

## 激光与光电子学进展

## 基于磁光晶体的光纤三维磁场传感器研究

张轩<sup>1,2</sup>, 郝鹏<sup>1,2\*</sup>, 苏亚<sup>1,2</sup>, 姚鹏辉<sup>1,2</sup>, 姚晓天<sup>1,2</sup><sup>1</sup>河北大学物理科学与技术学院光信息技术创新中心, 河北 保定 071002;<sup>2</sup>河北省光学感知技术创新中心, 河北 保定 071002

**摘要** 光纤磁场传感器具有抗干扰能力强、小型化、低成本等技术优势。为了实现空间磁场矢量的测量,基于磁光晶体提出了一种光纤三维磁场传感器。然后,设计和构建了光纤三维磁场传感器传感探头,搭建了光纤三维磁场测量系统。分析基于磁光晶体光纤三维磁场传感器的非正交误差,通过对基于磁光晶体的光纤三维磁场传感器三个传感单元两两夹角的准确测量,对系统三轴非正交误差进行标定补偿。实验测试装置利用一对通电线圈构建一维磁场对光纤三维磁场传感器系统进行三维正交标定,三轴标定精度分别为 $0.19^\circ$ 、 $0.26^\circ$ 和 $0.22^\circ$ 。实验结果表明,该基于磁光晶体光纤三维磁场传感器可实现 $0.2\ \mu\text{T}$ 磁场强度分辨率和 $0.5^\circ$ 角度分辨率的磁场矢量测量。

**关键词** 传感器; 磁光晶体; 磁场传感器; 法拉第效应; 光纤传感器; 三轴正交

中图分类号 TP212.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220883

## Research on Three-Dimensional Fiber Optic Vectors of Magnetic Field Sensor Based on Magneto-Optical Crystals

Zhang Xuan<sup>1,2</sup>, Hao Peng<sup>1,2\*</sup>, Su Ya<sup>1,2</sup>, Yao Penghui<sup>1,2</sup>, Yao X. Steve<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Photonics Information Innovation Center, College of Physics and Technology, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China;<sup>2</sup>Hebei Provincial Center for Optical Sensing Innovations, Baoding 071002, Hebei, China

**Abstract** An optical fiber magnetic field sensor has the technical advantages of strong anti-interference ability, miniaturization, and low cost. An optical fiber three-dimensional magnetic field sensor based on a magneto-optical crystal is proposed, in order to achieve the measurement of the space magnetic field vector. Moreover, a three-dimensional fiber optic vector of a magnetic field sensor probe has been designed, constructed, and experimentally demonstrated. The non-orthogonal error of the three-dimensional fiber optic vector of a magnetic field sensor is analyzed, and through the accurate measurement of the angle between the three sensing units of the optical fiber three-dimensional magnetic field sensor based on magneto-optical crystal, the system's three-axis non-orthogonal error is calibrated and compensated. The experimental test device uses a pair of energized coils to build a one-dimensional magnetic field, and calibrate the three-dimensional optical fiber with the three-dimensional magnetic field sensor system. The three-axis calibration accuracy is  $0.19^\circ$ ,  $0.26^\circ$ , and  $0.22^\circ$ , respectively. The experimental results show that the three-dimensional magnetic field sensor based on magneto-optical crystal fiber can measure the magnetic field vector based on the resolution of  $0.2\ \mu\text{T}$  magnetic field intensity and  $0.5^\circ$  angle resolution.

**Key words** sensors; magneto-optical crystal; magnetic field sensor; Faraday effect; fiber optic sensor; triaxial orthogonal

## 1 引言

随着现代社会的发展,电磁逐渐成为生活中不可或缺的一部分,给我们的生活带来极大的便利,生活中已经离不开电磁的使用。磁场传感与测量在地球物

理<sup>[1]</sup>、空间科技<sup>[2]</sup>、工业、医学<sup>[3]</sup>等领域有着十分广泛的应用。传统磁场测量的主要方法包括:磁流体测量<sup>[4]</sup>、磁力法、电磁感应法<sup>[5]</sup>、霍尔效应测量法<sup>[6]</sup>、脉冲测量法、磁共振法<sup>[7]</sup>、磁致伸缩法<sup>[8]</sup>、磁光效应法<sup>[9]</sup>等。随着光纤技术的迅速发展,一些传统测试方法虽然有着出

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-03-31; 录用日期: 2022-05-06; 网络首发日期: 2022-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(12004092)、河北省重点研发计划项目(19212109D)、河北省自然科学基金(F2020201041, F2021201013)、河北省高等学校科学技术研究项目(QN2019035)、河北大学高层次人才科研启动项目(801260201243)

