

Ψ 型四位置寻北仪方案

刘程

(中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘要:在传统四位置寻北方案基础上,针对光纤陀螺寻北仪提出了一种新的转位方案,将传统水平面内相互垂直转动寻北改为 Ψ 型转动寻北。相对传统转位方案,不仅保持了原有的优势,同时能够减少 25% 的转位时间。在不同情况下,通过巧妙的公式构造和选取对应位置下的陀螺输出,能有效避免光纤陀螺死区造成的寻北误差,并且可以提高某些特定角度范围的寻北精度。

关键词:转位方案;四位置;寻北仪

中图分类号:TN253;TP212.1;U666.1 **文献标识码:**A

Ψ Type Four-position North Seeker Scheme

LIU Cheng

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: On the basis of the traditional four-position north seeker scheme, a new transposition scheme for the optical fiber gyroscope north seeker is proposed in this paper. The ψ -type transposition scheme is used instead of the conventional perpendicular transposition scheme in horizontal plane. Compared with the traditional scheme, it not only maintains the original advantage, but also can reduce the transfer time by 25%. Under different circumstances, the error caused by the dead zone of FOG can be avoided effectively by using the formula constructed skillfully and selecting the corresponding position of the gyroscope output. And it can improve the accuracy of the north seeker in certain angle range.

Key words: transposition scheme; four-position; north seeker

0 引言

光纤陀螺仪是基于萨格纳克效应的光学陀螺的一种,一般包括干涉式、谐振式和布里渊式 3 种^[1]。现在讨论的光纤陀螺仪主要是指干涉式光纤陀螺仪(IFOG),自 1976 年首次演示了干涉型光纤陀螺原理以来,经过近 40 年的发展,IFOG 已在惯性导航领域中占据了重要位置。光纤陀螺仪与传统转子式陀螺仪相比,其具有结构简单,全固态,无机械转动部件,可瞬时启动,无机械磨损,耐冲击及动态范围大等优点;另外,根据不同的用途可选择不同的光纤长度和线圈直径来达到所需测量精度。因此,光纤陀螺仪在陆地、航天、航空、航海等领域应用广泛^[2]。

在传统正交四位置寻北方案的基础上,本文提出了一种新的寻北方案,即“Ψ”型四位置转位寻北。该转位方案不仅保持了传统四位置寻北的优势,且能减少 25% 的转位时间。理论上分析了本方案在 4

个位置上的输出,通过巧妙的公式构造推导出 3 种不同方位计算公式。根据不同的情况来选取计算公式,这样可以有效避免陀螺处于敏感死区时带来的方位计算不精确性,同时还能提高某些特定角度方位内的寻北精度。

1 光纤陀螺寻北原理

地理坐标系 $Ox_e y_e z_e$ 和地球自转角速度 ω_e 的关系如图 1 所示^[3],其中 ω_e 的方向平行于地球自转轴,在地球纬度为 ϕ 的地方, ω_e 可分为沿地理坐标系的北向 y_e 的水平分量 ω_1 ($\omega_1 = \omega_e \cos \phi$) 和地理坐标系的天向 z_e 的垂直分量 ω_2 ($\omega_2 = \omega_e \sin \phi$)。若将光纤陀螺垂直安装在水平面上,假定光纤陀螺的敏感轴在水平面内,且与载体纵轴方向一致,则光纤陀螺敏感到的角速率即为在水平方向的分量,便可解算出载体纵轴向与北向的夹角或直接确定北向所在的方位,从而实现自主定向^[4]。

