

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.03.017

二位置光纤陀螺寻北方案及误差分析

姜璐, 于运治, 姜庆国

(海军潜艇学院航海观通系, 山东 青岛 266044)

摘要: 为消除陀螺零偏和陀螺常值漂移的影响, 探讨二位置方案来实现高精度寻北的方法; 并以二位置寻北原理为基础, 给出其误差分析方法, 得出在陀螺的漂移及标度因数误差、台体的水平误差、转位误差、引入参数误差等几个因素作用下的误差模型, 并对误差特点进行分析。分析结果证明: 在以上误差源作用下产生的寻北误差多与方位角的三角函数成比例关系, 或为常值误差, 该结论可为补偿寻北误差提高寻北精度提供参考。

关键词: 光纤陀螺仪; 寻北; 二位置; 误差分析

中图分类号: TP306 **文献标志码:** A

Two-Position Optical Fibre Gyro North-Seeking Scheme and Error Analysis

Jiang Lu, Yu Yunzhi, Jiang Qingguo

(Dept. of Navigation, Submarine Academy of PLA Navy, Qingdao 266044, China)

Abstract: In order to cancel the impact of gyro bias and gyro drift, discusses two-position method to achieve high north seeking accuracy. Based on two-position north seeking, an error analyzing method is given. The error models are established, which includes gyro drift, scale-factor error, level error of platform, position transformation error and introduce parameter error. Then, analyze the error features. The analysis result shows that the north seeking error is proportioned to azimuth trigonometric function or is a constant under such error sources. The result can give reference to compensate north seeking error and improve north seeking accuracy.

Key words: fiber-optic gyroscope (FOG); north-seeking; two-position; error analysis

0 引言

光纤陀螺仪是基于Sagnac效应的新型光学陀螺, 同机电陀螺或激光陀螺相比, 其优点主要在于无活动部件、结构简单、耐冲击、启动时间短、动态范围宽、易于采用集成光路技术、信号稳定可靠和可直接数字输出^[1]。最近几年, 由于光纤陀螺在精度、性能和尺寸上具有更大的潜力, 已受到广泛关注和应用。陀螺寻北仪是一种能在静态下全天候自动指示方位的高精度惯性仪表, 它利用陀螺仪测得的地球自转角速度的水平分量和加速度计测得的水平误差角, 经过解算得到载体参考轴向与真北方向的夹角^[2]。根据光纤陀螺二位置的寻北原理, 寻北仪的精度主要受到元件的精度、结构安装和用于计算的参数的影响, 因此, 笔者从元件误差、台体的水平误差、转位误差及引入参数误差等方面进行综合分析。

1 二位置寻北方案的工作原理

图 1 为基于 FOG 寻北方案的结构原理图, 旋转平台安装有地球自转角速度的敏感元件光纤陀螺

仪和敏感重力加速度的加速度计或倾角传感器, 平台的位置信息由角位置编码器获取, 平台的位置由步进电机控制, 计算机主要完成信号的采集及处理, 信息的解算和平台控制功能。

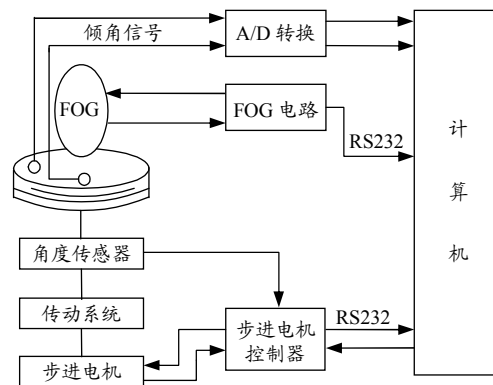


图 1 基于光纤陀螺的寻北仪的结构

将光纤陀螺仪输入轴即光纤敏感环的垂线方向置于水平面内, 则其敏感的是地球自转角速度 Ω 在输入轴方向上的分量, 如果光纤陀螺的输入轴在理想水平位置, 则有:

$$U = K_G \Omega \cos \varphi \cos \gamma + \Delta + \varepsilon(t) \quad (1)$$

收稿日期: 2011-10-09; 修回日期: 2011-11-07

作者简介: 姜璐(1972—), 女, 山东人, 博士, 副教授, 从事潜艇水下导航研究。

式中 K_G 为标度因数, Ω 为地球自转角速度, Δ 为陀螺零偏, $\varepsilon(t)$ 为光纤陀螺漂移, φ 为地理纬度, γ 为陀螺输入轴的初始方向与真北方向的夹角^[3]。

