

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.04.006

2022年国外惯性技术发展与回顾

淦述荣¹, 陈少春¹, 高溥泽², 宋丽君³

- (1. 北京海鹰科技情报研究所, 北京 100074;
2. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074;
3. 西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 西安 710055)

摘要:惯性技术广泛应用于海、陆、空、天各种载体的导航、定位与控制。通过对2022年的IEEE惯性传感器与系统会议、DGON惯性传感器系统会议、MEMS国际会议和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的详细梳理,总结了光学陀螺、微机电(MEMS)陀螺、半球谐振陀螺(HRG)、加速度计以及新兴的量子惯性传感器等惯性仪表及惯性导航系统(INS)的发展现状,并对惯性技术领域的发展趋势进行了分析与展望。当前,惯性技术领域相关研究主要侧重于小型化、提高精度和降低成本等方面。其中,光学陀螺较为成熟,更为侧重于小型化相关研究;微机电陀螺正在致力于向导航级性能突破和发展;半球谐振陀螺主要着力于探索降低高端产品的制造成本。

关键词:惯性技术;惯性导航;惯性传感器;陀螺仪;加速度计

中图分类号:U666.1 文献标志码:A 文章编号:2095-8110(2023)04-0069-12

Development and review of foreign inertial technology in 2022

GAN Shurong¹, CHEN Shaochun¹, GAO Puze², SONG Lijun³

- (1. Beijing HIWING Scientific and Technology Information Institute, Beijing 100074, China;
2. Beijing Automation Control Equipment Institute, Beijing 100074, China;
3. School of Information & Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Inertial technology is widely used in navigation, positioning and control of various carriers on sea, land, air and space. By sorting out the papers of inertial technology related conferences such as 2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems, DGON Inertial Sensors and Systems Symposium, IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems(MEMS) and the 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (INS), as well as the dynamic information disclosed by relevant institutions in the field of inertial technology, this paper summarizes the development status of inertial systems and inertial sensors such as optical gyroscopes, MEMS gyroscopes, hemispherical resonance gyroscopes (HRGs), accelerometers and the emerging quantum or atomic sensors. Lastly, the development trend of inertial technology is analyzed and prospected. Currently, research in the field of inertial technology mainly focuses on miniaturization, improving accuracy, and reducing cost. Among them, optical gyroscopes are more mature and more emphasis on miniaturization related research; MEMS gyroscopes are committed to breakthroughs and developments of navigation grade performance; HRGs mainly focus on the exploration of reducing the manufacturing cost of high-end products.

收稿日期:2023-04-24;修订日期:2023-06-21

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。

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

0 引言

2022 年是世界不平凡的一年。从 2022 年 2 月 24 日至今,俄乌冲突到战争已经过去了一年多的时间。这一年,不仅世界政治、经济格局发生了变化,而且世界科技装备也有了突飞猛进的发展,尤其战争的胶着,给各国国防装备的发展带来了重要的启示,尤其是关系到战场装备的导航定位、稳姿定向控制的核心惯性器件的应用适配和发展需求,也受到极大的挑战和冲击。

战场电子战、网络对抗、星链及无人机群的凸显,使 GPS 在作战使用过程中极易受到干扰、压制与屏蔽等多种影响,单一的 GPS 导航已经难以满足现代战争对于导航信息的需求。近年来,以美国为代表的军事强国致力于发展多种可替代 PNT 技术,通过大量引入各类自主导航信息源来补充 GPS,增强其导航系统的战场应用性能精度和适应可靠性。惯性技术是国家综合 PNT 体系的重要组成部分,具有精确自主导航、定位,不易受外部干扰,适用范围广等优势,一直是军事强国竞相发展的核心技术。惯性导航技术具有百年发展历史,基于其完全自主、高精度和不易受干扰的特性,被广泛应用于陆海空天关键军事与民用领域,成为 GNSS 之外最重要的 PNT 技术来源。

作为惯性导航系统的核心与基础,陀螺仪和加速度计技术持续发展,引领着惯性产品的更新换代。传统的机电陀螺技术早已成熟,静电和三浮陀螺主要应用于需要超高精度的战略平台,动调陀螺主要应用于导航级和战术级平台惯导系统,由于具有活动部件,复杂度和成本较高,机电陀螺的应用领域在逐渐缩小;国外激光陀螺技术已经非常成熟,并已成为导航和战略级性能以及一些战术级性能的标准。受既有市场使用情况和成熟度的影响,激光陀螺在高端导航市场和应用中仍占据主导地位;光纤陀螺(FOG)技术相对成熟,正朝着更高精度和更小型化两个方向发展,并在空间导航、平台稳定、导弹制导以及工业级领域得到大量应用,新兴光子纠缠光纤陀螺研究也在进行中;微机电(MEMS)陀螺和加速度计具有高环境适应性、尺寸小、质量小、功耗低和成本低(低 SWaP-C)等特点,在工业级和军用战术级领域有着不错的市场份

额,而且该技术正在向导航级性能突破和发展,目前已出现导航级工程样机,预计未来将进入高端战术级和导航级应用市场;半球谐振陀螺技术近年已实现重大突破,其精度涵盖战术级、导航级和战略级,随着赛峰集团实现半球谐振陀螺的工业化批生产有效降低了成本,其应用范围已从传统的空间应用和核潜艇等高端市场逐步拓展到了舰船、飞机、火炮和战车等广阔领域,以明显的体积、成本优势挑战着传统技术;原子陀螺和原子干涉仪等量子惯性传感技术整体上仍处于工程化探索阶段,但量子重力仪技术得到了较为快速的发展,市场上已出现商业化产品原型;加速度计整体性能稳步提升,应用领域不断拓展。摆式积分陀螺加速度计精度依然稳居高位,但鉴于其体积和成本极大地限制了其应用价值,石英摆式力平衡加速度计在近几年来由应用市场推动了其性能精度、成本体积的不同程度的提升,成为遍及多个领域、覆盖多个精度级别层次的核心产品。其中,高抗过载能力的蓝宝石摆式加速度计也在悄然兴起。同时,作为战略第三代的硅振梁加速度计,因其精度、成本、体积、功耗的综合性性价比得到快速发展,已经进入工程应用阶段。

1 激光陀螺

激光陀螺基于 Sagnac 效应测量角速度,具有启动快、动态特性好、标度因子稳定及环境适应性好等特点。美国在 20 世纪 70 年代最先研制出工程样机,80 年代开始在武器系统中应用,目前技术已非常成熟,最高工程化精度达到 $0.000\ 15(^{\circ})/h^{[1]}$,在导航级和战略级应用中占据重要地位,在制导弹药等战术级应用中也有大量应用。据 2022 年 Yole 报告数据显示,基于环形激光陀螺的系统 2021 年收入市场份额为 13.02 亿美元^[2],在高端惯性导航系统中仍然占据主导地位。

