

文章编号 1004-924X(2002)02-0154-06

微惯性测量组合关键技术与应用

解旭辉, 刘 危, 张明亮, 李圣怡

(国防科技大学 机电工程与自动化学院机电工程研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要: 简要回顾微惯性测量组合技术的发展和應用, 结合目前我国的发展水平和技术条件, 从应用的角度特别是军事应用方面分析了微惯性测量组合在应用过程中需要解决的主要问题和关键技术。文章最后指出了发展我国微惯性组合技术的道路是在有限的资金内以选定应用对象和应用环境为基础, 走应用与研制相结合的道路以应用促研制。

关键词: 微机械陀螺; 微机械加速度计; 微惯性测量组合

中图分类号: TH166 **文献标识码:** A

1 引言

在惯性仪表系统中, 惯性敏感器件——陀螺仪和加速度计是其重要的组成部分同时也是制约仪表小型化和微型化的瓶颈, 长期以来人们一致在探寻使其小型化的途径和方法。20世纪80年代后期以来, 继微米/纳米技术成功地应用于大规模集成电路的制作后, 人们便开始采用微电子机械加工技术制造各种微型传感器和微机电系统(MEMS), 微机械惯性敏感器就是其中之一, 它是集微型精密机械、微电子、半导体集成电路工艺等新技术于一身的前沿新技术。它的出现使惯性技术产生一次新的飞跃。微惯性敏感器件由于其在单晶硅、石英晶体、铌酸锂等电光材料芯片上应用光刻、腐蚀、沉积、离子注入、键合等微机械加工技术批量生产, 因此具有体积小、重量轻、成本低、功耗小和可靠性高、易于实现数字化和智能化等特点。微机械惯性敏感器的研制把基于旋转和非旋转的惯性敏感器从宏观概念向微观世界推进了一大步, 近年来, 特别是微电子加工技术与振动惯性技术的有机结合使惯性仪表技术发生了重大的变革, 因而大大拓展惯性技术在军用和民用领域中的应用。

2 微惯性测量组合的关键技术

微惯性测量组合的关键技术主要归结为两个

方面: 一方面是微惯性敏感器——微机械陀螺和加速度计; 另一方面是微惯性测量组合技术, 包括系统的结构、信号采集处理电路、组合测量解算算法以及系统的温度控制与补偿等均对系统的性能起着重要的影响。

2.1 微惯性器件——微机械陀螺和加速度计

从斯坦福大学于1977年首先采用微加工技术制造出第一个开环硅加速度计和美国Draper实验室在上个世纪80年代中叶首先基于振动陀螺的原理提出微机械陀螺的概念以来, 微惯性敏感器件已取得了巨大的进展。

目前, 微机械陀螺的实现方案可归结为框架式、音叉式、振动轮式、振动棒式、振动环式和四叶式等几种方案, 其中以基于音叉式方案为基础的微机械陀螺发展最为成熟和流行并已形成系列产品^[1]。微机械音叉式陀螺一般采用图1所示^[2]的单晶硅平板梳状结构, 它由一组挠性折叠梁支承在梳状驱动器的交变静电作用下在平面内作反向音叉式振动。当在该平面内, 沿与质量块振动方向相垂直的轴上有角速度输入时, 在哥氏力的作用下质量块做上下振动, 其振幅与角速度大小成正比。质量块下方的电容电极敏感这种振动并通过反馈回路施加静电力使其保持平衡位置。反馈电压经信号处理后获得与角速度成正比的电压。

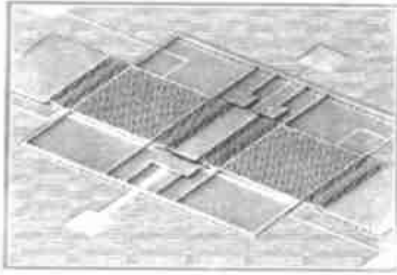


图 1 陀螺的机械调谐

Fig. 1 Micromechanical tuning fork gyro.

