

基于光纤陀螺的教学实验寻北仪

李英姿, 钱建强, 唐 棣, 李 政, 张毅翔

(北京航空航天大学 理学院, 北京 100191)

摘要: 光纤陀螺可测量沿其轴向转动角速度, 利用此功能通过四位置法可以实现寻北、实验室所在纬度以及地球自转角速度的测量. 本文介绍光纤陀螺寻北仪和四位置法的工作原理. 另外还介绍了寻北仪的实验装置和基本操作过程, 以及对数据的处理方法.

关键词: 光纤陀螺; 四位置法; 二自由度转台; 寻北仪

中图分类号: O 436. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0712(2009)03-0036-03

惯性技术的发展与陀螺仪的发展密切相关. 陀螺仪作为一种对惯性空间角运动的惯性敏感器, 可用于测量运载载体姿态角和角速度, 是构成惯性系统的基础核心器件. 光纤陀螺仪诞生于 1976 年, 目前已经发展为惯性技术领域具有划时代特征的新型主流仪表, 具有高可靠性、长寿命、快速启动、大动态范围等一系列优点. 随着我国航空航天事业的迅猛发展, 作为当代的大学生, 应该了解和掌握更多的航空航天技术. 本实验可以使学生更加了解光纤陀螺的工作原理和应用, 通过学生实际操作实验设备达到寻北目的, 并使学生通过测量获得所在位置的纬度和地球自转角速度.

1 实验原理

1.1 光纤陀螺寻北仪的工作原理

光纤陀螺基于萨格奈克(Sagnac)效应^[1,2], 在一闭合回路中, 沿顺时针方向和逆时针方向传播的两束光的光程差 ΔL 与闭合回路轴向旋转角速度 ω 、回路面积 A 成正比(如图 1 所示), 与真空中的光速 c_0 成反比. 考虑总长为 L , 直径为 D 的光纤圈, 真空中波长为 λ_0 , 此时萨格奈克效应相位差为

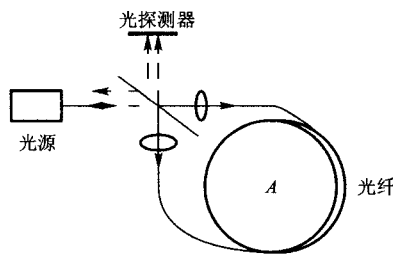


图 1 干涉式光纤陀螺原理图

$$\Delta\phi = \frac{2\pi LD}{\lambda_0 c_0} \omega \quad (1)$$

当光纤线圈绕其中心轴旋转时, 从光纤线圈两端出来的两束光出现光程差. 此时两束光的干涉情况发生变化, 到达光探测器的光强随之变化, 由于光探测器的输出电流正比于输入光强, 因此可以根据光探测器输出电流的变化检测两束光的相移, 从而推算出光纤陀螺旋转的角速度. 光探测器的输出电流可表示为^[3]

$$I = I_0 (1 + \cos \Delta\phi) \quad (2)$$

式中 I_0 为平均光强; $\Delta\phi$ 为两束光的相移.

光纤陀螺寻北仪原理如图 2 所示^[4]. 地球以恒定的自转角速度 ω_e 绕地轴旋转. 对于地球上纬度为 φ 的某点, 在该点地球自转的角速率可以分解为两个分量, 水平分量 $\omega_{e1} = \omega_e \cos \varphi$ 沿地球经线指向真北, 垂直分量 $\omega_{e2} = \omega_e \sin \varphi$ 沿地球垂线垂直向上. 可见, 利用惯性技术测量或者敏感地球自转角速度的水平分量即可获得地球上被测点的北向信息, 这就是陀螺寻北仪的基本原理^[5,6].

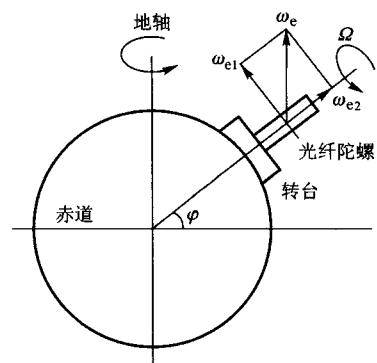


图 2 光纤陀螺寻北仪原理

收稿日期: 2008-04-09; 修回日期: 2008-10-06

作者简介: 李英姿(1968—), 女, 福建建瓯人, 北京航空航天大学理学院高级实验师, 主要从事测试计量技术研究.

