

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107816

光学电压传感器互易性光路研究*

周扬¹, 王黎明¹, 王腾¹, 曾令强², 杨娅姣²

(1. 海军工程大学电气工程学院 武汉 430033; 2. 中国航天电子技术研究院
北京航天时代光电科技有限公司 北京 100094)

摘要:提高光学电压传感器光路中光波相位差传输稳定性的关键是对系统光路寄生干扰相位差的抑制。为此研究了一种基于晶体材料 Pockels 效应,并结合 sagnac 光路结构形成的光学电压传感器,在分析该光路结构互易性机理基础上,提出了将系统光路改为使用熊猫型保偏光纤和低双折射旋转光纤相结合的形式以消除光敏感电路段产生的模式相位差,从而提高了传感器光路互易性。建立了系统光路温度场与热应力数学模型,利用有限元仿真研究了外界环境温度对其相位差传播产生的影响特性,得到外界温度每增加 1℃,光路双折射平均减小 $2.275\ 21\times 10^{-7}$ 。基于此,对该互易性光路进行了实验研究,实验表明:温度对测量结果最大影响为 1.733 9%/℃,当环境温度上升 10℃时,相比光路全采用熊猫型保偏光纤,传感器测量准确度从 6.008% 提高至 1.53%;当温度上升 20℃时,准确度从 52.016% 提高至 8.13%。可初步证明该互易性光路的可行性。

关键词:光学电压传感器;光路互易性;相位差;有限元仿真;温度特性

中图分类号: TH89 O436.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.40

Research on reciprocity optical path of optical voltage transformer

Zhou Yang¹, Wang Liming¹, Wang Teng¹, Zeng Lingqiang², Yang Yajiao²

(1. College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. China Academy of Aerospace Electronic Technology, Beijing Aerospace Times Optoelectronics Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: The key of improving the transmission stability of the light wave phase difference in the optical path of the optical voltage sensor is the suppression of the parasitic interference phase difference of the system optical path. To this end, an optical voltage sensor based on the Pockels effect of crystal material and combined with the sagnac optical path structure is studied. Based on the analysis of the reciprocity mechanism of the optical path structure, it is proposed to change the system optical path to use panda-type polarization maintaining fiber and low the combined form of the birefringent rotating fiber can eliminate the mode phase difference generated by the light-sensitive circuit section, thereby improving the optical reciprocity of the sensor. A mathematical model of the temperature field and thermal stress of the optical path of the system is established, and the influence of the external environment temperature on its phase difference propagation is studied by finite element simulation. It is obtained that for every 1℃ increase in the external temperature, the optical path birefringence decreases by $2.275\ 21\times 10^{-7}$ on average. Based on this, an experimental study on the reciprocity optical path has been carried out, and experiment shows that the maximum influence of temperature on the measurement result is 1.733 9%/℃. When the ambient temperature rises by 10℃, compared to the optical path, all panda-type polarization-maintaining fibers are used for sensor measurement. The accuracy is increased from 6.008% to 1.53%; when the temperature rises by 20℃, the accuracy is increased from 52.016% to 8.13%. The feasibility of the reciprocal optical path can be preliminarily proved.

Keywords: optical voltage transformer; light path reciprocal; phase difference; finite element simulation; temperature characteristics

收稿日期:2021-04-24 Received Date: 2021-04-24

* 基金项目:国家自然科学基金(41971416,41771487)项目资助

0 引言

光学电压传感器(optical voltage transformer, OVT)以光波为信息载体,光纤为传感媒介,通过测量光波相位差信息间接测量电压信号,相较于传统电学介入式测量方法,OVT因以光电隔离“非介入式”测量特点,具有安全性好、响应速度快,频率响应宽以及抗干扰能力强等优势^[1-4]。而光波作为传感器敏感外界电压以及传送电压信息的直接载体,因光子响应速度极快,以致OVT中光波相位差的稳定传输严重地受到外界噪声干扰,从而影响传感器测量准确度。

OVT光路中光波相位差传输稳定性问题的关键即为对系统光路寄生干扰相位差的抑制。针对该问题,目前相关理论研究较少,更多是根据OVT利用对光波相位特征量调制测量特点,从降低外界噪声干扰出发,通过借鉴干涉仪光路结构降噪技术,以提高OVT光路传输稳定性。文献[5]研究了一种尺寸为5 mm微型法布里-珀罗OVT,工频0.1~1 kV电压下分辨率为0.1 V;文献[6]介绍了一种测直流电压的萨格纳克干涉型OVT,传感器稳定性达 $\pm 0.5\%$;文献[7]提出了一种基于电光效应的准互易型反射式光路结构OVT,测量电压达15 kV,在0.8~3 kV直流电压范围内精度可达1%;对应地,文献[8]介绍了一种基于BGO晶体电光效应的透射式光路结构OVT;文献[9]针对基于Pockels效应OVT,描述了晶体横向调制时传感器工作原理;文献[10]针对文献[9]光路结构,仿真得到晶体内部电场与电压关系,在16~22 kV交流电压下相对误差为3%;文献[11]介绍了一种基于迈克尔逊结构OVT,采用相位产生载波解调算法获得干涉相位变化,分别进行了1 min短时42 kVrms交流和50 kV脉冲电压实验,传感器误差在 $\pm 0.8\%$ 内。

