

激光与光电子学进展

快轴可调弹光调制器闭环稳定控制研究

臧晓阳^{1,2,3}, 李克武^{2,3}, 王志斌^{1,2,3*}, 李坤钰^{1,2,3}, 梁振坤^{2,3}, 刘坤^{1,2,3}¹中北大学仪器与电子学院, 山西 太原 030051;²中北大学前沿交叉科学研究院, 山西 太原 030051;³山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051

摘要 快轴可调弹光调制器(FaaPEM)不仅具有调制频率高、通光孔径大、抗震性能好等优势,同时还弥补了传统弹光调制器相位延迟量和快轴方位角无法灵活调节的不足,在偏振调制以及偏振测量中发挥着重要的作用,FaaPEM是由两个压电驱动器和弹光晶体构成的谐振型光机电器件,在高压谐振状态下,因其自身的温度升高会导致弹光晶体谐振频率与驱动电压的频率不匹配,极大地影响了对于入射光的调制效率。为了确保FaaPEM在工作时的调制能力和稳定性达到最优效果,开展了FaaPEM的稳定闭环控制研究,提出了基于调制信号跟踪和相位调节的闭环驱动控制方法,并对FaaPEM稳定性进行了测试。测试结果表明:该系统加载反馈控制后,半波状态下稳定度达到4.18%,四分之一波状态下稳定度达到3.43%。

关键词 物理光学; 快轴可调弹光调制器; 频率温漂; 数字锁相技术; 反馈控制

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223051

Study on Closed-Loop Stability Control of Fast Axis Adjustable Photoelastic Modulator

Zang Xiaoyang^{1,2,3}, Li Kewu^{2,3}, Wang Zhibin^{1,2,3*}, Li Kunyu^{1,2,3}, Liang Zhenkun^{2,3}, Liu Kun^{1,2,3}¹School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;²Frontier Interdisciplinary Research Institute, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;³Engineering and Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, Taiyuan 030051, Shanxi, China

Abstract Fast axis adjustable photoelastic modulator (FaaPEM) not only has the advantages of high modulation frequency, large aperture, and good seismic performance, but also makes up for the shortcomings of traditional elastic optical modulator, such as phase delay and fast axis azimuth. It plays an important role in polarization modulation and polarization measurement. FaaPEM is a resonant optomechanical device composed of two piezoelectric drivers and elastic optical crystals. In the high voltage resonant state, due to its own temperature rise, the resonant frequency of elastic optical crystals does not match the frequency of driving voltage, which greatly affects the modulation efficiency of incident light. In order to ensure the optimal modulation capability and stability of FaaPEM at work, this paper carries out the research on the stable closed-loop control of FaaPEM, proposes a closed-loop drive control method based on modulation signal tracking and phase regulation, and tests the stability of FaaPEM. The test results show that the stability of the system reaches 4.18% under half wave state and 3.43% under quarter wave state after loading feedback control.

Key words physical optics; fast axis adjustable photoelastic modulator; frequency temperature drift; digital phase locking technology; feedback control

1 引言

偏振测量技术,对于国防军工和生物传感领域的

不断发展有着非常重要的作用。为了更好地研究偏振测量,国内外研究学者们提出一系列光学偏振态测量方法,其中包含声光调制、电光调制、法拉第磁光调制

收稿日期: 2022-10-15; 修回日期: 2022-11-16; 录用日期: 2022-12-14; 网络首发日期: 2023-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(62205310)、山西省自然科学基金(201901D111145)

通信作者: *wangzhibin@nuc.edu.cn

以及弹光调制等方法^[1]。快轴可调弹光调制器(FaaPEM)作为偏振测量的重要手段,经过不断发展,已被广泛应用于光谱测量、偏振成像、椭偏测量等方面。快速、高灵敏、全范围的优势,也促使其受到了国内外科学研发者的重视和推广。可以看出,提高FaaPEM的测试稳定性具有较大的应用需求。

弹光调制通过弹光晶体效应对入射光的偏振态实现相位调制。快轴可调弹光调制器在具备传统弹光调制器(PEM)高速高灵敏测量特点的同时,还能够通过调整驱动电压来灵活调节快轴方位角,从而实现全范围测量的功能^[2],并且相比传统的机械旋转补偿调节,其频率更高,实现过程更加平滑,在椭偏测量领域有着不可替代的优势,本文使用的快轴可调弹光调制器由两个呈45°夹角的压电晶体耦合在弹光晶体上,需要两路高压正弦波信号进行驱动,从弹光晶体内部的应力分布来看,其工作模式可分为纯驻波与纯行波模式,本文着重于纯驻波模式稳定控制,通过调节双驱动信号相位差控制快轴方位角。

