先进光纤传感技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022072902

空间用光纤陀螺辐射诱导磁场误差变化机理研究

王婷婷，王晓伟*，金　靖，宋凝芳

（北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院，北京 100191）

摘　要： 干涉式光纤陀螺在空间环境下受粒子辐射、电磁场等多种物理场共同影响，使角速度输出误差劣化。文章通过分析光纤陀螺磁场误差主要来源，推导了光纤陀螺磁场误差模型。基于磁场误差模型探究辐射对磁场误差相关参数的影响，建立辐射诱导磁场误差变化理论模型。在此基础上，通过影响机理分析和实验验证，确定辐射主要通过影响维尔德常数和光纤应力双折射进而影响光纤陀螺输出零偏。进一步地，通过搭建小型化光纤陀螺样机，对保偏光纤环进行辐射处理并进行了相应磁场误差测试。测试结果表明，光纤陀螺磁场误差随辐射总剂量发生变化，其变化规律符合辐射诱导磁场误差变化模型。

关键词： 光纤陀螺；空间辐射；磁场误差模型

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0689－08

Study on the Variation Mechanism of Radiation-Induced Magnetic Field Error in Space Fiber Optic Gyroscope

WANG Tingting, WANG Xiaowei, JIN Jing, SONG Ningfang

(School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, CHN)

Abstract: Interferometric fiber optic gyroscope (IFOG) is affected by various physical fields such as particle radiation and electromagnetic field in space environment, which deteriorates the angular velocity output error. In this paper, the magnetic field error model of fiber optic gyroscope was derived by analyzing the main sources of the magnetic field error of fiber optic gyroscope. Based on the magnetic field error model, the influence of radiation on the parameters of magnetic field error was investigated and the theoretical model of radiation-induced magnetic field error was established. Based on the model, by the influence mechanism analysis and experimental verification, it is determined that the radiation mainly affects the output zero bias of IFOG by changing the Verdet constant and stress-induced birefringence. Furthermore, by establishing a miniaturized IFOG prototype, the polarization maintaining fiber coil was radiated and the corresponding magnetic field error was measured. The experimental results show that the magnetic field error of IFOG varies with the total radiation dose, and its variation law conforms to the radiation-induced magnetic field error variation model.

Key words: fiber optic gyroscope; space radiation; magnetic field error model

0　引言

陀螺仪是卫星姿态控制系统的核心部件。近些年伴随着空间飞行器和卫星对陀螺仪使用数量的激增，人们对陀螺仪提出了更高的性能要求，陀螺仪朝着高精度、低成本、小型化的方向发展。干涉式光纤陀螺仪由于其全固态设计、启动时间短、动态范围宽等优点，开始逐渐在太空中推广使用[1]。

收稿日期：2022－07－29.

基金项目：国家自然科学基金项目(61935002).

* **通信作者：**王晓伟　**E-mail:** wangxw@buaa.edu.cn

干涉式光纤陀螺仪的主要工作原理是光学Sagnac效应。在绕环过程中由于光纤的扭转、挤压等因素的影响产生寄生应力双折射，进而造成光波在传播路径上产生偏振耦合和寄生干涉。为了使光纤陀螺达到最佳的互易性并抑制寄生干涉的产生，干涉式光纤陀螺的设计目前多采用保偏光纤和宽谱光源组合的全光纤方案[2]。

在空间环境下的干涉式光纤陀螺，除了角速度引起的非互易相位差以外，环境效应(包括磁场、辐照、温变等)也会引起相应的非互易相位误差，导致光纤陀螺输出出现漂移与劣化。其中，磁场误差是较为典型的一种由环境因素引入的误差。对于空间磁场，保偏光纤环路中存在的残余圆偏振光会对径向磁场敏感，从而使干涉光产生非互易相位差，称之为磁光法拉第误差。除此之外，由于光纤环弯曲引起的横向位移则会对轴向磁场敏感，也导致光纤陀螺产生非互易相位误差，称之为轴向磁场误差[3]。

对于空间辐射，由于光纤中存在缺陷，缺陷会引起辐射诱导衰减，这将会降低光纤陀螺的灵敏度，国内外相关研究团队对此已有较为充分的理论建模与分析。此外，研究表明，辐射也会改变光纤的维尔德常数、线性双折射等本征特性参数。Kim等的研究表明，在经过1.2 kGy的辐射剂量后，掺铜的锗硅酸盐光纤的维尔德常数是辐射前的1.4倍[4]。上海大学文建湘团队报道了伽马辐射对铋掺杂石英光纤的磁光性能的影响[5]，随着辐射剂量的增加，铋掺杂石英光纤的维尔德常数先减小后增大，进一步分析表明，维尔德常数的不同变化趋势是由于铋元素具备多种价态[6]。