目前,音叉式微机械陀螺经过热补偿后,其漂移速率稳定在 $10 \sim 100 \text{deg/h}$ 。热补偿条件下,漂移数据接近 1deg/h 陀螺已有样品,未来期望的性能指标是达到 0.1deg/h 。在同一块芯片上集成有三个微机械陀螺并配有相应的电子电路的三轴微陀螺组合已形成产品^[2]。

微机械加速度计结构分为平面扭摆式和共振式两种。平面扭摆式微机械加速度传感器采用电容电极敏感加速度并通过反馈回路施加静电力使扭摆保持平衡位置,反馈电压经信号处理后获得与加速度成正比的电压。图 2 所示为 Draper 实验室研制的一种采用力再平衡的扭摆式微机械加速度计的结构图。其性能指标在补偿后达到 $100 \mu\text{g}$ 的偏差和 100ppm 的标定误差^[2]。目前有望达到更高精度的扭摆式微机械加速度计已有样品。

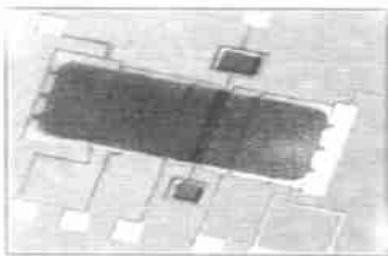


图 2 再平衡扭摆式微机械加速度计

Fig. 2 Micromechanical pendulous rebalance accelerometer.

共振式加速度计(也称振动梁式加速度计)结构如图 3 所示,其有一试验质量块,该质量块一个对应边上各支承着一个振动的柔性弯曲绞链。在质量块没有受到加速度负载作用时,两个绞链均以 10 到数百赫兹的频率振动,当质量块受到加速度负载时,其一个绞链拉紧,而另一个则被压缩从

而使其相应的振动频率一个增加另一个减小。两个绞链的频差的变化与质量块所受的加速度负载成正比。与扭摆式微机械加速度计相比,虽然共振式加速度计采用的开环方式使其在加速度负载的作用下无需用再平衡方式保持质量块在中心位置而使制造相对简单,但其精度更加依赖于器件的材料特性和器件的标定系数的稳定性。目前,基于石英晶体的共振加速度计的偏差已优于 $100 \mu\text{g}$ ^[2]。



图 3 石英共振加速度计

Fig. 3 Quartz resonator accelerometer.

国内对微机电陀螺和微机电加速度计研究起步于九十年代初期,主要研究机构有清华大学、信息产业部 13 所、北京大学、东南大学、上海冶金所等多家单位,并各自在微机电陀螺和微机电加速度计方面取得了较大进展。目前,在微机械陀螺上还有许多技术难点正在突破。微机械加速度计的精度已达到 1mg 的水平。在真空包装下陀螺的精度已达 10^{-9}h ,预计在未来几年有望突破在正常条件下陀螺精度达到 10^{-9}h 。

虽然微机械陀螺和加速度计经过了近 20 年和 30 年的发展,它们的精度和稳定性已取得了较大的进步,但从其精度和稳定性来看在未来相当一段时间内它们主要应用场合将集中在中、低档场合。在军事上的应用将主要集中于战术级应用,如图 4 所示^[2]。就其主要的原因是长期以来人们研究的微机械惯性敏感器件主要是基于振动原理,虽然从原理上讲其比较容易实现,但要提高精度确很困难。分析其主要原因可归结为三个方面:一是微机械惯性敏感器件的制造精度难以提高,特别是高深宽比刻蚀一般采用湿法进行,容易发生侧向侵蚀从而降低了加工精度;影响器件精度提不高的另一个原因是器件的测量信号容易受到干扰;第三个原因是由于目前对微机械器件的各种物理特性在微观状态下的表现尚缺乏足够的

研究,因而影响了器件的数学建模从而影响器件的精度补偿的有效性。

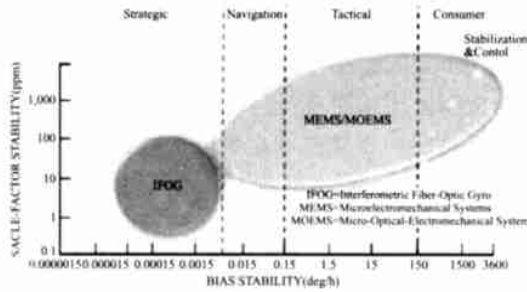


图 4(a) 远期陀螺的技术应用

Fig. 4(a) Far-term gyro technology application.