国外关于激光陀螺技术的研究主要侧重于在分析相关影响因素的基础上探索针对性地优化激光陀螺的性能。2022 年,莫斯科物理技术学院的 Y. Broslavets 等人报告了其在非平面腔四频塞曼激光陀螺仪上的最新研究成果,提出了一种通过最优选择周界控制系统操作点来减少外部磁场影响的方法,并分析了影响进一步提高测量精度的可能性因素^[3]。莫斯科罗蒙诺索夫国立大学 G. Barant-

sev 等人提出了环形激光陀螺机械抖动装置的动态弹性扭转的数学模型,并分析了其对捷联惯性导航系统姿态确定精度的影响及其校准方法^[4]。谢尔普霍夫工厂的 E. Petrukhin 等人研究了衍射非互易性对激光陀螺的影响,其模型实验结果表明其采用的方法能够识别由衍射效应引起的变形幅度和激光陀螺零位漂移^[5]。

总体来看,国外激光陀螺技术已非常成熟,技术发展和产品升级的趋势明显变缓,但基于激光陀螺的惯导系统仍然是国外武器装备导航系统的重要选择之一。

2 光纤陀螺

光纤陀螺也基于 Sagnac 效应实现角速度的测量,具有全固态、低噪声、高平均无故障工作时间、快速启动及体积成本较低等特点,于 20 世纪 90 年代逐步进入工程应用,目前技术较为成熟,精度可达 $0.000\ 03\ (^{\circ})/h$ ^[1],在导航级和战略级应用中占据重要地位,在制导弹药等战术级应用中也有大量应用。据 2022 年 Yole 报告数据显示,基于光纤陀螺的系统 2021 年收入市场份额为 7.79 亿美元^[2],市场份额仅次于激光陀螺。

2022 年,国外光纤陀螺研究主要侧重于探索提升信噪比、灵敏度等综合性能以及开发小型化和芯片集成技术的光纤陀螺产品。

提升综合性能方面,美国罗切斯特大学的 M. Song 等人将其开发的弱值放大技术应用于集成光学陀螺,可实现在不增加环形谐振器尺寸的情况下提高其信噪比和灵敏度^[6]。日本东京工业大学的研究人员提出并通过实验证明了使用对超辐射发光二极管驱动电流的直接反馈来抑制调制频率及其三阶谐波下的相对强度噪声,可有效减小角度随机游走,采用长度 5 km、有效面积 280 m² 的光纤环圈,在 40 h 的测量时间内实现了 $15\ \mu(^{\circ})/h^{1/2}$ 的角度随机游走和 $33\ \mu(^{\circ})/h$ 的零偏不稳定性^[7]。法国泰雷兹公司报告了利用光纤组件减少谐振式光纤陀螺(RFOG)中残余幅度调制(RAM)的独创技术,证明了调制频率下的 RAM 峰值在光电二极管上可被完全抑制,并消除了 RAM 引起的锁定点的频率漂移和零偏^[8]。该团队还分析了基于光子带隙空芯光纤的 RFOG 环形腔的光传输损耗对波长的依赖性及其对 RFOG 性能的影响^[9]。

小型化光纤陀螺开发方面,法国 iXblue 公司报

告了 UmiX 惯性测量单元中的光纤陀螺小型化技术。干涉仪采用全新的直径 127 μm 的保偏老虎型光纤,以外径约 40 mm 的紧凑四极光纤环圈实现了 3.5 m² 的 Sagnac 面积(图 1),角度随机游走(ARW)为 $0.006\ (^{\circ})/h^{1/2}$,运行中零偏优于 $0.005\ (^{\circ})/h$,变温零偏残差为 $0.02\ (^{\circ})/h$,标度因数稳定性优于 40×10^{-6} ^[10],该公司还采用瑞利-光频域反射(R-OFDR)方法来表征光纤陀螺四极光纤环圈沿光纤的纵向应变分布,可有效地揭示光纤环圈复杂热机械行为^[11]。俄罗斯 Fizoptika 公司推出了 VG221 微型光纤陀螺,其动态范围为 $400\ (^{\circ})/s$,零偏稳定性为 $1\ (^{\circ})/h$,角度随机游走为 $0.05\ (^{\circ})/h^{1/2}$,直径 33 mm,质量 15 g,功耗 0.3 W,该公司还在其紧凑型单轴陀螺 VG221 和三轴陀螺 G181 基础上开发了小型三轴光纤陀螺 G121,其尺寸为 $52\ \text{mm} \times 58\ \text{mm} \times 37\ \text{mm}$,质量为 125 g,零偏稳定性为 $3\ (^{\circ})/h$,角随机游走为 $0.025\ (^{\circ})/h^{1/2}$ 。

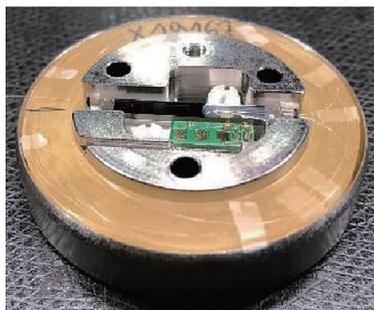


图 1 FOG40 干涉仪:Sagnac 面积 3.5 m² 的闭环光纤陀螺
Fig. 1 FOG40 interferometer: a closed loop FOG with 3.5 m² of Sagnac surface

在光纤陀螺惯性系统方面,国外主要厂商推出了一系列 SWaP(尺寸、质量和功耗)性能更优、结构更紧凑的惯性系统产品。2022 年,俄罗斯 Optolink 公司报道了其小型光纤陀螺惯性测量单元(IMU) IMU200 和 IMU400 的性能,其中,IMU200 的 SWaP 性能为 $75\ \text{mm} \times 75\ \text{mm} \times 60\ \text{mm}$ 、质量小于 0.5 kg、功耗小于等于 6 W,陀螺角度随机游走(ARW)为 $0.015\ (^{\circ})/h^{1/2}$,陀螺零偏不稳定性(BI)为 $0.02\ (^{\circ})/h$; IMU400 的 SWaP 性能为 $80\ \text{mm} \times 95\ \text{mm} \times 62\ \text{mm}$ 、质量小于 0.7 kg、功耗小于等于 7 W,陀螺 ARW 为 $0.007\ (^{\circ})/h^{1/2}$,陀螺 BI 为 $0.01\ (^{\circ})/h$ ^[12]。澳大利亚 Advanced Navigation 公司推出了新型数字光纤陀螺(DFOG)惯性导航系统(INS) Boreas D70,其尺寸($160\ \text{mm} \times 140\ \text{mm} \times 115.5\ \text{mm}$)、质量(2.5 kg)、功

