

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.04.06

MEMS 惯性传感器现状与发展趋势

卞玉民¹, 胡英杰², 李博¹, 徐淑静¹, 杨拥军¹

(1. 中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051;

2. 河北美泰电子科技有限公司, 河北 石家庄 050299)

摘要: 自上世纪 90 年代以来, 针对 MEMS 惯性器件的研究越来越多, MEMS 惯性传感器开始得到广泛的商业应用。本文对部分 MEMS 惯性传感器国内外的新近研究成果进行了分类与归纳, 分别对 MEMS 加速度计、MEMS 陀螺仪和微惯性测量组合以及惯性微系统进行了研究与分析。对 MEMS 惯性传感器发展趋势进行了初步推断, 认为未来 MEMS 惯性传感器的发展主要有四个方向: 高精度, 以满足日益精细化、智能化的应用需求; 微型化, 以实现便携、分布式应用要求; 高集成度, 以完成多种功能高密度组合; 适应性强, 以适应复杂应用环境, 拓宽应用范围。

关键词: MEMS; 惯性; 传感器; 现状; 趋势

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)04-0050-07

Research Status and Development Trend of MEMS Inertial Sensor

BIAN Yumin¹, HU Yingjie², LI Bo¹, XU Shujing¹, YANG Yongjun¹

(1. The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang 050051, China; 2. MT Microsystems Co., Ltd, Shijiazhuang 050299, China)

Abstract: Since the 1990s, the study of MEMS inertial device has become more and more popular, and MEMS inertial sensors have begun to get a wide range of business applications. In this paper, some recent research results of MEMS inertial sensors at home and abroad are classified and summarized, The MEMS accelerometer sensor, MEMS gyroscope, MIMU (Micro Inertial Measurement Unit) and inertial microsystem are reviewed and analysed respectively. The development trend of MEMS inertial sensor is preliminarily inferred and it is concluded that the future development of MEMS inertial device mainly has four directions; high precision to meet the application requirements of higher precision and intelligent technology; miniaturization for portable equipment installation; high integration to achieve a multiple functional integration; high adaptability to adapt to complex environment and broaden the scope of application.

Key words: MEMS; inertia; sensor; status; trend

0 引言

MEMS(Micro-electromechanical Systems), 简称“微机电系统”, 一般被认为是由微型机械传感器、执行机构和微电子电路组成的微型系统。由于微电子技术是一项发达的技术, MEMS 的研究和开发主要集中在微型机械传感器和执行器的研究和开发^[1]。MEMS 器件和微加工技术具有三个特点, 即小型化(Miniaturization)、微电子集成(Microelectronics integration)及高精度的批量制造(Mass fabrication with precision), 简称为 3M^[2]。随着人类社会的消费升级, MEMS 技术迎来的爆发式增长, 各种类型的 MEMS 传感器也被广泛地应用于航空航天、石油化工、船舶汽车、生活家居以及医疗健康等领域。

惯性传感器是对物理运动做出反应的器件, 如线

性位移或角度旋转, 并将这种反应转换成电信号, 通过电子电路进行放大和处理。加速度计和陀螺仪是最常见的 MEMS 惯性传感器^[3]。加速度计是敏感轴向加速度并转换成可用输出信号的传感器; 陀螺仪是能够敏感运动体相对于惯性空间的运动角速度的传感器。三个 MEMS 加速度计和三个 MEMS 陀螺仪组合形成可以敏感载体 3 个方向的线加速度和 3 个方向的加速度的微惯性测量组合(Micro Inertial Measurement Unit, MIMU)^[4], 惯性微系统利用三维异构集成技术, 将 MEMS 加速度计、陀螺仪、压力传感器、磁传感器和信号处理电路等功能零件集成在硅芯片内, 并内置算法, 实现芯片级制导、导航、定位等功能。

