

文章编号 1004-924X(2013)12-3072-08

摆式陀螺复合式全方位快速寻北

张志利, 陈 河*, 周召发

(第二炮兵工程大学 兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 陕西 西安 710025)

摘要: 由于现有摆式陀螺寻北仪对初始架设方位要求严格, 难以实现全方位快速寻北, 本文提出了一种复合式全方位快速寻北方案。研究了该方案涉及的摆式陀螺大偏北角运动规律、全方位快速预定向和小偏北角的快速粗寻北和精寻北。根据刚体动力学原理建立了摆式陀螺大偏北角运动方程, 运用数值分析和曲线拟合方法求得方程的近似解析解。依据上述运动规律, 分析了 1/2 周期和 1/4 周期全方位步进预定向的寻北时间和寻北效果, 并对寻北策略进行了优化。在分析曲线拟合快速粗寻北和步进快速限幅法的基础上, 提出了一种快速步进粗寻北限幅方法。最后, 结合上述方法和光电积分法, 提出了一种复合式全方位快速寻北方案。仿真结果表明: 优化后的步进策略可以在 190 s 内将陀螺主轴步进到真北 $\pm 300'$ 以内; 快速步进粗寻北限幅法可以在 95 s 内完成小偏北角粗寻北和限幅; 复合式寻北总时间不超过 11 min。结果显示该寻北方案有效克服了对初始架设方位的限制, 为摆式陀螺全方位快速高精度寻北提供了理论支撑和实践依据

关键词: 摆式陀螺; 全方位寻北; 复合寻北; 步进法; 曲线拟合

中图分类号: V241.5; U666.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132112.3072

Complex rapid omnibearing north seeking of pendulous gyroscope

ZHANG Zhi-li, CHEN He*, ZHOU Zhao-fa

(State Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory and Technology,
the Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

* Corresponding author, E-mail: chenhe2008888@126.com

Abstract: The pendulous gyro north seeker is difficult to complete the rapid omnibearing north seeking, for it is limited by initial erection azimuth seriously. In this paper, a complex rapid omnibearing north seeking method was put forward and the technological points involved such as the motion of pendulous gyro in a large azimuth, rapid omnibearing pre-direction, and fast coarse and precise north seeking in a small azimuth were investigated. Firstly, the motion equations of pendulous gyro in the large azimuth were established based on principles of rigid dynamics and its approximate analytic solution was gained by using the numerical analysis and curve fitting method. On the basis of the approximate analytic solution, the north seeking time and results of 1/2 period and 1/4 period step-measuring method were carefully studied and the step strategy was optimized. Then, a fast step coarse seeking and limiting method was proposed based on the analysis of curve fitting fast coarse north seeking and step fast limiting methods. Finally, a complex omnibearing method was designed with the combina-

收稿日期: 2013-06-03; 修订日期: 2013-07-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41174162)

tion of rapid omnibearing rough north seeking, fast coarse north seeking and limiting and the photoelectric integral method. Simulation results show that the basic shaft of the gyro can be stepped to the position of $\pm 300'$ from north within 190 s by optimized step strategy, the coarse north seeking and limiting can be achieved within 95 s, and the total time cost of the complex method is less than 11 min. With the complex method proposed, the azimuth angle in any direction can be determined accurately in a short time.

Key words: pendulous gyroscope; omnibearing north-seeking; complex north seeking; step-measuring method; curve fitting

1 引言

摆式陀螺经纬仪定向具有自主性强、精度高、寻北速度快等优点,被广泛应用于矿山测量、工程测量和军事测量中。国外先进的陀螺经纬仪,如 Gyromat-2000、MARCS 都能实现全方位寻北,而国产陀螺经纬仪的寻北定向仍受架设范围($\pm 8 \sim \pm 15^\circ$)的限制。目前通常先采用磁罗盘定向使初始架设方位位于规定范围内,然后采用相应的粗寻北方法使陀螺主轴方位角满足精寻北要求,最后通过不同的精寻北观测方法,实现陀螺经纬仪的高精度测量。由于磁罗盘定向受环境磁场影响大,不能完全保证初始架设方位位于规定范围内。为克服该方法的不足,文献[1]提出利用检测陀螺力矩实现陀螺经纬仪粗寻北的方法,该方法能够实现 $-90 \sim +90^\circ$ 任意方位粗寻北,但还不能实现全方位($-180 \sim +180^\circ$)寻北。

