



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

微装配 MEMS 仿真导论

康晓洋 田鸿昌 李德昌 编著

微装配与 MEMS 仿真导论

康晓洋 田鸿昌 李德昌 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书较为细致地叙述了微装配的基本过程和 MEMS 建模仿真的一些常用方法, 对于 MEMS 基本知识和微加工工艺部分, 作了简要叙述。本书主要介绍微装配技术与微装配系统、MEMS 系统建模与库的建立和宏建模的若干种常用方法, 同时, 对虚拟化实现的相关技术和实现方案给出了概念性描述。

全书共 9 章, 内容包括 MEMS 基本情况介绍、MEMS 工艺及器件特性、微装配技术与微装配系统、微装配关键技术、微控制理论与装配系统模型、系统建模、宏模型的建立、虚拟化实现、MEMSCAD 比较。

本书适用于从事 MEMS 研究的科研人员和教育工作者以及对 MEMS 相关技术感兴趣的大学生与研究生。

图书在版编目(CIP)数据

微装配与 MEMS 仿真导论/康晓洋, 田鸿昌, 李德昌编著.

—西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.3

ISBN 978-7-5606-2488-4

I. ① 微… II. ① 康… ② 田… ③ 李… III. ① 微电机—组装 ② 微电子学—机械系统—系统仿真
IV. ① TM38 ② TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 196701 号

策 划 陈宇光

责任编辑 南 景 陈宇光

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2011 年 3 月第 1 版 2011 年 3 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 17.375

字 数 406 千字

印 数 1~2000 册

定 价 28.00 元

ISBN 978-7-5606-2488-4/TM·0068

XDUP 2780001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

前 言

当今的微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, 简称 MEMS)产业重点不断从单个的微机电系统器件向微机电系统产品转移,而且其中的机械、热、电、静电及电磁间耦合作用与机理日趋复杂,一些传统的工程设计方法(如经验设计法等)无法满足微系统的设计要求。对微机电系统产品开发而言,这种反复尝试的设计方法、长设计周期以及微系统原型机的高昂费用导致了一种效率极为低下的、不切实际的情况。目前,针对微机电系统的现代设计理论与方法已日益受到微机电系统 CAD 厂商以及高等院校的相关研究机构的重视,但对微机电系统大规模生产阶段的自动装配系统的研究较少。

微装配作为 MEMS 产业化过程中的一项重要技术理应受到重视。在研究的过程中,我们查阅了大量国内外各方面的资料,发现迄今为止还没有一本书来系统讲解微装配的过程,于是我们项目组萌生了编写一本介绍微装配的书籍,希望对 MEMS 感兴趣的人在获取这方面知识的时候能够比我们来的容易些。

在现代产品设计过程中,装配技术作为检验设计质量的一个重要环节显得越来越重要。而这个过程通常是用各种 CAD 设计软件来实现的,于是又出现了仿真的问题。具体到 MEMS,微装配与仿真更是一个有机的整体。在设计 MEMS 时,要检验 MEMS 的可装配性,于是就要把 MEMS 系统进行建模仿真。因此,有必要将两者联合起来进行论述。

“国家大学生创新性实验计划”作为教育部、财政部高等学校本科教学质量与教学改革工程的重要组成部分,是培养高素质创新型人才的重要举措之一。该计划的实施,旨在培养大学生从事科学研究和探索未知的兴趣,从而激发大学生的创新思维和创新意识,锻炼大学生思考问题、解决问题的能力,培养其从事科学研究和创造发明的素质。

2007 年,教育部批准了首批 60 所高校实施该计划项目,西安电子科技大学作为实施该计划项目的高校之一,已经有 40 个项目被正式列入“国家大学生创新性实验计划”,“MEMS 自动装配系统的虚拟化研究”项目有幸成为其中之一。

本书较为细致地叙述了微装配的基本过程和 MEMS 建模仿真的一些常用方法,主要介绍了微装配技术与微装配系统、MEMS 系统建模与库的建立和宏建模的若干种常用方法,并对虚拟化实现的相关技术和实现方案给出了概念性描述。对于 MEMS 基本知识和微加工工艺部分,因已有较多相关的各类文献资料,本书只作简要叙述。

第一章介绍了 MEMS 的基本概念和各项特性,使读者对微观世界有一个初步的认识。通过学习本章,首先从微机电系统的定义(包括基本概念、研究内容和应用方向等方面)了解 MEMS 概况,然后从微加工材料到微器件再到微系统各层级了解所涉及到的材料、力学、尺寸效应等特性,即微观操作相异于宏观世界的主要原因及核心内容。本章的学习为了使读者逐渐进入微观世界,为以后各章的学习和对微系统更深层的研究建立一个基础。

