

陀螺寻北仪改进的步进迭代法

谭立龙, 陈志翔, 仲启媛, 张志利, 李帅

(第二炮兵工程大学兵器发射理论与技术军队重点实验室, 西安 710025)

摘要: 为了提高摆式陀螺寻北仪的限幅效率, 提出了一种改进的步进迭代法。首先, 在建立陀螺灵敏部运动方程和分析传统步进迭代法的实现原理的基础上, 根据初始下放角速度的大小提出不同的步进迭代策略; 然后详细推导了改进的步进迭代法的实现原理; 最后通过数值仿真验证了改进的步进迭代法的可行性。数值仿真算例表明: 当初始下放角速度在一定范围内时, 改进的步进迭代法相对于传统的步进迭代法限幅效率更高。改进的步进迭代法保留了传统步进法不需要增加系统硬件的优点, 避免了电磁阻尼法的电磁干扰力矩的问题, 保证了限幅的可靠性, 为缩短寻北时间提供理论参考。

关键词: 摆式陀螺; 限幅; 步进迭代策略; 改进

中图分类号: V241.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)11-0001-05

An Improved Stepping Iterative Method for Gyroscope North-Seeker

TAN Li-long, CHEN Zhi-xiang, ZHONG Qi-yuan, ZHANG Zhi-li, LI Shuai

(State Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory and Technology,

The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: To improve the amplitude limiting efficiency of pendulous gyroscope north-seeker, an improved stepping iterative method is developed. Firstly, based on the introduction of motion equation for the sensitive part as well as the analysis of traditional stepping iterative method, different stepping iterative strategies are put forward according to the initial angular velocity when the sensitive part is put down. Then, the implementation principle of improved stepping iterative method is deduced in details. The feasibility of the proposed method is verified by numerical simulation. The numerical simulation examples show that when the initial angular velocity for putting down the sensitive part is within a certain range, the improved stepping iterative method has a higher limiting efficiency than the traditional one. The improved stepping iterative method can avoid the electromagnetic interference torque problem of the electromagnetic damping method while keeping the traditional stepping method's advantages, and ensure the limiting reliability, thus providing a theoretical reference for shortening the north-seeking time.

Key words: pendulous gyroscope; amplitude limiting; stepping iterative strategy; improvement

0 引言

摆式陀螺寻北仪广泛应用于军用和民用领域^[1], 并且不受地形、气候、外界磁场、测量时间以及测量点测量条件的影响, 能够独立高精度地找到真北^[2]。陀螺寻北仪相对于磁罗盘的主要优势在于陀螺寻北仪

指向真北而不是地磁北, 并且不受周围环境磁场的影
响^[3]。目前, 摆式陀螺寻北仪通常采用粗、精寻北相结合的方式来有效提高寻北精度和速度。粗寻北的精度在 $\pm 30'$ 左右; 精寻北在工程上常使用积分法, 摆幅要求 $3' \sim 5'$ 。陀螺灵敏部下放后的初始摆幅受粗寻北精度、下放稳定性和转位误差等因素的影响, 陀螺灵敏部下放后的摆幅通常超出精寻北的范围, 因此必须采用适当的方法限制陀螺灵敏部的摆幅。

1 陀螺灵敏部摆幅的限制方法

由于使用的场合以及使用的条件不同, 目前常使

收稿日期: 2014-12-22

修回日期: 2015-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(41174162)

作者简介: 谭立龙(1973—), 男, 江苏沛县人, 博士, 副教授, 研究方向为导弹发射理论与惯性导航。

用4种方法限制陀螺灵敏部的摆幅,即电磁阻尼法^[4]、步进迭代法^[5]、平衡位置跟踪逆转点法^[6]和油液阻尼法。表1总结了4种方法的原理及优缺点。其中,步进迭代法以其限幅的高可靠性、工程实现简单等优点而被广泛应用于国内外陀螺寻北仪中,例如德国的GYROMAT系列陀螺经纬仪,国产Y/JTG-1, TZB-2等。

