

3/4 周期中天法的陀螺智能寻北

夏桂锁, 林明春, 林玉池, 黄银国, 崔彦平

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 陀螺仪寻北的中天法一次测量需要一个完整的陀螺摆动周期, 需时较长, 已不能适应现代测量需要。在传统中天法的基础上, 提出了 3/4 周期中天法, 并给出了 3/4 周期中天法的原理和推导公式。完成了传统中天法与 3/4 周期中天法应用于 JT15 陀螺仪上的精度对比实验。实验表明: 3/4 周期中天法在基本保持中天法测量精度的情况下, 可以有效地缩减中天法的寻北时间。说明了欠周期中天法寻北测量的可行性, 从而为提高寻北效率找到了一条有效的途径。

关键词: 陀螺经纬仪; 寻北; 中天法; 3/4 周期

中图分类号: P227.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2007)09-0053-03

3/4 period transit method in intelligent north-finding gyroscope system

XIA Gui-suo, LIN Ming-chun, LIN Yu-chi, HUANG Ying-guo, CUI Yan-ping

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,

Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Traditional north-finding gyroscope system based on transit method needs a whole gyroscope swing period which can not meet the modern measuring need for its long working time. The principle of 3/4 period transit method is proposed based on the whole transit method, then the basic principle and deduced formula of 3/4 transit method are presented. The contrastive experiments are accomplished based on JT15 gyroscope using the traditional transit method and the novel transit method. The experiments results show that 3/4 period transit method can effectively shorten the time of north-finding in the case of maintaining the measuring accuracy of the whole transit method. All of these prove the feasibility of north-finding gyroscope system based on 3/4 period and a new way to improve the north-finding efficiency time is put forward.

Key words: gyroscope; north-finding; transit method; 3/4 period

0 引言

在现代寻北测量中, 军、民两方面对于陀螺指北仪精度和速度的要求越来越高。在野外测量中, 悬挂式陀螺仪常用逆转点法, 但人工测量时逆转点法的精度较低。相比之下, 中天法观测具有省力、眼睛不易疲劳、观测者在观测过程中可以应付外界来往人员和其他突发因素的干扰等优点, 而且, 中天法比逆转点法精度高, 且易于实现仪器操作自动化。不过中天法要求完成一个行程至少需要满一个陀螺摆动周期。随着现代科学技术的发展, 尤其是计算机技术的飞速发展, 已经研制成功智能化寻北系统, 实现了陀螺寻北的数据采集、处理、结果的显示、记录的自动化, 但是, 寻北测量方法还没有讨论欠周期方法^[1]。从陀螺仪机械和中天法的原理出发, 提出 3/4 周期中天法。测量方法应用于智能寻北系统中, 提高了寻北速度。

1 中天法基本原理

在理想条件下, 陀螺的运动方程是正弦曲线或衰减的正弦曲线, 悬挂式陀螺仪寻北的很多方法都是以此为依据推导出的。陀螺仪运动轨迹的精确数学模型一般很难求得, 或者由于精确的数学模型过于繁琐, 实际寻北数学模型往往通过实践进行简化。

设陀螺的摆动规律可表示为

$$a = -a_m \sin[(t - t_0)2\pi/T_2], \quad (1)$$

式中 a_m 为摆幅; T_2 为陀螺摆动周期; t_0 为初始时间。

中天法原理如图 1 所示, L 为平衡位置, O 为陀螺仪刻度盘零刻线位置, O' 为相对于 L 的 O 的对称位置。 t_1, t_2, t_3 为运动曲线与 O 相交的时间坐标, 称为中天时间。时间差 $\Delta t = (t_3 - t_2) - (t_2 - t_1)$, 由于 O 和 O' 对 L 的对称关系, 可以得出运动曲线与平衡位置交点到邻近的中天点的时间为