第二章把 MEMS 的系统级划分为工艺级、物理级、器件级和系统级四个层级,四个层

级分别交叉对应 MEMS 的材料特性、结构特性和功能特性。MEMS 加工工艺部分扼要地介绍了常用的三大类微加工方式,包括各工艺的基本技术及特点。在器件结构功能部分,将现有 MEMS 器件分为微传感器与微执行器两部分,分别较为具体地描述了两部分所包含的各具体器件结构和功能。

第三章作为全书重点之一,详细介绍了微装配技术和微装配系统的基本概念及相关技术问题。

(1) 在微装配技术部分,先叙述了微装配技术的国内外研究概况、技术特点、典型技术应用等内容,然后具体讲述了微装配自动化的几项关键技术。装配自动化作为装配技术的发展趋势,因其自身优点,非常适合应用到微装配领域,形成微装配自动化技术。其必然成为以后微装配研究发展的趋势。

(2) 微装配系统部分将各微装配技术集成化,形成可控制系统,再发展到以后的自动化及智能化微装配系统。该部分对微装配系统的特点、功能、智能化技术和整体设计都作了详细阐述,又列举了一些微装配系统的系统设计与实现方案。

(3) 压电驱动部分详细介绍了用于微操作的压电驱动技术和应用多种驱动力的自装配技术。压电陶瓷相关技术和自装配技术分别作为材料科学和生物化学工程的新型研究热点,均可将其中的优势技术应用到微装配领域。

第四章介绍微装配关键技术,包括运动平台和显微视觉系统。本章内容可细分为磁悬浮平台、进给平台、平台隔振系统等运动平台;显微视觉系统、显微视觉系统研究现状、显微视觉系统的关键问题、微操作机器人的显微视觉自标定方法、显微视觉自动聚焦系统、微操作机器人深度信息提取等几个专题介绍了微装配发展的重点及难点。

仿真的第一步是建模,微控制理论与装配系统模型则是建模的基础。第五章从微控制的目的、微控制器设计、微机构模型的建立、信息模型建模等方面介绍了装配系统建模的一般过程。

第六章与第七章共同组成全书的重点部分——MEMS 仿真。

第六章主要包括面向 MEMSCAD 系统级仿真的建模技术和 MEMS 库的建立。

(1) 由于微观系统远异于宏观经验系统, MEMSCAD 的结构和功能也与传统 CAD 软件相差甚多,集中体现在 MEMSCAD 的多方面自身特点,从而便产生了 MEMSCAD 特殊的体系结构,结构当中涉及到多项关键技术,也存在不少须解决的问题。

(2) 系统级仿真已成为 MEMSCAD 仿真的核心技术问题,其总体被分为多个步骤,涉及到数学模型建立、物理能域耦合计算和基于能量耦合的宏模型建立等技术难题,至今没有形成标准统一的解决方案。

(3) MEMS 库的建立应用设计可重用思想,将设计过程大大简化。动态部件库、IP 库和键合图库的建立可不断积累设计经验、加速设计过程,从而可进一步推动 MEMS 的标准化和大规模产业化发展。

第七章承接第六章叙述的 MEMS 系统级仿真的关键技术,详细介绍了建立基于能量的宏模型的相关问题。器件级到系统级之间的接口常称为宏建模,是对一般模型的再次提取,对于实现复杂器件结构和接口电路的混合信号仿真具有重要意义。宏模型是一般模型的抽象模型,是实现系统级仿真的核心。常见的宏模型建立方法有节点分析(NODAS)方法、信号流模型法(也称黑箱模型法)和应用键合图理论建立宏模型三个大类,此外,还介

绍了其他两种应用不同数学思路的建模方法。几种方法各具优缺点,分别适用于不同的场合,这是长期以来一直没有寻找到统一认可建模方案的结果,同时也是原因。针对静电力耦合的具体问题,本章还介绍了用于能域耦合仿真分析的加速松弛方法。

第八章介绍了虚拟现实技术,它作为仿真技术的发展方向,因其所具有的 3I 特征(即沉浸感(Immersive)、交互性(Interaction)、想象性(Imaginative)),逐渐为人们所熟知。基于虚拟现实的多项技术,如虚拟工艺库建立、虚拟组装与虚拟运行等,均可作为虚拟化技术应用 MEMS 设计与分析的仿真实现过程中。虚拟现实技术强烈的沉浸感和交互性可拉近生活在宏观世界的人们通向微观世界的距离。通过本章的学习,读者会对 MEMS 虚拟化相关的各项技术有一个概念性的认识。

