

微机电系统引领航空技术新变革

MEMS will Have a Huge Impact in the Aviation Industry.

陆志东 余才佳 / 西安飞行自动控制研究所

导读:微机电系统 (MEMS) 被认为是21世纪的一项“使能”技术,对航空工业的技术革新将产生重大影响。本文介绍了MEMS在航空领域的典型应用,包括微惯性测量系统、微型飞行器、微流控和灵巧蒙皮、集成光电器件、发动机智能控制等,并探讨了未来MEMS的发展趋势。

关键词: 微机电系统; 微惯导系统; 微型飞行器; 集成光电器件

Keywords: MEMS; micro-inertial system; MAV; MOEMS

0 引言

微机电系统(MEMS)是20世纪80年代末在微电子技术和半导体工艺基础上发展起来的多学科交叉融合高新技术,它是将半导体集成电路和微机械元器件有机集成而构成独立的、微型化的智能系统。该系统包括微传感器、微执行器、微能源、微信号处理以及控制电路。可以预见,世界从过去的晶体管时代,跨越到现在的集成电路时代,即将进入到MEMS时代。

MEMS是微电子技术发展的产物,它的出现将对“现代工业之花”的航空工业产生非常重要的作用,主要表现在:将出现各种新型微传感器与微执行器,使飞行器分布式测量和智能控制成为可能;改变传统的飞行器设计和控制理念,实现智能蒙皮和智能动力;为常规武器制导带来变革,改变航空作战的模式和生态;使机载系统进入微型化时代;为微型飞行器、微型导弹奠定基础。

1 研制现状

1.1 微惯性测量

微惯性测量系统是利用MEMS惯

性测量元件进行运动载体加速度和角速度直接测量,配以相关电路,计算出载体所需的位置、姿态等导航信息。典型产品包括微惯性测量组合、微航姿系统和微惯性导航系统。相比传统的惯性测量系统,微惯性测量系统尺寸小、重量轻、功耗低、可靠性高、成本低,适合大批量生产。

微惯性测量主要用于各种战术武器的精确制导,典型应用如图1所示。航空制导炸弹(JDAM)、风修正弹药布撒器(WCMD)、红外格斗导弹等,均

采用MEMS惯性测量对弹药进行弹道修正或爆炸点精确控制,大大提高了弹药威力。美国的JDAM就是在常规航空炸弹基础上加装微惯性测量辅助的GPS制导组件而实现了爆炸位置的精确控制^[1-2]。另外,微惯性测量还可以应用于飞机/导弹的飞行控制、姿态控制、偏航阻尼控制及导弹导引头、光学瞄准系统的稳定、控制座舱仪表和试飞仪表智能化等。

