

引用格式: CHEN Shengshuo, LI Yansong, CHEN Dongxu, 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):0212002

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): 0212002

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

陈胜硕,李岩松,陈东旭,康世佳,许智光,刘君

(华北电力大学 电气与工程学院, 北京 102206)

摘要: 光学电压传感器在温度稳定性方面仍有亟待解决的问题,一是电光晶体在温度变化时存在温度梯度,导致表面温度与光路温度不等;二是晶体物性参数也会受到温度影响。为此提出一种基于温度场与双卡尔曼滤波(Dual Kalman, D-Kalman)参数估计的温度补偿方法。以锗酸铋晶体为研究对象,在对传感器输出信号进行交直流分离的基础上,先利用半解析法建立晶体暂态温度场模型,再分别通过卡尔曼滤波与中心差分卡尔曼滤波实现对晶体内部温度和初始温度下晶体折射率的状态估计,最后将修正参数与传感器输出信号高频分量相结合计算补偿电压。实验结果表明,传感器在外界温度为 [20 °C, 40 °C] 以 0.5 °C/min 速率不断升高的环境下,暂态温度场解析式的仿真精度在 0.02% 以内,实验测量精度在 0.2% 左右,补偿输出电压测量精度优于 0.52%。与同平台下反向传播神经网络温度补偿效果以及不同平台下的补偿效果相比,该方法提高了传感器测量精度。

关键词: 光学电压传感器; 温度稳定性; 暂态温度场; 卡尔曼滤波; 中心差分卡尔曼滤波

中图分类号: TH741; TM451

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20245302.0212002

0 引言

随着现代电网的发展,对电网运行的可靠性与效率的要求日益提高。传感设备的智能化以及测量技术的不断进步为智能电网的高效稳定运行提供了重要保障。

随着电网容量的不断提高及跨地域远距离输电的增多,在电网中广泛应用的电磁式电压传感器和电容式电压传感器的局限性也逐渐显露。由于传统电压传感器本身存在体积大、造价高、磁路饱和等固有缺点,光学电压传感器(Optical Voltage Sensors, OVS)显示出了更加广阔的应用前景。为满足新一代电力系统的发展需求,关于 OVS 的研究与实用化已成为当前电压传感领域的重要研究方向之一^[1-5]。

经过数十年的发展,OVS 在理论层面也取得了长足的进展,为了增加 OVS 的实用性,需要对 OVS 的测量精度不断进行优化。文献[6]提出一种基于条形铝金属偏振光栅的光学电压传感器,通过将电光相位延迟变化转化为光斑的平移,用图像传感器测量光斑位置实现电压直接测量。文献[7]通过研究 OVS 光路结构的互易性机理,提出了一种运用多光纤相互结合的方法抑制系统光路寄生干扰相位差。文献[8]基于一次电光效应和杂散电容耦合原理提出了一种双铌酸锂晶体结构 OVS,改善了光电传感单元的温度稳定性。文献[9]提出一种基于同轴电容结构的温度自愈式 OVS,通过双光路法提高测量装置的温度稳定性。文献[10]设计了一种自校准 OVS,通过设计基准电压源,使其与被测电压源串联实现自校准功能。综上,多数学者对 OVS 温度补偿方面的研究更多倾向于硬件补偿,对 OVS 本身的温度特性和电光晶体的热物性研究较少。本课题组前期设计了一款基于 Pockels 效应的旋转式光学电压传感器,解决了在直流电场测量中面

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51277066), 国家重点研发计划(No. 2021YFB2400805)

第一作者: 陈胜硕, 1542830593@qq.com

通讯作者: 李岩松, liyansong811@126.com

收稿日期: 2023-07-06; 录用日期: 2023-09-15

<http://www.photon.ac.cn>

临的电荷积累问题,但其也面临着温度漂移的困境^[11]。所以就其温度特性进行分析,本课题组提出通过处理OVS的输出信号将温度与电压解耦的方法,尽量排除温度的影响^[12]。但在后续分析中发现,部分参数仍会受到温度的影响,所以在文献^[12]的基础上引入温度变化量参数,对受到温度影响的参数进行状态估计。

文献^[12]以横向调制OVS为研究对象,详细分析了OVS在多物理场环境下的温度响应特性,通过频谱分析揭示了温度变化引起的漂移误差量的所处频带,通过相应的滤波方法提高OVS的测量精度。然而在考虑热光效应时,是在已经确定了初始温度晶体折射率 n_0 的基础上,分析温致折射率改变量 Δn 对测量精度的影响。实际上与热光效应同理,在不同初始温度下电光晶体的折射率也会发生改变^[13]。从文献资料中往往只能查到电光晶体在固定入射光波长或固定环境温度下的折射率数据,这些数据无法应用于多变外界环境下的OVS温度稳定性校正。同时,为了保证晶体的完整性以减少对内部光路的影响,大部分测温装置只能对晶体表面温度进行测量,这在稳态温度场环境下足以保证测量的准确性。但在外界温度不断改变的暂态温度场下,由于传热特性导致晶体表面温度与内部光路温度存在差值,仅利用表面温度数据也会对OVS的温度补偿产生较大误差影响,因此建立晶体内外温度联系成为亟待解决的问题。文献^[14]是在考虑第二类 and 第三类边界条件下构建Nd:YAG激光晶体的温度场模型,虽然本文中的晶体种类和边界条件与文献^[14]有所不同,但也有相应的借鉴意义。

本文提出一种基于温度场分析与双卡尔曼滤波参数估计的温度补偿方法。首先建立锗酸铋(Bismuth Germanium, BGO)晶体的暂态温度场模型,再通过卡尔曼滤波(Kalman Filtering, KF)算法对晶体内部温度实现准确估计,从而得到准确的温度变化量参数。然后使用中心差分卡尔曼滤波(Central Differential Kalman Filtering, CDKF)算法实现对初始温度下晶体折射率 n_0 的准确估计。最后将这两个修正参数结合传感器输出信号高频分量计算被测电压,实现温度补偿,从而提高传感器的测量精度与准确性。

1 光学电压传感器工作原理

横向调制光学电压传感器中的通光方向与外加电场方向相互垂直。整体结构主要由光源、起偏器、 $\lambda/4$ 波片、电光晶体、检偏器以及后续的信号处理系统等组成,如图1。入射到电光晶体表面的线偏振光在晶体内产生双折射,相位差与外加电压成正比,如式(1)。通过测量双折射相位延迟即可计算传感器外加电压。

$$\delta = \frac{2\pi n_0^3 \gamma_{41} l U}{\lambda' d} \quad (1)$$

式中, δ 为双折射相位差, n_0 为晶体折射率, γ_{41} 为电光系数, l 为晶体通光方向长度, U 为外加电压, λ' 为入射光波长, d 为晶体在外加电场方向上的长度。

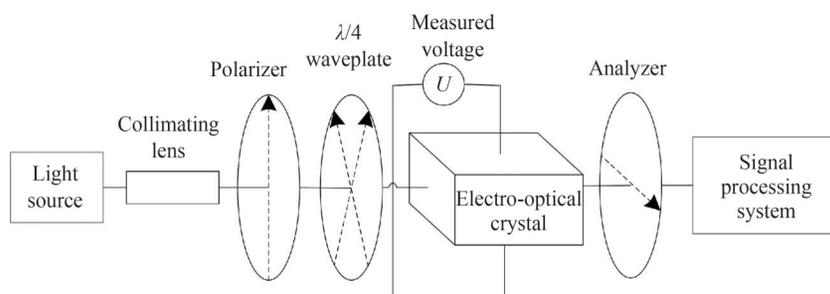


图1 横向调制OVS原理

Fig. 1 Schematic of horizontal modulation OVS

由于双折射相位差 δ 直接测量难度较高,往往采用偏光干涉法将相位调制转化为强度调制,在起偏器与晶体内光的偏振方向夹角为 45° 时,得到最大偏光干涉输出为^[15]

$$I_o = I_i \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (2)$$

由于式(2)代入式(1)得到的系统响应非线性,通过光偏置法利用 $\lambda/4$ 波片增加 $\pi/2$ 的相位偏移,简化后结果为

$$I_o = \frac{I_i}{2} (1 + \sin \delta) \approx \frac{I_i}{2} (1 + \delta) \quad (3)$$

式中, I_o 为出射光强, I_i 为入射光强。当 δ 远小于 1 时即可得到线性响应, 如式(3)^[15]。再利用线性响应方程通过测量光强计算双折射相位差 δ , 代入式(1)最终得出被测电压 U 。

本课题组在文献[11]中对同时受到电场、温度场、应力场等多物理场作用下的光学电压传感器输出特性进行了建模与分析。在图2所示的OVS传感头剖面图中, 以传感器通光方向为基轴之一(如图2中 z 方向)建立坐标系。考虑到外界温度变化导致晶体产生热胀冷缩, BGO晶体在图2所示的槽位中由于外壳的约束产生热应力, 使得以BGO晶体为传感单元核心的光学电压传感器受到包括电光效应、热光效应、弹光效应等的共同影响。偏振光在沿晶体通光方向传播产生的相位延迟为^[12]

$$\delta = \frac{\pi n_0^3 l}{\lambda'} [(p_{11} - p_{12} + p_{44})\sigma + \gamma_{41}E] \quad (4)$$

式中, p_{11} 、 p_{12} 、 p_{44} 为BGO晶体的弹光系数, σ 为BGO晶体在外界温度变化下受到的热应力, E 为外加电压在晶体内产生的电场强度。

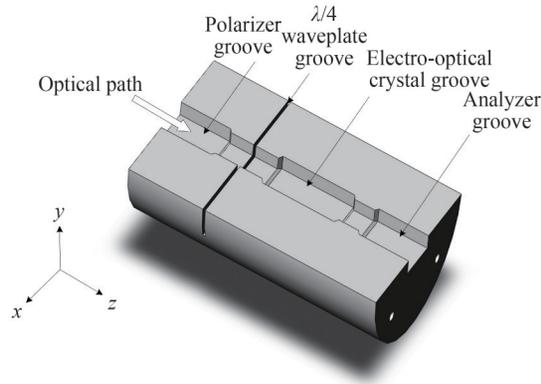


图2 OVS传感头内部结构剖面

Fig. 2 Internal structure section of OVS sensing head

式(4)中晶体折射率 n_0 会受到温度影响, 同时由于外界温度变化导致晶体产生热膨胀效应, 晶体通光方向长度 l 以及在外界约束下受到的热应力 σ 也会随着温度的改变而发生变化。在式(4)的基础上, 综合考虑温度对式(4)中参数产生的影响, 并进行后续补偿研究。

