

光学陀螺捷联惯性系统的发展与展望

查峰¹ 高敬东² 许江宁¹ 胡柏青¹

(¹中国人民解放军海军工程大学电气与信息工程学院, 湖北 武汉 430033)

²中国人民解放军海军工程大学训练部, 湖北 武汉 430033

摘要 综述光学陀螺的发展及其在捷联惯性系统中的应用概况, 总结其发展态势和研究方向。在简述光学陀螺的工作原理及优势的基础上, 回顾美、欧等国光学陀螺的发展历程以及我国光学陀螺的研究现状, 总结了光学陀螺研究的关键技术。概述捷联惯性系统的技术特点及光学陀螺在系统应用上的优势后, 回顾了美、欧等国光学陀螺捷联系统的发展历程。针对我国高精度光学陀螺捷联系统的研制需求, 阐述了美国在高精度系统方面的研制情况和技术途径。总结出光学陀螺捷联惯性技术的发展趋势, 为我国高精度光学陀螺捷联惯性系统的研制工作提供借鉴和参考。

关键词 光学器件; 发展; 激光陀螺; 光纤陀螺; 捷联惯性系统

中图分类号 V241.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.072301

Overview on Strapdown Inertial System Consisted by Optical Gyros

Zha Feng¹ Gao Jingdong^{1,2} Xu Jiangning¹ Hu Baiqing¹

¹Electric and Information College, The Chinese People's Liberation Army Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

²Department of Training, The Chinese People's Liberation Army Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract The development of optical gyro and its application in strapdown inertial system are presented to summarize their tendencies and research directions. The progress of optical gyro technology in America and European and the domestic research state are reviewed after analyzing the operating principle and characteristic of optical gyro, and then the key technology of optical gyro is summarized. The development of strapdown inertial system consisting of optical gyro is presented after introducing the characteristic of strapdown inertial system and the applied trait of optical gyro. The technology adopted by the high precision system research in America is expounded, and then the research tendency of optical gyro strapdown inertial technology is summed up, which can offer references to high accuracy system research and manufacture.

Key words optical devices; development; laser gyro; fiber-optic gyro; strapdown inertial system

OCIS codes 230.3120; 060.3510; 140.3370; 060.2800

1 引言

惯性导航是一种利用安装在载体上的惯性器件来测定载体的加速度、角速率等信息, 由此确定载体位置的技术。光学陀螺是 20 世纪 60 年代以后发展成熟起来的一种新型角速率敏感惯性元器件。与传统的机械转子陀螺相比, 它具有全固态、性能稳定、可靠性好、耐振动冲击、寿命长、动态范围广、启动迅速等一系列优势。目前, 国外的光学陀螺技术已渐趋成熟, 其产品呈现多样化、系列化, 并成功应用于各种军事、民用导航

收稿日期: 2011-02-17; **收到修改稿日期**: 2011-03-15; **网络出版日期**: 2011-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(40904018)、总装“探索一代”重大项目基金(7130529)和教育部重点实验室开发基金(201001)资助课题。

作者简介: 查峰(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事光学陀螺捷联惯性技术及应用等方面的研究。

E-mail: zha_feng@126.com

导师简介: 许江宁(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事惯性技术及应用方面的研究。E-mail: xujiangning@hotmail.com

领域。以美国为例,从主战飞机到战略导弹,从水面舰艇到战略核潜艇都装备有光学陀螺惯性导航系统。我国在光学陀螺的研究方面发展不均衡,只有国防科学技术大学等少数单位具有高精度产品的研制能力,光学陀螺研究及应用的总体水平落后于西方发达国家。尤其在工作时间长、精度要求高的舰船惯性导航系统方面,还没有相应的产品。随着光学、测控等技术的进一步发展,光学陀螺具有可观的精度潜力,以其为核心构件的惯性导航系统成为惯性系统技术的重要发展方向。

本文在简述光学陀螺原理的基础上,提供借鉴和参考。

2 光学陀螺的原理及特点

1913年,G. Sagnac^[1]发现了 Sagnac 效应,即沿着同一圆周路径反向传播的两束光在光源和路径发生旋转时将经过不同的行进路程而产生相位差。光学陀螺就是利用这一特性测定载体的旋转角速度。

