

The machine does not isolate man from the great problems of nature but plunges him more deeply into them. (机械不是把人从自然问题中隔离开来,而是把人更深入地融入自然。)

Saint-Exupéry, Wind, Sand, and Stars, 1939

第 1 章 概 论

1.1 概述

当微机电系统(microelectromechanical system, MEMS)和微结构(microstructure)在航天飞行任务中还处于初始应用的时候,我们来拼凑一本关于 MEMS 系统和微结构在航天中的应用这样一本书,似乎是一件有些草率的事情。任何一项技术从初始阶段发展到成熟阶段都需要几年时间和经历一些曲折的过程。打个比方,直到 20 世纪 40 年代晚期当大多数人能够乘坐飞机的时候,人类才算真正进入了飞行时代。从 1903 年莱特兄弟实现第一次飞行开始,到飞行实现大众化,整个成长期经历了五十多年。类似地,1969 年威斯丁豪斯(Westinghouse)设计了一种谐振栅式场效应管,标志着 MEMS 技术的诞生。在接下来的 10 年里,制造商开始在硅基圆片上使用刻蚀技术生产压力传感器,这种试验一直进行着,直到 80 年代初期硅采用表面加工工艺制造用于硬盘磁头的多晶硅执行器。到 80 年代,当 MEMS 器件在微电子和生物医学工业广泛地设计和研制时, MEMS 技术的潜能才被真正发掘出来。接下来的 25 年里, MEMS 技术从被认为是一项可关注的技术转变成一项具有潜在商业价值的技术。在 90 年代,美国政府和相关机构对 MEMS 技术和相关的起步项目进行了大规模的支持。空军科学研究所(Air Force Office of Scientific Research, AFOSR)支持了相关材料的基础研究,而国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)在 1993 年开始建设相应的代工服务(foundry service)。此外,国家标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)开始提供商业的代工服务。

在 20 世纪 90 年代后期, MEMS 技术在航天应用中的早期演示验证开始。这些演示体现在 Mighty Sat 1、返回式卫星(shuttle orbiter) STS-93 以及 DARPA 牵头的 OPAL 飞行联盟和 Scorpius(Microcosm)的亚轨道飞行当中。这些早期的切入点可能会被认为是下一代 MEMS 在航天应用的基础。一些早期应用主要出现在那些高校和业余爱好者研制的卫星当中。在不到 10 年的时间里, MEMS 发展成为一种完整的有系统的能用于航天的技术。MEMS 技术已经在航天被迅速采用,并且可以预测在今后 10 年里能够获得更广泛的使用。

出版这本书就是为了帮助和指导能够被更严格的航天飞行系统所采用的下一代 MEMS 技术的发展。这本书指出了在过于挑剔的航天系统和任务中采用新技术后如何降低风险,目的就是为了给那些系统工程师所使用。

回到章首那句出自 Saint-Exupéry 的引文, MEMS 技术和微型系统在航天飞行中的应用可以使我们在航天器任务的各个阶段处理得更加透彻, 其中包括地面、发射和在轨 3 个特定的阶段。理解这 3 个阶段对微型器件的影响是必要的, 这在本书中有详尽的阐述, 以此为今后适用于航天任务的 MEMS 技术的发展奠定基础。

1.2 背景和意义

依照某些标准, 微细工程可以认为起源于 15 世纪的某个时候。那时, 某个钟表匠利用一些宏观尺度的工具制作出一些微型的器件来装配一只怀表。在 1960 年左右, 石英被用来进行精确计时时, 手表就成为了第一种真正的 MEMS 器件。当我们思考 MEMS 技术或者说微细加工技术时, 手表和怀表可能不会被我们一下子联系起来。当然, 这些只是钟表匠的一些工艺品, 或者说只是某些钟表匠的手工艺品, 仅此而已, 不像其他的一些 MEMS 器件。当今, MEMS 技术的一个主要特点就是批量化生产, 能够同时生产出大量的具有相同特性的器件, 并且能够并行地进行自动化的装配。微电子技术的应用能够制造出更好的手表, 并且成本只有几美元或者几十美元而不是几千美元。类似地, 通过采用基于硅的微细加工技术能够把加速度计集成到汽车气囊中, 而将加速度计的价格降低到几美元的水平。

