

110 kV 纵向光学电压互感器的结构优化与设计

祝俊男^{1,2}, 谭巧^{1*}

(1. 闽江学院 物理与电子信息工程学院, 福建 福州 350108;
2. 福建农林大学 机电工程学院, 福建 福州 350100)

摘要: 光学电压互感器 (Optical Voltage Transducer, OVT) 是重要的电力系统测量设备。在使用过程中, 因碰撞、连接不稳定或温度变化等问题, 会导致传感光路或内部锗酸铋 (BGO) 晶体发生微小偏移。当偏移为 0.5° 时, 所引起的最大积分电压误差可达 0.1% , 这对于 0.2% 的标准要求而言是不可接受的。为了减小偏移带来的误差, 并改善 BGO 晶体内部电场的均匀性, 文中针对 110 kV 纵向调制型 OVT 提出了一种方解石介质分层和氮化铝包裹法, 两端采用 $\Phi 10\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ 的方解石对 BGO 晶体进行分压, 并覆盖一层 0.5 mm 厚的氮化铝来避免与 SF_6 气体直接接触。该结构模型成功解决了其他方法无法解决的晶体或者光路偏移导致的积分电压误差问题。根据仿真结果可知, 其偏移误差降低至 0.008% 以下, 并且通过实验所得图像的标准差提高了 35% 以上, 光强的分布均匀性得到了提高。仿真和实验结果均表明, 这种优化改进方案显著提升了 OVT 的性能和稳定性, 为电力系统的精准测量提供了可靠保障。

关键词: 光学电压互感器; Pockels 效应; 内电场分布; 电场积分误差

中图分类号: TM451 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240208

0 引言

光学电压互感器 (Optical Voltage Transducer, OVT) 内部不包含传统的电压互感器中的铁芯和绝缘油, 因此不会出现铁磁谐振和电磁饱和, 不会发生易燃和爆炸的情况。此外, 光学电压互感器还具有体积小、质量轻、安装方便等优点, 适用于各种复杂环境和场合的电压测量需求^[1]。

然而, 在实际应用中, 由于震动、连接不稳定以及热胀冷缩等问题, 会造成 OVT 内部光学器件之间产生微小的位置偏差, 导致内电场的分布不均匀, 进而影响测量结果^[2]。对于这些问题, 文献 [3] 提出了一种多片晶体叠层的纵向调制光学电压互感器, 然而, 这种方式仅仅降低了内电场的不均与系数, 并没有改善当 OVT 中晶体发生微小的晶体偏移和光路偏移后对测量结果的准确性造成严重影响。此外, 文献 [4] 指出了一种石英介质分层方法, 可以改善电光晶体内部

部电场的分布, 但这种方法也未能解决 OVT 在不同偏移情况下的电场积分所产生较大误差的问题。

为此, 文中针对 110 kV 的纵向调制 OVT 结构进行了电场仿真, 对电场内部的不均匀系数和发生偏移时的积分电压进行分析, 提出了一种新的介质分层和包裹法。通过采用介电常数相对较高的方解石对锗酸铋 ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, BGO) 进行分压, 并使用氮化铝对其进行包裹, 极大地消除了较高介电常数的 BGO 和较低介电常数的六氟化硫 (SF_6) 气体接触后电场不均匀性的不良影响。通过仿真计算出该方法可以有效地降低内电场的不均匀系数, 并且也能极大地减少当晶体或光路发生偏移时所带来的积分电压误差。实验结果也表明这种方法对 OVT 传感头中的电场分布改善明显。

1 基于 Pockels 纵向调制的 OVT 原理

基于 Pockels 效应的 OVT 根据调制方式的不同,

收稿日期: 2024-06-28; 修订日期: 2024-07-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (62005110); 福建省自然科学基金项目 (2022J011113)

作者简介: 祝俊男, 男, 硕士生, 主要从事光学电压互感器等方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 谭巧, 女, 副教授, 博士, 主要从事智能电网的测量新技术等方面的研究。