弹光调制器在工作过程中通过给压电晶体垂直方向提供高压驱动信号,压电晶体产生水平方向的周期性振动,振动传导至弹光晶体,弹光晶体发生相应的振动^[3]。由于弹光效应,这些弹光晶体会产生呈周期性变化的双折射现象,从而改变进入弹光晶体光的偏振态,进而实现相位调制^[4-6]。弹光调制器工作时,高压驱动信号的幅值越高,弹光调制器相位延迟量就越大,但与此同时,弹光的热耗散效应也就越明显,从而降低了弹光调制器的工作性能。本文根据快轴可调弹光调制器的工作原理,建立了振动模型与温漂模型,相应地分析了影响其稳定工作的关键因素,针对工作需求,提出了基于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的闭环控制方法,该方法通过数字锁相技术对探测器信号进行提取,将数据运算处理后与设定的相位延迟量进行比较,再通过调节数字频率合成器技术(DDS)中频率控制字与相位差控制字来调节驱动信号,经高压放大电路放大后,最终实现了一个完整的闭环控制。通过模型分析和系统测试,实验结果表明,本系统对快轴可调弹光调制器的工作有着优良的稳定效果。

2 基本原理

2.1 快轴可调弹光调制器工作原理

传统的弹光调制器振动模型^[7]如图1所示。

实际上,由于受力角度问题,弹光晶体内的驻波可完全分解为顺逆时针两种方向上的行波,因此,应力在弹光晶体中的分布^[8]可描述为

$$T_{(R,\theta,t)} = T_0 \cos\left(\frac{\pi R}{l}\right) \left[\sin(2\pi ft - \alpha - 2\theta) + \sin(2\pi ft - \alpha + 2\theta) \right] \quad (1)$$

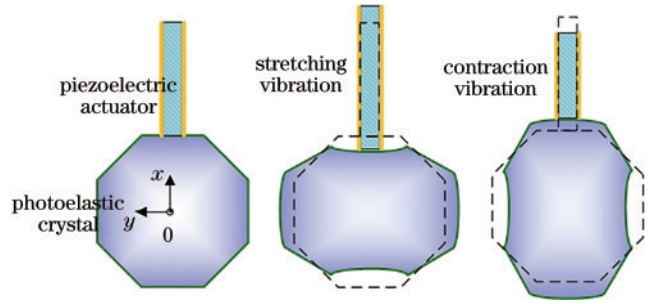


图1 弹光调制器振动模型

Fig. 1 Vibration model of PEM

由式(1)描述的应力分布可以看出,一系列驻波可看作是两列行波的叠加^[9]。为实现快轴方位角的自动化调节,通过在弹光晶体外部耦合两个压电晶体,相应地调节两压电晶体的振动,便可以改变驻波相位,从而实现快轴方位角和相位延迟量的灵活调节。如图2所示,在弹光晶体外耦合有两个压电晶体,且两压电晶体相对于弹光晶体呈对称分布,压电晶体C处于压电晶体A相距45°的空间位置上,此处为压电晶体A在弹光晶体C形成应力驻波的波节位置,所以此压电晶体C产生的应力驻波不会对压电晶体A产生的应力驻波有过大的影响,同理而言,由于对称分布,压电晶体A产生的应力驻波也不会对压电晶体C产生的应力驻波有过大的影响,综上可知,两压电晶体对彼此在弹光晶体中的应力驻波干扰均处于最小状态。

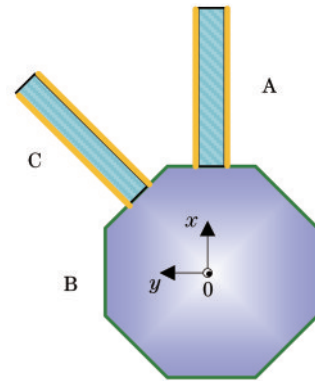


图2 快轴可调弹光调制器结构图

Fig. 2 Structure diagram of FaaPEM

当弹光晶体处于谐振状态时,两压电晶体工作频率相同,将C引入的应力驻波沿顺时针和逆时针两个方向分解,则弹光晶体中的应力分布可描述为

$$T = T_{A0} \cos\left(\frac{\pi R}{l}\right) \left[\sin(2\pi ft - 2\theta) + \sin(2\pi ft + 2\theta) \right] + T_{C0} \cos\left(\frac{\pi R}{l}\right) \left\{ \sin\left(2\pi ft - 2\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) - \alpha_{CA} + \gamma\right) + \sin\left[2\pi ft - 2\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) - \alpha_{CA} + \gamma\right] \right\} \quad (2)$$

式中: T_{C0} 和 T_{C0} 分别为压电晶体 A 和 C 驱动弹光晶体 B 的应力幅值; $\frac{\pi}{4}$ 为压电晶体 C 相对于压电晶体 A 的初始空间位置; γ 为两驱动信号之间的相位差^[10]。式(2)可进一步整理为

$$T = T_1 \sin(2\pi ft - 2\theta + \gamma_1) + T_2 \sin(2\pi ft + 2\theta + \gamma_2)。 \quad (3)$$

