

文章编号 1004-924X(2013)05-1244-07

# 步进快速限幅摆式陀螺寻北仪

王振业\*, 郭晓松, 周召发

(西安高技术研究所, 陕西 西安 710025)

**摘要:**针对摆式陀螺寻北仪存在的限幅效率低的工程实际问题,提出了一种步进快速限幅方法,介绍了该方法的实现原理和步骤,分析了 3 种主要测量误差对限幅效果的影响,论证了步进快速限幅法在理论上的可行性,最后将步进快速限幅法成功应用于摆式陀螺寻北仪上。设计了相应的限幅试验,利用摆动的平衡位置主动跟踪逆转点,实现了对摆幅的快速精确限制。理论和试验结果均表明:提出的步进快速限幅法保留了传统步进法不需要增加系统硬件的优点,有效克服了采用电磁阻尼法限幅时电磁干扰力矩的问题,保持了限幅的可靠性。基于步进快速限幅方法的摆式陀螺寻北仪能在一个步进周期(约 60 s)内实现对摆幅的快速精确限制,较传统步进法可以节省 2 个以上的步进周期,为缩短寻北时间提供了理论支撑和实践依据。

**关键词:**摆式陀螺寻北仪;步进快速限幅法;电磁阻尼法;摆幅

**中图分类号:** V241.5; V666.123 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132105.1244

## Stepped and fast limiting pendulous gyroscope

WANG Zhen-ye\*, GUO Xiao-song, ZHOU Zhao-fa

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

\* Corresponding author, E-mail: wzy20040412@163.com

**Abstract:** A stepped and fast limiting method to allow the equilibrium position of a swing to track the turning point was put forward for improving the limiting efficiency of pendulous gyroscopes. The working principle and achieving steps were introduced and the influences of three types of measurement errors on the limiting effect were analyzed. Then the feasibility of the proposed limiting method was demonstrated in theory. Finally, the method was applied to a pendulous gyroscope, and the swing range was limited exactly and rapidly by using the equilibrium position of the swing to track the turning point. The limiting experiment was designed based on the proposed limiting method. The theory and experiment results show that the new method has overcome the electromagnetic interference torque problem from the electromagnetic damping method and can keep the limiting reliability without adding system hardware. The pendulous gyroscope can just spend about 60 s to limit the swing, which saves more than 2 step periods than traditional one. This method can provide a theoretical support and practical basis for shorting the time of north seeking.

**Key words:** pendulous gyroscope; stepped and fast limiting method; electromagnetic damping method; swing range

收稿日期: 2012-11-14; 修订日期: 2013-01-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41174162)

## 1 引言

摆式陀螺寻北仪是一种能够自主测定真北方向的精密定向仪器,广泛应用于军民各个领域。随着光电技术、传感器技术及计算机技术在摆式陀螺寻北仪中的应用,摆式陀螺寻北仪已完成了由手动寻北向全自动寻北的成功转变,各种寻北方法也应运而生。目前,摆式陀螺寻北仪通常采用粗、精寻北相结合的方式来提高寻北精度和速度。文献[1]和文献[2]分析了探测误差对寻北精度和速度的影响,认为精寻北精度一般选择为 $\pm 10' \sim \pm 20'$ 。陀螺灵敏部下放后的初始摆幅受粗寻北精度、下放稳定性及转位误差等因素的影响,很难直接进入精寻北范围,例如,目前较为先进的电子罗盘粗寻北法<sup>[3]</sup>使用的KVHC100电子罗盘的标称精度为 $\pm 30'$ ,再加上转位误差和下放稳定性的影响,陀螺灵敏部下放后的摆幅通常为 $\pm 2^\circ$ 左右,远超出了精寻北的范围,因此,必须采用适当的方法限制摆幅。