通信作者: haopeng@hbu.edu.cn

色的性能,但在某些特定环境下则会显现出一些缺陷,如体积过大导致无法实现精密操作、功率过大致安全隐患、测量手段陈旧导致精度不够等问题。这些问题促进光纤和微电子器件的光学传感器得以研究和应用,光纤传感技术在磁场测量中的应用也越来越多。相对于传统磁场传感技术,基于光纤磁场传感器具有诸多优点<sup>[9,10-13]</sup>:1)体积较小,可以适用于多种环境受限的区域,得到较高的空间分辨率;2)绝缘性能好, $\text{SiO}_2$ 光纤本身的绝缘性就优于带电金属的传感器;3)抗干扰能力强,光纤传输时以光为传输信号,有非常好的抵抗电磁干扰的能力;4)安全性高,光纤将光约束在纤芯中且不向外辐射,故安全性较高,在特高压电磁或漏磁检测方面同样有着良好的应用前景。

常见光纤磁场传感器有:基于磁致伸缩效应的光纤传感器、干涉式光纤传感器和法拉第磁旋光效应光纤磁场传感器等。基于磁致伸缩效应的传感器的磁致伸缩材料大多都存在磁滞和非线性现象,灵敏度与材料尺寸相关,磁场测量重复性、高空间分辨率测量存在一定的局限性<sup>[8,14]</sup>。基于 Sagnac 干涉法的光纤磁场传感器测量结果准确性受环境温度影响较大,受自身双折射干扰较大,且成本较高<sup>[15-16]</sup>。基于法拉第磁旋光效应的光学磁场传感器利用磁流体、磁光晶体作为传感介质进行磁场感应,具有体积小、成本低、制作方法简单等优点,在电磁场检测领域具有良好的应用前景<sup>[17-18]</sup>。

因此,本文基于磁光晶体提出并搭建一种光纤磁场大小与方向的传感器系统,用于实现空间磁场矢量的测量。采用三个磁光晶体传感单元设计构造出三维磁场传感探头,针对传感探头存在非正交误差这一问

题,建立传感探头三个传感单元位置的空间模型,提出非正交误差校正方法并对搭建的光纤三维磁场传感器进行了非正交标定补偿,同时对通电线圈产生的磁场进行了实验测量。实验结果表明,基于磁光晶体光纤三维磁场传感器可进行空间磁场矢量的传感与测量,且具有较高的磁场大小和方向角度分辨率。该器件具有体积小、重量轻、可靠性高、操作简便和成本低等特点,在电力智能电网领域具有广阔的应用前景。

## 2 基本原理

磁光效应是指当线偏振光在某些晶体中沿光轴传播时,在沿传播方向磁场作用下,光振动的平面会发生偏转,如图 1(a)所示。灰色箭头代表着线偏振光的振动方向,在入射磁光晶体前为竖直方向,在有磁场情况下经过磁光晶体后则振动面会偏转一定角度  $\theta$ ,称为法拉第旋转角,旋转的角度与磁场强度和磁光晶体本身性质有关,旋转角可表示为

$$\theta = VLB, \quad (1)$$

式中: $\theta$ 为偏振光所处的偏振面在晶体中传播同时受磁场影响下所旋转过的角度; $V$ 为维尔德系数,是材料本身的固有属性; $B$ 为外界磁场矢量在光轴方向上投影的分量大小; $L$ 为光传输通过磁光晶体中受磁场影响的长度。当一束偏振光经磁光晶体传输时,在外界磁场的作用下旋转的法拉第旋转角与经过磁场相作用的长度呈正相关。利用一束光通过一个磁光晶体可实现一维磁场的测量,用三个正交的磁光晶体( $B_a$ 、 $B_b$ 、 $B_c$ )组建形成三维坐标系,便可实现空间磁场矢量的测量,如图 1(b)所示,以三个相互正交的磁光晶体构建一空间磁场矢量传感器。

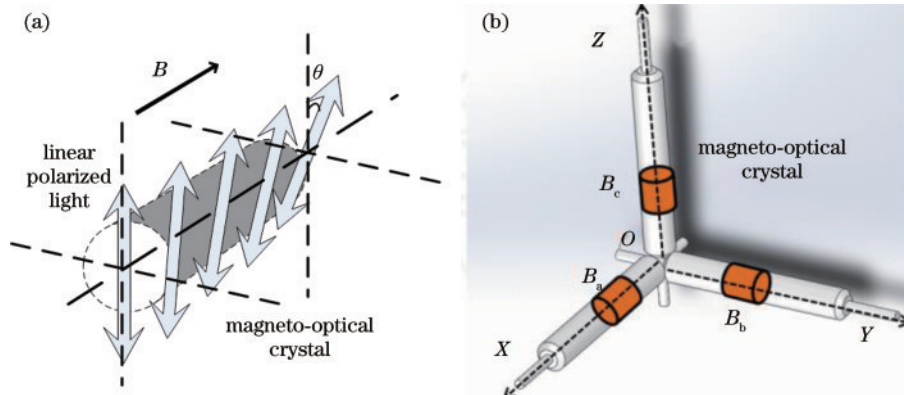


图 1 原理图。(a)法拉第磁光效应;(b)基于磁光晶体的光纤三维磁场传感器探头

Fig. 1 Schematic diagram. (a) Faraday magneto-optical effect; (b) optical fiber three-dimensional magnetic field sensor probe based on magneto-optical crystal

