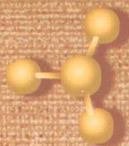


“十三五”国家重点图书出版规划项目



国防科技图书出版基金



微米纳米技术丛书  
MEMS与微系统系列

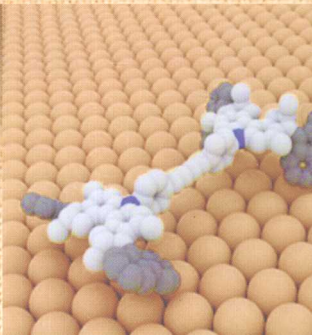
# 微机电 耦合动力学

Coupled Dynamics of MEMS

■ 许立忠 孙丽波 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press





国防科技图书出版基金

微米纳米技术丛书·MEMS与微系统系列

# 微机电耦合动力学

Coupled Dynamics of MEMS

许立忠 孙丽波 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

微机电耦合动力学/许立忠,孙丽波著. —北京:  
国防工业出版社,2015.5

(微米纳米技术丛书·MEMS与微系统系列)

ISBN 978-7-118-10053-2

I. ①微… II. ①许… ②孙… III. ①微电子技术—机  
电设备—耦合—动力学 IV. ①TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第091211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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 彩插 16 印张 20 $\frac{1}{4}$  字数 350千字  
2015年5月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 98.00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

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

## 国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

《微米纳米技术丛书·MEMS与微系统系列》

编写委员会

主任委员 丁衡高

副主任委员 尤 政

委 员 (以拼音排序)

邓中亮 丁桂甫 郝一龙 黄庆安

金玉丰 金仲和 康兴国 李佑斌

刘晓为 欧 黎 王晓浩 王跃林

温志渝 邢海鹰 杨拥军 张文栋

赵万生 朱 健

## 序

1994年11月2日,我给中央领导同志写信并呈送所著《面向21世纪的军民两用技术——微米纳米技术》的论文,提出微米纳米技术是一项面向21世纪的重要的军民两用技术,它的出现将对未来国民经济和国家安全的建设产生重大影响,应大力倡导在我国及早开展这方面的研究工作。建议得到了当时中央领导同志的高度重视,李鹏总理和李岚清副总理均在批示中表示支持开展微米纳米技术的跟踪和研究工作。

国防科工委(现总装备部)非常重视微米纳米技术研究,成立国防科工委微米纳米技术专家咨询组,1995年批准成立国防科技微米纳米重点实验室,从“九五”开始设立微米纳米技术国防预研计划,并将支持一直延续到“十二五”。

2000年的时候,我又给中央领导写信,阐明加速开展我国微机电系统技术的研究和开发的重要意义。国家科技部于当年成立了“863”计划微机电系统技术发展战略研究专家组,我担任组长。专家组全体同志用一年时间圆满完成了发展战略的研究工作,这些工作极大地推动了我国的微米纳米技术的研发和产业化进程。从“十五”到现在,“863”计划一直对微机电系统技术给以重点支持。

2005年,中国微米纳米技术学会经民政部审批成立。中国微米纳米学术协会经过十几年的发展,也已经成为国内学术交流的重要平台。

在总装备部微米纳米技术专家组、“863”专家组和中国微米纳米技术学会各位同仁的持续努力和计划的支持下,我国的微米纳米技术已经得到了长足的发展,建立了北京大学、上海交通大学、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、中国电子科技集团公司第十三研究所等加工平台,形成了以清华大学、北京大学等高校和科研院所为主的优势研究单位。

十几年来,经过国防预研、重大专项、国防“973”、国防基金等项目的支持,我国已经在微惯性器件、RF MEMS、微能源、微生化等器件研究,以及微纳加工技术、ASIC技术等领域取得了诸多突破性的进展,我国的微米纳米技术研究平台已经形



成,许多成果获得了国家级的科技奖励。同时,已经形成了一支年富力强、结构合理、有影响力的科技队伍。

现在,为了更有效、有针对性地实现微米纳米技术的突破,有必要对过去的研究工作做一阶段性的总结,把这些经验和知识加以提炼,形成体系传承下去。为此,在国防工业出版社的支持下,以总装备部微米纳米技术专家组为主体,同时吸收国内同行专家的智慧,组织编写一套微米纳米技术专著系列丛书。希望通过系统地总结、提炼、升华我国“九五”以来微米纳米技术领域所做出的研究工作,展示我国在该技术领域的研究水平,并指导“十二五”及以后的科技工作。

