

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514362

面向温漂影响的光学电压传感器线性 双折射动态解耦与补偿方法*

谭巧^{1,2}, 沈捷¹, 许诚³, 黄奕钒¹, 徐启峰¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院 福州 350116; 2. 闽江学院物理与电子信息工程学院 福州 350116;
3. 国网龙岩供电公司 龙岩 364000)

摘要: 光学电压传感器(OVS)是新一代电压互感器的发展方向。当前 OVS 面临的最大挑战是温漂引起的电光晶体线性双折射问题始终未能有效解决,成为制约其实用化的瓶颈。为此,提出面向温漂影响的 OVS 电光晶体线性双折射动态解耦与补偿方法。首先,基于晶体的光率体方程建立能够表征锗酸铋(BGO)晶体线性双折射的数学模型,分析线性双折射和电光相位延迟的产生机理和动态特性,为 OVS 线性双折射与电光相位延迟的解耦提供理论依据。然后,提出基于线性 OVS 的线性双折射解耦方法,其解调结果为电光相位延迟与线性双折射的线性叠加,其中电光相位延迟与待测电场直接相关,线性双折射因环境温度变化引入,基于两者产生的机理特性不同,可以将线性双折射从相位延迟中分离出来并予以补偿。在此基础上,提出了基于交流电压过零检测的 OVS 线性双折射补偿方法。实验结果表明,所提方法中电光晶体的线性双折射可测量、可补偿。在 $-20^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 温度范围,研究与分析了 BGO 晶体线性双折射的温度特性,并且经所提方法补偿后 OVS 的比差 $< 0.257\%$, 角差 $< 14.254'$ 。最后,搭建的光功率波动与振动实验平台测试了所提方法的光功率无关性与振动特性。基于 OVS 的线性解调模式为解决 OVS 电光晶体线性双折射问题提供了新视角。

关键词: 光学电压传感器;动态解耦;线性双折射;补偿;相位延迟

中图分类号: TH74 TM451 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Linear birefringence dynamic decoupling and compensation method of optical voltage sensor for temperature drift effects

Tan Qiao^{1,2}, Shen Jie¹, Xu Cheng³, Huang Yifan¹, Xu Qifeng¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;
2. College of Physics and Electronic Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350116, China;
3. State Grid Longyan Electric Power Supply Company, Longyan 364000, China)

Abstract: Optical voltage sensors (OVS) represent the developmental direction of next-generation voltage transformers. The primary challenge currently facing OVS is the ineffective resolution of linear birefringence in electro-optic crystals induced by temperature drift, which has become a bottleneck restricting their practical application. To address this issue, this paper proposes a dynamic decoupling and compensation method for linear birefringence in OVS electro-optic crystals under the influence of temperature drift. First, a mathematical model characterizing the linear birefringence of bismuth germanate oxide (BGO) crystals is established based on the crystal's optical indicatrix equation. The generation mechanism and dynamic characteristics of linear birefringence and electro-optic phase retardation are analyzed, providing a theoretical basis for the decoupling of linear birefringence and electro-optic phase retardation in OVS. Then, a linear birefringence decoupling method based on linear OVS demodulation is proposed. Its demodulation result is the linear superposition of electro-optic phase retardation and linear birefringence. The electro-optic phase retardation is directly related to the measured electric field, while linear birefringence is introduced by ambient temperature variations. Due to the distinct generation mechanisms of the two, linear birefringence can be separated from the phase retardation and compensated for. On this basis, an OVS

收稿日期: 2025-08-08 Received Date: 2025-08-08

* 基金项目: 国家自然科学基金(62405058, 62005110)、福建省自然科学基金(2022J01113)项目资助

linear birefringence compensation method based on AC voltage zero-crossing detection is proposed. Experimental results demonstrate that the linear birefringence of electro-optic crystals in the proposed method is measurable and can be compensated. Within the temperature range of -20°C to 70°C , the temperature characteristics of linear birefringence in BGO crystals are studied and analyzed. After compensation using the proposed method, the ratio error of OVS is less than 0.257 9% and the phase error is less than 14.254 7'. Finally, an experimental platform for optical power fluctuation and vibration is built to test the optical power independence and vibration stability of the proposed method. The linear demodulation mode based on OVS provides a new perspective for solving the linear birefringence problem in OVS electro-optic crystals.

Keywords: optical voltage sensor; dynamic decoupling; linear birefringence; compensation; phase delay

0 引 言

电压互感器是“感知”电网运行状态的重要工具,目前电力系统在线运行的电压互感器以电磁式和电容式为主,存在油气渗漏、环境不友好、运行维护量大等缺陷,已难以适应新型电力系统的“双碳”战略和绿色能源转型的发展需求^[1-4]。基于 Pockels 电光效应的光学电压传感器(optical voltage sensor, OVS)测量灵敏度高、测量范围大、不存在开路与燃烧爆炸的危险,并采用光纤传输信号,实现对高电压光隔离,绝缘性能优异且绿色环保^[5-8]。因此,OVS 是新一代电压互感器的发展方向。

经过近半个世纪的发展,OVS 仍然未能实用化。其中因温漂导致的电光晶体线性双折射是阻碍其实用化的瓶颈之一,现有研究表明它会显著降低 OVS 的测量精度,导致输出信号出现漂移;还会干扰电光相位延迟与待测电压间的线性关系,使得电压测量误差增大^[9-11]。基于 Pockels 效应的 OVS 将待测电压转化为电光相位延迟,但现有技术无法直接测量相位延迟,因此借助 Malus 定律将相位延迟近似线性转化为光强的变化,通过检测光强实现电压的测量^[12]。然而,环境温度、应力变化等在电光晶体上产生随机线性双折射,其与电光相位延迟以非线性的关系耦合于光强变化中,无法有效分离,致使电光晶体线性双折射成为棘手问题。此外,为了尽可能地还原真实的电压信号,这一解调模式需要将电光相位延迟控制在很小的角度内($<1^{\circ}$)以实现近似线性,如此小信号极易被线性双折射淹没掉,给解决线性双折射问题带来了更大的挑战。

目前关于 OVS 电光晶体线性双折射补偿方法的研究成果十分丰富,其中最具有代表性的为双晶体法^[13-14],其技术路线是在 OVS 传感单元安装两块光学性质完全相同的铋酸铋($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, BGO)晶体并在晶体之间放置 1 个 $1/2$ 波片,以构成互易型光路,当温度变化时两块晶体中的线性双折射可以相互抵消。但是,这一方法要求两块晶体的生长特性与光学特性完全一致,对工艺要求极高;同时波片同样存在严重的温漂^[15],并且双晶体结构增加了 OVS 光路的复杂性。双光路法是解

决线性双折射问题的另一个思路^[16],其利用偏振分束器作为检偏器,得到两束相互正交的偏振光,通过对两路信号的光强进行简单运算,可以消除信号中的直流分量与线性双折射。但是双光路法的补偿效果依赖于偏振分光器的分光效果和信号处理电路的对称性,效果并不理想。自愈式 OVS^[17-18]和自校准式 OVS^[19]引入了不受温度影响的基准源电压,并设置了参考光路,由测量光路和参考光路分别对待测电压和基准源电压进行平行测量,用参考光路参数的已知性对测量光路进行实时校正以解决晶体的线性双折射。但是,测量光路和参考光路的光学元件必须具备一致性,且参考光路使得 OVS 元器件数提高了一倍,成本翻倍且影响长期运行稳定性。

文献[20-21]在电光晶体线性双折射的产生机理上也做了深入研究,主要通过将温度参数引入电光晶体折射率椭球方程,以建立 OVS 的热应力双折射模型,在此基础上分析了在均匀温度场^[20]与非均匀温度场^[21]下线性双折射的变化机理。囿于线性双折射在实际中不可测量,上述机理无法验证。文献[22]基于均匀温度场的线性双折射模型,结合频谱分析揭示电光晶体温漂为低频分量,因此提出利用高通滤波的方法消除温漂影响。文献[23]进一步建立了电光晶体的暂态温度场模型,通过卡尔曼滤波确定晶体初始温度下的折射率,结合 OVS 输出光信号的高频分量,可实现温漂补偿。然而,这一类方法忽略了光功率波动对 OVS 输出光信号的影响,因此其温度补偿范围较窄(如 $20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$),难以满足实用化要求。

