

doi: 10.7690/bgzd.2024.12.004

## 三位置光纤陀螺寻北仪关键结构与实验

段廷亿, 邓云, 陈国弘, 周强, 刘平

(重庆天箭惯性科技股份有限公司, 重庆 401120)

**摘要:** 针对二位置、四位置光纤陀螺寻北仪齿轮啮合时配合间隙而无法实现高精度方位测量的问题, 设计新的 V 型槽定位方式, 并介绍关键结构的设计方案: 转位结构体组件、限位驱动组件、转位驱动组件, 推导光纤陀螺寻北仪在水平和倾角状态下的方位角解算公式; 为确定所设计光纤陀螺寻北仪的抗振动性能, 进行仿真分析。仿真结果表明: 安全系数和最大变形量均满足工程要求; 通过实验测得了寻北仪横滚角、俯仰角和方位角测试精度以及横滚角、俯仰角和方位角重复性精度。

**关键词:** 光纤陀螺寻北仪; 结构设计; 抗振动性能; 实验

**中图分类号:** U666.132 **文献标志码:** A

## Key Structure Design and Experiment of Three-position Fiber Optic Gyroscope North Finder

Duan Tingyi, Deng Yun, Chen Guohong, Zhou Qiang, Liu Ping

(Chongqing Tianjian Inertial Technology Company Limited, Chongqing 401120, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that high precision azimuth measurement can not be realized due to the fit clearance when the gears of two-position and four-position fiber optic gyroscope (fog) north finders are engaged, a new V-shaped groove positioning mode is designed, and the design scheme of the key structures is introduced, including the transposition structure assembly, the limit drive assembly and the transposition drive assembly, and the azimuth calculation formula of the fog north finder in the state of level and inclination is derived; In order to determine the anti-vibration performance of the designed fiber optic gyroscope north finder, the simulation analysis is carried out. The simulation results show that the safety factor and the maximum deformation meet the engineering requirements. The test accuracy of roll angle, pitch angle and azimuth angle and the repeatability accuracy of roll angle, pitch angle and azimuth angle of the north finder are measured by experiments.

**Keywords:** FOG north finder; structure design; anti-vibration performance; experiment

### 0 引言

寻北仪作为惯性技术领域的一个重要分支, 能够在静态下全天候、全方位快速自主确定方位基准, 通过光纤陀螺仪和加速度计传感器分别测得地球自转角速度分量和载体基准面倾角下的重力分量, 经过数据采集、程序解算后确定载体参考轴向与真北方向的夹角以及载体参考基准面与水平面的夹角<sup>[1]</sup>。快速高精度的寻北定向技术在舰船、车辆、雷达系统等领域都得到了广泛应用。

随着惯性技术的发展, 对光纤陀螺寻北仪的研究也越来越多。马晋美等<sup>[2]</sup>提出一种二位置光纤陀螺寻北仪, 实验结果表明: 该寻北仪在转台倾角 0~30° 范围内, 寻北精度可达到 9.05'~32.16'。李刚等<sup>[3]</sup>设计了一种四位置光纤陀螺寻北仪的转位机构, 试验得到该寻北仪在精密转台上的精度可达到

0.039°。张志豪<sup>[4]</sup>、杨建强等<sup>[5]</sup>、郭锐等<sup>[6]</sup>也对光纤陀螺寻北仪进行了相关研究。以上文献中寻北仪的转位机构通过步进电机配合齿轮啮合实现定位功能, 然而齿轮啮合时存在配合间隙, 无法实现寻北仪高精度方位测量。针对该问题, 笔者设计了新的 V 型槽定位方式, 利用机械式定位方式, 保证寻北仪的测量精度。

### 1 寻北仪工作原理及关键结构设计

光纤陀螺寻北仪总体结构如图 1 所示, 主要包括座体组件、外壳组件(图 1 中已隐藏)、功能电路组件、转位结构体组件、转位限位组件和转位驱动组件。转位结构体组件包含一个高精度的转位装置, 光纤陀螺仪垂直安装在该转位装置的旋转平台上, 旋转平台的台面在理想状况下平行于载体安装平面。

