

DOI: 10.13382/j.jemi.B2206085

光学电压传感器温度响应特性分析与实验研究*

陈胜硕¹ 胡杰祥¹ 李志² 康世佳¹ 李岩松¹ 刘君¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院 北京 102206; 2. 国网福建省电力有限公司福州供电公司 福州 350009)

摘要:光学电压传感器面临温度稳定性问题。本文以BGO晶体的Pockels效应模型为基础,结合热光效应等推导出光学电压传感器在多物理场作用下的温度响应模型,并对输出信号进行频谱分析,得到温度对传感器输出的影响规律,即由温度引起的输出漂移属于低频分量。在卡尔曼滤波降噪的基础上,提出了一种基于频谱分析的高通滤波温度补偿方法,通过滤除低频分量提高温度稳定性,并进行标定实验和温度响应特性实验。实验结果表明,传感器在[0℃, 50℃]温度范围内输出电压测量精度优于±1.79%,与同平台下BP神经网络温度补偿方法进行对比,该方法易于实现且有效地抑制了温度漂移的影响。

关键词:光学电压传感器;温度稳定性;高通滤波;Pockels效应;热光效应

中图分类号: TN98; TM933 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Analysis and experimental study on temperature response characteristics of optical voltage sensor

Chen Shengshuo¹ Hu Jiexiang¹ Li Zhi² Kang Shijia¹ Li Yansong¹ Liu Jun¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou Power Supply Company, Fuzhou 350009, China)

Abstract: Optical voltage sensors face the problem of temperature stability. Based on the Pockels effect model of BGO crystal and the thermo-optic effect and so on, the temperature response model of the optical voltage sensor under the action of multi-physical fields is derived and the spectrum analysis of the output signal is carried out to obtain the effect law of temperature on the output of the sensor, i. e., the output drift caused by temperature belongs to the low frequency component. Based on the Kalman filtering noise reduction, a high-pass filtering temperature compensation method based on spectral analysis is proposed to improve the temperature stability by filtering out the low frequency components, and calibration experiments and temperature response characteristics are conducted. The experimental results show that the accuracy of the output voltage measurement is better than ±1.79% in the temperature range of [0℃, 50℃], and the method is easy to implement and effectively suppresses the influence of temperature drift when compared with the BP neural network temperature compensation method in the same platform.

Keywords: optical voltage sensor; temperature stability; high-pass filtering; Pockels effect; thermo-optic effect

0 引言

近年来,先进的传感技术和量测设备是新一代电力系统可靠、高效、稳定运行的重要保障^[1-2]。

目前,在电力系统中应用最为广泛的电压测量设备为运行可靠性较好的电磁式电压互感器和电容式电压互感器。然而,传统电压测量设备存在体积大、造价高、测

量频带窄、铁磁谐振、磁路饱和等固有缺点,影响电网高效及安全运行^[3]。此外,挂网运行的传统电压互感器采用接触式测量方式,导致安装成本高、维护难度大^[4]。因此,为适应新一代电力系统的发展需求,非接触式电压测量设备及技术已成为当前电压传感领域的重要研究方向。

基于电光材料的光学电压传感器具备测量频带宽、响应快、体积小等众多优点,同时能够实现对电网电压的

收稿日期: 2022-12-06 Received Date: 2022-12-06

* 基金项目: 国家自然科学基金(51277066)项目资助

非接触式测量,目前已经在电力系统中得到应用^[5-7],例如法国的 Areva 和瑞士的 ABB 公司均已生产光学电压传感设备并挂网运行^[4],我国江苏省常熟南变电站已投入运行由南瑞航天公司生产的光学电压传感器^[7]。

近年来,国内外学者针对光学电压传感器进行了大量的研究工作。文献[8]提出了一种非接触式光学电压传感器,基于电光材料实现对高压输电线路的非接触感应。文献[9]提出了一种集成式光学电压传感器,并针对传感器的响应时间常数、幅频响应特性等指标进行了测试。本课题组在文献[10-11]中采用透射式横向调制结构的光路系统,设计了一种基于 Pockels 效应的旋转式光学电压传感器,实现对电压的非接触式测量。然而上述研究忽略了温度对光学电压传感器的影响,由于电光材料均存在热光效应、热膨胀效应^[12],环境温度变化会改变电光材料的折射率,从而导致电光材料产生干扰相位延迟量,最终引起光学电压传感器输出漂移^[13-15]。因此,如何解决光学电压传感器中存在的温度稳定性问题是光电传感领域一大挑战。

光学电压传感器的本质是被测电压作用下电光材料的折射率发生改变,使得通过电光材料的偏振光被电压调制。为改善光学电压传感器的温度稳定性,文献[16]引入双光路补偿法,其中一条光路的输出信号与激励场强为已知量,从而测算传感器温度漂移误差,实现对测量光路进行动态温度补偿。文献[17]设计一种双晶体补偿型光学电压传感器,利用两块尺寸一致的铌酸锂晶体构成双晶体补偿结构消除干扰双折射,从而消除由温度引起干扰相位延迟。上述文献采用的方法分别为双光路补偿法、双晶体补偿法,除此之外还有温控法、软件补偿法、硬件补偿法等^[18-19]。上述研究通过应用不同的传感结构对传感器温度稳定性进行了一定程度的提升,但在传感器的温度响应特性方面鲜有研究,难以为进一步改善传感器的温度稳定性提供参考和依据。

综上,为进一步研究光学电压传感器温度特性,本文以横向调制型光学电压传感器为研究对象,着重分析传感器的温度响应特性,从传感器响应曲线幅频特性的角度,揭示由温度引起的误差偏移量的所在频带,为设计信号处理电路提供依据,减小温度漂移带来的影响。为验证理论分析正确性,搭建光学电压传感器温度特性实验平台并进行实验研究,实验结果为光学电场传感器的实际应用提供重要参考。

