

## 弹光调制器动态参数测量与高效驱动匹配研究

刘坤 李克武 王爽 王志斌 张易琨

### Dynamic parameter measurement and efficient drive matching method for PEM

LIU Kun, LI Kewu, WANG Shuang, WANG Zhibin, ZHANG Yikun

引用本文:

刘坤,李克武,王爽,等.弹光调制器动态参数测量与高效驱动匹配研究[J].*应用光学*,2024,45(2):415–421. DOI: 10.5768/JAO202445.0203003

LIU Kun, LI Kewu, WANG Shuang, et al. Dynamic parameter measurement and efficient drive matching method for PEM[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(2): 415–421. DOI: 10.5768/JAO202445.0203003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0203003>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [基于空间光调制器的光束大角度扫描技术研究](#)

Large angle range beam scanning control based on crystal spatial light modulator

应用光学. 2020, 41(4): 816–821 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409803>

#### [Y波导调制器残余强度调制研究](#)

Residual intensity modulation of Y-waveguide modulator

应用光学. 2017, 38(6): 974–978 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0605002>

#### [激光雷达辅助驾驶道路参数计算方法研究](#)

Research on road parameters calculation for auxiliary driving with LIDAR

应用光学. 2020, 41(1): 209–213 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0107004>

#### [光电成像系统动态调制传递函数测量装置](#)

Dynamic modulation transfer function measuring device for photoelectric imaging system

应用光学. 2021, 42(4): 592–596 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401004>

#### [空间激光通信系统动态跟瞄参数测试方法研究](#)

Dynamic tracking and pointing accuracy measurement method of space laser communication system

应用光学. 2018, 39(5): 762–766 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0507002>

#### [光电雷达红外调制检测技术](#)

Infrared modulation detecting technology of electro-optic radar

应用光学. 2017, 38(3): 456–462 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0303005>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 02-0415-07

# 弹光调制器动态参数测量与高效驱动匹配研究

刘 坤<sup>1,2,3</sup>, 李克武<sup>2,3</sup>, 王 爽<sup>2</sup>, 王志斌<sup>1,2,3</sup>, 张易琨<sup>2,3</sup>

(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:** 为了提高弹光调制器 (photoelastic modulator, PEM) 的驱动效率, 提出了一种基于 PEM 动态参数测量的阻抗匹配参数计算方法。理论分析了 PEM 调制幅度与驱动电压大小的关系, 建立了 PEM 及其谐振匹配网络的等效电路模型, 在此基础上推导了 PEM 谐振驱动电压与各个参数的关系, 并设计了针对 PEM 动态测试的测量系统与验证方法。对谐振频率为 44.822 kHz 的 PEM 进行各项特性曲线的理论仿真与试验比较, 验证了动态测量系统的可靠性, 并通过数值仿真得到 PEM 最优匹配参数。在最优匹配参数附近选取不同匹配参数, 测量实际谐振驱动电压, 测量结果与仿真曲线相关性达 0.996 4, 变化趋势在 10 μF 前基本吻合, 且在理论最优匹配参数下, 实际谐振驱动电压峰值达 510 V, 优于其他驱动匹配方法, 接近理论最大值, 相对误差小于 1.16%。通过 PEM 等效动态参数推算的最优匹配参数, 可使 PEM 达到最大驱动效率。

**关键词:** 弹光调制器; 驱动效率; 动态参数; 阻抗匹配

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202445.0203003](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0203003)

## Dynamic parameter measurement and efficient drive matching method for PEM

LIU Kun<sup>1,2,3</sup>, LI Kewu<sup>2,3</sup>, WANG Shuang<sup>2</sup>, WANG Zhibin<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Yikun<sup>2,3</sup>

(1. School of Instruments and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Engineering and Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-electronic Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. Institute of Frontier Interdisciplinary Sciences, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to improve the driving efficiency of photoelastic modulator (PEM), a method of impedance matching parameter calculation based on dynamic parameter measurement of PEM was proposed. The relationship between PEM modulation amplitude and driving voltage was analyzed theoretically, and the equivalent circuit model of PEM and its resonance matching network were established. On this basis, the relationship between PEM resonant driving voltage and various parameters was derived, and the measurement system and verification method for the dynamic test of PEM were also designed. Theoretical simulation and experimental comparison of various characteristic curves were conducted on a PEM with a resonant frequency of 44.822 kHz, which verified the reliability of the dynamic measurement system, and the PEM optimal matching parameters were obtained by numerical simulation. Near the optimal matching parameters, the different matching parameters were selected to measure the actual resonance driving voltage. The correlation between the measurement results and the simulation curve reaches 0.996 4, and the change trend is basically consistent before 10 μF. The peak resonance driving voltage reaches 510 V, which is better than other driving matching methods and close to the theoretical maximum, and the relative error is less than 1.16%. The optimal matching parameter calculated by the PEM equivalent dynamic parameters can achieve the maximum driving