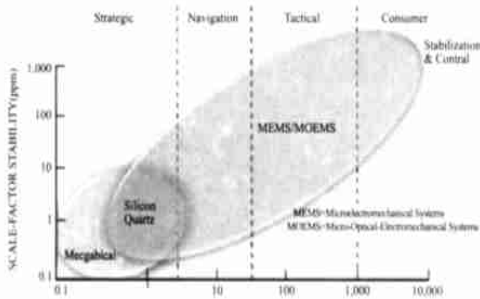


图 4(b) 远期加速度计的技术应用

Fig. 4(b) Far-term accelerometer technology application.

2.2 微惯性测量组合技术

微机械惯性组合技术已有了十几年的发展历史,低精度的产品已形成系列。目前,最为典型的产品是美国 Draper 实验室用三只微硅陀螺仪和三只微硅加速度计构成了微机械惯性测量组合(MIMU)陀螺的漂移不定性为 10^9 h,加速度计精度为 $25 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ 。此外,美国 BEI 技术公司已有 Motionpak 和 Motionpak - II 两款微机械惯性组合产品推向市场,其中 Motionpak 的三轴微机械陀螺和加速度计可以根据用户自己的需要进行取舍。从制造的角度看发展微惯性测量组合涉及的关键技术除所涉及的敏感器结构加工方面的关键技术外,还包括仪表的微机械结构、基于电容式的信号传感器、基于静电力再平衡伺服电路、音叉式梳状静电驱动谐振器以及相位—频率控制和信号增益反馈控制电路等等。就我国目前微机械发展水平来看,由于单轴的微机械陀螺和加速

度计的制造还未形成稳定的产品,现在研究集成型的微惯性测量组合的应用为时尚早。目前比较现实的途径是研究采用单轴的微机械陀螺和加速度计组成微惯性测量组合并开展其应用技术研究,以求在满足目前军事应用需要的同时以积累经验为集成型微惯性测量组合的应用研究提供技术储备。

结合目前我国的发展水平和技术条件,从应用的角度特别是军事应用方面来分析,微惯性测量组合由于其自身的特点使其在应用过程中有下面一系列的主要问题和关键技术需要解决。

(1) 元器件误差特性分析

通过对微机电陀螺和加速度计的误差分析(主要包括静态偏值与漂移、与 g 、 g^2 有关的偏值和漂移、装调误差、随机噪声、温度系数等),掌握元器件的特性建立误差模型,为系统的误差补偿(包括温度控制与补偿)提供前提条件。

(2) 结构优化设计

微惯性测量组合硬件结构设计包括其惯性传感器或传感器组件 (ISA) 的安装与运载工具对准所必需的机械结构设计和硬件电路的模块化设计。惯性传感器或传感器组件 (ISA) 是微惯性测量组合的核心部件,它们分别安装在一个立方体支架的六个面上以检测出 x 、 y 、 z 三个轴的输入角速度和加速度。立方体支架除具有隔振和耐冲击性的性能外(例如,在某些应用中,系统需承受 $10000g$ 以上的冲击),立方体支架的六个面的相互垂直的垂直度对系统的性能有重要的影响。结构优化设计的主要目的是使系统满足结构静动强度、刚度、振动、冲击的要求下,尽量减轻系统的重量和体积,为系统总体的安装和布局带来方便。

(3) 软件设计

在现有硬件水平和载体的运动特性基础上,研究各种初始对准及导航解算的算法,减少计算误差,将对系统精度起到重要作用。在系统结构设计方面另一个重要的内容是系统的软结构设计,即以系统软件开发为主,使系统能够适应各种不同的信号处理、不同的数码速率和不同输入/输出方案的需要,而不受硬件的影响。

(4) 微惯测量组合系统中 IMU 的集成与标定

将陀螺和加速度计通过机械装置、数据采集电路以及辅助电路集成在一起,由此形成 IMU。

IMU 的标定主要包括系统的偏值、标度因数、陀螺输出与 g 有关的系数、不正交度等,在此基础上,可对惯导系统进行软件补偿。

(5) 动态初始对准技术研究

由于微惯性系统的精度较低,静态初始对准的误差很大,不能真实提供航向和姿态,因此需要在系统运行过程中,利用外部辅助手段,例如与空间定位系统(GPS)组合实时修正系统的偏差完成系统的动态对准,使导航系统获得真实的航向和姿态,并校正惯性元件的误差,以提高微惯导系统的精度。