由于非线性问题的复杂性,目前国内对摆式陀螺运动规律的研究大都局限于小偏北角的情况,对大偏北角运动规律的理论 and 试验研究基本处于空白状态[2]。受此限制,对粗寻北方法的研究也都基于小偏北角运动规律,局限于严格限制初始架设范围情况下的快速粗寻北[3-4]。对摆式陀螺大偏北角运动规律和全方位快速粗寻北方法研究的缺乏,成为制约国产陀螺经纬仪实现快速全方位定向的瓶颈之一。因此,本文首先利用刚体动力学原理建立摆式陀螺大偏北角运动方程,然后将数值分析和曲线拟合相结合求得方程的近似解析解,从而进一步认识其全方位运动规律,为实现全方位寻北提供理论依据。根据得到的运动规律对任意位置步进快速粗寻北进行深入分析,提出优化后的步进策略;针对小偏角粗寻北,在分析拟合法快速粗寻北和步进快速限幅法的基础

上,提出快速粗寻北限幅法。最后,结合光电积分法提出了基于组合策略的全方位快速精确寻北方法。

2 陀螺灵敏部大偏北角运动规律

2.1 陀螺灵敏部运动方程

陀螺灵敏部力学模型如图 1 所示,它由陀螺房、陀螺转子和悬挂柱组成,通过悬挂带悬挂于仪器的壳体上,处于自由悬挂状态。悬挂带长为 l ,灵敏部重心为 G ,悬挂带与陀螺房接触点为 O_1 , G 与 O_1 的距离为 a ,与转子中心 O_2 距离为 d 。寻北时转子轴偏离真北的水平角为 α (逆时针为正, $-180 \sim +180^\circ$),俯仰角为 β (逆时针为正, $0 \sim 90^\circ$),悬挂带与铅垂线夹角为 γ ,寻北点的纬度为 φ 。

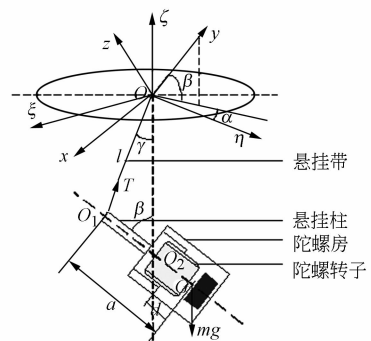


图 1 陀螺灵敏部力学模型

Fig. 1 Mechanical model of pendulous gyroscope

图中坐标系 $O-\xi\eta\zeta$ ($O-ENZ$) 为固连于地球的地理坐标系, $O\xi(OE)$ 指向东, $O\eta(ON)$ 指向真北, $O\zeta(OZ)$ 指向天顶; 坐标系 $O-xyz$, 原点为 O , z 轴沿陀螺房对称轴指向上, y 轴与转子自转角动量方向一致, x 按右手法则确定。根据刚体动力学知识, 忽略次要因素, 可得陀螺灵敏部运动方程如

下^[5]：

$$\begin{cases} H(\omega_e \sin \varphi + \dot{\alpha}) = m g a \beta \\ H(\omega_e \sin \alpha \cos \varphi + \dot{\beta}) = -D_B(\alpha - \alpha_n) - K_D \dot{\alpha} \end{cases}, \quad (1)$$

式中： H 为转子自转角动量， ω_e 为地球自转角速度， m 为灵敏部质量， g 为重力加速度， α_n 为悬挂带扭矩为零时的方位角； D_B 为悬挂带扭力系数； K_D 为阻尼系数。

该方程为平面自治系统。由于空气阻尼很小，可以忽略 K_D ^[5]。将方程中第一个式子中的 β 代入第二式，令 $D_K = H\omega_e \cos \varphi$ ， $K = D_B/D_K$ ， $\omega_0 = \sqrt{m g a D_K}/H$ ，得 α 满足方程：

$$\ddot{\alpha} + \omega_0^2 \sin \alpha + K \omega_0^2 (\alpha - \alpha_n) = 0, \quad (2)$$

β 满足方程：

$$\beta = \frac{H}{m g a} \dot{\alpha} + \frac{H \omega_e \sin \varphi}{m g a}. \quad (3)$$