耗(12 W)和成本相较其他导航系统降低了40%左右,可提供 $0.01 (^{\circ})/h$ 的零偏不稳定性, 0.01° 的滚转/俯仰精度和 0.1° 的航向精度。俄罗斯 Fizoptika 公司推出了微小型光纤陀螺惯性测量单元 U121D,其动态范围为 $400 (^{\circ})/s$ 、ARW 为 $0.05 (^{\circ})/h^{1/2}$ 、质量为160 g、功耗为1.5 W。美国 EMCORE 公司推出了 TAC-450 系列小型光纤陀螺惯性测量单元, TAC-450 系列采用光子集成芯片(PIC)技术,包括 TAC-450-360、-340 和-320 三型,其质量为0.7 kg,陀螺零偏稳定性为 $0.05 (^{\circ})/h$,ARW 为 $0.012 (^{\circ})/h^{1/2}$,可提供多种惯性级加速度计和磁力计选项。意大利 Civitanavi 系统公司和美国霍尼韦尔公司合作开发了 HG2802 高性能战术级光纤陀螺惯性测量单元,其动态范围为 $900 (^{\circ})/s$,在全温度范围内零偏重复性小于 $1 (^{\circ})/h$,零偏稳定性为 $0.05 (^{\circ})/h$,ARW 为 $0.05 (^{\circ})/h^{1/2}$ 。美国惯性实验室推出了 IMU-FI-200C 小型光纤陀螺惯性测量单元(图2),该系统经过全面校准、温度补偿,具有低噪声和高可靠性,其陀螺零偏重复性为 $0.5 (^{\circ})/h$ 、加速度计零偏重复性小于 $0.002g$,质量790 g,功耗5.5W。



图2 IMU-FI-200C 惯性测量单元

Fig. 2 IMU-FI-200C inertial measurement unit

在光纤陀螺应用方面,2022年6月,康斯伯格国防和航空航天公司已选择法国 iXblue 公司为新建的 U212CD 潜艇提供更强的导航能力,这些潜艇将用于挪威和德国海军。新款 U212CD 潜艇由蒂森克虏伯船舶系统公司(TKMS)建造,将配备 iXblue Marins M8 光纤陀螺惯性导航系统。

总体来看,国外光纤陀螺技术相对成熟,目前主要发展方向是进一步提升综合性能和小型化两个方面。同时,基于光纤陀螺的惯性导航系统应用领域在不断拓展,已开始无人系统、潜艇等领域

有所应用。

3 微机电陀螺

微机电陀螺主要基于科里奥利效应,采用石英或硅为敏感结构材料,利用微加工工艺技术,具有高可靠性、低 SWaP(体积、质量、功耗)、低成本及环境适应性好等特点,美国在20世纪90年代开始实现工程化应用,目前在战术级和工业级市场中得到了广泛应用,其性能正持续向导航级精度发展。据2022年 Yole 报告数据显示,基于 MEMS 陀螺的系统2021年收入市场份额为7.1亿美元^[2]。

2022年, MEMS 陀螺的相关研究主要是侧重于导航级高精度探索、降噪方法研究、制造工艺优化、敏感结构及系统设计等方面。

在面向导航级高精度探索方面,法国赛峰电子与防务公司介绍了其硅 MEMS 陀螺的设计和性能测试,采用轴对称双质量块和完全平衡的陀螺模式,具有量程 $1\ 000 (^{\circ})/s$,室温下零偏不稳定性 $0.007 (^{\circ})/h$,全温下零偏误差 $0.1 (^{\circ})/h$,标度因子误差小于 20×10^{-6} 的近导航级性能^[13]。法国航空航天实验室(ONERA)的研究人员开发了一种面向导航应用的新型轴对称石英 MEMS 陀螺仪 GYTRIX(图3),其角度随机游走达 $0.003 (^{\circ})/h^{1/2}$,零偏稳定性优于 $0.1 (^{\circ})/h$ ^[14]。米兰理工大学的 A. Buffoli 等人开发了一种基于压阻式纳米微机电传感(NEMS)的近导航级陀螺,其敏感结构面积仅 1.3 mm^2 ,噪声 $0.005 (^{\circ})/h^{1/2}$,零偏不稳定性 $0.015 (^{\circ})/h$ ^[15]。

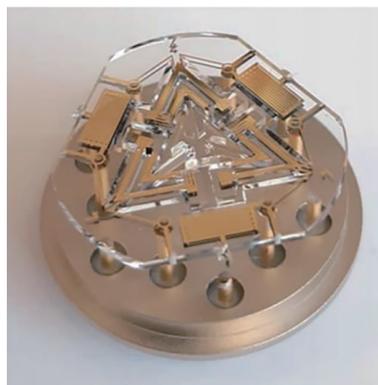


图3 GYTRIX 陀螺仪

Fig. 3 GYTRIX gyroscope

在降噪方法研究方面,伊朗谢里夫理工大学的 J. Abbasi 等人提出了一种采用自回归模型作为卡尔曼滤波器的过程环节对 MEMS 陀螺的长期误差(低频分量)进行降噪的方法,静态测试结果显示该

方法可使长期误差减少 50%^[16]。法国泰雷兹公司的研究人员分析了硅蚀刻缺陷对 MEMS 陀螺正交误差的影响,并提出在确定 MEMS 陀螺仪尺寸时应考量弯曲梁宽度变化以避免产生较高的正交误差^[17]。

在制造工艺优化方面,意法半导体公司开发了用于制造高性能惯性传感器的 ThELMA-Double 微机械加工技术平台,通过使用多个独立的厚外延多晶硅层制造结构和电气元件,可在不牺牲电气性能和机械鲁棒性的前提下缩小惯性传感器的尺寸^[18],同时采用 ThELMA-Double 工艺制造了首款 6 轴惯性测量单元原型,在电气性能和机械鲁棒性方面均有提升^[19]。美国加州大学欧文分校的 D. Vatanparvar 等人提出采用飞秒激光诱导化学蚀刻 (FLICE) 工艺来进行电容式 MEMS 谐振器的数字化制造,同时实现了宽高比高达 55 : 1 的通道和 0.6 M 量级的高品质因子,其研究表明 FLICE 工艺有可能成为传统等离子体刻蚀技术的替代方案,用以实现具有超高电容转导的高品质因子熔融石英 MEMS 谐振器^[20]。

在敏感结构及系统设计方面,日本东北大学的研究人员开发了一种具有独立调谐频率和品质因子能力的三质量谐振器 (TMR),其品质因子可调谐 19%,而谐振频率变化仅为 162×10^{-6} ^[21]。该研究团队还开发了一种采用 (100) 单晶硅制造的新型模式匹配多环盘谐振器,其频率失配仅为 0.14%^[22],并针对该多环谐振器提出了一种基于热弹性耗散的品质因子微调方法,可独立地调整两个正交模态的品质因子^[23]。剑桥大学的 M. Parajuli 等人设计了一种品质因子高达 100 万的四叶悬架系统硅 MEMS 陀螺 (图 4),在使用静电频率调谐实现模态匹配后测得的角度随机游走为 $0.01 (^{\circ})/h^{1/2}$ 、零偏不稳定性为 $0.34 (^{\circ})/h$ ^[24]。