本文拟采用构建出一套具备光路互易性结构的OVT,以解决系统因外界噪声干扰而引起的光路传输稳定性问题,从而提高传感器测量稳定性和准确度。

1 测量方案

光学电压传感器测量系统由电场敏感光路、光路系统、解调电路、接口电路和电源电路组成。本文主要针对光学电压传感器光路中光波传输稳定性问题,以提高光学电压传感器系统光路互易性为目标,对光学电压传感器光路互易性展开分析研究。

1.1 光路结构分析与选择

考虑到光学电压传感器一般需用到光纤干涉仪检测光波相位差信息,在此汇总了四类光纤干涉仪光路结构特点,如表1所示^[12]。

表1 各光纤干涉仪光路结构特点

Table 1 Optical path structure characteristics of different optical fiber interferometers

光纤干涉仪类型	光路结构与测量特点
Michelson	两条光纤臂,带有反射镜,对电压调制两次
Mach-Zehnder	两条光纤臂,不含反射镜,对电压调制一次
Fabry-Perot	一条光纤臂,带有反射镜,适用于应力、压力测量
Sagnac	一条光纤臂,带有反射镜,对电压调制两次,具备光路互易性

对于Michelson和Mach-Zehnder干涉仪光路结构,当光路中两条光纤臂在受到外界环境不同干扰量时,干扰量之差将会使光纤传输臂和敏感臂中的两光波产生一干扰相位差,影响传感测量精度。而Fabry-Perot和Sagnac干涉仪传输光路仅有一条,无需参考臂,在存在外界干扰时,光路中光波将会受到该干扰量同样地调制,在一定程度上可消除外界噪声对光路中光波引入的附加相位差。一般Fabry-Perot干涉仪更适合用于光纤位移等测量领域。

Sagnac干涉仪结构因具备光路互易性,已在干涉型光纤陀螺中广泛应用^[13]。对此,如若将其用在光学电压传感器中,相关技术更易继承。为了从系统光路结构上最大程度地降低因外界干扰造成的光路光波相位差传输稳定性问题,结合Sagnac干涉仪光路结构,其互易性结构能够对光波起到良好的共模抑制作用,同时可以消除各种寄生干扰产生的相位差。

1.2 互易性光路

针对降低因外界寄生效应对系统光路引入的干扰相位差,本文研究了一种基于晶体材料Pockels效应,并结合Sagnac光路结构形成的光学电压传感器^[14]。其互易性光路结构如图1所示,光路包括光源、环形器、耦合器、Y波导、延迟线圈、电光晶体材料及反射镜等。

整个光路可分为A段的传输光路和B段的光敏感电路。光源发出的光波经Y波导起偏、分光后分别经 0° 、 90° 物理熔接点作用后沿光纤快慢轴传输并进入耦合器,此后两光束在光纤中沿着光路保持着传播方向相同,偏振方向垂直。当电光晶体上加载有外置电场时,由Pockels效应知,两束线偏振光在晶体内传播过程中将产生相位差 δ ,在反射镜返回,相位差加倍,含有相位差信息的两束光在集成器件Y波导发生干涉,干涉光强信号通过探测器检测后输入后端电路进行调制解调。对于该互易性光路的互易性机理以及补偿措施将放置1.3节讨论。

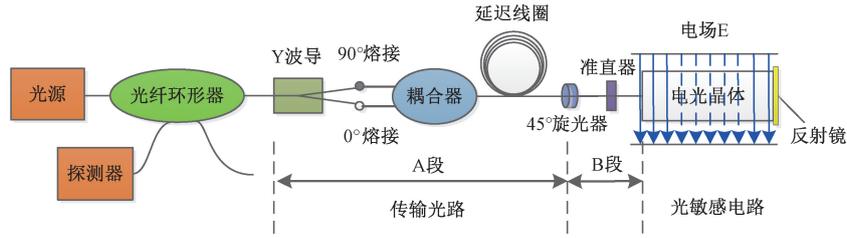


图 1 光学电压传感器互易性光路结构

Fig. 1 The structure of optical voltage sensor reciprocity optical path

1.3 互易性机理及补偿措施

为直观演绎、分析系统光路互易性机理,偏振光传播过程偏振模式变化示意图如图 2 所示。

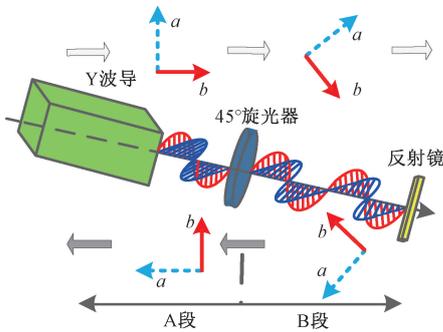


图 2 两线偏振光传播过程偏振模式变化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the change of polarization mode during the propagation of two-line polarized light

