

文章编号: 1003-501X(2008)11-0004-04

基于动调陀螺的多位置寻北仪的转位误差分析

谢慕君¹, 谭旭光¹, 王志乾^{2,3}

(1. 长春工业大学 电气与电子工程学院, 长春 130012;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

3. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130025)

摘要: 针对实验过程中转台在每个转位处存在的转位误差对系统寻北精度的影响, 介绍了动调陀螺多位置寻北仪的工作过程及真北解算原理, 进行了转位误差对寻北精度影响的误差分析。运用误差理论和偏导数原理, 推导出转位误差与寻北误差二者之间的关系模型。理论分析及实验结果表明, 在相同寻北位置数的情况下, 转位误差越小寻北精度越高; 同时在一定的转位误差时, 寻北位置数越多则寻北精度越高。根据理论分析, 提出了两种不同的误差补偿方法。

关键词: 动调陀螺; 多位置寻北仪; 转位误差; 寻北误差

中图分类号: V241.5

文献标志码: A

Multi-position North Seeker and Error Analysis of Position Transformation Based on Dynamically Tuned Gyro

XIE Mu-jun¹, TAN Xu-guang¹, WANG Zhi-qian^{2,3}

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China;

3. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: In order to reduce the influence of position error in every standstill-position of turntable on north-seeking precision, the work process of the Dynamically Tuned Gyro (DTG) multi-position north seeker and the principle of the azimuth arithmetic are introduced, and the relation between position error and north-seeking precision is analyzed. The mathematical model between position error and north seeking error is gotten through error theory and partial derivative principle. The analyses of theory and results of experiment show that, in the condition of the same north-seeking points, the less position error is, the higher north-seeking precision is; in the condition of the same position error, the more north-seeking points are, the higher north-seeking precision is. According to the theoretical analyses, two error compensation methods are presented.

Key words: dynamically tuned gyro; multi-position north seeker; position transformation error; north seeking error

1 引言

陀螺多位置寻北仪是一种快速、高精度的全天候自主定向装置, 主要用于军事上为火炮、导弹发射车等武器装备系统提供北向基准, 为了满足日以激烈的军事对抗要求, 不仅要求瞄准系统具有高精度, 同时要求系统在接收到指令后能快速给出方位信息。基于动调陀螺的多位置寻北技术在国内外被广泛重视和深入研究, 在设计过程中在对寻北误差进行评估时一般只考虑陀螺漂移、姿态角、轴系精度等几个方面, 本文从多位置寻北原理切入, 对转台的定位误差进行分析, 根据定位时产生转位误差对寻北结果影响的相关

收稿日期: 2008-04-18; 收到修改稿日期: 2008-06-16

作者简介: 谢慕君(1969-), 女(汉族), 吉林磐石人, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事光电平台自动控制的研究。E-mail: xmj666@163.com

通信作者: 谭旭光(1982-), 男(汉族), 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要从事光电平台控制方面的研究。E-mail: dnwnny1982@sina.com

性, 建立了二者的误差关系式, 并在此基础上提出了相应的补偿措施^[1-3]。

2 多位置寻北仪工作原理

寻北仪系统采用捷联式多位置寻北技术, 将一个动力调谐陀螺(DTG)垂直安装在转台上, 使其敏感轴与转台台面保持平行, 当转台静止时由敏感轴感应输出地球自转角速度分量(输出的量是地球自转角速度在载体坐标系^[4]中北向的分量), 同时将一个加速度计固联在平台上, 敏感近水平状态下的重力加速度分量, 检测支撑平台调平误差, 以计算陀螺仪的水平姿态角。系统工作过程如图 1 所示, ψ 为所要求的初始位置时陀螺敏感轴与真北夹角。

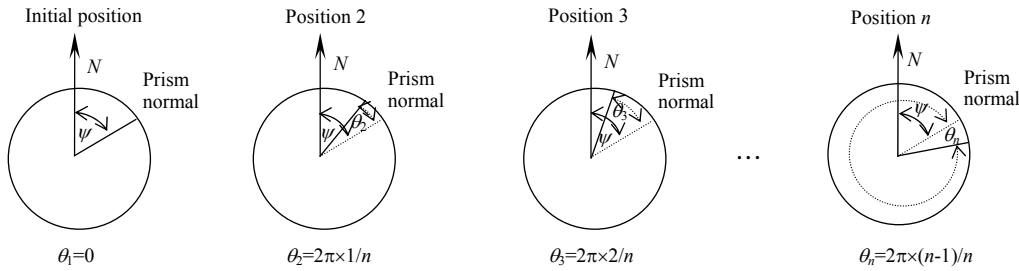


图 1 系统工作过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of working process of system