本文提出一种改进的步进迭代法,根据初始下放角速度的大小选择不同的迭代策略。首先根据陀螺灵敏部的摆动规律,结合不同的初始下放角速度分析,提出两种不同的步进迭代策略;然后详细推导了在不同的初始方位角情况下,针对不同的初始方位角速度选择不同的步进迭代策略,并将两种情况统一成改进的步进迭代法;最后通过数值仿真验证了改进的步进迭代法的可行性。

表1 限幅方法对比表

Table 1 Contrast of four amplitude limiting methods

限幅方法	原理	优点	缺点
电磁阻尼法	对摆动的陀螺灵敏部施加阻尼,使陀螺灵敏部主轴摆动快速收敛至北向附近	限幅时间短,限幅效果显著	对电磁力矩器控制精度要求高 对制造装配工艺要求高 零位稳定性受到一定程度影响
步进迭代法	利用零位多次跟踪逆转点,使悬带弹性势能不断释放,从而减小摆幅	可靠性高,仪器结构简单,制造成本低	限幅时间过长
平衡位置跟踪逆转点法	在平衡位置处,指北力矩与悬带扭力矩平衡的力学特性	可靠性较高,仪器结构简单,制造成本低	计算难度大 跟踪时间难以精确控制 限幅效果的随机性较大
油液阻尼法	对摆动的陀螺灵敏部施加阻尼,使陀螺灵敏部主轴摆动快速收敛至北向附近	仪器制造成本较低,限幅时间较短	油液的密封问题 控制精度非常难控制 对操作人员操作经验要求高

2 陀螺灵敏部运动方程建立

目前,列写摆式陀螺运动方程的方法主要有欧拉动力学方程、第二类拉格朗日方程以及动静法。文献[7-8]针对框架式陀螺,分别使用上述3种方法列写了陀螺仪的运动方程;文献[9]通过使用陀螺的章动理论从欧拉-拉格朗日方程推导出陀螺的通用数学模型。

摆式陀螺寻北的动力学模型如图1所示。陀螺灵敏部由陀螺房、悬挂柱组成,通过悬挂带悬挂于仪器壳体O点上。 O_1 为灵敏部的重心,悬挂点与重心 O_1 之间的距离 l 称为倾心高, mg 为灵敏部重力, H_c 为陀螺转子的动量矩。

为建立灵敏部的运动方程,建立地理坐标系 $O\xi\eta\zeta$ 和陀螺坐标系 $Oxyz$ 。 $O\xi$ 沿水平方向指向北, $O\eta$ 沿着

水平方向指向西, $O\zeta$ 垂直于当地水平面向上,地理坐标系与地球固连,以地球自转角速度 ω_e 相对于惯性空间转动; Ox 与转子轴平行,但不参与转动,从O点观察,陀螺马达顺时针方向旋转, Oy 轴向左, Oz 轴与 Ox 、 Oy 构成右手系,陀螺坐标系与陀螺灵敏部固连。通常用转子轴偏离真北的水平角 α (逆时针为正, $-180^\circ \sim 180^\circ$),俯仰角 β (逆时针为正, $0^\circ \sim 90^\circ$),悬挂带与铅垂线的夹角 γ 来表示陀螺转子轴的方位,如图1所示。从 $O\xi\eta\zeta$ 到 $Oxyz$ 可进行如下转换: $O\xi\eta\zeta$ 首先绕 $O\zeta$ 旋转 α 得到 $O\xi_1\eta_1\zeta_1$,再绕 $O\eta_1$ 旋转 β 得到 $O\xi_2\eta_2\zeta_2$,最后绕 $O\xi_2$ 旋转 γ 得到 $Oxyz$ 。