此外，辐射环境下光纤的双折射也存在一定程度的改变。研究表明，在辐射剂量为0～400 krad(Si)范围内保偏光纤和保偏光子晶体光纤的双折射呈近似线性变化，双折射辐射敏感系数分别为8.91×10^{-10}/krad(Si)和4.38×10^{-9}/krad(Si)。分析认为辐射是通过改变二氧化硅材料的化学键键能，从而影响保偏光纤的应力双折射[7]。

以上研究主要对金属掺杂光纤的辐射诱导维尔德常数变化、保偏光纤双折射的变化进行了相关研究，但均未对光纤陀螺层面磁场误差受相关因素影响造成漂移进行系统全面的分析。因此，本文拟首先通过理论分析，推导光纤陀螺磁场误差模型；其次，引入辐射因素建立辐射诱导磁场误差变化模型，并设计相关测试系统定量测试辐射对相关参数的影响；最后，搭建光纤陀螺样机，令不同辐射条件下的光纤环路并入整机进行测试，验证辐射诱导磁场误差变化模型。

1 辐射诱导磁场误差变化模型

如图1所示，空间恒定磁场矢量 $\boldsymbol{B}$ 可以分解为径向磁场和轴向磁场。

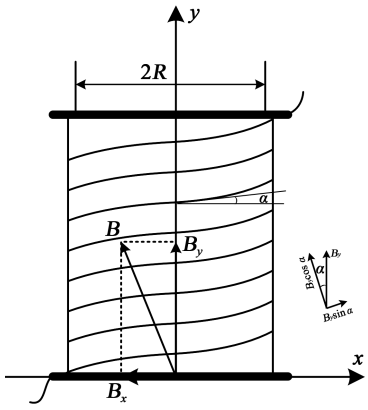


图1 光纤陀螺磁场分解图

(1)径向磁场误差模型

对于径向磁场 B_x 可以分解为沿着光纤切面的磁场 $B_x\cos[(z/R)-\theta_B]$，其中 θ_B 是 B_x 方向磁场的径向基准夹角，z 为沿光纤切向方向，R 为光纤环的半径。随后，将该磁场分量分解到光纤的切向方向为 $B_x\cos\alpha\cos[(z/R)-\theta_B]$，其中，$\alpha$ 为 x 方向与光纤绕环方向夹角，由于实际光纤环的缠绕过程中 α 极小，故令 $\cos\alpha=1$。

对于光纤陀螺的光纤环路来说，两束反向传播的光波之间引起的非互易相位差为

$$\phi_F=2\theta_F=2\int_0^L\alpha_P V B_x\,dz \tag{1}$$

式中，V 是光纤的维尔德常数，是材料的磁场本征特性参数，与介质性质以及传输光波频率有关；θ_F 是指磁致旋光角，对于顺磁材料和逆磁材料，当介质的维尔德常数为正值时，磁致旋光角与纵向磁场方向成右手螺旋关系，反之，磁致旋光角与纵向磁场方向成左手螺旋关系，光纤属于逆磁材料，对应的维尔德常数为正值；L 指光纤环中光纤的总长度；α_P 是一个与偏振态有关的系数，$\alpha_P=\lambda t_w/\pi\Delta n$，其中 t_w 指保偏光纤的扭转率。对于线偏振光 $\alpha_P=0$，对于圆偏振光 $\alpha_P=\pm1$，对于椭圆偏振光 $-1<\alpha_P<1$。α_P 可以被表示为线性双折射与圆双折射之比，由于光纤中残余应力的存在，使在光纤中传播的线偏振光

束劣化为残余双折射引起沿着光纤的偏振态的变化，故 α_P 不再是一个常数。因此，光纤环路中圆偏振光的存在是产生法拉第效应的根本原因。

光波偏振面的法拉第旋转角 θ_F 光通过的路程和光传播方向上的径向磁场分量 B_x 成正比，其相关关系如式所示[3]：

$$\theta_F = V\int_0^L B_x \mathrm{d}z \tag{2}$$

对于保偏光纤而言，其本征线性双折射远大于由法拉第效应引起的双折射变化，且由法拉第效应引起的双折射变化会在光纤陀螺中会产生非互异性相位差，因此对于高双折射保偏光纤来说则有：

$$\phi_F = \frac{2\lambda}{\pi\Delta n}\int_0^L t_w(z)\theta_F(z)\mathrm{d}z \tag{3}$$

由于磁光法拉第效应，分解到光纤的切向方向的磁场分量产生的法拉第漂移为

$$\phi_{Fx} = \frac{2\lambda V}{\pi\Delta n}\int_0^L t_w(z)B_x \sin\left(\frac{z}{R}-\theta_B\right)\mathrm{d}z \tag{4}$$

