

引信用MEMS开关 设计方法

■ 刘双杰 郝永平 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

引信用 MEMS 开关设计方法

刘双杰 郝永平 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

引信用 MEMS 开关设计方法/刘双杰,郝永平著.

—北京:国防工业出版社,2018.6

ISBN 978-7-118-11656-4

I. ①引… II. ①刘… ②郝… III. ①引信—弹性元件—设计 IV. ①TJ430.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 136091 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市众誉天成印务有限公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 9 字数 166 千字

2018 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 32.00 元



(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

目前应用在航空航天、汽车电子和弹药等领域上的开关有惯性开关和电子开关两大类,电子开关易受干扰且电子开关一般要使用电子计时器,计时器的关键部件为石英晶体或晶体振荡器。普通的石英晶体在高过载情况下易受损,若采用特殊的抗冲击晶体成本会较高。机械式惯性开关具有成本低、抗干扰能力强的特点。但是,传统的惯性开关采用的是弹簧和质量块结构,体积较大而且由于加工和装配误差,弹簧的一致性很难保证,造成阈值的散布范围大,可靠性和安全性不高。以 MEMS 技术为基础的 MEMS 开关不但体积小、响应快、能够捕捉微弱的信号,而且工艺性能好,适合批量生产,可以广泛应用于通信、宇航、自动化仪器、汽车、军事等领域,能够大大降低系统成本,提高工作效率。

引信用 MEMS 开关使用环境非常恶劣,和其他工程用 MEMS 开关不同,引信用 MEMS 开关要求抗高过载、抗干扰能力强、灵敏度高以及体积小,有时还需要解决弹丸多种姿态碰击目标的发火可靠性问题以及惯性开关通用性的问题。本书针对特殊环境需求,开展了 MEMS 开关相关技术的研究。开关在闭合的瞬间,系统的静电力、弹性力、惯性力、阻尼力等多种物理场耦合作用的结果直接决定开关的闭合与否以及闭合时间、闭合速度等开关状态量,因此多场耦合下器件的物理级模型决定着开关的响应时间、闭合时间以及阈值范围。本书研究了 MEMS 开关的多物理场及耦合现象,针对不同的需求设计了 3 种 MEMS 开关模型,介绍了多弹性支撑环形分布式 MEMS 万向惯性开关的加工工艺流程,研究了开关的检测技术,设计了一种试验冲击台,该冲击台能够通过增加缓冲垫达到增加加速度脉冲宽度的目的。

本书共分 6 章,第 1 章主要介绍本书的研究背景和研究意义。第 2 章对 MEMS 开关进行分类,并且分析了引信用 MEMS 开关的特点。第 3 章针对悬臂梁式的 MEMS 惯性开关工作时受到多个物理场耦合作用的特点,分别分析了结构场(弹性力)、静电场(静电力)以及外部的体积力场(惯性力)的特性;给出计算静电驱动悬臂梁结构变形的 3 种方法,即等效刚度法、模态叠加法和有限元反馈法;分别应用等效刚度法和有限元反馈法求解静电力作用下悬臂梁的变形特性,并比较 3 种方法的优缺点和适用性;建立惯性力和静电力耦合作用下悬

臂梁开关挤压膜阻尼模型,引入表征流体性能的雷诺方程,建立悬臂梁的流-固耦合模型,推导出了在静电力、惯性力耦合作用时,悬臂梁压膜阻尼系数的计算公式。第4章分析了影响引信 MEMS 惯性开关性能的主要因素:开关的响应时间、闭合可靠性以及开关闭合瞬间的接触电阻。第5章设计了3种不同的 MEMS 开关模型。针对引信用开关的通用性要求,基于静电驱动原理,设计了一种具有阈值可调功能的悬臂梁开关,满足了引信零部件通用性的要求,可以适用弹丸对不同目标的打击;针对引信用惯性开关万向性的要求,提出了一种多弹性支撑的环形万向惯性开关,研究了开关万向性的结构设计;建立了多物理场耦合作用下开关的动力学控制方程,推导出加速度阈值和开关结构参数的关系表达式;针对低 g 的要求,提出了一种螺旋线状悬臂梁支撑的低 g 值惯性开关,研究了开关的瞬态动力学。第6章是对环形万向惯性开关这一典型开关的测试技术介绍。