收稿日期: 2024-06-27; 修回日期: 2024-07-24

第一作者: 段廷亿(1994—), 男, 重庆人, 硕士。

光纤陀螺寻北仪工作时，转位驱动组件通过齿轮啮合驱动转位结构体组件内光纤陀螺仪按顺时针方向转动，到达指定位置后，转位限位组件利用 V 型面与转位装置进行配合，锁止对准并保持，完成精准定位。数据采集完成后，转位限位组件解除转位装置的锁定，转位驱动组件将转位装置旋转到下一个测量位置。所有位置数据采集完成后，功能电路组件对测量结果进行解算，转位装置复位到初始位置，等待下一次寻北指令。寻北仪从接收寻北指令到寻北完成并复位到初始位置的总时间不超过 3 min，具体寻北工作流程时序如表 1 所示。

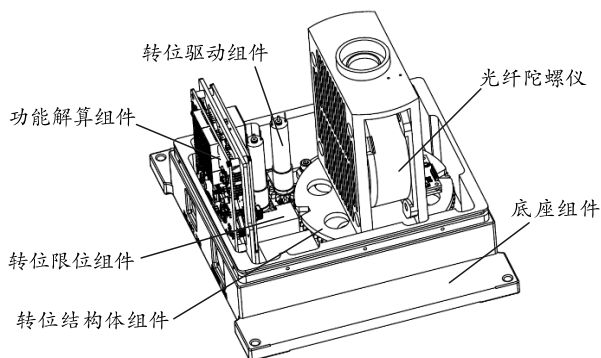


图 1 光纤陀螺寻北仪整体结构

表 1 寻北仪寻北工作流程时序

序号	寻北工作流程	分配时间/s
1	转位装置初始位置→0，到位后锁定	<5
2	保持 0 位置，功能电路组件采集数据	≤40
3	解锁，0→90°，到位后锁定	<15
4	保持 90°位置，功能电路组件采集数据	≤40
5	解锁，90°→180°，到位后锁定	<15
6	保持 180°位置，功能电路组件采集数据	≤40
7	解锁，转位装置复位到初始位置，解算板输出解算结果	<25
合计		<180

光纤陀螺寻北仪最主要的功能是保证寻北精度及重复性，下面对关键组件(转位结构体组件、转位限位组件、转位驱动组件)的结构设计进行详细介绍。

### 1.1 转位结构体组件结构设计

转位装置主要用于安装和承载光纤陀螺仪与加速度传感器(3 轴)电路板，并在旋转平面 0~210°范围内来回旋转。转位装置结构如图 2 所示，定位盘分别在 0、90°、180°位置设计定位“V”槽，通过机械加工保证相对位置的精度；加速度传感器电路板安装定位盘上，垂直于光纤陀螺仪安装平面；光纤陀螺仪安装在框架内，光纤陀螺仪敏感轴与定位盘的大平面平行。转位装置通过下方的承载板基准面贴合安装在寻北仪座体上，保证光纤陀螺仪的

