

# 2017 年国外惯性技术发展与回顾

薛连莉<sup>1</sup>, 陈少春<sup>1</sup>, 陈效真<sup>2</sup>

(1. 北京海鹰科技情报研究所, 北京 100074; 2. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100039)

**摘要:** 概述了国外惯性相关机构的发展变化, 从环形激光陀螺(RLG)、光纤陀螺(FOG)、微机电(MEMS)陀螺和原子陀螺等角度详细介绍了近年来不同机构如美国诺格公司、霍尼韦尔公司、法国赛峰电子与防务公司、iXblue 集团等的概况及其惯性仪表、系统的发展与应用。分析了全球定位系统(GPS)面临的严峻形势下, 美国 GPS 的发展以及 GPS 拒止环境下部分项目的新进展。最后, 对比了不同陀螺技术的发展和运用, 总结了惯性技术的趋势。

**关键词:** 激光陀螺; 光纤陀螺; MEMS 陀螺; 半球谐振陀螺; 原子陀螺; 惯性技术

**中图分类号:** U666.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5558(2018)07-01531

**doi:** 10.3969/j.issn.1674-5558.2018.02.001

## Development and Review of Foreign Inertial Technology in 2017

XUE Lian-li<sup>1</sup>, CHEN Shao-chun<sup>1</sup>, CHEN Xiao-zhen<sup>2</sup>

(1. Beijing HIDING Scientific and Technology Information Institute, Beijing 100074;

2. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039)

**Abstract:** The developments and changes in inertial related foreign agencies are introduced in detail. Then the developments and applications of inertial instruments and systems of different research institutes in recent years are summarized from the aspects of ring laser gyro(RLG), fiber optic gyro(FOG), MEMS gyro, hemispherical resonant gyro(HRG) and atomic gyro, Northrop Grumman, Honeywell Aerospace, Safran Electronics & Defense and iXblue for instance. The development of GPS and the new progress of some projects under the environment of GPS denied are analyzed considering the severe situation of GPS. Finally, the developments and applications of different gyro technologies are compared, the trend of inertial technology is summarized.

**Key words:** laser gyro; fiber optic gyro; MEMS gyro; hemispherical resonant gyro; atomic gyro; inertial technology

## 0 引言

高技术的迅猛发展, 尤其是干扰技术的兴起, 更体现了惯性技术对导航制导的价值。本文主要对国外惯性相关机构的变化和发展、惯性技术相关文献等进行了梳理。相关机构包括美国国防部预研计划局(DARPA)、Draper 实验室、诺格公司、霍尼韦尔公司、亚诺德半导体(ADI)公司、大西洋惯性系统公司、基尔福特公司、KVH 公司、喷气

推进实验室、斯坦福大学、密歇根大学、加州大学等, 法国赛峰集团、iXblue 集团、泰雷兹集团等, 英国 BAE 系统公司, 德国博世公司, 挪威 Sensoror 公司, 俄罗斯中央电气仪表研究所、物理光学公司、精密机械与控制研究所、陀螺光学股份有限公司、拉明斯克仪表厂、Optolink 公司等, 日本航空电子工业有限公司、三菱精密有限公司等, 主要分布如图 1 所示。由图 1 可知, 北美是惯性技术的活跃区域, 其次是欧洲和亚洲。近年来,

收稿日期: 2018-02-06

搜集整理到惯性技术相关动态上百余条、多个惯性技术相关会议论文集以及大量惯性技术相关文

献、专利,经分析梳理,得出惯性技术的一些新进展。



图 1 惯性技术研究机构分布图

Fig.1 Distribution of inertial technology organizations

## 1 惯性领域相关机构的变化情况

美国诺格公司于 1994 年组建。2001 年,该公司以 51 亿美元的价格收购利顿工业公司归其电子系统部;而利顿工业公司早在 1996 年就已收购斯佩里航海公司;德国利铁夫公司是利顿工业公司的德国分公司。因此,美国利顿工业公司、斯佩里航海公司、德国利铁夫公司现皆隶属诺格公司,是惯性技术产品主要研制机构。

BAE 公司是英国飞机、军火和国防系统的生产商。1999 年,该公司购买了马可尼电子系统公司、通用电子公司的国防电子和海军造船子公司,组成了 BAE 系统公司。美国 BAE 系统公司为英国 BAE 系统公司的子公司。BAE 系统公司的主要产品有精确着陆系统、Doppler 设备、GPS 和惯性导航系统等。2007 年 8 月,BAE 系统公司以 1.4 亿美元的价格,将惯性产品业务出售给 J. F 雷曼公司,成立了大西洋惯性系统(AIS)公司。2009 年 12 月,古德里奇公司与 AIS 公司达成价值 3.75 亿美元的并购协议,并购后 AIS 公司将被纳入古德里奇公司电子系统分部的传感器和综合系统业务。2012 年 7 月,美国联合技术公司(UTC)收购古德里

奇公司,同时将收购的古德里奇公司与汉盛公司合并组成 UTC 宇航系统公司。据罗克韦尔·柯林斯公司 2018 年 1 月 11 日报道,经过投票,该公司超过 96% 的股东赞成公司被 UTC 收购,交易预计将在 2018 年第 3 季度完成。完成交易后,罗克韦尔·柯林斯公司将与 UTC 宇航系统公司合并,成立一个新的联合技术公司,名为柯林斯宇航系统公司。据 UTC 预计,两家企业的合并将实现超过 5 亿美元的成本协同效应。

