

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.02.002

光纤陀螺惯导在航海领域的发展与应用

徐海刚¹, 裴玉锋¹, 刘冲¹, 李海军¹, 陶冶²

(1 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074;

2. 海军装备研究院, 北京 100161)

摘要:针对航海导航领域对惯性技术发展的新需求,从系统精度、旋转调制技术、陀螺性能等方面出发,梳理了国外航海惯导技术的发展脉络。由此总结出了航海惯导三点新的发展需求,包括定位精度、研制成本、使用维护性,同时给出了满足当前发展需求的一个研究方向,那就是采用超高精度的光纤陀螺研制航海惯导。最后从陀螺精度极限、温控、全阻尼等几个方面进行简要的可行性论证,并给出了部分验证试验结果,试验结果表明光纤陀螺惯导在航海领域具有广阔的发展前景。

关键词:光纤陀螺;航海惯导;组合导航;温控

中图分类号:U666.1

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2018)02-0007-05

The Development and Application of Fibre Optic Gyroscope INS in Navigation Domain

XU Hai-gang¹, PEI Yu-feng¹, LIU Chong¹, LI Hai-jun¹, TAO Ye²

(1. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China;

2. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China)

Abstract:Based on the new requirement of marine navigation for inertial technology development, the development of overseas navigation technology is reviewed, focusing on system precision, rotating modulation and gyro performance. And the demand of marine inertial navigation development is discussed in terms of positioning precision, manufacturing cost and maintenance. Then one of the development directions that can meet the current development demand is pointed out, which is INS based on FOG of ultrahigh precision. At last, the feasibility discussion of the limit of FOG precision, temperature control and absolute damping is presented. Part of experiment result is offered and shows the vast development prospect of FOG-based INS.

Key words:Fibre Optic Gyroscope(FOG); Marine INS; Integrated navigation; Temperature control

0 引言

当前航海惯导技术的发展,整体上仍是瞄准更高精度和更高性价比这2个主要目标。光纤陀螺惯导在航海领域的全面发展,绕不开在这2个主要目

标上与已成熟应用的静电、激光陀螺航海惯导进行全方位的比较。那么,现有成熟的静电、激光陀螺航海惯导技术的发展历程与现状如何,与其相比光纤陀螺有何突出特点,这一技术途径是否可行以及能否长远发展等是摆在我们面前需要深入思考的

收稿日期:2018-02-01;修订日期:2018-03-03

基金项目:“十三五”装备预研项目(3020107040102)

作者简介:徐海刚(1979-),男,博士,研究员,主要从事高精度惯导系统总体设计。E-mail: 56438859@qq.com

问题。针对这类问题,本文试图通过分析比较与试验验证提供一种解决方案^[1]。

从理论和工程应用上讲,航海惯导技术的发展需求,对处于不同发展阶段的国家是明显不同的,对新技术的发展和应用,主要取决于其先进性、可行性与付出的代价之间的权衡,不能一概而论。例如对于美国,经过多年积累,静电陀螺导航系统、旋转调制激光惯导产品状态已经极为稳定,后者的生产成本也处于可接受水平,其对光纤陀螺在航海领域应用的积极性表现的相对保守^[2];对于法国,其自身对航海惯导并无太高的技术要求,对于光纤陀螺航海惯导的大力鼓吹更多来自商业考虑;对于我国,显然又是另一番情形。本文尽量从技术发展本身来进行讨论^[3]。

1 国外情况梳理

本节重点梳理国外航海惯导技术的发展脉络,而不详细罗列产品或技术。纵观航海惯导技术的发展历程及现状,有以下几条脉络比较明显。

首先,技术发展的重点不仅是精度。早在20世纪50年代,液浮陀螺精度已经达到 $0.000015(^{\circ})/h$ ^[4];在20世纪70年代,静电陀螺惯导也达到相应的精度^[5];而之后发展的激光惯导、光纤惯导,都尚未达到这一精度。因此,航海惯导技术的发展重点不仅是产品的精度,更重要的是既能满足需求、又可批量制造且价格可接受。显然,以WSN-7A/B为代表的旋转调制激光惯导很好地满足了这类需求,并且具有相当可观的精度^[6]。

其次,旋转调制技术不能解决所有问题。当前多个领域热衷于应用旋转调制,但这并不代表该技术能解决所有问题,实践证明也存在一定固有缺陷。例如快速对准性能未必好,水平翻滚带来的误差难以抑制,定位精度高但姿态、速度品质特性不高等。当然,这里并非否定旋转调制技术的优点,而是说,随着对性能要求的提高以及惯性仪表技术的发展,最优的系统解决方案也会变化^[7]。