A 段光路中,由于 45° 旋光器对光波偏转作用,实现了相互垂直的两线偏振光偏振模式互换。而 B 段光路中,反射镜仅仅改变了两线偏振光传播方向,偏振方向并未改变,返回时,二者偏振方向并未发生模式交换。在光路敏感电路段,两光波各自历了不同传播路径,故而 B 段系统光路并不具备光路互易性。

设波长为 λ 的线偏振光 a 、 b 在光路传播过程中分别沿系统光路快慢轴传播,其折射率分别为 n_x 、 n_y ,与光纤快慢轴呈 45° 方向的光路折射率分别为 n_{x-45} 、 n_{y-45} ,A、B 段系统光路长分别为 L_1 、 L_2 ,在此先不考虑晶体 Pockels 效应产生的相位差, a 、 b 正向经过 A 段光路产生的相位差可表示为:

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi(n_y - n_x)L_1}{\lambda} \quad (1)$$

经反射镜作用,返回 A 段的传输过程中, a 、 b 偏振方向互换,此时产生的相位差为:

$$\Delta\varphi_2 = \frac{2\pi(n_x - n_y)L_1}{\lambda} \quad (2)$$

a 、 b 偏振模式的互换使得传输过程中两次产生的相

位差之和为 0。但是当 a 、 b 经过 45° 旋光器作用正向进入 B 段光路时,相位差为:

$$\Delta\varphi_3 = \frac{2\pi(n_{y-45} - n_{x-45})L_2}{\lambda} \quad (3)$$

经反射镜作用,返回 B 段过程中,相位差为:

$$\Delta\varphi_4 = \frac{2\pi(n_{y-45} - n_{x-45})L_2}{\lambda} \quad (4)$$

即 B 段中 a 、 b 产生的模式相位差为:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi(n_{y-45} - n_{x-45})L_2}{\lambda} \neq 0 \quad (5)$$

结合上述分析,针对 B 段光路不互易性问题,根本原因为光敏感电路中,因系统光路传播模式差作用,导致光波传播过程中产生模式相位差。

本文系统光路结构 A 段拟使用熊猫型保偏光纤和 B 段使用低双折射旋转光纤相结合的形式以此消除系统模式相位差的产生。低双折射旋转光纤是在保偏光纤基础上,将其熔融态高速旋转制成,拉制过程示意如图 3 所示。

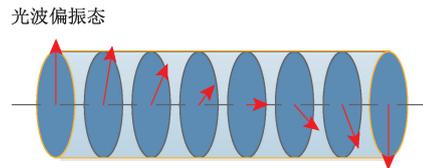


图 3 低双折射旋转光纤拉制示意图

Fig. 3 Schematic diagram of low birefringence rotating fiber drawing

相较于单模光纤抗干扰能力较差,低双折射旋转光纤在具备极小固有双折射同时,还拥有保偏光纤对光波偏振态保偏能力,利用低双折射旋转光纤光路无快慢轴之分特点,使得 a 、 b 在低偏光纤中的光路敏感电路段传播速度相等,消除因模式相位对传感器测量输出影响,保证其在光路 B 段不会产生附加光程差,最终进入 Y 波导的两线偏振光相位差信息仅来源于晶体 Pockels 效应产生的有用相位差,以此提高系统整体光路互易性。

2 互易性光路仿真研究

传感器实际运行中,系统光路光波相位差的传输存在外界环境温度等噪声干扰。对此,本节从非线性光学角度出发,利用有限元仿真研究外界环境温度对系统光路相位差传播产生的影响特性。

在米量级光纤光路内研究纳米量级的光波传输特性,一般仿真实验平台无法做到。根据光纤物理特性,一般光纤轴向长度远大于其径向尺寸 10 000 倍以上,可认为其传输特性不随长度发生变化,在此忽略光路各光学元器件,故可将三维系统光路简化为二维模型处理。而低偏旋转光纤拉制时无各向异性,本文仅针对熊猫保偏光纤展开研究。其所用熊猫型保偏光纤为长盈通 SXC-III-UK-PM1310/125 型,参数如表 2 所示。

表 2 熊猫型保偏光纤参数

Table 2 Panda polarization maintaining fiber parameters

参量符号	参量名称	参量数值与单位
r_{core}	纤芯半径	4.5 μm
r_{phys}	应力区半径	18 μm
r_{clad}	包层半径	62.8 μm
$r_{\text{p-c}}$	应力区到纤芯距离	30 μm
n_{core}	纤芯区折射率	1.444 3
n_{phys}	应力区折射率	1.427 28
n_{clad}	包层折射率	1.431 28