批量生产并不是把 MEMS 技术应用到航天器追求的首要目标——许多航天器都是唯一的或者是少数的几个。另外, 价格也不是主要因素, 因为航天器件的价格不仅仅看产品本身的成本, 而是或多或少地依赖产品能否适用于航天环境以及和飞行器的集成程度如何。可靠性才是主要问题; 典型情况下, 可能就只有一艘航天器, 并且要求长时间工作而不产生任何故障。

另外一个方面, 随着时间的变化, 对技术开发的要求也变化了。快速发射和入轨对器件的小型化、电子化和其他方面提出了要求。和在 15—16 世纪对小型经纬仪的发展一样, 许多应用于航天的实现技术要求能够确定经度, 能够精确导航和能够探测。MEMS 技术(我们采用 MEMS 指代任何微米/纳米技术、微细加工技术)在汽车工业和娱乐产业等商业性行业已经取得了成功。在这些行业里, 成本是主要的驱动力, 唯一的解决路径就是海量生产。从最初的压力传感器到后来用于气囊的加速度计, 成本降低到了只有几美元, 这都是 MEMS 技术在汽车行业成功的典范。在娱乐行业, 德州仪器公司(TI)生产的微镜阵列占到了 50% 的市场份额(其他的产品采用的是基于液晶的电子器件), 通过紧张但短暂的开发已经帮助数字投影仪的价格降到了 1000 美元以下。MEMS 技术带来的另外一个革命性变化的领域就是非冷却式红外探测器。在不降低灵敏度的前提下, MEMS 技术使得这类产品的价格降低了一个量级, 能够广泛采用在火灾警报器、警车和豪华汽车中, 取代以前那种非常昂贵的微光摄像仪。现在的问题是, MEMS 技术能够为航天领域带来什么?

电子器件微型化的主要驱动力是降低成本和海量生产。这些驱动力和当前一个重要的趋势结合起来, 即在越来越少的芯片中集成越来越多的组件和子系统, 使得在更小的封装体积中实现更强的功能。MEMS 技术和其他的传感器-执行器技术使把整个系统或平台的小型化和集成化成为可能。减小尺寸、降低质量和单位成本, 同时扩展功能, 这对空军任务来说具有非常重要的意义, 无论是从全球位置信息的获取还是从相关的民用科学及商业应用而言。类似的例子包括传感器快速且廉价的全球部署, 待命发射(launch-on demand, LOD)

的战术卫星,分布式传感器网络以及低费用的无人飞行器(unmanned aerial vehicle,UAV)等。以同步方式运行的卫星编队为提高卫星系统的能力和鲁棒性带来了非同寻常的新的曙光。例如,由 MEMS 加速度计和速率陀螺组成的质量轻、体积小的惯性测量单元(inertia measurement units,IMU),用于导航和姿态确定的全球定位系统(global position system,GPS)接收机和基于 MEMS 技术的微型推进器等都为小型飞行器、探测器、空间机器人、纳星卫星和小型行星登陆器等研制提供了技术保障。

这些带来很多好处,包括减少飞行器的组件数量,提高飞行器单位质量的功能,实现大批量生产用于待命发射战术应用的微型、纳型和皮型卫星(例如巡视飞行器),以及部署分布式空间系统等等。也可以利用 MEMS 技术研制像微型液态火箭引擎、微阀、陀螺和速度计等 MEMS 器件和子系统,构成微型发射运载工具来运送 1~2kg 的物件到低地球轨道。由此,这可能只需要 1 万~5 万美元就把一个承担了载荷(虽然很小)的功能完备的微型卫星发送到轨道上去,而不是要像今天这样动辄花费 1000 万~5000 万美元。

