

# 一种便携式倾斜基座光纤陀螺寻北仪设计

孟士超<sup>1</sup>, 赵汪洋<sup>2</sup>, 宋高玲<sup>2</sup>, 王远明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>海装沈阳局驻葫芦岛地区军事代表室, 辽宁 葫芦岛

<sup>2</sup>天津航海仪器研究所, 天津

Email: zhaowangyang@163.com

收稿日期: 2020年8月24日; 录用日期: 2020年9月15日; 发布日期: 2020年9月22日

## 摘要

单轴旋转光纤陀螺寻北仪是一种基于捷联式惯性工作原理的快速、高精度、自主式定向装置。利用光纤陀螺测量平面内不同方向地球自转角速率在载体坐标系水平方向上的分量, 通过解算得出参考方向与真北方向的夹角。在建立光纤陀螺寻北仪误差模型和光纤陀螺误差模型的基础上, 设计了适用于倾斜条件下的便携式光纤陀螺寻北仪, 分析了双位置、四位置寻北模式差异, 完成了倾斜基座寻北补偿。本文讨论了便携式寻北仪的整体结构布局方式以及线路总体设计及其实现功能, 利用F120H-M闭环光纤陀螺进行了半实物仿真验证及主要元件指标分析。

## 关键词

便携式, 光纤陀螺, 多位置寻北

# A Portable Tilted Base FOG North-Seeker Design

Shichao Meng<sup>1</sup>, Wangyang Zhao<sup>2</sup>, Gaoling Song<sup>2</sup>, Yuanming Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Navy Force Representative Office in Huludao Area, Huludao Liaoning

<sup>2</sup>Tianjin Navigation Instrument Research Institute, Tianjin

Email: zhaowangyang@163.com

Received: Aug. 24<sup>th</sup>, 2020; accepted: Sep. 15<sup>th</sup>, 2020; published: Sep. 22<sup>nd</sup>, 2020

## Abstract

The single-axis rotary fiber gyroscope is a fast, high-precision, autonomous directional device based on the principle of strapdown inertial operation. Using the fiber-optic gyro to measure the components of the earth's rotation rate in different directions in the carrier coordinate system horizontally, the angle between the reference direction and the true north direction is calculated

by solving the calculation. Based on the establishment of the fiber-optic gyroscope error model and the fiber gyroscope error model, the portable fiber-optic gyro-finding north instrument suitable for tilting conditions is designed, the difference of dual-position and four-position north-finding mode is analyzed, and the compensation of tilt base north is completed. This paper discusses the overall structure layout of the portable north finder and the overall design of the line and its implementation function, and uses the F120H-M closed-loop fiber gyro to verify the semi-physical simulation and analyze the main component index.

## Keywords

Portable, FOG, Multi-Position North-Seeking

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着中高精度光学陀螺仪技术趋于成熟,以快速寻北为关键技术,利用单个光纤陀螺仪实现中高精度寻北功能,满足低成本小型化的军用市场需求。本文根据中精度光纤陀螺仪的实际精度指标,智能化寻北仪操作流程,提高寻北仪在战场环境可靠性和适应性,设计一款“用的上、用的起、用的好”的便携式静态寻北系统。同时在设计上预留经纬仪接口和波罗棱镜接口,方便进行功能扩展。

## 2. 工作原理及流程设计

### 2.1. 工作原理

单轴旋转光纤陀螺寻北仪利用光纤陀螺测量平面内不同方向地球自转角速率在载体坐标系水平方向上的分量,通过解算得出参考方向与真北方向的夹角。理论上来说,光纤陀螺在单个位置的输出就可以得到寻北结果,但是单位置的结果与陀螺自身的零偏、零偏稳定性、标度因数、随机噪声等参数有直接关系,而参数无法测得确定的结果,因此使用单位置寻北的精度很低[1]。为了尽量避开光纤陀螺自身参数的影响,提高寻北精度,本文采用多位置寻北方案,其工作原理是将光纤陀螺仪转动固定角度,通过多位置测量消除光纤陀螺的常值漂移和水平姿态传感器偏值的影响,利用光纤陀螺测量地球自转角速率的水平分量来获得地球表面被测点的北向信息,利用水平姿态传感器测量固定陀螺的基座的倾斜角度,对光纤陀螺的输出数据进行补偿。得到载体的纵轴与真北方向的夹角[2]。