又因为在光纤陀螺中，Sagnac 相位差 ϕ 和旋转角速度 Ω 呈近似线性关系，即[8]：

$$\phi = \frac{2\pi LD}{\lambda c}\cdot\Omega \tag{5}$$

式中，λ 为光波的平均波长，D 为光纤环有效直径。则由径向磁场引起的磁场误差为

$$\Omega_x = \frac{V\lambda^2 c}{2\pi^2\Delta nLD}\int_0^{2m\pi} t_w(r\theta)B_x\sin\left(\frac{z}{R}-\theta_B\right)\mathrm{d}\theta \tag{6}$$

(2)轴向磁场误差模型

根据线偏振模式中的近似标量理论可以得知，光纤中存在横磁模(TM 模)和横电模(TE 模)两个相互独立的传播模式。当轴向磁场 B_y 作用在光纤上时，顺时针和逆时针方向光波的轴向磁光误差可推导为[9]

$$\begin{cases}\Delta\varphi = 2\delta\beta L = \dfrac{\lambda V B_y \mid \chi \mid}{\pi n}\displaystyle\sum_{i=1}^{m}\cos^2\theta(i)\mathrm{d}z \\ \chi = \dfrac{\displaystyle\iint\frac{\partial \mid e_x \mid^2}{\partial x}\mathrm{d}x\mathrm{d}y}{\displaystyle\iint \mid e_x \mid^2 \mathrm{d}x\mathrm{d}y}\end{cases} \tag{7}$$

式中，χ 为与光纤环弯曲半径有关的不对称度，e_x 是 $\theta=0°$ 时沿 x 方向的电场矢量，n 为光纤的折射率，$\Delta\varphi$ 中的求和项对应于光纤环路中的扭转度。

由于光纤环路中光纤的随机扭转，假设角 $\theta(z)$ 是随机均匀分布的。因此，它的每一个双折射轴都与 x 轴在大约一半的光纤长度[8,10-11]上重合。统计轴向磁光误差为[2]

$$\langle\Delta\varphi\rangle = \frac{\lambda V B_y \mid \chi \mid L}{2\pi n} \tag{8}$$

光纤陀螺的等效轴向磁场误差可以表示为

$$\Omega_y = \frac{\lambda^2 c V B_y \mid \chi \mid}{4\pi^2 nD} \tag{9}$$

(3)辐射诱导磁场误差变化模型

根据上文建立的径向和轴向磁场误差模型可知，对于给定几何和光学参数的光纤陀螺，磁场误差在静磁场下是保持不变的。但在辐射作用下，如果某些参数发生变化，则会产生辐射诱导磁场误差变化。

由式(6)和(9)可知，辐射可能会通过影响保偏光纤的维尔德常数、折射率 n、平均波长漂移、线性双折射进而来影响光纤陀螺的磁场误差。

针对辐射对维尔德常数的影响，在经过 1.2 kGy 的辐射剂量后，掺铜的锗硅酸盐光纤的维尔德常数是辐射前的 1.4 倍[4]，经过 5 kGy 辐射后，掺铅元素的石英光纤的维尔德常数增加了 41.94%，而单模光纤仅增加了 33.04%[12]。针对辐射对折射率的影响，在近地空间工作十年的航天器累计辐射剂量 1 kGy，其内部光纤环折射率变化仅为 5×10^{-6}[13]；用干涉法测量了锗硅酸盐光纤的辐射诱导折射率变化，在总辐射剂量为 13 MGy(H_2O)的辐射后，折射率仅变化约为 5.7×10^{-3}；当总辐射剂量为 1.54 MGy(H_2O)时，硼锗共掺光纤的折射率仅增加了 1.85×10^{-4}[14]。对于辐射对平均波长漂移的影响，2005 年兰州物理研究所对光纤的总剂量效应进行了研究，指出在辐照条件下光纤中传输的光谱会发生改变，但辐射对平均波长的影响较小[15]。由此可见，平均波长、折射率等参数虽然也受辐照影响，但影响量级较小，故可忽略。因此，辐射主要通过影响光纤的维尔德常数、线性双折射来影响光纤的磁光特性。进而可以建立如下的辐射诱导磁场误差变化模型：

$$\begin{cases}\Omega_x = \left[\dfrac{\lambda^2 cB_x}{2\pi^2 LD}\displaystyle\int_0^{2m\pi} t_w(r\theta)\sin\left(\frac{z}{R}-\theta_B\right)\mathrm{d}\theta\right]\cdot \\ \qquad\dfrac{V(d)}{\Delta n(d)} \\ \Omega_y = \left[\dfrac{\lambda^2 cB_y \mid \chi \mid}{4\pi^2 nD}\right]V(d)\end{cases} \tag{10}$$