OVS 电光晶体的线性双折射是个棘手问题。目前的线性双折射补偿研究工作均围绕着非线性解调模式展开,研究思路和补偿方法存在惯性,虽然取得了一定进展,但是效果并不理想。且现有方法需要借助复杂的光学结构或是算法来补偿线性双折射,以牺牲 OVS 的可靠性与稳定性为代价,因此不能有效地解决线性双折射问题。

综上,为了解决 OVS 的线性双折射问题,本文以纵向调制 OVS 为研究对象,建立了表征电光晶体线性双折射的数学模型。分析了线性双折射和电光相位延迟的产

生理理和动态特性,基于两者产生机理不同提出利用线性解调模式实现线性双折射和电光相位延迟的解耦,并设计过零检测电路分离出零电场条件下的线性双折射。最后,通过实验验证了所提方法的有效性。

1 线性双折射数学模型

在 OVS 运行过程中,BGO 晶体的线性双折射主要源于多物理场耦合作用,包括温度场与应力场,使其呈现光学各向异性。线偏振光通过电光晶体后,线性双折射与电光相位延迟以相位叠加的形式耦合于偏振态变化中。本章构建能够表征电光晶体线性双折射的数学模型。

BGO 晶体折射率对多物理场的响应可由光率体方程表征。无外加物理场时光率体方程为:

$$\beta_0 x_1^2 + \beta_0 x_2^2 + \beta_0 x_3^2 = 1 \quad (1)$$

式中: x_1, x_2, x_3 为晶体的主轴坐标系; β_0 表示未加电场时的逆介电张量,满足式(2),即:

$$\beta_0 = \frac{1}{n_0^2} \quad (2)$$

式中: n_0 为 BGO 晶体各向同性时的主轴折射率。

OVS 实际运行过程中,同时受到温度场 T 、应力场 σ_{kl} 的耦合作用,此时 BGO 晶体表现为各向异性,光率体方程的变化可以用逆介电张量的变化量 $\Delta\beta$ 表示,如式(3)所示。

$$\Delta\beta = \pi_{ijkl}\sigma_{kl} + b\Delta T \quad (3)$$

式中: ΔT 表示温度变化量; b 和 π_{ijkl} 为 BGO 晶体的热光系数矩阵和压光系数矩阵,分别满足式(4)、(5),即:

$$b = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{11} & 0 \\ 0 & 0 & b_{11} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\pi_{ijkl} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: b_{11} 为 BGO 晶体的热光系数; π_{11} 、 π_{12} 和 π_{44} 为 BGO 晶体的弹光系数。

若 BGO 晶体所处环境温度变化为 ΔT ,则晶体在热光效应下的 $\Delta\beta$ 满足式(6),即:

$$\Delta\beta = b\Delta T = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{11} & 0 \\ 0 & 0 & b_{11} \end{bmatrix} \Delta T \quad (6)$$

BGO 晶体由弹光效应引起的光学性质变化满足式(7),即:

$$\Delta\beta = \pi_{ijkl}\sigma_i = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (7)$$

为了简化计算,将 σ_{kl} 写成爱因斯坦求和约定形式 σ_i ,表示晶体不同方向的应力变化,由温度变化和温度梯度共同驱动,其中 BGO 晶体在主轴坐标系下任意一点的 σ 满足式(8),即:

$$\sigma = C(B, \mu, \alpha)\Delta T + \psi(\nabla T) \quad (8)$$

式中: B 为 BGO 晶体弹性模量; μ 为泊松比; α 为 BGO 晶体热膨胀系数; C 是由 B 、 μ 和 α 共同决定的常数; $\psi(\nabla T)$ 为温度梯度引起的应力变化项。

实际运行中,BGO 晶体置在两侧电极中,沿 x_3 轴方向晶体不受约束,故不会受热应力的影响。而在与通光方向垂直的方向上,晶体受结构约束存在热应力,考虑温度变化和温度梯度的影响, σ_i 在主轴坐标系中如式(9)所示。

$$\sigma_i = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: σ_1 、 σ_2 表示晶体在 x_1 、 x_2 主轴方向受到的正应力; σ_6 表示晶体在 x_1x_2 平面受到的切应力。

基于式(3)、(6)、(7)、(9)可以得到在温度场、应力场共同作用下 BGO 晶体的光率体方程为:

$$(\beta_0 + \pi_{11}\sigma_1 + \pi_{12}\sigma_2 + b_{11}\Delta T)x_1^2 + (\beta_0 + \pi_{12}\sigma_1 + \pi_{11}\sigma_2 + b_{11}\Delta T)x_2^2 + [\beta_0 + (\sigma_1 + \sigma_2)\pi_{12} + b_{11}\Delta T]x_3^2 + \pi_{44}\sigma_6x_1x_2 = 1 \quad (10)$$

式(10)表明,多物理场作用下 BGO 晶体的主轴方向和大小都发生了变化,为了方便求解通光方向上的折射率,建立坐标系 $[y_1, y_2, y_3]$,利用坐标变化矩阵 A 对其进行主轴化,如式(11)所示。

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: a_{ij} 表示变换前后坐标系各基矢之间的方向余弦。变换前后光率体截面图如图 1 所示。

在坐标系 $[y_1, y_2, y_3]$ 下,BGO 晶体的光率体方程如式(12)所示。

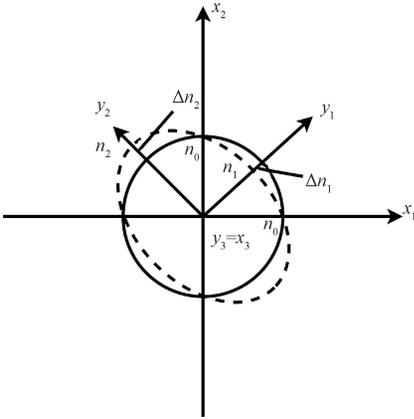


图1 坐标系变化前后 BGO 晶体光率体截面

Fig. 1 Cross-sectional diagrams of the optical indicatrix of BGO crystal before and after coordinate system transformation

$$\left[\beta_0 + \frac{(\pi_{11} + \pi_{12})(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} + b_{11}\Delta T + \frac{\sqrt{(\pi_{11} - \pi_{12})^2(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 4\pi_{44}^2\sigma_6^2}}{2} \right] y_1^2 +$$

$$\left[\beta_0 + \frac{(\pi_{11} + \pi_{12})(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} + b_{11}\Delta T - \frac{\sqrt{(\pi_{11} - \pi_{12})^2(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 4\pi_{44}^2\sigma_6^2}}{2} \right] y_2^2 +$$

$$[\beta_0 + (\sigma_1 + \sigma_2)\pi_{12} + b_{11}\Delta T] y_3^2 = 1 \quad (12)$$

故晶体在主轴方向上的折射率为:

$$\left\{ \begin{aligned} n_1 &= n_0 - \frac{1}{2}n_0^3\Delta\beta_1 = n_0 - \frac{1}{2}n_0^3 \times \\ &\left[\frac{(\pi_{11} + \pi_{12})(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} + b_{11}\Delta T + \frac{\sqrt{(\pi_{11} - \pi_{12})^2(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 4\pi_{44}^2\sigma_6^2}}{2} \right] \\ n_2 &= n_0 - \frac{1}{2}n_0^3\Delta\beta_2 = n_0 - \frac{1}{2}n_0^3 \times \\ &\left[\frac{(\pi_{11} + \pi_{12})(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} + b_{11}\Delta T - \frac{\sqrt{(\pi_{11} - \pi_{12})^2(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 4\pi_{44}^2\sigma_6^2}}{2} \right] \\ n_3 &= n_0 - \frac{1}{2}n_0^3\Delta\beta_3 = n_0 - \frac{1}{2}n_0^3 [(\sigma_1 + \sigma_2)\pi_{12} + b_{11}\Delta T] \end{aligned} \right. \quad (13)$$

