

地磁场对高精度光纤陀螺仪零偏的影响机理研究<sup>\*</sup>湛尧周<sup>1</sup> 王夏霄<sup>2</sup> 高洋洋<sup>2</sup> 黄 宛<sup>3</sup>

(1. 中航捷锐(北京)光电技术有限公司 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 北京 100191;

3. 中国航天科工集团第四研究院红峰控制有限公司 孝感 432000)

**摘要:** 结合惯导系统标定时的“四位置”误差问题,从理论上分析了光纤陀螺的磁敏感性对其零偏的影响机理,得到地磁场对光纤环的影响角度 $\theta_0$ 与光纤陀螺零偏误差的余弦函数模型;相位误差 $\Delta\varphi$ 与磁场强度 $H$ 呈线性关系;任一方向磁场对光纤陀螺的作用下都可以分解为正交两磁场的单独作用之和等结论。最后,对两支F120型高精度光纤陀螺进行常温静态测试,测试得到在全方位范围内,陀螺的零偏极差分别为0.20°/h、0.28°/h,加磁屏蔽后,陀螺的零偏极差减小到为0.027°/h、0.038°/h,磁屏蔽能有效减小地磁场对高精度光纤陀螺零偏的影响。

**关键词:** 光纤陀螺;地磁场;磁敏感性;零偏;磁屏蔽

中图分类号: TN251 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## Research on the influence mechanism of earth's magnetic field on zero bias of high precision FOG

Chen Yaoyou<sup>1</sup> Wang Xiaoxiao<sup>2</sup> Gao Yangyang<sup>2</sup> Huang Wan<sup>3</sup>

(1. Avition GYRO Photoelectricity technology CO, LTD, Beijing100191, China;

2. School of Instrument Science &amp; Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Hongfeng Control CO, LTD of the Fourth Research Institute, China Aerospace Science &amp; Industry Corp, Xiaogan 432000, China)

**Abstract:** Combined with "four position" error problem in inertial navigation system calibration, it was analyzed that the influence mechanism of magnet sensitivity on zero bias stability of FOG in theory, we can obtain the cosine function model between gyro bias and the angle that magnetic field effect on the optical fiber ring; the Influence of magnet field on bias stability is linear, the influence of magnet field with arbitrary directions can be resolved into the sum of two orthotropic magnet fields. Finally, we tested two F120 high precision fiber optic gyroscopes at room temperature and static state, and got zero bias of gyro is 0.20°/h, 0.30°/h in all direction range, and zero bias of gyro was decreased to 0.027°/h, 0.038°/h with magnetic shielding, the magnetic shielding can decrease the influence on zero bias of high precision FOG from earth's magnetic field effectively.

**Keywords:** fiber optic gyro; earth's magnetic field; magnet susceptibility; zero bias; magnetic shielding

## 1 引言

光纤陀螺是基于Sagnac效应的新型角速度传感器,具有无转动件的全固态结构、动态范围大、带宽大、功耗低、抗冲击振动、体积小、无启动过程、寿命长等突出优点<sup>[1-2]</sup>。在军事及民用领域广泛应用,目前各国都非常重视高精度光纤陀螺的研制。光纤陀螺仪的零偏严重制约着光纤陀螺精度的提高,而陀螺的磁敏感性是影响零位稳定性的重要因

素之一<sup>[3]</sup>,在进行光纤惯性组合标定时,由于陀螺对地磁场的磁敏感性而出现“四位置”误差<sup>[4-5]</sup>,而且光纤陀螺寻北精度受不同方位地磁场变化的影响<sup>[6-7]</sup>。为了探究地磁场对高精度光纤陀螺性能影响机理,本文从理论上分析了光纤陀螺的磁敏感性对零偏的影响,并分别测试了无磁屏蔽光纤陀螺及有磁屏蔽的光纤陀螺在不同方位角的输出地速值和零偏,验证了采取磁屏蔽的方法可使地磁场对高精度光纤陀螺零偏的影响显著降低。

## 2 磁敏感性对陀螺影响的理论分析

光纤陀螺是通过测量 Sagnac 效应引起的相位差来实现其高精度传感功能, Sagnac 效应在光纤环中产生非互易的圆双折射, 而外部磁场引起的法拉第效应会在光纤环中引入一个非互易的圆双折射, 使光在光纤环中传输时产生一个非互易相位差<sup>[8]</sup>, 由于这一误差无法与光纤陀螺的 Sagnac 效应区分, 因此光纤陀螺产生磁敏感性。

