

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.01.009

2019年国外惯性技术发展与回顾

薛连莉, 沈玉芄, 徐月

(北京海鹰科技情报研究所, 北京 100074)

摘要: 2019年,在IEEE惯性传感器与系统会议、MEMS国际会议、圣彼得堡组合导航会议、欧洲导航会议、美国导航学会的GNSS等会议上,国外惯性技术相关组织与机构纷纷报道其研究成果。结合惯性会议和相关研究机构披露的信息,梳理了惯性技术领域的最新发展动态,重点介绍了光学陀螺、微机电(MEMS)陀螺、半球谐振陀螺(HRG)、原子陀螺以及加速度计等惯性仪表及惯性系统的发展现状,并对惯性技术领域的发展动向进行了分析和展望。

关键词: 惯性技术; 惯性导航; 陀螺仪; 加速度计

中图分类号: T-1

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2095-8110(2020)01-0060-07



Development and Review of Foreign Inertial Technology in 2019

XUE Lian-li, SHEN Yu-peng, XU Yue

(Beijing HIWING Scientific and Technology Information Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: In the 6th IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems, IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), the 26th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, the European Navigation Conference 2019 and ION GNSS+ conference, a number of organizations and institutions specialised in inertial technology has reported their research results. The latest developments in the field of inertial technology are sorted out, and the development status of optical gyroscope, Micro Electromechanical System gyroscope, hemispherical resonance gyroscope (HRG), atomic gyroscopes, and accelerometers are introduced. Lastly, the outlook for development trends of the inertial technology field are analyzed.

Key words: Inertial technology; Inertial navigation; Gyro; Accelerometer

0 引言

在信息化条件下,现代战争对导航的需求与日俱增,导航系统是武器装备不可或缺的重要组成部分。围绕导航系统的攻防博弈,美国首先提出导航战(Navigation Warfare, NAVWAR)概念,随后俄罗斯、欧洲各国、日本、印度等同样开始为导航战蓄力,导航领域逐渐成为军事竞争的战略要地。为了满足多样

化的定位、导航与授时(Positioning, Navigation and Timing, PNT)需求,国外积极探索研究多种自主导航定位技术手段^[1]。惯性技术不受外界干扰,完全利用自包含传感器从载体及其外部自然环境中感知的信息进行导航,是重要的导航领域技术手段之一。

近年来,在惯性技术领域,国外霍尼韦尔、诺格、iXblue、赛峰等公司不断报道一些动态信息,披露了以光学陀螺、微机电(Micro-Electro-Mecha-

收稿日期:2019-12-09;修订日期:2019-12-19

作者简介:薛连莉(1991-),女,硕士,工程师,主要从事惯性与导航技术研究。E-mail: xuelianli232@126.com

nical System, MEMS)陀螺、半球谐振陀螺(Hemispherical Resonator Gyro, HRG)、原子陀螺、加速度计等为代表的惯性仪表及系统的发展,本文梳理了相关动态信息,介绍了惯性仪表及系统的发展现状,并对惯性技术的发展进行了分析展望。

1 光学陀螺

光学陀螺主要有激光陀螺和光纤陀螺两大类。其中,光纤陀螺按其工作原理可分为干涉式光纤陀螺(Interferometric Fiber Optic Gyroscope, IFOG)、谐振式光纤陀螺和受激布里渊散射光纤陀螺。

光学陀螺技术日趋成熟,精度突飞猛进,体积功耗不断降低。目前,激光陀螺最高精度优于 $0.0002(^{\circ})/h$,光纤陀螺最高精度可达 $0.00008(^{\circ})/h$,光学陀螺及其系统应用从战术级逐步拓展到战略级,在陆、海、空、天等多个领域中得到大批量应用,占据着主导地位。

1.1 激光陀螺

激光陀螺技术研究方面,加州理工学院的 Lai Y H 研究了在单片硅芯片上使用反向传播布里渊激光器的激光陀螺仪,证明了基于芯片的布里渊激光陀螺仪的可行性^[2]。康奈尔大学的 Angela D D V 等提出了一种新颖的技术来研究和消除激光效应的非线性,并将该分析应用于 GP2 和 GINGERINO 这 2 个环形激光器样机^[3]。