事实上,西南研究所(the SouthWest Research Institute)的研究人员已经做了一些拓展性的测试,认为真空状态的太空为 MEMS 器件的一些应用提供了理想的空间环境。一些 MEMS 器件在真空中经过 10^{10} 周期测试后证明只需要更低的电压就能工作^[2]。在未来的空间任务中,适用于空间应用的 MEMS 器件会研发出来,最终会采用到科学仪器和空间飞行器系统中。

1.3 航天用的 MEMS 器件

尽管在过去十多年里,有很多研制出来的 MEMS 器件可能适合空间系统的应用,但是它们最初的应用目的还是着眼于民用和军用场合。只有很少的一些器件,比如微型推进器和一些用于空间探测的科学测量装置,从一开始就是为了空间应用的。在上述两个方向上,从 20 世纪 90 年代开始,就有了把 MEMS 器件应用到空间项目的尝试,并检验它们的可用性。一些这方面的演示验证任务已经列写在下面,它们充当了重要的探路者的角色。

He who would travel happily must travel light. (愉快的旅行一定是轻装前进的。)

Antoine de Saint-Exupéry

1.3.1 数字微型推进项目 STS-93

第一次为 MEMS 器件研究的飞行记录是在 1999 年 7 月 23 日,在美国航天局哥伦比亚号航天飞机的 STS-93 次飞行,实验了数字微型推进计划(Digital Micro-Propulsion Program)。这是在上午 12 点 31 分开始的,为期 4 天,并第一次运送 MEMS 微型火箭推进器阵列进入太空。美国国防部高级研究计划局资助的 TRW 公司/航空航天公司(Aerospace Corporation)/加州理工学院(Caltech)的 MEMS 数字微型推进项目有两个主要目标:演示验证几种 MEMS 微火箭推进器并描绘其性能特征,以及发射 MEMS 微型火箭推进器升空并校正其在发射、飞行和着陆时的性能。

1.3.2 皮卫星任务

6 个皮卫星(Picosatellite),蛋白石计划(OPAL)火箭弹头的部分载荷,于 2000 年 1 月 26 日在范登堡空军基地发射。这些皮卫星于 2000 年 2 月 4 日部署到位,并运行 6 天直到 2000 年 2 月 10 号电池耗尽。罗克韦尔科学中心(Rockwell Science Center,RSC)制定并实施了一项基于 MEMS 的射频开关的实验,该实验作为一项 MEMS 空间应用的初步示范被整合入微型卫星(皮卫星)。美国国防部高级研究计划局(DARPA)的微系统技术办公室(Microsystems Technology Office,MTO)支持了这项工作,并且这一任务由航空航天公司(Aerospace Corporation)和斯坦福大学(Stanford University)作为合作伙伴共同管理。基于 MEMS 的表面微机械金属接触开关被制造和使用于皮卫星上的一个简单的实验,以研究仪器在空间中的运行以及其空间普遍应用的可行性。在整个卫星运行期间,所有的通信设施和网络协议以及 MEMS 射频开关实验的信息被收集。射频开关的性能与发射前完全一致^[3]。

1.3.3 天蝎座亚轨道示范

由 TRW 公司领导的小组设计的,使用在微纳卫星和皮型卫星上的,只有 1/4 硬币大小的微型火箭推进器阵列,已经成功地证明了它在实弹射击试验的功能,该实验于 2000 年 3 月 9 日在 Microcosm 制造的天蝎座亚轨道(Scorpius sub-orbital)探空火箭^[1]内进行。在白沙导弹靶场(the White Sands Missile Range)的实验中,独立的 MEMS 推进器,每个装满了收敛酸铅推进剂的燃料室只有一个罂粟种子大小,1s 间隔内点火次数超过 20 次。每个推进器提供 $10^{-4} \text{ N} \cdot \text{s}$ 冲量^[4]。