目前通常采用电磁阻尼法<sup>[4]</sup>和步进法<sup>[5-6]</sup>来限制陀螺灵敏部的摆幅。电磁阻尼法是通过在陀螺灵敏部上施加电磁阻尼力矩来限制陀螺灵敏部的摆幅,如果力矩控制得当,电磁阻尼法能迅速将摆幅限制在适当范围内,但目前国内的电磁阻尼力矩器的控制精度受到电磁线圈的磁滞效应以及绕线工艺等因素的影响而难以提高,而且电磁线圈的磁场效应还可能影响零位的稳定性,这些不足限制了电磁阻尼法的应用;步进法可以在不增加系统硬件的条件下实现对陀螺灵敏部摆幅的限制,并且对零位稳定性和寻北系统的可靠性不产生影响,因此,在陀螺寻北仪中得到了广泛的应用,但是步进法的限幅效率还有待于提高,例如,当初始摆幅为 $\pm 2^\circ$ 时,步进法通常需要采用3~4个步进周期(一个步进周期约60 s)才能使陀螺灵敏部位于精寻北范围内摆动。因此,如何快速有效限幅成为摆式陀螺寻北仪缩短寻北时间的瓶颈问题之一,本文正是针对这一工程实际问题进行了深入研究,在传统步进法的基础上提出了一种步进快速限幅方法,并将该方法成功应用于摆式陀螺寻北仪上,通过试验验证了方法的可行性。

## 2 步进法

步进法最早由文献[5]提出,后来由文献[6]进一步阐述用于粗寻北,其核心思想是通过跟踪逆转点释放悬带的弹性能。具体实现步骤为:当陀螺灵敏部摆动至一个逆转点时,启动跟踪机构将陀螺灵敏部的扭力零位迅速跟踪至逆转点处,此时,悬带不受扭力作用,弹性能为零,而指北位能达到最大;经过半个不跟踪周期,陀螺灵敏部摆动至第二个逆转点处,由于扭力零位还在第一个逆转点处,悬带受扭,弹性能和指北位能都达到瞬时最大,此时再次启动跟踪机构将陀螺灵敏部的扭力零位跟踪至第二个逆转点处;释放悬带的弹性能,在第二个逆转点处的指北位能将小于第一个逆转点,即陀螺灵敏部向北方向趋近了一步,此时第一个步进周期结束。经过数个步进周期,陀螺灵敏部的摆幅将越来越小,从而实现限幅的目的。步进法的原理示意图如图1所示。

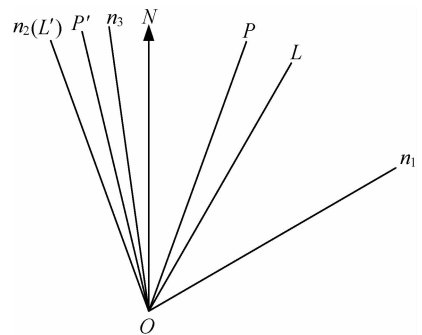


图1 步进法原理示意图

Fig. 1 Principle of stepped method

图1中ON表示真北方向,OP表示下放后的平衡位置,OL表示下放后的扭力零位位置, $On_1$ 表示第一个逆转点位置, $On_2$ 表示第二个逆转点位置, $OL'$ 表示一次步进后的零位位置(其与 $On_2$ 重合), $OP'$ 表示步进后的摆动平衡位置, $On_3$ 表示步进后第三个逆转点的位置, $\angle n_1On_2$ 表示步进前的摆幅, $\angle n_2On_3$ 表示步进后的摆幅。由图1可以明显看出,通过步进限制了摆幅,同时由于 $\angle n_2OP'$ 不可能等于零,因此通过步进法不可能使陀螺灵敏部停止摆动,只能通过多次步进使摆幅无穷趋近于0。

