

文章编号 1004-924X(2014)12-3258-06

## 两次步进预置北限幅设计

郭晓松,戴宇佳\*,谭立龙,周召发

(西安高技术研究所,陕西 西安 710025)

**摘要:**针对陀螺经纬仪存在限幅效率低的工程问题,设计了一种两次步进预置北限幅方案。介绍了传统步进限幅方法原理,分析了陀螺摆动平衡位与静摆零位的关系。将传统步进限幅法中的静摆零位跟踪更改为平衡位跟踪,通过两次步进使陀螺主轴摆动迅速限幅并以小摆角在真北附近运动。推导了两次步进转动角度及时刻的数学公式,分析了误差因素,并针对不同的摆幅和悬挂带扭转系数与陀螺力矩系数的比值进行了仿真运算。采用该方法改进了一个陀螺经纬仪的限幅,实验结果表明,该方法能在一个陀螺不跟踪摆动周期内完成限幅,限幅精度达到 $1'$ 。提出的限幅方法保留了传统步进限幅法不需要增加系统硬件的优点;提高了限幅效率,满足工程应用对寻北时间和精度的要求。

**关键词:**陀螺经纬仪;摆幅;步进限幅;快速寻北

**中图分类号:**V241.5;U666.123 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142212.3258

## Design of twice stepped limiting program by presetting on north

GUO Xiao-song, DAI Yu-jia\*, TAN Li-long, ZHOU Zhao-fa

(Xi'an High-tech Research Institute, Xi'an 710025, China)

\* Corresponding author, E-mail: dyjshjqy@126.com

**Abstract:** A twice stepped limiting program by presetting on north was designed to improve the efficiency of limiting process of a gyrotheodolite. The principle of traditional stepped limiting was introduced, and the relationship of the swing balance and the zero position of gyrotheodolite was analyzed. Then, the traditional program of zero position following was redesigned to a balance position following now, so that the gyro could quickly limit the swing of the gyro and allow it to campaign with a small swing near north through stepping twice. The mathematical formulas for two stepping angles and time were derived, the error factors on the limiting effect were analyzed and the different swing ranges and the coefficient ratios of suspensory torsions to gyro torques were simulated. Finally, the program was applied to a pendulous gyroscope. The theory and experiment results show that the limiting is implemented in an un-following gyro precession circle with a limiting precision of  $1'$ . The program proposed reaches the precision index and time demand of north-finding without adding any software, and improves the efficiency of limiting.

**Key words:** gyrotheodolite; swing range; stepped limiting method; quick north-finding

### 1 引言

陀螺经纬仪作为一种全天候、不依赖其他条

件能够测定真北方位的精密定向仪器,是目前陀螺寻北仪中测量精度最高的仪器,被广泛应用于测绘、隧道、矿山和军事等领域<sup>[1,2]</sup>。目前,德国DMT公司生产的GYROMAT3000是陀螺经纬

收稿日期:2014-03-02;修订日期:2014-04-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41174162)

仪产品中公认的性能最好的产品。国内陀螺经纬仪也出现了精度优于  $5''$  的产品,但在缩短测量时间以及实现全方位寻北技术方面与国外高端产品还存在一定差距。

陀螺经纬仪的精寻北测量要求陀螺主轴方位角在偏北一定角度内,如果偏北角过大,则陀螺经纬仪无法正常工作。因此在精寻北测量之前要对陀螺主轴摆动进行限幅,有文献提到精寻北测量对陀螺摆幅的要求为  $\pm 10' \sim \pm 20'$ ,这也是对限幅的精度要求<sup>[3-5]</sup>。

目前,常用的限幅方法是电磁法和步进迭代法(跟踪逆转点法)。电磁法受环境磁场影响较大,限幅精度不高,且电磁线圈的磁场效应还可能影响零位稳定性;步进迭代法具有稳定性好、无额外硬件要求等优点,但步进迭代法受到粗寻北精度影响,限幅时间较长<sup>[6-8]</sup>。有文献提出了一种新的改进型步进限幅法,核心思想是将传统步进迭代法的零位跟踪逆转点改为平衡位跟踪逆转点,缩短了限幅时间,但存在误差源过多且不利于工程修正等问题<sup>[9]</sup>。因此,如何实现简单快速限幅成为陀螺寻北技术的关键问题之一。

