLEKENS O, *et al.*. Electrically controllable liquid crystal component for efficient light steering[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(2): 1-13.
- [2] KOOP G. Tunable birefringent filters using liquid

大幅提升测量效率。

5 结 论

本文提出了用于 LCVR 相位延迟-电压曲线标定的方法。该方法将测量过程分为两步,首先使用光强法快速测量相位延迟-电压曲线,确定不同驱动电压下的液晶相位延迟范围;然后采用索累补偿法对相位延迟进行精确标定。这种测量方式解决了光强法测量精度低以及索累补偿法测量效率低的问题。并且,采用等偏离技术进一步提高索累补偿法的测量精度,利用 Labview 技术实现了系统自动化控制。最终实现 LCVR 相位延迟-电压曲线的高精度快速标定。针对该系统做了不同类型的测量实验,实验结果表明,本文采用的等偏离技术可有效提升暗点识别准确率,从而提高索累补偿器法的测量精度;本系统的相位延迟测量误差小于 $0.0575\% \lambda$,重复精度小于 $0.0197\% \lambda$,可实现相位延迟的高精度测量。本系统的测量效率优于传统的索累补偿器测量方法。

此外,在对液晶相位延迟进行重复测量的实验中发现,在不改变驱动器电压的条件下液晶相位延迟的测量结果仍会产生波动,且波动范围随相位延迟量的增加而增大。通过对比相位延迟-电压测量结果可知,在相位延迟为 360° 时对驱动电压的敏感性高于 90° 相位延迟位置,据此推断外加电场的不稳定会造成液晶相位延迟的小范围波动,在后续的液晶波片特性研究中需要考虑该因素。

致谢:感谢邓元勇老师、孙英姿老师给予的理论性指导,感谢张洋、周明尧在机械结构设计、加工方面的大力支持。本研究得到国家天文台所级公共技术服务中心项目的资助。

crystal variable retarders [J]. *SPIE*, 1994, 2873: 324.

- [3] LAURILA T, JOUTSENOJA T, HERNBERG R, *et al.*. Tunable external-cavity diode laser at 650 nm based on a transmission diffraction grating[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5632.
- [4] SHEN Z X, LI J F, ZHANG D Y, *et al.*. Design and test of a near-infrared tunable liquid crystal bi-

- refrangent filter[J]. *SPIE*, 2014, 9421: 178.
- [5] DENKER C, DIDKOVSKY L, MA J, *et al.*. Imaging magnetographs for high-resolution solar observations in the visible and near-infrared wavelength region[J]. *Astronomische Nachrichten*, 2003, 324(4): 332-333.
- [6] FINESCHI S, CAPOBIANCO G, MASSONE G. Liquid crystals Lyot filter for solar coronagraphy [J]. *SPIE*, 2011, 8148(1): 814808-8148010.
- [7] ZHANG Z Y, DENG Y Y, WANG D G, *et al.*. Near-infrared HeI 1083 nm Stokes polarimeter based on liquid crystal variable retarders [J]. *SPIE*, 2005, 5901: 377-388.
- [8] WU S T, EFRON U, HESS L D. Birefringence measurements of liquid crystals[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(21): 3911.
- [9] 赵海博, 赵慧洁, 张颖. 带有补偿器的液晶相位可变延迟器特性研究[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8): 1798-1803.
ZHAO H B, ZHAO H J, ZHANG Y. Study on characteristics of the liquid crystal variable retarder attached with the compensator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1798-1803. (in Chinese)
- [10] 张颖, 赵海博. 带有补偿器的液晶相位可变延迟器 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8): 1798-1803.
ZHANG Y, ZHAO H B. Liquid crystal variable retarder attached with compensator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1798-1803. (in Chinese)
- [11] 王伟, 李国华, 薛冬. 液晶电控双折射率与电压关系的研究[J]. *光学学报*, 2004, 24(7): 970-972.
WANG W, LI G H, XUE D. A study of voltage-dependent electric-control birefringence of liquid crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(7): 970-972. (in Chinese)
- [12] 孙英姿, 王东光, 张洪起, 等. 红外波片相位延迟的测试方法及精度分析[J]. *光学学报*, 2006, 26(5): 685-688.
SUN Y Z, WANG D G, ZHANG H Q. Method and precision analysis for measuring retardation of infrared waveplate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5): 685-688. (in Chinese)
- [13] 张志勇, 邓元勇, 王东光, 等. 基于液晶波片的近红外偏振分析器[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 696-702.
ZHANG ZH Y, DENG Y Y, WANG D G, *et al.*. Near infrared polarimeter based on liquid crystal variable retardes[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(3): 696-702. (in Chinese)
- [14] BAI L L, LI D, HUANG Z Q. Liquid crystal variable retarders' phase retardation measurement with quarter-wave plate and the validation [J]. *Solid State Phenomena*, 2011, 181/182: 297-300.
- [15] 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. (in Chinese)
- [16] PAWONG C, KAEWON R, CHITAREE R, *et al.*. Measurement of phase retardation in a liquid crystal variable wave retarder using a polarizing triangular interferometer[C]. 2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), September 24-27, 2016, Hangzhou, China. New York, USA: IEEE, 2016.

作者简介:



王刚(1992—),男,吉林白山人,博士研究生,2014年于合肥工业大学获得学士学位,2016年于北京交通大学获得硕士学位,研究方向为偏振光学仪器及自动控制。E-mail: gwang@nao.cas.cn

通讯作者:



侯俊峰(1986—),男,山西晋城人,博士,高级工程师,硕士生导师,主要从事偏振光学仪器的研究。E-mail: jfhou@bao.ac.cn