敏感轴与座体的安装基准面垂直或平行，如图 3 所示。

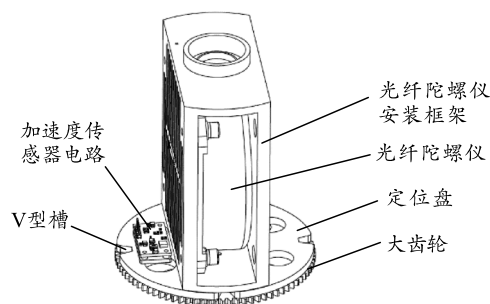


图 2 转位装置结构

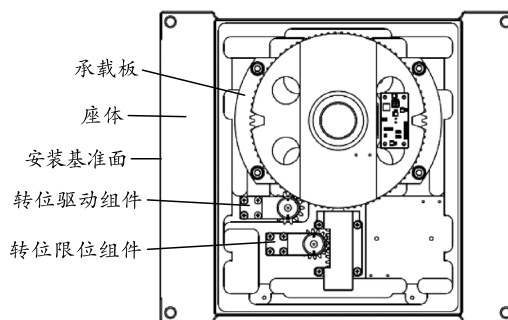


图 3 转位装置安装

### 1.2 转位驱动及限位结构设计

转位驱动电机通过传动齿轮与转位装置的大齿轮结合，控制转位装置转动。限位驱动电机通过传动齿轮驱动限位齿条与转位装置的定位盘“V”型限位槽结合，实现对转位装置位置的锁止。为保证位置重复性，消除机械磨损的影响，限位齿条设计成“V”型结构，与定位盘的限位槽结构特征一致，如图 4 所示。转位限位装置安装在座体上时，保证限位齿条的移动方向与座体上的基准面平行。

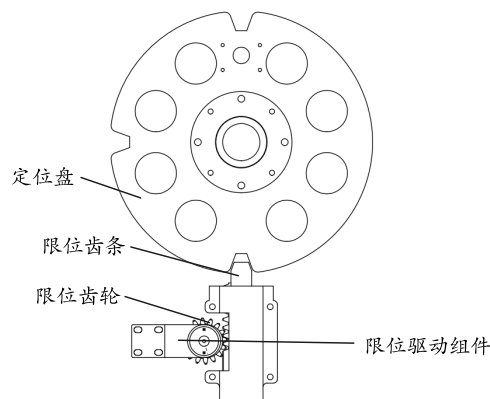


图 4 转位限位装置

为减小限位齿条往复机械磨损对转位装置定位重复性的影响，对限位齿条及滑槽按图 5 进行设计，限位齿条通过安装座“V”型的 2 个斜面进行承载，斜面为工作中的主要机械摩擦面，下方的直槽为定

位槽，在齿条往复运动中，基本不与直槽产生摩擦，确保定位的重复性。

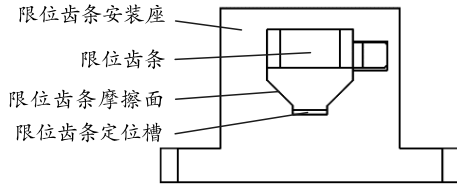


图 5 限位齿条结构

### 1.3 转位装置定位功能结构设计

如图 6 所示，转位结构体组件中承载板底部安装 3 只光敏三极管，分别对应转位装置处于 0°、90°、180°位置。工作时，光敏三极管接收到红外发光二极管(集成于加速度传感器电路板上)光源信息，确定转位装置所处粗略位置，最终结合限位齿条和定位盘的 V 型槽结构特征，完成转位装置精确定位。

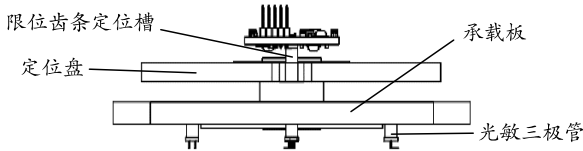


图 6 转位体定位功能结构

## 2 寻北仪方位角解算分析

设地球自转角速度  $\omega_e$ ，载体所处地理纬度为  $\varphi$ ，载体的参考北向(沿水平面)与真北方向的夹角为方位角  $\theta$ ，则载体的参考北向沿水平面的地球自转角速度分量<sup>[7]</sup>为：

$$\omega = \omega_e \cos \varphi \cos \theta. \quad (1)$$

当已知  $\omega_e$ 、 $\varphi$  并由陀螺仪测得  $\omega$  后，即可计算出  $\theta$ 。

将光纤陀螺寻北仪底座置于水平面上，保证光纤陀螺仪的敏感轴平行于水平面。寻北仪开始工作时，由初始位置到达位置 1，该位置光纤陀螺仪的敏感轴正对载体的安装(定位)基准面，此时光纤陀螺仪在位置 1 输出为  $\omega_1$ ；工作后转动至间隔 90°的位置 2，光纤陀螺仪的输出为  $\omega_2$ ；转动至间隔 180°的位置 3，光纤陀螺仪的输出为  $\omega_3$ 。因此：

$$\omega_1 = \omega_e \cos \varphi \cos \theta + E_0 + \varepsilon_1; \quad (2)$$

$$\omega_2 = \omega_e \cos \varphi \cos(\theta + 90^\circ) E_0 + \varepsilon_2; \quad (3)$$

$$\omega_3 = \omega_e \cos \varphi \cos(\theta + 180^\circ) E_0 + \varepsilon_3. \quad (4)$$