可分为横向调制与纵向调制,当 BGO 晶体的外电场方向平行于通光方向时,为纵向调制方式^[5],如图 1 所示。

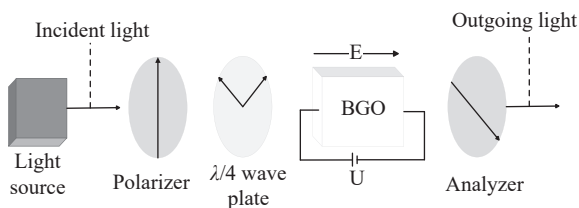


图 1 纵向调制图

Fig.1 Longitudinal modulation diagram

在纵向调制方式下,因为晶体施加电场的厚度和晶体通光路径的长度相等,所以 BGO 晶体所需的半波电压仅与晶体的电光特性有关,与晶体的尺寸大小无关。其电光相位延迟角 δ 和半波电压 U_π 为^[6]:

$$\begin{cases} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} U \\ U_\pi = \frac{\lambda}{2n_0^3 \gamma_{41}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: U 为 BGO 两端的待测电压; λ 为光源的波长; n_0 为晶体中的折射率; γ_{41} 为晶体的电光系数。根据 OVT 偏光干涉检测原理,输出光强 I_o 与电光相位延迟角 δ 之间的关系可以近似表示为^[7]:

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

式中: I_i 为输入光强。由公式 (1) 可知,输出光强 I_o 和晶体上的电压关系为:

$$I_o = \frac{I_i}{2} \left(1 + \frac{2\pi n_0^3 \gamma_{41} U}{\lambda} \right) \quad (3)$$

晶体或光路发生偏移时,会导致电光相位延迟角误差,进而引起输出光强误差。此时的输出光强误差为:

$$\Delta I_o = \frac{I_i(1 + \delta_1)}{2} - \frac{I_i(1 + \delta)}{2} = \frac{I_i \Delta \delta}{2} \quad (4)$$

结合公式 (1) 和公式 (4) 得到 ΔI_o 与积分电压误差 ΔU 的关系为:

$$\Delta I_o = \frac{I_i \pi n_0^3 \gamma_{41} \Delta U}{\lambda} \quad (5)$$

可见 ΔI_o 与 ΔU 成正比。因此,可以通过实验来检测改进后传感单元前后的输出光强分布变化,进而判断是否有效改善了晶体内电场的分布并减小了积分电压误差。

2 内电场分析

2.1 晶体长度的确定

OVT 系统的核心是传感单元,在高压电极施加 110/ $\sqrt{3}$ kV 的额定电压,通过 ANSYS Maxwell 3D 软件来对传感头的内电场进行分析。电极形状选择文献 [8] 中的电极。如果电极间隔太大,那么下降到晶体上的有效电压就会变低,对应的电光相位延迟就会变得很低;如果电极间距太短,则会使传感器的最大电场强度偏高,从而对绝缘产生不利的影响。因而需选取合适的电极间距,对传感头进行绝缘强度分析。根据 110 kV 的电压等级对应的雷击冲击电压为 480 kV,电极间距的击穿场强为 75 kV/cm。国际电工委员会 (IEC) 规定,安全系数的取值范围为 1.25~1.4^[9]。安全系数为允许最大电场强度与实际最大电场强度之比。在电极两端施加 480 kV 的雷击电压,令电极间距为 150 mm (160 mm BGO 晶体两端分布深入,电极孔内为 5 mm),得到电场分布如图 2 所示,此时的最大场强为 54.263 kV/cm,安全系数为 1.38,满足 IEC 要求。通过仿真得到不同电极间距的最大场强和安全系数,如表 1 所示。



图 2 电极间距 150 mm 时的电场分布

Fig.2 Electric field distribution at electrode spacing of 150 mm

表 1 不同间距下的最大场强和安全系数

Tab.1 Maximum field strength and safety factor at different spacing

Electrode spacing/mm	Maximum field strength/kV·cm ⁻¹	Safety factor
100	77.618	0.97
120	66.662	1.13
140	56.979	1.32
150	54.263	1.38
160	49.956	1.50

由表 1 可知, OVT 传感头电极间距选为 150 mm, 既确保了较高的绝缘安全裕度, 也满足了 OVT 的设

计需求。此时的电极开孔为 $\Phi 10\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的圆柱, 由于要避免尖端场强聚集效应的产生, 需将晶体深入开孔, 由于晶体属于绝缘材料, 并不会降低整体的安全系统, 所以晶体的长度可设计为 160 mm 。