$\Delta t/4$ 。那么,零刻线偏离平衡位置的角度 ΔN 可从式(2) 求出

$$\Delta N = -a_m \left\{ \sin \left[\left(\frac{T_2}{2} + \frac{\Delta t}{4} \right) \frac{2\pi}{T_2} \right] - \sin \left(\frac{T_2}{2} \cdot \frac{2\pi}{T_2} \right) \right\} = -a_m \left[\sin \pi \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2T_2} \Delta t \right) + \cos \pi \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2T_2} \Delta t \right) \right] = a_m \sin \left(\frac{\pi}{2T_2} \Delta t \right) \quad (2)$$

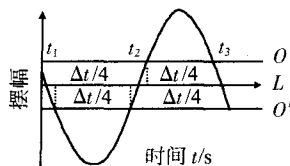


图1 中天法原理图

Fig 1 Principle diagram of transit method

按正弦级数展开式(2),并取前两项得

$$\Delta N = a_m \left[\frac{\pi}{2T_2} \Delta t - \frac{1}{6} \left(\frac{\pi}{2T_2} \Delta t \right)^3 \right] \quad (3)$$

取其一次项,得到中天法公式

$$\Delta N = Ca_m \Delta t \quad (4)$$

式中 C 为比例系数; Δt 为时间差。

中天法的误差即为舍去的高次项,约为

$$\delta a_N = a_m \frac{\pi^3}{48} \left(\frac{\Delta t}{T_2} \right)^3 \quad (5)$$

中天法在数学上的依据是把邻近平衡位置的部分曲线看成直线。由于接近于悬挂式陀螺仪的实际运动规律,因而,测量精度高,从而成为这类陀螺仪实际使用中采用的主要方法^[2]。

2 3/4 周期中天法的研究

对于悬挂式陀螺经纬仪,要提高寻北速度,需要缩短陀螺的寻北周期。但对于一台具体的陀螺仪来说,它在当地的摆动周期是确定的。采用中天法寻北,要求陀螺摆动一个周期以上。利用现代智能化技术,探讨在不足一个周期(本研究为3/4周期)内完成寻北测量是提高寻北速度的途径之一^[3]。

陀螺仪转子高速旋转的周期为

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{H_C}{mgl\omega_{1E}\cos\varphi}} \quad (6)$$

式中 m 为灵敏部质量,kg; g 为重力加速度, $m \cdot s^{-2}$; l 为倾心高,m; H_C 为自转角动量, $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$; ω_{1E} 为地球自转角速度,rad/s; φ 为地理纬度, ($^\circ$)。

对于特定的陀螺仪, m, l, H_C, ω_{1E} 为常数, g 和摆动周期与地理纬度 φ 有关,高纬度周期长,低纬度周期短^[4]。

上面分析表明:陀螺仪的寻北周期不是随机的,对于特定地点的特定陀螺仪,其摆动周期基本上是一常数,摆动规律基本符合简谐振动。本项目采用徐州光学仪器厂生产的 TJ-15 型陀螺仪,在中纬度地区的摆动周期约为 7~8 min。

为了缩短寻北测试时间,探讨 3/4 周期中天法的可行性,试分析以下 2 种情况:

1) $a_1 \geq a_2$: 光标两次通过零刻线的时间大于等于整周期的一半。如图 2 所示,设光标两次通过零刻线的时间

$T_1 = t_2 - t_1, a_1, a_2$ 为两侧摆幅。

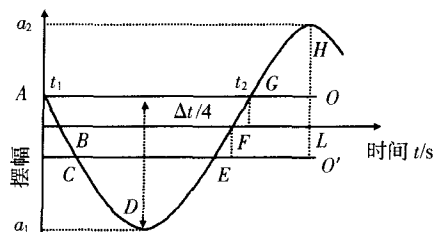


图2 $a_1 \geq a_2$ 时推导原理图

Fig. 2 Diagram of principle deduced as $a_1 \geq a_2$

由中天法原理,运动方程为

$$a = -a_m \sin \left[(t - t_0) 2\pi / T_2 \right],$$

$$\text{其中, } a_m = \frac{|a_1| + |a_2|}{2}.$$

陀螺仪光标通过 E 点与 F 点的时间差为 $\Delta t/4$, Δt 的物理意义与第 1 节相同。 T_3 为计算得到的陀螺摆动周期,由 O 和 O' 对称的几何关系