两束线偏振光在光纤环中反向传输时, 由保偏光纤双折射率  $\Delta\beta$  引起的非互易性圆双折射相位差为<sup>[9]</sup>:

$$\varphi_r = \frac{2\pi\Delta\beta L}{\lambda} = 2VHL \quad (1)$$

式中:  $V$  为维尔德 (Verdet) 常数;  $L$  为光纤环长度;  $H$  为磁场强度。

光纤陀螺的平面坐标系如图 1 所示, 假设存在大小和方向一定的磁场强度, 且磁场对光纤环的影响角度为  $\theta_0$ 。

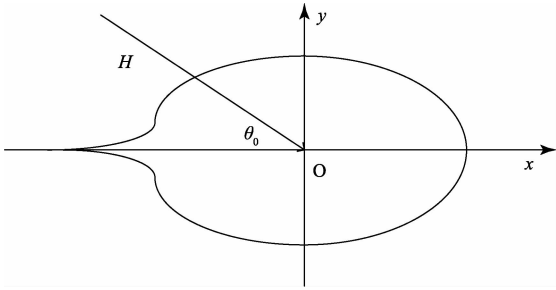


图 1 磁场以  $\theta_0$  角影响陀螺

由于在制作光纤预制棒时存在螺旋残余应力, 或绕制光纤环时引入一定程度的扭转, 导致附加圆双折射, 在外界磁场的作用下, 其由磁光法拉第效应产生的误差可以表示为<sup>[10-11]</sup>:

$$\Delta\varphi = \frac{2VDH}{\Delta\beta} \int_0^{2\pi} \tau(\theta) \sin(\theta - \theta_0) d\theta \quad (2)$$

式中:  $D$  为光纤环直径;  $\tau(\theta)$  为光纤环的扭转分布函数。

对式(2)进行三角函数展开化简得:

$$\Delta\varphi = \frac{2VDH}{\Delta\beta} \left[ \cos\theta_0 \int_0^{2\pi} \tau(\theta) \sin\theta d\theta - \sin\theta_0 \int_0^{2\pi} \tau(\theta) \cos\theta d\theta \right] \quad (3)$$

进一步化简得:

$$\Delta\varphi = \frac{2VDH}{\Delta\beta} \sqrt{p^2 + q^2} \cos(\theta_0 + \delta) \quad (4)$$

式中:  $p = \int_0^{2\pi} \tau(\theta) \sin\theta d\theta$ ,  $q = \int_0^{2\pi} \tau(\theta) \cos\theta d\theta$ ,  $\tan\delta = \frac{q}{p}$ 。

式(4)即为磁场作用下的光纤陀螺误差模型。通过分析此模型, 可以得到以下结论:  $\Delta\varphi$  与磁场强度  $H$  呈线性关

系, 磁场强度越大, 误差就越大; 任一方向磁场对光纤陀螺的作用下都可以分解为正交两磁场的单独作用之和; 当光纤陀螺主轴与磁场方向夹角满足  $\theta_0 = -\delta \pm \pi$  时, 相位误差  $\Delta\varphi$  有最大值, 即该方向为光纤陀螺的磁敏感轴方向。与之对应当  $\theta_0 = -\delta \pm \frac{\pi}{2}$  时,  $\Delta\varphi$  有最小值 0, 为光纤陀螺的磁场不敏感轴方向。

## 3 实验研究和结果分析

为了探究地磁场对高精度光纤陀螺零位稳定性的影响, 本小组在武汉立得空间公司的移动测量技术实验室, 测试了北航研制的 F120H 型陀螺在静态环境下陀螺在不同方位的常温零位稳定性。采用的实验设备包括双路直流稳压电源 1 个、陀螺测试专用计算机 1 台、00 级大理石台 1 个、F120H 型陀螺两只, 编号分别为 F120H1、F120H2。

采集的原始数据使用解析工具解析后使用 MATLAB 软件进行计算, 统计各位置点的计数均值, 及假定地速值。各地速值的计算公式如下:

$$\omega_1(1;9,2) = \frac{\omega_1(1;9,1)}{\text{mean}(\omega_1(:,1))} \times 7.5 \quad (5)$$