收稿日期: 2023-10-08; 修回日期: 2023-11-21

基金项目: 国家自然科学基金 (62205310, 62205309)

作者简介: 刘坤 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电探测与偏振测量研究。E-mail: [1790068359@qq.com](mailto:1790068359@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、光电检测等研究。E-mail: [wangzhibin@nuc.edu.cn](mailto:wangzhibin@nuc.edu.cn)

efficiency of PEM.

**Key words:** photoelastic modulator; driving efficiency; dynamic parameters; impedance matching

## 引言

弹光调制器 (photoelastic modulator, PEM) 是一种基于逆压电效应和光弹性效应研制的光学调制器件,由压电晶体与弹光晶体采用软连接的方式耦合组成,在实际工作中类似于具有固定快慢轴、但相位延迟量呈周期变化的波片<sup>[1-3]</sup>。较之其他偏振调制器件,PEM 具有通光孔径大、偏振特性好、工作频带宽、调制速度快等诸多优点,被广泛应用于旋光测量、圆二色性测量、椭圆偏振测量、多光谱温度测量和偏振成像等领域<sup>[4-8]</sup>。

PEM 的阻抗匹配,是其实现高效驱动、提高相位调制幅值的关键,目前常采用的匹配方法类似压电驱动阻抗匹配,主要有两种:1) 电感匹配法,AN J 等人通过串联或并联电感,抵消压电晶体的容抗使负载呈纯阻性<sup>[9-10]</sup>,这种匹配方法只适应于较低频压电振子;2) 电感-电容联合匹配法,QUAN W 等人通过并联大电容,提升谐振匹配网络的品质因数,再串联电感抵消容抗<sup>[11-13]</sup>。该匹配方法可以有效减小压电振子的谐振阻抗且具有良好的滤波与频率特性,因此更常用于 PEM 阻抗匹配领域。但由于缺乏 PEM 匹配网络参数推导的相关理论,在实际应用中只能通过多次更改匹配参数和实验采集谐振驱动数据来进行比较选择,该过程复杂繁琐,且难以找到最优匹配参数。

针对以上问题,本文将 PEM 视为带固定负载的压电石英晶体进行整体分析,建立了 PEM 等效电路模型与谐振匹配网络模型,推导了 PEM 谐振驱动电压幅值与匹配参数、等效参数的关系,并结合 PEM 定标光路与传输法测量网络,对 PEM 的等效动态参数进行测量,得到 PEM 谐振驱动电压幅值与匹配电容的关系曲线,从而找到最优匹配参数,使 PEM 的驱动效率最大。

## 1 理论与推导

### 1.1 PEM 相位调制原理

PEM 的工作原理是通过给压电振子两侧加高压正弦信号,使压电振子产生水平方向的周期性振动。振动通过软胶传导至弹光晶体,使弹光晶体共振形成应力驻波,产生周期性变化的双折射现象,通过晶体的线偏振光变为两束相互正交的偏振光,实现光的相位调制<sup>[14]</sup>。

当偏振光通过弹光晶体时,互相正交的两偏振分量的相位延迟为

$$\delta=\delta_0 \sin(2\pi f_0 t) \quad (1)$$

式中: $f_0$  为 PEM 谐振频率; $\delta_0$  为相位延迟幅值,可表示为

$$\delta_0 = \frac{2\pi d}{\lambda} k V_0 \quad (2)$$

式中: $d$  为弹光晶体通光方向厚度; $\lambda$  为入射光波长; $k$  为弹光晶体光学-应力常数; $V_0$  为 PEM 驱动电压幅值。PEM 作为一种高品质因数器件,其工作频带较窄,必须工作在谐振频率。因此对于 1 个加工完成的 PEM 和选定光源,驱动电压幅值是影响 PEM 相位延迟幅值的唯一因素。

