

从第五届惯性传感器与系统国际研讨会 看国外惯性技术的发展情况

薛连莉 葛悦涛 陈少春

摘 要 介绍了第五届惯性传感器与系统国际研讨会的概况。从论文发表数量和论文内容,探讨了国外惯性技术领域的一些研究进展和发展动向,并重点关注了国外 MEMS 惯性器件、高精度惯性器件等方面的研究进展。

关键词 惯性技术 陀螺仪 加速度计 谐振器

引 言

2018 年 3 月 26 ~ 29 日,第五届惯性传感器与系统国际研讨会在意大利科莫湖召开。此次会议是惯性技术领域的国际大会,国内外从事惯性技术的知名公司、院校均有参加并作相关报告,包括赛峰电子与防务公司、iXblue 集团、泰雷兹集团、Acti-dyn 公司、博世集团、诺格公司、Silicon Sensing 公司、General Photonics 公司、Civitanavi 系统公司、Acutronic 公司、Cielo 公司、Optolink 公司、Concern CSRI Elektropribor 公司等,斯坦福大学、加利福尼亚大学、密歇根大学、卡耐基·梅隆大学、纽卡斯尔大学、温莎大学、京都大学等。会议期间,部分公司还展示了相关导航产品及检测设备。本文通过对会议报告、论文情况进行梳理,得到国外惯性技术领域的一些新进展,以期为国内惯性技术领域的人员提供参考。

1 会议概况

2018 年 3 月 26 日的会议日程主要为专题报告,来自俄亥俄大学的 Michael B 教授、伯明翰大

学的 Kai B 教授和意法半导体公司的 Alessandro T 博士分别就传感器误差对惯性导航系统性能的长期影响、原子干涉惯性传感器的发展及对未来导航应用的影响、决定微机电(MEMS)惯性传感器精度的主要因素等进行了授课讲解。

2018 年 3 月 27 ~ 29 日的会议日程主要为特邀报告和论文交流,特邀报告包括大批量 MEMS 器件制造商如何满足不同市场的要求、作为天文导航和大地测量之间惯性联系的 Bohnenberger、赛峰电子与防务公司改变游戏规则半球谐振陀螺技术等,论文交流主要围绕惯性导航系统/导航系统和航姿参考系统、高精度谐振陀螺、MEMS 加速度计与惯性测量单元以及新兴应用等专题开展研讨,其中 MEMS 器件及其应用、原子磁力计在导航中的应用、各类谐振陀螺技术是会议交流重点。

本次会议集收录了 50 篇论文,其中国内论文 8 篇,国外论文 42 篇,分别为美国 15 篇,意大利 8 篇,法国 7 篇,德国 3 篇,俄罗斯和日本各 2 篇,英国、瑞士、加拿大、荷兰和新加坡各 1 篇,具体分布情况如图 1 所示。论文内容涉及校准与测试(3 篇),新兴应用(5 篇),MEMS 陀螺仪(12 篇),MEMS 加速度计(8 篇),高精度惯性器件(5 篇),谐振器(5 篇),设计、制造与工艺(12 篇),具体分布情况如图 2 所示。值得一提的是,本次会议有 8 篇国内论文发表,这说明我国惯性技术取得了一定的发展并且在国际惯性技术领域有一定影响。