MEMS 惯性传感器的研究成果对于物体的制导、导航, 各类型交通工具的自动驾驶以及各种智能穿戴设备的应用具有重要意义, 本文针对 MEMS 惯性传感

器进行了研究现状的综述和发展趋势的分析,旨在为 MEMS 惯性传感器的未来发展提供参考。

1 MEMS 加速度计

MEMS 加速度计是 MEMS 领域最早开始研究的传感器之一。经过多年的发展, MEMS 加速度计的设计和加工技术已经日趋成熟。根据敏感机理不同, MEMS 加速度计可以分为压阻式、热流式、谐振式和电容式等。压阻式 MEMS 加速度计^[5]容易受到压阻材料影响,温度效应严重、灵敏度低,横向灵敏度大,精度不高。热流式加速度计^[6]受传热介质本身的特性限制,器件频率响应慢、线性度差、容易受外界温度影响。因此,热流式和压阻式加速度计主要用于对精度要求不高的民用领域或军事领域中的高 g 值测量。谐振式微加速度计^[7]理论上可以达到导航级的精度,但目前技术状态还达不到实用化。而电容式硅微加速度计^[8]由于精度较高、技术成熟、且环境适应性强,是目前技术最为成熟、应用最为广泛的 MEMS 加速度计。随着 MEMS 加工能力提升和 ASIC 电路检测能力提高,电容式 MEMS 加速度计的精度也在不断提升。

国外众多研究机构和惯性器件厂商都开展了 MEMS 加速度计技术研究,如美国的 Draper 实验室、Michigan 大学、加州大学 berkley 分校、瑞士 Neuchatel 大学、美国 Northrop Grumman Litton 公司、Honeywell 公司、ADI, Silicon Designs, Silicon Sensing, Endeveco 公司、瑞士的 Colibrys 公司、英国的 BAE 公司等。其中,以 Draper 实验室为代表的研究机构和大学的主要工作在于提升 MEMS 加速度计的技术指标。能够提供实用化 MEMS 加速度计产品的主要厂家有 ADI, Silicon Designs, Silicon Sensing, Endeveco 和瑞士的 Colibrys 公司。

目前,硅微加速度计的主要发展趋势是高精度、集成化和小型化,大部分采用集成化封装,并在此基础上不断朝着高精度、数字化和高可靠性的方向发展。这主要得益于 MEMS 加工工艺的快速发展和数字 ASIC 电路检测能力的不断提升。MEMS 敏感结构采用硅硅键合,敏感结构厚度不断增加,ASIC 采用数字化电路,不仅检测能力提高,还可以在后续环路中增加各种补偿环节,有利于提高 MEMS 加速度计的性能。

在惯性测量应用中,通常需要测量空间三个方向的加速度信号。为了保证 MEMS 加速度计的精度,大多采用三个单轴 MEMS 加速度计立体组装的形式来实现三个方向的加速度信号测量。随着测量设备进一步

朝着微型化方向发展,对三轴 MEMS 加速度计的集成度提出了更高的要求,采用三个单轴 MEMS 加速度计测量三个方向加速度信号的方案已经不能满足设备小型化的要求。目前已经有众多公司开展了三轴单片集成 MEMS 加速度计的研究,但主要集中在低精度领域,研制的三轴 MEMS 加速度计产品主要用于振动、冲击测量、手机、游戏等工业和消费领域,不能满足高端装备在精度方面的要求。

将三个单轴高精度加速度计组装实现三个方向的加速度信号测量,该方案的优点是三个方向精度高,对单轴加速度计的敏感方向没有要求,并且三个方向的敏感结构可以采用完全相同的工艺加工,因此一致性好、对微机电敏感结构的加工工艺要求不高,可以采用任何一种工艺路线;缺点是体积和功耗大,对组装精度要求高,否则会导致各轴之间的交叉耦合系数很大,影响三轴加速度计的整体精度。典型产品包括 Crossbow 公司的 TG 和 GP 系列、Silicon Design 公司的 2470 和 2476 系列等,如图 1、图 2 所示。Crossbow 公司的 TG 系列和 GP 系列三轴 MEMS 加速度传感器量程从 $\pm 2 g$ 到 $\pm 10 g$,噪声 $20 \mu g/\sqrt{Hz}$,交叉耦合 1%。



