

文章编号:1001-5078(2018)05-0615-05

· 光电技术与系统 ·

# 陆用光纤陀螺寻北仪误差特性研究

杨建强<sup>1</sup>, 杨林<sup>2</sup>, 刘斌<sup>3</sup>

(1. 中国人民解放军驻三三〇三厂军事代表室, 湖北 武汉 430200; 2. 陆军武汉军事代表局, 湖北 武汉 432200;  
3. 中国人民解放军71320部队装备部, 河南 开封 475003)

**摘要:**针对陆用武器对高精度寻北定向的要求, 本文以高精度光纤陀螺寻北仪为研究对象, 基于光纤陀螺寻北仪误差模型和光纤陀螺的误差特性, 从理论上对光纤陀螺寻北仪寻北误差进行了分析, 提出寻北仪主要包括系统误差和器件误差两个方面的误差源, 并分别对不同误差源引起的寻北误差进行推导, 得到光纤陀螺寻北仪寻北精度主要受陀螺零偏漂移、安装误差和转台测角精度决定的结论。对光纤陀螺寻北仪各误差源引起的寻北误差进行仿真试验, 试验证明了理论分析的正确性。

**关键词:**定向; 光纤陀螺; 寻北仪; 误差分析

**中图分类号:** V241.5<sup>+</sup>34 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.05.015

## Research on error characteristics of land FOG north – seeker

YANG Jian-qiang<sup>1</sup>, YANG Lin<sup>2</sup>, LIU Bin<sup>3</sup>

(1. Military Representative Office in 3303 factory of PLA, Wuhan 430200, China;  
2. Military Representative Bureau at Wuhan of PLA Land force, Wuhan 432200, China;  
3. Armament Department of 71320 PLA Troops, Kaifeng 475003, China)

**Abstract:** Aiming at the requirement of land weapons for high accuracy north seeking, taking high accuracy FOG north-seeker as the research object, based on error model of FOG north-seeker and error characteristics of FOG, the error of FOG North-seeker is analyzed in theory, and error sources of north-seeker are introduced, which mainly include system error and device error. The north seeking errors caused by different error sources are deduced, the results show that north seeking precision of FOG north-seeker mainly depends on gyro drift, installation error and angle measurement accuracy. The simulation experiment on north seeking error caused by various error sources of FOG north-seeker was carried out. The experimental results prove the validity of the theoretical analysis.

**Key words:** orient; FOG; north-seeker; error analysis

### 1 引言

高精度定向是现代陆用武器打击精度的先决条件, 尤其是陆基远程武器, 定向精度是保证射程内武器杀伤力的重要因素。陀螺寻北仪作为惯性技术应用的重要成果之一, 定向精度高、测量时间短、不受气候条件限制, 可以在不依赖任何外部信

息的情况下全天候、自主地测量方位, 是高精度定向基准系统的首选设备。高精度快速寻北技术不仅是现代战争中确保武器系统快速机动、精确打击的重要保障技术, 在地球物理探测、煤矿开采、大地测量、隧道建设及石油矿井等民用领域中也是必备的技术手段。

光纤陀螺具有重量轻、体积小、全固态以及易于集成等诸多优点,可作为寻北仪理想的惯性器件,随着国内光纤陀螺性能水平的不断提高,光纤陀螺寻北仪具有广阔的发展前景和较高的研究价值,尤其是在中低精度领域,光纤陀螺寻北仪已经得到推广和应用。

光纤陀螺寻北仪主要有二位置、四位置、多位置以及连续旋转等多种寻北方法,不同的方法寻北原理基本相同,本文以简单实用的四位置法对寻北仪原理进行介绍,推导寻北仪误差模型,并分析不同误差源对陀螺寻北精度的影响,最后通过仿真试验对理论分析正确性进行验证<sup>[1-2]</sup>。

## 2 寻北仪原理

### 2.1 坐标系定义

定义寻北仪坐标系( $b$ 系, $O - X_b Y_b Z_b$ ),原点  $O_b$  在寻北仪惯性敏感中心上, $O - X_b$  沿寻北仪纵轴的右侧, $O - Y_b$  沿寻北仪的纵轴方向, $O - Z_b$  由右手规则确定。

定义大地地理坐标系( $n$ 系, $O - X_n Y_n Z_n$ ),原点  $O_n$  在寻北仪惯性敏感中心上, $O - Y_n$  沿子午线向北。 $O - Z_n$  沿引力场垂线向上, $O - X_n$  由右手规则确定,即东北天坐标系。

