

DOI:10.16136/j.joel.2023.08.0437

光纤电压传感器传感头优化与热致非互易误差抑制

杨汉瑞^{1*}, 董春君¹, 黄蔚梁², 王建青³, 郭宜昌¹, 韩泽庭¹

(1. 东北电力大学 自动化工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 中国电建集团江西省电力设计院有限公司 电网工程分公司, 江西 南昌 330096; 3. 中国航天科技集团公司 第九研究院十六研究所, 陕西 西安 710100)

摘要:针对普通光纤电压传感器在外界温度扰动下其输出精度和稳定性会受到严重影响这一问题,本文提出了一种采用保偏光子晶体光纤(polarization maintaining photonic crystal fiber, PM-PCF)作为传感光纤的传感头优化方法抑制温度扰动下的系统非互易误差。在综合考虑 PM-PCF 与传统熊猫型保偏光纤(panda polarization maintaining fiber, panda-PMF)尾纤间的熔接损耗、传输损耗以及现有工艺条件下的光纤制备等问题的基础上,优化得到了与 panda-PMF 间的熔接损耗低至 0.14 dB 的 PM-PCF;并对比分析了这两种保偏光纤的双折射温度依赖特性,建立了全光纤类型的光学电压传感器(fiber optic voltage sensor, FOVS)热致系统误差输出模型,分析验证了 PM-PCF 在解决反射式逆压电型 FOVS 热致非互易问题的可行性。结果表明,采用 PM-PCF 优化后的 FOVS 热致非互易误差约是传统保偏光纤电压传感器的 10^{-2} 量级。这在提高系统输出精度和稳定性等方面具有显著优势,同时这种低损耗的优化方法在光纤传感及通信等领域具有重要的应用价值。

关键词:电压测量; 光纤电压传感器; 保偏光子晶体光纤(PM-PCF); 热致误差抑制

中图分类号: TM 930.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)08-0809-07

Sensor head optimization and thermal nonreciprocal error suppression for fiber optic voltage sensor

YANG Hanrui^{1*}, DONG Chunjun¹, HUANG Weiliang², WANG Jianqing³, GUO Yichang¹, HAN Zeting

(1. School of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin, Jilin 132012, China; 2. Transmission Electrical Department of Power Grid Engineering Company, Power China Jiangxi Electric Power Engineering Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330096, China; 3. Department of Fiber Sensors, No. 16 Institution of Aerospace & Technology Corporation, Xi'an, Shaanxi 710100, China)

Abstract: The output accuracy and stability of the optical fiber voltage sensor can be seriously affected under the disturbance of external ambient temperature. Therefore, this paper proposes a sensor head optimization method using polarization maintaining photonic crystal fiber (PM-PCF) as the sensing fiber to suppress the system's nonreciprocal error under temperature disturbance. Consideration of the fusion loss, transmission loss between the traditional panda polarization maintaining fiber (panda-PMF) pigtail and PM-PCF, and the fiber fabrication problem under the existing technological conditions, a PM-PCF with the fusion loss as low as 0.14 dB between it and the traditional panda-PMF is optimized. The birefringent temperature dependence characteristics of the two kinds of polarization maintaining fibers are compared and analyzed. And the thermal system error output model of the fiber optic voltage sensor (FOVS) is established. Then, the feasibility of PM-PCF in solving the thermal nonreciprocity problem of reflective inverse piezoelectric FOVS is analyzed and verified. The results show that the thermal nonreci-

* E-mail: yanghanrui1208@163.com

收稿日期: 2022-06-13 修订日期: 2022-10-06

基金项目: 吉林省自然科学基金(YDZJ202101ZYTS140)和国家自然科学基金青年基金(61703090)资助项目

procity error of the FOVS optimized by PM-PCF is about 10^{-2} of the traditional PCF voltage sensor. It has significant advantages in improving the output accuracy and stability of the system. At the same time, this low-loss optimization method has important value in fiber sensing and communication application area.

