

ISSN 1003-501X

CN 51-1346/O4

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

弹光调制器谐振特性研究及其谐振频率自跟踪

李坤钰, 李克武, 刘坤, 王志斌

引用本文:

李坤钰, 李克武, 刘坤, 等. 弹光调制器谐振特性研究及其谐振频率自跟踪[J]. 光电工程, 2023, 50(4): 220249.

Li K Y, Li K W, Liu K, et al. Research on resonance characteristics of photoelastic modulators and self-tracking of resonant frequency[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(4): 220249.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220249>

收稿日期: 2022-10-08; 修改日期: 2023-02-19; 录用日期: 2023-02-24

相关论文

基于温度和PZT协同控制的激光器频率锁定技术研究

雷明, 于怀勇, 方圆, 向强, 杨恽, 张丽哲

光电工程 2020, 47(9): 190523 doi: [10.12086/oe.2020.190523](https://doi.org/10.12086/oe.2020.190523)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.220249

弹光调制器谐振特性研究及其谐振频率自跟踪

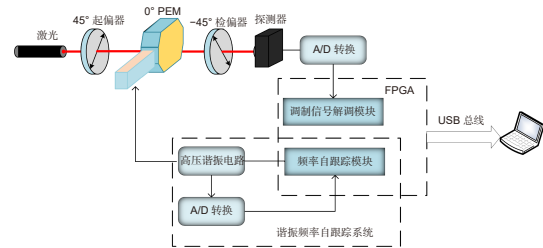
李坤钰^{1,2,3}, 李克武^{2,3}, 刘坤^{1,2,3}, 王志斌^{1,2,3*}¹中北大学仪器与电子学院, 山西太原 030051;²中北大学山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西太原 030051;³中北大学前沿交叉科学研究院, 山西太原 030051

摘要: 弹光调制器是一种由各向同性的弹光晶体和压电晶体组成的高品质因数热机电耦合器件, 广泛用于偏振测量、光谱测量等诸多领域。但是在高压谐振状态下, 其谐振频率会随着温度变化出现漂移, 导致弹光调制器的相位调制幅值不稳定以及驱动效率降低。针对该问题, 首先对弹光调制器谐振频率特性进行分析, 建立了弹光调制器及其高压谐振驱动电路的复合谐振网络模型, 提出了利用谐振网络的幅频特性进行频率跟踪的实现方法, 并设计了基于现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 的控制测试系统, 实现了谐振频率跟踪以及调制幅度的测量。通过测试验证了该方案可有效进行谐振频率跟踪, 提高了弹光调制器的稳定性以及驱动效率, 测试时长大于 90 min, 相位调制幅度的标准偏差为 0.83% rad。

关键词: 弹光调制器; 频率跟踪; 相位调制幅度; 幅频特性

中图分类号: O436

文献标志码: A



李坤钰, 李克武, 刘坤, 等. 弹光调制器谐振特性研究及其谐振频率自跟踪 [J]. 光电工程, 2023, 50(4): 220249

Li K Y, Li K W, Liu K, et al. Research on resonance characteristics of photoelastic modulators and self-tracking of resonant frequency[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(4): 220249

Research on resonance characteristics of photoelastic modulators and self-tracking of resonant frequency

Li Kunyu^{1,2,3}, Li Kewu^{2,3}, Liu Kun^{1,2,3}, Wang Zhibin^{1,2,3*}¹School of Instrument and Electronics, North University of China, Shanxi, Taiyuan 030051, China;²Shanxi Optoelectronic Information and Instrument Engineering Technology Research Center, North University of China, Shanxi, Taiyuan 030051, China;³Frontier Interdisciplinary Research Institute, North University of China, Shanxi, Taiyuan 030051, China

Abstract: As a kind of high-quality factor thermo-electromechanical coupling device composed of isotropic elastic-optical crystal and piezoelectric crystal, photoelastic modulator (PEM) is widely applied for polarization measurement, spectrum measurement, and many other purposes. However, the resonant frequency tends to drift with temperature changes in the high-voltage resonant state, which destabilizes the phase modulation amplitude of

收稿日期: 2022-10-08; 修回日期: 2023-02-19; 录用日期: 2023-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62205310)

*通信作者: 王志斌, wangzhibin@nuc.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

the photoelastic modulator and reduces the driving efficiency. To solve this problem, the resonant frequency characteristics of the photoelastic modulator are analyzed at first. Then, a compound resonant network model of the photoelastic modulator and its high voltage resonant driving circuit is established, and a solution to frequency tracking based on the amplitude-frequency characteristics of the resonant network is proposed. Besides, a control test system based on field programmable gate array (FPGA) is developed to achieve resonant frequency tracking and modulation amplitude measurement. The test results show that this method is applicable to track the resonant frequency effectively and improve the stability and driving efficiency of the elastic light modulator. The duration of the test exceeds 90 min, and the standard deviation of the phase modulation amplitude is 0.83% rad.

