

随钻测斜仪中光纤陀螺光纤环 Shupe 效应仿真

赵建辉, 徐帆*, 李帆, 徐贺

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 针对井下近钻头处随钻测斜仪内径受限、井下环境温度梯度大等特殊恶劣环境, 设计了一种用于测量石油井眼轨迹惯性的椭圆柱形光纤陀螺。由于光纤环存在热致非互易相移问题, 以光纤环的 Shupe 误差为基础, 采用 4 极对称绕法, 建立了椭圆柱形光纤环的三维温度瞬态响应数学模型。结合光纤陀螺实际的工作环境, 利用有限元法对椭圆柱形光纤环进行了数值仿真, 定量分析其工作温度梯度下光纤环的 Shupe 误差, 实验验证了模型的正确性。在光纤长度、光纤环层数和光纤环半径一定的条件下分别对圆柱形光纤环和椭圆柱形光纤环施加相同的温度激励, 比较两种光纤环的热致误差速率。结果表明: 椭圆柱形光纤环热致误差速率比圆柱形光纤环小 35%~39%, 在满足井下测量仪器体积受限的同时, 可提高井眼轨迹惯性测量的精度。

关键词 光纤光学; 光纤陀螺; 椭圆柱形光纤环; Shupe 效应; 有限元; 随钻测斜仪

中图分类号 V241.533 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0506001

Simulation of Shupe Effect in Fiber Optic Gyroscope Fiber Coil with Inclinometer While Drilling

Zhao Jianhui, Xu Fan, Li Fan, Xu He

School of Instrument Science and Opt-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract An elliptic cylindrical fiber optic gyroscope (FOG) for petroleum well trajectory inertial measurement is designed for the special condition of the limited borehole diameter and the large gradient of temperature in inclinometer while drilling (IWD). Due to the thermally induced nonreciprocal phase shift in fiber coil, the three-dimensional (3D) temperature transient response mathematical model of elliptic cylindrical fiber coil is established by quadrupole (QAD) winding method, which is based on the Shupe effect of fiber coil. Combined with the actual working environment of FOG, we use finite element method to numerically simulate elliptic cylindrical fiber coil and analyze the Shupe error at working temperature gradient quantitatively. The experimental results verify the correctness of the model. In order to compare the thermal error rates of two fiber coils, we simulate the cylindrical and elliptic cylindrical fiber coils under the same temperature excitation when the fiber length, the layers of fiber coil and the radius of fiber coil are fixed. The results show that the thermal error rate of the elliptic cylindrical fiber coil is 35% to 39% smaller than that of cylindrical fiber coil and the precision of the well trajectory inertial measurement can be improved when the underground measuring instrument is limited in volume.

Key words fiber optics; fiber optic gyroscope; elliptic cylindrical fiber coil; Shupe effect; finite element; inclinometer while drilling

OCIS codes 060.2800; 120.6810; 120.5790

1 引言

随着定向钻井技术的发展, 基于光纤陀螺 (FOG) 的惯性随钻测斜仪 (IWD) 成为了石油井眼

轨迹测量的研究热点。实际测井环境非常恶劣, 例如: 深井往往达数千米, 井下温度变化范围大, 可达 0.03 °C/m, 同时井眼尺寸严重制约了井下测斜仪的内部空间^[1]。光纤陀螺具有体积小、精度高、成本

收稿日期: 2017-11-06; 收到修改稿日期: 2017-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(51574012)

作者简介: 赵建辉(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事航天器导航制导与控制、精密仪器设计与应用方面的研究。

E-mail: zhaojianhui@buaa.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: x123xufan@163.com

低、不受地磁干扰、抗冲击振动等优势^[2-3],是近钻头随钻测斜仪的理想选择。然而光纤环具有温度敏感性,其周围温度场的不均匀变化引起的非互易性相移,使光纤陀螺的零偏产生漂移^[4-6],是影响惯性测量精度的关键因素之一。