通过式(2)可以求得 α 的变化规律，代入式(3)，可以求得 β 的变化规律。这样对二自由度微分方程组的研究转化为对单自由度非线性振动问题的求解。

2.2 大偏北角摆动规律

式(2)为非线性振动方程，不存在精确解析解，增加了求解的难度。目前常用的方法有三类，第一类是定性方法，它只能对振动趋势做一个定性分析；第二类是近似解析方法，如平均法、等效线性法、摄动法和谐波平衡法等，这类方法有的精度不高，有的求解过于困难，但其优点是求解结果的形式是解析的，便于分析；第三类则是在计算机上进行的数值解法，其优点是精度高，适用范围广，简便易行，可编制通用程序，缺点是无法得到变量之间的解析表达式^[6]。

为进一步方便分析，最好能得到式(2)的近似解析解，由于方程中 α_n 的存在且不为 0，不满足目前求近似解析解的方法中对 α 为 0 时恢复力为 0 的要求，无法用上述近似方法得到近似解析

解^[7-10]。因此，首先通过数值仿真分析其运动规律，然后由拟合得到近似解析解。

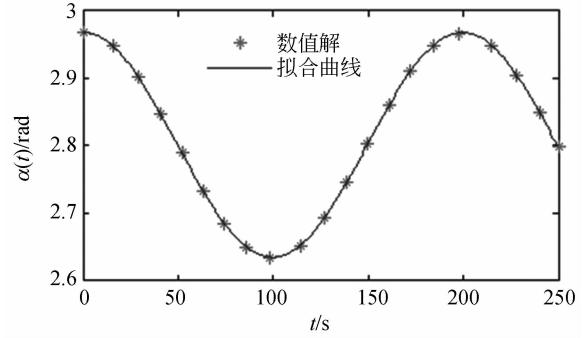


图 2 陀螺灵敏部摆动规律 ($A=17\pi/18$)

Fig. 2 Motion of pendulous gyroscope ($A=17\pi/18$)

根据某陀螺样机的相关参数，取 $m=2$ kg， $a=0.15$ m， $H=0.19$ kg·m²/s， $K=2$ ， $g=9.8$ m/s²， $\omega_e=7.29 \times 10^{-5}$ rad/s， $\varphi=34^\circ$ 。设初始条件为 $\alpha_n = \alpha(0) = A$ ， $\dot{\alpha}(0) = 0$ ，数值仿真可得 $A=17\pi/18$ 时运动规律如图 2 所示。图中数值解由龙格库塔法求得，拟合曲线由正弦函数拟合数值解得到。从图中可以看出，用正弦函数可以很好地描述摆式陀螺大偏北角时的运动规律。 A 从 0 到 π 间隔取值，通过计算每个 A 值时数值解和正弦函数拟合曲线之间偏差可知：用正弦函数描述摆式陀螺大偏北角运动规律，绝对误差最大不超过 0.012 rad(42'')，相对误差最大不超过 0.6%，满足大范围粗寻北精度要求。将其大偏北角运动规律写为：

$$\alpha = B \cos(2\pi t/T) + d, \quad (4)$$

式中： B 、 T 、 d 均为初值 A 的函数。

公式中有 3 个待定参数 B 、 T 、 d ，陀螺灵敏部参数确定后他们都是初始架设方位角 A 的函数。通过数值计算可以得到其随 A 的变化规律，进行数据拟合可得式(5)中的函数关系：

$$\begin{cases} B = 0.000\ 445\ 5A^9 + 0.000\ 889\ 9A^8 - 0.001\ 867A^7 - 0.005\ 018A^6 - 0.002\ 985A^5 - \\ \quad 0.006\ 876A^4 - 0.035\ 6A^3 - 0.104\ 1A^2 + 0.148\ 1A + 0.439\ 2 \\ T = T_0(-0.003\ 164A^8 - 0.005\ 673A^7 + 0.009\ 286A^6 + 0.018\ 44A^5 + 0.001\ 247A^4 + \\ \quad 0.013\ 07A^3 + 0.081\ 65A^2 + 0.160\ 3A + 1.115) \\ d = 0.001\ 543A^6 + 0.006\ 322A^5 + 0.009\ 924A^4 + 0.027\ 79A^3 + 0.101\ 3A^2 + 0.766\ 8A + 1.139 \end{cases}, \quad (5)$$