丁衡高

2011年11月30日

# 前 言

微机电系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)将微结构的传感技术、致动技术和微电子控制技术集成于一体,形成同时具有“传感—计算(控制)—执行”功能的智能微型装置或系统。它具有结构体积小、性能稳定、可靠性高、能耗低、响应快以及制造成本低廉等优点,被认为是21世纪为人类社会生活创造新的高技术产业生长点的一场革命。MEMS技术集精密机械元件、电子器件、传感器和致动器功能于一体,特别适合航空、航天以及国防武器装备等尖端军事领域,不少MEMS产品已经在武器制导系统、敌我识别系统、分布式战场敏感网络、飞机灵巧蒙皮、微型机器人等方面获得应用。

本书综合运用连续体动力学、静电学、流体动力学等理论,研究机电耦合微构件的耦合动力学问题,以施加静电场力的两种典型微构件:微梁、微板为例,对其动态特性、敏感特性进行分析。书中考虑了静电场力等非线性因素,应用非线性近似解法分析了两种微构件系统的弱非线性自由振动、接近共振的受迫振动以及远离共振的受迫振动。此外,本书还对考虑压膜阻尼的两种微构件系统机电流体三场耦合动力学问题展开了研究,并进行了相应的应用研究,其中包括微型谐振压力传感器的机电耦合动力学问题,以及静电微泵的机电流体耦合动力学问题。本书将作者多年来从事这一领域的科研成果汇总、整理,希望本书能适合关心此领域工作的科研、教学以及工程设计人员的需要,对掌握微构件在多重因素影响下的响应规律、MEMS产品的多场耦合动力学性能设计及控制奠定理论和技术基础。此外,本书内容还可以为其他激励类型的微构件多场耦合动力学理论研究提供借鉴。

本书共分为12章,在第1章绪论中简要介绍了MEMS发展概况及其主要军事应用。第2章至第5章介绍了微梁机电耦合系统动力学理论,以及考虑空气挤压膜的微梁系统机电流体耦合动力学理论。第6章和第7章着重介绍了微板机电耦合系统的振动特性。第8章至第11章以板、梁微构件多场耦合理论为背景,介绍了国防装备中应用较为广泛的微型谐振压力传感器、静电微泵的动力学分析。第12章介绍了微板机电耦合系统的原理性试验。

与本书相关的研究工作得到河北省重点基础研究项目“微型谐振压力传感器多场耦合动力学”(编号:13961701D),以及“机电集成静电谐波微型传动系统”(准号:50775195)等国家自然科学基金项目的资助,作者在此表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促,个人水平有限,本书的错误和不当之处在所难免,诚恳希望同行及广大读者批评指正。

作者

2015年3月于燕山大学

## 内 容 简 介

本书主要介绍 MEMS 典型构件机电耦合及机电流体耦合动力学的相关理论与应用。全书共分 12 章, 主要内容包括: 微机电系统及微机电系统动力学问题的发展与应用现状; 静电驱动微板、微梁机电耦合动力学理论; 静电驱动微板、微梁机电耦合非线性动力学理论; 考虑压膜阻尼的微梁机电流体耦合动力学理论; 谐振式微型压力传感器敏感性分析; 静电微泵泵膜动力学、流量及结构优化分析; 静电驱动微板动力学实验测试。

本书可供高等院校微电子、机电一体化等专业的师生阅读, 也可作为从事微机电系统工程设计开发的研究生和科研技术人员参考。

This book mainly introduces the electromechanical coupled and electromechanical fluid coupled dynamics theory and application of MEMS typical micro components. There are 12 chapters in this book: Introduction, Electromechanical coupled dynamics of electrostatically driven micro - plates and micro - beams, Electromechanical coupled nonlinear dynamics of electrostatically driven micro - plates and micro - beams, Electromechanical fluid coupled dynamics of micro - beams considering squeeze film damping, Sensitivity about resonant pressure micro sensor, Dynamics of the electrostatic micro - pump membrane, its flow and structural optimization, Dynamics test of electrostatically driven micro - plate.