2 OVS 暂态温度场与状态估计模型

2.1 BGO 晶体热模型及边界条件

考虑温度影响时首先要建立BGO晶体内部暂态温度场模型以求取内部通光光路实际温度。光学电压传感器中使用的BGO晶体形状为长方体, 图3为BGO晶体的热模型图, 其中通光方向设定为 z 轴。晶体暴露在大气环境中, 外界气温变化使晶体内部产生温度梯度, 且晶体各表面均符合热力学第三类边界条件。在构建温度场时还要考虑入射光在晶体内衰减的能量, 这部分能量可以近似看做晶体的内热源, 而文献[16]中提到BGO晶体对光的吸收系数极小, 相对应的光强衰减也极小, 所以晶体的内热源可视作近似为零。

由于BGO晶体为各向同性介质^[15], 并且内热源近似为零, 则晶体内部的温度场热传导方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

式中, ρ 为晶体密度, C_p 为晶体定压比热容, λ 为晶体导热系数, $T(x, y, z, t)$ 为温度场的时空分布函数。

考虑到外界温度变化的不确定性, 为了简化温度场函数解析解的计算, 将空气温度变化设定为两个不同的阶段, 如图4: 阶段I空气温度从初始温度 T_0 以恒定速率 v 进行变化, 在经过时间 τ 后, 达到状态切换温度 T_1 ; 阶段II从温度 T_1 开始, 外界温度保持恒定, 但由于温度梯度的存在, 晶体内部温度未在 τ 时刻温度同步

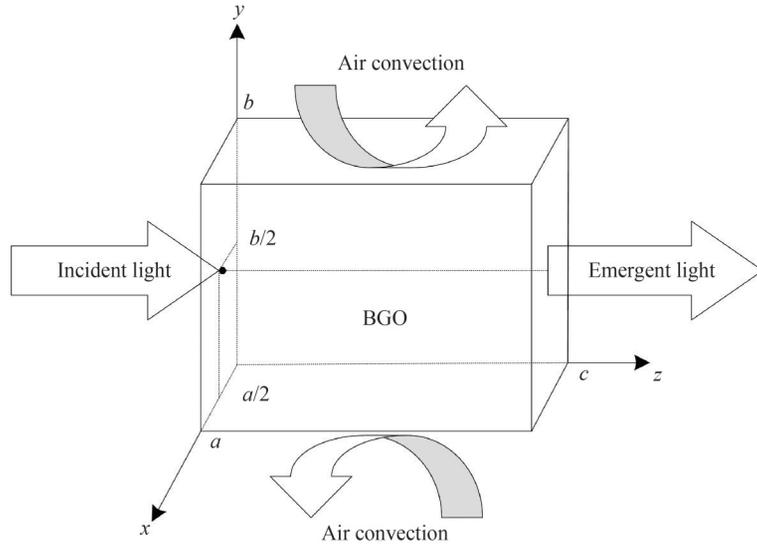


图3 BGO 晶体热模型
Fig. 3 BGO crystal thermal model

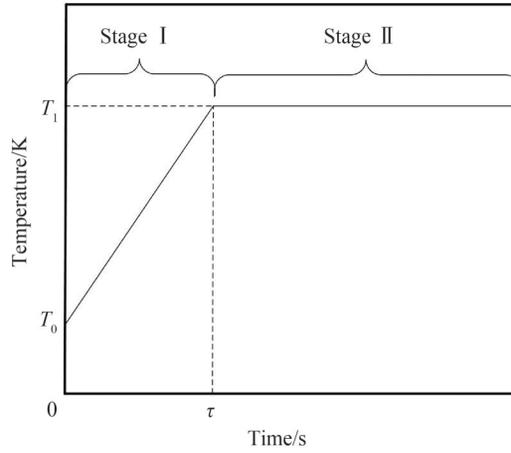


图4 外界温度变化示意
Fig. 4 Schematic of external temperature change

变化到 T_1 , 在之后的一段时间仍会进行热传导过程, 使晶体整体温度逐步逼近 T_1 。

在不同阶段 BGO 晶体均处于第三类边界条件之下, 边界条件形式相同, 如式(6)。

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h(T|_{x=0} - T_f) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=a} = h(T|_{x=a} - T_f) \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = h(T|_{y=0} - T_f) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=b} = h(T|_{y=b} - T_f) \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = h(T|_{z=0} - T_f) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=c} = h(T|_{z=c} - T_f) \end{array} \right. \quad (6)$$

式中, h 为 BGO 晶体的表面对流换热系数, T_f 为外界流体温度。不同阶段初始条件以及 T_f 的形式有所不同: 阶段 I 中 $T_f = T_0 + vt$, 初始条件为当 $t=0, T=T_0$; 阶段 II 中 $T_f = T_1$, 初始条件为当 $t=\tau, T=T(x, y, z, \tau)$ 。

2.2 BGO晶体内部温度场函数模型构建

2.2.1 阶段I温度场函数模型构建

利用半解析法^[17]求解式(5),得到其在满足边界条件式(6)下的解析解为

$$T_1(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} C_{ijk}(t) \left[\frac{h}{\lambda} \sin \beta_{1i} x + \beta_{1i} \cos \beta_{1i} x \right] \left[\frac{h}{\lambda} \sin \beta_{2j} y + \beta_{2j} \cos \beta_{2j} y \right] \left[\frac{h}{\lambda} \sin \beta_{3k} z + \beta_{3k} \cos \beta_{3k} z \right] + T_0 + vt \quad (7)$$

式中, $C_{ijk}(t)$ 为温度场中与时间有关的系数。 β_{1i} 可通过 MATLAB 求解超越方程式(8)求得, β_{2j}, β_{3k} 将式(8)中的长度 a 替换成对应应在 y, z 轴方向的长度 b, c 即可同理求解。

$$2\beta_{1i} \frac{h}{\lambda} = \left[\beta_{1i}^2 - \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2 \right] \tan(\beta_{1i} a) \quad (8)$$

将式(7)代入热传导方程式(5),整理可得

$$\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} [C_{ijk}'(t) + gC_{ijk}(t)] \left[\frac{h}{\lambda} \sin \beta_{1i} x + \beta_{1i} \cos \beta_{1i} x \right] \left[\frac{h}{\lambda} \sin \beta_{2j} y + \beta_{2j} \cos \beta_{2j} y \right] \left[\frac{h}{\lambda} \sin \beta_{3k} z + \beta_{3k} \cos \beta_{3k} z \right] = -v \quad (9)$$

式中, $g = \alpha(\beta_{1i}^2 + \beta_{2j}^2 + \beta_{3k}^2)$, α 为 BGO 晶体的热扩散率。

将函数系 $\left\{ \frac{h}{\lambda} \sin \beta_{1i} x + \beta_{1i} \cos \beta_{1i} x \right\}, \left\{ \frac{h}{\lambda} \sin \beta_{2j} y + \beta_{2j} \cos \beta_{2j} y \right\}, \left\{ \frac{h}{\lambda} \sin \beta_{3k} z + \beta_{3k} \cos \beta_{3k} z \right\}$ 分别在定义域 $[0, a], [0, b], [0, c]$ 上进行带权正交得到

$$C_{ijk}'(t) + gC_{ijk}(t) = -\frac{8v}{u_1 u_2 u_3} \int_0^a \int_0^b \int_0^c \left(\frac{h}{\lambda} \sin \beta_{1i} x + \beta_{1i} \cos \beta_{1i} x \right) \left(\frac{h}{\lambda} \sin \beta_{2j} y + \beta_{2j} \cos \beta_{2j} y \right) \left(\frac{h}{\lambda} \sin \beta_{3k} z + \beta_{3k} \cos \beta_{3k} z \right) dz dy dx \quad (10)$$

式(10)中的 $\beta_{1i}, \beta_{2j}, \beta_{3k}$ 均取超越方程式(8)的第一个数值解, u_1 可以通过式(11)计算得到

$$u_1 = \left[\beta_{1i}^2 + A^2 \right] \left[a + \frac{A}{\beta_{1i}^2 + A^2} \right] + A \quad (11)$$

式中, $A = h/\lambda, u_2, u_3$ 将式(11)中的长度 a 换成对应应在 y, z 轴方向的长度 b, c 即可同理求解。

将式(10)中右侧部分整体看作常数 f , 即可解得

$$C_{ijk}(t) = \frac{f}{g} + ce^{-gt} \quad (12)$$

式中, c 为任意常数, 可以通过初始条件求解。再代入式(7)即可得到阶段 I 暂态温度场表达式, 表示为

$$T_1(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{f}{g} (1 - e^{-gt}) \left[\frac{h}{\lambda} \sin \beta_{1i} x + \beta_{1i} \cos \beta_{1i} x \right] \left[\frac{h}{\lambda} \sin \beta_{2j} y + \beta_{2j} \cos \beta_{2j} y \right] \left[\frac{h}{\lambda} \sin \beta_{3k} z + \beta_{3k} \cos \beta_{3k} z \right] + T_0 + vt \quad (13)$$

2.2.2 阶段II温度场函数模型构建

在达到阶段 II 之后外界温度不再发生变化, 即 $v=0$ 。按照阶段 I 的解法 $f=0$, 无法求解温度场, 所以如图 5 所示重新定义坐标系 $[x', y', z']$, 以晶体中心为坐标原点, 以通光方向为 z' 轴, 根据晶体温度场的对称性对温度场函数模型进行求解。

具体解法在文献[18]中有详细过程, 不再赘述, 将阶段 II 温度场的函数模型整理可得

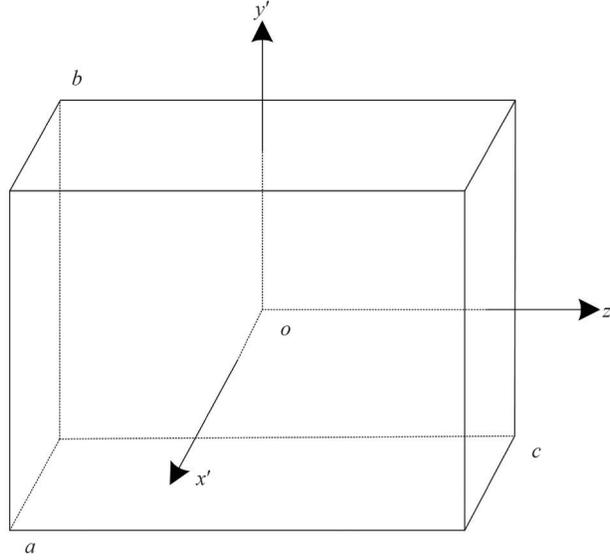


图5 阶段II温度场坐标系定义

Fig. 5 Coordinate system definition of stage II temperature field

$$T_{II}(x', y', z', t) = \theta_0 \times \left[\frac{2\sin\beta'_{11}}{\beta'_{11} + \sin\beta'_{11} \cos\beta'_{11}} \right] \cos\left(\beta'_{11} \frac{x'}{a/2}\right) e^{-\beta'^2_{11} F_0} \times \left[\frac{2\sin\beta'_{21}}{\beta'_{21} + \sin\beta'_{21} \cos\beta'_{21}} \right] \cos\left(\beta'_{21} \frac{y'}{b/2}\right) e^{-\beta'^2_{21} F_0} \times \left[\frac{2\sin\beta'_{31}}{\beta'_{31} + \sin\beta'_{31} \cos\beta'_{31}} \right] \cos\left(\beta'_{31} \frac{z'}{c/2}\right) e^{-\beta'^2_{31} F_0} + T_1 \quad (14)$$