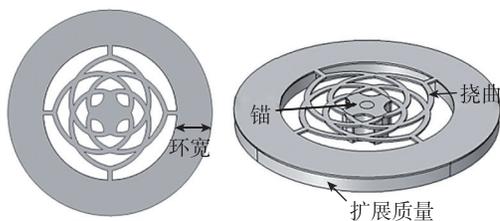


图 4 四叶悬架系统

Fig. 4 Quatrefoil suspension system

MEMS 陀螺惯性系统方面,国外主要厂商推出了一系列小型化、高精度惯性系统产品。2022 年,

法国 SBG Systems 公司推出了其首款战术级微型惯性测量单元 Pulse-40 (图 5),采用独特的冗余设计可在缩小器件尺寸的同时将性能水平推至最大。通过将该惯性测量单元与多波段 RTK GNSS 接收器相结合,SBG Systems 公司推出了 Quanta Plus 微型惯性导航系统,该产品外形尺寸 $50 \text{ mm} \times 37 \text{ mm} \times 23 \text{ mm}$,质量 38g,俯仰精度为 0.015° ,航向精度为 0.035° ,定位精度为 1 cm,即使在最恶劣的 GNSS 环境中也能获得可靠的位置和姿态。美国惯性实验室推出了战术级 MEMS 惯性测量单元 Kernel-210 和 Kernel-220,两者都是 IMU-P 战术单元的小型化版本,其陀螺零偏稳定性为 $1 (^{\circ})/h$ 、加速度计零偏稳定性为 0.005 mg 。意法半导体推出了高性能 6 轴 MEMS 惯性测量单元 LSM6DSV16X,实现了 $650 \mu\text{A}$ 下的低功耗运行和 $2.8 \text{ mdps}/\text{Hz}^{1/2}$ 的极低陀螺仪噪声水平^[25]。日本 TDK 公司推出了 InvenSense ICM-45xxx 系列 6 轴 MEMS 运动传感器,采用片上自校准和其首创的 BalancedGyro™ 技术,允许在芯片上进行灵敏度校准,使陀螺仪精度寿命提高 10 倍,并显著节省了工厂校准的工作量和成本。意大利 Civitanavi 系统公司推出了基于 GNSS 和 4 个 MEMS 惯性测量单元的高精度 MIMU-M 惯性导航系统,其飞行测试结果表明在 GNSS 辅助下姿态误差 (RMS) 小于 0.2° 、真实航向精度漂移为 $1 (^{\circ})/10 \text{ min}$ ^[26]。



图 5 Pulse-40 惯性测量单元

Fig. 5 Pulse-40 inertial measurement unit

MEMS 陀螺应用方面,2022 年 3 月,英国 Silicon Sensing 公司的 AMU30 MEMS 惯性测量单元被集成到五月花号自主船 (MAS) 为其跨大西洋航行提供海上通用导航能力。5 月,美国 EMCORE 公司获得一家主要国际武器系统制造商为精确制导弹药提供多个 SDI170 MEMS 惯性测量单元的初始合同。SDI170 将被整合到一个制导系统中,以提

高通用弹药的精度并将其转换为智能武器系统。5月,EMCORE公司获得一份价值约2 100万美元的10年期生产合同,为先进井筒测量设备提供定制MEMS陀螺。9月,澳大利亚Advanced Navigation公司的双天线GNSS辅助MEMS惯性导航系统Certus Evo被Dynetics公司选中用于其承研的无人机回收项目。Certus Evo可提供接近光纤陀螺的性能,结合MEMS传感器的可靠性,其滚动和俯仰精度为 0.03° ,航向精度为 0.05° ,定位精度为10 mm。10月,英国BAE系统公司在为瑞典国防物资管理局(FMV)升级CV90履带车辆车队的项目中,选择了Advanced Navigation公司的Motus惯性导航系统。该系统采用高精度的MEMS陀螺和加速度计,其陀螺零偏不稳定性为 $0.02^\circ/\text{h}$,滚动和俯仰精度为 0.05° ,航向精度为 0.8° 。

4 半球谐振陀螺

半球谐振陀螺是一种高性能的科里奥利振动陀螺,具有精度高、SWaP低、可靠性高、抗辐射、使用寿命长和环境适应性强等特点。目前,美国诺格和法国赛峰HRG技术水平领先,最高精度达到 $0.0001^\circ/\text{h}$ ^[27-28]。美国从20世纪90年代实现了高精度HRG的空间领域应用,俄罗斯在2000年后实现了导航级以上HRG的装备和空间应用,法国赛峰集团在2010年后实现技术和批生产能力突破,采用全角控制方式,以大量程、更低成本和SWaP,将HRG的应用领域大幅拓宽,开发了多种海、陆、空、天领域应用的惯导系统。据2022年Yole报告显示,基于半球谐振陀螺的系统2021年收入市场份额为1.72亿美元^[2]。

2022年国外半球谐振陀螺研究主要侧重于产品开发、微半球谐振陀螺设计制造和半球谐振陀螺性能优化。

在半球谐振陀螺产品开发方面,InnaLabs公司和欧洲航天局报告了其耐辐射的三轴科里奥利振动陀螺ARIETIS-NS的测试结果,其零偏不稳定性优于 $0.1^\circ/\text{h}$ 、角度随机游走优于 $0.005^\circ/\text{h}^{1/2}$ 、质量为1.2 kg、功耗小于7 W,已在太空中无故障地累计运行超过250万小时^[29]。

在微半球谐振陀螺设计制造方面,加州大学欧文分校的研究人员开发了一种采用三叠层晶片键合和高温微抛光工艺实现熔融石英双壳层结构的制造工艺,制造并演示了品质因数高达183万、振幅

衰减时间为120 s的熔融石英双壳谐振器原型^[30]。该团队还开发了一种集成于平面电极基板的熔融石英双壳陀螺(图6),该陀螺在 $n=2$ 和 $n=3$ 模态下分别实现了 0.03 和 $0.083^\circ/\text{h}^{1/2}$ 的角度随机游走以及 0.4 和 $0.75^\circ/\text{h}$ 的零偏不稳定性^[31]。