Keywords: photoelastic modulator; frequency tracking; phase modulation amplitude; amplitude-frequency characteristics

1 引言

弹光调制器 (Photoelastic modulator, PEM) 是一种由各向同性的弹光晶体和压电晶体组成的高品质因数光电器件, 利用高压谐振电路产生周期性变化的正弦高压作用于压电晶体, 使压电晶体产生周期性的机械振动^[1], 驱动各向同性的弹光晶体处于受迫振动状态, 使其产生周期性的双折射效应, 进而实现对入射光的相位调制。PEM 具有调制幅度精确、调制效率高、使用波段宽、可精确控制相位延迟等优势, 是一种谐振调制技术, 被广泛应用于偏振测量以及光谱测量^[2-4]。

虽然 PEM 是一种高品质因数器件, 但是在高压驱动下, 由于机械振动产生的热损耗会导致其谐振频率发生漂移, 使 PEM 的相位调制幅度的稳定性以及调制效率降低^[5-6], 所以研究 PEM 的稳定控制尤为重要。目前对于 PEM 的稳定控制主要有两种方法, 1) 驱动电压自适应调节方法, 通过实时测量 PEM 的调制幅度, 当调制幅度变化时, 改变施加在压电晶体上的驱动电压幅值实现对 PEM 调制幅度的稳定控制, 但此方法并没有对谐振频率进行跟踪, 当谐振频率发生漂移时, PEM 的驱动效率依然会降低^[7]。2) 利用 PEM 谐振的相频特性, 采用锁相环进行频率跟踪, 对 PEM 的电压信号与电流信号的相位差进行测量来跟踪谐振频率^[8]。但是由于提取的电压与电流信号来自不同的预处理回路, 会因干扰导致失锁, 无法准确跟踪谐振频率。

针对以上问题, 本文通过对谐振网络的幅频特性进行理论分析, 对其谐振频率自跟踪系统进行了设计, 与驱动电压自适应调节的方法相比, 此方案实现了对谐振频率的跟踪, 提高了 PEM 的调制效率, 且采用

幅频特性进行频率跟踪不用考虑锁相环失锁的问题, 实现了对 PEM 调制幅度的稳定控制, 并进行了实验验证。

2 PEM 工作原理及其谐振特性研究

PEM 由压电晶体和弹光晶体通过软胶连接组成, 可以有多种形式, 主要有单压电晶体棒状结构、双压电晶体棒状结构以及单压电晶体八角对称结构等。本文采用的单压电晶体的八角对称结构是目前比较常用的, 具有较大的通光孔径以及较低的静态残余双折射^[9]。选用熔融石英作为弹光晶体, 采用高压谐振电路产生周期性变化的高电压幅值加在压电晶体两端驱动 PEM 进行受迫伸缩振动^[10], 如图 1 所示。

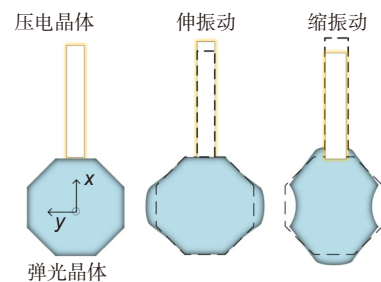


图 1 PEM 结构及其振动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the PEM structure and its vibration

PEM 尽管是一种品质因数 Q 值可达 10^3 量级的低损耗器件, 但高压驱动信号使其工作时会出现因介电损耗和机械损耗而引起的热耗散, 一部分与环境进行热交换, 另一部分使 PEM 自身的温度升高从而导致其谐振频率发生改变, 如果不进行谐振频率跟踪会导致 PEM 的驱动效率降低和调制幅度的不稳定。当弹光晶体受到压电晶体的逆压电效应产生周期性机械应力而进行伸缩振动时, 可等效为机械位移系统中的二

阶欠阻尼系统^[11]。将机械系统等效类比为电路系统, 可将 PEM 等效为 RLC 串联电路, 并建立了如图 2 所示高压谐振电路与 PEM 的复合谐振网络模型。

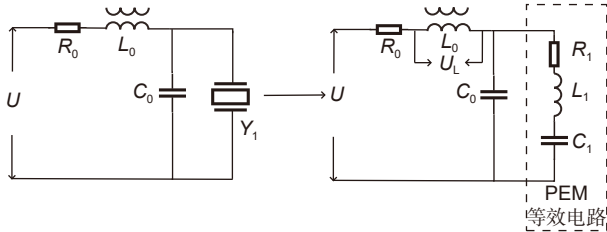


图 2 PEM 高压谐振电路与 PEM 的复合谐振网络示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the composite resonant network of a high-voltage resonant circuit and PEM

