

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.03.005

稳定环境下的高精度光纤捷联惯导精度探索研究

陶冶¹, 李海军², 徐海刚²

(1. 海军研究院, 北京 100161; 2. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要:在分析法国 MARINS 光纤惯导方案及温度试验的基础上, 论证提出了一种带温控高精度光纤陀螺捷联惯导设计方法, 并在温箱稳定环境下进行了试验验证。试验表明, 在温箱温控精度为 0.1°C 的条件下, 惯导系统精度可以达到 $1\text{nmile}/10\text{d}$; 若实装, 温控精度将优于 0.02°C , 光纤惯导精度还可进一步提高。

关键词: 稳定环境; 光纤陀螺 (FOG); 捷联惯导系统 (SINS); 导航精度

中图分类号: U666.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2018)03-0030-05

Research on Precision of High Accuracy FOG-SINS Under Steady Conditions

TAO Ye¹, LI Hai-jun², XU Hai-gang²

(1. Naval Research Academy, PLA, Beijing 100161, China;

2. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: Based on the deep analysis of the project and test of MARINS in France, a designing method of an accurate FOG-SINS with temperature control is introduced and experimentally validated at a constant temperature in the environmental chamber. The result shows that the 10-day navigation precision of FOG-SINS can reach 1 nmile when the temperature control precision of the environment chamber is 0.1°C and can be further improved if the temperature control precision reaches 0.02°C through precise temperature control methods.

Key words: Steady conditions; Fiber Optic Gyroscope (FOG); Strapdown Inertial Navigation System (SINS); Navigation precision

0 引言

在国外, 潜用惯导和水面型惯导一直是分 2 个系列单独发展。潜用惯导对陀螺的性能要求最高, 一般要结合电磁计程仪、配合电子海图信息, 在重力异常和强洋流区域系统工作于三阶阻尼模式, 其他区域工作于 Kalman 阻尼模式, 目的是抑制舒拉周期振荡误差对惯导性能的影响, 提高长周期导航精度^[1-2]。目前国外实际应用的最高精度水下型惯

导是静电陀螺惯导, 静电陀螺精度优于十万分之一, 且噪声极小、角度随机游走可忽略, 但陀螺热稳定时间长、对准 3d 左右才能发挥出理想的高精度。如何替代结构复杂、维护成本昂贵的静电惯导, 更好地满足武器等用户的需求是近年来惯性导航领域面临的突出和现实问题。美国立顿公司利用霍尼韦尔成熟的高精度激光陀螺、采用双轴旋转调制方案, 实现了惯导 14d 的重调周期, 推算激光惯导自主定位精度优于 $2\text{nmile}/14\text{d}$ 。但采用旋转调制方

收稿日期: 2018-02-07; 修订日期: 2018-03-31

基金项目: 装发“十三五”项目 (41417030101)

作者简介: 陶冶 (1979-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事舰艇导航技术研究。E-mail: taoye02@buaa.edu.cn

案在机理上存在锯齿形速度误差,难以满足高精尖用户速度和姿态匹配传递对准的需要。法国 IXBLUE 公司光纤陀螺及惯导系统处于国际领先地位,近期一项试验表明,纯捷联光纤惯导在温箱环境下实现了优于 $0.4\text{nmile}/38\text{d}$ 的定位精度,对应的光纤陀螺的精度达到 $4.7 \times 10^{-6} (^{\circ})/\text{h}$,充分显示了光纤陀螺捷联惯导系统的精度潜力。这主要是通过稳定的温度环境克服光纤陀螺全温环境劣势,充分发挥了光纤陀螺长期稳定性好的特点^[3]。在此基础上,本文跟踪开展了高精度光纤陀螺惯导系统研究,通过分析光纤陀螺的数据可以发现,其在稳定环境条件下的精度水平要明显优于温度变化等非稳定环境。因此,本文研制了一套高精度光纤陀螺捷联惯导系统,并在温箱中进行恒温条件下的精度测试,旨在探索温度稳定条件下高精度光纤陀螺捷联惯导系统的精度潜力。