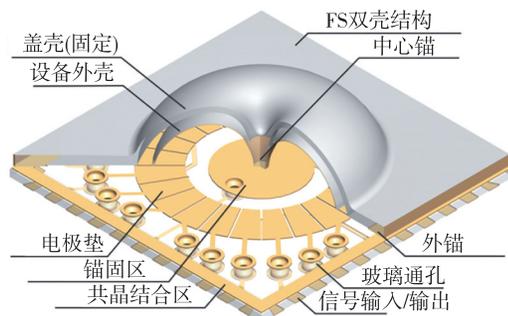


图6 熔融石英双壳陀螺示意图

Fig. 6 Schematics of a FS dual-shell gyroscope

在半球谐振陀螺性能优化方面,加州大学欧文分校的研究人员分析了金属化镀膜对熔融石英双壳微半球谐振陀螺性能的影响,确定了Cr膜的最佳厚度以实现最小的品质因数损失^[32]。该研究团队还分析了熔融石英双壳陀螺几何结构对能量损失的影响^[33]。萨拉托夫国立技术大学的R. Ermakov等人针对半球谐振陀螺建立了一个考虑各种外部干扰影响的误差模型,可评估振动对基于半球谐振陀螺的测量设备读数的影响^[34]。

在系统和应用方面,法国赛峰集团将HRG Crystal™半球谐振陀螺与导航级MEMS闭环加速度计配合,设计出紧凑的IMU,其尺寸 $6\text{ cm}\times 9\text{ cm}\times 9\text{ cm}$,质量430 g,功耗小于5 W。将该IMU安装在Geonix™惯性导航系统的底座上,进行了寻北、机载导航和陆地导航试验验证,实现了导航级性能,这将进一步提升赛峰导航级HRG惯性系统的SWaP-C优势^[35]。2022年6月,空中客车直升机公司已选择赛峰电子与防务公司为未来的H160M Guépard直升机配备SkyNaute超紧凑型惯性/GNSS组合导航系统(图7),该导航系统采用半球谐振陀螺HRG Crystal™,实现了超高可靠性和较好的SWaP(3 L/3 kg/20 W)。

5 量子惯性传感器

量子惯性传感器整体上还处于实验研究和初步工程化探索阶段。其中,作为自旋转子的核磁共振原子和瑟夫原子陀螺已经进入工程化探索阶段,



图 7 SkyNaute™ 惯性/GNSS 组合导航系统

Fig. 7 SkyNaute™ hybrid inertial/GNSS navigation system

而波动干涉型原子陀螺还处于原理实验研究阶段。但是,量子重力仪近年来发展迅速,目前正逐步走向商业化、实用化阶段。

在自旋型原子陀螺方面,2022 年,美国威斯康星大学研究了核磁共振陀螺的混合 PM-PDM 调制方法,获得 mHz 级的转动灵敏度。德国、波兰、美国多家单位合作研究了原子自旋陀螺的极化动力学,提出了一种补偿磁场闭环控制的新方法,通过该方法优化工作参数,系统与以前最好的联合磁强计相比具有相当的灵敏度,而惰性气体密度降低到 1/4,实现的陀螺灵敏度为 $0.5 \mu\text{rad s}^{-1}/\text{Hz}^{1/2}$,等效磁场灵敏度为 $2.5 \text{ fT}/\text{Hz}^{1/2}$ [36]。韩国防务发展局研制了原子自旋陀螺气室的制作系统,研究了气室制作工艺,测试了制作气室的 Xe 同位素横弛豫时间和信噪比,预期在 1Hz 重复率下实现陀螺角度随机游走 $0.062 (^{\circ})/\text{h}^{1/2}$ [37]。俄罗斯 Concern CSRI Elektropribor, JSC 研究中心对核磁共振陀螺的零偏补偿进行了实验研究,通过品质因子估算方法有效提升了陀螺精度[38]。该机构还研究了微小型核磁共振陀螺气室的设计和制作工艺,通过理论设计和实验验证以实现陀螺角度随机游走的最优化。

在冷原子干涉陀螺方面,2022 年,美国弗吉尼亚大学改进了基于玻色凝聚原子的双 Sagnac 干涉仪,其转动灵敏度的散粒噪声极限可达 $6 \times 10^{-7} \text{ rad/s}$ 。法国巴黎天文台等单位研制了高稳定双轴冷原子陀螺仪 SYRTE,其凭借 11 cm^2 的大物理面积和 800 ms 的长采集时间,灵敏度和稳定性达到 $3 \times 10^{-10} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ [39]。

在冷原子惯性导航系统方面,巴黎萨克雷大学的 J. Bernard 等人研制了机载应用的冷原子惯性测量单元,其方案是用单一的原子干涉传感器交替

测量三向加速度和三向旋转,每向量子测量都与经典惯性传感器结合互补,以提供高动态的精确连续测量[40]。

在冷原子重力仪方面,2022 年,伯明翰大学的 Ben Stray 等人研制了一款类似沙漏构造的冷原子重力梯度仪,实现统计不确定性 $20\text{E}(1\text{E}=10^{-9}/\text{s}^2)$,等效每个重力仪不确定性 1.4 ng ,性能与其他商用产品相比提高了 1.5~4 倍,在户外实验中以信噪比 8 成功检测出路面下约 0.5 m 的截面尺寸 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的隧道[41]。法国航空航天研究院和巴黎萨克雷大学的 A. Bonnin 等人研制了绝对冷原子海洋航空重力仪 GIRAFE,其稳定性和重复性在海上测量中达到几个 $0.1 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,在空中测量达到几个 $1 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ [42]。2022 年 5 月,法国 iXblue 公司推出了世界上第一台工业级紧凑便携式差分量子重力仪(DQG)(图 8),该 DQG 原型机具有优于 1 E (即 $10^{-9}/\text{s}^2$)的高分辨率,可同时测量重力加速度及其垂直梯度的绝对值。7 月,iXblue 公司与美国国家地质和火山研究所合作,使用量子重力仪对埃特纳火山引起的重力变化进行监测。该仪器可在其他技术无法使用的情况下,依旧提供高品质的监测数据。



图 8 iXblue 差分量子重力仪

Fig. 8 iXblue differential quantum gravimeter

6 加速度计

加速度计是与陀螺仪匹配的另一种核心惯性器件,当前工程应用的主要加速度计包括摆式积分陀螺加速度计、挠性摆式加速度计以及 MEMS 谐振式加速度计等。其中,目前战略级应用的是摆式积分陀螺加速度计;挠性摆式加速度计则是导航级和战术级应用的主流产品;MEMS 谐振式加速度计

包括石英振梁加速度计和硅谐振加速度计,是近年快速发展的热点技术,在工业级和战术级领域已广泛应用,其中石英振梁加速度计已实现导航级精度,未来有望进入导航级与战略级应用领域。

2022年,国外相关研究机构和厂商持续致力于提升加速度计综合性能,主要侧重于新型加速度计的研发、MEMS加速度计产品的研发、MEMS加速度计性能提升研究及应用领域的拓展等。