2.1 光路温度场与热应力数学模型

外界温度对系统光路传输性能影响本质为温度的改变将导致周围空气与光路间产生热量传递现象。介质导热微分方程是对导热物体内部温度场内在规律的描述,适用于所有物质间的导热过程,其方程为^[15]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho Q \quad (6)$$

式中:左边为介质升温所需总导热量,等式右边前三项依次为在介质 x, y, z 3 方向上传热量,最后一项为介质本身释放的单位热量。 ρ 为介质密度,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c 为介质比热容,单位为 $\text{J}(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; T 为给定介质初始温度条件; t 为时间变量; κ_i 为介质沿各方向上热传导系数,单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

对入射光在光纤波导中双折射随温度变化特性的分析,必须通过给定介质初始温度条件 T 以及建立热传导边界条件来求解特定的本征方程^[15-16]。

第一类温度边界条件:在 χ_1 边界上给定温度 $f(\chi, t)$

$$T = f(\chi, t) \quad (7)$$

第二类热通量边界条件为:在 χ_2 边界上给定热通量密度 $q(\chi, t)$

$$\kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \kappa_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \kappa_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = q(\chi, t) \quad (8)$$

第三类热交换边界条件为:在 χ_3 边界上给定对流换热 $h(T_a, T)$

$$\kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \kappa_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \kappa_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = h(T_a - T) \quad (9)$$

通过热弹性理论方程,结合导热微分方程,可得热应力与光纤波导应变间的物理方程为:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y - \nu \sigma_z) + \alpha \Delta T(x, y, z) \quad (10)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x - \nu \sigma_z) + \alpha \Delta T(x, y, z) \quad (11)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu \sigma_x - \nu \sigma_y) + \alpha \Delta T(x, y, z) \quad (12)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \quad (13)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xz} \quad (14)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{yz} \quad (15)$$

式中: ε_i 为光纤 x, y, z 轴热应变; σ_i 为光纤 x, y, z 轴方向上热应力; $E = 7.8 \times 10^{10} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$, 为弹性模量; ν 为泊松比; α 为材料热膨胀系数; $\Delta T(x, y, z)$ 为温度差; γ_{ij} 为剪应变; τ_{ij} 为剪应力。

对于光纤波导,各方向上主折射率与其应力有如下数值关系:

$$n_x = n_0 - C_1 \sigma_x - C_2 \sigma_y \quad (16)$$

$$n_y = n_0 - C_1 \sigma_y - C_2 \sigma_x \quad (17)$$

式中: n_i 为光纤 x, y 轴主折射率; n_0 为光纤热应力作用时折射率; C_i 为光弹系数,式(16)减式(17)可得光纤双折射与热应力分布关系:

$$B = (C_1 - C_2) (\sigma_y - \sigma_x) \quad (18)$$

由式(18)知,外界温度改变使得光纤内部热应力分布发生改变,从而引起系统光路双折射产生变化。

2.2 光路温度场仿真与分析

一般光纤轴向折射率分布是相同的,仅在径向存在差别,以二维模型研究光纤双折射温度特性既不会引入较大系统误差,同时也极大降低了仿真运算量。

以系统光路热应力数学模型为理论基础,利用有限元仿真固体力学和电磁波频域模块,研究保偏光纤中应力双折射温度影响特性,设置外界温度范围为 $-20 \sim 60^\circ\text{C}$ 。表 3 给出了光纤各物理量参数值。

表 3 光纤各物理量参数值

Table 3 Physical parameter values of optical fiber

参量符号	参量名称	参量数值与单位
α_{core}	纤芯热膨胀系数	$1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
α_{phys}	应力区热膨胀系数	$1.54 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$
α_{clad}	包层热膨胀系数	$5.4 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$
T_L	光纤拉丝温度	1 000℃
T_a	室温	20℃
C_1	光弹系数	$0.757\ 244\ 8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$
C_2	光弹系数	$4.187\ 75 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$