### 2.2. 工作流程设计

寻北仪设备上电启动后,首先进行故障检测及初始化,当检测到系统各单元正常后,进入寻北准备状态,等待装入初始位置信息,以进行解算参数初始化。接收到寻北命令后,装订初始位置,系统进入粗寻北阶段,根据当前位置进行一个粗定向,判断航向是否在 $\pm 10^\circ$ 或 $180^\circ \pm 10^\circ$ 范围内,如果粗定向结果在此范围内,则控制电机旋转 $45^\circ$ ,并以此作为第一个位置。当粗定向结果显示航向不在此范围内,则以当前位置作为第一个位置,采集解算板在第一个位置进行陀螺、水平姿态传感器数据采样和预处理,60秒数据采样结束后存储第一个位置的陀螺、水平姿态传感器的处理结果以及当前旋转机构的旋转角度位置;第一个位置采样结束以后,给出驱动信号,驱动电机带动旋转组件转动到第二个位置(第一个位置 $+180^\circ$ ),60秒以后存储数据采样的最终结果和转角数据。第二个位置的采样结束后,采集解算板接收到

采样完成的信号后, 进行寻北计算并将计算结果送到显示面板或通过通讯口发送给外设设备。系统工作顺序示意图如图 1 所示。

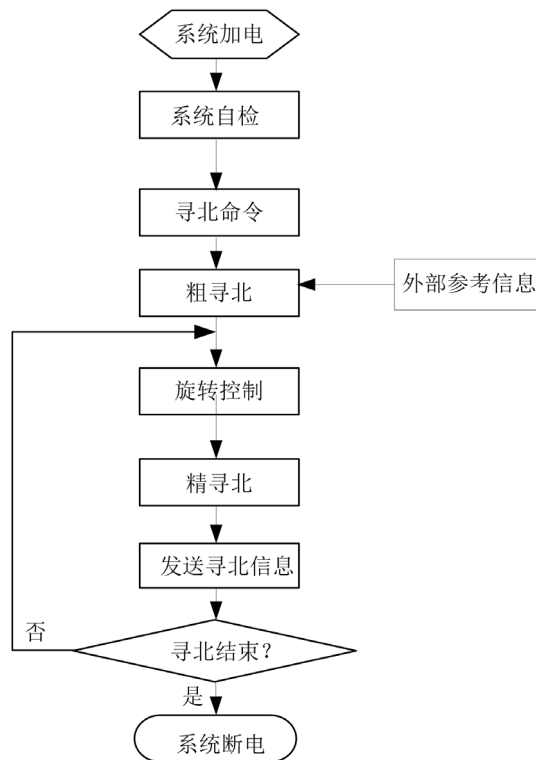


Figure 1. System workflow  
图 1. 系统工作流程

### 2.3. 两位置寻北设计

当系统处于调平状态时, 光纤陀螺在初始测量的位置时的输出值为  $\omega_1$ ; 利用伺服电机驱动, 使光纤陀螺的敏感轴逆时针转  $180^\circ$  到达反向位置, 此时陀螺的输出记为  $\omega_2$ 。

陀螺的两个位置的输出为:

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega_e \cos \phi \cos k + \varepsilon_{11} \\ \omega_2 = \omega_e \cos \phi \cos(k + 180^\circ) + \varepsilon_{12} = -\omega_e \cos \phi \cos k + \varepsilon_{12} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_{11}$ 、 $\varepsilon_{12}$  为陀螺输出的漂移;

寻北时需要提取的有用信号为低频直流分量  $\omega_e \cos \phi \cos k + \varepsilon_d$ , 去除了低频周期干扰和噪声的影响后, 由式(1)解算出方位角

$$k = \arccos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2\omega_e \cos \phi}\right) \quad (2)$$

通过式(2)处理中消除了陀螺零偏, 极大地降低了对陀螺精度的要求; 此时陀螺转过的角度就是敏感轴的初始方向与真北的夹角。

### 2.4. 四位置寻北设计

若选用四位置寻北, 则不需要进行粗寻北, 单位位置停留 60 秒采集数据完成后由采集解算板进行寻北

计算并将计算结果发送到显示面板或上位机等外设。当寻北仪在调平状态下，利用四位置寻北可以忽略当地纬度的输入[3]。

假设在调平状态下，方位角为  $k$ 。在间隔  $90^\circ$  的四个位置上分别采样陀螺仪信号，得到  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ 、 $\omega_4$ 。采集到的陀螺数据信号如式(3)所示：