在新型加速度计开发方面,伊斯法罕大学的 M. Rahimi 等人开发了一种基于法布里-珀罗(FP)微腔的差分微光机电系统(MOEMS)加速度计,在 $\pm 1 g$ 范围内具有良好的线性响应,静态表征中的光学灵敏度和分辨率分别为 $6.52\text{nm}/g$ 和 $153\mu\text{g}$ ^[43]。Exail集团(前身为iXblue)发布了在iXAtom联合实验室开发的第一款三轴量子传感器,能够在3个维度、任何方向上连续跟踪并测量加速度。该传感器以传统传感器的速率(带宽1 kHz)提供连续信号,但借助基于量子测量提供的原位和实时校准使其精度提高了50倍($6\times 10^{-8}g$)^[44]。英国Teledyne e2v公司在两个低轨小卫星大气密度测量任务CASPA-ADM和Q-ACE的牵引下,正在研制紧凑型冷原子加速度计,其目标灵敏度为 $2.3\times 10^{-8}\text{m}/\text{s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ ^[45]。

在MEMS加速度计产品开发方面,美国霍尼韦尔公司推出了高性能、高可靠性的硅MEMS加速度计MV60,该传感器安装在1.085平方英寸(1平方英寸=645.16 mm²)的电路板上,质量6.5 g,功耗小于45 mW,可承受5 000g的冲击,并具有大于300 Hz的带宽,60g的量程,0.2~1mg的年零偏重复性和 $30\times 10^{-6}\sim 75\times 10^{-6}$ 的标度因子重复性。美国Silicon Designs公司推出了1527型系列战术级MEMS加速度计,其零偏重复性优于2 mg,质量0.68 g,功耗33 mW,特别适合于需要低功耗、低噪声、在大温度变化范围和辐射暴露环境下长期可靠运行的空间应用。在1527型MEMS加速度计芯片和专有电子器件集成基础上,Silicon Designs公司开发了2290型系列高精度单轴MEMS直流校准参考加速度计,具有超低噪声性能和惯性级稳定性,可用于在端到端校准和相关性能验证期间确定未知MEMS直流加速度计的灵敏度和频率响应特性。

在MEMS加速度计性能提升研究方面,美国EMCORE公司开发了一种新的温度校准方法可使其高精度石英MEMS加速度计获得高端导航级性能,该加速度计的常温零偏不稳定性为30ng,常规

校准后全温零偏为 $25\mu\text{g}$,在采用多谐振模态运行机制和自校准算法后全温零偏优于 $2\mu\text{g}$ ^[46]。法国泰雷兹公司为其导航级MEMS谐振加速度计开发和优化了低噪声混合信号专用集成电路(ASIC),使加速度计零偏不稳定性达到 $0.3\mu\text{g}$,噪声达到 $1\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$ 的白噪声水平^[47]。法国格勒诺布尔-阿尔卑斯大学的 T. Miani 等人通过采用增强晶圆级封装改善了其基于纳米谐振器的谐振加速度计性能,改进后的加速度计可在近1 kHz的大带宽范围内达到 $1.75\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$ 的噪声水平^[48]。日本东芝公司开发了一种带有T形电极的MEMS差分谐振加速度计,具有 $7.9\mu\text{g}$ 的零偏不稳定性和134 dB的高动态范围^[49]。英国剑桥大学的 G. Sobreviela-Falces 等人开发了一种导航级差分MEMS振梁加速度计,在10 s积分时间内的运行零偏不稳定性为 $0.123\mu\text{g}$,速度随机游走为 $0.7\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$ ^[50]。

在应用拓展方面,赛峰电子与防务公司报道了其基于硅MEMS加速度计的高端惯性导航的性能演示结果。赛峰子公司赛峰传感技术瑞士公司(原赛峰Colibrys)在2020年实现了导航级硅MEMS加速度计及批生产能力,零偏和标度因子分别达到 $30\mu\text{g}$ 和30 ppm。目前,该加速度计与HRG Crystal™半球谐振陀螺配合设计成新的惯性导航系统,并进行了试验验证,结果表明其与当前应用的挠性摆式速度计具有相同的导航性能^[35]。以色列物理逻辑公司推出了一种面向能源市场应用的耐高温闭环MEMS加速度计,在其MAXL-CL-3000系列MEMS芯片设计的基础上进行了改进,可在125~150℃的高温环境下保持低至 $500\mu\text{g}$ 的长期零偏重复性和 400×10^{-6} 的长期标度因数重复性。法国iXblue公司报告了对其小型导航级石英振梁加速度计在空间应用方面的改进,主要是侧重于针对电路的升级使其符合空间应用的需求^[51]。

7 组织机构的发展变化

2022年,各组织机构也在不断推进结构调整、融资与并购以加快技术发展和市场整合步伐,使其规模实力显著增强,发展质量显著提升。澳大利亚Advanced Navigation公司完成了B轮6 800万美元融资以加快推广其光纤陀螺技术和产品的应用。意大利Civitanavi公司在泛欧交易所以4 000万欧元IPO上市融资支持加快光纤陀螺业务发展。初创企业Zero Point Motion融资340万美元用以进

一步开发基于微谐振器环形技术的光子集成光纤陀螺。美国 EMCORE 公司以约 500 万美元的全现金交易方式完成了对 L3Harris 公司空间和导航业务的收购。此次收购使 EMCORE 公司在获得环形激光陀螺技术的同时,将光纤陀螺产品组合扩展到战略级应用,并进入太空市场。EMCORE 公司还收购了 KVH 公司的惯性导航业务,在获得光子芯片集成光纤陀螺技术的同时,拓展了陆军和各种地面应用客户群体,并在不断增长的工业自主市场中开辟了新机遇。法国 Groupe Gorgé 集团收购了法国导航公司 iXblue,并将其与此前收购的 ECA 集团合并到新的联合品牌 Exail 下运营,两者合并后将可为客户提供从组件到复杂系统的完整海军系统和子系统,并进一步扩大了市场覆盖范围和客户群体。法国赛峰集团完成对法国 Orolia 公司的正式收购,通过将 Orolia 的精确时间参考技术与其成熟的惯性导航解决方案结合在一起,将能够提供一套完整弹性 PNT 架构和设备,以满足航空、国防、太空和交通运输等领域的导航需求。同时,赛峰集团还将子公司 Colibrys(瑞士)和 Sensoror(挪威)合并为赛峰传感技术公司以整合其微传感器业务,进一步加强其在弹性 PNT 解决方案市场中的地位。

8 展望

惯性技术经过百余年的发展,已形成内涵丰富的技术体系,惯性技术在向更高性能水平突破,同时向低 SWaP-C 的方向发展,呈现出多层次竞争发展的态势,相关技术在取得进步和拓展市场的同时也在面临竞争与更新换代,新技术将不断发展并推动市场格局发生新的变化。