Key words: voltage measurement; optical fiber voltage sensor; polarization-maintaining photonic crystal fiber (PM-PCF); thermally induced error suppression

0 引 言

近年来,光纤传感器凭借体积小、测量精度高、抗电磁干扰能力强以及输出信号数字化等突出优势具有广泛的发展前景,越来越多地应用于高压电力系统、航空航天、国防安全、核工业、医疗健康等领域^[1,2]。其中,光学电压传感器(optic voltage sensor, OVS)是综合运用光纤传感技术、光电子技术以及电光调制技术来实现电压的测量与保护的新型传感器^[3],近年来,国内外研究学者一直致力于 OVS 的开发和研究,使其得到快速发展。综合近年来有关的研究情况,国内外对 OVS 的研究主要集中在结构方案、光路系统、信号处理 3 个部分^[3-5],其中在结构方案上主要以基于电光效应的晶体型和基于逆压电效应的全光纤型 OVS 两种方案为主^[6]。与基于电光效应的 OVS 相比,基于逆压电效应的 OVS 光路结构简单,传感头无需光学透镜系统(起偏器、检偏器、波片等)及光学准直,信号传输与检测都使用分立光学元件,也不需要光学胶进行粘接,在提高系统长期稳定性和可靠性上更具优势^[7]。但是,在实际应用中,OVS 光路系统受到外界温度的变化严重影响光纤中光波的传输特性,导致测量误差,制约其走向实用化。

2010 年,ABB 公司的 BOHNERT 等^[7]提出了一种基于逆压电效应的具有互易性光路结构的反射式 OVS,其对于信号的检测和传输均使用光纤,是一种全光纤类型的光学电压传感器(fiber optic voltage sensor, FOVS),工程应用前景较好,备受关注。反射式逆压电型 FOVS 巧妙地利用了法拉第旋光器的不可逆转性和传感头上的传感光纤与等长补偿光纤间的 90° 对轴熔接,实现了光路中偏振模式的互补,提高了系统稳定性。然而,在实际制备中要做到传感头上的传感光纤和补偿光纤完全等长基本上是不可能的,致使系统存在非互易性误差,在外界环境温度扰动下,传统熊猫型保偏光纤(panda polarization maintaining fiber, panda-PMF)的双折射特性亦随着温度改变,引起附加相位差,致使 FOVS 系统非互易误差变得更加严重和复杂。而光子晶体光纤由于其材料的单一

性和几何双折射,使其具有低温度敏感性、高偏振稳定性能等优良性能^[8],其在提高偏振干涉型光学传感器的温度稳定性方面有着潜在的应用价值^[9,10]。为此,考虑对 FOVS 传感头的传感光纤优化、提高温度稳定性,是解决 FOVS 环境温度问题、走向实用化的关键。本文在不改变现有系统结构且不增加制备工艺难度的基础上,考虑将保偏光子晶体光纤(polarization maintaining photonic crystal fiber, PM-PCF)作为 FOVS 传感光纤,提高了传感头的温度稳定性,可作为解决非互易 FOVS 环境热稳定性问题、提升系统精度的有效技术途径。

图 1 所示横截面结构的 PM-PCF 是目前发展成熟、应用广泛的一种类型,其制备工艺也比较成熟。然而,由于构成光路系统的器件比较多,又是反射式光路,且 PM-PCF 和 panda-PF 之间的熔接耦合不可避免,整个系统的光损耗比较严重,为此,采用 PM-PCF 解决 FOVS 现有热特性问题的同时,还应考虑不引入新的问题,包括 PM-PCF 与 panda-PMF 熔接损耗问题、传输损耗问题以及现有工艺条件下的光纤制备问题。

考虑以上问题,由于 FOVS 传感光纤和补偿光纤的长度较短(10 m 左右),可忽略传输损耗问题。而对于 PM-PCF 与传统保偏光纤之间的熔接,一方面需要从工艺上解决因空气孔塌陷带来的熔接损耗问题,另一方面需要解决不同光纤间因模场匹配性导致的熔接损耗问题。针对第一个问题目前可采用电热丝加热技术,通过对熔接过程中的参数优化,能够很好地控制 PM-PCF 的空气孔塌陷,降低空气孔塌陷引起的熔接损耗。这里如何解决第二个问题是传感头优化的关键,在不增加制备工艺难度的基础上,本文在图 1 给出的 PM-PCF 结构基础上,通过优化现有结构空气孔的关键参数,得到了与传统 panda-PMF 模场匹配度好、低熔接损耗的 PM-PCF;并建立 FOVS 热致系统误差的输出模型,分析了基于 PM-PCF 的 FOVS 系统输出性能,相比于 panda-PMF,优化后的 PM-PCF 作为传感头的传感光纤能够达到抑制热致非互易误差的目的。通过本文的研究,不仅为 FOVS 热致非互易误差提供了新思路、新方法,