本文 2018-06-17 收到,薛连莉、葛悦涛分别系北京海鹰科技情报研究所工程师、高级工程师

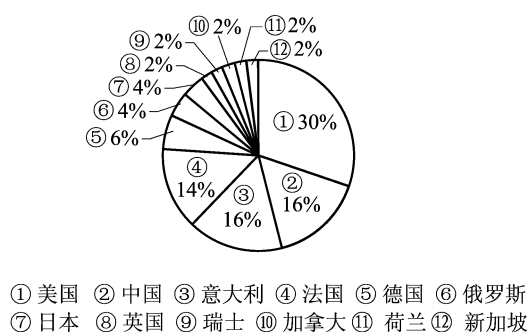


图1 不同国家论文分布情况

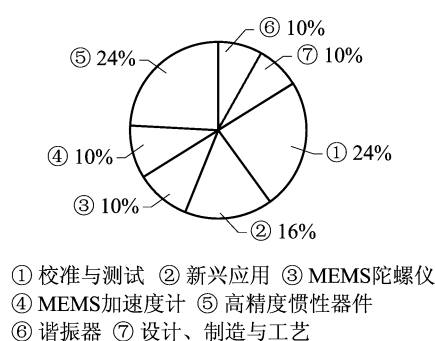


图2 不同主题论文分布情况

2 国外惯性技术发展情况

会议文集收录国外论文 42 篇, 占总量的 84%, 虽不能全面反映国外的发展水平, 但从中也能看出国外惯性技术的一些基本发展趋势和新进展。由图 1 可见, 美国为惯性技术研究最为活跃的区域, 入选论文数量达到 15 篇, 占总量的 30%, 其次是欧洲和亚洲国家。值得注意的是, 由于此次会议是在意大利召开, 考虑到地理因素, 虽然意大利被收录的文章达 8 篇, 却并不能准确代表其在惯性技术领域的发展水平。法国入选的文章数量为 7 篇, 占总量的 14%, 其中, 赛峰电子与防务公司的《HRG by SAFRAN: the game-changing technology》, 反响热烈。就研究内容而言, 主要集中于 MEMS 惯性器件、高精度惯性器件、谐振器、制造与工艺、新兴应用等方面, 具体情况如下。

2.1 MEMS 惯性器件

此次会议 MEMS 惯性器件方面的文章占总量的 40% 以上, 从文章数量看, MEMS 惯性技术是近年来的研究热点问题, 会议涉及的 MEMS 惯性器件
飞航导弹 2018 年第 9 期

包含 MEMS 陀螺仪、加速度计及磁强计等, 现主要介绍 MEMS 陀螺仪和加速度计的研究进展。

1) MEMS 陀螺仪

MEMS 陀螺技术重点关注模型设计与优化、平台设计、基础工艺、误差标定补偿以及新应用等方向。

模型设计方面, 美国 Coherent 传感器公司的 David H 提出了一种低成本 DSP 方法, 该方法能解耦速率和正交伺服系统, 并能够在 MEMS 陀螺仪中使用高环路增益, 实现了噪声的大幅降低和对参数变化的敏感性。德国博世集团的 Martin P 等人针对具有非线性驱动运动的 MEMS 传感器, 提出了一种降阶模型仿真方法。加拿大温莎大学的研究人员提出了一种分析模型来预测掺杂硅 MEMS 谐振器的温度灵敏度; 弗莱堡大学的研究人员重点探讨了电容式 MEMS 陀螺仪的谐振频率控制和数字校正问题。日本东北大学的研究人员将独立控制的 CW/CCW 振荡用于虚拟旋转 MEMS 全角陀螺仪, 成功解决了角度锁定问题。

平台设计方面, 美国密歇根大学的 Donguk M Y 等人针对陀螺仪易受温度、应力等环境因素的影响, 引入了机械隔离平台, 从而最大限度地减少应力影响和热损失。日本日立公司研发集团研究人员探索了可重构 IC + FPGA 平台中 MEMS 陀螺仪的自适应馈通消除问题。

基础工艺方面, 意大利米兰理工学院的 Izadi M 等人在 MEMS 陀螺仪中建立起了梁的各向异性弹性综合模型, 重点研究轴向非垂直蚀刻的影响。意法半导体公司的 Gattere G 等人对 MEMS 深反应离子刻蚀的刻蚀尺寸损失进行了实验研究。加拿大 Teledyne DALSA 公司的 Francois D 等人介绍了一种 200 mm 晶圆高性能惯性传感器的制造工艺, 适用于工业、航空航天、海军和国防市场。

误差标定补偿方面, 日本京都大学的 Yunyi S 等人提出一种在模式匹配振动环陀螺仪 (VRG) 中进行非均匀径向宽度设计的方法, 以补偿 (100) 单晶硅 (SCS) 面内杨氏模量的各向异性。

新应用方面, 美国亚诺德半导体公司采用基于战术级 MEMS 陀螺仪 (零偏稳定性为 $1 (^{\circ})/s$) 的惯性测量单元 (IMU) 对自动驾驶汽车进行导航, 试验