1.3.4 基于 MEMS 的微型卫星侦察器系列

基于 MEMS 的微型卫星侦察器系列(MEMS-based pico sat inspector,MEPSI)空间飞行实验显示能够载荷微型($<1\text{kg}$)侦察器(PICOSAT 微型卫星)装置,并根据命令释放进入空间,执行对飞船主机的监视任务并与一个专用地面站共享收集到的数据。美国国防部已经批准了一系列的螺旋变化的飞行任务(预飞行任务,preflights),并导致最终将进行完整的 MEPSI 任务的飞行任务。第一代 MEPSI 微型卫星于 2002 年 12 月建成并在 STS-113 任务中飞行。

所有 MEPSI 皮型卫星的大小都是 $4\text{in} \times 4\text{in} \times 5\text{in}$ 的立方体形。卫星由安装在航天飞机、可扩展运载火箭(expandable launch vehicle,ELV)或主卫星上的一个特殊皮型卫星发射器发射成为彼此连接的一对卫星。即将用于 STS/PICO2 的发射器也适用于执行 STS-113 任务的航天飞机,同时不需要重新设置^[5]。

1.3.5 导弹和军火-惯性测量单元

2002 年 6 月 17 日,第一次使用基于 MEMS 技术的惯性测量装置(inertial measurement units,IMU)制导的,为美军 NetFires 精确攻击导弹(precision attack missile,PAM)计划进行的飞行试验的成功,作为一个重要的里程碑,进而将 MEMS 引入 ManTech 计划,以生产基于 MEMS 技术的体积更小、成本更低、精度更高、战术级的惯性测量装置。在 75s 的飞行

中,精确攻击导弹飞到了大约海拔 20000ft(1ft=0.3048m),并且成功地执行了一些使用导航装置的测试,该导航装置包含整合入 GPS 接收器的 HG-1900(基于 MEMS)惯性测量装置。测试演习还成功地改变了飞行中导弹的指导点,使其能够成功地执行拦截任务^[6]。

1.3.6 蛋白石、蓝宝石和绿宝石

斯坦福大学的卫星快速研究试验台(satellite quick research testbed,SQUIRT)卫星项目展示了应用于航天的微米和纳米技术。蓝宝石(SAPPHIRE)是一个 MEMS 隧道红外地平探测器的试验平台。第二个微型卫星,蛋白石(OPAL),它的名字来自于它的主要任务,即轨道微型卫星发射器。蛋白石(OPAL)探索母船-子船任务架构使用卫星快速研究试验台弹出手掌大小、功能齐全的微型卫星的可能性。蛋白石(OPAL)还为在轨 MEMS 加速度计的性能指标提供了一个试验台,而其中一个微型卫星是 MEMS 射频开关的试验台。绿宝石(EMerald)是下一个卫星快速研究试验台项目,涉及两个微型卫星,该项目将展示一个直接受益于 MEMS 的虚拟火箭技术。其火箭载荷还包括一个在空间环境中致力于全面电子操纵和小尺寸组件测试的试验平台。绿宝石还将运载一个胶体微推进器模型,这是推进器子系统小型化的第一个步骤,最终该技术仍将包含 MEMS 技术。该推进器正在与斯坦福大学的等离子动态实验室(the Plasma Dynamic Laboratory)共同开发^[7~9]。

1.3.7 国际案例

列举一系列由美国发起的实验案例是不公平的,这暗示着这项活动仅限于美国。在国际领域人们对此也有很大的兴趣,并付出着努力,进行着专业的研究。欧洲航天局(The European Space Agency,ESA)和法国国家空间研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales,CNES)^[12]在此领域十分活跃。加拿大维多利亚大学(the University of Victoria)致力于基于 MEMS 的自适应光学望远镜方面的研究^[13]。中国正在试验 Yam-Sat 和硅卫星^[14],与此同时,日本也正在开展包括微推进研究和许多其他不胜枚举的活动^[15]。这些努力跨越了国界,并且进行着大规模的合作。