式中： $E_0$  为光纤陀螺仪常值漂移误差； $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$  为采集时漂，由于 2 个位置的测量条件相同，当光纤陀螺仪精度满足要求，且相隔时间较短，在外界环境不发生明显改变的情况下，可认为随机误差  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$ ，均可忽略不计<sup>[8]</sup>。解算后得到：

$$\theta = \arctan \left( \frac{2\omega_2 - \omega_1 - \omega_3}{\omega_1 - \omega_3} \right). \quad (5)$$

以上为三位置寻北仪光纤陀螺仪敏感轴平行于水平面时，方位角  $\theta$  的解算原理。如果在工作状态下，光纤陀螺仪的底座与水平面存在一定夹角时，寻北精度就会受到影响。文献[9]提出了光纤陀螺仪的底座与水平面存在夹角，结合本文中设计的光纤陀螺寻北仪，则有：

$$\omega'_1 = \omega_e \cos \varphi (\sin \theta \cos \gamma + \cos \theta \sin \beta \sin \gamma) - \omega_e \sin \varphi \cos \beta \sin \gamma + E_0 + \varepsilon_1; \quad (6)$$

$$\omega'_2 = \omega_e \cos \varphi (\cos \theta \sin \beta + \sin \theta \cos \gamma \cos \beta) + \omega_e \sin \varphi \sin \gamma \cos \beta + E_0 + \varepsilon_2; \quad (7)$$

$$\omega'_3 = -\omega_e \cos \varphi (\sin \theta \cos \gamma + \cos \theta \sin \beta \sin \gamma) + \omega_e \sin \varphi \cos \beta \sin \gamma + E_0 + \varepsilon_3. \quad (8)$$

解算后得到：

$$\theta = 2 \arctan \left( \frac{\cos \gamma + \sqrt{\cos^2 \gamma + \sin^2 \beta \sin^2 \gamma - A^2}}{A + \sin \gamma \sin \beta} \right). \quad (9)$$

式中：

$$A = \frac{\omega'_1 - \omega'_3 + 2\omega_e \sin \varphi \cos \beta \sin \gamma}{2\omega_e \cos \varphi}. \quad (10)$$

3 轴加速度计传感器对于地球重力  $g$  的分量较敏感，从而测量横滚角  $\beta$  和俯仰角  $\gamma$ ，加速度计传感器随光纤陀螺仪位置变化，可分别测量间隔 90°的 3 个位置的重力加速度分量，实现载体横滚角  $\beta$  和俯仰角  $\gamma$  的测量。当与载体基准面水平面产生横滚角  $\beta$ ，解算后得到：

$$\beta = \arcsin \left( \frac{g_{\beta 1} - g_{\beta 3}}{2g} \right). \quad (11)$$

同理，当与载体基准面水平面产生俯仰角  $\gamma$  时，解算后得到：

$$\gamma = \arcsin \left( \frac{2g_{\beta 2}}{\sqrt{4g^2 - (g_{\beta 1} - g_{\beta 3})^2}} \right). \quad (12)$$

以上为三位置寻北仪光纤陀螺仪敏感轴与水平面存在一定夹角时，方位角  $\theta$  的解算原理。

## 3 抗振动性能仿真分析

光纤陀螺寻北仪在运输、工作过程中经常会受到不同程度的随机振动影响。为保证光纤陀螺寻北仪在载体环境中能够正常工作，应保证光纤陀螺寻北仪的变形量尽可能小以及最大响应应力值应小于材料需用应力值。转位结构体组件作为光纤陀螺寻北仪的关键结构部件，其随机振动响应特性影响了整个光纤陀螺寻北仪的工作精度和可靠性；因此，仿真结果主要关注转位结构体组件响应情况。利用 Abaqus 软件对光纤陀螺寻北仪整体进行随机