1 光纤陀螺惯导系统设计方案

光纤陀螺惯导系统在实际使用过程中的磁场及温度环境对系统精度的影响较大。为了给光纤陀螺提供一个较为稳定的使用环境,在系统设计时需要重点考虑系统的磁场环境及温度环境,为此采取多项技术措施确保系统精度可以达到实际要求,包括:基于多层磁屏蔽的磁场误差抑制、基于多腔结构设计的温度隔离、基于定温与变温相结合的多级温度误差补偿等技术^[4-6]。

1.1 系统结构

系统的结构设计主要考虑给陀螺仪及加速度计提供一个较为稳定的环境。为此,在结构上采取分腔设计,即将陀螺仪及加速度计构成的组合放在一个单独的腔体内,而惯导系统相关的二次电源板及信息处理电路等配套电路放在另外一个腔体内。这样,作为系统热量的主要来源,电源板及信息处理电路在系统工作时产生的热量对惯性组合中的陀螺仪及加速度计的影响将降至最低,陀螺仪及加速度计在系统工作时的温升将被控制在一个很小的范围之内。系统的结构示意图如图 1 所示。

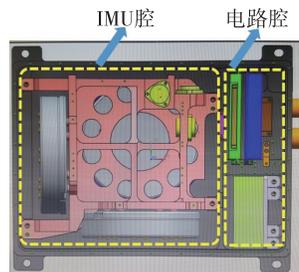


图 1 惯导系统结构

Fig. 1 The structure of SINS

1.2 系统组成

光纤陀螺捷联惯导系统主要包括高精度三轴一体光纤陀螺、高精度石英挠性加速度计以及配套的二次电源转换电路板和综合信息处理电路等组成,如图 2 所示。其中二次电源板主要完成光纤陀螺、加速度计以及其他配套电路所需电源的二次转换,信息处理电路的功能包括完成内部光纤陀螺和加速度计数据的采集,同时完成与外界相关设备的通信等功能。在完成系统设计之后,需要重点研究光纤陀螺以及加速度计的温度特性,并对相关误差进行有效补偿,具体方法在第 2 节介绍。

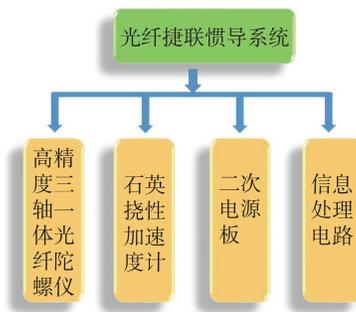


图 2 系统组成

Fig. 2 The composition of SINS

2 光纤陀螺温度特性

2.1 温度影响分析

光纤陀螺的基本结构包括光路和电路两部分。光路部分包括:超发射激光二极管 SLD 光源、单模耦合器、Y 波导、光纤环圈、光电转换探测器等;电路部分包括前置放大模块、A/D 模块、逻辑模块

(FPGA)、D/A 转换及驱动模块、光源驱动和温控模块、测温模块等。温度对光纤陀螺内部的各个元器件都可能产生影响,在器件级,通常研究不同器件受温度的影响特性,并采取针对性的措施,不断改善不同温度下器件的性能^[7-8]。而对于已经成型的光纤陀螺,如果要想进一步提高其输出精度,可以在系统级对输出进行进一步补偿。

2.2 温度补偿方法

为了减小陀螺输出精度受环境温度的影响,目前较为常用的方法是在系统级进行温度标定,即基于光纤陀螺整体输出情况随温度的变化进行研究,提出基于各种数学建模方法的补偿技术对光纤陀螺的输出进行补偿^[9-11]。温度标定方法通常是将陀螺放在温箱中,设定温箱以一定的速率在低温和高温之间往返几次,再利用陀螺的输出结果与温度数据进行拟合,利用拟合结果对陀螺输出进行补偿。

图 3 所示为温度标定时温度变化情况,可以看出进行了 2 次 $-40^{\circ}\sim+60^{\circ}$ 的温度变化过程。图 4 所示为在经过温度标定之后,对陀螺输出进行补偿前后的曲线情况,可以很明显看出,在没有进行温度补偿时,陀螺输出数值明显存在较大变化;而经