激光陀螺的工作原理结构如图 1 所示,采用了 3 个反射镜组成环形谐振腔,即闭合光路。激光管中沿光轴传播的光子向两侧经过透镜 M_1 和 M_5 射出,再分别从另一端反射回来,于是回路中有传播方向相反的两条光束。若环形光路的角速度为零,则正反方向运行的两束光的光程相同,因此两束光在腔体中形成静止干涉条纹。若环形光路存在转动,正反方向运行的两束光会因光程不同而形成频率差,此频率差反映了转动角速度大小,因此通过测量该频率差可以确定载体运动的角速度。

光纤陀螺(FOG)与激光陀螺的工作原理本质相同,主要区别在于利用了多匝光纤环取代环形激光器。

光学陀螺的工作原理是建立在量子力学的基础上,它利用光路替代了传统陀螺的机械转子,陀螺无旋转和运动部件,具有传统机械陀螺不可比拟的优势。陀螺性能稳定,可靠性好;能够承受强烈的速度和振动冲击,寿命长,动态范围广;不存在马达的启动和稳定问题,启动迅速,具有很高的标度因子稳定性;输出信息数字化,方便计算机处理;相对于同精度的机械陀螺,成本低;动态测量范围大,可直接固联于载体,便于构成捷联惯性系统。

3 光学陀螺的发展历程

Sagnac 效应发现后,受限于当时的技术条件和生产工艺,在随后的 50 年里并没有出现相应的光学陀螺产品。20 世纪 60 年代,激光技术的出现使得光学陀螺的研究突飞猛进。1963 年,Macek 等^[2]首次验证了环形激光陀螺的概念。1976 年美国 Utah 大学制成世界上第一台光纤陀螺。1975 年,Vali 等^[3]提出了光纤陀螺的构想,但从提出构想到工程实践存在一系列的技术困难,为此研究人员耗费了几十年的时间。

目前具有光学陀螺的研制和生产能力的国家有美国、法国、德国、英国、俄罗斯、日本等。其中美国和法国的研制水平最高。我国对光学陀螺研究起步较晚,但近年来进展明显。

3.1 美欧光学陀螺的发展

美国代表了光学陀螺研究和生产的最高水平,最有代表性的为 Northrop Grumman, Sperry, Honeywell 等公司。

1963 年,Sperry 公司首先做出了激光陀螺仪的实验装置。1966 年,Honeywell 公司提出利用抖动偏频法消除闭锁效应,这一技术使得陀螺的生产成为可能。1972 年,该公司研制出 GG-1300 型激光陀螺,随后成功应用于战术飞机和导弹上。

20 世纪 80 年代起,美国军方先后开始与 Douglas、Honeywell、Litton、Rockwell 等公司合作,开始研制激光陀螺捷联惯导系统。1985 年美国提出了战略防御计划(SDI)后,投资 10.4 亿美元用于开展激光实验及激光陀螺的研制工作。

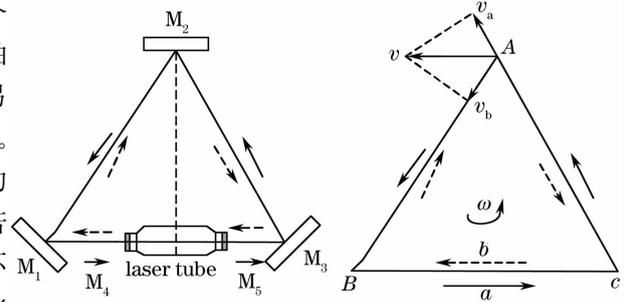


图 1 激光陀螺的结构和光路图

Fig. 1 Structure and optical path of laser gyro

在应用需求牵引下,美国各大公司都研制了相应的产品,其中 Honeywell 公司研制水平最高。据公开文献显示,该公司精度最高的激光陀螺零漂为 $0.00015^\circ/\text{h}$,输入速率动态范围 $1500^\circ/\text{s}$,使用寿命 $2 \times 10^5 \text{ h}$ 以上,输入轴对准稳定度达到微弧量级。

与此同时,美国的光纤陀螺也得到了迅速发展。20 世纪 90 年代, Northrop Grumman 公司的光纤陀螺产品的漂移在 $1.0 \sim 0.01^\circ/\text{h}$ 之间,已成功应用于 IMU200, IMU600 和 LN200 等系统中^[4]。而 Honeywell 公司是光纤陀螺产品的最主要研发单位,其产品研发历程^[5](如表 1 所示)在一定程度上代表了光纤陀螺的发展。