本书由沈阳理工大学的刘双杰、郝永平编写。感谢国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2015AA042700)对本著作的大力支持。

由于作者水平有限,且编写时间仓促,书中难免有错误和疏漏,敬请读者批评指正。

作者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 MEMS 技术的概述	2
1.1.1 MEMS 的概念和特点	2
1.1.2 MEMS 技术的发展	4
1.2 MEMS 技术在军事中的应用	8
第 2 章 MEMS 开关分类	11
2.1 加速度计开关	11
2.2 RF MEMS 开关	13
2.3 机电耦合开关	16
2.4 MEMS 惯性开关	17
2.5 引信用 MEMS 开关的特点	22
2.5.1 目前引信用开关存在的问题	23
2.5.2 引信特殊环境对 MEMS 惯性开关性能需求	24
第 3 章 开关多物理场	26
3.1 结构场	26
3.1.1 变截面积悬臂梁的刚度计算	26
3.1.2 S 形折叠悬臂梁刚度计算	29
3.1.3 S 形折叠悬臂梁刚度的有限元仿真	36
3.2 静电场	38
3.2.1 静电驱动原理	38
3.2.2 静电吸合效应	39
3.2.3 负弹簧效应的影响	41
3.3 静电-结构耦合特性分析	42
3.3.1 等效刚度法静电-结构耦合分析	42

3.3.2	模态叠加法静电 - 结构耦合分析	43
3.3.3	有限元反馈法静电 - 结构耦合分析	44
3.4	阻尼场	49
3.4.1	滑膜阻尼	50
3.4.2	压膜阻尼	51
3.4.3	悬臂梁的流 - 固耦合的压膜阻尼模型	53
第 4 章	影响引信 MEMS 惯性开关性能的主要因素	62
4.1	开关的响应时间	62
4.2	开关的闭合可靠性	64
4.3	开关的接触电阻	67
4.3.1	接触形式的影响	67
4.3.2	接触材质的影响	68
4.3.3	接触电阻的计算	69
第 5 章	典型开关的设计与分析	72
5.1	阈值可调的悬臂梁开关的设计与分析	72
5.1.1	模型的建立	73
5.1.2	开关基本工作原理	74
5.1.3	开关工作性能仿真	77
5.1.4	抗过载性能仿真	91
5.1.5	尺寸参数对开关性能的影响分析	91
5.1.6	加工误差仿真分析	96
5.2	环形无源万向惯性开关的设计与分析	98
5.2.1	开关基本工作原理	99
5.2.2	开关工作性能仿真	101
5.2.3	抗过载性能仿真	109
5.2.4	开关工艺流程	110
5.2.5	开关封装工艺	114
5.3	低 g 值惯性开关的设计与分析	115
5.3.1	模型的建立	115
5.3.2	开关工作性能的仿真	116
5.3.3	低 g 值开关的模态仿真	118

第 6 章 典型开关测试技术	121
6.1 MEMS 器件测试的基本原理与方法	121
6.2 开关静态实验测试	122
6.2.1 尺寸检测	122
6.2.2 接触电阻检测	125
6.3 开关冲击实验测试	125
6.3.1 开关阈值测试	125
6.3.2 开关抗高过载性能测试	126
参考文献	129

第1章 绪 论

从科学发展史上看,人们对自然界各种现象的物理研究基本呈现两级化的发展趋势:一方面是针对宇宙的极大化研究,尺度特征为光年,研究手段以射电望远镜为代表;另一方面是针对原子、分子和电子等的极小化研究,尺度特征为微米、纳米甚至皮米,研究手段以扫描隧道显微镜为代表^[1]。微机电系统(Micro-electromechanical Systems, MEMS)是极小化研究的一个重要方向,是继微电子技术之后在微尺度研究领域中的又一次革命。长期以来,人们不断追求尺度微小型化的装置,以适应生物、环境控制、医学、航天航空、数字通信、传感技术、灵巧武器等领域日益增长的要求^[2]。21世纪以来, MEMS 技术迅速渗透到各个领域,为各领域带来了革命性的变化, MEMS 技术的渗透使器件的功能不断更新,实现许多以前无法实现的功能,也开辟了更多更新的应用领域。今天的 MEMS 与 40 年前的集成电路类似, MEMS 对未来的社会发展将会产生什么影响目前还难以预料,但它是 21 世纪初一个新的产业增长点,则是毋庸置疑的。