2.2 分层介质的选择

传感头内电场分布不均匀的主要原因在于 BGO 晶体的相对介电常数 16 远大于气体的介电常数 1.002, 从而引起的晶体边缘电场严重扭曲^[10]。为了解决这个问题, 可以在晶体之间添加合适分层介质, 以减缓晶体外电势下降的速度, 改善 OVT 内电场的均匀性^[11]。引入了不均匀系数 f 对晶体电场进行分析:

$$\begin{cases} f = \frac{E_{\max}}{E_{\text{av}}} \\ E_{\text{av}} = \frac{U}{l} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $E_{\max}$ 为晶体通光路径上的最大电场强度; E_{av} 为晶体通光路径上平均电场强度; U 为路径上的积分电压 (两点路径上的整体电场); l 为晶体的通光路径。

分压介质的选择至关重要, 要确保其具有良好的透光性, 并且在分压过程中不会导致电光晶体击穿, 因此在选择不同的分压介质材料时, 需要对其透光性能、介电常数以及分压计算进行评估。石英玻璃和方解石都具有良好的透光性和较大的介电常数, 其中石英和方解石的相对介电常数分别为 3.8 和 8.3。并且其本身的热膨胀系数较小, 在高温环境下产生的温漂误差也会降低^[12]。其内部结构如图 3 所示。

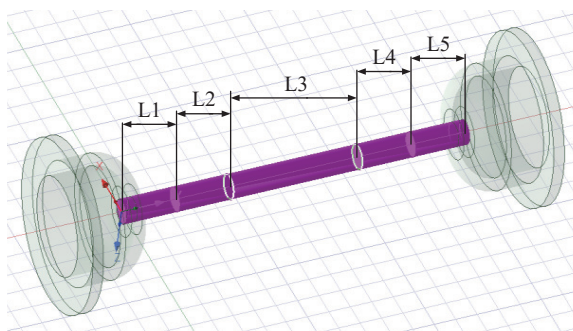


图 3 介质分层法内部结构图

Fig.3 Internal structure diagram of medium layering method

根据图 3 的结构对不同的介质分压模型进行仿真, 其结果如表 2 所示。

当附加介质仅为方解石时, 电场的不均与系数最

表 2 不同介质分压的不均匀系数

Tab.2 Uneven coefficient of partial pressure in different media

Internal structure	Uneven coefficient of electric field along the central axis f
L1-L5(160 BGO)	1.157 291 464
L1,L2,L4,L5(25 calcite); L3(60 BGO);	1.050 770 614
L1,L2,L4,L5(25 quartz); L3(60 BGO);	1.119 726 029
L1,L5(30 calcite); L2,L4(30 quartz); L3(40 BGO)	2.808 525 035
L1,L5(30 quartz); L2,L4(30 calcite); L3(40 BGO)	1.664 036 271

小, 所以采用方解石作为分压介质可有效地改善 OVT 传感头内部的电场分布。由表 2 可知, 可将图 3 简化为图 4 所示。



图 4 传感头内部简化图

Fig.4 Simplified diagram of the sensor head interior

对 BGO 晶体和方解石的长度比进行优化设计, 通过仿真得到 BGO 晶体中轴线电场不均匀系数结果如表 3 所示。

表 3 不同长度的方解石和 BGO 的仿真结果

Tab.3 Simulation results of different lengths of calcite and BGO

Internal structure	Uneven coefficient of electric field along the central axis f
L1,L3(50 calcite); L2(60 BGO)	1.050 770 614
L1,L3(60 calcite); L2(40 BGO)	1.047 418 909
L1,L3(70 calcite); L2(20 BGO)	1.043 037 132
L1,L3(72 calcite); L2(16 BGO)	1.044 010 605
L1,L3(74 calcite); L2(12 BGO)	1.042 240 523
L1,L3(75 calcite); L2(10 BGO)	1.036 833 224
L1,L3(76 calcite); L2(8 BGO)	1.039 859 667
L1,L3(77 calcite); L2(6 BGO)	1.060 976 667

当 BGO 晶体长度为 10 mm 时, 其中轴线上的电场不均匀系数达到最小值, 表明电场分布相对较为均匀。因此, 选择晶体长度为 10 mm 和方解石长度为 75 mm 时效果最佳。

