

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.03.003

## 2021年国外惯性技术发展与回顾

淦述荣<sup>1</sup>, 刘志强<sup>2</sup>, 宋丽君<sup>3</sup>, 周同<sup>4</sup>

- (1. 北京海鹰科技情报研究所, 北京 100074;
2. 中国航天科工飞航技术研究院, 北京 100074;
3. 西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 西安 710055;
4. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:**对2021年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等惯性技术相关会议文献,以及惯性技术领域相关机构披露的动态信息进行详细梳理。总结了光学陀螺、微机电(MEMS)陀螺、半球谐振陀螺(HRG)、原子陀螺和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剖析与展望。

**关键词:**惯性技术;惯性导航;陀螺仪;加速度计

**中图分类号:** P228.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-8110(2022)03-0023-08

## Development and Review of Foreign Inertial Technology in 2021

GAN Shu-rong<sup>1</sup>, LIU Zhi-qiang<sup>2</sup>, SONG Li-jun<sup>3</sup>, ZHOU Tong<sup>4</sup>

- (1. Beijing HIWING Scientific and Technology Information Institute, Beijing 100074, China;
2. HIWING Technology Academy of CASIC, Beijing 100074, China;
3. School of Information & Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
4. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** By sorting out the papers of inertial technology related conferences such as 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems, 2021 IEEE 34<sup>th</sup> International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) and the 28<sup>th</sup> Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, as well as the dynamic information disclosed by relevant institutions in the field of inertial technology, the development status of inertial navigation systems and inertial instruments is summarized, including optical gyroscopes, MEMS gyroscope, hemispherical resonance gyroscope (HRG), atomic gyroscopes and accelerometers. The development trend of inertial technology is analyzed and prospected.

**Key words:** Inertial technology; Inertial navigation; Gyroscope; Accelerometer

### 0 引言

随着信息化技术的飞速发展,现代战争对导航信息的需求与日俱增,精度要求日益提升。惯性导航凭借其不易受外界干扰、精度相对较高等优点,成为现代战争的重要导航方式,广泛应用于陆海空

天等高精尖军事领域,并不断向民用领域扩展延伸。

惯性传感器是惯性导航系统的核心部件,主要分为陀螺仪和加速度计。不同的惯性传感器基于其工作原理和结构特性,在精度、体积和成本等方面表现出不同特点。传统机电陀螺目前仍是工程应用精度最高的陀螺<sup>[1]</sup>,但结构尺寸较大,主要应用

收稿日期:2022-04-11;修订日期:2022-04-27

作者简介:淦述荣(1986-),男,硕士,高级工程师,主要从事惯性与导航技术方面的研究。

于战略核潜艇、战略导弹等战略级应用中;光学陀螺整体上技术相对较为成熟,具有高精度、高可靠性的特点,基于高精度光学陀螺的惯性系统仍然是陆海空天等领域武器装备导航级应用的重要选择;同时,中低精度的光学陀螺在导弹武器和制导弹药等战术级领域也有广泛的应用;微机电陀螺体积小、质量小、功耗低且成本适中,但精度相对偏低,目前主要应用于军用战术级市场和工业市场<sup>[2]</sup>;半球谐振陀螺同等精度下具有较好的尺寸、质量和成本效益,且可靠性高,国外基于半球谐振陀螺的惯性导航系统已成功应用于火炮和战车、快艇、太空发射器等陆海空天武器装备平台,未来随着半球谐振陀螺性能的提高和尺寸的减小,其应用范围也将不断扩展<sup>[3]</sup>;原子陀螺精度较高,但仍处于工程化探索阶段;加速度计朝着两级化发展,消费级加速度计成本不断下降,军用级加速度计性能不断提升。

## 1 光学陀螺

光学陀螺主要包括激光陀螺和光纤陀螺两大类。光学陀螺精度相对较高,技术日趋成熟,器件的质量不断提升,体积和功耗也不断降低。目前,国外激光陀螺最高精度 $0.00015(^{\circ})/h$ ,光纤陀螺最高精度 $0.00003(^{\circ})/h$ <sup>[1]</sup>。光学陀螺惯性系统在陆用战车、水面舰艇及导弹等陆海空高端装备领域得到了广泛应用。

### 1.1 激光陀螺

激光陀螺的主要优势是没有转子活动部件,精度高、稳定性好、重复性好、工作寿命长。与同为光学陀螺的光纤陀螺相比,激光陀螺的标度因数非常稳定,且动态特性好,在对标度因数稳定性要求极高的应用中,激光陀螺仍是首选陀螺。迄今为止,虽然各种新型陀螺仪不断出现,但是激光陀螺的应用综合性价比、环境适应性能均处于优势地位。

国外关于激光陀螺技术的研究主要侧重于提升激光陀螺的测量精度,技术途径包括参数调节、激光谐振腔优化及偏频技术等方面。2021年,莫斯科物理技术学院 Y. Broslavets 等研究了基于 YAG:Cr 4+ 宽带增益介质并在锁模机制下运行的多频固态环形激光陀螺,确定了确保角度测量最大精度的激光参数<sup>[4]</sup>;该团队还研究了周长为 28cm 的非平面对称腔四频塞曼环形激光陀螺的最大可实现精度,提出了一种补偿外磁场影响的方法,以及相应的陀螺周长等参数调节系统<sup>[5]</sup>。莫斯科罗蒙诺索夫国立大学的 G.