1.2 微型飞行器

美国于20世纪90年代提出微型飞

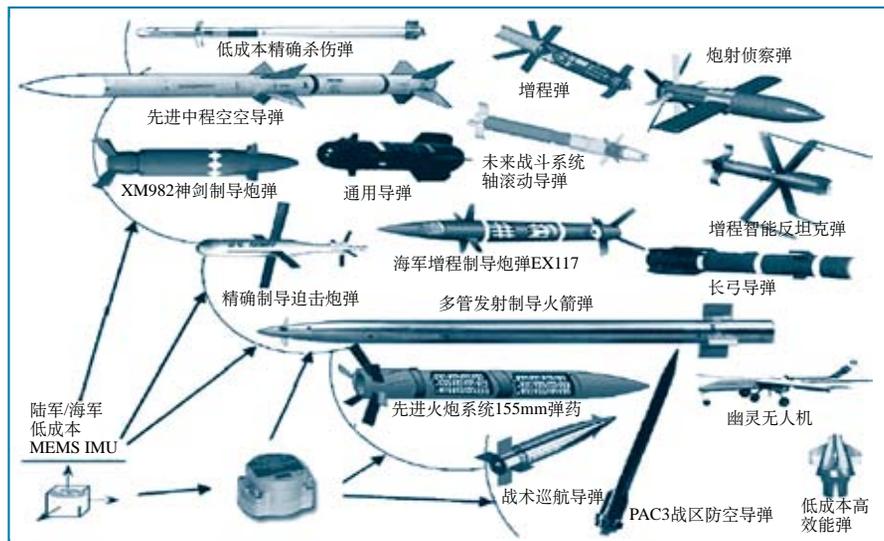


图1 MEMS微惯性测量典型应用



固定翼MAV



旋翼MAV



扑翼MAV

图2 微型飞行器

飞行器(MAV)概念,按照美国国防部高级计划研究局(DARPA)的定义,微型飞行器的尺寸小于15 cm、质量10~100 g、续航时间20~120 min、航程大于10km、飞行速度22~45km/h、能靠其自身能力飞行和完成各种探测任务^[3]。得益于MEMS技术的小型化和低功耗特性,使得只有麻雀甚至苍蝇大小的微型飞行器成为可能(图2)。

MEMS技术在微型飞行器中具有绝对重要的地位,如控制系统中的微型地平仪、微型高度计、微型空速计、微型舵机,导航系统中的微型磁场传感器、微加速度计和微陀螺仪,以及微型摄像机、微型通信系统、微光电传感器和微能源等,都需要MEMS的技术支持,甚至微型发动机、微型飞行器的机翼都要利用MEMS技术制造。

1.3 微流控制与灵巧蒙皮

MEMS技术可用于飞行器边带层流的主动控制,减少流体气动摩擦,实现飞行器减阻或增升、减小抖振载荷、降低噪声辐射、改进飞行器操纵等,取代传统的流线型机身设计,制造出真正的飞行器灵巧蒙皮,从而改变传统的飞行器表面控制技术。同时,该技术还能用于发动机内外流控制,涡轮、涡扇和旋翼的扰流控制。例如,采用高时间分辨率和高空间分辨率的分布式MEMS微传感器对高雷诺数下的流体进行测量,利用低成本、批量生产的MEMS微

执行器阵列对飞机表面微流体进行实时控制,能抵消流场压力、温度、气流等细小变化引起的干扰,取代传统飞行控制表面,实现飞行器表面的主动流体控制。据估计,MEMS微流体主动控制技术能减少飞行器50%~80%的表面摩擦力,节省高达80%的成本^[4]。通过改变涡轮发动机气压舱、进气口的气动外形,可以提升动力系统性能。

加州大学洛杉矶分校和加州理工学院研制了基于柔性衬底的微型多晶硅热敏操控传感器和分布式球形微执行器,对三角翼无人机前缘的边界层分离点进行在线测量,通过机载数字信号处理(DSP)系统实时判定分离点位置(图3a),并进行了飞行操控性测试^[5]。佐治亚理工学院研制了MEMS微传感器和微执行器,利用安装在流层界面上的多个微执行器产生喷气脉冲式动力,叠加后获得飞行器的推进力,微执行器与飞行器表面气流场的相互作用,取代传统的流线型外形设计,使控制效能提高一至

两个数量级。

波音公司、Endevco公司和佐治亚理工学院联合开发了一种利用“压力带”测量气动结构压力的保形方法(图3b)^[6],它由3个互联的超微MEMS压力传感器模块组成,已用于波音747、波音767、波音777和波音787的机翼压力测量、计算载荷能力、发动机效率、燃油经济性等运行参数及确定不同飞行状态下的结构载荷。

基于MEMS技术灵巧蒙皮正逐渐向集成射频器件的方向发展。美国航空航天局(NASA)在F-18上进行了灵巧蒙皮集成天线的测试,俄罗斯也在苏-30MKI的机翼上测试了有源电子扫描阵雷达的发送和接收模块。

1.4 集成光电器件

微光机电系统(MOEMS)因其对光束在时间和空间上的精确控制能力以及体积小、可批量生产、功耗低和价格合理等优势,可广泛应用于航空领域的军用光电侦察装备,如激光测距、激