由式(13)可以得到温度场、应力场共同作用下 BGO 晶体产生的线性双折射 δ 满足式(14),即:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_2 - n_1)d = \frac{\pi d}{\lambda}n_0^3 \times \sqrt{(\pi_{11} - \pi_{12})^2(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 4\pi_{44}^2\sigma_6^2} \quad (14)$$

式中: λ 为光源波长; d 为通光距离。

由式(14)可知, δ 与 BGO 晶体所受正应力差值 $\sigma_1 - \sigma_2$ 和切应力 σ_6 有关。因外界温度变化以及温度梯度改变了 BGO 晶体内部热应力分布,应力变化在晶体内引入了附加电光相位延迟(即线性双折射)。

目前,OVS 多依赖偏光干涉解调模式将相位延迟转化为光强变化实现间接测量,这一模式下线性双折射与电光相位延迟以非线性关系耦合于光强信号中难以分离。为了解决这一问题,提出基于 OVS 的线性解调模式实现线性双折射的动态解耦与测量,以解决线性双折射分离与补偿问题。

2 偏光干涉解调模式的线性双折射问题

基于偏光干涉解调模式 OVS 的检测原理如图 2 所示,光路结构主要由光源、起偏器、电光晶体、 $\lambda/4$ 波片、检偏器、光电探测器以及信号处理模块组成。

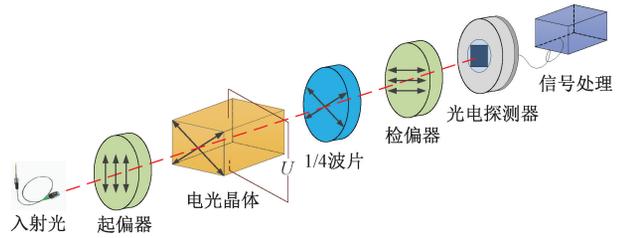


图2 基于偏光干涉解调模式 OVS 的检测原理

Fig. 2 Detection principle of OVS based on polarization interference demodulation mode

光源发出的光经起偏器形成线偏振光,再通过经交流电场调制后的电光晶体,产生电光相位延迟 φ ,其包含了待测电压 U 的信息,满足式(15),即:

$$\varphi = \frac{\pi}{U_\pi} U \quad (15)$$

式中: U_π 为电光晶体的半波电压。

由于现有技术无法直接测量 φ ,因此经过 $\lambda/4$ 波片和检偏器后,将 φ 转化为光强的变化,通过检测光强以实现电压测量。出射光强 I_o 与 φ 之间存在非线性关系^[24-25],如式(16)所示。

$$I_o = \frac{I_i}{2}(1 + \sin \varphi) \quad (16)$$

式中: I_i 表示入射光强。实际应用中,为了实现近似线性测量,通常将 φ 控制在 $<1^\circ$,即取 $\sin \varphi \approx \varphi$,式(16)变为:

$$I_o = \frac{I_i}{2}(1 + \varphi) \quad (17)$$

若考虑 δ ,其与 φ 叠加后经过 $\lambda/4$ 波片转化为线偏振光偏振面的旋转,因此式(16)改写为:

$$I_o = \frac{I_i}{2} [1 + \sin(\varphi + \delta)] \quad (18)$$

为了实现近似线性解调,即满足式(17),偏光干涉解调模式要求相位延迟 $\varphi + \delta < 1^\circ$,而现有的定量研究表明仅仅 δ 就超出了这个范围^[21],导致 OVS 的输出信号严重失真,严重损害了测量准确度。其次,虽然输出光强信号包含了线性双折射的信息,但是根据式(18)可知 δ 是以非线性的关系耦合于光强变化中,光强无法准确反映线性双折射的大小,因此 δ 在偏光干涉解调模式中不可解耦、无法测量。

3 线性解调模式下线性双折射的动态解耦与补偿方法

3.1 基于条形径向偏振光栅的线性 OVS

解决 OVS 电光晶体线性双折射的前提,是实现相位延迟的线性测量,以保持 OVS 的输出信号与相位延迟之间的线性关系,即有望实现 φ 与 δ 的动态解耦。

文献[26-28]提出了若干种线性测量的 OVS,其中径向检偏式 OVS 具有代表性^[26],是基于条形径向偏振光栅(strip aluminum polarization grating, SAPG)将电光相位延迟转换为光斑图像的线性平移,通过定位光斑即可实现电光相位延迟的直接测量。这一方案与光功率大小和光斑形状无关,只与光轴位置的(即电光相位延迟)变化有关。因此,其理论上可以实现任意角度的电光相位延迟测量,从而解决了线性双折射噪声淹没有效信号的问题,这是实现线性双折射动态解耦的前提。其次,径向检偏式 OVS 实现了相位延迟的线性解调,因此输出结果可以准确刻画线性双折射的影响。

径向检偏式 OVS 的光路如图 3(a)所示。与图 1 的传统 OVS 相比,其用 SAPG 替换了检偏器,SAPG 的结构如图 3(b)所示。SAPG 共有 12 001 个栅条单元水平排列,宽度均为 $1 \mu\text{m}$,位于中心的栅条单元透光方向垂直于水平线,定义为 0° ,两侧的栅条分别按顺时针和逆时针方向以 $30''$ 的角度顺次设置直至 $\pm 50^\circ$ 。每个栅条单元均可视为一个检偏器,因此 SAPG 提供了 $\pm 50^\circ$ 的检偏范围。带有任意相位延迟的线偏振光通过 SAPG 时,栅条方向与之垂直的光波分量(transverse magnetic, TM)可以全部通过,与之平行的光波分量(transverse electric, TE)被反射或吸收,无光通过,最终解调得到的光斑图像为条形光斑。因此,通过定位光斑暗纹(亮纹)的位置变化,即可得知线偏振光的相位延迟,从而计算待测电压。

基于径向检偏式 OVS 的测量原理,当线偏振光透过 SAPG 后,得到出射光强表达式如式(19)所示^[26]。

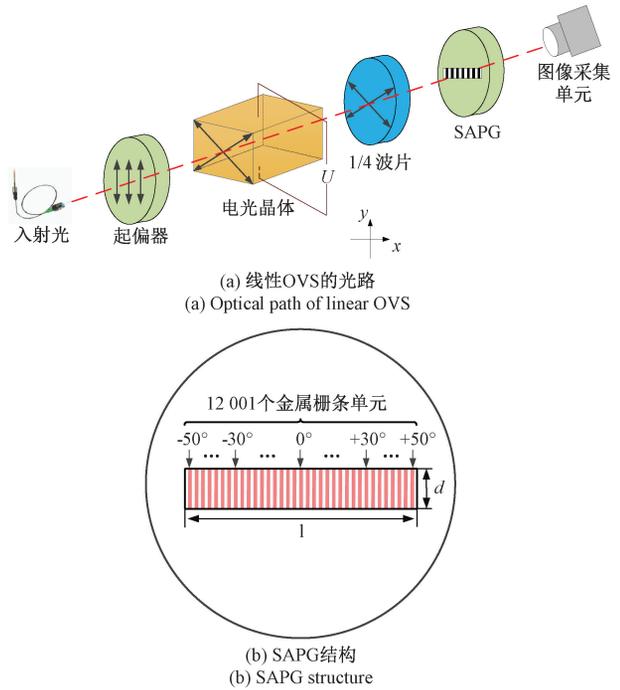


图 3 基于 SAPG 实现的线性 OVS

Fig. 3 Linear OVS implemented based on SAPG

$$I_{\text{out}} = t_{\text{TM}} \exp(2j\xi) \sin^2\left(\theta - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (19)$$