基于磁光晶体光纤三维磁光传感器测得空间某一位置处的矢量磁场  $\mathbf{B}(B_x, B_y, B_z)$  可表示为

$$|\mathbf{B}| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}, B_{x,y,z} = K_{x,y,z} \theta_{x,y,z}, \quad (2)$$

式中: $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$ 分别为基于磁光晶体光纤三维磁光传感器输出相互正交的三个方向上的场强值,其大小由

各方向传感系数  $K_{x,y,z}$  和光偏振旋转角所决定。矢量磁场  $\mathbf{B}(B_x, B_y, B_z)$  测量精度包含场强大小精度和方向角度精度两部分。传感器场强大小精度由各方向磁光晶体传感器的测量精度和三个传感器传感系数测试精度所决定。传感器方向角度精度由各方向磁光晶体

传感器的测量精度和三个传感器的正交精度所决定。基于磁光晶体光纤三维磁光传感器的三个传感单元由于加工误差以及安装工艺存在不正交误差,由三个传感器组成的测量系统会成为非理想正交系,如图 2 所示,图中  $\omega_{ab}$ 、 $\omega_{bc}$ 、 $\omega_{ac}$  为传感单元 a、b、c 每两个传感单元之间的夹角。因此,需要对基于磁光晶体光纤三维磁光传感器进行三维强度测量归一化标定和三轴正交标定。

在图 2 中,设  $OX$ 、 $OY$ 、 $OZ$  分别为传感器三个理想正交坐标轴,一个磁光晶体传感单元 a 与  $X$  轴相重合,另两个传感单元 b 和 c 偏离理想的两正交轴  $Y$  和  $Z$ ,传感单元 a、b、c 每两个传感单元之间的夹角定义为  $\omega_{ab}$ 、 $\omega_{bc}$ 、 $\omega_{ac}$ 。以传感单元 a、b 建立  $XOY$  面,两传感单元交点为坐标原点  $O$ ,传感单元 a 得到的测量值即为  $B_x$ 。 $Y$ 、 $Z$  方向上的场强值  $B_y$ 、 $B_z$ <sup>[19]</sup> 可表示为

$$\begin{cases} B_x = B_a \\ B_y = \frac{B_b - B_a \cos \omega_{ab}}{\sin \omega_{ab}} \\ B_z = \frac{B_c \sin \omega_{ab} + B_b (\sin \omega_{ac} \sin \omega_{ab} - \sin \omega_{bc}) + B_a (\sin \omega_{ab} \sin \omega_{bc} - \sin \omega_{ac})}{|\sin \omega_{ab}| \sqrt{\sin^2(\omega_{ab}) - \cos^2(\omega_{ab}) - \sin^2 \omega_{ac}^2 + 2 \cos \omega_{ab} \cos \omega_{bc} \cos \omega_{ac}}} \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $B_a$ 、 $B_b$ 、 $B_c$  为基于磁光晶体光纤三维磁光传感器内部三个磁光晶体传感单元所测得的磁场值大小。

因此,基于磁光晶体的光纤三维磁光传感器所组成三个磁光晶体传感单元两两之间角度已知情况下,通过上述式(3)进行正交补偿,可得到  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  相互正交的三个方向上的场强大小,其中  $OX$  轴与传感器其中一磁光晶体探头方向相重合,其他两轴与其相正交并符合笛卡尔坐标系规定。

### 3 实验及结果

本文搭建的基于磁光晶体的光纤三维磁场传感系统如图 3 所示。传感系统由放大自发辐射(ASE)光源(VLSS-980-B-500-1 台式激光光源,上海科耐特激光科技有限公司,上海)、1×3 光纤分束器、磁光晶体传感探头、消偏器、平衡光电探测器(BPD, PDB435C, Thorlab, 美国)、数据采集卡(NI 9223)组成。其中,磁

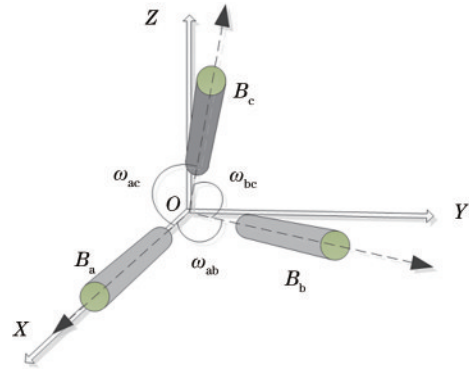


图 2 基于磁光晶体光纤三维磁场传感器正交校正分析模型图  
Fig. 2 Model diagram of three-dimensional magnetic field sensor based on the orthogonal correction analysis of magneto-optical crystal fiber