光纤截面 x 、 y 轴折射率分布分别如图 4、5 所示。

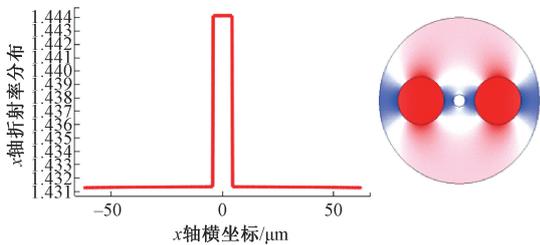


图 4 x 轴折射率分布

Fig. 4 x -axis refractive index distribution

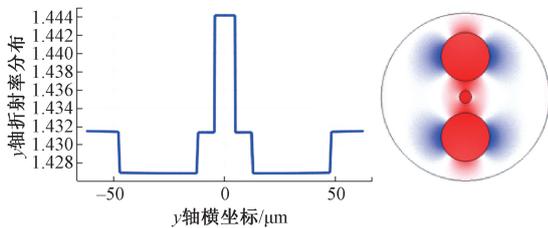


图 5 y 轴折射率分布

Fig. 5 y -axis refractive index distribution

从图 4、5 可以看出,室温条件下 x 轴上纤芯折射率为 1.444 3,应力区为 1.431 3, y 轴上纤芯折射率为 1.444 1,应力区为 1.426 8。进一步地,仿真得到温度在 $-20 \sim 60^\circ\text{C}$ 范围变化时,光纤有效应力双折射为:

从图 6 可看出,系统光路有效折射率随温度升高而增大。光路双折射温度特性曲线如图 7 所示。

从图 7 中可看出,系统光路应力双折射大小随着外界温度升高,从 -20°C 时的 2.043×10^{-4} 逐渐降低至 60°C 时的 1.861×10^{-4} 。系统光路外界温度每增加 1°C ,双折射平均减小 $2.275\ 21 \times 10^{-7}$ 。结合式(1),在已知系统光路物理长度时,可计算此时光路两偏振入射光因外界温度而产生的寄生相位差。基于此,通过该差值可计算传感器此时对应的电压值大小。此为系统互易性光路实验对温度干扰的抑制效果提供定量分析依据。

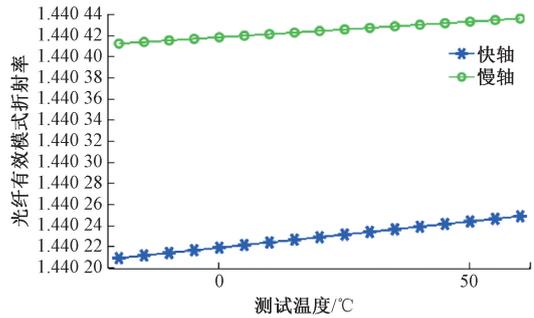


图 6 有效模式折射率随温度变化特性曲线

Fig. 6 Characteristic curve of effective mode refractive index changed with temperature

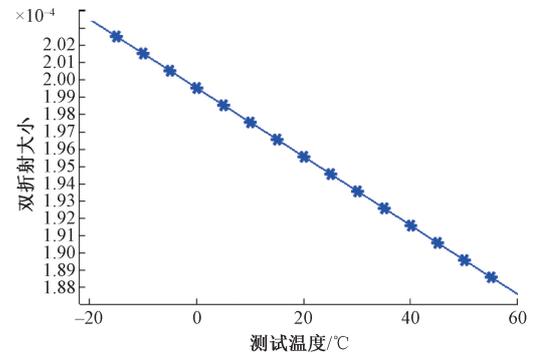


图 7 光纤双折射的温度特性曲线

Fig. 7 Temperature characteristic curve of optical fiber birefringence

3 互易性光路实验验证与分析

为了对系统光路互易性效果展开实验分析,需进一步对其展开变温测试实验。

前面给出了该型光学电压传感器测量方案,系统可分为系统光路和电路两部分。光路部分主要包括 1 310 nm 光源、Y 波导、熊猫型保偏光纤、低双折射旋转光纤(长约 10 mm)以及 LiNbO_3 晶体(长、宽、高为 60 mm、4 mm、1.5 mm),如图 8 所示。

其中电光晶体两侧嵌有金属电极板,两电极板上附着两根导线。系统电路包括前置放大器、AD、FPGA、DA 等,如图 9 所示。

光路中两光波由晶体 Pockels 效应产生的相位差返回 Y 波导发生干涉,经光电探测器转化为电信号,经前置放大,由 AD 将干涉模拟信号转换为数字信号进入以 FPGA 为核心的数字处理单元,并在其中完成闭环信号检测,然后通过 DA 将数字信号转化为模拟信号反馈于 Y 波导,其主要参数如表 4 所示。

