

微惯性仪表

——微机械加速度计

董景新等 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 提 要

微机械加速度计是以 IC 工艺和微机械加工工艺为基础制作的 MEMS 器件,在军民两用领域均有广泛的应用前景。本书以作者参加“九五”、“十五”重点预研课题及清华大学“985”校级重点项目工作为基础写成。全书共分 9 章,主要内容包括:微机械加速度计的类型、工作原理及数学模型,电容式微机械加速度计的结构和电路,微机械加速度计的集成、误差分析、主要性能指标及测试方法,微机械加速度计的应用及进一步研究动向等。

本书内容除对微机械加速度计的研究和应用有借鉴作用之外,对其他惯性仪表乃至其他 MEMS 器件的研究亦有参考价值,可供惯性技术领域、机电系统领域以及各相关应用领域的科技工作者阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

微惯性仪表——微机械加速度计/董景新等编著. —北京:清华大学出版社,2002

ISBN 7-302-06296-X

. 微... . 董... . 微型 - 机械 - 加速度计 - 基本知识  
. TH824

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 007794 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

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

责任编辑:张秋玲

版式设计:肖 米

印 刷 者: 印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 850×1168 1/32 印张: 10 字数: 251 千字

版 次: 2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-06296-X/TH·109

印 数: 0001~4000

定 价: 0.00 元

# 前 言

在微米/纳米技术这一引人注目的前沿技术背景下,惯性技术领域正经历一场深刻的变化。以集成电路工艺和微机械加工工艺为基础制造的各种微传感器和微机电系统(MEMS)脱颖而出,平均年增长率达到30%。MEMS是尺寸从毫米到微米级的将电子元件和机械元件集成到一起的系统,可以对微小尺寸进行敏感、控制、驱动,单独地或配合地完成特定的功能;具有体积小、质量轻、成本低、能耗低、集成度高和智能化程度高等一系列特点。微机械加速度计是其中具有代表性的器件之一。它不仅成为一些高科技武器中微型惯性测量组合(MIMU)的核心元件,在民用领域也有广泛应用前景,例如通用航空、车辆控制、高速铁路、机器人、工业自动化、探矿、玩具等。其最主要的商业领域是在汽车技术中,包括安全控制功能,如四个轮的操纵和自动刹车、气袋开启和防抱死系统等。在小加速度范围的加速度计可用于如防盗装置、起搏器控制中的活动检测等。

在高新技术推动和强势市场需求牵引下,微机械加速度计的研制在国内已成为MEMS领域的研究热点之一,而国内外尚未见有同类著作出版。作为在国家和学校经费资助下,在国内最早进入该领域的主要研究人员,愿将近年来的研究工作总结出来,献给国内惯性技术领域、MEMS领域以及各应用领域的科技工作者。

如果读者从该书能够得到一些启发和帮助,将是笔者感到欣慰的事。笔者衷心希望在国内同行的共同努力下,微机械加速度计在国内尽快实现产品化。

该书是在“九五”和“十五”相关课题科研工作的基础上写成的,由董景新教授主笔,是集体工作的反映。赵长德教授和曹志锦工程师的工作对该专著的成稿起了很大作用;第4章和第5章主要反映袁光、张自然、皮舜、吴晓春、秦君华、刘云峰等研究生的贡献;第6章主要反映李疆、王松、马欣龙、朱峰等研究生的贡献;第8章部分内容反映了研究生王伟的贡献。参考资料除近年来国内外该领域研究的各种文献外,主要参考本课题组的有关报告、学术论文和研究生论文。为此,首先感谢国家有关部门和清华大学对该课题经费的支持,感谢丁衡高院士对于开展该课题的积极倡导、全力推动、支持和指导,感谢“九五”该课题的负责人高钟毓教授的开创性工作,同时感谢“九五”本课题组的其他同志——王永梁教授、张嵘副研究员、陈志勇助研、郭美凤讲师以及所有参与该课题的研究生。另外,还要感谢作为主要协作单位的信息产业部电子第十三研究所的主要合作伙伴吕苗等,以及给予该项课题支持的十三所赵正平、杨克武前后两任所长、梁春广院士、赵彦军副所长、微米纳米研究中心主任杨拥军和一切给予该课题关注、支持的人。