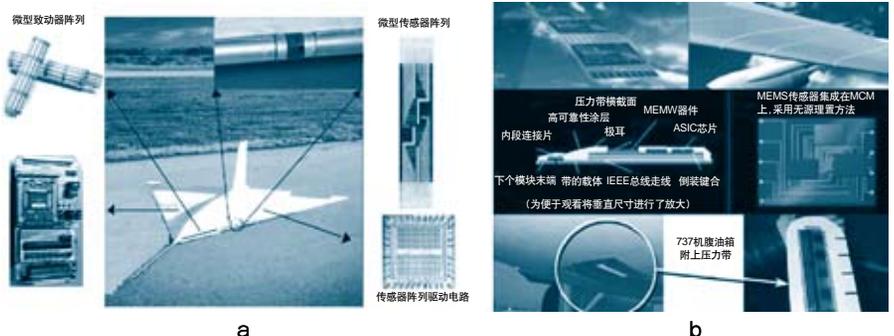


图3 灵巧蒙皮结构系统

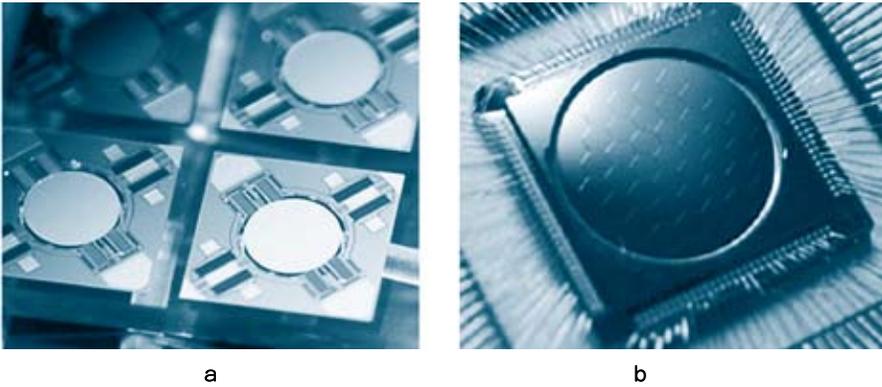


图4 MEMS集成光电器件

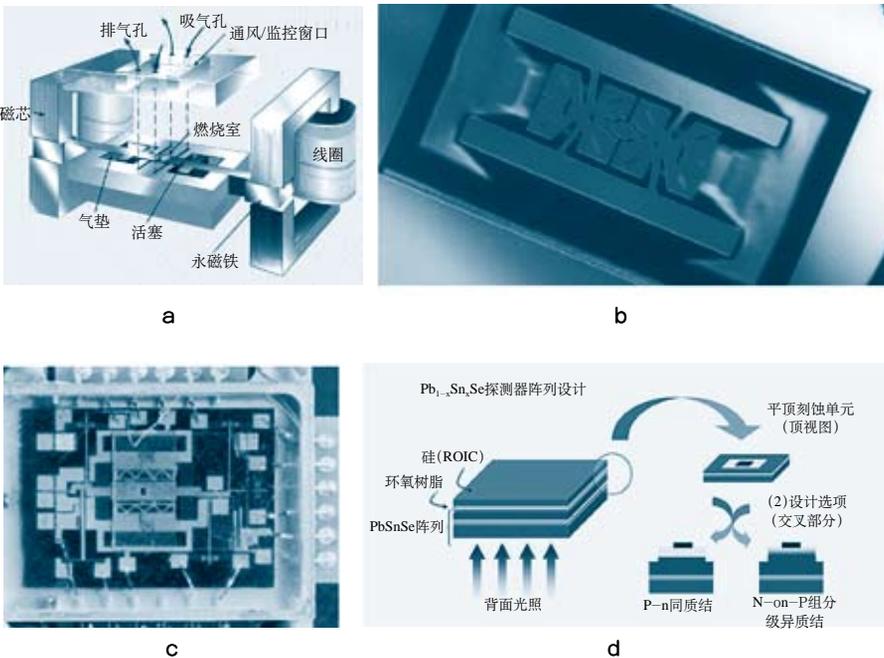


图5 MEMS技术部分航空应用实例

光雷达、光学制导、预警监视等。

MOEMS扫描微镜(图4a)可用于战斗机的平显(HUD)。当飞行员透过座舱玻璃观察舱外时,可以同时看到叠加在外景上的字符、图像等信息,无需再观察舱外目标和舱内仪表,提高了飞行员反应速度,减少操作失误。