国外陀螺技术的发展趋势如图 9 所示^[2]。激光陀螺技术已经成熟,随着光纤陀螺和半球谐振陀螺技术的发展,其现有的市场主导地位将受到挑战;光纤陀螺技术相对较为成熟,仍在向进一步提高精度与小型化方向发展,同时拓展应用市场;半球谐振陀螺将持续发展并趋于成熟,拓展导航级和战略级应用市场,以明显的 SWaP-C 优势挑战传统技术;MEMS 陀螺在未来 10 年可能趋于成熟,性能也将进一步提高,在中低战术级市场应用占据主导,在高端战术级和导航级应用上也将开拓市场;光子集成技术和量子技术处于起步和快速发展阶段,从技术发展周期规律来看,可能要在 2030 年之后才能初步成熟和工程化应用。

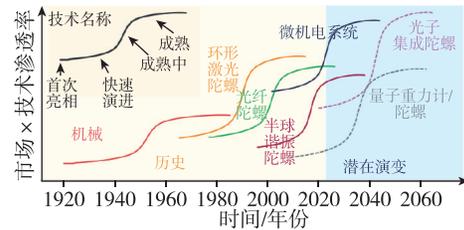


图 9 陀螺技术发展趋势

Fig. 9 Development trend of gyroscope technology

国外加速度计在军用和民用领域仍将朝着高精度和低 SWaP-C 方向发展。在民用领域,低成本的加速度计及惯性系统在制造业、新能源及交通等领域得到了广泛的应用;在军用领域,高性能仍将是研究机构和厂商致力发展的重点方向,MEMS 加速计性能稳步提升并有望拓展到导航级等更为广阔的应用领域;微光学加速度计、原子加速度计等新型加速度计的发展步伐正在加快,未来有望在更高精度的场景中得到应用。

国外惯性导航系统主要向着高性能、低成本和小型化方向发展,以分别满足战略武器的高精度需求、各类常规武器和平台的高动态与高可靠性需求、民用市场的低成本与高可靠性需求。基于军用领域对惯性导航系统的高可靠性的更高要求,国外正在积极探索以惯性导航系统为核心的多源融合导航技术,美国霍尼韦尔公司已于 2022 年 4 月成功验证了以视觉、天体和磁异常辅助惯性导航系统的高可靠性、高性能替代性导航解决方案,未来以惯性导航系统为核心的多源融合导航技术将有望实现更为快速的发展和更为广泛的应用。

参考文献

- [1] 沈玉芄,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 2022[R]. Yole Development, 2022.
- [3] BROSLAVETS Y Y, FOMICHEV A A, SEMENOV V G, et al. Four-frequency zeeman laser gyroscope with nonplanar symmetric resonator and its perimeter control system[C]//2022 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS),

- Saint Petersburg, Russian Federation, 2022, pp. 1-4, doi: 10.23919/ICINS51784. 2022.9815450.
- [4] BARANTSEV G O, KOZLOV A V, SHAIMARDANOV I K, et al. A model of the elastic dynamic torsion of a ring laser gyroscope mechanical dither and a method for its calibration[C]//2022 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2022, pp. 1-4, doi: 10.23919/ICINS51784. 2022.9815435.
- [5] PETRUKHIN E A, BESSONOV A S. Effect of diffraction nonreciprocity in a laser gyro[C]//2022 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2022, pp. 1-4, doi: 10.23919/ICINS51784. 2022.9815369.
- [6] SONG M. Integrated optical gyroscope with inverse weak value amplification[C]//2022 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, USA, 2022, pp. 1-2.
- [7] TAKEI N, MIRANDA M, MIYAZAWA Y, et al. Simultaneous suppression of thermal phase noise and relative intensity noise in a fiber-optic gyroscope[J]. IEEE Sensors Journal, vol. 23, no. 3, pp. 2249-2254, 1 Feb. 1, 2023, doi: 10.1109/JSEN.2022.3232087.
- [8] DESCAMPEAUX M, FEUNET G, BRETENAKER F. Original technique for residual amplitude modulation reduction in RFOG[C]//2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/INERTIAL53425. 2022.9787734.
- [9] DESCAMPEAUX M. Impact of photonic bandgap hollow-core fiber loss wavelength dependence on the performance of RFOG[C]//2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/INERTIAL53425. 2022.9787529.
- [10] FERRAND S. UmiX series: how to miniaturize FOG technology[C]//2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/INERTIAL53425. 2022.9787535.
- [11] BOIRON H. Rayleigh-OFDR strain distribution measurement of a self-standing fiber-gyroscope coil[C]//2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/INERTIAL53425. 2022.9787740.
- [12] KORKISHKO Y. Miniature inertial measurement units IMU200 and IMU400 based on FOG with MEMS-accelerometers: development and studying of characteristics[C]//2022 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2022, pp. 1-5, doi: 10.23919/ICINS51784. 2022.9815451
- [13] EMERARD J-D. Si-MEMS gyro by safran: to-towards the navigation grade[C]//2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/INERTIAL53425. 2022.9787731.
- [14] PERRIER T, TRAON O L, LEVY R, et al. Gytrix, a novel axisymmetric quartz MEMS gyroscope for navigation purpose[C]//2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/INERTIAL53425. 2022.9787719.
- [15] BUFFOLI A, GADOLA M, SANSA M, et al. Thermal characterization of scale-factor and zero-rate offset in near-navigation-grade nems-based gyroscopes[C]//2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS), Tokyo, Japan, 2022, pp. 762-765, doi: 10.1109/MEMS51670. 2022.9699625.
- [16] ABBASI J, HASHEMI M, ALASTY A. A memory-based filter for long-term error de-noising of MEMS-gyros[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 71, pp. 1-8, 2022, Art no. 7503308, doi: 10.1109/TIM.2022.3178964.
- [17] AZIER A, LEVERRIER B, KACEM N, et al. Investigating the effects of silicon etching imperfections on the quadrature error in MEMS gyroscopes[C]//2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/INERTIAL53425. 2022.9787765.
- [18] VERCESI F. Thelma-double: a new technology platform for manufacturing of high-performance MEMS inertial sensors[C]//2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS), Tokyo, Japan, 2022, pp. 778-781, doi: 10.1109/MEMS51670. 2022.9699437.
- [19] GATTERE G. High performance MEMS IMU with thelma-double technology[C]//2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/INERTIAL53425. 2022.9787756.
- [20] VATANPARVAR D, SHKEL A M. Digital manufacturing of resonance MEMS from a single-layer fused silica material[C]//2022 IEEE 35th International Con-