法国通用机械电气公司即法国萨基姆公司,该公司在航空、航海、陆地用惯性导航系统方面位列欧洲前位。2005 年,斯奈克玛公司和萨基姆公司合并成赛峰集团。而据赛峰集团 2016 年 5 月宣布,萨基姆公司、斯奈克玛公司、透博梅卡等公司名称将不再使用,统一使用赛峰集团品牌,萨基姆公司更名为赛峰电子与防务公司。

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。

## 2 惯性仪表及系统的发展与应用

目前,光学陀螺已占领高精度应用市场,微

机电陀螺和原子陀螺取得重要进展。在 2017 年国外惯性相关会议上, 来自 NSIT、斯坦福大学、DARPA、诺格公司、霍尼韦尔公司、iXblue 公司等专家、学者分别从不同角度报道了光学陀螺、MEMS 陀螺和原子陀螺的研究, 本文将介绍以上技术领域的新进展。

## 2.1 激光陀螺

国外激光陀螺领域相关单位有美国 DARPA、Draper 实验室、霍尼韦尔公司、诺格公司、Singer-Kearfott 公司等, 法国萨基姆公司、Sextant 公司等, 日本的宇宙开发事业团(NASDA)、国家宇航实验室、日本航空电子工业有限公司(JAE), 俄罗斯的 Polyus 研究所、电子光学(Electrooptika)公司等。自 20 世纪 60 年代发展至今, 激光陀螺主要关键技术已取得突破, 在多个领域得到了广泛应用。近两年, 涉及激光陀螺技术的论文和专利数量相对较少。在专利申请及发文数量方面, 美国、日本、德国、欧专局、法国等国家/机构的激光陀螺发文数量占总数量的近 75%。

### (1) 霍尼韦尔公司

霍尼韦尔公司是世界激光陀螺研究的先驱, 长期以来一直领跑国际激光陀螺领域的最新进展。公司在激光陀螺方面的基本发展路线是: 以技术发展为基础, 拓展产品成系列化, 形成 GG1308、GG1320、GG1342、GG1389 系列产品, 在型谱中发展标准、典型产品。高精度以 GG1389 为代表, 低精度以 GG1308、GG1320 为代表。2007 年年初, 霍尼韦尔公司发布了 GG1320 的升级产品——GG1320AN(军用) 和 GG1320AN01(民用), 用于航天领域的导航级 HG9848-IMU 和代表激光陀螺惯性器件最新发展水平的 HG9900-IMU 均采用 GG1320AN 作为姿态测量传感器。2016 年 3 月, 美国国防后勤局陆海分部授予霍尼韦尔公司宇航分部一项为期 3 年金额 3890 万美元的合同, 为美国海军 AN/WSN-7 海上导航系统研制环形激光陀螺。2016 年 10 月, 霍尼韦尔公司宣布对其 Laseref 系列惯导系统进行升级, 新的 Laseref IV 惯导系统将取代之前的 Laseref II/III 惯导系统。

### (2) 诺格公司

诺格公司于 2001 年收购了利顿工业公司, 成为激光陀螺的主要生产者, 其基本发展路线是:

1994 年之前主要发展机抖激光陀螺技术; 1994 年—2000 年发展三轴激光陀螺以及零闭锁陀螺技术, 2000 年后的研究主要是微型激光陀螺。目前, 该公司的 MK39/MK49 系列惯导系统已被超过 24 个国家的海军选用, 主要用于为舰艇平台和火控系统提供位置、姿态、速度和方向数据。由 MK39/MK49 改装而成的 AN/WSN-7/7A/7B 惯导系统是美海军的自用型。其中, AN/WSN-7/7A 惯导系统(精度达 1nmile/14d) 采用霍尼韦尔公司的 GG1342 激光陀螺, AN/WSN-7B 惯导系统(精度达 1nmile/d) 采用霍尼韦尔公司的 GG1320 激光陀螺。据报道, 2017 年 9 月, 美海军授予诺格公司 1103 万美元合同, 生产 AN/WSN-7 环形激光陀螺导航系统组件用于安装美海军水面舰艇、潜艇, 预计 2019 年 4 月完成。

### (3) 赛峰电子与防务公司

法国赛峰电子与防务(萨基姆)公司 1977 年开始涉足激光陀螺领域, 目前是欧洲最大的激光陀螺生产厂家。萨基姆公司激光陀螺产品主要以 GLC-8、GLC-46 和 GLS-32 激光陀螺为主, 形成系列惯导产品, 如 SIGMA 95、SIGMA 30 和 SIGMA 40, 广泛用于军用飞机、无人机、无人水下潜艇、导弹等领域。2015 年 2 月, 印度斯坦航空有限公司(HAL) 与萨基姆公司签订了技术转让协议, 根据协议条款, HAL 将为印度空军生产 SIGMA 95 惯导系统。目前, 印度空军和海军部署了数百架作战飞机都已配置了萨基姆的激光陀螺导航系统, 包括鹰、捷豹、米格-29 和苏-27 和苏-30。2016 年 10 月, 采用 SIGMA 40 惯导系统对 AGM-84 鱼叉反舰导弹进行对准的甲米轻型护卫舰和 KDX 级护卫舰在泰国成功进行测试。