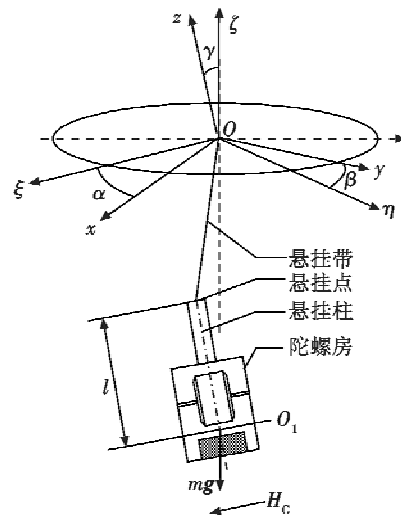


图1 摆式陀螺动力学模型

Fig. 1 Dynamic model of pendulous gyroscope

设灵敏部绕 Ox 、 Oy 、 Oz 轴的转动惯量分别为 J_x 、 J_y 、 J_z (J_x 不包括陀螺转子的转动惯量, $J_y \approx J_z$),在 α 为小角度时,即小偏北情形,不跟踪状态下陀螺灵敏部摆动的欧拉动力学方程为

$$\begin{cases} J_x \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + mgl\gamma = 0 \\ J_y \frac{d^2 \beta}{dt^2} + H_c \omega_e \sin \varphi + H_c \frac{d\alpha}{dt} + mgl\beta = 0 \\ J_x \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + H_c \omega_e \cos \varphi \cdot \alpha - H_c \frac{d\beta}{dt} + D_B (\alpha - \alpha_0) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: φ 表示当地的纬度; D_B 表示悬带的扭力系数; α_0 表示悬带扭力零位的方位角。

令 $D_K = H_c \omega_e \cos \varphi$, $D = D_K + D_B$, $\lambda = D_B / D$ 解式(1)可得

$$\alpha = \lambda \alpha_0 + A \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

式中: A 表示陀螺灵敏部的摆幅, A 、 θ 均由陀螺灵敏部摆动的初始条件决定; ω 表示陀螺灵敏部摆动的角频率,

$\omega = \sqrt{\frac{mgl(D_K + D_B)}{H_c^2}}$ 。需要特别说明的是:国外先进的陀螺经纬仪都采用扭力矩与陀螺力矩比值大于1的大截面

金属悬带,即 $1/2 < \lambda < 1$ 。例如德国的GYROMAT系列高精度陀螺经纬仪,都采用扭力矩与陀螺力矩比值为 2.5 的大截面金属悬带^[10-11]。

由式(2)可以得出,陀螺灵敏部转子轴绕真北方向做有偏移的正弦摆动,偏移的位置 α_{eq} 常称为摆动的平衡位置($\alpha_{eq} = \lambda\alpha_0$),如图 2 所示。

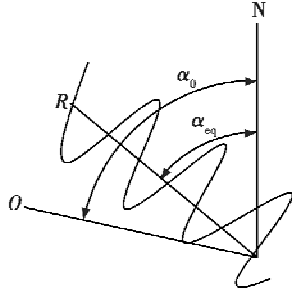


图 2 陀螺灵敏部摆动模型

Fig. 2 Oscillation model of gyro's sensitive part

3 步进迭代策略的提出

文献[5-6]详细说明了步进法的限幅原理以及限幅的特点。方法的核心思想就是通过跟踪逆转点不断地释放悬带的弹性势能,进而减小系统的机械能,过程中陀螺灵敏部摆幅逐渐减小,扭力零位渐渐逼近真北。

由于下放过程不稳定,导致陀螺灵敏部下放后存在初始角速度。图 3 中,横轴代表时间与真北向,纵轴代表陀螺灵敏部的方位角,3 条曲线表示由于初始下放角速度的不同引起陀螺灵敏部摆动规律有所差异。红线表示陀螺灵敏部下放后,角速度使灵敏部远离北向;蓝线表示陀螺灵敏部下放后,角速度使灵敏部靠向北向;绿线表示一种比较理想的情况,即陀螺灵敏部下放角速度近似为零。由第一部分中式(2)可知:虽然陀螺灵敏部的下放角速度不同导致图 3 的 3 种情况,即摆幅 A 和相位 θ 不同,但是 3 种情况的平衡位置 α_{eq} 是相同的。