二位置寻北是指分别在相隔 180° 2 个位置进行测量, 开始寻北时, 陀螺敏感轴与载体纵轴重合, 设敏感轴方向与真北方向的夹角为 γ , 其陀螺的输出为:

$$U_1 = K_G \Omega \cos \varphi \cos \gamma + \Delta + \varepsilon(t_1) \quad (2)$$

通过电机驱动, 台体旋转 180° , 陀螺敏感轴也随之转过 180° , 此时陀螺输出为:

$$U_2 = -K_G \Omega \cos \varphi \cos \gamma + \Delta + \varepsilon(t_2) \quad (3)$$

忽略陀螺的随机漂移, 这样即可解算出方位角:

$$\gamma = \arccos \left[\frac{U_1 - U_2}{2K_G \Omega \cos \varphi} \right] \quad (4)$$

2 误差分析

2.1 光纤陀螺零偏和漂移的影响

从式 (1) 可以看出, 陀螺输出信号包含有陀螺的零偏和陀螺的漂移。零偏是指陀螺仪输入为零时, 其输出不为零, 这个输出值就是零偏; 陀螺漂移包含有常值漂移和随机漂移, 一般由常值分量、周期分量和白噪声组成。从二位置寻北方案可以看出, 如忽略随机漂移的影响, 方位角解算如式 (4), 这就抵消了陀螺零偏和常值漂移的影响, 降低了对陀螺精度的要求, 这也是二位置寻北方案的优势所在。

若考虑陀螺漂移, 方位角为:

$$\gamma' = \arccos \left[\frac{U_1 - U_2 + \varepsilon}{2K_G \Omega \cos \varphi} \right]$$

式中 $\gamma' = \gamma + \Delta\gamma$, $\Delta\gamma$ 为陀螺漂移产生的方位角误差。

陀螺漂移同其敏感值相比为小量, 将上式展开成泰勒级数形式, 并忽略二阶以上项, 得:

$$\begin{aligned} \gamma' &= \arccos \frac{U_1 - U_2}{2K_G \Omega \cos \varphi} - \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{U_1 - U_2}{2K_G \Omega \cos \varphi} \right)^2}} \cdot \frac{\varepsilon}{2K_G \Omega \cos \varphi} = \\ &\gamma - \frac{1}{\sin \gamma} \cdot \frac{\varepsilon}{2K_G \Omega \cos \varphi} \end{aligned} \quad (5)$$

由陀螺漂移引起的误差为:

$$\Delta\gamma = -\frac{1}{2K_G \Omega \cos \varphi} \cdot \frac{\varepsilon}{\sin \gamma} \quad (6)$$

2.2 光纤陀螺标度因数误差的影响

标度因数误差是指标度因数的实际值相对标称

值的变化。在同一角速度输入之下, 如果标度因数变化, 将引起陀螺的测量误差。如果标度因数 K_G 存在误差 ΔK , 则根据寻北公式 (4) 得:

$$\cos \gamma' = \frac{U_1 - U_2}{2(K_G + \Delta K) \Omega \cos \varphi} \quad (7)$$

式中 $\gamma' = \gamma + \Delta\gamma$, $\Delta\gamma$ 为 ΔK 产生的方位角误差。

由于 ΔK 为小量, 将上式在 K_G 处用泰勒级数展开, 并忽略二阶以上无穷小量, 得:

$$\cos \gamma' = \frac{U_1 - U_2}{2K_G \Omega \cos \varphi} - \frac{U_1 - U_2}{2\Omega \cos \varphi} \cdot \frac{1}{K_G^2} \cdot \Delta K = \cos \gamma - \cos \gamma \cdot \frac{\Delta K}{K_G} \quad (8)$$

