doi:10.11887/j.cn.201403009 http://journal.nudt.edu.cn

# 光纤陀螺输入轴失准角的温度特性*

阳明晔,宋章启,张学亮,陈宇中
(国防科技大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘 要**:光纤陀螺的输入轴失准角温度变化特性是光纤陀螺惯性系统正交校准所面临的主要难题。提出了一种有效地消除输入轴失准角测量误差的测试方法;对三只椭圆环结构的光纤陀螺进行了输入轴失准角温度特性研究。结果表明,三只椭圆环光纤陀螺的输入轴失准角分布比较集中;此外,椭圆环光纤陀螺的输入轴失准角随着温度变化呈非单调的曲线变化,高温过程的变化速度相对较快。该结论对光纤陀螺环制作工艺的改进提供了测试依据,并有助于惯性系统正交校准的温度补偿技术研究。

**关键词**:光纤陀螺;标度因数;输入轴失准角;温度特性
**中图分类号**:V241.5 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2014)03-0046-05

# Temperature characteristics of input axis misalignment angle of fiber optic gyro

*YANG Mingye, SONG Zhangqi, ZHANG Xueliang, CHEN Yuzhong*
(College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract**: The temperature variation characteristic of the input axis misalignment angle of fiber optic gyro has become one of the key problems of orthogonal calibration of the fiber optic gyro inertia system. Firstly, a kind of measurement method, which can eliminate the measurement errors effectively, was presented. Then, the input axis misalignment angles of three fiber optic gyros with elliptical-structure optical fiber rings were measured. It is found that the three samples have similar input axis misalignment angles; the input axis misalignment angles vary non-monotonously with the changing of temperature; and the varying velocity is fast relatively in high temperature region. The results may be useful for improving the manufacturing technology of the fiber ring of the fiber optic gyro and will be helpful to prompt the temperature compensation technology of the orthogonal calibration in fiber optic gyro inertia system.

**Key words**: fiber optic gyro; scale factor; input axis misalignment angle; temperature characteristic

光纤陀螺是一种由多匝光纤构成传感单元的角速度传感器,具有全固态、体积小、抗干扰、耐冲击等特点,已广泛应用于惯性系统中。多匝光纤构成的光纤环圈等效平面法线即为光纤陀螺的输入轴(Input Axis,IA)。当输入轴与载体转动角速度方向平行时,陀螺输出量最大。理想情况下,陀螺输入轴应与安装面的法线即输入基准轴(Input Reference Axis,IRA)平行。但是光纤陀螺的传感单元光纤环是由多匝线圈构成的,其输入轴是每匝光纤面矢量合成的结果。由于四极对称绕法的固有问题和绕制工艺缺陷,导致IA一般不会与IRA重合。通常定义IA与IRA之间的夹角即为输入轴失准角 $\gamma_m$。在三轴陀螺组合成惯性系统中,$\gamma_m$ 的存在会造成不同陀螺的角速度交叉耦合。因此,在惯性导航系统研制中,需要对传输矩阵进行校准,消除包括 $\gamma_m$ 在内的输入轴失准角不正交带来的系统误差,以提高惯性导航系统精度[1-3]。但是光纤陀螺的光纤环是由光纤绕制而成,由于骨架加工及光纤绕制工艺的不确定因素,光纤陀螺的IA会在环境的温度、压力、振动等外界因素的影响下发生变化。这种变化加大了惯性系统的补偿难度,甚至不能补偿。而光纤陀螺惯性导航系统通常要工作在环境温度变化范围较大的条件下,因此有必要对光纤陀螺的输入轴失准角 $\gamma_m$ 进行温度特性研究。一方面可以对光纤陀螺系统进行检验筛选;另一方面也可为光纤环的绕制工艺的改进提供参考;而且也为开展惯性系统的系统误差角的温度补偿技术研究提供必要指导。

## 1 输入轴失准角测试原理

光纤陀螺自身的输入轴失准角主要源于光纤

* 收稿日期:2013-10-11
作者简介:阳明晔(1974—),女,湖南东安人,讲师,硕士,E-mail:yangmingye74@163.com

环物理结构。同时,光纤陀螺输入轴失准角测试过程中,转台结构与安装还将引入输入轴失准角的测试误差[4-5]。由于转台安装平面的法线与电机的转动轴之间存在偏差,当陀螺安装在转台台面上时,给 $\gamma_m$ 测量预先添加了一个偏置角;将陀螺安装于转台台面上时,由于夹具设计和加工的原因,也引入一个安装误差。通常,每次安装陀螺时产生的安装误差相同。