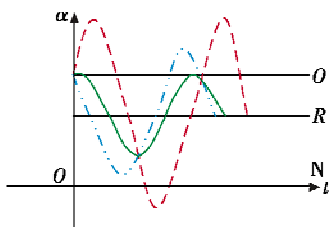


图 3 下放角速度不同的摆动模型

Fig. 3 Oscillation models of gyro with different initial angular velocities

首先,阐述两种不同的步进迭代策略。策略 1:扭力零位跟踪每一个逆转点,传统的步进迭代法即采用这种策略。在图 4 中,扭力零位会跟踪 A 点,接着跟踪下一个逆转点 A_1 点。策略 2:在两个逆转点中扭力零

位跟踪距北向较近的逆转点。在图 4 中,在 A, B 两个逆转点中,扭力零位跟踪 B 点。扭力零位跟踪到 A_1 与跟踪到 B 的时间相同。因此通过比较 A_1 与 B 的方位角决定采用的步进迭代策略。

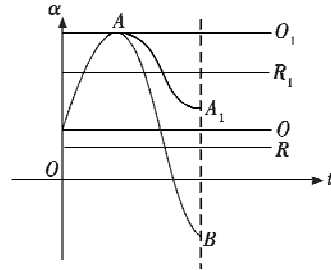


图 4 步进迭代的两种策略

Fig. 4 Two tactics of step iterative method

4 改进的步进迭代法

设陀螺灵敏部下放后的初始状态为 (x_{10}, x_{20}) , x_{10} 表示初始方位角, x_{20} 表示初始角速度,陀螺灵敏部下放对应的扭力零位的方位角为 M , 满足 $M = x_{10}$ 。首先研究 $x_{10} > 0, x_{20} > 0$ 的情况(与图 4 对应)。对于 $x_{20} \leq 0$ 的情况(对应图 3 中的蓝线、绿线),策略 1 与策略 2 限幅效果相同。

根据第一部分上述设定的参数可以解算出:跟踪 A 点后扭力零位 O_1 的方位角为

$$\alpha_{O_1} = \lambda M + \sqrt{(x_{10} - \lambda M)^2 + \frac{J}{D} x_{20}^2} \quad (3)$$

跟踪 A 后摆幅的大小为

$$\alpha_{A-A_1} = 2(1 - \lambda) \cdot (\lambda M + \sqrt{(x_{10} - \lambda M)^2 + \frac{J}{D} x_{20}^2}) \quad (4)$$

逆转点 A_1 的方位角为

$$\alpha_{A_1} = (2\lambda - 1) \cdot (\lambda M + \sqrt{(x_{10} - \lambda M)^2 + \frac{J}{D} x_{20}^2}) \quad (5)$$

逆转点 B 的方位角为

$$\alpha_B = \lambda M - \sqrt{(x_{10} - \lambda M)^2 + \frac{J}{D} x_{20}^2} \quad (6)$$

本文采用作商法比较逆转点 A_1 和 B 的方位角绝对值的大小,方位角越小表明限幅效果越好。

$$\left| \frac{\alpha_{A_1}}{\alpha_B} \right| = \left| \frac{\lambda M + \sqrt{(x_{10} - \lambda M)^2 + \frac{J}{D} x_{20}^2}}{\lambda M - \sqrt{(x_{10} - \lambda M)^2 + \frac{J}{D} x_{20}^2}} \right| = (2\lambda - 1) \cdot \frac{\lambda M + \sqrt{(1 - \lambda)^2 M^2 + \frac{J}{D} x_{20}^2}}{\lambda M - \sqrt{(1 - \lambda)^2 M^2 + \frac{J}{D} x_{20}^2}} (x_{10} = M) \quad (7)$$

设 $a = \lambda M > 0, x = \sqrt{(1 - \lambda)^2 M^2 + \frac{J}{D} x_{20}^2}$, 构造函数