1 光学电压传感器工作原理

1.1 调制方式

根据被测电压方向与光路方向之间为垂直或平行的关系,光学电压传感器分为横向调制结构和纵向调制结

构,其结构如图 1 所示。两种调制方式各有优劣,横向调制型光学电压传感器制作成本低,但其测量精度易受电场边缘效应的影响;纵向调制型光学电压传感器测量精度不受电场边缘效应的影响,但其制作成本高,加工复杂,且面临绝缘问题。目前,横向调制型光学电压传感器的应用较为广泛。

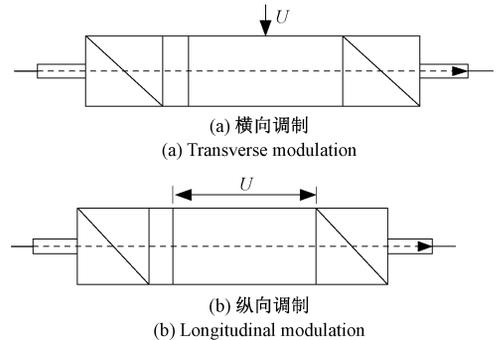


图 1 光学电压传感器结构示意图

Fig. 1 Optical voltage sensor structure schematic

1.2 基本原理

以横向调制型光学电压传感器为例,其结构示意图如图 2 所示,主要由光源、电光晶体传感单元、光电探测器、数据采集卡、信号处理系统等组成。在实际应用中,被测电压被施加于电光晶体传感单元两侧的金属极板上,在极板间电场作用下,电光晶体(如 BGO 晶体、LiNbO3 晶体等)由各向同性晶体变为各向异性,由光源发出的光射入电光晶体传感单元之后产生相位延迟,该相位延迟包含被测电压信息。相位延迟 δ_0 与被测电压的关系为:

$$\delta_0 = kEl = k \frac{l}{d} U \quad (1)$$

式中: $k = (2\pi/\lambda)n_0^3\gamma_{41}$, λ 为光波波长, n_0 是晶体的折射率, γ_{41} 是电光系数, E 为电场强度, l 为晶体通光距离, d 为极板间距, U 为被测电压。

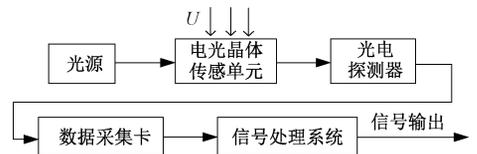


图 2 横向调制光学电压传感器系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the structure of the transverse modulated optical voltage sensor system

由式(1)可见,通过检测相位延迟 δ_0 ,就能获得被测电压值。但实际上相位延迟量难以直接测量,通常采用偏光干涉法将相位延迟转换为光强,通过测量光强求得被测电压强度。所测光强与被测电压之间的关系为^[11]:

$$I_o = \frac{I_i}{2}[1 + \sin\delta_0] = \frac{I_i}{2}[1 + \sin(klU/d)] \quad (2)$$

式中: I_i 为输入光强, I_o 为输出光强。实际应用中, 通常将上述模型线性化, 即取 $\sin\delta_0 \approx \delta_0$, 式(2)变为:

$$I_o \approx \frac{I_i}{2}[1 + \delta_0] \quad (3)$$

式(3)所描述的线性化模型产生的误差 e 为:

$$e = \left| \frac{\delta_0 - \sin\delta_0}{\delta_0} \right| \times 100\% \quad (4)$$

2 温度场等作用下光学电压传感器输出模型

2.1 基于 BGO 晶体的 Pockels 效应模型

BGO 晶体在无外加电场时表现为各向同性, 在晶体主轴坐标系 $[X, Y, Z]$ 中其折射率椭球方程为:

$$\beta_0 X^2 + \beta_0 Y^2 + \beta_0 Z^2 = 1 \quad (5)$$

其中, $\beta_0 = 1/n_0^2$, n_0 表示晶体折射率。有外加电场 \mathbf{E} 作用时, BGO 晶体的电光系数矩阵为:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{41} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{41} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{41} \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中, γ_{41} 为 BGO 晶体线性电光系数, 设 E_x, E_y, E_z 为电场强度矢量 \mathbf{E} 在 BGO 晶体各主轴上的分量, 则在外界电场作用下 BGO 晶体光率体方程为:

$$\beta_0 X^2 + \beta_0 Y^2 + \beta_0 Z^2 + 2\gamma_{41} E_x YZ + 2\gamma_{41} E_y ZX + 2\gamma_{41} E_z XY = 1 \quad (7)$$

为便于求解通光方向上的晶体折射率, 建立坐标系 $[x, y, z]$, 与原坐标系 $[X, Y, Z]$ 关系如图 3 所示。其中 X 轴、 Y 轴分别与 y 轴、 z 轴成 45° , Z 轴与 x 轴重合。

坐标系 $[x, y, z]$ 与 $[X, Y, Z]$ 的转换关系为:

$$(X, Y, Z)^T = \mathbf{T}(x, y, z)^T \quad (8)$$

$$\text{式中: } \mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}。$$

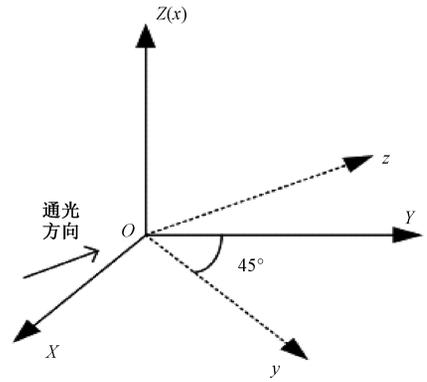


图3 $[x, y, z]$ 与 $[X, Y, Z]$ 两坐标系空间关系图

Fig. 3 Spatial diagram of the two coordinate systems $[x, y, z]$ and $[X, Y, Z]$

由于 z 轴为通光方向, 令 $z = 0$, 同时在实际应用中令电场方向与 Z 轴重合, 即 $E_x = E_y = 0, \mathbf{E} = E_z$, 结合式(7)、(8)可得在 $[x, y, z]$ 坐标系中光率体方程为:

$$\beta_0 x^2 + (\beta_0 + \gamma_{41} \mathbf{E}) y^2 = 1 \quad (9)$$

所以 BGO 晶体在 x, y 方向上的折射率为:

$$\begin{cases} n_x = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 \Delta\beta_1 = n_0 \\ n_y = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 \Delta\beta_2 = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{41} \mathbf{E} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可得两束偏振光分别沿 x 轴、 y 轴方向振动的偏振光在晶体内部沿着 z 轴传播 l 距离后, 产生的相位差增量 δ 为:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_x - n_y) l = \frac{\pi n_0^3 \gamma_{41} \mathbf{E} l}{\lambda} = \frac{\pi n_0^3 \gamma_{41} l U}{\lambda d} \quad (11)$$

2.2 多物理场下光学电压传感器输出模型推导

光学电压传感器实际运行过程中, 同时受到电场、温度场、应力场的作用。由于电光材料均存在热光效应、弹光效应, 两者都会导致电光材料产生干扰相变量, 从而引起光学电压传感器的温度偏移。其中, BGO 晶体的热光系数矩阵 \mathbf{b} 为:

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{11} & 0 \\ 0 & 0 & b_{11} \end{pmatrix} \quad (12)$$

若 BGO 晶体所处环境温度变化 ΔT , 则晶体在热光效应下的逆介电张量变化量为:

$$\Delta\mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{11} & 0 \\ 0 & 0 & b_{11} \end{pmatrix} \cdot \Delta T \quad (13)$$

而 BGO 晶体的弹光系数矩阵 \mathbf{p} 为:

$$p = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{pmatrix} \quad (14)$$

其中, p_{11} 、 p_{12} 、 p_{44} 为 BGO 晶体弹光系数, 晶体所处环境温度变化量同样设为 ΔT , 因温度变化产生的热应力为 σ , 其值 σ_0 与 ΔT 之间的关系为:

$$\sigma_0 = K(B, \mu, \alpha) \times \Delta T \quad (15)$$

其中, B 为 BGO 晶体弹性模量, μ 为泊松比, α 为 BGO 晶体热膨胀系数, K 是由 B , μ 和 α 共同决定的常数。

BGO 晶体在热应力作用下的逆介电张量变化量为:

$$\Delta\beta' = p \times \sigma \quad (16)$$

当外界温度变化时, 晶体会发生形变, 若晶体在某一方向上的形变不受约束, 则在该方向不存在热应力。旋转式光学电压传感器传感部分设计如图 4 所示^[11]。

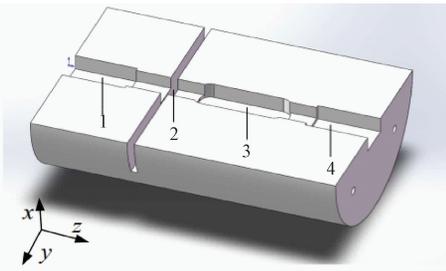


图 4 旋转式光学电压传感器传感单元剖面图 (1-起偏器, 2-1/4 波片, 3-BGO 晶体, 4-检偏器)

Fig. 4 Cross-sectional view of the sensing unit of the rotary optical voltage sensor (1-polarizer, 2-1/4 wave plate, 3-BGO crystal, 4-polarizer)

如图 4 所示, 为便于安装, 晶体槽位在通光方向上的长度长于晶体长度, 所以沿 z 轴方向没有约束, 热应力为 0。在与通光方向相垂直的方向上晶体紧贴仪器内壁, 所以 x, y 方向上均存在热应力。因此在 $[x, y, z]$ 坐标系中, 晶体所受热应力为:

$$\sigma_{xyz} = (\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T \quad (17)$$

其中, $\sigma_1 = \sigma_2$, 令 $\sigma_1 = \sigma_2 = 2\sigma$, 转换至主轴坐标系 $[X, Y, Z]$ 中, 可以得到:

$$\sigma_{xyz} = (\sigma \quad \sigma \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \sigma)^T \quad (18)$$

根据式(13)、(14)、(16)、(18)可以得到, 在温度场和应力场的共同作用下, BGO 晶体的逆介电张量变化量为:

$$\Delta\beta = \Delta\beta + \Delta\beta' = b\Delta T + p \times \sigma = \begin{pmatrix} b_{11}\Delta T + (p_{11} + p_{12})\sigma \\ b_{11}\Delta T + (p_{11} + p_{12})\sigma \\ b_{11}\Delta T + 2p_{12}\sigma \\ 0 \\ 0 \\ p_{44}\sigma \end{pmatrix} \quad (19)$$

根据式(6)、(19)可以求得在 $[x, y, z]$ 坐标系下 BGO 晶体的折射率椭球方程为:

$$(\beta_0 + 2p_{12}\sigma)x^2 + [\beta_0 + (p_{11} + p_{12} + p_{44})\sigma + \gamma_{41}E]y^2 + [\beta_0 + (p_{11} + p_{12} + p_{44})\sigma - \gamma_{41}E]z^2 = 1 \quad (20)$$

所以 BGO 晶体在 x, y 方向的折射率为:

$$\begin{cases} n_x = n_0 - \frac{1}{2}n_0^3\Delta\beta_1 = n_0 - n_0^3p_{12}\sigma \\ n_y = n_0 - \frac{1}{2}n_0^3\Delta\beta_2 = \\ n_0 - \frac{1}{2}n_0^3[(p_{11} + p_{12} + p_{44})\sigma + \gamma_{41}E] \end{cases} \quad (21)$$