光纤环线圈中时变温度扰动将引起两束沿光纤环反向传播的光波经历不同的相移,这种由温度引起的非互易性相移称为 Shupe 相移,Shupe 相移引起的误差称为 Shupe 误差。为减小温度的影响,Mohr^[7]建立了光纤环温度模型,并通过对比实验得出减小光纤长度、增加绕制层数可减小 Shupe 误差的结论。Frigo 等^[8]以温度场的线性分布为基础,定量分析了 Shupe 效应,并通过 4 极对称绕法使 Shupe 误差减少 3 个数量级。Tirat 等^[9]基于数值法,利用 I-DEAS 传热仿真热分析 CAD 软件对光纤环中的温度场进行较为精确的分析,并以此为依据对 Shupe 效应进行定量研究。李茂春等^[10]提出了一种三维光纤环温度响应模型,用于分析光纤环敏感轴的轴向不对称温度梯度造成的 Shupe 误差。

以上文献都是研究标准圆柱形光纤环,没有考虑到体积受限下异形光纤陀螺的热致非互易性效应。本文在此基础上,设计了一种可满足井下仪器体积受限的特种椭圆柱形光纤陀螺,并对椭圆柱形光纤环的 Shupe 误差进行了数值仿真和实验验证。

2 椭圆柱形光纤环

2.1 物理模型

在石油测井中,一般的测斜仪直径只有 60 mm 或 80 mm。目前市场上的圆形光纤陀螺尺寸相对较大,在测斜仪中的应用中受到限制,必须对其进行优化设计。随钻测斜仪的结构如图 1(a)所示,在保证随钻测斜仪正常工作的前提下,为提高测斜仪的测量精度,课题组设计了一种小型椭圆柱形光纤陀螺,如图 1(b)所示。

2.2 三维光纤环温度瞬态响应数学模型

由温度引起的非互易性相移和由旋转引起的 Sagnac 相移无法区分,将在光纤陀螺中产生偏置误差。由 Shupe 效应引起的非互易相位误差^[10]为

$$\Delta\phi_e(t) = \frac{2\tau}{L} \beta_0 \frac{\partial n}{\partial T} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\partial \Delta T}{\partial t} \Big|_{(s,t)} s ds, \quad (1)$$

式中: $\Delta\phi_e(t)$ 为热致非互易相移; τ 为光纤环的渡越时间; L 为光纤总长度; $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为光在真空中的传播常数; λ_0 为光在真空中的波长; $\partial n/(\partial T)$ 为光

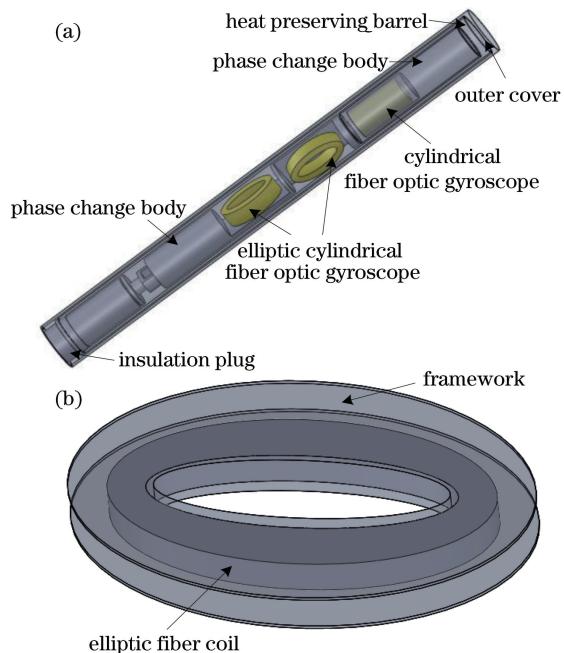


图 1 (a) 随钻测斜仪结构示意图;

(b) 椭圆柱形光纤陀螺结构示意图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of IWD;

(b) schematic diagram of elliptic cylindrical FOG

纤折射率的温度变化系数; $\frac{\partial \Delta T}{\partial t} \Big|_{(s,t)}$ 为在时刻 t 沿光纤并且距离其起始端 s 处的温度变化率; s 为距光纤起始端的长度。