利用MEMS技术加工的可变反射镜自适应光学系统(图4b),可校准大气扰动,实现飞机与卫星、飞机与地面间的光通信、成像和导弹导向瞄准。

利用MEMS技术可以制造谐振式和

干涉式MOEMS陀螺。谐振式MDEMS是在硅片上制作闭路谐振光波导替代激光陀螺的玻璃谐振腔,干涉式MDEMS则在硅片上制作环路光波导或微镜阵列替代光纤线圈。

DARPA的微电子科学家们联系工业界,正寻求在一块硅片上融合电子、光学和MEMS组件的方法,用于远程通信的收发器、激光雷达传感器和通信的相干光学系统等。

1.5 发动机智能控制

MEMS器件在推进系统中的应用

主要包括:进气口流体控制、浪涌/延迟控制、燃烧不稳定控制、状态监控、健康检测、叶片末端清洁度控制、振动控制,为发动机及其元件的自适应控制技术及设计带来革命,实现智能型发动机。为了适应发动机中的恶劣环境,MEMS器件必须摒弃传统的单晶硅材料,代之以新型的碳化硅(SiC),同时改进封装技术。为了满足恶劣环境的应用,需要达到以下的环境要求:200~1200℃的高温;20个大气压强的高压;1kHz或更高的振动频率;140dB的强噪声;承受10~25g的过载,以及耐水、潮湿和多尘。

1.6 其他航空应用

1) 微动力系统

以电、热、动能或机械能输出为目的,在毫米到厘米级尺寸,产生瓦到十瓦级的功率,为微型飞行器提供动力(图5a)。它通过MEMS加工和装配技术将传统的微推进组件器件化并集成,或者将微传感器和微执行器集成到微喷系统中,实现功能的完善和扩充。

2) 微压力传感器

采用MEMS技术可以制造微型硅谐振式压力传感器(图5b),体积、质量只有振动筒谐振式压力传感器的1/10,可用于飞机的分布式大气数据测量,其兼具小型化、低功耗和高精度的特性,有利于提高测量精度、减少飞机载荷。

3) 智能引信

采用MEMS技术在硅片上制作传感器、定时器、开关及控制元件,甚至集成电雷管最核心的部件电桥,最终形成质量好、可靠性高、更安全的固态电子引信(图5c),为航空机载武器提供安全可靠引爆方式^[4]。