本文在传统步进迭代限幅方法的基础上,提出一种两次步进预置北限幅方法<sup>[10]</sup>,通过两次步进使陀螺主轴摆动迅速限幅并以小摆角在真北附近运动。文中对不同  $K$  值(定义为悬挂带扭转系数与陀螺力矩系数的比值)和摆幅进行了仿真,取得了比较理想的效果,使限幅能在一个陀螺不跟踪摆动周期内完成。

## 2 传统步进迭代限幅法原理

陀螺经纬仪的核心组件是一根恒弹性材料悬带悬吊的一个质心下移的陀螺灵敏部,工作时高速自转的陀螺主轴将在重力矩作用下向北进动。陀螺主轴方位在真北附近时,水平进动遵循正弦规律,这为各种粗、精寻北算法提供了理论依据。

传统步进迭代限幅法的核心思想是利用零位多次跟踪逆转点,使悬带弹性势能不断消耗,从而减小摆幅。其原理是:不考虑空气阻尼的情况下,陀螺主轴运动时弹性势能和指北位能的总量一定,相互间不断转换,当陀螺主轴运动到一个逆转点时,具有最大弹性势能,此时使零位快速跟踪至与逆转点重合位置并停留,同时释放弹性势能;

若零位没有与北向重合就具有指北位能,将继续向北进动,到达另一个逆转点时获得新的最大弹性势能,零位快速跟踪至新的逆转点,又一次释放弹性势能。这时新位置的指北位能小于前一位置,即悬带零位向北逼近了,重复几次后,陀螺主轴摆幅即达到精寻北测量要求<sup>[11]</sup>。

## 3 平衡位与零位的关系

平衡位与零位的关系如图 1 所示,假设测量过程中无零位变化。设  $OA$  为陀螺经纬仪的初始架设位置, $OO'$  为粗寻北后悬带零位, $ON$  为真北方向, $OB$  为陀螺主轴的动平衡位置。在动平衡位置上存在以下关系:

$$-\alpha_m H \omega_E \cos \varphi + D_B \Delta \alpha = 0, \quad (1)$$

其中: $\alpha_m$  为陀螺主轴摆动平衡位置  $OB$  与真北  $ON$  之间的水平夹角; $H$  为陀螺灵敏部角动量; $\omega_E$  为地球自转角速度; $\varphi$  为测量地点的地理纬度; $D_B$  为悬带扭转系数; $\Delta \alpha$  为陀螺主轴摆动平衡位置与悬带零位之间的水平夹角; $\alpha_N$  为陀螺主轴静摆零位,即悬带零位  $OO'$  与真北方向  $ON$  之间的水平夹角。 $H \omega_E \cos \varphi = D_k$  为陀螺力矩系数,因此式(1)可以表示为:

$$-\alpha_m D_k + D_B \Delta \alpha = 0, \quad (2)$$

将  $\alpha_m = \alpha_N - \Delta \alpha$  代入式(2)得:

$$\alpha_m = K \Delta \alpha = \frac{K}{1+K} \alpha_N = \lambda \alpha_N, \quad (3)$$

式(3)中, $K = D_B / D_k$ ,  $\lambda = K / (1 + K)$ ,  $1 + K = T_1^2 / T_2^2$ ,  $T_1$  为陀螺经纬仪跟踪摆动周期,  $T_2$  为陀螺经纬仪不跟踪摆动周期。

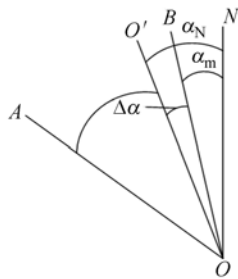


图 1 平衡位与零位关系图

Fig. 1 Figure of balance and zero position

## 4 两次步进预置北限幅法原理

传统步进迭代限幅法通过多次零位跟踪,逐



### 5.1 粗寻 $\alpha_N$ 北误差

完成粗寻北后,处理器将得到一个粗寻北方向值  $\alpha_N$ ,工程应用上, $\alpha_N$  存在的误差最终将导致步进电机转动角度  $\Delta\alpha_i$  以及第二次转动时机  $t_i$  存在误差,从而影响限幅效果,这是粗寻北算法带来的系统误差。理论上可以进行误差修正,但对于精寻北来说并非摆幅越小越好,适当放宽粗寻北阶段对时间的要求,采用合适的算法可以提高  $\alpha_N$  精度以减小系统误差。文献[16]中提出的粗寻北算法精度达到  $0.831 1'$ ,文献[17]中提出的粗寻北算法精度也有  $3'54''$ ,已经远远满足要求。同时,增加系统修正会有额外的数据处理负担,改善效果不会太明显。