图1 Crossbow三轴加速度传感器



图2 Silicon Design三轴加速度传感器

三轴组装的另一种途径是将采用不同加工工艺且敏感方向不同的三个单轴 MEMS 加速度计在平面内组装到一起,用于敏感三个方向的加速度信号。和前一种组装方案相比,该方法显著降低了组装的复杂性,但由于不同敏感方向的加速度计通常采用不同的工作原理和加工工艺,各轴之间的一致性很难保证,所以通常不被高精度三轴 MEMS 加速度计所采用。

对于单片集成三轴 MEMS 加速度计,实现途径主要有两种:一种方案是采用一个敏感质量来敏感三个方向的加速度信号。该方案的优点是芯片体积小;缺点是各轴之间的交叉耦合大、器件精度较低。主要用于振动、冲击和倾角测量等工业领域。另一种方案是

将三个分立结构制作在一个芯片上,三个芯片在工作中是相互独立的,分别用于敏感 X 向、 Y 向和 Z 向的加速度信号,相当于三个单轴加速度计。该方案的优点是三个轴向之间的交叉耦合小;缺点是三个结构制作在一个芯片上,芯片体积偏大,若减小芯片体积则会导致每个敏感结构的尺寸都很小,导致加速度计整体精度较低。这种方法制作出三轴加速度计产品尺寸非常小,可以达到 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,但技术指标很低,分辨力超过 10 mg ,主要用于消费领域,如手机、玩具、无人机等。

目前,产量较大的是性能较差的 MEMS 加速度计,开发低成本、低噪音、长期稳定性好、低温度灵敏度的高精度加速度计仍然是一个挑战。其难点之一是开发低应力、低漂移的高精度封装技术;另一个主要难点是接口电路,其中需要高灵敏度、低噪声和大动态范围的低漂移读出/控制电路。

2 MEMS 陀螺仪

自 20 世纪 80 年代以来,对角速率敏感的 MEMS 陀螺仪受到越来越多的关注。根据性能指标, MEMS 陀螺仪可分为速率级、战术级和惯性级^[3]。速率级陀螺仪可用于消费类电子产品、手机、数码相机、游戏机和无线鼠标;战术级陀螺仪适用于工业控制、智能汽车、火车、汽船等领域;惯性级陀螺仪可用于卫星、航空航天导航、制导和控制。

根据不完全统计,研究 MEMS 陀螺仪的机构如下:斯坦福大学、密歇根大学、加州大学伯克利分校、欧文、洛杉矶、中东技术大学、弗莱堡大学、南安普敦大学、首尔国立大学、根特大学、清华大学、北京大学、东南大学、上海交通大学、浙江大学、博世, ST, InvenSense, NXP, ADI, TI 等。目前,对 MEMS 陀螺仪的研究主要集中在以下几个方面:①新材料、新制备技术和新工艺^[9];②ASIC 单片集成电路^[10];③高真空度封装^[11];④新的结构和工作原理^[12];⑤模式匹配控制,噪声抑制和耦合信号抑制^[13];⑥驱动模式的闭环控制^[14];⑦自校准和温度补偿^[15];⑧可靠性测试、失效分析和可靠性设计^[16]。

MEMS 陀螺主要有线振动型陀螺和谐振环型陀螺,前者工艺简单,利于大批量、低成本生产;后者具有更高的理论精度但结构及原理更为复杂^[17]。

线振动型 MEMS 陀螺采用了两个机械结构:一个构件谐振并耦合能量到第二个构件,同时对第二个构件的运动进行测量。尽管该方法能满足很多场合的要

求,但要达到导航级的要求还须进一步提高其性能。

环形结构,由于采用高度对称的设计,所以能方便地考虑轴间耦合,而且对于干扰振动不敏感,因此陀螺仪的敏感度得到有效提高^[18]。

环形 MEMS 陀螺谐振子经历了单环环形、实心盘和多环环形的发展过程,测控电路经历了角速率开环模式、力平衡模式和全角模式的发展过程,加工工艺经历了 SOG 到 SOI 的发展过程,其输出性能逐步提高。

加州大学欧文分校 A. M. Shkel 团队利用多环环形谐振子锚点设计灵活、电极摆放自由的优势,设计了锚点在外、电极在内的多环环形陀螺,工作在 3θ 模态下, Q 值达到 10 万以上。角度随机游走为 $0.047\text{ (}^\circ\text{)}/\sqrt{\text{h}}$,短期零偏不稳定性为 $0.65\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$ 。