该书涉及多学科交叉领域,笔者学识有限,其中错误在所难免,恳请读者不吝赐教。

编著者

2002 .12

# 目 录

<b>1</b>	<b>概论</b>	1
1.1	引言	1
1.2	微机械加速度计的应用前景	2
1.3	微机械加速度计的技术背景	4
1.4	国内外微机械加速度计发展历史及研究现状	7
<b>2</b>	<b>微机械加速度计的类型</b>	21
2.1	表面加工梳齿式电容加速度计	21
2.2	体硅加工梳齿式电容加速度计	24
2.3	“跷跷板”摆式电容加速度计	26
2.4	“三明治”摆式电容加速度计	27
2.5	LIGA 加工高精度电容加速度计	28
2.6	隧道电流型加速度计	29
2.7	压阻式微机械加速度计	30
2.8	压电式微机械加速度计	30
2.9	微型热对流加速度计	31
2.10	微型双轴加速度计	32
2.11	微型三轴加速度计	32

2.12	振梁式微机械加速度计 .....	33
<b>3</b>	<b>工作原理及数学模型 .....</b>	<b>37</b>
3.1	加速度计工作原理 .....	37
3.2	加速度计的基本数学模型 .....	38
3.2.1	线加速度计的基本数学模型 .....	38
3.2.2	摆式加速度计的基本数学模型 .....	39
3.3	开环微机械加速度计的数学模型 .....	41
3.3.1	开环微机械加速度计的灵敏度 .....	41
3.3.2	静电力作用下开环微机械加速度计 的刚度和阻尼比 .....	44
3.4	闭环微机械加速度计的数学模型 .....	47
<b>4</b>	<b>电容式微机械加速度计结构 .....</b>	<b>53</b>
4.1	“三明治”电容摆式微机械加速度计 .....	54
4.1.1	结构 .....	54
4.1.2	动态仿真 .....	58
4.1.3	结构计算 .....	73
4.2	“跷跷板”电容摆式微机械加速度计 .....	77
4.2.1	结构 .....	77
4.2.2	结构特性分析 .....	83
4.2.3	静电引力、支承梁弯曲及电容误差 的关系 .....	84
4.2.4	阻尼分析 .....	88
4.2.5	仿真 .....	90
4.3	梳齿式电容微机械线加速度计 .....	94
4.3.1	梳齿式定齿均匀配置结构 .....	94
4.3.2	梳齿式定齿偏置结构 .....	95

<b>5</b>	微机械加速度计的结构加工工艺 .....	124
5.1	表面硅加工工艺.....	124
5.2	体硅加工工艺.....	126
5.2.1	体硅溶解薄片法 .....	128
5.2.2	干法刻蚀工艺 .....	142
5.2.3	静电键合 .....	156
5.3	LIGA 加工工艺 .....	162
5.3.1	LIGA 工艺原理 .....	162
5.3.2	LIGA 工艺过程 .....	163
5.3.3	LIGA 工艺使用的材料 .....	166
5.3.4	LIGA 结构的特性 .....	166
5.3.5	准 LIGA 工艺 .....	167
5.4	封装技术.....	167
<b>6</b>	电容式微机械加速度计电路 .....	169
6.1	前置放大电路.....	169
6.1.1	环形二极管电路 .....	170
6.1.2	模拟开关电容检测电路 .....	171
6.1.3	双路调制型前置电路 .....	173
6.1.4	双载波低阻调制型前置电路 .....	174
6.1.5	单载波电容桥高阻调制型前置电路 .....	175
6.1.6	变压器电容桥自举前置放大器电路 .....	177
6.1.7	通用电容读取 ASIC 电路 .....	179
6.2	调理电路.....	180
6.2.1	交流放大及滤波电路 .....	181
6.2.2	相敏解调器 .....	181
6.2.3	载波类型的选择 .....	188

6 3	反馈加力电路.....	190
6 4	膜集成电路.....	192
6 4.1	薄厚膜混合集成电路的寄生效应 .....	194
6 4.2	薄厚膜混合集成电路的热设计问题 .....	199
6 5	ASIC 集成电路 .....	204
<b>7</b>	<b>微机械加速度计的误差分析 .....</b>	<b>211</b>
7 1	微机械加速度计噪声分析.....	211
7 1.1	布朗噪声 .....	211
7 1.2	集成运算放大器的噪声 .....	213
7 1.3	减小系统噪声的措施 .....	218
7 2	温度误差.....	220
7 3	交叉加速度误差.....	224
7 4	微机械加速度计闭环系统误差分析.....	225
<b>8</b>	<b>微机械加速度计的主要性能指标测试方法 .....</b>	<b>227</b>
8 1	重力场 1 g 静态翻滚试验 .....	227
8 1.1	基本方法 .....	227
8 1.2	寻找加速度计的机械零位 .....	229
8 1.3	加速度计的 1 g 静态翻滚试验 .....	231
8 1.4	稳定性、噪声、重复性试验 .....	233
8 1.5	数据处理方法 .....	238
8 1.6	动态翻滚试验 .....	244
8 1.7	阈值测试 .....	246
8 1.8	分辨率测试 .....	247
8 2	高 g 精密离心机试验 .....	250
8 3	温度性能试验.....	255