弹光调制器工作时, 弹光晶体中的应力可整理为驻波和行波的叠加^[11]。本文为实现快轴方位角灵活可调的模式, 仅考虑弹光晶体内只存在行波的状态。当 $\gamma - \alpha_{CA} = \pm \frac{\pi}{2}$ 且 $T_A = T_C$ 时, 弹光晶体中形成纯应力行波^[12], 式(3)可化为

$$T = 2T_A \sin(2\pi ft \pm 2\theta), \quad (4)$$

式中: $2\pi ft \pm 2\theta$ 的“+”和“-”分别代表应力行波沿

顺时针和逆时针传播。在纯行波状态下, 理论上, 两个压电驱动器在弹光晶体中形成的应力幅值应该相同, 但由于压电驱动器本身的压电常数以及与弹光晶体之间的耦合状态均存在微小差异, 因此当需要两个驱动调制幅度一致时, 所施加的驱动电压很可能不同, 此时需要通过驱动电压来补偿。由上述分析可以得出, 本文使用的快轴可调弹光调制器不仅继承了传统 PEM 高速、高精度的特点, 同时还避免了其快轴方位角只能机械调节的不足, 通过调整 FaaPEM 的驱动电压, 可以实现相位延迟量和快轴方位角的灵活调节。

2.2 系统稳定性分析

为了更好地对系统进行稳定性分析, 本文从电路角度进行分析, 建立热交换模型, 如图 3 所示。

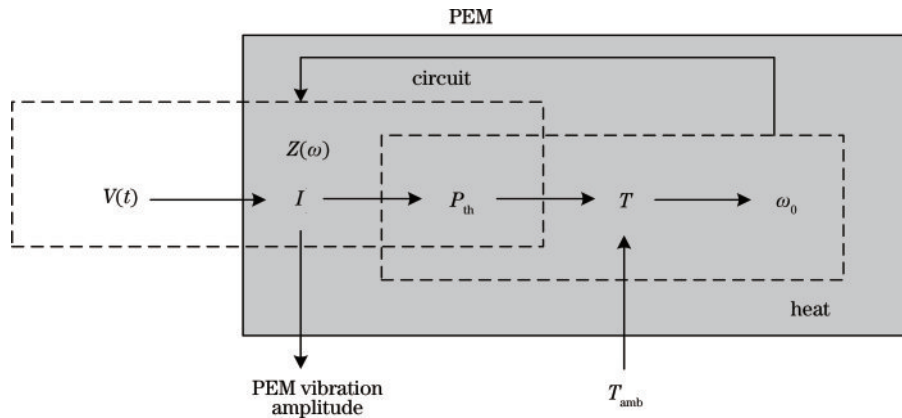


图 3 弹光调制器动态热交换模型

Fig. 3 Dynamic heat exchange model of PEM

图 3 展示了快轴可调弹光调制器工作时与外界环境发生热交换的过程, 其中 $Z(\omega)$ 为弹光调制器的等效阻抗, ω_0 为弹光调制器的谐振角频率, T_{amb} 表示环境温度, T 为弹光调制器自身温度^[13-14]。

为了深入分析热耗散过程, 根据快轴可调弹光调制器动态模型, 将整体器件等效为 RLC 谐振电路, R 为快轴可调弹光调制器的等效电阻, L 和 C 为快轴可调弹光调制器中用于谐振匹配的等效电容和等效电感^[15]。可推导出快轴可调弹光调制器的等效电抗为 $Z(\omega) = R \left[1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right]$, 快轴可调弹光调制器热损耗功率 P_{th} ^[16] 表示为

$$P_{th} = \frac{V(\omega)^2}{2R \left[1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \right]}。 \quad (5)$$

当功率转化为热能时, 两类晶体的谐振频率变化趋势不同, 从而导致匹配状态发生变化, 调制性能便会相应下降。只有当压电晶体和弹光晶体均耦合在谐振状态时, 快轴可调弹光调制器才会处于最佳工作状态^[17]。

在工作过程中, 弹光调制器与外部环境始终存在热交换过程。快轴可调弹光调制器频率温度可表示为 $\omega_0(T) = \omega_0' + a(T - T_{amb})$, 其中 ω_0' 为快轴可调弹光调制器固有谐振频率, a 为温度系数, 由式(5)可得, 快轴可调弹光调制器频率温漂模型为

$$\frac{d\omega_0}{dt} = \frac{a \cdot V(\omega)^2}{2CR \left[1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \right]} - \frac{\omega_0 - \omega_0'}{\tau_{th}}, \quad (6)$$

式中: $\tau_{th} = RC$ 为热时间常数; C 为快轴可调弹光调制器的等效比热容。由于快轴可调弹光调制器自身温度的不断变化, 其谐振频率也会相应发生漂移, 双驱动信号之间的相位差也会发生变化, 从而相应导致系统相位延迟量发生波动, 影响了系统运行的稳定性。为了解决快轴可调弹光调制器工作不稳定的问题, 必须实时根据调制状态更改频率、相位差和电压幅值, 使整个系统工作稳定^[18]。