式中:  $\omega_1(1;9,1)$  表示各位置点的计数均值。

将 F120H 型陀螺水平放置在大理石台上, 实验过程中始终保持静止状态, 将 F120H 型陀螺上电预热 10 min, 然后让陀螺每沿主轴顺时针旋转  $45^\circ$  角后静止采集 2 min 数据, 一组共采集 8 个方位 9 个数据。实验测试结果如下:

F120H1 型陀螺在不同位置点所测量的地速值、计数均值参见表 1。

表 1 F120H1 型陀螺仪测试结果

序号	位置点	计数均值	地速值( $^\circ/\text{h}$ )
1	0	4415.8	7.5922
2	45	4429.3	7.5650
3	90	4441.4	7.5858
4	135	4418.9	7.5473
5	180	4371.9	7.4671
6	225	4332.3	7.3994
7	270	4328.6	7.3932
8	315	4348.0	7.4262
9	360	4405.2	7.5239

F120H1 型陀螺仪测试结果拟合曲线如图 2 所示, 大致满足正弦关系, 其中,  $\delta = -\frac{\pi}{4}$ , 在磁场对光纤环的影响角度  $\theta_0$  为  $225^\circ$ 、 $270^\circ$  时零偏值较大, 陀螺常温零偏极差为  $0.2^\circ/\text{h}$ 。

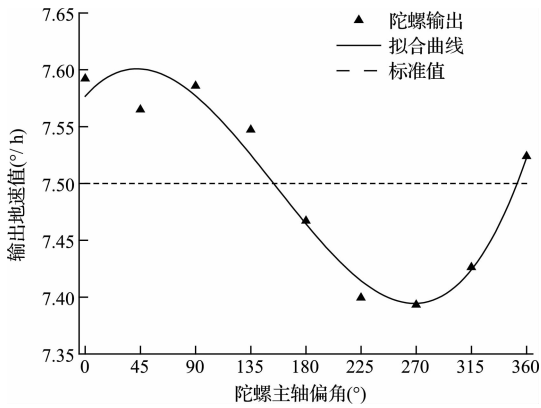


图2 F120H1型陀螺仪输出地速值

F120H2型陀螺在不同位置点所测量的地速值、计数均值参见表2。

表2 F120H2型陀螺仪测试结果

序号	位置点	计数均值	地速值(°/h)
1	0	4 394.0	7.489 7
2	45	4 435.5	7.560 4
3	90	4 453.9	7.591 9
4	135	4 403.5	7.506 0
5	180	4 347.5	7.410 5
6	225	4 285.7	7.305 2
7	270	4 294.0	7.319 4
8	315	4 313.8	7.353 0
9	360	4 392.8	7.487 8

F120H2型陀螺仪测试结果拟合曲线如图3所示,大致满足正弦关系,  $\delta = -\frac{\pi}{4}$ , 在在磁场对光纤环的影响角度  $\theta_0$  为 225°、270°时零偏值较大,陀螺常零偏极差为0.28°/h。

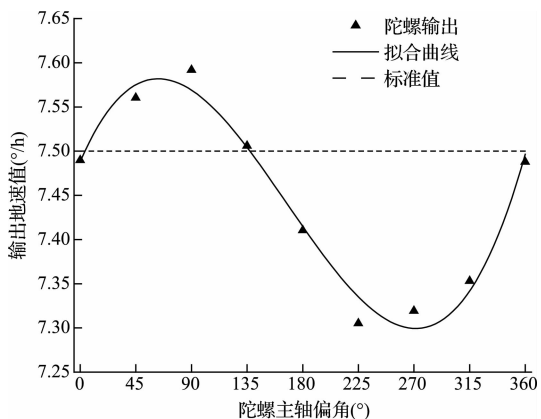


图3 F120H2型陀螺仪输出地速值

为减小地磁场对高精度光纤陀螺仪零偏的影响,降低光纤陀螺磁敏感性的技术措施主要是补偿和磁屏蔽<sup>[12]</sup>。本文采用铁镍合金屏蔽材料制作的长方体形屏蔽体外罩,将光纤陀螺磁屏蔽之后,对F120H1、F120H2型陀螺仪采用与上述相同的实验方法进行测试,得到两支陀螺仪在不