1.4 微机电系统和微结构在航天中的应用

MEMS 和微结构在航天技术中的应用大致可分为以下 4 个部分。

1.4.1 对 MEMS 的理解和 MEMS 的展望

设想在未来 10~20 年内,MEMS 技术有可能在多种航天任务中得到应用,这是一件多么鼓舞人心的事情。第 2 章的主要目的是激发 MEMS 技术应用到未来 NASA 航天任务当中的想法,以及提高任务设计者们对 MEMS 技术的认可度。同时也希望通过本章使非航天应用领域的 MEMS 技术人员、研发人员和决策者们能够了解到 MEMS 技术在未来 NASA 科学和开发任务中广阔的应用前景。因此本章的目的在于带领读者去明确并且思考未来 MEMS 技术对民用航天领域的影响,影响是潜在的、长期的、革命性的,但也许是破坏性的。本章对 MEMS 在航天领域应用的潜力进行概述之后,简要地阐述了在未来航天任务中几个应用 MEMS 技术发展的实例。接着本章从这些近期的技术发展出发,通过对 MEMS 技术

在未来科学探索任务中若干个可能的最终应用领域的阐述,描述了 MEMS 技术的应用愿景。最后,作为对未来 MEMS 技术研发的激励,本章总结了 MEMS 技术融入到航天任务中的障碍、设计挑战以及其他需要克服的关键因素,从而使其从目前尚未成熟的阶段发展到全面应用潜力的发挥。

第 3 章讨论 3 类基本的 MEMS 制造工艺:体硅加工技术、牺牲层加工技术和 LIGA 加工技术。它们在其可实现的器件的深宽比、材料、复杂度和与 IC 兼容性上具有不同的能力。这些不同的能力使它们应用于不同范围的器件。在商业上成功的 MEMS 器件有压力传感器、加速器、陀螺仪和喷墨喷嘴。德州仪器(TI)研制的数字镜像器件(DMD)和模拟器件公司(Analog Devices, AD)研制的 ADXL 加速度计和陀螺仪是两个非常成功的商业案例。另外,该章还讨论了 MEMS 的集成方案和应用在 MEMS 中的先进材料。

第 4 章讨论航天环境及其对设计的影响,包括 MEMS 的材料选择和制造控制。该章概述了影响 MEMS 器件长期可靠性的热、机械、化学影响,并且回顾器件会遇到的存储和应用条件。该章还讨论了 MEMS 设计和材料选择中的各种影响因素,包括航天任务的环境影响、放射线、零重力、零压力、等离子、原子氧以及和它们相关的潜在因素,同时也讨论了长寿命需求。最后,基于航天环境操作对硬件的特殊要求,该章对材料选择进行了讨论。细心的读者会发现该章仅仅是一个概述,它必须与本书中阐述可靠性、包装、污染和处理的章节联系在一起阅读。

第 5 章整章都在讨论 MEMS 的辐射诱发的功能性老化问题。首先,该章讨论了航天任务中会遇到的辐射环境。MEMS 相关的辐射环境主要包括太阳或深度空间中产生的高能粒子(太阳粒子和宇宙辐射)。然后该章阐述了粒子密度的空间和温度变化以及光谱分布。接着,该章详细讨论了导致全部电离辐射量、移位损害剂量和单次事件效应等辐射损害的原理。之后,该章介绍了特定 MEMS 辐射老化的背景信息,包括加速度计、微引擎、数字镜像器件和 RF 继电器。最后该章介绍了一些减轻辐射损害的途径和方法。