收稿日期:2015-08-17

作者简介:刘程(1986-),男,重庆人,工程师,硕士,主要从事组合导航算法的研究。

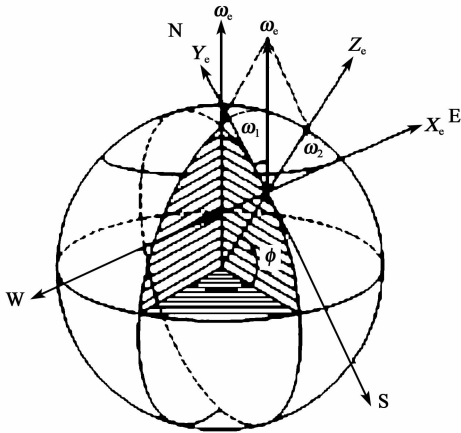


图1 地理坐标和地球自转角速度的关系

地理坐标系的北向水平分量 ω_1 在水平面的投影如图2所示,图中E、W、S、N分别为东、西、南、北方向,FOG为光纤陀螺, φ 为方位角。

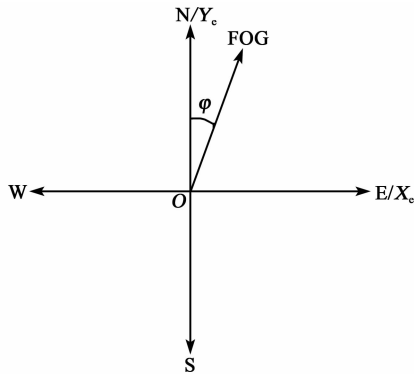


图2 地球自转角速度水平面投影分量

将光纤陀螺仪输入轴即光纤敏感环的垂线方向置于水平面内,则其敏感的是 ω_1 在输入轴方向上的分量,如果光纤陀螺的输入轴在理想水平位置,则有

$$U = \omega_0 + K\omega_e \cos \phi \cos \varphi + \varepsilon(t) \quad (1)$$

式中: U 为光纤陀螺输出; ω_0 为光纤陀螺零偏; K 为刻度系数; $\varepsilon(t)$ 为陀螺漂移。从式(1)可看出,在不考虑光纤陀螺零位和漂移的情况下,光纤陀螺在某一定点测到的输出值与真北方向的夹角成余弦关系。而在实际使用中,由于陀螺漂移和其他外界干扰的影响,需要在式(1)的基础上研究更复杂和有效的寻北方案^[5]。

根据采样和解算方式的不同,光纤陀螺的寻北方案可分为静态和动态两种。静态寻北方案包括二、三、四位置寻北方案和多位置寻北方案。

2 传统的四位置寻北方案介绍

传统四位置寻北方案,让光纤陀螺在水平面内相差 90° 的4个位置进行检测,然后根据光纤陀螺输

出值计算出北向角,如图3所示。

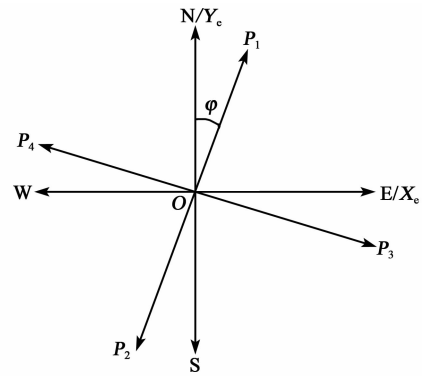


图3 传统四位置转位寻北

转位顺序按照 $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4$,其中位置 P_1 为初始时刻光纤陀螺敏感方向,然后顺时针转动 180° ,逆时针转动 90° ,再顺时针转动 180° ,最后回到 P_1 位置,其优点是能够有效得到光纤陀螺零位,提高寻北精度,但转位机构总共需转动 720° 。按照上面的转动顺序可得到光纤陀螺在4个位置上的4个不同的输出,分别为 U_{10} 、 U_{20} 、 U_{30} 和 U_{40} 。

位置 P_1 :

$$U_{10} = \omega_0 + K\omega_e \cos \phi \cos \varphi + \varepsilon(t_1) \quad (2)$$

位置 P_2 :

$$U_{20} = \omega_0 - K\omega_e \cos \phi \cos \varphi + \varepsilon(t_2) \quad (3)$$