## 2.2 光纤陀螺

国外光纤陀螺相关单位主要有美国 DARPA、Draper 实验室、诺格公司、霍尼韦尔公司、KVH 公司等, 法国萨基姆公司、iXblue 公司等, 日本三菱精密有限公司, 俄罗斯 Optolink 公司等。自 20 世纪 70 年代发展至今, 光纤陀螺关键技术取得重大突破, 应用领域不断拓展, 与激光陀螺形成了相互补充甚至竞争的态势。目前, 光纤陀螺的精度最高可达  $8 \times 10^{-5} (^{\circ})/h$ , 表 1 为当前不同机构性能最高的光纤陀螺仪及其参数。

表 1 当前不同机构性能最高的光纤陀螺仪参数

Table 1 Parameters of up-to-date highest performance FOGs

光纤陀螺及厂商	角度随机游走 / [° / h <sup>1/2</sup> ]	零偏稳定性 / [° / h]	标度因数误差 / 1×10 <sup>-6</sup>	线圈长度 / 直径
霍尼韦尔公司 HPFOG	1×10 <sup>-4</sup>	3×10 <sup>-4</sup>	1	4km
AlliedSignal 制导与控制系统	2.1×10 <sup>-4</sup>	5.7×10 <sup>-4</sup>	—	2km
诺格利顿公司制导控制系统	9×10 <sup>-4</sup>	9×10 <sup>-4</sup>	10	1km, 76mm
L-3 Space & Nav CIRUS-A	5×10 <sup>-4</sup>	3×10 <sup>-3</sup>	10	—
Airbus 防务太空 Astrix-200	2×10 <sup>-4</sup>	—	30	5km, 200mm
iXblue 公司 MARINS 系列	1.8×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	—	5km
iXblue 公司光纤陀螺样机	3.9×10 <sup>-5</sup>	—	—	5km
Optolink 公司 SRS-2000	1.8×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	30	2km, 250mm
Optolink 公司 SRS-5000	6.9×10 <sup>-5</sup>	8×10 <sup>-5</sup>	3	5km, 250mm

### (1) 霍尼韦尔公司

霍尼韦尔公司自 20 世纪 80 年代中期开始研发各类精度的光纤陀螺, 将保偏和去极化闭环结构作为高性能补充成分应用到环形激光陀螺产品线上, 研发了一系列干涉式光纤陀螺产品, 零偏稳定性范围为 0.0001(°) / h ~ 0.001(°) / h。2016 年, 该公司披露其用于太空应用的高性能太空光纤陀螺(HPS-FOG), 精度范围达 0.0002(°) / h ~ 0.0006(°) / h。除了干涉式光纤陀螺, 霍尼韦尔公司还进行了谐振式光纤陀螺的研究。2017 年, 霍尼韦尔公司报道了紧凑型谐振式光纤陀螺技术进展, 该陀螺首次采用硅基光学芯片(SIOB)技术, 在敏感环尺寸为 5.08cm 下, 得到样机初步试验测试结果: 随机游走优于 0.0029(°) / h<sup>1/2</sup>, 零偏稳定性优于 0.1(°) / h。

### (2) 诺格公司

诺格公司自 1988 年开始研制基于光纤陀螺 IMU 系统, 代表产品分为 uFORS 系列与 FOG-200 系列。前者具有精度低、小型化特征; 后者具有精度高的特点, 多用于 IMU、AHRS 等军用系统。据诺格公司 2016 年报道, 该公司已交付超过 30000 个基于光纤陀螺的惯性导航产品以及超过 10000 个光纤陀螺速率传感器, 而这奠定了诺格公司在光纤陀螺领域的领先地位。

### (3) KVH 公司

据 KVH 公司 2016 年 12 月报道, 经过 20 年的发展, 该公司的光纤陀螺已经由大型、低性能的光纤陀螺发展成了紧凑型、精确的光纤陀螺及其

惯导系统。KVH 公司光纤陀螺和光纤陀螺基惯性系统的成功很大程度上归结于该公司光纤的设计与制造技术、制造过程以及信号处理过程, 比如 KVH 公司设计和制造的开环光纤陀螺可为小封装提供战术级性能。

### (4) 法国 iXblue 公司

经过数十年的持续研发, iXblue 公司的光纤陀螺应用系统覆盖了航海、陆地和空间应用等场合, 涵盖了从战术级到战略级的各个精度范围。该公司基于光纤陀螺的姿态航向参考系统 OCTANS 非常适用于各种水面舰艇, 基于光纤陀螺的惯性导航系统 PHINS 的性能优于 OCTANS, 能实现在无 GPS 信号情况下的精确惯性导航, 目前广泛应用在多国海军装备上。MARINS 是该公司专为军事用途开发的高精度光纤陀螺捷联惯导系统, 系统上的光纤陀螺使用了长 5km 的光纤环, 陀螺零偏稳定性为 1.8×10<sup>-4</sup>(°) / h, 角度随机游走为 1×10<sup>-4</sup>(°) / h<sup>1/2</sup>, 能实现 1nmile/72h 的高精度纯惯性导航。2016 年, 英国皇家海军授予 iXblue 的战略合作伙伴洛马英国公司一份 5 年期合同, 选择 iXblue 的高级 MARINS M7 系统对 35 艘大型水面舰艇和潜艇的导航系统进行升级, iXblue 将为 35 艘英国皇家海军大型水面舰艇和潜艇提供 70 套 MARINS M7 系统。此外, 该公司还推出了用于水下航行器的高性能光纤陀螺惯性导航系统 PHINS 惯性导航系统。与 iXblue 公司 MARINS 系列惯导系统相比, PHINS 惯导系统的体积和质量大大减小, 如表 2 和表 3 所示。