1.4.2 航天系统和仪器中的 MEMS

在过去 20 年中,微机电系统和纳机电系统(MEMS 和 NEMS)以及其他微纳米技术已经在很多学术和工业上成为活跃的研发领域。从航天系统角度,这些技术领域,具有低容积和低功耗的高功能器件与系统,正是航天技术所需要的。然而这些技术只有少量已经或将要应用在实际飞行中。第 6 章揭示一些限制这些鼓舞人心的技术融入到航天应用的根本原因。该章还对屈指可数的成功案例进行了案例分析。最后,该章推荐了快速且具有成本效率的克服阻碍新技术融合的机制。如在该章和其他章介绍的大量的基于微纳米技术的器件和系统所证明的,限制航天应用多样性的是我们的想象力,从而这也限制了这些应用中微纳米器件和系统的类型的开发。大多数微纳米技术概念均发源于硅集成电路技术领域。这个领域已经非常快速地扩展成为一个多学科领域,它不仅探索新的物理、化学和生物现象,而且应用了宽广和多样的材料系统。

第 7 章讨论微纳米技术在科学仪器中的应用。微机械加工方法的发展使航天器中科学仪器的尺寸和质量不断降低。MEMS 技术的采用非常引人注目,因为它不仅能够降低任务成本而且无需牺牲任务的能力。像监测环境条件的核磁共振 MEMS 探头这种更小型的仪器可以本质上降低星球登陆器的质量和尺寸,从而降低发射成本。MEMS 技术也可以产生

新功能,例如,为韦伯太空望远镜(the James Webb Space Telescope,JWST)研制的多目标光谱仪就是基于 MEMS 开关阵列开发的。我们可以预想一些新的航天任务,如装备了微机械加工仪器、地磁仪、等离子光谱仪的大量小卫星,可用来对地磁场的空间和时间分布(MagConn)进行测定。该章将介绍一些使用了 MEMS 技术的科学仪器范例,这些科学仪器通过 MEMS 技术的应用,实现了新的功能或者性能提高,或者在无需牺牲性能的前提下降低尺寸与质量。

1.4.3 卫星分系统中 MEMS

卫星分系统中的 MEMS 应用的主要场合包括通信、制导、导航和控制以及温控和微推进。第 8 章阐述 MEMS 器件及其在航天器通信中应用的适用性。一个最鼓舞人心的 MEMS 应用就是在航天器微波通信中使用“有源孔径相控阵天线”(active aperture phase array antennas)。该系统包括多组天线,它通过天线相互间不同的相移来实现干涉的构造和解构,从而获得高指向性。这样的系统允许电子操控和发射,具有更好的灵活性而且不会干扰卫星的飞行姿态。这样的相控阵列已经在固态元器件中应用,但是这些系统能耗高,功耗太大,并且具有较大的插入损耗和非线性问题。与之相比,由应用在 MEMS 技术研制的开关构成的移相器微电子机械开关中的调相器具有更小的插入损耗和更低的功耗。MEMS 技术使质量更小、功耗更低、可电子操控的天线在小卫星中的应用成为可能。另外一种不寻常的应用,就是使用微光机电系统(MOEMS),如应用在航天技术中的可操控微镜像阵列。这样,光学系统的高转移率很快能够与该系统的灵敏度相结合,并获得光学通信的全指向控制能力。虽然这些技术是在 21 世纪初期的通信热时获得发展,但它在航天应用中依然很不成熟。该章讨论了几个功能测试和应用。

温控系统是所有航天器和仪器的主要部分,它将航天器的温度控制在正常工作温度范围之内。对于具有较少的温度容积和表面积以及有限功耗的小卫星系统,需要寻找新的方法,通过使用温度开关和有源温控百叶窗使主动温控成为可能。MEMS 能够提供一种低功耗、小尺寸和低质量的解决方案,这正是小卫星所需要的。第 9 章讨论相关的几个案例,包括 NASA 的 ST5 新千年计划(New Millennium Program)上列举的温控开关、温度开关新方法和 MEMS 在热交换中的应用。在更短的开发时间内为多个不同的任务开发多个相同的卫星时,有源温控系统为温控工程师提供了更大的灵活性。