式中，d 为光纤所处环境的辐射剂量。

下面主要对辐射对光纤的维尔德常数、线性双

折射的影响进行理论分析和实验测定。为了验证辐射对光纤维尔德常数及线性双折射的影响，选用一种典型光纤陀螺用熊猫型保偏光纤进行实验，该熊猫型保偏光纤纤芯部分掺锗，两个应力区掺硼。光纤由锐光信通技术有限公司提供，光纤包层截面如图 2 所示，其结构参数如表 1 所示。根据保偏光纤陀螺对光源的需求选定了工作于 1 550 nm 波段，选取长度为 3～5 m 的熊猫型保偏光纤，^{60}Co 源作为辐照源，辐射剂量分别为 0(对照组)，1，2，5，10，50，100 和 300 kGy。

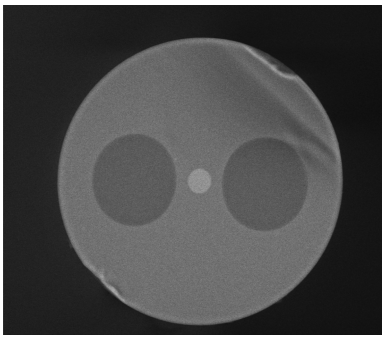


图 2 熊猫型保偏光纤的截面

表 1 光纤相关参数

参数	值
纤芯直径/μm	6
SAP 直径/μm	22
包层直径/μm	80
涂覆层直径/μm	135
平均损耗/(dB/km)	0.3

2 辐射对光纤磁光相关参数影响实验验证

2.1 辐射对维尔德常数的影响

(1)辐射对维尔德常数的影响机理

法拉第效应源于塞曼分裂，对于逆磁性掺杂材料，激发态在磁场作用下分裂，此时能级不再简并，进而导致左右旋偏振光激发的电子跃迁概率不同，即引起左右旋圆偏振差增大，从而使法拉第偏转角增大，最终导致掺杂光纤的维尔德常数增加[16-17]。

根据色散理论，维尔德常数与折射率的关系式如下：

$$V=\frac{\omega}{2c}\frac{n_+-n_-}{B} \tag{11}$$

式中，ω 为入射光的角频率，c 为光在真空中的速度，n_+ 和 n_- 分别为左、右圆偏振光的折射率，B 为磁场大小，维尔德常数如下式所示，是入射光角频率的函数。

$$V=\frac{Ne^3\mu}{2nm^2c\varepsilon_0}\frac{\omega^2}{(\omega_0^2-\omega^2)^2} \tag{12}$$

式中，N 为单位体积色散电子数，m 为电子质量，ε_0 为空间介电常数，n 为折射率，e 为基本电荷，μ 和 ω_0 分别为光纤的磁导率和共振频率。在很多共振频率下，将式(12)改为

$$V=\frac{Ne^3\mu}{2nm^2c\varepsilon_0}\sum_k\frac{f_k\omega^2}{(\omega_0^2-\omega^2)^2} \tag{13}$$

其中，f_k 是谐振频率 ω_k 处的振子强度。在不同的辐射剂量下发生塞曼分裂电子需要跃迁的能极差不同，因此，电子的谐振频率不同，进而导致维尔德常数发生改变。

(2)辐射对维尔德常数影响测试系统

保偏光纤维尔德常数测量装置原理基于马赫-曾德白光干涉仪，主要组成部分包括一个 ASE 光源、两个铌酸锂 $LiNbO_3$ 集成光学调制器、一个一维电动位移台、一个探测器、一个锁相放大器、一个信号发生器和一个功率放大器，具体结构如图 3 所示。

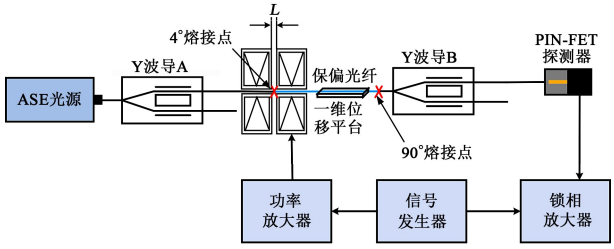


图 3 维尔德常数测量系统

因为磁场引起的偏振耦合极为微弱，为实现对小信号的检测，采取的措施是：一方面利用光学干涉的方法将微弱信号进行放大；另一方面用信号发生器及驱动电路，实现对磁场的驱动及调制，结合锁相放大器，利用相干解调的方式提取微弱信号。

光学干涉主要利用对轴光纤熔接机对从 ASE 光源出射光经 $LiNbO_3$ 集成光学调制器 A 起偏后的光纤以 4°的熔接角导入待测光纤，随后利用对轴光纤熔接机将待测光纤以 90°熔接角与 $LiNbO_3$ 集成光学调制器 B 相连。因此从 $LiNbO_3$ 集成光学调制器 A 发出的偏振光将分为快轴光和慢轴光。将电磁铁放置在 $LiNbO_3$ 集成光学调制器 B 的尾纤与被测光纤之间的熔接点附近。通过将脉冲信号作用到位移平台上，被测光纤可以均匀地在磁场中移动。对于快轴光，在法拉第效应的作用下，产生一个和慢轴光发生干涉的法拉第旋转二次谐波，并通过被测

