

高等学校通用教材

微机械电子系统及其应用

刘广玉 樊尚春 周浩敏 编著



这种微型侦察机名为“微星”，长度仅为15厘米，质量也只有200克左右。



北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

高等学校通用教材

微机械电子系统及其应用

刘广玉 樊尚春 周浩敏 编著

北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

内 容 简 介

本书综合当前公开发表的大量有关微机电系统(MEMS)的科技文献和我们近几年研究工作的成果,主要介绍当今微机电系统的内容、应用及其发展。内容包括微机电系统的组成和应用、微机电系统功能材料、微机械制造技术、微机械执行器、微机械传感器及微机械弱信号检测与处理6部分。

全书内容丰富,图文恰当,新颖实用。可作为高校有关专业研究生和高年级大学生的教材,也可供检测与控制等微工程领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微机械电子系统及其应用/刘广玉等编著. —北京:
北京航空航天大学出版社,2003.2

ISBN 7-81077-183-3

I. 微… II. 刘… III. 微型—机电系统
IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 078046 号

微机械电子系统及其应用

刘广玉 樊尚春 周浩敏 编著

责任编辑 王 瑛

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: bhpres@263.net

河北省涿州市新华印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:12.625 字数:283 千字

2003 年 2 月第 1 版 2003 年 2 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 7-81077-183-3/TP·104 定价:16.00 元

前 言

微机械电子系统,即微机械技术,是20世纪80年代后期国际上兴起的一项高技术。其主要特征是尺度微小。器件尺寸一般在微米、亚微米乃至纳米量级。如此微小器件的实现,是制造技术上的一场革命。它在微机械发展过程中占有主导地位,起着关键作用。一旦攻克微机械制造技术这一关,诸多领域的技术革命即可取得巨大成功。

微机械技术将是一项新兴的产业,会优先在生物、医疗、航空、航天、电子产品、过程控制及测试技术等领域获得广泛的应用。

微机械技术发展迅速。目前全球计有300余家制造微机械的企业,美国、日本及德国居前3位。学术界大量的研究论文发表在诸多期刊和会刊上。著名期刊有 *Journal of microelectromechanical systems*, *Journal of micromechanics and micro-engineering* 及 *Sensors and Actuators*; 而工程书籍和教材形式的出版物则极少。

作者综合了当前公开发表的大量文献以及近几年的科研成果和经验,编著了此书。此书介绍当今微机电系统的核心内容及其发展,重点放在微机电系统和器件的工作原理、结构形式、设计参数、制造技术、输入到输出的微弱信号检测、使用特性及应用场合等方面;借助图形、表格,形象化说明讨论的内容;力求文字简洁和避免过多的数学推导。

全书共6章:第1章,微机电系统的组成和应用;第2章,微机电系统功能材料;第3章,微机械制造技术;第4章,微机械执行器;第5章,微机械传感器;第6章,微机械弱信号检测与处理。其中第1,2,3,4章由刘广玉教授编写,第5章由樊尚春教授编写,第6章由周浩敏教授编写。全书由主编刘广玉教授统稿、整理及补充,并承蒙北京理工大学樊大钧教授审阅,提出了一些宝贵意见,作者做了认真修改。在此深表感谢。

本书编写过程中,尽管作者已做了很大努力,但由于水平所限,必会有不妥之处,敬请读者批评指正。

本书可作为有关专业高年级大学生和研究生教材,也可供从事检测与控制等微工程领域工作的科研和技术人员参考。

编 者
2002年5月

目 录

第 1 章 微机电系统的组成和应用

1.1 引 言	1
1.2 微机电系统的特征	2
1.3 微机电系统的材料和制造技术	3
1.4 微机电系统的测量技术	4
1.5 微机电系统的应用	5
1.5.1 在航空航天方面的应用	6
1.5.2 在生物医学方面的应用	8
1.5.3 在微流量系统方面的应用	11
1.5.4 在扫描探针显微术方面的应用	12
1.5.5 在信息科学方面的应用	12
1.5.6 在微光学方面的应用	13
1.6 结 语	14
思考题	15
参考文献	15