式中： $T_0 = 2\pi/(\omega_0 \sqrt{1+K})$ 。

3 复合式全方位快速寻北

3.1 任意架设方位步进粗寻北

3.1.1 1/2 周期步进法

步进寻北的核心思想是通过跟踪逆转点释放悬带的弹性位能。设某一时刻陀螺摆动到逆转点处, 通过一次步进使悬带扭力零位与摆动的逆转点重合, 这时悬挂带不受扭, 弹性位能为 0, 陀螺受指北力矩作用, 具有指向位能; 当陀螺摆动半周期时, 即达到另一逆转点, 由于扭力零位还在前一逆转点位置, 悬带受扭, 弹性位能最大而动能最小, 此时快速一步步进, 使悬带零位步进到这一逆转点上, 则弹性位能又变为 0, 而这一新位置指北位能的绝对值小于前一位置。经几次步进后, 陀螺的摆幅减小, 扭力零位最终逼近真北方向^[11-12]。

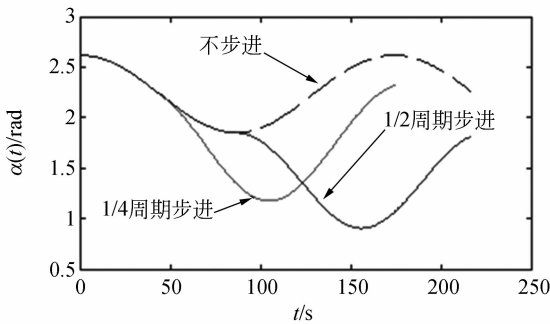


图 3 步进效果示意图

Fig. 3 Result of stepping methods

文献[11]分析了小偏北角时的步进寻北规律并将其用于粗寻北, 本文分析将步进寻北用于全方位粗寻北时的情况。如图 3 所示, 设步进前陀螺灵敏部摆动方位角最大位置为 A_0 , 振幅和周期都是初值 A_0 的函数, 分别设为 $B(A_0)$ 、 $T(A_0)$, 步进后灵敏部摆动方位角最大值减小为 $A_1 = A_0 - 2B(A_0)$, 所用时间为 $T(A_0)/2$ 。依此步进, 可使陀螺主轴方位角不断减小。步进 n 次可得:

$$A_n = A_0 - 2 \sum_{i=1}^n B(A_{n-1}), \quad (6)$$

所用时间为:

$$T_s = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n T(A_{n-1}). \quad (7)$$

通过式(5)、(6)、(7)计算得到不同初始架设方位时的步进寻北效果如表 1 所示。其中, A 为

不同的初值, n_1 为步进次数, T_{s1} 为对应的寻北时间, A_{n1} 为寻北后摆动方位角最大值。可以看出, 采用步进寻北法可以实现全方位粗寻北, 随着初始架设方位的增大, 需要的步进次数增多, 寻北时间也相应增加。其明显不足是寻北时间比较长, 初始架设方位角 30° 时寻北时间约为 3 min, 170° 时寻北时间超过 7 min, 不能满足快速寻北的要求。

表 1 不同步进策略效果比较

Tab. 1 Results of different stepping strategies

A/rad	n_1	T_{s1}/s	$A_{n1}/(^{\circ})$	n_2	T_{s2}/s	$A_{n2}/(^{\circ})$	n_3	T_{s3}/s	$A_{n3}/(^{\circ})$
$\pi/18$	2	118.70	67	4	101.37	-125	4	120	-72
$3\pi/18$	3	178.25	70	5	132.67	-168	5	155	-45
$5\pi/18$	3	180.23	124	5	133.53	-288	5	155	-96
$7\pi/18$	4	241.55	64	6	166.01	-24	6	190	25
$9\pi/18$	4	245.89	95	6	169.10	-72	6	190	10
$11\pi/18$	4	251.30	140	6	174.10	-152	6	190	-28
$13\pi/18$	5	319.31	73	6	180.48	-288	6	190	-120
$15\pi/18$	5	336.51	129	7	220.53	-155	6	190	-281
$17\pi/18$	6	438.21	134	8	264.63	-282	6	190	179

3.1.2 1/4 周期步进法

1/2 周期步进法通过跟踪逆转点释放悬带的弹性位能达到寻北目的, 由于逆转点处灵敏部摆动速度很慢, 导致总的寻北时间较长。为了避免由于灵敏部处摆动速度慢导致寻北时间长的不足, 可以适当提前步进时机, 比如采用 1/4 周期步进法。如图 3 所示, 可以看出 1/4 周期步进法摆动向北收敛的速度明显加快。

通过计算机仿真, 可以得到不同初始架设方位时 1/4 周期步进法效果如表 1 所示。其中, n_2 为步进次数, T_{s2} 为寻北时间, A_{n2} 为寻北结果。从表中可以看出, 1/4 周期步进法全方位粗寻北时间比 1/2 周期步进法短, 大初始架设方位角情况下粗寻北时间减少尤为明显, 由 438.21 s 减小到 264.63 s。