式中: t_{TM} 是 TM 波的衍射效率(即透过率); ξ 为是 TM 波与 TE 波之间的相位差; θ 为金属栅条的方向(在 $-50^\circ \sim 50^\circ$ 范围规律变化)。

当满足 $\theta = \varphi/2$, 从相应栅条单元透射出的光强为最小值,其所在位置为暗条纹的中心。当 φ 发生变化时,暗纹位置沿栅条单元线性平移。SAPG 的栅条方向为 $\theta = -50^\circ \sim 50^\circ$, 则 φ 的变化范围是 $-100^\circ \sim 100^\circ$; 暗纹平移的范围为光栅的长度,即 $0 \sim l$, 假设当 $\varphi = 0^\circ$ 时,暗纹中心位置在 0° 栅条单元上,则光斑位移量 Δx 与 φ 的关系满足式(20),即:

$$\varphi = 200^\circ \times \frac{\Delta x}{l} = \frac{10\pi}{9} \times \frac{\Delta x}{l} \quad (20)$$

根据式(15)、(20),则可得到 U 与 Δx 的关系如式(21)所示。

$$U = \frac{10}{9} \times \frac{U_\pi}{l} \times \Delta x \quad (21)$$

图 4 展示了带有不同 φ 的线偏振光通过 SAPG 解调后,得到的出射光斑图像,线偏振光在其偏振面垂直的栅条上直接通过,对应条形光斑亮条纹的中心位置,在其偏振面平行的栅条上无光透过,对应的条形光斑暗纹的中心位置。因此,当 φ 变化时,经 SAPG 解调得到的结果为固定条形光斑的线性平移。通过测量光斑平移量 Δx ,即可实现 φ 的直接测量。

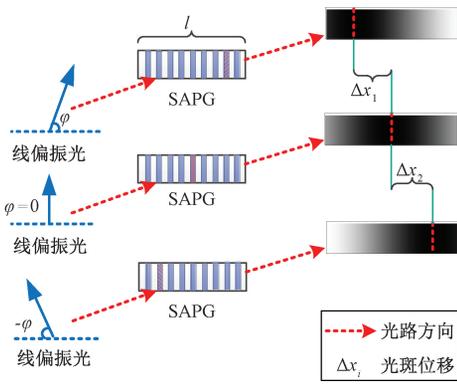


图4 电光相位延迟与条形光斑位移的关系

Fig. 4 Relationship between electro-optic phase delay and strip spot displacement

3.2 δ的动态解耦与补偿

既然径向检偏式 OVS 实现了相位延迟的线性测量,那么其就可以准确的测量线性双折射。结合式(20)可知,若考虑 δ, OVS 的相位延迟(即 φ+δ)与 Δx 之间满足式(22),即:

$$\varphi + \delta = \frac{10\pi}{9} \times \frac{\Delta x}{l} \quad (22)$$

可见 Δx 包含了 δ 的信息,如何将 δ 从中提取出来是关键。根据式(14)、(15)可知,φ 与待测交流电压(电场)直接相关,呈正弦变化,δ 因环境温度与应力变化等因素引入。简而言之,φ 具有规则性,δ 随机变化,基于两者产生的机理特性可以将二者分离。在待测交流电压过零时满足零电场(U=0)条件,此时电光晶体不产生电光效应,即 φ_{U=0}=0,则此时 OVS 的输出信号只与 δ 有关,可表示为:

$$\begin{cases} \delta(t) = \frac{10\pi}{9l} \Delta x(t) \\ \text{s.t. } \varphi(t) = 0; t = k\pi; k \in Z \end{cases} \quad (23)$$

综上,基于径向检偏式 OVS 实现了 δ 的动态解耦,测得交流电压过零点时线性 OVS 输出光斑的位移量 Δx,即可得到 δ。

δ 的变化速率主要取决于环境温度,远低于 φ 的变化速率(变化频率 f=50 Hz),因此可以认为一个乃至数个周期内 δ(t) 是相同的。为此,所提出的 δ(t) 补偿策略是每隔 1 s 采集下一个周期交流电压过零点 t_{i,0},并采集此时 Δx,根据式(23)算得 δ(t_{i,0}) 并进行补偿,则这 1 s 任意时刻经补偿后得到的 φ(t) 如式(24)所示。

$$\varphi(t) = \frac{10\pi}{9} \times \frac{\Delta x(t)}{l} - \delta(t_{i,0}) \quad (24)$$

3.3 过零检测电路

准确检测交流电压过零点是实现 δ 补偿的前提。本文利用标准电压互感器二次模拟输出作为基准电压进行过零点采集。检测电路如图 5 所示,包括电压衰减电路、

运放及电压合成电路以及过零检测电路。电压衰减电路将基准电压降为毫伏级弱信号,再经过集成运放电路放大合成后,利用三极管的开关特性在电压过零点输出一个高电平触发脉冲,输送至相机采集卡触发相机进行过零采集。另外在过零检测电路中集成了一个定时器,确保每次过零检测的间隔时间为 1 s。由于过零检测电路的输入电压由标准电压互感器产生,具有良好的正弦波特性,输出波形平滑且失真度极低,因此过零点的检测准确度高。

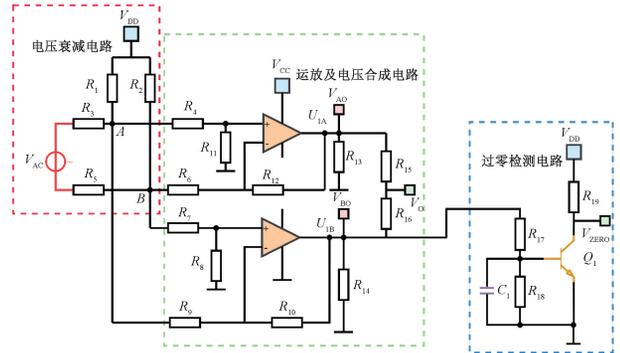


图5 过零检测电路

Fig. 5 Zero-crossing detection circuit

3.4 光斑定位

线性 OVS 通过定位光斑暗纹中心位置、以计算光斑位移量,从而实现相位延迟测量。首先将光斑图像转化为灰度分布图,再通过定位灰度最小值点的坐标确定 Δx。本文图像采集系统由型号为 LA-CM-16K05A 的互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)与型号为 OR-Y4C0-XXM00 的采集卡组成,采集卡频率 48 kHz,其采样带宽可完整覆盖工频电压基波。CMOS 的相机分辨率为 16 384 pixels,可以完全采集 SAPG 上 12 001 个暗亮条纹的偏振信息。为了抑制 CMOS 成像过程中引入噪声导致图像灰度值的随机波动,本文通过傅里叶变换和 Butterworth 低通滤波器对灰度图像进行滤波,获得基频振幅波形,并对其进行拟合后进行光斑暗纹中心定位,其中当 φ=0° 时得到的灰度分布如图 6 所示。

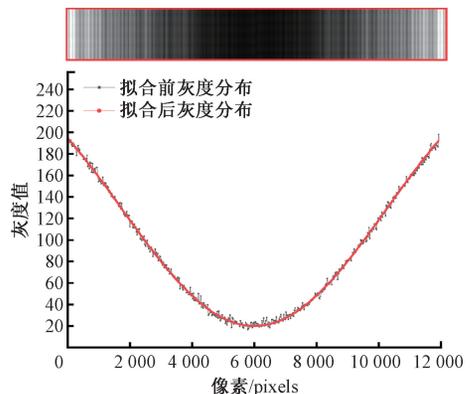


图6 光斑灰度分布(φ=0°)