第九章分析了现有 MEMSCAD 系统,能使读者对 MEMSCAD 有一个系统的了解。MEMSCAD 即 MEMS Computer Aided Design(MEMS 计算机辅助设计),是 MEMS 设计技术的一个重要分支。随着 MEMS 技术的快速发展,在 MEMS 领域实现电子设计自动化(EDA)的需求变得越来越迫切。

本书是在项目组紧密的协作下完成的,首先感谢每个组员,特别是杜刚、赵伟为了这本书的编写与团队合作付出的艰辛劳动,没有大家的共同努力就不可能完成这本书。其次,要特别感谢我们的导师李德昌教授,他不仅在学术上给予了我们很多帮助,而且在本书的具体编写过程中给我们提出了很多指导性的意见和建议。

本书的出版得到了西安电子科技大学出版社的大力支持,特别是出版社陈宇光老师对本书的编著给予了很多帮助,在此深表谢意!

由于作者水平所限,书中难免有不妥之处,敬请各位读者指正。

国家大学生创新性实验计划
MEMS 自动装配系统的虚拟化研究项目组
2009 年 4 月

目 录

第一章 MEMS 基本情况介绍	1
1.1 概述	1
1.2 单晶硅的材料特性	2
1.3 薄膜材料的力学特性	4
1.4 微执行器的尺度效应	5
1.5 微机器人的尺度效应	6
第二章 MEMS 工艺及器件特性	7
2.1 MEMS 材料工艺特性	7
2.1.1 硅微加工技术	8
2.1.2 LIGA 工艺	8
2.1.3 3IH 工艺	9
2.2 MEMS 器件结构功能	9
2.2.1 微传感器	9
2.2.2 微执行器	15
2.2.3 新型 MEMS 器件	22
2.3 MEMS 系统产品简介	23
第三章 微装配技术与微装配系统	24
3.1 微装配基本过程方法	25
3.1.1 微/纳米操作的特点	26
3.1.2 典型微/纳米操作技术及其应用	26
3.1.3 先进灵巧装配技术	29
3.2 微装配自动化技术	29
3.2.1 微装配的机器人技术	30
3.2.2 手爪及操作(微夹持)	35
3.2.3 微型零件胶粘接的微装配技术	36
3.2.4 显微视觉伺服系统	39
3.2.5 小结与展望	41
3.3 微装配系统简述	41
3.3.1 微装配系统的特点及功能分析	42
3.3.2 智能化微装配	43
3.4 微装配系统设计	44
3.4.1 任务功能描述	45
3.4.2 微装配系统设计	45
3.4.3 微装配系统的设计思路	46

3.4.4	微装配系统关键技术的研制	46
3.5	成型系统介绍	48
3.5.1	一种新型微装配系统样机	49
3.5.2	日本东京大学的一个微装配系统	50
3.5.3	基于微机器人的微装配站	50
3.5.4	可宏/微精密定位的微操作机器人	51
3.6	压电驱动技术和自装配技术	51
3.6.1	一种适用于微操作的驱动技术(装配是若干微操作)	51
3.6.2	自装配技术	54
3.6.3	标准化方案	58
第四章	微装配关键技术	71
4.1	运动平台	71
4.1.1	磁悬浮平台	71
4.1.2	进给平台	75
4.1.3	平台隔振系统	77
4.2	显微视觉系统	96
4.2.1	显微视觉系统研究现状	96
4.2.2	显微视觉系统的关键问题	98
4.2.3	微操作机器人的显微视觉自标定方法	100
4.2.4	显微视觉自动聚焦系统	104
4.2.5	微操作机器人深度信息获取	107
第五章	微控制理论与装配系统模型	112
5.1	微控制的目的	112
5.1.1	精密定位原理	112
5.1.2	精密定位的神经网络控制	113
5.2	微装配的关键系统——微控制系统	114
5.2.1	微控制方式	114
5.2.2	微装配中的微控制	117
5.3	微控制器设计	118
5.3.1	串联 PID 控制器综合	118
5.3.2	鲁棒控制器综合	119
5.3.3	视觉伺服控制系统	120
5.4	装配模型	122
5.4.1	装配模型概述	122
5.4.2	装配模型建模	124
5.4.3	装配模型与装配顺序	125
5.5	宏动、微动机构模型的建立	126
5.5.1	宏动机构模型的建立	126
5.5.2	微动机构模型的建立	128
5.6	信息模型建模	129
5.6.1	信息模型建模概述	129