第 2 章 微机电系统功能材料

2.1 概 述	16
2.2 硅材料	16
2.2.1 单晶硅	16
2.2.2 多晶硅	18
2.2.3 硅-蓝宝石	21
2.2.4 化合物半导体材料	22
2.2.5 SiC 薄膜材料	23
2.3 压电材料	24
2.3.1 压电效应	24
2.3.2 石英晶体	24
2.3.3 压电陶瓷	26

2.3.4 聚偏二氟乙烯薄膜·····	29
2.3.5 ZnO 压电薄膜·····	31
2.4 磁致伸缩材料·····	33
2.5 形状记忆合金·····	34
2.6 电流变液和磁流变液材料·····	35
2.7 膨胀合金·····	36
2.8 金刚石材料·····	37
2.9 纳米相材料·····	38
思考题·····	40
参考文献·····	40

第3章 微机械制造技术

3.1 概 述·····	41
3.2 硅微机械制造技术·····	41
3.2.1 体型微加工技术·····	41
3.2.1.1 化学腐蚀·····	41
3.2.1.2 离子刻蚀·····	52
3.2.2 表面微加工技术·····	55
3.2.2.1 薄膜生成技术·····	55
3.2.2.2 牺牲层技术·····	59
3.3 LIGA 技术和 SLIGA 技术·····	63
3.3.1 LIGA 技术·····	63
3.3.2 SLIGA 技术·····	64
3.4 特种精密机械制造技术·····	64
3.5 固相键合技术·····	66
3.5.1 技术要求·····	66
3.5.2 键合方法·····	71
3.5.2.1 阳极键合·····	71
3.5.2.2 Si-Si 直接键合·····	74
3.5.2.3 玻璃封接键合·····	76
3.5.2.4 金属共熔键合·····	78
3.5.2.5 冷压焊键合·····	80
3.5.2.6 键合方法小结·····	80
3.6 微机械加工技术集合·····	81

思考题	82
参考文献	83

第4章 微机械执行器

4.1 概 述	84
4.2 微电机	84
4.2.1 静电力驱动变电容式微电机	84
4.2.1.1 步进微电机	84
4.2.1.2 同步微电机	89
4.2.2 静电驱动谐波式微电机	90
4.2.3 电悬浮微电机	92
4.3 微泵和微阀	95
4.3.1 微流量控制系统	95
4.3.2 微型泵	96
4.3.2.1 有阀微型泵	96
4.3.2.2 无阀微型泵	106
4.4 梳状微谐振器	114
4.4.1 梳状微谐振器的结构和工作原理	114
4.4.2 谐振梳弹性系统的固有频率	116
思考题	119
参考文献	120

第5章 微机械传感器

5.1 概 述	122
5.2 硅压力微传感器	123
5.2.1 硅电容式压力微传感器	124
5.2.1.1 工作原理	124
5.2.1.2 微电容测量电路	125
5.2.1.3 性能和应用	130
5.2.2 硅谐振式压力微传感器	132
5.2.2.1 工作原理	132
5.2.2.2 电阻热激励、电阻检测硅谐振梁式压力微传感器	133
5.3 硅谐振式加速度微传感器	141
5.3.1 概 述	141

5.3.2 电阻热激励、电阻检测硅谐振式加速度微传感器·····	142
5.3.2.1 传感器微结构·····	142
5.3.2.2 开环特性测试和闭环回路设计·····	144
5.4 0 位平衡式硅电容加速度微传感器·····	149
5.5 硅谐振式角速率微传感器·····	150
5.5.1 概 述·····	150
5.5.2 谐振陀螺的工作原理·····	152
5.5.3 静电激励、电容检测硅谐振式微陀螺·····	154
5.5.3.1 原理结构·····	154
5.5.3.2 开环检测·····	156
5.5.3.3 闭环检测·····	158
思考题·····	160
参考文献·····	161