则地理坐标系  $n$  到寻北仪坐标系  $b$  的变换通过偏航角  $A$ 、俯仰角  $\beta$ 、横滚角  $\alpha$  按照式(1)进行转换:

$$C_n^b = C_y(\alpha)C_x(\beta)C_z(A) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta \\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A & \sin A & 0 \\ -\sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos A - \sin\alpha\sin\beta\sin A & \sin\alpha\sin\beta\cos A + \cos\alpha\sin A & -\sin\alpha\cos\beta \\ -\cos\beta\sin A & \cos\beta\cos A & \sin\beta \\ \sin\alpha\cos A + \cos\alpha\sin\beta\sin A & \sin\alpha\sin A - \cos\alpha\sin\beta\cos A & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix}$$

### 2.2 地球自转角速度和重力加速度

地球自转角速度的投影矢量在地理坐标中可以表示为:

$$\omega_{ie}^n = C_e^n \omega_{ie}^e = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{ie} \cos\phi \\ \omega_{ie} \sin\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\omega_{ie}^b = C_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{ie} \cos\phi \\ \omega_{ie} \sin\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{ie} \cos\phi (\sin\alpha\sin\beta\cos A + \cos\alpha\sin A) + \omega_{ie} \sin\phi (-\sin\alpha\cos\beta) \\ \omega_{ie} \cos\phi \cos\beta\cos A + \omega_{ie} \sin\phi \sin\beta \\ \omega_{ie} \cos\phi (\sin\alpha\sin A - \cos\alpha\sin\beta\cos A) + \omega_{ie} \sin\phi \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

重力加速度矢量在地理坐标中可以表示为:

$$g_{ie}^n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (4)$$

则在寻北仪坐标中,重力加速度的投影为:

$$g_{ie}^b = C_n^b g_{ie}^n = \begin{bmatrix} -g\sin\alpha\cos\beta \\ g\sin\beta \\ g\cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 2.3 四位置寻北原理

如图 1 所示,寻北仪四位置法寻北原理<sup>[3-4]</sup>推导如下:

定义寻北仪陀螺敏感轴与地理北向夹角为  $A$ ,

式中,  $\phi$  表示当地纬度。地球自转角速度的投影矢量在寻北仪坐标系中可以表示为:

则根据式(3)、(5)得到光纤陀螺和加速度计在位置一的输出表达式:

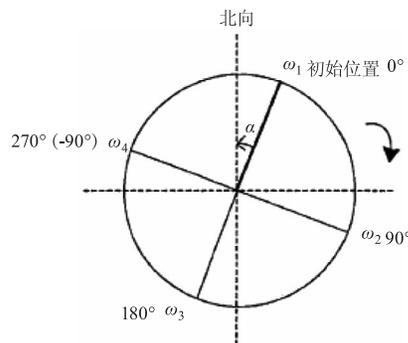


图 1 四位置寻北转动示意图

Fig. 1 The schematic of four positions north seeking rotation

$$G_1 = K(\omega_N \cos\beta \cos A + \omega_\eta \sin\beta) + \varepsilon_1 \quad (6)$$

$$F_1 = Cg \sin\beta + \nabla_1 \quad (7)$$

式中,  $G_1$  为光纤陀螺在寻北位置一时的输出;  $F_1$  为加速度计在寻北位置一的输出;  $K$  为光纤陀螺刻度因子;  $\varepsilon$  为光纤陀螺零偏;  $\omega_N = \omega_{ie} \cos\phi$ ;  $\omega_\eta = \omega_{ie} \sin\phi$ ;  $C$  为加速度计刻度因子;  $g$  为当地重力加速度;  $\nabla$  为加速度计零偏。