表明使用 MEMS IMU 进行陆地车辆导航的系统可达到类似于民用 GPS 的精度,当汽车以 40 km/h 的速度匀速行驶时,10 min 内的位置误差为 30 m。这对于 MEMS IMU 而言,既是机遇,又是挑战。

MEMS 惯性传感器由于具有体积小、成本低、环境适应性强、易于大批量生产和产业化等优点,目前已广泛用于军用以及民用领域。需求的增长推动着技术的发展,随着 MEMS 技术的不断发展,未来极有可能占领中低精度军用和民用市场。

2) MEMS 加速度计

在 MEMS 加速度计研究方面,美国密歇根大学的 Yemin T 等人介绍了一种新的具有高检测分辨率和低噪声的数字式加速度计阵列的实现和初步表征;斯坦福大学的 Kirsten E K 等人针对加速度计在环境温度下的灵敏度会发生很大变化的情况,提出了一种有源补偿方案,用一对对称热敏电阻的共模电阻连续监测环境条件,并补偿温度波动,可以减轻环境温度波动对器件性能的影响。意法半导体公司的 Alessandro T 等人提出了一种能够调制从 DC 到 AC 频率加速度的 MEMS 几何调制加速度计。在此方案中,可移动质量块的几何形状通过静电致动转换成操作,从而调节惯性矩并因此调制惯性力。意大利米兰理工学院的 Cristiano R M 等人提出了一种可进行时间切换、具有单谐振器和低偏移漂移 z 轴的 FM MEMS 加速度计;Maspero F 等人对 MEMS 加速度计的偏移漂移特征进行了组合电子和算法的开发。伦敦城市大学的研究人员设计了基于 MEMS 加速度传感器的自动零基线校正电路,而大大减少了累积误差。由此可见,MEMS 加速度计的研究主要集中于加速度计设计、优化与误差补偿等方面。

2.2 高精度惯性器件

此次会议报道的高精度惯性器件主要包括光纤陀螺、半球谐振陀螺和原子惯性器件。

1) 光纤陀螺

早在 2017 年 9 月德国导航学会举办的惯性传感器与系统会议上,俄罗斯 Optolink 公司已宣布推出高精度光纤陀螺 SRS-5000。Optolink 公司表示其对 SRS-5000 的五台样机进行了全面的测量和评估,测得的角度随机游走优于 $69 \mu^\circ/\text{h}^{1/2}$,零偏稳定性优于 $8 \times 10^{-5} (^\circ)/\text{h}$ 。而在此次会议上,

Optolink 公司进一步公布其研究进展,表明该公司目前正组装并测量基于 SRS-5000 的惯性测量单元 (IMU-5000) 和捷联惯性导航系统 (SINS-5000),测量结果显示,在超过七天的静态测试时间里,位置漂移约为 10 nm。

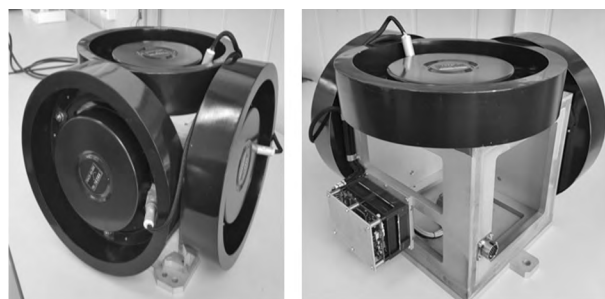


图3 高精度惯性测量单元 IMU-5000

此外,意大利 Civitanavi 系统公司表示,采用 2-3-4 欧拉角定向表示法,其已开发出基于光纤陀螺的惯性导航系统,以用于卫星着陆期间的导航与稳定。由此可见,国际光纤陀螺的精度不断提高,应用领域也越来越广泛。