### 5.2 转位电机误差

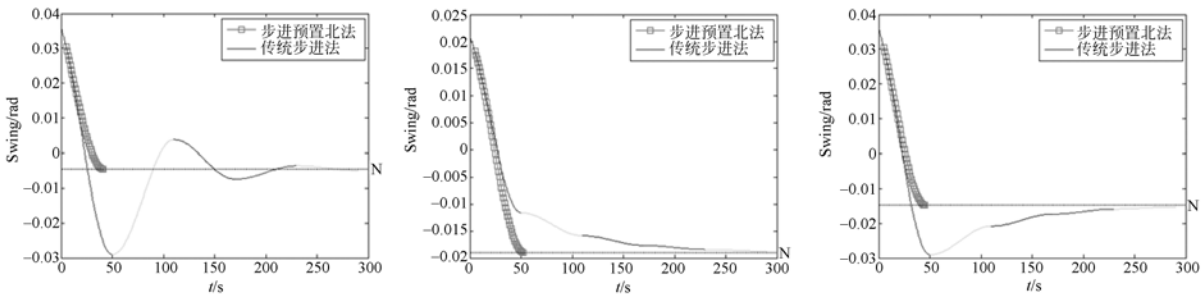
原理推导中假定回转电机转动是极短时间内完成的,实际应用中总会有时间差。假定回转电

机转动速度为  $2(^{\circ})/s$ ,陀螺主轴摆幅为  $2^{\circ}$ ,摆动周期为  $120 s$ ,则陀螺主轴摆动最大速度约为  $6.4 (^{\circ})/s$ ,回转电机转动速度与陀螺主轴摆动最大速度相差  $18.75$  倍,故回转电机转动期间可以认为陀螺主轴方位指向和摆动速度几乎不变。

## 6 仿真与实验测试

### 6.1 仿真

在 MATLAB 中对传统步进迭代限幅法和两次步进预置北限幅法进行对比仿真。两种方法陀螺灵敏部下放后陀螺主轴初始摆幅都受到下放稳定性和陀螺经纬仪架设偏北角大小的影响。同时,传统步进迭代限幅法对于不同  $K$  值和初始摆幅的仿真效果不同,如图 3 所示:



(a) 初始摆幅跨北,  $K < 1$       (b) 初始摆幅不跨北,  $K > 1$       (c) 初始摆幅跨北,  $K > 1$   
 (a)North in original swing,  $K < 1$     (b)North out of original swing,  $K > 1$     (c) North in original swing,  $K > 1$

图 3 不同初始摆幅与  $K$  值的仿真图

Fig. 3 Simulation charts of different original swings and  $K$  values

仿真中设陀螺不跟踪摆动周期为  $120 s$ 。从图 3(a)可以看出,当  $K < 1$  时,无论陀螺灵敏部下放稳定性如何,陀螺初始摆幅总会跨越真北,采用传统步进限幅方法限幅时,每一次步进陀螺灵敏部都将越过真北 1 次,壳体转动角度较大,需要反复多次转动才能达到理想限幅效果;当  $K > 1$  且陀螺灵敏部下放稳定性较好时初始摆幅不会跨越真北,如图 3(b)所示,采用传统步进限幅方法限幅,壳体通过多次转动从真北一侧逐渐逼近真北,达到限幅目的;图 3(c)表示  $K > 1$  且陀螺灵敏部下放稳定性较差或初始摆动受到干扰时的限幅情况,初始摆幅跨越真北,采用传统步进限幅方法时需要壳体 1 次步进到真北另一侧,再从真北一侧通过多次步进逐渐逼近真北,完成限幅。由图 3 可知当采用两次步进预置北限幅方法时, $K$  的取