2.3 包裹介质的选择

在 BGO 晶体周围包裹一层具有合适介电常数的材料,以避免直接与 SF_6 气体接触,可以改善晶体内电场分布,减少尖端场强的聚集^[13]。在选择材料时,需要考虑介电常数、绝缘性能、温度特性、材料老化和重量等因素。可以选取氧化铝 (Al_2O_3)、氧化钇 (Y_2O_3) 和氮化铝 (Al_N) 进行分析^[14]。其相对介电常数如表 4 所示。

表 4 不同包裹材料的介电常数

Tab.4 Dielectric constant of different wrapping materials

Material	Relative dielectric constant
Al_2O_3	10
Y_2O_3	13
Al_N	8.8

为了确定包裹范围对传感头内电场分布均匀性的影响,设计不同的包裹结构并进行分析,如图 5 所示。

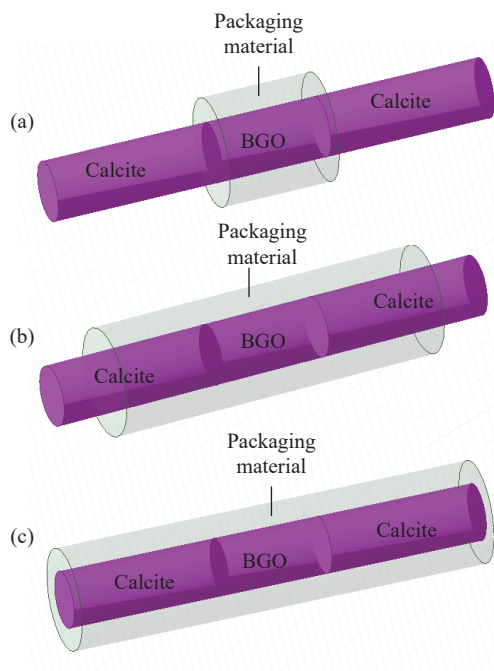


图 5 (a) 包裹 BGO; (b) 包裹不进入电极; (c) 包裹进入电极

Fig.5 (a) Packaging BGO; (b) The package does not enter the electrode; (c) The package enters the electrode

根据表 4 和图 5 对不同的材料和包裹结构分别组合仿真,所得到的结果如表 5 所示。

表 5 不同材料和包裹结构下的仿真结果

Tab.5 Simulation results under different materials and packaging structures

Packaging structure	Packaging material	Uneven coefficient of electric field along the central axis f
No package	-	1.036 833 224
Packaging BGO	Al_2O_3	1.027 438 892
	Y_2O_3	1.051 428 278
	Al_N	1.018 698 990
The package does not enter the electrode	Al_2O_3	1.059 131 114
	Y_2O_3	1.062 449 804
	Al_N	1.057 003 822
The package enters the electrode	Al_2O_3	1.046 571 856
	Y_2O_3	1.088 016 863
	Al_N	1.023 207 299

可见,包裹材料采用 Al_N 相较于 Al_2O_3 和 Y_2O_3 时的中轴线电场不均匀系数有明显的降低;包裹结构上,只包裹 BGO 这一结构相较于其他两种的效果也非常显著。所以选择图 5(a) 的包裹结构使用 Al_N 作为包裹材料最佳。包裹厚度在 0.1~5 mm 范围内变化时,仿真结果如图 6 所示。

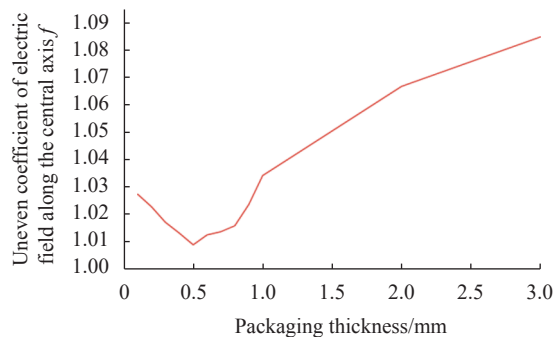


图 6 不同包裹厚度下的电场不均匀系数

Fig.6 Uneven coefficient of electric field under different packaging thicknesses

由图 6 可知,当包裹厚度在 0.1~5 mm 范围内变化时,在 0.5 mm 厚度时中轴线电场不均匀系数的效果最佳。

2.4 晶体或光路偏移时的误差分析

OVT 传感头中的光路和晶体中心轴通常为一条线,但其受到热胀冷缩、震动与器件连接老化等因素的影响,会导致光路或晶体的位置发生变化,从而产生晶体偏移和光路偏移^[15]。假设晶体的中心轴为 d_1 ,光路为 d_2 ,两条线的夹角为偏移角度 τ 。晶体偏移是