1.2 四位置法^[7]

利用光纤陀螺测量其轴向所在某一确定平面内的角速度分量,其轴向每旋转 90° 测量一次角速度分量 ω , 分别记为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$, 于是有下列关系:

$$\omega_1 = \omega \cos \theta + \varepsilon + \varepsilon_0 \quad (3)$$

$$\omega_2 = \omega \cos(\theta + 90^\circ) + \varepsilon + \varepsilon_0 = -\omega \sin \theta + \varepsilon + \varepsilon_0 \quad (4)$$

$$\omega_3 = \omega \cos(\theta + 180^\circ) + \varepsilon + \varepsilon_0 = -\omega \cos \theta + \varepsilon + \varepsilon_0 \quad (5)$$

$$\omega_4 = \omega \cos(\theta + 270^\circ) + \varepsilon + \varepsilon_0 = \omega \sin \theta + \varepsilon + \varepsilon_0 \quad (6)$$

其中 ω 为光纤陀螺所在平面内角速度最大值, θ 为初始位置与角速度最大值位置的夹角或其补角, ε 为随机误差, ε_0 为系统误差。

由式(3)一式(6)分别可以得到

$$\omega_4 - \omega_2 = 2\omega \sin \theta \quad (7)$$

$$\omega_1 - \omega_3 = 2\omega \cos \theta \quad (8)$$

$$\tan \theta = \frac{\omega_4 - \omega_2}{\omega_1 - \omega_3} \quad (9)$$

即

$$\theta = \arctan \frac{\omega_4 - \omega_2}{\omega_1 - \omega_3} \quad (10)$$

由式(7)或者式(8)可以得到

$$\omega = \frac{\omega_4 - \omega_2}{2 \sin \theta} \quad (11)$$

或者

$$\omega = \frac{\omega_1 - \omega_3}{2 \cos \theta} \quad (12)$$

由式(10)、(11)或(12)可以确定 θ 和 ω , 于是我们可以确定地理北, 并由此得到陀螺所在位置的纬度和地球自转角速度。

2 实验内容

2.1 实验装置

本装置由计算机、角速度信号转换模块、光纤陀螺和二自由度转台组成。角速度信号转换模块存储在计算机内的存储器中, 计算机通过 RS232 接口与光纤陀螺连接, 光纤陀螺安装在二自由度转台的载物台上。

角速度信号转换模块用 Visual C++ 语言编译, 主要由登录界面和信息采集界面(图3)构成。登录界面用于教师和学生分别访问信息采集界面, 学生信息采集界面用来接收光纤陀螺在不同位置状态下的角速度信号, 并根据需要录入相关参数, 解析获得当前光纤陀螺所在的纬度以及地球自转的角速度。教师信息采集界面, 不仅能实现学生操作的所有功能, 而且可以检查学生实验数据。



图3 信息采集界面

二自由度转台的思路来自我国舰艇上常用的对空导弹发射架, 并巧妙的应用了分光仪的底座^[8], 突出的特点就是完全机械式的, 加强了学生实验的动手能力。转台的底座由分光仪的底座改装而成, 为第一个自由度, 可在水平面内转动; 在转盘的基础上加装一个支架, 在支架上加一个横向转动的轴, 轴外侧安装有分度盘, 与轴连接一个载物台用于放置光纤陀螺, 使其在竖直平面内转动, 为第二个自由度(如图4)。