2) 半球谐振陀螺

此次会议,赛峰电子与防务公司的市场部总监 Fabrice D 作了题为《HRG by SAFRAN: the game-changing technology》的报告,报告介绍了赛峰电子与防务公司在 HRG 方面的研究成果和应用情况,通过展示基于 HRG 的产品在不同场合的应用,表明该公司 HRG 已经能够达到光学技术产品的性能,且具有更小的尺寸和质量、更低的功耗以及更高的可靠性。测试结果显示,赛峰电子与防务公司的 HRG 在 2 000 h 内的零偏稳定性优于 $0.0001 (^\circ)/\text{h}$ 。报告最后还指出 HRG 不仅是一种创新的陀螺技术,更是一项颠覆性的技术,未来可能重构陀螺仪技术的蓝图。报告内容反响热烈,此后,诺格公司、Innalab 公司相继在美国导航学会举办的定位与导航系统 (PLANS) 会议、俄罗斯举办的圣彼得堡组合导航系统国际会议中报道其 HRG 研究进展,在惯性技术领域引起了一股 HRG 技术的研究热潮。

总的来说,赛峰电子防务公司的半球谐振陀螺

飞航导弹 2018 年第 9 期

能重建陀螺技术的蓝图这一说法虽然有待探究,但随着 HRG 结构简化、成本降低,可以预计,未来 HRG 所占市场份额将逐渐增加。



图4 赛峰电子与防务公司的 HRG

3) 原子惯性器件

原子惯性传感器主要包含原子陀螺仪、加速度和磁力计,其中原子陀螺仪又可以分为基于原子干涉的冷原子陀螺和基于原子自旋的核磁共振陀螺。此次会议上,诺格公司报道了其在核磁共振陀螺仪和原子磁力计方面的研究进展。

在题为《Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope: Developing a Primary Rotation Sensor》的一文中指出,当前核磁共振陀螺仪的物理封装设计包含了许多新的组件和材料,这些组件和材料却也存在新的问题与挑战,如使用磁屏蔽层内的铁氧体内层只能部分消除陀螺仪中显著的场梯度,仍会有明显的残余场梯度,将氦自旋相干寿命限制在 1 s 内或更短时间。此时可实现的陀螺仪角度随机游走和零偏稳定性将显著降低。诺格公司采用了一种新的热消磁方法解

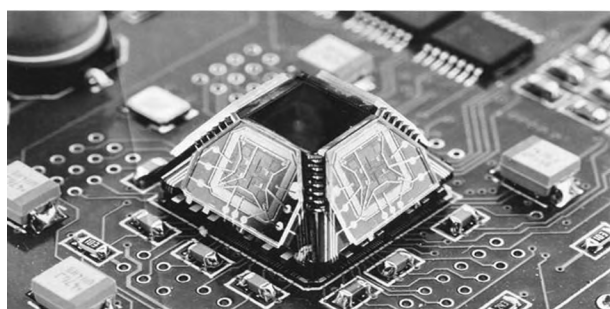


图5 诺格公司的核磁共振陀螺仪

决了这个问题,用热消磁铁氧体屏蔽层构建的第一个单元场梯度旋转寿命比场消磁铁氧体屏蔽元件构建的长 100 ~ 1 000 倍。

该公司还透露其在原子磁力计方面的研究进展,在题为《Compact Atomic Magnetometer for Global Navigation》的文章中称,其正开发一种基于原子的磁力计技术,该技术可提供不依赖于 GPS 的全球定位能力。通过使用单个敏感元件,消除了使用物理方法分离传感元件时遇到的许多问题。尽管现场测试结果暴露了两个破坏性能的设计缺陷,但目前均已解决。总的来说,在原子惯性传感器方面,讨论的主题已经由介绍原理、方案和误差分配走向了对关键技术及核心部件的分析、设计与实现方法上。

2.3 谐振器设计

谐振器作为惯性传感器的主要组成部分,是实现高精度惯性传感器的关键,美国、俄罗斯、日本等国都对其进行了研究。在美国国防预先研究计划局(DARPA)精确鲁棒惯性制导弹药先进微惯性传感器(PRIGM: AIMS)项目的支持下,密歇根大学的 Behrouz S 等人提出了一种基于改进微喷技术的精密壳集成(PSI)陀螺仪的设计和制造方法,PSI 谐振器设计成可实现低频 $n = 2$ 酒杯模式和高寄生模式频率,以提高抗冲击和振动能力。俄罗斯莫斯科大学的研究人员使用低成本石英谐振器制造中低精度科里奥利振动陀螺仪(CVG),所提出的技术可以在不进行精密加工的基础上通过市售熔融石英管制成低成本谐振器,尽管品质因数远低于精密石英半球谐振器,但大大超过了金属圆柱形谐振器。新型谐振器的优点使其能够显著提高基于中低精度 CVG 惯导系统的精度,而不会增加其成本。此外,美国