(6) 组合导航技术研究

惯性导航系统具有自主性,但由于微惯性敏感器件的误差随时间迅速发散,因此,单独工作不能满足使用要求,引入空间定位系统等辅助信息,并进行 Kalman 滤波可较好地解决微惯导系统的弱点。

3 微惯性测量组合的应用

微惯性测量组合具有明显的军民两用特点,在民用方面可用于通用航空、车辆自动驾驶和控制、机器人以及工业自动化等。在军事应用方面,由微机电陀螺和微机电加速度计集成的微机电惯性系统在常规兵器中有十分广阔的前景。其在常规武器方面的应用主要可以归结为三个方面:一是解决老问题——战术寻的头稳定、自动驾驶仪、短时飞行的导弹、鱼雷引信、低成本罗盘和姿态航向参考系统;第二方面是在正在研制的新的武器系统中加入微惯性测量组合——联合攻击弹药(JDAM)、风偏修正弹药弹箱(WCMD)、联合防区外攻击系统(JSOW);第三个方面也是未来微惯性测量组合应用最为活跃的方面——小型制导弹药、智能蒙皮的结构、个人导航、制导炸弹和智能炮弹。

目前常规兵器制导化,战术制导武器的小型化已成为必然发展趋势,自 20 世纪 90 年代中期,世界各主要国家都在发展该类武器系统。发展这类武器系统所带来的好处:

一是提高武器自身的杀伤力。提高武器系统杀伤力来自于两个方面,一方面是提高系统的威力,在这个方面采用微机电系统优点是可以减小武器系统的辅助部分的体积增大系统的战斗部以

提高系统的威力,如海军的鱼雷引信系统如果采用微机电惯性系统可使其体积减小到原有的 1/10;另一个方面是提高系统命中精度和射程;采用微机电惯性系统带来另一个优点是着眼于战术运用与后勤保障。

以常规炮射弹药为例,传统的常规炮射弹药均为无控飞行,命中精度较差。新一代弹药要求进一步提高射程和散布精度,由微机电陀螺和加速度计集成的微机电惯性系统具有成本低,尺寸小、重量轻、功耗少、可靠性高、抗振动冲击能力强,适于大批量生产等特点。这正可满足常规兵器的低成本、批量大、工作环境恶劣等要求。它与火箭增程技术和滑翔技术结合,可使炮兵弹药的在有效提高射程的同时,提高弹药的命中精度,给弹药发展带来革命性的变化。从可以预测的应用趋势来看,微惯性测量组合在新一代制导弹药中应用将成为其最活跃的领域。

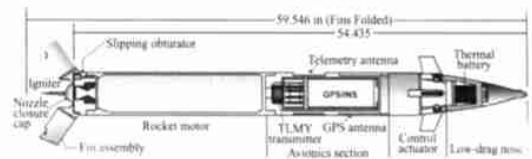


图 5 ERGM 实验导弹

Fig. 5 ERGM demonstration round.

美国已将由微惯性测量组合系统成功地用到了 127mm 舰炮发射的增程制导弹药(Extended Range Guided Munition, 简称 ERGM)上,所用的微机电陀螺和微机电加速度计由 Draper 实验室研制,陀螺的短期偏值稳定性为 $0.0029^{\circ}/s$,加速度计的偏值稳定性为 $1mg$,由它们集成为微惯性测

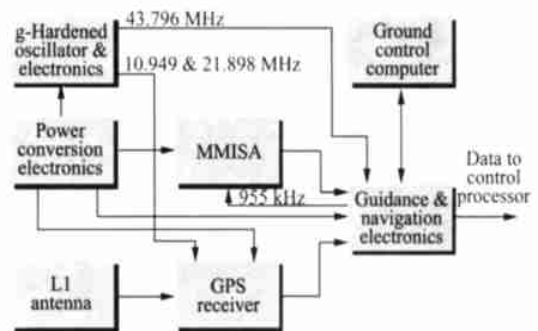


图 6 GPS/MIMU 系统方框图

Fig. 6 Block diagram of the GPS/MIMU system.