$f(x), g(x)$ 得

$$f(x) = |g(x)| = |(a+x)/(a-x)| \quad (8)$$

于是有

$$|\alpha_A/\alpha_B| = (2\lambda - 1) \cdot f(x) \quad (9)$$

对 $g(x)$ 求导, 得

$$g'(x) = \frac{2a}{(a-x)^2} > 0. \quad (10)$$

函数 $g(x)$ 及 $f(x)$ 的函数曲线如图 5 所示, 图中, 虚线表示 $g(x)$, 实线表示 $f(x)$ 。

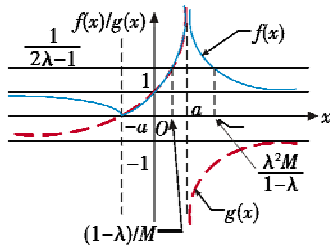


图 5 函数 $g(x)$ 及 $f(x)$ 的示意图

Fig. 5 Sketch map of function $g(x)$ and $f(x)$

由 $x_{20} > 0$, 得 $x > (1-\lambda)M$, 且随着 x_{20} 的增大, x 随之增大。由 $f(x)$ 的函数性质, 可得 $f(x)$ 在 $((1-\lambda)M, a)$ 上单调增加; $f(x)$ 在 $(a, +\infty)$ 上单调减小, $f(x) > 1$ 。

令 $|\alpha_A/\alpha_B| = (2\lambda - 1) \cdot f(x) = 1$, 有 $f(x) = \frac{1}{2\lambda - 1}$, 代入式(8)解得方程的两个解以及对应的 x_{20}

$$x_1 = (1-\lambda)M, x_{20,1} = 0 \text{ 或 } x_2 = \frac{\lambda^2 M}{1-\lambda}$$

$$x_{20,2} = \sqrt{\frac{D}{J} \cdot \frac{(2\lambda - 1)(2\lambda^2 - 2\lambda + 1)}{(1-\lambda)^2}} M. \quad (11)$$

由式(11)及 $f(x)$ 的性质分析可得: $f(x)$ 在 $((1-\lambda)M, a)$ 有 $f(x) > \frac{1}{2\lambda - 1}$, $|\frac{\alpha_A}{\alpha_B}| > 1$, 在 $(a, \frac{\lambda^2 M}{1-\lambda})$ 有 $f(x) > \frac{1}{2\lambda - 1}$, $|\frac{\alpha_A}{\alpha_B}| > 1$; 在 $(\frac{\lambda^2 M}{1-\lambda}, +\infty)$ 有 $f(x) < \frac{1}{2\lambda - 1}$, $|\frac{\alpha_A}{\alpha_B}| < 1$ 。

综合上述分析可得出如下结论: 对于 $x_{10} > 0$ 的情况, 当 $x_{20} \in (0, \sqrt{\frac{D}{J} \cdot \frac{(2\lambda - 1)(2\lambda^2 - 2\lambda + 1)}{(1-\lambda)^2}} M)$, 使用策略 2 比策略 1 限幅精度要高; 当 $x_{20} \in ((\frac{D}{J} \cdot \frac{(2\lambda - 1)(2\lambda^2 - 2\lambda + 1)}{(1-\lambda)^2})^{1/2} M, +\infty)$, 使用策略 1 比策略 2 限幅精度要高; 当 $x_{20} \in (-\infty, 0]$, 策略 1 与策略 2 限幅精度相同。

同理, 对于 $x_{10} < 0$ 的情况, 可以得出类似的结论。

图 6 表示在不同的初始状态下, 策略 1 与策略 2

的优先示意图。图中, 1 代表策略 1, 2 代表策略 2, 上部分表示对于 $x_{10} > 0$ 的情况, x_{20} 的不同取值对应不同的步进迭代策略; 下部分表示 $x_{10} < 0$ 的情况。