第 6 章 微机械弱信号检测与处理

6.1 概 述·····	162
6.2 微弱信号检测技术·····	163
6.2.1 滤波技术·····	163
6.2.1.1 无源低通滤波器·····	164
6.2.1.2 有源低通滤波器·····	165
6.2.1.3 巴特沃兹滤波器·····	166
6.2.1.4 高通、带通及带阻滤波器·····	168
6.2.2 频域信号的相关检测技术·····	170
6.2.2.1 自相关函数·····	170
6.2.2.2 互相关函数·····	170
6.2.2.3 功率谱密度函数·····	171
6.2.2.4 频率响应函数和相干函数·····	171
6.2.2.5 相关技术对噪声抑制的应用·····	172
6.2.3 锁相环技术·····	174
6.2.4 时域信号的取样平均技术·····	175
6.2.5 开关-电容网络·····	177
6.2.6 抗干扰的技术措施·····	178
6.3 微弱信号检测技术的应用·····	179
6.3.1 光纤激励、检测硅谐振膜的弱信号测量电路·····	179

6.3.2 谐振式微传感器频率特性测试中的弱信号检测电路	180
6.3.2.1 频率特性开环测试系统	182
6.3.2.2 微弱信号检测	184
6.3.2.3 电阻热激励、电阻检测硅谐振梁式压力微传感器闭环电路设计.....	188
6.3.3 微机械隧道效应型加速度传感器的弱信号检测电路	188
6.3.4 微弱电容信号的检测电路	190
思考题.....	192
参考文献.....	192

第 1 章 微机电系统的组成和应用

1.1 引 言

微机械、微系统或微机械电子系统(微机电系统)是大意相同的 3 个名词,兴起于 20 世纪 80 年代后期,其含义十分广泛。一般可定义为由微米(10^{-6}m)和纳米(10^{-9}m)加工技术制作而成的,融机、电、光、磁以及其他相关技术群为一体的,可以活动和控制的微工程系统。目前,人们泛称的是微机械电子系统(Microelectromechanical Systems, MEMS)。它是以微传感器、微执行器以及驱动和控制电路为基本元器件组成的、自动性能高的、可以活动和控制的、机电合一的微机械装置。其基本特点是体积小、质量轻、功耗低。用它进行的操作是极其微细的,有的操作已经到了单个细胞乃至分子范围;有的微型敏感元件能敏感到单个原子,能进行原子量级的探测。如此细微的工作状况,用肉眼是不能直接分辨的,必须借助显微术或专用仪器来观察和控制。

传统(宏观)机械的最小构成单元通常是 mm 量级,而微机械的最小零件尺寸要下降 3~6 个数量级,即进入到 μm 和 nm 的尺度范畴。

微机械装置不仅节省空间和原材料,还节省能源。以微传感器在航空航天上的应用为例:现在一架航天飞机需要安装 3 000~4 000 只各种用途的传感器,若用质量只有几 g 的微传感器取代那些 kg 级质量的传统传感器,显然在减轻飞机质量,减少能源供应和储存,增加航程及可携带更多的有用设备等方面都有积极的作用。

微机电系统是国际上近十余年来新兴起的一项热点技术。它的由来和产生不是偶然的,是人类社会和科学技术持续发展的必然结果。人类社会的日益进步,人民生活水平的日益提高,科学技术的日益发展,都需要大量资源的支持。大量资源的耗散,促使自然资源的开发日益扩大。这不仅会使资源日渐枯竭,出现资源危机,还将严重地破坏生态环境,使其失去平衡,给人类造成灾难。发展和应用微机电系统和微型技术,可以满足人类社会实现低能耗、高效率、低成本以及保护环境和维持生态平衡的愿望。

科学技术的进步,是社会繁荣的动力。在宏观技术方面,人类已经取得了显著成果,推进了社会发展,创造了人类文明。为了社会的持续发展,科技工作者们正在向微观技术世界进军,包括从原子、分子尺度出发,研究自然界各种现象的行为和规律。微机电系统研究的兴起,集中地反映了人类开拓微观技术世界这一发展趋势。