再次,导航系统技术的发展是螺旋式上升的。在航海导航领域,经历了从稳定平台(如静电导航仪)到固定式捷联(如MK 39 Mod A)、再到框架式捷联(如WSN-7A/B)的形式演变;随着光纤陀螺的发展,固定式的高精度光纤捷联惯导(以法国Marins为代表)有望成为新的发展主流^[8];长远来看,随着原子陀螺的发展,稳定平台式的惯导系统

有望重新被使用。没有一成不变的形式,系统技术的发展,是惯性仪表技术、产品成本与可制造性、对精度的追求等多方面综合权衡的结果^[9]。仪表精度难以提高时,会牺牲系统复杂度来获取性能;反之,系统形式会大大简化。由此表现出螺旋上升的发展趋势^[10]。

最后,对激光陀螺与光纤陀螺特点的比较应该客观。依据经验,激光陀螺在标度因数、零偏温度特性方面具有显著优势,在成本方面并不比光纤陀螺高;光纤陀螺在随机游走特性方面具有显著优势,在零偏重复性方面并不比激光陀螺差^[11]。另一个判断有待进一步考究或试验证实,即以MK 39 Mod A为代表的固联式激光捷联惯导也曾获得广泛应用,但其后至今未再获得进一步发展,原因可能是其长期工作或存储的稳定性不如光纤陀螺^[12]。

综上,从国外情况来看,航海惯导技术的发展历史与发展需求、本国发展基础、惯性仪表发展情况之间是息息相关的,不存在一劳永逸的解决问题的方案,最优方案始终在发展的路上,当前所谓最优的方案终究会被淘汰^[13]。

2 新的发展需求

从武器装备使用的角度来看,新的发展首要需求显然不是精度问题,而是制造与使用维护性,但这一问题又只能依靠采用新的技术途径来解决。因此,航海惯导新的发展需求主要表现在以下2个方面:

1)需要发展定位精度接近或优于激光陀螺导航系统、导航信息特性(速度、姿态等信息的绝对误差和变化率)优异的导航系统^[14]。

2)需要发展定位精度接近静电陀螺导航仪、成本呈量级降低、使用维护性(启动时间、标定周期等)显著提高的导航系统^[15]。

为了满足以上发展需求,首先需要改进或采用新型陀螺仪。近期来看,光纤陀螺在随机游走、零偏长期稳定性、成本、可制造性等方面具有突出的优势,激光陀螺如能在长期稳定性、随机游走方面有所突破,亦是不错的选择^[16];远期来看,超高精度原子陀螺有望进入航海导航应用领域。其次在系统技术上创新,快速温控技术是解决光纤陀螺受温度变化影响的一条有效途径;克服剩余陀螺漂移需要在工程应用上突破全阻尼技术;系统形式应采用纯捷联的形式^[17]。

综上,采用超高精度的光纤陀螺研制航海惯导,是满足当前发展需求的一条很好的途径。

3 可行性论证

下面从陀螺精度极限、温控、全阻尼、试验验证等几个方面进行简要的可行性论证。

3.1 陀螺精度极限

对于长航时导航系统来说,主要考虑的是光纤陀螺的随机游走系数要小、零偏稳定性和零偏长期重复性要高^[18]。

从理论极限来看,光纤陀螺的随机游走可达 $10^{-6} (^{\circ})/h^{\frac{1}{2}}$ 以上,零偏稳定性可达 $10^{-6} (^{\circ})/h$ 以上,零偏重复性理论精度是 0,相应的导航系统精度可满足 3 个月乃至更长时间导航的需要^[19]。

从实际发展来看,目前国际上最新报道的零偏稳定性最高的光纤陀螺,是俄罗斯 Optolink 公司的 SRS-5000 光纤陀螺,其随机游走可以达到 $6.9 \times 10^{-5} (^{\circ})/h^{\frac{1}{2}}$,零偏稳定性达到 $8 \times 10^{-5} (^{\circ})/h$;而从实际应用和验证来看,法国 iXblue 公司的 Marins 系列产品所用陀螺等效零偏重复性精度已达到 $1.5 \times 10^{-5} (^{\circ})/h$,已可望静电陀螺之项背^[20]。

随着光纤陀螺技术的发展,光纤陀螺这一极限精度及可工程实现的精度将进一步提高,可以支撑超高精度航海惯导的发展。

3.2 温控技术的得失

温度变化是所有超高精度陀螺的大敌,采用温控技术是解决这一问题最直接、最有效的技术途径。

对于超高精度惯导及其应用场景来说,采用温控技术需要增加的体积、质量、功耗一般不是太大的问题,准备时间的延长是需要重点考量的问题。资料显示,对于静电陀螺、三浮陀螺等机电陀螺来说,温控稳定的时间在 12~36h,陀螺精度才能达到相应的设计极限;而对于光纤陀螺来说,这一时间也不会显著的缩短,甚至有可能增长,这是需要重点考量的问题之一^[21]。