值区间和初始摆幅情况都不会影响限幅在一个陀螺不跟踪摆动周期内完成,壳体只需要转动 2 次即可完成限幅,较传统步进限幅方法具有明显时间优势。

### 6.2 实验验证

利用智能陀螺试验样机进行两次步进预置北限幅法实验验证,该样机粗寻北精度为  $20'$ 。实验室条件下,先启动陀螺仪进行一次寻北,调整仪器至真北。再以真北为基准,通过控制回转电机转动,使陀螺仪架设在不同偏北角上,启动陀螺仪下放陀螺灵敏部后进行粗寻北和限幅实验,实验平台如图 4 所示。

采集的实验数据如表 1 所示。由测试数据可见两次步进预置北限幅法能将限幅时间稳定在一个陀螺不跟踪摆动周期( $120s$ )以内,最长用时

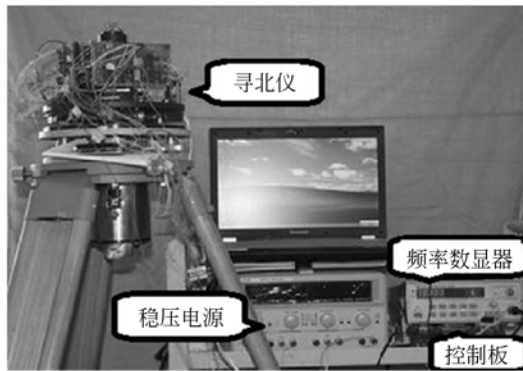


图 4 实验设备

Fig. 4 Experimental equipment

表 1 两次步进预置北限幅法实验结果

Tab. 1 Result of stepped presetting on north program

偏北/ ( $'$ )	测回	限幅前摆幅/ ( $'$ )	限幅后摆幅/ ( $''$ )	用时/ s
150	1	116	25	42.2
	2	95	2	58.8
	3	58	6	67.6
120	1	135	41	93.5
	2	80	8	75.1
	3	45	8	49.8
90	1	85	54	37.0
	2	112	6	64.9
	3	55	57	33.3
60	1	95	10	76.5
	2	74	21	80.5
	3	106	21	40.7

## 参考文献:

- [1] ZOU X Y, XUN Q, CHEN J B. A north-finder algorithm and its signal processing[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2004, 24(9): 804-807.
- [2] Andrew Wetherelt, Paul Hunt. Underground azimuth determinations using an adapted wild GAK1 [C]. *FIG XXII International Congress*. Washington, 2002: 4-15.
- [3] 邢晓刚, 林玉池, 冯莉, 等. 全自动陀螺经纬仪中粗寻北系统设计[J]. *计算机测量与控制*, 2008, 16(12): 1893-1899.
- XING X G, LIN Y CH, FENG L, et al.. Design of coarse north-finding system in all automated gyroscope theodolite[J]. *Computer Measurement &*

为 93.5 s, 最短用时为 33.3 s; 限幅后摆幅稳定在  $1'$  以内, 最大摆幅为  $57''$ , 最小摆幅为  $2''$ , 几乎能静止在真北方向上, 能够满足精寻北的精度要求。导致限幅时间有所差别的原因是每次仪器完成粗寻北后陀螺主轴的摆动方向和速度具有不可重复性, 有时先远离北向, 有时直接向北进动, 受到下放稳定性以及陀螺架设方位角大小的影响。

## 7 结 论

在传统步进限幅法基础上提出了一种两次步进预置北限幅法, 详细讨论了该方法的原理, 分析了主要误差因素对限幅效果的影响, 最后进行了仿真和实验测试, 结果表明两次步进预置北法能有效提高限幅效率。该方法保留了传统步进限幅法不需要增加系统硬件的优点; 采用平衡位置跟踪使得转位更加准确; 通过选择合适的粗寻北算法可以控制限幅精度; 限幅时间能稳定在一个陀螺不跟踪摆动周期(120 s)以内, 限幅精度能达到  $1'$ ; 同时对陀螺下放稳定性要求较低(摆幅小于  $3^\circ$ )。该设计方案在粗寻北有较好精度的前提下有效提高了限幅效率, 满足了工程应用对时间和精度的要求。但距离实际工程化还需要进一步验证陀螺架设偏北较大时(大于  $3^\circ$ )的情况, 需要考虑调整导流丝结构、改进止挡装置以及大角度限幅完成后如何跟踪光标等问题。

*Control*, 2008, 16(12): 1893-1899. (in Chinese)