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega_N \cos k + E_0 + \varepsilon_1 \\ \omega_2 = -\omega_N \cos k + E_0 + \varepsilon_2 \\ \omega_3 = -\omega_N \cos k + E_0 + \varepsilon_3 \\ \omega_4 = \omega_N \cos k + E_0 + \varepsilon_4 \end{cases} \quad (3)$$

式中：

$E_0$  为陀螺常值漂移误差； $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$  和  $\varepsilon_4$  分别为采样时刻的陀螺时漂。因寻北时间较短，故可近似认为四个位置上的陀螺时间零偏大小相等。

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 \quad (4)$$

则

$$\frac{\omega_1 - \omega_3}{2} = \frac{2\omega_N \cos \theta}{2} = \omega_N \cos \theta \quad (5)$$

$$\frac{\omega_4 - \omega_2}{2} = \frac{2\omega_N \sin \theta}{2} = \omega_N \sin \theta \quad (6)$$

综合(5)和(6)得：

$$\frac{\omega_N \cos \theta}{\omega_N \sin \theta} = \tan \theta \quad (7)$$

因此，航向

$$k = a \tan \left( \frac{\omega_4 - \omega_2}{\omega_1 - \omega_3} \right) \quad (8)$$

四位置寻北的优点在于不仅消除了陀螺漂移的常值误差，在调平状态下无需输入当地纬度  $\varphi$ 。

### 3. 基座倾斜对寻北的影响

如果安装陀螺的基座平面与水平面存在较大倾角，则寻北精度会受到较大的影响下面分析当基座平面不水平时，倾角对方位角测量产生的影响。为了达到快速、精确调平的目的，在系统中增加敏感元件加速度计或倾角传感器来检测转台平面相对于水平面的倾斜角。通过运算实现基座的解析调平，对寻北结果进行补偿，以保证寻北精度[4]。

考虑载体运动时转动顺序为偏航  $K \rightarrow$  纵摇  $\theta \rightarrow$  横摇  $\psi$ ，则可得地理坐标系至载体坐标系的转换矩阵为：

$$C_n^b = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos K + \sin \psi \sin \theta \sin K & -\cos \psi \sin K + \sin \psi \sin \theta \cos K & -\sin \psi \cos \theta \\ \cos \theta \sin K & \cos \theta \cos K & \sin \theta \\ \sin \psi \cos K - \cos \psi \sin \theta \sin K & -\sin \psi \sin K - \cos \psi \sin \theta \cos K & \cos \psi \cos \theta \end{pmatrix} \quad (9)$$

在静态寻北方案下，每次转动的角度为  $\eta_i$ ，则载体坐标系到陀螺坐标系的转换矩阵为：

$$C_b^g = \begin{bmatrix} \cos \eta_i & -\sin \eta_i & 0 \\ \sin \eta_i & \cos \eta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

已知地球自转角速率  $\omega_e$  在地理坐标系的分量为  $[0 \ \omega_N \ \omega_U]$ ，则在陀螺坐标系各轴上的分量为：

$$\bar{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = C_b^g \cdot C_n^b \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_N \\ \omega_U \end{bmatrix} \quad (11)$$

因此光纤陀螺在敏感轴 OY 方向输出为：

$$\begin{aligned} \omega_y = & [\omega_N (\sin k \sin \theta \cos \psi - \cos k \sin \psi) - \omega_U \sin k \cos \theta] \sin \eta_i \\ & + (\omega_N \cos \theta \cos \psi + \omega_U \sin \theta) \cos \eta_i + \omega_0 + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (12)$$

基座平面绕垂直于陀螺轴的倾角对方位角测量的影响

当基座平面倾斜角度与陀螺敏感轴一致时，即陀螺敏感轴相对水平面抬高(或降低)  $\theta$  角时，在式(9)中令横摇  $\psi = 0$ ，则陀螺的输出变为：

$$\omega = \omega_e \cos \phi \sin k \cos \theta - \omega_e \sin \phi \sin \theta + \varepsilon_i \quad (13)$$

