

温度和电场作用下保偏光纤对方位传递的影响

杨志勇, 宋俊辰*, 蔡伟, 陆高翔

火箭军工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 陕西 西安 710025

摘要 针对基于保偏光纤的非通视方位传递系统中温度与电场引起的方位传递误差, 从非通视方位传递系统的工作原理出发, 分别推导了基于温度、电场作用保偏光纤的方位角解算模型, 并仿真分析了保偏光纤长度、热膨胀系数及电场振幅等因素对方位传递精度的影响。实验结果表明, 当温度为 20 °C 时, 方位角解算误差对温度不敏感; 当温度高于 20 °C 时, 方位角解算误差容易受温度、保偏光纤长度的影响, 可通过调整保偏光纤的热膨胀系数、泊松比控制方位传递误差。电场大小和电场作用长度共同影响方位角解算误差, 当作用角度为 45° 时, 电场振幅不会产生方位角解算误差。该研究结果对保偏光纤非通视方位传递系统的环境适应性研究及系统测量精度的提高具有一定的指导意义。

关键词 光纤光学; 保偏光纤; 方位传递; 相位差; 温度; 电场

中图分类号 TH744

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2106002

Influence of Polarization-Maintaining Fibers on Azimuth Transmission Under Variable Temperature and Electric Field

Yang Zhiyong, Song Junchen*, Cai Wei, Lu Gaoxiang

Armament Launch Theory and Technology Key Discipline Laboratory of PRC, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China

Abstract Given the azimuth transmission errors caused by temperature and electric fields in the non-line-of-sight azimuth transmission system based on polarization-maintaining fibers, we derive azimuth calculation models for polarization-maintaining fibers under the action of a variable temperature and electric field, respectively, from the perspective of the working principle of the non-line-of-sight azimuth transmission system. We also simulate and analyze the influences of the length and thermal expansion coefficient of the polarization-maintaining fibers and the electric field amplitude on the azimuth transmission accuracy. The experimental results show that when the temperature is 20 °C, the azimuth solution error is not sensitive to temperature, whereas when the temperature is higher than 20 °C, it is significantly affected by temperature and the length of the polarization-maintaining fibers. The azimuth transmission error can be controlled by adjusting the thermal expansion coefficient and Poisson's ratio of the polarization-maintaining fibers. The azimuth solution error is affected by both the electric field magnitude and the length of the polarization-maintaining fibers within the electric field. When the action angle is 45°, the electric field amplitude will not produce an azimuth solution error. The conclusion of the study is of guiding significance for studying the environmental adaptability and improving the system measurement accuracy of non-line-of-sight azimuth transmission systems based on polarization-maintaining fibers.

Key words fiber optics; polarization-maintaining fiber; azimuth transmission; phase difference; temperature; electric field

OCIS codes 060.2420; 060.2340; 120.6780; 260.1440

收稿日期: 2021-02-19; 修回日期: 2021-03-20; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(61505254)

通信作者: *juicec_s@163.com

1 引言

基于磁光调制的通视方位传递技术^[1]要求携带方位信息的偏振光必须沿直线传播且无遮挡,因此,人们提出了基于保偏光纤的新型非通视方位传递技术^[2]。保偏光纤理论上能实现非通视条件下方位信息的传递,因此,在航天器发射初始对准、仪器测量及隧道工程等领域具有广阔的应用前景。

依据晶体的双折射效应,光在保偏光纤内部以正交偏振态的偏振模形式传输。为了避免偏振模之间的能量耦合,在光纤中引入几何或应力双折射,以增大偏振模之间的传播常数差异,从而有效避免模间耦合。保偏光纤被广泛应用于光纤水听器、光纤陀螺等高精密光学仪器中^[3-4],外部环境变化不可避免地会影响保偏光纤的性能,导致仪器的精度下降,人们也已经对这类问题进行了长期研究^[5-6]。温度对保偏光纤偏振性能的影响比较突出,如基于保偏光纤的光纤陀螺处于低温工作环境时,保偏光纤容易发生微弯和模式耦合,导致光纤陀螺的偏振性能恶化^[7]。传统应力型保偏光纤(熊猫型和领结型)根据制作原理引入了应力区,但应力区对温度敏感,在温度作用下保偏光纤的双折射率随温度的升高逐渐减小^[8-9]。Shiue 等^[10]研究了温度对双层光纤的影响,用粘弹性理论分析了温度作用下双层光纤的热应力,得到温度与双层光纤材料特性(杨氏模量、热膨胀系数、泊松比和松弛时间)之间的关系,为温度作用下保偏光纤性能的分析提供了参考。此外,电

场作用下光通过晶体时会发生双折射现象,使保偏光纤中存在非线性器件的克尔效应^[11-13]。目前,国内外学者主要利用克尔效应原理研究电场测量,但对电场作用下克尔效应的研究不多,针对克尔效应作用下保偏光纤传递方位信息的研究更少。而基于保偏光纤的非通视方位传递系统中保偏光纤偏振模之间的相位差变化会直接影响方位角的解算精度,因此,研究温度、电场对方位传递精度的影响具有重要意义。

本文从非通视方位传递原理出发,分析了偏振模相位差对方位传递的影响,根据热光效应、光弹效应和克尔效应分析了温度、电场作用下保偏光纤偏振模的折射率变化情况。以折射率引起的附加相位差为基础建立了方位角解算模型,对系统方位传递精度的影响因素进行了仿真分析。

2 基本原理

图 1 为基于保偏光纤的非通视方位传递系统,上、下仪器用保偏光纤连接,分别安装在非通视位置。上仪器中激光器发出的激光经起偏器成为线偏振光,携带起偏器方位信息的线偏振光被耦合进保偏光纤并传输至下仪器的调制器中。偏振光通过调制器内部磁光材料时,在调制信号驱动产生的交变磁场作用下实现偏振光信号的调制。调制后的偏振光信号经过检偏器、聚焦镜、光电转换、信号检测处理等,提取出与方位角对应的电信号,并驱动下仪器的转动,完成方位同步,进而实现非通视条件下方位信息的传递。