5.6.2	面向装配序列规划的信息建模	132
5.6.3	敏捷化开发环境下产品装配模型的信息组成	134
5.7	微测试概述	135
5.7.1	微结构特性的测试要求与方法	136
5.7.2	微几何量检测方法	138
5.7.3	微材料特性检测	143
第六章	系统建模	145
6.1	系统级仿真建模简述	145
6.2	MEMS 库的建立	149
6.2.1	部件和部件库的概念	150
6.2.2	IP 库的建立	155
6.2.3	键合图库的建立	160
第七章	宏模型的建立	164
7.1	宏模型的概念	164
7.1.1	准静态宏模型	165
7.1.2	动态宏模型	165
7.2	建立宏模型的方法	166
7.2.1	节点分析方法	167
7.2.2	信号流模型(自由度缩聚的方法)	173
7.2.3	键合图理论建立宏模型	179
7.2.4	其他建模方法	185
7.3	含能量域耦合问题的宏模型	193
7.3.1	加速松弛法及其在静电力耦合问题仿真分析中的应用	195
7.3.2	耦合宏模型举例	198
第八章	虚拟化实现	205
8.1	虚拟现实技术简述	205
8.1.1	虚拟现实技术的定义	205
8.1.2	虚拟现实技术的特征	206
8.1.3	虚拟现实技术的分类	206
8.1.4	虚拟现实的关键技术	207
8.2	MEMS 虚拟化技术	207
8.2.1	虚拟工艺库	207
8.2.2	虚拟组装	211
8.2.3	虚拟运行	214
8.3	虚拟装配概述	218
8.3.1	虚拟装配的定义	219
8.3.2	虚拟装配技术的主要功能	219
8.4	虚拟装配的软硬件配置	220
8.4.1	软件配置	221

8.4.2	硬件配置	221
8.4.3	虚拟装配思路的产生和发展	223
8.4.4	虚拟装配的关键技术	224
8.5	虚拟装配关键技术的实现	225
8.5.1	虚拟装配建模技术	225
8.5.2	装配干涉及碰撞检测	226
8.5.3	配合特征的识别及装配约束的建立	236
8.5.4	受约束运动的实现	238
第九章	MEMSCAD 比较	240
9.1	MEMSCAD 的研究概况	240
9.1.1	MEMSCAD 的特点及其设计原则	241
9.1.2	MEMSCAD 系统的结构	242
9.2	MEMSCAD 的关键技术	245
9.2.1	数值计算方法研究和多能量域耦合仿真	245
9.2.2	宏模型建模	247
9.2.3	版图综合及加工工艺的生成和优化	247
9.3	现今 MEMSCAD 的不足及困难	249
9.4	MEMSCAD 实现方案	250
9.4.1	类型(1)	252
9.4.2	类型(2)	253
9.4.3	类型(3)	253
9.4.4	类型(4)	254
9.4.5	微机电系统 CAD 设计的过程及展望	255
参考文献		257

第一章 MEMS 基本情况介绍

1.1 概 述

微电子机械系统——MEMS(Micro-Electro-Mechanical System)的概念于 20 世纪 80 年代末提出,它一般泛指特征尺度在亚微米至毫米范围的装置,目前各国对它的定义尚未完全统一。美国 MCNC 对 MEMS 的定义是:微电子机械系统是由电子和机械元件组成的集成化微器件或系统,它是采用与集成电路兼容的大批量工艺制造的,并且尺寸在微米到毫米之间。它将计算、传感与执行融合为一体,从而改变了人类感知和控制自然世界的方式。日本微机械中心的定义是:微机械是由只有几个毫米大小的功能元件组成的,它能够执行复杂、细微的任务。欧洲 NEXUS(the Network of Excellence in Multifunctional Microsystems)的定义是:微结构产品具有微米级结构,并具有由微结构形状提供的技术功能。微系统由多个微元件组成,并作为一个完整的系统进行优化,以提供一种或多种特定功能,在许多场合包括微电子功能。