指 BGO 晶体在使用过程中发生的位置偏移,此时晶体的中心轴 d_1 偏离光路 d_2 ,如图 7(a)所示;光路偏移是指光学信号在传输过程中发生的路径偏移,此时的光路 d_2 会发生偏移,从而偏离晶体的中心轴 d_1 ,如图 7(b)所示。

当发生偏移时的电光相位延迟角变为 δ_1 :

$$\delta_1 = \frac{2\pi n_0^3 \gamma_{41} U}{\lambda(d_1/d_2)} = \frac{2\pi n_0^3 \gamma_{41} U}{\lambda \cos \tau} \quad (7)$$

由此产生的测量误差 $\Delta\delta$ 为:

$$\Delta\delta = \delta_1 - \delta = \frac{2\pi n_0^3 \gamma_{41} U}{\lambda(d_1/d_2)} = \frac{2\pi n_0^3 \gamma_{41} U}{\lambda \cos \tau} \quad (8)$$

由相位延迟角与施加电压的正比关系,引入积分电压误差 ΔU 为:

$$\Delta U = \frac{\Delta\delta U_\pi}{\pi} \quad (9)$$

ΔU 即为电压积分误差。通常 τ 非常小, ΔU 主要来源于 BGO 晶体内的电场畸变。因此 ΔU 越小,晶体内部电场分布的均匀度越高。

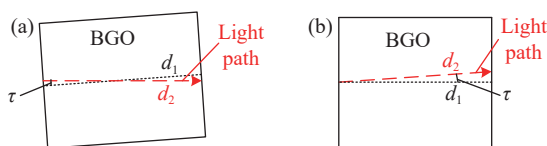


图 7 (a) 晶体偏移; (b) 光路偏移

Fig.7 (a) Crystal deviation; (b) Light path deviation

选取系统内部的偏移角度在 $0.1^\circ \sim 0.5^\circ$ 之间,分析 OVT 改善前和改善后的结构在发生偏移时对通光路径积分电压造成的影响。在未对 BGO 晶体分压和包裹时,系统发生晶体偏移和光路偏移的积分电压误差如图 8(a)所示,而通过改善后的积分电压误差如图 8(b)所示。

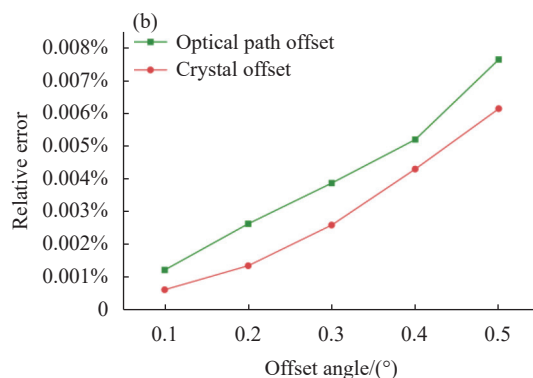
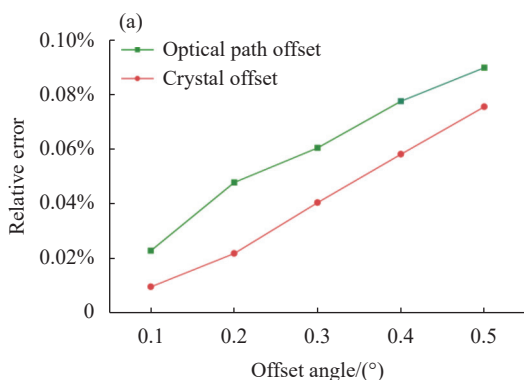


图 8 (a) 改善前的积分电压误差; (b) 改善后的积分电压误差

Fig.8 (a) Integral voltage error before improvement; (b) Improved integrated voltage error