### 3 步进快速限幅法

#### 3.1 步进快速限幅法原理

由上面的分析可知,通过步进法可以限制陀螺灵敏部的摆幅,但当陀螺灵敏部的初始摆幅较大时,往往需要经过多个步进周期才能使陀螺灵敏部的摆幅限制在精寻北范围内。步进法是利用扭力零位来跟踪逆转点的,如果采用平衡位置来跟踪逆转点,将会使限幅效果更加显著,这就是步进快速限幅法的核心思想。步进快速限幅法的实现原理如图 2 所示。图中  $ON$  表示真北方向; $OP$  表示下放后的平衡位置; $OL$  表示下放后的扭力零位位置; $On_1$  表示下放后的初始位置,即第一个逆转点位置; $On_2$  表示第二个逆转点位置; $OL'$  表示一次步进后的零位位置; $OP'$  表示步进后的摆动平衡位置,它与  $On_2$  重合,下面统一用  $OP'$  表示。

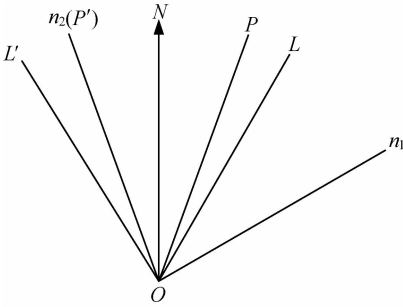


图 2 步进快速限幅法原理示意图

Fig. 2 Principle of stepped and fast limiting method

步进快速限幅法的实现步骤是:当陀螺灵敏部下放后,通过光电传感器监测陀螺灵敏部的摆动,确定第一个逆转点的位置  $On_1$ ,然后通过最大速度法<sup>[7-8]</sup>或计时法<sup>[9]</sup>确定陀螺灵敏部摆动的平衡位置  $OP$ ,再通过单片机计算出角度  $\angle POn_1$  和  $\angle POL$ ,由于  $OP'$  与  $On_1$  关于  $OP$  对称,因此可以计算出  $\angle POP'$ ,根据精寻北原理<sup>[6]</sup>还可以计算出  $\angle PON$ 。

$$\angle PON = K \times \angle POL. \quad (1)$$

$K$  为零位修正系数,由文献<sup>[10]</sup>可知:

$$K = \frac{D_B}{D_K} = \frac{T_1^2 - T_2^2}{T_2^2}, \quad (2)$$

式(2)中: $T_1$ 为跟踪摆动周期, $T_2$ 为不跟踪摆动周期, $D_K$ 为陀螺的指北力矩系数, $D_B$ 为悬带的扭力

系数。

由  $\angle POP'$ 、 $\angle PON$  和  $\angle POL$  可以得出  $\angle LOL'$ 。

$$\angle LOL' = \angle POL + \angle POP' + \angle P'OL', \quad (3)$$

$$\angle P'OL' = \frac{\angle P'ON}{K}, \quad (4)$$

$$\angle P'ON = \angle POP' - \angle PON. \quad (5)$$

当陀螺灵敏部摆动至第二个逆转点  $On_2$  处时,根据计算出的角度  $\angle LOL'$  转动陀螺灵敏部跟踪至  $OL'$  处,此时新的平衡位置  $OP'$  将和第二个逆转点  $On_2$  重合,由于逆转点处的速度为 0,而  $OP'$  又是平衡位置,因此当陀螺灵敏部步进至  $OL'$  位置时将不再摆动,通过一次步进就能使摆幅变为 0。

#### 3.2 测量误差对摆幅的影响

上面的原理分析是一种理想状态,由(3)式可知,计算得到的  $L'$  位置与逆转点  $On_1$ 、平衡位置  $OP$ 、跟踪转位这 3 个因素有关,受这些因素的影响,陀螺灵敏部在跟踪至  $OL'$  位置时,不可能在  $OP'$  方向上静止,它会围绕  $OP'$  方向做微幅摆动,正是这种微幅摆动,为下一步的精寻北提供摆幅条件,下面将详细分析这 3 种测量误差对步进后摆幅的影响。