一般来说,安装误差的影响比转台结构误差要严重许多。因此,在 GJB 2426 – 1995 及 GJB 2426A – 2004 两个版本的《光纤陀螺仪测试方法》中,有关输入轴失准角的测试方法都充分考虑了安装误差的消除。上述方法可满足中低精度的光纤陀螺测试需求,但对于高精度的惯导器件,还存在一定缺陷。

### 1.1　标度因数 $K$ 的测试方法

光纤陀螺标度因数是输入轴失准角测量中的关键参数,因此必须首先进行精确测量。当光纤陀螺绕转动轴旋转时,光纤陀螺的输出 $\omega_{IA}$ 与转台输入角速度 $\Omega$ 的关系为

$$\omega_{IA} = \omega_0 + K\Omega\cos(\gamma) \tag{1}$$

其中,$\omega_0$ 为零偏,$K$ 为光纤陀螺标度因数,$\gamma$ 为输入轴与转动轴间的夹角。当光纤陀螺 IRA 与转动轴平行时,$\gamma$ 即为输入轴失准角 $\gamma_m$。按照 GJB2426A – 2004《光纤陀螺仪测试方法》中的标度因数测试方法来确定的 $K$ 值实际上为 $K\cos\gamma_m$。但通常情况下由此产生的测量误差比例 $\Delta K/K$ 为几百 ppm,$\gamma_m$ 角误差率 $\Delta\gamma_m/\gamma_m$ 与 $\Delta K/K$ 近似相等[6],对 $\gamma_m$ 的结果影响很小,因此可以忽略。本文首先按照这一方法测出光纤陀螺的标度因数 $K$ 值,然后再进行输入轴失准角 $\gamma_m$ 的测试。

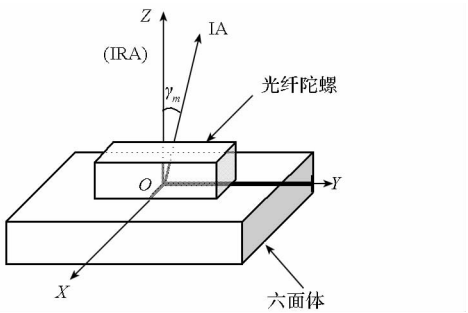



图 1　装有光纤陀螺的六面体工装

Fig. 1　Hexahedron tooling equipped with of fiber optic gyro

### 1.2　输入轴失准角 $\gamma_m$ 的测试方法

为保证安装精度,光纤陀螺的安装基准面加工精度较高,而陀螺外壳的其他部分的垂直度和平整度均要求不高。为了便于陀螺的测试,将陀螺装于标准六面体工装上,六面体三轴垂直误差小于几个角秒。在测试过程中,将六面体安装在转台台面上。此时,陀螺与六面体组成一个整体。本文用图 1 所示的统一坐标系进行标识。图 1 中,与六面体的上安装面垂直的轴即为 IRA,设为 $OZ$ 轴;在六面体的安装面与两棱边平行相互正交的轴设为 $OX$、$OY$ 轴,与 $OZ$ 轴一起构成一个直角坐标系。因此,光纤陀螺 IA 与 IRA(即 $OZ$ 轴)之间的夹角即是光纤陀螺输入轴失准角 $\gamma_m$。在下面分析中,将装有陀螺的六面体工装称为陀螺载体。

将陀螺载体整体安装在转台上,使 IRA 轴平行于转台台面。转台施加角速度 $\Omega$ 与陀螺输出 $\omega_{IA}$ 的关系可表述为

$$\omega_{IA} = \omega_0 + K\Omega\sin(\gamma_T) \tag{2}$$

式中,$\gamma_T$ 为输入轴失准角在当前测试平面内的投影,其中 $T = x$ 或 $y$,$\gamma_x$ 对应于 IA 在 $XOZ$ 平面上投影与 IRA 的夹角,$\gamma_y$ 对应于 IA 在 $YOZ$ 平面上投影与 IRA 的夹角。