表 1 Honeywell 研发的光纤陀螺
Table 1 FOG developed by Honeywell

Years	Type of FOG	Bias $/(\circ/\text{h})$	RWC $/(\circ/\text{h}^{1/2})$
1986~1991	Tactic FOG	10	0.1
1989~1994	Polarization maintaining FOG	0.001	0.0002
1994~1997	Polarization maintaining FOG (high precision)	0.0002	0.0001
1993~1996	Fiber-optic depolarized gyro		
1998	Fiber-optic depolarized gyro (high precision)	0.0001	0.00009

20 世纪 90 年代, Honeywell 为美国军方的干涉型光纤陀螺(IFOG)计划^[6,7](该计划旨在用光纤陀螺替代静电陀螺应用于战略核潜艇)研制 ADM I 和 ADM II 两种高精度的光纤陀螺。ADM I 随机游走系数达到了 $0.0003^\circ/\text{h}^{1/2}$ 。ADM II 外型如图 2,文献[8]报道了该陀螺的研制情况,陀螺仪尺寸为 9.8 和 13.5 cm,高度为 7.8 cm,随机游走系数相对于 ADM I 有所提高,精度指标因保密考虑未提及。

法国光学陀螺的研究也一直走在世界的前列,其最为代表性的单位为 Sextant 公司、Sagem 公司和 Ixsea 公司。

1972 年, Sextant 公司开始研究激光陀螺。1979 年研制的 SEXTANT 型激光陀螺应用于“美洲虎”直升机飞行,1981 年 33CM 型激光陀螺在 ANS 超音速导弹项目中标,1987 年研制的激光陀螺用于“阿里安”4 火箭的飞行。1990 年该公司获得了法国未来战略导弹项目。

Sagem 公司的激光陀螺研究始于 1977 年,1987 年组装了第一个样机 GLS32 型环形激光陀螺,后经技术改进后用于航空及潜艇的捷联惯导系统。1987 年又研制了面向于航空应用的 GLC16 型样机。

Ixsea 公司在光纤陀螺的研究方面卓有成效。该公司的前身为 Photonetics 旗下的一个导航部,直到 2000 年成为 Ixsea 公司。20 世纪 70 年代后期, Photonetics 的 Udd 等相继发表了许多被称为具有“里程碑”价值的文章^[9~11]。20 世纪 80 年代后期, Photonetics 公司取得了技术上的重大突破,提出的“全数字”概念,为高性能的光纤陀螺研制提供了先决条件;20 世纪 90 年代初,无制冷、波长稳定的光纤光源的出现使得产品精度进一步提高;到 20 世纪末, Photonetics 公司对外公布的量产产品零漂达到了 $0.05^\circ/\text{h}$ 。该公司为了配合 NASA 公司的 Sofia 计划,在 1997 年底研制了 4 只零漂为 $0.00022^\circ/\text{h}$ 的光纤陀螺产品。

另外德国、意大利、俄罗斯、日本也是光纤陀螺研究和生产的大国。德国的 Litef 公司和意大利 Lital 公司、俄罗斯 Fizoptika 公司都具有光纤陀螺的生产能力。日本在中、低精度光纤陀螺实用化、民用化方面走在世界的前列。

3.2 我国光学陀螺的研究

我国在 20 世纪 90 年代开始了光学陀螺的研究。目前有国防科学技术大学、航天工业总公司属第 33 所、13 所、航空工业集团第 618 所、上海 803 所、北京航空航天大学、浙江大学、北京理工大学等单位都相继开展了光学陀螺的研究工作。

国防科学技术大学对于激光陀螺的研究一直走在国内前列。据公开文献显示,到目前为止研制的激光陀螺零漂为 $0.002^\circ/\text{h}$,随机游走系数为 $0.0003^\circ/\text{h}^{1/2}$,温度敏感系数 $0.00002^\circ/(\text{h} \cdot \text{C})$,标度因子稳定性小于

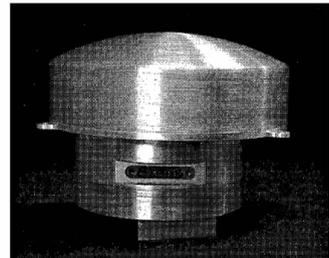


图 2 ADM II 光纤陀螺

Fig.2 ADM II fiber-optic gyro

6×10^{-6} , 达到国际先进水平。另外, 中国航空工业集团第 618 研究所也进行了激光陀螺的研制工作, 其系列产品已成功应用于国产飞机导航系统中。

清华大学在“九五”期间开展了循环干涉型光纤陀螺的研究^[12]。循环干涉型光纤陀螺可减小光纤敏感线圈在结构和绕制等方面的难度, 从而降低光纤陀螺的成本。浙江大学和 Honeywell 公司几乎同时发现应用消偏技术能够提高光纤陀螺精度。北京航空航天大学具备了从 $0.5 \sim 0.01^\circ/\text{h}$ 不同精度的光纤陀螺的量产能力。2009 年后, 该单位与航空 618 所合作以研制更高精度的光纤陀螺产品。除此之外, 公开的文献资料中很少涉及其他单位的研制情况。