- [4] 郭庆树, 魏鹏涛, 张勇. 光电积分式陀螺经纬仪用于发射阵地定向误差分析[J]. *中国惯性技术学报*, 2010, 18(3): 267-271.
- GUO Q SH, WEI P T, ZHANG Y. Analysis on orientation errors of photoelectric integral gyro-theodolite used in launching position[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, 18(3): 267-271. (in Chinese)
- [5] 张葆. 陀螺经纬仪精度分析[J]. *光学精密工程*, 1994, 2(6): 59-66.
- ZHANG B. Accuracy analysis for the gyro-theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1994, 2(6): 59-66. (in Chinese)
- [6] 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 M CH, XIA G S, LIN Y CH, *et al.*. Application of electronic compass to all automated intelligent gyroscope north finder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 719-724. (in Chinese)
- [7] 田育民,刘思伟,白云超. 摆式陀螺寻北仪粗寻北的新方法[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(4): 441-448.
- TIAN Y M, LIU S W, BAI Y CH. New method of rough north seeking applied in gyro-theodolite[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2009, 17(4):441-448. (in Chinese)
- [8] 万鹏,张海东. 陀螺经纬仪零位改进系数研究[J]. 北京测绘, 2005, (2):48-49.
- WAN P, ZHANG H D. Research of zero coefficient in gyro-theodolite [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2005, (2):48-49. (in Chinese)
- [9] 王振业,郭晓松,周召发. 步进快速限幅摆式陀螺寻北仪[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5):1244-1250.
- WANG ZH Y, GUO X S, ZHOU ZH F. Stepped and fast limiting pendulous gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5):1244-1250. (in Chinese)
- [10] ROMMEL N. Functional principle and technical concept of the high-precision surveying gyroscope GYROMAT 2000 [C]. *Symposium Gyro Technology*, Stuttgart, 1994.
- [11] 王绩,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 ZH, SHEN G X. Investigation on integral method of pendulous gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5):746-752. (in Chinese)
- [12] 林明春,夏桂锁,林玉池,等. 积分法在智能陀螺寻北系统中的应用研究[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(10):57-59.
- LIN M CH, XIA G S, LIN Y CH, *et al.*. Application of integral method in all automated intelligent gyroscope north finder [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, 26(10): 57-59. (in Chinese)
- [13] 李宗春,李广云,张冠宇,等. GYROMAT 2000 陀螺经纬仪定向程序探讨[J]. 测绘科学, 2006, 31(5):107-109.
- LI Z CH, LI G Y, ZHANG G Y, *et al.*. On the orientation process of GYROMAT 2000 [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(5): 107-109. (in Chinese)
- [14] 王庆林. 陀螺经纬仪定向系统误差研究[J]. 测绘科学, 2010, 35(5):56-57.
- WANG Q L. Study on systematic errors in gyro-theodolite orientation [J]. *Science of Surveying and mapping*, 2010, 35(5):56-57. (in Chinese)
- [15] OLEG N K. Gyroscopic stabilization of non-conservation systems [J]. *Phys. Lett. A*, 359 (2006) 204-210.
- [16] 董桂梅,冯莉,林玉池,等. 趋势预测 1/8 周期快速寻北法 [J]. 光学精密工程, 2011, 9(1):53-57.
- DONG G M, FENG L, LIN Y CH, *et al.*. Fast north-seeking method based on 1/8 period prediction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 9(1):53-57. (in Chinese)
- [17] 冯莉,董桂梅,林玉池,等. 基于智能陀螺经纬仪实现快速初寻北 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1582-1586.
- FENG L, DONG G M, LIN Y CH, *et al.*. Quick coarse north-seeking based on intelligent gyro theodolite system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7):1582-1586. (in Chinese)
- [18] DMT. Operator's Guide GYROMAT 2000[G].

#### 作者简介:



郭晓松(1957—),男,河南镇平人,教授,博士生导师,1983年、1995年于第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士学位,主要从事定位定向技术、光电瞄准技术、自动检测技术等方面的研究。E-mail: gxs744202@163.com



戴宇佳(1989—),男,湖南湘潭人,硕士研究生,2012年于第二炮兵工程大学获得学士学位,主要从事摆式陀螺仪自主定位定向方面的研究。E-mail: dyjshijqy@126.com