表 2 iXblue 公司 PHINS 系列惯导系统参数

Table 2 Parameters of iXblue PHINS series

PHINS 系列	C3	C5	C7
定位精度/DT	0.3%	0.2%	0.1%
航向精度/(°)	0.15	0.05	0.01
俯仰和滚转方向精度/(°)	0.05	0.05	0.01
直径/mm	140	154	200
质量/kg	1.6	4.7	3.5

表 3 iXblue 公司 MARINS 系列惯导系统参数

Table 3 Parameters of iXblue MARINS series

MARINS 系列	M3	M5	M7
定位精度/(nmile/72h)	6	3	1
航向精度/(°)	0.01		
俯仰和滚转方向精度/(°)	0.01		
平均无故障工作时间/h	100000		
对准时间/min	15		
尺寸/(mm×mm×mm)	433×324×329	433×324×329	500×400×344
质量/kg	28	28	42

(5) 俄罗斯

俄罗斯 Optolink 公司 2017 年 9 月在德国 Karlsruhe 举办惯性传感器与系统会议，展示光纤陀螺仪 SRS-5000，零偏稳定性达  $8 \times 10^{-5} (^{\circ})/h$ ，如图 2、图 3 所示。此外，2016 年，该公司还提出采用跨条纹检测形式增加现有高精度光纤陀螺动态范围的兼顾大动态范围和高精度两大技术优势的光纤陀螺。同时，空间应用 FOG VOBIS 研究和飞行试验结果，陀螺仪零偏稳定性优于  $0.03 (^{\circ})/h$ ，随机游走优于  $0.005 (^{\circ})/h^{1/2}$ 。表明历经 15 个月的对地静止轨道(GEO)飞行试验测试后性能没有衰

减，加速寿命试验表明 VOBIS 在高真空度和高辐照环境中的工作寿命能够长达 15 年。



图 2 SRS-5000 陀螺仪

Fig.2 View of SRS-5000

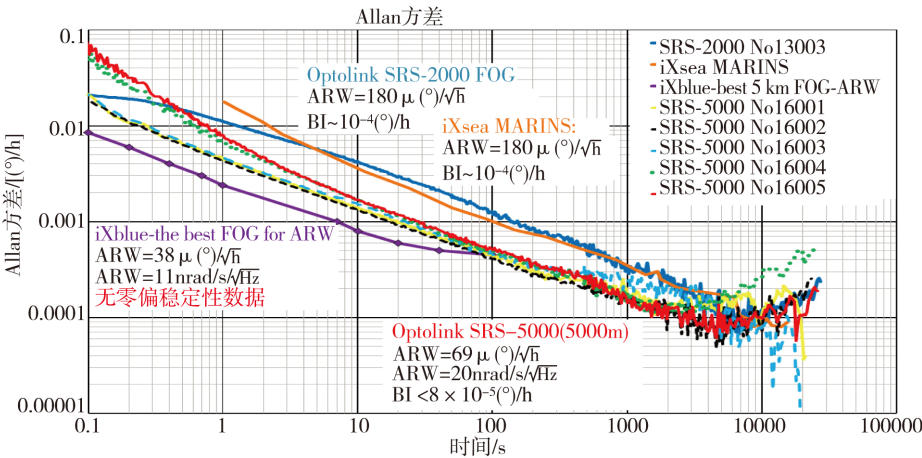


图 3 SRS-5000 陀螺仪与 iXblue 公司最佳性能光纤陀螺的比较图

Fig.3 Comparison diagram between SRS-5000 gyro and best performance fiber optic gyro of iXblue company



### (6) 其他机构

此外,加州大学、毕尔肯大学、Nufern 公司等报道了光纤陀螺新技术、新原理和新方法。总体上,干涉式光纤陀螺技术日渐成熟,涵盖军民应用各领域,工程化应用广泛。紧凑型谐振式光纤陀螺(RMOG)技术有望解决制约 RFOG 的小型化、集成化难题,霍尼韦尔公司首次验证其实用化。总之,提升性能、小型化和集成化是提升光纤陀螺综合竞争力,提升与其他类陀螺竞争的主要手段,应为当前 FOG 研究热点。

### 2.3 MEMS 陀螺

MEMS 陀螺仪相关研究单位有美国 DARPA、

Draper 实验室、霍尼韦尔公司、大西洋惯性系统公司、InvenSense 公司、波音公司、斯坦福大学、密歇根大学、加州大学、HRL 实验室等,英国 BAE 系统公司,挪威 Sensoror 公司,日本东北大学、东芝公司等。自 20 世纪 80 年代发展至今, MEMS 陀螺关键技术不断取得突破,应用领域不断拓展,如图 4 所示。在美国 DARPA NGIMG 项目支持下,多环碟形陀螺最高精度达  $0.003(^{\circ})/h$ 。从近年国外惯性相关会议的论文集来看, MEMS 陀螺是惯性领域的研究焦点,报道文献数量占比较高。