2.3 闭环控制系统设计

本系统主要包括基于 FPGA 的数据处理电路、高压放大电路、模数采集与数模转换电路及通信电路等, 设计了快轴可调弹光调制器稳定控制系统, 如图 4 所示。

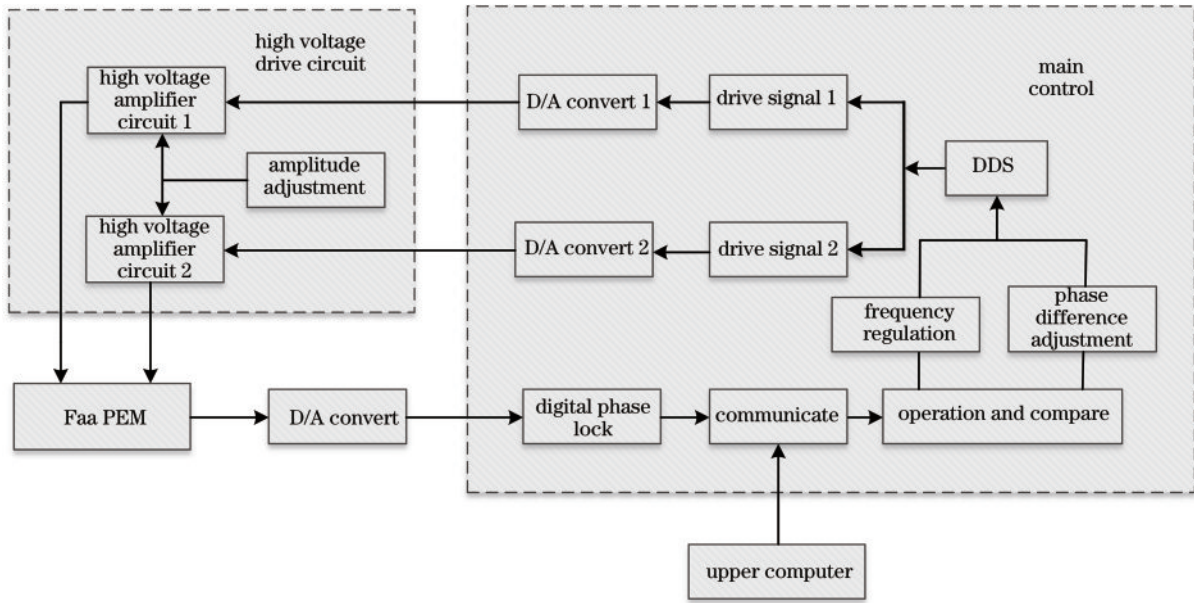


图 4 快轴可调弹光调制器稳定控制系统

Fig. 4 FaaPEM stabilization control system

系统运行过程为:系统上电,FPGA 主控板输出两路正弦波驱动信号,高压放大电路将其放大后加载到 FaaPEM 的双压电驱动器上,从而令弹光晶体对入射光进行调制,探测器接收到调制光并将其转化为电信号后,由模/数(A/D)模块进行电信号采集,主控板针对此电信号进行数字锁相,得到的所需倍频项并进行运算比较,当超出设定范围后,对下一周期的 DDS 模块输出信号的频率、相位差相应调整,至此,完成一次闭环调节,而 FPGA 通过串口电路与上位机实时通

信,将关键参量进行实时显示,再通过调节高压驱动电路中运放的反馈电阻旋钮对放大倍数进行微调。

3 实验验证与数据分析

为验证快轴可调弹光调制器闭环控制系统的稳定性,采用激光器、快轴可调弹光调制器、FPGA 控制电路、高压驱动电路等搭建了测试系统所需的实验平台,系统框图如图 5 所示。

在快轴可调弹光调制器整体驱动前,为保证快轴

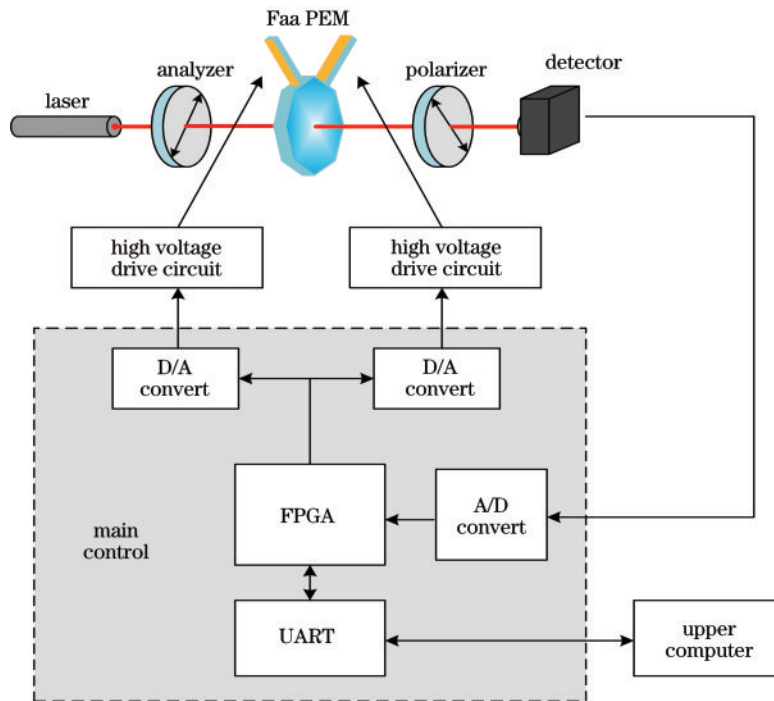


图 5 系统图

Fig. 5 System diagram

可调弹光调制器的调制能力,需要分别测量单压电驱动器工作时的相位延迟幅值最高处的工作频率,即谐振频率,并尽可能保持一致,故采用扫频的方式来确定谐振频率,扫频范围为 45~55 kHz,将扫描的数字锁相数据分别进行分析绘图,如图 6 所示。