将光纤环的温度模型建立在如图 2 所示的三维柱面坐标系中,需要对(1)式进行变换:

$$\Delta\phi_e(t) = \frac{2\tau}{L} \beta_0 \frac{\partial n}{\partial T} \left(\int_0^{L/2} \frac{\partial \Delta T}{\partial t} \Big|_{(s,t)} s ds - \int_0^{L/2} \frac{\partial \Delta T}{\partial t} \Big|_{(s',t)} s' ds' \right), \quad (2)$$

式中: s 和 s' 都取正值,但正方向却相反, s 以逆时针(CCW)方向递增, s' 以顺时针(CW)方向递增,两者

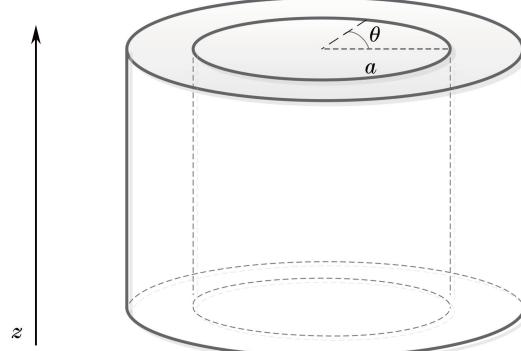


图 2 椭圆柱形光纤环柱面坐标系

Fig. 2 Cylindrical coordinate system of elliptic cylindrical fiber coil

的取值范围都是 $0 \sim L/2$ 。

根据(2)式,将 s 和 s' 以每匝光纤的长度为单位进行离散化,然后将离散后各匝光纤以椭圆柱坐标系参数 a, θ, z 表示, a 为长半轴, θ 为离心角,并且温度变化率 $\frac{\partial \Delta T}{\partial t} \Big|_{(s,t)}$ 和 $\frac{\partial \Delta T}{\partial t} \Big|_{(s',t)}$ 采用相应坐标系参数和时间参数 t 表示。定义从光纤中点开始逆时针缠绕的第 i 匝为第 i CCW 匝;从光纤中点开始顺时针缠绕的第 j 匝为第 j CW 匝。定义 s_{i0} 为第 i CCW 匝的起点到光纤中点的距离,例如对于第 1 CCW 匝而言 $s_{10}=0$; s_{j0} 为第 j CW 匝的起点到光纤中点的距离。

以第 i CCW 匝为例,如图 3 所示,椭圆的参数方程为

$$\begin{cases} x = a \cos \theta \\ y = b \sin \theta \end{cases}, \quad (3)$$

式中: b 为短半轴; $\theta \in [0, 2\pi]$ 为离心角,并且满足 $b_i = a_i - (a_0 - b_0)$ (a_0 和 b_0 分别为初始长半轴和短半轴), $a^2 - b^2 = c^2$, 椭圆的离心率为

$$e = c/a, (0 < e < 1). \quad (4)$$

椭圆弧长微分为

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} = \sqrt{a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta} d\theta, \quad (5)$$

根据椭圆性质化简可得

$$ds = a \sqrt{1 - e^2 \cos^2 \theta} d\theta, \quad (6)$$

则椭圆弧长为

$$s = \int_0^\theta ds = a \int_0^\theta \sqrt{1 - e^2 \cos^2 \theta} d\theta. \quad (7)$$

令 $\psi = \pi/2 - \theta$, 则 $d\theta = -d\psi$, $\cos \theta = \sin \psi$, 并且积分与积分变量无关,(7)式化简可得

$$s = a \int_0^\theta \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \theta} d\theta. \quad (8)$$

查阅相关数学手册,积分 $\int_0^\theta \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta$ 为