系统以棱镜法线为基准方向, 由主控制单元向伺服控制单元发控制指令完成转台复位到起始限位位置(棱镜法线)等准备工作, 伺服控制电路向主控制器报告当前角位置信息(陀螺敏感轴与基准方向的夹角)后, 陀螺仪数据采集单元采集当前位置的输出信号, 完成第一位置采样; 伺服控制电路控制转台转动到第二位置并向主控制器报告第二位置角位置信息, 数据采集单元采集第二位置数据, 完成第二位置采样; 如此反复, 待在完成一周 n 个转角位置即为完成了一次寻北, 再由数据处理单元把每次的数据用最小二乘法进行实时曲线拟合处理, 估计出基准方向与地理北向的夹角 $\hat{\psi}$, 解算出了真北值。

动调陀螺有正交的两个敏感轴, 同时有 X 、 Y 两个分别与载体坐标系的 X_b 、 Y_b 轴保持平行的输入轴, 因此只需分析得出其中一轴的相关参数, 另一轴的参数可按同样方法计算得到。系统在一周内每个转角位置($\theta_i = (i-1) \times 2\pi/n, i=1,2,\dots,n$)处待静止后采集陀螺的输出信号, 由于地球自转角速度在载体坐标系中可分解成为东向分量和北向分量, 陀螺的每个敏感轴感应输出的信号量是对应在转角位置处地球自转角速度在水平面内投影北向分量, 根据系统运动的特点输出信号被调制成周期性正弦信号, 在忽略载体平台姿态角的条件下, 即假定系统无调平误差, 陀螺输出的数学模型为

$$y_i = R + a \cos \theta_i + b \sin \theta_i + w_i \quad (1)$$

式中: y_i 为陀螺输出量值(已转换为角速度); $\theta_i = (i-1) \times 2\pi/n, i=1,2,\dots,n$; R 为陀螺常值漂移; w_i 为陀螺随机漂移项; $a = \omega_N \cos \psi, b = \omega_N \sin \psi$, ω_N 为地球自转角速率的北向分量, $\omega_N = k \omega_c \cos \varphi$ 。 k 为动调陀螺的标度因数; ω_c 为地球角速率; φ 为当地地理纬度。

根据陀螺的输出特性可知 R 、 w_i 近视为常值, 可通过交流放大器滤掉, 将理想输出模型式(1)简化成:

$$y_i = \omega_N \cos(\theta_i - \psi) \quad (2)$$

陀螺仪输出的等效模型函数特性曲线如图 2 所示。当图中函数曲线在纵轴方向有最大值时, 横轴上对应的相位角 ψ 为真北方向与基准参考方向的夹角, 从而定出真北方位角。

根据陀螺仪输出的函数特性可知, 解算真北的实质就是根据采集的数据运用合理的数学方法, 计算出式(2)中的 ψ 值。在每个转角位置处采样得到的数据序列是 θ_i 对应的 y_i 值, 先根据一周内离散化采样点数计算出数字角频率大小, 再用三参数正弦拟合算法进行曲线拟合。设理想的正弦信号为

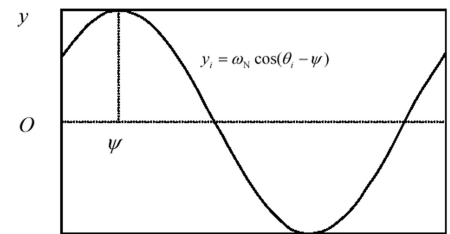


图 2 陀螺仪输出原理模型曲线

Fig.2 Principle curve of gyroscope output

$$y(t) = \omega_N(2\pi ft + \psi) + R$$

此时问题关键是寻找 $\hat{R}, \hat{a}, \hat{b}$ 使式(3)残差平方和取最小^[5-7]。

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{a} \cos \theta_i - \hat{b} \sin \theta_i - \hat{R}]^2 \quad (3)$$

