

文章编号:1001-2486(2011)01-0105-04

速率偏频激光陀螺寻北仪中转台测角周期性误差的影响分析*

张岩,吴文启,江明明

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

摘要:连续旋转式寻北仪以其突出的性能成为当前寻北仪研究的热点,但关于转台误差对连续旋转寻北算法精度影响的分析很少。针对速率偏频激光陀螺寻北仪,研究了转台测角周期性误差对寻北结果的影响。理论分析表明,测角周期性误差的存在会导致寻北结果偏离真实值,必须对其进行建模和补偿以提高寻北精度。对理论分析结果进行了仿真实验和样机寻北实验验证。

关键词:速率偏频激光陀螺;寻北仪;转台测角周期性误差

中图分类号:U666.1 **文献标识码:**A

Study on North-finding Deviation Caused by the Turntable's Periodic Angular Position Error in a Rate Biased RLG North-finder

ZHANG Yan, WU Wen-qi, JIANG Ming-ming

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Currently, the continuous rotary north-finder is widely discussed for its outstanding performance. However, few researches about the influence of turntable error on the continuous rotary north-finding algorithm can be found. For the north-finder based on rate biased RLG (ring laser gyro), the influence of turntable's periodic angular position errors to the north-finding results was studied. Theoretical analysis shows that, the existence of periodic angular position errors may cause unexpected error in the north-finding process and these errors must be modeled and compensated for in order to increase the north-finding precision. Finally, simulation and experiments were carried out to verify the theoretical conclusion.

Key words: rate biased RLG; north-finder; turntable's periodic angle position error

寻北仪是一种测量其基准边与地理真北方向之间夹角的仪器,可为其他设备提供方位和姿态等信息,被广泛应用于武器瞄准、导弹发射、隧道和矿井建设等国防和民用领域。

寻北仪通常使用陀螺仪作为敏感地球自转角速度的测量部件,其寻北精度主要取决于陀螺零偏稳定性和陀螺随机游走等陀螺精度指标。二位置法和多位置法等寻北算法,可有效消除陀螺常值零偏的影响,但算法对陀螺随机游走和零偏漂移等误差抑制效果并不明显^[1-2]。为进一步提高寻北仪精度,近年来采用连续旋转方法的激光陀螺寻北仪和光纤陀螺寻北仪有了一定的研究进展,连续旋转式寻北仪可以将陀螺误差均匀调制在各个方向,通过对陀螺测量结果的解调可以使陀螺的测量噪声得到更好的抑制,从而有效提高寻北精度^[3-7]。

通常使用单轴转台为寻北仪提供角度基准和

旋转角速度,转台的精度势必会对寻北精度产生一定的影响。对于二位置法和多位置法等传统寻北算法,寻北仪在单轴转台的固定角位置处静止采集数据,转台的角位置精度会对寻北结果有所影响,其中两位置寻北仪由转位误差引起的寻北误差约为转位误差的一半^[8]。

对于连续旋转寻北算法,由于单轴转台处于连续旋转工作状态,其角位置精度和速率稳定性对寻北算法精度影响的分析目前还比较少。本文主要分析转台测角周期性误差对寻北结果的影响,根据寻北仪原理和转台测角周期性误差特性进行了公式推导和定量分析,通过仿真实验和样机寻北实验证实了分析的正确性。