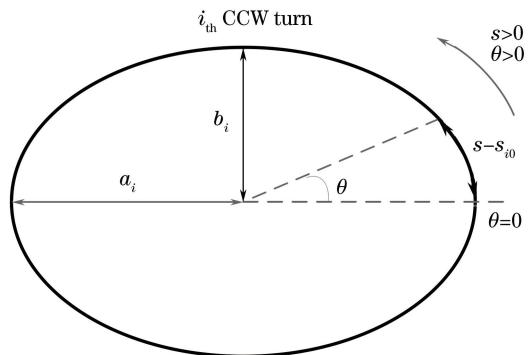


图 3 椭圆柱形光纤环第 i CCW 匝

Fig. 3 The i_{th} CCW turn of elliptic cylindrical fiber coil

勒让德(Legendre)第二类椭圆积分,记为 $E(k, \theta)$, 其中 k 称为模数,该积分不可积,但可以展开为无穷级数,且级数项含有定积分

$$E(k, \theta) = \int_0^\theta \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta = \theta - \frac{1}{2} k^2 \int_0^\theta \sin^2 \theta d\theta - \frac{1}{2 \times 4} k^4 \int_0^\theta \sin^4 \theta d\theta - \frac{1 \times 3}{2 \times 4 \times 6} k^6 \int_0^\theta \sin^6 \theta d\theta - \frac{1 \times 3 \times 5}{2 \times 4 \times 6 \times 8} k^8 \int_0^\theta \sin^8 \theta d\theta - \dots. \quad (9)$$

从图 3 中可以看出

$$s - s_{i0} = a_i \int_0^\theta \sqrt{1 - e_i^2 \sin^2 \theta} d\theta = a_i E(e_i, \theta). \quad (10)$$

由(2)、(6)和(10)式可知,第 i CCW 匝光纤对热致非互易性相移的影响可表示为

$$\Delta \phi_i(t) = \frac{2\tau}{L} \beta_0 \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^{2\pi} \frac{\partial \Delta T}{\partial t} \Big|_{(a_i, \theta, z_i, t)} [a_i E(e_i, \theta) + s_{i0}] a_i \sqrt{1 - e_i^2 \cos^2 \theta} d\theta, \quad (11)$$

式中: $\frac{\partial \Delta T}{\partial t} \Big|_{(a_i, \theta, z_i, t)}$ 为逆时针第 i 圈各位置温度分布的变化率。

同理,如图 4 所示,对于第 j CW 匝

$$s' - s_{j0} = -a_j \int_0^\theta \sqrt{1 - e_j^2 \sin^2 \theta} d\theta = -a_j E(e_j, \theta), \quad (12)$$

并且

$$ds' = -a_j \sqrt{1 - e_j^2 \cos^2 \theta} d\theta. \quad (13)$$

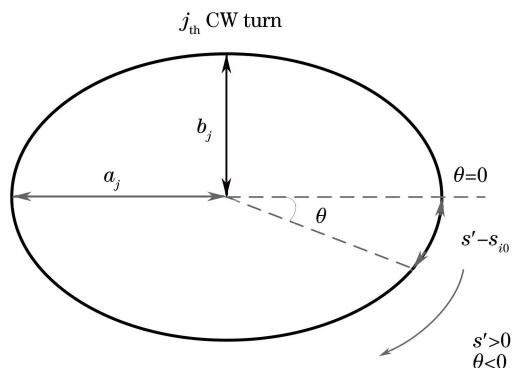


图 4 椭圆柱形光纤环第 j CW 匝

Fig. 4 The j_{th} CW turn of elliptic cylindrical fiber coil

由(2)、(12)和(13)式可知,第 j CW 匝光纤对热致非互易性相移的影响可表示为

$$\Delta \phi_j(t) = \frac{2\tau}{L} \beta_0 \frac{\partial n}{\partial T} \int_{-2\pi}^0 \frac{\partial \Delta T}{\partial t} \Big|_{(a_j, \theta, z_j, t)} [a_j E(e_j, \theta) - s_{j0}] a_j \sqrt{1 - e_j^2 \cos^2 \theta} d\theta, \quad (14)$$

式中: $\frac{\partial \Delta T}{\partial t} \Big|_{(a_j, \theta, z_j, t)}$ 为顺时针第 j 圈各位置温度分