图 2 中, R_0 为高压谐振电路的等效阻值, L_0 为高压谐振电路的电感, C_0 为高压谐振电路的电容, Y_1 为 PEM, 组成 LC 串联高压谐振电路在 C_0 两端产生高压驱动 PEM。 L_1 为 PEM 等效电感、 C_1 为 PEM 等效电容、 R_1 为反应 PEM 机械损耗的动态电阻。 PEM 与 C_0 的等效总阻抗 Z_e 为

$$\begin{cases} Z_e = R_e + jX_e \\ R_e = -\frac{R_1}{[1 - \omega C_0(\omega L_1 - 1/\omega C_1)]^2 + \omega^2 C_0^2 R_1^2} \\ X_e = \frac{\omega L_1 - 1/\omega C_1 - \omega C_0 [R_1^2 + (\omega L_1 - 1/\omega C_1)^2]}{[1 - \omega C_0(\omega L_1 - 1/\omega C_1)]^2 + \omega^2 C_0^2 R_1^2} \end{cases} \quad (1)$$

R_0 和 L_0 的总阻抗 Z_0 为

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0 \quad (2)$$

当输入电压 U 幅值为确定值时可得电感 L_0 两端电压互感出来的电压 U_L :

$$U_L = \frac{U |j\omega L_0|}{|Z_0 + Z_e|} \quad (3)$$

当 $R_1 L_1 C_1$ 串联支路谐振时, 即弹光调制器工作频率处于谐振时, 串联支路的电抗 X 为 0, 即:

$$\omega L_1 = 1/\omega C_1 \quad (4)$$

因此通过仿真可以得到 L_0 两端电压 U_L 幅值随频率变化曲线如图 3 所示, 当频率为 f_s 即处于图中的虚线位置时, PEM 处于谐振状态, L_0 两端电压 U_L 幅值最低。

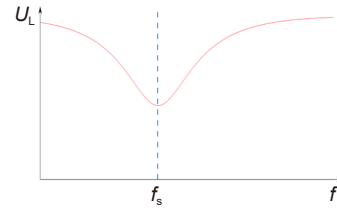


图 3 L_0 两端电压随频率变化曲线
Fig. 3 Variation curve of the voltage across L_0 with frequency

根据这一理论, 同时利用电感互感的原理得到电感电压, 实现高压谐振驱动电路与低压采集电路的隔离, 避免了高压电路发生故障对低压电路造成影响。高压驱动电路通过扫频改变高压驱动信号的频率, 并实时监测电感电压, 从而确定 PEM 的谐振频率, 且对驱动信号的频率进行实时的调整, 使其电压保持最小值实现对 PEM 谐振频率的跟踪, 从而实现对 PEM 相位调制幅度的稳定控制。

3 谐振自跟踪稳定控制系统及测试系统设计

3.1 谐振自跟踪稳定控制系统设计

基于以上对驱动电路与 PEM 的复合谐振网络幅频特性的分析, 在高压谐振电路匹配良好的条件下, 设计了基于现场可编程阵列逻辑 (field programmable gate array, FPGA) 数字锁相放大器实现对电感电压的精确检测^[12], 并实时调整驱动信号的频率将其电压稳定在最低点。谐振自跟踪系统结构框图如图 4 所示。

首先由 FPGA 输出频率可调的脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 信号给高压谐振电路, 控制高压谐振电路的电容充放电产生正弦高压信号驱动压电晶体, 使压电晶体产生周期性的机械应力作用于弹光晶体, 使其受迫振动。同时高压谐振电路的电感产生互感电压, 进入模数转换器 (analog to digital converter, ADC) 转换为数字量进入 FPGA 中, FPGA 实现数字锁相放大器, 产生本地参考信号, 与输入的数字量进行互相关运算, 对电感电压的实时精确检测, 随后 FPGA 控制模块实时调整输出的 PWM 的频率, 将电感电压幅值稳在最低点, 保证 PEM 工作在谐振状态, 达到频率跟踪的目的, 软件控制流程图如图 5 所示。

首先控制系统扫频得到 PEM 的谐振频率 f_s , 而后改变 FPGA 输出 PWM 波的占空比改变高压谐振电路的输出幅值从而设定好 PEM 的相位调制幅度, 设

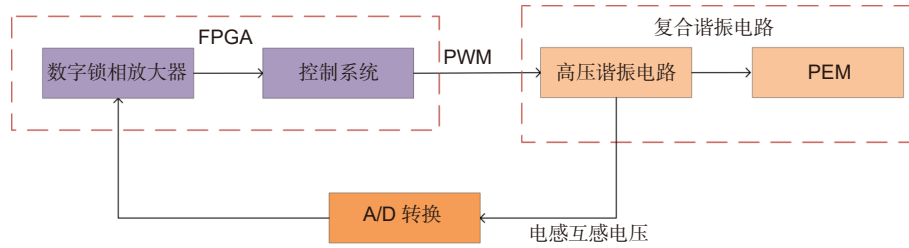


图 4 谐振自跟踪系统结构框图

Fig. 4 Structure block diagram of the resonant self-tracking system

置完成后检测电感电压 U_{\min} , 令 $U_{\min} = U_L$, 然后以步进 Δf 右移谐振频率, 检测此时的电压 U_{\min} , 若 $U_{\min} \leq U_{\min}$, 则令 $U_{\min} = U_{\min}$, 并继续以同样的步进右移频率, 若 $U_{\min} > U_{\min}$, 也令 $U_{\min} = U_{\min}$, 频率以相同步进左移, 并检测电压 U_{\min} , 此过程反复进行, 当某一时刻出现干扰引起 U_{\min} 波动造成错误的判断, 也会在下次进行纠正, 从而将电感电压值一直稳在最低点, 实现谐振频率的自跟踪, 维持 PEM 一直工作在谐振频率。