在求得 $\gamma_x$、$\gamma_y$ 的基础上即可得出输入轴失准角

$$\gamma_m = (\gamma_x^2 + \gamma_y^2)^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

为了克服地球自转的作用,需取陀螺旋转整周期数据的平均值。另外,为了提高测量精度,在陀螺的带宽和测量角速度范围内,角速度 $\Omega$ 可选择较大值进行测试。

#### 1.2.1　测试 IA 在 $YOZ$ 平面内投影与 IRA(即 $OZ$ 轴)的夹角 $\gamma_y$

将 $OY$ 轴正向朝上平行于转台法线方向,此时 IRA 与转台面平行。为消除零偏的影响,转台以给定的角速度正转后以相同的速度反转,分别记录旋转整周期的陀螺输出平均值。按式(4)计算消除零偏

$$\omega_{IAy1} = \frac{\omega_{IAy+} - \omega_{IAy-}}{2} = K\Omega\sin(\gamma_{y1}) \tag{4}$$

式中,$\omega_{IAy+}$、$\omega_{IAy-}$ 分别表示正反转时陀螺的输出平均值;$\omega_{IAy1}$ 表示 $OY$ 轴平行转台面垂直方向时的第一个计算值;$\gamma_{y1}$ 为此状态下 IA 与转动轴垂线的夹角在 $YOZ$ 平面内投影,它是转台台面法线与转动轴之间的误差角与 $\gamma_y$ 角之和。由于 $\gamma_{y1}$ 远小于 1,可近似取 $\sin(\gamma_{y1}) \approx \gamma_{y1}$。为了消除转台结构误差,将陀螺载体绕 $OY$ 轴旋转 180°,重复上述测试过程,获得 $OY$ 轴平行转台面垂直方向时的第二个计算值,记为 $\omega_{IAy2}$。取两者的均值即可消除转台结构误差,记为 $\omega_{IAy}^{+}$。

为了消除安装误差,在上述基础上,将陀螺载体绕 IRA 旋转 180°,使 *OY* 轴正向朝下平行转台面垂直方向。重复 *OY* 轴朝上时的测试过程,获得 *OY* 轴平行转台面垂直方向的第三个、第四个计算值 $\omega_{IAy3}$ 和 $\omega_{IAy4}$,仍然取两者的均值消除此时的转台结构误差,得到 $\omega_{IAy}^{-}$。最后利用前后两次结果 $\omega_{IAy}^{+}$、$\omega_{IAy}^{-}$,消除安装误差,得到 IA 在 *YOZ* 平面内的投影与 IRA(即 *OZ* 轴)的夹角

$$\gamma_y = \frac{\omega_{IAy}^{+} - \omega_{IAy}^{-}}{2K\Omega} \tag{5}$$

1.2.2 测试 IA 在 *XOZ* 平面内投影与 IRA(即 *OZ* 轴)的夹角 $\gamma_x$

将陀螺绕 *OZ* 轴逆时针旋转 90°,使 *OX* 轴正向朝上平行转台面垂直方向。然后按照求取 $\gamma_y$ 的方法进行测试,求取 IA 在 *XOZ* 平面内投影与 IRA(即 *OZ* 轴)的夹角 $\gamma_x$。此时,即可根据式(3)获取输入轴失准角。

## 2 输入轴失准角温度特性测试系统

将陀螺载体的测试在配有温箱的单轴速率转台上进行。通过改变温度,进行光纤陀螺的输入轴失准角的温度特性实验。

实验系统如图 2 所示,由一台配有温箱的单轴速率转台(型号为 MO - 16PV/CL,角速率控制精度是 $5\times10^{-6}$°/s)、一个装有陀螺的高精度的六面体工装(尺寸为 160mm × 140mm × 40mm,加工精度满足测试要求)和一台用于转台控制和数据处理的计算机组成。温箱温度的变化、转台的远程控制都由计算机完成,计算机同时还接收光纤陀螺的数据并对数据进行处理。