光纤与 $LiNbO_3$ 集成光学调制器 B 正交熔接点提取该二次谐波。由于 ASE 光源相干长度较短，所以法拉第旋转二次谐波和慢轴光是主要的干涉光。进而可以得到探测器参测光光强为

$$I = I_s + I_c + 2\gamma(z)\sqrt{I_c I_s}\sin\left(\frac{2\pi z}{L_B}\right) \quad (14)$$

式中，z 为磁隙与 90°熔接点之间的距离，L_B 为待测光纤的拍长，I_s 为慢轴光强，I_f 为快轴光强，I_c 为快轴耦合进慢轴的光强，$I_c = I_f\theta_{eff}^2$，θ_{eff} 为有效旋转角，γ 是 ASE 光源的自相干函数。

为了实现对微弱信号的提取，利用锁相放大器可检测与磁场变化同频的信号，得到锁相放大器的解调输出值为

$$A = \frac{1}{\sqrt{2}}\gamma(z)\sqrt{I_f I_s}\theta_{eff}\sin\left(\frac{2\pi z}{L_B}\right) \quad (15)$$

通过电动位移台改变磁场的作用位置，可实现对 Z 参数的扫描。因此，可以用解调值的峰峰值 $A_{p\text{-}p}$ 来计算保偏光纤的维尔德常数。$LiNbO_3$ 集成光学调制器的尾纤是传统熊猫光纤。特别地，如果将磁场在 4°熔接点附近移动，可同时得到熊猫型保偏光纤样品的维尔德常数。当磁场刚好作用于熔接点处时，锁相放大器解调输出值最大；而当磁场远离熔接点时，锁相放大器解调输出值逐渐减小。由式(15)可求得熊猫型保偏光纤样品的维尔德常数为

$$V = \frac{\sqrt{2}A_{p\text{-}p}}{4\sqrt{I_f I_s}Bl\sin c\dfrac{\pi l}{L_B}} \quad (16)$$

(3)测试结果分析

通过分别接入不同辐射剂量处理后的保偏光纤，测试其维尔德常数，得到如图 4 所示维尔德常数随辐射剂量变化的实验曲线。对该测试结果利用扩展饱和指数模型[18-19]进行拟合，得到辐射剂量和维尔德常数的关系为

$$V = 0.001071d^{0.7816} + 0.08952\left(1 - e^{-\left(\frac{d}{0.804}\right)^{0.7816}}\right) - 0.05884\left(1 - e^{-\left(\frac{d}{0.2543}\right)^{0.7816}}\right) \quad (17)$$

式中，V 为维尔德常数，d 为辐射剂量。拟合均方根误差可达 0.002 632，由此可见辐射剂量与维尔德常数满足扩展饱和指数模型。

由上图拟合曲线可知，保偏光纤维尔德常数随辐射剂量增大而增大，在高辐射剂量下增势趋缓。

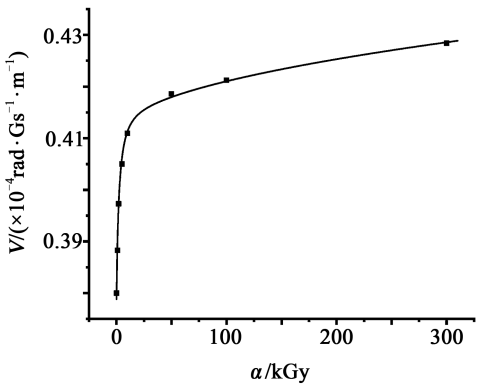


图 4　辐射对维尔德常数影响测量拟合结果

2.2　辐射对双折射的影响

(1)辐射对双折射的影响机理

根据保偏光纤的结构特点，可以将保偏光纤的双折射表示成形状诱导的双折射和应力诱导的双折射之和，表达式如下：

$$\Delta n = \Delta n_G + \Delta n_S \quad (18)$$

其中，Δn 是保偏光纤双折射；Δn_G 是形状诱导的双折射，其产生原因主要是光纤几何形状不对称；Δn_S 是应力诱导的双折射，表示各向异性应力通过弹光学效应诱导的自应力分量。

基于辐射对熊猫保偏光纤折射率的研究，辐射对熊猫光纤形状诱导的双折射微乎其微[20]，在分析熊猫保偏光纤的时候通常直接可以将光纤的掺杂和应力部分建模为圆形棒，且其结构参数在辐射过程中不发生变化。因此，对于熊猫保偏光纤辐射主要是对其应力诱导双折射产生影响。熊猫保偏光纤的芯、包层和应力区域的主要成分为二氧化硅(锗)、二氧化硅、二氧化硅(锗、氧化硼)，辐射对熊猫保偏光纤的应力诱导的双折射主要在于影响掺杂锗的纤芯和掺杂硼的应力区形成的化学键的键能大小[21]。由于熊猫保偏光纤其纤芯和应力区存在锗-硅键、硅-硅键等氧缺陷错位键，其键能相比锗-氧键和硅-氧键键能较低，更容易被破坏形成色心。当受到辐射时，这些键更容易断裂，进而改变应力区和纤芯产生的应力大小，导致应力诱导的保偏光纤的双折射发生变化[22]。