微机电系统不像集成电路(IC),只涉及单一的电学参数,而是涉及机、电、光、磁、热等多门学科范畴,并模糊了学科界限的边缘技术;所以对它的研究,绝不是简单地在原有技术上做适

当的改进,而是要求开发者具有新的思维。

尽管研究和发展 MEMS 技术的难度很大,但它对人类未来的影响已吸引了众多科学家和工程师们对它的不懈追求与探索。在实验室里,他们力求创造出能改造传统工程系统的各种微机械装置,以满足人类社会的持续发展,特别是满足不断追求尺寸微型化的航空航天、生物工程、临床医学、信息技术、环境监测及预防等诸多方面的迫切需求。

可以预见,将来人类的活动会与微机械技术(或称微型技术)密切相关,它将影响人类生活和社会的各个方面。概括地说,微机械技术是 21 世纪引人注目的技术,它将使世界发生改变。

值得指出的是,尽管微技术的应用将遍及各种工程和科学领域,但它不能完全取代宏技术。微技术有微的妙处,宏技术有宏的作用,二者将相伴共存。不过,各类宏技术如舰艇、飞机、汽车等传统装置本身,待挖掘的技术潜力已近殆尽,一味地追求它们本身的最优化已无意义,而应将重点转移到把微技术植入传统装置中,提高它们的数字化、信息化及智能化水平,以提高其综合效能。

1.2 微机电系统的特征

尺寸微小是微机电系统的基本特征。当尺寸小到 μm 至亚 μm 量级时,会产生微尺寸效应。它的影响将反映到诸如结构材料、设计理论、制造方法、在微小范围内各种能量的相关作用及测量技术等许多方面。也就是说,工程上常用的尺寸缩放法不适用于由微尺寸元器件组成的微装置;因而,传统的设计理论、方法及一些物理定律不能完全套用,许多理念需要更新和重新建立,必须从新的构思出发去探索微机械由于尺寸效应形成的一些特殊现象和规律。如果不仔细研究微尺寸效应带来的物理现象,就很难构造出完美的微机械装置。

- 微尺寸效应对于元器件间的作用力有很大影响。随着尺寸的减小,与尺寸 3 次方成比例的像惯性力、体积力及电磁力等的作用将明显减弱;而与尺寸 2 次方成比例的像粘性力、表面力、静电力及摩擦力等的作用则明显增强,并成为影响微机械性能的主要因素。在微机械中,又由于表面积与体积之比相对增大,使热传导的速度也相对增加。

所以在微机械设计中,对元器件间作用力的分析、控制及利用不同于传统的宏观机械。如在传统的电机设计中,多利用电磁力驱动;而在微型电机设计中,则多利用静电力驱动。

又如微机械的能源很小,因而应尽可能地降低摩擦阻力造成的能耗,必要时可利用悬浮机理等技术等措施实现 0 摩擦。最大限度地降低摩擦、磨损是保证微机械功能和寿命的关键,因而研究微机械中摩擦、磨损的特性与机理也就成为一项主要研究课题。

- 随着元器件尺寸的减小,元器件材料内部缺陷出现的可能性减小,因而元器件材料的机械强度会增加。所以微型元器件的弹性模量、抗拉强度、疲劳强度及残余应力均与大零件有所不同。

- 由于微尺寸效应,导致微机电系统的惯性小、热容量低,容易获得高灵敏度和快响应。

● 由于微尺寸效应,导致微机电系统的前端装置如微传感器的输出信号十分微小,传统的测量工具和仪器难以实现如此微弱信号的检测,必须创造新的测量设备。

● 微机电系统尺度的缩小,集成化程度的提高,会导致工序增多,成本增高;所以应在试制前对整个微机电系统的器件、工艺及性能进行模拟分析,对各种参数进行优化,以保证微系统的设计合理、正确,降低研制成本,缩短研制周期。显然,传统的设计方法(基本上为试凑法)已难以满足上述新要求,必须寻求新的设计途径。其中最流行的就是微机电系统的计算机辅助设计(MEMS CAD)。运用 MEMS CAD,除了借鉴已有的机械 CAD 和电子 CAD 工具外,还必须针对特定的微系统,开发专用的 CAD 建模软件。这方面有大量的工作要做。