根据图 8 的结果可知,初始状态下 OVT 系统由于光路偏移引起的电场积分误差最大可达 0.089 69%,而晶体偏移引起的电场积分误差最大可达 0.075 44%。经过改善后,光路偏移引起的最大电场积分误差降至 0.007 62%,晶体偏移引起的最大电场积分误差降至 0.006 12%。这表明改善方法取得了显著效果,有效减少了由于 OVT 外部连接因素所造成的误差。

3 实验验证

3.1 实验准备

实验装置如图 9 所示。光源为波长 632.8 nm 的半导体光源,光斑直径为 3 mm,功率可调;起偏器的偏振方向为 90° ,使光源发出的自然光变为线偏振光;扩束镜为四倍扩束,使得光斑直径能够完全覆盖 BGO 晶体; $\lambda/4$ 波片为 45° 方向,使得线偏振光转变为圆偏振光;传感单元包括一块 BGO 晶体 (尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$),半波电压为 33.26 kV,外部包裹介质 Al₂N,两块冰洲石晶体 (尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$),以及开孔类半球形电极。Al₂N 的长度为 10 mm,内径为 10 mm,外径为 10.5 mm;检偏器为 0° 方向,用来检验

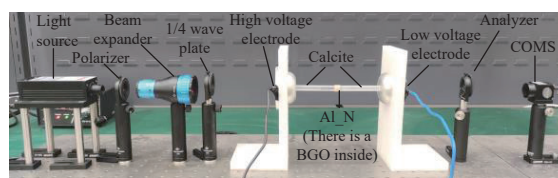


图 9 实验装置示意图

Fig.9 Schematic diagram of experimental setup

该光线是否为偏振光;最后光线进入 CMOS 相机,在接受到出射光后显示光斑图像。

为了评估实验获得的光强分布数据的变化,采用标准差作为衡量光强图像数据离散程度的指标。其代表了像素值的变化程度或者图像亮度的差异性。标准差越大,表示图像中的像素值分布越分散,而标准差较小则意味着图像中的像素值分布较为集中,其积分电压的误差也会相对较小。标准差的计算公式如下所示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (10)$$

式中: N 表示图像中的元素总个数; x_i 表示第 i 个元素; μ 表示各元素中平均值。需要指出的是,由于条件的限制,气体环境为常见的空气,而非仿真模型中的 SF_6 气体。尽管空气和 SF_6 气体的介电常数略有不同,但它们与 BGO 晶体的介电常数相差较大,满足内电场分布不均匀的原因。因此,用空气替代 SF_6 作为气体环境不会影响实验结果的可靠性。

3.2 实验过程与结果

在实验前,必须对光学系统进行校准,以确保光束垂直入射到各个光学元件上,并且通过晶体后的光斑能够完全被 CMOS 工业数字相机接收到。在室温条件下,逐步施加 0 V~1 kV 的直流测试电压给高压电极,每次增加 100 V。然后使用 CMOS 相机采集 500 V 和 1 kV 时的图像,接受到的光斑图像如图 10 所示。

图 10(a) 和 (b) 展示了附加包裹介质前在 500 V 和 1 kV 下的光强分布。经标准差计算,包裹介质前的标准差分别为 40.2837 和 52.1065。这些标准差值表明,随着电压增加,电光调制效应增强,导致光斑亮度增加。针对附加包裹介质后 500 V 和 1 kV 下的光强分布,如图 10(c) 和 (d) 所示。通过标准差计算,500 V 和 1 kV 时,经包裹改善后的标准差分别为 24.26181 和 33.774。可以看出,附加包裹介质后,图像的离散程度明显减小,随着电压增加,光斑亮度也会增加。

实验结果表明,经包裹改善后的光斑分布更加均匀,在 500 V 下的电场均匀度提高了 39.77%;在 1 kV 下的电场均匀度提高了 35.18%,实验与仿真的结果一致。