Barantsev 等分析了环形激光陀螺机械抖动装置可能受到的动态弹性扭转对捷联惯导系统姿态确定精度的影响,并提出了一种利用补偿姿态积分对这种影响进行参数校准的方法<sup>[6]</sup>。

在激光陀螺惯性系统方面,2021年7月,英国 Sonardyne 公司为日本川崎重工(KHI)的商用海底精密检查器配套了 SPRINT-Nav 700,用于导航、跟踪和控制。SPRINT-Nav 700 采用霍尼韦尔公司的环形激光陀螺仪和加速度计,可支持准确和长时间导航,并能够最大限度地降低复杂性和减少有效载荷空间消耗。2021年11月,法国泰雷兹公司和德国 CS GROUP 公司联合为法国海军水面舰艇开发了一套高性能、弹性的网络安全导航系统。该系统采用泰雷兹公司的基于环形激光陀螺仪和加速度计的 TopAxyz 惯性导航装置,可提供准确、可靠的导航信息,不受海况和船只位置的影响。

总体来看,2021年国外激光陀螺发展主要在小形化、低精度环形激光陀螺和大尺寸、超高精度环形激光陀螺两个方面,相关研究主要还是侧重于提升测量精度;基于高精度激光陀螺的惯性导航系统仍然是水下航行器和水面舰艇等装备的重要选择之一。

### 1.2 光纤陀螺

在光纤陀螺方面,国外主要采用多种光学调制方法来提升光纤陀螺综合性能。2021年,布尔诺科技大学的 M. Skalský 等提出了一种在低成本全光纤干涉陀螺仪中实现标度因数稳定和调制深度控制的方法,该方法利用压电相位调制器在闭环中执行偏置调制和 Sagnac 相移补偿,可将标度因数漂移降低 1 个数量级以上<sup>[7]</sup>。坎皮纳斯州立大学的研究人员提出了一种基于均值解调方案提高开环光纤陀螺线性度的方法,该方法可以使传感器输出的线性度提高 65 倍,非线性误差优于  $2.3 \times 10^{-4}$ <sup>[8]</sup>。斯坦福大学的研究人员提出通过优化相位偏差来最小化加宽激光器驱动光纤陀螺仪的角度随机游走(Angle Random Walk, ARW)的方法,该方法对于方波调制在最佳偏置时的 ARW 可改善约 10dB<sup>[9]</sup>。巴黎萨克雷大学的 M. Descampeaux 等提出了一种无源谐振器光纤陀螺仪(Resonator Fiber Optic Gyroscope, RFOG)残差调幅控制新方法,使用单个光电探测器产生两个误差信号,同时抵消激光频率和剩余幅度调制(Residual Amplitude Modulation, RAM)<sup>[10]</sup>。

在光纤陀螺惯性系统方面,2021年,澳大利亚 Advanced Navigation 公司推出具有自主专利的数字光纤陀螺惯性导航系统 Boreas D90,其尺寸为 160mm×140mm×115.5mm、质量为 2.5kg、功耗为 12W,成本较其他导航系统降低了约 40%,可提供 0.001(°)/h 的战略级零偏稳定性,0.005°的滚转/俯仰精度和 0.01°的航向精度。韩国 Fiberpro 公司推出了战术级光纤陀螺惯性测量单元(Inertial Measurement Unit,IMU)FI200C,该 IMU 在全温度范围内零偏重复性小于 0.5(°)/h,ARW 为 0.03(°)/h<sup>1/2</sup>,质量为 790g,功耗为 5W。俄罗斯 Fizoptika 公司推出了光纤陀螺 IMU U181,该 IMU 动态范围为 300(°)/s,ARW 为 0.025(°)/h<sup>1/2</sup>,质量为 200g,功耗为 1.5W。