因此在两个相差  $180^\circ$  的转位上：

$$\begin{cases} \omega_{1y} = \omega_e \cos \phi \sin k \cos \theta - \omega_e \sin \phi \sin \theta + \varepsilon_{i1} \\ \omega_{2y} = -\omega_e \cos \phi \sin k \cos \theta + \omega_e \sin \phi \sin \theta + \varepsilon_{i2} \end{cases} \quad (14)$$

如果不考虑其它干扰，则式(14)可得：

$$k = \arcsin \left( \frac{\omega_{1y} - \omega_{2y} + 2\omega_e \sin \phi \sin \theta}{2\omega_e \cos \phi \cos \theta} \right) \quad (15)$$

俯仰角对方位角的影响函数为：

$$F(k, \theta) = \arcsin \left( \frac{\omega_{1y} - \omega_{2y} + 2\omega_e \sin \phi \sin \theta}{2\omega_e \cos \phi \cos \theta} \right) - \arcsin \left( \frac{\omega_{1y} - \omega_{2y}}{2\omega_e \cos \phi} \right) \quad (16)$$

因此，基座平面绕垂直于陀螺轴的倾角将直接引起一个同样量级的方位角测量误差，从而在较大程度上影响寻北精度[5]。

当基座平面倾斜角度与陀螺敏感轴垂直时，此时陀螺的输出等同于基座平面水平时陀螺的输出情况，对方位角测量没有影响。只有当基座平面误差角与陀螺敏感轴一致时，误差角才能对陀螺的输出产生影响。

## 4. 总体设计

### 4.1. 基本结构

该光纤陀螺寻北仪总体设计如图 2 所示，整体结构如图 3 所示。其内部各元件工作所需电源如图 4 所示。内部供电分成两个部分，即旋转部分供电和非旋转部分供电。非旋转部分供电固连在机箱内部，负责非旋转元件即解算控制板、旋转编码器、电机、和电子罗盘的供电。旋转部分供电安装在转台上，负责光纤陀螺仪供电[6] [7]。