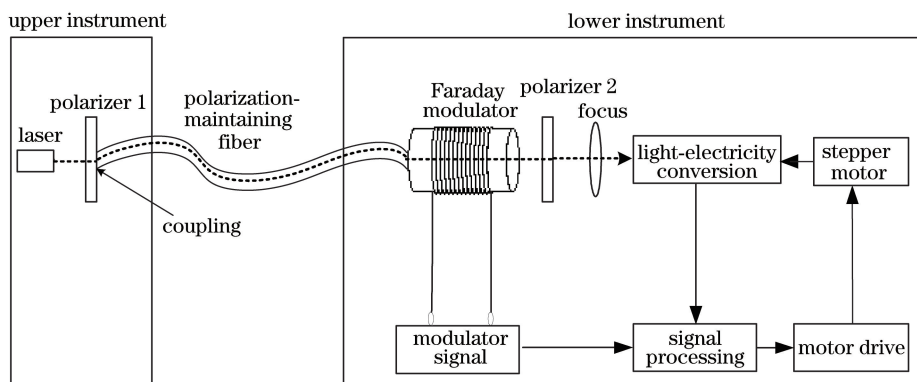


图 1 基于保偏光纤的方位传递系统

Fig. 1 Azimuth transmission system based on polarization-maintaining fiber

借助麦克斯韦列描述方位传递时的偏振光状态以及琼斯矩阵进行方位传递系统光学器件的特性描述,利用琼斯矩阵变换麦克斯韦列的方法求解携带方位信息偏振光的传输状态和传输结果。经过光调制器输出的光强信号可表示为

$$I = \frac{1}{4} I_0 [1 - \cos(m_f \sin \omega t) \cos 2\alpha - \sin(m_f \sin \omega t) \sin 2\alpha \cos \delta], \quad (1)$$

式中, I_0 为经过起偏器后的光强, t 为时间变量, $m_f = 2V_{\text{TGG}} B_m L_{\text{TGG}}$ 为调制度, V_{TGG} 为磁光材料的维

尔德常数, B_m 为磁光调制器中交变磁场的最大幅值, L_{TGG} 为磁光材料的长度, α 为方位角, ω 为调制线圈所加正弦激励信号的角频率, δ 为光纤偏振模固有双折射产生的相位差。将(1)式中的 $\cos(m_f \sin \omega t)$ 和 $\sin(m_f \sin \omega t)$ 展开为第一类贝塞尔函数并忽略二阶以上的高阶项, 得到光电转换后的电信号, 可表示为

$$u \approx ku_0 [1 - J_0(m_f) \cdot \cos 2\alpha - 2J_1(m_f) \cdot \sin 2\alpha \cos \delta \sin \omega t - 2J_2(m_f) \cdot \cos 2\alpha \cos(2\omega t)], \quad (2)$$

式中, $u_0 = \eta I_0 / 4$, η 为光电转换系数, k 为放大系数, J 为第一类贝塞尔函数。令 $U = 2ku_0 J_1(m_f) \sin(2\alpha)$, $V = 2ku_0 J_2(m_f) \cos(2\alpha)$, 对混合信号进行隔直滤波, 得到交流信号

$$u_A = -U \cos \delta \sin \omega t - V \cos(2\omega t). \quad (3)$$

交流信号 u_A 中始终存在两特殊极值点 u_{A1} 和 u_{A2} , 两极值点的横坐标不随方位角及相位差的变化而变化, 能通过特定方式采集得到, 可表示为

$$\begin{cases} u_{A1} = 2ku_0 [J_2(m_f) \cos(2\alpha) - J_1(m_f) \cos \delta \sin(2\alpha)] \\ u_{A2} = 2ku_0 [J_2(m_f) \cos(2\alpha) + J_1(m_f) \cos \delta \sin(2\alpha)] \end{cases}, \quad (4)$$

对极值点 u_{A1} 和 u_{A2} 进行“差除和”处理, 得到方位角解算模型

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left[\sec \delta \frac{J_2(m_f)}{J_1(m_f)} \cdot \frac{u_{A2} - u_{A1}}{u_{A2} + u_{A1}} \right], \quad (5)$$

式中, 固有相位差 δ 需要根据保偏光纤的性能参数和光纤长度提前推算设定, u_{A1} 和 u_{A2} 可通过取样积分电路采集, 采集的准确性会直接影响方位传递精度。

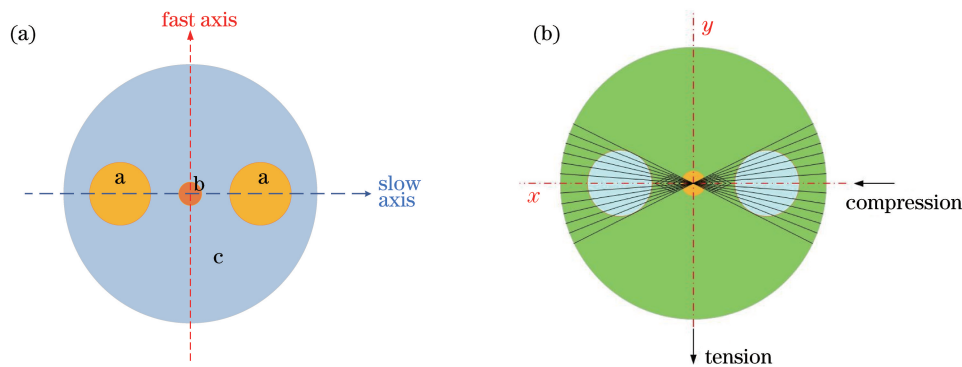


图 2 熊猫型保偏光纤的结构。(a)截面示意图;(b)应力作用示意图

Fig. 2 Structure of the panda polarization-maintaining fiber. (a) Schematic diagram of the cross section; (b) schematic diagram of the stress action