$\Delta\gamma$ 为小角, 有:

$$\cos \gamma' = \cos(\gamma + \Delta\gamma) \approx \cos \gamma - \sin \gamma \cdot \Delta\gamma \quad (9)$$

比较式 (8)、式 (9), 可得:

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta K}{\operatorname{tg} \gamma \cdot K_G} \quad (10)$$

上式即为陀螺标度因数误差对寻北精度的影响, 可知, ΔK 产生的寻北误差同方位角有关, 与 $\operatorname{tg} \gamma$ 成反比。

2.3 台体水平误差对寻北精度的影响

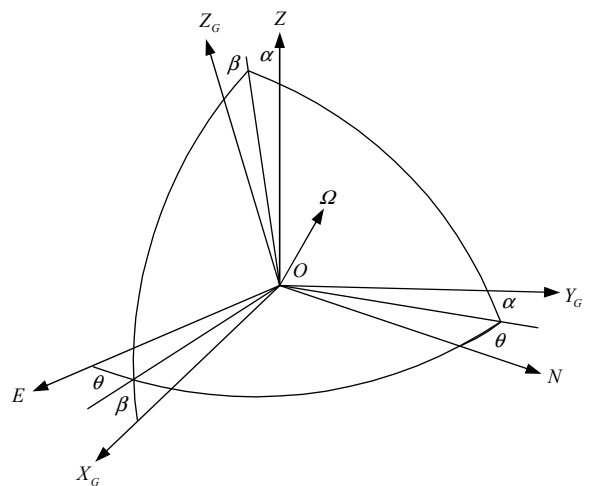


图 2 陀螺坐标系相对地理坐标系的关系

前面的分析是假设陀螺的敏感轴在理想水平面的测量结果, 当台体倾斜时再用式 (5) 的输出信号进行解算就会产生较大的误差, 因而应该进行水平误差的补偿^[4]。台体上安装 2 个输入轴互相垂直的加速度计或倾角传感器, 其中一个与陀螺的敏感轴平行, 另一个与敏感轴垂直, 用于测量陀螺坐标系 $OX_G Y_G Z_G$ 相对水平面的误差角 α 和 β , 如图 2 所示, $OENZ$ 为东北天地理坐标系, 根据坐标变换得到陀螺坐标系与地理坐标系之间的方向余弦矩阵为:

$$C_0^b = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \theta - \sin \beta \sin \alpha \sin \theta & \cos \beta \sin \theta + \sin \beta \sin \alpha \cos \theta & -\sin \beta \cos \alpha \\ -\cos \alpha \sin \theta & \cos \alpha \cos \theta & \sin \alpha \\ \sin \beta \cos \theta + \cos \beta \sin \alpha \sin \theta & \sin \beta \sin \theta - \cos \beta \sin \alpha \cos \theta & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中 α 、 β 和 θ 角逆时针为正, 这样方位角 γ 与 θ 的关系为: $\gamma = 360^\circ - \theta$, 地球自转速度在陀螺坐标系 $OX_G Y_G Z_G$ 上的分量为:

$$\begin{bmatrix} \omega_x^g \\ \omega_y^g \\ \omega_z^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma + \sin \beta \sin \alpha \sin \gamma & -\cos \beta \sin \gamma + \sin \beta \sin \alpha \cos \gamma & -\sin \beta \cos \alpha \\ \cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \\ \sin \beta \cos \gamma - \cos \beta \sin \alpha \sin \gamma & -\sin \beta \sin \gamma - \cos \beta \sin \alpha \cos \gamma & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \Omega \cos \varphi \\ \Omega \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (12)$$

二位置测量时, 陀螺敏感轴沿 OY_G 的正向和反向测量 2 次, 陀螺在位置 1 和位置 2 的输出信号为:

$$\begin{aligned} U_1 &= K_G (\Omega \cos \varphi \cos \alpha \cos \gamma + \Omega \sin \varphi \sin \alpha) + \Delta + \varepsilon(t_1) \\ U_2 &= -K_G (\Omega \cos \varphi \cos \alpha \cos \gamma + \Omega \sin \varphi \sin \alpha) + \Delta + \varepsilon(t_2) \end{aligned} \quad (13)$$