斯坦福 Thomas W. Kenny 团队也利用多环环形陀螺电极摆放自由的优势,将电极安置在环与环之间,其优势在于相比于外环安置电极方法电极数量有成倍的增长。随着电极数量的增多,驱动电容量与检测电容量也随之增大,只需较低电压便可完成驱动与控制,同时也可提高检测灵敏度。在模态匹配工作模式下,标度为 $1.37\text{ mV}/\text{(}^\circ\text{)}\cdot\text{s}^{-1}$,角度随机游走为 $0.29\text{ (}^\circ\text{)}/\sqrt{\text{h}}$ 。为提升多环环形陀螺性能,此团队还采用了许多方法。例如为了提升谐振子的品质因数,降低振型位移的误差,在多环环形谐振子表面覆盖了薄薄的一层氧化物,使得谐振子的表面粗糙度降低了 10 倍,提升了谐振子几何参数的均匀性,品质因数提升了 30%,艾伦方差零偏不稳定性为 $1.43\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$,角度随机游走为 $0.18\text{ (}^\circ\text{)}/\sqrt{\text{h}}$ 。

2008 年,喷气推进实验室(JPL)联合伯克利大学采用自动增益控制(AGC)驱动闭环和力平衡检测闭环方案,在 FPGA 平台上实现了对多环环形 MEMS 陀螺的控制。该方案可对环路中的 FIR 滤波器以及环路增益进行配置,以适应不同结构参数的陀螺和陀螺老化带来的参数变化问题,相对于模拟电路,更加灵活,零偏稳定性达到 $0.25\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$ 。

2014 年,波音公司报道了一种包含驱动闭环、力平衡检测闭环与环境干扰补偿的多环环形 MEMS 陀螺。该陀螺利用半实物仿真工具实现了原型样机的快速设计。陀螺谐振子的直径为 8 mm ,品质因数为 $50000 \sim 100000$,采用误差建模和补偿技术实现了 $0.01\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$ 的艾伦方差零偏不稳定性, $0.0023\text{ (}^\circ\text{)}/\sqrt{\text{h}}$ 的角度随机游走以及 $0.04\text{ (}^\circ\text{)}/\text{h}$ 的上电重复性,为当时报道过的 MEMS 陀螺的最高性能。

Sensoror 公司的三轴陀螺仪 STIM210, 陀螺量程为 ± 400 ($^{\circ}$)/s, 全温零偏误差为 10 ($^{\circ}$)/h, 角度随机游走为 0.15 ($^{\circ}$)/ \sqrt{h} , 如图 3 所示。另外, 国外的 VTI, ST 和 Invensense 等公司研制了三轴单芯片集成的 MEMS 陀螺产品, 如图 4 所示。这些产品的误差多集中在零偏稳定性几十到几百度每小时以内, 线性度 0.1% 以上, 多用于手机、体感控制等消费类电子领域。



图3 Sensoror公司的三轴MEMS陀螺

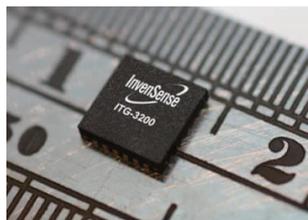


图4 Invensense公司的三轴MEMS陀螺

2018 年, 在意大利召开的第五届惯性传感器与系统国际研讨会上, 发布了很多关于 MEMS 加速度计和 MEMS 陀螺的最新进展, 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^[19]。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, 也使其面临着更多的挑战。

3 微惯性测量组合

微惯性测量组合 (MIMU) 是基于 MEMS 技术的新颖惯性测量器件, 用来测量物体的三轴角速度和三轴加速度信息, 是实现微小型无人机、交通工具等导航制导的核心部件。