温度变化对光纤的折射率和双折射率都会造成不同程度的影响, 实际应用中, 温度变化还会使光纤的保偏性能产生波动, 导致光纤的总体性能下降。

3 模型构建

3.1 温度影响模型

双折射是波动光学中一种重要的现象^[14-15], 而光纤内部材料介质并不都是各向同性的, 因此同样存在双折射。常规光纤的双折射率很小, 对外界产生的不良影响几乎没有抵抗力。熊猫型保偏光纤在生产中通过人为引入高双折射率, 提高其对外界不良影响的抵抗力。由于非通视方位传递系统引入了保偏光纤, 在方位信息高效传输过程中尤其关注保偏光纤的偏振性能, 而保偏光纤的偏振性能与双折射特性息息相关。当温度发生变化时, 保偏光纤中的双折射受热膨胀效应、径向压力热效应和轴向应变热效应的影响^[16]。熊猫型保偏光纤主要受包层和应力施加部分热膨胀系数不匹配引起的直接热效应(热膨胀效应)影响, 这种效应与保偏光纤固有的双折射原理相同。而径向压力热效应、轴向应变热效应是由涂层的间接机械效应引起的, 温度的变化会在光纤表面产生径向压力, 并沿光纤产生额外的轴向应变, 径向压力和额外的轴向应变都会改变光纤的双折射率。

图 2(a)为熊猫型保偏光纤的截面图, 其中, a 表示掺杂石英棒的应力区, b 表示纤芯, c 表示包层, 且应力区的热膨胀系数 α_a 大于包层的热膨胀系数 α_c 。沿 x 轴存在压应力, 沿 y 轴存在拉应力, 如图 2(b)所示。可以发现, 温度变化及应力区 a 与包层 c 的泊松比不同均会使纤芯 b 的内部结构发生显著变化, 各向异性应力也会发生变化^[17-18]。

为保证引入保偏光纤的非通视方位传递系统能适应环境因素的影响, 以熊猫型保偏光纤为例, 进一步分析温度与方位信息传输的关系。熊猫型保偏光纤的

双折射率可表示为

$$B = \frac{\beta_x - \beta_y}{2\pi/\lambda} = \frac{\beta_x}{k_0} - \frac{\beta_y}{k_0} = \frac{\Delta\beta}{k_0} = n_x - n_y, \quad (6)$$

式中, B 为熊猫型保偏光纤的双折射率, β_y 、 β_x 分别为入射光在 y 方向和 x 方向的线偏振模在保偏光纤中的传播常数, λ 为波长, k_0 为入射光在真空中的波数, n_y 、 n_x 分别为熊猫型保偏光纤快轴(y 轴)和慢轴(x 轴)的折射率。对于保偏光纤, 存在 $B = B_s + B_{s0} + B_G$, 其中, B_G 为保偏光纤纤芯形状差异引起的几何分量, B_{s0} 为不对称纤芯热膨胀差异引起的自应力分量, B_s 为应力区引起的应力分量。由于熊猫型保偏光纤的 B_s 远大于 B_G 和 B_{s0} , 因此, 实验中只讨论 B_s , 即 $B = B_s$ 。

根据热光效应、光弹效应可知^[19], 在温度作用下, 熊猫型保偏光纤中存在

$$B = \frac{\Delta\alpha EC\epsilon T}{1 + \nu}, \quad (7)$$

式中, $\Delta\alpha$ 为熊猫型保偏光纤应力区与纤芯之间的热膨胀系数差值, E 为保偏光纤的杨氏模量, C 为保偏光纤的光弹系数, ϵ 为保偏光纤的纤芯椭圆度(理想情况下, 熊猫型保偏光纤的 $\epsilon = 1$), ν 为熊猫型保偏光纤的泊松比系数, T 为熊猫型保偏光纤的作用温度。对于一段温度作用长度为 L 、波长为 λ 的熊猫型保偏光纤, 两偏振模式间的相位差 $\Delta\delta$ 可表示为

$$\Delta\delta = \frac{2\pi L}{\lambda} (n_s - n_f), \quad (8)$$

式中, n_s 和 n_f 分别为温度作用下熊猫型保偏光纤慢轴和快轴的折射率, 温度作用下熊猫型保偏光纤的相位差可表示为

$$\Delta\delta = \frac{2\pi}{1 + \nu} EC\Delta\alpha \frac{\epsilon L T}{\lambda}, \quad (9)$$

将(9)式代入(3)式, 得到

$$u_{A\omega} = -U\cos(\delta + \Delta\delta)\sin\omega t - V\cos(2\omega t), \quad (10)$$

式中, $u_{A\omega}$ 为考虑温度影响后系统调制得到的交流信号, 为了便于公式推导, 设

$$\begin{cases} B_1 = -2ku_0 J_1(m_f) \sin(2\alpha) \cdot \cos(\delta + \Delta\delta) \\ B_2 = -2ku_0 J_2(m_f) \cos(2\alpha) \end{cases} \quad (11)$$

可以发现, 相位差变化只会导致交流信号的极值发生变化, 极值点的横坐标则保持不变, 利用取样积分电路采集极值点 $u_{A1\omega}$ 、 $u_{A2\omega}$, 得到

$$\begin{cases} u_{A1\omega} = 2ku_0 J_2(m_f) \cos(2\alpha) - \\ \quad 2ku_0 J_1(m_f) \sin(2\alpha) \cdot \cos(\delta + \Delta\delta) \\ u_{A2\omega} = 2ku_0 J_2(m_f) \cos(2\alpha) + \\ \quad 2ku_0 J_1(m_f) \sin(2\alpha) \cdot \cos(\delta + \Delta\delta) \end{cases} \quad (12)$$