### 1.2 PEM 等效电路模型

为了提高 PEM 的驱动效率,在一定的输入电压下得到更大的谐振驱动电压,满足红外偏振测量中 PEM 大相位延迟幅值的需求,需要对 PEM 进行阻抗匹配。为此,根据压电晶体分析领域常用的 Mason 等效网络思想,将 PEM 视为带负载的压电石英,将具有机电耦合特征的 PEM 物理模型转换成相应的电学模型,将换能器在工作过程中的物理力学参数等效成对应的电学参数,建立 PEM 等效电路模型,如图 1 所示。



图 1 PEM 等效过程

Fig. 1 Equivalent process of PEM

将压电晶体储存电荷的能力,采用单一支路上的静态电容  $C_0$  进行表征。在 PEM 工作过程中,将其本身发生的物理状态变化转换成电学模型,然后采用动态参数进行表示。PEM 在机械振动过程中发生的本身弹性的变化采用动态电容  $C_1$  进行表征,在机械振动过程中 PEM 受到的惯性采用动态电感  $L_1$  进行表征,在 PEM 工作过程中因振动摩擦、能量传递损耗则采用动态电阻  $R_1$  进行表征。由此可得,PEM 整体等效阻抗  $Z_1$  为

$$Z_1 = \frac{\frac{L_1}{C_0} - \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_0 C_1} - \frac{R_1}{2\pi f C_0} j}{R_1 + (2\pi f L_1 - \frac{1}{2\pi f C_1} - \frac{1}{2\pi f C_0}) j} \quad (3)$$

式中: $f$ 为 PEM 驱动电压频率,而为了使 PEM 的总阻抗最小,应使其动态支路感抗与容抗抵消,即工作在纯电阻状态,则有:

$$2\pi f_s L_1 - \frac{1}{2\pi f_s C_1} = 0 \quad (4)$$

可化简  $Z_1$  为

$$Z_1 = j \frac{1}{2\pi f_s C_0} // R_1 \quad (5)$$

式中  $f_s$  为 PEM 的串联谐振频率。由式(5)可知,在此驱动频率下,PEM 等效动态支路电抗为 0,而由于静态支路  $C_0$  的存在,PEM 整体仍为容性负载,因此需要选择合适谐振匹配网络,使 PEM 整体阻抗降低,并向纯阻性区靠近,减小其无功功率输出。

### 1.3 PEM 谐振匹配网络

由于 PEM 等效电路模型容性静态支路的存在,采用压电晶体研究中常用的电容-电感特性匹配方法,谐振匹配网络如图 2 所示。

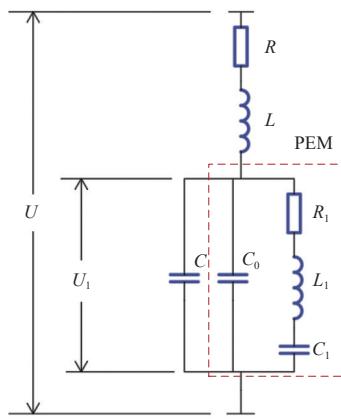


图 2 PEM 谐振匹配网络

Fig. 2 Resonant matching network of PEM

图 2 中,  $U$  为方波驱动电压;  $U_1$  为谐振网络 LC 振荡产生的 PEM 驱动电压;  $C$  为匹配电容,与 PEM 并联,用于增大储能,提高匹配串联谐振回路的品质因数;  $L$  为匹配电感,用于抵消匹配电容与 PEM 的容抗;  $R$  为匹配回路等效电阻,其值较小计算时可忽略。当输入电压  $U$  频率趋近于  $f_s$  时,整个系统接近纯阻态,谐振匹配网络整体阻抗  $Z$  如式(6)所示:

$$Z = j2\pi f_s L + Z_1 // \left( j \frac{1}{2\pi f_s C} \right) \quad (6)$$

可算得 PEM 驱动电压  $U_1$  如式(7)所示:

$$U_1 = U \frac{Z_1 // \left( j \frac{1}{2\pi f_s C} \right)}{Z} \quad (7)$$

当驱动电压  $U$  频率趋近于  $f_s$  时,整个系统接

近纯阻态,即匹配回路电抗接近于 0,可推导出匹配电容  $C$  与匹配电感  $L$  的关系如下:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_s^2 (C + C_0)} \quad (8)$$