4 光学陀螺的关键技术

激光陀螺仪的关键技术在于对陀螺漂移、噪声和闭锁阈值的处理和解决:

1) 激光陀螺的漂移表现为零偏的不稳定性。影响激光陀螺零偏的主要原因有谐振光路的折射系数、介质扩散的各向异性、氦氛等离子体在激光管中的流动。

2) 激光陀螺噪声表现在角速度测量上, 一方面来自激光介质的自发发射, 另一方面是目前多数激光陀螺仪采用的机械抖动偏频技术, 在抖动运动变换方向时, 抖动角速率较低, 在短时间内, 低于闭锁阈值, 将造成输入信号的漏失, 并导致输出信号相位角的随机变化。

3) 闭锁阈值问题是激光陀螺面临的最为关键的问题。它将影响到激光陀螺仪标度因子的线性度和稳定度。闭锁阈值取决于谐振光路中的损耗, 主要是反射镜的损耗。

为了解决这些关键问题, 国内外许多学者进行了大量的理论和实验研究。

G. A. Pavlath^[4]对激光陀螺的工程化问题进行了详细阐述。Honeywell 公司在提高精度和小型化方面提出了许多解决方案。该公司提出了输出信号的细分技术, 提高抖动偏频的频率, 以提高激光陀螺的采样频率; 利用玻璃熔结工艺来实现反射镜和电极等的密封。采用 BK-7 光学玻璃取代 Zerodur 等零膨胀系数材料, 建立光波在谐振器中的谐振条件, 并对温度误差进行了补偿。20 世纪 90 年代末, Litton 公司提出采用光学方法消除陀螺“闭锁”现象, 研制了四频差动激光陀螺, 陀螺精度得到大幅提高。

国防科学技术大学等在激光陀螺的关键技术上有深入研究。汪之国等^[13,14]分析了温度、磁场、随机振动等因素对激光陀螺性能的影响, 并建立了相应的误差模型。肖贵遐等^[15,16]从理论分析机械抖动激光陀螺闭锁误差产生的原因, 给出了闭锁误差与输入角速率、机械抖动频率和机械抖动幅度的关系。从谐振腔的谐振特性出发, 严格地推导出无源谐振腔激光陀螺中由腔镜背散射引起的闭锁效应关系式及闭锁阈值表达式。张梅等^[17,18]分析了随机噪声对激光陀螺输出的影响。

光纤陀螺需要突破的主要技术有灵敏度消失、噪声和光纤双折射引起的漂移。灵敏度消失是由于检测器中的光密度正比于 Sagnac 相移的余弦量所引起的, 噪声是由于瑞利背向散射引起的。为了达到低噪声, 应采用小相干长度的光源。另外, 如果两束相反传播的光波在不同的光路上, 就会产生漂移。造成光路长度差的原因是单模光纤有两正交偏振态, 这两种偏振态光波一般以不同速度传播。由于环境影响, 使两正交偏振态随机变化。

Honeywell 公司技术人员认为其高精度光纤陀螺产品主要基于以下关键技术^[19]: 1) 光纤长度可达到 $2 \sim 4 \text{ km}$, 大功率的光纤光源, 保证了很好的波长稳定性和低噪声; 2) 利用反馈回路减少了光源输出光的相对强度; 3) 采用“双斜坡”反馈方案, 保证了最好的标度因素的线性度和最大动态范围; 4) 合理的误差抑制调制技术。美国德雷珀实验室从 1978 年开始对光纤陀螺进行了研究。初期开始采用谐振腔式的构建方案, 后因背向散射误差不能解决改为干涉仪式方案。在干涉仪式光纤陀螺的研制过程中采用了三大技术措施: 1) 把光源、探测器和前置放大器做成一个模块; 2) 光纤传感环圈结构影响精度很大, 采用了无骨架绕制光纤环圈的技术途径; 3) 多功能集成光学器件模块, 包括了所有其余的光纤陀螺的光纤器件。文献显示, 国外在高精度产品的研制方面基本采用了统一的技术方案: 采用全数字闭环、全保偏光纤的结构, 利用宽带超荧光掺饵光纤光源, 电路方面采用双重闭环反馈和强度噪声的抑制技术, 有效提高零偏和标度因子稳定性。