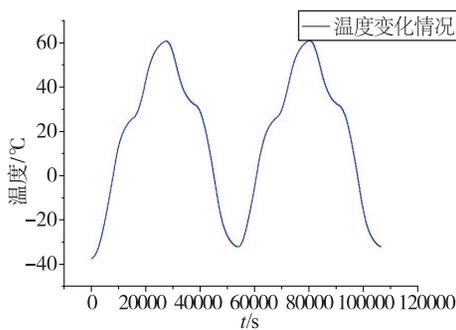


图 3 温度曲线

Fig. 3 The temperature curve

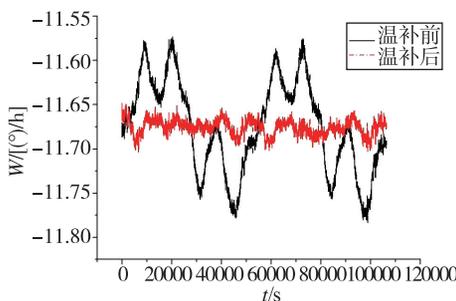


图 4 陀螺输出补偿前后对比曲线

Fig. 4 The curve of gyroscope output before and after compensation

过温度标定补偿之后,陀螺输出受温度变化的影响不再那么明显,输出精度提高了近 1 个数量级。目前不同单位生产的光纤陀螺不论是在器件级还是在系统级都会进行温度的补偿,通常经过温度补偿后陀螺的输出精度可以提高数倍。

同时可以看出,在经过温度补偿后,陀螺的输出精度仍然不能满足舰船等需要长时间导航的高精度应用场合。在这种情况下,如果要进一步提高系统的精度只能采取两种方法,一是采用更高精度的光纤陀螺,二是在系统级进一步消除陀螺漂移对系统导航精度的影响。而光纤陀螺的精度性能受研究水平及加工工艺的影响,短期内很难提高;而在系统上减小陀螺漂移对系统导航精度的影响,可以采用旋转调制技术,利用不同方向陀螺漂移的对称影响,减小对系统级精度的影响,这也是目前的一个热点研究方向。

旋转调制惯导系统虽然具有一定的精度优势,且目前已经取得了一些实际应用,但是相对于捷联惯导系统,其在可靠性、维修性、系统成本以及尺寸质量等方面不占优势。如果以捷联的结构同样取得旋转调制惯导系统的精度水平,那么将把两者的优势结合于一身。

2.3 恒温条件下的陀螺特性

2.2 节分析了经过温度补偿的光纤陀螺精度水平有较大幅度的提升,但是补偿后的剩余误差相对于高精度应用领域仍然无法接受,也就是说陀螺精度仍然会受温度变化的影响。上面都在分析温度变化时光纤陀螺的输出精度,下面分析温度稳定条件下光纤陀螺的精度水平。

光纤陀螺在实验室条件下测试获得的精度会明显优于实际工程应用的精度,这从一方面说明光纤陀螺的精度水平容易受外界环境的影响,而另一方面也同样说明光纤陀螺在环境稳定的条件下会表现出较好的精度水平。

图 5 所示为某型高精度光纤陀螺在试验室条件下测试时温度变化曲线,可以看出刚上电时,陀螺温度慢慢上升,在近 2h 后稳定在 0.4° 的区间范围内。图 6 所示为对应的陀螺输出曲线,可以看出当陀螺温度稳定在 0.4° 区间时,陀螺输出的曲线明显较为平稳,陀螺的输出精度可以优于 $0.001(^{\circ})/h$ ($100s$ 平均)以内,可以看出在温度稳定时,陀螺的输出也会非常稳定。