光晶体传感探头如图 3(b) 所示由三个磁光晶体传感单元组成(传感单元 a 和传感单元 b 为美国通用光电 FCS-001-15T-2I-SM-MM-FC/APC, 传感单元 c 为美国通用光电 FCS-001-15T-3I-SM-MM-FC/APC)。通过三个磁光晶体传感器固定结构保证三个磁光晶体传感单元距离最近,且相互正交。传感探头外形为 10 mm×10 mm×10 mm 正方体,磁光晶体三个传感单元传感方向分别与立方体的三个面平行。ASE 光源发出的光为低偏振度的自然光,为进一步降低偏振度使偏振度接近于 0,可在光源后连接一 Lyot 光纤消偏器。随后,测试光经单模光纤通过一分三光纤分束器进行分束,分别进入磁光晶体传感探头的三个磁光晶体传感单元进行三个正交方向的磁场测量,每个磁场传感器输出两路光信号。传感探头输出两路光信号为线偏振光,通过 Lyot 光纤消偏器进行消偏处理转换为自然光,用以抑制 BPD 偏振相关灵敏度对测量结果

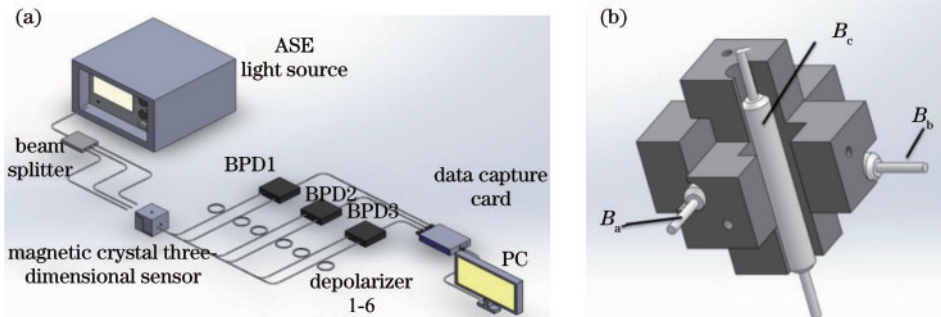


图 3 光纤三维磁场传感系统。(a) 系统组成图;(b) 磁光晶体传感探头结构图

Fig. 3 Optical fiber three-dimensional magnetic field sensing system. (a) System composition diagram; (b) structure diagram of magneto-optical crystal sensing probe

影响。测量的磁场强度与两路光信号输出光强差成正比。由 BPD 平衡光电探测器探测输出每个磁光晶体传感单元的两路光电压值和两路光的差分电压信号经采集卡、上位 PC 机进行信号数据处理, 获得被测三维磁场的测量值。

首先, 对基于磁光晶体光纤三维磁场传感器三个磁光晶体传感单元进行磁场测量强度大小归一化标定。每个磁光晶体传感单元经 BPD 得到的磁场强度可表示为

$$B = K \cdot \theta = K \cdot \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{V_{RF}}{V_1 + V_2}\right), \quad (4)$$

式中:  $V_1$ 、 $V_2$  和  $V_{RF}$  为平衡光电探测器探测输出每个磁光晶体传感单元出射两路光强电压值和两路的差分电压信号;  $K$  为磁光晶体传感单元的传感系数。在三维传感探头组装前, 对三个磁光晶体传感单元进行传感系数标定, 标定实验通过测量已校准的螺线管中心磁场来完成。将三个磁场传感单元分别放在同一螺线管内, 螺线管中心磁场与通电电流标定关系为  $2.14 \mu\text{T}/\text{mA}$ 。通过改变螺线管电流, 在螺线管中心内部产生不同强度磁场, 对三个磁场传感单元进行磁场传感系数标定, 将磁场传感器置于螺线管内部轴线位置, 通过可调直流稳压电源给螺线管通不同的电流, 利用数字万用表读取螺线管通电电流值, 计算得到螺线管内磁场强度。基于磁光晶体的光纤三维磁场传感器三个传感单元测量螺线管产生不同磁场的法拉第转角, 测试结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 数据点拟合后得到的曲线斜率即  $K_a$ 、 $K_b$ 、 $K_c$ , 分别为  $0.0346 \text{ mrad}/\mu\text{T}$ 、 $0.0345 \text{ mrad}/\mu\text{T}$ 、 $0.0699 \text{ mrad}/\mu\text{T}$ 。三个磁场传感器中: 传感器 a、b 的型号相同, 由于磁光晶体传感长度加工误差, 传感系数相差不大; 由于实验室条件限制, 传感单元 c 采用另一型号磁光晶体传感器, 其传感度系数约为 a、b 的 2 倍。将测量得到三个传感单元的传感系数写入基于磁光晶

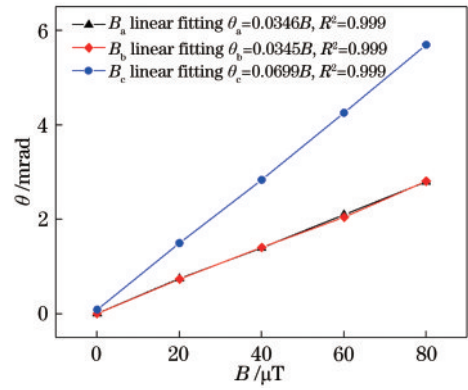


图 4 基于磁光晶体的光纤三维磁场传感器三个传感单元传感系数测试结果

Fig. 4 Test results of sensing coefficients of three sensing units of three-dimensional fiber optic vector magnetic field sensor based on magneto-optical crystal