张桂材等^[20]总结了国内光纤陀螺的研究状况, 指出了研制高精度光纤陀螺的技术途径和需解决的关键技术。延凤平等^[21,22]对光纤陀螺的光偏振问题进行了研究。米剑等^[23~26]对温度、偏光干涉、辐照等因素对

光纤陀螺的影响进行了分析,建立了相应的误差模型及补偿方案。

5 光学陀螺捷联惯性系统

5.1 捷联惯性系统特点

捷联式惯导系统是一种将惯性器件刚性固联在载体上,利用数学平台取代物理平台,通过计算机对惯性器件的输出进行坐标变换、积分等相关解算,得到载体的姿态、航向、速度及位置信息的惯性导航系统。

与平台式惯导系统相比,捷联惯导系统有其自身优势。首先系统没有平台框架以及用以稳定框架的旋转机构及伺服装置,系统硬件简化,可靠性提高;系统大部分功能靠软件实现,机械构件少,因此系统体积小,制造成本和维护费用低。传感器的位置相对固定,因此容易采用多器件配置,实现冗余技术;系统可以直接提供载体所要求的全部惯性基准信号(尤其是角速率信息),使其具有很好的系统综合能力,使得精度提高更具潜力。

同时,捷联惯导系统对惯性器件的参数稳定性、动态范围、可靠性要求较高。系统导航计算完全由计算机完成,代价是增加了计算机的负担。系统动态范围广导致噪声信息随着传感器进入系统,信息处理要求高,算法复杂;系统算法误差大,系统精度较平台式惯导相对较低。

虽然捷联惯导系统在系统计算及精度上存在不足,但随着计算机处理能力的提高,精度高、动态范围广的全固态陀螺,尤其是光学陀螺的出现,使得捷联惯导系统的发展极具潜力,其研制工作受到广泛重视。据报道,美国军用惯导系统 1984 年全部为平台式惯导,到 1989 年已有一半改为捷联式惯导,1994 年捷联式惯导已占 90%。

5.2 光学陀螺捷联惯性系统

随着光学元器件、测控技术的发展成熟,光学陀螺的精度大为提高,高精度光学陀螺惯性系统的研究逐渐得到重视。

20 世纪 80 年代,美国开展了激光陀螺惯导系统研究,Litton 公司的 LTN-90 激光陀螺惯导系统取代了 LTN-72 平台系统成为标准机载惯导系统。20 世纪 90 年代后,Sperry 公司利用激光陀螺研制了 MK39 的 Mod3A 和 Mod3B 系列惯导系统并成功应用于海军舰艇。

法国在 20 世纪 90 年代开展了基于光纤陀螺系统的研发工作,包括姿态测量系统、惯性导航系统、惯性测试单元等。1995 年,ESA CNES、EADS—Astrium、ixSpace 等团队为 Astrix 200 惯性测试单元研制的光纤陀螺短期零漂达到 $0.001^{\circ}/h$,随机游走系数为 $0.0002^{\circ}/h^{1/2}$,标度因子稳定性为 3×10^{-5} 。Photonics 公司为法国最为著名的光纤陀螺生产厂家,其 1997 研制的 Octans 光纤陀螺罗经(见图 3)航向精度达到了 0.1° ,姿态精度为 0.01° [27]。Ixsea 公司的光子惯性导航系统(PHINS,如图 4 所示)为光纤陀螺惯性系统的典型代表,系统利用融合了多传感器的信息融合技术,实现海上和水下的精确定位[28]。



图 3 Octans 系统结构
Fig. 3 Structure of Octans



图 4 光子惯性导航系统
Fig. 4 Photonics inertial navigation system

3.3 光学陀螺旋转捷联惯性系统

在光学陀螺达到了较高水平后,器件精度提高有限。为了进一步提升光学陀螺惯导系统的精度潜力,研究人员开始转向合理、有效的系统补偿技术研究。

1980 年开始,Levinson 等[29~31]提出了旋转调制思想,即通过周期性改变惯性测量单元(IMU)的姿态调制惯性器件的常值或慢变误差。随后 Sperry 公司利用激光陀螺研制了单轴旋转惯导系统,并进行了海上实