激光陀螺惯性系统方面,2019 年 9 月,美国陆军合同司令部宣布与霍尼韦尔公司签订了价值 3790 万美元的战术先进地面惯性导航装置 TALIN 5000 型的采购合同,预计 2023 年 9 月完成。TALIN 5000 系统采用霍尼韦尔公司的环形激光陀螺仪和加速度计,提供全球定位系统(Global Positioning System, GPS)拒止环境下的惯性导航。

总体来看,国外激光陀螺的研究 2019 年并未披露突破性进展,研究方向包括小型化和性能改进^[4];基于激光陀螺的惯性导航系统仍是陆用战车、导弹等武器装备的重要选择之一。

1.2 光纤陀螺

光纤陀螺技术研究方面,国外不断推进相关技术的研究,采用多种方法从精度、尺寸和成本等方面提高光纤陀螺的综合性能。Therice A M 等提出了三种方法提高光纤陀螺的总体性能^[5]:一是用低相干激光器代替光纤陀螺中使用的时间相干掺铒光纤光源,使得噪声和漂移接近战略级性能,光源波长稳定性优于

10^{-6} ;二是在光纤陀螺的感应线圈中使用空心光纤以减少热漂移,噪声实现 $0.135(^{\circ})/h^{1/2}$;三是由 2 个环形谐振器耦合组成的光学陀螺仪,试验结果显示该陀螺仪的旋转灵敏度至少是具有相同半径和损耗的优化单环谐振器的 170 倍^[6-10]。日本 Tsunehiko I 等提出了一种自动驾驶用低成本干涉式光纤陀螺仪的制造方法,采用精确对准的四极光纤线圈和调制部件,减少热感应光学相位差和抑制不必要的偏振串扰;并开发出一种自动光纤绕线机,在提高产品性能的同时减少了工作时间,降低了干涉式光纤陀螺的制造成本^[11]。日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)提出了一种干涉式光纤陀螺传感器线圈,该线圈由多芯光纤与扇入/扇出设备拼接而成,实现了 $0.002(^{\circ})/h^{1/2}$ 的角度随机游走性能,研究表明七芯波导环可成功用作 Sagnac 干涉仪^[12-13]。KVH 公司将光子芯片技术整合到高精度光纤陀螺产品中,得到的 Photonic Gyro IMU 样机中陀螺角度随机游走优于 $0.0097(^{\circ})/h^{1/2}$,零偏稳定性为 $0.02(^{\circ})/h$ 。随着该款光子芯片技术的研发, KVH 将实现高性能、低成本惯性系统的量产。

此外,新技术的发展或能推动光纤陀螺性能的突破性进展。在第六届惯性传感器与系统国际研讨会上,美国加州理工学院的 Parham P K 等首次展示了其硅集成光学陀螺仪及互易灵敏度增强(Reciprocity Sensitivity Enhancement, RSE)技术,这种技术可以降低光纤陀螺仪的噪声并使其小型化^[14]。奥地利科学院和维也纳量子科学与技术中心的物理学家在《New Journal of Physics》发表论文的研究成果表明:使用纠缠光子可以克服光纤陀螺的噪声极限,达到经典光无法达到的精确度,并有望得到光纤陀螺更高的灵敏度极限^[15]。

光纤陀螺惯性系统方面,美国诺格公司推出光纤惯性导航系统 SeaFind,可提供与 MK39 环形激光陀螺罗盘系列惯性导航产品相同的性能水平,且尺寸大大减小,仅为 $250\text{mm}\times 250\text{mm}\times 127\text{mm}$;法国 SBG Systems 公司在美国丹佛举行的国际激光雷达测绘论坛(International LiDAR Mapping Forum, ILMF)上宣布推出 Horizon IMU,这是一款基于光纤陀螺的高性能惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU),专为要求苛刻的测量应用而设计,如高海拔地区无人机的数据采集、密集城区的移动测绘以及自动驾驶平台的测试。法国

iXblue公司在SAS 2019上公开了一款新型军用战略级光纤陀螺惯导系统MARINS M11,导航精度达到1nmile/15d,可用于水面舰船和潜艇导航。

光纤惯性系统的应用方面,Draper实验室为美海军三叉戟II计划(潜射弹道核导弹+战略核潜艇)研究的新型制导系统,选择用干涉式光纤陀螺仪代替原始的机械陀螺仪,这标志着干涉式光纤陀螺惯导系统逐渐用于战略武器。