在光纤陀螺应用方面,2021年1月,挪威 Vard 集团选择法国 iXblue 公司为挪威海岸警卫队的新型 P6615 Jan Mayen 级战船提供导航系统研制生产。得益于其捷联式光纤陀螺仪技术,iXblue 公司的 Marins 系列惯性导航系统已被证明可以在北极等高纬度地区提供准确、弹性和安全的导航。2021年4月,俄罗斯 Optolink 公司的 TRS-500 光纤陀螺仪安装在最新的联盟号 MS-17 航天器的着陆模块控制系统中,成功协助执行了着陆任务。Optolink 公司 TRS-500 小尺寸三轴闭环光纤陀螺仪对地球旋转速率敏感,与开环陀螺相比,其对零操作及模数输出使其能够提供更高的标度因数准确度和更大的动态范围,特别适用于高机动性载体。

总体来看,2021年国外光纤陀螺技术的研究重点主要是通过光学调制、工艺优化等方法,使其朝着高精度、小型化、低成本及良好恶劣环境适应性等方向发展;基于光纤陀螺的惯性导航系统,具有小型化、高性能的特点,是陆用战车、水面战船、导弹、航天器等武器装备的重要选择之一。

## 2 微机电陀螺

微机电(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)陀螺具有体积小、质量小、功耗低等特点,在军用和民用市场都得到了广泛应用,是惯性技术领域重要的研究热点之一。

2021年,MEMS 陀螺的相关研究主要侧重于通过结构小型化、制造工艺优化、谐振器优化设计、测控电路的误差补偿设计等方法来提升 MEMS 陀螺仪的整体性能。

在结构小型化方面,米兰理工大学的 M.

Gianollo 等在 1mm<sup>2</sup> 面积内,采用标准 MEMS 工艺制造了一种结构小型化的四质量块陀螺仪,并实现了低至 20μHz/Hz<sup>1/2</sup> 的相位噪声<sup>[11]</sup>。米兰理工大学的 M. Gadola 等设计了一种尺寸为 1.2mm<sup>2</sup>、带宽为 100Hz 的微型俯仰/滚动陀螺仪,其在平面内测得的最低 ARW 为 600μ(°)/(s/Hz<sup>1/2</sup>),最低零偏不稳定性为 2.8(°)/h。该陀螺仪采用结合积分补偿的新架构,获得了比前一代产品高出 10 倍的标度因数,同时还优化了能量传输以及振动稳定性<sup>[12]</sup>。日本硅传感系统公司升级了陀螺仪 CRS39A,使其质量减小了 40%,且组件更易安装在具有 25mm 直径套管的井下钻井设备中。日本 TDK 公司旗下 Tronics Microsystems 公司推出了用于无人系统和自动驾驶汽车领域的高精度数字 MEMS 陀螺仪 GYPRO,其质量仅为 2g,易于集成且材料费用低,可提供超低噪声、低延迟和高线性度的角速率测量。美国 ADI 公司报告了其用于 ADIS1654x 系列 IMU 的小尺寸、抗振、低噪声 MEMS 陀螺仪的性能参数,实现了 0.55(°)/h 的零偏不稳定性,50(°)/h 的 10 年内零偏重复性;集成了该 MEMS 陀螺仪的新一代 IMU 零偏性能提升了 4 倍,灵敏度提高了 30 倍,重复性提高了 10 倍<sup>[13]</sup>。

在制造工艺优化方面,美国通用电气公司开发了一种名为 GE Polaris 的导航级低成本惯性 MEMS 工艺流程,GE Polaris 共有六层掩模层,具有厚绝缘硅和 20~200μm 的器件层,30:1 的高纵横比蚀刻,采用硅通孔技术的晶圆级真空密封<sup>[14]</sup>。加州大学的 D. Vatanparvar 等开发了一种硅基熔融石英微型环形陀螺的制作工艺,使陀螺 Q 值高达 53.9 万,分频低至 8Hz<sup>[15]</sup>。日本硅传感系统公司推出了一种新型高性能/低噪声单轴全硅陀螺仪 CRH03,在 MEMS 和电子设备两方面进行了改进,使功耗比上一代产品 CRH02 降低了 30%,抗振性能更高,其零偏不稳定性为 0.03(°)/h,ARW 为 0.005(°)/h<sup>1/2</sup>。

在谐振器优化设计方面,密歇根大学的 J. Cho 等成功研制了一种高 Q 值导航级熔融石英微型盆状谐振陀螺仪,直径 5mm 的微型盆状谐振器 Q 值可达到 587 万,短期运行零偏稳定性为 0.01(°)/h;直径 10mm 的微型盆状谐振器 Q 值可达到 1250 万,短期运行零偏稳定性为 0.00138(°)/h<sup>[16]</sup>。日本东北大学的研究团队提出了一种使用附加应力抵消结构来减少锚定损失的电磁环谐振器的设计方法,频率失配低至 0.17%<sup>[17]</sup>;该研究团队还设计了一种利用模态定位的新型高刚度灵敏度三自由度谐振器,这