式中, θ_0 为状态转换时刻的过剩温度, β'_{11} 、 β'_{21} 、 β'_{31} 分别取长宽高对应的超越方程的第一个解, F_0 为傅里叶数。

2.3 BGO 晶体中心温度状态估计

2.2节中的暂态温度场函数模型建立了晶体表面温度与中心温度的联系, 可以通过测量晶体表面温度计算中心温度的数值, 但这也对晶体表面温度的测量精度提出了很高的要求。为了使中心温度解析解与实际温度更加贴近, 在暂态温度场的基础上, 通过引入热路模型并结合卡尔曼滤波算法对晶体中心温度进行状态估计^[19-21]。采用文献[20]提出的方法, 以晶体体中心点为原点, 整体热路模型如图6(a)。由于外部温度变化, 以升温环境为例, 热量沿各面垂直外表面方向向晶体中心传递, 将其中一条传热支路径向 n 等分, 如图6(a)中的红框所示支路, 每个小单元都包含热容与热阻。由于电光晶体需要保持完整性, 只能对晶体表面温度进行测量, 所以此处采取与文献[20]中相同的处理方法, 令 $n=1$ 。此时沿 BGO 晶体六个不同表面的热路汇总在一起, 如图6(a)。考虑到晶体物理参数的对称性, 沿晶体相对面延伸的两条热路参数完全相等, 六条支路相互并联。各条支路的热容并联后相加成为一个整体热容 C , 数值上与晶体热容相等; 晶体内传导热阻 R_c 与外换热热阻 R_s 串联构成一条支路上的热阻, 六条支路的热阻相互并联即可得到最终简化模型中的总热阻 R 。

图中 T_c 表示晶体体中心点温度, T_i 表示晶体外部空气温度, C_i ($i=1, 2, \dots, 6$) 表示支路热容, R_{c_j} ($j=1, 2, \dots, 6$) 表示由于晶体热传导产生的热阻, R_{s_k} ($k=1, 2, \dots, 6$) 表示由于晶体表面对流换热产生的热阻。其计算公式为 $R_c = \frac{L_c}{\lambda A}$ 、 $R_s = \frac{1}{hA}$, 其中 L_c 表示沿传热方向的特征长度, A 表示传热面的表面积。

将图6(a)中的热路进行简化整理, 得到如图6(b)所示的简化热路模型。其中 R 、 C 是经过等效化简后的热阻与热容。在阶段 I 情况下 $T_i = T_0 + vt$; 在阶段 II 情况下 $T_i = T_1$ 。根据基尔霍夫电流定律推导可得 BGO 晶体热路模型的求解方程为

$$C \frac{dT_c}{dt} = \frac{T_i - T_c}{R} \quad (15)$$

将式(15)进行离散化, 构建出关于晶体内部中心温度的状态方程为

$$T_{k+1} = \left(1 - \frac{\Delta t}{RC}\right) T_k + \frac{T_i}{RC} \Delta t + \omega_k \quad (16)$$

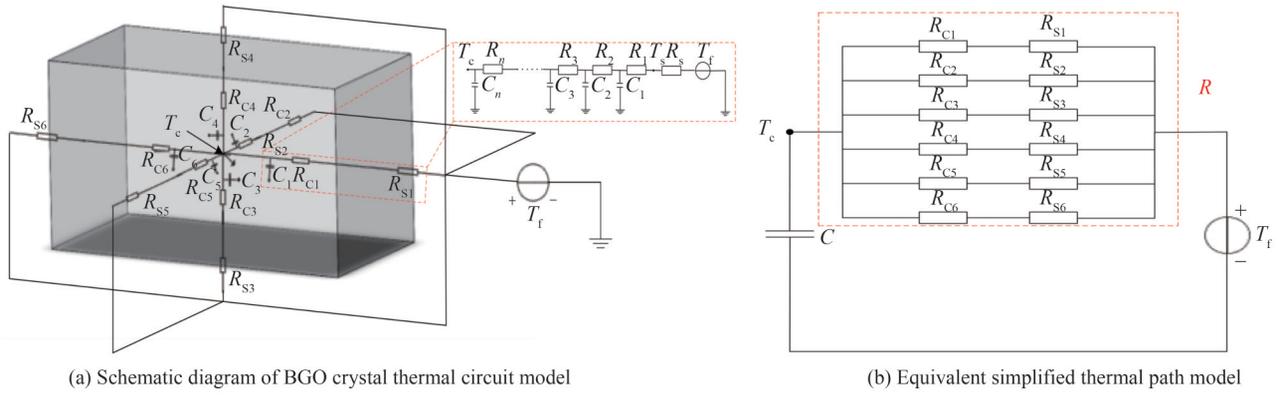


图6 BGO晶体热路模型构建
Fig. 6 Construction of BGO crystal thermal circuit model

式中, T_k, T_{k+1} 分别为第 $k, k+1$ 时刻晶体内部中心温度, Δt 为第 $k, k+1$ 时刻的间隔, w_k 为系统噪声, 符合高斯分布。

矩阵形式线性卡尔曼滤波流程可表示为

$$\begin{cases} x'_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \\ P'_{k+1} = AP_k A^T + Q \\ K_{k+1} = P'_{k+1} H^T (HP'_{k+1} H^T + R)^{-1} \\ x_{k+1} = x'_{k+1} + K_{k+1} (z_{k+1} - Hx'_{k+1}) \\ P_{k+1} = (I - K_{k+1} H) P'_{k+1} \end{cases} \quad (17)$$

式中, x_k, x'_k 分别为 k 时刻状态向量的估计值和一步预测值, P_k, P'_k 分别为估计协方差矩阵和一步预测协方差矩阵, A, B, H 分别为状态转换矩阵、系统控制矩阵、量测转换矩阵, u_k 为系统控制向量, Q, R 分别为系统噪声协方差矩阵、量测噪声协方差矩阵, K_k 为卡尔曼增益矩阵, I 为单位矩阵。

按照式(17)的线性卡尔曼滤波计算流程, 以BGO晶体内部体中心点温度 T_c 为状态变量, 以能通过直接测量得到的晶体表面中心点温度为量测变量, 根据式(16)构建状态方程, 根据式(13)、(14)构建不同阶段量测方程, 表示为

$$\begin{cases} T_{Im} = T_k + T_I(x_1, y_1, z_1, t) - T_I(x_0, y_0, z_0, t) + v_k \\ T_{IIm} = T_k + T_{II}(x_1, y_1, z_1, t) - T_{II}(x_0, y_0, z_0, t) + v_k \end{cases} \quad (18)$$

式中, $(x_1, y_1, z_1), (x_0, y_0, z_0)$ 分别为测量点和晶体中心点坐标, v_k 为量测噪声, 符合高斯分布。通过式(16)、(18)可以看出温度估计模型是线性模型, 为了解决线性模型精确估计问题并提高计算速度, 引入卡尔曼滤波方法实现对晶体内部中心温度的状态估计, 并以此修正表面测量温度计算式(4)中受到温度影响的参数。

2.4 BGO晶体折射率状态估计

在不考虑光源扰动性的前提下, 式(4)中受到温度影响的参数包括晶体长度 l 、晶体受到的热应力 σ 以及晶体折射率 n_0 。其中晶体通光方向长度 l 在外界温度变化时会发生热膨胀效应; 晶体在外界温度变化时所产生的热应力 σ 与热应变和晶体的物性参数有关。前两个参数可以直接构建其与温度变化量 ΔT 的关系, 而对初始温度下的晶体折射率 n_0 的求取则为本节研究的重点。

结合式(3)、(4)可得在多物理场下OVS输出信号的低频分量 I_{o-} 与高频分量 $I_{o\sim}$ 分别为

$$\begin{cases} I_{o-} = \frac{I_i}{2} \left[1 + \frac{\pi n_0^3 l}{\lambda'} (p_{11} - p_{12} + p_{44}) \sigma \right] \\ I_{o\sim} = \frac{I_i}{2} \cdot \frac{\pi n_0^3 l}{\lambda'} \gamma_{41} E = \frac{I_i}{2} \cdot \frac{\pi n_0^3 l \gamma_{41} U}{\lambda' d} \end{cases} \quad (19)$$

以图2中坐标系进行分析, BGO晶体承受的热应力 σ 与热应变 ϵ 关系可表示为

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{1}{E'}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha'\Delta T \\ \epsilon_y = \frac{1}{E'}[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] + \alpha'\Delta T \\ \epsilon_z = \frac{1}{E'}[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha'\Delta T \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 分别为沿 x, y, z 的热应变, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为沿 x, y, z 的热应力, E' 为 BGO 晶体杨氏模量, μ 为 BGO 晶体泊松比, α' 为 BGO 晶体热膨胀系数, ΔT 为温度变化量。

在图 2 所示的 OVS 传感头外壳的限制下, BGO 晶体只能沿通光方向 z 轴自由伸缩, 在另外两个基轴方向受到外壳限制, 得到 $\epsilon_x = \epsilon_y = 0, \sigma_z = 0$, 代入式 (20) 可得

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_y = -\frac{\alpha'E'\Delta T}{1-\mu} \\ \epsilon_z = \alpha'\Delta T \frac{1+\mu}{1-\mu} \end{cases} \quad (21)$$

晶体长度 l 在外界温度变化时发生热胀冷缩, 其计算公式如 (22), 其中 l_0 为初始长度。

$$l = l_0(1 + \epsilon_z) = l_0 \left(1 + \alpha'\Delta T \frac{1+\mu}{1-\mu} \right) \quad (22)$$

由于 $\sigma_x = \sigma_y = 2\sigma^{[12]}$, 将式 (21)、(22) 代入式 (19) 可得

$$\begin{cases} I_{0-} = \frac{I_i}{2} \left[1 + \frac{\pi n_0^3}{\lambda'} l_0 \left(1 + \alpha'\Delta T \frac{1+\mu}{1-\mu} \right) (p_{11} - p_{12} + p_{44}) \left(-\frac{\alpha'E'\Delta T}{2(1-\mu)} \right) \right] \\ I_{0\sim} = \frac{I_i}{2} \cdot \frac{\pi n_0^3 l_0 \left(1 + \alpha'\Delta T \frac{1+\mu}{1-\mu} \right) \gamma_{41} U}{\lambda' d} \end{cases} \quad (23)$$

光学电压传感器的输出信号为交直流混合信号, 经过高通滤波得到分离的低频与高频输出信号。由式 (23) 得到输出信号低频分量与初始折射率 n_0 的非线性关系, 其中温度变化量 ΔT 即为 2.3 节状态估计得到的晶体中心温度的变化量。以式 (23) 中的低频分量 I_{0-} 作为 n_0 的量测方程, 考虑到式 (23) 为非线性模型, 第 2.3 节中的卡尔曼滤波无法解决此类问题, 故引入 CDKF 算法对 n_0 进行状态估计, 同时 CDKF 算法也能提高估计结果的精度。