从 20 世纪 90 年代开始, 美国军事部门就很重视 MEMS 惯性器件在武器制导领域的应用与发展。

DARPA 资助了一系列旨在演示验证 MEMS 惯性器件应用于制导弹药 (如炮弹、火箭弹等) 领域的相关计划, 研制的 MEMS 惯性制导系统体积不断减小、精度和集成度不断提升。目前, 国外微惯性测量组合 MIMU 的实现途径主要有两种, 其中一种是将三个单轴加速度传感器和三个单轴陀螺仪通过立体组装到一起分别实现三个方向加速度信号和角速度信号的测量。主要的厂家包括美国 Honeywell 公司、美国 UTC 公司、挪威的 Sensoror 公司等, 都研制出了微惯性测量组合产品, 并且在无人机、航空制导炸弹、精确制导导弹等为代表的战术武器中得到了工程验证和应用。

美国 Honeywell 公司在获得了 Draper 实验室振动陀

螺和扭摆式加速度传感器的技术授权的基础上, 制定了围绕 MEMS 惯性传感器展开小型化和超小型化 IMU 的发展计划, 主要应用于武器系统制导中。其较成熟的产品包括精度较高的 HG1900 型 MEMS 惯性测量组合产品和 HG1930 抗高过载 MEMS 惯性测量组合产品, 如图 5 所示。其中 HG1930 由三个 MEMS 加速度传感器和三个 MEMS 陀螺仪组装。三个加速度传感器和三个陀螺仪均为单轴模块, 和电源模块与信号处理模块共同完成六轴测量。陀螺的量程最大可达 7200 ($^{\circ}$)/h, 零偏重复性 20 ($^{\circ}$)/h, 加速度传感器最大量程达到 85 g, 零偏重复性 5 mg, 整个系统功耗小于 3 W。



(a) 外观图

(b) 内部结构图

图5 Honeywell 公司 HG1900 型 MIMU

UTC 公司的微惯性测量组合惯性系统 SiIMU02 如图 6 所示。系统中的集成式硅 MEMS 陀螺零偏不稳定性 6.5 ($^{\circ}$)/h, 角度随机游走 0.5 ($^{\circ}$)/ \sqrt{h} , 该产品已经广泛应用于各类制导炮弹、制导火箭弹中。



图6 UTC 公司 SiIMU02 型 MIMU

微惯性测量组合的另一个实现途径是将多个 MEMS 敏感结构制作在一个芯片上, MEMS 芯片和 ASIC 电路芯片通过引线键合连接达到六轴测量的目的, 实现了更高的集成度和更小的体积。该方案可以把六轴敏感芯片和 ASIC 芯片共同封装在一个陶瓷管壳内, 形成的 MIMU 和目前单轴惯性器件体积相当。主要的生产厂家包括 ST, BOSCH, INVENSENSE, MAXIM 等。ST 公司研制的 LSM330 惯性模块能够同时测量

三个方向的加速度信号和三个方向的角速度信号,如图 7 所示,角速度测量通道最大量程为 ± 2000 ($^{\circ}$)/s,噪声为 3.8 ($^{\circ}$) \cdot s $^{-1}$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$,加速度测量通道最大量程为 ± 16 g,噪声为 90 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$,整个器件尺寸仅为 2.5 mm \times 3 mm \times 0.83 mm。



图 7 ST 公司 LSM330 型 MIMU

和立体组装方案相比,敏感结构单片集成方案在体积、功耗等方面具有突出优势,但目前采用该方法研制的 MIMU 普遍精度比较低,多用于消费和工业领域。

目前,国内研制的微型惯性测量单元,主要技术路线还是采用三个单轴加速度计和三个陀螺仪立体组装方式集成,虽然产品指标能够满足一些现有领域的使用要求,但还存在体积偏大、安装精度差、成本较高等问题。开展敏感结构六轴单片集成 MIMU 的研究,解决现有微型惯性测量单元存在问题,在保持现有单轴惯性器件测量精度的前提下,提高六轴 MIMU 的集成度,减小体积,将更大程度地拓展微惯性 MIMU 的应用领域,极大地提高我国导航制导系统的技术水平。

总之, MIMU 正朝着高精度、小体积、集成化、实用化、高可靠的方向发展,在系统中的应用也越来越普遍。对成本和体积敏感的应用领域,势必取代体积大、成本高的传统惯性测量单元。