光纤陀螺朝着战略级超高精度、导航级强环境适应性、集成化超小型低成本方向发展,通过开展光纤陀螺噪声抑制、精密绕环、纠缠光子、集成芯片等技术研究提高陀螺的精度和稳定性,降低其体积和成本。

2 MEMS陀螺

现有MEMS陀螺主要基于哥氏效应,包括线振动式MEMS陀螺仪、角振动式MEMS陀螺仪、振动环式MEMS陀螺仪和悬浮转子式MEMS陀螺仪。精度范围覆盖 $0.01 \sim 500 (^{\circ})/h$,以其体积小、质量小、功耗和成本适中、可靠性高等特点在精确制导弹药、汽车和消费电子领域中得到大量应用,是近期惯性技术领域重要的研究热点之一。

国外军用MEMS陀螺技术路线和商用MEMS陀螺技术路线完全不同。美国DARPA Micro-PNT等项目重点支持振动环式和悬浮转子式MEMS陀螺仪的研制,并取得很好结果^[16]。

在DARPA精确鲁棒惯性制导弹药的先进惯性微传感器(Precise Robust Inertial Guidance for Munitions Advanced Inertial Micro Sensors, PRIGM AMIS)子项目支持下,卡内基·梅隆大学的研究人员通过声学 and 光学组件的材料和器件设计实现了陀螺性能增强,声光陀螺仪在灵敏度(9x)、信噪比(13x)和稳定性(超过100s)方面性能得到提升,同时器件外形尺寸减小了一半^[17];密歇根大学的研究人员提出了一种用于高Q值陀螺仪精密壳集成谐振器的改进设计和制造方法,在7000g冲击下成功测试了壳的抗冲击能力^[18]。在DARPA微型速率积分陀螺(Micro Rate Integrating Gyroscope, MRIG)项目支持下,密歇根大学的研究人员成功研制了一种Q值达154万的真空封装熔融石英鸟盆型微谐振陀螺仪,零偏稳定性达 $0.0103 (^{\circ})/h$ ^[19]。在DARPA活跃层主次级校准(Primary and Secondary Calibration on Active Layer, PASCAL)项目支持下,乔治亚理工学院的研究人员设计了采用三维纳米间隙

深反应离子刻蚀工艺制造的高Q值和高动态范围的授时和惯性测量单元(Timing and Inertial Measurement Unit, TIMU),先进的接口电路架构为高Q值陀螺仪提供自校准,大大降低了漂移^[20]。加州大学欧文分校的Andrei M S团队介绍了微加工熔融石英半环形壳设计和制造的最新进展,该制造基于微玻璃吹制工艺,经证实可实现高Q值(170万)MEMS谐振子和陀螺仪^[21]。

此外,2019年4月,霍尼韦尔公司报告了其用于平台稳定的MEMS面外陀螺仪性能结果,实现了优于 $0.006 (^{\circ})/h^{1/2}$ 的角度随机游走和 $0.2 (^{\circ})/h$ 的中值零偏稳定性。作为驱动和检测模式下的特征传感器,频率间隔大于700Hz,从而允许带宽大于300Hz。HG6900 IMU将集成这些传感器,体积为 259cm^3 ^[22]。2019年9月,霍尼韦尔公司推出了基于MEMS技术的HGGuide i300 IMU和HG4930 S-Class IMU两款新型IMU,力求实现小型化、低功耗和经济高效的光纤陀螺替代方案。

国外相关研究机构不断开展研究以提高MEMS陀螺的精度,通过在微加工、专用集成电路、测控电路、结构与材料等方面开展优化设计,将MEMS陀螺的精度提高到导航级,并不断降低其体积和成本。MEMS惯性器件具有巨大的潜力,可为移动设备创造新的应用领域,并具有更大的灵活性和更高的可靠性。

3 半球谐振陀螺

半球谐振陀螺作为最具潜力的哥氏振动陀螺,最高精度可达 $0.0001 (^{\circ})/h$,连续工作15年的可靠度高达0.995,在同等精度陀螺中具有体积质量优势,半球谐振陀螺及其系统逐步在空间、航空、航海等领域开展应用,成为近期惯性技术领域的研究热点之一。