CDKF 算法的具体流程如图 7。

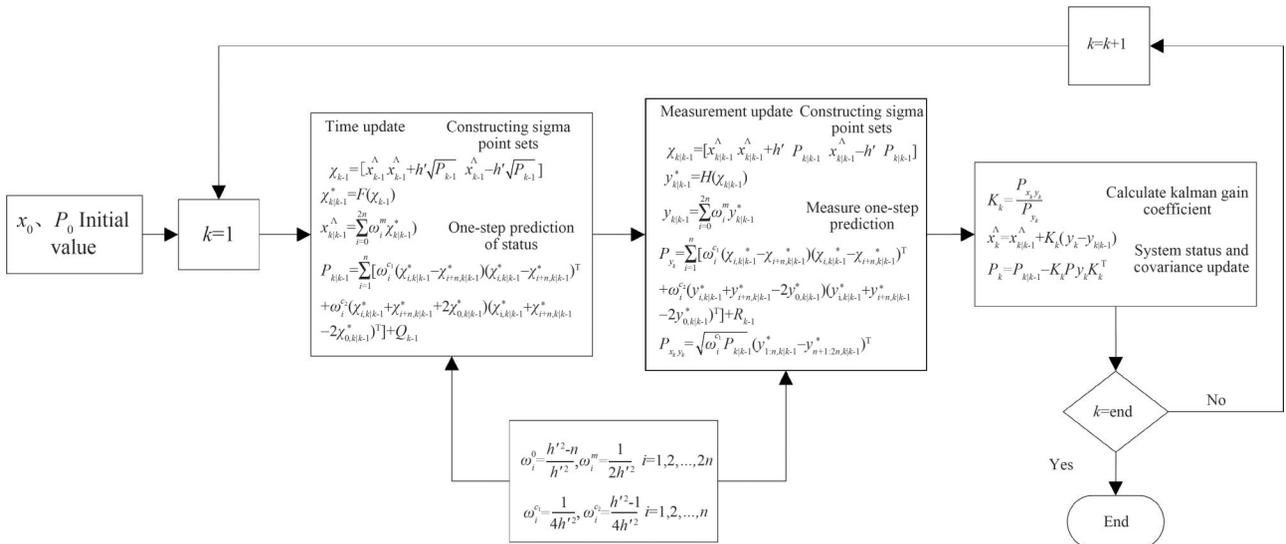


图 7 中心差分卡尔曼滤波流程
Fig. 7 Flow of central differential Kalman filtering

先通过第一次状态估计得到晶体中心点实际温度变化量 ΔT 的准确值,再通过第二次状态估计得到初始温度下晶体折射率 n_0 的准确值,结合式(23)中OVS输出信号的高频分量 $I_{0\sim}$,得到被测电压 U 的补偿测量结果,最终实现对光学电压传感器的温度补偿。

3 仿真分析

3.1 仿真参数

通过BGO晶体的温度场仿真验证2.2节构建的暂态温度场的正确性。在对BGO晶体进行温度场仿真时需要输入多个物性参数,考虑到物性参数本身也会受到温度变化的影响,根据文献[22]对各项物性参数进行拟合,得到其与温度的关系式,如图8。

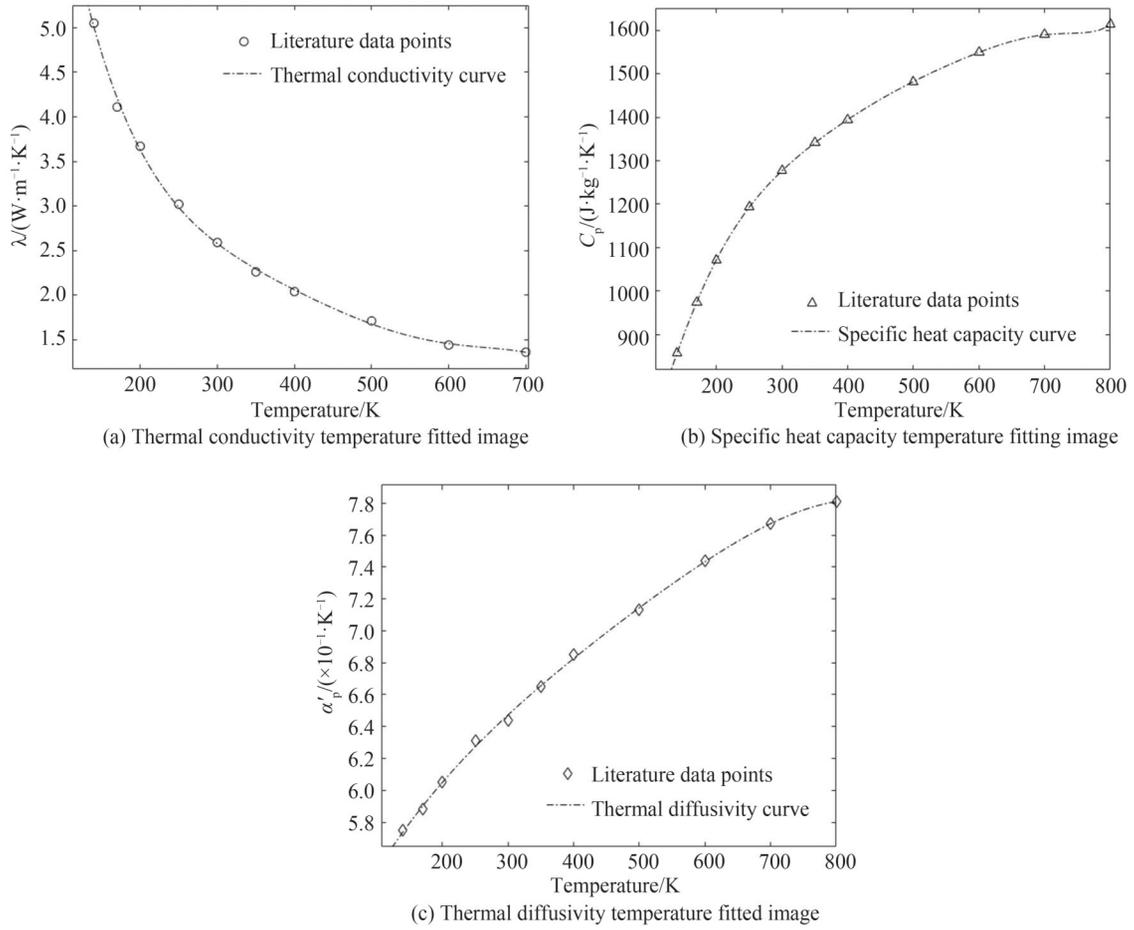


图8 BGO晶体物性参数温度拟合图

Fig. 8 Temperature fitting image of BGO crystal physical properties parameters

各物性参数拟合公式及评价指标如表1。

文献中给出了BGO晶体杨氏模量 E' 与温度的关系式以及其他参数的数值^[23-26],将BGO晶体建模所需物性参数以及宏观尺度整理如式(24)及表2。

$$E' = 1.082 \times 10^{11} - 2.380 \times 10^6 T - 4.647 \times 10^4 T^2 + 76.8 T^3 \quad (24)$$

结合以上模型参数进行BGO晶体的暂态温度场仿真。

表1 物性参数拟合公式及评价指标

Table 1 Fitting formula and evaluation index of physical properties parameters

Parameters	Fitting equations and evaluation metrics			
Thermal conductivity $\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	Formula	$\lambda = -4.073 \times 10^{-13} T^5 + 9.9 \times 10^{-10} T^4 - 9.428 \times 10^{-7} T^3 + 0.0004466 T^2 - 0.1105 T + 13.95$		
	Indicator	SSE	R-square	RMSE
		0.018 2	0.998 7	0.067 46
Specific heat capacity $C_p/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	Formula	$C_p = 1.541 \times 10^{-18} T^8 - 5.616 \times 10^{-15} T^7 + 8.654 \times 10^{-12} T^6 - 7.319 \times 10^{-9} T^5 + 3.671 \times 10^{-6} T^4 - 0.00109 T^3 + 0.175 T^2 - 9.434 T + 662.7$		
	Indicator	SSE	R-square	RMSE
		0.023 59	1	0.108 6
Thermal diffusivity $\alpha'/(10^{-6} \cdot K^{-1})$	Formula	$\alpha' = -1.152 \times 10^{-11} T^4 + 2.176 \times 10^{-8} T^3 - 1.67 \times 10^{-5} T^2 + 0.009191 T + 4.725$		
	Indicator	SSE	R-square	RMSE
		0.003 848	0.999 3	0.025 32

表2 模型参数

Table 2 Model parameters

Parameters	Value
Poisson's ratio μ	0.175
Convective heat transfer coefficient h	$2.5 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
Elasto-optical coefficient $p_{11} - p_{12}$	$-2.995 \times 10^{-13} m^2 \cdot N^{-1}$
Elasto-optical coefficient p_{44}	$-1.365 \times 10^{-12} m^2 \cdot N^{-1}$
Crystal length l	10 mm
Crystal thickness d	5 mm

3.2 BGO 晶体暂态温度场仿真结果

利用 COMSOL 软件进行仿真, 设置 BGO 晶体与周围环境的初始温度为 293.15 K, 仿真场景设定为晶体外界大气温度以 0.5 K/min 的速度持续上升, 升温时间持续 2 400 s, 直至大气温度升温到 313.15 K, 在 2 400 s 外界温度达到 313.15 K 后不再改变, 然后持续运行至 6 000 s。

在 2 400 s 时 BGO 晶体表面温度仿真图像如图 9(a), 内部温度仿真图像如图 9(b)。

从图 9 可以明显看出, 在外界温度持续变化时, 晶体各表面以及内部温度出现了明显的温度梯度, 说明晶体表面温度与内部光路温度存在明显差异, 验证了计算内部温度的必要性。

结合仿真结果对 2.2 节构建的 BGO 晶体暂态温度场解析表达式进行验证。选取 BGO 晶体表面中心点以及晶体中心点分别进行仿真计算和解析计算的温度比较, 结果如图 10。

从图 10 可以看出, 通过半解析法构建的 BGO 晶体暂态温度场模型式(13)、(14)与仿真计算结果非常吻合。表面中心点的温度相对误差在 0.015% 以内, 体中心点的温度相对误差基本在 0.02% 以内, 仅由于两段温度场的构建方法不同在状态转换点存在一定的相对误差阶跃。