位置 P_3 :

$$U_{30} = \omega_0 - K\omega_e \cos \phi \sin \varphi + \varepsilon(t_3) \quad (4)$$

位置 P_4 :

$$U_{40} = \omega_0 + K\omega_e \cos \phi \sin \varphi + \varepsilon(t_4) \quad (5)$$

忽略陀螺随机漂移,可以计算得到方位角:

$$\varphi = a \tan \frac{U_{40} - U_{30}}{U_{10} - U_{20}} \quad (6)$$

从式(6)可看出,传统四位置寻北方案在忽略陀螺随机漂移时,方位角解算采用差分 and 比值的方法,从而避开求光纤陀螺刻度系数、零偏、地理纬度等参数的影响。但如果4个位置中的任一个位置存在测量偏差都将给最终的方位计算带来较大的误差,所以对4个位置的绝对测量精度要求高^[6]。尤其是当方位角处于东西方向小角度范围时,由于光纤陀螺存在测量死区及最小分辨等问题,无法敏感到小的地球自转水平分量,此时测量值出现一定的偏差,导致方位角计算不准。

3 改进的四位置寻北方案

在已知各种寻北方案中,二位置寻北方案花费

时间和采样点数均最少,但是需要知道光纤陀螺的刻度系数和测量点当地纬度信息^[3-4,7]。从第2节分析可知,传统四位置寻北方案不需要以上信息,但寻北时间长,且不能有效避免光纤陀螺的测量死区,导致在某些方位上,测量误差大。因此,在传统四位置寻北方案中,要对寻北时间和寻北精度进行折衷考虑,在充分借鉴传统四位置寻北方案的基础上,设计了一种新的四位置寻北方案,如图4所示。

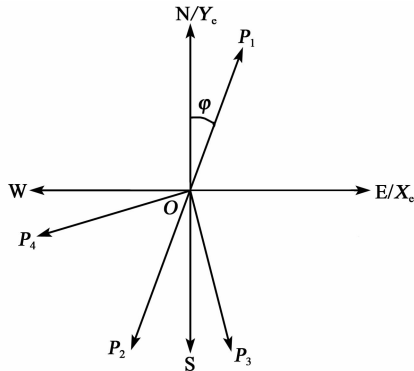


图4 Ψ型四位置转位寻北

图中, $\angle P_3OP_2 = \angle P_2OP_4 = 45^\circ$, $OP_3 \perp OP_4$ 。新的转位方式下,4个位置不再处于相互垂直的关系,只有 P_3 与 P_4 保持相互垂直,而不是传统的敏感相反方向。 P_1 与 P_2 依然保持传统相反方向,但 OP_3 、 OP_4 与轴 P_1P_2 分别保持 45° 的夹角关系。采用新的转位方式不仅节约转位时间,还能有效避免陀螺死区带来的方位不精确性。

改进后的转位顺序仍为 $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4$, 其中 P_1 为初始时刻光纤陀螺敏感方向,然后顺时针转动 180° 到达 P_2 ,逆时针转动 45° 到达 P_3 ,再顺时针转动 90° 到达 P_4 ,最后回到 P_1 ,转位机构总共需转动 540° 。相对传统转位方案,在转位上能节约25%的时间。按照上面的转动顺序可得到光纤陀螺在4个位置上的4个不同的输出,分别为 U_1 、 U_2 、 U_3 和 U_4 。

位置 P_1 :

$$U_1 = \omega_0 + K\omega_e \cos \phi \cos \varphi + \varepsilon(t_1) \quad (7)$$

位置 P_2 :

$$U_2 = \omega_0 - K\omega_e \cos \phi \cos \varphi + \varepsilon(t_2) \quad (8)$$