上述定义明显地与各国发展 MEMS 技术的特点、途径有密切关系。美国将与集成电路工艺兼容和集成化制造作为判定 MEMS 的主要条件,这与美国主要发展硅微加工技术,并在国际上保持领先地位有关。但是,这一定义过于狭隘,将大量非硅材料与工艺制作的微系统排除在 MEMS 之外。日本研究 MEMS 的重点是超精密机械加工,它侧重于传统机械的微型化,因此对 MEMS 的定义以微机械为主,而未对微电子功能作出明确要求。这显然与当前 MEMS 发展主流存在差距。在欧洲的定义中分为微结构和微系统两个概念,以包含采用 LIGA 技术制作的微型纯机械零件,但缺乏对 MEMS 的统一定义。我们认为 MEMS 应通过尺寸和功能来定义,而不应限定于任何制作工艺,因为工艺技术是不断发展和完善的。MEMS 器件并不能完全用总尺寸来定义,而应用特征尺寸来表征。特征尺寸是决定器件性质和加工工艺的关键尺寸,如静电马达的直径。特征尺寸在毫米级以上的机械电子系统基本上属于传统的机电一体化装置,传统的机械加工技术已经能够满足要求。而特征尺寸在亚微米以下的机械电子系统,由于纳米效应、量子效应的作用,其理论基础与加工技术已经完全改变,应属于最近几年新提出来的纳电子机械系统 NEMS(Nano-Electro-Mechanical System)的研究范畴。因此,我们认为 MEMS 应定义为:微电子机械系统是由特征尺寸在亚微米至毫米范围内的电子和机械元件组成的微器件或微系统,它将传感、处理与执行融为一体,以提供一种或多种特定功能。MEMS 的发展使人类的操作和感知能力拓展到纳米、微米空间,将使传统机械产生革命性的变化,近十几年来已经成为世界各国竞相研究的热点。

在微小尺寸范围内,机械依特征尺寸可以划分为 1~10 mm 的小型机械、1 μm~1 mm 的微型机械以及 1 nm~1 μm 的纳米机械。微型系统由微型机械各单元构成,也可以包含小型和纳米机械。它是集微型驱动器、微型传感器、微型执行器以及信号处理和控制电路,直至接口、通信和电源等为一体的系统。它也可以是少量单元的集成。微型系统通常可以分为几个独立的功能单元,其输入常是物理量信号,通过传感器转换为电信号,经过信号处理后,由执行器与外界作用。每一个微系统都可以通过电、光、磁等物理量信号与其他微系统进行通信。微型系统的目标在于通过微型化、集成化来探索新原理、新功能的元件和系统,开辟一个新技术领域,形成批量化产业。微型系统研究涉及元件和系统的设计、能源、材料、制造、测试、控制、集成,以及它们与宏观世界的接口等多方面。在理论上,它涉及微电学、微机械学、微光学、微流体学、微热力学、微摩擦学、材料学、物理学、化学和生物学等理论基础学科。

随着对 MEMS 研究的深入,不可避免地遇到了大量的力学问题,如“微机械尺度下材料的力学特性有何改变”、“微加工过程对微结构的力学性能有何影响”、“如何从力学角度来评价、选择和设计微执行器”。对微型机械中涉及的材料、结构和流动的力学分析与实验检测已经成为 MEMS 研究的一个重要分支。由于 MEMS 尺寸微小,其流动特性、材料与结构的力学行为和物理性质与宏观法则有明显不同,当它受不同环境(湿、热、电、磁、力等)和不同加工过程的影响时,力学参数也会有明显变化。MEMS 表现出来的尺度效应、表面效应、隧道效应都远远超出了宏观力学和物理规律范畴。迄今为止,宏观力学中的物理规律不能完全解释和指导 MEMS 设计、制造工艺、封装和应用中提出的问题,尤其是对其中很多重要问题还缺少有效的实验研究方法,有待于 MEMS 研究人员与力学研究人员共同进行深入的研究。

首先探讨 MEMS 材料、结构、动力学设计原则与方法,为进一步的深入研究提供借鉴。

1.2 单晶硅的材料特性

单晶硅是 MEMS 中最基本、最常用的材料,因此必须首先对单晶硅的力学特性进行研究。表 1.1 为单晶硅与其他材料的基本力学参数对照表。

表 1.1 单晶硅与其他材料力学特性对比

力学特性 材料名称	屈服强度 (Yield strength) /(10 ⁹ N/m ²)	努普硬度 (Knoop hardness) /(10 ⁹ N/m ²)	弹性模量 (Young's modulus) /(10 ¹¹ N/m ²)
Si	7.0	8.3	1.9
Fe	12.6	3.9	1.96
高强度钢	4.2	14.7	2.1
不锈钢	2.1	6.5	2.0
W	4.0	4.8	4.1
Mb	2.1	2.7	3.43
Al	0.017	1.3	0.70