同主轴方位角的零偏测试结果如图4、5所示。

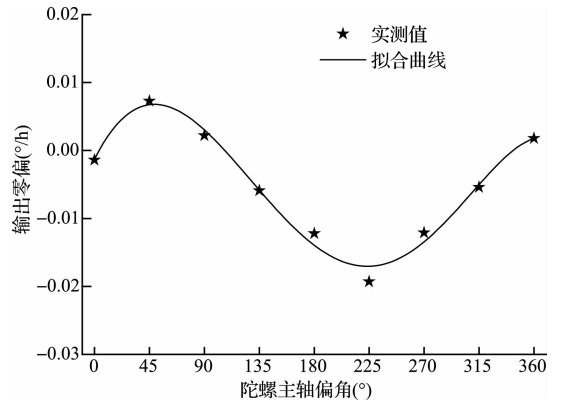


图4 F120H1陀螺仪零偏值

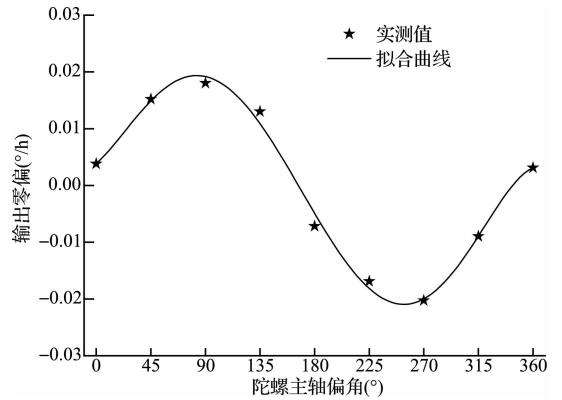


图5 F120H2型陀螺仪零偏值

F120H1、F120H2型陀螺仪加磁屏蔽后的输出零偏与其未加磁屏蔽前的输出地速值随不同的主轴方位角变化趋势相同,满足正弦关系变化,但其零偏极差分别减小到0.027°/h、0.038°/h,将光纤陀螺的零偏极差减小了将近10倍,所以,采取磁屏蔽的方法可使地磁场对高精度光纤陀螺零偏的影响显著降低。

### 4 结 论

为解决地磁场对高精度光纤陀螺仪零偏的影响,理论分析了磁场对光纤陀螺精度的影响机理,得出了磁场对光纤陀螺误差的影响规律,并进行了实验验证,通过对比光纤陀螺加磁屏蔽前后的零偏大小,得出了加磁屏蔽的方法可使光纤陀螺的零偏显著减小的结论。

### 参考文献

[1] 谭曦,刘军,殷建玲,等. 光纤陀螺在直流及交变磁场中的磁敏感性研究[J]. 中国激光, 2012, 39(9):0905006.  
 [2] LLOYD S W, FAN S, DIGONNET M J F. Experimental observation of low noise and low drift in a laser-driven fiber optic gyroscope [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(13): 2079-2085.  
 [3] ZHANG D W, ZHAO Y X, FU W L, et al. Nonreciprocal

- phase shift caused by magnetic-thermal coupling of a polarization maintaining fiber optic gyroscope[J]. Optics Letters, 2014, 39(6): 1382-1385.
- [4] 龙达峰, 刘俊, 张晓明, 等. 基于椭圆拟合的三轴陀螺仪快速标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 1299-1305.
- [5] 段苛苛, 李邓化. 粒子滤波在光纤陀螺四位置寻北中的应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1749-1755.
- [6] 秦国庆, 赖际舟, 陈驹, 等. 捷联航姿系统加速度计振动噪声平滑技术[J]. 电子测量技术, 2013, 36(4): 87-91.
- [7] 任磊, 邵春江, 周璐, 等. 克服磁场对高精度光纤陀螺寻北影响的研究[J]. 航天控制, 2013, 21(3): 81-84.
- [8] 王夏霄, 宋凝芳, 张春熹, 等. 光纤陀螺的磁敏感性的试验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(10): 1116-1120.
- [9] ZHANG D W, WANG ZH F, CHEN L, et al. Nonreciprocity in single-mode fiber coil induced by orthogonal magnetic field[J]. Journal of Optics, 2013, 15(5): 055706.
- [10] HOTATE K, TABE K. Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect; experiment[J]. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5(7): 997-1001.
- [11] 王夏霄, 王野, 李立京, 等. 光纤陀螺“四位置”误差机理研究[J]. 现代电子技术, 2013, 36(18): 138-141.
- [12] 李金涛, 房建成. 高精度光纤 IMU 的磁屏蔽方法及实验研究[J]. 航空学报, 2011, 32(11): 2016-2116.