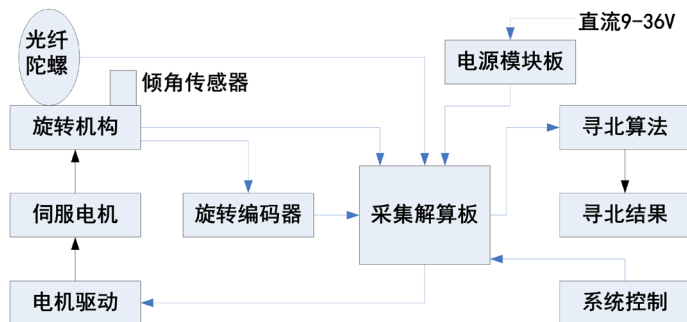


Figure 2. General design of FOG north finder  
图 2. 光纤陀螺寻北仪总体设计示意图

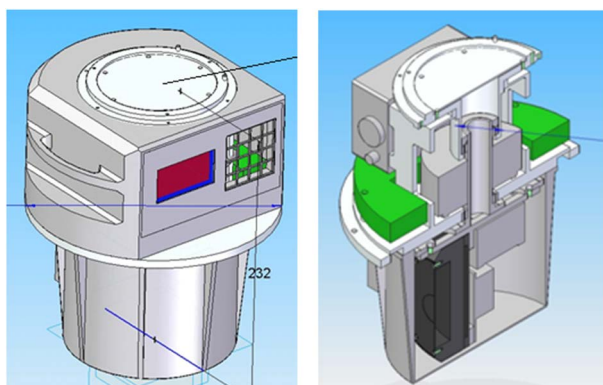


Figure 3. Overall structure diagram  
图 3. 整体结构示意图

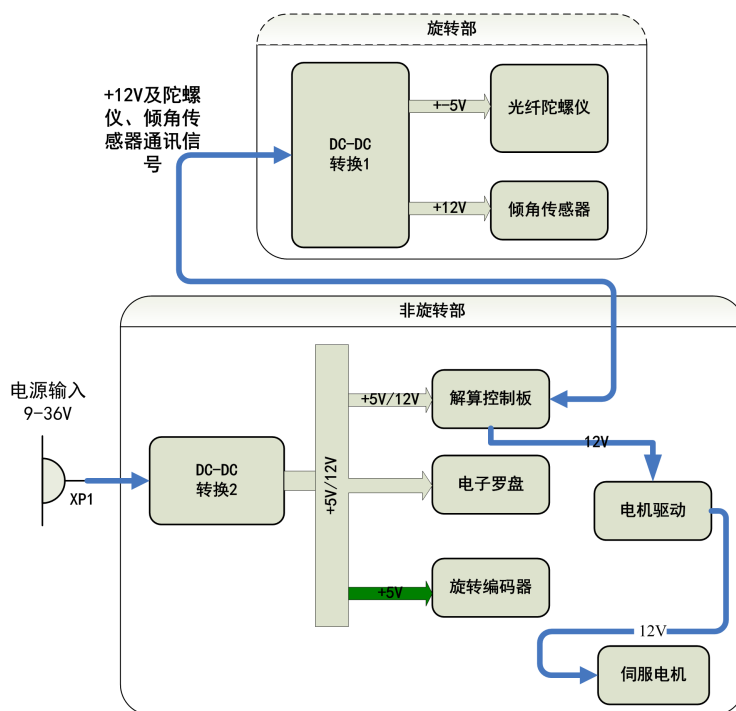


Figure 4. Internal power supply diagram  
图 4. 内部供电关系示意图

## 4.2. 线路设计

系统线路设计如图 5 所示，寻北仪的主体由旋转机构、电子单元、设备壳体组成，其中电子单元包括电源转换、解算控制板组成。解算控制板采集光纤陀螺、倾角传感器、旋转编码器信号，DSP 完成数据解算并输出给定参考角度，闭环系统依据参考给定和电机角度反馈输出控制率并驱动电机旋转[8]，实现自主寻北。

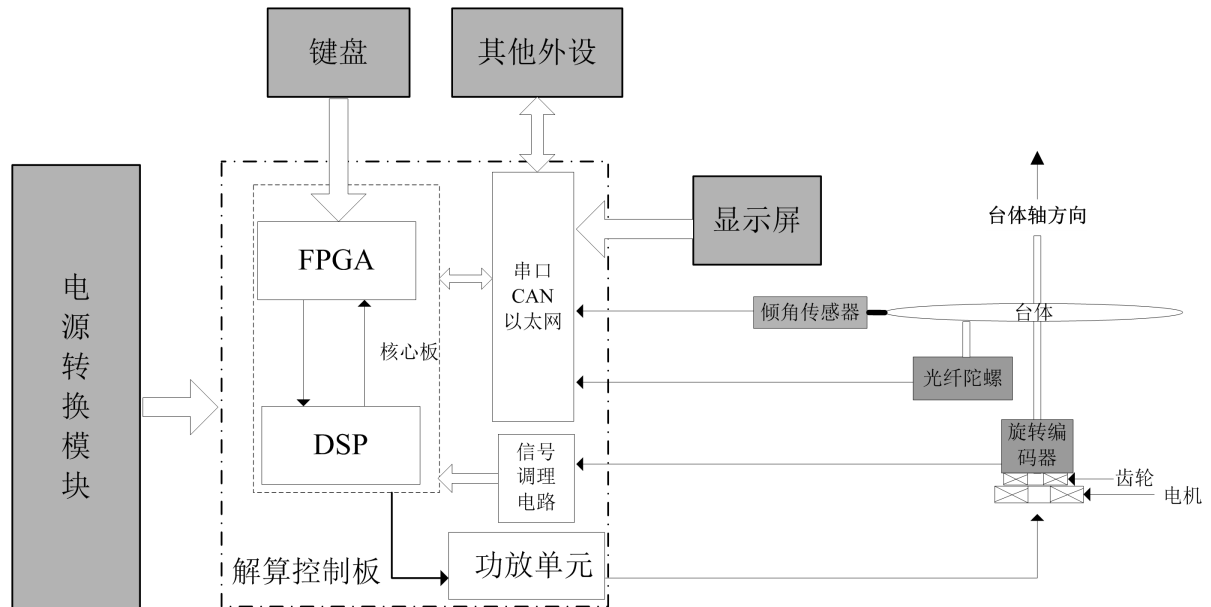


Figure 5. Overall system circuit  
图 5. 系统总体线路

线路系统设计包括电源转换板和控制解算板，其中电源转换板为控制解算板、各种传感器(如旋转编码器、陀螺仪、倾角传感器等)、电机等提供电能；控制解算板完成数据采集、算法解算、电机控制解算和对外通讯等功能。