寻北仪绕转位机构逆时针转动  $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ , 到达寻北第二、三、四位置, 同理可以得到光纤陀螺和加速度计的输出分别为:

$$G_2 = K(\omega_N(\sin\alpha \sin\beta \cos A - \cos\alpha \sin A) - \omega_\eta \sin\alpha \cos\beta) + \varepsilon_2 \quad (8)$$

$$F_2 = Cg \sin\alpha \cos\beta + \nabla_2 \quad (9)$$

$$G_3 = -K(\omega_N \cos\beta \cos A + \omega_\eta \sin\beta) + \varepsilon_3 \quad (10)$$

$$F_3 = -Cg \sin\beta + \nabla_3 \quad (11)$$

$$G_4 = K(\omega_N(-\sin\alpha \sin\beta \cos A + \cos\alpha \sin A) + \omega_\eta(\sin\alpha \cos\beta)) + \varepsilon_4 \quad (12)$$

$$F_4 = -Cg \sin\alpha \cos\beta + \nabla_4 \quad (13)$$

根据公式(8)~(13)求解得到寻北仪寻北计算公式如下:

$$A = \arcsin\left(\frac{\tan\phi(G \sin\beta - \sin\alpha \cos\beta)}{\sqrt{\cos^2\alpha + (-\sin\alpha \sin\beta - G \cos\beta)^2}}\right) - \arctan \frac{-\sin\alpha \sin\beta - G \cos\beta}{\cos\alpha}$$

$$\beta = \arcsin \frac{C^{-1}(F_1 - F_3 - \nabla_1 + \nabla_3)}{2g}$$

$$\alpha = \arcsin \frac{C^{-1}(F_2 - F_4 - \nabla_2 + \nabla_4)}{2g \cos\beta} \quad (14)$$

式中,  $G = \frac{G_2 - G_4 - \varepsilon_2 - \varepsilon_4}{G_1 - G_3 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}$ 。

### 3 寻北仪误差机理

根据四位置法光纤陀螺寻北仪寻北原理, 从寻北仪惯性器件误差和系统误差两个方面分析寻北仪误差机理<sup>[5-7]</sup>, 其中惯性器件误差包括光纤陀螺测量误差和加速度计测量误差, 寻北仪系统误差包括安装误差、测角误差以及纬度误差。

#### 3.1 器件误差

##### (1) 光纤陀螺测量误差

光纤陀螺测量误差包括陀螺标度因数误差和零偏漂移误差, 由式(15)可知方位角  $A$  的计算公式中不含标度因数  $K$ , 因此当光纤陀螺标度因数误差为常值时, 寻北仪寻北精度不受陀螺标度因数误差的

影响, 因此光纤陀螺测量误差主要是指陀螺零偏漂移误差。

由式(8)~(13)可以得到:

$$\cos\alpha \sin A - (\sin\alpha \sin\beta + G \cos\beta) \cos\alpha = \tan\phi(G \sin\beta - \sin\alpha \sin\beta) \quad (15)$$

将方位角  $A$  看作是  $G$  的函数, 对式(15)进行求导得到:

$$dA = \frac{\tan\phi \sin\beta + \cos\beta \cos\alpha}{\cos\alpha \cos A + G \cos\beta \sin A + \sin\alpha \sin\beta \sin A} dG \quad (16)$$

令  $dG = dG' \varepsilon$ ,  $\varepsilon$  表示光纤陀螺零偏漂移变化率, 则式(16)表明, 光纤陀螺零偏漂移对寻北精度的影响与工作时平台倾斜角、当地地理纬度以及寻北方位角有关。假定寻北仪俯仰角  $\beta$ 、横滚角  $\alpha$  均为  $0^\circ$ , 纬度  $\phi = 45^\circ$ , 则光纤陀螺零偏漂移变化率  $\varepsilon = 0.01^\circ/h$  引起的寻北误差最大约为  $0.027^\circ$ 。光纤陀螺零偏漂移受光纤陀螺启动性能、温度性能以及电、磁场的影响较大, 在快速寻北的情况下, 陀螺漂移是影响寻北精度的主要因素。

##### (2) 加速度计测量误差

由式(4)可以看出, 加速度计零偏漂移主要影响寻北仪俯仰角  $\beta$ 、横滚角  $\alpha$  的计算, 式(4)分别对  $\alpha$ 、 $\beta$  求导得到:

$$dA = \frac{G \tan\phi \cos\beta - G \sin\beta \cos A}{\cos A + G \cos\beta \sin A} d\beta \quad (17)$$

$$dA = \frac{-\tan\phi \cos\alpha + \sin\alpha \sin A}{\cos\alpha \cos A + G \sin A} d\alpha \quad (18)$$