为了验证理论模型建立的完整性, 额外设定一个外界温度下降的温度环境: 1) 外界温度以 0.75 K/min 的速度从 303.15 K 降低到 273.15 K; 2) 外界温度保持 273.15 K 持续 1 h。由于探究性质与升温情况的相似性, 以 BGO 体中心点的解析式与仿真计算结果为例进行说明, 如图 11。在状态转换温度处由于解析式的改变, 存在相对误差阶跃的情况下, 整个过程的相对误差稳定在 0.03% 以内, 解析式计算曲线与仿真计算曲线同样十分吻合。说明之前建立的 BGO 晶体在两种不同温度阶段下的暂态温度场模型式(13)、(14)也适用于外界温度下降的情况, 验证了该理论模型的正确性和完整性。后续仿真研究以升温情况为主进行论证说明。

用 BGO 晶体两个特殊位置点验证了 2.2 节构建的暂态温度场模型的正确性。考虑到虽然在外加电压影响下入射光线在晶体中会产生双折射, 但双折射角的数量级很小, 所以直接以晶体通光方向的中心轴线作为通光光路进行近似, 中心轴线如图 12(a), 并用中心轴线的模型计算结果与仿真结果对比验证暂态温度

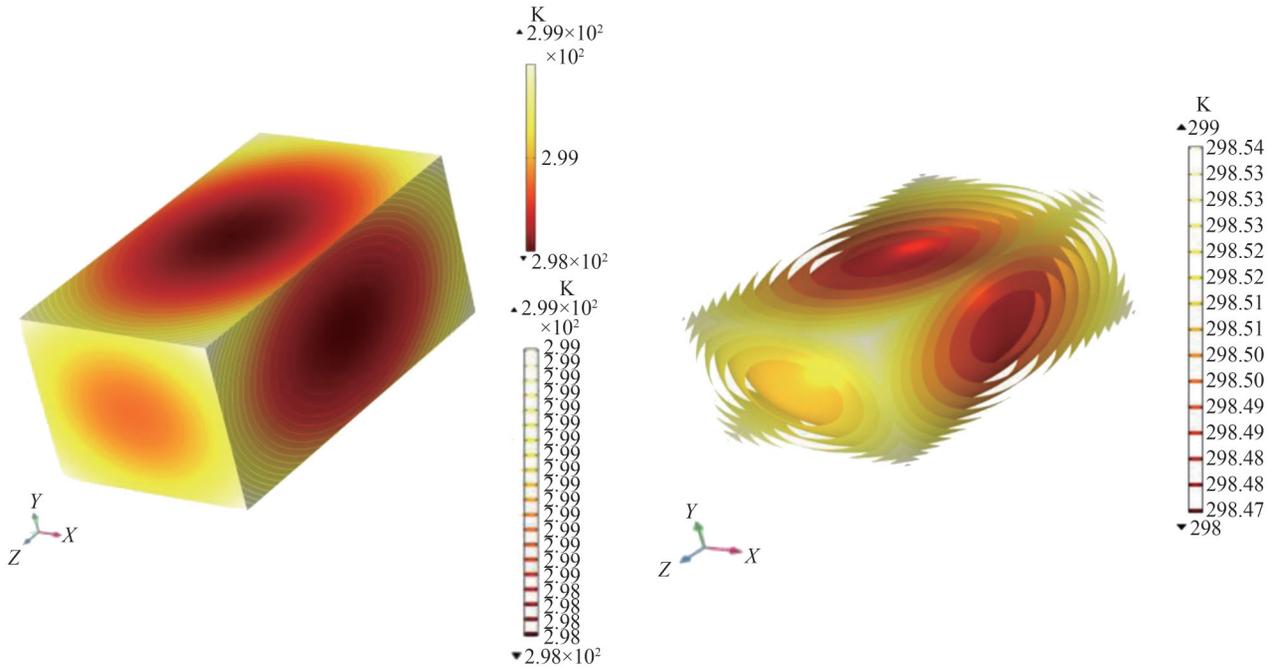


图9 BGO晶体温度场仿真

Fig. 9 Simulation of BGO crystal temperature field

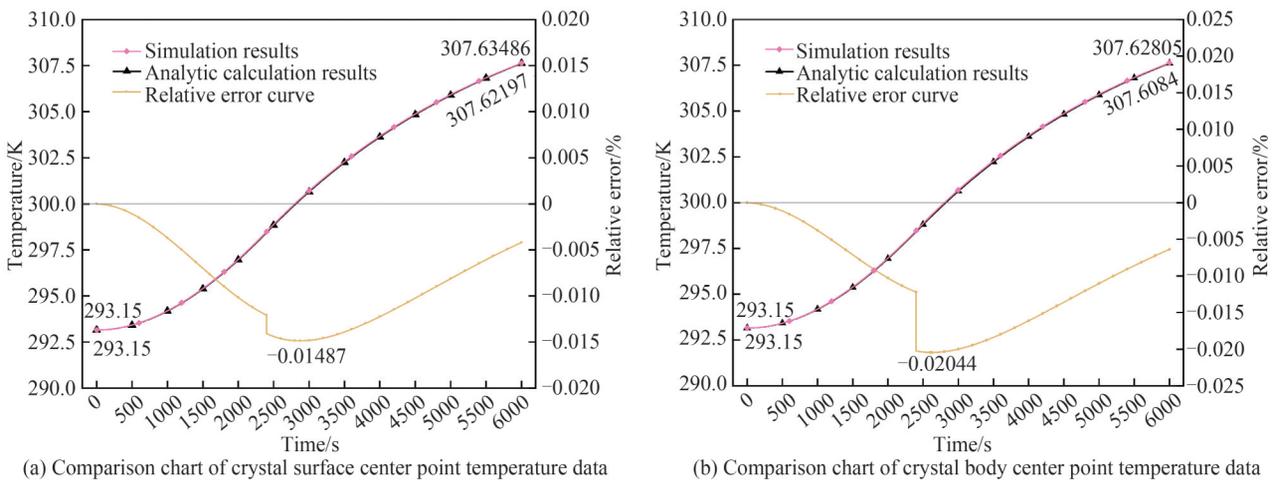


图10 BGO晶体面中心点、体中心点模型计算与仿真对比

Fig. 10 Model calculation and simulation comparison of BGO crystal face center point and body center point

场模型的正确性。整条光路上各个位置的温度与时间变化曲线如图12(b)。

从图12(b)可以看出晶体中心轴线上各点的时间变化趋势保持一致,从中选出两条特别的曲线分别投影到坐标面。其中一条是体中心点的温度-时间曲线,与图10(b)相吻合;另外一条是在状态转换温度时刻(2400 s)整条光路的温度分布图像,投影到温度-位置坐标面上可以明显看出呈边缘高、中间低的对称特性,符合热力学特征。图13展示了晶体通光方向中心轴线在3.2节设定的外界升温环境下的仿真计算结果与温度场模型计算结果的相对误差。

如图13,在升温期间,暂态温度场模型对BGO晶体中心轴线的温度计算结果与仿真结果十分吻合,相对误差控制在0.02%以内。综上,从仿真层面验证了2.2节建立的暂态温度场模型式(13)、(14)的正确性,为后续实验研究提供了理论基础。

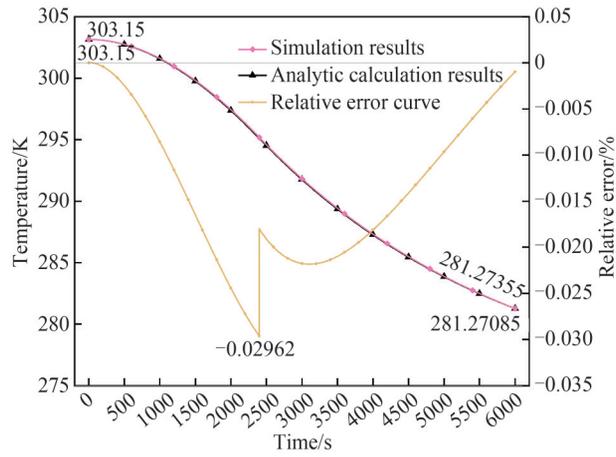
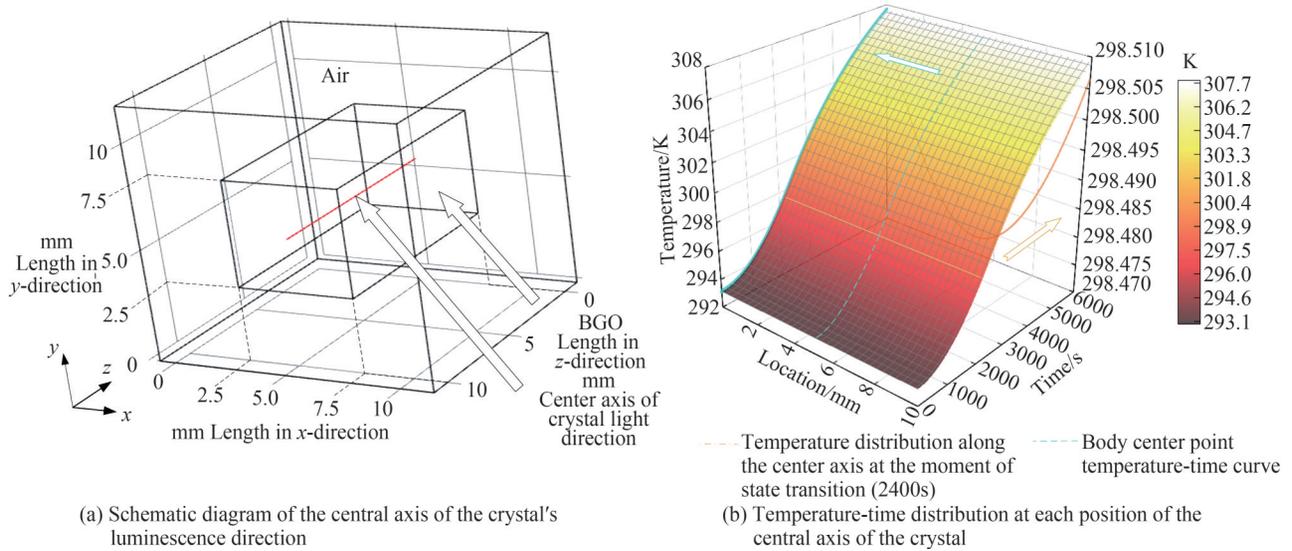


图 11 降温环境 BGO 体中心点模型计算与仿真对比

Fig. 11 Cooling environment BGO body center point model calculation and simulation comparison



(a) Schematic diagram of the central axis of the crystal's luminescence direction

(b) Temperature-time distribution at each position of the central axis of the crystal

图 12 BGO 晶体中心轴线各个位置温度-时间分布

Fig. 12 Temperature-time distribution at each position of the central axis of the BGO crystal