将式(4)代入上式,可得匹配元件参数与 PEM 等效参数的关系如下:

$$L = \frac{R_1^2 L_1 C_1 (C + C_0)}{L_1 C_1 + R_1^2 (C + C_0)^2} \quad (9)$$

联立式(4)~式(8),可算得 PEM 谐振时,匹配网络驱动电压  $U_1$  为

$$U_1 = U \frac{\left( j \frac{C_0}{\sqrt{L_1 C_1}} // R_1 \right) // \left( j \frac{\sqrt{L_1 C_1}}{C} \right)}{j \frac{1}{4\pi^2 f_s^2 (C + C_0) \sqrt{L_1 C_1}} + \left( j \frac{C_0}{\sqrt{L_1 C_1}} // R_1 \right) // \left( j \frac{\sqrt{L_1 C_1}}{C} \right)} \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可知,在 PEM 与输入电压  $U$  选定的谐振匹配网络中,谐振驱动器电压只与匹配元件参数  $L$ 、 $C$  有关。要计算出合适的谐振匹配电感  $L$  与匹配电容  $C$ ,使 PEM 谐振时其驱动电压最大,就需要对 PEM 的等效电学参数进行测量,其静态支路  $C_0$  可由电容表笔直接测量,而动态支路参数  $R_1$ 、 $C_1$ 、 $L_1$  则需要选择合适的测量网络进行计算。

## 2 实验系统设计

### 2.1 PEM 动态参数测量系统

由于 PEM 的耦合结构特性,及大电压、大负载等驱动特性,本文结合 PEM 定标光路<sup>[15]</sup>对石英晶体常用的动态参数测量方法——传输法进行了改进,具体测量系统如图 3 所示。

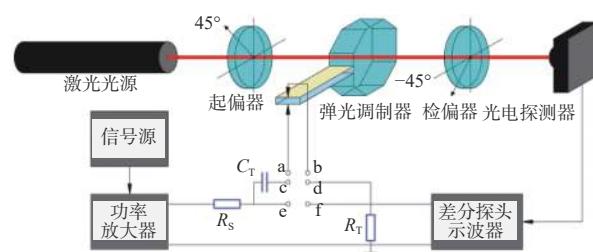


图 3 PEM 动态参数测量系统

Fig. 3 Dynamic parameter measurement system of PEM

该测量系统主要由 PEM 定标光路和 PEM 动态参数测量电路组成。定标光路激光依次通过起偏器、PEM 和检偏器后被光电探测器探测,探测信号传输至示波器,PEM 的调制轴与坐标轴重合,起

偏器和检偏器的透光轴相对 PEM 调制轴设置成 45°; 动态参数测量电路由信号发生器产生正弦信号, 经功率放大器放大后输入测量网络,  $R_S$  为限流电阻;  $R_T$  为测量电阻;  $C_T$  为负载电容。

系统设置调试完成后, 首先将 PEM 的 a、b 端接入测试网络 e、f 端子, 调节信号发生器输出信号频率, 观察示波器上探测器接收的 PEM 调制光信号。当其相位调制幅值最大时, 此时的驱动频率则为 PEM 的位移共振频率, 可近似为 PEM 等效电路的串联谐振频率, 记为  $f_s$ 。在此频率下, 通过示波器差分探头测量 PEM 与  $R_T$  两端电压幅值  $U_{T1}$  与  $U_{RT}$ , 即可计算 PEM 的阻抗  $|Z_1|$  如式(11):

$$|Z_1| = R_T \frac{U_{T1}}{U_{RT}} \quad (11)$$

结合式(5)即可算出动态电阻  $R_1$  的值, 如式(12)所示:

$$R_1 = \sqrt{\frac{|Z_1|^2 (\frac{1}{2\pi f_s C_0})^2}{(\frac{1}{2\pi f_s C_0})^2 - |Z_1|^2}} \quad (12)$$

然后将 PEM 的 a、b 端接入测试网络 c、d 端子, 调节信号发生器输出信号频率, 观察示波器上探测器接收的 PEM 调制光信号。当其相位调制幅值最大时, 此时的驱动频率记为  $f_{s1}$ , 则有:

$$f_{s1} = f_s \sqrt{\left(1 + \frac{C_1}{C_0 + C_1}\right)} \quad (13)$$

对 PEM 按大负载石英晶体模型, 取一级近似值, 即可得动态电容  $C_1$  为

$$C_1 = \frac{2(f_{s1} - f_s)(C_0 + C_T)}{f_s} \quad (14)$$

结合式(4)即可算出动态电感  $L_1$  的值如式(15)所示:

$$L_1 = \frac{1}{8\pi^2 f_s (f_{s1} - f_s) (C_0 + C_T)} \quad (15)$$

通过对 PEM 等效电路动态参数的测量, 可以对其谐振网络匹配电容电感进行精确计算选择, 提高谐振回路的品质因数, 使 PEM 的驱动电压与相位延迟幅值  $\delta_0$  达到最大。