验,系统采用了四位置转/停的方案。与此同时,Honeywell 公司采用双轴转位方案研制了激光陀螺导航仪。Rockwell 公司研制了一种由 3 个激光陀螺和 1 个三轴加速度计组成的导航系统,系统 IMU 绕舰船龙骨轴连续旋转,于 1985 年进行了海上实验和鉴定。

20 世纪 90 年代后期,Sperry 公司对 MK39 惯导系统进行了改进,将单轴旋转调制方案引入系统^[32]研制出 MK39 Mod3C(如图 5 所示),系统位置精度达到了 1/24 nmile/h。而后的 MK49 则是采用双轴旋转以期获得更好的导航性能。据文献^[33]报道,MK49 系统航向误差 0.75' [95%, 循环误差概率(CEP)];横摇误差为 0.72' (95%, CEP);纵摇误差为 0.6' (95%, CEP),系统无故障时间达到了 14400 h。

后在 MK39 Mod3C 的基础上又发展了 AN/WSN-7B 系统,系统采用 Honeywell 公司的 GG1320 激光陀螺和单轴旋转方案,重调周期为 24 h。在 MK49 的基础之上发展了 AN/WSN-7A 系统,AN/WSN-7A 系统采用 GG1342 型激光陀螺和双轴旋转方案,IMU 定期绕横摇轴和方位轴进行 180° 翻转,用来消除陀螺漂移和其他误差源。为进一步提高系统精度,系统采用了自校准、隔离外界运动等技术手段。全自主条件下,系统能够提供 14 天的导航能力。

经过十几年的发展,美国的激光陀螺惯导系统(LGINS)迅速取代原有的船用惯导系统,成为各国海军舰船和潜艇装备的主要平台。Sperry 公司的 MK39 系列激光陀螺惯导系统已经被 24 个以上国家的海军选用于各种舰船平台,MK49 激光陀螺导航仪已成为北约 12 个国家海军的标准设备。AN/WSN-7 系统被美国海军列为水面舰船和攻击型核潜艇的标准装备,代表了惯性技术发展的最新水平,在 2001 年就已完成全部航母的换装工作。

与激光陀螺捷联惯导的研究同步,在海军的支持下,由 Pennsylvania 州立大学的应用实验室(ARL)、Boeing 公司和 Honeywell 公司等 3 个单位合作开始了一项光纤陀螺惯导系统的研制计划(IFOG 计划),旨在取代价格昂贵的静电陀螺导航仪^[34]。该系统包括一个三轴稳定平台,三轴稳定平台由元件安装底座、内环框架、外环框架和水冷外壳组成。内外环框架构成一个稳定平台以隔离舰船运动的影响。主体仪器安装在减震基座上,减震基座使 IMU 及其元件不受线性震动的影响。此外,系统采用了 4 项系统技术^[7]来提高导航精度。1998 年 IEEE 定位与导航会议上报道了该系统的应用情况,指出其成本是静电陀螺的十分之一,而可靠性可达到 3×10^5 h。由于保密等因素,系统精度未公开。

5.4 我国光学陀螺捷联惯性技术研究

近年来,国内光学陀螺旋转惯导系统的研究受到了广泛重视。国防科学技术大学、北京航空航天大学、航天时代电子公司、中国航空工业集团 618 所等都进行了相关的研究工作,并取得了显著成效。

北京航空航天大学率先研制了一种两个单元体的双轴旋转惯导系统样机,随后与 618 所合作研制了双轴旋转的激光陀螺捷联惯导系统(如图 6 所示),并与海军工程大学合作完成了海试实验并取得了理想效果。系统精度高,可靠性好,对准时间短。国防科学技术大学研制了一种单轴旋转的激光陀螺惯导系统样机(如图 7 所示),并进行了适应性实验,文献^[35]显示系统位置精度达到 1/72 nmile/h,航向精度优于 0.5'。

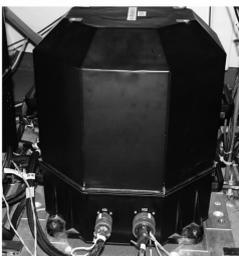


图 6 双轴旋转激光陀螺惯导系统
Fig. 6 LGINS with dual-axis rotation



图 5 MK39 Mod3C 系统
Fig. 5 MK39 Mod3C

Fig. 5 MK39 Mod3C



图 7 单轴旋转激光陀螺惯导系统
Fig. 7 LGINS with single-axis rotation

6 展 望

光学陀螺捷联惯导系统成为惯性技术发展的主流趋势和重要方向。纵观欧美先进国家惯性技术的发展历程,研制高精度的光学陀螺捷联惯导系统需解决以下问题:

1) 研制新型的高精度光学陀螺

高精度、小型化、低成本已成为光学陀螺的发展方向。固体超短脉冲环形激光陀螺能够减少甚至消除陀螺的闭锁且寿命长、温度效应弱,是一种具有光明前景的新一代高精度激光陀螺。循环干涉型光纤陀螺可以在不降低精度的前提下有效地缩短光纤的长度,成为光纤陀螺的发展方向。

2) 研究系统补偿技术

采用元件级或系统级旋转技术;减小环境因素对系统的影响,通过控制技术抑制环境的变化;信息融合技术及元件误差补偿。

参 考 文 献

- 1 G. Sagnac. L'ether lumineux demontre par l'effet du vent relative d'ether dans un interferometer en rotation uniforme[J]. *C. R. Acad. Sci.*, 1913, **157**: 708~710
- 2 W. M. Macek, D. T. M. Davis. Rotation rate sensing with traveling wave ring lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1963, **2**(3): 67~68
- 3 V. Vali, R. W. Shorthill. Fiber ring interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(5): 1099~1100
- 4 G. A. Pavlath. Challenges in the development of the IFOG[C]. Austin: 2003 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2003
- 5 G. A. Pavlath. Fiber optic gyro based inertial navigation systems at northrop grumman[C]. Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002. 6~10
- 6 Jr. Morrow, D. W. Heckman. High precision IFOG insertion into the strategic submarine navigation system[C]. Palm Springs: Position Location and Navigation Symposium, 1998. 332~338
- 7 D. W. Heckman, L. M. Baretela. Improved affordability of high precision submarine inertial navigation by insertion of rapidly developing fiber optic gyro technology[C]. San Diego: Position Location and Navigation Symposium, 2000. 404~410
- 8 D. W. Heckman, M. Baretela. Interferometric fiber optic gyro technology (IFOG)[J]. *Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2000, **15**(12): 23~28
- 9 G. A. Pavlath. Closed-loop fiber optics gyros[C]. *SPIE*, 1996, **2837**: 46~60
- 10 H. Lefevre. The Fiber Optic Gyroscope[M]. Boston: Artech House, 1993
- 11 T. Gaiffe T, P. Simonpietri, J. Morisse *et al.*. Wavelength stabilization of an erbium-doped-fiber source with a Bragg grating for high-accuracy FOG[C]. *SPIE*, 1996, **2837**: 375~380
- 12 Y. S. Zhang, F. Gao, X. Wu *et al.*. Investigation of the re-entrant integrated optical rotation sensor[C]. Stuttgart: University of Stuttgart, Symposium of Gyro Technology, 2000
- 13 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei *et al.*. Effect of magnetic field on light intensity and bias in four-frequency differential laser gyros[J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(4): 540~545
汪之国, 龙兴武, 王 飞 等. 磁场对四频差动激光陀螺光强和零偏的影响[J]. 光学技术, 2010, **36**(4): 540~545
- 14 Zhang Pengfei, Long Xingwu. Research of the relation between dither frequency and temperature inmechanically dithered ring laser gyro[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(5): 523~525
张鹏飞, 龙兴武. 二频机抖激光陀螺抖动频率与温度关系的研究[J]. 激光技术, 2006, **30**(5): 523~525
- 15 Xiao Guixia, Ding Jingxing. Lock-in effect in a passive resonator laser gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(11): 1589~1593
肖贵遗, 丁金星. 无源谐振腔激光陀螺中的闭锁效应[J]. 光学学报, 1997, **17**(11): 1589~1593
- 16 Gao Yukai, Deng Zhenglong. A new method for eliminating the lock-in error of mechanically dithered ring laser gyro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 354~358
高玉凯, 邓正隆. 消除机械抖动激光陀螺闭锁误差的方法[J]. 中国激光, 2007, **34**(3): 354~358
- 17 Zhang Mei. Angle random walk of ring laser gyro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0208004
张 梅. 激光陀螺的角度随机游走[J]. 中国激光, 2011, **38**(2): 0208004
- 18 Wang Kedong, Gu Qitai. The influence of random noise on output of ring laser gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003,