对极值点 $u_{A1\omega}$ 、 $u_{A2\omega}$ 进行“差除和”处理, 得到温度作用下方位角的解算模型

$$\alpha_\omega = \frac{1}{2} \arctan \left[\tan(2\alpha) \sec \delta \cos \left(\delta + \frac{2\pi}{1 + \nu} EC\Delta\alpha \frac{LT}{\lambda} \right) \right]. \quad (13)$$

3.2 电场影响模型

存在外加静电场或低频电场 \mathbf{E}_k 时, 保偏光纤的光学介电常数 $\tau(\omega, \mathbf{E}_k)$ 为 \mathbf{E}_k 的函数, 对于足够小的 \mathbf{E}_k , 可将 $\tau(\omega, \mathbf{E}_k)$ 展开为 \mathbf{E}_k 的幂级数^[20], 即

$$\begin{aligned} \tau(\omega, \mathbf{E}_k) = & a_0(\omega) + a_1(\omega + \Omega)\mathbf{E}_k + \\ & a_2(\omega + 2\Omega)\mathbf{E}_k \cdot \mathbf{E}_k + \dots, \end{aligned} \quad (14)$$

式中, ω 和 Ω 分别为光和电场的角频率。(14)式中总是存在与电场平方成比例及更高次的偶次项, 对于外加电场作用保偏光纤的情况, 折射率的变化与外加电场振幅的平方成正比, 即克尔效应。从非线性光学角度分析可知, 克尔效应就是外加电场与光电场在介质内通过三阶非线性极化率作用产生的三阶非线性极化效应。电场作用下保偏光纤引起的克尔效应产生的相位差可表示为

$$\Delta\delta_E = 2K_E L_k \mathbf{E}_k^2 \pi, \quad (15)$$

式中, K_E 为克尔常数, 实验使用的保偏光纤 $K_E = 3 \times 10^{-15} \text{ m/V}^2$, L_k 为电场作用保偏光纤的长度。参考温度影响模型的建立过程, 得到外加电场条件下方位角的解算模型为

$$\alpha_k = \frac{1}{2} \arctan \left[\sec \delta \cos(\delta + 2K_E L_k \mathbf{E}_k^2 \pi) \tan(2\alpha) \right]. \quad (16)$$

4 仿真分析

4.1 温度仿真

非视通方位传递系统在保偏光纤的连接使用过程中, 不可避免地会受到外界环境温度的影响, 尤其是在不同纬度地区工作时, 温度对系统的微扰不可忽视。由上述理论推导过程可知, 温度作用保偏光纤的方位传递精度会受到多个因素的影响。设保偏光纤的工作波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 杨氏模量 $E = 7.8 \times 10^{10}$, 泊松比 $\nu = 0.186$, 热膨胀系数差值 $\Delta\alpha = 4.5 \times 10^{-7}$, 光纤固有双折射导致的相位差为 $\pi/6$, 光弹系数 $C = 3.43 \times 10^{-12}$, 调制度 $m_f = 0.087 \text{ rad}$, 方位角为 $30'$ 、 30° 时方位角解算误差随温度大小和温度作用长度的变化曲线如图 3 所示。可以发现, 温度大小和温度作用长度共同影响方位角解算精度, 且不同方位角解算情况下的作用规律基本相同, 但解算误差随方位角的变化而变化。

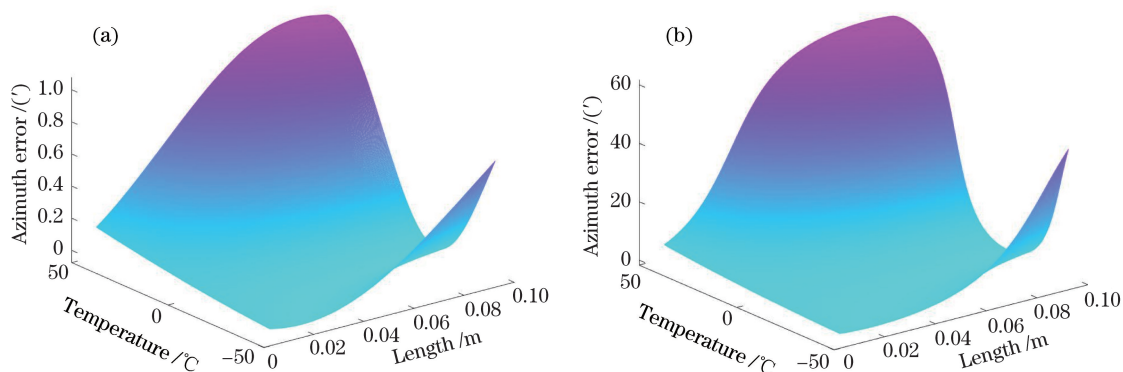


图 3 温度作用下的误差图。(a) $\alpha=30'$; (b) $\alpha=30^\circ$

Fig. 3 Error graph under temperature action. (a) $\alpha=30'$; (b) $\alpha=30^\circ$

温度作用保偏光纤长度 $L=10\text{ cm}$, 温度为 $20\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$, $-80\sim -20\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内方位角的变化情况如图 4 所示。可以发现, 在其他条件确定时, 方位角解算误差与方位角近似呈正弦曲线变化关系, 原因是方位角解算误差推导中省略了贝塞尔

函数二阶以上的高阶项^[21]。此外, 还需进一步分析方位角为 30° 时方位角解算误差随温度作用保偏光纤长度、温度大小、保偏光纤中不同材料成分掺杂比引起的热膨胀系数差异及保偏光纤泊松比的变化情况。