总而言之,微机电系统自身的一些特征和内在规律,几乎都是由微尺寸效应引发而生的,从而形成了微工程技术体系。

1.3 微机电系统的材料和制造技术

传统的机电系统,用得最多的是金属材料,采用传统的机械制造工艺制作而成;而微机电系统最常用的则是硅及其化合物材料。

● 硅是容易获得的超纯无杂的低成本材料,有极好的机械特性和电学特性,非常适合制造微结构;

- 便于利用集成电路(IC)工艺和微机械加工工艺进行批量生产;
- 硅微结构便于和微电子线路实现集成化。

集成电路制造技术,包括版图设计、刻蚀工艺、薄膜工艺以及模拟技术等已发展得较为成熟,能成功地用于微电子器件和集成电路的制作,但它不能完全满足微机电系统及其器件的制造。

微机电系统及器件多种多样,像各种原理和结构的微传感器、微执行器及微结构等,不仅和微电子之间有交联,还和外界其他物理量相互作用,并且为体型结构。例如,硅膜片在压力作用下会发生变形;悬挂在硅梁上的质量块受加速度作用后,会使硅梁变形,质量块也随之往复运动,而硅压力传感器和加速度传感器就是在上述机理的基础上分别设计和制造而成的。其间,传感器的敏感结构要和硅衬底相连,硅衬底还要装配在壳体上,传感器总体形成层与层之间互不相同的三维体结构;所以,微机电系统及器件的制造,远非 IC 加工工艺所能及,必须在 IC 工艺基础上扩展一些专用的微机械加工技术,包括体型加工技术、表面加工技术、构件间的相互组装技术、键合及一些封装技术等,才能制造出具有一定性能的微器件和微机电系统。

其实,微机电系统及器件的不同结构,主要取决于掩膜版图的设计;它们的制备工艺和过程则是类同的。可归结为:

- ① 掩膜版图的设计和制造;
- ② 利用光刻版术将平面图形从掩膜版上转移到立体结构的硅晶片表面上;
- ③ 通过 IC 工艺和专用的微机械加工技术,制造出所需要的微机电器件及系统(详见本书

第3章);

④ 封装和测试。

必须指出,性能优良的微器件及系统,是经过不断改进版图设计和加工工艺而得到的,尤其是微加工工艺。如果没有高精度(nm级)的微加工工艺,版图设计、改进得再理想,也不能获得性能优良的微器件及系统。换言之,高精度的微加工工艺是得到性能优良的微器件及系统的头等关键技术。

1.4 微机电系统的测量技术

由于微尺寸效应,导致微传感器、微执行器等输出量衰减到微弱信号级,如运动位移、振幅及形变小到亚 μm 和nm量级。将它们变换成可供接收和处理的电信号时,相应的电压量小到 μV 、亚 μV 乃至nV,电流量小到nA,电容量小到(0.1~0.001)pF。为了把如此微弱的有用信号从强噪声背景下提取出来,从设计上考虑,必须遵循的原则是:

- 设计合理的集成检测电路布局;

- 检测电路必须与微机械装置(如微传感器)尽量靠近,最好能与传感器实现单片集成或混合集成;

- 尽量减短微系统的尺寸链。

目的都是为了尽量避免寄生信号的产生和干扰。

对于如此微弱信号的检测,目前还缺少标准化的测量方法和设备;因此,研究和开发微弱信号的测量技术和相应的设备,是保证微机电系统取得成功的另一项关键技术。

还有,微机电系统器件的制造,涉及到nm量级的加工精度。器件本身的几何量检测,都是传统的测量工具难以实现的。像如何测量微器件的尺寸和结构的误差,如何评价器件表面的原子和分子的几何结构,如何评价薄膜表面的平整度和起伏等,都是摆在测量技术面前的重要课题。

目前,能够在nm范围内进行测量的仪器,是20世纪80年代中前期基于量子隧道效应创造的扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscopy, STM),或称扫描探针显微镜。