第 10 章讨论使用基于 MEMS 的微系统去应对有关未来任务需求的问题和挑战。可以用来执行航天器制导、导航和控制(guidance, navigation, and control,GNC)过程中飞行姿态监测和控制功能的潜在 MEMS 技术有待开发,并被突出强调,尤其是对微型卫星任务,体积、质量和功耗的需求不能被传统的航天器构件技术所满足。对 MEMS 微系统有关制导、导航和控制空间应用潜力方面的一般性问题进行了讨论,其中包括在模块化多功能 GNC 系统中使用嵌入式 MEMS 陀螺仪和加速度仪,该 GNC 系统是高度集成,结构紧凑的,并且拥有低功耗和低质量。此外,通过对几个选定的专为 GNC 应用开发的最新 MEMS 技术的概括介绍,讨论了 MEMS 技术如何应用于飞行姿态监测和控制策略的问题。该章最后概述了未来的 MEMS GNC 在空间系统应用的插入点。

第 11 章讨论不同的微推进系统,它主要分为电子推进和化学推进两大类。该章针对各种推进系统的 3 个方面进行了讨论:工作原理、最近技术水平以及如何通过 MEMS 或微

机械对其进行实现或实现的可能性。实践证明单纯的通过 MEMS 实现的推进器器件是有限的,未来还需要面对巨大的挑战去实现在其他技术上的飞跃。制造基于 MEMS 的,包括控制系统、推进剂和起飞加速器的推进系统所面临的主要挑战就是其所有元器件的小型化。

1.4.4 MEMS 技术航天领域应用的插入点

本书的最后一部分所阐述的内容与前面 3 部分都不同,它并不是基于历史数据的。尽管有不少 MEMS 器件已经应用在一些实验飞行器上,但是业界目前并没有强烈愿望去发展符合太空需求的 MEMS 器件。在该篇大部分作者都参与了为 ST5 空间任务开发 MEMS 热控开关的工作,并且努力把自己的经验通过该篇传授给读者,希望读者能够对 MEMS 器件的复杂度和微电子集成之间的不同之处有一个基本的理解。

从某些角度来看,每一个器件都与封装相关。为了能够为实现 MEMS 在空间应用中的高性能和可靠性,必须重视 MEMS 的封装。第 12 章介绍封装的问题。作为器件和系统设计的有机组成部分,必须在产品设计的早期阶段,而不是在后期阶段,就将封装因素考虑进来。因为 MEMS 封装的变革来源于集成电路工业,所以两个领域在这些因素上的共通性并不令人惊奇。但是在应用中还是会有很多特殊的要求,这一点在后面的章节中会有所介绍。MEMS 封装和微电子工业的电子封装的一个引人注目的不同在于 MEMS 封装必须提供一个与外界环境进行交互的窗口。而且,比起微电子封装,MEMS 封装必须考虑一套更加复杂的参数,如苛刻的空间环境和发射环境。

第 13 章专门讨论 MEMS 在空间应用中的处理和污染控制,这一点对最终的任务成功至关重要。处理和污染控制问题贯穿于 MEMS 的整个生命周期,从非常基础的硅晶片处理阶段到轨道运行阶段。MEMS 封装要求我们制定处理和污染控制计划,从而在每个程序的层面上保证整体计划的充分性。该章花了很大的篇幅介绍计划的具体内容,帮助读者能够制定和实施有效防止有害影响的处理和污染控制计划。

第 14 章介绍空间环境对 MEMS 器件材料提出的挑战。该章阐述了熟知的失效机制,如摩擦失效、蠕变失效、疲劳失效和断裂失效,还介绍了空间环境诱发的材料不兼容性。该章讨论了环境诱发应力,如撞击和振动、湿度应力(主要是在地球上)、辐射应力、电子应力和温度应力等,并且讨论了这些应力因素组合的可能性。该章最后概述了克服这些因素的设计和材料选择的预防措施。

第 15 章首先介绍几个太空飞行应用中 MEMS 可靠性的评估方法。MEMS 可靠性尚处于发展阶段。可靠性历史数据的缺乏是将 MEMS 引入航天领域应用非常关键的障碍。该章最后介绍了来源于军品微电子领域的、传统的基于统计理论的可靠性分析方法和物理失效机理。