4) 红外焦平面阵列

利用MEMS技术加工的红外焦平面阵列传感器(图5d)能够帮助作战人员在没有日光的条件下观察目标或地形,

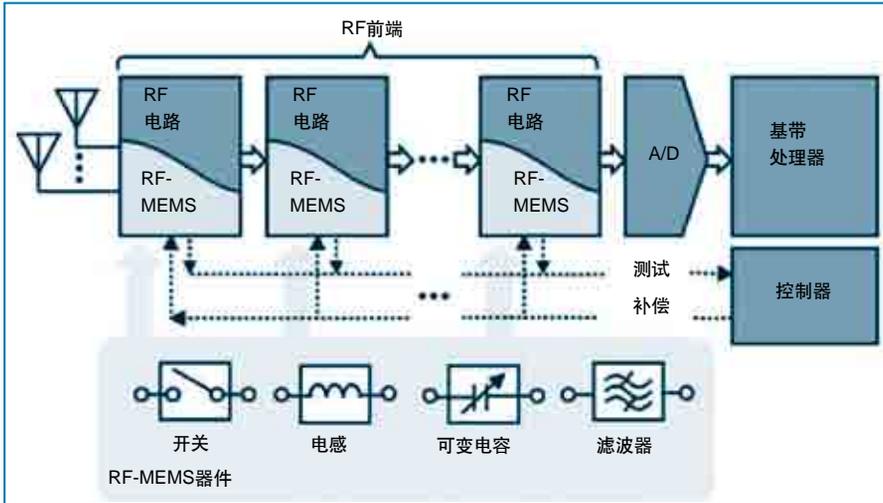


图6 RF MEMS应用

典型产品	Crossbow NAV400	NavChip ISNC01
体积	< 34inch ³	< 0.2inch ³
重量	< 580g	< 6g
功耗	< 5W	< 0.2W

图7 板级INS和芯片级INS

可用于导弹成像制导、高精度跟踪、夜视、侦查等。美国利用MEMS技术研制的二维热成像传感器已发展到4096×4096面阵,能够获得清晰的二维图像。

5) RF MEMS

MEMS技术可以制作RF MEMS,包括射频开关、滤波器、可变电容、可变电感、移相器、振荡器等(图6)。与传统射频元器件相比,RF MEMS具有低插入损耗、线性、宽带、体积小等优点,在微型飞行器、航电系统、相控阵雷达、雷达导引头和弹载数据链等领域具有广阔的应用前景。美国利用RF MEMS 开关、可调电容器和跟踪滤波器研制的军用安全通信系统,已用于F-22 战斗机天线界面单元跟踪滤波器、RAH-66 直升机AIU 跟踪滤波器和三军通用ARC-210(V) 军用无线电接收机的预选器。

6) 微拦截器

美国弹道导弹防御系统中新开发的多拦截器(MKV),由一枚助推火箭携带几十个微型杀伤拦截器,能够同时摧毁多个目标。MKV中的微型部件,如陀螺仪、加速度计、高度系统、微传感器和推进器等,都需要MEMS技术支持^[7]。

7) 微导弹

目前国外正在研究利用MEMS技术加工的苍蝇导弹,该导弹体积形状如苍蝇大小,可以引爆弹药库、油库,可以飞入敌方指挥部袭击指挥官。

2 发展趋势

2.1 系统集成单片化

将MEMS传感器和执行器的机械结构,信号处理电路实现单芯片集成,以减小系统的体积,降低功耗,制造真正的芯片上的系统(System on Chip)将会是未来的一种发展趋势。单芯片集

成的实现途径有两种:一是采用互补金属氧化物半导体(CMOS)和MEMS的集成制造工艺,在单个硅片上直接加工出MEMS微机械结构和处理电路;二是ASIC电路与MEMS微机械结构分别加工,在同一个基板上采用薄膜、厚膜或低温共烧陶瓷(LTCC)等方式实现混合集成。采用集成工艺的惯性测量系统正在由传统惯性导弹系统(INS)向板级INS、甚至是芯片级INS方向发展(图7),掌上惯导或指尖惯导离我们正越来越远。

2.2 制造工艺多样化

MEMS器件对制备工艺具有很大的依赖性,而工艺本身又具备多样性,且层出不穷,典型的制备工艺包括:体硅加工工艺、表面牺牲层工艺、溶硅工艺、LIGA和准LIGA工艺、声激光刻蚀、非平面电子束光刻、镀膜工艺、键合工艺、电火花加工、微切割、CMOS MEMS混合工艺、MEMS封装工艺等。但要真正做好MEMS,必须是设计与工艺相结合,任何隔离两者的做法都不可取。

2.3 涉及领域多元化

对MEMS的研究,不仅涉及基础理论、制造工艺、应用技术,还涉及到MEMS技术与其他如通信、计算机、光学、射频、流体、生物等多学科技术的结合问题,更涉及到一些新兴学科和一些前沿技术的应用和综合。MEMS技术在航空领域正引发一场“微小型”革命,随着应用的进一步深入,未来的航空装备将因MEMS的引入而彻底改观。