振动分析<sup>[10]</sup>。随机振动输入条件如图 7 所示。

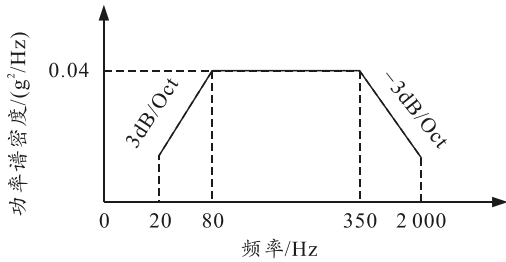


图 7 随机振动功率谱密度

X 向随机载荷作用下结构应力云图如图 8 所示，结构应力响应 RMISE 应力值为 40.44 MPa，出现在底部的承载板上，该值远小于铝合金 2A12-T4 材料的强度极限<sup>[9]</sup>425 MPa，结构设计安全系数为 10.5。结构响应的变形量曲线如图 9 所示，出现在光纤陀螺仪安装框架的顶部，其最大变形量约为  $7.51 \times 10^{-4}$  mm，该变形量几乎可以忽略。

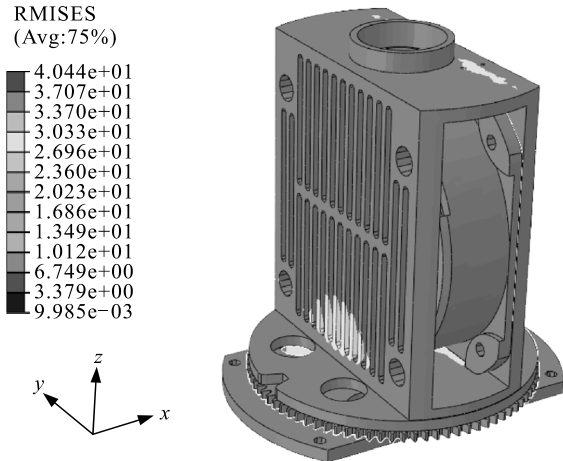


图 8 X 轴随机振动响应应力云图

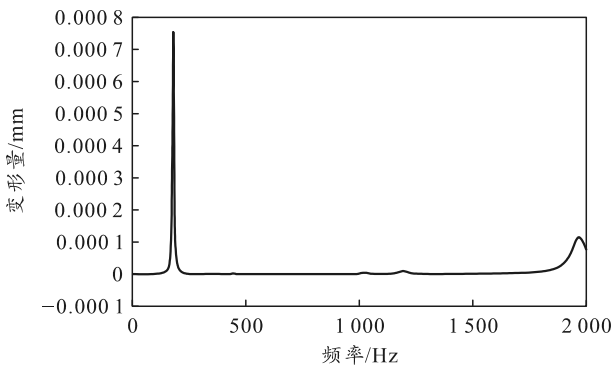


图 9 X 轴响应变形量

Y 向随机载荷作用下结构应力云图如图 10 所示，结构应力响应 RMISE 应力值为 40.99 MPa，出现在底部的承载板上，该值远小于铝合金 2A12-T4 材料的强度极限 425 MPa，结构设计安全系数为 10.37。结构响应的变形量曲线如图 11 所示，出现在光纤陀螺仪安装框架的顶部，其最大变形量约为  $6.98 \times 10^{-4}$  mm，该变形量几乎可以忽略。

