

高精度动调陀螺寻北仪优化设计

胡旭伯¹, 陈广聪², 卜继军¹, 曾辉¹, 刘立¹, 刘青峰¹

(1. 中国电子科技集团公司第26研究所, 重庆400060; 2. 工业和信息化部电子第五研究所, 广东广州510610)

摘要: 陀螺的漂移和随机误差是影响动调陀螺寻北的主要因素。提出了三位置寻北方案, 消除了陀螺漂移对寻北的影响。准备时间、采样时间、低力矩维持电压和堵转时间等参数设置会直接影响寻北时间和寻北精度。通过实验数据设置合理的参数可减小陀螺随机误差。实测结果表明寻北精度从 0.2° 提高到 0.05° 。

关键词: 寻北仪; 动调陀螺; 三位置; 低力矩维持电压; 堵转时间

中图分类号: U666; TN253

文献标识码: A

Optimum Design of High-precision Dynamically Tuned Gyroscope North Finding System

HU Xunbo¹, CHEN Guangcong², BU Jijun¹, ZENG Hui¹, LIU Li¹, LIU Qingfeng¹

(1. 26th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. 5th Institute of Ministry of industry and Information Technology, Guangzhou 510610, China)

Abstract: The gyro drift and random error are the primary factors which influence the performance of the dynamically tuned gyroscope north finding system. The tri-position north finding scheme is proposed to eliminate the effect of gyro drift on the north-finding. Prepare-time, sample-time, low-moment holding voltage and block-rotation time can affect the time and the precision of north finding. These Parameters can be set to decrease gyro random error by testing data. The test results show that the precision of north finding is raised from 0.2° to 0.05° .

Key words: north finding system; dynamically tuned gyroscope; tri-position; low-moment holding voltage; block-rotation time

0 引言

陀螺寻北仪是一种基于惯性工作原理的快速、高精度、自主式定向仪表。它通过测量地球自转角速度和重力加速度, 经过解算得到固定于其上的参考轴向与真北方向的夹角^[1]。

在工程应用中, 如何满足寻北精度、寻北时间、成本、体积、质量、环境适应性等复杂要求, 是对每一个工程技术人员的考验。其中, 提高寻北精度和缩短寻北时间是一对相互矛盾的要求, 需要设计人员在两者间寻找平衡点。为了得到高精度的方位角, 需对引起寻北误差的因素进行详细的分析, 并对此进行有针对性地消除和补偿^[2]。除此以外, 还应根据实测的陀螺数据对寻北方式进行优化设计, 充分发挥陀螺性能, 提高寻北精度^[3]。

1 误差分析及寻北方案

1.1 动调陀螺误差模型

动调陀螺寻北仪通常由1个双轴动调陀螺和2个加速度计组成, 两个敏感轴就能测量出地球自转

在两个敏感轴的投影分量。在理想条件下, 方位角为

$$\psi = \arctan\left(\frac{\omega_x}{\omega_y}\right) \quad (1)$$

式中 ω_x 和 ω_y 分别为陀螺 x 、 y 轴的输出。

x 、 y 轴陀螺在静止状态下, 陀螺输出的简化数学模型如下:

$$\omega_x = \Omega \cdot \cos L \cdot \cos \psi \cdot k_x + \alpha_{xy} \cdot \Omega \cdot \cos L \cdot \sin \psi + D_x + \nabla_x \quad (2)$$

$$\omega_y = \Omega \cdot \cos L \cdot \sin \psi \cdot k_y + \alpha_{yx} \cdot \Omega \cdot \cos L \cdot \cos \psi + D_y + \nabla_y \quad (3)$$

式中: $\Omega=15^\circ/\text{h}$ 为地球自转角速率; L 为当地纬度; k_x 、 k_y 为 x 、 y 轴陀螺比例系数; α_{xy} 、 α_{yx} 为 x 、 y 轴陀螺安装误差系数; D_x 、 D_y 为 x 、 y 轴陀螺漂移误差项; ∇_x 、 ∇_y 为 x 、 y 轴陀螺随机误差项。

从陀螺数据分析的角度, 上述陀螺输出的主要误差有:

收稿日期: 2014-04-23

作者简介: 胡旭伯(1981-), 男, 河北沧州人, 硕士, 主要从事惯性系统、惯性/卫星组合导航技术研究。

1) 陀螺的比例系数误差。主要包括非线性、随温度变化项。

2) 陀螺的安装误差。包括结构安装误差、陀螺轴向失准。

3) 陀螺的漂移误差。主要包括常值和一阶项。

4) 陀螺的随机误差。包括转位不重复误差、陀螺零位随机误差、陀螺零位随温度变化项等难以建模的部分。

这些误差中, α_{xy} 、 α_{yx} 和 k_x 、 k_y 是设备固有的制造误差, 可通过标定测量出该值, 再通过计算补偿。 D_x 、 D_y 和 ∇_x 、 ∇_y 对寻北精度影响最大, 如何消除该误差就成了寻北仪的关键技术。