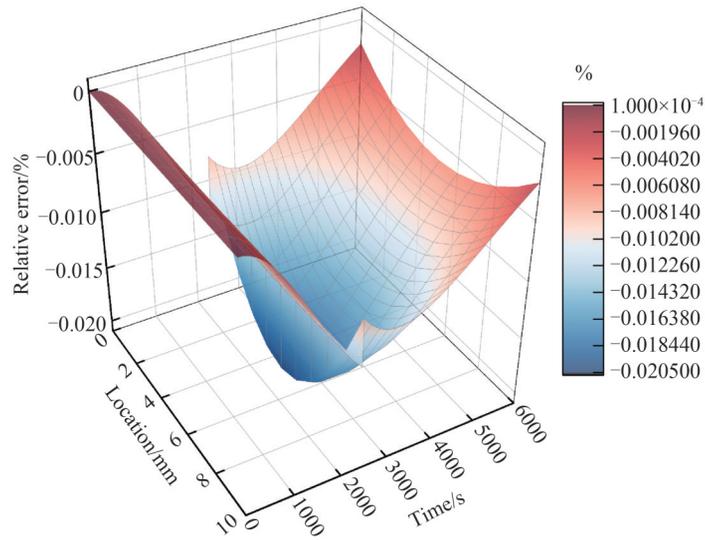


图 13 通光光路解析式与仿真相对误差

Fig. 13 The analytical formula of the through optical path and the relative error of the simulation

4 实验结果分析

本节主要在实验层面继续验证暂态温度场模型的正确性,并在此基础上使用晶体表面温度和传感器输出信号的测量数据,实现对晶体中心温度与初始温度下折射率 n_0 的状态估计,最后结合式(23)中传感器输出信号的高频分量 I_{ω} 计算被测电压 U 。

4.1 BGO晶体暂态温度场测量验证实验

将5 mm×5 mm×10 mm规格大小的BGO晶体传感单元置于温度控制箱内,设置温度控制箱温度为20℃并保持1 h,以充分保证BGO晶体的整体初始温度趋于一致。然后以0.5℃/min的速率从20℃升温至40℃,升温过程持续40 min左右,然后再将温度控制箱温度保持在40℃持续1h。期间使用荧光光纤测温仪以BGO晶体非通光方向表面中心点作为测温点,持续测量BGO晶体在不同阶段下的温度变化情况。采样间隔设置为1 s,测温时间持续100 min,将测温结果汇总整理,与温度场模型计算结果进行对比,如图14(a)。相对误差如图14(b)。

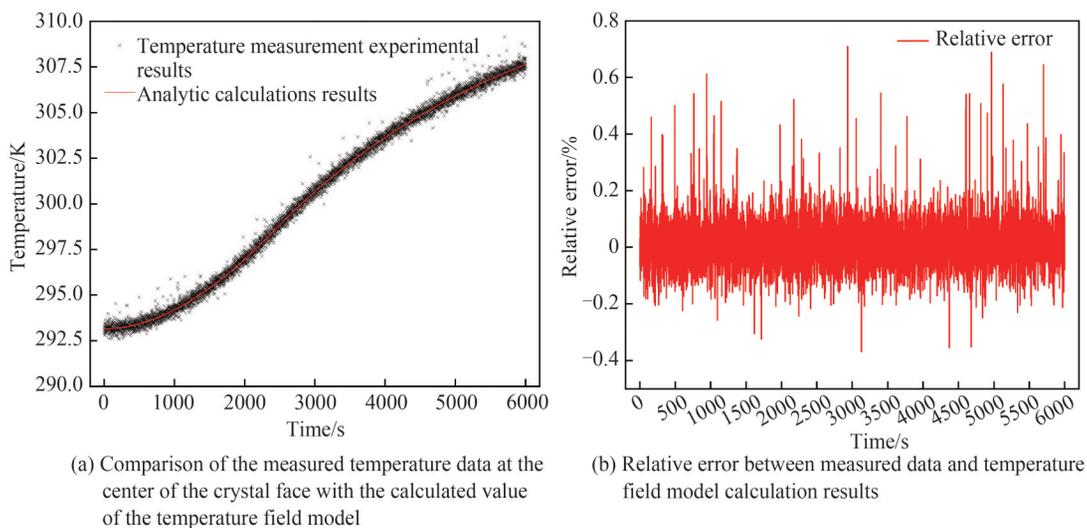


图14 晶体表面中心点温度实测数据与温度场模型计算值对比

Fig. 14 Comparison of the measured data of the temperature of the center point of the crystal surface and the calculated value of the temperature field model

将图14(a)与图12(a)进行对比,可以看出在3.2节设置的升温背景下,BGO晶体表面中心点温度的实验量测数据与仿真及温度场模型计算结果相吻合。晶体表面中心点在升温过程的量测数据与模型计算结果相对误差整体在0.2%以内,从实验层面证明了BGO晶体暂态温度场模型的正确性。

4.2 BGO晶体中心温度状态估计与分析

4.1节中的表面中心点温度测量数据在部分时间点与模型计算结果相对误差较大。考虑到由于人为因素、仪器振动等对测量过程产生的影响,晶体各处实际温度不可能与暂态温度场模型的计算结果完全相同,并且测量数据存在大量噪声。直接利用晶体表面中心点量测数据代入暂态温度场模型求解的中心温度与实际中心点温度会产生明显误差。此时采用卡尔曼滤波算法对测量数据进行处理,利用式(16)作为状态方程,式(18)作为量测方程,对晶体中心点温度进行状态估计。

图6的热路模型中需要对热容、热阻两个参数进行辨识。其中热容 $C=mc$, m 为BGO晶体质量, c 为晶体比热容;热阻与BGO晶体的导热系数与对流换热系数有关,不同的外界条件辨识结果不同。以3.2节设置的升温条件进行辨识,结果如表3。

表3 热路模型参数
Table 3 Thermal path model parameters

Parameters	Thermal resistance R	Thermal capacity C
Value	1 604.708 8	2.297 2

根据表3的热路模型参数对晶体体中心点温度进行状态估计,结果如图15。

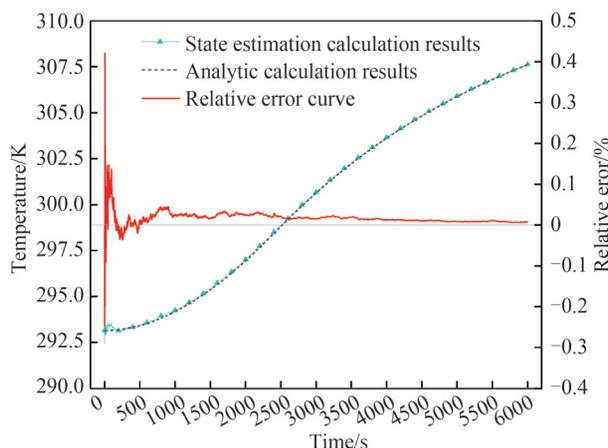


图15 BGO晶体内部温度估计结果

Fig. 15 BGO crystal internal temperature estimation result

由图15可知,在3.2节设置的升温情况下,晶体中心温度的状态估计结果与直接用暂态温度场模型对该情景模拟计算的结果相吻合,也避免了将量测数据直接代入暂态温度场模型计算中心温度造成的误差。以晶体中心温度的估计结果与初始温度作差得到温度变化量 ΔT 用于后续折射率参数的估计和电压的补偿计算。

4.3 晶体折射率估计与电压补偿实验

给OVS施加频率为50 Hz、幅值为3 kV的工频电压。传感单元输出的光信号经过光电探测器变成与光强成正比的电信号,如图16。经过数据采集卡变成数字信号后接入计算机并使用LabVIEW软件记录观察,数据采集卡的采样速率设定为10 kHz。

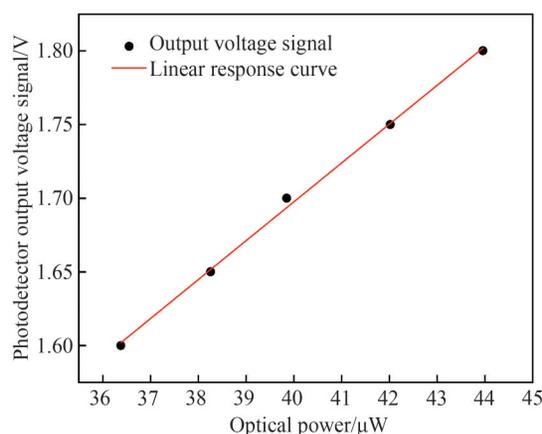


图16 光电探测器线性响应标定

Fig. 16 Photodetector linear response calibration

将传感器输出信号进行交直流分离,得到的低频、高频分量以及原始信号,如图17。

在3.2节设置[20 °C, 40 °C]升温背景下对图17进行分析。图17(a)展示了传感器输出信号波形,仅截取能显示具体波形的部分时间跨度,去噪后的正弦波形未出现明显失真。图17(b)展示了低频分量在整个实验区间的变化,其变化趋势与晶体内部温度变化趋势基本吻合,能够明显看出外界温度变化对输出信号低频分量的影响。而传感器输出信号高频分量在升温过程中仅略有波动。

将4.2节得到的温度变化量 ΔT 与图17(b)中低频分量的量测数据代入到式(23)构成折射率 n_0 的量测方程,利用CDKF算法对初始温度下的晶体折射率 n_0 进行估计,结果如图18。

从图18可以看出晶体折射率 n_0 在估计初期存在很大的波动,经分析是由于晶体内部温度的状态估计值在实验初期结果扰动过大导致。考虑到状态估计结果的波动,以实验后1 000 s稳定区间取平均值作为晶体