由式(20)可得在电场、温度场、应力场的作用下, 偏振光在晶体内部沿着 z 轴传播 l 距离后产生的总相位差 δ_T 为:

$$\delta_T = \frac{2\pi}{\lambda}(n_x - n_y)l =$$

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

$$\delta + \Delta\delta \quad (22)$$

结合式(3)、(22)知, 在外界场共同作用下 BGO 晶体的总相位延迟量 δ_T 和光学电压传感器的数学模型分别为:

$$\delta_T = k_1 U + k_2 \Delta T \quad (23)$$

$$I_o \approx \frac{I_i}{2} [1 + \delta_T] = \frac{I_i}{2} [1 + k_1 U + k_2 \Delta T] \quad (24)$$

其中, k_1 、 k_2 为常数。在实际应用中, 被测电压 U 频率为 50 Hz, 而与之相比环境温度变化通常较为缓慢, 其变化频率远小于 50 Hz, 因此由温度场引起的 $k_2 \Delta T$ 属于低频分量。将式(24)写为如下形式:

$$I_o \approx S_{\omega} + S_{\omega} \quad (25)$$

式中:

$$S_{\omega} = \frac{I_i}{2} [1 + k_2 \Delta T]$$

$$S_{\omega} = \frac{I_i}{2} \times k_1 U$$

其中, S_{ω} 为传感器输出光强的固有直流分量和低频分量, S_{ω} 为高频分量。在后续的信号处理部分可通过傅

里叶变换区分不同频率的输出信号。基于一次实验,所得传感器输出信号的傅里叶分解结果如图5所示。图5表明传感器的输出信号由以直流分量为主的低频分量和以50 Hz为中心的高频分量构成。

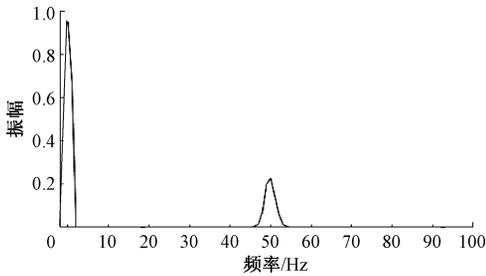


图5 光学电压传感器输出信号傅里叶分解结果
Fig. 5 Fourier decomposition result of optical voltage sensor output signal

根据上述推导并结合图5中频谱分析结果,可以确定由温度引起的误差偏移量处于低频带,并在卡尔曼滤波降噪的基础上,提出了基于频谱分析的高通滤波温度补偿方法,可以对测量数据进行进一步处理,有助于减小温度漂移带来的影响,并搭建实验平台进行验证。

3 实验平台搭建

3.1 BGO 晶体传感单元

基于偏光干涉检测原理,搭建光学电压传感单元,其结构如图6所示。其中BGO晶体尺寸为5 mm×5 mm×10 mm,起偏器和检偏器为THORLABS公司生产的5 mm偏振分束棱镜(型号PBS502),1/4波片为THORLABS公司生产的圆偏振片(型号CP1L780)。光路通过光纤准直器进行校准。所有光学元件均封装于绝缘材料中。其余实验参数如表1所示。

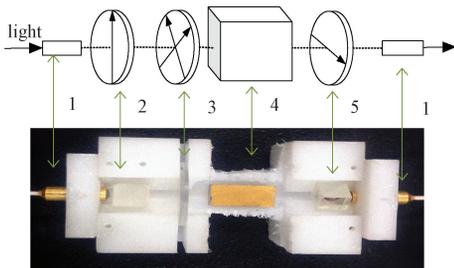


图6 光电传感单元(1-准直器,2-起偏器,3-1/4波片,4-BGO晶体,5-检偏器)

Fig. 6 Optical sensing unit (1-collimator, 2-polarizer, 3-1/4 plate, 4-BGO, 5-analyzer)

随着被测电压的增大,结合式(4)、(11)可知偏光干涉法在实际应用中采取的线性化模型产生的非线性误差

也会增大,为使最大非线性误差 e 小于1%,应满足:

表1 晶体及实验参数

Table 1 Crystal and experimental parameters

参数	n_0	γ_{41}	λ	l	d
数值	2.068	1.11×10^{-12} m/V	850 nm	0.01 m	0.05 m

$$e = \left| \frac{\delta - \sin\delta}{\delta} \right| \times 100\% \approx \frac{\delta^2}{6} \times 100\% < 1\% \quad (26)$$

由式(26)并根据表1给出的各项参数,可得被测电压范围为(-19.23 kV, 19.23 kV)。

3.2 光学电压传感器温度特性实验平台

为了研究光学电压传感器的温度特性,搭建了传感器温度实验平台,如图7所示。实验平台包括一个可编程温度控制箱,一个光路通道,一个电路通道和内部光电传感单元。通过光纤将光源和光电探测器分别连接到BGO晶体传感单元上形成光信号回路,通过导线将BGO传感单元上下两侧的电极板与交流试验变压器连接形成交流电回路。光电探测器将光信号转换为电信号,电信号经过数据采集卡输出到数据处理中心。

可编程温度控制箱由上海 ESPEC 公司生产(型号 SETH-Z-021LK),其工作温度为-40 °C ~ +150 °C,温度波动误差 $\leq \pm 0.3$ °C。BGO晶体传感单元被放置在带有防震功能的支架上,以尽量减少温控箱工作过程中机械振动的影响。其他实验设备及型号如表2所示。

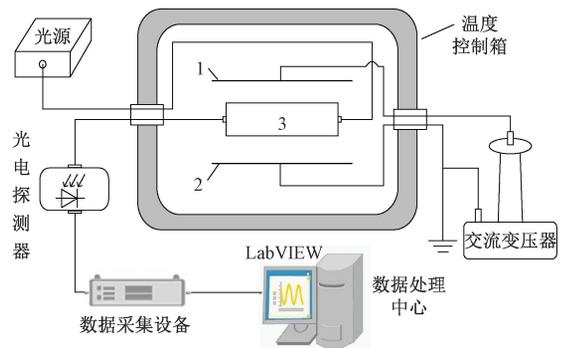


图7 光学电压传感器温度响应实验平台

(1-高压电极板,2-接地电极板,3-BGO传感单元)