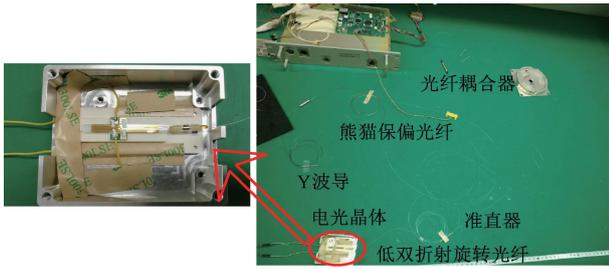


图8 光路部分以及电光晶体

Fig. 8 Optical path part and electro-optic crystal

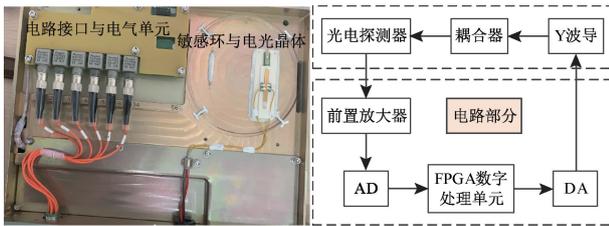


图9 电路部分实物以及原理框图

Fig. 9 Circuit part physical and principle block diagram

表4 硬件主要参数

Table 4 Main hardware parameters

硬件名称	型号	参数数值
数据分析仪	航天九院	采样频率 4/10 kHz
前置放大器	AD844ANZ	-
AD	AD9240ASZ	14 bit
FPGA	EP3C25E144I7N	最大工作频率 315 MHz
DA	AD5320BRMZ	12 bit

由光路部分和电路部分组成的系统实验平台如图10所示。

变温实验范围选择0~50℃。首先设定温控箱温度恒定在20℃,样机开机,打开上位机录波软件,将直流供电电压设定为6V,电压通过导线以无分压形式直流加载在晶体两侧电极板上。变温实验温度曲线如图11所示。

根据OVT中变比规定,可利用以下公式计算OVT数字输出有效值^[17]:

$$D_{out} = \sqrt{\frac{[\sum_{i=0}^n (y_i - y_0)^2 - \sum_{i=0}^n (x_i - x_0)^2]}{n}} \quad (19)$$

式中: D_{out} 为OVT数字输出有效值; n 为数据分析仪采样频率, $n=4\ 000$; x_i 为零输入电压时OVT数字输出,其中 $i=1,2,\dots,4\ 000$, x_0 为零输入电压时OVT数字输出平均值; y_i 为非零输入电压时OVT数字输出,其中 $i=1,2,\dots,4\ 000$; y_0 为非零输入电压时OVT数字输出平均值。

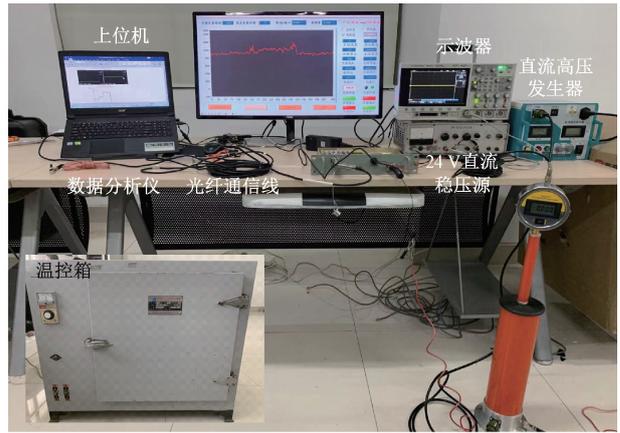


图10 互易性光路实验平台

Fig. 10 Reciprocity optical path experiment platform

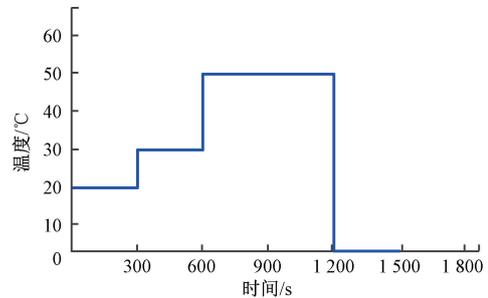


图11 系统光路环境温度随时间变化曲线

Fig. 11 System optical path ambient temperature curve changed with time

在整个25min内,传感器数字输出与变温关系如图12所示。

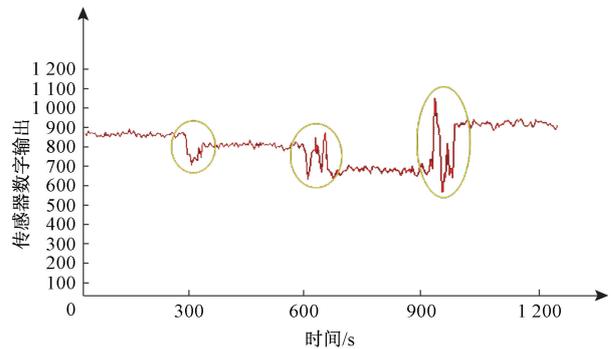


图12 温变下传感器数字输出波形图

Fig. 12 Digital output waveform diagram of sensor under temperature change

分析波形可得到以下几个结论,总结如下:

1)在温度发生3次骤变过程中,如图12中圈出部分所示,传感器输出存在大幅度跳动,且随着温度改变幅度增大,波纹跳动幅度也增大,随后一旦温度保持恒定,输

出曲线波动明显减小。其原因可能是随着系统光路自身温度与环境温度的温差增大,空气向系统光路传热过程中,导致光纤热应力分布以及各光学元器件温度特性发生急剧改变,两入射光相位差发生跳变。