- 23**(12): 1479~1483
王可东,顾启泰. 随机噪声对激光陀螺输出特性的影响[J]. 光学学报, 2003, **23**(12): 1479~1483
- 19 L. K. Strandjord, G. W. Adams, D. Ang. System for suppression of relative intensity noise in a fiber optic gyroscope[P]. US Patent, WO/20000/040926, 2000
- 20 Yang Jianchun, Zhang Guicai. Fiber optic gyro—a new kind of solid initial instrument[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2000, **29**(21): 307~312
杨建春, 张桂才. 光纤陀螺——一种全新的全固态惯性仪表[J]. 光子学报, 2000, **29**(21): 307~312
- 21 Yan Fengping, Shan Ying, Jian Shuisheng. Study on polarization property in stimulated Brillouin scattering fiber optic gyros (SBS-FOG)[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(10): 913~917
延风平, 单英, 简水生. 受激布里渊散射光纤陀螺中光偏振特性的研究[J]. 中国激光, 2001, **A28**(10): 913~917
- 22 Zhang Xulin, Zhou Kejiang. Polarization-fluctuation in resonator of resonator fiber-optic gyro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2083~2088
张旭琳, 周柯江. 谐振式光纤陀螺环形谐振腔的偏振问题[J]. 中国激光, 2009, **36**(8): 2083~2088
- 23 Mi Jian, Zhang Chunxi, Li Zheng *et al.*. Effect of polarization interference on fiber optic gyro performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1140~1144
米剑, 张春熹, 李铮等. 偏光干涉对光纤陀螺性能的影响[J]. 光学学报, 2006, **26**(8): 1140~1144
- 24 Liu Dewen, Xiao Wen, Wei Bo. Mechanism of radiation effects on fiber optic gyros[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 419~422
刘德文, 肖文, 魏博. 光纤陀螺受辐照影响机理分析[J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 419~422
- 25 Yan Fengping, Lan Huijuan, Jian Shuisheng. Investigation of the temperature compensated method for fiber optic gyros [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7): 968~974
延风平, 蓝慧娟, 简水生. 光纤陀螺温度补偿方案研究[J]. 光学学报, 1999, **19**(7): 968~974
- 26 Yang Zhihuai, Ma Huilian, Zheng Yangming *et al.*. Frequency locking technique in digital closed-loop resonator fiber optic gyro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 814~819
杨志怀, 马慧莲, 郑阳明等. 谐振式光纤陀螺数字闭环系统锁频技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(6): 814~819
- 27 T. Caiffe. U-phins: an inertial navigation system developed specifically for AUV control and navigation[C]. International Conference on Underwater Intervention, 2001. 84~92
- 28 T. Gaiffe. U-phins: a FOG-based inertial navigation system developed specifically for AUV control and navigation[J]. New Orleans: Underwater Intervention, 2001
- 29 E. Levinson, C. S. Giovanni Jr.. Laser gyro potential for long endurance marine navigation[C]. New Jersey: Position Location and Navigation Symposium, 1980. 115~129
- 30 E. Levinson, R. Majure. Accuracy enhancement techniques applied to the marine ring laser inertial navigator (MARLIN) [J]. *J. Inst. Navigation*, 1987, **34**(1): 64~86
- 31 E. Levinson, J. Ter Horst, M. Willcocks. The next generation marine inertial navigator is here now[C]. Las Vegas: Position Location and Navigation Symposium, 1994. 121~127
- 32 G. Adams, N. Barnett, L. Insley *et al.*. Evolution of precision IFOG[C]. Albuquerque: 57th Annual Meeting/CIGTF 20th Biennial Test Symposium, 2001
- 33 J. I. Lahham, D. J. Wigent, A. L. Coleman. Tuned support structure for structure-borne noise reduction of inertial navigator with dithered ring laser gyros (RLG)[C]. San Diego: Position Location and Navigation Symposium, 2000. 419~428
- 34 J. I. Lahham, J. R. Brazell. Acoustic noise reduction in the MK 49 ship's inertial navigation system (SINS) [C]. Monterey: Position Location and Navigation Symposium, 1992. 32~39
- 35 Long Xingwu, Tang Jianxun, Wang Yu *et al.*. Development on ship's RLG inertial navigation system[C]. Ningbo: The 6th Annual Conference of Chinese Inertial Technology Preceedings, 2008. 15~23
龙兴武, 汤建勋, 王宇等. 船用激光陀螺惯导系统的研制[C]. 宁波: 中国惯性技术学会第六届学术年会论文集, 2008. 15~23