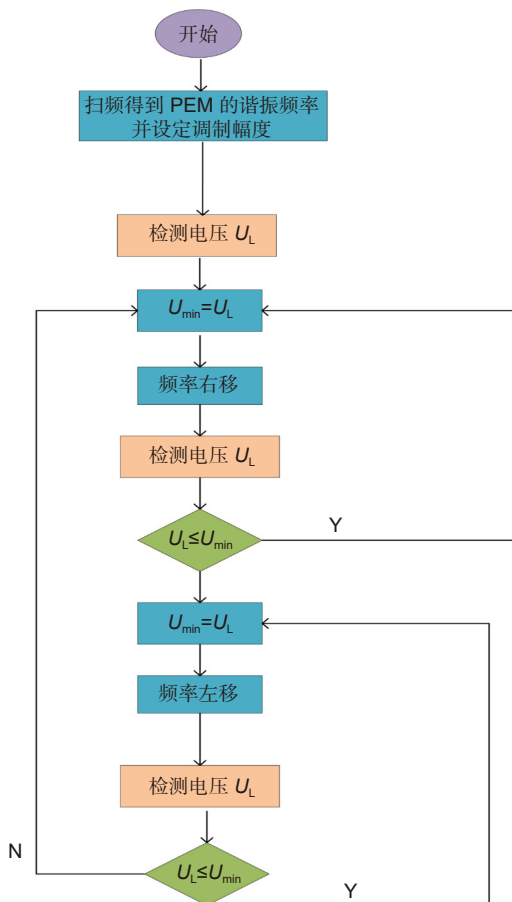


图 5 软件控制流程图

Fig. 5 Control flow chart of the software

3.2 测试系统设计

为了验证该谐振自跟踪方法对 PEM 的相位调制幅度的稳定控制效果, 搭建了如图 6 所示的测试系统。

PEM 位于两个正交的检偏器中间, 调制轴为 0° , 与起偏器的透光轴成 45° , 可见光激光器依次通过起偏器、PEM、检偏器, 经过调制后的光信号到达探测器转换为电信号。入射光经过 45° 起偏器后的 Stokes 参量为

$$S_{in} = I_0 [1 \ 0 \ 1 \ 0]^T, \quad (5)$$

其中: I_0 为入射光经过起偏器后的光强。入射光经过图 6 所示的光路系统后得到的出射光的 Stokes 参量为

$$S_{out} = M_{P2} M_{PEM} S_{in}, \quad (6)$$

M_{P2} 为检偏器 P_2 的 Muller 矩阵, PEM 的 Muller 矩阵 M_{PEM} 如式 (7) 所示^[13], 其中 δ 为 PEM 的相位延迟量。

$$M_{PEM} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\delta) & \sin(\delta) \\ 0 & 0 & -\sin(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

因此经过检偏器输出到达探测器的光强值为

$$I = \frac{I_0}{2} [1 - \cos \delta] = \frac{I_0}{2} [1 - \cos(\delta_0 \sin \omega t)], \quad (8)$$

δ_0 为 PEM 的调制幅度, ω 为 PEM 的振动角频率。将上式用第一类 Bessel 级数展开可得:

$$I = \frac{I_0}{4} \left(1 - \left(J_0(\delta_0) + 2 \sum_{2k} (-1)^k J_{2k}(\delta_0) \cos(2k\omega t) \right) \right), \quad (9)$$