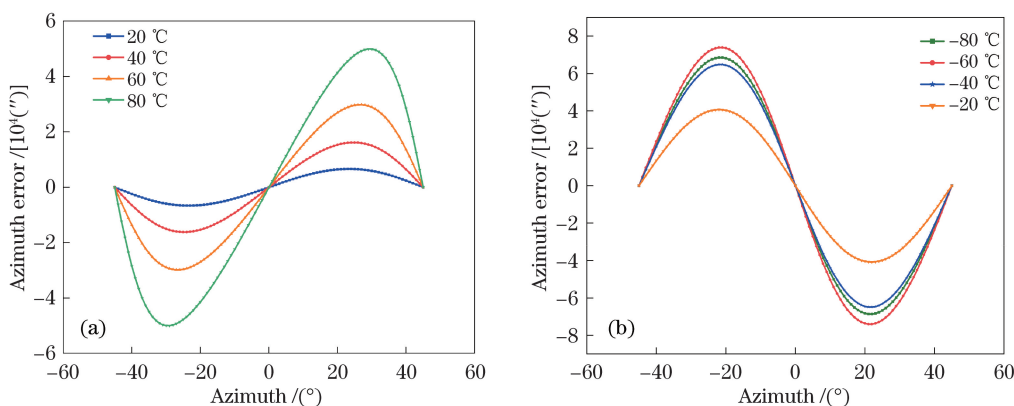


图 4 方位角引起的误差。(a) $20\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$; (b) $-80\sim -20\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 4 Error caused by azimuth. (a) $20\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$; (b) $-80\sim -20\text{ }^\circ\text{C}$

图 5 为方位角解算误差在温度为 $20\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 及 $-70\sim -5\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内随保偏光纤长度的变化曲线。由图 5(a) 可知, 当保偏光纤长度增大时, 方位角解算

误差受温度影响的程度增大; 当保偏光纤长度较小时, 温度微扰敏感程度大幅降低, 方位角解算误差在可接受范围内。由图 5(b) 可知, 在 $-70\text{ }^\circ\text{C}\sim -5\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范

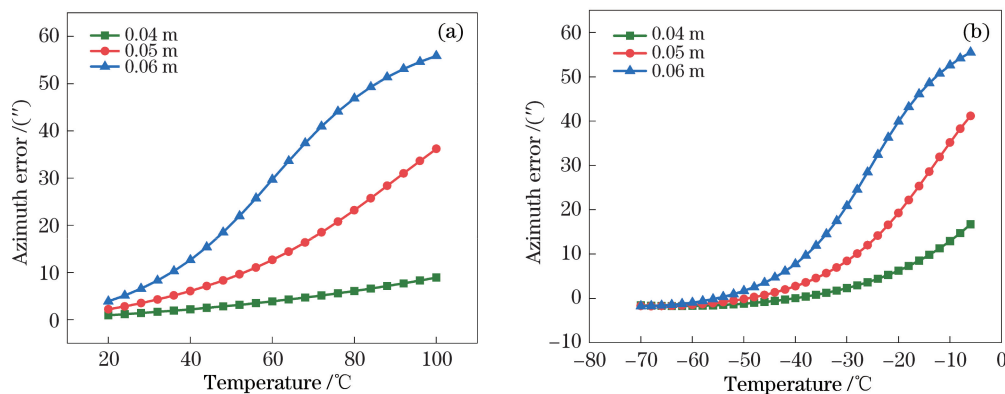


图 5 温度作用长度引起误差。(a) $20\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$; (b) $-70\sim -5\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 5 Error caused by the length of temperature action. (a) $20\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$; (b) $-70\sim -5\text{ }^\circ\text{C}$

围内,方位角解算误差随温度的升高不断增大,且温度作用的保偏光纤长度会直接影响方位角解算误差。

保偏光纤长度为 1~10 cm,温度分别为 0,10,30,50 °C 时的方位角解算误差如图 6(a)所示,温度分别为 0,-10,-30,-50 °C 时的方位角解算误差如图 6(b)所示。由图 6(a)可知,温度升高时,方位角解算误差受温度作用保偏光纤长度的影响程度增大;当温度为 10 °C 时,温度作用下方位角解算误差基本不受保偏光纤长度的影响。由图 6(b)可知,当温度作用下保偏光纤的长度为 6~10 cm 且温度从

-10 °C 开始降低时,方位角解算误差受温度作用保偏光纤长度的影响增大。当温度为 -10 °C 和 -30 °C,温度作用下保偏光纤的长度为 1~10 cm 时,方位角解算误差随保偏光纤长度的变化较小,方位角解算误差在可接受范围内。当作用温度为 0 °C 时,方位角解算误差为 0,且两组实验结果均能验证该规律。此外,当温度作用下保偏光纤的长度超过 5 cm 时,温度对方位角解算误差的影响较大,因此在实际应用中减小温度作用的保偏光纤长度可以有效提升系统的方位传递精度。