MEMS 是由电子和机械组成的集成化器件或系统,它是通过硅工艺、大规模集成技术以及微机械加工技术,把信息传感、数据处理、执行机械以及其他一些微器件按照集成电路的制造原则,以高密度低成本的方式、有机且优化地集成于一体,其组成原理如图 1.1 所示,即将计算、传感与执行融合在一起,发展出了微机电系统^[3]。自问世以来, MEMS 逐步成为人们在微观领域认识和改造客观物质世界的一种高新技术和重要手段。

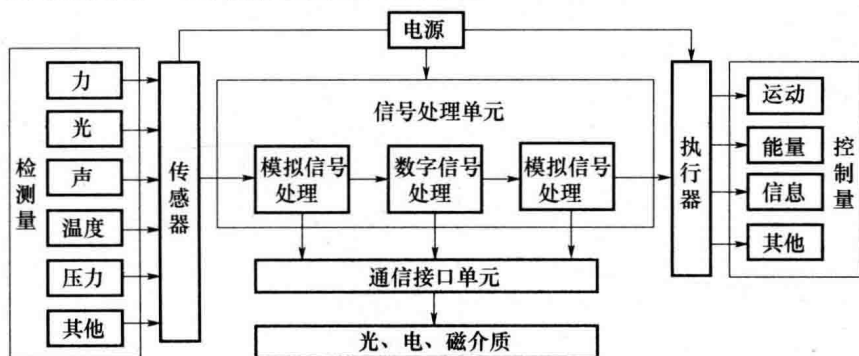


图 1.1 MEMS 组成原理

1.1 MEMS 技术的概述

1.1.1 MEMS 的概念和特点

对于微机械电子系统 (MEMS) 的定义, 还没有一个统一的确切描述, 各个国家基于各自不同的发展背景和认识上的侧重点, 提出了几种不同的定义^[4,5]。在欧洲, 微机械电子系统的不同学科交汇的特点被重视, 通常称为“微系统” (Microsystems), 主要强调微机械电子系统的高度集成和多功性质, 它偏重于系统功能方面的描述, 是 MEMS 的重要发展方向; 在美国, 微机械电子系统称为微型机械电子系统 (MEMS), 更偏重于加工手段和尺度的规定, 是采用 IC 集成电路可兼容技术加工元器件, 实现产品的批量生产; 日本和德国则习惯称为“微型机械” (Micro machine), 尤其是日本, 微型机械是从大机械制造小机械、小机械制造微机械发展而来, 因而更侧重于小尺度条件下机械的复杂性和智能化。

综合以上对 MEMS 的定义, 从 3 个方面对定义进行描述: 从尺度范围看, 公认的 MEMS 尺寸范围为 $0.01\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$; 从功能方面看, MEMS 是组合了两个或多个电、磁、机、光、化学、生物或其他特性, 将传感器、信息处理电路和执行器集成在一起的微型系统, 具有信息感知、信息处理和对外界进行操作与控制等功能; 在加工方法上, 主要采用 IC 集成电路可兼容加工技术, 进行批量化制造。

从半导体集成电路 (IC) 技术发展而来的 MEMS 技术具有集成电路系统的许多优点, 同时又集约了多种学科发展的尖端成果, MEMS 具有以下的非约束性特征^[6]:

(1) 微型化。MEMS 器件体积小, 尺寸在微米到毫米范围之内, 具有重量轻、耗能低、惯性小、谐振频率和品质因子高 (高 Q 值) 的特点^[7]。图 1.2 是 MEMS 加工的齿轮和一只蚂蚁的体积尺寸对比图。完成相同的工作, 微机械所消耗的能量仅为传统机械的十几分之一或几十分之一, 而运作速度却可达其 10 倍以上。