解算控制板完成数据采集、算法解算、电机控制解算、和对外通讯等功能。采集解算板实现如下功能：

- 1) 数据采集：通过串口采集陀螺仪、倾角传感器
- 2) 角度解码：对角度传感器输出的正余弦信号进行解码和细分；
- 3) 寻北算法：依据寻北方案对采集的数据信息进行寻北解算；
- 4) 电机控制：根据采集到的角度传感器信息，依据位置控制算法进行解算，驱动功率电路进行电机位置控制；
- 5) 与外部设备通讯。

解算控制板设计采用模块化思想，其原理框图如图 6 所示。主要模块及功能描述如下：

核心板：已经固化好的 DSP+FPGA 最小系统，主要完成算法解算(DSP)和接口扩展(FPGA)。

电源接口模块：完成板上电压转换，为其他模块供电。

信号调理电路模块：对旋转编码器输出的模拟信号做滤波、放大、整形等处理，从而获得更高精度和分辨率的角度信息。

功放模块：功率放大，驱动直流电机运动。

串口模块：接收陀螺仪、倾角传感器、电子罗盘设备内部传感器信号，同时用于接收 GPS、经纬仪等外部设备数据。

其他接口模块：预留 CAN、以太网等模块，做后续功能拓展。

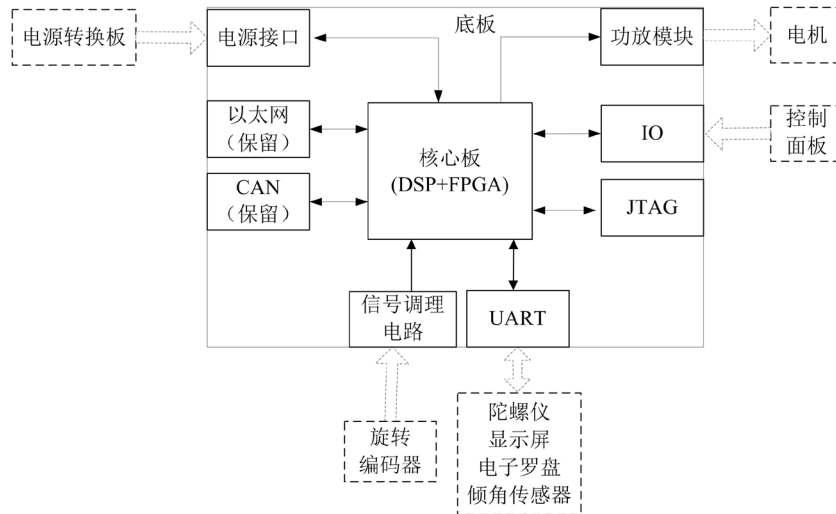


Figure 6. Schematic diagram of control solution board  
图 6. 控制解算板原理框图

### 4.3. 仿真测试

利用 F120H-M 闭环光纤陀螺进行了半实物仿真试验，将设备置于双轴转台上，利用转台设置其纵摇、横摇；利用夹具调整寻北仪的设备方向，实现航向变化，用以验证在不同位置下的寻北精度为主要元件后续指标提供参考。倾斜状态光纤系统的试验数据如表 1~3 所示。

Table 1. Results of north seeking at 0° and 180°  
表 1. 在 0°和 180°时的寻北结果

转台横摇	转台纵摇	转台航向	X向陀螺灵敏度 (°/h)	Y向陀螺灵敏度 (°/h)	Z向陀螺灵敏度 (°/h)	时间	设备刻度指向	寻北误差
-3°	4°	0	0.4515	12.2793	8.6478	1 min	0	1.6'(1 min)
-3°	4°	0	0.4481	12.2871	8.6476	2 min	0	
-3°	4°	0	-0.4497	-12.2910	8.6570	1 min	179.9842	23"(2 min)
-3°	4°	0	-0.4518	-12.2917	8.6578	2 min	179.9842	