$\hat{R}, \hat{a}, \hat{b}$ 即为 R, a, b 的最小二乘拟合估计值, 代入解北运算公式就能计算出方位角 ψ 。

把采集的样本序列、待估计的参数及陀螺随机漂移量分别用列向量形式表示, 设有: $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$;

$$\mathbf{X} = [\hat{R}, \hat{a}, \hat{b}]^T; \quad \mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T; \quad \text{同时构造 } n \times 3 \text{ 阶矩阵 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ 1 & \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos \theta_n & \sin \theta_n \end{bmatrix}。 \text{陀螺输出模型可用线性方}$$

程: $\mathbf{Y} = \mathbf{AX} + \mathbf{W}$ 来表示, 那么式(3)可用矩阵可表示成: $\varepsilon = (\mathbf{Y} - \mathbf{AX})^T (\mathbf{Y} - \mathbf{AX})$, 由于式(3)是一种闭合的线性过程, 因而它是绝对收敛的, 当式(3)中的 ε 取得最小值时解得 \mathbf{X} 的最小二乘解:

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Y}$$

当 $\{w_i\}$ 为零均值白噪声时, 则有 $\hat{R}, \hat{a}, \hat{b}$ 均为无偏估计。在求得 \hat{a} 和 \hat{b} 之后, 即可得到方位角 ψ 的估计值:

$$\hat{\psi} = \arctan(\hat{b} / \hat{a}) \quad (4)$$

3 多位置转位误差对寻北精度影响误差分析

由寻北仪的寻北、解算原理可知, 在对数据进行实时处理过程中的样本值为陀螺在各停顿位置的输出量值, 而在对采集的数据进行正弦拟合时把各个样本近视为陀螺仪在指令位置的输出量值, 由于转台在定位过程中很难保证指令位置和实际停顿位置的完全重合致, 因此存在偏差, 这个误差定义为转位误差, 相应地它将会对最终的寻北精度产生影响。通过推导出二者的误差模型, 在模型的基础上对系统的寻北最终输出进行实时补偿, 才能有效地提高寻北仪定北的精确度^[8-9]。

因为伺服机构对转台当前角位置信息(陀螺北向基准与陀螺敏感轴之间的夹角)的测量属于等精度测量, 可视一次完成寻北过程当中每一个转角位置处的转位误差相等, 利用误差处理方法算其大小。令每个转角位置的残余误差为 $v_i = \hat{\theta}_i - \theta_i$, 其中 $\hat{\theta}_i$ 为转台静止时编码器输出值, $\theta_i = (i-1) \times 2\pi/n, i=1, 2, \dots, n$ 。根据贝塞尔公式计算出一周后转台转位误差的标准差 σ_θ 的值为

$$\sigma_\theta = \sqrt{\sum_{i=1}^n v_i^2 / (n-1)} \quad (5)$$

然后, 利用谐波分析方法对式(2)中的 a 和 b 值进行估计, 可得:

$$\hat{a} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \cos \theta_i \quad (6); \quad \hat{b} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sin \theta_i \quad (7)$$

$$\text{则式(4)可表示成: } \hat{\psi} = \arctan \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^n y_i \cos \theta_i} \quad (8)$$

计算出真北方位角估计值在每一个转角位置处的局部偏导为

$$\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial \theta_i} = \frac{2}{n \omega_n} y_i \cos(\theta_i - \psi) \quad (9)$$

根据误差分析的相关理论可知, 对于多元函数其增量可用函数的全微分表示, 那么对一个整周期寻北各个测量位置的转位误差对寻北产生的随机误差^[8] σ_ψ 为

$$\sigma_\psi = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial \theta_i} \sigma_\theta \right)^2} = \frac{2}{n \omega_n} \sigma_\theta \sqrt{\sum_{i=1}^n [y_i \cos(\theta_i - \psi)]^2} \quad (10)$$

假定陀螺仪在每个转角位置的输出都是无偏差输出, 即消除陀螺仪的常值漂移和随机漂移的影响, 将式(2)代入式(10)中, 则有:

$$\sigma_\psi = \frac{2 \times \sigma_\theta}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n [\cos(\theta_i - \psi)]^4} \quad (11)$$

4 仿真及实验结果分析

根据式(11), 运用 Matlab 数学工具^[10]进行了模型仿真。假设捷联寻北在同一方位——即 ψ 为定值, 按照转台一周内 30 等分、60 等分、90 等分、120 等分及 180 等分时进行计算, 得出不同寻北位置数情况下转位误差(横坐标)对寻北误差(纵坐标)影响的对应关系曲线, 如图 3 所示。