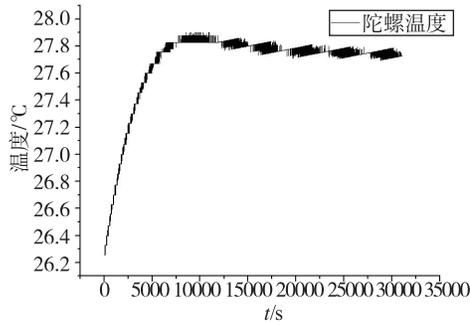


图 5 高精度光纤陀螺测试温度曲线

Fig. 5 The test temperature curve of high accuracy fiber optic gyroscope

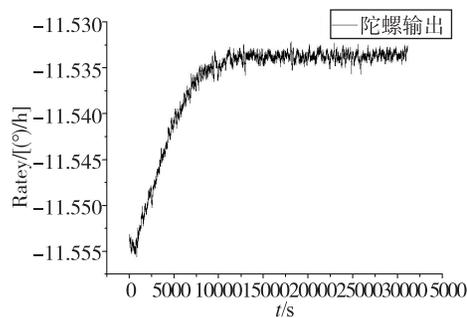


图 6 高精度光纤陀螺测试输出曲线

Fig. 6 The output curve of high accuracy fiber optic gyroscope

3 稳定环境下的精度探索

利用高精度光纤陀螺研制了一套捷联惯导系统样机,将该样机放入温箱中,设定温箱温度为恒温 40°。在系统温度稳定后,首先对系统进行一组 4h 以上的长时间测试,利用该条次数据完成对系统在 40°条件下的天向陀螺漂移及加表零偏等误差的估计,在补偿各项估计误差后,对系统进行 1.0h 的初始对准,然后进入纯惯性导航,导航时间在 7~17d,共进行 3 个条次测试。

测试的导航结果如表 1 所示,可以看出,测试的最大误差小于 3nmile,该精度甚至优于利用同精度的光纤陀螺研制的双轴旋转调制系统。通过分析恒温条件下的陀螺输出数据,在温度稳定时,陀螺输出精度优于 0.0002(°)/h,甚至达到 0.0001(°)/h,而该陀螺在常温温度未稳定条件下的输出精度只能达到 0.002(°)/h。可以看出,温度稳定时,陀螺输出精度将提高 1 个数量级以上。

表 1 试验时导航结果

Tab. 1 The navigation result of experimentation

| 序号 | 时间/d | 最大误差/m | |
|----|------|--------|------|
| | | 经度 | 纬度 |
| 1 | 17 | 4542 | 1575 |
| 2 | 11 | 1588 | 679 |
| 3 | 7 | 1231 | 945 |

图 7 和图 8 所示分别为条次 1 试验时的位置误差曲线以及实验时的系统温度曲线,由图 7 可以看出,北向位置误差最大值在 1500m 左右,东向位置误差最大值为 4500m 左右,而在 10d 内误差都在 1nmile 以内。系统温度稳定在 44.50°~44.58°之间,由于系统存在一定的温升,因此系统温度略高于温箱设定温度。由图 8 系统的温度曲线可以看出,由于存在白天和黑夜的变化导致温箱外界环境温度的变化,使温箱内温控精度受到影响,因此系统敏感到的温度也存在一定的波动,且呈一定的周期变化。

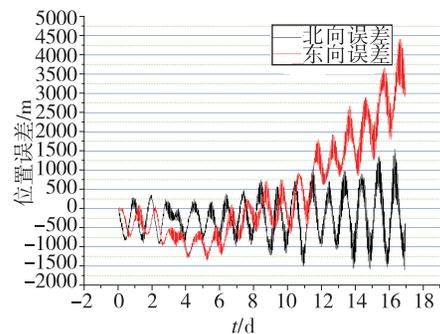


图 7 条次 1 导航结果

Fig. 7 The navigation result of data No. 1

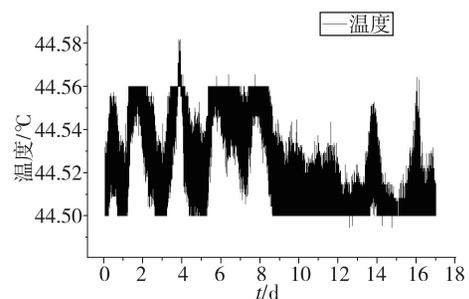


图 8 条次 1 温度曲线

Fig. 8 The temperature curve of data No. 1

由数据可知,温箱的实际温控精度在 0.1° 左右,且随外界环境存在一定的周期变化。而依据以往系统的设计经验,系统级温控可以将内部温度精确控制到 0.02° 左右。而当环境温度进一步稳定时,陀螺的输出精度将有进一步提高的空间,系统的精度水平也将有一定的提升,这正是下一步的研究方向。