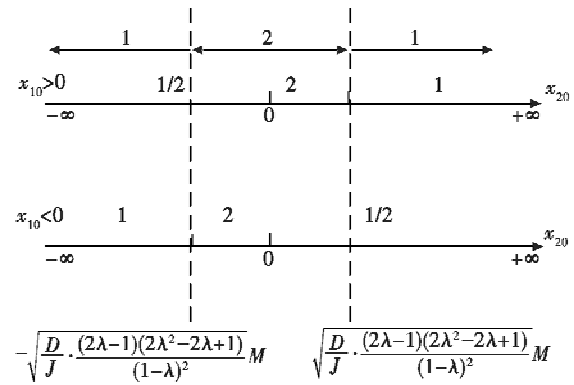


图 6 优先策略示意图

Fig. 6 Sketch map of prior tactics

将上述的两种情况归纳总结为改进的步进迭代法:

- 1) 当初始下放角速度 $x_{20} \in \left(-\infty, -\left(\frac{D}{J} \cdot \frac{(2\lambda - 1)(2\lambda^2 - 2\lambda + 1)}{(1-\lambda)^2}\right)^{1/2} M \right)$ 或 $x_{20} \in \left(\left(\frac{D}{J} \cdot \frac{(2\lambda - 1)(2\lambda^2 - 2\lambda + 1)}{(1-\lambda)^2}\right)^{1/2} M, +\infty \right)$ 时, 使用策略 1;
- 2) $x_{20} \in \left(-\sqrt{\frac{D}{J} \cdot \frac{(2\lambda - 1)(2\lambda^2 - 2\lambda + 1)}{(1-\lambda)^2}} M, \sqrt{\frac{D}{J} \cdot \frac{(2\lambda - 1)(2\lambda^2 - 2\lambda + 1)}{(1-\lambda)^2}} M \right)$ 时, 使用策略 2。

5 仿真

为了验证改进步进迭代法的可行性, 根据某陀螺寻北仪的技术参数, 在 Matlab 中对改进步进迭代法的限幅效果进行仿真。不跟踪周期 $T = 120$ s; 零位修正系数 $\lambda = 0.64$; 粗寻北精度为 $30'$, 作为初始方位角的参考值; 精寻北要求的限幅精度 $\delta = 3'$ 。计算可以得到

$$\sqrt{\frac{D}{J} \cdot \frac{(2\lambda - 1)(2\lambda^2 - 2\lambda + 1)}{(1-\lambda)^2}} M = 1.71. \text{ 仿真程序采}$$

用 $\left| \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} \right| < S_{\text{slope}}$ 来判断逆转点, $S_{\text{slope}} = 10^{-2}$ 。

在 10 组不同初始角速度情况下, 对策略 1, 2 分别进行仿真, 结果如表 2 所示。表 2 中: 精度表示图 4 中使用不同的步进迭代策略对应的逆转点 A_1 或 B 的方位角大小; 限幅时间表示经过若干次限幅满足精寻北要求的时间。

仿真结果 1~7 组中: 初始方位角速度分布于 $\sqrt{\frac{D}{J}} \cdot$

$\sqrt{\frac{(2\lambda-1)(2\lambda^2-2\lambda+1)}{(1-\lambda)^2}} M=1.71$ 的两侧。改进步进

迭代法在 1~4 组对应的初始方位角速度,使用策略 2。由表中数据可以看出,策略 2 的限幅精度高于策略 1,策略 2 的限幅时间短于策略 1;在 5~7 组使用策略 1,策略 1 的限幅精度高于策略 2,策略 1 的限幅时间短于策略 2。表 2 中用加粗数字表示改进的步进迭代法的仿真结果。传统步进迭代法对应表中的策略 1,可以看出,在初始角速度较小的情况下(1~4 组),改进步进迭代法要优于传统步进迭代法。初始角速度较大时(5~7 组),改进步进迭代法等同于传统方法。仿真结果 8~10 组表明了第三部分中,对于 $x_{20} \leq 0$ 的情况策略 1 与策略 2 限幅效果相同。