续表

材料名称 \ 力学特性	屈服强度 (Yield strength) /(10^9 N/m 2)	努普硬度 (Knoop hardness) /(10^9 N/m 2)	弹性模量 (Young's modulus) /(10^{11} N/m 2)
SiC	21	24.3	7.0
TiC	20	24.2	4.97
Al $_2$ O $_3$	15.4	20.6	5.3
Si $_3$ N $_4$	14	34.2	3.85
SiO $_2$	8.4	8.0	0.73
金刚石	53	68.6	10.53

硅的屈服强度为 7×10^9 N/m 2 ，比不锈钢高 3 倍多，是高强度钢的 1.7 倍。硅的努普硬度为 8.3×10^9 N/m 2 ，比高强度钢低 1/2，比不锈钢高 1/3，与石英(SiO $_2$)接近。硅的弹性模量为 1.9×10^{11} N/m 2 ，与钢、铁、不锈钢接近。数据表明，硅材料并不像通常所感觉的那样脆弱。分析产生这种感觉的原因，可以发现以下几点：

首先，通常接触的是直径 50~130 mm、厚度仅 250~500 μ m 的单晶硅片。这种圆薄片在受到外力时容易产生较大的内应力，从而导致损坏。实际上，相同尺寸的不锈钢片，在同一外力作用下同样会被损坏。当硅片被分割成数毫米见方的小芯片时，发生损坏的概率就大大减小了。

其次，由于单晶硅材料具有沿晶面解理的趋势，当硅片边缘、表面和硅体内存在缺陷而导致应力集中，并且其方向与解理面相同时，会使硅片开裂、损坏。同时人们也利用这一现象，将硅片划割分离成一个个小芯片，在这一工艺中不可避免地会有一些芯片上的缺陷导致芯片缺损。

最后，半导体的高温处理和多层膜淀积工艺会引入内应力，当与硅材料本体、边沿的缺陷结合时会产生开裂。人们认为硅强度低的另一个原因是硅被破坏时发生脆性断裂，而金属材料通常是发生塑性变形。因此硅材料制作的机械元件和器件的实际强度取决于它的几何形状、缺陷的数量和大小、晶向，以及在生长、抛光、流片时产生和积累的内应力。当充分考虑到这些影响因素后，将可能获得强度比高强度合金还好的硅微机械结构。合理使用硅材料和正确设计硅结构与加工工艺，应遵循以下三个原则。

1. 缺陷最小原则

必须尽量降低硅材料在表面、边沿和本体中的晶体缺陷密度，尽量减小结构尺寸，以降低机械结构中晶体缺陷的总数。应当尽量减少或取消容易引起边沿和表面缺损的切割、磨削、划片和抛光等机械加工工艺，采用腐蚀分离取代划片。如果传统的机械加工工艺是必不可少的，则应将受到严重影响的表面和边沿腐蚀去除。

2. 应力最小原则

微结构中应尽量避免采用尖锐边角和其他容易产生应力集中的设计。由于各向异性腐蚀会产生尖锐的边角，而导致应力集中，因此在有些结构中可能需要进行后续的各向同性腐蚀或其他平滑锐角的工艺。由于材料的热膨胀系数不同，高温生长和处理工艺将不可避

免地引起热应力，使微结构在不良的力学条件下发生断裂，因此必须采用退火工艺降低高温处理所带来的热应力。

3. 最大隔离原则

应采用 SiC 或 Si₃N₄ 等坚硬、耐腐蚀的薄膜覆盖硅表面，以防止硅本体与外界直接接触，尤其是在高应力、高磨损的应用场合。在工艺条件和结构特点不允许的情况下，可以采用硅橡胶等电绝缘柔性材料对非接触外表面进行保护。

1.3 薄膜材料的力学特性

薄膜材料在 MEMS 器件中必不可少，尤其是在表面微加工器件中，薄膜材料的力学特性对 MEMS 器件的设计和实现同样具有重要意义。例如，当制作一组 SiO₂ 薄膜悬臂梁时，由于存在内应力，会使悬臂梁发生翘曲，偏离原来设计的直梁形状。因此在设计 MEMS 器件时，不仅要考虑弹性模量、泊松比等力学参数在 MEMS 中尺度的变化，而且还应考虑内应力对结构形状和工作状态的影响。表 1.2 所示为薄膜材料的特性。