布的变化率。

最后,累加每一匝光纤对热致非互易性相移的

贡献可得到椭圆柱形光纤环三维热致非互易相移的表达式

$$\Delta\phi_e(t) = \frac{2\tau}{L}\beta_0 \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{N_{CCW}} a_i \int_0^{2\pi} \frac{\partial \Delta T}{\partial t} \Big|_{(a_i, \theta, z_i, t)} [a_i E(e_i, \theta) + s_{i0}] \sqrt{1 - e_i^2 \cos^2 \theta} d\theta + \sum_{j=1}^{N_{CW}} a_j \int_{-2\pi}^0 \frac{\partial \Delta T}{\partial t} \Big|_{(a_j, \theta, z_j, t)} \times [a_j E(e_j, \theta) - s_{j0}] \sqrt{1 - e_j^2 \cos^2 \theta} d\theta \right\}, \quad (15)$$

式中: N_{CCW} 和 N_{CW} 分别为逆时针总匝数和顺时针总匝数。

Sagnac 效应表达式^[11]为

$$\Delta\phi_R = \frac{8\pi A}{\lambda_0 c_0} \Omega, \quad (16)$$

式中: A 为光纤环围绕面积; Ω 为转速; c_0 为光在真空中的速度。把(15)式代入(16)式中可得热致误差速率三维表达式

$$\Omega_{e-e}(t) = \frac{n}{2A} \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{N_{CCW}} a_i \int_0^{2\pi} \frac{\partial \Delta T}{\partial t} \Big|_{(a_i, \theta, z_i, t)} [a_i E(e_i, \theta) + s_{i0}] \sqrt{1 - e_i^2 \cos^2 \theta} d\theta + \sum_{j=1}^{N_{CW}} a_j \int_{-2\pi}^0 \frac{\partial \Delta T}{\partial t} \Big|_{(a_j, \theta, z_j, t)} \times [a_j E(e_j, \theta) - s_{j0}] \sqrt{1 - e_j^2 \cos^2 \theta} d\theta \right\}, \quad (17)$$

式中: n 为光纤折射率。对(17)式进行积分可得热致误差角度三维表达式

$$\phi_{e-e}(t) = \frac{n}{2A} \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{N_{CCW}} a_i \int_0^{2\pi} \Delta T(a_i, \theta, z_i, t) [a_i E(e_i, \theta) + s_{i0}] \sqrt{1 - e_i^2 \cos^2 \theta} d\theta + \sum_{j=1}^{N_{CW}} a_j \int_{-2\pi}^0 \Delta T(a_j, \theta, z_j, t) \times [a_j E(e_j, \theta) - s_{j0}] \sqrt{1 - e_j^2 \cos^2 \theta} d\theta \right\}, \quad (18)$$

式中: $\Delta T(a_i, \theta, z_i, t)$ 和 $\Delta T(a_j, \theta, z_j, t)$ 分别为逆时针第*i*圈和顺时针第*j*圈各位置温度分布的变化量。

当光纤环为圆形时,即 $r=a=b$,且 $e=0$,由(9)式可知

$$E(0, \theta) = \theta. \quad (19)$$

由(17)和(18)式可知,圆形光纤环的热致误差速率三维表达式^[10]为

$$\Omega_{e-e}(t) = \frac{n}{2A} \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \sum_{i=1}^{N_{CCW}} r_i \int_0^{2\pi} \frac{\partial \Delta T}{\partial t} \Big|_{(r_i, \theta, z_i, t)} (r_i \theta + s_{i0}) d\theta + \frac{n}{2A} \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \sum_{j=1}^{N_{CW}} r_j \int_{-2\pi}^0 \frac{\partial \Delta T}{\partial t} \Big|_{(r_j, \theta, z_j, t)} (r_j \theta - s_{j0}) d\theta, \quad (20)$$

圆形光纤环的热致误差角度三维表达式^[10]为

$$\phi_{e-e}(t) = \frac{n}{2A} \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \sum_{i=1}^{N_{CCW}} r_i \int_0^{2\pi} \Delta T(r_i, \theta, z_i, t) (r_i \theta + s_{i0}) d\theta + \frac{n}{2A} \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \sum_{j=1}^{N_{CW}} r_j \int_{-2\pi}^0 \Delta T(r_j, \theta, z_j, t) (r_j \theta - s_{j0}) d\theta. \quad (21)$$