$6.98 \times 10^{-4}$  mm，该变形量几乎可以忽略。

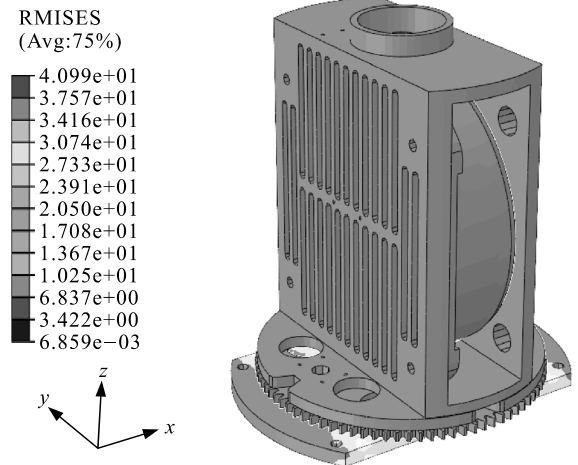


图 10 Y 轴随机振动响应应力云图

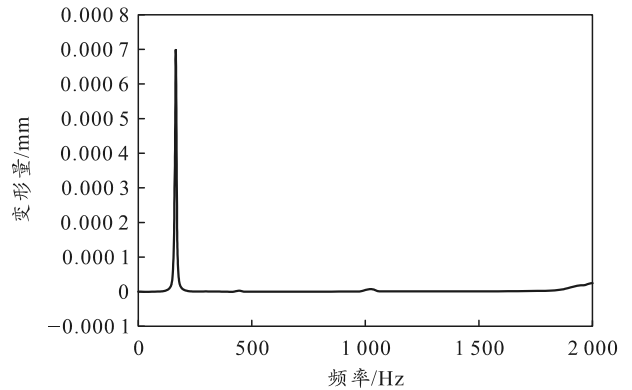


图 11 Y 轴响应变形量

Z 向随机载荷作用下结构应力云图如图 12 所示，结构应力响应 RMISE 应力值为 36.4 MPa，出现在底部的承载板上，该值远小于铝合金 2A12-T4 材料的强度极限 425 MPa，结构设计安全系数为 11.68。结构响应的变形量曲线如图 13 所示，出现在大齿轮上，其最大变形量约为  $9.71 \times 10^{-4}$  mm，该变形量几乎可以忽略。

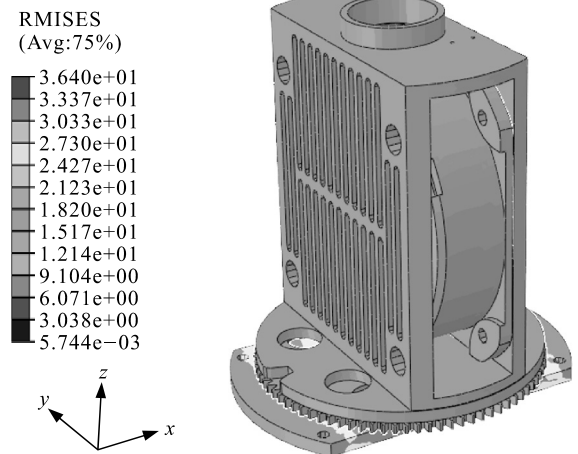


图 12 Z 轴随机振动响应应力云图

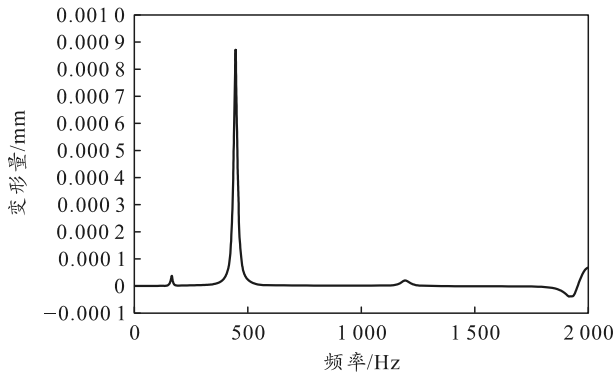


图 13 Z 轴响应变形量曲线

#### 4 精度测试实验

光纤陀螺寻北仪选用北京思卓博瑞科技有限公司生产的 FG-98H 光纤陀螺仪，具体参数如表 2 所示；加速度传感器选用安徽芯动联科微系统股份有限公司生产的 MAX537LC-2g，具体参数如表 3 所示。

表 2 FG-98H 光纤陀螺仪性能特性

序号	性能指标项	性能参数
1	测量范围/g	±2
2	标度因数非线性度/ppm	≤10
3	零偏重复性/(°/h)	≤0.005
4	标度因数非对称度/ppm	≤2
5	标度因数重复性(全温)/ppm	≤50