1.2 三位置寻北方案

寻北仪目前普遍采用多位置寻北法, 即在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内的等间隔的位置上采样陀螺的输出数据, 进行方位角解算的方法。它在一定程度上降低了陀螺漂移的影响, 提高了寻北精度, 实际普遍采用二、四位置法等^[4]。

三位置寻北是两位置寻北法的改进方法, 即在一次寻北过程内完成先在 0° , 再到 180° , 最后回到 0° , 共 3 次测量, 实际上是在 0° 先后分别测量两次的方法。

根据式(2)、(3)得到陀螺在 3 个位置的测量值:

1) 位置 1

$$\omega_{x1} = \Omega \cdot \cos L \cdot \cos \psi \cdot k_x + \alpha_{xy} \cdot \Omega \cdot \cos L \cdot \sin \psi + D_{x1} + \nabla_{x1} \quad (4)$$

$$\omega_{y1} = \Omega \cdot \cos L \cdot \sin \psi \cdot k_y + \alpha_{yx} \cdot \Omega \cdot \cos L \cdot \cos \psi + D_{y1} + \nabla_{y1} \quad (5)$$

2) 位置 2

$$\omega_{x2} = \Omega \cdot \cos L \cdot \cos(\psi + 180^\circ) \cdot k_x + \alpha_{xy} \cdot \Omega \cdot \cos L \cdot \sin \psi + D_{x2} + \nabla_{x2} \quad (6)$$

$$\omega_{y2} = \Omega \cdot \cos L \cdot \sin(\psi + 180^\circ) \cdot k_y + \alpha_{yx} \cdot \Omega \cdot \cos L \cdot \cos \psi + D_{y2} + \nabla_{y2} \quad (7)$$

3) 位置 3

$$\omega_{x3} = \Omega \cdot \cos L \cdot \cos \psi \cdot k_x + \alpha_{xy} \cdot \Omega \cdot \cos L \cdot \sin \psi + D_{x3} + \nabla_{x3} \quad (8)$$

$$\omega_{y3} = \Omega \cdot \cos L \cdot \sin \psi \cdot k_y + \alpha_{yx} \cdot \Omega \cdot \cos L \cdot \cos \psi + D_{y3} + \nabla_{y3} \quad (9)$$

计算时, 首先将位置 1、3 的测量值求均值, 再用均值减去二位置的测量值得到最终计算值。由于, D_x 、 D_y 包括常值和一阶项, 其一阶项又是时间的线性函数, 因此 $D_{x1} + D_{x3} = D_{x21} \times 2$ 。所以最终计算值

为

$$\omega_x = 2\Omega \cdot \cos L \cdot \cos \psi \cdot k_x + \Delta_x \quad (10)$$

$$\omega_y = 2\Omega \cdot \cos L \cdot \sin \psi \cdot k_y + \Delta_y \quad (11)$$

这种方法中完全消除了漂移对寻北的影响, 只剩下随机误差对寻北精度的影响, 是一种较合理的寻北方案。

2 参数优化设计

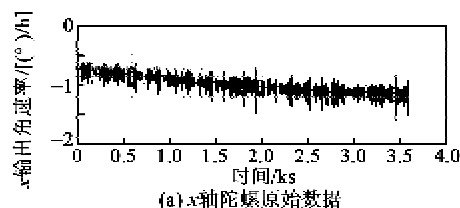
三位置寻北方案虽有很大的进步, 但还不能消除随机误差所带来的寻北误差。针对随机误差的特点, 我们提出了一种多次寻北消除随机误差, 提高寻北精度的方法。

该方法分析陀螺的静态漂移试验数据, 合理设计单次寻北时间, 尽可能在要求的时间内完成多次寻北, 通过计算多次寻北均值就能在不同程度上消除随机误差的影响。

2.1 准备时间

由于陀螺通电后进入稳定工作状态需要一段准备时间, 这段时间陀螺输出随机误差较大, 会对寻北产生较大影响。因此实际工程中必须先确定陀螺的准备时间后寻北仪才能开始工作。