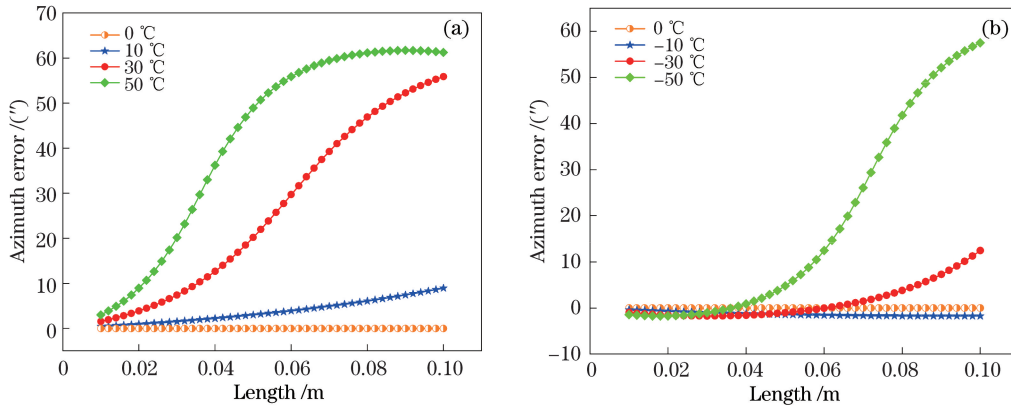


图 6 温度引起的误差。(a)温度为 0,10,30,50 °C;(b)温度为 0,-10,-30,-50 °C

Fig. 6 Error caused by temperature. (a) Temperature is 0, 10, 30, 50 °C; (b) temperature is 0, -10, -30, -50 °C

由图 2(a)可知,熊猫型保偏光纤由应力区 a、纤芯 b 和包层 c 三部分组成,应力区的主要成分为氧化硼和二氧化硅,纤芯的主要成分为二氧化锗和二氧化硅,包层为纯二氧化硅,二氧化硅的热膨胀系数 $\alpha_0 = 5.4 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,氧化硼的热膨胀系数 $\alpha_B = 10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,二氧化锗的热膨胀系数 $\alpha_{Ge} = 7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,掺杂氧化硼或二氧化锗保偏光纤的热膨胀系数可用混合模型表示为^[22]

$$\alpha = (1 - m)\alpha_0 + m\alpha_1, \quad (17)$$

式中, α_1 为掺杂氧化硼或二氧化锗光纤的热膨胀系数, m 为掺杂材料的摩尔分数。4 组保偏光纤掺杂材料的摩尔分数如表 1 所示。

表 1 保偏光纤的掺杂成分

Table 1 Doping composition of polarization-maintaining fiber

$m / \%$	$\alpha_0 / \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$\alpha_B / \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$\alpha_{Ge} / \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta\alpha / \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
5	5.4×10^{-7}	10×10^{-6}	7×10^{-6}	1.5×10^{-7}
20	5.4×10^{-7}	10×10^{-6}	7×10^{-6}	6.0×10^{-7}
35	5.4×10^{-7}	10×10^{-6}	7×10^{-6}	1.05×10^{-6}
45	5.4×10^{-7}	10×10^{-6}	7×10^{-6}	1.35×10^{-6}

根据表 1 提供的参数,仿真了不同摩尔分数掺杂材料下方位角解算误差与温度的变化关系,如图 7 所示。由图 7(a)可知,随着保偏光纤掺杂材料摩尔分数的增加,方位角解算误差会明显增大,这种变化趋势在温度高于 20 °C 后尤其明显。当温度为 -70~-30 °C 时,图 7(b)的变化趋势与图 7(a)类似;当温度为 -35~-5 °C 时,方位角解算误差对保偏光纤掺杂材料摩尔分数不敏感。综合分析可知,温度为 -35~-5 °C、5~20 °C 时,保偏光纤掺杂材料摩尔分数对方位角解算误差的影响较小。

为得到较高的双折射率,制作保偏光纤的过程中掺杂了多种材料,而泊松比与材料特性息息相关,因此,需要分析保偏光纤在温度作用下泊松比对方位角解算误差的影响。图 8 为保偏光纤在不同泊松比下方位角解算误差与温度的变化曲线。可以发现,当保偏光纤作用温度范围为 -70~-50 °C 以及 40~70 °C 时,泊松比与方位角解算误差有直接关系,较大的泊松比会导致较大的方位角解算误差;当保偏光纤作用温度范围为 -40~20 °C 时,泊松比对方位角解算误差的影响较小,此时方位角解算误差在 0°附近微扰波动。

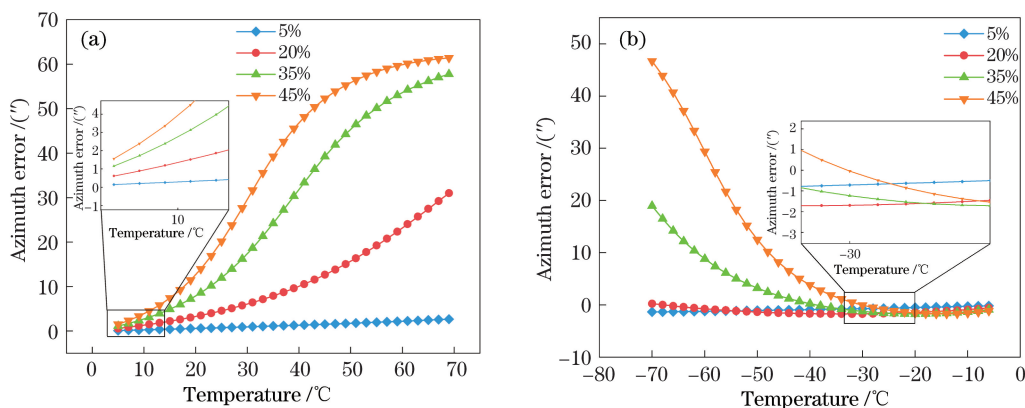


图 7 不同摩尔分数下保偏光纤材料引起的误差。(a) 5~70 °C ;(b) -70~-5 °C
 Fig. 7 Errors caused by polarization-maintaining fiber materials at different mole fractions.
 (a) 5-70 °C ; (b) -70--5 °C