2.4 研究方向纳米化

MEMS正在向更小的尺度延伸,较活跃的是纳米机电系统(NEMS),包括碳纳米管、纳米线等。随着纳米材料和纳米加工技术的发展,不久的将来NEMS传感器、NEMS超微型飞行器和仿生昆虫等将会出现。以色列研制的可

浅析机载软件测试策略

Analysis on Testing Strategy of Airborne Software

张国升 王保松 / 江苏金陵机械制造总厂

摘要: 归纳、分析了机载软件所特有的实时性、反应性、嵌入式、高度的可靠性及安全性的特点,并依据其特点提出了机载软件的测试策略。在综合分析讨论的基础上,总结得出了进行机载软件测试的原则和方法,对保证机载软件质量,提高其稳定性、可靠性、安全性具有指导意义。

关键词: 机载软件; 软件测试; 测试策略

Keywords: airborne software; software testing; testing strategy

0 引言

机载软件是应用于机载设备内部的计算机软件,主要包括机上的信息管理和指令控制系统和系统的依托平台等。随着机载计算机在军用战机控制系统中的广泛使用,机载软件质量问题愈显突出,甚至成为机载计算机软件能否

发挥其优越性能的一个制约因素。现代战机大量采用自动化控制系统,机载计算机不仅数量多、品种杂,而且软件程序复杂,为了稳定飞机作战性能、保障战斗力,机载软件的可靠性、安全性测试必不可少。机载软件测试不仅是机载软件生存周期中的一个关键环节,也是保证机

载软件质量的重要活动之一,其重要性不亚于软件的开发环节。解决机载软件可靠性、安全性问题的一个重要手段就是对软件进行充分的测试。但由于机载软件本身的复杂性和特殊性,其测试仍然存在许多困难。本文在对机载软件特点总结归纳的基础上,对机载软件的测

拦截地空导弹、直径130纳米的电子纤维“蒲公英”,就源自NEMS技术,每架飞机可以携带数以百万计的“蒲公英”,撒布在空中,使对方雷达显示一片迷茫,导弹将难以找到准确的攻击目标。

3 总结

MEMS技术正在全球产生航空工业的新一轮变革,在我国航空领域的应用始于微惯性传感器,已初步构建高校、企业和科研机构三位一体的研发体系, MEMS的发展经历了理论设计期、样机研制期、正迎来产业化应用的高速发展期。随着技术的培育积累, MEMS技术必将对我国航空工业乃至国民经济等产业提供强有力的技术支撑、带来重大的技术变革,也将哺育出一个新的产业。

AST

参考文献

- [1] 毕克允. 微电子技术: 信息化武器装备的精灵[M]. 第二版. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [2] 任子西. MEMS技术将会为战术导弹带来一场革命[J]. 战术导弹技术, 2010(1): 1-8.
- [3] 周新春, 昂海松. 微型飞行器研究进展与关键技术[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(6): 1-4.
- [4] Klaus Schadow, Ayman El-Fatraty. RTO-MP-104: military/aerospace MEMS applications: AVT task group 078[R]. Brussels: The RTO AVT Symposium, 2003.
- [5] Jiang Fukang, Xu Yong, Weng Tianxiang, Han Zhigang, etc. Flexible shear stress sensor skin for aerodynamics

applications. micro electro technical systems[C]. Miyazaki, Japan: MEMS 2000.

[6] 刘亚威. 国外航空微系统的研究应用[J]. 国防制造技术, 2010, 6(3): 36-39.

[7] 彭灏, 李业惠, 张素梅. 多拦截器: 弹道导弹防御的新锐[J]. 现代军事, 2006(1): 44-45.

作者简介

陆志东, 中航工业导航技术首席专家, 西安飞行自动控制研究所总工程师、研究员, 长期从事惯性仪表及惯性导航技术重点型号及预先研究等工作。

余才佳, 西安飞行自动控制研究所传感器室副主任、高级工程师, 长期从事MEMS技术、微惯性仪表的预先研制等工作。