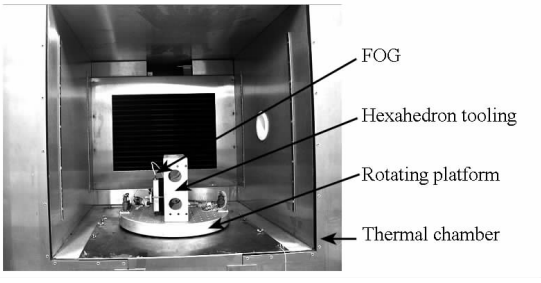



图 2 $\gamma_m$ 温度特性测试实验系统

Fig. 2 Test system of temperature characteristics of $\gamma_m$

实验中采用本单位研制的椭圆结构光纤环的光纤陀螺作为研究对象,其中的光纤环的外形结构如图 3 所示。为了分析 $\gamma_m$ 的共性以及差异,选取了 3 只陀螺进行测试。实验的具体测试流程是:首先,选择测试温度点;然后设计温箱控制程序,启动温箱工作;在温箱工作到每个测试温度点时,首先保温 1.5h,待陀螺工作稳定后,按照前文所述的测试方法测出当前温度的 $\gamma_x$、$\gamma_y$,进而得出输入轴失准角 $\gamma_m$。



图 3 椭圆形光纤环

Fig. 3 Elliptical optical fiber ring

## 3 测试数据分析

### 3.1 输入轴失准角的测试精度验证

在对陀螺进行输入轴失准角的温度特性测试之前,首先就输入轴失准角的测量分辨率和重复性两方面对陀螺本身的测量精度进行评估。

本文采用等间距模拟法来测试陀螺关于输入轴失准角 $\gamma_m$ 的分辨能力。实验系统如图 4 所示,基于图 2 系统进行了改装。在六面体工装与陀螺之间添加一个一维电动旋转台,通过电机的旋转,可以改变陀螺输入轴与转台旋转轴之间的夹角,来模拟陀螺输入轴失准角的变化。实验中仍然设六面体工装的上安装面法线方向为 IRA。

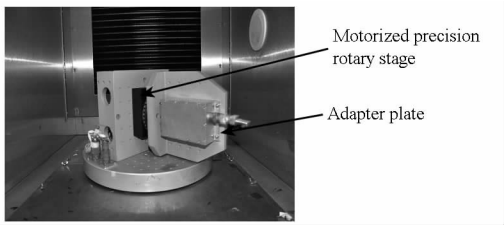



图 4 $\gamma_m$ 分辨能力实验测试系统

Fig. 4 Test system of discernibility of $\gamma_m$

电控旋转台每次的角度改变量为 0.005°,约 $8.73\times10^{-5}$rad。每改变一次,按照前文所述的输入轴失准角 $\gamma_m$ 测试方法进行一次测量。本次实验中,电控旋转台先后转动了八次,进行了九次输入轴失准角的测量,转动的角度大小总和为 0.04°(即 $6.9813\times10^{-4}$rad)。每转动一次,将前后两次的输入轴失准角相减,获得角度变化量。测试结果如图 5 所示。

如设电动旋转台一次改变量为 $\gamma_0$,则 $\gamma_0 = 8.73\times10^{-5}$rad。从图 5 可以看出,$\dfrac{|\Delta\gamma_m - \gamma_0|}{\gamma_0} \leqslant 50\%$,参照 GJB 2426A - 2004《光纤陀螺仪测试方法》中关于光纤陀螺分辨率的定义,此时,陀螺输

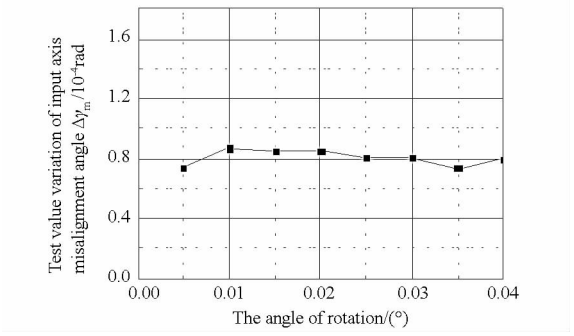



图 5　输入轴失准角测量值变化量 $\Delta\gamma_m$ 随转动角度的变化曲线

Fig. 5　Variation of input axis misalignment angle $\Delta\gamma_m$ vs the angle of rotation