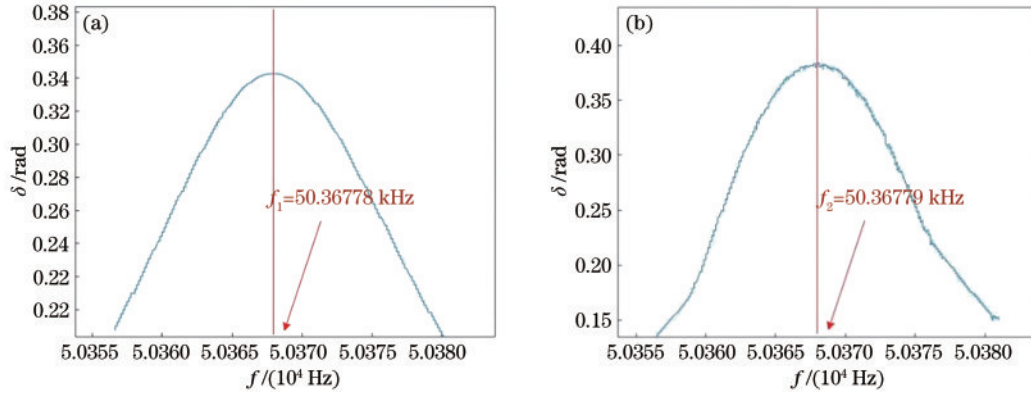


图 6 扫频结果图。(a)第一压电驱动器;(b)第二压电驱动器

Fig. 6 Sweep result diagram. (a) First piezoelectric actuator; (b) second piezoelectric actuator

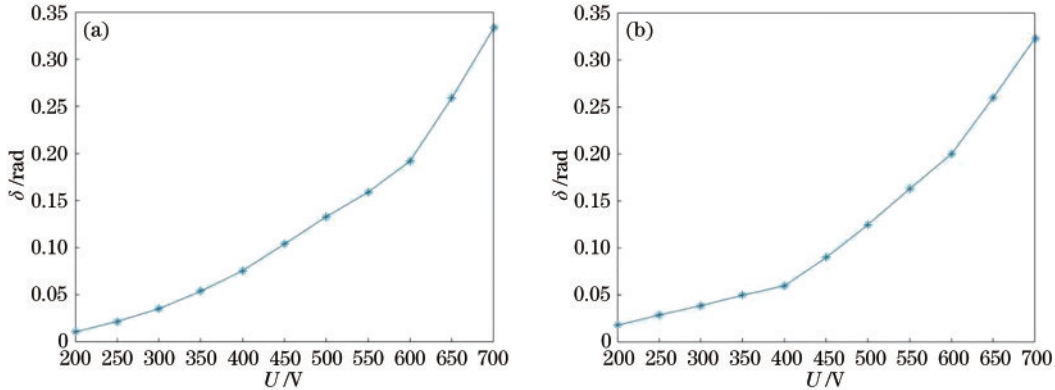


图 7 相位延迟幅值随驱动电压的变化曲线。(a)第一压电驱动器电压调节图;(b)第二压电驱动器电压调节图

Fig. 7 Amplitude of the phase delay varies with the driving voltage. (a) First piezoelectric actuator voltage regulation diagram; (b) second piezoelectric actuator voltage regulation diagram

双压电驱动器分别工作,调节至相同的相位延迟幅值,转动检偏器,使其方向与起偏器平行,双压电驱动器同时工作,在上位机程序中设置相位差控制字自动累加,相位差调节范围 $80^{\circ}\sim 110^{\circ}$,单次累加 0.35° ,累加间隔 0.5 s ,如图 8 所示。

由上述测试可知,快轴可调弹光调制器的双压电驱动器满足基本运行要求,谐振频率一致,整体的快轴可调弹光调制器的谐振频率为 50.36778 kHz ,另外在确定了双驱动电压幅值与谐振频率的前提下,双驱动电压的相位差波动的过程中, J_4/J_2 存在最低点,且单调性先降后增。

本系统具体测试过程如下:

1) 光路系统搭建完成后,电路系统上电,同时令快轴可调弹光调制器的双压电驱动器工作。

2) 系统工作 20 min 后,下载无反馈控制的驱动程序,调节系统初态达到半波状态,取相应的倍频信号,采集 $50\sim 60\text{ min}$ 左右的数据,绘制曲线图,曲线图 9(d)所示。

由图 6 可知,两个压电驱动器的谐振频率几乎一致,故此可确定快轴可调弹光调制器整体谐振频率为 50.36778 kHz ,接下来令两压电驱动器分别工作,各自调节其驱动电压,记录对应的相位延迟幅值,经数据分析后如图 7 所示。