半球谐振陀螺仪按结构形式可分为两件套和三件套半球谐振陀螺仪,按控制形式可分为全角模式和力平衡模式半球谐振陀螺仪。以法国赛峰电子与防务公司为代表,具备 $0.0005 \sim 0.005 (^{\circ})/h$ 精度范围的半球谐振陀螺量产能力。采用全角模式、平面电极,并将陀螺零件数量简化成3个,更易加工、实现低成本和批量化生产。在DARPA公布的比较研究中,赛峰电子与防务公司的半球谐振陀螺被评为导航级领域中具有最佳成本、尺寸、质量和功率(C-SWaP)的传感器,可与霍尼韦尔公司的HG9900或诺格公司的半球谐振陀螺仪竞争,如图1所示。

2019 年,赛峰电子与防务公司报道了半球谐振陀螺的最新进展,基于该陀螺的 BLACK-ONYX™ DUAL CORE HP 惯性导航系统质量小于 25kg,尺寸小于 0.028m³,功耗小于 50W,精度达 1nmile/120h。同时,凭借着半球谐振陀螺的超高 SWaP 性能,GEONYX™ 惯性导航系统可用于火炮和战车的精确导航和指向^[23],如表 1 所示;此外,基于半球谐振陀螺的 SpaceNaute 惯性参考系统已被欧洲 Ariane 6 太空发射器选用,预计将于 2020 年 7 月首次发射^[24];针对士兵指向应用和便携式系统,赛峰电子与防务公司开发了 Sterna 超轻寻北仪,可在 100s 内快速寻北,精度优于 0.7mil。

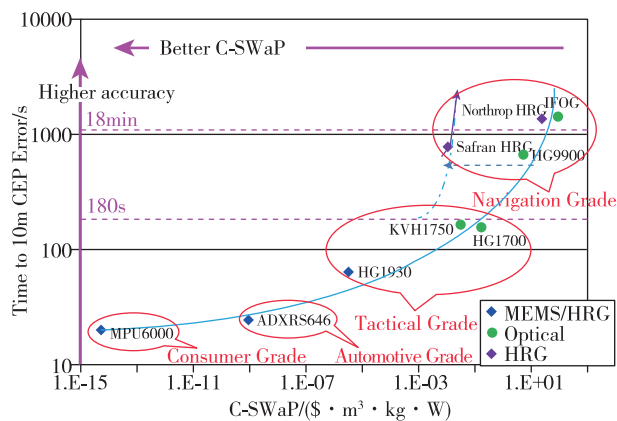


图 1 不同传感器 C-SWaP 随导航性能的变化

Fig. 1 C-SWaP over navigation performance for various sensors

表 1 陆用惯性系统关键特征参数

Tab. 1 Key characteristics of land INS

	GEONYX™	Talin	LN270	FIN3110	Sigma30
尺寸/cm ³	16.2×15.8×20.5	14×19×22	14×19×26	19×22×29	25×26×34
体积/L	5.5	6.5	6.9	12	22.2
功耗/W	15	26	25	40	30
航向性能/mil	< 0.35	< 0.25	1~5	< 1	< 0.2
对准时间/min	5	5	15	10	5
位置性能/%DT	0.05	0.05	0.25	0.2	0.05

美国诺格公司在多年半球谐振陀螺研究的基础上,正在开发新型 LR-450 IMU 中的毫米半球谐振陀螺仪,专为质量更小、成本更低的小型平台而设计^[25]。

国外新一代半球谐振陀螺精度已达 0.0001(°)/h、10⁻⁷ 的水平,半球陀螺谐振子典型尺寸(直径)在 5mm 左右,Q 值达到 1×10⁷。新一代半球陀螺具有

高精度、高可靠、结构简单等优点,且 3D 微纳制造技术的快速进步,有力地推动了具有 MEMS 特征尺寸的高线性度微半球陀螺技术发展。随着半球谐振陀螺性能的提高和尺寸的减小,其应用范围也不断扩展。

4 原子陀螺

原子光子领域的重大科学发现和量子调控技术的飞速发展,推动了以核磁共振陀螺、原子干涉陀螺、无自旋交换弛豫(Spin Exchange Relaxation Free, SERF)原子自旋陀螺为代表的原子陀螺性能不断提升^[26-27],在军用和民用领域已表现出巨大的发展潜力和应用价值,在相关研究机构的共同努力下,其工程化进程日益加快。