入轴失准角的测量可分辨角度小于 0.005°,即 $8.73\times10^{-5}$rad。受旋转电机精度限制,不能进行更精细测量,但从图 5 结果显示,本测试系统可分辨更小的输入轴变化。另外,在陀螺的带宽和测量角速度范围内,提高转台角速度,还可以获得更高的 $\gamma_m$ 分辨能力。

在常温下,对该光纤陀螺进行了重复性测试实验。将一只陀螺按照 $\gamma_m$ 测量方法重复进行了 3 次测量。测试结果如表 1 所示。

**表 1　常温重复测试 $\gamma_m$ 的结果**

Tab. 1　Result of repeat test about $\gamma_m$ in normal temperature

| 序号 | $\gamma_m$ 值 (rad) | $\gamma_m$ 值的方差 $\sigma$ (rad) |
|---|---|---|
| 1 | 0.003 57 | |
| 2 | 0.003 49 | $4.164\times10^{-5}$ |
| 3 | 0.003 55 | |

测量的 $\gamma_m$ 值的方差分布为 $4.164\times10^{-5}$rad。

### 3.2　输入轴失准角温度特性测试

利用前文所述的 $\gamma_m$ 的测试方法和搭建的实验系统对本单位自制的具有椭圆环结构的三只光纤陀螺的 $\gamma_m$ 进行了温度特性测量。测量数据如图 6 所示。

图 6 显示了三只陀螺 $\gamma_m$ 大小随温度的变化情况。三个陀螺的输入轴失准角均随温度有不同程度的变化。在实验温度范围内,陀螺 1 的 $\gamma_m$ 变化幅度最大,极差达到 0.001rad,测试温度范围内的 $\gamma_m$ 平均值为(0.0034 ± 0.0004) rad;陀螺 2 在测试温度范围内的 $\gamma_m$ 平均值为(0.00378 ± 0.00007) rad,极差为 0.00017rad;陀螺 3 在测试温度范围内的 $\gamma_m$ 平均值为(0.0012 ± 0.0001) rad,极差为 0.00024rad。总的来看,陀螺 3 的 $\gamma_m$ 最小,常温时只有 0.00119rad;陀螺 2 的 $\gamma_m$ 温度稳定性最好,温度范围内最大变化仅 0.00017rad,但其 $\gamma_m$ 较大。

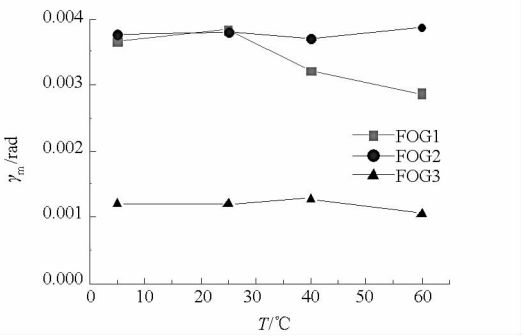



图 6　$\gamma_m$ 大小随温度变化的曲线

Fig. 6　Changing of three FOG's $\gamma_m$ vs temperature

从测量结果可以看出,陀螺输入轴失准角与 *OZ* 轴夹角在 0.002rad 左右,输入轴失准角 $\gamma_m$ 随温度变化的变化可近似为仅在 *XOY* 平面内。设 IA 矢量的模为单位矢量,则 IA 矢量在 *XOY* 平面的投影可用坐标($\gamma_x$,$\gamma_y$)表示。测试结果如图 7 所示:

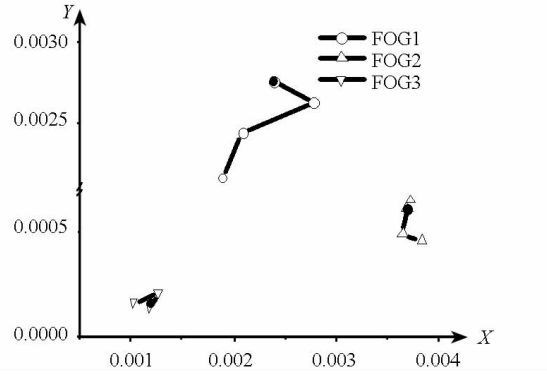



图 7　IA 在 *XOY* 平面内的投影

Fig. 7　Projection of IA in *XOY* plane

图 7 显示了三只陀螺 $\gamma_m$ 不同温度下在 *XOY* 平面投影。为了分辨每只陀螺的温变过程,在每条曲线 5℃ 点进行了填充标识。从图 7 可以看出,三只陀螺的 $\gamma_m$ 角具有共同特征:1)$\gamma_m$ 空间分布相对集中,均在第一象限,可能是工艺问题。作为共性,便于修正;2)随温度变化,$\gamma_m$ 呈现非单调的曲线变化趋势;3)高温比低温变化速度快。