##### 3.2.1 逆转点 $On_1$ 的测量误差对摆幅的影响

在理想状态下,由于下放后的初始位置速度为零,即陀螺摆的动能为零,陀螺摆在初始位置只具有指北位能和弹性能,这与逆转点处的能量形式一样,因此,根据能量守恒定律,在理想状态下,下放后的初始位置即第一个逆转点位置,但实际寻北过程中,由于受到锁放机构平稳性、外界振动以及电磁干扰等因素的影响,测得的初始位置总会偏离逆转点一定的角度,记逆转点的测量误差为  $\Delta\alpha$ ,下面具体分析  $\Delta\alpha$  对摆幅的影响。

当存在逆转点测量误差  $\Delta\alpha$  时,设摆幅变化为  $\Delta_1$ ,测量误差和摆幅变化之间的关系可用图 3 来表示。图 3 中  $ON$  表示真北方向, $On_1$  表示下放后实际的逆转点位置, $On_{11}$  表示下放后的初始位置, $OL$  表示下放后的零位位置, $OP$  表示下放后的平衡位置, $On_2$  表示实际的逆转点位置, $On_{22}$  表示计算得到的逆转点位置,即步进后的平衡位置, $OL'$  表示计算得到的零位位置, $OA$  表示通过快速步进后的逆转点位置,图中有关系  $On_1$  和

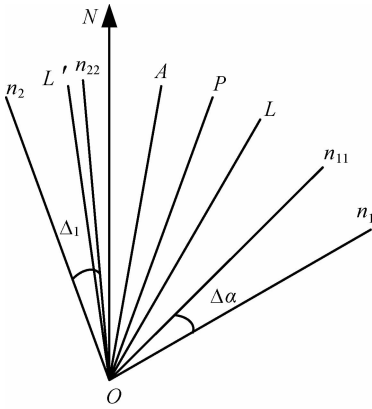


图 3 逆转点测量误差对摆幅的影响示意图

Fig. 3 Effect of measurement error of reversal point on swing range

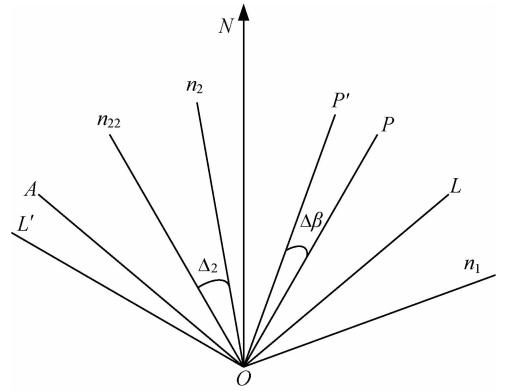


图 4 平衡位置测量误差对摆幅的影响示意图

Fig. 4 Effect of measurement error of equilibrium position on swing range

$On_2$ 关于 $OP$ 对称, $On_{11}$ 和 $On_{22}$ 关于 $OP$ 对称, $On_2$ 和 $OA$ 关于 $On_{22}$ 对称,因此有角度关系:

$$\Delta_1 = \Delta\alpha. \quad (6)$$

### 3.2.2 平衡位置 $OP$ 的测量误差对摆幅的影响

由步进快速限幅法的测量原理可知,平衡位置是通过速度法或计时法测得,受采样周期、陀螺不跟踪周期测量精度以及计时误差等因素的影响,在测量平衡位置时必定存在测量误差,将平衡位置测量误差记为  $\Delta\beta$ ,下面具体分析  $\Delta\beta$  对摆幅的影响。