## 目录

---

8 4	振动冲击试验.....	258
8 5	中间阶段试验.....	261
8 5.1	表头验收试验 .....	261
8 5.2	电路验收试验 .....	261
8 5.3	电模拟试验 .....	265
<b>9</b>	<b>微机械加速度计的应用及进一步研究动向 .....</b>	<b>267</b>
9 1	微机械加速度计的应用.....	267
9 1.1	惯性导航和制导 .....	267
9 1.2	惯性测量系统 .....	271
9 1.3	惯性稳定系统 .....	274
9 1.4	汽车安全装置 .....	276
9 1.5	探矿测震 .....	278
9 1.6	高速列车控制 .....	279
9 1.7	机器人状态控制 .....	279
9 1.8	测物体振动 .....	280
9 1.9	过载限制 .....	280
9 1.10	贵重物品防摔.....	281
9 1.11	运动员辅助训练 .....	281
9 1.12	钻井控制.....	281
9 1.13	建筑物测量.....	281
9 1.14	波浪测量.....	282
9 2	微机械加速度计的进一步研究动向.....	282
9 2.1	高分辨率微机械加速度计 .....	282
9 2.2	多轴集成加速度计 .....	283
9 2.3	微结构设计技术 .....	284
9 2.4	数字化输出和具备通信能力的微弱信号 集成电路 .....	286

## 微惯性仪表——微机械加速度计

---

9.2.5	微结构的加工工艺 .....	287
9.2.6	微机理研究 .....	289
9.2.7	可靠性研究 .....	294
9.2.8	微机械加速度计陀螺仪 .....	294
参考文献.....		297

# 1 概 论

## 1.1 引言

临近第二次世界大战结束时(1944年9月8日),法西斯德国为了挽救败势,祭出“第三帝国的秘密武器”,向英国伦敦成功发射了2000枚射程300km的V-2火箭,这些V-2火箭从欧洲本土发出,飞越英吉利海峡,有1230枚落入伦敦市区,其中有半数落在距目标中心13km的区域内,使英国陷入一片混乱,轰动了全世界,也使人首次深刻认识了加速度计——这一沿着V-2火箭纵轴方向安装的高科技产品。

20世纪40年代初,德国人研制了世界上第一只摆式陀螺加速度计。此后的半个多世纪以来,由于航空、航海和航天领域对惯性测量元件的需求,各种新型加速度计应运而生,其性能和精度也有了很大的完善和提高。1957年10月,前苏联成功发射第一颗人造地球卫星;1958年7月,美国“鱼号”核潜艇潜入海底连续航行1830海里,穿越北冰洋到达英国波特兰港,艇位误差仅为10海里左右;1969年7月,美国阿波罗飞船成功登月;1997年7月,美国探索火星的“旅居者”号火星车在火星着陆并进行工作。这些惊世的事件都表明了加速度计等惯性仪表的作用及达到的水平。

加速度计面世后一直作为最重要的惯性仪表之一,用在惯性导航和惯性制导系统中,与海陆空天运载体的自动驾驶及高技术武器的高精度制导联系在一起而受到重视。加速度计有多种分类方法。按惯性检测质量的运动方式分类,可分为线加速度计和摆式加速度计;按支承方式分类,可分为宝石轴承支承加速度计、液

体悬浮支承加速度计、气体悬浮支承加速度计、挠性支承加速度计、磁悬浮支承加速度计和静电支承陀螺加速度计等；按有无反馈信号分类，可分为开环加速度计和闭环加速度计；按加矩方式分类，可分为模拟加矩式加速度计和脉冲加矩式加速度计；按敏感信号方式分类，可分为电容式加速度计、半导体压阻式加速度计、电感式加速度计、压电式加速度计；按工作原理分类，可分为振弦式加速度计、摆式陀螺加速度计等。