$$T_3 = 2T_1 + \Delta t \quad (7)$$

陀螺摆动规律的方程为正弦曲线, L 为平衡位置,则摆动时间与摆幅之间的关系为

$$\begin{aligned} \Delta a &= \frac{|a_1| - |a_2|}{2} \\ &= a_m \left\{ \sin \left[\left(\frac{T_2}{2} + \frac{\Delta t}{4} \right) \frac{2\pi}{T_3} \right] - \sin \left(\frac{T_2}{2} \cdot \frac{2\pi}{T_3} \right) \right\} \\ &= -a_m \sin \left[\frac{\pi}{2(2T_1 + \Delta t)} \Delta t \right], \end{aligned} \quad (8)$$

其中, Δa 为 E, F 两点间的摆幅差。解得

$$\Delta t = \frac{2T_1 \sin^{-1} \left(\frac{-\Delta a}{a_m} \right)}{90 - \sin^{-1} \left(\frac{-\Delta a}{a_m} \right)} \quad (9)$$

代入中天法的寻北公式(4),结果为

$$\Delta N = Ca_m \frac{2T_1 \sin^{-1} \left(\frac{-\Delta a}{a_m} \right)}{90 - \sin^{-1} \left(\frac{-\Delta a}{a_m} \right)} \quad (10)$$

2) $a_1 < a_2$: 光标两次通过零刻线的时间小于整周期的一半。如图 3 所示,设光标两次通过零刻线的时间 $T_1 = t_2 - t_1$ 。 Δt 的物理意义与第 2.1 节相同。

应用与第 2.1 节相同的分析方法,陀螺摆动规律的方程为正弦曲线, L 为平衡位置,则摆动时间与摆幅之间的关系为

$$\begin{aligned} \Delta a &= \frac{|a_1| - |a_2|}{2} \\ &= a_m \left\{ \sin \left[\left(\frac{T_2}{2} + \frac{\Delta t}{4} \right) \frac{2\pi}{T_3} \right] - \sin \left(\frac{T_2}{2} \cdot \frac{2\pi}{T_3} \right) \right\} \end{aligned}$$

$$=-a_m\sin\left[\frac{\pi}{2(2T_1+\Delta t)}\Delta t\right],\tag{11}$$

式中 Δa 为 C,D 两点间的摆幅差。解得

$$\Delta t=\frac{2T_1\sin^{-1}\left(\frac{-\Delta a}{a_m}\right)}{90-\sin^{-1}\left(\frac{-\Delta a}{a_m}\right)}.\tag{12}$$

则

$$\Delta N=Ca_m\frac{2T_1\sin^{-1}\left(\frac{-\Delta a}{a_m}\right)}{90-\sin^{-1}\left(\frac{-\Delta a}{a_m}\right)}.\tag{13}$$

从以上分析得到,无论两侧摆幅大小如何,最后的计算公式都是统一的。

由于需要根据 a_1,a_2,T_1 3 个参数计算周期 T_3 ,而且,这个过程势必将 a_1,a_2,T_1 3 个参数的原始误差叠加到 T_3 ,所以,要求这 3 个数据足够精确。为了最大限度地避免误差,需要进行数据拟合。这项工作将在以后的研究中尝试。

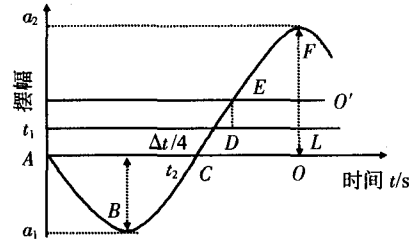


图3 $a_1 < a_2$ 时推导原理图

Fig 3 Diagram of principle deduced as $a_1 < a_2$

3 实验及数据分析

在计算过程中,3/4 周期中天法根据的是陀螺运动方程为正弦曲线这一理想情况,如第 2.1,2.2 节对 Δt 的求解。而 2 种测量方法在寻北结果的计算中应用了同一公式。从这一意义上说,整周期中天法与 3/4 周期中天法具有相同的精度。然而,在实际中由于陀螺运动误差的影响,欠周期和满周期的精度不可能完全一样。