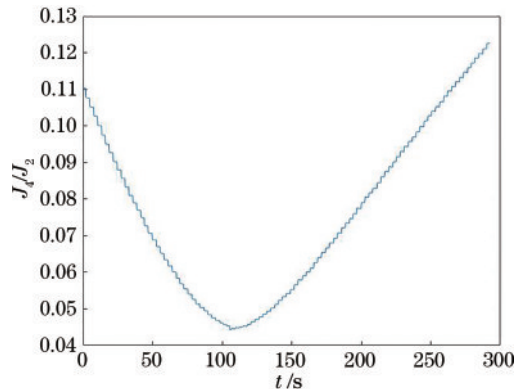


图 8 相位差扫描结果

Fig. 8 Phase difference scanning results

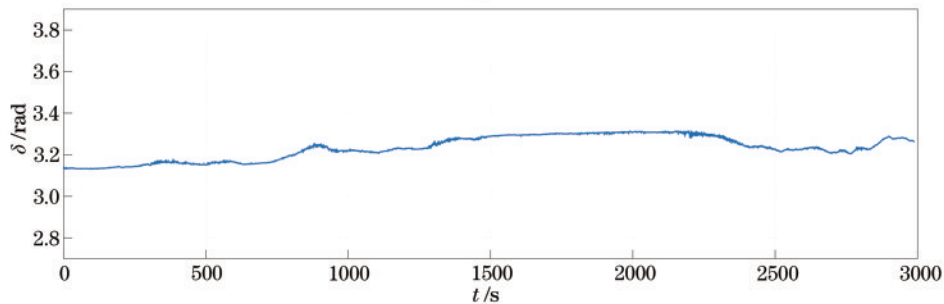
3) 将具有反馈控制功能的驱动程序下载至 FPGA 主控板中,分别调节系统达到半波与四分之一波状态并各自采集 $50\sim 60\text{ min}$ 左右的数据。半波状态下,单棒驱动与双棒驱动的波形如图 9(a)和(b)所示,



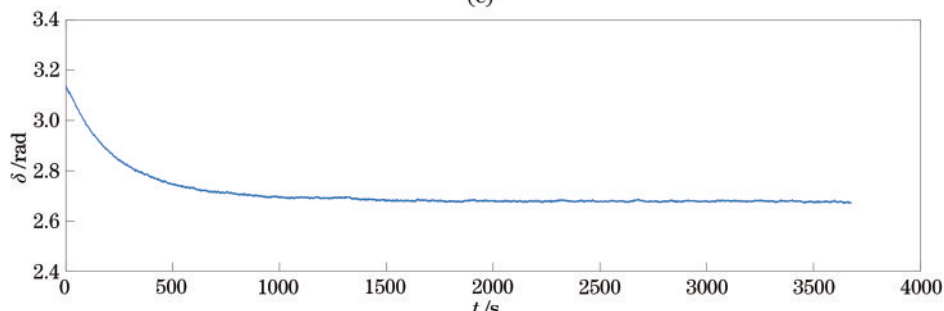
(a)



(b)



(c)



(d)

图 9 半波状态。(a) 单压电驱动器驱动；(b) 双压电驱动器驱动；(c) FaaPEM 相位延迟量随时间的变化曲线；(d) 无反馈的 FaaPEM 相位延迟量随时间的变化曲线

Fig. 9 Half wave state. (a) Driven by single piezoelectric actuator; (b) driven by dual piezoelectric actuators; (c) FaaPEM phase delay as a function of time; (d) curve of phase delay of FaaPEM without feedback as a function of time

四分之一波状态下,单棒驱动与双棒驱动的波形如图 10(a)和(b)所示。再将 3 份数字锁相数据导入 Matlab 中,提取对应通道的倍频信号,绘制曲线图,2 张曲线图如图 9(c)和图 10(c)所示。

半波状态下,双压电驱动器驱动电压均在 800 V 附

近,压电驱动器单独驱动时,探测器波形基本一致,同时驱动时,探测器信号接近完美正弦波波形,双驱动电压相位差在 90°附近,图 9(c)中相位延迟量波动平缓,说明系统运行稳定,运行状态几无跳变,浮动范围在 3.114~3.247 之间,总体运行稳定性达到了 4.18%。