位置 P_3 :

$$U_3 = \omega_0 + K\omega_e \cos \phi \cos(\varphi + 180^\circ - 45^\circ) + \varepsilon(t_3) = \omega_0 - K\omega_e \cos \phi \cos \varphi \cos 45^\circ - K\omega_e \cos \phi \sin \varphi \cos 45^\circ + \varepsilon(t_3) \quad (9)$$

位置 P_4 :

$$U_4 = \omega_0 + K\omega_e \cos \phi \cos(\varphi + 180^\circ + 45^\circ) + \varepsilon(t_4) = \omega_0 - K\omega_e \cos \phi \cos \varphi \cos 45^\circ + K\omega_e \cos \phi \sin \varphi \cos 45^\circ + \varepsilon(t_4) \quad (10)$$

同样忽略陀螺随机漂移,将式(7)、(8)相加可得光纤陀螺零位:

$$\omega_0 = (U_1 + U_2)/2 \quad (11)$$

将式(7)、(8)相减可得光纤陀螺敏感地球自转在 P_1 时的水平分量输出:

$$K\omega_e \cos \phi \cos \varphi = (U_1 - U_2)/2 \quad (12)$$

将式(10)和式(9)相减可得

$$K\omega_e \cos \phi \sin \varphi \cos 45^\circ = (U_4 - U_3)/2 \quad (13)$$

将式(10)和式(9)相加,并将式(11)代入可得

$$K\omega_e \cos \phi \cos \varphi \cos 45^\circ = [(U_1 + U_2) - (U_4 + U_3)]/2 \quad (14)$$

联合式(13)、(14)可得方位求取式为

$$\varphi = \text{atan} \frac{(U_4 - U_3)}{(U_1 + U_2) - (U_4 + U_3)} \quad (15)$$

从式(15)可看出,本文提出的Ψ型四位置寻北方案同样保持了传统四位置寻北方案的优势,即不需要光纤陀螺刻度系数、零偏、地理纬度。但是实际工程应用中,受光纤陀螺测量分辨率及自身测量死区的限制,当光纤陀螺敏感轴在东西方向一定小角度范围时,陀螺敏感不到地球自转水平分量,输出只有零位。假设东西方向上 $\pm 2^\circ$ 为死区,该死区数值范围由具体陀螺参数确定。为提高参与方位计算数据的可靠性,可将死区范围扩大至 $\pm 15^\circ$ 。

4 避死区方位计算

综上所述可知,当陀螺敏感轴在死区上时,光纤陀螺在该位置上的输出将不含地球自转水平分量。因此需要对式(7)~(15)作一定的变换处理,则有以下几种情况。

4.1 位置 P_3 处于死区

当位置 P_3 处于死区时,即方位在 $135^\circ \pm 15^\circ$ 或 $315^\circ \pm 15^\circ$,此时位置 P_3 只输出陀螺零位,位置 P_1 、 P_2 、 P_4 能有效敏感地球自转水平分量,其中位置 P_4 输出绝对值最大,此时不利用位置 P_3 的输出信息。

将式(12)左、右乘以 $\cos 45^\circ$ 可得

$$K\omega_e \cos \phi \cos \varphi \cos 45^\circ = \cos 45^\circ \frac{(U_1 - U_2)}{2} \quad (16)$$

将式(11)、(16)代入式(10)可得

$$K\omega_e \cos \phi \sin \varphi \cos 45^\circ = U_4 - \frac{(U_1 + U_2)}{2} +$$

$$\cos 45^\circ \frac{(U_1 - U_2)}{2} \quad (17)$$

联合式(16)、(17)可得

$$\varphi = \operatorname{atan} \frac{2U_4 - (U_1 + U_2) + \cos 45^\circ (U_1 - U_2)}{\cos 45^\circ (U_1 - U_2)} \quad (18)$$

4.2 位置 P_4 处于死区

当位置 P_4 处于死区时,即方位在 $45^\circ \pm 15^\circ$ 或 $225^\circ \pm 15^\circ$,此时位置 P_4 只输出陀螺零位,位置 P_1 、 P_2 、 P_3 能有效敏感地球自转分量,其中位置 P_3 输出绝对值最大,此时不利用位置 P_4 的输出信息。