其中: k 为正整数, J_0 为 0 阶贝塞尔级数, J_{2k} 为 $2k$ 阶贝塞尔级数。可得到调制信号中二次谐波和四次谐波幅值为

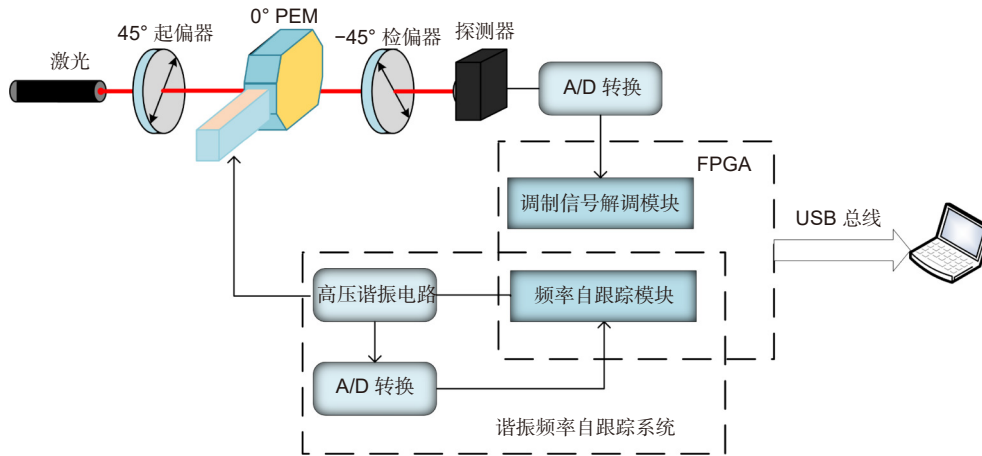


图 6 测试系统结构框图

Fig. 6 Test system structure diagram

$$\begin{cases} V_{2f} = -\frac{I_0}{2} J_2(\delta_0) \\ V_{4f} = -\frac{I_0}{2} J_4(\delta_0) \end{cases} \quad (10)$$

调制信号解调模块通过数字锁相放大器完成对调制信号中二次和四次谐波解调, 得到四次谐波与二次谐波的幅值, 将上面两式作比可得:

$$\frac{V_{4f}}{V_{2f}} = \frac{J_4(\delta_0)}{J_2(\delta_0)} \quad (11)$$

由上式可通过二次和四次谐波幅值的测量及其比值, 实现对 PEM 的相位调制幅度 δ_0 的定标^[14-15], J_4/J_2 与调制幅度 δ_0 对应关系如图 7 所示。

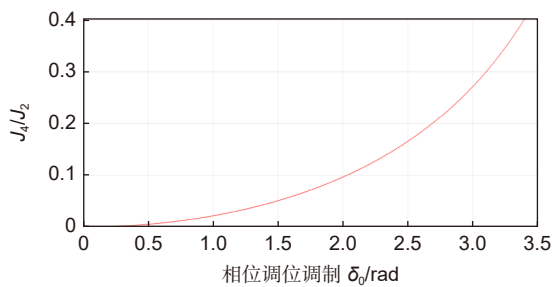


图 7 J_4/J_2 与调制幅度 δ_0 对应关系

Fig. 7 Correspondence between J_4/J_2 and modulation amplitude δ_0

由图 7 可知, 当 PEM 的调制幅度在一定范围内时, 信号中四次谐波与二次谐波幅值的比值和调制幅度是一一对应的, 因此可以通过四次与二次谐波的幅值之比实现对 PEM 调制幅度的定标, 且通过可以消除光源光强波动对调制幅度定标的影响, 与此同时, 本系统设计了基于 FPGA 的数字锁相放大器实现了对二次与四次谐波的幅值的测量, 有效提高了系统的集成度。

4 实验结果与分析

4.1 扫频测试

在进行谐振频率自跟踪之前先进行扫频测试验证理论推导是否正确, 搭建图 6 所示的测试系统, 在实验室常温环境下测试。本次实验选用熔融石英的 PEM, PEM 仿真频率为 50 kHz, 光源选用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光, 起偏器和检偏器均为格兰泰勒偏振器, 探测器为索雷博的硅基探测器 PDA10A-EC, 波长范围 200~1100 nm, 带宽 150 MHz。设定 PWM 信号的占空比为 25% 不变, 即驱动电压不变。在 50 kHz 附近进行扫频测试, 每次扫频的步进为 0.04 Hz, 扫频测试结果如图 8 所示。

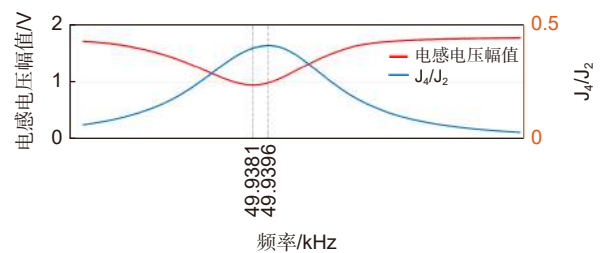


图 8 扫频测试结果

Fig. 8 Frequency sweep test results

通过数字锁相得到的电感电压幅值 U_L 和二次谐波与四次谐波幅值 V_{2f} 、 V_{4f} , 通过 V_{4f}/V_{2f} 得到 J_4/J_2 。图 8 中电感电压的最低点对应的频率为 49.9381 kHz, 由式 (11) 分析可知 J_4/J_2 的最高点对应 PEM 驱动效率最高点, 也就是 PEM 调制幅度的最大值, 即 PEM 最佳谐振频率为 49.9396 kHz, 相差 1.5 Hz, 理论上两个频率应该相等, 但是由于 PEM 的支架静电容影响^[16],