量组合,再与 GPS 进行紧组合完成制导任务^[3]。1996 年 12 月,美国海军首次披露了这种由得克萨斯仪器公司研制的弹药(图 5 所示)。该弹内装有 72 枚 M80 子弹。弹药中由微惯性测量组合构成的微惯性制导系统的结构如图 6 所示。系统包括下列主要部分:

(1) 具有温度补偿的抗高 g 加速度冲击的时间基准振荡器;

(2) 微机械惯性传感器组件(MMISA);

(3) 小型 GPS 接收机;

(4) 制导与导航电路,包括以 DSP 为核心的微处理系统以及电源系统。

该类弹药的飞行过程为(图 7 所示):惯导系统初始化,火炮向上发射,尾翼开伞,电池工作,舵机开始工作,滚转控制,火箭发动机助推,弹药到达最高点,弹体滑翔,到达目标。从而获得 120.7km 的最大射程,使舰炮对岸纵深攻击能力大大提高,可有效对付陆地人员、器材和装甲车辆,为登陆部队提供远程火力支援。目前,该弹已进入批量生产,计划 2002 年在海军服役。

英国于 90 年代初开始为陆军和海军提供一种远程多用途尾翼稳定子母炮弹,该炮弹由口径为 155mm 线膛炮发射,最大初速 945m/s,通过采

用碳纤维绕制弹体、微惯性系统加 GPS 制导、火箭增程等技术,射程达到 100km 以上,精度 40m。



图 7 ERGM 的飞行过程

Fig. 7 The flying process of ERGM.

4 展 望

目前就我国在该研究方面的发展而言,必须在有限的资金内以选定应用对象和应用环境为基础,走应用与研制相结合的道路。从目前的微机械陀螺和加速度计等惯性敏感器件发展水平来看,应用介入研制的条件已基本成熟并得到了有关部门的高度重视,与此同时在微惯性测量组合应用研究方面可望在未来的几年内得到长足发展。

参考文献:

- [1] Maluf N. *An introduction to microelectromechanical systems engineering*[M]. Artech House, Inc. 2000.
- [2] Barbour N, Schmidt G. Inertial sensor technology trends[A]. *The proceedings of the workshop on autonomous underwater vehicles, IEEE*[C], 1998.
- [3] Dowdle J R, Flueckiger K W. A GPS/INS Guidance system for navy 5" projectiles[A]. *The Institute of Navigation's 52nd Annual Meeting*[C]. 1996.
- [4] Titterton D H, Weston J L. *Strapdown inertial navigation technology*[M]. Peter Peregrinus Ltd, 1997.
- [5] 高钟毓. 微机械惯性仪表的原理结构与制造技术[J]. *半导体情报*, 1997, 34(2): 18-21.

Key technologies and applications of micromechanical inertial measurement units

XIE Xu-hui, LIU Wei, ZHANG Ming-liang, LI Sheng-yi

(School of Mechatronics Engineering and Automation,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The development of the micromechanical inertial measurement unit and its applications are briefly overviewed in this paper. Based on its current technological development status in China, the main problems and key techniques are discussed from an applicable viewpoint. Finally, a suitable way of developing the micro-mechanical inertial measurement system is suggested.

Key words: micromechanical gyroscopes; micromechanical accelerometers; micromachanical inertial measurement units

作者简介:解旭辉(1967-),男,湖南省长沙市人,1997年毕业于国防科技大学机械电子工程专业,获博士学位,现任国防科技大学机电工程与自动化学院机电工程研究所精密工程与数控研究室主任,副研究员,目前主要从事精密工程与计算机控制、微惯性测量组合及其应用等相关方面的研究工作。

《发光学报》(季刊) ——物理学类核心期刊

《发光学报》是中国物理学会发光分科学会主办的学术会刊,由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所承办。该刊以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年和2000年连续三次被“中文核心期刊要目总览”评为物理学类核心期刊。2000年被评为中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年始;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(P)自2000年始已定期收录检索该刊论文。本刊内容丰富、信息量大主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》为季刊,大16开本,100页,国内外公开发行。国内定价:每册9.00元。全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址:长春市人民大街140号

《发光学报》编辑部

邮 编:130022

电 话:(0431)5684692-2534

E-mail:fgxb@ciomp.ac.cn

国内统一刊号:CN-1116/O4

国际标准刊号:ISSN 1000-7032

国内邮发代号:8-173

国外发行代号:4863Q

http://www.ciom.ac.cn