将式(11)、(16)代入式(9)可得

$$K\omega_e \cos \phi \sin \varphi \cos 45^\circ = \frac{(U_1 + U_2)}{2} - U_4 - \cos 45^\circ \frac{(U_1 - U_2)}{2} \quad (19)$$

联合式(16)、(19)可得

$$\varphi = -\operatorname{atan} \frac{2U_3 - (U_1 + U_2) + \cos 45^\circ (U_1 - U_2)}{\cos 45^\circ (U_1 - U_2)} \quad (20)$$

当方位在以上两种情况范围以外时,均可采用式(15)进行方位计算,不再考虑位置 P_1 、 P_2 是否处于死区。主要是由于参与方位计算的 $K\omega_e \cos \phi \cos \varphi \cos 45^\circ$ 和 $K\omega_e \cos \phi \sin \varphi \cos 45^\circ$ 是通过位置 P_3 、 P_4 上的输出计算得到,位置 P_1 、 P_2 上的输出只参与零位计算,而零位的计算无论 P_1 、 P_2 是否处于死区,均能有效计算得到。

采用本文提出的 Ψ 型四位置转位寻北方案可应用式(15)、(18)和(20)计算得到方位信息,具体采用哪种计算公式,视具体情况而定。在某些方位情况下,也可混合使用,从而提高寻北精度。

5 结束语

通过以上原理分析可看出,本文提出的这种“ Ψ ”型四位置寻北新方案,相对传统四位置寻北,在各个环节都体现出了很强的优越性。

1) 保持传统四位置方案下不需要知道光纤陀

螺刻度系数、零位和寻北当地纬度信息。

2) 该方案将寻北过程中的转位时间降低了25%,从而降低光纤陀螺漂移对寻北结果的影响,实现快速寻北的同时提高寻北精度。

3) 它的转位控制、测量与计算原理简单,工程上易实现,因此适合工程化应用。

这种新寻北方案在寻北方法研究上提供了有别于传统寻北方案的另一种思路,对促进寻北仪向高精度,快速寻北方向上的发展将起积极作用。

参考文献:

- [1] 杨远洪,申彤,郭锦锦. 光纤陀螺技术及应用[J]. 红外与激光工程,2007,36(5):626-631.
YANG Yuanhong, SHEN Tong, GUO Jinjin. Fiber optic gyroscope technology and application[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(5): 626-631.
- [2] 王丽芬,谢英,杨功流,等. 基于光纤陀螺的捷联寻北仪误差分析[J]. 光电工程,2011,38(5):46-51.
WANG Lifeng, XIE Ying, YANG Gongliu, et al. Error analysis of the strap-down north-finder based on the fiber optic gyroscope[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(5): 46-51.
- [3] 王文霞. 光纤陀螺寻北方案研究和比较[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2009.
- [4] 段苛苛. 基于光纤陀螺的寻北系统关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学,2014.
- [5] 朱立峰,吴易明,陈良益,等. 对光纤陀螺寻北仪二位置寻北方案的改进[J]. 科学技术与工程,2007,7(12): 2908-3910.
ZHU Lifeng, WU Yiming, CHEN Liangyi, et al. Improvement of two position north determining scheme to IFOG north seeker[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(12): 2908-3910.
- [6] 郑秋丽. 光纤陀螺寻北仪误差分析及补偿技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2011.
- [7] 姜璐,于运治,姜庆国. 二位置光纤陀螺寻北方案及误差分析[J]. 兵工自动化,2012,31(3):55-57.
JIANG Lu, YU Yunzhi, JIANG Qingguo. Two-position optical fibre gyro north-seeking scheme and error analysis[J]. Ordnance Industry Automation, 2012, 31(3): 55-57.