This book can be used as reference book for teachers, students and engineers of microelectronics, mechatronics majors, and other relevant majors.

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 MEMS 概述 .....	1
1.2 MEMS 在军事领域的应用 .....	5
1.3 微构件动力学研究 .....	9
<b>第 2 章 微梁机电耦合振动</b> .....	12
2.1 微梁机电耦合模型建立 .....	12
2.2 静电力分析 .....	15
2.3 悬臂式微梁机电耦合自由振动 .....	16
2.3.1 静态位移求解 .....	16
2.3.2 动态分析 .....	18
2.4 弹性支撑微梁机电耦合自由振动 .....	19
2.4.1 静态位移求解 .....	19
2.4.2 动态分析 .....	20
2.5 悬臂式微梁机电耦合受迫振动 .....	22
2.5.1 简谐受迫振动 .....	22
2.5.2 共振分析 .....	23
2.6 弹性支撑微梁机电耦合受迫振动 .....	23
2.6.1 简谐受迫振动 .....	23
2.6.2 共振分析 .....	24
2.7 实例计算及分析 .....	25
2.7.1 悬臂式微梁 .....	25
2.7.2 弹性支撑微梁 .....	33
<b>第 3 章 微梁机电耦合非线性动力学</b> .....	40
3.1 弱非线性系统的自由振动 .....	40
3.2 接近共振的受迫振动 .....	42
3.3 远离共振的受迫振动 .....	45
3.4 实例计算及分析 .....	47

3.4.1	弱非线性系统自由振动分析	47
3.4.2	接近共振的受迫振动分析	49
3.4.3	远离共振的受迫振动分析	50
<b>第4章</b>	<b>微梁机电流体耦合自由振动</b>	<b>54</b>
4.1	微梁机电流体耦合模型建立	54
4.1.1	振动方程	54
4.1.2	空气挤压膜阻尼	54
4.1.3	系统动静态方程	56
4.2	微梁机电流体耦合自由振动	56
4.2.1	静态位移求解	56
4.2.2	动态分析	56
4.3	实例计算及分析	61
4.3.1	位移振动响应分析	61
4.3.2	电场、压力场振动响应分析	62
4.3.3	灵敏度分析	65
<b>第5章</b>	<b>微梁机电流体耦合受迫振动</b>	<b>75</b>
5.1	受迫振动方程的建立	75
5.2	受迫振动求解	75
5.3	实例计算及分析	78
5.3.1	共振分析	78
5.3.2	灵敏度分析	79
<b>第6章</b>	<b>微板机电耦合振动</b>	<b>86</b>
6.1	微板机电耦合模型建立	86
6.2	四边简支微板机电耦合自由振动	89
6.2.1	静态位移求解	89
6.2.2	动态分析	90
6.3	对边简支对边固定微板机电耦合自由振动	92
6.3.1	静态位移求解	92
6.3.2	动态分析	94
6.4	三边简支一边自由微板机电耦合自由振动	95
6.4.1	静态位移求解	95
6.4.2	动态分析	96
6.5	四边简支微板机电耦合受迫振动	97
6.5.1	简谐电压激励	97