将 3/4 周期中天法植入系统,利用具有智能化功能的机械光学式陀螺仪做如下寻北实验:

1) 将陀螺仪固定在一个位置(此位置为大致方位),测量 3 个行程。在测量至 3/4 周期和整周期时记录测量的结果 ΔN ,计算平均值 $\overline{\Delta N}$,计算标准偏差^[5]

$$s=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2}{n-1}},$$

$$\text{其中,}\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nx_i;$$

2) 基于上一测量位置,将陀螺经纬仪转动一个角度,测量 3 个行程,观察、计算测量结果;

3) 重复步骤 2。

表 1 和表 2 是整周期中天法和 3/4 周期中天法的测量

结果。

表 1 整周期方法测量结果

Tab 1 Measurement results of whole period method

位置	行程	测量出的 整周期 T_2 (s)	测量结果 $\Delta N(^{\circ})$	均值 $\Delta N(^{\circ})$	测量结果的 标准偏差 $s(^{\circ})$
北偏东 6'	1	452.36	-231.72	-230.57	1.01
	2	452.11	-229.84		
	3	452.52	-230.16		
向西偏转 3'	1	451.63	-170.30	-167.77	5.92
	2	452.36	-172.00		
	3	452.11	-161.00		
向西偏转 2'	1	452.73	-58.27	-54.27	7.65
	2	452.48	-45.45		
	3	452.53	-59.09		
向西偏转 2'	1	452.66	53.70	51.58	5.8
	2	452.52	45.02		
	3	452.51	56.03		
向西偏转 2'	1	452.36	159.85	166.78	6.37
	2	452.52	168.11		
	3	452.36	172.37		

表 2 3/4 周期方法测量结果

Tab 2 Measurement results of 3/4 period method

位置	行程	计算出的 整周期 T_3 (s)	测量结果 $\Delta N(^{\circ})$	均值 $\Delta N(^{\circ})$	测量结果的 标准偏差 $s(^{\circ})$
北偏东 6'	1	452.40	-226.47	-229.22	4.14
	2	452.05	-227.21		
	3	452.47	-233.99		
向西偏转 3'	1	451.41	-164.21	-55.95	6.61
	2	452.46	-169.13		
	3	452.44	-169.91		
向西偏转 2'	1	453.04	-62.81	-55.95	6.61
	2	452.00	-49.62		
	3	452.42	-55.41		
向西偏转 2'	1	452.73	48.36	47.55	6.54
	2	452.63	40.65		
	3	452.93	53.65		
向西偏转 2'	1	452.43	153.70	162.28	8.13
	2	452.35	163.26		
	3	452.44	169.88		

2 种测量方法运算时,唯一不同的参数就是陀螺摆动周期。整周期方法的周期 T_2 的均值为 452.39",标准偏差为 0.27";3/4 周期方法的周期 T_3 的均值为 452.41",标准偏差为 0.39"。标准偏差表征了观测值 x_i 的变化性或对平均值 $\bar{x}$ 的分散性。由寻北测量结果看,2 种方法结果的标准偏差^[6]可以控制在 10"内。

整周期中天法寻北结果标准偏差的平均值为 5.35",

(下转第 58 页)

测微动开关端子之间的电阻),然后,再逆时针旋转螺钉 1/4 圈,相当于螺钉轴向移动 $0.5/4=0.125\text{ mm}$,作为限位的安全裕度。将微动开关组件与调试好的新顶杆与螺钉组件配对放置和使用,室温固化 24 h。

3) 产品的其余零部件组装完成后,调整新顶杆在底座上的位置,使微动开关的电触点在 0.08 MPa 时动作,这样,便能准确保证压力开关在 0.08 MPa 时再移动 0.125 mm 后安全限位。

5 试验结果

5.1 限位检测

采用新旧 2 种限位方法分别生产试验件 5 只,通过支架千分表测量压力开关限位情况检测结果如表 1。

表 1 新旧限位方法限位情况比较

Tab 1 Comparison of two different displacement restriction methods

参数	旧限位方法的试验件					新限位方法的试验件				
	J1	J2	J3	J4	J5	X1	X2	X3	X4	X5
限位压力 (MPa)	0.460	0.070	0.850	0.500	0.060	0.090	0.092	0.088	0.089	0.091