Table 2. Results of north seeking at 45° and 225°  
表 2. 在 45°和 225°时的寻北结果

转台横摇	转台纵摇	转台航向	X向陀螺灵敏度 (°/h)	Y向陀螺灵敏度 (°/h)	Z向陀螺灵敏度 (°/h)	时间	设备刻度指向	寻北误差
-3°	4°	2.3'	9.0055	8.3670	8.65738	1 min	44.9913	1.8'(1 min)
-3°	4°	2.3'	9.0081	8.3649	8.6554	2 min	44.9913	
-3°	4°	2.3'	-9.0170	-8.3736	8.6561	1 min	224.9853	38"(2 min)
-3°	4°	2.3'	-9.0164	-8.3694	8.6542	2 min	224.9853	



**Table 3.** Results of north seeking at 90° and 270°  
**表 3.** 在 90° 和 270° 时的寻北结果

转台 横摇	转台 纵摇	转台 航向	X向陀螺敏感量 (°/h)	Y向陀螺敏感量 (°/h)	Z向陀螺敏感量 (°/h)	时间	设备刻度 指向	寻北误差
-3°	4°	1.6'	12.2859	-0.4694	8.6659	1 min	89.9862	2.1"(1 min)
-3°	4°	1.6'	12.2839	-0.4621	8.6639	2 min	89.9862	
-3°	4°	1.6'	-12.2935	0.4526	8.6421	1 min	270.9903	2.0"(2 min)
-3°	4°	1.6'	-12.2985	0.4567	8.6435	2 min	270.9903	

从仿真测试看，基座倾斜对寻北结果并无明显影响，说明倾斜条件寻北补偿效果明显；从多位置寻北停留的时间看，2 分钟的停留时间寻北精度明显优于 1 分钟，表明 2 分钟的光纤陀螺噪声处理时间要好于 1 分钟的情况；从陀螺寻北时初始航向看，在 90° 和 270° (即东西向时) 寻北效果不佳，因此在静态寻北时初始时刻应当避免东西方向寻北。

## 5. 结论

本文设计了一种便携式倾斜应用下的光纤陀螺寻北仪，介绍了基于多位置转位的寻北方案、系统总体设计、线路控制设计，重点分析倾斜条件下寻北精度的影响。在半实物仿真中采用 F120H-M 光纤陀螺进行系统测试，通过不同倾斜角度、不同寻北时间考核了寻北仪的寻北精度，结果表明其倾斜角度的补偿能够满足系统寻北精度，影响系统寻北精度的主要误差是短时(1 min)的光纤陀螺的随机漂移和输出噪声，后续的设计改进将重点考虑有效抑制光纤陀螺随机漂移和输出噪声的方法。

## 参考文献

- [1] 姜璐, 于运治, 姜庆国. 二位置光纤陀螺寻北方案及误差分析[J]. 兵工自动化, 2012, 31(3): 55-57.
- [2] 李绪友, 王爽, 张琛. 光纤陀螺寻北仪四位置寻北算法的改进[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6 增刊): 759-763.
- [3] Ly-Gagnon, D., Tsukamoto, S., Katoh, K., *et al.* (2006) Coherent Detection of Optical Quadrature Phase-Shift Keying Signals with Carrier Phase Estimation. *IEEE Journal Lightwave Technology*, **24**, 12-21.  
<https://doi.org/10.1109/JLT.2005.860477>
- [4] 王彬, 翁海娜, 刘畅, 等. 正交检测技术在光纤陀螺寻北仪中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(2): 164-168.
- [5] 郝燕玲, 张义, 孙枫, 等. 单轴旋转式捷联惯导方位对准研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 309-315.
- [6] 徐海刚, 郭宗本. 一种实用旋转调制式陀螺寻北仪的设计[J]. 兵工学报, 2010, 31(5): 616-619.
- [7] 任磊, 宋凝芳, 董全林. 光纤陀螺寻北仪数据采集单元的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2008, 31(5): 120-122, 147.
- [8] 李娟, 孙立宁, 刘延杰. 高速高精度定位机构的优化设计[J]. 压电与声光, 2008, 30(2): 242-245.