虽然各种加速度计特点不同，但价格都很昂贵，使其他领域对它很少问津。这种状况直到微机械加速度计（micro-mechanical accelerometer, MMA）的问世才发生了改变。

## 1.2 微机械加速度计的应用前景

以集成电路（integrated circuit, IC）工艺和微机械加工工艺为基础制作的微机械加速度计，以其体积小、重量轻、功耗小、成本低、易集成、过载能力强和可批量生产等特点，不仅成为微型惯性测量组合（micro inertial measurement unit, MIMU）的核心元件，也迅速扩大到其他民用领域。图 1-1 为现阶段各种加速度计的性能及应用示意图<sup>[1]</sup>。可以看出，微机械加速度计目前主要用于战术导弹中段制导、灵巧炸弹和各种商用等相对低精度要求的场合。随着微机械加速度计性能的提高，其应用还会不断向中高精度的应用领域扩展。

微机械加速度计发展趋势是军民两用<sup>[2]</sup>。在欧共体为加强微机械传感器研究专门成立的情报机构 NEXUS（The Network of Excellence in Multifunctional Microsystems）发布的 1996—2002 年微型系统市场分析中提到，到 2002 年微型系统的国际市场需求将由 140 亿美元增长到 380 亿美元。其中微型加速度计的国际市场需求将由 1996 年的 2 400 万只（折合 2.4 亿美元）增长

到 2002 年的 9 000 万只(折合 4.3 亿美元),具体应用情况如表 1-1 所示。

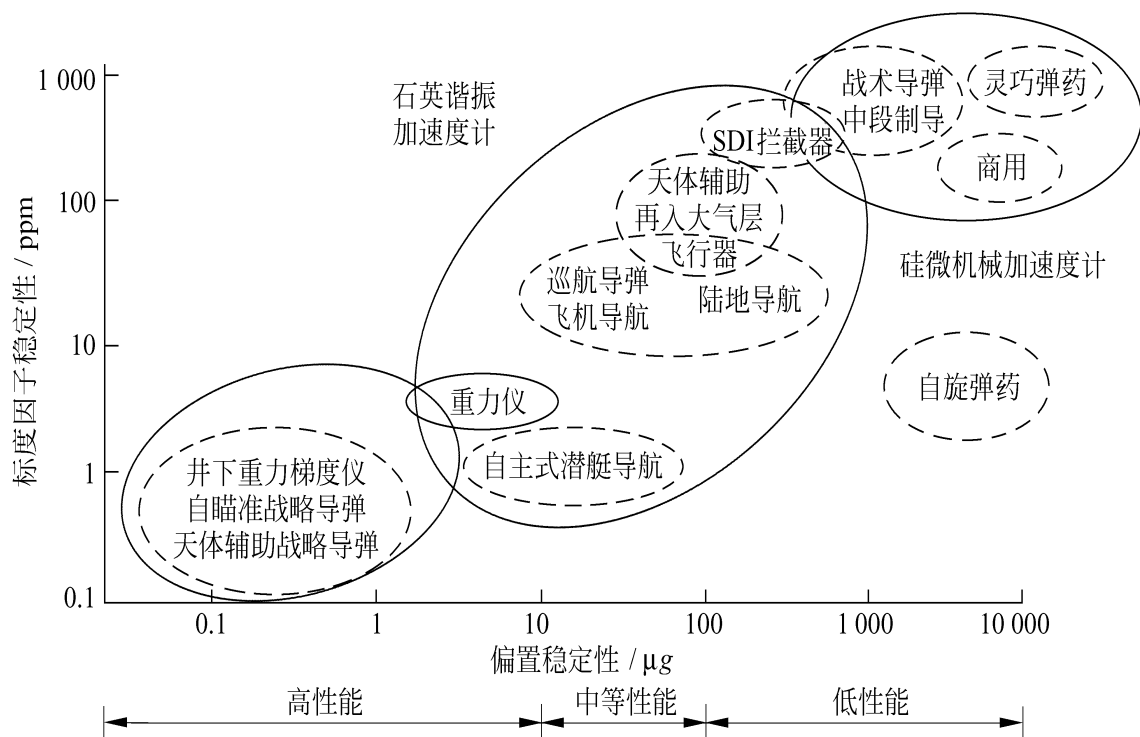


图 1-1 各种加速度计性能及应用领域简图

表 1-1 微型加速度计产品的市场应用

100 万美元

年 代	工业与自动化 (包括过程控制与宇航方面的应用)	汽车技术	总折合价值
1996 年	90	150	240
2002 年	130	300	430

美国的 System Planning Corporation 组织预测 2003 年微型系统有 110.5 亿美元的市场,并会保持每年 20% ~ 30% 的增长速度。其中各技术领域在应用方面所占销售份额如图 1-2 所示<sup>[193]</sup>。