## 2.2 验证系统设计

搭建动态参数测量与驱动效率验证实验系统, 用于检验 PEM 动态参数测量的准确性, 以及测量 PEM 驱动效率, 其光路同图 3 PEM 定标系统光路, 其驱动控制与信号采集部分如图 4 所示, 图 4 中匹

配电容  $C$  两侧 g、h 接图 3 定标光路 PEM 的 a、b 端。

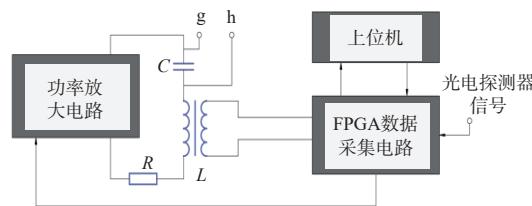


图 4 PEM 驱动控制与信号采集系统

Fig. 4 Drive control and signal acquisition system of PEM

该系统由上位机下发控制字至 FPGA 的 DDS 模块产生控制信号, 经过功率放大电路控制 LC 谐振网络产生幅值、频率、相位可调节的 PEM 正弦驱动信号, 通过互感线圈输出反馈信号, 与探测器接收的光调制信号经 FPGA 数据采集模块, 传输至上位机分析。

通过比较采集反馈信号与仿真驱动电压的幅频、相频特性曲线, 验证 PEM 动态参数测量的准确性; 通过采集 PEM 调制光信号, 经过数字锁相得到其 2 倍频幅值  $V_{2f}$  与 4 倍频幅值  $V_{4f}$ , 进而通过 4 倍频与 2 倍频幅值比  $J_4/J_2$ , 推导出 PEM 相位延迟幅值  $\delta_0$  的大小<sup>[16]</sup>。

## 3 实验结果与分析

本文制作了目标谐振频率为 45 kHz 的单驱动八角二维对称结构 PEM, 用于实验测试。在实验室常温环境下, 按图 3 所示搭建测试系统, 选用寄生电容小的高精度测量电阻  $R_T=6.79 \text{ k}\Omega$ , 测量电容  $C_T=24 \text{ pF}$ , 采用电容表测量 PEM 静态电容  $C_0=16 \text{ pF}$ 。

首先将 PEM 的 a、b 端接入测试网络 e、f 端子, 调节信号发生器与功率放大器, 设置扫频范围为 44 kHz~46 kHz, 驱动电压幅值为 500 V; 观察示波器 PEM 调制信号的相位延迟幅值  $\delta_0$  大小, 其最大值为  $1.8\pi$ , 此时的驱动频率即为 PEM 串联谐振频率  $f_s=44.822 \text{ kHz}$ , 测量电阻  $R_T$  两端电压幅值为 160 V, PEM 两端电压幅值为 250 V, 由此可计算出动态电阻  $R_1=9.48 \text{ k}\Omega$ 。将 PEM 的 a、b 端接入测试网络 c、d 端子, 同样的扫频信号下得到  $f_{s1}=44.827 \text{ kHz}$ , 由此可计算出动态电容  $C_1=5.18 \times 10^{-3} \text{ pF}$ , 动态电感  $L_1=2.436 \text{ H}$ 。

将测量出的 PEM 等效参数代入式(12), 设输入电压  $U$  为 15 V, 可绘制 PEM 谐振驱动电压  $U_1$  的幅值与匹配电容关系曲线如图 5 所示。

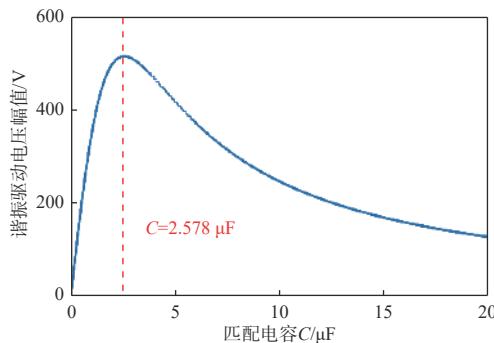
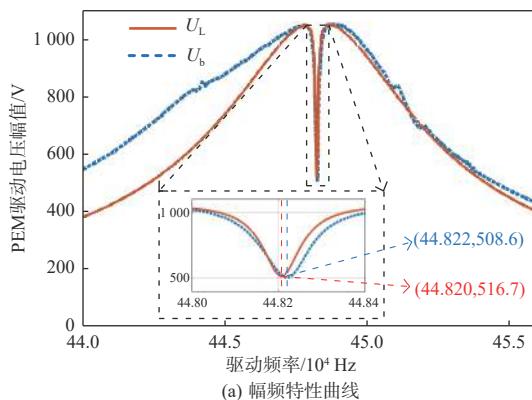