表 1.2 薄膜材料的特性

特性 材料名称	薄膜厚度 (Thickness) / 10^{-7} m	薄膜密度 (Density) / (10^3 kg/m^3)	弹性模量 (Young's modulus) / (10^{11} N/m^2)	体材料弹性模量 (Bulk Young's modulus) / (10^{11} N/m^2)
SiO ₂ (湿氧化) (thermal-wet)	4.25	2.2	0.57	0.7
SiO ₂ (干氧化) (thermal-dry)	3.11	2.25	0.67	
SiO ₂ (溅射) (sputtered)	4.0	2.2	0.92	
Si ₃ N ₄ (CVD)	3.5	3.1	1.3	—
Si ₃ N ₄ (溅射) (sputtered)	2.9	3.1	1.3	1.5
7059 glass (溅射) (sputtered)	4.2	2.25	0.52	0.6
Nb ₂ O ₅ (溅射) (sputtered)	8.4	4.47	0.85	1.6
α -SiC (辉光放电) (glow discharge)	8.8	~3.0	0.85	4.8
Cr (溅射) (sputtered)	—	7.2	1.8	2.8

材料力学参数主要包括密度、硬度、弹性模量、应力极限、应变极限、疲劳寿命、冲击韧度、品质因数等，而目前所能获得的微机械材料的力学特性存在以下问题：

(1) 已获得的数据从品种、项目上都很不够，远远不能满足应用需要；

(2) 现有数据是在各自不同的工艺条件、试样尺寸和测试仪器下获得的, 缺乏通用性和权威性;

(3) MEMS 的新材料、新工艺层出不穷, 目前缺乏一种快速响应机制来收集、确认新数据。

由于薄膜材料的力学特性与工艺过程密切相关, 因此通常根据实际工艺条件制作薄膜悬臂梁, 通过试验悬臂梁的力学行为得到薄膜的力学特性。不同工艺制作的 SiO_2 薄膜之间弹性模量的变化更大, 溅射 SiO_2 薄膜的弹性模量是湿氧化 SiO_2 薄膜的 1.6 倍。

MEMS 器件相关参数的测量十分重要, 包括对于 MEMS 器件的弹性模量、泊松比等基本力学参数的测量, MEMS 材料的摩擦与磨损的测量, MEMS 结构内应力和应变的测量, MEMS 结构固有频率与振动模态等动态参数的测量以及微机构运动速度的测量。

MEMS 薄膜材料工艺过程中的力学问题还包括薄膜附着力与脱落机理、多层膜之间的热匹配与热失效、微结构内部损伤与演化过程、应力集中和残余应力对微结构的影响等。它们与 MEMS 器件的成品率和可靠性紧密联系在一起。目前是通过大量的试验来摸索出最佳的工艺流程, 然后通过严格的工艺参数控制来保证质量, 缺乏系统的理论指导和规范的工艺分析程序, 有待于通过工艺研究与力学研究的紧密结合, 探索出微结构性能与工艺过程的关系, 制定 MEMS 工艺设计规范。

1.4 微执行器的尺度效应

传统机械做功往往是与体积力联系在一起的, 动物爬行、飞行时要克服的也主要是重力、惯性力等体积力。然而在 MEMS 领域, 表面力起主导作用。用特征尺寸 L 来表征物体的大小, 该物体正好可以被包容在边长为 L 的正方体中。当特征尺寸 $L > 1 \text{ mm}$ 时, 体积力起主导作用, 这时要求的驱动力 $F \propto L^3$; 当特征尺寸 $L \leq 1 \text{ mm}$ 时, 表面力起主导作用, 这时要求的驱动力 $F \propto L^2$ 。表 1.3 所示为各种微执行器的尺度效应。

表 1.3 各种微执行器的尺度效应

执行器类型 (Actuation type)	工作原理 (Working principle)	驱动力 (Actuation force)	响应时间 (Response time)	功率密度 (Power density)
形状记忆合金 (SMA)	热响应 (Thermal response)	L^2	L^2	L^{-2}
静电 (Electrostatic)	$E = C(\text{Normal})$	L^2	L	L^{-1}
	$V = C(\text{MEMS})$	C	L^2	L^{-4}
磁阻 (Reluctance)	$J \propto L^{-1}$	L^2	L	L^{-1}
永磁 (Perm. Magnet)	$J \propto L^{-1}, B = C$	L^2	L	L^{-1}
罗伦茨力 (Lorentz-force)	$J \propto L^{-1}$	L^2	L	L^{-1}
压电(Piezo)	谐振(Resonance)	L	L	L^{-3}

通常,执行器所产生的驱动力都与 L 相关,当执行器的尺寸发生变化时,驱动力也发生相应的变化。因此将首先研究微执行器的尺度效应,这对 MEMS 选择合适的微执行器具有指导意义。