表 3 加速度传感器性能特性

序号	性能指标项	性能参数
1	测量范围/g	±2
2	非线性度/ppm	<300
3	月重复性/ug	100
4	分辨率/ug	5

实验时，将光纤陀螺寻北仪安装固定在高精度转台(精度为 0.5°，带有北向安装基准)上，接上计算机和电源。如图 14 所示，转台可以实现光纤陀螺寻北仪的横滚和俯仰，本次试验横滚角和俯仰角范围均为-5°~5°。光纤陀螺寻北仪测试精度实验结果如表 4 所示；将转台设定为横滚角 0，俯仰角 0，方位角 35°，进行光纤陀螺寻北仪重复性精度测试实验，结果如表 5 所示。



图 14 光纤陀螺寻北仪测试实验

表 4 光纤陀螺寻北仪测试精度实验 (°)

分类	参考值	输出值	差值	测试精度
横滚角	0	0	0	0.008 9
	-2.5	-2.50	0	
	-5.0	-5.02	-0.02	
	-2.5	-2.51	-0.01	
	0	0	0	
	2.5	2.50	0	
	5.0	5.01	0.01	
俯仰角	0	-0.01	-0.01	0.009 2
	-2.5	-2.50	0	
	-5.0	-5.00	0	
	-2.5	-2.49	0.01	
	0	0.02	0.02	
	2.5	2.50	0	
	5.0	5.01	0.01	
方位角	0	359.98	-0.02	0.037 8
	45	44.99	-0.01	
	90	90.05	0.05	
	135	135.05	0.07	
	180	179.97	-0.03	
	225	224.98	-0.02	
	270	270.04	0.04	
315	315.00	0		

表 5 光纤陀螺寻北仪重复性精度实验 (°)

序号	横滚角	俯仰角	方位角
1	-0.02	0	34.78
2	-0.01	-0.01	34.78
3	-0.01	-0.01	34.79
4	-0.02	-0.01	34.77
5	-0.02	-0.01	34.71
6	-0.01	-0.01	34.74
测试精度	0.005 5	0.004 1	0.030 6

测试精度及重复性精度计算公式为：

$$C = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2} \quad (13)$$

式中：C 为精度值(1σ)；n 为测量次数；α<sub>i</sub> 为第 i 次测量结果； $\bar{\alpha}$  为 n 次测量结果的均值。

经过计算分析后由表 4 得到：光纤陀螺寻北仪的横滚角测试精度为 0.008 9°，俯仰角测试精度为 0.009 2°，方位角测试精度为 0.037 8°。由表 5 可以得到：光纤陀螺寻北仪的横滚角重复性精度为 0.005 5°，俯仰角重复性精度为 0.004 1°，方位角重复性精度为 0.030 6°。

#### 5 结束语

笔者针对寻北仪由于定位机构齿轮啮合时存在配合间隙而无法实现高精度方位测量的问题，设计了一种 V 型槽定位方式，详细介绍了三位置光纤陀螺寻北仪关键结构(转位结构体组件、转位限位组件、转位驱动组件)设计，推导了新的三位置光纤陀螺寻北仪分别在水平和倾角时，方位角的解算公式，

并进行了抗振动性能仿真分析。基于随机振动条件得出光纤陀螺寻北仪 X、Y、Z 轴的安全系数分别为 10.5、10.37、11.68，均满足工程设计要求；X、Y、Z 轴的最大变形量分别为  $7.51 \times 10^{-4}$ 、 $6.98 \times 10^{-4}$ 、 $9.71 \times 10^{-4}$  mm，量级较小，均可忽略不计。通过实验测得了所设计光纤陀螺寻北仪的测试精度和重复性精度。由实验结果可得：光纤陀螺寻北仪的横滚角测试精度为  $0.0089^\circ(1\sigma)$ ，俯仰角测试精度为  $0.0092^\circ(1\sigma)$ ，方位角测试精度为  $0.0378^\circ(1\sigma)$ ；光纤陀螺寻北仪的横滚角重复性精度为  $0.0055^\circ(1\sigma)$ ，俯仰角重复性精度为  $0.0041^\circ(1\sigma)$ ，方位角重复性精度为  $0.0306^\circ(1\sigma)$ 。