加州大学欧文分校的研究人员介绍了一种用于制造核磁共振陀螺仪和核磁共振磁力计的原子传感器 MEMS 组件的批处理方法,引入的方法利用了玻璃吹制工艺、折纸式折叠和更传统的 MEMS 制造,得到的核磁共振陀螺仪角度随机游走为 0.1(°)/h^{1/2}^[28];通过开展系统小型化和高精度等关键技术攻关,进一步提高核磁共振陀螺的工程化实现。在 DARPA 的精确惯性导航系统(Precise Integrated Navigation System, PINS)和自适应导航系统(Adaptive Navigation System, ANS)项目支持下,AOSense 公司的原子干涉陀螺精度达 5×10⁻⁶(°)/h。美国桑迪亚国家实验室的原子干涉陀螺仪内腔尺寸为 20mm×30mm×60mm,灵敏度为 1×10⁻⁶ rad/sHz^{1/2}。在美国的小企业创新研究计划(Small Business Innovation Research, SBIR)项目支持下,Twinleaf 公司的核自旋陀螺精度达 1×10⁻⁴(°)/h。

5 加速度计

加速度计正向两级化发展,消费级加速度计的应用领域不断拓展,随着制造商的增多,成本不断下降;军用级加速度计精度不断提高,性能也不断提升。

1) 摆式积分陀螺加速度计精度最高,可达到 0.1μg,但结构复杂、体积大、价格贵,主要用于战略导弹等高端武器装备。

2) 挠性摆式加速度计主要包括石英摆式加速度计和硅摆式加速度计,精度范围覆盖 5~1000μg,是目前主流的工程应用加速度计,在陆、海、空、天、制导弹药等多个领域中得到大量应用。

3) 石英振梁加速度计正处于技术转化至成熟应用的快速发展阶段,极具发展潜力,精度已达到

$10\mu\text{g}$,最高精度接近 $1\mu\text{g}$,广泛应用于战术级导航应用领域,近期有望进入战略级应用领域。2019年,iXblue公司宣布其首款满足高性能应用的石英振梁加速度计 iXal A5,零偏 $20\sim 150\mu\text{g}$ 、标度因数 $(2\sim 60)\times 10^{-6}$,该加速度计基于振梁加速度计技术以及由法国航空航天实验室(Onera)开发的振动惯性加速度计概念研发,iXblue将其产业化。

4)硅微机电加速度计在体积、质量、功耗和成本方面综合优势明显,在制导弹药、机器人、汽车消费电子应用的牵引下,性能日益提升,工程产品精度可达 $0.1\sim 1\text{mg}$ 。特别在高 g 传感和高分辨振动感应的细分应用领域中,微机电加速度计能够充分发挥其优势。

5)微光学加速度计、原子加速度计等新型加速度计正在逐步走出基础科学实验室,应用于更广阔世界。iXblue公司提出了一种将宽频带和高动态测量范围的机械式加速度计与基于冷原子干涉测量的高稳定性量子加速度计相结合的混合式加速度计。该混合式传感器具有传统加速度计的高动态范围和高带宽,以及量子加速度计的长期稳定性,在恶劣条件下具有良好的运行状态,其精度可达 $10\text{ng}^{[29]}$ 。英国帝国理工学院开发了一种基于冷原子的加速度计,稳定性比传统的高约 1000 倍,作为潜艇量子导航系统的一部分。

加速度计用材料方面,部分研究机构开始采用石墨烯制造加速度计。瑞典皇家理工学院的研究人员利用高导电纳米材料石墨烯开发出了一款全球最小的加速度计,在可穿戴人体监测传感器和导航技术领域开创突破性应用^[30]。

6 惯性技术发展趋势

目前,国外陀螺技术的发展阶段如图 2 所示,国外加速度计技术的发展阶段如图 3 所示。

展望未来,惯性技术呈现的发展趋势如下:

1)精度作为惯性技术的核心指标,始终指引着陀螺、加速度计以及系统技术的发展,同时牵引相关前沿科学技术在惯性技术领域的应用。光学陀螺技术目前处于最成熟阶段,未来其精度从战术级、导航级逐渐延伸到战略级。MEMS 陀螺目前已在战术级占据主导地位,后续在微纳米技术和微加工工艺等发展的推动下,精度将覆盖导航级。在前沿科学技术的推动下,以原子陀螺为代表的新型惯性仪表将不断涌现,技术成熟度持续提升,有望取得

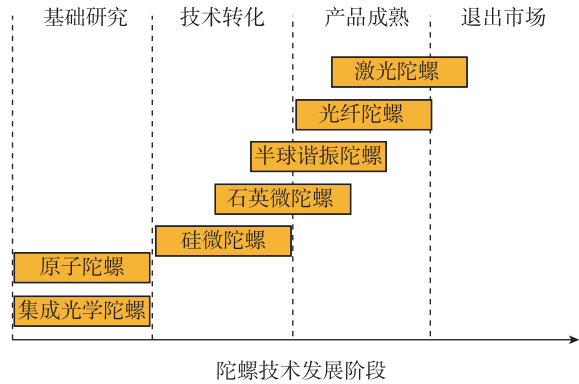


图 2 国外陀螺技术发展阶段

Fig. 2 Development phase of foreign gyro technology

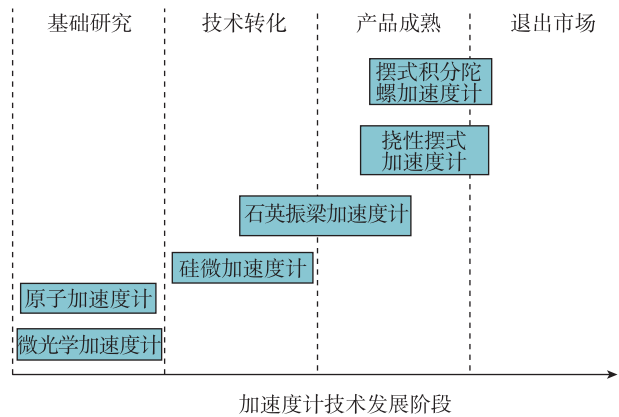


图 3 国外加速度计发展阶段

Fig. 3 Development phase of foreign accelerometer technology

理论上的高精度。

2)惯性技术综合性能日益提升,体现在体积减小、质量减小、功耗降低和成本降低。除精度指标之外,国外惯性技术日益追求体积、质量、功耗和成本的综合性能优化。小型化、轻型、低功耗是国外惯性仪表的重要发展趋势。

3)国外惯性技术公司依托核心技术,通过系列化产品满足不同需求,力图占领不同领域,扩大其市场份额。以半球谐振陀螺为例,赛峰公司根据陆地、海洋、天空环境的不同,不断开发出不同的半球谐振陀螺惯性系统,包括寻北仪、陆用导航系统、船用导航系统、精确制导武器、航空导航系统、航天导航系统等,通过丰富产品线力图占领不同领域,达到扩大市场份额的目的。

4)惯性仪表和系统的可靠性提高,环境适应性增强。以光学陀螺和半球谐振陀螺为代表,惯性仪表和系统的可靠性日益提高,光学陀螺惯导系统的平均无故障时间可达 10 万 h;半球谐振陀螺惯导系统的平均无故障时间甚至高达 100 万 h。同时,环境适应性不断增强,MEMS 惯导系统可承受

20000g 的冲击;半球谐振陀螺惯导系统具备超宽的工作温度范围: $-95^{\circ}\text{C} \sim 155^{\circ}\text{C}$ 。

5) 新型惯性仪表不断涌现和快速发展。在原子技术等前沿技术发展的推动下,在不依赖卫星导航的武器装备需求牵引下,世界各主要国家和惯性技术研究机构大力投入发展新型惯性技术。预计在未来一段时期内,新型惯性仪表将不断涌现,处于高速发展阶段。