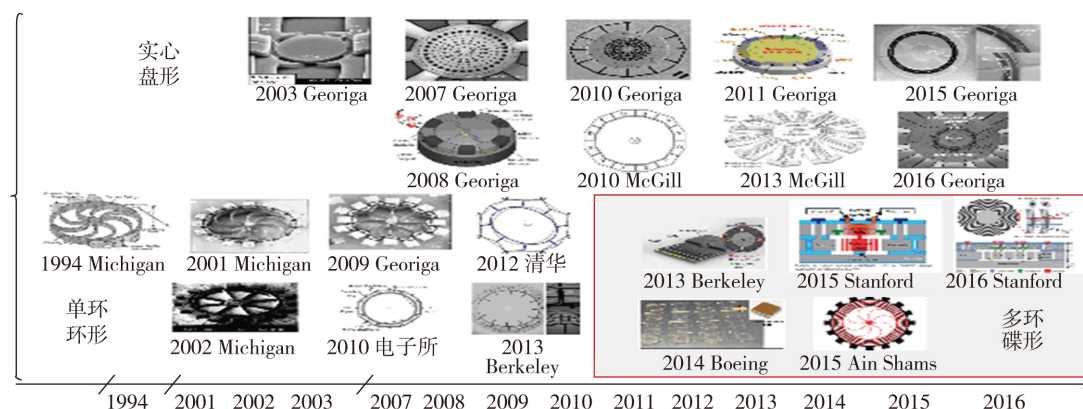


图 4 MEMS 惯性器件的发展

Fig.4 Development of MEMS inertial device

美国 Draper 实验室作为微机电陀螺研究领域的领导者,先后研制了双框架结构、调频音叉结构和振动轮结构微机电陀螺。霍尼韦尔公司购买其调频音叉结构微机电陀螺专利,研制了一系列微机电陀螺仪,零偏稳定性优于  $10(^{\circ})/h$ ,大量应用于 JDAM 制导炸弹等武器系统。针对单兵导航和惯性寻北需求,霍尼韦尔公司还与 Draper 实验室共同开展高性能硅微陀螺研究。在现有音叉式微陀螺结构基础上进行了优化,显著改善了微陀螺性能灵敏度和结构稳定性。

大西洋惯性系统公司研制了振动环结构微陀螺,其产品 CRS09 广泛应用在 NLAW 反坦克武器、A-Darter 空空导弹、MBDA 海狼舰船防御导弹等武器装备中。此外,该公司 SiIMU02、SiIMU04、MinIM 和  $\mu$ Nav 等惯导系统也得到广泛应用。简氏防务周刊 2017 年 9 月报道大西洋惯性系统公司开发

出 TITAN 和 LITIS 两种新型微机电惯性测量单元,性能精度范围和续航能力比 SiIMU02 有所提高。

亚诺德报道体公司主要微惯性器件产品为 iMEMS 和 iSensor 两个系列,分别采用单片集成和系统集成技术,其中采用系统集成技术的微陀螺产品 ADIS16135 零偏稳定性已达到  $6(^{\circ})/h$ 。

德国博世公司 MEMS 陀螺专利申请最多,发布了 DRS-MM1、DRS-MM2 和 DRS-MM3 这 3 代微陀螺产品。其中,DRS-MM3 零偏稳定性达到  $1.5(^{\circ})/h$ ,主要面向汽车和消费电子应用。

英国 BAE 公司采用 MEMS 谐振环陀螺实现 MEMS IMU 系列化,如图 5 所示,最小体积仅有  $16.387\text{cm}^3$ ,零偏稳定性优于  $0.1(^{\circ})/h$ ,IMU 可植入士兵战靴,实现单兵全时导航。BAE 谐振环陀螺有角速率和速率积分两种模式,用于高速旋转弹、中程导弹和美国 155mm 制导神箭炮弹等武器系统。



图5 BAE 公司系列化 MEMS IMU

Fig.5 MEMS IMU series of BAE

挪威 Sensoror 公司公开报道精度最高产品 SAR500 蝶形陀螺, SAR500 测量范围为 $\pm 500(^{\circ})/s$ , 标度因数误差为 $\pm 3 \times 10^{-4}$ , 零位稳定性优于 $0.04(^{\circ})/h$ , 零偏重复性优于 $0.1(^{\circ})/h$ 。

日本硅传感系统公司(SSS)一直研制 MEMS 谐振环陀螺, 最新产品零偏稳定性优于 $0.06(^{\circ})/h$ , 角度随机游走优于 $0.01(^{\circ})/h^{1/2}$ , 是谐振环陀螺最高水平。

迄今为止, 高性能惯性传感器市场, 如战术等级以上的市场已被半球谐振陀螺、RLG、FOG 主导。虽然这些传感器的尺寸、功率要求和成本在过去的 20 年中已经大大降低, 并且可以预期进一步的降低, 但是战术 IMU 尺寸保持在 0.5L 的量级, 并且成本保持在 10K 的量级。而随着 MEMS IMU 的发展, 功耗和成本的不断降低, 其对战术和导航级应用的传统传感器威胁越来越大。

## 2.4 原子陀螺仪

国外原子陀螺仪相关单位有美国 DARPA、Draper 实验室、诺格公司、霍尼韦尔公司、Singer-Kearfott 公司、洛马公司、AOSense 公司、斯坦福大学、耶鲁大学、加州大学, 法国巴黎天文台、高等光学研究所、萨基姆公司、泰雷兹公司, 德国 Aesculap 公司, 日本京都大学等。目前, 国外重点研究核磁共振陀螺和原子干涉陀螺。