(2) 集成化。MEMS 可以把不同功能、不同敏感方向和致动方向的多个传感器或执行器集成于一体, 形成微传感器阵列或微执行器阵列, 甚至可以把多种器件集成在一起以形成更为复杂的微系统。微传感器、微执行器和 IC 集成在一起可以制造出高性能的 MEMS 器件^[8]。引信中的保险机构采用 MEMS 技术, 将传统立体结构复杂的机构平面化, 制备出 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的镍质保险机构, 该机构集成了微传爆序列、MEMS 加速度计和微机械结构, 在体积缩小的同时, 功能也大大扩充, 且机构的安全性和可靠性也更高^[9]。

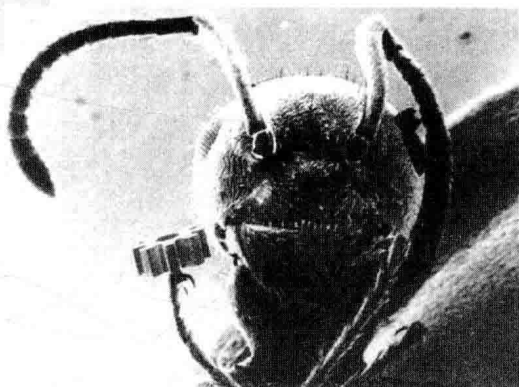


图 1.2 MEMS 齿轮和蚂蚁的体积尺寸对比图

(3) 多学科交叉。广义上讲, MEMS 并不是传统机械电子系统的直接微型化, 在制造工艺、工作原理和材料性质等方面远远超过传统机械电子的范围, MEMS 技术是一种多学科交叉的前沿性领域, 它几乎涉及自然及工程科学的所有领域, 如电子、机械、光学、物理学、化学、生物医学、材料科学、能源科学等。

(4) 批量生产。用 MEMS 加工工艺在一片基片上可以同时制造出成百上千个微机械部件或完整的 MEMS 器件, 生产成本大大降低, 能量损耗以及对环境的污染也大大降低。

MEMS 特点很大程度上反映在其加工工艺的特殊。和传统的机加工工艺不同, MEMS 加工工艺可以加工尺寸更小、结构更为复杂的器件。

MEMS 的加工方法主要有 3 种: 第一种是以美国为首的体硅刻蚀技术, 该技术是利用化学腐蚀方法加工成集成电路的工艺技术对硅材料进行加工, 形成硅基 MEMS 器件^[10]; 第二种是以日本为代表的传统的纯机械加工手段, 即利用较大或大的机器来加工小机器, 然后利用小机器来加工微小机械, 通过微小机器达到目标精度的微小器件^[11]; 第三种是以德国为代表的 LIGA 技术, LIGA 技术分为光刻、电铸、注塑^[12] 3 个步骤。通过利用 X 射线进行光刻, 经过电铸生成所要的模型, 注塑可以批量生产器件。

硅基 MEMS 主要是依照两方面的加工为主线, 分别是表面牺牲层技术(又称表面微加工)和体硅加工技术^[13]。表面微机械加工工艺能够制造附着在衬底表面附近的微结构^[14]。相对于通过物理、化学方式来选择去除衬底的体微机械加工不同, 表面微机械加工没有移除或腐蚀体衬底材料。体硅微加工与表面微加工的区别在于体硅微加工是对衬底的部分选择性去除以形成悬臂梁或膜等机械结构, 或者一些有着独特三维结构的机械结构, 如空腔、通孔、台

等^[15]。根据腐蚀剂的不同,体硅刻蚀技术可分为湿法和干法两种。湿法刻蚀使用液态的化学腐蚀液取出材料,而干法刻蚀采用等离子体或者气相刻蚀剂去除材料。湿法刻蚀速率与衬底的晶向有关,在衬底腐蚀过程中,如果各个方向的刻蚀速率相同,则该过程为各向同性刻蚀。如果各个方向的速率受晶向的影响而不同,则称为各向异性刻蚀^[16,17]。SOI (Silicon - on - insulate) 也是一种体硅加工技术,与其他体硅工艺相比较,SOI 工艺采用全硅结构。SOI 指的是绝缘层上的硅,采用的是具有三明治结构的硅片,最下面是支撑硅片,中间是绝缘层,最上面是薄的硅结构层(厚度从几十纳米到几百微米不等)。绝缘层往往由二氧化硅构成,也称为“埋氧层”,厚度一般几百纳米^[18]。