1 寻北仪基本原理

本文对速率偏频激光陀螺寻北仪进行研究,通过单轴转台的连续转动使激光陀螺工作在速率

* 收稿日期:2010-07-22

基金项目:国家部委资助项目

作者简介:张岩(1981—),男,博士生。

偏频方式,可以在提高陀螺测量精度的同时消除陀螺机械抖动对转台的干扰。速率偏频激光陀螺寻北仪基本结构如图1所示。

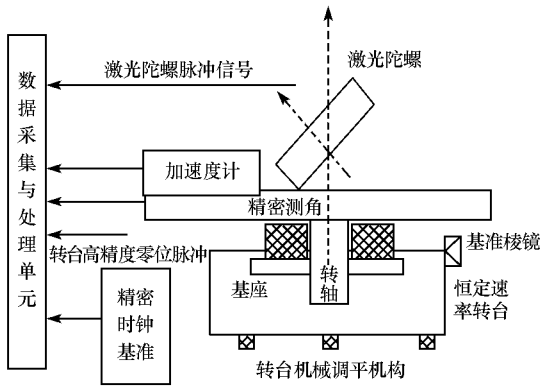


图1 速率偏频激光陀螺寻北仪

Fig.1 The north-finder based on rate biased RLG

图1中采用有零位脉冲输出的单轴速率位置转台,通过其高精度测角光栅测量转台转动角度。通过机械调平机构实现转台的大致水平,台面上安装的石英加速度计可以实现水平姿态角的解析调平^[5]。将激光陀螺安装在单轴速率位置转台上,转台为激光陀螺提供偏频速率,为能同时对地球自转速率和转台提供的偏频速率敏感,激光陀螺采用斜向安装方式,此时激光陀螺敏感轴随着转台相对地球自转角速度矢量做周期性的变化,被转台旋转频率调制后的激光陀螺敏感轴角速度输入量包含了转台转动角速度分量和地球自转角速度分量^[10]。

设当地纬度为 L ,地球自转角速度为 ω_{ie} ,当转台精确调平时,其转轴与当地铅垂线重合,转台转动角速率为 $\Omega(t)$,转台零位基准边与真北方向夹角为 φ ,陀螺敏感轴与其在水平方向投影的夹角为 θ ,从陀螺敏感轴在水平方向的投影与转台零位基准边夹角为 0 时刻开始计时,则激光陀螺敏感轴输入角速度 Ω_c 为:

$$\Omega_c(t) = \Omega(t)\sin\theta + \omega_{ie}\sin L\sin\theta + \omega_{ie}\cos L\cos\theta\cos(\alpha(t) + \varphi) \quad (1)$$

其中, $\alpha(t) = \int_0^t \Omega(t)dt$ 。

设 t 时刻激光陀螺敏感轴转过的角度为 $G(t)$,则有

$$G(t) = \int_0^t \Omega_c(t)dt = \alpha(t)\sin\theta + \omega_{ie}\sin L\sin\theta t + \omega_{ie}\cos L\cos\theta \int_0^t \cos(\alpha(t) + \varphi)dt \quad (2)$$

取 Δt 为定时采样间隔,则在 $t_i \sim t_{i+1}$ 内可得激光陀螺第 $i+1$ 次采样的理论输出值为:

$$\begin{aligned} \Delta G_{i+1} &= G(t_{i+1}) - G(t_i) \\ &= (\alpha_{i+1} - \alpha_i)\sin\theta + \omega_{ie}\sin L\sin\theta\Delta t + \frac{\omega_{ie}\cos L\cos\theta\Delta t}{(\alpha_{i+1} - \alpha_i)} [(\sin\alpha_{i+1} - \sin\alpha_i)\cos\varphi + (\cos\alpha_{i+1} - \cos\alpha_i)\sin\varphi] \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可知,激光陀螺理论输出值由转台转动角度投影、地球自转角速度垂直分量投影和地球自转角速度水平分量投影这三项组成,其中只有第三项包含北向角 φ 的信息。

若忽略激光陀螺标度因数的变化,考虑量化过程、零位漂移及随机游走等误差因素,激光陀螺实际输出数据可表示为:

$$G_{y_{i+1}} = [(\sum_{i1=1}^{i+1} \Delta G(t_{i1})) / Q] - [(\sum_{i1=1}^i \Delta G(t_{i1})) / Q] \triangleq \Delta G(t_{i+1}) / Q + \epsilon_{i+1} \quad (4)$$

其中, $[\cdot]$ 表示求整运算, Q 为激光陀螺的标度因数, ϵ_{i+1} 为第 $i+1$ 次采样时包括量化误差、零漂和随机游走等在内的激光陀螺测量误差。

利用转台角度测量信息,对测量值 G_y 进行预处理,可以消除转速不均匀的影响,得到地球自转角速度水平分量投影对应的余弦分量

$$\begin{aligned} Y_{i+1} &= G_{y_{i+1}} \cdot Q - (\alpha_{i+1} - \alpha_i)\sin\theta - \omega_{ie}\sin L\sin\theta\Delta t \\ &= \frac{\omega_{ie}\cos L\cos\theta\Delta t}{\alpha_{i+1} - \alpha_i} [(\sin\alpha_{i+1} - \sin\alpha_i)\cos\varphi + (\cos\alpha_{i+1} - \cos\alpha_i)\sin\varphi] + \epsilon_{i+1} \cdot Q \\ &= \frac{\omega_{ie}\cos L\cos\theta\Delta t\sin[(\alpha_{i+1} - \alpha_i)/2]}{(\alpha_{i+1} - \alpha_i)/2} \cdot \cos[(\alpha_{i+1} + \alpha_i)/2 + \varphi] + \epsilon_{i+1} \cdot Q \end{aligned} \quad (5)$$