上述结果表明在相同的寻北位置数 n 的情况下, 转位误差越小寻北精度越高; 同时在一定的转位误差时, 寻北位置数越多则寻北精度越高。

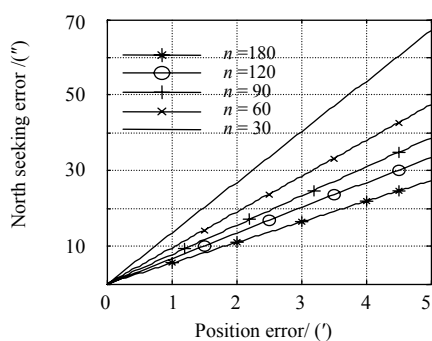


图 3 转位误差与寻北误差关系

Fig.3 Relation of transformation error and north-seeking

表 1 不同转位误差的实验结果

Table 1 Experiment result of different transformation errors

	$n = 90$		$n = 180$	
	σ_{θ}	σ_{ψ}	σ_{θ}	σ_{ψ}
1	1.005'	44.14"	1.054'	33.21"
2	1.988'	57.02"	2.007'	42.17"
3	3.111'	57.02"	3.075'	43.02'
4	4.120'	64.07"	3.812'	48.96"
5	5.303'	74.35"	5.173'	57.09"
6	5.779'	86.48"	5.841'	63.82"

在所研制的多位置捷联寻北仪上, 伺服转台采用直流力矩电机驱动, 位置检测采用 19 位绝对式光电轴角编码器, 分辨力 2.5", 精度 4"。伺服控制器采用 TMS320LF2407 及相应的外围接口电路。以 $n=90$ 和 $n=180$ 为例, 分别进行 6 组伺服转台不同转位误差时的寻北实验, 在每组实验中, 进行了 6 次寻北测量, 计算出每组数据的转位误差 σ_{θ} 和寻北误差 σ_{ψ} , 其中寻北误差 σ_{ψ} 还包含有其它的系统误差和随机误差。结果如表 1 所示。

表 1 的实验结果验证了理论分析的正确性, 在其它条件相同的情况下, 转位误差越大则寻北误差越大。可采取以下两种不同的途径减小转位误差对寻北精度的影响:

1) 增加转台定位时间, 提高转台定位精度。在提高位置信息测量精确度的同时有足够长的定位时间, 使转台定位位置最大可能地与指令位置重合, 减小系统最终的转位误差 σ_{θ} , 相应的 σ_{ψ} 值也将随之减小。

2) 采用有效的数据处理方法, 对寻北解算结果进行实时处理, 数据处理单元将每个位置的 v_i 值存入存储单元, 待系统完成一周测量以后将这些数据进行代数相加并计算出 σ_{θ} , 同时判定其符号(约定指令位置向逆时针方向偏为正), 求出 σ_{ψ} , 再与拟合输出计算得到方位角估计值 $\hat{\psi}$ 作代数相加, 所得结果为补偿后最终输出的真北值。

5 结 论

本文介绍了基于动调陀螺的多位置寻北仪的工作原理和转位误差的测量方法, 重点分析了转位误差对寻北结果的影响, 推导出二者的关系式, 并进行了仿真和实验验证。为捷联式多位置寻北仪的设计提供了理论依据, 具有较大的参考价值。根据函数关系式提出两种可行性方案减小转位误差对寻北精度的影响, 两种方案的实施还需做进一步研究。

参考文献:

- [1] 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.
GAO Mao-lin, ZHAO Zhong, ZHANG Ju. Two-Position Gyro-Based North Seeker and Error Analysis of Position Transformation [J]. *Computer Measurement & Control*, 2006, 14(1): 70-71.
- [2] 林明春, 夏桂锁, 林玉池, 等. 电子罗盘在全自动智能陀螺寻北仪中的应用 [J]. 光学 精密工程, 2007, 15(5): 719-724.
LIN Ming-chun, XIA Gui-suo, LIN Yu-chi, et al. Application of electronic compass to all automated intelligent gyroscope north finder [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(5): 719-724.