种新颖设计中的模式定位可通过调整刚度来调整灵敏度,测量结果显示,制造的灵敏度为 209.6;通过施加 39.3V 的直流偏置,灵敏度可提高到 56679<sup>[18]</sup>。

在速率检测方案的误差补偿设计方面,米兰理工大学的 L. G. Pagani 等提出了一种用于改善调幅电容 MEMS 陀螺仪零速率输出稳定性的闭环方法,测试结果表明,陀螺仪温度稳定性提高了 300 倍<sup>[19]</sup>。

在全角检测模式的测控电路误差补偿设计方面,日本东芝公司研发了世界上第一个工作在全角模式下的可以检测地球自转的 MEMS 速率积分陀螺仪模块,实验结果表明,陀螺在该全角测控电路下的零偏不稳定性达到了  $0.1(^{\circ})/h$ ,实现了地速测量验证<sup>[20]</sup>。

在精度提升方面,在美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)弹药导航级 IMU(PRIGM NGIMU)项目的支持下,美国霍尼韦尔公司正在开发一款型号为 HG7930 的基于 MEMS 的 IMU(图 1)。相较于 HG1930 战术级 MEMS IMU,在体积略有增加的情况下,性能提升了 1 个数量级,其陀螺仪 ARW 可达  $0.0035(^{\circ})/h^{1/2}$ ,陀螺仪零偏重复性优于  $0.1(^{\circ})/h$ ,加速度计零偏重复性优于  $20\mu g$ <sup>[21]</sup>。美国角斗士技术公司发布的 SX2 系列低噪声、高速 MEMS 惯性传感器,在性能方面取得了巨大进步,ARW 低至  $0.0018(^{\circ})/(s/Hz^{1/2})$ ,拥有 600Hz 带宽,高达 10kHz 的数据速率和低于  $100\mu s$  的延迟。日本村田制作所开发了一种新型 MEMS 六自由度惯性传感器 SCHA63T,用于全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)定位辅助和动态倾斜检测。SCHA63T 传感器包括三轴陀螺和三轴加速度计,陀螺零偏不稳定性低至  $1(^{\circ})/h$ ,陀螺仪噪声密度为  $0.0015(^{\circ})/(s/Hz^{1/2})$ 。美国惯性实验室推出了 MEMS 惯性测量单元 IMU-NAV-100,水



图 1 霍尼韦尔 HG7930 IMU 原型

Fig. 1 Prototype of Honeywell HG7930 IMU

平精度  $0.03^{\circ}$ ,陀螺仪零偏稳定性可达  $0.5(^{\circ})/h$ ,加速度计零偏稳定性  $0.003mg$ 。

在低成本设计方面,德国博世公司的研究人员使用冗余、低成本 MEMS 传感器阵列提升纯惯性导航定位精度,结果表明,使用由 14 个设备组成的阵列相较于单个设备,其导航的误差性能水平提高了  $\sqrt{14}$  倍<sup>[22]</sup>。

在结构小型化方面,日本硅传感系统公司推出了一种新的九自由度惯性测量单元 DMU41(图 2)。该惯性测量单元拥有与光纤陀螺仪几乎相同的性能,其尺寸为  $50mm \times 50mm \times 50mm$ ,质量仅为 200g,与该公司 DMU30 惯性测量单元相比,体积减少了 54%,质量减小了 42%,功耗降低了 50%。美国霍尼韦尔公司推出的用于小型卫星导航的微型空间抗辐射惯性传感器 HG4934,质量仅为 145g,小体积和低功耗适合应用于小型低成本卫星。美国 EMCORE 公司推出的新型 MEMS 惯性测量单元 SDC500,采用小巧、轻便、低功耗和密封设计,提供了卓越的集成功能,根据温度、冲击和振动环境的不同,陀螺仪零偏为  $1(^{\circ})/h \sim 20(^{\circ})/h$ ,加速度计零偏为  $1mg \sim 5mg$ 。



图 2 惯性测量单元 DMU41

Fig. 2 DMU41 IMU

### 3 半球谐振陀螺

半球谐振陀螺基于哥氏振动原理,是一种高精度新型固体振动陀螺,具有结构简单、启动时间短、可承受大过载、物理特性稳定、可靠性高和超长寿命的优势,是最有潜力实现高精度、小型化、低成本的陀螺仪,已实现  $0.0001(^{\circ})/h$  的高精度<sup>[3]</sup>,成为国外惯性技术领域的研究热点之一。而半球谐振子作为半球谐振陀螺的心脏,其性能在多个方面影响半球谐振陀螺产品的精度,也直接决定整个陀螺的