造成 PEM 的最佳谐振频率与电感电压最低点的频率存在一个较小的偏差。

4.2 PEM 谐振频率跟踪测试

在扫频测试中, 虽然由于静态电容造成电感电压幅值最低点的频率与 PEM 的最佳谐振频率存在较小的偏差, 但是这个偏差是固定值, 即可通过将电感电压维持在最低点使 PEM 工作频率维持谐振频率附近, 实现对相位调制幅度的稳定控制。

调节驱动信号幅值, 将 PEM 相位调制幅度设定在 3.14 rad 左右室温下进行测试, 如图 9 所示。在没有对谐振频率进行跟踪时, PEM 开始工作与外界环境进行热交换造成热耗散, 使其谐振频率出现漂移, 导致调制效率降低, 调制幅度降低。当采用上述方案进行 PEM 的谐振频率跟踪时, 其相位调制幅度的稳定性明显提高。测量时间大于 90 min, 调制幅度的标准偏差 σ_0 为 0.83% rad, 较小的标准偏差反映了 PEM 的调制幅度波动很小, 将整个光路系统的相位调制幅度稳定在一个比较小的波动范围, 整个测试过程中相位调制幅度的最小值为 3.1372 rad、最大值为 3.1747 rad、均值为 3.1623 rad, 所以与平均值存在最大偏差 $|3.1372-3.1623|/3.1623=0.79\%$ 。最终测试结果最大偏差与驱动电压自适应调节^[1]的方法接近, 标准偏差与文献 [5] 提出的双闭环方式相比较差, 但文献 [5] 中谐振频率跟踪是利用调制器相频特性进行跟踪的, 需要采集调制器的电压和电流信号增大了电路设计的复杂度。导致本次测试的相位调制幅度波动主要原因是高压谐振电路输出的驱动电压不稳定, 如图 10 为测试过程中 PEM 谐振频率变化曲线。因为高压谐振电路电感和电容都为静态, 当频率发生变化时, 其输出的驱动电压也会改变, 导致 PEM 的调制幅度发生变化。在整个测试过程中, PEM 的谐振频率一直增大, 使高压谐振电路的输出电压增大, 所以最终导致 PEM 的调制幅度增大。因此, 高压谐振电路的输出电压不稳定是造成本次测试 PEM 的调制幅度变化的主要原因。

为了验证该系统的可靠性, 采用温度控制器对调制器的所处环境的温度进行局部控制 (如图 11 所示), 分别在 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 进行了测试, 测试时间超过 60 min, $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 测试下标准偏差为 0.26%, $80\text{ }^\circ\text{C}$ 测试下标准偏差为 0.15%。此实验验证了该系统在不同环境温度下的可靠性, $80\text{ }^\circ\text{C}$ 的测试结果优于上述室温环境以及 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 下的测试结果, 主要原因是 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 测试

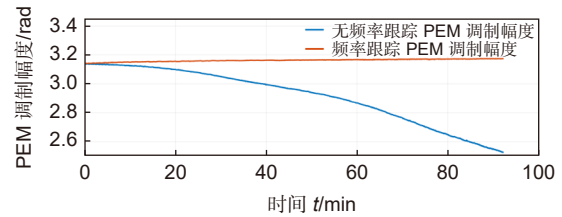


图 9 有无频率跟踪下相位调制幅度变化

Fig. 9 Phase modulation amplitude change with and without frequency tracking

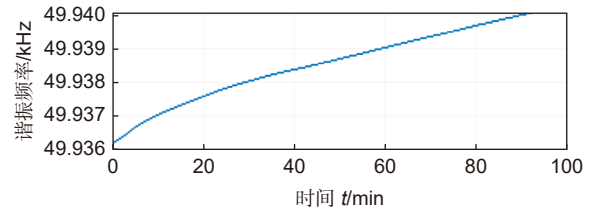


图 10 PEM 谐振频率变化曲线

Fig. 10 PEM resonance frequency curve

下谐振频率漂移较小, 因此高压驱动电路的输出电压相对比较稳定, 所以最后最终 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 下调制幅度标准偏差最小。