体光纤三维磁场传感器信号处理算法中, 将三个传感单元进行磁场强度传感系数归一化。

由上述基于磁光晶体光纤三维磁场传感器三轴正交标定算法可知, 测量获得传感器三个传感单元两两之间夹角便可实现传感器的三轴正交标定。基于磁光晶体光纤三维磁场传感器三轴正交标定实验如图 5(a) 所示。将两螺线管间隔一定距离且对称地布置于一旋转平台上, 对称中心为转台中心, 且两螺旋管的中心处于同一直线, 螺线管直径是基于磁光晶体光纤三维磁场传感器传感探头的 2 倍以上。三维磁场传感探头放置于旋转台的中心位置处, 高度方向上三维磁场传感探头中心处与两螺线管中心线高度相同, 与旋转台相分离, 不随旋转台转动而转动。两通电螺线管相串联, 在旋转台中心传感探头处产生的磁场近似为均匀磁场, 磁场的方向与两螺线管中心线相重合。旋转台转动将带动两螺线管一起转动, 两通电螺线管在转台中心产生的均匀平面磁场方向也将随着转台的

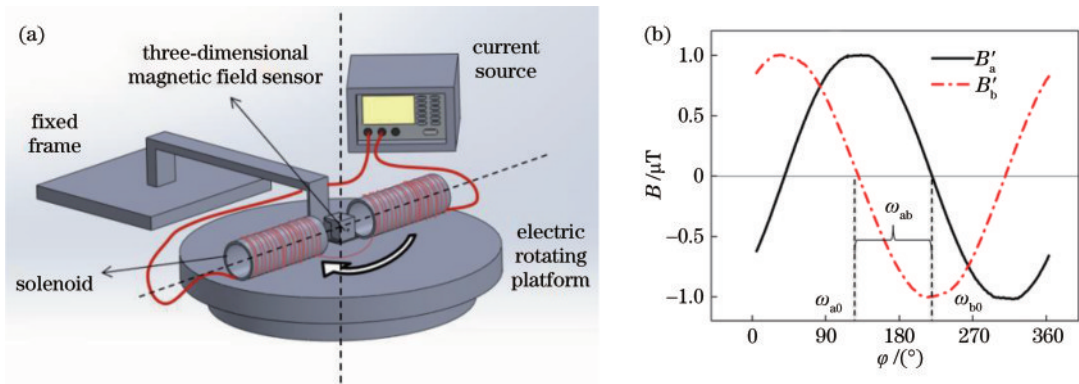


图 5 基于磁光晶体光纤三维磁场传感器三轴正交标定实验。(a) 传感单元夹角测量装置; (b) 传感单元夹角测量原理示意图, 两传感单元夹角  $\omega_{ab} = \omega_{b0} - \omega_{a0}$

Fig. 5 Triaxial orthogonal calibration experiment of three-dimensional magnetic field sensor based on magneto-optical crystal. (a) Measuring device for included angle of sensing unit; (b) schematic diagram of the principle of measuring the angle of sensing unit, and the included angle of two sensing units  $\omega_{ab} = \omega_{b0} - \omega_{a0}$

转动而转动,且转动的角度一致。旋转台转动角度范围为  $360^\circ$ ,其分辨率为  $0.01^\circ$ (无细分),绝对定位精度为  $0.01^\circ$ 。测量三个传感单元两两夹角的原理为:将传感探头某一平面与旋转台平面相互平行地放置于转台中心位置处,旋转与螺线管相互固定的圆形转台,测量得到传感探头两个传感单元的磁场强度测量值与转台转动角度之间的关系,如图 5(b)所示,以  $0 \mu\text{T}$  磁场强度为参考线,获得两传感单元输出为  $0 \mu\text{T}$  时,对应转台旋转角度差值,此差值即为两传感单元的夹角。依次设置传感探头立方体三个相垂直的面与转台相平行,重复上述实验,即可测量获得三个传感单元之间的两两夹角。

利用上述方法,对基于磁光晶体光纤三维磁场传感器三个传感单元里每两个轴夹角重复进行了 10 次测量,测量结果如表 1 所示。三个传感单元两两夹角  $\omega_{ab}$ 、 $\omega_{bc}$ 、 $\omega_{ac}$  的测量值分别为  $89.9^\circ$ 、 $90.0^\circ$ 、 $85.7^\circ$ ,十次

重复测量的标准差分别为  $0.191^\circ$ 、 $0.257^\circ$ 、 $0.218^\circ$ ,反映了搭建的基于磁光晶体光纤三维磁场传感器三轴正交精度为  $0.191^\circ$ 、 $0.257^\circ$ 、 $0.218^\circ$ 。