其工作原理是利用超细的金属纳米探针(纳米尖)和被测样件表面的2个电极,当探针尖与样件表面非常接近(如1nm)时,在探针与表面形成的电场作用下,将产生隧道电流效应,即电子会穿过二者之间的空隙从一个电极流向另一个电极。隧道电流的大小与空隙大小有关。当空隙增大时,电流指数形式衰减,若空隙增大0.1nm,电流减小1个数量级,灵敏度极高。测出探针在非常接近的被测样件表面上扫描产生的隧道电流变化,即可得知样件表面在nm尺度内各点位置的微细变化,即表面的三维空间形貌。

在STM的基础上,现已发展了多种扫描探针的显微技术,以适应不同领域的需要。这些显微技术都是利用探针与样件的不同相互作用,探测表面或界面在nm尺度上表现出来的微

细变化。如原子力显微镜(Atomic Force Microscopy, AFM),就是利用探针和被测表面之间微弱力的相互作用这一物理现象,对被测样件表面进行扫描测量,得知纳米形貌。AFM的探测力极其微弱,在 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ N之间,形成与被测表面轻微接触或接近于非接触(相互作用力仅为几 nN)的模式。这种程度的接触模式是不会使样件表面产生形变和损伤的。

AFM除与STM一样,可以对导体进行探测外,还可以用于绝缘体表面的探测;因而具有更广的适应性。例如图1-1所示,是用AFM扫描测量出的多晶硅芯片的表面粗糙度。尽管有21 nm的凹凸不平度,但给人的直观感觉仍是非常光滑的表面。

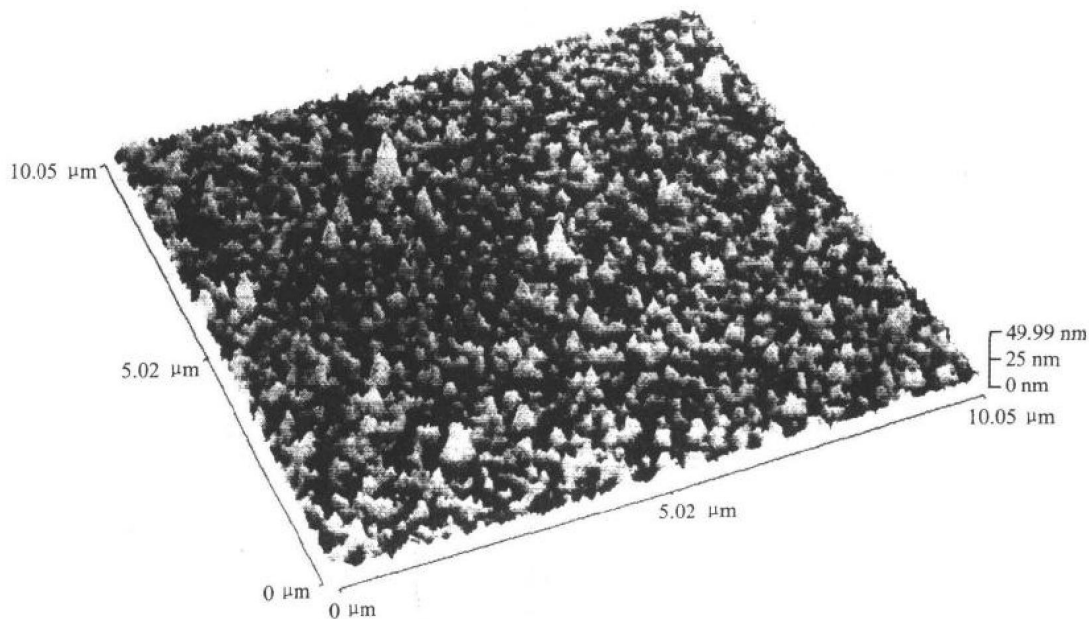


图 1-1 AFM 扫描测量结果示例

还应指出,STM和AFM扫描显微镜可视为微型坐标测量仪,除含有核心部分——纳米探针外,还含有扫描装置、信息处理及图像分析部分。扫描装置确保探针相对样件表面产生三维(x, y, z)扫描运动;信息处理和图像分析部分除对探针得到的信息进行处理外,还应控制三维扫描系统正确工作,最终给出样件表面的三维图像特征。