表 2 策略 1、策略 2 的仿真结果对比表

Table 2 Emulation results of tactic 1 and tactic 2

组数	初始状态		策略 1		策略 2	
	方位角/ (°)	角速度/ (°·s ⁻¹)	精度/ (°)	限幅时间/ s	精度/ (°)	限幅时间/ s
1	30	0.5	9.42	125.75	4.84	107.70
2	30	1	11.51	150.15	2.61	133.50
3	30	1.5	13.93	166.30	11.22	151.35
4	30	1.7	14.93	170.25	14.79	170.95
5	30	2	16.45	175.35	20.23	183.00
6	30	3	21.64	186.25	38.70	208.20
7	30	5	32.17	197.95	76.23	246.65
8	30	0	8.42	109.10	8.42	109.10
9	30	-2	20.23	134.00	20.23	134.00
10	30	-4	57.42	182.55	57.42	182.55

通过分析可以得出:上述数值仿真结果验证了改进步进迭代法的可行性以及在初始角速度较小时,相对于传统步进迭代法的优越性。

6 结论

本文在传统步进迭代法的基础上提出一种改进步进迭代法。首先根据不同的初始下放角速度,提出两种不同的步进迭代策略;然后详细推导了在不同的初始方位角情况下,针对不同的初始方位角速度选择不同的步进迭代策略,并将两种情况统一成改进步进迭代法;最后通过数值仿真验证了改进步进迭代法的可行性与优越性。由于改进步进迭代法是对传统步进迭代法在算法上的改进,且结论简单明了,因此无需对现有寻北仪的硬件结构进行更改,直接修改系统的控制程序便可投入工程应用。

参考文献

[1] JIN Y G, SHU Y G, XIN L. On zero position correction of hanging tape of gyro-theodolite [J]. Survey Review, 2008, 40(308):129-134.

- [2] ZHONG Q Y, TAN L L, HUANG X X, et al. Eliminating noises and improving the seeking north precision of magnetic suspension gyroscope based on heuristic threshold selection[C]//The 3rd International Conference on Computer Research and Development (ICCRD), Shanghai:IEEE, 2011:141-144.
- [3] MATTHEW T. Albert Einstein's expert opinions on the Sperry vs Anschutz gyrocompass patent dispute[J]. World Patent Information, 2008, 30(4):320-325.
- [4] 白云超,刘思伟,田育民. 自动化陀螺经纬仪中阻尼力矩器设计[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(6):752-755. (BAI Y C, LIU S W, TIAN Y M. Design of damping torque for automatic gyro-theodolite [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(6):752-755.)
- [5] 王缜,申功勋. 摆式陀螺寻北仪积分测量方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5):746-752. (WANG Z, SHEN G X. Investigation on integral method of pendulous gyroscope [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(5):746-752.)
- [6] 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 Z Y, GUO X S, ZHOU Z F. Stepped and fast limiting pendulous gyroscope [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(5):1244-1250.)
- [7] 许江宁,卞鸿巍,刘强,等. 陀螺原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2009. (XU J N, BIAN H W, LIU Q, et al. Theory and application of gyroscopes [M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2009.)
- [8] 刘洁瑜,余志勇,汪立新,等. 导弹惯性制导技术[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2010. (LIU J Y, YU Z Y, WANG L X, et al. Inertial guidance technology of missile [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010.)
- [9] MANUEL F, PEREZ P, MANUEL P M. A generalized mathematical model to analyze the nonlinear behavior of a controlled gyroscope in gimbals [J]. Nonlinear Dynamics, 2007, 48(1):129-152.
- [10] 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 C, 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.)
- [11] 王亚江,李广云,邢坤,等. Gyromat 3000 陀螺经纬仪温度影响测试与分析[J]. 测绘科学, 2012, 37(6):128-129. (WANG Y J, LI G Y, XING K, et al. Test and analysis for temperature effect on Gyromat 3000 [J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(6):128-129.)