利用上述测量获得基于磁光晶体光纤三维磁场传感器三传感单元磁场强度归一化标定系数,三个传感单元两两夹角,对基于磁光晶体光纤三维磁场传感器进行磁场强度归一化和三轴正交标定。标定完成后,基于图 5(a)实验装置,基于磁光晶体光纤三维磁场传感器对两通电螺旋管产生的磁场进行了磁场传感实验。将传感探头 YOZ 平面放置与旋转台平行, $\varphi$  为转台相对于 OZ 轴正方向的旋转角度,且 OZ 轴正向相 OY 轴正向旋转为正,磁场矢量正向的起始刻度与  $B_z$  正方向夹角为  $0^\circ$ ,旋转转台,基于磁光晶体的光纤三维磁场传感器三轴输出磁场测量值与转台旋转角度之间关系如图 6(a)所示。测量磁场矢量在 Y 轴和 Z 轴方向的磁场强度  $B_y$  和  $B_z$  随着转台旋转角度呈正弦变化关

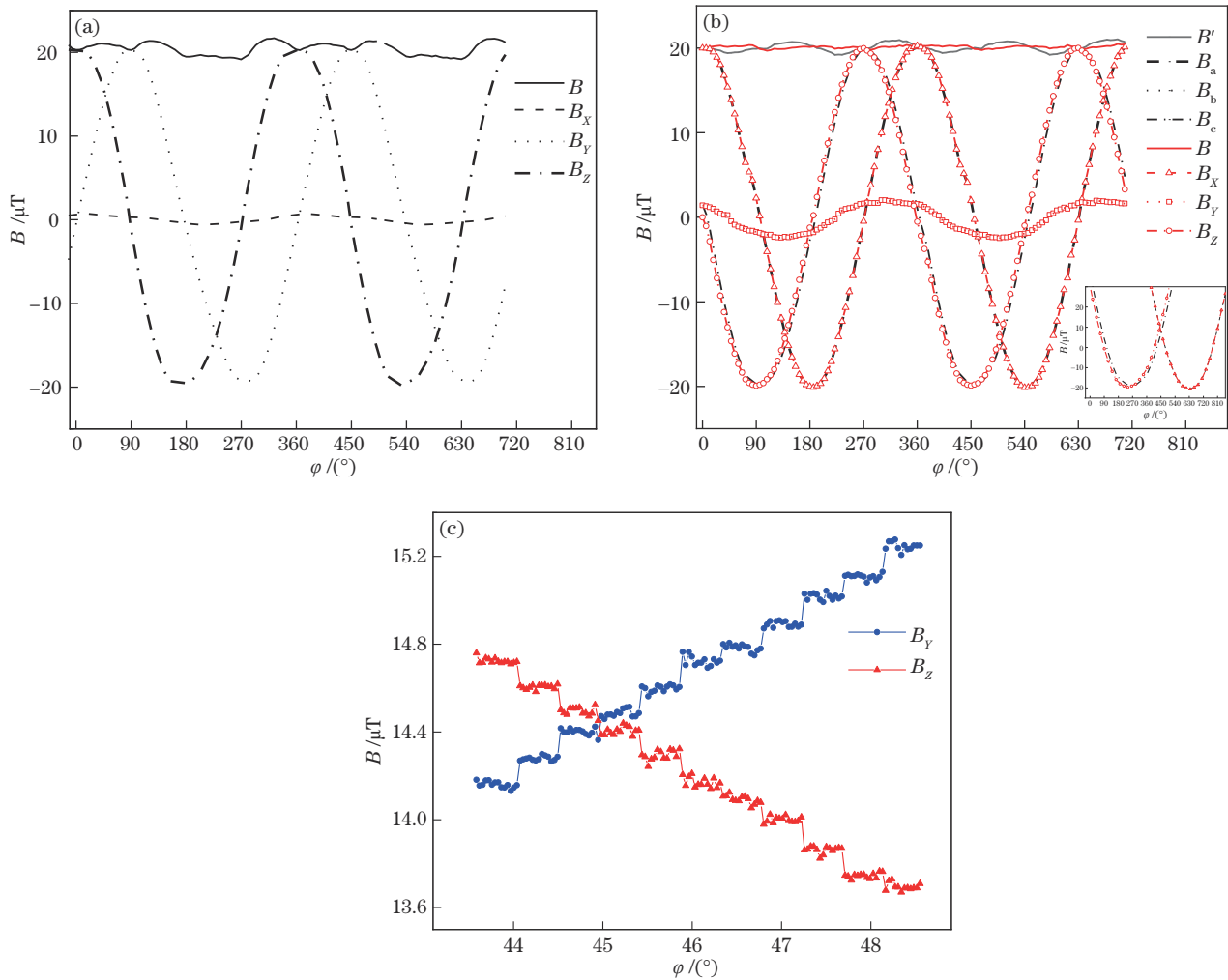


图 6 基于磁光晶体的光纤三维磁场传感器对磁场矢量测量结果。(a)YOZ 平面平行磁场矢量旋转  $720^\circ$  时三维传感器测量结果; (b)XOZ 平面平行磁场矢量旋转  $720^\circ$  时三维传感器测量结果;(c)磁场矢量以  $0.5^\circ$  的步进共旋转  $5^\circ$  时三维传感器测量结果  
Fig. 6 Measurement results of the three-dimensional fiber optic vector magnetic field sensor based on magneto-optical crystal. (a) Measurement results of three-dimensional sensor when YOZ plane rotates  $720^\circ$  parallel to magnetic field vector; (b) measurement results of three-dimensional sensor when XOZ plane rotates  $720^\circ$  parallel to magnetic field vector; (c) measurement results of three-dimensional sensor when the magnetic field vector rotates  $5^\circ$  in steps of  $0.5^\circ$