核磁共振陀螺方面, 在 DARPA 芯片级组合原子导航项目(C-SCAN)的支持下, 诺格公司目前已研制出零偏稳定性达 $0.01(^{\circ})/h$ 的核磁共振惯导系统工程样机; 加州大学提出了一种实现高精度微型核磁共振陀螺仪的 3D 立体折叠式微型核磁共振陀螺方案, 实现了核心器件的设计与研制, 基于实现的核心器件性能, 1mm 原子气室构建的核磁共振陀螺理论上能够实现角度随机游走 $0.1(^{\circ})/h^{1/2}$ 。

原子干涉陀螺技术的发展引起了美国和欧洲的巨大兴趣, 先后在此领域启动了相关项目, 如美国 DARPA 的精密级惯性导航系统(PINS)项目、欧洲的高精度冷原子空间干涉仪计划(HYPER)和空间原子干涉计划(SAI)。Draper 实验室自 2010 年以来, 联合 MIT 持续开展了原子干涉陀螺研究。针对原子干涉回路面积小、陀螺灵敏度低的难题, 设计操控光场, 在快速绝热扫频中产生同步 Raman 跃迁, 将原子团分束能量从 2hk 提高到 30hk, 原子干涉灵敏度提高 15 倍。美国圣地亚国家实验室从减小渡越时间的思路出发, 研制了基于热原子干涉的原子陀螺和加速度计。法国巴黎天文台、PSL 大学等在法国国家空间研究中心的资助下进行了冷原子干涉陀螺仪的研究, 2017 年, Savoie 等提出了一种具有实时振动补偿的高灵敏度冷原子陀螺仪, Nicolas 等提出了一种用于增强原子干涉测量的大模态光学共振器。

## 3 不依赖 GPS 的部分项目新进展

随着 GPS 研究的深入, GPS 干扰、欺骗、压制技术日趋成熟, 世界主要强国均列装了 GPS 对抗设备, 现有第 2 代 GPS 已经无法为美军提供可靠、精确定位。美国为保持卫星导航先进地位, 为美军现代化信息战、导航战和电子对抗中奠定优势确立了 GPS-III 计划, 旨在通过技术升级, 提升 GPS 定位精度和抗干扰能力。目前, 美军已与洛马公司签订 10 颗 GPS-III 卫星订购计划。GPS III SV01 已于 2016 年 12 月完成了全部地面测试, 具备发射条件。GPS III SV02 于 2017 年 5 月完成整合, 7 月完成声学测试, 预计 2018 年交付美空军。GPS III SV03 现已组装完成, 正在准备开始环境测试。

此外, 美国又在寻求替代和补充措施。2017 年 5 月 31 日, 美国陆军在联邦商业机会网(FBO)发布了可靠导航、定位与授时(A-PNT)项目征询书, 在建立反介入和区域拒止能力时帮助其扩展 PNT 功能, 以确保 A-PNT 项目顺利进行。6 月, 陆军快速能力办公室作战负责人在第 16 届陆军通信与电子协会(AFCEA)年会上提到, 下一代 PNT 技术可免受网络攻击, 预计在 2018 年年初实现作战评估, 代替 GPS 导航的新型 PNT 系统将依靠冷原子干涉技术。7 月, 美国陆军快速能力办公室发

布了“PNT 替代方案”信息征集书(RFI),旨在开发相关系统寻求技术发展。针对 GPS 拒止情况下的导航, DARPA 的部分项目取得了一些进展。

### 3.1 全源定位与导航(ASPN)项目

2017 年 5 月,美国空军研究实验室宣布 ASPN 系统战斗机平台功能验证试验获得成功。至此,该系统海陆空高低速平台和单兵装备功能验证全部完成,这标志着世界首个多平台通用、可综合利用各种信息的高精度导航系统即将进入实用阶段。

ASPN 项目于 2011 年启动,由空军研究实验室、DARPA 联合开发,陆军通信与电子研发中心、海军空间与海战系统司令部、NASA 参与。2012 年 6 月,Draper 实验室和阿尔贡 ST 公司完成了理论算法和软件体系架构开发;2016 年,诺格公司、科学应用国际公司等完成了原型系统、实时导航算法和传感器新测量方法开发;2016 年 10 月—2017 年 5 月,系统在有/无 GPS 环境下完成了多平台框架通用性及综合导航能力验证。下一步,ASPN 系统可能将在美国空军“快速轻量自主系统”无人机项目中应用,并通过陆军“可靠定位导航与授时”项目进一步改进升级。

### 3.2 精确鲁棒惯性制导弹药(PRIGM)项目

2017 年 9 月,DARPA 的 Robert Lutwak 在夏威夷召开的惯性传感器与系统会议上介绍了 PRIGM 项目的研究进展。其中,先进导航惯性测量单元(NGIMU)正在为当前部署的战术级 MEMS IMU 开发接口兼容的插入式替代品,而先进惯性微传感器(AIMS)正在研究未来惯性传感器的新型架构、材料和操作模式,这些惯性传感器在极端条件下能够提供卓越的导航性能。

2015 年,针对高级惯性器件,DARPA 新启动了精确鲁棒惯性制导弹药(PRIGM)项目,研制高级新型低 C-SWaP 惯性微传感器。2016 年 3 月,DARPA 微系统技术办公室选定诺格为 PRIGM 开发基于 MEMS 的新一代 IMU,该系统通过加速度和角速度测量,为飞控系统导航提供数据输出。在 627 万美元的基本合同中,要求诺格公司验证其 MEMS 陀螺仪和加速计满足规定性能及环境要求。追加的 530 万美元合同要求评估 LR-500 是否满足