同时这种低损耗的优化方法在光纤传感及通讯等众多领域具有重要的应用价值。

1 PM-PCF 优化设计

在 FOVS 光路系统中,需考虑 PM-PCF 与 panda-PMF 熔接时的损耗、模场匹配性等问题,为此,除分析 PM-PCF 保偏能力以外,还需要对其模场面积和耦合损耗等重要参数进行数值仿真分析。如图 1 所示,PM-PCF 的大空气孔和小空气孔直径分别由 d_1 、 d_2 表示,而其间距分别由 Λ 、 Λ_1 表示。这里将 Λ/λ 定义为归一化频率,占空比由 d_2/Λ 表示。根据当前制备工艺成熟的 PM-PCF 给出其仿真参数,如表 1 所示,仿真过程中,工作波长取 $\lambda=1550\text{ nm}$ 。

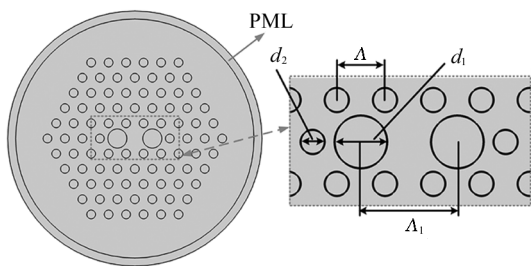


图 1 PM-PCF 截面示意图

Fig. 1 PM-PCF cross-section schematic

表 1 PM-PCF 的仿真参数

Tab. 1 The simulation parameters of PM-PCF

Parameter	Value
Diameter/ μm	$d_1 = 4.5, d_2 = 2.15$
Cladding/ μm	125
Coefficient of thermal expansion/ (10^{-6} K^{-1})	0.56
Young's modulus/GPa	72.4
Refractive index	Silicon dioxide=1.45, Air=1

1.1 模场特性

在实际应用中,要实现 PM-PCF 与 panda-PMF 光功率的高效耦合,就必须要考虑两种光纤的模场适配性。通常来说,传统的 panda-PMF 模场面积约为 $28.26\text{ }\mu\text{m}^2$,而 d_2/Λ 和 Λ/λ 是影响 PM-PCF 模场面积的关键参数。由于 PM-PCF 的模场面积并非中心对称,所以在研究过程中需要引入等效模场面积^[11]:

$$A_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}(x)}^2 + A_{\text{eff}(y)}^2}{2}}, \quad (1)$$

式中, $A_{\text{eff}(x)}$ 、 $A_{\text{eff}(y)}$ 分别表示 x 、 y 方向的模场面积。在光纤中基模的模场面积表达式为^[12]:

$$A_{\text{eff}(x/y)} = \frac{(\iint E^2 dx dy)^2}{\iint E^4 dx dy}. \quad (2)$$

结合式(1)和(2)并根据有限元仿真软件可以得出 PM-PCF 在不同占空比下,归一化频率与等效模场直径的对应关系,结果如图 2 所示。从图 2 可知,当 d_2/Λ 从 0.4 开始,以 0.1 为步长变化到 0.7, Λ/λ 从 3 开始,以 0.5 为步长变化到 5 时; Λ/λ 在 3.2—3.7 之间时,存在 PM-PCF 与 panda-PMF 模场面积高效匹配的占空比。

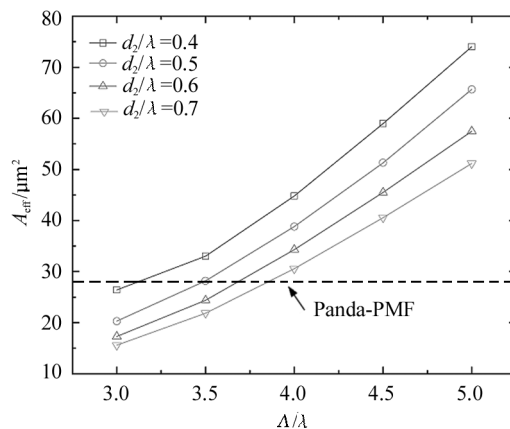


图 2 不同 d_2/Λ 下的 A_{eff} 与 Λ/λ 之间的关系

Fig. 2 The relationship between A_{eff} and Λ/λ under different d_2/Λ

1.2 双折射特性

对于光子晶体光纤,其双折射定义为:

$$B = |n_x - n_y|, \quad (3)$$

式中, n_x 、 n_y 分别表示光纤中的有效折射率。

FOVS 在实际运行环境下,外界温度和振动等环境因素的变化都会影响系统的输出稳定性^[13],这就需要通过提高传感光纤的偏振稳定性,因此,优化后的 PM-PCF 双折射应该高于传统 panda-PMF 双折射 (3.4×10^{-4})。本文在不同占空比 (d_2/Λ) 和不同大空气孔直径 (d_1) 下,对 PM-PCF 双折射值与归一化频率 (Λ/λ) 之间关系进行分析。其中 d_2/Λ 以 0.1 为步长,从 0.4 变化到 0.7;以 0.5 为步长,将 Λ/λ 从 3 变化到 5; d_1 从 $3\text{ }\mu\text{m}$ 变化到 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。从图 3(a)可知,当 Λ/λ 变化范围为 3.0—3.3 时,PM-PCF 的双折射值大于 panda-PMF 的双折射数值,且 PM-PCF 的双折射值受 d_2/Λ 的影响很小,双折射随着空气孔直径的增加而增加。当 Λ/λ 变化范围为 3.0—3.3、 d_1 不小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时才可以满足双折射数值的要求。