参考文献：

[1] 蔡迎波, 乔永严. 单轴光纤陀螺寻北仪四位置寻北误差分析[J]. 光学与光电技术, 2017, 32(6): 84-88.  
 [2] 马晋美, 朱家海, 谢聂. 二位置光纤陀螺寻北仪方案设计及验证[J]. 电子技术与软件工程, 2021, 232(22):

75-77.  
 [3] 李刚, 黄勇, 周静梅, 等. 光纤陀螺寻北仪四位置转位机构设计及其控制[J]. 压电与声光, 2010, 32(4): 558-564.  
 [4] 张志豪. 基于单轴光纤陀螺的转位寻北仪设计[D]. 太原: 中北大学, 2021.  
 [5] 杨建强, 杨林, 刘斌. 陆用光纤陀螺寻北仪误差特性研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(5): 615-619.  
 [6] 郭锐, 严康, 雷杰. 一种惯性寻北仪静态误差分析方法[J]. 信息通信, 2017(7): 49-51.  
 [7] 朱立峰, 吴易明, 陈良益, 等. 对光纤陀螺寻北仪二位置寻北方案的改进[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(12): 2908-2910.  
 [8] 姜璐, 于运治, 姜庆国, 等. 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.  
 [9] 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): 1-5.  
 [10] 王晶晶. 关于高精度小型化陀螺寻北仪结构设计研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.

\*\*\*\*\*

(上接第 7 页)

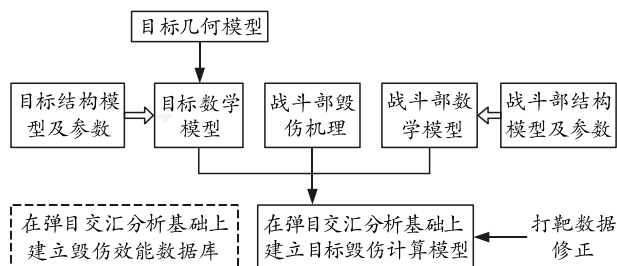


图 9 构建目标毁伤计算模型的流程

3 结论

笔者对空面同时多目标攻击重规划系统的功能组成、工作逻辑、设计难点开展了细致研究。在此基础上，下一步将开展机载工程实现，主要涉及满足准实时性的攻击重规划算法设计、硬件处理资源架构设计等。

对于有人作战飞机，无论自动飞行还是人工驾驶，都需要给飞行员一个清晰可辨、精准显示的人机界面，使得飞行员能够高效介入、精准控制作战飞机以实施空面同时多目标火力打击，这就对显示设计提出了更高要求；因此，下一步也会同步开展空面同时多目标攻击重规划方案显示画面的友好设计研究。

参考文献：

[1] 张舜钰. 制导炸弹落角约束制导律设计[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.  
 [2] 刘世民, 冯保民. 美军 B-2A 轰炸机的战术使用特点[J]. 国防科技, 2008, 29(2): 23-25, 43.  
 [3] RICH K. Rotorcraft pilot's associate from concept to flight demonstration[C]//AHS international forum. AHS, 1999: 1303-1311.  
 [4] 参考消息网. 美军为 B-2 进行升级可识别并规避敌新型防空系统[R/OL]. (2017-11-12). <https://mil.sina.cn/2017-11-22/detail-ifypapmz3859378.d.html>.  
 [5] 于雷, 陈中起, 周中良, 等. 空地多目标序贯攻击三维最优航迹实现[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(8): 137-140.  
 [6] 刘晓亮, 谭守林, 牛国华, 等. 基于多属性决策的打击目标选择[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(9): 135-138.  
 [7] 黄定轩. 基于客观信息熵的多因素权重分配方法[J]. 系统工程理论方法应用, 2003, 12(4): 321-324.  
 [8] 李向东, 杜志华. 目标易损性[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.  
 [9] 卢芳云, 李翔宇, 田占东, 等. 武器毁伤与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2021.  
 [10] 马晓明. 基于贝叶斯网络的舰船目标毁伤评估[J]. 兵工自动化, 2016, 35(6): 72-75.