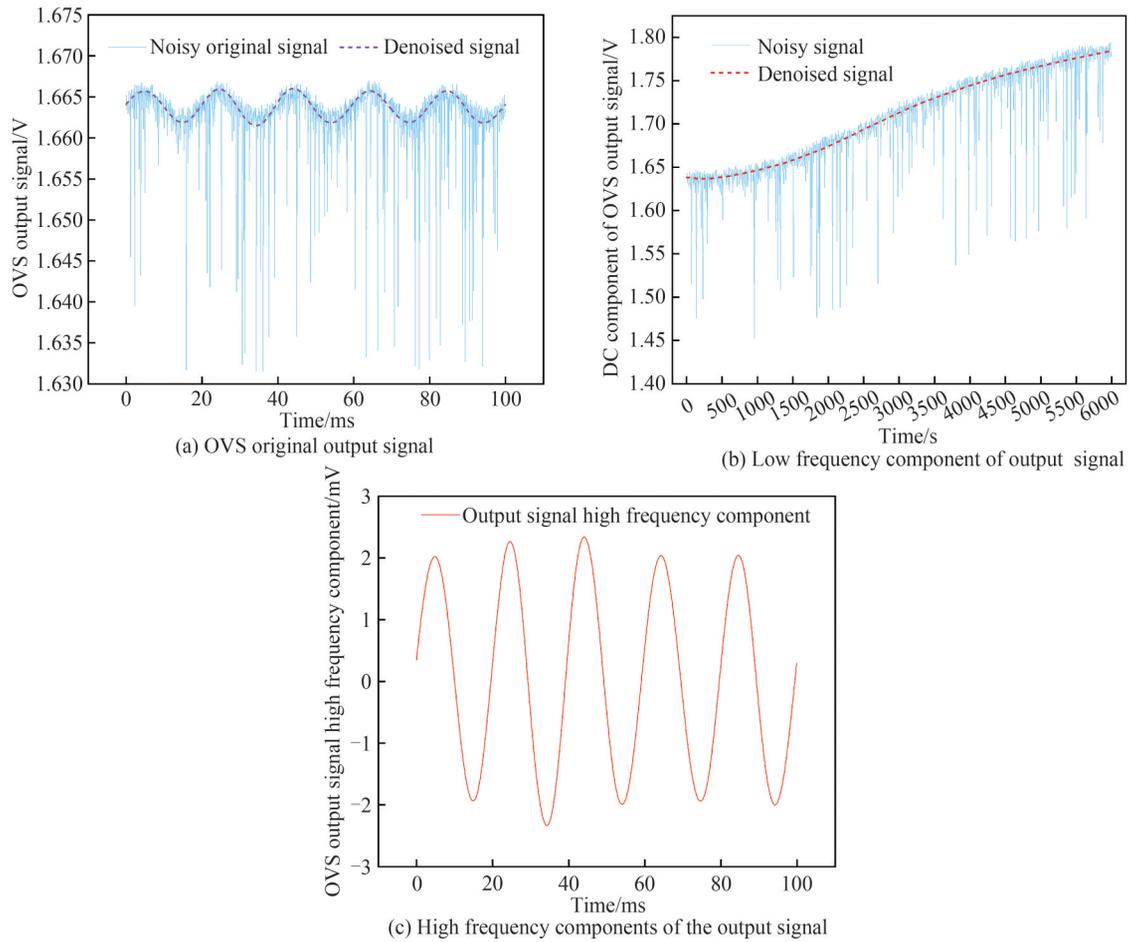


图 17 升温环境下传感器输出信号交直流分量

Fig. 17 The AC and DC components of the sensor output signal in a heating environment

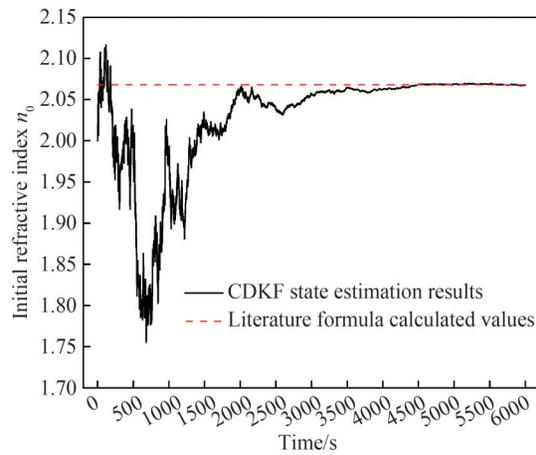


图 18 折射率 n_0 的 CDKF 估计结果

Fig. 18 CDKF estimation results for refractive index n_0

未加电场时的折射率 n_0 的状态估计结果。在初始温度为 293.15 K, 入射光波长为 850 nm 的情况下, n_0 的估计结果为 2.068 28, 与文献[26]中的计算结果相对偏差为 0.017 6 %。

最后将温度变化量 ΔT 、晶体折射率 n_0 及图 17(c) 中高频分量的量测数据代入式(23)中的高频分量计算公式, 得到补偿后的传感器测量电压 U 。在外加电压为 3 kV 的情况下, 补偿计算结果如表 4。

与同平台下的反向传播神经网络(Back Propagation Neural Network, BPNN)补偿方法进行比较, 结果如表 5。

表4 不同外界温度下电压补偿计算结果

Table 4 Calculation results of voltage compensation at different external temperatures

Temperature/°C	Compensation voltage /kV
20	2.984 4
25	2.989 8
30	3.014 4
35	2.990 1
40	3.011 1

表5 同平台下不同温度补偿方法相对误差比较

Table 5 Comparison of relative errors of different temperature compensation methods under the same platform

Temperature/°C	D-Kalman	BPNN
20	0.52%	0.96%
25	0.34%	0.79%
30	0.48%	0.66%
35	0.33%	0.82%
40	0.37%	0.91%

与文献[7]和文献[27]的补偿结果进行对比,结果如表6。

表6 不同平台不同温度补偿方法相对误差比较

Table 6 Comparison of relative errors of different temperature compensation methods for different platforms

Temperature range	Compensation methods	Compensation results
[20 °C, 40 °C]	D-Kalman	0.52%
[-10 °C, 50 °C]	Fresnel rhombic crystal	0.9%
[20 °C, 30 °C]	Reciprocal optical path	1.53%

由表5可知, BPNN补偿方法在[20 °C, 40 °C]范围内最大相对误差为0.96%。相比之下,在同平台下所提出的温度补偿方法可以更大程度上减小温度漂移对传感器测量产生的影响。由表6可知,相比于文献[7]和[27],本文提出的温度补偿方法补偿结果更优。但考虑到不同实验平台实验条件和装置精度的不同,不应该对其中某种方法进行全盘否定,同时考虑到文献[7]、[27]提出的更偏向于硬件补偿方法,而本文更偏向于软件补偿方法,互相借鉴能有更大的研究空间。

4.4 OVS温度补偿实验平台展示

为了研究光学电压传感器中BGO晶体的暂态温度场以及进行被测电压温度补偿实验,搭建了传感器温度实验平台,如图19。实验平台包括电路与光路通道、一台可编程温控箱、一台电源控制箱、一台荧光光

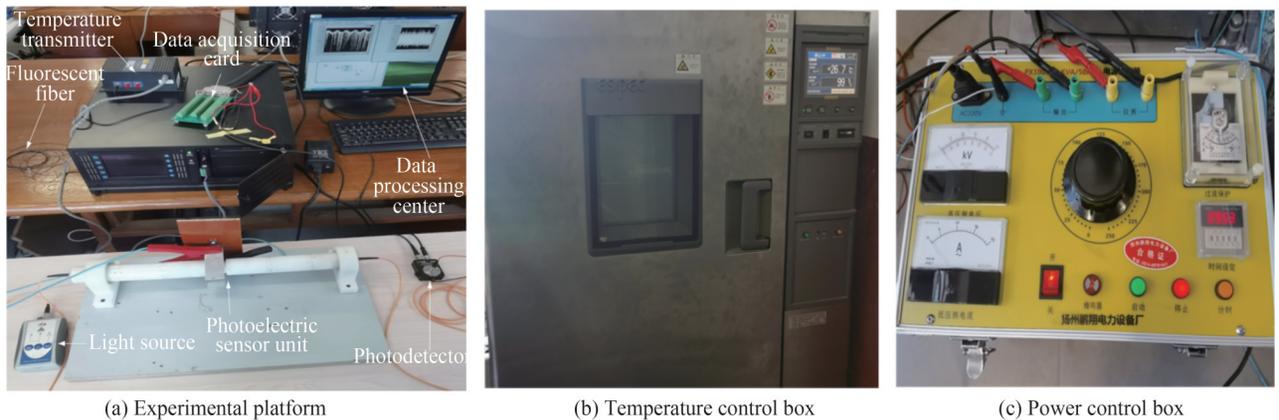


图19 光学电压传感器温度补偿实验平台设备

Fig. 19 Optical voltage sensor temperature compensation experimental platform equipment

纤测温装置、一台高频变压器以及光电传感单元。通过光纤和导线分别连接光学电压传感器的光信号回路与电信号回路,通过荧光光纤测温仪对BGO晶体非透光方向表面中心点进行温度测量,构成测温回路。

图19显示了光学电压传感器温度补偿实验平台的主要设备与部分连接情况,为了更加形象直观地展示整个实验平台,绘制了平台完整组装后的连接原理图,如图20。

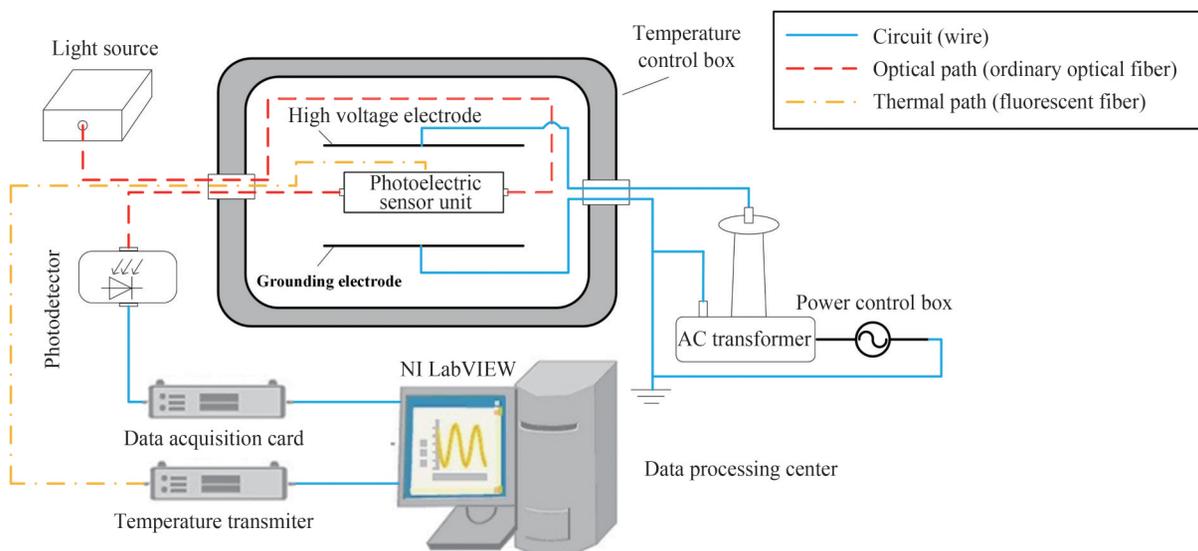


图20 光学电压传感器温度补偿实验平台连接原理

Fig. 20 Optical voltage sensor temperature compensation experiment platform connection schematic

实验设备具体型号如表7。

表7 实验设备型号

Table 7 Experimental equipment model

Equipment	Manufacturer	Model
Light source	FIBKEY	6 900 Series Handheld Light Source
Photodetector	THORLABS	PDA36A2
High frequency transformer	Yangzhou Pengxiang Electric Power Equipment Factory	PX1007
Fluorescent fiber thermometer	INDIGO	FOTS-DINA-7060-N

5 结论

在得到相位延迟 δ 的基础上,引入温度变化量 ΔT 进行修正。首先从理论上推导了BGO晶体的暂态温度场模型,然后利用KF实现对晶体中心温度的状态估计,从而得到温度变化量的准确数据,再利用CDKF实现对初始温度下晶体折射率 n_0 的状态估计。最后将这两个修正参数代入传感器输出信号高频分量 I_o 计算被测电压,实现温度补偿。