1.3 结构优化设计

通过以上分析可知,对传感头的 PM-PCF 进行优化设计时,应当综合考虑等效模场面积 (A_{eff})、 B 、 Λ/λ 、 d_2/Λ 、 d_1 等因素,使得优化设计后的 PM-PCF

与传统 panda-PMF 能够满足高度模场匹配和理想的双折射特性。结合式(1)、(2)、(3),并根据有限元数值仿真分析软件可以得出 PM-PCF 在不同占空比下,归一化频率与等效模场直径以及双折射的对应关系,结果见图4。从图4可知,当 Δ/λ 范围在3.18—3.48, d_2/Δ 约为0.4, d_1 约为5 μm 时,是 PM-PCF 结构的最优区域,在此区域内得到优化的 PM-PCF 的结构参数。并且,根据式(4)计算熔接损耗^[11],优化后的 PM-PCF 与 panda-PMF 的熔接损耗为0.14 dB,这一结果远低于其他优化 PM-PCF 与 panda-PMF 熔接时产生的损耗^[12, 14]。

$$\alpha = -10\log_{10} \frac{4A_{\text{eff}(x)}A_{\text{eff}(y)}A_{\text{eff}(p)}^2}{(A_{\text{eff}(x)}^2 + A_{\text{eff}(p)}^2)(A_{\text{eff}(y)}^2 + A_{\text{eff}(p)}^2)}, \quad (4)$$

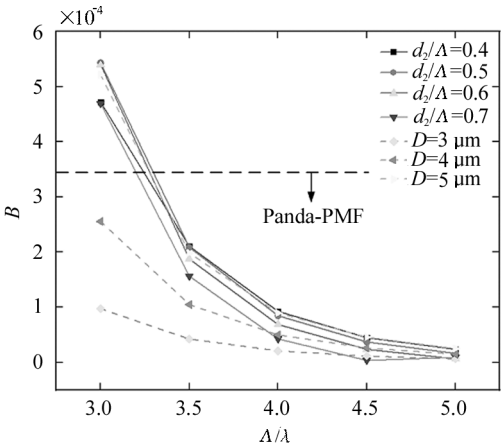


图 3 双折射与 Δ/λ 之间的关系

Fig. 3 The relationship of birefringence versus Δ/λ

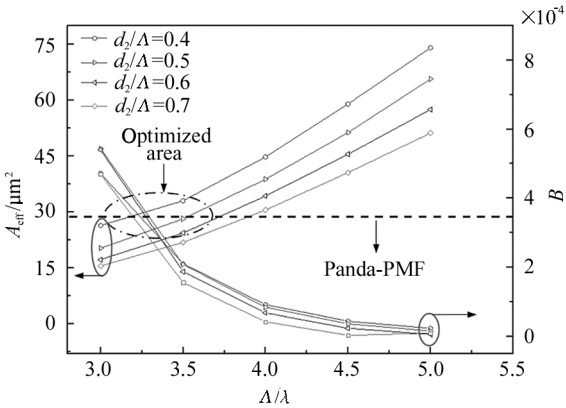


图 4 不同 d_2/Δ 下的 A_{eff} 、 B 与 Δ/λ 之间的关系

Fig. 4 The relationship between A_{eff} , B and Δ/λ under different d_2/Δ

2 双折射的温度依赖特性

传统 panda-PMF 双折射类型属于应力双折射,当温度变化时,由于内部热应力的存在,导致光纤应

力得到释放,双折射有明显的变化,影响系统的输出稳定性。PM-PCF 通过破坏结构对称性达到高双折的目的,且材料单一不会因为热膨胀系数不同而产生热应力,因此,温度变化对其影响较小,双折射温度稳定性高。这里基于有限元法对 panda-PMF 应力双折射进行了分析,相关参数在表 2 中给出。如图 5 所示,是两种光纤的双折射随温度的变化(−40—85 $^{\circ}\text{C}$)情况。经过计算可以得到 panda-PMF 和 PM-PCF 双折射温度系数分别为: -3.5×10^{-7} 、 -2.2×10^{-9} 。当传感光纤与补偿光纤不等长时,双折射温度系数大的光纤更易受到温度影响,导致温度对系统输出的影响更加严重。因此,在相同温度环境下,PM-PCF 的双折射温度稳定性高于 panda-PMF 的 2 个数量级。