(2)辐射对双折射影响测试系统

保偏光纤双折射的测量通常利用光相干域偏振检测法。光相干域偏振检测法以宽谱光源干涉原理为基础。主要利用步进马达作为调整光程补偿手段，使用迈克尔逊干涉仪来实现对保偏光纤出射光光程补偿。当补偿距离不同的时候，相当于对保偏

光纤中不同的耦合点发出的光进行光程补偿。因此各个耦合点的耦合状态可以分离出来，从而可以检测到保偏光纤和光纤器件的偏振模式耦合率强度分布，其原理如图 5 所示[23]。

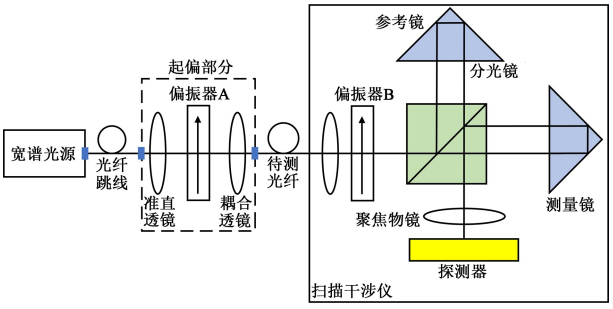


图 5 光相干域偏振检测仪原理图

使用七段保偏光纤样本进行辐照实验。采用光相干域偏振检测仪测光纤双折射的时候，调整偏振器 A 和 B，使得其偏振轴分别与被测光纤的偏振轴成一定的角度，最优为 45°[21]。宽谱光源发出的光经过偏振器 A 后耦合进待测光纤，偏振光投影到待测光纤的两偏振主轴上。由于保偏光纤两个偏振主轴的折射率不同，所以两个偏振轴会产生光程差。待测光纤中输出的光信号经偏振器 B 再次投影到统一偏振方向后进入迈克尔逊干涉仪。当参考臂和测量臂相等时出现主干涉条纹。移动测量镜，当补偿掉保偏光纤中产生的光程差的时候，再次出现次相干峰。通过测量保偏光纤的长度 L 和主相干峰值对应的测量镜位置差 Z，即可测得保偏光纤的双折射 Δn 为

$$\Delta n = \frac{2Z}{L} \tag{19}$$

(3)测试结果分析

通过分别接入经不同辐射剂量处理后的保偏光纤，测试其双折射大小，得到如图 6 所示保偏光纤双折射随辐射剂量变化的实验曲线。利用扩展饱和指数模型[18-19]进行拟合得：

$$\Delta n = 0.001874 d^{0.7816} + 0.1318\left(1 - \mathrm{e}^{-\left(\frac{d}{1.613}\right)^{0.7816}}\right) - 0.0004954\left(1 - \mathrm{e}^{-\left(\frac{d}{24.12}\right)^{0.7816}}\right) \tag{20}$$

式中，Δn 为双折射，d 为辐射剂量。拟合均方根误差可达 0.002 038，由此可见辐射剂量与双折射满足扩展饱和指数模型。

由图 6 可知，保偏光纤双折射随辐射剂量增大而增大，在高剂量下增势趋缓。

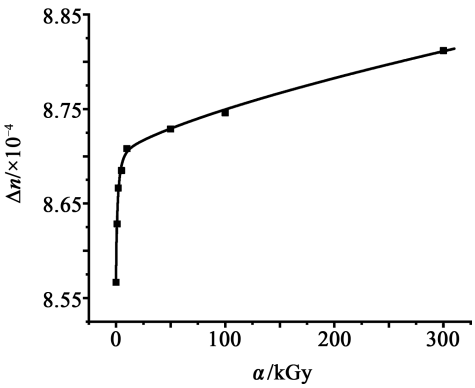


图 6 辐射剂量与保偏光纤双折射关系图

3 光纤陀螺验证实验

(1)实验设备

为了进一步验证保偏型光纤陀螺在辐射下的磁光误差，建立了如图 7 所示的闭环光纤陀螺样机，包括一个 ASE 光源(中心波长约 1 550 nm)、一个 2×2 耦合器、一个 $LiNbO_3$ 集成光学调制器、一个 PIN-FET 光电探测器和相关解算电路。