第 16 章阐述关于“质量保证要求、制造和测试”的内容。历史数据和明确的测试方法的缺乏使得 MEMS 在空间应用的最终性能无法得到保证。而明确的军事和航天微电子规范形成了 MEMS 器件质保的基本要求。这个要求包括明确的规格和标准,对 MEMS 特有的测试和终端应用测试方法进行了补充,使它更适用于实际的应用环境。该章的目的在于给读者提供一个指南而不是指示,也就是说,每一个应用都需要制定满足其特定工作环境的保证要求。

1.5 小结

在未来的几年内,会出现大量的 MEMS 与微结构在航天技术当中应用的实例。MEMS 的发展更像 Internet 的成长而不是遵循摩尔定律的微电子的功能性发展。客户化器件会出现在新的应用当中并且会被放置在轨道空间中。正如本书概论所述,迄今为止, MEMS 在空间技术中的应用,依然停留在学校科研阶段,并没有应用在关键嵌入式系统中。由于本书并非基于大量的 MEMS 与微结构在实际飞行中的应用经验总结而来,因此它还尚需改进。但我们希望本书能够为下一代 MEMS 和微系统在航天领域的应用做出些贡献。

As for the future, your task is not to foresee it, but to enable it. (至于未来,你的任务不是预测到它,而是使它得以实现。)

Antoine de Saint-Exupéry, The Wisdom of the Sands

参考文献

1. *Implications of Emerging Micro- and Nanotechnologies Committee on Implications of Emerging Micro- and Nanotechnologies*. Air Force Science and Technology Board Division on Engineering and Physical Sciences, 2002.
2. McComas, D.J., et al., Space applications of microelectromechanical systems: Southwest Research Institute[®] vacuum microprobe facility and initial vacuum test results. *Review of Scientific Instruments*, 74, (8), 3874–3878, 2003.
3. Yao, J.J., et al., Microelectromechanical system radio frequency switches in a picosatellite mission. *Smart Materials and Structures*, 10, (6), 1196–1203, 2001.
4. Micro Thrusters built by TRW Team targets future microsatellites. *Small Times* “Business Wire,” May 16, 2001.
5. http://www.darpa.mil/mto/mems/summaries/2004_summaries/afri.html
6. http://www.ml.afri.af.mil/stories/mlm_asc_03_1429.html
7. Twigg, R., Space system developments at Stanford University — from launch experience of microsatellites to the proposed future use of picosatellites. *Proceedings of SPIE* 4136, 79–86, 2000.
8. Kitts, C.A. and Twigg, R.J., Initial developments in the Stanford SQUIRT program. *Proceedings of SPIE* 2317, 178–185, 1995.
9. Kitts, C., et al., Emerald: A low-cost spacecraft mission for validating formation flying technologies. *Proceedings of the 1999 IEEE Aerospace Conference, Mar 6–Mar 13 1999*, 2, 217226, 1999.
10. Sekler, J., et al., COPS — a novel pressure gauge using MEMS devices for space, European Space Agency, (Special Publication) ESA SP, 439–443, 2003.
11. Sekler, J. and Wobmann, L., Development of an European QCM — outgassing detector with miniaturised interfaces, European Space Agency, (Special Publication) ESA SP, 515–519, 2003.
12. Lafontan, X., et al., The advent of MEMS in space. *Microelectronics Reliability*, 43, (7), 1061–1083, 2003.
13. Hampton, P., et al., Adaptive optics control system development. *Proceedings of SPIE* 5169, 321–330, 2003.

14. Liang, X., et al., Silicon solid-state small satellite design based on IC and MEMS. *Proceedings of the 1998 5th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology*, 932–935, 1998.
15. Tanaka, S., et al., MEMS-based solid propellant rocket array thruster with electrical feedthroughs. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 46, (151), 47–51, 2003.