表 1 表明:采用新的限位方法消除了加工误差、装配误差的影响,保证了限位的准确性。

5.2 振动和冲击试验

选取新的限位结构产品 3 只,进行振动、冲击试验。振动试验频率为 5~2000 Hz,加速度峰值为 $5g_n$;X,Y,Z 3 个方向;冲击试验波形为半正弦波;峰值加速度为 $15g_n$;轴向和径向 2 个方向各施加 3 次冲击,持续时间为

11 ms。检测试验前后的报警点压力,试验结果见表 2。

表 2 振动和冲击试验结果

Tab 2 Experimentation results of vibration and impac

试验件 编 号	报警点压力 (MPa)				规定的报警点 压力 (MPa)
	振动试验前	振动试验后	冲击试验前	冲击试验后	
1	0.082	0.083	0.083	0.083	0.08 ±0.008
2	0.079	0.080	0.080	0.081	
3	0.080	0.082	0.082	0.081	

表 2 表明:顶杆的结构改变后,产品具有耐受振动、冲击的能力,满足技术规范规定的要求。

6 结束语

试验验证和实际应用表明:将顶杆设计成两体结构,配合合理的组装工艺,消除了加工误差和装配误差对限位可靠性的影响,解决了压力开关的限位不可靠的难题,达到了过载保护的目的,提高了产品的可靠性,对同类产品具有指导意义。

参考文献:

[1] 卢晓敏,董宇红,王 伟,等. 高温压力控制器的设计[J]. 传感器技术,2004,23(6):20.
[2] 李科杰. 新编传感器技术手册[M]. 北京:国防工业出版社,2002:146-171.
[3] 袁希光. 传感器技术手册[M]. 北京:国防工业出版社,1986:115-116.

作者简介:

王金文(1962-),男,满族,辽宁法库人,高级工程师,专业研究方向为传感器技术。

(上接第 55 页)

最大值为 7.65";3/4 周期测量法寻北结果标准偏差的均值为 5.70",最大值为 8.13"。而且,3/4 周期中天法与整周期中天法在同一位置的不同次测量中结果的标准偏差大小带有一定的随机性。从实验结果看,整周期中天法与 3/4 周期中天法的差别并不大。所以,3/4 周期中天法基本保持了整周期中天法测量精度高的特点。

4 结 论

综上所述,可以得出以下结论:
1) 在没有办法缩短陀螺寻北周期的情况下,采用欠周期方法进行寻北测量是提高寻北速度的有效途径;
2) 根据传统中天法推导了 3/4 周期中天法的理论公式,说明了这种方法在智能寻北系统中的可行性;
3) 通过实验表明:3/4 周期中天法在基本保持了中天法测量精度的前提下,可以缩短 1/4 的寻北时间,提高了寻北效率,说明了这种方法在军、民两用的重要意义。

参考文献:

[1] 林玉池,孙占元,赵美蓉,等. 中天法在陀螺智能寻北系统中的应用研究[J]. 机械工程学报,2003,39(8):116-119.
[2] 靳奉祥,郑文华. 对中天法陀螺定向计算公式的修正[J]. 工程勘察,1991(3):51-60.
[3] 郭喜庆,武克用. 新型陀螺经纬仪的研究与应用[J]. 光学精密工程,2001,9(2):182-185.
[4] 郭素云. 陀螺仪原理及应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1985:226.
[5] Shou M C, Leu L P. Energy of power spectral density function and wavelet analysis of absolute pressure fluctuation measurements in fluidized beds[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2005, 83(A5):478-481.
[6] 赵汪洋,杨功流,庄良杰. 多导航传感器的多模卡尔曼滤波研究[J]. 传感器与微系统,2006,25(7):85-88.

作者简介:

夏桂锁(1978-),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士,主要从事现代传感技术及自动测量系统的研究。