表 1 基于磁光晶体的光纤三维磁场传感器三个传感单元两两夹角的测量结果

Table 1 Measurement results of the angle between two of the three sensing units of fiber three-dimensional magnetic field sensor based on magneto-optical crystal

Number of times	$\omega_{ab}/(^{\circ})$	$\omega_{bc}/(^{\circ})$	$\omega_{ac}/(^{\circ})$
1	89.7	90.0	85.8
2	90.1	90.2	85.7
3	90.0	90.2	85.8
4	90.1	90.1	85.5
5	89.6	89.6	85.3
6	89.7	90.0	85.5
7	89.7	89.6	85.5
8	90.1	89.6	85.8
9	89.7	90.1	86.1
10	89.8	90.3	85.8
Average	89.9	90.0	85.7
Standard deviation	0.191	0.257	0.218

系,在  $X$  轴方向的磁场强度在  $(0 \pm 0.1) \mu\text{T}$  范围变化,总磁场强度  $B$  在  $(20 \pm 0.75) \mu\text{T}$  范围内变化。可以发现总磁场强度  $B$  测量结果随着磁场的旋转有着一定的波动,产生的原因主要有两个方面,一是来自三个传感单元自身传感随机噪声,二是来自三轴正交误差引起的系统误差。将传感探头  $XOZ$  平面放置与旋转台平行,  $\varphi$  为转台相对于  $OX$  轴正方向的旋转角度,且  $OX$  轴正向向  $OZ$  轴负向旋转为正,起始刻度的磁场矢量正向与  $B_z$  正方向夹角为  $0^{\circ}$ ,旋转转台,基于磁光晶体的光纤三维磁场传感器三轴输出磁场测量值与转台旋转角度之间关系如图 6(b) 所示。  $B'$ 、 $B$  为非正交误差修正前和修正后的总磁场强度测量值,  $B_a$ 、 $B_b$ 、 $B_c$  分别为三个传感单元磁场强度的测量值,  $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$  分别为修正后  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向的磁场强度值。可以看出,  $OX$  和  $OZ$  方向传感单元夹角为  $85.7^{\circ}$ ,以  $OX$  轴为基准进行正交修正,修正前  $B_c$  旋转  $85.7^{\circ}$  测量值从 0 达到最大值  $19.7 \mu\text{T}$ ,修正后  $B_z$  旋转  $90^{\circ}$  测量值从 0 达到最大值  $19.9 \mu\text{T}$ ,非正交误差修正后磁场强度最大值  $B_z$  相对于修正前  $B_c$  增加了  $0.2 \mu\text{T}$ 。同时,非正交误差修正后总磁场强度  $B$  相对于修正前  $B'$  波动范围从  $\pm 0.8 \mu\text{T}$  减少到  $\pm 0.4 \mu\text{T}$ ,提高了总磁场强度测量的准确度。由于传感探头  $XOZ$  平面与旋转台旋转平面未存在一定平行角度误差(即未实现严格平行),  $B_y$  测量值随着转台的转动有着周期波动。

为验证三维磁场传感器的角度分辨率,在通电线圈产生磁场与传感探头  $OZ$  轴成  $45^{\circ}$  附近,设置电动转台以步进  $0.5^{\circ}$  共测量 10 个采样点,共旋转  $5^{\circ}$ ,观测每传感器测量值变化。实验结果如图 6(c) 所示。磁场方向每旋转  $0.5^{\circ}$ ,磁场强度变化约  $0.1 \mu\text{T}$ 。由此可知,搭建的基于磁光晶体光纤三维磁场传感器每轴磁

场强度检测分辨率优于  $0.2 \mu\text{T}$ ,在被测磁场强度大于  $20 \mu\text{T}$  时,可以实现角度分辨率高于  $0.5^{\circ}$  的磁场矢量角度分辨率。

## 4 结 论

光纤磁场传感技术具有体积小、抗干扰、可长距离监测等优点,本文基于磁光晶体搭建了一种光纤三维磁场传感系统,提出了一种通过测量三个传感单元两两夹角进行三维磁场传感探头三轴正交标定补偿的方法。采用精密旋转台和一对通电螺线管搭建了三轴磁场传感探头三轴正交标定补偿实验装置,对搭建的基于磁光晶体光纤三维磁场传感器进行了正交补偿系数测量。基于磁光晶体的光纤三维磁场传感器对矢量磁场的测量实验结果表明:搭建的基于磁光晶体的光纤三维磁场传感器每轴磁场强度检测分辨率优于  $0.2 \mu\text{T}$ ,在被测磁场强度大于  $20 \mu\text{T}$  时,可以实现角度分辨率高于  $0.5^{\circ}$  的磁场矢量角度分辨率。