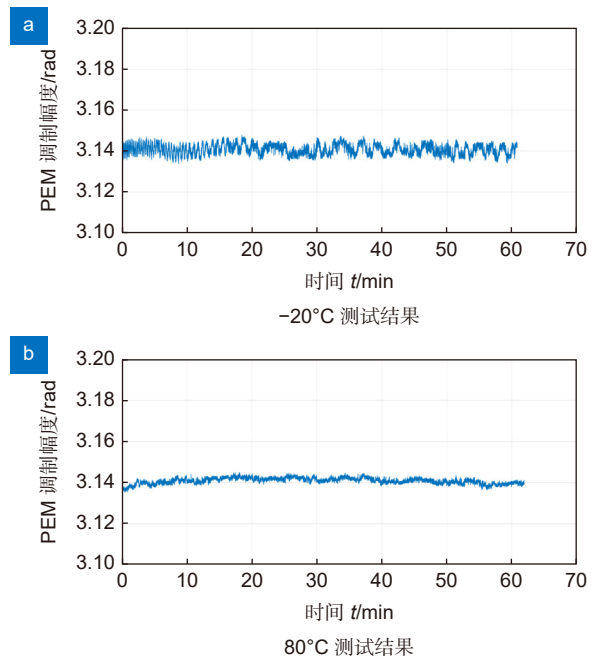


图 11 典型温度下测试结果

Fig. 11 Test results at typical temperature

5 结论

本文基于 PEM 与高压谐振电路的复合谐振网络系统的幅频特性, 针对 PEM 存在温漂导致驱动效率

下降和调制幅度不稳定的问题, 创新性地提出了一种基于复合谐振网络幅频特性谐振频率自跟踪的方案, 实现了基于 FPGA 的数字锁相放大器以及频率自跟踪控制系统。通过基于 FPGA 的数字锁相放大器实现了调制信号二四次谐波的测量以及电感电压幅值的精确测量, 提高系统的集成度。并搭建实验系统进行验证, 对比了无频率跟踪和谐振频率跟踪两种情况下 PEM 的相位调制幅度变化情况, 且在室温、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行了测试, 最终相位调制幅度的标准偏差 σ_{ϕ} 不超过 0.83% rad, 最大偏差不超过 0.79% 。可有效提高 PEM 调制幅度的稳定性以及驱动效率。该方法为 PEM 控制策略提供了一种新思路, 对 PEM 在高精度测量中的应用有一定的价值。

参考文献

- [1] Zhang M J. The research of high-speed data processing technology of the photo-elastic modulation fourier transform spectral reconstruction[D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
张敏娟. 弹光调制傅里叶变换光谱复原高速数据处理技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [2] Hippias K W, Crosby G A. Applications of the photoelastic modulator to polarization spectroscopy[J]. *J Phys Chem*, 1979, **83**(5): 555-562.
- [3] Su F, Zhang B W, Li T H. High speed stress measurement technique based on photoelastic modulator (PEM) and galvanoscanner[J]. *Opt Lasers Eng*, 2021, **136**: 106306.
- [4] Wang S, Han X, Wang Y N, et al. Dispersion of the retardation of a photoelastic modulator[J]. *Appl Sci*, 2019, **9**(2): 341.
- [5] Quan W, Wang Q H, Zhai Y Y. A dual closed-loop drive and control system of photoelastic modulator for atomic magnetometer[J]. *Meas Sci Technol*, 2018, **29**(6): 065105.
- [6] Hirschy L, Wang B L, Wolf J, et al. Basic optical properties of the photoelastic modulator. Part III: thermal properties[J]. *Proc SPIE*, 2012, **8486**: 848619.
- [7] Liang Z K, Li X, Wang Z B, et al. Photo-elastic modulation based on adaptive regulation of driving voltage[J]. *Chin J Lasers*, 2021, **48**(11): 1104001.
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.
- [8] Chen G W, An Y Q, Wang Z B, et al. Self tracking technology of photoelastic modulation frequency[J]. *Opto-Electron Eng*, 2015, **42**(10): 21-26,32.
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.
- [9] Wang B L, Hinds E, Krivoy E. Basic optical properties of the photoelastic modulator part II: residual birefringence in the optical element[J]. *Proc SPIE*, 2009, **7461**: 746110.
- [10] Wei H C. The study of photoelastic modulator and its high-voltage drive technology[D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
魏海潮. 弹光调制器及其高压驱动技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [11] Wang Y C. The research on stability of photoelastic modulation fourier transform spectrometer[D]. Taiyuan: North University of China, 2014.
王艳超. 弹光调制傅里叶变换光谱仪稳定性研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [12] Li J. Research on the application of digital lock-in amplifier in the detection of weak photoelectric signal[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
李健. 数字锁相放大器在微弱光电信号检测中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [13] Zhou J. Mueller matrix analysis of photoelastic modulator[J]. *J Changshu Coll*, 2001, **15**(4): 19-22.
周军. 光弹调制器应用的 Mueller 矩阵分析[J]. *常熟高专学报*, 2001, **15**(4): 19-22.
- [14] Zeng A J, Huang L H, Dong Z R, et al. Calibration method for a photoelastic modulator with a peak retardation of less than a half-wavelength[J]. *Appl Opt*, 2007, **46**(5): 699-703.
- [15] Wang M W, Tsai F H, Chao Y F. In situ calibration technique for photoelastic modulator in ellipsometry[J]. *Thin Solid Films*, 2004, **455-456**: 78-83.
- [16] Wu Y T, Xiong W, Li C B, et al. Research and verification on resonance characteristics of photoelastic modulator[J]. *Acta Opt Sin*, 2021, **41**(15): 1523002.
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.