图 5 PEM 谐振驱动电压与匹配电容关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between PEM resonant driving voltage and matching capacitance

由图 5 可知, 当匹配电容  $C=2.578 \mu\text{F}$  时, PEM 的谐振驱动电压最大, 同时可算出相应的匹配电感  $L=4.89 \text{ mH}$ , 我们称以上匹配参数为理论最优匹配参数。保留以上测试系统中的光路部分, 将 PEM 动态参数测量电路置换成图 4 所示 PEM 驱动控制与信号采集系统, 匹配电容选用温度特性好的高压银云母电容, 匹配电感选用磁芯磁导率低的绕制磁环电感, 对 PEM 驱动电压  $U_b$  的反馈信号进行采集, 与计算参数仿真结果对比如图 6 所示。



(a) 幅频特性曲线

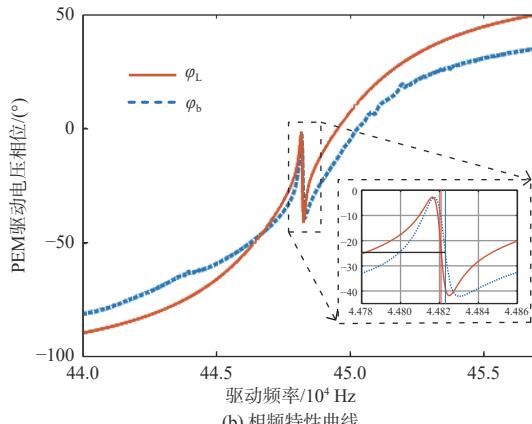


图 6 PEM 仿真驱动电压与实际驱动电压比较

Fig. 6 Comparison between PEM simulated driving voltage and actual driving voltage

图 6(a)中,  $U_L$  为将各参数测量结果带入式(7)后所得 PEM 驱动电压幅值,  $U_b$  为通过扫频采集的 PEM 实际反馈驱动电压幅值, 可知其幅频特性曲线变化趋势基本一致, 其曲线波谷极小值点即为 PEM 谐振频率, 谐振频率差值小于 2 Hz, 谐振电压幅值接近; 图 6(b)中,  $\phi_L$ 、 $\phi_b$  分别为仿真驱动电压、实际驱动电压的相位, 其相频特性曲线变化趋势基本一致, 其谐振相位相同。由以上分析可知, PEM 等效模型的建立与等效参数测量是准确的, 可应用于谐振匹配参数的计算, 及以其变化趋势为依据的 PEM 稳定控制技术的研究。

随后, 在 44.822 kHz 的驱动频率下, 更换不同的匹配参数对, 通过互感器采集其反馈谐振驱动电压, 得到其实际谐振驱动电压幅频特性曲线如图 7 所示。

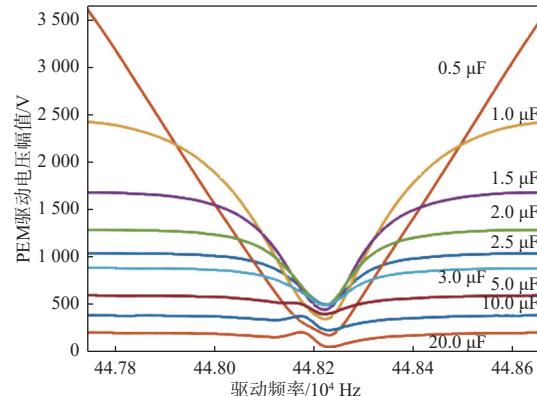


图 7 不同谐振匹配电容下 PEM 谐振驱动电压幅频特性曲线

Fig. 7 Amplitude frequency characteristic curves of PEM driving voltage under different resonant matching capacitances