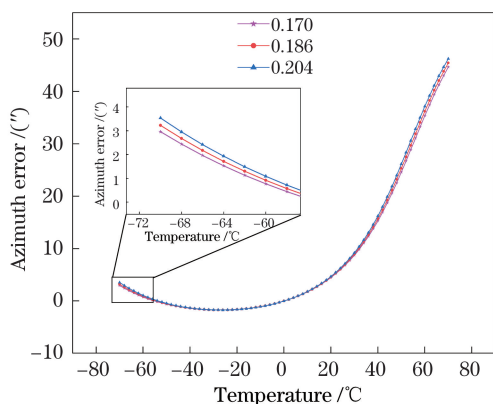


图 8 方位角解算误差随泊松比及温度的变化曲线
 Fig. 8 Variation curve of the azimuth calculation error with Poisson's ratio and temperature

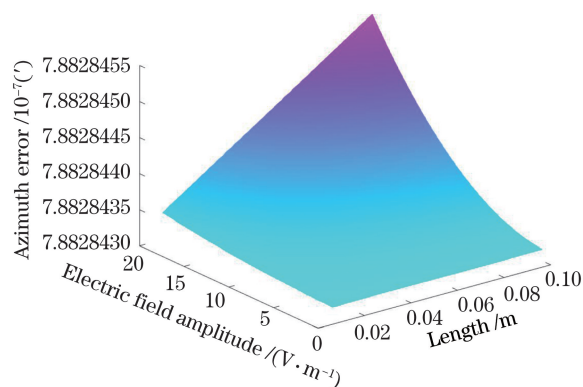


图 9 电场作用误差图
 Fig. 9 Error graph of electric field action

4.2 电场仿真

基于上文推导的方位角与外部环境电场的理论关系,在工作波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 克尔常数 $K_E = 3.0 \times 10^{-15} \text{ m/V}^2$, 调制度 $m_i = 0.087 \text{ rad}$, 方位角为 $30'$ 时仿真了电场作用保偏光纤方位角解算误差随电场振幅大小和电场作用长度的关系, 结果如图 9 所示。可以发现, 电场大小和电场作用保偏光纤长度共同影响方位角解算误差, 当电场振幅为 $0 \sim 10 \text{ V/m}$ 时, 解算误差基本不变。

图 10 为不同电场振幅条件下方位角解算误差随方位角的变化曲线, 对比图 4 和图 10 可以发现, 电场解算误差受方位角影响与温度条件下的作用规律基本相同。当作用角度靠近 45° 时, 解算误差对电场振幅大小的敏感程度逐渐减小; 当作用角度为 45° 时, 电场振幅将不产生方位角解算误差, 这与温度条件下的作用规律基本相同。此外, 电场振幅在 10 V/m 内的方位角解算误差不受影响。

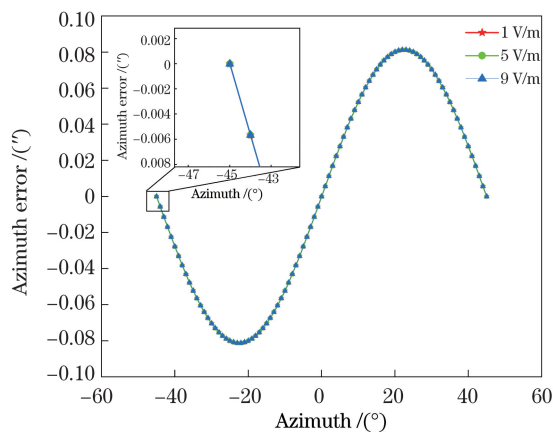


图 10 方位角引起的误差

Fig. 10 Error caused by azimuth

图 11 为电场作用在不同保偏光纤长度下方位角解算误差与电场振幅的关系, 可以发现, 方位角解算误差受电场振幅影响较小, 但随电场振幅的增大呈上升趋势。

图 12 为不同电场振幅作用下方位角解算误差与电场作用保偏光纤长度的关系图, 可以发现, 随着

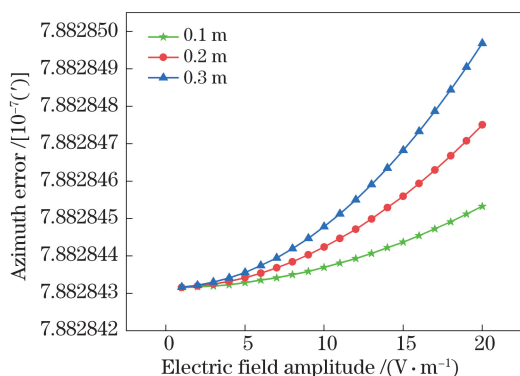


图 11 电场作用保偏光纤长度引起的误差

Fig. 11 Error caused by the length of polarization-maintaining fiber under the action of electric field

电场作用保偏光纤长度的增大,方位角解算误差呈线性递增趋势。此外,电场振幅会明显影响方位角的解算误差。当电场作用的保偏光纤长度小于 20 cm、电场振幅为 5~15 V/m 时,电场对方位角解算误差的影响较小。

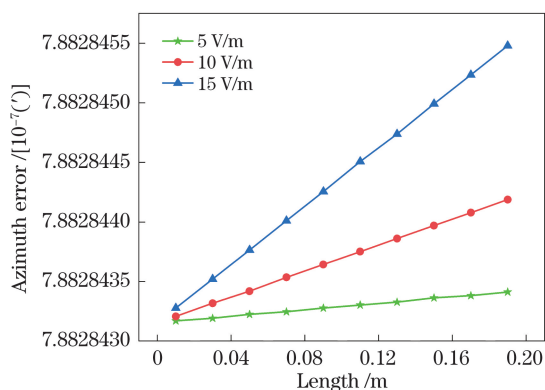


图 12 电场振幅引起误差

Fig. 12 Error caused by electric field amplitude

5 结 论

在基于保偏光纤的非通视方位传递系统的基础上,分析了温度、电场作用下的保偏光纤对方位传递精度的影响。依据热光效应和克尔效应分别建立了温度、电场作用下保偏光纤偏振模折射率的变化关系,并将折射率变化引起的附加相位差添加到方位解算模型上,数值仿真了温度和电场对方位传递精度的影响,给出了实际应用中的相关建议。仿真结果表明,在温度或电场作用下,当作用角度靠近 45°时,温度或电场对方位传递精度的影响程度逐渐降低;当作用角度为 45°时,温度和电场都不影响传递精度。温度、电场以及温度和电场作用的保偏光纤长度共同影响了方位传递精度,依据系统原理进行设计时,保偏光纤长度在满足要求的前提下需尽