Fig. 6 Grayscale distribution at φ=0°

根据 SAPG 栅条单元方向可知, $\varphi = 0^\circ$ 时暗纹中心位置在 0° 栅条单元位置, 图 7 列出了当 $\varphi = -80^\circ, -40^\circ, 0^\circ, 80^\circ$ 时由图像采集系统处理得到的出射光斑图像与对应的灰度分布图, 通过上位机处理后即可提取当前 φ 与 U 的信息。

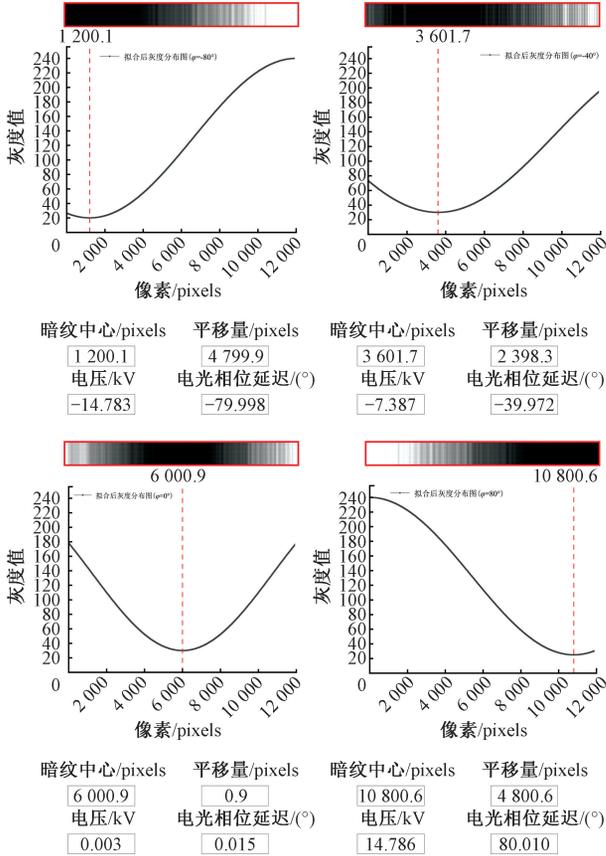


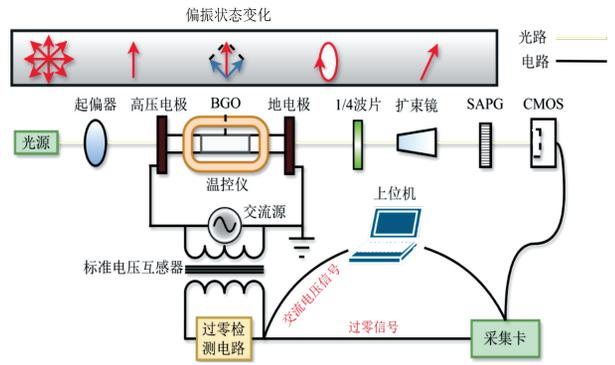
图 7 不同 φ 下的光斑图像灰度分布

Fig. 7 Grayscale distribution of spot images at different φ

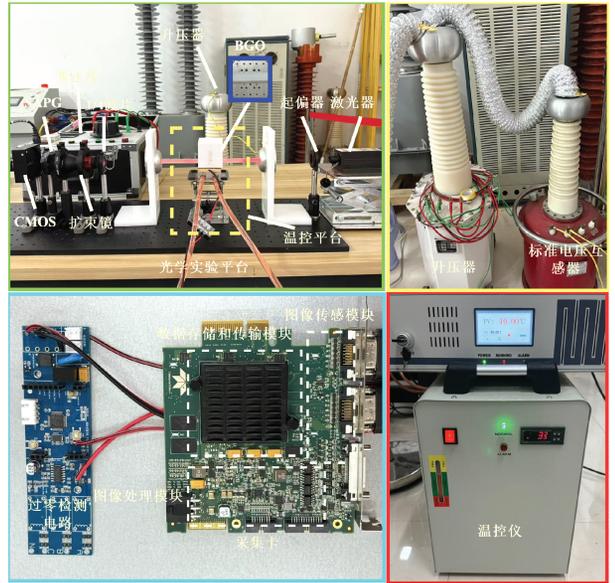
4 实验验证及分析

4.1 实验平台

线性 OVS 线性双折射补偿方法的实验验证系统如图 8 所示。其中光源波长为 632.8 nm, 扩束后的光斑直径约 15 mm, BGO 晶体为圆柱形, 几何尺寸为 $\Phi 9.8 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 半波电压为 33.26 kV。SAPG 采用电子束直写方法制成, 加工精度为 $\pm 5 \text{ nm}$, 长度为 12 mm、宽度 1.5 mm, 最大可测量的电光相位延迟角度为 $\pm 100^\circ$ 。调压器的容量为 7.5 kVA; 升压器的容量为 5 kVA、电压可调范围 1~100 kV; 标准电压互感器额定电压为 10 kV/100 V、0.05 准确级; 温控仪型号为 TLTP-TEC 2410, 可调节温度范围为 $-40^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ 。上位机软件基于 LabVIEW 平台开发, 用于数据处理及可视化。



(a) 实验系统原理
(a) Schematic diagram of the experimental system



(b) 实验现场
(b) Experimental site

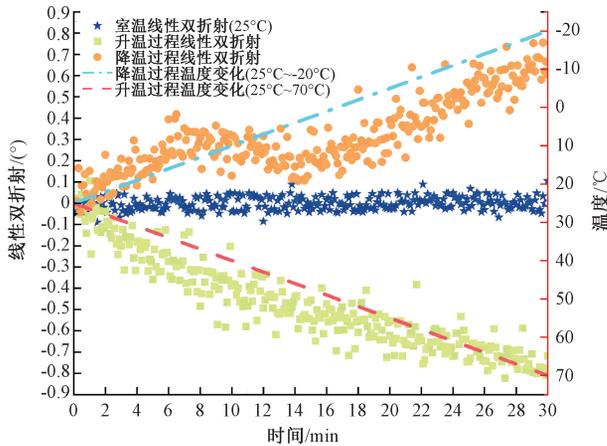
图 8 实验验证系统

Fig. 8 Experimental verification system

4.2 电光晶体线性双折射温度特性实验

基于 3.2 节提出的 δ 解耦与补偿方法, 需要在交流电压过零时刻采集光斑图像, 并计算光斑位移量, 结合式 (23) 即可还原得到 δ 。实验过程中, 调压器驱动升压器给 OVS 施加 10 kV 工频电压, 调节温控仪使晶体的工作温度由 25°C 分别向 -20°C 和 70°C 变化, 变化速率 $1.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 。实时记录过零时刻的 δ , 如图 9 所示, 此外还采集了室温环境下的 δ 以作对比。

根据图 9 分析 BGO 晶体 δ 的温度特性: 1) 当温度由 25°C 降至 -20°C 时, δ 随温度变化逐渐增加至 0.805° , 且值得注意的是, δ 在 $10^\circ\text{C} \sim -5^\circ\text{C}$ 范围内受应力弛豫影响^[29], 因此变化趋势变缓; 当温度由 25°C 升至 70°C 时, δ 的绝对值也增加到 0.742° 。结合式 (8)、(14) 可知, 温度变化先引起 BGO 晶体的热应力增大, 进而导致 δ 增大。因此, δ 的整体变化趋势与温度呈正相关, 实验结果与理

图9 BGO 晶体 δ 的温度特性Fig. 9 Temperature characteristics of BGO crystal's δ

论模型推导一致。2) 常温下 δ 的波动较为稳定, 其主要源于图像采集系统与暗纹定位噪声。但是在升温 and 降温过程中 δ 均表征出无规律的波动性, 且波动范围明显变大。这是因为在升降温过程中, 由热扩散主导 BGO 晶体内部形成温度梯度, 使得应力分布不均匀, 即正向应力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)^2$ 增加。由于温度梯度是个动态变化过程, 与环境温度变化速率、材料导热系数等有关, 因此引入的正向应力差也呈现无规律的动态变化, 从而使得 δ 的波动具有随机性。