图 7 为分别选取  $0.5 \mu\text{F}$ 、 $1 \mu\text{F}$ 、 $1.5 \mu\text{F}$ 、 $2 \mu\text{F}$ 、 $2.578 \mu\text{F}$ 、 $3 \mu\text{F}$ 、 $5 \mu\text{F}$ 、 $10 \mu\text{F}$ 、 $20 \mu\text{F}$  的匹配电容与对应的匹配电感, 对 44.822 kHz 的 PEM 进行阻抗匹配, 并通过实验采集的反馈驱动电压幅频特性曲线。由此可得, 不同的匹配电容下, PEM 的仿真谐振驱动电压  $U_1$ 、实际反馈谐振驱动电压  $U_b$ , 以及  $U_1$  与  $U_b$  的相对误差如表 1 所示。

表 1 不同匹配电容下 PEM 谐振驱动电压比较

Table 1 Comparison of PEM resonant driving voltage under different matching capacitances

驱动电压	匹配电容 $C/\mu\text{F}$								
	0.5	1	1.5	2	2.578	3	5	10	20
$U_1/\text{V}$	192	348	448	501	516	510	420	250	131
$U_b/\text{V}$	188	357	455	500	510	504	410	242	85
相对误差/%	2.08	2.58	1.56	0.2	1.16	1.18	2.38	3.2	35

同时可得实际匹配电容与谐振驱动电压的关系,与仿真曲线对比如图 8 所示。

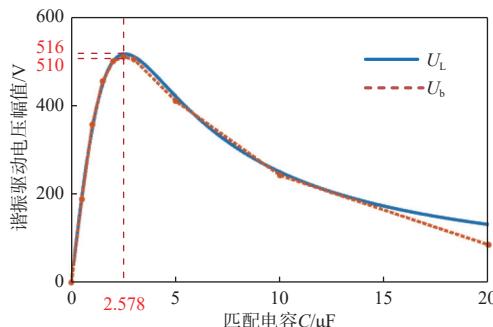


图 8 仿真谐振驱动电压、反馈谐振驱动电压与匹配电容关系对比图

Fig. 8 Comparison diagram of relationship between simulated resonant driving voltage, feedback resonant driving voltage and matching capacitance

由表 1 和图 8 可算得, 实际测量结果与仿真曲线间整体相关系数为 0.996 4, 变化趋势在  $10 \mu\text{F}$  前基本吻合(在实际应用中 PEM 一般不超过  $100 \text{ kHz}$ , 故谐振匹配电容大小一般不超过  $10 \mu\text{F}$ ),  $10 \mu\text{F}$  后偏离仿真曲线, 为实际实验中匹配电容影响, 匹配电容越大, 寄生电感越大, 从而影响等效模型静态支路的准确性, 导致实际谐振驱动电压小于仿真值。而在理论最优匹配参数下, 实际谐振驱动电压峰值接近理论最大值, 且与理论最大谐振驱动电压幅值相对误差小于 1.16%, 动态参数测量与匹配参数选取的准确度高, 可知通过 PEM 等效动态参数推算的最大驱动效率匹配参数符合实际测量结果。

为方便比较, 对 PEM 各驱动方法的驱动电路均以  $15 \text{ V}$  电压输入, 测试谐振时 PEM 驱动电压幅值  $U_S$ , 以  $U_S$  的大小代表驱动效率的高低, PEM 各匹配驱动方法对比如表 2 所示。

表 2 不同 PEM 匹配驱动方法对比

Table 2 Comparison of different PEM matching drive methods

方法	$U_S/\text{V}$	特点	参考文献
电感匹配驱动	140	驱动效率低, 成本低, 匹配过程简易	文献[9]
电感-电容联合匹配驱动	488	驱动效率较高, 成本较高, 匹配过程复杂繁琐	文献[12~13]
最优匹配参数匹配驱动	510	驱动效率高, 成本较低, 匹配过程较为简易	本文

## 4 结论

本文介绍了 PEM 的相位调制原理与等效电路

模型, 并针对目前的 PEM 谐振匹配网络难以找到最高效的匹配参数的问题, 推导了一定输入电压下 PEM 谐振驱动电压与等效参数、匹配参数的关系, 设计了 PEM 动态参数测量系统, 并制作了目标谐振频率为  $45 \text{ kHz}$  的单驱动八角二维对称结构 PEM, 用于实验测试测量并验证实验 PEM 的各项等效动态参数, 通过带入等效参数数值仿真得到 PEM 谐振驱动电压与匹配电容关系曲线与理论最优匹配参数。然后选择多组理论最优值附近的匹配参数进行 PEM 谐振驱动电压实际测量, 结果显示, 实际测量值与仿真曲线相关系数为 0.996 4, 且变化趋势在  $10 \mu\text{F}$  前基本吻合, 在理论最优匹配参数下, 实际谐振电压峰值达  $510 \text{ V}$ , 优于其他匹配驱动方法, 接近理论最大值, 且相对误差小于 1.16%。因此, 本文通过对 PEM 等效动态参数与谐振匹配参数的测量, 使 PEM 谐振匹配网络在一定输入电压下, 实现了最大谐振驱动电压输出, 为 PEM 的高效驱动匹配提供了理论参考, 且为以反馈驱动信号各项特性为基础的 PEM 稳定控制技术研究提供了有力支撑。