当存在平衡位置测量误差  $\Delta\beta$  时,设摆幅变化为  $\Delta_2$ ,测量误差和摆幅变化之间的关系可用图 4 表示。图中  $ON$  表示真北方向, $On_1$  表示下放后实际的逆转点位置, $OL$  表示下放后的零位位置, $OP$  表示下放后实际的平衡位置, $OP'$  表示测量得到的平衡位置, $On_2$  表示实际的逆转点位置, $On_{22}$  表示计算得到的逆转点位置, $OL'$  表示计算得到的零位位置, $OA$  表示通过快速步进后的逆转点位置。图中有  $On_1$  和  $On_2$  关于  $OP$  对称, $On_1$  和  $On_{22}$  关于  $OP'$  对称, $On_2$  和  $OA$  关于  $On_{22}$  对称,因此有角度关系:

$$\Delta_2 = 2\Delta\beta. \quad (7)$$

### 3.2.3 跟踪转位误差对摆幅的影响

由于转台转位误差以及跟踪速度的影响,使跟踪后的零位位置与计算所得的零位位置不重合,这必然会引起摆幅的变化,将转位误差记为  $\Delta\gamma$ ,下面将具体分析  $\Delta\gamma$  对摆幅的影响。

当存在转位误差  $\Delta\gamma$  时,设摆幅变化为  $\Delta_3$ ,转位误差和摆幅变化之间的关系可用图 5 来表示,

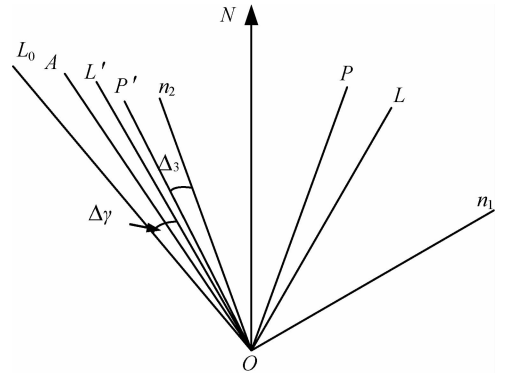


图 5 转位误差对摆幅的影响示意图

Fig. 5 Effect of transposition error on swing range

图中  $ON$  表示真北方向, $On_1$  表示下放后实际的逆转点位置, $OL$  表示下放后的零位位置, $OP$  表示下放后实际的平衡位置, $On_2$  表示计算得到的逆转点位置, $OL'$  表示计算得到的零位位置, $OL_0$  表示经过快速步进后的零位位置, $OP'$  表示快速步进后实际的平衡位置, $OA$  表示通过快速步进后的逆转点位置。图中有  $On_1$  和  $On_2$  关于  $OP$  对称, $On_2$  和  $OA$  关于  $OP'$  对称。根据图 5 有如下的角度关系:

$$\frac{\angle NO_{n_2}}{2\Delta_3 - \angle AOL'} = \frac{\angle NO_{n_2} + \Delta_3}{\Delta\gamma + \Delta_3 - \angle AOL'} = K. \quad (8)$$

因此

$$\Delta_3 = \frac{K}{(K+1)}\Delta\gamma. \quad (9)$$

### 3.2.4 综合误差引起的摆幅变化

实际寻北过程中下放后的摆幅往往是受以上

3 种误差综合影响的结果,当同时考虑 3 种误差对摆幅的影响时,它们之间的关系可用图 6 来表示。

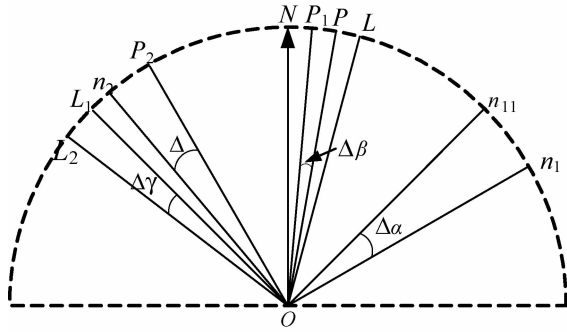


图 6 3 种误差对摆幅的综合影响示意图

Fig. 6 Combined effects of above three errors on swing range

图 6 中  $ON$  表示真北方向,  $OP$  表示实际的平衡位置,  $OL$  表示下放后的实际零位,  $On_1$  表示实际的逆转点位置,  $On_{11}$  表示下放后测得的初始位置,  $OP_1$  表示通过最大速度法或计时法得到的平衡位置,  $OP_2$  表示步进后的平衡位置,  $On_2$  表示实际的逆转点位置,  $OL_1$  表示通过计算得到的步进后的零位位置,  $OL_2$  表示步进后实际零位。