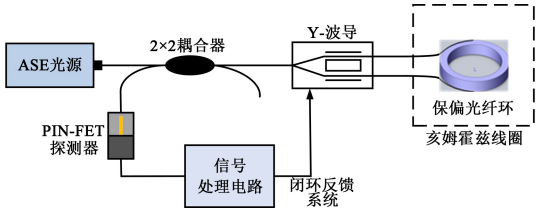


图 7 测试陀螺样机

采用对称绕制方法制备了 3 个光纤环，均使用前述熊猫型保偏光纤绕制。绕制工艺、设备等均保持一致。环路绕制长度约 300 m，绕制直径约 30 mm。所有光纤环均采用相同的绕环参数，并在辐射环境下进行预处理。辐射剂量率为 25 Gy/min，总辐射剂量分别为 0，5 和 10 kGy，即对每个光纤环在辐射前、5 kGy 剂量辐射后、10 kGy 剂量辐射后分别接入陀螺样机，测试其一次磁场误差。

(2)测试结果分析

实验中，干涉式光纤陀螺样机被放置在亥姆霍兹线圈的平台上，亥姆霍兹线圈可以在其中心产生水平或垂直磁场。通过调节亥姆霍兹线圈电源的恒流驱动电流来控制通过光纤环路的径向或轴向磁场强度。为了排除光源功率、光谱宽度等系统光学参数对干涉式光纤陀螺性能的影响，在实验过程中，光纤陀螺的其他部件保持不变，只需要将光纤环与光纤陀螺重新连接。

由于光纤陀螺的磁光误差以非互易相位差的形式表现出来，因此光纤陀螺的输出信号表现为零偏漂移。如图 8 所示，施加在光纤陀螺上的径向磁场强度分别为 0，±3，±6 和±9 Gs。每一磁场强度下的采样时间约为 300 s。

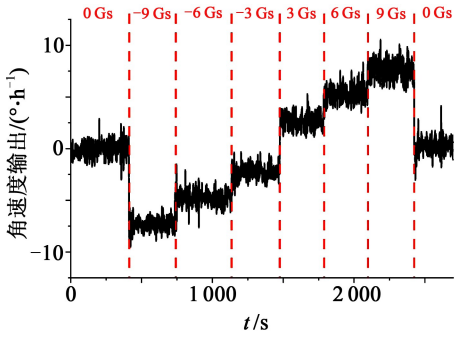


图 8　磁场误差测试结果示意图

将各磁场强度下陀螺输出求均值并与零磁场下陀螺输出作差，并与相应磁场强度作线性拟合，可得特定辐射剂量下光纤陀螺径向/轴向磁场敏感性，测试结果如表 2 所示。表中理论值一列为依据公式(10)和相应维尔德常数、双折射辐射相关性测试结果代入计算所得。

表 2　辐射诱导磁场误差变化测试结果

磁场误差	辐射总剂量/kGy	测试结果(°·h^{-1}·Gs^{-1})			理论值
		1# 光纤环	2# 光纤环	3# 光纤环	
径向磁场误差	0	0.790 7	0.774 1	0.779 5	0.790 9
	5	0.828 6	0.835 1	0.829 7	0.831 5
	10	0.845 1	0.851 0	0.847 9	0.841 4
轴向磁场误差	0	1.802 2	1.810 9	1.803 3	1.803 9
	5	1.931	1.925 7	1.919 8	1.922 6
	10	1.947 9	1.954 1	1.951 6	1.950 9

由上表可知，不同辐射剂量下的光纤陀螺磁场误差发生显著变化，对三个光纤环不同辐射剂量下磁场误差的测试结果与理论计算值基本一致，即变化规律符合上文所述辐射诱导磁场误差变化模型。

4　结论与展望

本文首先通过分析光纤陀螺磁场误差主要来源，推导了光纤陀螺磁场误差模型，并引入空间辐射因素，建立了辐射诱导磁场误差变化模型；其次，在光纤层面，通过对模型主要参数的分析，确定辐射主要通过影响维尔德常数和光纤应力双折射，并分别对经不同辐射剂量处理的光纤样本进行了相应测试。对测试结果进行分析可知，保偏光纤维尔德常数和双折射均随辐射剂量增大而发生显著变化，变化关系满足扩展饱和指数模型；最后，通过搭建小型化光纤陀螺样机，对绕制的保偏光纤环路分别进行辐射处理并进行磁场误差测试，测试结果表明，光纤陀螺磁场误差随辐射总剂量发生变化，其变化规律符合所建立的辐射诱导磁场误差变化模型。本文基于空间应用环境，对光纤陀螺受磁场、辐射场因素共同影响下的多物理场耦合误差进行了相关研究。下一阶段，可针对复杂轨道环境，提出空间用光纤陀螺的进一步轻质化、小型化优化措施。

参考文献：

[1] Wen X, Dewen L, Yuyan Z. Research on the key techniques of fiber optic gyroscopes in space applications[J]. Proc. SPIE, 2005, 5985: 59855O. 1-59855O. 4.