## 参考文献:

- [1] WANG S, HAN X, WANG Y N, et al. Dispersion of the retardation of a photoelastic modulator[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(2): 341.
- [2] PHAL Y, YEH K, BHARGAVA R. Concurrent vibrational circular dichroism measurements with infrared spectroscopic imaging[J]. *Analytical Chemistry*, 2021, 93(3): 1294-1303.
- [3] SU F, ZHANG B W, LI T H. High speed stress measurement technique based on photoelastic modulator (PEM) and galvano-scanner[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 136: 106306.
- [4] 李克武, 王爽, 刘梓良, 等. 双弹光级联的差频调制型应力双折射测量[J]. 光学学报, 2023, 43(4): 83-92.  
LI Kewu, WANG Shuang, LIU Ziliang, et al. Stress birefringence measurement based on double cascaded photoelastic modulation with differential frequencies[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(4): 83-92.
- [5] 胡将, 李克武, 李晋华, 等. 基于弹光调制光谱的多光谱温度测量[J]. 中国激光, 2022, 49(9): 152-160.  
HU Jiang, LI Kewu, LI Jinhua, et al. Temperature measurement using multi-spectral method based on photoelastic modulation spectroscopy[J]. *Chinese Journal of*

- Lasers, 2022, 49(9): 152-160.
- [ 6 ] JIANG H, SHI H Y, SUN X D, et al. Optical anisotropy of few-layer black phosphorus visualized by scanning polarization modulation microscopy[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(6): 2509-2515.
- [ 7 ] HAN C Y, CHEN M T, LAI H B, et al. Dynamic Stokes polarimetric imaging system with dual-wavelength operation[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2020, 38(1): 014010.
- [ 8 ] LI K W, ZHANG R, JING N, et al. Fast and full range measurements of ellipsometric parameters using a 45° dual-drive symmetric photoelastic modulator[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5725-5733.
- [ 9 ] AN J F, SONG K Z, ZHANG S X, et al. Design of a broadband electrical impedance matching network for piezoelectric ultrasound transducers based on a genetic algorithm[J]. *Sensors*, 2014, 14(4): 6828-6843.
- [ 10 ] 李存波, 谢本亮. TeO<sub>2</sub>压电换能器的外部匹配网络设计[J]. 压电与声光, 2011, 33(5): 768-770.  
LI Cunbo, XIE Benliang. Design of the external matching network of TeO<sub>2</sub> piezoelectric transducer[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2011, 33(5): 768-770.
- [ 11 ] 苟阳, 付欣. 随钻声波发射换能器宽频阻抗匹配设计及实验[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 186-193.  
GOU Yang, FU Xin. Broadband impedance matching design and experiment for acoustic while drilling trans-
- ducer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(3): 186-193.
- [ 12 ] 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 Haichao, ZHANG Jilong, CHEN Youhua, et al. Research on impedance matching features of piezoelectric crystal for photoelastic modulated interferometer[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2013, 35(2): 185-188.
- [ 13 ] QUAN W, WANG Q H, ZHAI Y Y. A dual closed-loop drive and control system of photoelastic modulator for atomic magnetometer[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(6): 065105.
- [ 14 ] 王志斌, 张瑞, 赵冬娥, 等. 光弹调制差频偏振测量及误差分析[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 876-883.  
WANG Zhibin, ZHANG Rui, ZHAO Donge, et al. Photoelastic-modulator-based differential frequency polarization modulation measurement and error analysis[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 876-883.
- [ 15 ] 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 Kewu, WANG Shuang. Calibration and stability control for photoelastic modulator using feedback optical path[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(5): 935-942.
- [ 16 ] XING B Z, DING M, LU J X, et al. Calibration for phase retardation of photoelastic modulator based on compound Bessel function[J]. *Optik*, 2020, 206: 164322.