Fig. 7 Optical voltage sensor temperature response experimental platform (1-high voltage electrode plate, 2-ground electrode plate, 3-BGO sensing unit)

表2 实验设备型号

Table 2 Experimental equipment model

设备名称	制造商	型号
光源	FIBKEY	6900系手持光源
光电探测器	THORLABS	PDA36A2
交流变压器	扬州鹏翔电力	PX1007

3.3 光学电压传感器信号降噪处理

实践中发现光电探测器将光强信号转换为电压信号过程和数据采集卡 A/D 转换过程中会产生大量随机噪声,输出信号较弱时会受到噪声极大的干扰。因此本文基于 LabVIEW 软件,采用卡尔曼滤波算法对数字信号进行降噪处理^[20]。光电探测器输出原始电压信号波形及经过降噪处理后的波形如图 8 所示(为便于观察,将滤波后波形增添一个上移量)。结果表明降噪效果良好,降噪后没有出现波形失真,降噪前后波形相位基本一致,没有出现相位偏差。

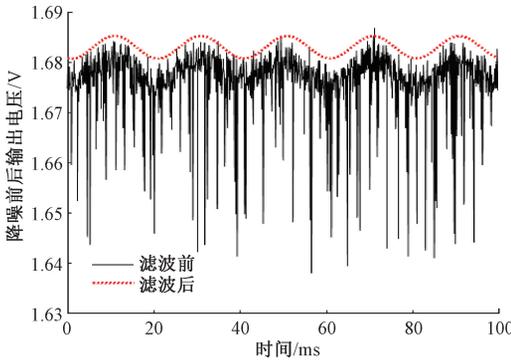


图 8 降噪前后光学电压传感器输出信号
Fig. 8 Optical voltage sensor output signal before and after noise reduction

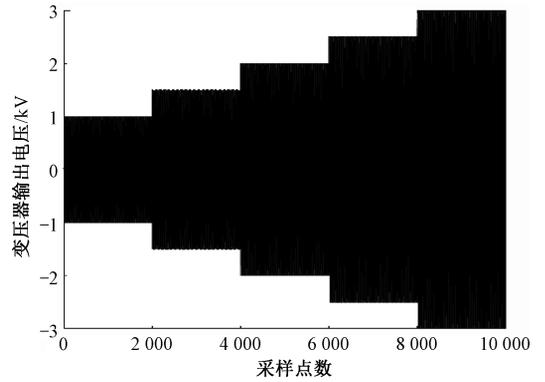


图 9 逐级加压下交流变压器输出结果
Fig. 9 Results of AC transformer output under step-by-step voltage boosting

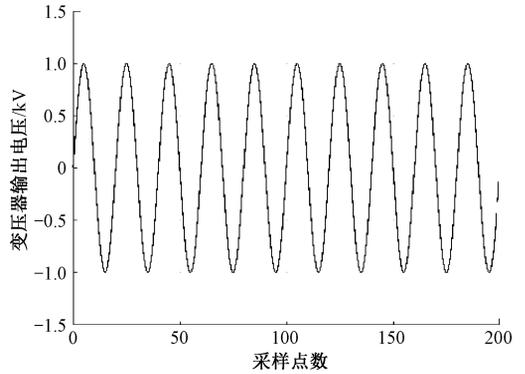


图 10 交流变压器输出波形局部放大图像
Fig. 10 Local magnification image of AC transformer output waveform

4 实验结果分析

4.1 光学电场传感器标定

利用温度特性实验平台对光学电压传感器进行标定。调节变压器变比逐级增加被测电压幅值,所加电压幅值依次为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 kV,变压器输出结果如图 9 所示。横坐标表示采样点数,纵坐标为变压器输出电压值。图 9 表明随着变压器变比增大,变压器输出电压幅值也逐渐增大。为便于观察,选取图 9 中采样点数为 0~200 之间的输出结果进行局部放大,如图 10 所示。可见变压器输出正弦波形良好无失真。

传感器的测试结果如表 3 所示。其中 u_0 表示传感器输出电压, U 为被测电压。利用线性拟合算法分析传感器响应线性度并进行标定。拟合曲线如图 11 所示。拟合方程为 $y = 0.748x + 0.094$,线性拟合相关系数 $R^2 = 0.9974$ 。结果表明响应线性度较好,传感器能够准确反映被测电压幅值。

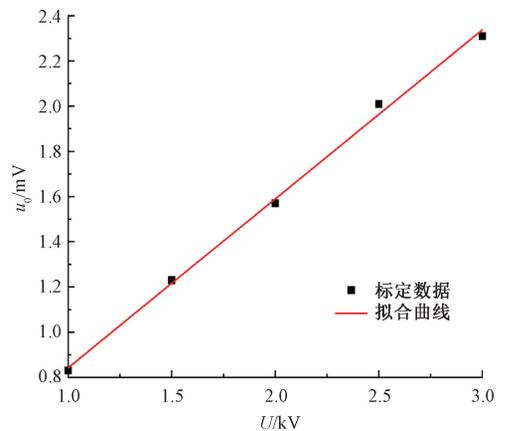


图 11 光学电压传感器标定拟合曲线
Fig. 11 Optical voltage sensor calibration fitting curve

表 3 交流电压 $U-u_0$ 测量数据

Table 3 $U-u_0$ measurement data of AC voltage

U/kV	1	1.5	2.0	2.5	3.0
u_0/mV	0.83	1.23	1.57	2.01	2.31

4.2 传感器的温度稳定性实验结果与分析

为分别研究热膨胀和热收缩情况下传感器的温度响

应特性,将 BGO 晶体传感单元置于温度控制箱内,设置温度以 0.5 °C/min 的速率先从 0 °C 升温至 50 °C,再从 50 °C 降至 0 °C,升温过程和降温过程分别持续 100 min 左右。保持被测电压(幅值 3 kV, 50 Hz)和光源的输出光强不变,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压信号,经过数据采集卡变成数字信号后接入计算机记录观察。由于数据采集卡的采样速率为 10 kHz,在实验过程中会产生大量数据,为便于数据统计,每隔 10 °C 记录一次光电探测器输出电压,所记录数据的采样点数为 30 000。着重分析不同温度下传感器输出信号的工作点电压和包含被测电压信息的高频分量幅值。