性能。尤其是半球谐振子的异形加工精度,已成为制约半球谐振陀螺发展和应用的技术瓶颈。

2021 年 6 月,法国赛峰公司推出了其首款专为法国海上突击队设计的两栖惯性导航系统 GEO-NYX™ M,该导航系统采用半球谐振陀螺仪 HRG Crystal™,实现了高可靠性、最佳的功率/质量/尺寸比,且完全静音;GEO-NYX™ M 对环境完全不敏感,能够在极端条件下运行,可用于海军快艇平台和陆基平台,可提供导航和瞄准两种典型应用。

#### 4 原子陀螺

原子陀螺目前整体上还处于实验研究和初步工程化探索阶段,尚未形成大规模产业化应用。在研究进展方面,2021 年,康奈尔大学的研究人员研究了金刚石 MEMS 谐振器中产生的千兆赫兹频率应变振荡,以驱动金刚石氮空位(NV)中心的自旋和轨道共振,利用室温下的自旋-应变相互作用,验证了双量子态和单量子跃迁的相干自旋控制<sup>[23]</sup>。伯明翰大学的 B. Adams 等研制了一种用于重力地图匹配导航的便携式高数据速率原子干涉重力仪(HIDRAG),其目标灵敏度在 100Hz 数据速率下为  $10^{-7} g/Hz^{1/2}$ ,月稳定性为  $10^{-9} g$ <sup>[24]</sup>。德国博世公司的 R. Cipolletti 等开展了核磁共振陀螺仪瞬态特性的建模研究,提出了基于自旋的导航级陀螺仪的建模和参数优化方法<sup>[25]</sup>。德国博世公司的 J. Riedrich-Möller 等开展了 MEMS 气室中氩原子核自旋进动的自由感应衰减测量实验,在实现紧凑型核磁共振陀螺仪方面迈出了重要一步<sup>[26]</sup>。2021 年 3 月,澳大利亚 Advanced Navigation 公司与澳大利亚 Q-CTRL 公司获得了澳大利亚政府“月球到火星”计划的资金支持,两家公司将合作为太空运载火箭、卫星和着陆器研发量子增强的惯性导航解决方案,该方案旨在为美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)的 Artemis 月球探索计划提供高精度惯性导航技术,并支持 NASA 执行未来的深空、月球和星际飞行任务。

#### 5 加速度计

2021 年,加速度计继续朝着两级化发展,消费级加速度计的应用领域不断拓展,成本不断下降;军用级加速度计的精度不断提高,综合性能也不断提升。相关研究机构和厂商也持续发力,致力于提升加速度计的整体性能,相关研究主要是基于加速度计的本底噪声改善、信号带宽提高、测量范围拓

宽和测量精度提升等方面。

在本底噪声改善方面,英国 Silicon Microgravity 公司的 M. Pandit 等提出了一种通过避免高频地震噪声在长周期测量中的混叠,以改善谐振式 MEMS 加速度计本底噪声的方法,使本底噪声性能提升了 13 倍,实现了具有  $10ng/Hz^{1/2}$  本底噪声的谐振加速度计<sup>[27]</sup>。剑桥大学的 G. Sobreviela-Falces 等设计了一种在地球学和重力测量应用中具有较好稳定性的差分 MEMS 振梁加速度计,可实现优于 10ng 的零偏不稳定性和  $10ng/Hz^{1/2}$  的本底噪声<sup>[28]</sup>。剑桥大学的 H. Zhang 等设计了一种在高阶弯曲模态下运行的模态局域化 MEMS 加速度计,实现了 130ng 的零偏不稳定性和  $85ng/Hz^{1/2}$  的本底噪声<sup>[29]</sup>。

在信号带宽提升方面,格勒诺布尔-阿尔卑斯大学的 T. Miani 等设计和制造了一种基于纳米机械压阻传感器的谐振加速度计,该谐振加速度计将压阻纳米谐振器与微米质量块相结合,实现了高达  $10\%/g$  的频率灵敏度和 1.5kHz 的大带宽<sup>[30]</sup>。桑迪亚国家实验室的 D. Dominguez 等设计和制造了一种具有 MHz 超高带宽、体积微加工的光机加速度计,该加速度计在 120kHz 带宽上显示出平坦响应,最小可检测信号为 26mg<sup>[31]</sup>。以色列物理逻辑公司改进了 MEMS 开环加速度计 MAXL-OL-2040C 的信号带宽,测试结果表明,加速度计带宽由 300Hz 增加至 2000Hz。