(20)和(21)式中参数与椭圆形光纤环参数相同。

2.3 三维光纤环温度瞬态响应数学模型求解及实验验证

光纤环温度瞬态响应的求解过程为:首先利用ANSYS 软件建立光纤环有限元模型来仿真特定温度激励下的光纤环温度场分布信息,然后根据每匝光纤的温度信息以及温度瞬态响应数学模型进行计算求解。模型中光纤长度为 794 m,光纤外径为 165 μm ,采用 4 极性对称绕法,绕制时控制每层匝

数相同。圆柱形光纤环内半径为 30 mm,32 层;椭圆柱形光纤环长半轴为 70 mm,短半轴为 30 mm,32 层。仿真参数如表 1 所示。

表 1 光纤环物理参数

Table 1 Physical parameters of fiber coil

Parameter	Vaule
Refractive index	1.46
Density / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1200
Thermal conductivity / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.13
Specific heat / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1302

分别对圆柱形光纤环和椭圆柱形光纤环施加如图 5 所示的温度激励进行仿真计算和实验分析, 验证三维光纤环温度瞬态响应数学模型的正确性。

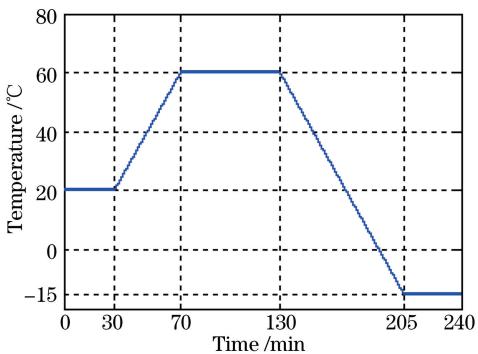


图 5 对光纤环温度激励

Fig. 5 Temperature excitation of fiber coil

实验中, 两种光纤环同时置于温箱中部, 设定实验温度为: 初始温度为 20 °C, 保温 30 min, 然后以 1 °C/min 的温变速率升温至 60 °C, 保温 60 min, 再以 1 °C/min 的温变速率降温至 -15 °C, 保温 35 min, 实验结束。有限元仿真中, 分别施加图 5 所示的温度激励于两种光纤环表面, 表面传热系数为 $h=5 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$, 仿真时间步长 60 s。圆柱形光纤环和椭圆柱形光纤环的实验与有限元计算结果分别如图 6 和图 7 所示。

对陀螺输出数据进行 10 s 平滑处理, 圆柱形光纤环零偏实测输出极值为 $2.5207 (\text{°}) \cdot \text{h}^{-1}$, 计算输

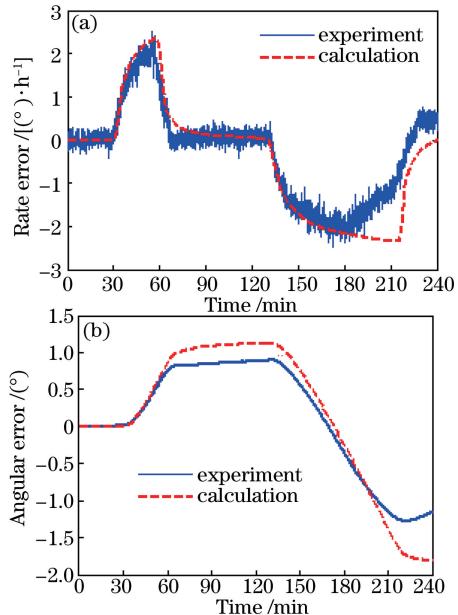


图 6 圆柱形光纤环数值计算与实验结果。

(a)热致误差速率; (b)热致误差角度

Fig. 6 Calculated and experimental results of cylindrical fiber coil. (a) Thermal error rate; (b) thermal error angle