### 作者简介

谌尧周, 1963 年出生, 中航捷锐(北京)光电技术有限公司市场部经理, 本科。从事光纤陀螺研究工作。

## R&S RTH 系列新世代手持示波器

罗德与施瓦茨公司日前在全球隆重推出了行业首款具有现代实验室示波器性能、隔离通道、并支持触摸屏操作和无线遥控的 R&S Scope Rider RTH 系列新世代手持示波器。RTH 系列手持示波器集紧凑坚固的外观设计和五合一的多功能于一身, 满足业内最高的 CAT IV 600V / CAT III 1 000 V 测试安全等级, 完美兼顾外场测试和实验室研发测试的需要, 成为新世代手持示波器的理想之选。

传统的手持示波器常常因为触发功能单一、波形捕获率极低、采集和记录长度小、测量分析能力有限, 限制了用户在外场测试中解决问题的能力。这些弱点也使用户在实验室尽管有移动测试和浮地测试的需要, 却不得不放弃使用手持示波器进行产品研发和调试的重要原因。R&S RTH 系列新世代手持示波器应对这一挑战, 在紧凑的结构设计中, 同时提供实验室研发仪器的性能和手持仪器的电池供电及便携性。高达 5 万次/s 的波形捕获率、自主研发的 10 Bit ADC 配合最高 500 MHz 的通道模拟带宽使这款手持示波器傲视同侪。

R&S RTH 系列手持示波器集成了 5 种仪器功能于一身, 实现其他同类产品无法企及的多功能。作为高性能便携示波器, R&S Scope Rider 具有精密数字触发系统、33 种参数自动测量、模板测试、XY 显示模式等众多性能特点。除此之外, 它还可以作为 8 通道逻辑分析仪、带有触发和解码功能的协议分析仪、数据记录仪和数字万用表。丰富的功能使其成为应对各种测试任务的理想之选。

这款手持示波器还在行业内首次采用 7 英寸 800x480 电容触摸屏, 使其可以像平板电脑一样进行直观的操作。仪器面板上的大按钮设计适合现场测试人员戴着手套进行操作。实用的多功能滚轮可以方便地进行设置参数的调整。所有的测量信息根据不同应用被清晰直观地显示在高亮显示屏上,

用户在任何场景下都可轻松读取测量结果。

为满足外场测试的苛刻环境要求, R&S RTH 系列手持示波器通过了严苛的防尘防滴水 IP51 外壳防护等级认证。同时它也通过了满足军标的各项机械负载特性测试。全隔离的仪器设计提供了最高的安全等级, 满足 IEC61010-1 标准定义的 CAT IV 600V 和 CAT III 1 000 V 电气安全等级测试需要。

不止于此, R&S RTH 系列手持示波器提供包括中文在内的多语言菜单支持, 还配备了 MicroSD 卡、USB 和以太网接口, 用户可以非常方便地完成测量数据的存储和传输。此外, 它还集成了 WLAN 无线网口, 允许用户通过智能手机、平板或笔记本电脑对其进行遥控操作。用户只需简单地打开移动控制设备上的网页浏览器就可完成所有操控, 不需要其他额外的软件或应用程序。

强大的电池续航能力配合 2.4 Kg 的重量, R&S RTH 系列手持示波器为用户在现场安装、维护和处理突发情况以及实验室桌面和移动应用提供了高度的灵活性。这款全新的手持示波器不仅可以用于传统的电气工程领域, 也可服务于其他更广泛的工业市场。无论是普通技工还是专业人员都可通过它来对电气安装、系统和部件情况获得清晰的了解; 无论是工业研发还是生产制造, 无论在汽车电子、铁路、电力、船舶、航空航天测试应用, R&S RTH 系列手持示波器都可以让您得心应手。

R&S RTH 系列手持示波器有 4 通道和 2 通道型号选择, 两通道型号还标配数字万用表功能。带宽选择包括 60 MHz、100 MHz、200 MHz、350 MHz 和 500 MHz。同时提供 I2C, SPI, UART, RS-232, RS-422 和 RS-485 等总线触发和解码选项。