1.5 微机器人的尺度效应

采用微执行器可以模仿自然界的微小型生物,制作出各种微机器人,如机器蚂蚁、机器苍蝇、微型机器鱼等。在这些机械中实现爬行、飞行、游动所需要的驱动力与尺寸相关,同时微执行器所能产生的驱动力也与尺寸密切相关,因此微机器人的尺度效应分析十分必要。

微型飞行器(MAV)的发展带来了对空气动力学的新挑战,它们包括:

(1) 面临低雷诺数空气动力学研究领域的挑战。此时,机翼上的气流具有难以模拟的效应,如由层流分离引起的迟滞失速。

(2) 小飞行器低速飞行时层流起主导作用,能产生想象不到的相当大的力和力矩,这要采用全三维的空气动力学方法进行分析。与二维机翼相比,三维方法更缺少可用的数据。

(3) 气流扰动,甚至是 MAV 本身的机动都会使 MAV 明显地受到不稳定气流影响,这时它的翼载很低,惯性几乎不存在。许多与 MAV 同样大小的自然飞行物通常采用另一种不稳定空气动力源(如拍打翅膀等),来产生升力和推力。MAV 最终或许也只能采取这种方法。

总之,微机器人的尺度效应要求:

(1) 合理利用硅材料应遵循最小缺陷、最小应力和最大隔离三个原则,这样就有可能得到力学性能可以与高强度钢相比的硅结构。

(2) 薄膜材料的力学性能与制作工艺密切相关,因此应该根据实际工艺制备试样,通过实际测试得到薄膜力学参数。

(3) 静电、电磁和 SMA 微执行器的驱动力与 L^2 成正比,压电执行器的驱动力与 L 成正比,因此微执行器在微尺度下将显得更为有力。

(4) 通过对机器蚂蚁、微型飞机、微型机器鱼等微机器人在微尺度下的动力学特性分析,结合微执行器的尺度效应特征,得到微机器人在尺寸越小时越容易被驱动,为设计和制作微机器人等复杂微系统提供理论依据。

第二章 MEMS 工艺及器件特性

MEMS 的系统划分自上而下分为工艺级、物理级、器件级和系统级四个层级，对应于各层级分别表现出 MEMS 的材料特性、结构特性和功能特性，其对应关系如图 2.1 所示。现就各层级特点将 MEMS 特性分别进行描述。

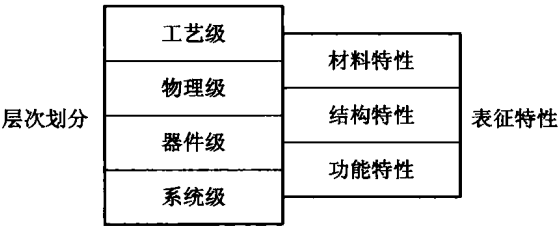


图 2.1 MEMS 系统层级与其表征特性对应关系

2.1 MEMS 材料工艺特性

在对系统进行制造前理论分析，尤其是对尺度效应等具体问题分析时，往往会涉及到 MEMS 材料特性，其特性在很大程度上也与 MEMS 加工工艺有关。

所谓加工，是运用各种工具将原材料改造成为具有某种用途的形状。提及加工，自然会联想到机械加工。机械加工是将某种原材料经过切削或模压形成最基本的部件，然后将多个基本部件装配成一个复杂的系统。某些机械加工也可以称为微纳米加工，因为就其加工精度而言，某些现代磨削加工或抛光加工的精度可以达到微米或纳米量级。但这里的微米或纳米是指工件形状的精度。微纳米加工不同于传统加工，其最本质的区别是加工形成的部件或结构本身的尺寸在微米或纳米量级。形成微纳米结构的工艺技术可大体分为三种类型：平面工艺、探针工艺和模型工艺。

以平面工艺为基础的微纳米加工是与传统机械加工概念完全不同的加工技术。平面工艺依赖于光刻(Lithography)技术。首先将一层光敏物质感光，通过显影使其感光层受到辐射部分留在基底材料表面；通过多层曝光、腐蚀或沉积，复杂的微纳米结构可以从基底材料上构筑起来。这里的光刻是广义的，实现感光层图案不仅可以通过光学的曝光，还可以是电子束曝光、离子束曝光和 X 射线曝光。这些图案可以通过掩膜投影实现，也可以通过直接扫描激光束、电子束或离子束实现。腐蚀技术包括化学液体湿法腐蚀和各种等离子体干法刻蚀。材料沉积技术包括热蒸发沉积和电铸沉积。

探针工艺可以说是传统机械加工的延伸，是用各种微纳米尺寸的探针取代了传统的机