型系统 2003 年各技术领域的销售比例

微机械惯性传感器以其尺寸小、成本低的诱人特点在商业领域占据了广泛的市场。低成本惯性传感器的商业应用领域主要有:通用航空、车辆控制、高速铁路、机器人、工业自动化、探矿、玩具等。但最主要的商业领域是在汽车技术中。汽车工业的发展显示将来一辆汽车上将使用多只加速度计,微机械加速度计在汽车上的应用包括安全控制功能,如车轮的操纵和自动刹车、气袋开启和防抱死系统等,总之,利用惯性测量装置可能为未来汽车提供自动行驶所需的控制、诊断和导航功能<sup>[3,4]</sup>。具有防撞气囊和防侧滑控制系统的汽车一直以每年 8% 的速率增长。据估计,在几年之内,传感器和电子设备将体现一辆小轿车大约 30% 的价值。微系统技术汽车产品(包括加速度传感器、压力传感器、化学传感器、微喷注射系统等)预期到 2002 年将有 10 亿美元的市场,这个领域的年增长率估计为 20%。

硅加速度计的另一方面应用是心脏起搏器,先进的心脏起搏器设计包含多个传感器,其中 1~2 只加速度计用来检测病人的运动,以使救护设备的输出适应病人的需求。专家普遍预测,不久的将来微机械加速度计将独占中低精度的应用市场。

### 1.3 微机械加速度计的技术背景

早在 1955 年,著名物理学家、诺贝尔奖获得者 R. P. Feynman 曾经提出这样的设想:如果人类能够用常规的机器制造出比其体积小机器,而较小的机器又可以制造更小的机器,这样一步步逐级缩小生产装置,以致最后实现按人的意志排布原子,这将对人类的生活创造奇迹<sup>[5]</sup>。

在创造奇迹的历程中出现了微机电系统(microelectromechanical systems, MEMS)。微机电系统名称的首次正式问世是在 1989 年美国盐湖城一次微型遥控操作机器人的会议(Micro-Tele-Operated Robotics Workshop)上,由加利福尼亚大学伯克利

分校的 Roger Howe 教授宣布的<sup>[6]</sup>。NEXUS 中给出微机电系统一个较普遍的定义：“微机电系统是电子和机械元件相结合的微装置或系统,采用与集成电路兼容的批加工技术制造,尺寸可从毫米到微米量级范围内变化。这些系统结合了传感和执行功能并进行运算处理,改变了我们感知和控制物理世界的方式。”这一新的领域在欧洲多称为微系统技术(microsystems technology, MST)<sup>[7]</sup>,这一称谓更强调系统的观点,即如何将多个微型化的传感器、执行器、处理电路等元部件集成为一个智能化的有机整体。在精密机械加工方面有传统优势的日本则称该领域为微机器(micro-machine)<sup>[8]</sup>。

微机械(micromachining)是实现微机电系统的设计和制造手段,是制作人的肉眼不能直观感知的微小尺寸元器件的工具,是 MEMS 加工最主要的基础<sup>[6]</sup>。微机械的生产工艺方法主要是在集成电路生产工艺方法的基础上扩展形成的。对于微机械,虽然可供选择的材料很多,但硅材料理想的机械和电子特性以及 IC 制造工艺的部分兼容性,使之成为包括微加速度计在内的许多微机电系统的首选材料。在硅片上既可以完成机械加工,又可以完成电子线路的集成,因此结构简单,集成度高,尺寸小;由于采用了半导体材料加工工艺,能够进行大批量生产,因此系统的造价低——通常比常规加速度计低两个数量级;而且硅的强度高,弹性变形小,抗过载能力强,可以在恶劣的环境下长时间、大负荷地稳定工作。