同一厂家同种型号的陀螺也会由于材料、加工、器件等多种原因, 导致陀螺在准备时间上存在一定差异, 最大可达 50%。即使是同一只陀螺, 也会存在冷启动和热启动的差异, 在进行长时间工作(通常是 1 h 以上)后, 准备时间会缩短 10%~20%。在进行高精度寻北仪设计时应考虑这类差异, 缩短准备时间。考虑到同一批次的陀螺由于工艺、材料一致性, 准备时间相差较小, 工程上可采用一种较简便的判定方式。根据同一批次的陀螺随机抽取一定数量的样品, 对陀螺进行漂移实验, 根据实测数据确定最小准备时间。通常动调陀螺的原始数据含有较大噪声, 难以直接判断合适的准备时间, 可以采用平滑获得清晰的曲线。图 1 为动调陀螺 1 h 漂移原始数据。图 2 为动调陀螺 1 h 漂移数据 100 s 平滑曲线。由图 1、2 可知, 该陀螺 x 轴输出较稳定, 但 y 轴输出在 70 s 后才逐渐稳定。



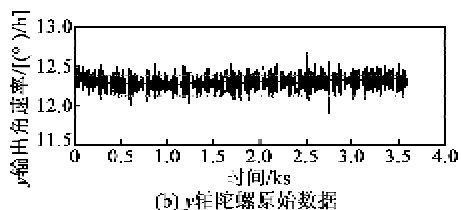


图1 动调陀螺1 h漂移原始数据

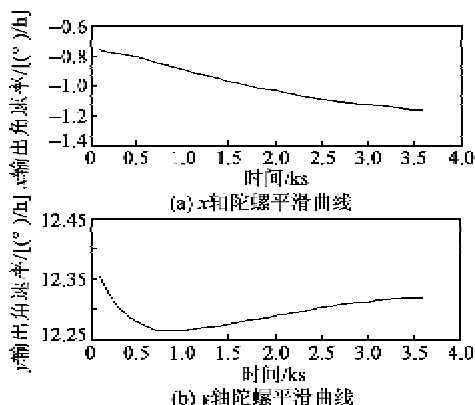


图2 动调陀螺1 h漂移数据100 s平滑曲线

2.2 采样时间

采样时间是指陀螺在每一个位置进行测量的工作时间。该时间过短会导致陀螺信噪比过低,陀螺及电路的噪声将会增大随机误差;时间过长又会降低陀螺数据的使用效率,不能减少随机误差的影响。一种简便的确定单位位置测量时间的方法是陀螺静态漂移试验。将试验获得的陀螺原始漂移数据按照不同的时间间隔求均值形成新的样本序列(例如分别按照1 s、5 s、10 s、15 s、20 s、25 s平滑等),再对新样本求取标准差,形成对应的标准差序列,如表1所示。

表1 不同平滑时间后的标准差

序号	平滑时间/s	标准差/ $[(^{\circ})/\text{h}]$	
		ω_x	ω_y
1	1	0.212 0	0.199 0
1	10	0.041 4	0.031 8
2	20	0.032 0	0.024 8
3	30	0.027 4	0.020 2
4	40	0.024 0	0.0185
5	50	0.023 1	0.015 4
6	60	0.019 6	0.014 4

由表1可知,陀螺原始数据经20 s平滑后标准差就已较小,再延长平滑时间效果也不明显,可选20 s作为该陀螺每一个位置的采样时间。

2.3 低力矩维持电压

为了保证转位机构转到固定位置后能紧贴靠边,需向力矩电机加一个较小的电压,使电机持续输出力矩将转位机构紧压在靠边上。这个电压可称为低力矩维持电压。当维持电压大于某一限值后,可能会使转位机构与靠边连续碰撞,这种碰撞带来的冲击会对采集的传感器信号进行干扰,从而影响陀螺数据的稳定性。

通过调整电机控制电路的参数,改变维持电压大小,可消除该现象。笔者对陀螺的输出进行了监控,同时调整电机的低力矩大小。当电机驱动电压为0.4 V时,陀螺输出有如图3所示的振荡,此时陀螺输出的随机误差约在 $1 (^{\circ})/\text{h}$ 。

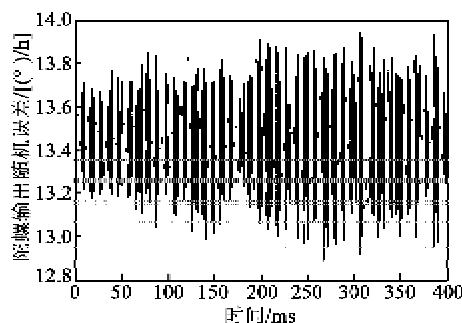


图3 转位机构定位后陀螺x轴输出

经过调整电机驱动电压,将电压调整到0.22 V左右,此时的陀螺信号如图4所示,调试后的陀螺陀螺输出的随机误差只有 $0.4 (^{\circ})/\text{h}$,随机误差减小将大幅提高寻北精度。