为验证理论分析的正确性,在温度响应特性实验平台基础上增加了测温回路并进行实验。实验结果表明,外界温度在 $[20\text{ }^\circ\text{C}, 40\text{ }^\circ\text{C}]$ 范围内以 $0.5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升高,暂态温度场模型计算结果与实验测量温度的误差在 0.2% 以内,与仿真结果的误差在 0.02% 以内。而补偿后的被测电压与标定电压的相对误差小于 0.52% ,补偿效果优于同平台下BPNN补偿方法以及不同平台下的多种补偿方法。证明提出的基于温度场与双卡尔曼滤波参数估计的温度补偿方法在光学电压传感器温度补偿方面具有一定的应用价值。但在研究过程中没有考虑光源的波动性以及光在晶体中的能量损耗,还需进行更进一步的研究。

参考文献

- [1] WANG Pengya. Analysis of the research status of optical voltage transformers[J]. Communication Power Technology, 2018, 35(7): 33-36.
王鹏雅. 光学电压传感器研究现状分析[J]. 通信电源技术, 2018, 35(7): 33-36.
- [2] KUMADA A, HIDAKA K. Directly high-voltage measuring system based on pockels effect[J]. IEEE Transactions on

- Power Delivery, 2013, 28(3):1306-1313.
- [3] SHI Zhaomin, ZHANG Jiangtao, PAN Xianlin, et al. Analysis of key parameters of ultra-low frequency voltage AC-DC conversion[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 82-89.
石照民, 张江涛, 潘仙林, 等. 超低频电压交直流转换关键参数分析[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 82-89.
- [4] TAN Qiao, XU Qifeng, XIE Nan. Research status of optical voltage transformers[J]. Journal of Soochow University, 2014, 29(2): 36-43.
谭巧, 徐启峰, 谢楠. 光学电压传感器的研究现状[J]. 苏州大学学报, 2014, 29(2): 36-43.
- [5] HUANG Lisheng, MA Shanjun, XU Canhua, et al. Optical voltage transformer polarized interferometry mode (1) analysis of the limitations of common polarized interferometry modes[J]. Power system automation, 2014, 38(2): 97-101, 114.
黄荔生, 马善军, 许灿华, 等. 光学电压传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.
- [6] XU Qifeng, HUANG Yifan, XIE Nan, et al. Linear optical voltage transformer based on bar aluminum metal polarized grating[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2021, 41(7): 2556-2565.
徐启峰, 黄奕帆, 谢楠, 等. 基于条形铝金属偏振光栅实现的线性光学电压传感器[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2556-2565.
- [7] ZHOU Yang, WANG Liming, WANG Teng, et al. Research on the optical path of optical voltage sensor reciprocity[J]. Journal of Instrumentation, 2021, 42(7): 81-88.
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.
- [8] SIMA Wenxia, HAN Rui, YANG Qing, et al. Dual crystal temperature compensated non-contact optical overvoltage sensor[J]. High Voltage Technology, 2018, 44(11): 3465-3473.
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.
- [9] HUANG Yuehua, CHEN Jindi, LI Zhenhua. Performance analysis of optical voltage transformer based on coaxial capacitor voltage divider[J]. Grid Technology, 2016, 40(8): 2570-2578.
黄悦华, 陈锦地, 李振华. 基于同轴电容分压的光学电压传感器性能分析[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2570-2578.
- [10] XIAO Zhihong, YU Wenbin, ZHANG Guoqing, et al. A method for improving the temperature stability of optical voltage sensors[J]. Journal of Electrotechnical Technology, 2015, 30(4): 106-112.
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.
- [11] LI Y S, GAO L, WAN J, et al. Optical DC electric field sensing based on Pockels effect using bismuth germanate crystals[J]. Applied Optics, 2020, 59(21):6237-6244.
- [12] CHEN Shengshuo, HU Jiexiang, LI Zhi, et al. Analysis and experimental research on the temperature response characteristics of optical voltage sensors [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 169-178.
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.
- [13] YAN Yuntao. Research on the temperature characteristics of optical fiber voltage transformers [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
延云涛. 光纤电压传感器温度特性的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [14] PAN Xiaorui, LI Long, GENG Yingge, et al. Thermal analysis of LD end-pumped Nd: YAG laser with class III boundary conditions[J]. Laser and Infrared, 2019, 49(6):697-701.
潘晓瑞, 李隆, 耿鹰鸽, 等. 第三类边界条件LD端面泵浦Nd: YAG激光器热分析[J]. 激光与红外, 2019, 49(6): 697-701.
- [15] LIU Yanbing, YU Chunyu, LI Hongbin. Electronic transformer principle, technology and application [M]. Beijing: Science Press, 2009: 105-120.
刘延冰, 余春雨, 李红斌. 电子式互感器原理、技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 105-120.
- [16] LI Kaicheng, YE Miaoyuan, ZHAN Qionghua, et al. The influence of electro-optical crystals on measurement accuracy in optical fiber voltage transformers[J]. Photoelectric Engineering, 2000, 27(4): 67-71.
李开成, 叶妙元, 詹琼华, 等. 光纤电压传感器中电光晶体对测量精度的影响[J]. 光电工程, 2000, 27(4): 67-71.
- [17] SHI Peng, CHANG Rui, CHEN Wen, et al. Effect of Type III thermal boundary conditions on the thermal effect of laser crystals[J]. Journal of Photonics, 2009, 38(10): 2539-2542.
史彭, 常锐, 陈文, 等. 第三类热边界条件对激光晶体热效应的影响[J]. 光子学报, 2009, 38(10): 2539-2542.
- [18] ZHANG Ximin, ZHU Tong, AN Qingsong, et al. Heat transfer. 6th edition [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2014: 58-75.
章熙民, 朱彤, 安青松, 等. 传热学. 第6版[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 58-75.
- [19] LI Yuan, WANG Chen, ZHANG Guanjun. A migration analogy study of heat transfer and electrical problems: (2) engineering practice [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(9): 1-8.

- 李元,王晨,张冠军.传热学与电学问题的迁移类比研究:(2)工程实践[J].西安交通大学学报,2021,55(9):1-8.
- [20] XIONG Rui, LI Xinggang. Internal temperature estimation of power battery based on dual Kalman filtering algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(14): 146-151.
- 熊瑞,李幸港.基于双卡尔曼滤波算法的动力电池内部温度估计[J].机械工程学报,2020,56(14):146-151.
- [21] LI Jiang, WANG Yiwei, WEI Chao, et al. Review of the application of Kalman filtering theory in power systems[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 135-144.
- 李江,王义伟,魏超,等.卡尔曼滤波理论在电力系统中的应用综述[J].电力系统保护与控制,2014,42(6):135-144.
- [22] XI T G, FEI Y, LEUNG W P, et al. Thermal properties of bismuth germanate $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ [J]. Journal of Materials Science Letters, 1989,8:1317-1319.
- [23] DONG Zexing. Research on environmentally insensitive optical voltage sensors based on ground potential crystal compensation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- 董泽兴.基于地电位晶体补偿的环境不敏感性光学电压传感器研究[D].武汉:华中科技大学,2016.
- [24] ETTORE M, PIERO R, FULVIO R, et al. Anelastic and elastic properties of a synthetic monocrystal of bismuth germanate $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ at low temperatures-ScienceDirect [J]. Journal of Alloys and Compounds, 1994, 211-212 (1) : 640-643.
- [25] WILLIAMS P A, ROSE A H, DAY G W, et al. Optical, thermo-optic, electro-optic, and photoelastic properties of bismuth germanate ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)[J]. Applied Optics, 1996, 35(19): 3562-3569.
- [26] JR G, AULUCK S, SINGH D J, et al. Optical properties of bismuth germanate[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(1): 42-66.
- [27] LI C, ZENG R. Optical voltage sensor using Fresnel rhomb $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ crystal[C]. Photonics Asia,2014,14(1): 79-84.

Temperature Compensation Method for Optical Voltage Sensing Based on Temperature Field and D-Kalman Parameter Estimation

CHEN Shengshuo, LI Yansong, CHEN Dongxu, KANG Shijia, XU Zhiguang, LIU Jun
(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Optical voltage sensors based on electro-optical materials have many advantages such as wide measurement band, fast response and small size, which can realize the non-contact measurement of grid voltage, and how to improve the measurement accuracy of optical voltage sensors has become an urgent problem. Temperature stability has become one of the important factors affecting the measurement accuracy of optical voltage sensors. When considering the effect of temperature on the sensing unit electro-optical crystal, two problems are faced: first, there is a temperature gradient in the electro-optical crystal when the temperature changes, resulting in unequal temperature between the crystal surface and the internal optical path; second, the physical parameters of the crystal are also affected by the temperature. Therefore, the bismuth germanate crystal is used as the research object in this paper, and the output response equation of the optical voltage sensor under multi-physics field is analyzed in combination with the previously derived one. In the output response equation, it is concluded that the temperature drift is a low-frequency component and the applied voltage is a high-frequency component, so that the output signal of the sensor is separated from the AC signals and DC signals. However, after adding the temperature variation parameter to the output response equation, the correction result shows that the temperature variation parameter and the refractive index parameter of the crystal affected by temperature also exist in the high-frequency component, so it is necessary to estimate the states of these two parameters. Considering that electro-optical crystals are optical materials, the internal temperature can not be measured directly by destroying the crystal, so it is necessary to establish a relationship between the surface temperature and the internal temperature to calculate the internal temperature indirectly. A semi-analytic method is first used to establish the crystal transient temperature field model, and the direct substitution of the measured surface temperature data to obtain the internal temperature will introduce a large amount of noise error, so the state estimation of the internal temperature of the crystal is realized by Kalman filtering. The refractive index parameters of the crystal queried through the literature are limited by light wavelength or temperature and can not be adapted to the time-varying environment. Therefore, the crystal refractive index at initial

temperature is estimated by the central differential Kalman filter combined with the low frequency component of the sensor output signal. Finally, the compensation voltage is calculated by substituting the correction parameters into the high-frequency component of the sensor output signal. In summary, a temperature compensation method based on temperature field and dual Kalman filter parameter estimation is proposed. The experimental results show that the simulation accuracy of the transient temperature field resolution formula is within 0.02% and the experimental measurement accuracy is about 0.2% under the environment where the sensor is exposed to an external temperature of [20 °C, 40 °C] at a heating rate of 0.5 °C/min, which verifies the correctness of the transient temperature field model construction. The relative error of the refractive index parameters of the crystal obtained by the central differential Kalman filter is 0.017 6% compared with the calculated results in the literature. The accuracy of the output voltage measurement is better than 0.52% using two correction parameters to compensate. The method improves the sensor measurement accuracy compared with the temperature compensation effect of the Back Propagation Neural Network under the same platform and the temperature compensation effect in the relevant literature.

Key words: Optical voltage sensor; Temperature stability; Transient temperature field; Kalman filter; Center differential Kalman filter

OCIS Codes: 120.3930; 230.2090; 120.4640; 120.6810