- ference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS), Tokyo, Japan, 2022, pp. 180-183, doi: 10.1109/MEMS51670.2022.9699685.
- [21] CHEN J, TSUKAMOTO T, TANAKA S. Triple mass resonator for electrostatic quality factor tuning [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 31, no. 2, pp. 194-203, April 2022, doi: 10.1109/JMEMS.2021.3138530.
- [22] WANG S, CHEN J, TSUKAMOTO T, et al. Mode-matched multi-ring disk resonator using (100) single crystal silicon [C]// 2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS), Tokyo, Japan, 2022, pp. 786-789, doi: 10.1109/MEMS51670.2022.9699445.
- [23] ABDELLI H, TSUKAMOTO T, KHAN M, et al. A novel quality factor trimming method for multi-ring MEMS resonators based on thermoelastic dissipation [C]//2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS), Tokyo, Japan, 2022, pp. 766-769, doi: 10.1109/ME-MS51670.2022.9699522.
- [24] PARAJULI M, SOBREVIELA G, SESHIA A A. Silicon MEMS gyroscope with quatrefoil suspension system achieving 1 million quality factor [C]//2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS), Tokyo, Japan, 2022, pp. 770-773, doi: 10.1109/MEMS-51670.2022.9699510.
- [25] VALZASINA C. A compact 6-axis IMU combining low-power operation with high stability and low noise [C]// 2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/INERTIAL53425.2022.9787744.
- [26] LUCIANI G, SENATORE R, PIZZARULLI A. MIMU-M-A high accuracy, miniature INS based on GNSS and multiple MEMS IMUs [C]//2022 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), Braunschweig, Germany, 2022, pp. 1-19, doi: 10.1109/ISS55898.2022.9926345.
- [27] DELHAYE F. HRG by SAFRAN: the game-changing technology [C]//2018 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Lake Como, Italy, 2018, pp. 1-4.
- [28] 薛连莉, 沈玉芃, 徐月. 2019 年国外惯性技术发展回顾 [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)
- [29] TORASSO A, DIRAM R, KOWALTSCHKE S. Design and test results of a rad tolerant space qualified CVG [C]//2022 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), Braunschweig, Germany, 2022, pp. 01-16, doi: 10.1109/ISS55898.2022.9926303.
- [30] ASADIAN M H, WANG D, SHKEL A M. Fused quartz dual-shell resonator gyroscope [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 533-545, Aug. 2022, doi: 10.1109/JMEMS.2022.3166213.
- [31] WANG D, ASADIAN M H, HII D, et al. Fused silica dual-shell gyroscope with in-plane actuation by out-of-plane electrodes realized using glassblowing and thru-glass-vias fabrication [C]//2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS), Tokyo, Japan, 2022, pp. 154-157, doi: 10.1109/MEMS51670.2022.9699792.
- [32] WANG D, ASADIAN M H, GUAN W, et al. Effect of metallization on quality factor and noise characteristics in fused silica dual-shell gyroscopes [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 31, no. 6, pp. 877-887, Dec. 2022, doi: 10.1109/JMEMS.2022.3199231.
- [33] GUAN W, WANG D, ASADIAN M H, et al. Effect of geometry on energy losses in fused silica dual-shell gyroscopes [C]// 2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/INERTIAL53425.2022.9787718.
- [34] ERMAKOV R V, L'VOV A A, KONDRATOV D V, et al. Vibrational error model update for a hemispherical resonator gyroscope [C]//2022 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2022, pp. 1-3, doi: 10.23919/ICINS51784.2022.9815386.
- [35] LENOBLE A, LAVIEVILLE P, FOLOPPE Y, et al. High-end inertial navigation demonstration based on MEMS accelerometers [C]//2022 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), Braunschweig, Germany, 2022, pp. 1-19, doi: 10.1109/ISS55898.2022.9926411.
- [36] EMMANUEL K. Polarization dynamics in a nuclear spin gyroscope [J]. arXiv. 2210.07687.
- [37] YIM S H, LEE D-Y, LEE S, et al. Experimental setup to fabricate Rb-Xe gas cells for atom spin gyroscopes [J]. *AIP Advances* 12, 015025, 2022.
- [38] CHALKOV V V, SHEVCHENKO A N. Experimental study of nuclear gyro bias compensation using the quality factor estimation [C]//2022 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1215, 2022, 012012.

- [39] GUESSOUM M, GAUTIER R, BOUTON Q, et al. High stability two axis cold-atom gyroscope[C]//2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-2.
- [40] BERNARD J. Progress towards the development of a cold-atom inertial measurement unit for onboard applications [C]//2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-4.
- [41] STRAY B, LAMB A, KAUSHIK A, et al. Quantum sensing for gravity cartography[J]. *Nature* 602, 590-594 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04315-3>
- [42] BONNIN A. Marine and airborne gravimetry with an absolute cold atom sensor[C]//2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/INERTIAL53425.2022.9787747.
- [43] RAHIMI M, MALEKMOHAMMAD M, TAGHAVI M, et al. Design and fabrication of a differential MOEMS accelerometer based on Fabry-Pérot micro-cavities[J]. *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 15, pp. 14779-14785, Aug. 1, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3184979.
- [44] SIMON T. Tracking the vector acceleration with a hybrid quantum accelerometer triad[J]. *Sci. Adv.* 8, eadd 3854, 2022.
- [45] TRIGATZIS M, KISS-TOTH M, MADDOX S, et al. Compact cold atom accelerometer payload for low-Earth orbit atmospheric drag measurement[C]//2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/INERTIAL53425.2022.9787698.
- [46] ZOTOV S, MOORE R, SHTIGLUZ S, et al. Quartz MEMS accelerometer for EMCORE inertial technology from tactical to high-end navigation[C]//2022 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), Braunschweig, Germany, 2022, pp. 1-20, doi: 10.1109/ISS55898.2022.9926393.
- [47] DEJAEGER R, LEFORT O, JEANNETEAU M, et al. A low-noise mixed signal ASIC for navigation-grade resonant MEMS accelerometer[C]//2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-3, doi: 10.1109/INERTIAL53425.2022.9787724.
- [48] MIANI T. Nanoresonator-based accelerometer with large bandwidth and improved bias stability[C]//2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/INERTIAL53425.2022.9787526.
- [49] MASUNISHI K. A T-shaped MEMS differential resonant accelerometer with module-base demonstration of > 134 db dynamic range and < 1 Mdeg absolute tilt angle precision[C]//2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS), Tokyo, Japan, 2022, pp. 150-153, doi: 10.1109/MEMS51670.2022.9699761.
- [50] SOBREVIELA-FALCES G. A navigation-grade MEMS vibrating beam accelerometer[C]//2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS), 2022, pp. 782-785, doi: 10.1109/MEMS51670.2022.9699447.
- [51] JOLLY O, KERRIEN T, FOSSET S, et al. Miniaturized navigation grade quartz vba accelerometer for space applications [C]//2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022, pp. 1-3, doi: 10.1109/INERTIAL-53425.2022.9787528.

(编辑:孟彬)