[2] Cai Wei, Song Ningfang, Jin Jing, et al. Transverse magneto-optic error of a miniature solid-core photonic-crystal fiber optic gyroscope[J]. IEEE Access, 2019, 7: 20106-20112.

[3] Hotate K, Tabe K. Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect: influence of the earth's magnetic field [J]. Appl. Optics, 1986, 25(7): 1086-1092.

[4] Kim Y, Ju S, Jeong S, et al. Influence of gamma-ray irradiation on Faraday effect of Cu-doped germano-silicate optical fiber[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2015, 344: 39-43.

[5] Wen J, Che Q, Dong Y, et al. Irradiation effect on the magneto-optical properties of Bi-doped silica optical fiber based on valence state change[J]. Optical Materials Express, 2020, 10(1): 88.

[6] Yang Y, Hui L, Lin L, et al. Radiation-induced birefringence variations in polarization-maintaining fibers[J]. Opt. Lett., 2017, 42(24): 5214-5217.

[7] Lefèvre H. Potpourri of comments about the fiber optic gyro for its 40th anniversary, and how fascinating it was and it still is! [C]// Proc. SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging, 2016.

[8] Zhao Yuxiang, Zhou Yanru, Zhang Dengwei, et al. Nonreciprocal phase error caused by orthogonal magnetic field in a polarization-maintaining fiber-optic gyro [J]. IEEE Sensors J., 2015, 15(9): 5128-5132.

[9] Arditty H J, Lefevre H C. The Fiber-Optic Gyroscope[M]. Artech House, 1984.

[10] Logozinskii V N. Magnetically induced non-Faraday nonreciprocity in a fiber-optic gyroscope [J]. J. of Communications Technology and Electronics, 2006, 51(7): 836-840.

[11] Wen J X, Wang W N, Guo Q, et al. Gamma-ray radiation

on magneto-optical property of Pb-doped silica fiber[J]. J. of Inorganic Materials, 2018, 33(4): 416.

[12] Baccini D. The effect of gamma radiation on fibre Bragg grating sensors when used as radiation dosimeters[J]. Theses Honours, 2013.

[13] Kher S, Chaubey S, Oak S M, et al. Measurement of gamma-radiation induced refractive index changes in B/Ge doped fiber using LPGs[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2013, 25(21): 2070-2073.

[14] 杨生胜，牛小乐. 光纤的总剂量效应分析研究[J]. 真空与低温，2005，11(3)：154-158.
Yang Shengsheng, Niu Xiaole. Study on the total dose effect analysis of optical fiber[J]. Vacuum and Hypothermia, 2005, 11(3): 154-158.

[15] Borrelli, Nicholas F. Faraday rotation in glasses[J]. The J. of Chemical Phys., 1964, 41(11): 3289-3293.

[16] Suits J C. Faraday and Kerr effects in magnetic compounds [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1972, 8(1): 95-105.

[17] Borgermans P, Brichard B, Decreton M C. Models for the radiation-induced attenuation in pure silica optical fibers: spectral dependencies and absorption band kinetics[J]. Proc. of SPIE, 2002, 24(3): 272-277.

[18] 晁代宏，马 静，陈淑英，等. 基于性能退化的卫星用光纤陀螺可靠性评估[J]. 红外与激光工程，2011，40(9)：1763-1767.
Chao Daihong, Ma Jing, Chen Shuying, et al. Reliability evaluation of fiber optic gyroscope for satellite based on performance degradation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(9): 1763-1767.

[19] Fernandez A, Brichard B, Berghmans F. In situ measurement of refractive index changes induced by gamma radiation in germanosilicate fibers [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2003, 15(10): 1428-1430.

[20] Loch M, Heinlein W E. High-resolution measurement of birefringence profiles in stress-induced polarization-maintaining fibers[J]. J. of Lightwave Technol., 1989, 7(8): 1213-1216.

[21] Wong D, Poole S B, Sceats M G. Stress-birefringence reduction in elliptical-core fibers under ultraviolet irradiation [J]. Opt. Lett., 1992, 17(24): 1773-1777.

[22] Yang Y, Duan W, Miao Y. High precision measurement technology for beat length of birefringence optical fiber[J]. Measurement Science & Technol., 2013, 24(2): 025201.

作者简介：

王婷婷(1997－)，女，河北省邢台市人，硕士研究生，主要从事光纤传感与光纤陀螺方面的研究；

王晓伟(1994－)，男，河北省石家庄市人，博士研究生，主要从事光子晶体光纤和光纤传感器方面的研究；

金 靖(1975－)，男，内蒙古自治区人，博士，教授，博士生导师，主要从事光学传感器方面的研究；

宋凝芳(1968－)，女，天津市人，博士，教授，博士生导师，主要从事光纤陀螺仪和惯性导航系统方面的研究。