尺寸、质量、功率及性能参数要求,并在国防部仿真环境中进行 IMU 原型系统测试。

### 3.3 快速轻量自主(FLA)项目

2017 年 8 月,Draper 实验室和麻省理工学院在 DARPA 的 FLA 项目中开发了先进的无人机视觉辅助导航技术,可不依赖 GPS、详细的环境地图或者动作捕捉系统等外部支持,使无人机实现在未知环境中的自主感知和机动。Draper 实验室在 FLA 项目中发展了一种创新的姿态评估方法,由视觉和惯性导航系统组成,结合两种感知方法的优势,相比于单独使用每种方法在时间维度上误差积累更慢,实现所有飞行轨迹的位置、姿态和速度评估。FLA 项目于 2014 年 12 月启动,旨在发展全新算法使小型无人机在无操作人员遥控信号和 GPS 信号介入的情况下,仅凭借自身携带的高分辨率摄像机、激光雷达、声纳或惯性测量单元,便可在房间、楼梯、走廊或其他设障环境中执行自主导航飞行等低等级的任务。2016 年 2 月,FLA 项目完成首飞,第 1 阶段于 2017 年 6 月宣告结束。

## 4 结论

总体来说,国外惯性技术有以下几个趋势:

1) 在高端惯性系统应用方面,环形激光陀螺仪、光纤陀螺仪和半球谐振陀螺竞争激烈。环形激光陀螺市场占有率最高,光纤陀螺、半球谐振陀螺和硅 MEMS 陀螺次之,这种情况短期内不会改变。图 6 为法国 Yole 发展公司公布的 2017 年和预测的 2022 年高端惯性系统分布图。

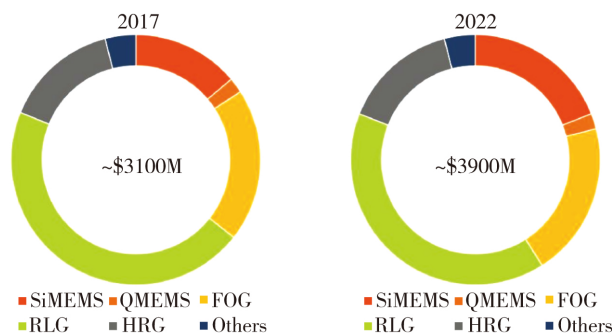


图 6 Yole 发展公司高性能陀螺仪分布图

Fig.6 High-performance gyroscope distribution by Yole development



2) 硅基 MEMS 陀螺仪正逐渐取代低端应用领域光纤陀螺, 但取代那些精度要求高的应用仍需要时间。与此同时, KVH 和 iXblue 等光纤陀螺厂商也在不断改进其光纤陀螺技术, 降低尺寸和成本。

3) 环形激光陀螺受到半球谐振陀螺在高性能应用领域的挑战。美国诺格公司和法国赛峰集团的投资, 使半球谐振陀螺仪取得巨大进步, 半球谐振陀螺市场占有率不断提高。

4) 低成本、尺寸、质量和功率(CSWAP) 成为提升惯性技术产品竞争力的关键。美国 DARPA 针对惯性器件与系统提出了 CSWaP 综合指标, 即成本、尺寸、质量和功耗的乘积, CSWaP 综合指标越小越具有竞争力。为追求 CSWaP 的最佳, 法国萨基姆公司将高端振动陀螺与 MEMS 加速度计和微型电子板相关联, 设计出 PRIMU 满足各种导航应用需求。

5) 随着各种干扰技术发展和 GPS 拒止情况时有发生, 多源复合导航成为惯性技术发展的重要方向。在 2017 年 9 月惯性会议上, AFIT 的 John Raquet 博士列举了一些不使用 GPS 替代方案, 包括视觉辅助、机会信号、激光雷达、伪卫星/信标、磁场变化和星体跟踪等。2017 年 10 月, 诺格公司宣布其开发出全源自适应融合(ASAF) 软件, ASAF 搜集来自各种信息源的数据, 如雷达、电光/红外、激光雷达、星体跟踪、磁力计、高度计等, 通过使用高速算法和硬件得到导航解决方案。此外, DARPA 针对 GPS 拒止情况下开展的一系列项目也取得了一定进展。