定义 $\eta_{i+1} = (\alpha_{i+1} + \alpha_i)/2$, $H_i = [\cos\eta_i \quad -\sin\eta_i]^T$, $H = [H_1 \quad H_2 \quad \dots \quad H_n]^T$, $Y = [Y_1 \quad Y_2 \quad \dots \quad Y_n]^T$, $X = \left\{ \frac{\omega_{ie}\cos L\cos\theta\Delta t\sin[(\alpha_{i+1} - \alpha_i)/2]}{(\alpha_{i+1} - \alpha_i)/2} \cos\varphi \cdot \frac{\omega_{ie}\cos L\cos\theta\Delta t\sin[(\alpha_{i+1} - \alpha_i)/2]}{(\alpha_{i+1} - \alpha_i)/2} \sin\varphi \right\}^T$, 则有 $Y = HX$,应用最小二乘算法可得寻北结果:

$$X = (H^T H)^{-1} H^T Y \quad (6)$$

$$\varphi = \arctan[X(2)/X(1)] \quad (7)$$

2 转台误差及其对寻北结果的影响分析

寻北仪中使用的单轴转台主要由工作台面、转台轴系、电机及角编码器等部件组成其机械结构,采用角编码器作为角位置和角速率反馈元件构成闭环控制系统。测角分辨率和测角精度是转台光栅角位置测量的重要参数,其中测角分辨率

主要由光栅环一周的刻线数量和电子细分能力决定,测角精度则不仅与光栅测角精度和测角分辨率有关,还与测角轴系的装配精度相关。

若考虑寻北仪实际工作时存在的转台测角误差,将第 i 次转台角度测量值记为 α'_i ,则有 $\alpha'_i = \alpha_i + \beta_i$,其中 β_i 为第 i 次转台角度测量的误差。由转台测角误差的原理可知, β_i 可以表示为周期性误差和离散误差两部分,其中周期性误差可表示为转台实际角度 α_i 的周期函数 $f(\alpha_i) = f(\alpha_i + 2\pi)$,离散误差则可认为是高斯白噪声 ξ_i ,即有 $\beta_i = f(\alpha_i) + \xi_i$ 。

为分析转台测角误差对寻北精度的影响,忽略陀螺测量误差,则有

$$\begin{aligned} \eta'_{i+1} &= (\alpha'_{i+1} + \alpha'_i)/2 \\ &= (\alpha_{i+1} + \alpha_i)/2 + (\beta_{i+1} + \beta_i)/2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$Y_{i+1} = \frac{\omega_{ie} \cos L \cos \theta \Delta t \sin[(\alpha_{i+1} - \alpha_i)/2]}{(\alpha_{i+1} - \alpha_i)/2} \cdot \cos(\eta_{i+1} + \varphi) - (\beta_{i+1} - \beta_i) \sin \theta \quad (9)$$

本文对测角周期性误差进行分析,暂不考虑测角离散误差的影响。测角周期性误差 $f(\alpha_i)$ 通常可以表示为角位置的多次谐波形式,即有

$$f(\alpha) = \sum (A_0 + A_1 \sin \alpha + B_1 \cos \alpha + A_2 \sin 2\alpha + B_2 \cos 2\alpha + A_3 \sin 3\alpha + B_3 \cos 3\alpha + \dots) \quad (10)$$