1.5 微机电系统的应用

综上所述,微机电系统及微器件在各种工程和科学领域的应用大有发展前途。可用它实现信息获取(微传感器)、信息处理(微电子技术)乃至信息执行(微执行器)等多种多样的功能。

优先应用的主要领域包括航空航天、生物医学、微流量控制、微探头和显微技术、信息科学、微光学技术、微机器人及环境监测等。它是改变人类生活的一项尖端技术。

1.5.1 在航空航天方面的应用

微机电系统在飞行器的电子设备、飞行器设计及微小卫星等技术方面都有重要的应用。

图 1-2 所示为机载分布式大气数据计算机,由全压-静压-攻角为一体的多功能微型大气数据探头(或称组合式空速管)、微型压力传感器(静压、差压及动压)以及信号处理单元直接组成,并封装在壳体内,形成一个微机电系统。多功能微型大气数据探头把感受的大气数据直接输入相应的微传感器,并将其变换为电信号,再经信号处理单元解算和补偿后,以总线信号方式提供给飞机上飞控、火控、导航及环境控制等各系统使用。与现在飞机上使用的常规型分离式大气数据计算机相比,其体积和质量下降 1~2 个数量级。减轻质量和减小体积,对于飞机和空间飞行器来说是至关重要的。

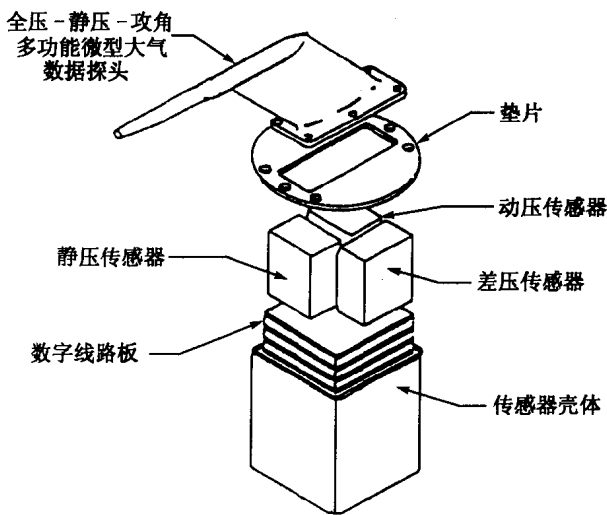


图 1-2 分布式大气数据计算机

类似情况,集合微陀螺、微加速度计及其信号处理单元,便可构成微型惯性导航系统。该系统也是以硅材料为主,用微机械加工工艺制造而成的,其体积和质量比常规惯性导航系统至少下降 2~3 个数量级。这种微型惯性系统,在未来飞机和航天器的姿态控制、测量及导航方面具有重要的应用价值。

航空航天常用的压力微传感器、微陀螺及微加速度计的工作原理和构造,可参见本书第 5 章。

现代飞机和飞行器的结构更多地采用复合材料,已成为发展趋势。尤其引人注目的是,在复合材料内分布嵌入微机电系统功能单元(微传感器+微执行器+微电子线路),便可得到期

望的、程序可控的材料和结构组态。这些材料和结构被称为 Smart(机敏)材料和 Smart 结构。这种 Smart 结构具有自我监测和检测的功能,能连续地对结构的应力、振动、声、加速度、气动阻力及结构完好性(或损伤)等多种状态实施监测和检测。例如,若将能测量和控制气动涡流和扰动气流的 MEMS 单元分布嵌入飞机襟翼表面,使其成为主动柔性表面,便可对气流扰动或涡流形成主动抑制,就能明显地降低气动阻力,改善飞机飞行的机动性,参见示意图 1-3。类似的主动活动表面也可用于转动直升飞机的桨叶、燃气轮机的叶片,以达到减振降噪,提高功效的目的。