2) 系统光路温度从 0℃、30℃ 上升至 50℃ 过程中,传感器输出与温度呈明显负相关性,从 50℃ 降低至 0℃,输出明显增大。

在此,针对结论二,结合光学直流电压传感器光路互易性,利用文中互易性光路仿真研究结果,给出如下推导与分析:

温度的改变导致传感器数字输出产生位移,根本原因是系统光路中传播的两线偏振光相位差值发生改变,导致光电探测器接受到的干涉光强发生变化,最终导致上位机数字输出产生位移。

根据熊猫型保偏光纤双折射温度特性关系知,温度每增加 1℃,其双折射平均减小 2.27521×10^{-7} 。温度升高,双折射降低,导致两光波总体相位差减小,进而光电探测器中检测到的光强信号减弱,导致最后输出电压随之降低,反之同理。

由图 12 可看出,当温度从 20℃ 上升至 30℃,传感器数字输出在 820 上下波动,此时对应的输出电压值为 5.77 V,此时传感器测量准确度为 1.53%。当温度从 30℃ 上升至 50℃,传感器数字输出在 690 附近波动,此时对应输出电压值为 4.78 V,传感器准确度为 8.13%。当温度从 50℃ 下降至 0℃,传感器数字输出在 960 附近波动,此时对应输出电压值为 6.81 V,传感器准确度为 5.40%。传感器输出电压与温度变化如图 13 所示。

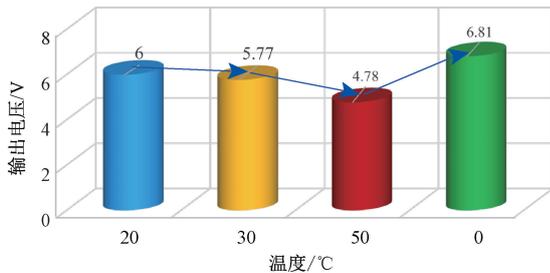


图 13 输出电压与温度变化柱状图

Fig. 13 Output voltage and temperature change histogram

如果系统光路 B 段采用熊猫型保偏光纤,对于温度的改变,理论上可计算出因光路光波双折射变化引起的额外传输相位差。基于此,可以计算晶体 Pockels 效应产生该相位差,对应的系统输入电压值。结合公式(1)知,温度从 20℃ 上升至 30℃,两光波经快慢轴单向产生的相位差 $\Delta\varphi$ 与传播距离 L 关系为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_y - n_x) \times L \times 10 \quad (20)$$

当温度升高 10℃ 时,根据式 20 可计算得,导致系统因模式双折射产生的相位差为 $\Delta\varphi = 0.109115 \text{ rad}$ 。根据 LiNbO_3 晶体 Pockels 效应数学表达式,横向调制时光波通过晶体产生的电光延迟 $\Delta\delta$ 为:

$$\Delta\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{22} E l \quad (21)$$

式中: λ 为光波长, $n_0 = 2.297$ 为 LiNbO_3 晶体无外加电场时折射率大小; $\gamma_{22} = 6.80 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 为一次电光系数; E 为晶体所处场强; l 为晶体通光长度。

结合式(21)可得,该相位差此时对应晶体 Pockels 效应输入电压值应为 $V_1 = 6.9012 \text{ V}$,此时传感器理论上测量准确度为 6.008%;同理,当升温 20℃ 时,对应输出量 $V_2 = 13.8024 \text{ V}$,传感器测量准确度为 52.016%;温度对测量结果最大影响为 1.7339%/℃。可以证明,在没有光路互易性对外界温度的抑制作用下,温度改变量越大,传感器测量精度受其影响越大。当环境温度上升 10℃ 时,相比光路全采用熊猫型保偏光纤,传感器测量准确度从 6.008% 提高至 1.53%,光路互易性降低了 B 段光路中光波因外界温度引入的干模式扰相差,大大减小了光路对外界温度的敏感性,对其产生的干扰起到了有效抑制作用。

4 结 论

系统光路 B 段采用低双折射旋转光纤,使得传感器光路更具备互易性,而光路互易性能够有效抑制因外界干扰而产生的寄生相位差。传感器光路通过双光路检测技术,使得物理光路不必追求传输光纤的等长性,降低了传感器光纤光路制作工艺要求。本文的研究对研制高精度、可靠性光学电压传感器具有一定参考价值。