式(13)表明, 寻北仪倾斜计算误差与寻北仪倾斜角大小、当地地理纬度以及寻北方位角有关, 由式(14)可以计算加速度计零偏漂移  $\nabla = 100 \mu\text{g}$  引起的倾角计算误差约为  $0.0057^\circ$ , 假定寻北仪真实俯仰角  $\beta$ 、横滚角  $\alpha$  均为  $0^\circ$ , 纬度  $\phi = 45^\circ$ , 则加速度计零偏引起的寻北误差最大约为  $0.0057^\circ$ , 即在这种情况下, 寻北误差最大时等于倾斜角测量误差。加速度计零偏漂移主要受温度的影响, 寻北时间较短的情况下, 温度变化较小, 寻北过程中加速度计零偏漂移一般小于  $100 \mu\text{g}$ , 经过温度补偿后的加速度计会进一步提高测量精度。

#### 3.2 系统误差

##### (1) 安装误差

由寻北仪机械加工或装调使光纤陀螺与转动平台之间会产生安装误差, 安装误差较小时, 考虑安装

误差后的寻北仪系  $b'$  系可以经过如下坐标转换矩阵得到:

$$C_b^{b'} = \begin{bmatrix} 1 & \phi_z & -\phi_y \\ -\phi_z & 1 & \phi_x \\ \phi_y & -\phi_x & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

式(19)中,  $\phi_x$ 、 $\phi_y$ 、 $\phi_z$  分别表示安装误差角。将式(19)分别代入式(3)、(5)可以得到  $b'$  系下的地球自转角速度和重力加速度矢量投影, 同样按照式(6)~(13)推导方位角计算公式并对方位角进行求导, 可以得到:

$$dA = \frac{G \tan \phi \sin \alpha \cos \beta + \tan \phi \sin \beta + \cos \beta \cos A - G \sin \alpha \sin \beta \cos A + G \cos \alpha \sin A}{\cos \alpha \cos A + G \cos \beta \sin A + \sin \alpha \sin \beta \sin A} \phi_z \quad (20)$$

当  $\beta$ 、 $\alpha$  较小时, 可作如下近似:

$$\cos \alpha \approx 1, \cos \beta \approx 1, \sin \alpha \approx \alpha, \sin \beta \approx \beta, \sin \alpha \sin \beta \approx 0$$

则式(20)近似为:

$$dA \approx \frac{\cos A + G \sin A}{\cos A + G \sin A} \phi_z \quad (21)$$

式(21)表明, 在寻北仪倾斜较小的情况下, 由安装误差角引起的寻北误差约为 1 倍的关系。

#### (2) 转台测角误差

寻北仪系统测角误差会造成寻北仪四位置寻北过程中没有严格按照  $90^\circ$  间隔进行转位, 假设测角误差为  $d\theta$ , 则每次转动, 寻北仪坐标系的姿态转换矩阵可以表示为:

$$C_b^{b_i} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i + d\theta) & -\sin(\theta_i + d\theta) & 0 \\ \sin(\theta_i + d\theta) & \cos(\theta_i + d\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

式(22)中,  $\theta_i$  表示寻北仪每次转动的角度:  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$ , 根据将式(6)~(13)进行改写, 并对方位角进行求导:

$$dA = \frac{-G \tan \phi \sin \alpha \cos \beta - \tan \phi \sin \beta - \cos \beta \cos A + G \sin \alpha \sin \beta \cos A - G \cos \alpha \sin A}{\cos \alpha \cos A + G \cos \beta \sin A + \sin \alpha \sin \beta \sin A} d\theta \quad (23)$$

当  $\beta$ 、 $\alpha$  较小时, 则式(23)近似为:

$$dA \approx \frac{-\cos A - G \sin A}{\cos A + G \sin A} d\theta \quad (24)$$

式(24)表明, 测角误差与安装误差的影响类似, 在寻北仪倾斜较小的情况下, 由测角误差引起的

寻北误差约为 1 倍的关系。

#### (3) 初始纬度误差

式(14)方位角计算包含纬度  $\phi$ , 将式(15)对纬度进行求导可得:

$$dA = \frac{(G \sin \beta - \sin \alpha \cos \beta) \sec^2 \phi}{\cos \alpha \cos A + \sin \alpha \sin \beta \sin A + G \cos \beta \sin A} d\phi \quad (25)$$

当  $\beta$ 、 $\alpha$  较小时, 式(25)表明四位置寻北受纬度误差的影响基本可以忽略, 当寻北倾斜角较大时, 纬度误差对寻北精度影响会随纬度增加而增加。

## 4 寻北误差仿真

### 4.1 仿真条件

根据第 3 节的分析, 选取陀螺零偏漂移、加速度计零偏漂移、安装角误差和转台测角误差作为主要误差源进行仿真, 仿真条件如下:

- (1) 陀螺零偏漂移:  $0.01^\circ/\text{h}$ ;
- (2) 加速度计零偏漂移:  $100 \mu\text{g}$ ;
- (3) 光纤陀螺与转台平面安装误差角:  $30''$ ;
- (4) 转台测角误差:  $10''$ ;
- (5) 寻北仪倾斜角度为  $1^\circ$ 。

### 4.2 仿真结果

仿真在不同纬度情况下, 得到方位角为  $0^\circ \sim 360^\circ$  寻北误差结果, 如图 2 所示。

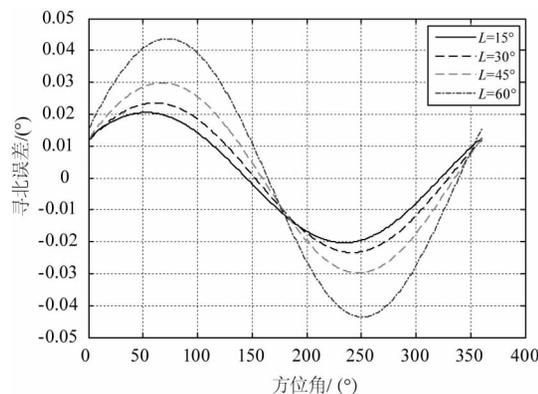


图 2 寻北误差曲线

Fig. 2 The curve of north seeking error

图 1 表明, 在 4.1 节设定的仿真条件下, 寻北误差最大可以达到  $0.045^\circ$ , 且寻北误差会随着纬度的增加而变大, 仿真结果符合第 3 节不同误差源引起的寻北误差的理论分析结论。

## 5 结论

本文以陆用高精度光纤陀螺寻北仪为研究对象, 以四位置寻北方法为例, 详细分析了光纤陀螺寻北仪

误差机理,分析结论表明陀螺零偏误差、安装误差和测角误差是光纤陀螺寻北仪的主要误差源,仿真结果验证了理论分析的正确性。本文的分析结论为光纤陀螺寻北仪的设计提供理论基础,在高精度应用场合,可以通过选用性能较好的光纤陀螺、对安装误差进行标定、提高测角精度等措施,有效提高光纤陀螺寻北仪精度。

#### 参考文献:

- [1] JIANG Qingxian, CHEN Xiaobi, MA Xiaohui, et al. North seeker using single axis FOG[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, 18(2): 165 - 169. (in Chinese)  
蒋庆仙, 陈晓壁, 马小辉, 等. 单轴光纤陀螺寻北仪[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(2): 165 - 169.
- [2] GAO Maolin, ZHAO Zhong, ZHANG Jun. Two-position gyro-based north seeker and error analysis of position transformation [J]. Computer Measurement & Control, 2006, 14(1): 70 - 71. (in Chinese)  
高茂林, 赵忠, 张钧. 二位置陀螺寻北仪及转位误差分析[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(1): 70 - 71.
- [3] LIU Y B, GAO L M, ZHAO T Y. The generally error analysis of FOG north-seeker [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(Suppl. 2): 570 - 573. (in Chinese)  
刘宇波, 高立民, 赵天宇. 光纤陀螺寻北仪误差系统分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(增刊2): 570 - 573.
- [4] R B Dyott, D E Allen. A Fiber Optic Gyroscope North Finder[J]. SPIE, 1994, 2360: 442 - 448.
- [5] ZHANG Yan, CAO Juliang, WU Wenqi, et al. The analysis of turntable error and arithmetic design for north-finder based on rate biased RLG [J]. Advanced Materials Research, 2011, 383 - 390.
- [6] WANG Lidong, WANG Xiaoxiao, ZHANG Chunxi. The multi-position north-seeking error analysis of FOG north-seeker [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2007, 29(1): 42 - 44. (in Chinese)  
王立冬, 王夏宵, 张春熹. 光纤陀螺寻北仪多位置寻北误差分析[J]. 压电与声光, 2007, 29(1): 42 - 44.
- [7] GUO Xiqing, HUANG Lei, LIU Wei. High precision north determining scheme based on FOG bias stability [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2009, 17(6): 268 - 260. (in Chinese)  
郭喜庆, 黄蕾, 刘伟. 基于 FOG 零偏稳定性的高精度寻北方案 [J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(6): 268 - 260.