本文分别进行了升温、降温情况下的稳定性实验,在每次的数据记录中存在大量的采样点,以升温过程中 20 °C 时采样数据为例,数据图像如图 12 所示。由于每个温度都有大量的采样数据,为方便观察不同温度下工作点电压的变化趋势,在排除偏差过大的数据之后对数据集取均值以获得该温度下的工作点电压数据,以图 12 为例,在升温过程中 20 °C 情况下的工作点电压数据为 1.602 V,其余温度下的数据处理方法相同。

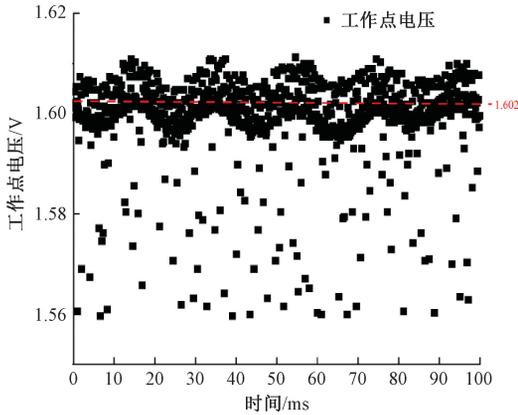


图 12 20°C 升温过程工作点电压采样数据图像
Fig. 12 Image of voltage sampling data at the operating point of the 20°C heating process

通过上述数据处理方法得到每个温度点传感器的工作点电压随温度变化情况见图 13。由图 13 可见,光学电压传感器的 BGO 传感单元因温度变化引起的干扰相位延迟导致工作点电压在 [1.4 V, 2.1 V] 范围内变化,最大相对偏差达到 50% 左右,给传感器测量精度带来不利影响。

传感器输出高频分量幅值随温度变化情况见图 14。由图 14 可见,高频分量幅值受温度影响较小,升温和降温过程整体温度变化范围为 [2.30, 2.38] mV,以其中最小值为标准,最大变化幅度仅为 3.4%。

在保持被测电压为 3 kV 的情况下,按照图 11 中拟

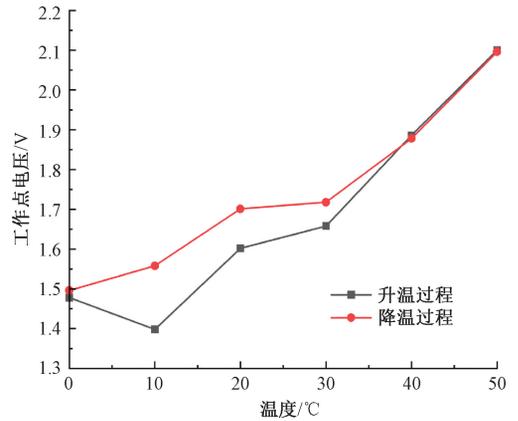


图 13 光学电压传感器温度响应曲线(工作点电压)
Fig. 13 Optical voltage sensor temperature response curve (working point voltage)

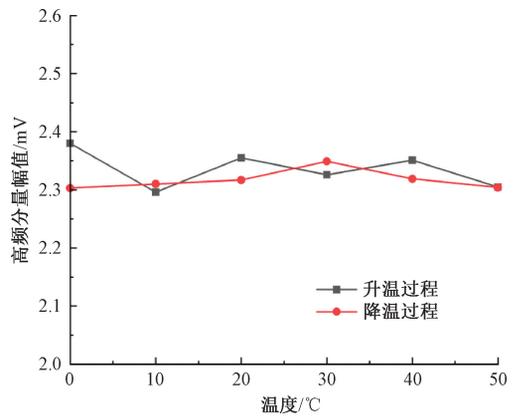


图 14 光学电压传感器温度响应曲线(高频分量)
Fig. 14 Optical voltage sensor temperature response curve (high frequency component)

合曲线公式可以推得标定结果为 2.338 mV。定义测量相对误差 ε 为:

$$\varepsilon = \frac{u_k - u_1}{u_1} \times 100\% \quad (27)$$

式中: u_k 为实际测量值, u_1 为实验标定结果。图 14 所示的高频分量实验结果变化范围 [2.30, 2.38] mV,相比标定结果测量精度在 1.79% 以内,这是由于实验中受到光源波动影响,当光源波动 ΔI 时,由式(25)知高频分量波动量为:

$$\Delta S_{\omega} = \frac{\Delta I}{2} \times k_1 U \quad (28)$$

为降低光源波动的影响,在后续实验研究中可采用稳定性更好的光源设备。

为分析温度变化对传感器响应幅频特性的影响,以升温实验数据为例对传感器输出信号进行傅里叶分解。由于传感器输出高频分量为毫伏级别,远小于直流分量

和低频分量,为便于观察,将每组数据高频信号按同一比例放大,并对幅频特性曲线进行归一化处理,所得结果如图 15 所示。

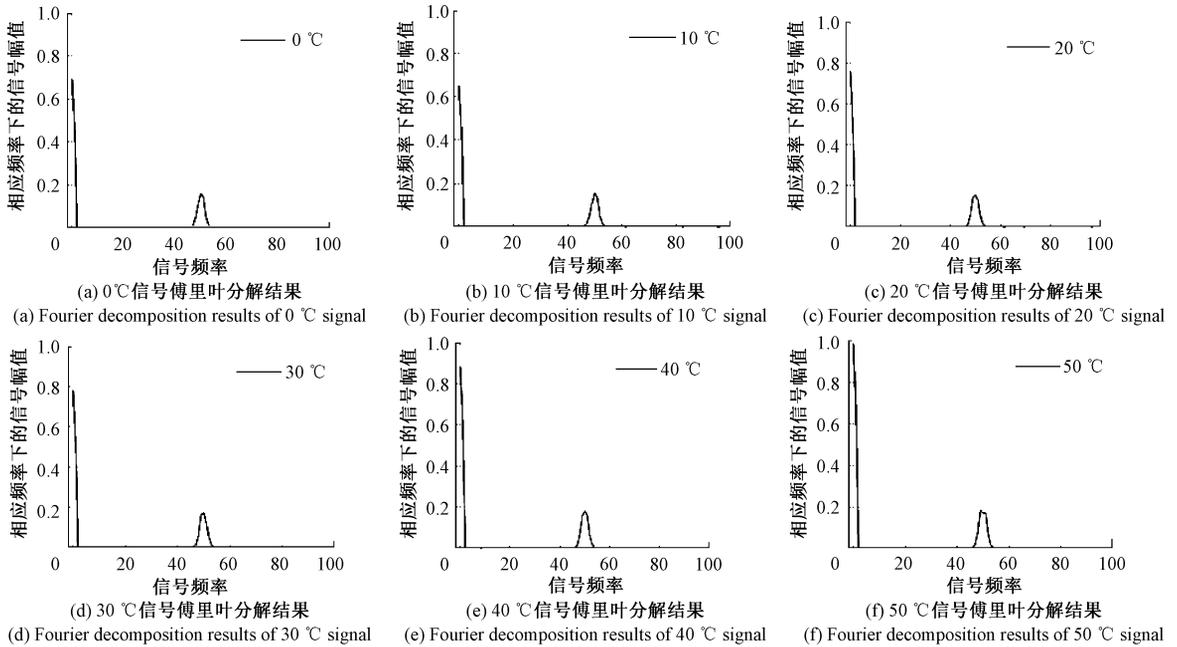


图 15 不同温度下传感器输出信号傅里叶分解结果

Fig. 15 Fourier decomposition result of optical voltage sensor output signal

由图 15 可见,传感器输出信号主要集中在低频段和以 50 Hz 为中心的高频段。不同温度下低频分量幅值在 [0.65, 1] 范围内变化,变化幅度为 53.8%, 相对而言高频分量幅值变化幅度不超过 5%。在以温度为变量的实验背景下,低频段分量幅值的大幅度变化也验证了式 (24)、(25) 推导得到的多物理场作用下的传感器温度响应特性模型的正确性,说明温度漂移的影响属于低频分量,为后续通过抑制低频分量提高光学电压传感器温度稳定性提供了理论与实验依据。

4.3 不同补偿方案下温度稳定性实验结果对比分析

在如图 6、7 所示建立的实验平台基础上,采用 BP 神经网络温度补偿方法进行对比分析。选择传感器工作点电压与工作温度作为神经网络输入量,以环境温度为 20 °C 传感器工作点电压作为标定电压值^[21],建立拥有一层隐含层的 BP 神经网络结构,以预测值与真实值之间的均方误差作为评价参数,确定隐含层的节点数。测试结果如图 16 所示。

由图 16 可知,BP 神经网络在 2-12-1 的结构下性能最优,在该结构下对传感器进行温度补偿,补偿效果对比如表 4 所示。

由表 4 可见,在本实验平台下 BP 神经网络补偿最大相对误差为 2.12%。相比之下,本文提出的温度补偿方法可以在更大程度上减小温度漂移对传感器测量产生的影响。

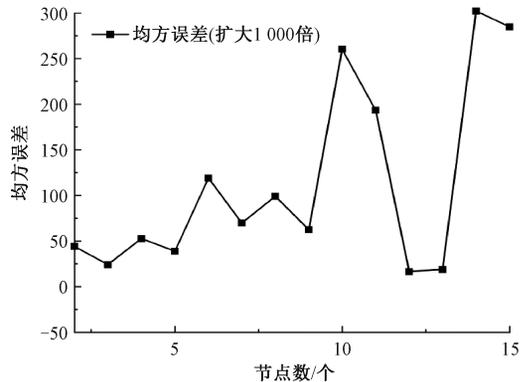


图 16 神经网络隐藏层节点数性能评图

Fig. 16 Performance evaluation diagram of the number of nodes in the hidden layer of neural network

表 4 不同方法补偿后输出相对误差

Table 4 The relative output error after compensation by different methods

温度/°C	高通滤波	神经网络
0	1.79%	2.12%
10	1.24%	1.45%
20	0.72%	0.69%
30	0.51%	0.81%
40	0.55%	0.88%
50	1.41%	1.51%

5 结 论

本文从理论上推导了光学电压传感器的温度响应模型并对传感器输出信号进行频谱分析,得到温度对传感器的影响规律。并根据输出信号的傅里叶分解结果,证明了温度变化引起的传感器输出偏移量属于低频分量,其从宏观上体现为传感器的工作点电压漂移。

为验证理论分析的正确性,并对温度漂移的误差进行补偿,搭建了传感器的温度响应特性实验平台。并在卡尔曼滤波降噪和高通滤波的基础上进行标定实验和温度响应特性实验。实验结果表明,在 $[0\text{ }^{\circ}\text{C}, 50\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 温度范围内对输出信号进行高通滤波可以使输出电压与标定电压的相对误差小于 $\pm 1.79\%$,即温度变化对传感器输出高频分量影响较小,且补偿效果优于同平台下BP神经网络补偿方法。说明本文提出的基于频谱分析的高通滤波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。同时由于光源的波动性,在该领域仍具有更进一步的研究空间。