可能短,从而保证在一定温度和电场微扰情况下产生的方位传递误差在可接受范围内。研究结果对基于保偏光纤非通视方位传递系统的环境适应性研究、系统测量精度的提高具有一定指导意义。

参 考 文 献

- [1] Dong X N, Gao L M, Shen X J, et al. Passing azimuth vertically with the technic of magneto optic modulation[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(11): 1389-1391.
董晓娜, 高立民, 申小军, 等. 利用磁光调制实现方位角垂直传递[J]. 光子学报, 2001, 30(11): 1389-1391.
- [2] Cai W, Zhao Z H, Yang Z Y, et al. Non-line-of-sight azimuth transmission technology based on polarization-maintaining fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1512001.
蔡伟, 赵钟浩, 杨志勇, 等. 基于保偏光纤的非通视方位传递技术[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1512001.
- [3] Suo X X, Li J, Liu Y Y, et al. Development of resonant fiber optic gyroscope based on hybrid photonic crystal fiber resonator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1206003.
索鑫鑫, 李晶, 刘元元, 等. 基于混合型光子晶体光纤谐振腔的谐振陀螺方案[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1206003.
- [4] Wang X Q, Zhang T, Liang L J, et al. Testing technique of polarization-coupling distribution of fiber coil and beat length of used fiber [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 230602.
王学勤, 张彤, 梁兰菊, 等. 光纤环偏振耦合分布及绕环光纤拍长测试技术[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 230602.
- [5] Iadicco A, Ranjan R, Esposito F, et al. Arc-induced long period gratings in polarization-maintaining panda fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(18): 1533-1536.
- [6] Fang S S, Wu X Q, Zhang G, et al. High-sensitivity fiber optic temperature and strain sensors based on the vernier effect [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0106004.
方莎莎, 吴许强, 张刚, 等. 基于游标效应的高灵敏光纤温度和应变传感器[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0106004.
- [7] Liu J H, Li R C. Analysis of thermal drift in high performance interferometric fiber-optic gyroscopes [J]. Chinese Optics, 2020, 13(2): 333-343.
刘军号, 李瑞辰. 高精度干涉式光纤陀螺热漂移分析[J]. 中国光学, 2020, 13(2): 333-343.

- [8] Kim Y H, Song K Y. Characterization of nonlinear temperature dependence of Brillouin dynamic grating spectra in polarization-maintaining fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(23): 4922-4927.
- [9] Zhang F, Lit J W. Temperature and strain sensitivity measurements of high-birefringent polarization-maintaining fibers[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(13): 2213-2218.
- [10] Shiue S T, Tu Y K. Relaxation of thermal stresses in double-coated optical fibers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 86(8): 4085-4090.
- [11] Li M J, Li S P, Nolan D A. Nonlinear fibers for signal processing using optical Kerr effects[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(11): 3606-3614.
- [12] Ju H, Lee E C, Yang S K, et al. Quantum squeezing by optical Kerr effects in nonlinear waveguides[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2011, 1399: 991-992.
- [13] Magalhães R, Pereira J, Garcia-Ruiz A, et al. Distributed detection of quadratic Kerr effect in silica fibers using chirped-pulse ϕ OTDR[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11199: 1119929.
- [14] Liu J H, Liu Y F, Xu T H. Analytical estimation of stress-induced birefringence in panda-type polarization-maintaining fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(24): 1507-1510.
- [15] Kaczmarek C. Uncertainty of the Sagnac interferometer-based measurement of the modal birefringence of polarization maintaining optical fibers[J]. *Optica Applicata*, 2012, 42(4): 875-885.
- [16] Chiang K S. Temperature sensitivity of coated stress-induced birefringent optical fibers[J]. *Optical Engineering*, 1997, 36(4): 999-1007.
- [17] Park Y, Paek U C, Kim D Y. Characterization of a stress-applied polarization-maintaining (PM) fiber through photoelastic tomography[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(4): 997.
- [18] Zhang Y X. Theoretical study of pressure and temperature detected simultaneously for polarization-maintaining fiber sensor[D]. Xi'an: Xidian University, 2008.
张月星. 保偏光纤传感器压力温度同时探测的理论研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [19] Guan R F, Wang X L, Wang X F, et al. Finite element analysis on stress-induced birefringence of polarization-maintaining optical fiber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(1): 42-45.
- [20] Zhu Z W. Optical fiber imported electric field measurement in transformer oil for oil-paper insulation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
朱宗旺. 油纸绝缘油中电场光纤导入式测量技术研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- [21] Yang Z Y, Zhou Z F, Zhang Z L. Influence of Bessel functions expansions on spatial azimuth measurement error[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(3): 461-465.
杨志勇, 周召发, 张志利. 贝塞尔函数展开对空间方位失调角测量误差的影响[J]. *应用光学*, 2012, 33(3): 461-465.
- [22] Zhu F X, Chen H, Yin J D, et al. Radially polarized field fiber based on circularly symmetric radial birefringence[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0101005.
朱方祥, 陈浩, 尹金德, 等. 基于圆对称径向双折射的径向偏振场光纤[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0101005.