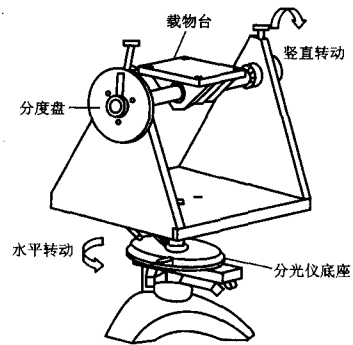


图4 二自由度转台

2.2 实验步骤及数据处理

先调节二自由度转台, 使其在竖直方向转动, 使光纤陀螺的轴向平行于水平面(也可以不平行于水平面, 所成角度 $-30^\circ \sim +30^\circ$), 锁紧竖直方向。调节二自由度转台使光纤陀螺轴向处于水平方向任意位置, 测量角速度(即零偏值), 然后顺时针或者逆时针转动转台(只沿其中的一个方向, 设沿逆时针方向), 每旋转 90° 测量 n 次角速度 ($n \geq 10$), 并取其平均值为该位置的角速度, 记为 $\omega'_i, i = 1, 2, 3, 4$, 一共

测量4个位置的数据(如表1).

表1 光纤陀螺在水平面内4个位置的采样值/(°)

位置	1	2	3	4
采样值	10.74	2.88	-9.11	-0.96
	10.65	2.69	-8.83	-0.96
	10.84	2.69	-9.02	-0.96
	10.46	2.78	-8.92	-1.06
	10.65	2.88	-9.02	-0.96
	10.65	2.69	-8.92	-0.96
	10.74	2.88	-8.83	-0.86
	10.65	2.78	-8.92	-0.96
	10.84	2.78	-8.92	-0.86
	10.84	2.88	-9.02	-0.86
平均值	10.71	2.79	-8.95	-0.94

将平均值代入式(9),有

$$\tan \alpha = \frac{\omega'_4 - \omega'_2}{\omega'_1 - \omega'_3} = -0.19$$

$$\alpha = \arctan \frac{\omega'_4 - \omega'_2}{\omega'_1 - \omega'_3} = -10.75^\circ$$

α 为光纤陀螺轴向初始位置与地理北极的夹角,当 $\alpha > 0$ 时,将转台在水平面内顺时针转过 α 角,当 $\alpha < 0$ 时,将转台在水平面内逆时针转过 $-\alpha$ 角.再测量此位置的自转角速度分量,当自转角速度 $\omega' > 0$ 时,光纤陀螺轴向所对方向即为地理北的方向;当自转角速度 $\omega' < 0$ 时,光纤陀螺轴向所对方向即为地理南的方向.

此时锁紧二自由度转台水平方向,使转台仅在竖直平面内转动.调整光纤陀螺使其轴向垂直于水平面(通过在光纤陀螺上放置水平仪,使光纤陀螺上表面平行于水平面,此时我们认为光纤陀螺其轴向垂直于水平面),测量此位置时的角速度,然后依次将光纤陀螺轴向指向地理南极、竖直向下、地理北极,每个位置测量 n 次角速度($n \geq 10$),取平均值后分别记为 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 ω_4 (见表2).

表2 光纤陀螺在竖直面内4个位置的采样值/(°)

位置	1	2	3	4
采样值	11.10	9.77	-11.76	-9.99
	11.21	9.77	-11.76	-9.88
	11.10	9.99	-11.76	-9.99
	11.10	9.77	-11.87	-9.99
	11.21	9.99	-11.87	-9.88
	11.21	9.65	-11.87	-9.99
	11.10	9.77	-11.76	-9.77
	11.10	9.77	-11.87	-9.88
	11.10	9.99	-11.76	-9.99
	11.10	9.77	-11.87	-9.88
平均值	11.14	9.82	-11.82	-9.92

将平均值代入式(9),有

$$\tan \varphi = \frac{\omega_4 - \omega_2}{\omega_1 - \omega_3} = 0.86$$

$$\varphi = \arctan \frac{\omega_4 - \omega_2}{\omega_1 - \omega_3} = 40.71^\circ$$

$$\omega = \frac{\omega_4 - \omega_2}{2 \sin \varphi} = 15.14^\circ/\text{h}$$

这样就得到了光纤陀螺所在位置的纬度 φ 和地球自转角速度 ω .