根据随机误差标准差合成公式<sup>[11]</sup>可得总误差  $\Delta$  可以表示为:

$$\Delta = \sqrt{(\Delta_1)^2 + (\Delta_2)^2 + (\Delta_3)^2} = \sqrt{(\Delta\alpha)^2 + 4(\Delta\beta)^2 + \left[ \frac{K}{(K+1)}\Delta\gamma \right]^2}. \quad (10)$$

设逆转点测量误差为  $\pm 10'$ , 平衡位置测量误差为  $\pm 5'$ , 跟踪转位误差为  $\pm 1'$ ,  $K = 0.8$ , 则总误差为  $\pm 14.15'$ , 正好位于精寻北范围内, 因此经过一次步进就能迅速限制陀螺灵敏部的摆幅, 使其位于精寻北范围内摆动, 如果摆幅偏小, 可以根据仪器的限幅效果, 调整跟踪转位精度, 使摆幅位于精寻北范围。

## 4 步进快速限幅摆式陀螺寻北仪样机研制与试验

### 4.1 试验设备组成

由上面的理论分析可知, 步进快速限幅法是一种不需要增加系统硬件而能有效限制陀螺灵敏部摆幅的方法, 理论分析还表明通过步进快速限幅方法可以在一个步进周期内(约 60 s)使摆幅迅

速减少甚至使陀螺灵敏部停摆, 而步进法则难以达到这种限幅效果。因此为验证步进快速限幅法的可行性, 设计了相关试验, 试验设备如图 7 所示。

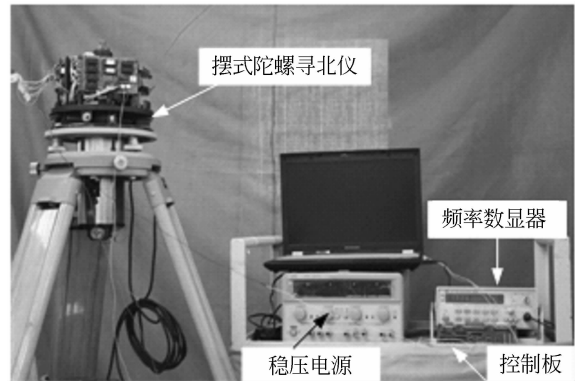


图 7 试验设备

Fig. 7 Experimental equipment

试验设备由 5 台仪器组成: 摆式陀螺寻北仪样机、稳压电源、计算机、频率数显器和控制板。稳压电源用于给摆式陀螺寻北仪样机供电; 频率数显器用于观测陀螺灵敏部的摆动情况, 当陀螺灵敏部摆动时, 位于灵敏部上的摆镜跟着摆动, 通过相应的光路系统使摆动光标成像于 CCD 上, CCD 经过光电转换将光信号转换为电压信号, 再将电压信号转换为相应的频率信号, 最后由频率数显器显示, 因此频率数显器上频率的变化真实反应了陀螺灵敏部的摆动情况, 当陀螺灵敏部位于逆转点时, 会在一个频率上停留 1~2 s, 然后向相反的方向变化, 当陀螺灵敏部从逆转点位置摆动半个不跟踪周期(大概为 60 s)时记录下当时的频率, 这个频率对应的位置即摆动的平衡位置; 计算机内设计了相应的角度计算程序用于将频率信号转换为相应的角度信息, 从而计算出陀螺灵敏部摆动的角度; 控制板上有多个控制按钮, 用于在调试过程中人工控制摆式陀螺寻北仪的锁放、跟踪操作; 摆式陀螺寻北仪样机主要由以下 5 部分组成, 分别为光栅测角系统、回转跟踪机构、光路系统、陀螺灵敏部、锁放机构, 光栅测角系统用于精确测量回转跟踪机构转动的角度, 锁放机构采用电机驱动实现自动锁放, 具有快速和慢速锁放两种模式, 由于样机处于调试阶段, 两种锁放模式可以人工进行选择。试验环境为实验室环境, 试验前先利用标定好的基准点将陀螺寻北仪架设至真北附近。