(下转第 12 页)

参考文献:

- [1] Meir Iecovich. Line of Sight Stabilization Requirements for Target Tracking System [J]. **SPIE**, 1990, **1304**: 100-111.
 - [2] 邹东明, 刘栖山, 陈长青, 等. 舰载光电跟踪设备视轴稳定分析 [J]. 兵工自动化, 2003, **22**(1): 15-19.
ZOU Dong-Min, LIU Xi-sha, CHEN Chang-qing, *et al.* Stabilization Analysis of LOS for Carrier-Based Electro-Optical Tracking Equipment [J]. **Armament Automation**, 2003, **22**(1): 15-19.
 - [3] 李冰, 陈洪斌. 车载平台刚体动力学模型分析 [J]. 光电工程, 1999, **26**(增刊): 12-15.
LI Bing, CHEN Hong-bin. An Analysis for Dynamic Model of a Rigid Body on Vehicle-Borne Platform [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 1999, **26**(Sup.): 12-15.
 - [4] 高策, 乔彦峰. 光电经纬仪测量误差的实时修正 [J]. 光学 精密工程, 2007, **15**(6): 846-851.
GAO Ce, QIAO Yan-feng. Real-time error-correction method for photoelectric theodolite [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2007, **15**(6): 846-851.
 - [5] 车双良, 朱麦花. 光电经纬仪结构动态特性研究 [J]. 光电工程, 2004, **31**(7): 15-17.
CHE SHuang-liang, ZHU Mai-hua. Study on dynamic structural property of electro-optical theodolite [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2004, **31**(7): 15-17.
 - [6] 王宗友, 徐智勇. 单台光电经纬仪对目标稳定跟踪的研究 [J]. 光电工程, 2003, **30**(2): 11-14.
WANG Zhong-you, XU Zhi-yong. Study on stable tracking target with single photoelectric theodolite [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2003, **30**(2): 11-14.
 - [7] MSC Software. **MSC.ADAMS FSP** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
 - [8] MSC Software. **MSC.ADAMS/View** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- ~~~~~
- (上接第 7 页)
- [3] 王镇, 申功勋. 摆式陀螺寻北仪的积分测量方法 [J]. 光学 精密工程, 2007, **15**(5): 746-752.
WANG Zhen, SHEN Gong-xun. Investigation on integral method of pendulous gyroscope [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2007, **15**(5): 746-752.
 - [4] 徐建华, 刘星桥, 陈家斌. 捷联寻北仪方位角误差分析 [J]. 兵工学报, 2006, **27**(2): 284-287.
XU Jian-hua, LIU Xing-qiao, CHEN Jia-bin. Strap-down North Finder Azimuth Error Analysis [J]. **ACTA ARMAMENTARII**, 2006, **27**(2): 284-287.
 - [5] QI Yu-tong, CHEN Fen-gu, SU Hai-bin. Error Analysis of a Dynamically Tuned Gyro Strapdown Northfinder [J]. **Journal of Beijing institute of Technology**, 1999, **8**(3): 331-336.
 - [6] 李岩, 张智永, 范大鹏. 陀螺安装误差影响视轴稳定平台精度的机理研究 [J]. 光电工程, 2007, **34**(9): 10-15, 29.
LI Yan, ZHANG Zhi-yong, FAN Da-peng. Principle of the effect of gyro misalignment on the stabilization platforms accuracy [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2007, **34**(9): 10-15, 29.
 - [7] 梁志国, 张大治. 四参数正弦波曲线拟合的快速算法 [J]. 计测技术, 2006, **26**(1): 4-7.
LIANG Zhi-guo, ZHANG Da-zhi. A Fast Arithmetic Method of Four-parameter Sine Wave Curve-fit [J]. **Aviation Metrology & Measurement Technology**, 2006, **26**(1): 4-7.
 - [8] REN Shun-qing, ZHAO Zhen-hao, CHEN Yan. Error Analysis for the Gyro North Seeking System [C]// **ISSCAA**. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 783-786.
 - [9] ZHANG Zhi-jun, WU Ke-yong, SUN Ji-yu. Fiber Optic Gyroscope Automatic North-finder and Prototype Design [J]. **3rd International Symposium on Instrumentation Science and Technology**, 2004, **2**: 783-787.
 - [10] 冯永利, 杨文淑. 陀螺稳定控制系统设计与仿真 [J]. 光电工程, 2003, **30**(1): 32-34.
FENG Yong-li, YANG Wen-shu. Design and Simulation of a Stabilizing and Control System with Gyroscope [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2003, **30**(1): 32-34.