忽略陀螺随机漂移的影响, 寻北解算公式为:

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{U_1 - U_2 - 2K_G \Omega \sin \varphi \sin \alpha}{2K_G \Omega \cos \varphi \cos \alpha} \right) \quad (14)$$

从式 (14) 可以看出, 台体水平误差角 α 对寻北精度有所影响, 需要通过安装在台体的加速度计测量水平误差角进行补偿。

2.4 转位误差的影响

二位置寻北过程中, 由于需从 0° 位置转到 180° 位置进行测量, 如果存在转位误差 $\Delta\theta$, 必然会影响到寻北结果。若转位误差为 $\Delta\theta$, 则在 180° 位置测量输出变为:

$$U'_2 = -K_G \Omega \cos \varphi \cos (\gamma + \Delta\theta) + \Delta + \varepsilon(t_2) \quad (15)$$

方位角解算: $\gamma' = \arccos \frac{U_1 - U'_2}{2K_G \Omega \cos \varphi}$

由于 $\Delta\theta$ 为小量, 上式按泰勒级数展开, 并忽略二次以上项, 得:

$$\gamma' = \gamma + \frac{1}{\sin \gamma} \cdot \frac{K_G \Omega \cos \varphi \sin \gamma}{2K_G \Omega \cos \varphi} \cdot \Delta\theta = \gamma + \frac{\Delta\theta}{2} \quad (16)$$

由转位误差产生的方位误差角为:

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta\theta}{2} \quad (17)$$

由此可见转位误差产生的是常值误差。

2.5 引入的纬度误差的影响

由于二位置寻北需引入纬度参数, 若引入的信息不准确必然会带来寻北误差^[5]。因而有必要分析

纬度误差对寻北精度的影响。当存在纬度误差 $\Delta\varphi$ 时, 其方位角解算变为:

$$\gamma' = \arccos \frac{U_1 - U_2}{2K_G \Omega \cos (\varphi + \Delta\varphi)} \quad (18)$$

同样利用泰勒公式展开, 只保留一次项, 得:

$$\gamma' = \gamma - \frac{1}{\sin \gamma} \left(-\frac{U_1 - U_2}{2K_G \Omega \cos^2 \varphi} \right) \sin \varphi \cdot \Delta\varphi = \gamma + \frac{1}{\sin \gamma} \cdot \cos \gamma \cdot \text{tg} \varphi \cdot \Delta\varphi \quad (19)$$

由纬度误差产生的方位角误差为:

$$\Delta\gamma = \frac{\text{tg} \varphi}{\text{tg} \gamma} \cdot \Delta\varphi \quad (20)$$

3 结束语

通过上面分析可知: 二位置寻北方案可以消除陀螺零偏和陀螺常值漂移的影响, 但需要提供陀螺标度因数和纬度 2 个参数, 陀螺漂移和标度因数误差对寻北精度的影响与方位角的三角函数有关, 与 $\cos \gamma$ (或 $\text{tg} \gamma$) 成反比; 台体的水平误差对寻北结果有所影响, 需通过安装在台体的加速度计测得的误差角进行补偿; 转位误差产生的是常值误差; 引入的纬度误差也同方位角的三角函数有关, 与 $\text{tg} \gamma$ 成反比。

参考文献:

- [1] 姜璐. 陀螺仪在导航中的应用及比较[J]. 船舶工程, 2004, 26(2): 10-13.
- [2] 卜继军. 陀螺寻北仪二位置寻北方案[J]. 中国惯性技术学报, 2002, 10(3): 46-49.
- [3] 姜璐. 基于光纤陀螺的几种寻北方案的比较[C]. 第三届全国水下导航应用技术研讨会优秀论文一等奖, 2010.
- [4] 蒋庆仙, 马小辉, 陈晓壁, 等. 光纤陀螺寻北仪的二位置寻北方案[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(3): 2-5.
- [5] 卜继军, 魏贵玲, 吕志清. 二位置陀螺寻北仪静态误差分析[J]. 压电与声光, 2000, 22(5): 309-312.