1991 年,美国国家关键技术委员会向美国总统提交了《美国国家关键技术》报告,其中第 8 项即为“微米和纳米制造”,美国国家自然科学基金会亦将该项目列为优先支持的关键技术<sup>[9]</sup>。自从 20 世纪 60 年代以来,随着集成电路加工技术和理论的发展,给仪器仪表行业带来了新的发展方向。1982 年 Binnig 和 Rohrer 研制出扫描隧道显微镜(scanning tunnel microscope, STM),它以极高

的空间分辨率(横向可达 0.1 nm,纵向可达 0.01 nm)成为揭示原子、分子微观世界的手段。而且由于 STM 在表面能达到原子尺度的定位精度,并能通过探针对表面作用,从而成为在纳米尺度上对表面进行改性和排布原子的工具。1985 年研制出能在大气压下工作的袖珍式 STM,标志着扫描隧道显微技术的成熟。该技术很快成为表面科学强有力的研究手段,迅速渗透到物理、化学、生物等许多领域的微观研究。例如,观察表面形貌,测定表面原子结构;观测表面电子态和电荷密度波;研究表面物理化学变化的动态过程,借以揭示催化、腐蚀、摩擦磨损等表面现象的微观机理等。

微机械按其尺寸可分为宏观微机械( $> 1\mu\text{m}$ )、介观微机械( $10\text{nm} \sim 1\mu\text{m}$ )以及原子和分子微机械( $< 10\text{nm}$ )。现有的微机械加速度计在微米量级,属于宏观微机械范畴。其工作原理、设计理论等大体可以沿袭传统的理论。但是,随着微结构尺寸的不断缩小,结构可承受的外载荷和体积力变得次要,而摩擦力和其他表面力有时成为影响性能的主要因素<sup>[10]</sup>。

20 世纪 80 年代中后期以来,以集成电路工艺和微机械加工工艺为基础制造的各种微传感器和微机电系统脱颖而出,平均年增长率达到 30%。MEMS 是尺寸从微米到毫米级的将电子元件和机械元件集成到一起的系统,可以对微小尺寸进行敏感、控制、驱动,单独地或配合地完成特定的功能;具有体积小和质量小、成本和能耗低、集成度和智能化程度高等一系列特点。

另外,量子力学、介观物理、混沌物理等现代科学以及先进的电子计算机等技术都给 MEMS 的发展提供了理论和物质基础。

微米和纳米科技是现代科学(量子力学、介观物理、混沌物理等)以及先进技术(微电子技术、电子计算机、扫描隧道显微技术等)相结合的产物。微机电系统是微米/纳米技术的一个分支。微米/纳米科学技术的发展为微机电系统的发展提供了技术支持,并不断推动微机械加速度计的发展。微米/纳米科学技术是面向

21 世纪的高新科学技术,它有着广阔的科研和应用前景<sup>[2]</sup>。正如美国国家关键技术委员会向美国总统提交的报告指出的:微米级和纳米级技术的发展已使人们能开发出一类新的显微级尺寸的器件。这些器件能在诸如环境控制、医学等不同的领域工作。它们的低成本及比现有器件高的灵敏度可能会使许多领域有所突破。

## 1.4 国内外微机械加速度计发展历史及研究现状

在微米/纳米技术这一引人注目的前沿技术背景下,惯性技术领域也经历着深刻的变化。以集成电路工艺和微机械加工工艺为基础制作的各种微传感器和微机电系统不断出现,微型惯性测量组合(MIMU)成为其中典型性、代表性的成果<sup>[11]</sup>。

1977 年美国 Stanford 大学在世界上首先采用微加工技术制造出了一种开环硅加速度计,并且在 80 年代初形成了产品。但是,这种装置的高动态范围、低振动分离、偏置及标度因数稳定性都比较差。在 80 年代后半期,人们开始研究各种闭环力平衡式硅微机械加速度计,并且取得了巨大进展。

美国 AD(Analog Devices)公司于 1989 年开始微硅梳齿式电容加速度计的研究,1990 年与德国 Seimens 公司合作开发其电子测量电路,1992 年满足了汽车安全气囊的性能指标要求,于 1993 年投产,现已形成系列产品<sup>[12~16]</sup>。

1993 年 AD 公司推出基于汽车方面应用的 ADXL50 加速度计,ADXL50 是最成功的面微机械加工加速度计之一,测量范围是  $\pm 50g$ 。1996 年又推出了第二代加速度计产品

---

\* 本书中斜体  $g$  为重力加速度( $9.8\text{m/s}^2$ ),在表示形式上作为单位处理,区别于作为质量单位的正体  $g$ 。