1/2 周期步进法由于使悬带零位跟踪逆转点, 在 $K > 1$ 的条件下, 陀螺灵敏部主轴会不断向北靠近, 但不会越过真北。采用 1/4 周期步进时, 由于步进后悬带零位与逆转点不一致, 陀螺灵敏部主轴摆动会越过真北, 这是导致表 1 中小偏北角时寻北时间没有明显减少的原因。

3.1.3 步进策略优化

分析 1/4 周期步进和 1/2 周期步进可以发

现,二者的区别主要在于步进时机和步进次数的不同。将优化的思想引入步进策略的选择中,设定不同步进次数和各次步进之间的时间间隔,仿真得到相应的步进效果并比较其寻北效果,最后得到优化后的步进方案,其过程如图 4 所示。

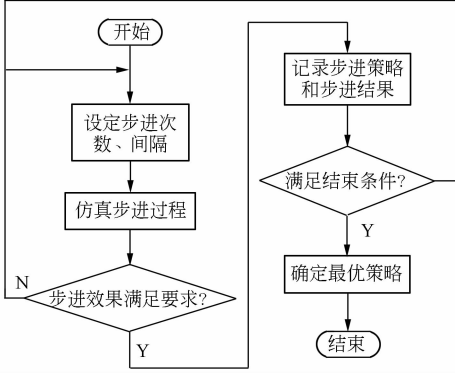


图 4 步进策略优化流程

Fig. 4 Flowchart of stepping strategy optimization

该过程可通过计算机完成。经过优化后的步进策略为分别在开始寻北第 30、60、90、120、155 和 190 s 进行步进,使悬带零位与陀螺主轴方位一致,释放悬带弹性位能。如表 1 中 n_3 、 T_{s3} 、 A_{n3} 所示,优化后的步进方案能在 190 s 使陀螺灵敏部主轴从任意初始架设方位收敛到北向 $\pm 300'$ 以内。

通过步进法可以在 190 s 内将陀螺轴从任意方位步进到偏北 $\pm 300'$ 范围内,此时相当于对初始架设方位有严格要求的情况。再通过传统的粗寻北和精寻北即可完成寻北过程。

3.2 快速步进粗寻北限幅

3.2.1 快速粗寻北

小偏北角 ($\alpha < 10^\circ$) 时, $\sin \alpha \approx \alpha$, 式 (2) 近似为:

$$\ddot{\alpha} + (1+K)\omega_0^2\alpha - K\omega_0^2\alpha_n = 0, \quad (8)$$

根据线性振动理论知其解可写为:

$$\alpha = L \sin(\omega t + \varphi) + b, \omega = \omega_0 \sqrt{1+K}. \quad (9)$$

由于陀螺罗盘仪器中心不与真北方向重合,设仪器中心偏离真北方向角度为 ΔN , 通过零位测量得到的自摆零位为 δ , 则 CCD 传感器测得的灵敏部摆动方程为^[13-14]:

$$x = \frac{K}{1+K}(\Delta N + \delta) - \Delta N + L \sin(\omega t + \varphi) = L \sin(\omega t + \varphi) + b_1 = L_1 \sin(\omega t) + L_2 \cos(\omega t) + b_1, \quad (10)$$

式中: δ 为自摆零位, ω 可以计算得到, L_1, L_2, b_1 待定。

精寻北时,为保证寻北测量的精度,要求灵敏部转子主轴在 CCD 零位附近小幅摆动,即要求 b_1 和 L 要小。自摆零位 δ 比较小,通常采用小偏角粗寻北减小 ΔN 来减小 b_1 ; 减小 L 是在粗寻北的基础上通过限幅来实现。一般的粗寻北方法或者是解算出 ΔN , 通过电机使陀螺罗盘向北转动 ΔN 角度,使陀螺罗盘仪器中心与真北夹角减小,如两个逆转点法、1/4 周期法、曲线拟合法等,或者是通过 1/2 周期步进法使 ΔN 不断减小。前一类方法计算出 ΔN 后,需要将灵敏部锁紧托起并转到相应位置,然后解锁下放灵敏部,经限幅后进入精寻北测量^[3]; 步进法步进跟踪逆转点,不需要锁紧托起灵敏部,也就省去了下放、限幅等环节,粗寻北后直接进入精寻北,但该方法一般需要 3~4 次步进,时间比较长^[15]。为提高寻北速度,快速粗寻北可采用欠周期曲线拟合法。