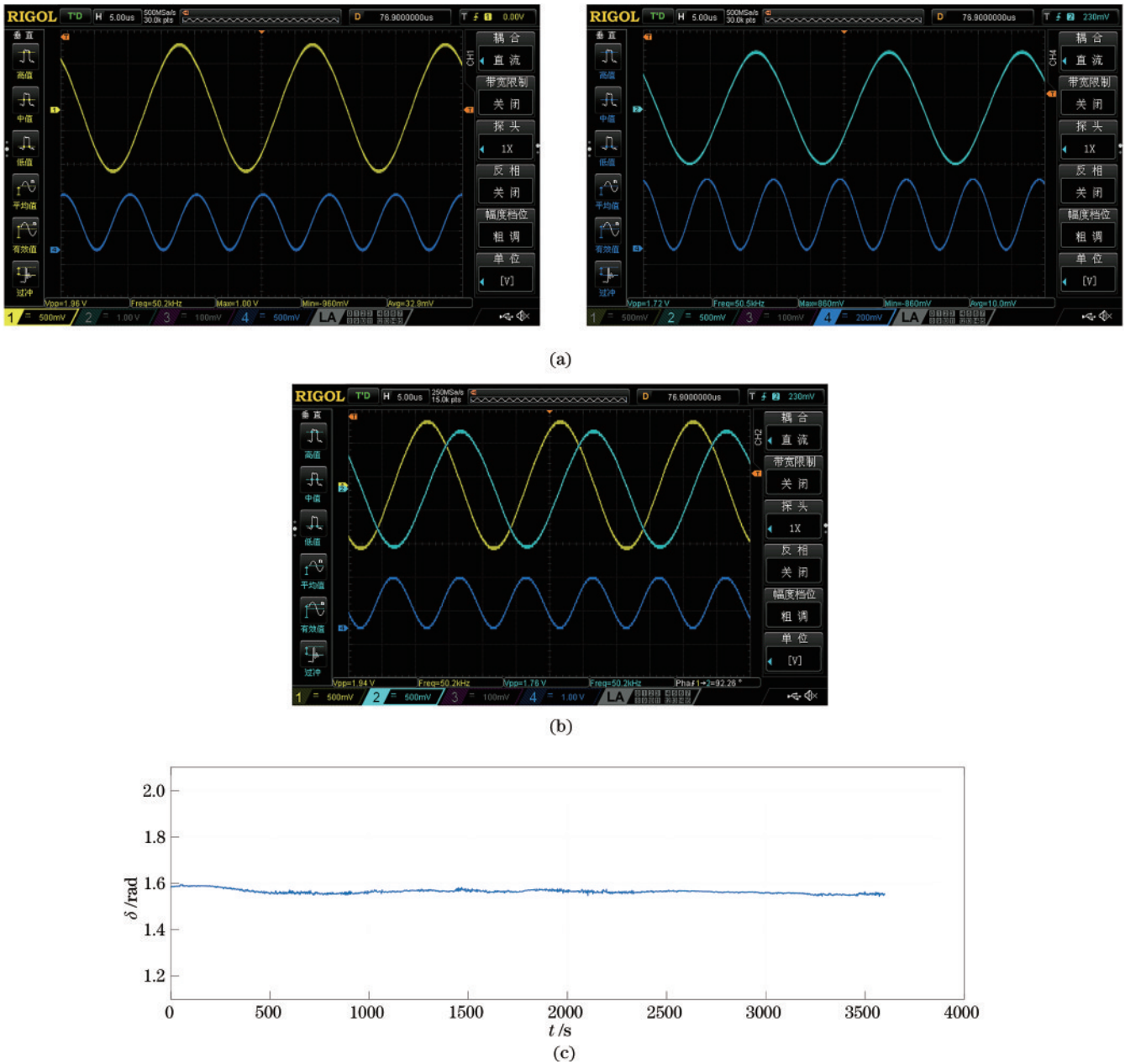


图 10 四分之一波状态。(a)单压电驱动器驱动；(b)双压电驱动器驱动；(c)FaaPEM 相位延迟量随时间的变化曲线
 Fig. 10 Quarter wave state. (a) Driven by single piezoelectric actuator; (b) driven by dual piezoelectric actuators; (c) FaaPEM phase delay as a function of time

由图 10 可知,在单压电驱动器驱动至四分之一波状态,驱动电压约为 400 V,探测器信号波形图基本一致,当双压电驱动器同时工作时,探测器信号接近完美正弦波状态,从图 10(c)可观察到相位延迟量波动范围控制在 1.544~1.598,总体运行稳定性达到了 3.43%。

从以上数据不难发现,加载闭环控制后的系统整体运行过程中变化稳定,几乎没有明显跳变,在长时间运行的情况下,仍能保持良好的稳定效果。而在未加载闭环控制的系统,相位延迟量呈衰减趋势且跳变较大。相较于无反馈控制的情况,采取反馈控制后,稳定性有了显著提高。其次,与传统的温度控制和频率的方法相比,使用双驱动电压反馈控制,空间占用率低,无需考虑光线穿过恒温箱折射率等光学因素影响,也无需额外实

时存储频率变化,与此同时,本文使用的 FaaPEM 需要采用双驱动电压供给,且相位差和电压峰峰值均需自动调节,难度倍增,且最终仍能与温度控制和频率控制达到同一控制精度水平,具有优良的控制效果。

4 结 论

快轴可调弹光调制器具有灵敏度高、可灵活调节快轴、调制频率好等优势,在椭圆偏测量方面有着极大的优越性,但存在着运行稳定性方面的缺陷。为了得到更高的稳定性和调制效率,本文根据快轴可调弹光调制器的组成及工作原理,分析了决定纯行波调制工作状态的关键参量,对应地建立了数学模型,并对影响快轴可调弹光调制器工作不稳定的因素进行分析,提出