## 4.2 试验方案

试验分为两部分,第一部分用来验证快速寻北法的可行性,采用慢速下放模式,使陀螺灵敏部的摆幅在 $1.5^\circ$ 以内,然后进行限幅,限幅后观察摆幅的变化并记录;第二部分用来验证快速寻北法在较大摆幅时的限幅效果,采用快速下放模式,使陀螺灵敏部的摆幅位于 $3^\circ$ 以内,然后进行限幅,限幅后观察摆幅的变化并记录。

试验时先记录下第一个逆转点的位置,然后等待陀螺灵敏部摆动至第二个逆转点时记录下第二个逆转点的位置,这2个逆转点之间的摆幅即为限幅前的摆幅;当陀螺灵敏部摆动至第三个逆转点时,采用控制板启动跟踪系统跟踪陀螺灵敏部的摆动,跟踪时有意识的将跟踪时间稍加长,使自摆零位超出第三个逆转点位置;当陀螺灵敏部摆动至第四个逆转点位置时记录下此时的逆转点位置;当陀螺灵敏部摆动至第五个逆转点位置时再记录下第五个逆转点的位置,第四、五个逆转点之间的摆幅即为限幅后的摆幅。

## 4.3 试验结果及结论

试验结果经整理后如表1所示。从表1数据可以得出以下三个重要结论:

(1)从第4组试验结果可以明显看出通过步进快速限幅法能在一个步进周期内(约60 s)较大幅度的限制摆幅,甚至使陀螺灵敏部停止摆动,这充分证明了步进快速限幅法理论分析的正确性;

(2)从大摆幅的试验数据可以明显看出,当陀螺灵敏部摆幅较大时,通过步进快速限幅法能在一个步进周期内(约60 s)迅速限制陀螺灵敏部的摆幅,这充分说明了步进快速限幅法的可行性。

(3)从表中数据可以看出限幅效果相差明显,也不是每次采用步进快速限幅法限幅都能使陀螺灵敏部停止摆动,造成这种现象的主要原因是试验过程中没有经过精确计算,跟踪时间也难以准确控制,因此限幅效果的随机性较大。

## 参考文献:

- [1] 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 gyrotheod-

表1 步进快速限幅法试验结果

Tab.1 Experimental results of stepped and fast limiting method (Unit:  $'$ )

序号	小摆幅限幅		大摆幅限幅	
	限幅前	限幅后	限幅前	限幅后
	摆幅	摆幅	摆幅	摆幅
1	75.6	36.1	170.6	75.9
2	81.5	39.2	174.2	86.5
3	39.2	14.0	166.4	78.6
4	14.0	0.05	167.2	18.3
5	72.3	41.6	169.1	42.7
6	41.6	20.8	174.3	81.7