4 惯性微系统

惯性微系统是利用 3D 异构集成技术,将 MEMS 陀螺、微加速度计、压力传感器、磁传感器和信号处理电路等在硅基片上进行集成^[20],并内置导航定位算法,实现芯片级精确制导、导航、定位等功能,同时能够与卫星导航共同组成组合导航系统,是装备制导、导航和定位的核心部件。

美国国防部在 20 世纪 90 年代末率先提出了采用异质异构集成技术,将微电子器件、光电子器件和 MEMS 器件整合集成在一起,开发集成微系统的新概

念。它的核心是按装备功能发展的需要,多种先进元器件通过异质异构集成技术,以三维集成的结构形式设计、制造具有复杂功能的芯片级规格的微小型电子系统。集成微系统的探测能力、带宽、速度将比现有系统提高 100 倍以上;同时,它的结构进一步小型化和低功耗化,预期它的体积、重量和功耗都将比目前的系统下降 2 ~ 3 个数量级,这将极大地提高系统的机动性和隐蔽性。微系统技术将是 21 世纪各种先进装备系统的核心。美国权威专家评价这是一项引发新一轮革命性装备变革的重大创举。

微系统技术是实现各类微型系统的基础和支撑,是“赋予未来能力”的核心技术,具有微型化、数字化、智能化、多功能、高可靠、多信息融合等特点;通过采用微系统制造和集成技术,将不同材质和不同功能的芯片立体集成融合,将“电子学、光子学、MEMS、架构、算法”五大技术与“传感 + 处理 + 通信 + 执行 + 能源”五大功能融为一体。使系统功能倍增的同时,大幅度降低体积重量,以满足未来装备对于功能集成度和智能化、轻量化的迫切需求。

美国国防部将微系统技术列为六大军用关键技术之一,在上世纪 90 年代就专门设立微系统技术办公室 (Microsystems Technology Office, MTO) 负责实施微系统的发展研究。美国政府以 DARPA MTO 牵头组织的微系统技术发展资本每年约 6 亿美元左右,带动了约 20 亿美元商业资本的投入,建立支撑微系统技术的工业能力体系。

共性关键技术方面,美国利用硅集成电路和 MEMS 的强有力技术基础,建立了支撑微系统产品发展的技术平台。功能单元集成方面,正在通过发展 IC 工艺、三维 SIP 封装、圆片级三维封装、芯片级 SIC 封装、异质集成等技术,将深亚微米晶体管、微米级传感器、执行器等集成在同一芯片上,研制芯片级多功能集成单元,以发展全谱信号获取、信息处理、通讯、信令执行等智能化的芯片。

DARPA 在 2010 年 1 月启动了“定位、导航和授时微系统技术” (Micro-PNT) 项目的研发工作,如图 8 所示,该研究旨在利用微系统技术实现微型惯性导航系统。

该项目提出的芯片级复合原子导航仪体积不大于 20 cm 3 ,功耗不超过 1 W。项目完成后惯性导航系统的体积比目前减小 4 个数量级,重量降低 2 个数量级,角速度精度提高 2 个量级,加速度精度提高 1 个多数量级,如图 9 所示。