了基于数字锁相技术的相位差闭环控制方法。最终经整体联调测试后,半波状态下稳定度达到 4.18%,四分之一波状态下稳定度达到 3.43%。本研究为快轴可调弹光调制器的稳定运行提供了可靠的思路,对相位延迟量控制系统的稳定性提升具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] 虞文俊. 红外偏振成像技术与方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
Yu W J. Research on infrared polarization imaging technology and method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [2] 魏海潮, 张记龙, 陈友华, 等. 弹光调制器压电晶体阻抗匹配特性的研究[J]. 压电与声光, 2013, 35(2): 185-188.
Wei H C, Zhang J L, Chen Y H, et al. Research on impedance matching features of piezoelectric crystal for photoelastic modulated interferometer[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2013, 35(2): 185-188.
- [3] 梁振坤, 李晓, 王志斌, 等. 基于驱动电压自适应调节的弹光调制[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1104001.
Liang Z K, Li X, Wang Z B, et al. Photo-elastic modulation based on adaptive regulation of driving voltage [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1104001.
- [4] 曾爱军, 王向朝, 董作人, 等. 光弹调制器在偏振方向调制中的应用[J]. 中国激光, 2005, 32(8): 1063-1067.
Zeng A J, Wang X Z, Dong Z R, et al. Application of photoelastic modulator in modulation of polarization direction[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(8): 1063-1067.
- [5] 张瑞, 陈媛媛, 景宁, 等. 基于双弹光差频调制的中红外波片相位延迟高精度测量[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0312002.
Zhang R, Chen Y Y, Jing N, et al. High-precision measurement of mid-infrared waveplate phase retardation based on dual photoelastic difference frequency modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0312002.
- [6] 刘梓良, 王志斌, 李克武, 等. 一种弹光调制器精确定标微系统设计[J]. 光学技术, 2022, 48(1): 8-13.
Liu Z L, Wang Z B, Li K W, et al. A precise calibration microsystem for photoelastic modulator[J]. Optical Technique, 2022, 48(1): 8-13.
- [7] 陈友华, 张记龙, 王艳超, 等. 基于铌酸锂压电弹光双效应的单晶体弹光调制器[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1116002.
Chen Y H, Zhang J L, Wang Y C, et al. Single crystal photo-elastic modulator based on lithium niobate piezoelectric and photo-elastic effect[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1116002.
- [8] 李克武, 王爽. 利用反馈光路的弹光调制器定标及稳定控制[J]. 应用光学, 2022, 43(5): 935-942.
Li K W, Wang S. Calibration and stability control for photoelastic modulator using feedback optical path[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(5): 935-942.
- [9] 唐凡春, 步扬, 吴芳, 等. 四分之一波片快轴方位角和相位延迟量分布的测量装置和方法: CN112326201A [P]. 2021-02-05.
Tang F C, Bu Y, Wu F, et al. Quarter-wave plate fast axis azimuth angle and phase retardation distribution measuring device and method: CN112326201A[P]. 2021-02-05.
- [10] 魏海潮, 张记龙, 王志斌, 等. 弹光调制压电晶体驱动控制器的设计[J]. 电子技术应用, 2012, 38(6): 68-71.
Wei H C, Zhang J L, Wang Z B, et al. Design of piezoelectric crystal driving power based on the photoelastic modulator[J]. Application of Electronic Technique, 2012, 38(6): 68-71.
- [11] 李克武. 基于快轴可调弹光调制的椭偏测量技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
Li K W. The research of ellipsometry based on fast axis adjustable photoelastic modulation[D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
- [12] 张瑞, 陈媛媛, 景宁, 等. 基于双弹光差频调制的中红外波片相位延迟高精度测量[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0312002.
Zhang R, Chen Y Y, Jing N, et al. High-precision measurement of mid-infrared waveplate phase retardation based on dual photoelastic difference frequency modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0312002.
- [13] 李凡月, 韩杰, 曾爱军, 等. 基于相位调制和样品摆动的 1/4 波片相位延迟量测量方法[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0208003.
Li F Y, Han J, Zeng A J, et al. Method for measuring retardation by swinging quarter-wave plate with phase modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(2): 0208003.
- [14] 张敏娟, 王艳超, 王召巴, 等. 不同谐振状态下弹光调制器的品质因数分析[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0415002.
Zhang M J, Wang Y C, Wang Z B, et al. Quality factor analysis of photoelastic modulation with different resonant state[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0415002.
- [15] 马静. 铌酸锂弹光晶体的频率-温度特性研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.
Ma J. Study on frequency and temperature characteristics of elastic-optic crystal lithium niobate[D]. Taiyuan: North University of China, 2012.
- [16] 陈光威, 安永泉, 王志斌, 等. 弹光调制的频率自跟踪技术[J]. 光电工程, 2015, 42(10): 21-26, 32.
Chen G W, An Y Q, Wang Z B, et al. Self tracking technology of photoelastic modulation frequency[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(10): 21-26, 32.
- [17] 李克武, 王黎明, 王志斌, 等. 弹光调制和电光调制联合测剩余双折射[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0508003.
Li K W, Wang L M, Wang Z B, et al. Measurement of residual birefringence combined photo-elastic modulation with electro-optic modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0508003.
- [18] 武燕婷, 熊伟, 李超波, 等. 光弹调制器谐振特性的研究及验证[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1523002.
Wu Y T, Xiong W, Li C B, et al. Research and verification on resonance characteristics of photoelastic modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1523002.