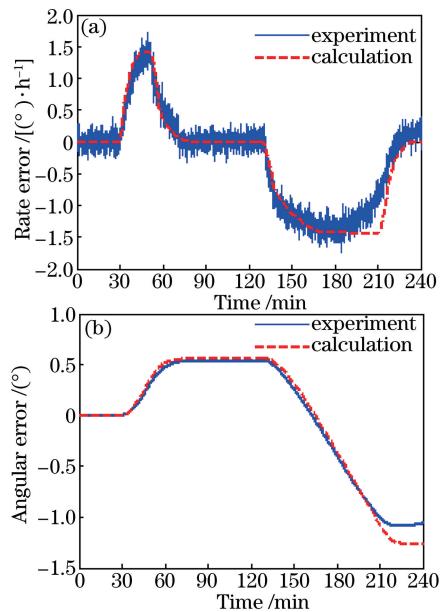


图 7 椭圆柱形光纤环数值计算与实验结果。

(a)热致误差速率; (b)热致误差角度

Fig. 7 Calculated and experimental results of elliptic cylindrical fiber coil. (a) Thermal error rate; (b) thermal error angle
出极值为 $2.3506 (\text{°}) \cdot \text{h}^{-1}$; 椭圆柱形光纤环零偏实测输出极值为 $1.7389 (\text{°}) \cdot \text{h}^{-1}$, 计算输出极值为 $1.4438 (\text{°}) \cdot \text{h}^{-1}$, 两种光纤环热致误差速率的计算和实验结果非常吻合, 表现出很好的一致性, 并且数量级相同, 验证了光纤环温度模型建立的正确性。热致误差角度是热致误差速率的积分, 从图 6 和图 7 还可以看出, 热致误差速率在计算和实验中的差异会在热致误差角度的积分下表现出来, 并且随着时间的推移而增大。

3 椭圆柱形光纤环与圆柱形光纤环的热致误差速率

在光纤长度、光纤环半径和光纤环层数一定的条件下比较两种光纤环的热致误差速率。采用 2.3 节中的模型和仿真参数, 分别对圆柱形光纤环和椭圆柱形光纤环施加如图 5 所示的温度激励进行温度场仿真, 求解两种光纤环的热致误差速率, 计算输出结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 在光纤长度、光纤环内径和光纤环层数一定的条件下, 椭圆柱形光纤环的热致误差速率比圆柱形光纤环小。在上述条件下, 通过改变相应的光纤环层数和匝数, 计算两种光纤环的零偏极值, 如表 2 所示。

从表 2 可以看出, 在光纤长度、光纤环内径和光纤环层数一定的条件下, 椭圆柱形光纤环的热致误

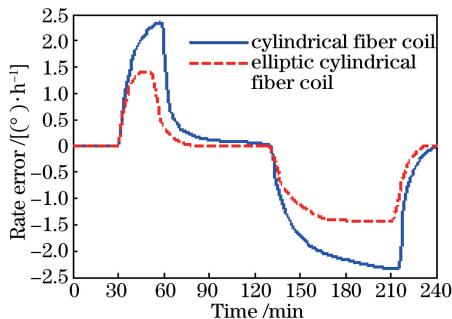


图 8 椭圆柱形光纤环与圆柱形光纤环的热致误差速率

Fig. 8 Comparison of rate error between elliptic cylindrical and cylindrical fiber coils

差速率比圆柱形光纤环的小35%~39%。在该条

表 2 椭圆柱形光纤环与圆柱形光纤环的热致误差速率

Table 2 Comparison of thermal error rate between elliptic cylindrical and cylindrical fiber coils

Number	Fiber coil	Layers of fiber coil	Turns of each layer	Total effective area / m ²	Thermal error rate / [° · h ⁻¹]	Optimization ratio / %
1	Cylindrical	24	160	13.1244	3.0276	35.7
2	Elliptic cylindrical	24	96	17.4121	1.9478	
3	Cylindrical	28	135	13.3178	2.7954	38.8
4	Elliptic cylindrical	28	82	17.7351	1.7096	
5	Cylindrical	32	116	13.4771	2.3506	38.6
6	Elliptic cylindrical	32	71	17.9338	1.4438	