由于本文仿真时将系统光路简化为二维模型,忽略了光学元器件以及电光晶体受变温影响情况,互易性光路与温度的单独定量分析还需进一步研究。

参考文献

- [1] PENG-YA W. Analysis of research status of optical voltage transformers [J]. Telecom Power Technology, 2018, 26(2): 155-159.
- [2] NIE Y, GE J. Overview of voltage transformers suitable for high voltage levels [C]. 2020 3rd International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE). IEEE, 2020: 888-891.
- [3] 王鹏雅. 光学电压互感器研究现状分析[J]. 通信电源技术, 2018, 35(7): 33-36.
WANG P Y. Analysis of research status of optical voltage transformers [J]. Telecom Power Technology, 2018, 35(7): 33-36.
- [4] FUSIEK G, NIEWCZAS P, GORDON N, et al. 132 kV

- optical voltage sensor for wide area monitoring, protection and control applications [C]. 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). IEEE, 2020; 1-5.
- [5] JAVERNIK A, DONLAGIC D. Miniature, micro-machined, fiber-optic Fabry-Perot voltage sensor [J]. Optics Express, 2019, 27(9): 13280-13291.
- [6] TAKAHASHI M, SASAKI K. In-line sagnac interferometer-type optical voltage sensor for DC voltage measurement [C]. 24th International Conference on Optical Fibre Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2015, 9634: 96345P.
- [7] ZHANG C X, FENG X, LIANG S, et al. Quasi-reciprocal reflective optical voltage sensor based on Pockels effect with digital closed-loop detection technique [J]. Optics Communications, 2010, 283(20): 3878-3883.
- [8] 罗苏南. 组合式光学电压/电流互感器的研究与开发 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2000.
- LUO S N. Research on combined optical voltage & current transformer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2000.
- [9] PAN F, XIAO X, XU Y, et al. An optical AC voltage sensor based on the transverse pockels effect [J]. Sensors, 2011, 11(7): 6593-6602.
- [10] SABER A M, EL-AZAB J, EL-NABY S H, et al. Utilization of transversal pockels effect in intense electric field sensing [C]. 2017 14th International Conference on Smart Cities: Improving Quality of Life Using ICT & IoT (HONET-ICT). IEEE, 2017; 57-61.
- [11] CHEN X, HE S, LI D, et al. Optical fiber voltage sensor based on Michelson interferometer using phase generated carrier demodulation algorithm [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 16(2): 349-354.
- [12] 王巍, 丁东发, 夏君磊. 干涉型光纤传感器用光电子器件技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- WANG W, DING D F, XIA J L. Optoelectronic device technology for interferometric optical fiber sensor [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [13] 徐宏杰, 刘海锋, 张春熹, 等. 基于光纤 Sagnac 干涉仪的高精度宽谱光源平均波长测量技术 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1): 127-131.
- XU H J, LIU H F, ZHANG CH X, et al. High precision measurement of broadband optical wavelength based on fiber optic sagnac interferometer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(1): 127-131.
- [14] 谭金权, 曾令强, 龙娅, 等. 新型非介入式全光纤互易型电压电场传感器 [P]. 北京: CN110554229A, 2019-12-10.
- TAN J Q, ZENG L Q, LONG Y, et al. New non-intrusive all-fiber reciprocal voltage and electric field sensor [P]. Beijing: CN110554229A, 2019-12-10.
- [15] 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 of Pockels effect electro-optical sensor mechanism and experimental study [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [16] VAJDI M, MOGHANLOU F S, SHARIFIANJAZI F, et al. A review on the Comsol Multiphysics studies of heat transfer in advanced ceramics [J]. Journal of Composites and Compounds, 2020, 2(2): 35-43.
- [17] 李彦, 章敏, 冯秀娟, 等. 准互易光学电压互感器数字闭环信号处理方法 [J]. 电测与仪表, 2011, 48(7): 32-36+60.
- LI Y, ZHANG M, FENG X J, et al. Digital closed-loop signal processing system for the quasi-reciprocal optical voltage sensor [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(7): 32-36+60.

作者简介



周扬, 2018 年于湖北师范大学获得学士学位, 现为海军工程大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感方面的研究。

E-mail: 913748573@qq.com

Zhou Yang received his B. Sc. degree from Hubei Normal University in 2018. He is currently a master student at Naval University of Engineering. His main research direction is optical fiber sensing.



王黎明, 2001 年于海军工程大学获得学士学位, 2004 年于西安交通大学获得硕士学位, 2009 年于华中科技大学获得博士学位, 主要从事检测技术方面的教学与研究。

E-mail: icesoar@163.com

Wang Liming received his B. Sc. degree from Naval University of Engineering in 2001, his M. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2004, and his Ph. D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2009. Now he is mainly engaged in teaching and research in testing technology.



曾令强, 2010 年于北京科技大学获得学士学位, 2017 年于北京科技大学获得博士学位, 主要从事光纤传感及机械动力学方面的研究。

E-mail: zeng_l_q@163.com

Zeng Lingqiang received his B. Sc. degree from University of Science and Technology Beijing in 2010, his Ph. D. degree from Beijing University of Science and Technology in 2017. Now he is mainly engaged in the research of optical fiber sensing and mechanical dynamics.