2.3 实验误差的计算与分析

真实值: $\varphi_0 = 39.93^\circ$, $\omega_0 = 15.04^\circ/\text{h}$

$$\eta_\varphi = \left| \frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_0} \right| = 1.95\%$$

$$\eta_\omega = \left| \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right| = 0.65\%$$

本实验所产生的误差主要来自在测量过程中由于振动、环境温度等因素对光纤陀螺造成的微扰,导致测量同一位置的十组数据有微小的差别,尽管通过取平均值消除了一定的误差,但是误差仍然存在.另外,二自由度转台和人为操作等也对实验结果有所影响.

3 结论与展望

光纤陀螺轴向处在水平面内,测量出其角速度分量,利用四位置法计算出偏差角度,然后确定地理北的方向;在包含地理北方向并垂直于水平面的平面内,测量出光纤陀螺轴向的角速度分量,利用四位置法计算出实验室所处的纬度值和地球的自转角速度.采用在相差 90° 的4个方向上采样的四位置法寻北方案,可以抵消陀螺常值漂移的影响,并减小陀螺随机漂移的影响.从实验结果来看满足学生实验的要求.

此实验已在本校自主创新实验中投入使用,在下一阶段,我们准备在实验方案和数据处理等方面增加内容,并投入到全校本科综合实验中.

参考文献

- [1] 张桂才. 光纤陀螺仪[M]. 北京:国防工业出版社, 2002.
- [2] Sagnac G. L'ether lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'ether dans un interféromètre en rotation uniforme [J] *Compte-rendus de l'Académie des Sciences*, 1913, 95:708-710.
- [3] Culshaw, Giles I P. Fiber optic gyroscope[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1993,16(1): 120-128.
- [4] 张志君,孙霁宇,武克用. 光纤陀螺寻北仪样机设计及系统测试[J]. *测试技术学报*, 2007, 21(2): 130-132.

(下转42页)

完全相同. 在电工学中, 通过在感性电路两端并联一个适当的电容器可以提高负载的功率因素以减少无功功率的消耗. 而我们这里是采用串联电容器的方式减少不必要的热损耗.

参考文献:

- [1] 人民教育出版社. 物理选修 1-1[M]. 北京: 人民教育出版社, 2006.
- [2] 侯云畅. 高等数学: 下册[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 281-283
- [3] 周义仓, 靳祯, 秦军林. 常微分方程及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 155-157
- [4] 复旦大学, 上海师范大学物理系. 电磁学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979: 168-176; 313-315
- [5] 廖玄九, 郭木森, 屠广林, 等. 电工学: 上册[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979: 94-99

An explanation for demonstrative phenomenon in hand alternator

CAI Zhi-dong

(Department of Teacher Education, Danyang School District of Zhenjiang College, Danyang, Jiangsu 212300, China)

Abstract: The phenomenon of a pulsating direct current in demonstrative experiment of hand alternator is founded and the reasonable explanation is presented. An improvement for demonstrative experiment is also proposed.

Key words: alternator; pulsating direct current; second-order linear differential equation with constant coefficient

(上接 38 页)

- [5] Lauf G B. Gyroscopic Surveying[J]. Quarterly of the Colorado School of Mines, 1970, 65(2): 25-28.
- [6] Logan K P. Determining an azimuth with a gyrotheodolite [M]. Engineer Topographic Laboratories, Virginia, 1986.
- [7] 张德宁, 万健如, 韩延明, 等. 光纤陀螺寻北仪原理及其应用[J]. 航海技术, 2006, (1): 37-38.
- [8] 梁家惠, 李朝荣, 徐平, 唐芳. 基础物理实验[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.

A fiber - optic gyroscope north seeker for teaching experiments

LI Ying-zi , QIAN Jian-qiang, TANG Di, LI Zheng, ZHANG Yi-xiang

(School of Science, BeiHang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Fiber-optic gyroscope (FOG) can be used to measure the velocity of rotation on its axis. Using this method and four-position scheme, we measure the north of the earth, the latitude of laboratory and the speed of self-rotation of the earth. The main principles of FOG north seeker and four-position scheme are introduced. The experimental equipment of north seeker, experimental steps and the data treatment method are also discussed.

Key words: FOG; four-position scheme; two-axis turntable; north seeker