## 参 考 文 献

- [1] Kloss C, Finlay C C, Olsen N. Co-estimating geomagnetic field and calibration parameters: modeling Earth's magnetic field with platform magnetometer data [J]. Earth, Planets and Space, 2021, 73(1): 23.
- [2] 邓元勇,甘为群,颜毅华,等. 太阳磁场探测现状与展望[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 20200278. Deng Y Y, Gan W Q, Yan Y H, et al. Current situation and prospect of solar magnetic field exploration[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(11): 20200278.
- [3] Meng Q L, Daugherty M, Patel P, et al. High-sensitivity and spatial resolution transient magnetic and electric field probes for transcranial magnetic stimulator characterizations[J]. Instrumentation Science & Technology, 2018, 46(5): 502-518.
- [4] Zhang S, Li X, Liu Y, et al. A MMF-TSMF-MMF structure coated magnetic fluid for magnetic field measurement[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(19): 1105-1108.
- [5] Scott W R. Electromagnetic induction sensor with a spinning magnet excitation[C]//IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 28-August 2, 2019, Yokohama, Japan. New York: IEEE Press, 2019: 3542-3545.
- [6] Lee C Y, Chien T C. Design and fabrication of micro-hall-effect sensors[C]//2018 12th International Conference on Sensing Technology (ICST), December 4-6, 2018, Limerick, Ireland. New York: IEEE Press, 2018: 96-101.
- [7] Yao K W, Liu M, Zheng Z Y, et al. Automatic shimming method using compensation of magnetic susceptibilities and adaptive simplex for low-field NMR[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 6007012.
- [8] Slesarev Y N, Vorontsov A A. Simulation of process of reproducing the measuring signal of a magnetostrictive

- displacement transducer on ultrasonic torsion waves for a triangular excitation pulse[C]//2020 International Russian Automation Conference, Sochi, Russia. New York: IEEE Press, 2020: 708-712.
- [9] Dufour A, Bsawmaï L, Jamon D, et al. All-fiber magneto-optical effect using nanoparticles doped Sol-gel thin film deposited within microstructured fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(17): 5604-5610.
- [10] Song N F, Ma F, Wang X X, et al. Research on axial magnetic field sensitivity in the polarization-maintaining optical fiber coil of fiber optic gyroscope[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 222242-222247.
- [11] 许保祥, 熊智, 黄继勋, 等. 提高高精度光纤陀螺磁场适应性的方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(4): 20200239.  
Xu B X, Xiong Z, Huang J X, et al. Research on method of improving magnetic field adaptability of high-precision IFOG[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(4): 20200239.
- [12] Lin Z T, Zhao Y, Zhao R, et al. High-sensitivity and low-loss vector magnetic field sensor based on the C-type optical fiber[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, 57(11): 4002308.
- [13] Jin X P, Sun H Z, Jin S W, et al. High-sensitivity fiber optic magnetic field sensor based on lossy mode resonance and hollow core-offset structure[J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2021, 49(4): 416-427.
- [14] 李彦超, 王春晖, 曲杨. 多光束激光外差测量磁致伸缩系数的方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s108005.
- Li Y C, Wang C H, Qu Y. Study on magnetostrictive coefficient based on multi-beam laser heterodyne[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(s1): s108005.
- [15] 李绪友, 刘攀, 光星星, 等. 保偏光纤陀螺横向磁场误差的温度依赖性[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0106006.  
Li X Y, Liu P, Guang X X, et al. Temperature dependence of transverse magnetic error in a polarization maintaining fiber optic gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0106006.
- [16] 李汉钊, 钱伟文, 刘路, 等. 谐振式光纤陀螺角度随机游走的分析与优化[J]. *中国激光*, 2021, 48(9): 0901002.  
Li H Z, Qian W W, Liu L, et al. Analysis and optimization of angle random walk of resonant fiber optic gyroscope[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0901002.
- [17] Li X L. Investigation of the magnetic field sensing properties of a magnetic fluid clad microfiber knot sensor [J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2019, 47(3): 341-354.
- [18] Li Y S, Zhao X J, Liu J. Analysis of the anti-magnetic interference characteristics of the stacked magneto-optical current sensor and error compensation method[C]//2021 International Conference of Optical Imaging and Measurement (ICOIM), August 27-29, 2021, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2021: 77-83.
- [19] 姚晓天, 王来龙, 尉长江, 等. 利用磁光材料测量空间磁场的装置及方法: CN107102275A[P]. 2017-08-29.  
Yao X T, Wang L L, Wei C J, et al. Device and method for measurement of space magnetic field through adoption of magneto-optical materials: CN107102275A[P]. 2017-08-29.