在测量范围拓宽方面,东京工业大学的 A. Uchiyama 等设计了一种用于宽检测范围的单轴双质量块 MEMS 加速度计,可实现从  $\mu g$  级到 20g 的大范围加速度检测<sup>[32]</sup>。以色列物理逻辑公司推出了具有大量程的闭环 MEMS 加速度计 MAXL-CL-3050(图 3)和 MAXL-CL-3070。其中,MAXL-CL-3050 的动态范围为  $\pm 50g$ ,MAXL-CL-3070 的动态范围为  $\pm 70g$ 。

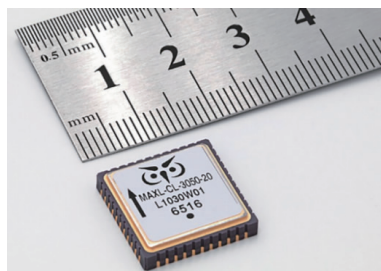


图 3 MEMS 加速度计 MAXL-CL-3050

Fig. 3 MEMS accelerometer MAXL-CL-3050

在测量精度提升方面,法国 iXblue 公司开发了

一种新型石英振动传感器(图4),可用于高动态范围(100g)测量,具有导航级性能(零偏和标度因数重复性分别小于 $100\mu\text{g}$ 和 $3\times 10^{-5}$ )、低SWaP(小于10g和50mW)<sup>[33]</sup>。乔治亚理工学院的S. Shin等设计了一种亚 $\mu\text{g}$ 分辨率的超灵敏调频谐振加速度计,可实现10s范围内最小检测加速度为ng级,并具有25g的线性上限和0.5%的标度因数非线性<sup>[34]</sup>。美国角斗士技术公司推出了新型三轴数字MEMS加速度计A300D,其速度随机游走为 $0.058\text{mg}/\text{Hz}^{1/2}$ ,零偏稳定性为 $0.015\text{mg}$ 。Tronics Microsystems公司推出了数字高精度闭环MEMS加速度计AXO315,具有极低的噪声和出色的线性度,可在苛刻的温度和振动条件下提供一流的零偏重复性和标度因数重复性。美国Silicon Designs公司推出了新的1525型Low-G系列MEMS直流加速度计芯片,旨在为工业级无人机和机器人等各种应用提供可靠、准确和可重复的低频振动和加速度测量,该系列具有出色的零偏稳定性、零交叉耦合设计以及 $5\mu\text{g}$ 的艾伦方差。

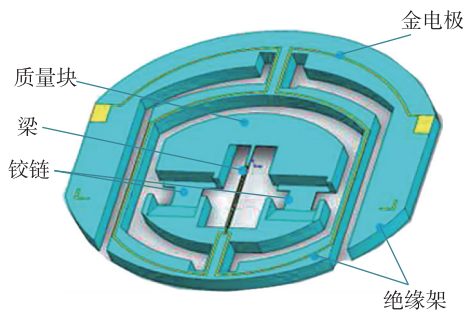


图4 基于单片石英晶片的振动惯性加速度计设计示意图  
Fig. 4 Design schematic of vibrating inertial accelerometer based on a monolithic quartz wafer

## 6 组织机构的发展变化

2021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。美国惯性实验室与澳大利亚电信集成商CSE Crosscom建立合作关系,为澳大利亚海洋行业提供其定位定向和导航产品。美国惯性实验室收购了无人机和机器人MEMS IMU开发商美国Mem-sense公司,有效增强了其在MEMS惯性系统领域的技术实力,有望加速其在自动驾驶汽车、卫星导航、航空航天和国防等领域突破性技术的发展。法国iXblue公司收购了光子元件和仪器制造商法国Kylia公司及集成量子仪器制造商法国Muquans公司。在

完成收购后,iXblue公司将进一步加强光子学的战略轴心,其在仪器、激光和先进的光子学组件方面的营业额预期将超过3500万欧元。比利时Septentrio公司与比利时XenomatiX公司建立合作伙伴关系,Septentrio公司GNSS/INS接收器AsteRx SBi3 Pro+将成为XenomatiX公司道路激光雷达XenoTrack的一部分,基于其全球定位坐标实现对路面状况的毫米级精确分析。法国赛峰电子与防务公司收购了陀螺仪传感器和MEMS惯性系统制造商挪威Sensoror AS公司。赛峰集团就收购弹性定位、导航与授时(Positioning, Navigation, and Timing,PNT)领域全球领导者Orolia公司展开了独家谈判,此次收购可通过显著的互补性来扩展其弹性PNT解决方案,这一补充将使赛峰集团能够在PNT、惯性导航、GNSS接收机和模拟器的各个方面建立世界领先地位。