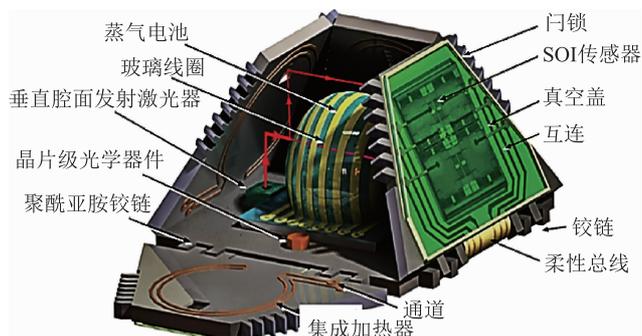


图8 美国 MICRO-PNT 微系统结构图

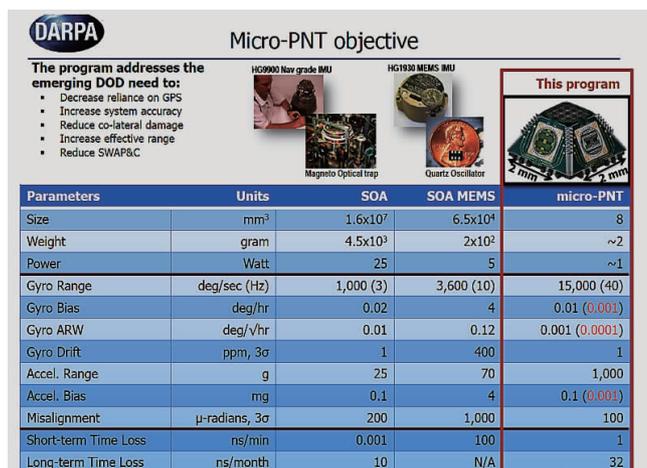


图9 美国 Micro-PNT 微系统研究目标

MICRO-PNT 项目的研究成果可以应用于多种未来作战环境中，包括从单兵导航到无人机、无人潜航器和导弹的导航、指引和控制(NGC)。通过 MICRO-PNT 的研究，美军希望提升惯性传感器的动态应用范围，降低时钟和惯性传感器的长期漂移，开发可以提供位置、方向和时间信息的超小系统。微尺度上的集成技术是 MICRO-PNT 的重要研究内容，为了实现 MICRO-PNT 系统的集成化和微型化，就必须采用微系统集成与互联工艺。

惯性微系统集成与互联工艺主要涉及硅通孔(Through Silicon Via, TSV)技术、晶圆级封装(Wafer Level Packaging, WLP)技术和无源集成器件(Integrated Passive Devices, IPD)技术。

TSV 技术是针对多层芯片层间互联要求，制备 TSV 通孔并实现金属化，获得的金属化通孔可实现层间信号的低损耗传输。通过制备金属化 TSV 通孔以实现结构层信号连接输出，采用 3D 垂直集成技术，可获得高集成度，提升性能。由于 TSV 技术能够使芯片在三维方向堆叠的密度最大、芯片间互联线最短、外形

尺寸最小，并且大大改善芯片速度和低功耗的性能，成为目前电子封装技术中最引人注目的一种技术。

WLP 技术：直接在晶圆上进行器件的封装和测试，切割后，实现具备完整功能的芯片单元，且无需额外的塑料封装和陶瓷封装外壳。采用 WLP 技术可以有效显效芯片尺寸，节约芯片封装成本；满足系统对微型化传感器、电路单元的迫切需求。

IPD 技术：在硅基片上进行惯性微系统所需的电阻、电容、电感等无源元件的集成，减少分立元件，具有小型化和提高系统性能的优势。无论是减小整个产品的尺寸与重量，还是在现有的产品体积内增加功能，集成无源元件技术都能发挥很大的作用。

5 结论

综上所述，未来 MEMS 惯性传感器的发展主要有四个方向：

1) 高精度

导航、自动驾驶和个人穿戴设备等对惯性传感器的精度需求逐渐提高，精细化测量需求和智能化的发展也对传感器的精度提出了越来越高的要求。

2) 微型化

器件的微型化可以实现设备便携性，满足分布式应用要求。微型化是未来智能传感设备的发展趋势，是实现万物互联的基础。

3) 高集成度

无论是惯性测量单元还是惯性微系统都是为了提高器件的集成度，进而实现在更小的体积内具备更多的测量功能，满足装备小体积、低功耗、多功能的需求。

4) 适应性强

随着 MEMS 惯性传感器的应用范围越来越广泛，工作环境也会越来越复杂，例如：高温、高压、大惯量和高冲击等，适应复杂环境能够进一步拓宽 MEMS 惯性传感器的应用范围。

参 考 文 献

[1] Bao M. Chapter 1 - Introduction to MEMS Devices[J]. Analysis & Design Principles of MemS Devices, 2005: 1 - 32.

[2] ChangLiu. 微机电系统基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

[3] Yazdi N, Ayazi F, Najafi K. Micromachined Inertial Sensors[J]. Proceedings of IEEE, 1998, 86(8): 1640 - 1659.

[4] Ayazi F. Multi-dof Inertial MEMS: From Gaming to Dead Reckoning[C]// Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference. IEEE, 2011: 2805 - 2808.