非硅基 MEMS 加工技术主要包括 LIGA、准 LIGA 等加工技术。LIGA 工艺可以得到深宽比非常大,侧壁表面质量良好的三维精密结构,而且材料可以是金属、陶瓷以及有机材料^[19,20]。用 LIGA 技术可以进行微器件的大批量生产,使成本大大降低^[21]。LIGA 技术已经在微传感器、微光学器件以及其他微器件加工中显示出了无可比拟的优越性。但是,LIGA 工艺需要昂贵的同步辐射 X 光源和制作复杂的 X 线掩模。科技人员为解决这一问题,发明了用紫外线或激光光刻工艺代替同步辐射 X 光深层光刻的工艺^[22],称为准 LIGA 技术。准 LIGA 技术对设备要求较低,具有更高的实用性和灵活性,并且与集成电路有较好的兼容性。在加工深宽比的微金属结构中,准 LIGA 的加工工艺不及 LIGA 工艺所加工的性能和质量,但也能满足微机械制造中许多工艺要求,并且价格低廉,目前研究准 LIGA 技术比 LIGA 技术更加广泛^[23]。

1.1.2 MEMS 技术的发展

MEMS 技术是微/纳米科学技术的一个新兴领域,它的起源与各学科领域交叉并与工业发展有关,其中关系最密切的是半导体集成电路和固态传感器,它们促进了 MEMS 技术的长足发展^[24]。1947 年半导体晶体管的发明为 MEMS 技术的出现奠定了基础。美国物理学家 Richard Feynman 分别于 1959 年和 1983 年发表了“*There's Plenty of Room at the Bottom*”和“*Infinitesimal Machinery*”两篇文章,科学地预见并描绘了微/纳米机械与控制的技术发展趋势^[25,26]。自 20 世纪 80 年代起,MEMS 就引起了世界各国科学界、产业界和政府部门的高度重视,成为发达国家高科技发展的重点方向之一。1982 年美国 U. C. Bekeley 利用表面牺牲层技术加工微型静电马达成功标志着 MEMS 技术进入新纪元。美国模拟器件公司 (ANALOG DEVICES, INC; ADI) 于 1989 年开始对叉指式电容加速度传感器进行研究,1993 年投产,现已形成 ADXL 系列产品,这种低成本集成硅微加速度传感器广泛应用于汽车工业,随后出现的三轴加速度计在军事

工业也得到了广泛应用^[27](图 1.3)。20 世纪 90 年代中期 ICP(电感耦合等离子刻蚀)技术的出现促进了体硅工艺的快速发展(图 1.4)。20 世纪 90 年代末美国 Sandia 实验室发明 5 层多晶硅技术,提高了体硅加工的深宽比,代表了最高水平(图 1.5)。