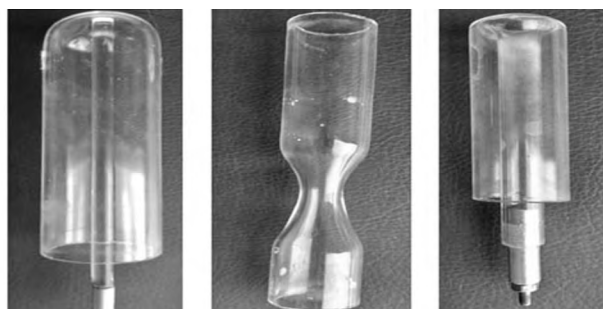


图6 各种管状谐振器

斯坦福大学的 Dongsuk D 等人研究了硅的横向扩散掺杂对 MEMS 谐振器温度补偿的影响; 卡内基·梅隆大学的 Ashraf M 等人研究了谐振腔设计对声表面波陀螺 (SAWG) 噪声性能的影响。

3 结束语

作为惯性技术领域的国际大会, 第五届惯性传感器与系统国际研讨会总体还是能反映国际惯性技术的发展情况。此次会议有 40% 以上的论文是关于 MEMS 惯性传感器, 这说明 MEMS 技术研究已成为惯性传感器领域不可忽略的重要组成部分。一方面, 人工智能、自主导航等新兴技术给 MEMS 惯性传感器的发展带来了机遇, 另一方面, 却让 MEMS 惯性传感器面临着更多的挑战。高性能惯性传感器方面, 光纤陀螺、半球谐振陀螺和原子惯性器件均取得了一些新进展, 而半球谐振陀螺技术的研究, 或许能成为未来高端惯性技术市场中陀螺技术产品分布的关键。

参考文献

- [1] Donguk M Y , Khalil N . A micro thermal and stress isolation platform for inertial sensors. The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [2] Michael L , Michael B . Compact atomic magnetometer for global navigation (NAV-CAM) . The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [3] Lgor P , Brock B , Carey M , et al . Towards self-navigating cars using MEMS IMU: challenges and opportunities. The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [4] Michael L , Dennis B , James P , et al . Nuclear magnetic resonance gyroscope (NMRG) . The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [5] Stephane M , Francois D , Jeffrey D . 200mm high performance inertial sensor manufacturing process. The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [6] Kirsten K , Martin W , Camille E . Active temperature compensation of thermal accelerometer for improved stability. The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [7] Sina A , Mohammad H A , Andrei S . High quality factor MEMS gyroscope with whole angle mode of operation. The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [8] Bernard V , Damien P , Mehdi B . A control strategy for controls and centrifugal effects reduction in an inertial system test equipment. The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [9] Fabrice D . HRG by SAFRAN: the game-changing technology. The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [10] Thomas P , Raphaël L , Patrick K , et al . Modeling of a vibrating MEMS magnetometer partially covered with a ferromagnetic thin film. The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [11] Daniele G , Roberto S , Enrico Q . FOG based INS for satellite launcher application. The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [12] Cristiano Marra , Filippo F , Giacomo L . Single resonator , time-switched , low offset drift Z-axis FM MEMS accelerometer. The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [13] Francesco R , Gabriele G , Lorenzo C , et al . Experimental investigation of MEMS DRIE etching dimensional loss. The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [14] Jörg F W . The machine of bohnenger: inertial link between astronomy , navigation and geodesy. The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [15] Mikhail B , Boris L , Evgeniy C . Quartz cylindrical resonators for mid-accuracy Coriolis vibratory gyroscopes. The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [16] Yuri K , Vyacheslav F , Viktor P . High-precision inertial measurement unit IMU-5000. The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [17] Takashiro T , Shuji T . Virtually rotated MEMS whole angle gyroscope using independently controlled CW/CCW oscillations. The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018
- [18] Payman R , Matthew S , Jiewen L . Modeling of temperature frequency-compensation of doped silicon MEMS resonator. The 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems ,2018