上面针对温度稳定下的陀螺输出精度进行了详细分析,而加速度计的精度水平同样会影响到系统的精度水平。经过数据分析发现,在温度稳定条件下,加速度计会表现出稳定的精度水平,其零偏稳定性可优于 $5\mu\text{g}$,这也确保了系统的长时间导航精度。

4 工程应用问题

稳定环境下的高精度光纤捷联惯导系统如果要实现工程应用,还有很多工程问题需要面对和解决,主要包括:系统温度稳定所需要的准备时间,惯性器件误差的重复性问题等。实际应用中需要面对的各种工程问题并不影响目前对研究方向的探索。下面对这2个问题进行简单的分析和说明。

1) 准备时间

系统如果要开始工作必须是在内部环境稳定的条件下,而系统内部温度稳定通常需要几个小时的时间,这个时间对于高精度惯导系统的应用场合来说是可以接受的,目前静电陀螺惯导系统的准备时间可能需要十几个小时,甚至几十个小时。因此对于高精度的应用场合,温度稳定所需要的准备时间不是主要问题。

2) 器件误差重复性

以上主要是针对器件误差的稳定性进行了分析。而由惯性器件的特点可知,系统的重复性与稳定性基本处于相同的量级,也就是说器件误差稳定性好的情况下,其重复性精度也会很高,因此只需在前期完成对系统器件常值误差的补偿即可。具体情况还需进一步分析和验证,特别是长期稳定性问题。

5 结论

本文针对需要长时间高精度惯性导航的应用领域,对环境稳定条件下的光纤陀螺捷联惯导系统的系统精度进行了探索研究。首先分析了光纤陀螺受温度影响的精度特性、温度补偿方法及效果,重点研究了温度稳定条件下光纤陀螺的精度水平,发现在温度稳定时,陀螺的输出精度可以有大幅度

的提升。据此,利用研制的高精度光纤陀螺捷联惯导系统在温箱中进行环境稳定条件下的验证试验,结果表明在温控精度 0.1° 的条件下,系统精度可达 $1\text{mile}/10\text{d}$,而当温控精度进一步提高时,系统精度有望同步提升,最后分析了工程应用时需要解决的工程问题,后续将提高温控精度,进一步探索环境稳定条件下的高精度光纤捷联惯导系统精度潜力。

参考文献

- [1] 张崇猛,蔡智渊,舒东亮,等. 船舶惯性导航技术与展望[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(6): 3-8.
- [2] 孙伟,孙枫,刘黎明. 光纤陀螺旋转捷联惯导系统的发展与应用[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(11): 1-4.
- [3] Paturel Y, Honthaas J, Lefèvre H, et al. One nautical mile per month FOG-based strapdown inertial navigation system: A dream already within reach[J]. Gyroscopy and Navigation, 2014, 5(1): 1-8.
- [4] Ruffin P B, Smith R H. Fiber winding approaches for environmentally robust IFOG sensor coils components for fiber optic applications[C]//IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. San Diego, 1992: 179-189.
- [5] 赵龙,胡少波,纪文涛. 光纤惯组温度补偿模型和测试技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2016, 348(4): 39-43.
- [6] Fang J C, Wan D J. A fast initial alignment method for strapdown inertial navigation system on stationary base[J]. Journal of Southeast University, 1996, 32(4): 1501-1504.
- [7] Zhang X F, Fan H C, Liang Y. FOG output drift compensation based on temperature gradients[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2011, 33(1): 38-39.
- [8] Liu Y Y, Yang G L, Yin H L. Temperature compensation for fiber optic gyroscope based on dual models [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015, 23(1): 132-136.
- [9] Chen X Y, Shen C. Study on temperature error processing technique for fiber optic gyroscope[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(9): 784-792.
- [10] 刘元元,杨功流,李思宜. BP-AdaBoost模型在光纤陀螺零偏温度补偿中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(2): 235-239.
- [11] Narasimhappa M, Sabat S L, Rangababu P, et al. An improved adaptive Kalman filter for denoising fiber optic gyro drift signal[C]//Proceedings of Annual IEEE India Conference (INDICON). IEEE, 2014: 1-6.