式 (10) 中有 3 个待定参数,理论上测量 3 个时刻的 x 和 t 值,便可得到关于 L_1, L_2, b_1 的 3 个线性方程,求解该线性方程组即可得到 L_1, L_2, b_1 。在实际测量中,考虑到陀螺灵敏部的摆动要受到随机误差的影响,通过一段时间连续采样,得到一系列测量值 x_i , 其线性拟合模型为:

$$x_i = L_1 \sin(\omega t_i) + \cos(\omega t_i) + b_1 + \varepsilon_i(t_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (11)$$

式中: n 为采样点数; x_i, t_i 分别为采样得到的位置序列和对应的时间序列; $\varepsilon_i(t_i)$ 为拟合误差。

$$\text{设 } \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t_1) & \cos(\omega t_1) & 1 \\ \sin(\omega t_2) & \cos(\omega t_2) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin(\omega t_n) & \cos(\omega t_n) & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

则其最小二乘解为:

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ b_1 \end{bmatrix} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{X}. \quad (12)$$

利用式 (12) 即可求得用 x_i, t_i 线性拟合得到的 L_1, L_2, b_1 。采样时间可以综合考虑对寻北时间和精度的要求。考虑到粗寻北对精度的要求以及快速寻北对时间的限制,快速粗寻北可将采样时间设定为 1/8 周期 (约 15 s)。

3.2.2 步进快速限幅法

限幅可以采用步进法、电磁阻尼法等,但步进

法时间长, 电磁阻尼法需要电磁阻尼器, 且存在电磁干扰力矩。文献[15]提出了一种步进快速限幅法, 有效解决了以上问题, 其原理如图 5(a) 所示。图中 ON 表示真北方向, OP 表示步进前的平衡位置, Ol 表示步进前的扭力零位位置, On_1 表示步进前第一个逆转点的位置, 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。传统步进法是用悬带零位 Ol 跟踪逆转点 On_2 , 步进快速限幅法则计算出 On_2 与 OP' 重合时的悬带零位 Ol' , 当灵敏部摆动至 On_2 时将悬带零位 Ol 步进至 Ol' , 理论上灵敏部将停止摆动。

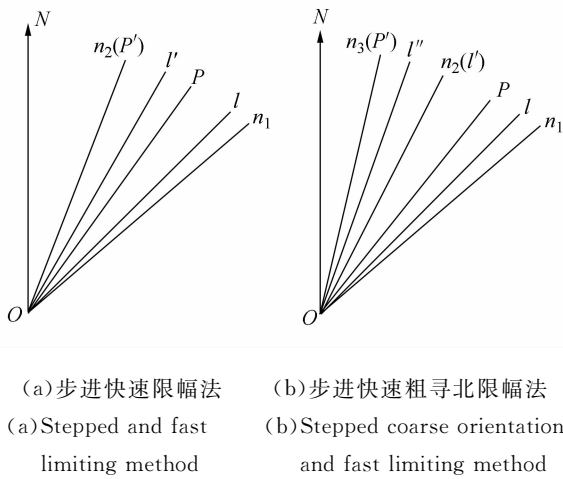


图 5 两种步进方法的限幅原理
Fig. 5 Principles of two stepping methods

3.2.3 快速步进粗寻北限幅法

从上面分析可以看出, 步进法粗寻北在粗寻北的同时可以实现限幅, 但寻北时间长; 拟合法快速粗寻北需要与步进快速限幅法相结合为精寻北提供条件, 速度较快, 但需要锁放等步骤。综合步进策略优化、拟合粗寻北以及步进快速限幅的思想, 进一步提出一种快速步进粗寻北限幅方法, 如图 5(b) 所示, 其过程是: 在 On_1 摆动到 On_2 前, 通过曲线拟合快速计算出 On_2 的位置, 然后将悬带零位步进至 On_2 , 以加快灵敏部摆动速度; 步进后在灵敏部摆动到逆转点 On_3 前, 再次通过拟合计算出 On_3 的位置, 在此基础上计算出使平衡位置 OP' 与 On_3 重合的悬带零位 Ol'' , 当灵敏部摆动至逆转点 On_3 时, 再次步进使零位与 Ol'' 重合。这样只需经过 2 次步进即可使 ΔN 减小, 并同时实现限幅。