表 2 panda-PMF 的仿真参数
Tab. 2 The simulation parameters of panda-PMF

Parameter	Value
Diameter/ μm	Fiber core:6, Stress zone:32, Cladding:125, Coating:230
Distance/ μm	Fiber core-stress zone:28
Poisson's ratio ν	Fiber core:0.17, Cladding:0.17, Stress zone:0.2, Coating:0.4
Coefficient of thermal expansion / (10^{-6} K^{-1})	Fiber core:0.6, Cladding:0.5, Stress zone:2.42, Coating:80
Young's modulus/GPa	Fiber core:72.37, Cladding:72.4, Stress zone:49.22, Coating:0.8
Piezometric coefficient / $(\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	$B_1 = 0.65 \times 10^{-12}$, $B_2 = 4.2 \times 10^{-12}$

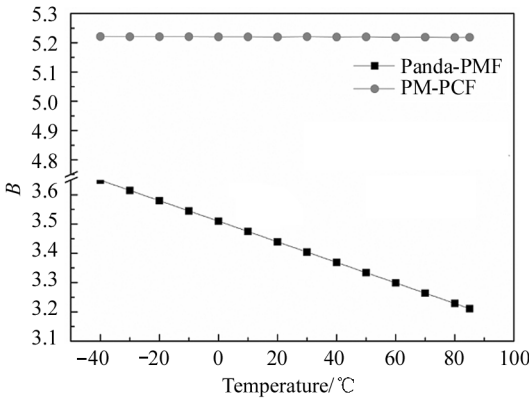


图 5 两种保偏光纤在 −40—85 $^{\circ}\text{C}$ 区间内的双折射变化
Fig. 5 The birefringence of two polarization maintaining fiber in the range from −40 $^{\circ}\text{C}$ to 85 $^{\circ}\text{C}$

3 基于 PM-PCF 的 FOVS

如图6所示,是基于逆压电效应的反射式 FOVS 结构原理图,其基本工作原理为^[15,16]:光源发出的光通过环形器进入起偏器后变成线偏振光,再经过 45° 熔接点后变成幅值相等的两正交偏振光,经过调制之后分别沿着保偏延迟光纤的快轴和慢轴传输。经过法拉第旋光器后,进入缠绕在石英晶体上的传感光纤,由于传感光纤和补偿光纤以 90° 对轴熔接,使得两束正交偏振光模式互换,经反射镜返回,最后在起偏器处产生的干涉信号仅由传感头处逆压电效应引起,干涉产生的光强信号通过环形器进入光电探测器。

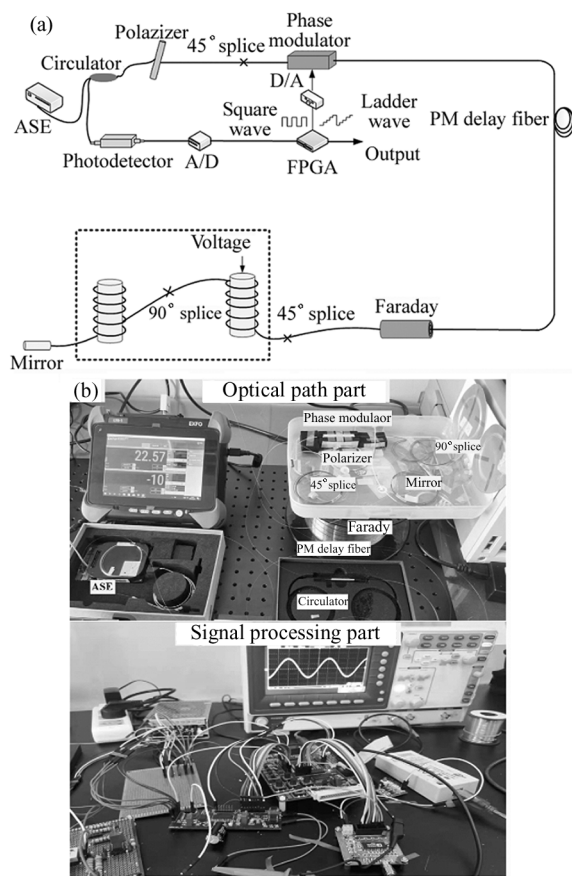


图6 反射式光纤电压传感器的示意图:

(a) 结构示意图; (b) 实验室 FOVS 原理样机照片

Fig. 6 Schematic of reflective FOVS:

(a) Structure diagram;

(b) Laboratory prototype photo of FOVS

由逆压电效应引起的相位差主要是由光纤长度和折射率变化导致的,可由下式表示^[15]:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_l + \Delta\varphi_n =$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} [(n_{x1} - n_{y1})\Delta L + L_1(\Delta n_{x1} - \Delta n_{y1})], \quad (5)$$

式中, ΔL 表示光纤长度的变化量, Δn_{x1} 、 Δn_{y1} 分别表示由于弹光效应导致的光纤折射率的变化量。

首先,当石英晶体产生形变时,传感光纤长度变化与待测电压之间的关系由式(6)给出^[15]:

$$\Delta L = N \cdot \Delta l = N \cdot \frac{-d_{11}\pi RU}{d}, \quad (6)$$

式中, Δl 表示单圈光纤长度变化量, N 表示缠绕匝数, d_{11} 表示石英晶体的压电系数, R 表示石英晶体半径, d 表示石英晶体的高度, U 为待测电压值。

其次,由于光纤的折射率变化引起的相位差由式(7)表示^[16]:

$$\Delta\varphi_n = \int_0^{2\pi R} -5.5 \times 10^5 r^2 (\kappa_1^2 - \kappa^2) dR = -5.5 \times 10^5 r^2 \frac{d_{11}\pi NU}{d \times R}, \quad (7)$$

式中, κ 、 κ_1 表示光纤弯曲曲率。

最后,结合式(5)、(6)、(7),得到待测电压作用下的逆压电相位差为:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_l + \Delta\varphi_n = -\frac{d_{11}\pi RUN}{d} \left[\frac{2\pi(n_{x1} - n_{y1})}{\lambda} + \left(\frac{5.5 \times 10^5 \times r^2}{R^2} \right) \right]. \quad (8)$$

由式(8)可以看出,相位差和待测电压呈线性相关。而相位差的大小和待测电压、光纤以及石英晶体等参数有关。在实际应用中,光纤双折射会受到温度波动的影响发生变化,从而产生误差相位,且与系统输出相位差无法区分,从而影响 FOVS 系统的输出性能。

在本文的研究中,起偏器消光系数 $\epsilon=0$ 且各熔接点无角度误差,法拉第旋光器偏转角为 45°, 利用琼斯矩阵对系统进行了数学建模^[17]。

传感光纤琼斯矩阵为:

$$\mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} e^{i\left[\frac{2\pi}{\lambda}(n_{x1}L_1 + n_{x1}\Delta L_1 + L_1\Delta n_{x1})\right]} & 0 \\ 0 & e^{i\left[\frac{2\pi}{\lambda}(n_{y1}L_1 + n_{y1}\Delta L_1 + L_1\Delta n_{y1})\right]} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

补偿光纤琼斯矩阵为:

$$\mathbf{M}_2 = \begin{pmatrix} e^{i\left[\frac{2\pi}{\lambda}(n_{x1}L_2)\right]} & 0 \\ 0 & e^{i\left[\frac{2\pi}{\lambda}(n_{y1}L_2)\right]} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中, L_1 、 L_2 分别代表传感光纤和补偿光纤的长度, n_{x1} 、 n_{y1} 分别代表光纤折射率。

当传感光纤与补偿光纤完全相等 ($L_1 = L_2$) 时,系统理想输出光强的表达式为:

$$\Delta I = E_x^2 \sin(2\Delta\varphi + \varphi_f), \quad (11)$$

式中, $E_x^2 = I_0$ 是光源的光强; φ_f 为反馈相移。

然而,在 FOVS 实际工艺制作过程中,两段光纤长度不会完全相等 $L_1 \neq L_2$ ($L_2 = L_1 + \Delta L_2$)。

$$\Delta I' = E_x^2 \sin(2\Delta\varphi + 2\delta(T) + \varphi_f), \quad (12)$$

式中, $\delta(T)$ 是由光纤不等长所产生的非互易性相位差。由式(5)可知,相位差不仅与光纤折射率有关,还与光纤长度有关。由于温度会改变光纤双折射的大小,且会改变光纤长度。所以,系统的热致误差模型为^[13]:

$$\delta(T) = \int_0^{\Delta L_2} \frac{2\pi}{\lambda} \frac{dB}{dT} \cdot \Delta \hat{T}(s, t) ds + \int_0^{\Delta L_2} \frac{2\pi}{\lambda} (n_x - n_y) \alpha \cdot \Delta \hat{T}(s, t) ds. \quad (13)$$