4 结 论

设计了一种适用于随钻测斜仪的椭圆柱形光纤陀螺光纤环结构，并建立了椭圆柱形光纤环三维 Shupe 误差模型，分析了光纤环温度变化导致的热致误差速率和热致误差角度。在光纤长度、光纤环层数和光纤环半径一定的条件下，采用有限元法分别对圆柱形光纤环和椭圆柱形光纤环的三维 Shupe 误差模型进行数值仿真，比较了两种光纤环的热致误差速率。仿真和实验证明了椭圆柱形光纤环三维 Shupe 误差模型的正确性，得到该条件下椭圆柱形光纤环热致误差速率优于圆柱形光纤环的结论。该结构在井下近钻头井眼轨迹测量的特殊环境下，既能满足井下仪器体积受限的需求，又可提高大温度梯度下的惯性测量精度。

参 考 文 献

- [1] Seibi A, Karrech A, Boukadi F, et al. Wellbore path estimation using measurement while drilling techniques: a comparative study and suggestions for improvements [J]. Energy Sources, Part A, 2009, 31(14): 1205-1216.
- [2] Li R, Zhao J H, Li F. On gyroscopic MWD based on axial velocity integrated method [J]. Well Logging Technology, 2012, 36(2): 192-196.
- [3] Wan S P, He X D. Temperature effects in a Brillouin fiber optic gyroscope [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 162-165.
- [4] Yang Y H, Meng C X. Research on the characteristic of bias error and noise analysis method of fiber optic gyroscope [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1206006.
- [5] Li J L, Xu H L, He J. Temperature compensation of start-up drift for fiber optic gyroscope based on wavelet network [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0506005.
- [6] 李家垒, 许化龙, 何靖. 基于小波网络的光纤陀螺启动漂移温度补偿 [J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0506005.
- [7] Li X Y, Ling W W, Xu Z L, et al. Effect of double-cylinder winding on temperature performance of interferometric fiber optic gyroscope [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0806003.

件下，椭圆柱形光纤环优于圆柱形光纤环是由以下原因造成：1) 椭圆柱形光纤环的总有效面积比圆柱形光纤环大，光纤环的灵敏度只与光纤环的有效面积有关，且呈正比关系，Shupe 误差随着光纤环总有效面积的增大而减小；2) 椭圆柱形光纤环的每匝光纤长度比圆柱形光纤环大，从而导致椭圆柱形光纤环每层匝数比圆柱形光纤环少，而 4 极性绕法中上下两层光纤受温度梯度的影响相互补偿，且相同两层中匝数越少，补偿残差越小；3) 椭圆柱形光纤环在温度场中受热面积比圆柱形光纤环大，从而受热更加均匀，受温度梯度影响较小；4) 本文三维模型中只考虑了 Shupe 误差，忽略了光纤及固胶热应力的影响。

- 李绪友, 凌卫伟, 许振龙, 等. 双柱型绕法对干涉式光纤陀螺温度性能的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0806003.
- [7] Mohr F. Thermo optically induced bias drift in fiber optical Sagnac interferometers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(1): 27-41.
- [8] Frigo N J. Compensation of linear sources of non-reciprocity in Sagnac interferometers[C]. Fiber Optic and Laser Sensors I. International Society for Optics and Photonics, 1983, 412: 268-272.
- [9] Tirat O F J, Euverte J M. Finite element model of thermal transient effect in fiber optic gyro[C]. Fiber Optic Gyros: 20th Anniversary Conference. International Society for Optics and Photonics, 1996, 2837: 230-239.
- [10] Li M C, Liu T G, Jiang J F, et al. Transient characteristic testing of fiber optic gyro fiber coil based on temperature excitation[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 435-441.
- 李茂春, 刘铁根, 江俊峰, 等. 基于温度激励的光纤陀螺光纤环瞬态特性检测[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 435-441.
- [11] Herve C. Lefevre. The fiber-optic gyroscope[M]. Zhang G C, Wang W, Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 4-11.
- 勒费夫尔. 光纤陀螺仪[M]. 张桂才, 王巍, 译. 北京: 国防工业出版社, 2002: 4-11.