如图 6 所示, 设初始时 On_1 偏北 10° , 传统步进法经过 4 次步进, 用时 240 s, 使 On_1 收敛到 $7.5'$; 快速步进粗寻北限幅法先在 50 s 处提前将悬带零位步进至逆转点, 然后在灵敏部摆动至下一个逆转点处时, 将悬带零位步进至图 5(b) 中 Ol'' 处, 用时 95 s, 使 On_1 收敛到 $5'$; 使用拟合法快速粗寻北与步进快速限幅法相结合的方法, $1/8$ 周期(约 15 s)、锁放(约 30 s)、限幅(约 60 s), 至少需要 105 s。可见快速步进粗寻北限幅法既能有效缩短寻北时间, 又能简化寻北过程。

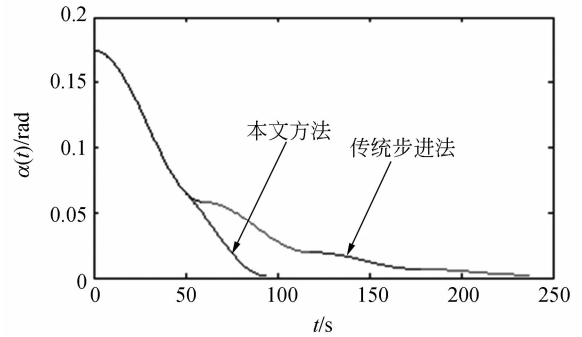


图 6 快速步进粗寻北限幅法与传统步进限幅法对比
Fig. 6 Comparison of traditional stepping method with stepped coarse orientation and fast limiting method

3.3 整周期光电积分

经过粗寻北, 陀螺罗盘仪器中心已非常靠近真北, 偏北角一般为角分级。为实现高精度寻北, 需要进行精寻北。精寻北时, 灵敏部摆动方程仍为式(10)。精寻北的任务即高精度地测量出 ΔN , 结合陀螺罗盘仪器中心在经纬仪度盘上的读数即可计算出北向。为实现高精度测量, 自动陀螺经纬仪一般采用整周期光电积分法^[16]。其原理为, 对式(10)进行整周期积分得:

$$\int_t^{t+T_0} (L\sin(\omega t + \varphi) + b_1) dt = b_1 T_0, \quad (13)$$

式中: T_0 为摆动周期。

通过一周期采样, 得:

$$\int_t^{t+T_0} (L\sin(\omega t + \varphi) + b_1) dt \approx \sum_{i=1}^n x_i \Delta t. \quad (14)$$

由式(13)、(14)即可计算出 b_1 , 进而根据式(10)计算出 ΔN 。

3.4 组合寻北方案设计

综合以上分析设计出组合式寻北方案如图 7 所示。其寻北过程为任意架设摆式陀螺寻北仪,

首先通过步进预定向(190 s)使仪器摆动中心靠近真北方向,考虑到陀螺启动、灵敏部锁放用时,该过程约需要 4 min;第二步是进行自摆零位测量,用时约 2 min;第三步通过快速步进粗寻北限幅(95 s)使仪器摆动中心满足精寻北要求,考虑到陀螺启动、下放等,该步用时约 2.5 min;最后通过整周期光电积分法精寻北,积分一周约 120 s,加上转子制动等过程,该步用时约 2.5 min。该方案能够实现全方位寻北,整个寻北过程可在 11 min 内完成。

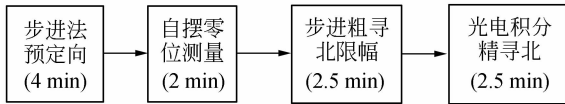


图 7 组合式寻北方案

Fig. 7 Flowchart of complex north seeking

4 结 论

本文针对现有摆式陀螺寻北仪普遍存在的对初始架设方位要求严格,不能实现全方位快速寻北的问题,详细分析了摆式陀螺大偏北角寻北时的运动规律,并以此为基础提出了一种基于组合

策略的寻北方法。该方法首先运用步进法进行大范围预定向,然后利用快速步进粗寻北限幅法为精寻北创造条件,最后利用整周期光电积分法精寻北,分析结果表明:

(1) 大偏北角运动时,可以用正弦函数很好地描述摆式陀螺的摆动规律。

(2) 优化后的步进法可快速地将陀螺摆从任意角度收敛到真北附近,4 min 内即可使方位角达到 $\pm 300'$ 内;在对寻北速度要求较高的场合,还可以适当放宽对预定向的要求,进一步提高定向速度。在大范围预定向的基础上,运用快速步进粗寻北限幅法可以快速使陀螺轴满足精寻北要求,时间一般不超过 2.5 min。该方法要求方位角不大于 $10^\circ(600')$,综合采用步进法和快速步进粗寻北限幅法可快速完成全方位粗寻北并完成限幅(< 6.5 min),之后可直接转入精寻北过程。

(3) 基于组合策略的寻北方案能够有效解决摆式陀螺寻北仪对初始架设方位要求严格的问题。在快速大范围粗寻北的基础上,运用整周期光电积分法,可以在较短时间(< 11 min)实现任意方位高精度寻北。该寻北方案可以为全方位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。

参考文献:

- [1] 田育民,刘思伟,白云超. 摆式陀螺经纬仪粗寻北的新方法[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)
- [2] 王振业,郭晓松,周召发,等. 摆式陀螺寻北仪的大偏北角运动特性分析[J]. 压电与声光, 2013, 35(2): 204-208.
WANG ZH Y, GUO X S, ZHOU ZH F, et al.. The motion characteristics in large azimuth of the pendulous gyroscope north-seeker analyzing [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2013, 35(2): 204-208. (in Chinese)
- [3] 李国英,张志利,王自杰. 复合寻北在全自动陀螺经纬仪系统中的应用[J]. 传感器技术, 2005, 24(10): 77-79, 85.
LI G Y, ZHANG ZH L, WANG Z J. Application of

- complex north finding method in auto-gyroscope system [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2005, 24(10): 77-79, 85. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 李涛. 电磁阻尼在悬挂式二自由度陀螺中的应用[D]. 西安:西安理工大学, 2007.
LI T. *Application of the electromagnetic damping to the suspended two-degree gyro-theodolite* [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [6] 刘延柱,陈立群,陈文良. 振动力学[M]. 第二版,北京:高等教育出版社, 2011.
LIU Y ZH, CHEN L Q, CHEN W L. *Vibration Mechanics* [M]. Second Edition, Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese)

- [7] 陈树辉. 强非线性振动系统的定量分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
CHEN SH H. *Quantitative Analysis Methods of Strongly Non-Linear System* [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [8] 廖世俊. 超越摄动: 同伦分析方法基本思想及其应用[J]. 力学进展, 2008, 38(1): 1-34.
LIAO SH J. Beyond perturbation: the basic concepts of the homotopy analysis method and its applications [J]. *Advances in mechanics*, 2008, 38(1): 1-34. (in Chinese)
- [9] 李鹏松. 求解大振幅非线性振动问题的若干解析逼近方法[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
LI P S. *Some Analytical Approximate Methods for Large Amplitude Nonlinear Oscillations* [D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese)
- [10] 李鹏松, 孙维鹏, 吴柏生. 单摆大振幅振动的解析逼近解[J]. 振动与冲击, 2008, 27(2): 72-74.
LI P S, SUN W P, WU B SH. Analytical approximate solutions to large amplitude oscillation of a simple pendulum [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(2): 72-74. (in Chinese)
- [11] 王缜, 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] 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)
- [13] 韩新建, 邓年茂, 王建钊, 等. 基于正弦曲线拟合法实现陀螺罗盘快速精寻北[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(3): 253-256.
HAN X J, DENG N M, WANG J ZH, *et al.*. Algorithm for fast north-seeking of gyrocompass based on sine curve fitting [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2012, 20(3): 253-256. (in Chinese)
- [14] 董桂梅, 冯莉, 林玉池, 等. 趋势预测 1/8 周期快速寻北法[J]. 纳米技术与精密工程, 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]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2011, 9(1): 53-57. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 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): 57-62.
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 Micro-system Technologies*, 2007, 26(10): 57-62. (in Chinese)

作者简介:



陈河(1989-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 2011年于第二炮兵工程学院获得学士学位, 主要从事定位定向与全方位快速精确寻北技术方面的研究。E-mail: chenhe2008888@126.com



周召发(1973-), 男, 重庆人, 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全方位快速寻北技术方面的研究。E-mail: zzftxy@163.com

导师简介:



张志利(1966-), 男, 河南濮阳人, 教授, 博士生导师, 1988年、1991年、2001年于第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士、博士学位, 主要从事兵器发射理论与技术方面的研究。E-mail: zhangzli@126.com