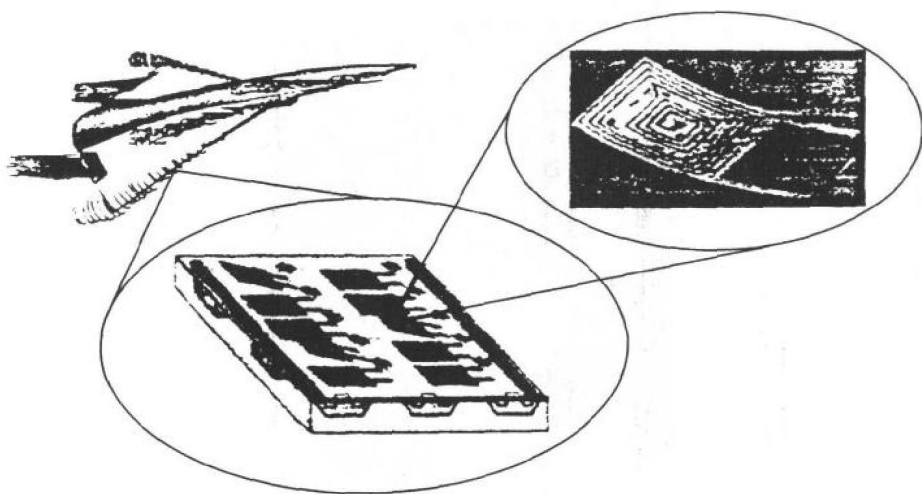


图 1-3 气动扰动控制的柔性襟翼示意图

可以预见,利用具有程序可控、动态可调的 Smart 材料和结构继而可以研发活动机翼的飞机。这种新型飞机会像鸟儿一样飞翔,用活动机翼调节空气阻力,达到节省燃油、提高性能的目的。

Smart 材料和结构在其他方面的重要应用:

- 有源和无源结构的振动阻尼及其控制;
- 有源和无源噪声阻尼及其控制,像潜艇用 Smart 结构表面(蒙皮),即可提高潜艇的减噪功能和隐身性能;
- 桥梁、高速公路及地震结构的监测与报警等。

微机电系统对发展微小卫星起着重要的促进作用,它的应用使微小卫星的质量降至 10 kg 以下。不久的将来,含有多种微传感器、微处理器、天线、微型火箭及微控制器等在内的集合体,将会用微米和纳米制造技术把它们制作在同一块硅基片上,成为单片微小卫星。这些微小卫星发射上天后,形成星团(或称浮动层)。这个星团就是分布在一定轨道上的微小卫星结构体系,可以保证在任何时刻对地球上的覆盖区进行监视。

微机电系统也推动了无人驾驶微型飞机的实现。图 1-4 给出的是利用微、纳米制造技术制造出来的微型飞机样机。可以放在手掌上的这种微型飞机的翼展仅有 15 cm, 靠体积仅有纽扣大小(d (直径) <1 cm)的涡轮喷气发动机或微型马达来驱动。这种微型飞机可用于常规军用侦察机监视不到的巷道和阴山背地的地方侦察, 搜集情报。

现在, 仅有 1 cm 大小的直升飞机样机已经被制造出来, 由 2 台微型马达提供动力。



图 1-4 微型飞机样件

尽管微型飞机尚未完全达到可实战应用的阶段, 但军事部门对制造微型飞机表现出极大的兴趣。预计将来, 当有一只像小鸟或蜜蜂一样的飞行物在你头上盘旋时, 你要注意, 这也许是有有人在监视你。

1.5.2 在生物医学方面的应用

微传感器、微执行器及微系统在生物医学和工程方面的应用, 对促进医疗器械的改善, 加速疾病的预防、诊断及治疗都有重要作用。主要应用场合:

- 腔内压力监测;
- 微型手术;
- 生物芯片;
- 细胞操作;
- 仿生器件等。

腔室压力测量已应用于临床, 如颅内压力、胸腔压力、心脏房室及其他血管等部位的压力