[5] Liu Y, Zhao Y, Tian B, et al. Analysis and Design for

- Piezoresistive Accelerometer Geometry Considering Sensitivity, Resonant Frequency and Cross-axis Sensitivity[J]. *Microsystem Technologies*, 2014, 20(3): 463–470.
- [6] Garraud A, Giani A, Combette P, et al. A Dual Axis CMOS Micromachined Convective Thermal Accelerometer[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2011, 170(1): 44–50.
- [7] Trusov A A, Zotov S A, Simon B R, et al. Silicon Accelerometer with Differential Frequency Modulation and Continuous Self-calibration [C]// IEEE. International Conference on MICRO Electro Mechanical Systems. IEEE, 2013: 29–32.
- [8] Xiao D B, Li Q S, Hou Z Q, et al. A Novel Sandwich Differential Capacitive Accelerometer with Symmetrical Double-sided Serpentine Beam-mass Structure[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2016, 26(2): 025005.
- [9] Peng S, Tavassoli V, Mayberry C L, et al. A 3D-HARPSS Polysilicon Microhemispherical Shell Resonating Gyroscope: Design, Fabrication, and Characterization[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(9): 4974–4985.
- [10] Rombach S, Maurer M, Manoli Y. Continuous-time Lowpass and Bandpass $\Delta\Sigma$ - modulators for Closed-loop Readout Circuits of Capacitive MEMS Gyroscopes[C]// Inertial Sensors and Systems Symposium. IEEE, 2015: 1–18.
- [11] Senkal D, Askari S, Ahamed M J, et al. 100 K Q-factor Toroidal Ring Gyroscope Implemented in Wafer-level Epitaxial Silicon Encapsulation Process [C]// IEEE International Conference on MICRO Electro Mechanical Systems. IEEE 2014: 24–27.
- [12] Askari S, Asadian M H, Kakavand K, et al. Vacuum Sealed and Getter Activated MEMS Quad Mass Gyroscope Demonstrating Better than 1.2 Million Quality Factor[C]// IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. IEEE, 2016: 142–143.
- [13] Flader I B, Ahn C H, Ng E J, et al. Stochastic Method for Disk Resonating Gyroscope Mode Matching and Quadrature Nulling[C]// IEEE International Conference on MICRO Electro Mechanical Systems. IEEE, 2016: 998–1001.
- [14] Yang C, Li H. Digital Control System for the MEMS Tuning Fork Gyroscope Based on Synchronous Integral Demodulator [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(10): 5755–5764.
- [15] Aktakka E E, Najafi K. A Six-axis Micro Platform for in Situ Calibration of MEMS Inertial Sensors[C]// IEEE International Conference on MICRO Electro Mechanical Systems. IEEE, 2016: 243–246.
- [16] Li J, Broas M, Makkonen J, et al. Shock Impact Reliability and Failure Analysis of a Three-axis MEMS Gyroscope[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2014, 23(2): 347–355.
- [17] 齐广峰, 吕军锋. MEMS 惯性技术的发展及应用[J]. *电子设计工程*, 2015(1): 87–89.
- [18] 刘危, 解旭辉, 李圣怡. 微机械惯性传感器的技术现状及展望[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(5): 425–431.
- [19] 薛连莉, 葛悦涛, 陈少春. 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[J]. *飞航导弹*, 2018(9): 1–6.
- [20] 夏艳. 3D 集成的发展现状与趋势[J]. *中国集成电路*, 2011, 20(7): 23–28.

作者简介



卞玉民(1973–), 男, 高级工程师, 中国电子科技集团公司第十三研究所 MEMS 产品室科研项目主管。2002 年毕业于南京理工大学测试计量技术及仪器专业, 获得工学硕士学位, 同年到中国电子科技集团公司第十三研究所从事 MEMS 器件技术和产品开发工作至今。主持承担了 10 余项国家“973”、“863”、重大科学仪器专项、国家重点研发计划项目、型谱和基金等课题, 获得国防科学技术进步二等奖 1 次, 部级科技技术奖 2 次。发表学术论文 20 余篇。