参考文献

- [1] 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.
SHI ZH M, ZHANG J T, PAN X L, 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.
- [2] 杨庆,董富宁,罗曼丹,等. 宽频电压感知方法及其数据应用[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 1969-1983.
YANG Q, DONG F N, LUO M D, et al. Broadband voltage perception method and its data application [J]. High Voltage Technology, 2021, 47(6): 1969-1983.
- [3] 穆舟,江波,赵伟,等. 电力系统暂态过电压测量技术综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(5): 1-13.
MU ZH, JIANG B, ZHAO W, et al. Summary of transient overvoltage measurement technology of power system [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2022, 59(5): 1-13.
- [4] HAN R, YANG Q, SIMA W X, et al. Non-contact measurement of light-ning and switching transient overvoltage based on capacitive coupling and Pockels effects [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 139(1): 93-100.
- [5] 周扬,卜乐平,王黎明,等. 电光晶体的 Pockels 效应仿真研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 123-129.
ZHOU Y, BU L P, WANG L M, et al. Simulation research

on the Pockels effect of electro-optical crystals [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 123-129.

- [6] LI H, FU Z D, LIU L Y, et al. Analysis of the light propagation model of the optical voltage sensor for suppressing unreciprocal errors [J]. Sensors, 2017, 17(1): 85.
- [7] 温海燕,雷林绪,张朝阳,等. 基于普克尔效应的光学电压互感器的设计和实验 [J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1180-1184.
WEN H Y, LEI L X, ZHANG CH Y, et al. Design and experiment of optical voltage transformer based on Pukker effect [J]. Grid Technology, 2013, 37(4): 1180-1184.
- [8] HAN R, YANG Q, SIMA W X, et al. Non-contact measurement of lightning and switching transient overvoltage based on capacitive coupling and Pockels effects [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 139(1): 93-100.
- [9] 谢施君,汪海,曾嵘,等. 基于集成光学电场传感器的过电压测量技术 [J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2929-2935.
XIE SH J, WANG H, ZENG R, et al. Overvoltage measurement technology based on integrated optical electric field sensor [J]. High Voltage Technology, 2016, 42(9): 2929-2935.
- [10] 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.
- [11] 李岩松,高利,刘君. 基于光学传感的交直流混合场一体化测量实现 [J/OL]. 电测与仪表: 1-8.
LI Y S, GAO L, LIU J. Realization of integrated measurement of AC and DC hybrid fields based on optical sensing [J/OL]. Electrical Measurement and Instrumentation: 1-8.
- [12] 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.
- [13] 陈振宜,王伟男,陈娜,等. 电场作用下掺锰石英光纤中线偏振光传输特性研究 [J]. 电子测量技术, 2018, 41(18): 48-51.
CHEN ZH Y, WANG W N, CHEN N, et al. Research on the transmission characteristics of midline polarized light of manganese-doped quartz optical fiber under the action of electric field [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(18): 48-51.
- [14] WANG D J, XIE N. An optical voltage sensor based on wedge interference [J]. IEEE Transactions on

- Instrumentation and Measurement, 2017, 67(1): 57-64.
- [15] 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 the optical path of optical voltage sensor reciprocity [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 81-88.
- [16] 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, 2017, 40(2): 1-10.
- [17] 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.
SI MA W X, HAN R, YANG Q, et al. Dual crystal temperature compensated non-contact optical overvoltage sensor [J]. High Voltage Technology, 2018, 44(11): 3465-3473.
- [18] 刘轩东,程章颖,马乐晨,等. 基于光纤消逝场的电场测量技术研究综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 1984-1997.
LIU X D, CHENG ZH Y, MA L CH, et al. Review of research on electric field measurement technology based on optical fiber vanishing field [J]. High Voltage Technology, 2021, 47(6): 1984-1997.
- [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 for improving the temperature stability of optical voltage sensors [J]. Journal of Electrotechnical Technology, 2015, 30(4): 106-112.
- [20] 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.
LI J, WANG Y W, WEI CH, et al. Review of the application of Kalman filtering theory in power systems [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 135-144.
- [21] 黄艳. 基于 BP 神经网络光学电压传感器温度补偿技术的研究与 LabVIEW 软件的实现[J]. 三明学院学报, 2019, 36(4): 33-40.

HUANG Y. Research on temperature compensation technology of optical voltage sensor based on BP neural network and implementation of LabVIEW software [J]. Journal of Sanming College, 2019, 36(4): 33-40.

作者简介



陈胜硕, 2021 年于华北电力大学获得学士学位, 现为华北电力大学硕士研究生, 主要研究方向为先进输变电技术。

E-mail: 1542830593@qq.com

Chen Shengshuo received a B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2021. He is now a M. Sc. degree from North China Electric Power University. His main research interests include advanced power transmission and transformation technology.



李志(通信作者), 2019 年于华北电力大学获得学士学位, 2022 年于华北电力大学获得硕士学位, 现为国网福建省电力有限公司福州供电公司职员, 主要研究方向为先进输变电技术。

E-mail: 1164165299@qq.com

Li Zhi (Corresponding author), received a B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2019 and a M. Sc. degree from North China Electric Power University in 2022. He is now an employee of Fuzhou Power Supply Company of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd. His main research interests include advanced power transmission and transformation Technology.



李岩松, 1991 于东北电力大学获得学士学位, 2000 年于华北电力大学获得硕士学位, 2004 年于华北电力大学获得博士学位。现为华北电力大学教授, 主要研究方向为智能传感与透明电网、电力系统分析与控制。

E-mail: liyansong811@126.com

Li Yansong received his B. Sc. degree from Northeast Electric Power University in 1991, M. Sc. degree from North China Electric Power University in 2000 and Ph. D. degree from North China Electric Power University in 2004. He is now a professor of North China Electric Power University. His main research interests include intelligent sensing and transparent power grid, power system analysis and control.