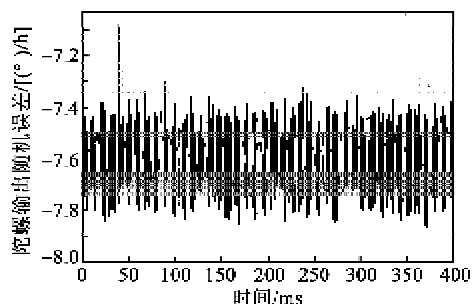


图4 电机调试后当转位机构定位后的陀螺x轴输出

2.4 堵转时间

当转位机构转到固定位置后,转位机构与靠边的冲击会影响陀螺内部转子自转轴发生偏转,陀螺内部的传感器敏感到这个偏转就会使陀螺输出的数据带有较大噪声。之后陀螺内部的自平衡回路会施加自平衡力矩,使转子回到平衡位置,噪声也会随之回到静止下的正常状态。从转位机构紧靠贴靠边,

转位电机施加低力矩后,到噪声回复正常可以采样的这段时间可称为堵转时间。

堵转时间设置的偏长,会导致无谓的等待,增加寻北时间;堵转时间设置的偏短,又会导致等待时间不够,引入了较大的噪声,降低了寻北精度。通过对多只陀螺实地测试,该型陀螺从转位机构紧贴靠边到噪声回复正常约需时间 3~4 s,考虑预留 25% 的余量,可设置堵转时间为 5 s。

3 试验结果

为了验证上述方法的可行性,笔者在现有寻北仪产品中随机选取了一台,该产品原工作方式为一位置寻北,总工作时间 5 min,准备时间 3 min,每个位置测量约 1 min,其寻北精度的测试结果约为 0.2° 。

作者为该寻北仪设定了三位置寻北、初始准备时间 3 min、每个位置测量时间 20 s。每次产品通电准备后,持续的进行三位置寻北,每次通电进行 12 次三位置寻北,共通电 4 次。对比每次通电,不同次数均值的寻北结果,如表 2 所示。

表 2 求不同次数均值间的差值

次数	2 次寻北/ ($^{\circ}$)	4 次寻北/ ($^{\circ}$)	6 次寻北/ ($^{\circ}$)
1	45.829	45.835	45.846
2	45.878	45.870	45.864
3	45.870	45.871	45.865
4	45.853	45.851	45.854
最大差值/($^{\circ}$)	0.049	0.036	0.019
总工作时长/s	320	480	640
次数	8 次寻北/ ($^{\circ}$)	10 次寻北/ ($^{\circ}$)	12 次寻北/ ($^{\circ}$)
1	45.845	45.844	45.845
2	45.865	45.856	45.856
3	45.860	45.856	45.850
4	45.852	45.850	45.848
最大差值/($^{\circ}$)	0.02	0.012	0.011
总工作时长/s	800	840	1 000

由表 2 可知,这种寻北方式随着寻北时间的延长,寻北次数的增加,寻北均值的重复性越来越高,证明该方式可有效地提高寻北精度。

工程应用中设计人员可根据项目要求时间自行设计准备时间和单位位置测量时间,在寻北时间和寻北精度间找寻出最好的平衡方式。

4 结束语

本文提出的陀螺寻北仪三位置优化设计方法通过三位置寻北、多次寻北优化设计、调解低力矩维持电压、降低堵转时间等方法有效地减少寻北时间,提高寻北精度。设计人员可根据具体项目要求,合理设置寻北次数及寻北时间,进而提高寻北精度。通过实验验证,该方法有较高的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 卜继军,魏贵玲,李勇建,等.陀螺寻北仪二位置寻北方案[J].中国惯性技术学报,2002(3):46-49.
BU Jijun, WEI Guiling, LI Yongjian, et al. Two-position detecting scheme for gyro-based north seeker[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2002(3): 46-49.
- [2] 李宝林,卜继军,胡小兵.动力调谐陀螺寻北仪倾斜补偿算法[J].压电与声光,2011,33(5):734-737.
LI Baolin, BU Jijun, HU Xiaobing. Compensating arithmetic of dynamically tuned gyroscope north-finder in lean state[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(5): 734-737.
- [3] 谢慕君,谭旭光,王志乾.基于动调陀螺的多位置寻北仪的转位误差分析[J].光电工程,2008(11):4-7.
XIE Mujun, TAN Xuguang, WANG Zhiqian. Multi-position north seeker and error analysis of position transformation based on dynamically tuned gyro[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008(11): 4-7.
- [4] 白云超,马小辉,刘思伟,等.基于旋转调制技术的自动陀螺寻北仪关键技术研究[J].测绘科学与工程,2010(1):16-18.