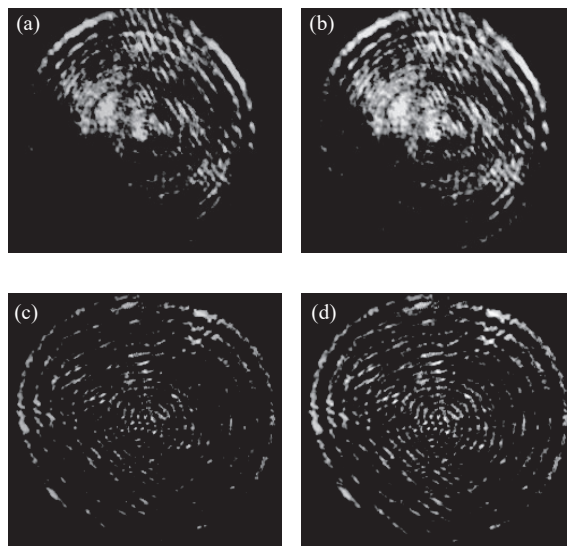


图 10 (a) 包裹介质前 $U=500$ V; (b) 包裹介质前 $U=1$ kV; (c) 包裹介质后 $U=500$ V; (d) 包裹介质后 $U=1$ kV

Fig.10 (a) $U=500$ V before packaging the medium; (b) $U=1$ kV before wrapping the medium; (c) After wrapping the medium, $U=500$ V; (d) After wrapping the medium, $U=1$ kV

4 结 论

文中对 110 kV 电压等级的纵向调制 OVT 进行了仿真分析,分别对电极间距、分层介质和包裹介质做了详细分析,并找出一种最合适的结构,能有效降低晶体的内电场的均匀性,并极大降低了在晶体或光路发生偏移情况下 OVT 所产生的测量误差。通过仿真分析,采用该优化结构,使得晶体中轴线的电场不均匀系统从 1.157 3 降到了 1.008 8,光路偏移引起的最大电场积分误差从 0.090% 降低到 0.008% 以下;晶体偏移引起的最大电场积分误差从 0.075% 降低到 0.006% 左右,改善效果显著。并且,通过实验验证,经过改善后的结构其标准差降低了 35% 以上,说明该结构能有效改善晶体内电场的分布并减小积分电压误差,从而进一步验证了该优化结构的有效性和可靠性。这对其他 OVT 的结构优化也具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] XIE Nan, QIU Xinmao, XU Qifeng, et al. Regulation of bismuth germanate electro-optic crystal's half-wave voltage [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0420003. (in Chinese)
- [2] XIAO Xia. Stability analysis and reliability research on optical

- voltage transformer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003. (in Chinese)
- [3] SANTOS J C, TAPLAMACIOGLU M C, HIDAKA K. Pockels high-voltage measurement system [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, 15(1): 8-13.
- [4] CHEN Linyang, XU Qifeng, XIE Nan, et al. A method for improving the electric field distribution of longitudinal modulation OVT [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(4): 158-162. (in Chinese)
- [5] ZHANG Mingming, LI Hongbin, LIU Yanbing. Optical voltage transformer based on longitudinal Pockels effect [J]. *Sensor Technology*, 2005, 24(6): 58-59, 64. (in Chinese)
- [6] TAN Qiao. Study on sensing characteristics of optical transformer based on radial polarization detection [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017. (in Chinese)
- [7] HUANG Yifan, XU Qifeng, CHEN Hao, et al. Defects and improvement methods of voltage divider structure in optical voltage sensors [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018(21): 166-171. (in Chinese)
- [8] CHEN Linyang. Optimization design of electric field in the sensing head of optical voltage sensor [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017. (in Chinese)
- [9] XIAO Yueyu. Influence of the electric field distribution on the optical voltage transformer [J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(5): 37-40. (in Chinese)
- [10] TAN Qiao, XU Qifeng, XIE Nan, et al. Quantitative research on the intrinsic linear birefringence and temperature characteristic of BGO crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0622004. (in Chinese)
- [11] XIE Rongfang, XU Qifeng, XIE Nan, et al. A method for improving the electric field distribution of OVT's electro-optical crystal [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(6): 91-95. (in Chinese)
- [12] LI Jingzhen. Optical Handbook [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2010: 2556. (in Chinese)
- [13] HUANG Yifan, XU Qifeng, CHEN Linyang, et al. The medium enwrapping method for improving the internal electric field distribution of OVT [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0722004. (in Chinese)
- [14] ZHOU Wenyin. Research on high thermal conductivity insulating polymer composite materials [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- [15] FENG Xiujian, ZHANG Chunxi, YU Jia, et al. Electric field calculation and error analysis of quasi reciprocal optical voltage sensors [J]. *Journal of Beihang University*, 2011, 37(8): 985-989. (in Chinese)