此外,温度控制的稳定性也是关键指标之一,对于 $10^{-5} (^{\circ})/h$ 量级的光纤陀螺来说,0.1℃ 量级的短期波动都有可能是致命的影响,这就需要在系统隔热与温度控制上下功夫。

3.3 全阻尼技术

阻尼技术是航海惯导的核心关键技术。当前

普遍成熟应用的是采用经典控制理论设计的水平阻尼网络,能够有效地将水平方向的舒拉振荡消除,从而获得稳定、平滑的姿态和速度信息,但也仅此而已;方位阻尼网络的实现存在巨大困难。

研究表明,采用 Kalman 滤波融合电磁计程仪与惯导的信息,能够有效消除水平方向的舒拉振荡,同时能够估计出或部分估计出水平方向惯性仪表(主要是陀螺)的误差,消除其对应的呈地球周期振荡的误差,从而有效地提高系统导航精度。举例说明,水平阻尼网络仅能消除舒拉振荡的影响^[22];采用组合导航方案,则可在消除舒拉振荡的同时,又可以基于观测的舒拉振荡幅值估计出水平陀螺漂移,并消除其影响,相当于起了 2/3 方位阻尼的作用,因此可以从本质上提高长航时的导航级精度^[23];实践表明这至少是可以部分做到的。

应用组合导航技术之后,决定系统精度的核心关键因素就变成了垂向陀螺漂移,如何进一步估计出这一误差源,是航海惯导系统极具应用价值和挑战性的一项工作^[24]。

3.4 试验验证

采用高精度光纤陀螺,对以上思路进行验证。将惯导系统放置在温箱内,在恒温条件下进行长航时导航精度测试。测试时间持续 17d,整个过程中光纤陀螺数据曲线及温度曲线分别如图 1、图 2 所示。

可以看出,整个过程陀螺温度变化峰峰值在 0.4℃ 左右;尽管陀螺输出变化峰峰值在 0.001(°)/h 左右,但其长周期平均的零偏稳定性为 0.0002(°)/h。另外,从 2 条曲线对比可以看出,陀螺输出变化与温度有明显的对应关系,通过精密温控与补偿有望进一步提高陀螺输出精度。

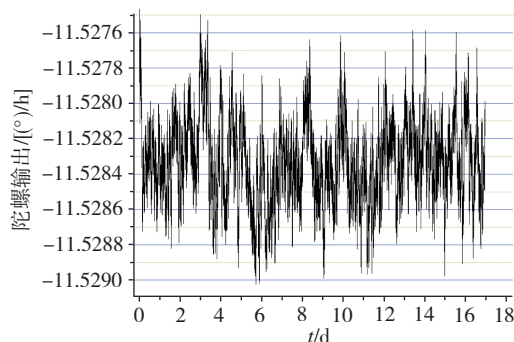


图1 陀螺输出曲线

Fig. 1 The output curve of gyroscope

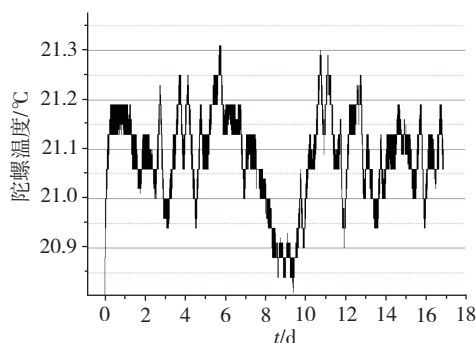


图 2 陀螺温度曲线

Fig. 2 The temperature curve of gyroscope

试验过程中系统位置误差如图 3 所示,北向位置误差最大值为 1500m,东向位置误差最大值为 4500m。该实验结果表明在温控条件下,光纤惯导系统实验室静态定位精度能够达到 1.0nmile/10d。通过进一步提高温控精度及温度误差补偿精度,导航精度有望达到 1.0nmile/20d,甚至 1.0nmile/30d。

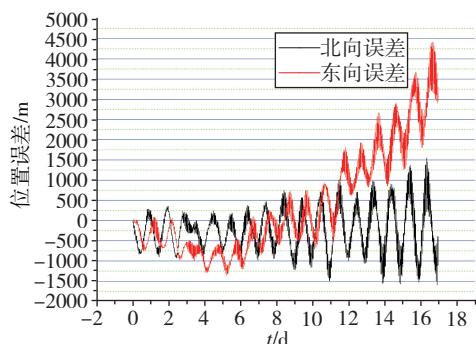


图 3 位置误差曲线

Fig. 3 The curve of position error

另外,测试发现,陀螺温度稳定大概需要 6~8h,但陀螺输出稳定要在 20h 以上,因此如何加快温控稳定时间是后期工程应用中需要重点关注的问题^[25]。

4 展望

本文针对航海导航领域对惯性技术发展的新需求,总结了国外航海惯导技术的发展历程,分析了光纤陀螺惯导在航海领域应用的优劣势以及关键技术,总结有以下几点结论:

1)航海惯导技术不存在一劳永逸的解决方案,最优方案始终在发展进步;

2)采用超高精度的光纤陀螺研制航海惯导,是满足当前发展需求的一条很好的途径;

3)温控光纤是目前实现长航时高精度导航的一种优选方案。

参考文献

- [1] Ishibashi S, Tsukioka S, Sawa T, et al. The rotation control system to improve the accuracy of an inertial navigation system installed in an autonomous underwater vehicle[C]//2007 Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. IEEE, 2007: 495-498.
- [2] Tucker T, Levinson E. The AN/WSN-7 B marine gyrocompass/navigator[C]//2000 Proceedings of the ION NTM. Anaheim, 2000: 348-357.
- [3] Titterton D H, Weston J L. Strapdown Inertial navigation technology(2nd Edition)[M]. Copublished by the American institute of Aeronautics and Astronautics and the Institution of Electrical Engineers, 2004: 453-456.
- [4] Feng S, Yongli C, Yueyang B, et al. Azimuth rotation experiment and analysis for fiber-optic gyroscope strapdown system[C]//2009 International Conference on Information Technology and Computer Science. IEEE, 2009: 141-144.
- [5] Sun F, Sun W, Wu L. Coarse alignment based on IMU rotational motion for surface ship[C]//2010 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium (PLANS). IEEE, 2010: 151-156.
- [6] Chang G, Xu J, Li A, et al. Error analysis and simulation of the dual-axis rotation-dwell autocompensating strapdown inertial navigation system[C]//2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). IEEE, 2010: 124-127.
- [7] Liu X, Deng Z H, Wang B, et al. Transfer alignment method under uncertain flexure deformation based on multiple model filtering[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(10): 2145-2151.
- [8] 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.
- [9] Liu Y, Yang G, Yin H. Temperature compensation for fiber optic gyroscope based on dual models[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015, 23(1): 132-136.
- [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] Paturol 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.
- [12] 徐海刚, 郭元江, 李志峰, 等. 旋转调制光纤陀螺惯导寻北精度探索[J]. *导航定位与授时*, 2015, 2(3): 11-15.
- [13] 郭元江, 钱江, 徐海刚, 等. 舰载武器捷联惯导系统极地传递对准算法[J]. *导航定位与授时*, 2015, 2(3): 23-28.
- [14] 吴衍记. 高精度光纤陀螺发展现状及对策[J]. *导航定位与授时*, 2015, 2(4): 53-57.
- [15] 刘冲, 孙凯丽, 李海军, 等. 双轴旋转惯导系统轴系间安装偏差角的标校方法[J]. *导航定位与授时*, 2015, 2(1): 1-5.
- [16] 郑辛, 武少伟, 吴亮华. 导弹武器惯导系统传递对准技术综述[J]. *导航定位与授时*, 2016, 3(1): 1-8.
- [17] Hays K M, Schmidt R G, Wilson W A, et al. A submarine navigator for the 21st century[C]//2002 IEEE Position Location and Navigation Symposium. IEEE, 2002: 1451-1460.
- [18] Morrow R B, Heckman D W. High precision IFOG insertion into the strategic submarine navigation system[C]//IEEE 1998 Position Location and Navigation Symposium. IEEE, 1998: 118-123.
- [19] Yang Y, Miao L J. Fiber-optic strapdown inertial system with sensing cluster continuous rotation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(4): 1173-1178.
- [20] Levinson E, Majure R. Accuracy enhancement techniques applied to the marine ring laser inertial navigator (MARLIN)[J]. *Navigation*, 1987, 34(1): 64-86.
- [21] Rice H, Mendelsohn L, Aarons R, et al. Next generation marine precision navigation system [C]//IEEE 2000 Position Location and Navigation Symposium. IEEE, 2000: 233-247.
- [22] Hibbard R, Wylie B, Levison E. Sperry marine MK-49, The world's best ring laser gyro ship's inertial navigation system[C]//Proceedings of the JSDE. Orlando, 1996: 1-7.
- [23] Wu J, Huang D, Tan Z. Research on errors self-estimation of INS in motion base[C]//Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation. IEEE, 2000: 2084-2087.
- [24] Goshen-Meskin D, Bar-Itzhack I Y. Unified approach to inertial navigation system error modeling[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1992, 15(3): 648-653.
- [25] Wei G, Li G, Wu Y, et al. Application of Least Squares-Support Vector Machine in system-level temperature compensation of ring laser gyroscope[J]. *Measurement*, 2011, 44(10): 1898-1903.