## 参考文献

- [1] Yole development. High end inertial systems 2017 sample [EB/OL]. <http://www.yole.fr>.
- [2] Yole development. High end inertial systems 2015 sample [EB/OL]. <http://www.yole.fr>.
- [3] Passaro V M N, Cuccovillo A, Vaiani L, et al. Gyro-cope technology and applications: a review in the industrial perspective[J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2284.
- [4] Zimmermann S, Erler T, Geiger W, et al. 2017 DGON inertial sensors and systems program[C]. 2017 DGON Inertial Sensors and Systems, 2017.
- [5] Andrei M S. 2017 IEEE international symposium on inertial sensors and systems proceedings papers[C]. 4<sup>th</sup> IEEE International symposium on Inertial Sensors and Systems, 2017.
- [6] Fan Z F, Luo H, Lu G F, et al. Direct dither control without external feedback for ring laser gyro[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(4): 767-770.
- [7] Korth W Z, Heptonstall A, Hall E D, et al. Passive, free-space heterodyne laser gyroscope[J]. *Classical & Quantum Gravity*, 2016, 33(3): 035004.
- [8] Hurst R B, Mayerbacher M, Gebauer A, et al. High-accuracy absolute rotation rate measurements with a large ring laser gyro: establishing the scale factor[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 1124-1130.
- [9] Neda N, René J L, Cheng J H, et al. A new technique for integrating MEMS-based low-cost IMU and GPS in vehicular navigation[J]. *Journal of Sensors*, 2016: 5365983.
- [10] Sanders G A, Sanders S J, Strandjord L K, et al. Fiber optic gyro development at Honeywell[C]. *SPIE Commercial+Scientific Sensing & Imaging*, 2016.
- [11] Pavlath G A. Fiber optic gyros past, present, and future [C]. 22<sup>nd</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, 2012: 8421.
- [12] Jay N. Two decades of KVH fiber optic gyro technology: from large, low performance FOGs to compact, precise FOGs and FOG-based inertial systems[C]. *SPIE Commercial+Scientific Sensing & Imaging*, 2016.
- [13] Korkishko Y N, Fedorov V A, Prilutskiy V E, et al. Fiber optic gyro for space applications—results of R&D and flight tests[C]. *IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems*, 2016.
- [14] Bergh R A, Arnesen L, Herdman C. Fiber optic gyro development at Fibernetics[C]. *SPIE Commercial+Scientific Sensing & Imaging*, 2016.
- [15] Mitani S, Mizutani T, Sakai S. Current status of fiber optic gyro efforts for space applications in Japan[C]. *SPIE Commercial+Scientific Sensing & Imaging*, 2016.
- [16] Lloyd S W, Fan S H, Dignonnet M J F. Experimental observation of low noise and low drift in a laser-driven fiber optic gyroscope[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(13): 2079-2085.
- [17] Wang Z N, Yang Y, Lu P, et al. Dual-polarization interferometric fiber-optic gyroscope with an ultra-simple configuration[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2463-2466.

(下转第 40 页)

and Research, 2016, 5(2): 1643-1647.

- [6] 席雷平, 陈自力, 李小民. 基于地形熵的地形适配区选择准则研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(4): 247-249.
- XI Lei-ping, CHEN Zi-li, LI Xiao-min. Discussion on the navigable terrain selection algorithm based on terrain entropy [J]. Journal of Projectiles, Pockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(4): 247-249.
- [7] 王华, 晏磊, 钱旭, 等. 基于地形熵和地形差异熵的综合地形匹配算法[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(9): 25-27.
- WANG Hua, YAN Lei, QIAN Xu, et al. Integration terrain match algorithm based on terrain entropy and terrain variance entropy [J]. Computer Technology and Development, 2007, 17(9): 25-27.
- [8] 王伟, 谢燕武, 李爱军. 基于地形熵和 MAD 的综合地形匹配算法[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(s9): 1015-1017.
- WANG Wei, XIE Yan-wu, LI Ai-jun. Terrain matching algorithm based on terrain-entropy and MAD [J]. Journal

of Projectiles, Pockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(s9): 1015-1017.

- [9] Wu L, Wang H, Chai H, et al. Performance evaluation and analysis for gravity matching aided navigation [J]. Sensors, 2017, 17(4): 769-783.
- [10] 程华, 田金文, 马杰, 等. 基于双近邻模式和最近距离的三维地形匹配区选择[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 247-252.
- CHENG Hua, TIAN Jin-wen, MA Jie, et al. Selection of suitable 3D terrain matching filed based on dual-neighbor pattern and proximate distance [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(2): 247-252.



姓名: 张璐  
性别: 女  
学历: 硕士研究生  
专业: 大地测量学与测量工程  
研究方向: 重力辅助导航、组合导航

#### (上接第 9 页)

- [18] Guattari F, Moluçon C, Bigneur A, et al. Touching the limit of FOG angular random walk: challenges and applications[C]. DGON Intertial Sensors and Systems, 2016: 1-13.
- [19] Bernauer F, Wassermann J, Guattari F, et al. Portable sensor technology for rotational ground motions[C]. Geophysical Research Abstracts, 2016: 13345.
- [20] Bochhati M, Schön S, Schlippert D, et al. Could cold atom interferometry sensors be the future inertial sensors? - first simulation results [C]. DGON Intertial Sensors and Systems, 2017.
- [21] Korkishko Y N, Fedorov V A, Prilutskiy V E, et al. Highest bias stability fiber-optic gyroscope SRS-5000[C]. DGON Intertial Sensors and Systems, 2017.
- [22] de Toldi E, Lefèvre H, Guattari F, et al. First steps for a giant FOG: searching for the limits [C]. DGON Intertial Sensors and Systems, 2017.
- [23] Pyatishchev E N, Enns Y B, Kazakin A N, et al. MEMS gyro comb-shaped drive with enlarged capacity gradient [C]. 24<sup>th</sup> Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 2017: 1-3.
- [24] Guattari F, Moluçon C, Bigneur A, et al. Touching the limit of FOG angular random walk: challenges and applications[C]. DGON Intertial Sensors and Systems, 2016: 1-13.
- [25] Bernauer F, Wassermann J, Guattari F, et al. Portable sensor technology for rotational ground motions [C]. Geophysical Research Abstracts, 2016: 13345.



姓名: 薛连莉  
性别: 女  
学历: 硕士研究生  
专业: 航空宇航科学与技术  
职称: 助理工程师  
研究方向: 导航、制导与控制