综上, δ 的波动一方面与温度变化呈正相关, 另外受晶体温度梯度、应力非均匀分布影响, 呈现出随机波动的特征, 这也正是线性双折射问题难以解决的原因。且囿于晶体不同方向上的热应力无法测量, 因此其成为 OVS 实用化的瓶颈问题之一。基于本文提出的 δ 动态解耦方法, 可以实现 δ 的准确测量, 并为其补偿提供技术支撑。

4.3 准确度试验

准确度是评估 OVS 测量性能的重要指标之一。将升压器的一路输出连接至标准电压互感器, 标准电压互感器的输出连接过零检测电路的输入端口, 以确定过零点时触发 CMOS 进行图像采集用于 δ 的补偿, 同时将标准源的模拟电压信号传入上位机; 升压器的另一路输出连接 OVS, 通过图像采集系统实时捕获光斑图像传入上位机, 上位机提取光斑图像中的待测电压信息, 并将其转化为数字电压信号与标准源进行对比, 进而获取 OVS 的比差和角差数据。LabVIEW 处理界面如图 10 所示。

接下来验证在线性双折射补偿前后线性 OVS 的温度稳定性。测试电压为 10 kV 工频信号, 测试温度范围为 $-20^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$, 速率为 $1.5^\circ\text{C}/\text{min}$, 通过上位机记录补偿前后 OVS 的测量结果如表 1 所示。

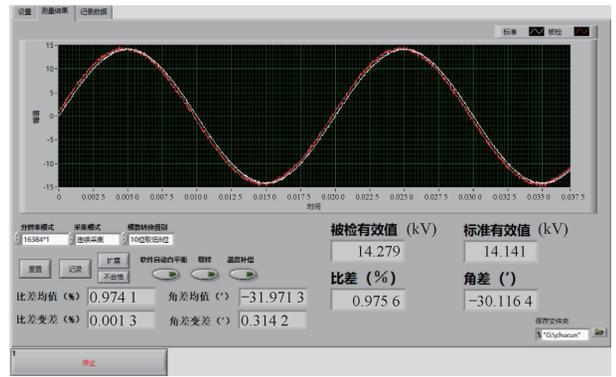


图 10 上位机处理界面

Fig. 10 Processing interface of the host computer

表 1 补偿前后线性 OVS 测量准确度实验数据

Table 1 Measurement accuracy of linear OVS before and after compensation

温度/ $^\circ\text{C}$	比差/%		角差/ $^\circ$	
	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
-20	-0.978 5	0.120 1	-30.632 1	-12.731 4
-10	-0.635 1	0.253 8	20.384 2	6.631 7
0	-0.216 1	0.111 2	-25.162 7	-13.121 4
10	-0.332 6	0.131 2	17.341 2	7.112 1
20	0.166 7	0.113 1	9.661 7	7.131 7
30	0.181 7	0.112 1	13.131 6	8.597 8
40	0.331 2	0.223 4	-21.693 1	-3.618 9
50	0.493 2	0.191 2	-29.314 2	-12.197 8
60	0.785 1	0.148 3	-32.693 1	-7.618 9
70	1.014 1	0.257 9	35.971 3	14.254 7

受到 BGO 晶体 δ 的影响, OVS 的比差最大达到 1.014 1%, 角差达到 35.971 3'。经补偿后 OVS 的测量准确性显著提升, 比差 $< 0.257 9\%$, 角差 $< 14.254 7'$, 验证了所提方法的有效性。

4.4 光功率无关性和振动测试实验

1) 光源波动测试

OVS 通常采用超辐射发光二极管 (super luminescent diode, SLD) 作为光源, 但长期运行后其会出现 20% ~ 30% 的光功率衰减, 更严重的甚至超过 50%^[30]。因此, 有必要研究光功率波动对所提方法的影响。

根据式 (21) 可知, 线性 OVS 通过检测出射光斑的位移量实现电压测量, 与光强大小无关, 因此理论上不受光源光功率波动的影响, 这一特性在先前的研究^[26]中得以验证。在此基础上, 测试了光功率波动对所提线性双折射补偿方法的影响, 如图 11 所示, 实验中在激光器后方

设置一块衰减片,通过旋转衰减片即可实现光源输出功率的调节。

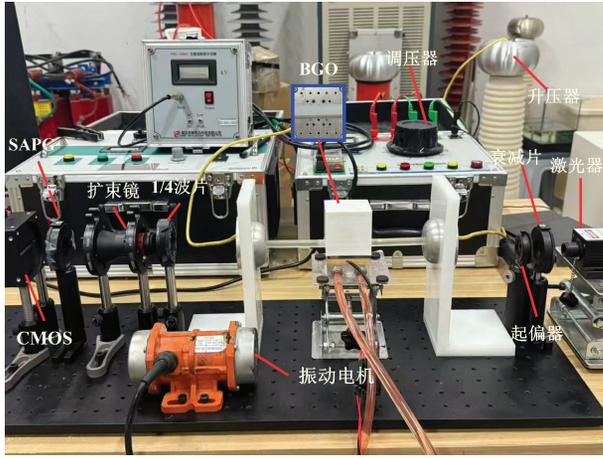


图 11 光功率波动与振动测试的实验平台

Fig. 11 Experimental platform for light power fluctuation and vibration testing

首先通过温控系统使得 BGO 的工作温度保持在 50℃,在 10 kV 工频电压作用下,测试 100%、75% 和 50% 输出光功率下线性 OVS 的比差数据,如图 12 所示,每组测试时间为 30 min。为了方便计算比差均值,本节采用式(25)计算比差的绝对值 f_u ,即:

$$f_u = \left| \frac{U_c - U_r}{U_r} \right| \times 100\% \quad (25)$$

式中: U_c 为线性 OVS 的输出电压; U_r 为标准电压互感器的输出电压。

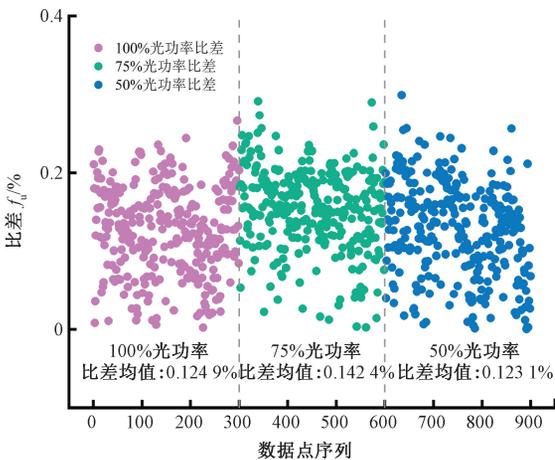


图 12 不同光功率下 OVS 的比差

Fig. 12 Ratio error of OVS under different optical power levels

在不同光功率下 OVS 的比差均值分别为 0.124 9%、0.142 4% 和 0.123 1%,且比差波动程度保持一致,表明了光功率波动对所提出的补偿方法无影响。

2) 振动测试

为了测试所提方法在机械振动环境下的稳定性,在测试平台上安装型号为 HY-0.4 的振动电机,如图 11 所示。振动电机的输出振动频率 50 Hz、振幅为 1.5 mm、峰值振动加速度 15 g,测试时长为 30 min,满足 IEC 60068-2-6 互感器标准的振动测试要求。

BGO 的工作温度为 50℃、施加 10 kV 工频测试电压,图 13 记录了振动前后线性 OVS 的比差数据,可见振动后线性 OVS 的比差波动更为显著,且比差均值明显增加,由 0.116 7% 变化为 0.224 3%,表明振动会影响所提方法的补偿效果。