## 5 结论

本文在传统步进法基础上提出了一种步进快速限幅方法,详细论述了该方法的实现原理和步骤,分析了测量误差对摆幅的影响,最后在基于步进快速限幅方法的摆式陀螺寻北仪上设计了限幅试验,证明了采用步进快速限幅方法可以有效解决限幅效率低的工程实际问题。步进快速限幅法保留了传统步进法不需要增加系统硬件的优点,有效克服了采用电磁阻尼法限幅时电磁干扰力矩的问题,保持了限幅的可靠性。理论和试验结果均表明步进快速限幅法通过一次步进就可以使陀螺灵敏部的摆幅限制在适当范围内,比传统步进法缩短了2个以上的步进周期(一个步进周期约60 s),例如,限幅前摆幅为 $167.2'$ ,通过一次步进就能将摆幅限制到 $18.3'$ 范围内摆动;理论和试验结果还表明步进快速限幅法通过一次步进甚至可以使陀螺灵敏部停止摆动,例如,限幅前摆幅为 $14'$ ,通过一次步进能将摆幅限制到 $3''$ 以内摆动,几乎可以认为陀螺灵敏部在限幅后停摆。试验结果充分证明了步进快速限幅法的可行性和限幅效果的显著性,是一种高效的限幅方法。本文可以为高精度快速摆式陀螺寻北仪的研制提供理论支撑和实践依据。

olite used in launching position [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, 18(3): 267-271. (in Chinese)

- [2] 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 gyrotheodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1994,2(6): 59-66.

(in Chinese)

- [3] 齐永岳,赵美蓉,林玉池. 陀螺经纬仪自动粗寻北系统的设计研究[J]. 传感器与微系统, 2009, 25(5): 19-21.  
 QI Y Y, ZHAO M Y, LIN Y CH. Study on automated coarse north-finding system of gyroscope [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, 25(5): 19-21. (in Chinese)
- [4] 白云超,刘思伟,田育民. 自动化陀螺经纬仪中阻尼力矩器的设计 [J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(6): 752-755.  
 BAI Y CH, LIU S W, TIAN Y M. Design of damping torque for automatic gyrotheodolite [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2009, 29(6): 752-755. (in Chinese)
- [5] 范俊智. 陀螺经纬仪阻尼法的稳定观测 [J]. 矿山测量, 1995, (2): 8-10.  
 FAN J ZH. The stable observation of damping method in the gyrotheodolite [J]. *Mine Surveying*, 1995, (2): 8-10. (in Chinese)
- [6] 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 ZH, SHEN G X. Investigation on integral method of pendulous gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 746-752. (in Chinese)
- [7] 夏桂锁. 陀螺经纬仪自动寻北关键技术的研究

[D]. 天津:天津大学, 2006.

- XIA G S. *The Key Technology of Automatic North-seeking in the Gyro-theodolite* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese)
- [8] 张金梅. 陀螺经纬仪快速寻北的算法研究 [D]. 天津:天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2008.  
 ZHANG J M. *Algorithm Study on Fast North-seeking of Gyro-theodolite* [D]. Tianjin: Precision Instrument and Electronic Engineering Institute, Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- [9] 林家聪,桑光灿,孙建明. 陀螺经纬仪计时摆幅法定向 [J]. 中国矿业学院学报, 1985, 16-32.  
 LIN J C, SANG G C, SUN J M. The orientation with the method to record the swing time in the gyro-theodolite [J]. *Journal of China Mining Institute*, 1985, 16-32. (in Chinese)
- [10] 万朋,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, ZHAN H D. Research of zero coefficient in gyro-theodolite [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2005, (2): 48-49. (in Chinese)
- [11] 费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京:机械工业出版社, 2004.  
 FEI Y T. *Error Theory and Data Processing* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004. (in Chinese)

#### 作者简介:



**王振业**(1984—),男,湖南娄底人,博士研究生,2006年、2009年于第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士学位,主要从事全方位高精度快速陀螺寻北仪的研制工作和自主定位定向理论研究。E-mail: wzy20040412@163.com



**周召发**(1973—),男,重庆人,博士,副教授,硕士生导师,1996年、2002年、2007年于第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事定位定向与基准传递方面的研究。E-mail: zzftxy@163.com



**郭晓松**(1957—),男,河南镇平人,硕士,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