结合式(12)和式(13),系统的输出误差可以表示为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta I' - \Delta I}{\Delta I} \times 100\% = \frac{I_0 [\sin(\delta(T) + \Delta\varphi + \varphi_f) - \sin(\Delta\varphi + \varphi_f)]}{I_0 \sin(\Delta\varphi + \varphi_f)} \times 100\%. \quad (14)$$

当传感光纤与补偿光纤存在长度差时会引入的非互易误差会与待测电压产生的相位掺杂在一起,无法识别,且由于外界温度的扰动,会加剧其非互易性误差。

当采用 panda-PMF 作为传感光纤时,在 110 kV 电压等级下,如图 7 可知,在不考虑其他误差因素影响情况下,当传感光纤和补偿光纤长度差为 1 μm 时,可以将系统输出误差控制在理想范围,而随着长度差的增加也加剧了系统的输出误差,这严重影响了系统的输出精度。然而,现有的制备工艺将长度差控制在 μm 级以内非常困难。

假设在实际制备过程中能够控制的长度误差为 1 mm,这里分别选取 66 kV、110 kV、220 kV 不同电压等级对比分析采用两种保偏光纤作为传感光纤时系统的输出性能。结果如图 8 所示:在相同误差长度(1 mm)下,无论何种电压等级,与传统 panda-PMF 相比,在 $-40 \sim 85^\circ\text{C}$ 温度范围内,采用 PM-PCF 作为传感光纤,系统热致非互易误差得到了极大的抑制,约为采用传统 panda-PMF 作为传感光纤的 FOVS 系统的 10^{-2} 量级,这在提高 FOVS 系统输出精度和稳定性方面具有显著优势。

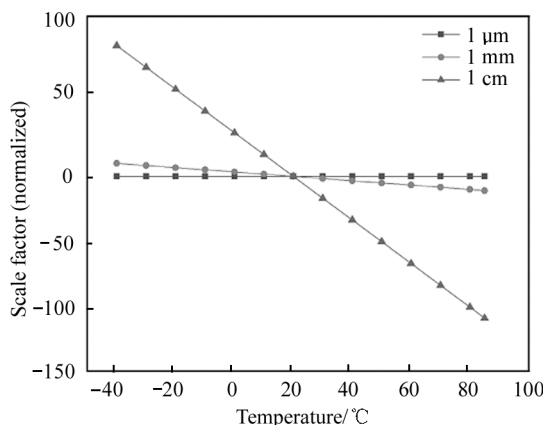


图 7 不同长度误差下系统输出误差随温度变化曲线

Fig. 7 The system output error variation curve with temperature for different length difference

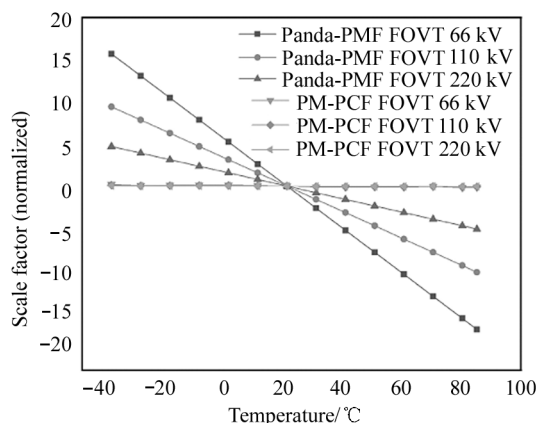


图 8 不同电压等级下系统输出误差随温度变化曲线

Fig. 8 The system output error variation curve with temperature at different voltage levels

4 结 论

为了抑制反射式 FOVS 系统热致非互易误差、提高系统输出精度和稳定性,在不改变 FOVS 结构且不增加工艺难度的前提下,本文通过对传感头 PM-PCF 关键参数进行优化,得到的 PM-PCF 与传统 panda-PMF 的熔接损耗低至 0.14 dB。与此同时,本文建立了 FOVS 系统热致非互易误差输出模型,并通过与采用传统 panda-PMF 作为传感光纤的 FOVS 系统进行对比,优化后的 FOVS 传感头采用 PM-PCF 作为传感光纤的系统热致非互易误差约为前者的 10^{-2} 量级,这极大地提高了系统的输出精度和稳定性。这一方法和相应的结论为抑制 FOVS 非互易误差、解决环境稳定性问题提供了可靠的理论依据,为加快 FOVS 实用化进程提供了科学的技术支撑,同时在光纤陀螺、传感和通信等领域具有重要应用价值。

参考文献:

- [1] GUAN J, HU S Y. Fiber Bragg grating current sensor based on magnetic fluid[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2021, 32(8): 826-832.
关静, 胡圣尧. 基于磁流体的光纤光栅电流传感器[J]. 光电子 • 激光, 2021, 32(8): 826-832.
- [2] ZHAO L J, ZHAO H Y, LIANG R Y, et al. Design and analysis of photonic crystal fiber with high birefringence[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2021, 32(7): 687-695.
赵丽娟, 赵海英, 梁若愚, 等. 高双折射光子晶体光纤分析[J]. 光电子 • 激光, 2021, 32(7): 687-695.
- [3] ZHOU Y, WANG L M, WANG T, et al. Research on reciprocity optical path of optical voltage transformer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 81-88.
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.
- [4] WANG W L, LIU Q, LIU Z Y, Wu Q, et al. Simulation of a temperature-compensated voltage sensor based on photonic crystal fiber infiltrated with liquid crystal and ethanol[J]. Sensors, 2022, 22(17): 6374.
- [5] HE X Q, LI C S, YANG X Y, et al. An optoelectronic voltage sensor based on timer chip and pulse duration ratio modulation[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(9): 909-914.
贺雪倩, 李长胜, 杨心月, 等. 利用计时器芯片和脉冲占空比调制的光电式电压传感器[J]. 光电子 • 激光, 2020, 31(9): 909-914.
- [6] YANG Q, SUN S P, SIMA W X, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 349-367.
杨庆, 孙尚鹏, 司马文霞, 等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 349-367.
- [7] LI Z H, YAN S H, HU W Z, et al. Research and application situation analysis of optical voltage transformers[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3230-3236.
李振华, 闫苏红, 胡蔚中, 等. 光学电压互感器的研究及应用现状分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3230-3236.
- [8] YANG H R, HUANG W L, JIAO S X, et al. Temperature independent polarization-maintaining photonic crystal fiber with regular pentagon air hole distribution[J]. Optik, 2019, 185: 390-396.
- [9] YANG B, TENG F, ZHANG Z H, et al. On orbit validation and design of high precision photonic crystal fiber optic gyroscope[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2022, 30(1): 113-120.
- [10] XU X B, WANG X Y, GAO F Y, et al. Photonic crystal fiber-optic gyroscope technology and its first space experiment[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(1): 1-7.
徐小斌, 王晓阳, 高福宇, 等. 光子晶体光纤陀螺技术及其首次空间试验[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(1): 1-7.
- [11] ZHANG C J, ZHANG Z H, XU X B, et al. Thermally optimized polarization-maintaining photonic crystal fiber and its FOG application[J]. Sensors (Basel), 2018, 18(2): 567.
- [12] LI M C, HUI F, ZHAO X M. Optimized design of a photonic crystal fiber for high-precision FOGs[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2019, 27(3): 373-377.
李茂春, 惠菲, 赵小明. 一种高精度光纤陀螺用光子晶体光纤设计[J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27(3): 373-377.
- [13] YANG H R, GUO Y C, XU S B, et al. Thermal characteristics of quartz crystal and analysis of thermal-induced system error in optical fiber voltage sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 8169-81176.
杨汉瑞, 郭宜昌, 徐士博, 等. 石英晶体热特性及光纤电压传感器热致系统误差分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 8169-8178.
- [14] YANG Y H, YANG F L, LU L, et al. Research on interferometer photonic crystal fiber optic cyroscope technology[J]. Acta Optic Sinica, 2018, 38(3): 0328004.
杨远洪, 杨福铃, 陆林, 等. 干涉型光子晶体光纤陀螺技术研究[J]. 光子学报, 2018, 38(3): 0328004.
- [15] BOHERT K, WILDERMUTH S. Fiber-optic voltage sensor using fiber gyro technology[J]. Procedia Engineering, 2010, 5: 1091-1094.
- [16] SUN Z M, WANG S H, LI J W, et al. Analysis of bias thermal stability of interferometer fiber-optic gyroscope using a solid-core polarization-maintaining photonic crystal fiber[J]. Optical Review, 2016, 23(6): 968-975.
- [17] YU J, ZHANG C X, WANG X X, et al. Reflective in-line sagnac interferometer-type fiber optical voltage sensor based on converse piezoelectric effect[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(12): 4017-4022.
于佳, 张春熹, 王夏霄, 等. 基于逆压电效应的 In-line Sagnac 反射式光纤电压互感器[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4017-4022.

作者简介:

杨汉瑞 (1986—), 女, 博士, 副教授, 主要研究领域为光纤传感与智能光电检测技术, 电力设备光电监测与故障诊断技术。