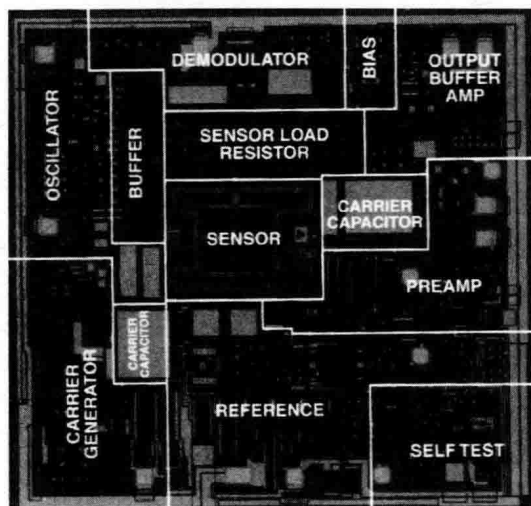


图 1.3 ADI 公司生产的微加速度计 MEMS 芯片

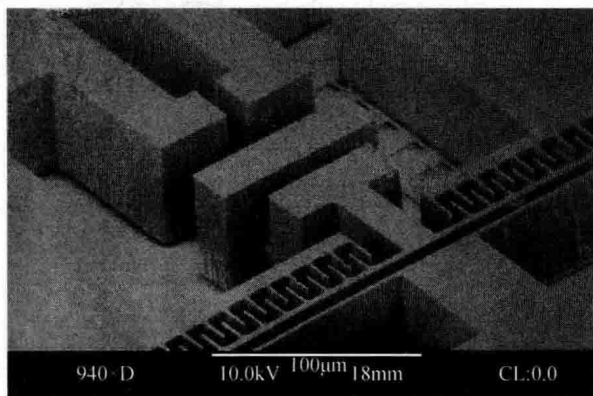


图 1.4 ICP 的体硅工艺制品

进入 20 世纪 90 年代,与 MEMS 相关的研究越来越广泛,MEMS 的触角已延伸到生产和生活的许多角落,如微泵、微阀等微流体器件;压力、加速度、陀螺等传感器件;电泳、DNA 探测等微生物芯片;药物释放系统;硬盘悬挂系统以及光开关等微光学器件。一些 MEMS 器件已经开始商品化,如微型压力传感器、

微型加速度计、微型生物/化学传感器、喷墨打印头以及医学检测传感器 (DNA 芯片) 等^[28,29]。图 1.6 表示的是美国 2003 年各种 MEMS 产品所占的市场份额, MEMS 技术的发展进步, 还将带动与之相关的多个研究领域如微装配、设计技术、材料、微流体、微力学、微摩擦等的研究。据预测, MEMS 的全球市场销售额将会在未来几年大幅增长^[30] (图 1.7)。

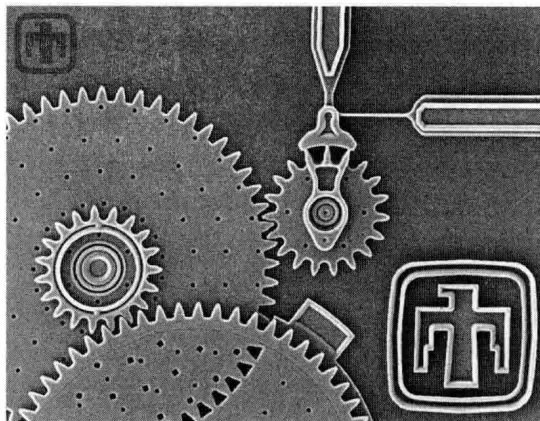


图 1.5 美国 5 层多晶硅技术加工的齿轮

MEMS Market and Industry

Technology Area	Typical Devices/Applications	Companies	Market Baseline (\$Millions)	Market 2003 (Est.) (\$Millions)
Inertial Measurement	Accelerometers, Rate Sensors, Vibration Sensors	TI, Sarcos, Boeing, ADI, EG&G IC Sensors, AMMI, Motorola, Delco, Breed, Systron Donner, Honeywell, Allied Signals	\$350-\$540	\$700-\$1400
Microfluidics and Chemical Testing/Processing	Gene Chip, Lab on Chip, Chemical Sensors, Flow Controllers, Microneozzles, Microvalves	Battelle, Sarnoff, Microcosm, ISSYS, Berkeley MicroInstruments, Redwood, TiNi Alloy, Alfymentrix, EG&G IC Sensors, Motorola, Hewlett Packard, TI, Xerox, Canon, Epson	\$400-\$550	\$3000-\$4450
Optical MEMS (MOEMS)	Displays, Optical Switches, Adaptive Optics	Tanner, SDL, GE, Sarnoff, Northrop-Grumman, Westinghouse, Interscience, SRI, CoreTek, Lucent, Iridigm, Silicon Light Machines, TI, MEMS Optical, Honeywell	\$25-\$40	\$450-\$950
Pressure Measurement	Pressure Sensors for Automotive, Medical, and Industrial Applications	Goodyear, Delco, Motorola, Ford, EG&G IC Sensors, Lucas NovaSensor, Siemens, TI	\$390-\$760	\$1100-\$2150
RF Technology	RF switches, Filters, Capacitors, Inductors, Antennas, Phase Shifters, Scanned Apertures	Rockwell, Hughes, ADI, Raytheon, TI, Aather	(Essentially \$0 as of 1998)	\$40-\$120
Other	Actuators, Microrelays, Humidity Sensors, Data Storage, Strain Sensors, Microsatellite Components	Boeing, Exponent, HP, Sarcos, Xerox, Aerospace, SRI, Hughes, AMMI, Lucas Novasensor, Sarnoff, ADI, EG&G IC Sensors, CP Clare, Siemens, ISSYS, Honeywell, Northrop Grumman, IBM, Kionix, TRW	\$510-\$1050	\$1230-\$2470

■ Companies currently under contract. ■ Companies with past contracts.