Structural optimization and design of 110 kV longitudinal Optical Voltage Transducer

ZHU Junnan^{1,2}, TAN Qiao^{1*}

(1. College of Physics and Electronic Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350100, China)

Abstract:

Objective With the continuous improvement of power system transmission capacity and voltage level, previous voltage transformers have exposed some fundamental shortcomings, such as poor insulation performance, large volume, electromagnetic resonance, easy magnetic saturation, etc., which are difficult to meet the needs of smart grid development. Optical Voltage Transformer (OVT) adopts optical sensing technology, which can overcome the above defects and better meet the development needs of China's smart grid, with good development prospects. However, there are still many unresolved issues with OVT. In practical applications, small positional deviations between optical devices may occur due to vibration, unstable connections, and thermal expansion and contraction, resulting in uneven distribution of internal electric fields and affecting measurement results. However, current research methods have only reduced the unevenness and coefficient of the internal electric field, and have not improved the accuracy of measurement results when small crystal and optical path offsets occur in OVT crystals.

Therefore, this article conducts electric field simulation on the longitudinal modulation OVT structure of 110 kV, analyzes the non-uniformity and coefficient inside the electric field, and proposes a new dielectric layering and wrapping method when offset occurs.

Methods The sensing unit of OVT is simulated and analyzed using ANSYS Maxwell. Firstly, the distance between electrodes is determined (Fig.2), and then a layered structure is selected (Fig.3). Next, the packaging material and structure are selected (Tab.5), and finally the thickness of the packaging is determined (Fig.6). By using calcite with relatively high dielectric constant to divide the voltage of BGO and wrapping it with Al_N, the adverse effect of electric field non-uniformity after contact between BGO with higher dielectric constant and SF₆ gas with lower dielectric constant is greatly eliminated. And an experimental setup is built to verify its simulation results (Fig.9).

Results and Discussions The non-uniformity of the electric field inside the OVT sensing unit is mainly caused by direct contact between SF₆ (1.002) with a relatively small dielectric constant and BGO (16) with a relatively large dielectric constant. Direct contact between the two is avoided by using calcite layering with a relative dielectric constant of 8.3 and Al_N wrapping with 8.8. And a set of two ends $\Phi 10$ mm $\times$ 75 mm calcite layers, with the middle being $\Phi 10$ mm $\times$ 10 mm BGO and an OVT sensing unit with a thickness of 0.5 mm wrapped around it. Through system simulation, it can be found that the unevenness of the field integration voltage and the coefficient are significantly reduced (Fig.6), and the errors caused by crystal shift or optical path shift due to external factors are also significantly reduced. Finally, an experimental setup was constructed and signals were collected through CMOS. The results are shown (Fig.10), which presents the standard deviation calculated before and after the improvement, as well as under different voltages. The optimized effect can be clearly seen.

Conclusions This article conducts simulation analysis on longitudinal modulation OVT with a voltage level of 110 kV. Detailed analysis is conducted on electrode spacing, additional medium, and wrapped medium, and the most suitable structure is found to effectively reduce the unevenness of the internal electric field of the crystal. In addition, compared to other studies, this article greatly reduces the errors generated in the case of crystal or optical path offset. By improving the internal structure of the OVT system, the uneven electric field along the crystal axis has been reduced from 1.157 3 to 1.008 8 (Fig.6), and the maximum electric field integration error caused by optical path offset has been reduced from 0.090% to below 0.008%; The maximum electric field integration error caused by crystal displacement has been reduced from 0.075% to about 0.006% (Fig.8), and the improvement effect is significant. And through experiments, it can also be demonstrated that the model can effectively improve the distribution of electric field inside the crystal and reduce the integration voltage error (Fig.10), which further confirms the effectiveness and reliability of our proposed method.

Key words: Optical Voltage Transducer; Pockels effect; internal electric field distribution; error of electric field integral

Funding projects: Youth Science Fund Project of National Natural Science Foundation of China (62005110); Natural Science Foundation of Fujian province (2022J011113)