6.5.2	简谐外载荷激励	99
6.5.3	简谐电压和简谐外载荷共同激励	100
6.6	对边简支对边固定微板机电耦合受迫振动	102
6.6.1	简谐电压激励	102
6.6.2	简谐外载荷激励	103
6.6.3	简谐电压和简谐外载荷共同激励	103
6.7	三边简支一边自由微板机电耦合受迫振动	104
6.8	微板机电耦合自由振动实例计算及分析	105
6.8.1	四边简支微板	105
6.8.2	对边简支对边固定微板	111
6.8.3	三边简支一边自由微板	116
6.9	微板机电耦合受迫振动实例计算及分析	121
6.9.1	简谐电压激励下的受迫响应分析	121
6.9.2	简谐电压和简谐外载荷共同作用下的微板动态响应分析	126
6.9.3	简谐电压激励下的共振分析	148
6.9.4	简谐电压和简谐外载荷共同激励下的共振分析	151
<b>第7章</b>	<b>微板机电耦合非线性动力学</b>	<b>154</b>
7.1	弱非线性系统自由振动	154
7.1.1	非线性静电场力	154
7.1.2	系统非线性动力学方程	155
7.1.3	广义时间函数及幅频响应特性	156
7.2	接近共振的受迫振动	158
7.3	远离共振的受迫振动	161
7.4	实例计算及分析	164
7.4.1	工作电压与静态平均位移	164
7.4.2	频率特性	165
7.4.3	时域动态响应	173
7.4.4	幅频响应特性	186
7.4.5	系统影响因素分析	190
<b>第8章</b>	<b>谐振式压力传感器敏感性分析</b>	<b>206</b>
8.1	灵敏度近似计算方法	206
8.1.1	压力膜弯曲	206
8.1.2	灵敏度分析	208
8.1.3	灵敏度影响因素分析	209

8.2	不同结构谐振式压力传感器 .....	210
8.2.1	固支结构 .....	211
8.2.2	跳板结构 .....	212
8.2.3	半岛结构 .....	213
8.3	改进的灵敏度计算方法 .....	215
8.3.1	半岛结构压力应力关系分析 .....	215
8.3.2	灵敏度解析式的推导 .....	216
8.4	两种方法的比较 .....	220
<b>第9章</b>	<b>静电微泵泵膜的振动分析</b> .....	<b>222</b>
9.1	静电微泵的模型及泵膜的振动方程 .....	222
9.2	泵膜的自由振动 .....	223
9.3	泵膜在偏置电压下的静态位移 .....	226
9.4	防止静电吸合的条件 .....	227
9.5	微泵机电流体耦合动力学模型及压膜阻尼 .....	228
9.6	偏置电压下泵膜的振动方程 .....	233
9.7	偏置电压下泵膜的自由振动 .....	234
9.7.1	自由振动微分方程的求解 .....	234
9.7.2	频率特性 .....	235
9.7.3	广义坐标 .....	236
9.8	偏置电压下泵膜的受迫振动 .....	240
9.8.1	受迫振动微分方程的求解 .....	240
9.8.2	接近共振的受迫振动 .....	241
9.8.3	远离共振的受迫振动 .....	245
9.9	实例计算及分析 .....	249
9.9.1	系统结构参数 .....	249
9.9.2	泵膜静态位移分析 .....	249
9.9.3	泵膜的自由振动分析 .....	249
9.9.4	泵膜接近共振的受迫振动分析 .....	255
9.9.5	泵膜远离共振的受迫振动分析 .....	257
<b>第10章</b>	<b>微泵流量分析</b> .....	<b>259</b>
10.1	无阀微泵的工作原理 .....	259
10.2	扩散口和收缩口的性能分析 .....	260
10.3	微泵流量分析 .....	264
10.3.1	阻尼比的确定 .....	264



10.3.2	流量计算	264
10.3.3	瞬时流量计算	266
10.4	微泵流量影响因素分析	268
10.4.1	远离共振	268
10.4.2	接近共振	269
10.4.3	流量影响曲线	270
10.4.4	结果分析	273
<b>第 11 章</b>	<b>微泵结构参数的优化</b>	<b>275</b>
11.1	优化设计的数学模型	275
11.2	静电微泵优化问题的简化	276
11.3	静电微泵的优化	277
11.4	ANSYS 仿真分析	280
11.4.1	泵膜自由振动模态仿真	280
11.4.2	泵膜结构静电耦合变形仿真	283
<b>第 12 章</b>	<b>静电驱动微板动力学实验</b>	<b>287</b>
12.1	实验测试原理	287
12.2	微动实验平台的设计与制造	289
12.2.1	主要设计要求	290
12.2.2	结构设计	290
12.3	简谐激励下微板动力学实验	291
12.3.1	共振区域检测	292
12.3.2	微板动力学实验	294
12.3.3	实验结果与理论值分析比较	298
<b>参考文献</b>		<b>300</b>