图 1.6 2003 年美国市场对 MEMS 器件的需求

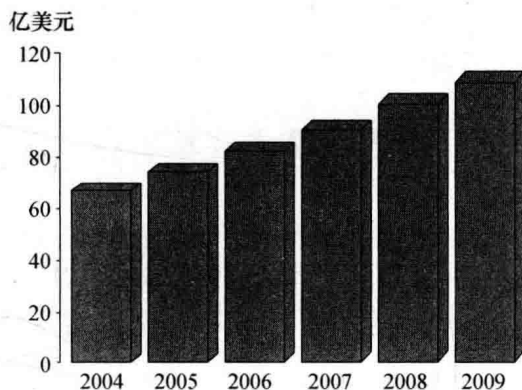


图 1.7 MEMS 产品全球市场预测

国外 MEMS 强国有美国、日本、德国。美国在几年前已经有 DMD 数字微镜器件、加速度计、惯性测量器件、微流体系统等批量产品进入市场,取得市场效益;德国侧重于微机械加工技术,并实现了多种具有前沿性的加工手段。仅德国每年的 MEMS 投入就达 7000 万美元,并且制定了从 1990 年起 5 年时间,投资 4 亿马克的微机械系统技术计划;日本通产省工业技术院将微型机械技术列入 90 年代的 9 个大型计划之一,并于 1991 年成立了微机电系统研究中心,计划 10 年内投资 250 多亿日元发展 MEMS^[31]。

国内的微机电系统研究始于 1989 年,在“十五”期间,MEMS 被正式列入“863 计划”中的重大专项,加上教育部的教育振兴计划、中国科学院的知识创新体系、基金委和科技部新的立项以及地方和企业的投入,总经费约计 5 亿元以上。2002 年国家高科技计划启动了 MEMS 重大专项,投入 2 亿元进行 MEMS 的研究和开发。2006 年启动“十一五”、“863 计划”。中国的 MEMS 研究(含部分纳机电 Nano electro-mechanical system, NEMS)已经形成覆盖多个研究领域的较为完整的体系,主要包含基础理论、微纳工艺、微纳器件、微纳测试、微纳系统和微封装等。中国在 MEMS 研发方面取得了长足的进步,不少成果已经进行了产业化应用,标志性成果有:微惯性测量组合单元(Micro Inertial Measurement Unit, MIMU)及单元器件获得军事上的应用;神舟系列飞船测控系统采用了大量微传感器;多种传感元件用于民用产品;生物芯片、血液生化检测系统、智能药丸和智能内窥镜等开始用于临床^[32]。

据不完全统计,全国已有 120 个单位开展 MEMS 研发,主要加工基地有信息产业部电子 13 所、北京大学微电子所、清华大学微电子所、上海交通大学和上海微系统所等。同时国内在微纳米制造方面已成立了 3 个专业学会,即中国

微米纳米技术学会(一级学会)、中国机械工程学会微纳米制造技术分会、中国仪器仪表学会微器件与系统技术学会^[32]。

1.2 MEMS 技术在军事中的应用

世界各国为了掌握现代战争的主动权,大力发展微型飞行器、战场侦察传感器、智能军用机器人、微惯性导航系统以及智能弹药,通过这些新型的装备来增加武器的杀伤力,军用武器装备的小型化是现代战争的一个主要发展趋势。MEMS 器件由于其体积小、成本低、可靠性高等优点,越来越多的地方已经使用该技术来改进武器性能。为了在战场上取得压倒性的技术优势,MEMS 技术的发展程度被各国纳入了衡量军事的一个标准,也正是如此,MEMS 技术近年来得到了飞速发展。当前,MEMS 技术已经在海陆空战场以及空间技术方面都得到了应用^[33,34]。比较典型的有导弹导航系统、战场生化物质检测装置、后勤物资射频寻迹器件、鱼雷引信系统,以及微小型卫星系统等。这些微型器件大大提高了军队的作战能力,降低了无谓的生命财产损失。

MEMS 在军事上应用于如下领域:

(1) 武器制导和个人导航芯片上的惯性导航组合。应用 MEMS 技术制造的微惯性测量组合(MIMU),没有转动的部件,在寿命、可靠性、成本、体积和质量等方面跟常规的惯性仪表比起来,都有很大的优势。美国陆军已在 81mm 迫击炮弹和“神剑”155mm 炮弹上进行了试验,美国海军也正在研究低成本的惯性测量单元,用于鱼雷的惯性制导^[35]。

(2) 战斗机智能蒙皮用作襟翼附着在飞行器表面,通过偏转襟翼改变湍流结构可获得更好的空气动力学性能。美国国防高级研究计划局还在开发机翼上微喷管,发动机喷出的空气通过机翼下方的微喷管向外吹散,可以增加机翼下方的空气流量、增加升力,这一技术还适用于微型飞行器的飞行控制^[36]。

(3) 微型飞行器(MAV)用于基本侦查。微小的尺寸使得 MAV 灵活并且易于隐蔽,同时也便于单兵携带,更加的适应复杂环境的小兵种作战^[37]。

(4) 抗冲击的高 g 值加速度计。其测量范围可达到上万 g 甚至十几万 g ,在智能弹药引信中用于最佳起爆控制,其尺寸和重量可大大减小,能满足引信设计微型化的需求^[38]。

(5) RF MEMS 开关在智能天线中的应用。通过控制开关的通与断来实现信号沿不同路径传播,通过这种方式能够实现多频段多极化的功能,且 RF MEMS 开关与微带贴片天线集成,也能实现多频段多极化功能,辐射效率高,在

军事侦查、制导等领域具有广阔的应用前景。

(6) MEMS 引信技术。引信是武器系统中的重要部件,它通过对环境、目标进行探测获得信息并进行处理和识别信息,实现对引信的安全状态控制和最佳起爆控制^[39]。

采用 MEMS 技术,可以开发小型化、低成本、高安全性和可靠性的复杂保险系统,从而一改传统引信系统的体积大、重量重、结构复杂、功能难以复合等缺点,将会使引信技术产生一个质的飞跃。

MEMS 引信主要包括引信用 MEMS 环境传感器、MEMS 执行器(保险机构)和微传爆序列(飞片雷管)。环境传感器可对发射后的弹道环境进行探测,通过信号处理器识别正常发射环境、非发射环境以及非正常发射环境。

环境传感器有加速度微传感器、微陀螺、温度微传感器、压力微传感器、声微传感器、磁微传感器等。加速度微传感器可用于检测发射时弹的加速度、飞行时弹的减加速度以及转速、弹的倾角测量,也可以用于弹在侵彻目标时,侵彻深度的确定和穿透介质层数的探测;微陀螺可用于确定弹的顶点或弧段飞行信息;温度微传感器可用于测量弹在飞行时由于与空气的摩擦而使引信头部局部范围温度的变化信息;压力微传感器可用于测量弹在飞行中引信头部所受的迎面空气压力,也可通过检测水的压力,确定鱼雷的入水深度^[40]。除以上介绍的传感器外,还有一种 MEMS 惯性开关(又称为 g 开关、加速度开关)能够感知加速度信号,并受控于加速度阈值,经多力耦合作用,执行开关机械动作^[41]。MEMS 惯性开关不需要电能源捕捉信号的变化,且能够实现物理意义上的“闭合”或“断开”,外接电路简单,抗干扰性能强,万向的惯性开关还能够解决弹丸大着角碰目标不易发火的问题。

引信中的保险机构是引信系统的重要组成部分。从 1994 年美国海军水面武器中心 Indian Head 分部开始对用于鱼雷的 MEMS 引信安保机构进行研究至今,美国专利、文献以及产品中提到多种 MEMS 保险机构^[42-46]。图 1.8 是美国海军水面武器中心 Indian Head 分部研制的用于鱼雷的 MEMS 引信安全保险机构^[47],该机构融合惯性执行器、流量传感器、碰撞传感器和飞片雷管于一体,不仅使引信体积大大缩小,安全性和可靠性也得到较大提高,引信更智能。

基于 MEMS 技术的各种高技术武器的产生与发展,将改变传统的作战战略和战术概念,一种“以小胜大、以少胜多、以无形胜有形”的未来作战模式将呈现在未来的战场上^[48]。