以一次谐波为例进行分析,有 $\beta_i = A \sin(\alpha_i + \phi)$,此时

$$\begin{aligned} Y_{i+1} &= \frac{\omega_{ie} \cos L \cos \theta \Delta t \sin[(\alpha_{i+1} - \alpha_i)/2]}{(\alpha_{i+1} - \alpha_i)/2} \cdot \\ &\cos(\eta_{i+1} + \varphi) - 2A \sin \theta \sin[(\alpha_{i+1} - \alpha_i)/2] \cdot \\ &\cos(\eta_{i+1} + \phi) \\ &\triangleq B \cos(\eta_{i+1} + \varphi) - C \cos(\eta_{i+1} + \phi) \\ &= \sqrt{B^2 + C^2 - 2BC \cos(\varphi - \phi)} \cdot \\ &\cos[\eta_{i+1} + \varphi + \arcsin \frac{C \sin(\varphi - \phi)}{B}] \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $B = \frac{\omega_{ie} \cos L \cos \theta \Delta t \sin[(\alpha_{i+1} - \alpha_i)/2]}{(\alpha_{i+1} - \alpha_i)/2}$, $C = 2A \sin \theta \sin[(\alpha_{i+1} - \alpha_i)/2]$ 。

由式(11)可知,转台测角周期性误差的存在,使得陀螺测量信号预处理后得到的余弦分量 Y 的幅值和相位随 φ 取值不同发生变化。这样,由式(6)、(7)得到的寻北结果将与其真实值 φ 相差 $\arcsin \frac{C \sin(\varphi - \phi)}{B}$ 。

考虑到转台测角周期性误差通常为角秒量级,此时有 $C \ll B$,由转台测角周期性误差引起的

寻北误差可近似为 $C \sin(\varphi - \phi)/B$,即寻北误差随 φ 做正弦规律变化,且寻北误差最大值与测角周期性误差幅值成正比。当取 $L = 30^\circ, \theta = 30^\circ, \Omega = 10^\circ/\text{s}, \Delta t = 1\text{ms}$ 时,若测角周期性误差幅值为 $1''$,寻北误差最大值约为 $0.44''$ 。

对于测角周期性误差的高次谐波,采用类似的推导过程,亦可得出在其影响下的陀螺测量信号余弦分量的相位变化规律以及寻北误差的表达式。

由以上分析可知,角秒量级的转台测角周期性误差引起的寻北误差已经不能忽略。为保证寻北精度,必须对其进行建模和补偿,尽可能消除转台的测角周期性误差。

3 仿真实验与样机寻北实验

3.1 仿真实验

为验证上文关于测角周期性误差对寻北结果影响的分析,对转台测角周期性误差的不同参数进行仿真。仿真条件如下: $L = 30^\circ, \theta = 30^\circ, \Omega = 10^\circ/\text{s}, \Delta t = 1\text{ms}, Q = 0.466''/\text{pulse}$,不考虑其它陀螺测量噪声,寻北时间为 10min 。转台测角周期性误差是初相为 0 、幅值不同的正弦信号。在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 内改变 φ 进行仿真,得到寻北误差如图 2 所示。

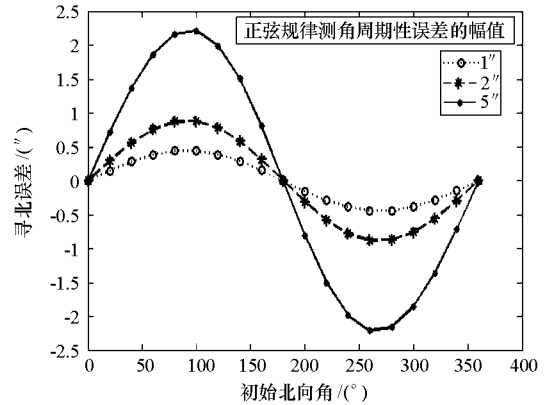


图 2 转台测角周期性误差对寻北结果的影响
Fig.2 The influence of periodic platform measuring error to the north-finding result

由图 2 可以看出,测角周期性误差会引入较大的寻北误差,转台测角周期性误差对寻北结果的影响主要体现为对于不同初始北向角寻北结果与真值的偏差,偏差的最大值及其对应的初始北向角与公式推出的结论一致。

3.2 样机寻北实验

本文通过激光陀螺标定转台的方法^[11]得到实验所用转台的测角周期性误差曲线如图 3 所

示,得到测角周期性误差的五次谐波表达式(12),根据式(12)可对转台的测角周期性误差进行补偿。式中 $f(\alpha)$ 的单位为角秒, $f(\alpha)$ 的其它高次谐波幅值均小于 $0.01''$ 。