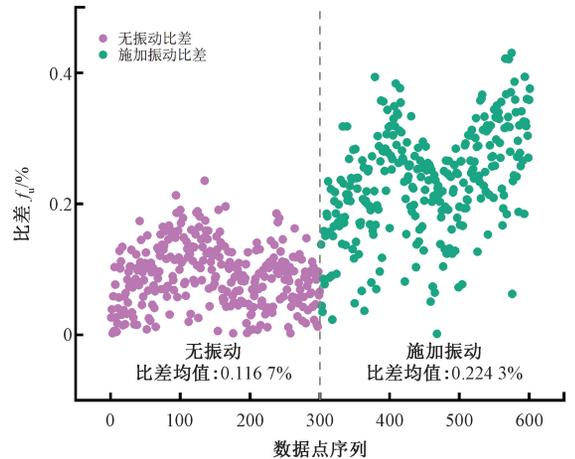


图 13 振动测试前后 OVS 的比差

Fig. 13 Ratio error of OVS before and after vibration test

4.5 线性双折射补偿方法稳定性验证

为了验证所提补偿方法的稳定性,本文进行了 24 h 的连续测试^[31]。测试电压为 10 kV 工频信号,BGO 晶体的测试温度为-20℃~70℃变化,速率为 1℃/min。实时记录补偿前后的比差数据,得到稳定性测试数据如图 14 所示。

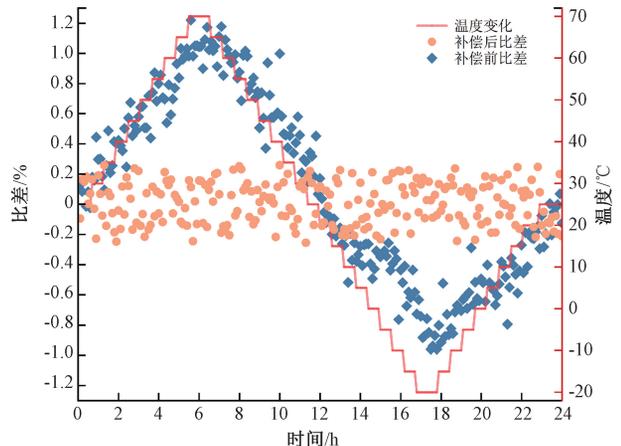


图 14 OVS 补偿方法稳定性

Fig. 14 Stability of OVS compensation method

实验结果表明, OVS 系统误差随环境温度变化, 补偿后的测量误差 $< \pm 0.26\%$, 验证了所提补偿方法的稳定性。

4.6 误差分析

分析经所提算法补偿后的误差来源:

1) 过零点触发存在微小延时, 为了定量分析, 定义 ε 为过零点延时引起的电压测量误差, 基于式 (21)、(23) 可得:

$$\varepsilon = \frac{U_m \sin(2\pi ft)}{U_1} \times 100\% \quad (26)$$

式中: U_m 为输入电压最大值; U_1 为标定电压值; t 为过零点采集延迟时间。

完成一次采集的时间约延迟 $5.3 \mu\text{s}$, 由式 (26) 可知会产生 0.003% 的电压测量误差。

2) CMOS 的分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$, 换算成相位延迟的测量误差为 $\pm 0.15'$, 导致测量电压的不确定性为 $\pm 1 \text{ V}$ 。

3) 机械振动使得线性 OVS 光学元件的相对位置发生微位移, 相机定位光斑图像的最低点发生变化, 从而引入了测量误差, 即为光路对准误差。此外, 机械振动导致相机发生抖动, 也引入了定位误差。

5 讨论

本章从 OVS 系统结构复杂程度与成本两方面对现有线性双折射补偿方法展开分析与总结。

5.1 系统结构复杂程度

现有代表性的 OVS 线性双折射补偿方法有双晶体法^[13]、双光路法^[16]以及自愈式补偿法^[17], 表 2 对上述方法以及本文所提出的方法做了综合对比, 包括光路元件数量、光路结构解析, 该光路结构解析基于经典 OVS 的光路结构^[32]对比。根据元件数量对比可知, 本文所提出的补偿方法中光路元件数量最少, 因此系统结构复杂程度优于现有方法。

表 2 不同线性双折射补偿方法的对比

Table 2 Comparison of different linear birefringence compensation methods

补偿方法	光路元件数量	光路结构解析
双晶体法	7	多装配了 BGO 晶体 (1 块)、1/2 波片 (1 片)
双光路法	7	多装配了偏振分光镜 (1 块)、光电探测器 (1 个)
自愈式补偿法	9	多装配了起偏器 (1 个)、检偏器 (1 个)、BGO 晶体 (1 块)、1/4 波片 (1 块)
动态解耦与补偿法	6	多装配了 SAPG (1 块), 用 CMOS 相机替代了光电探测器

另外值得注意的是, 光路元件数量越多, OVS 系统的长期稳定性更差, 潜在成本也越高。

5.2 成本

光栅制备可分为光栅母版制作与图案转移两个步骤: 光栅母版通过电子束直写方法制备, 随后借助纳米压印与等离子体蚀刻技术, 将母版图案转移至玻璃基板。当前 SAPG 的母版加工成本约为 $30\,000$ 元。若考虑大规模生产, 基于现有技术单个母版可制备超过 50 个第 2 代复制品, 光栅的成本可降至 600 元以下。另外, 综合考虑光路复杂度及 OVS 运行稳定性, 本研究提出的方法在潜在成本方面具有显著优势。

6 结论

提出了一种面向温漂影响的电压传感器线性双折射动态解耦与补偿方法。构建了可表征 BGO 晶体线性双折射的数学模型, 依托 OVS 的线性解调模式实现电光相位延迟与线性双折射的解耦, 并利用过零检测电路实现补偿。最后, 搭建了实验验证平台, 基于线性双折射动态解耦方法研究了 BGO 晶体线性双折射的温度特性。实验结果表明: 1) 在 $-20^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 测试温度范围, 经线性双折射补偿后的 OVS 比差 $< 0.257\%$, 角差 $< 14.254'$; 2) 在 100% 、 75% 和 50% 输出光功率下, 补偿后的 OVS 比差均值几乎保持恒定, 表明所提方法的光功率无关性; 3) 振动环境下, 补偿后的 OVS 比差均值由 0.1167% 增至 0.2243% , 主要是光路对准偏移与相机抖动引入的误差; 4) 24 h 稳定性实验结果显示, 补偿后 OVS 的比差 $< \pm 0.26\%$, 验证了所提方法的有效性。

参考文献

- [1] 杨鸣, 朱豪帅, 邹滨阳, 等. 基于电压互感器的宽频电压测量方法研究综述 [J]. 电工技术学报, 2025, 40(7): 2247-2266.
YANG M, ZHU H SH, ZOU B Y, et al. Review of research on wideband voltage measurement methods based on voltage transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(7): 2247-2266.
- [2] 陈小涛, 张文斌, 索春光, 等. 基于双路参考激励信号参数辨识的非接触电压测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(3): 20-29.
CHEN X T, ZHANG W B, SUO CH G, et al. Non-contact voltage measurement method based on parameter identification of dual reference excitation signals [J].

- Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(3): 20-29.
- [3] 黄汝金, 索春光, 张文斌, 等. 基于阻抗变换的非接触电压测量自校准方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 137-145.
- HUANG R J, SUO CH G, ZHANG W B, et al. A self-calibration method of non-contact voltage measurement based on impedance transformation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 137-145.
- [4] 邸志刚, 陈佳旗, 贾春荣, 等. 基于马赫-曾德干涉仪的光纤电流互感器设计[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4): 228-237.
- DI ZH G, CHEN J Q, JIA CH R, et al. Design on fiber optical current transformer based on Mach-Zehnder interferometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 228-237.
- [5] TAO F, ZHANG H, LIU ANG, et al. Digital twin in industry: State-of-the-art [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2405-2415.
- [6] 王佳荣, 贺博. 一种新型电光晶体半波电压测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(10): 13-21.
- WANG J R, HE B. Novel half-wave voltage measurement method for electro-optical crystal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10): 13-21.
- [7] 周扬, 王黎明, 王腾, 等. 光学电压传感器互易性光路研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7): 81-88.
- ZHOU Y, WANG L M, WANG T, et al. Research on reciprocity optical path of optical voltage transformer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 81-88.
- [8] 杨庆, 孙尚鹏, 司马文霞, 等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 349-367.
- YANG Q, SUN SH P, SIMA W X, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 349-367.
- [9] 陈胜硕. 光学电压传感器暂态温度特性与温度补偿研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
- CHEN SH SH. Transient temperature characterization and temperature compensation of optical voltage sensors[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024.
- [10] 延云涛. 光纤电压互感器温度特性的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- YAN Y T. The Research on temperature characteristics of fiber optic voltage transformers [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [11] ZHAO J, XU SH G, WU B F, et al. Research on the performance of a fiber optical current transformer for high voltage filtering capacitor unbalanced current measurement[J]. Journal of Optical Technology, 2022, 89(6): 353-358.
- [12] 高春嘉, 齐波, 高原, 等. 大尺寸油纸绝缘结构空间电场非接触式测量的光学传感器[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4949-4957, 4997.
- GAO CH J, QI B, GAO Y, et al. Non-contact electro-optic sensor for space electric field in large-scale oil-pressboard insulation structure [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4949-4957, 4997.
- [13] 韩春阳, 徐浩东, 石磊, 等. 具有温度自补偿功能的宽频带光纤电场传感器[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 3082-3089.
- HAN CH Y, XU H D, SHI L, et al. Broadband optical fiber electric field sensor with temperature self-compensation [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3082-3089.
- [14] 司马文霞, 韩睿, 杨庆, 等. 双晶体温度补偿型非接触式光学过电压传感器[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3465-3473.
- SIMA W X, HAN R, YANG Q, et al. Contactless optical overvoltage sensor based on dual-crystal compensation [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3465-3473.
- [15] 许灿华, 徐启峰, 谢楠. 用晶体斜劈方法测量石英波片相位延迟的温度特性[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 127-131.
- XU C H, XU Q F, XIE N. Using crystal wedge to measure temperature dependence of quartz wave plates' phase retardation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 127-131.
- [16] 黄荔生, 马善军, 许灿华, 等. 光学电压互感器偏光干涉测量模式(一)常见偏光干涉测量模式局限性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 97-101, 114.
- HUANG L SH, MA SH J, XU C H, et al. Polarization interference measuring mode of optical voltage transducer

- part one limitation analysis of polarization interference measuring model [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(2): 97-101, 114.
- [17] 赵一男, 张国庆, 王贵忠, 等. 220 kV 自愈式光学电压互感器研制[J]. *高电压技术*, 2013, 39(5): 1135-1141.
- ZHAO Y N, ZHANG G Q, WANG G ZH, et al. Development of a 220 kV self-healing optical voltage transformer[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(5): 1135-1141.
- [18] LI ZH H, ZHAO SH. High accuracy optical voltage transformer with digital output based on coaxial capacitor voltage divider[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2018, 40(13): 3824-3833.
- [19] 肖智宏, 于文斌, 张国庆, 等. 一种提高光学电压传感器温度稳定性的方法[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(4): 106-112.
- XIAO ZH H, YU W B, ZHANG G Q, et al. A method to improve temperature stability of optical voltage sensor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(4): 106-112.
- [20] XIAO X, XU Y, DONG Z X. Thermodynamic modeling and analysis of an optical electric-field sensor [J]. *Sensors*, 2015, 15(4): 7125-7135.
- [21] XU Q F, DONG CH L, HUANG Y F, Modeling and minimization for thermal stress birefringence of an optical voltage transducer[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(3): 528-535.
- [22] 陈胜硕, 胡杰祥, 李志, 等. 光学电压传感器温度响应特性分析与实验研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(3): 169-178.
- CHEN SH SH, HU J X, LI ZH, et al. Analysis and experimental study on temperature response characteristics of optical voltage sensor [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(3): 169-178.
- [23] 陈胜硕, 李岩松, 陈东旭, 等. 基于温度场与 D-Kalman 参数估计的光学电压传感温度补偿方法[J]. *光子学报*, 2024, 53(2): 113-132.
- CHEN SH SH, LI Y S, CHEN D X, et al. Temperature compensation method for optical voltage sensing based on temperature field and D-Kalman parameter estimation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2024, 53(2): 113-132.
- [24] 张宾. Pockels 效应电光传感机理建模与实验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- ZHANG B. Modeling and experimental research on the electro-optic sensing mechanism of Pockels effect [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [25] YAN Y T, WU CH Q, LIU L L, et al. Temperature characteristics of a BGO fiber-optic voltage transformer[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(28): 7781-7788.
- [26] 徐启峰, 黄奕钊, 谢楠, 等. 基于条形铝金属偏振光栅实现的线性光学电压互感器[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(7): 2556-2565.
- XU Q F, HUANG Y F, XIE N, et al. Linear optical voltage transformer based on strip aluminum polarization grating[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(7): 2556-2565.
- [27] 谢楠, 徐启峰, 谭巧. 采用牛顿环光栅的光学电压互感器相位延迟检测方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(8): 185-191.
- XIE N, XU Q F, TAN Q. Phase delay detection method for optical voltage transformer based on newton ring grating [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(8): 185-191.
- [28] 谭巧, 徐启峰, 谢楠. 实现线性测量的光学电压传感器设计[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(3): 135-140.
- TAN Q, XU Q F, XIE N. Optical voltage sensor design for linear measurement[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(3): 135-140.
- [29] 王帅. KDP 晶体的结构应力和应力弛豫的研究[D]. 济南: 山东大学, 2024.
- WANG SH. Study on structural stress and stress relaxation of KDP crystals[D]. Jinan: Shandong University, 2024.
- [30] 耿祥瑞, 刘舒杨, 柴斌, 等. 光纤电流互感器超辐射发光二极管光源衰减故障分析[J]. *电气技术*, 2024, 25(12): 21-27.
- GENG X R, LIU SH Y, CHAI B, et al. Analysis on super luminescent diode light source attenuation fault of fiber optical current transformer[J]. *Electrical Engineering*, 2024, 25(12): 21-27.
- [31] ZHAO J, XU SH G, WU B F, et al. Research on the performance of a fiber optical current transformer for high

voltage filtering capacitor unbalanced current measurement[J]. *Journal of Optical Technology*, 2022, 89(6): 353-358.

[32] 程云国. 光学电压互感器的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.

CHENG Y G. Study on the optical voltage transformer[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.

作者简介



谭巧, 2003 年于哈尔滨工程大学获得学士学位, 2005 年于哈尔滨工程大学获得硕士学位, 2017 年于福州大学获得博士学位, 现为闽江学院副教授, 主要研究方向为新型光学传感器。

E-mail: tqfeiji@163.com

Tan Qiao received her B. Sc. degree from Harbin Engineering University in 2003, her M. Sc. degree from Harbin Engineering University in 2005, and her Ph. D. degree from Fuzhou University in 2017. Now she is an associate professor at Minjiang University. Her main research interest includes novel optical sensors.



许诚, 2008 年于南京工程学院获得学士学位, 2012 年于山东理工大学获得硕士学位, 现为国网龙岩供电公司高级工程师, 主要研究方向为电力系统测量技术。

E-mail: 307276126@qq.com

Xu Cheng received his B. Sc. degree from Nanjing Institute of Technology in 2008, his M. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2012. Now he is a senior engineer in State Grid Longyan Power Supply Company. His main research interest includes power system measurement technology.



黄奕钊(通信作者), 2015 年于福州大学获得学士学位, 2020 年于福州大学获得博士学位, 现为福州大学副教授, 主要研究方向为电力测量新技术。

E-mail: Huangyifan@fzu.edu.cn

Huang Yifan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Fuzhou University in 2015, his Ph. D. degree from Fuzhou University in 2020. Now he is an associate professor at Fuzhou University. His main research interest includes new technologies for electrical measurement.