7 组织机构的发展变化

机构为研究服务,机构调整无疑彰显研究态势与动向,更是研究内容的需求,及时把握各机构发展变化也就十分必要^[31-32]。2019 年,Emcore 公司以大约 2580 万美元的价格收购了 SDI 公司,将雷锡恩公司、洛马公司和波音 777X 项目添加到 Emcore 公司现有的导航系统产品组合中,扩大 Emcore 公司的导航系统产品组合,使航空和国防市场成为 Emcore 公司最大的收入来源。赛峰公司和 Orolia 宣布签署战略合作伙伴关系,为军队提供 GPS 拒止环境下最新的弹性定位、导航和授时(Resilient PNT, RPNT)解决方案,计划重点包括导航战、移动和固定 PNT 解决方案。三菱电机欧洲公司在德国分公司总部成立了一个高精度定位系统事业部,新部门为德国和欧洲客户提供关键技术,加速引入厘米级自动驾驶和安全驾驶辅助方案。iXblue 公司宣布任命 Thomas Buret 为其首席运营官,推动 iXblue 公司在海事应用、光子学和自主性等技术领域更快发展。2019 年,各组织机构不断推进结构调整、并购与重组,开展战略合作,规模实力显著增强,发展质量明显提升。

8 结束语

2019 年,随着现代科学技术的高速发展,在航空、航天、航海以及武器装备需求牵引下,在现代物理学、计算机和电子技术、先进微加工工艺联合推动下,惯性技术受到世界各主要国家和研究机构的关注,取得了巨大的进步。

惯性技术关系到国家安全和国民经济建设,属于基础性、战略性和前沿性的军民两用高新技术,其发展一直受到国防和国民经济建设重大需求的牵引,相关组织机构不断推进结构调整、并购与重组,开展战略合作,实力明显增强。未来,惯性技术将持续受到世界各国的高度关注。

参考文献

- [1] John B. DARPA Positioning, Navigation, and Timing (PNT) technology and their impacts on GPS users[C]// Proceedings of 23rd Meeting of Space-Based Positioning, Navigation and Timing. The Westin Alexandria Old Town, Alexandria, VA 22314, 2019.
- [2] Lai Y H. Microresonator brillouin laser gyroscope [D]. California Institute of Technology. Doi: 10.7907/10XE-G776. <https://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:05282019-120721714>.
- [3] Trostel M L, Moseley S, Scaramuzza N, et al. Ring laser gyroscope tests of lorentz symmetry[C]// Proceedings of the Eighth Meeting on CPT and Lorentz Symmetry. Bloomington, Indiana, 2019.
- [4] Angela D V, Di V, Nicolò B, et al. Analysis of ring laser gyroscopes including laser dynamics[J]. European Physical Journal C, 2019, 79: 573.
- [5] Therice A M, Jonathan M W, Matthew J G, et al. Advances in optical gyroscopes[C]// Proceedings of Seventh European Workshop on Optical Fibre Sensors, SPIE 11199. 2019.
- [6] Eric U, Ingrid U S. Personal reflections on fiber optic gyros mid-1970s to the present[C]// Proceedings of Fiber Optic Sensors and Applications XVI, SPIE 11000. 2019.
- [7] Ramón J P M. IFOG and IORG gyros: a study of comparative performance[DB/OL]. [2019-01-20] [2019-09-28]. IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.89957. <https://www.intechopen.com/online-first/ifog-and-iorg-gyros-a-study-of-comparative-performance>.
- [8] Paveau A, Cros G, Masson S, et al. Robustness of Astrix Fiber Optic Gyros in space radiative environment[J]. CEAS Space Journal, 2019(11): 219.
- [9] Guattari F, Toldi de E, Garcia R F, et al. Fiber optic gyroscope for 6-component planetary seismology[C]// Proceedings of International Conference on Space Optics, Volume 11180, ICSO 2018. 2019: 1118080.
- [10] Liming W, Daniel R H, Thomas D M, et al. Low-cost, high-end tactical-grade fiber optic gyroscope based on photonic integrated circuit[C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Naples, FL, USA, 2019.
- [11] Imamura T, Matsui T, Yachi M, et al. A low-cost interferometric fiber optic gyro for autonomous driving[C]// Proceedings of 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute

- of Navigation. ION GNSS, 2019.
- [12] Mitani S, Nigo K, Mizutani T, et al. Interferometric fiber-optic gyroscope using multi-core fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(21): 5525-5530.
- [13] Mitani S, Nigo K, Mizutani T, et al. Interferometric multi-core fiber optic gyroscope under temperature changing environment[C]// *Proceedings of International Conference on Space Optics, ICSO 2018*. 2019: 1118055.
- [14] Khial P, White A D, Hajimiri A. A chip-scale nanophotonic optical gyroscope[C]// *Proceedings of 2019 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*. Naples, FL, USA. DOI: 10.1109/ISISS.2019.8739715.
- [15] Fink M, Steinlechner F, Handsteiner J, et al. Entanglement-enhanced optical gyroscope [J]. *New Journal of Physics*, 2019, 21.
- [16] Ashraf M, Lutong C, James B, et al. Acousto-optic gyroscope with improved sensitivity and 100 second stability in a small form factor[C]// *Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on Inertial Sensor & System*. Naples, Florida, USA, 2019.
- [17] Mishra M K, Dubey V M, Mishra P M. MEMS technology: a review[J]. *Journal of Engineering Research and Reports*, 2019, 4(1): 1-24.
- [18] Sajal S, Ali D, Jae Y C, et al. High-Q 3D micro-shell resonator with high shock immunity and low frequency mismatch for MEMS gyroscopes[C]// *Proceedings of 2019 IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. Seoul, Korea (South). DOI:10.1109/MEMSYS.2019.8870818.
- [19] Jae Y C, Woo J K, He G H, et al. 1.5-million Q-factor vacuum-packaged birdbath resonator gyroscope (BRG) [C]// *Proceedings of 2019 IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. Seoul, Korea (South). DOI:10.1109/MEMSYS.2019.8870889.
- [20] Ayazi F, Wen H, Jeong Y, et al. High-Q timing and inertial measurement unit chip (TIMU) with 3D wafer-level packaging[C]// *Proceedings of 2019 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*. Austin, TX, USA. DOI: 10.1109/CICC.2019.8780183.
- [21] Mohammad H A, Wang Y S, Andrei M S. Development of 3D fused quartz hemi-toroidal shells for high-Q resonators and gyroscopes[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2019, 28(6).
- [22] Endean D, Christ K, Duffy P, et al. Near-navigation grade tuning fork MEMS gyroscope[C]// *Proceedings of 2019 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*. Naples, FL, USA. DOI: 10.1109/ISISS.2019.8739669.
- [23] Deleaux B, Lenoir Y. The world smallest, most accurate and reliable pure inertial navigator: ONYX™ [C]// *Proceedings of 2018 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*. Braunschweig, Germany. DOI: 10.1109/InertialSensors.2018.8577108.
- [24] Fabrice D. SpaceNaute® the HRG based inertial reference system of ariane 6 European space launcher [J]. *Gyroscopy and Navigation*, 2019, 10(1): 1-6.
- [25] Northrop Grumman. Northrop Grumman's hemispherical resonator gyro achieves 50 million operating hours in space [EB/OL]. [2019-08-06]. <https://news.northropgrumman.com/news/releases/northrop-grummans-hemispherical-resonator-gyro-achieves-50-million-operating-hours-in-space>.
- [26] Feng D. Review of Quantum navigation [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 237.
- [27] Newman Z L, Maurice V, Drake T, et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock[J]. *Optica*, 2019, 6(5): 680-685.
- [28] Mohammednoor R M. MEMS components for NMR atomic sensors[D]. UC Irvine, ProQuest. 2019.
- [29] Cheiney P, Barrett B, Templier S, et al. Demonstration of a robust hybrid classical/quantum accelerometer[C]// *Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on Inertial Sensor & System*. Naples, Florida, USA, 2019.
- [30] Fan X, Forsberg F, Smith A D, et al. Graphene ribbons with suspended masses as transducers in ultra-small nanoelectromechanical accelerometers [J]. *Nature Electronics* 2019(2): 394-404.
- [31] 薛连莉, 陈少春, 陈效真. 2017年国外惯性技术发展回顾[J]. *导航与控制*, 2018, 17(2): 1-9. Xue Lianli, Chen Shaochun, Chen Xiaozhen. Development and review of foreign inertial technology in 2017[J]. *Navigation and Control*, 2018, 17(2): 1-9 (in Chinese).
- [32] 薛连莉, 戴敏, 葛悦涛, 等. 2018年国外惯性技术发展回顾[J]. *飞航导弹*, 2019(4): 16-21. Xue Lianli, Dai Min, Ge Yuetao, et al. Development and review of foreign inertial technology in 2018[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2019(4): 16-21 (in Chinese).