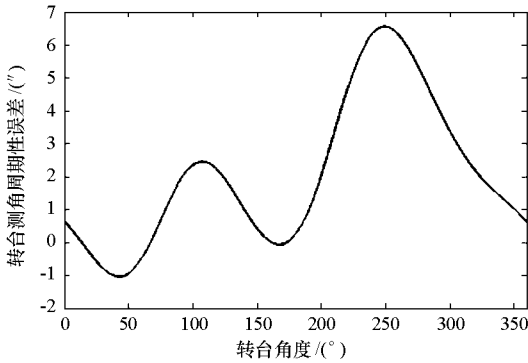


图3 转台测角周期性误差标定曲线
Fig.3 Calibration curve of the turntable's periodic measuring error

$$\begin{aligned}
 f(\alpha) = & 2.0549 - 2.2607\sin\alpha - 0.8042\cos\alpha \\
 & + 0.0953\sin2\alpha - 1.6863\cos2\alpha \\
 & - 0.2602\sin3\alpha + 0.9975\cos3\alpha \\
 & + 0.0083\sin4\alpha + 0.0769\cos4\alpha \\
 & + 0.0693\sin5\alpha - 0.0006\cos5\alpha \quad (12)
 \end{aligned}$$

对速率偏频激光陀螺寻北仪样机在某固定位置进行多次寻北实验,该位置方位角为 226.540° (由陀螺经纬仪得到)。实验条件如下:转台转速为 $10^\circ/\text{s}$,寻北时间为 10min 。寻北仪样机所用激光陀螺零偏稳定性优于 $0.005^\circ/\text{h}$,零偏重复性优于 $0.003^\circ/\text{h}$,随机游走优于 $0.003^\circ/\sqrt{h}$ 。

对寻北实验数据分别在不补偿和补偿测角周期性误差两种情况下处理,得到寻北结果如表1所示。对转台测角周期性误差进行补偿后的寻北均值与真实值基本一致,而转台测角误差未补偿时寻北均值与真实值偏差达到 0.550° 。

表1 寻北实验结果

Tab.1 The result of north-finding experiment

转台测角周期性误差	寻北结果	
	均值($^\circ$)	标准差($''$)
未补偿	225.990	41
已补偿	226.537	19

样机寻北实验结果表明,转台测角周期性误差使得寻北结果相对真实值出现较大偏差。为得到准确的寻北结果,必须对该误差进行补偿。

4 结论

转台测角误差分析对于速率偏频激光陀螺寻北仪精度评估、误差分配和设备选型具有重要意义。根据转台测角误差的特性可以将转台误差分解为周期性误差和离散误差,本文对测角周期性误差进行分析,给出了测角周期性误差对寻北结果影响的定量公式描述。分析表明,转台测角周期性误差会导致寻北结果相对真实值出现较大偏差,对寻北精度产生较大的影响,必须对其进行误差建模和补偿。仿真结果和寻北仪实验证实了理论分析结果的正确性。

参考文献:

- [1] Zhang Z J, Sun J Y, Wu K Y. Error Analysis and Test Study of Fiber Optic Gyroscope North-finder [C]//SPIE, China, 2005, 5634: 611 - 618.
- [2] 黄宗升. 旋转式激光陀螺寻北仪的研究[D]. 长沙:国防科技大学,2007.
- [3] Kim S J, Lee S S, Kwon Y S, et al. Dynamic North-finding Scheme Based on a Fiber Optic Gyroscope [C]//SPIE, USA, 1997, 3087: 126 - 136.
- [4] 黄宗升,秦石乔,王省书,等. 恒速偏频激光陀螺寻北仪的研究[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(5): 65 - 68.
- [5] 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.
- [6] 徐建华,谢玲,高亚楠,陈家斌. 旋转调制式寻北仪滤波技术研究[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(8): 718 - 721.
- [7] 邹向阳,孙谦,陈家斌,等. 连续旋转式寻北仪的寻北算法及信号处理[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(9):804 - 807.
- [8] 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.
- [9] 张红良,武元新,查亚兵,等. 高精度惯测组合标定误差分析[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(1): 142 - 146.
- [10] Zhang Y, Wu W Q, Cao J L. The Study of North-finder Based on Rate Biased RLG[C]//The 3rd International Symposium on System and Control in Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [11] 黄宗升,秦石乔,王省书,等. 光栅角编码器误差分析及用激光陀螺标校的研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(10): 1866 - 1869.