在实验中,测试用椭圆形光纤环采用四极绕法,每层 63 匝,共 16 层,椭圆环长轴均值为 90mm。以陀螺 3 为例,常温时,$\gamma_m$ = 0.00119rad,其相当于光纤环面在 $\gamma_m$ 的相对方向整体倾斜了 108μm;绕制的光纤直径是 250μm,因此可以等效为共 432 匝光纤圈往 $\gamma_m$ 角的相对方向产生了约一根光纤直径大小的偏斜。

## 4 结论

本文对光纤陀螺输入轴失准角测量方法进行了分析和讨论,提出了一种消除转台系统偏差的测量方法;然后,采用带温箱的单轴速率位置转台和标准六面体,建立了光纤陀螺输入轴失准角温度实验系统,最后对实际光纤陀螺的输入轴失准角的温度特性进行了测量分析。实际测试系统输入轴失准角测试精度可达 $8.73 \times 10^{-5}$ rad 。实验发现不同光纤陀螺输入轴失准角在温度条件下变化情况不同,该结果可以作为光纤陀螺环质量的判别依据,也可为光纤环的制作工艺的改进提供参考,同时为光纤陀螺组合惯性系统的温度补偿研究提供技术支撑,为提高惯性系统的系统精度打下基础。

## 参考文献(References)


[1] 朱国力,文香稳,潘明华. 三维姿态测量系统的安装误差[J]. 华中科技大学学报,2011,39(5):1 - 5.
ZHU Guoli, WEN Xiangwen, PAN Minghua. Installation errors of three-dimension pose measurement systems[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011,39(5):1 - 5. (in Chinese)

[2] Qin S Q, Huang Z S, Wang X S. Optical angular encoder installation error measurement and calibration by ring laser gyroscope[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2010,59(3):506 - 511.

[3] 李岩,张智永,范大鹏. 陀螺安装误差影响视轴稳定平台精度的机理研究[J]. 光电工程,2007,34(9):10 - 15,29.
LI Yan, ZHANG Zhiyong, FAN Dapeng. Principle of the effect of gyro misalignment on the stabilization platforms accuracy[J]. Opto - Electronic Engineering, 2007,34(9):10 - 15,29. (in Chinese)

[4] GJB 2426 - 95. 光纤陀螺仪测试方法[S]. 北京:国防科学技术工业委员会,1995.
GJB 2426 - 95. Methods for fiber optic gyroscope test[S]. Beijing: the Commission of Science, Technology, and Industry for National Defense,1995. (in Chinese)

[5] GJB 2426A - 2004. 光纤陀螺仪测试方法[S]. 北京:国防科学技术工业委员会,2004.
GJB 2426A - 2004. Methods for fiber optic gyroscope test[S]. Beijing: the Commission of Science, Technology, and Industry for National Defense,2004. (in Chinese)

[6] 张海鹏,房建成. 陀螺标度因数与输入轴失准角解耦测试研究[J]. 宇航学报,2007,28(5):1161 - 1166.
ZHANG Haipeng, FANG Jiancheng. Research on the uncoupling test between gyroscope scale factor and input axis misalignment[J]. Journal of Astronautics, 2007,28(5):1161 - 1166. (in Chinese)

[7] 吉世涛,秦永元,蓝燕,等. 光纤陀螺输入轴失准角温度补偿研究[J]. 测控技术,2010,29(10):6 - 8.
JI Shitao, QIN Yongyuan, LAN Yan, et al. Temperature compensation research on input axis misalignment of FOG[J]. Measurement & Control Technology, 2010,29(10):6 - 8. (in Chinese)