## 7 展望

2021年,随着现代物理学、计算机和电子技术的飞速发展,以及微加工和微集成技术等先进制造技术的不断完善,在军用和民用领域蓬勃需求的牵引下,惯性技术取得了较大的进步。惯性技术领域主要研究机构和厂商积极应用新技术、新工艺,开发了一系列新的惯性传感器件及系统,并在高精度、集成化、低成本等方面的综合性能有所发展。展望未来,随着现代科学技术的不断发展,以及军事和国民经济领域的应用需求的不断扩展,惯性传感器件及系统相关技术也必将得到更为长足的进步。

### 1) 高精度是惯性技术发展的终极追求

精度提升始终指引着陀螺、加速度计以及系统技术的发展,同时推动相关前沿科学技术在惯性技术领域的应用。光学陀螺、半球谐振陀螺、原子陀螺聚焦新材料、新工艺以及新原理的研究;MEMS惯性器件在微型化、柔性化、工作持久性、稳定性,以及输出信号提取和抗辐射方面进行进一步探究。

### 2) 惯性关键部件原子尺度制造跨入新时代

近年来,高精度传感器原子尺度制造已经成为国外惯性技术领域的研究热点之一。随着原子和近原子尺度制造技术的出现,惯性关键部件(MEMS惯性器件、半球谐振子)的制造技术随着器件特征尺寸的不断缩小,从以经典力学、宏观统计分析和工程经验为主要特征的现代制造技术,走向

以量子理论为代表的多学科综合交叉集成的下一代制造技术,将成为科技界研究前沿之一。

### 3)低精多维高精度测量技术快速发展

随着惯性技术的进步和国防需求的牵引,低精多维实现高精度测量技术在惯性领域得到快速发展。依托核心技术序列化、模块化、标准化,满足新时代装备智能、高精度、低成本、快速应对的需求。尤其随着我国北斗卫星导航系统的完善以及地磁、雷达及图像等传感器应用领域的不断扩大,智能技术的发展及其在惯性领域的渗透,借助虚拟空间建模技术,实现设计指标在数字化世界中的精确模型,通过数字智能化实现惯性技术在物理世界的真实复现和决策支持,达到低精多维高精度测量的目的。

### 参考文献

- [1] 沈玉芃, 杨文钰, 朱鹤, 等. 2020年国外惯性技术的发展与展望[J]. 飞航导弹, 2021(4):7-12.  
Shen Yupeng, Yang Wenyu, Zhu He, et al. Development and prospects of foreign inertial technology in 2020[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(4): 7-12(in Chinese).
- [2] Yole D. High-end inertial sensors for defense, aerospace & industrial applications, market and technology report 2020[R]. Yole Development, 2020.
- [3] 薛连莉, 沈玉芃, 徐月. 2019年国外惯性技术发展与回顾[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(1): 60-66.  
Xue Lianli, Shen Yupeng, Xu Yue. Development and review of foreign inertial technology in 2019[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(1):60-66(in Chinese).
- [4] Broslavets Y Y, Ambartsumyan D M, Semenov V G, et al. Multifrequency solid-state ring laser gyroscope based on YAG:Cr4+[C]//Proceedings of 2021 28<sup>th</sup> Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 2021: 1-8.
- [5] Broslavets Y Y, Kalmykova N S, Fomitchev A A, et al. New four-frequency Zeeman laser gyroscope with a nonplanar symmetric cavity, its parameters and operation[C]// Proceedings of 2021 28<sup>th</sup> Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 2021: 1-8.
- [6] Barantsev G O, Kozlov A V, Shaimardanov I K, et al. Elastic dynamic torsion of a ring laser gyroscope mechanical dither and its effect on the accuracy of attitude determination[C]//Proceedings of 2021 28<sup>th</sup> Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 2021: 1-4.
- [7] Skalský M, Fialka J, Kopečný L, et al. Scale-factor stability control technique for closed-loop all-fiber interferometric optical gyroscope[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2021: 1-4.
- [8] Schlichting M W, Bacurau R M, Ferreira E C. Linearization of open-loop fiber optic gyroscopes with mean-value demodulation scheme[C]// Proceedings of 2021 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), 2021: 1-14.
- [9] Morris T A, Zawada A N, Garcia D, et al. Optimization of the angular random walk in laser-driven fiber-optic gyroscopes[C]//Proceedings of IEEE Sensors Journal, doi: 10.1109/JSEN.2021.3136087.
- [10] Descampeaux M, Feugnet G, Bretenaker F. New method for residual amplitude modulation control in RFOG[C]//Proceedings of 2021 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), 2021: 1-11.
- [11] Gianollo M, Mastri V, Zega V, et al. Miniaturized quadruple mass gyroscopes: challenges and implementation[C]//Proceedings of 2021 IEEE Sensors, 2021: 1-4.
- [12] Gadola M, et al.  $600\mu\text{dps}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,  $1.2\text{ mm}^2$  MEMS pitch gyroscope[C]// Proceedings of 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2021: 1-4.
- [13] Prikhodko I, Geen J, Merritt C, et al. Vibration immune, long-term stable and low noise synchronized mass MEMS gyroscope [C]//Proceedings of 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2021: 1-4.
- [14] Lin D, Macdonald R, Calbaza D, et al. Polaris-a low cost MEMS fabrication platform for navigation-grade inertial sensors[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2021: 1-4.
- [15] Vatanparvar D, Hii D, Shkel A M. Fabrication process and structural characterization of fused silica-on-silicon toroidal ring gyroscope[C]//Proceedings of 2021 IEEE Sensors, 2021: 1-4.
- [16] Cho J, Woo J K, Yan J, et al. High-Q navigation-grade fused-silica micro birdbath resonator gyroscope [C]// Proceedings of 2021 IEEE Sensors, 2021: 1-4.
- [17] Khan M J, Tsukamoto T, Tanaka S. Design of electromagnetic ring resonator with zero anchorloss[C]// Proceedings of 2021 21<sup>st</sup> International Conference on

- Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), 2021; 301-304.
- [18] Chen J, Tsukamoto T, Tanaka S. A novel three degree-of-freedom resonator with high stiffness sensitivity utilizing mode localization[C]// Proceedings of 2021 IEEE 34<sup>th</sup> International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2021; 810-813.
- [19] Pagani L G, Guerinoni L, Falorni L, et al. Direct phase measurement and compensation to enhance MEMS gyroscopes ZRO stability[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2021, 30(5): 703-711.
- [20] Miyazaki F, et al. A 0.1 (°)/h module-level silicon MEMS rate integrating gyroscope using virtually rotated donut-mass structure and demonstration of the Earth's rotation detection[C]//Proceedings of 2021 21<sup>st</sup> International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), 2021; 402-405.
- [21] Johnson B, et al. Development of a navigation-grade MEMS IMU[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2021; 1-4.
- [22] Blocher L, et al. Purely inertial navigation with a low-cost MEMS sensor array[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2021; 1-4.
- [23] Fuchs G D. Quantum control of spin and orbital states with a diamond MEMS resonator[C]// Proceedings of 2021 21<sup>st</sup> International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), 2021; 295.
- [24] Adams B, Macrae C, Entezami M, et al. The development of a high data rate atom interferometric gravimeter (HIDRAG) for gravity map matching navigation[C]// Proceedings of 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). IEEE, 2021; 1-4.
- [25] Cipolletti R, Riedrich-Moeller J, Fuchs T, et al. Modeling of the transient behavior of a nuclear magnetic resonance gyroscope [C]// Proceedings of 2021 IEEE Sensors, 2021; 1-4.
- [26] Riedrich-Möller J, Cipolletti R, Schmid M, et al. Nuclear spin precession in MEMS vapour cells-key element of a nuclear magnetic resonance gyroscope[C]// Proceedings of 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), 2021; 1.
- [27] Pandit M, Sobreviela G, Pili C, et al. A 10 nano-g/RT-HZ resonant MEMS accelerometer employing anti-aliasing control[C]// Proceedings of 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). IEEE, 2021; 1-4.
- [28] Sobreviela-Falces G, Pandit M, Mustafazade A, et al. A MEMS vibrating beam accelerometer for high resolution seismometry and gravimetry [C]// Proceedings of 2021 IEEE 34<sup>th</sup> International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). IEEE, 2021; 196-199.
- [29] Zhang H, Sobreviela G, Pandit M, et al. JMEMS letters a low-noise high-order mode-localized MEMS accelerometer[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2021, 30(2): 178-180.
- [30] Miani T, Verdot T, Berthelot A, et al. Resonant accelerometers based on nanomechanical piezoresistive transduction[C]// Proceedings of 2021 IEEE 34<sup>th</sup> International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). IEEE, 2021; 192-195.
- [31] Dominguez D, Hackett L, Miller M, et al. Megahertz bandwidth bulk micromachined optomechanical accelerometer with fiber optical interconnects[C]// Proceedings of 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2021; 1-4.
- [32] Uchiyama A, Ichikawa T, Shibata K, et al. A MEMS accelerometer with a single axis two proof masses for a wide detection range[C]// Proceedings of 2021 21<sup>st</sup> International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), 2021; 112-115.
- [33] Taibi R, Jolly O, Kerrien T, et al. SWaP reduction for high dynamic navigation grade accelerometer based on quartz VBA technology[C]// Proceedings of 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). IEEE, 2021; 1-4.
- [34] Shin S, Daruwalla A, Liu Z, et al. A sub-micro-G resolution frequency-modulated piezoelectric in-plane accelerometer[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2021; 1-2.

(编辑:孟彬)