作者简介



李坤钰(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电检测方面的研究。

E-mail: 1125544527@qq.com;



【通信作者】王志斌(1969-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事偏振测量、光谱测量、光电检测等方面的研究。

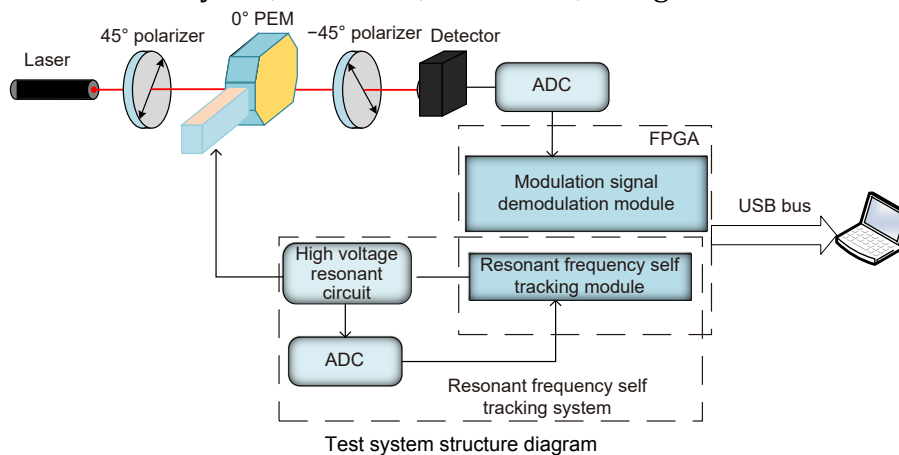
E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Research on resonance characteristics of photoelastic modulators and self-tracking of resonant frequency

Li Kunyu^{1,2,3}, Li Kewu^{2,3}, Liu Kun^{1,2,3}, Wang Zhibin^{1,2,3*}



Test system structure diagram

Overview: Overview: Photoelastic modulator, a high-quality thermo-mechanical coupling device composed of isotropic elastic optical crystal and piezoelectric crystal, is widely used in polarization measurement, spectral measurement, and many other fields. A high-voltage resonant circuit is adopted to generate the periodically changing high voltage amplitude, which is applied to both ends of the piezoelectric crystal to drive the photoelastic modulator to perform forced telescopic vibration, thus generating periodic birefringence. Although the quality factor of the photoelastic modulator is as high as 10^3 , the photoelastic crystal in the photoelastic modulator will vibrate in length under the action of the piezoelectric crystal when driven by the high voltage. In addition, there will be thermal dissipation caused by dielectric loss and mechanical loss, some of which exchange heat with the environment, and the rest will raise the temperature of the photoelastic modulator itself. When the heat exchange between the photoelastic modulator and the external environment is happened before the heat balance, the resonant frequency will be changed, which will lead to the reduction of the modulator driving efficiency and the instability of the modulation amplitude. Standing from the perspective of mechanical point, the system can be equivalent to the vibration model of a damped spring-mass system. The system is an underdamped second-order system, and the modulator can also be equivalent to a RLC series resonant circuit from the electrical perspective. Therefore, when the temperature of the modulator changes, its electrical parameters and resonant will also vary. Therefore, this paper first analyzes the resonant frequency characteristics of the photoelastic modulator from the perspective of electricity, and establishes the equivalent circuit model of the photoelastic modulator and the composite resonant network model with the high-voltage resonant drive circuit. Meanwhile, the resonant network is analyzed, and the results show that when the photoelastic is in the resonant state, the modulator impedance and the inductance voltage amplitude of the high-voltage resonant circuit are both the smallest. Therefore, this paper designs a control and test system based on field programmable gate array (FPGA) by combining the above mentioned characteristic and applying the amplitude and frequency characteristics of the resonant network. FPGA completes the measurement of the inductance voltage amplitude and the demodulation of the photoelastic modulation signal through the digital phase-locked amplifier. After obtaining the inductance voltage amplitude, the real-time tracking of the minimum value of the inductance voltage amplitude can be obtained by FPGA, so that the tracking of the resonant frequency of the photoelastic modulator can be realized. By demodulating the modulated signal, the calibration optical path system of the photoelastic modulator is also capable of measuring the modulation amplitude of the modulator. Finally, this paper successfully builds the test system, and conducts the frequency sweep test to verify the feasibility of the resonance tracking system. The resonance tracking tests on the modulator are implemented at room temperature -20°C & 80°C respectively. The results show that the test meets the requirements, and the maximum standard deviation of modulation amplitude is lower than 0.83% rad.

Li K Y, Li K W, Liu K, et al. Research on resonance characteristics of photoelastic modulators and self-tracking of resonant frequency[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(4): 220249; DOI: 10.12086/oe.2023.220249

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62205310)

¹School of Instrument and Electronics, North University of China, Shanxi, Taiyuan 030051, China; ²Shanxi Optoelectronic Information and Instrument Engineering Technology Research Center, North University of China, Shanxi, Taiyuan 030051, China; ³Frontier Interdisciplinary Research Institute, North University of China, Shanxi, Taiyuan 030051, China

* E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn