

〔美〕 Kenji Uchino Jayne R. Giniewicz 著
胡敏强 金 龙 顾菊平 徐志科 译



Micromechatronics

微机械电子学



科学出版社
www.sciencep.com

微机械电子学

Micromechatronics

[美] Kenji Uchino Jayne R. Giniewicz 著
胡敏强 金 龙 顾菊平 徐志科 译

科 学 出 版 社

北 京

图字: 01-2008-0362

内 容 简 介

本书描述了微机械电子学领域中固态致动器装置的基础理论、实际应用材料、致动装置的设计、驱动/控制技术以及典型应用实例,讨论了该学科领域未来的发展趋势。全书内容如下:第1章描述微机械电子学的现状和发展趋势;第2~4章覆盖了相关的理论知识、实用材料以及设计制造中的注意事项;第5章描述驱动/控制技术;第6章描述致动器的建模、损耗和发热问题;第7章介绍有限元分析的方法;第8~10章介绍三种类型装置的具体应用;第11章介绍在当代科技和经济形势下微机械电子学的未来发展。

本书适合高等院校微机械电子学领域本科生、研究生、专业教师 and 该领域的科技人员参考使用。

Copyright © 2003 by Marcel Dekker, Inc.

All Rights Reserved.

Authorized translation from English language edition

published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC.

本书封面贴有 Taylor & Francis 集团防伪标签,未贴防伪标签属未获授权的非法行为。

图书在版编目(CIP)数据

微机械电子学/(美)内野研二,简尼维茨著;胡敏强等译. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-029121-9

I. 微… II. ①内… ②简… ③胡… III. 机电一体化 IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 190270 号

责任编辑:姚庆爽/责任校对:刘小梅

责任印制:赵 博/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年10月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010年10月第一次印刷 印张:24 1/2

印数:1—3 000 字数:465 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

作为压电致动器研究的先驱，Kenji Uchino 是致动器和传感器国际中心的主任，宾夕法尼亚州立大学电气工程教授。目前，他在宾夕法尼亚州立大学开设研究生课程：铁电体装置和微机械电子学，采用的本教材和课本《铁电体装置》由 Marcel Dekker 公司于 2000 年出版。

Kenji Uchino 在东京工业大学获得博士学位后，成为该校物理电子系的助理研究员，1985 年为上智大学（东京）物理系的副教授，1991 年到宾夕法尼亚州立大学。1986~1988 年，Kenji Uchino 教授担任 NASDA（日本）的航天飞机应用委员会会员；1992~1994 年，他担任了 NF 电子仪器（美国）的副总裁。现在，他已经是美国、日本、欧洲等八十多家研发与制造压电致动器的厂家的顾问。1986 年以来，他一直是由日本政府（MITI）资助一部分的智能致动器/传感器研究委员会主席。此外，他是美国陶瓷学会的董事，IEEE、日本材料研究学会和应用物理学会的会员。他还担任了《高性能材料（克吕韦尔学术）》期刊的执行副主编，《智能材料与结构体系》期刊和日本《应用物理》期刊的副主编。

Kenji Uchino 教授的研究涉及固态物理学，主要侧重于电介质、铁电体和压电材料研究。特别是在这一领域，他针对新材料、装置设计和制造工艺的性能开发了固态致动器，并应用于精确定位器、超声波电机以及高频振荡器中。他共撰写了论文 300 篇，著作 40 本，获得了与陶瓷致动器相关的专利 19 项。

Kenji Uchino 教授还获得过多项学术奖励，包括宾夕法尼亚州立大学工程学会颁发的杰出研究奖和日产研究奖学金。除了他的学术成果，他还是 KERAMOS（国际专业陶瓷工程学会）的荣誉会员。此外，日本科学电影节（1989）上，表彰他在几个教育录影带中制作压电致动器的科学纪录片获得了最佳电影纪录片奖。

Jayne R. Giniewicz 是宾夕法尼亚州的印第安纳大学（IPU）的物理学副教授。在 1992 年加入 IPU 物理系之前，Jayne R. Giniewicz 博士是宾夕法尼亚州立大学材料研究实验室的研究人员和研究生，期间她获得了固态理论的理科硕士学位（1985）和博士学位（1991）。1987 年，她以访问学者的身份，在东京的索菲亚大学和 Kenji Uchino 研究组一起工作。她参与了用于实现高分辨率投影技术的电光快门阵列的开发，该项目由富士通总公司和川崎有限公司资助；她还参与制作了部分 Kenji Uchino 教授的关于致动装置的教学录像。此外，她还是材料研究协会、希格玛西研究会、匹兹堡衍射学会及美国物理学会的会员。

Jayne R. Giniewicz 博士主要研究领域为新型功能材料和复合物结构特性，尤其是其铁电、机电及电光学特性和应用。她一直从事并推动新型弛豫铁电材料、铁电固溶体系统和新型压电复合系统的研究工作，以及在宾夕法尼亚州的 IPU 物理教学的教育评估和课堂主动学习的策略的研究。

译 者 序

微电子学是一门综合性很强的边缘学科，它渗透性强，与其他学科结合产生出了一系列新的交叉学科，微机械电子学（Micromechanitronis）就是微电子学与机械学相结合的产物，是近年来发展起来且具有广阔应用前景的新技术。

本书属于微机械电子学的专著，是一本不可多得的教学、科研参考书，它是国际微机械电子学著名学者内野研二（Kenji Uchino）教授及其合作作者佳南·简尼维茨（Jayne R. Giniewicz）教授多年从事教学、科研工作的成果，也是宾夕法尼亚州立大学几个相近领域的研究生教材，深受师生好评。目前国内该领域相关研究也出版了一些专著，但国外一些代表性著作很少引进国内，因此翻译出版一些优秀教材供国内读者学习，以推进中国的教学水平和科技水平很有必要。

本书是东南大学“超声波电机及其控制研究课题组”科研工作的一部分。全书由胡敏强教授统一规划，组织了东南大学金龙教授、徐志科副研究员和南通大学顾菊平教授共同完成全书的翻译工作，东南大学博士生王瑞霞、陈强参加了部分初译工作，南通大学仲崇贵副教授参加了第2章的初译。翻译工作中我们力求忠实准确地把握原著，尽量保留原著风格，对原著中个别印刷错误亦作了必要的注释。在翻译工作期间，我们还参阅了作者寄来的四章准备再版的英文教材。

全书由东南大学赵家璧教授作了详细且认真的审校，力求译文的准确性。科学出版社的姚庆爽编辑对本书的编写给予了指导和帮助，译者对他们表示衷心感谢。课题组还要向国家自然科学基金委员会、江苏省科技厅、南京市科技局、国电南京自动化股份有限公司、西安微电机研究所等单位给予翻译工作的支持和关心表示衷心感谢。

由于时间仓促，加上译者水平有限，书中难免有不完善之处，恳请各位专家和读者批评指正。

前 言

近年来,机电一体化领域的研究取得了重大进展,正如“日式英语”(日本人英语)单词“mechatronics”(机电一体化)所反映的那样,集电子和机械于一体装置的概念在日本已广为公众所接受。目前,日本工厂已用机器人制造出许多产品,日本超市通常利用自动化系统进行样品展示和销售。此外,半导体芯片技术的快速发展产生了对微位移定位装置的需求。因此,利用压电、磁致伸缩或形状记忆效应来工作的致动器已成为微机械电子技术新时代的重要组成部分。

本书是(内野研二)撰写的陶瓷致动器系列丛书中的最新著作。1984年,日本工业技术中心出版了他的第一本书《压电致动器的发展及应用要点》;1986年,森北出版公司(东京)出版了第二本《压电/电致伸缩型致动器》,成为该公司畅销书之一,随后被译成韩语。森北出版公司(东京)还出版了基于问题的教材《压电致动器:问题求解》,并附送60min教学视频录像带;1996年,完成了教材的英文翻译版,并由克鲁维尔学术出版社发行;该系列的第六本由内野研二和佳南·简尼维茨合作完成,提供了早期教材中提出的主题的最新章节和微机械电子学中致动器的当前以及未来应用的新材料。

本书提出了固态致动器的理论描述、实际材料、装置设计、驱动/控制技术和典型应用的概述,还讨论了微机械电子学领域的当前及未来发展趋势。第1章沿着书中应用材料的概况对该领域的概要和微定位技术的最新发展进行了介绍;第2~4章涵盖了相关的理论基础和实用材料、设计和制造的考虑因素;第5章描述了驱动/控制技术;第6章解决了致动装置的建模和调节过程中的机电损耗与发热等关键问题;第7章致力于利用有限元分析对这些效应的建模,这些方法的演示包含在随书附带的光盘中;第8~10章介绍了三种不同类装置的应用,第8章介绍了伺服位移传感器的应用;第9、10章分别介绍了脉冲驱动电机和超声波电机的应用;第11章从行业和社会角度,就这些新系统对科技和经济的影响展望了机械电子学的未来。

本书是为电子材料、控制系统工程、光通信、精密机械和机器人等领域学习和工作的研究生或工业工程师编写的,主要用做研究生课程的教材,需要30个75min的课时;当然,本书也可供该领域想扩展相关知识的人自学。随书附送的57min录像的光盘包括一些致动器的商业生产和利用有限元分析建模的实例。非常感谢纽约Magsoft公司的菲利普博奇伊洛博士制作了附送光盘,并为第7章的有限元法撰写了前言。致动器的发展及其在微定位中的应用是一个新的、不断变

化的、高度跨学科领域，只用一本书来覆盖所有相关材料是不可能的，因此，本书选择了一些认为比较重要和基础的主题，以使读者对微机械电子系统的致动装置设计及其应用有足够的认识。

特别要感谢允许本书的应用章节中引用了他们研究成果的下列人员：

拓宋佐藤，东京工业大学 (Takuso Sato, Tokyo Institute of Technology)；

胜则横山和千秋田沼，东芝的 R&D 实验室 (Katsunori Yokoyama and Chiaki Tanuma, Toshiba R&D Laboratory)；

内田繁雄和森山文彦，日立中央研究实验室 (Shigeo Moriyama and Fumihiiko Uchida, Hitachi Central Research Laboratory)；

手流林和严林，东京技术研究所，精密工程实验室 (Teru Hayashi and Iwao Hayashi, Tokyo Institute of Technology, Precision Engineering Laboratory)；

中野圭介和大内秀雄，东京技术研究所，精密工程实验室 (K. Nakano and H. Ohuchi, Tokyo Institute of Technology, Precision Engineering Laboratory)；

贞行高桥，NEC 公司中央研究所 (Sadayuki Takahashi, NEC Central Research Laboratory)；

肯矢野，NEC 电气通信传输部 (Ken Yano, NEC Communication Transfer Division)；

路久菅，NEC 微电子实验室 (Michihisa Suga, NEC Microelectronics Laboratory)；

指田年生，新生工业 (Toshiiku Sashida, Shinsei Industry)；

森英治、上羽贞行、黑泽实，东京技术研究所，精密工程实验室 (E. Mori, S. Ueha, M. Kuribayashi, Tokyo Institute of Technology, Precision Engineering Laboratory)；

昭雄熊田，日立麦克赛尔 (Akio Kumada, Hitachi Maxel)；

大西一正，阿尔卑斯电气 (Kazumasa Onishi, ALPS Electric)；

富川义郎和广濑诚二，山形大学 (Yoshiro Tomikawa and Seiji Hirose, Yamagata University)；

大冢一弘，智能结构中心，MISc (Kazuhiro Otsuka, Smart Structure Center, MISc)；

安文古屋，弘前大学 (Yasubumi Furuya, Hirosaki University)；

樋口俊郎，东京大学 (Toshiro Higuchi, University of Tokyo)；

本光和田，喷气推进实验室 (Ben K. Wada, Jet Propulsion Laboratory)；

詹姆斯范森和马克伊利，喷气推进实验室和 Xingtics (J. L. Fanson and M.

A. Ealey, Jet Propulsion Laboratory and Xinetics);

斯特罗克, 斯特罗克技术学会 (H. B. Strock, Strock Technology Associates);

富来涛, 爱荷华州立大学 (A. B. Flatau, Iowa State University);

克拉克, 克拉克协会 (A. E. Clark, Clark Associates);

内斯比特哈古德, 马萨诸塞州技术研究所 (Nesbit Hagood, Massachusetts Institute of Technology);

马克河乔利和大卫卡尔森, 洛德公司 (Mark R. Jolly and J. David Carlson, Lord Corporation)。

对于想了解当前国家最先进致动器技术消息的读者, 我们推荐由固态致动器研究委员会 (JTTAS) (内野研二任主编) 撰写、1995 年由东京富士技术社出版的《精密控制用新型致动器手册》(1087 页), 想详细及时了解铁电体材料及其应用的参考内野研二编写的《铁电体装置》(2000 年马塞尔德克尔出版), 特别建议有兴趣的读者学习更多有关铁电材料的知识。

最后, 感谢宾夕法尼亚州立大学和宾夕法尼亚州印第安纳大学的各位同事, 特别感谢宾夕法尼亚州立大学的罗伯特纽纳姆博士和埃里克克鲁斯博士对准备此书过程中的不断鼓励和支持。内野研二在此感谢妻子美智子在这个项目期间的关心和支持。佳南·简尼维茨想感谢物理系的同事和朋友以及宾夕法尼亚州印第安纳大学的迪安约翰厄克对其参与这个项目的热烈支持, 她将一如既往地竭诚而全心地与约翰和西奥简尼维茨分享所有项目工作中的美好东西。

Kenj Uchino (内野研二)

Jayne Giniewicz (佳南·简尼维茨)

2002 年 5 月于宾夕法尼亚州立大学, 宾夕法尼亚印第安纳大学

符 号 表

D	电位移
E	电场
P	电介质极化, 电介质极化强度
P_s	自发极化
α	离子极化
γ	洛伦兹因数
p	偶极矩 ^①
ϵ_0	真空介电常数
ϵ	介电常数
K	相对电容率或相对介电常数 (对压电体而言: $K \approx \chi = K - 1$)
κ	逆介电常数
χ	电介质极化率
C	居里-外斯常数
T_0	居里-外斯温度
T_c	居里温度 (相变温度)
G	吉布斯自由能
A	赫尔姆霍茨自由能
F	兰道自由能密度
x	应变
x_s	自发应变
X	应力
s	弹性顺度
c	弹性刚度
v	音速
d	压电应变系数 ^②

① 原书中偶极距用了“ μ ”和“ p ”两种符号, 现统一用“ p ”符号。

② 原书中“ d ”用压电应变系数和电荷系数两种定义, 现统一为压电应变系数一种定义。

h 压电逆电荷系数^①

g 压电电压系数

M, Q 电致伸缩系数

k 机电耦合系数

η 效率

Y 杨氏模量

$\tan \delta (\tan \delta')$ 扩展的(强化的)介电损耗

$\tan \phi (\tan \phi')$ 扩展的(强化的)弹性损耗

$\tan \theta (\tan \theta')$ 扩展的(强化的)压电损耗

① 原书中“ h ”用逆电荷系数定义,即国内压电刚度系数定义。

教学进度安排

每学期上 30 次课，每次上课时间 75min。

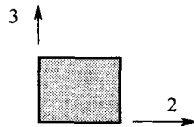
课题	课时
0 本课程概述和预备知识的检查	1
1 致动器和微机械电子学的当前动向	3
2 电场感应应变的理论描述	3
3 致动器材料	2
4 致动器的结构及制造方法	2
5 致动器的驱动/控制技术	4
6 损耗机理与发热	1
7 有限元分析法	2
实验室演示	1
8 伺服位移传感器的应用	3
9 脉冲驱动电机的应用	2
10 超声波电机的应用	4
11 微机械电子学展望	1
复习（问/答）	1

预 备 知 识

学习微机械电子学需要了解一些预备知识。在参照下一页答案之前先回答下列问题。

问题 1：列出应力 X -应变 x 的方程式，推导弹性刚度 c 和弹性顺度 s 的定义式。

问题 2：在下图所示的方形材料上粗略画出切应力 (X_4) 和切应变 (x_4)。



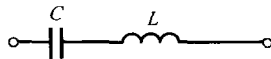
问题 3：写出声音在密度为 ρ ，弹性顺度为 s^E 的材料中传播的速度 v 的表达式。

问题 4：设杆的长度为 l ，声音在杆内的传播速度为 v ，写出基本纵向共振频率 f_0 的表达式。

问题 5：给出下列等式右边余弦函数的幅角， $\cos(kx)\cos(\omega t) + \cos(kx - \pi/2)\cos(\omega t - \pi/2) = \cos[?]$

问题 6：计算极板面积为 A ，电极极板间距为 t ，极板间填充的介质的相对介电常数为 K 的电容器的电容 C 。

问题 7：写出下图所示电路的谐振频率表达式。



问题 8：写出冲激函数 $[\delta(t)]$ 的拉普拉斯变换。

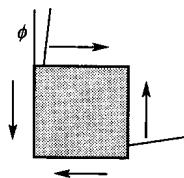
问题 9：设电源内阻为 Z_0 ，则外电路电阻 Z_1 应当取多大，才能使电路获得最大输出功率？

问题 10：设压电体应变系数为 d ，若施加外应力 X ，求它的极化率 P 。

答案。

问题 1: $X=cx$, $x=sX$

问题 2: $x_4=2x_{23}=2\phi$ (注意: 一般最好选用弧度法, 切应力不等于对角线处的外应力。)



问题 3: $v = 1/\sqrt{\rho^E}$

问题 4: $f_o = \frac{v}{2l}$

问题 5: $(kx - \omega t)$ (两个驻波叠加可产生一个行波)

问题 6: $C = \epsilon_o K \left(\frac{A}{t} \right)$

问题 7: $f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$

问题 8: 1 (注意: 偶尔会利用冲激函数来获取系统的传递函数)

问题 9: $Z_1 = Z_o$. (注意: Z_1 的电流和电压分别为 $V/(Z_o + Z_1)$ 和 $[Z_1/(Z_o + Z_1)]V$, 两者的乘积就是功率, 当 $Z_o/\sqrt{Z_1} = \sqrt{Z_1}$ 时, 输出功率最大。)

问题 10: $P=dX$ (这就是所谓的直接压电效应。)

目 录

译者序

前言

符号表

教学进度安排

预备知识

第 1 章 致动器和微机械电子学的当前趋势	1
1.1 对新型致动器的需求	1
1.2 微定位的传统方法	3
1.3 固态致动器概述	5
1.4 重要设计概念和本书结构	24
第 2 章 场致张力的理论描述	29
2.1 铁电性	29
2.2 电场感应应变的微观描述	36
2.3 压电性的张量/矩阵描述	38
2.4 铁电和反铁电现象的理论描述	47
2.5 磁致伸缩现象学	60
2.6 铁电畴的再取向	61
2.7 铁电体中的晶粒大小和电场感应应变	67
第 3 章 致动器材料	76
3.1 实用致动器材料	76
3.2 压电换能器的品质因数	95
3.3 电致伸缩应变与温度的关系	101
3.4 响应速度	104
3.5 致动器的机械特性	105
第 4 章 陶瓷致动器的结构及制造方法	123
4.1 陶瓷和单晶体的制造	123
4.2 装置设计	128
4.3 电极材料	153
4.4 市场上现有的压电致动器和电致伸缩致动器	156

第 5 章 压电致动器的驱动/控制技术	162
5.1 压电致动器的分类	162
5.2 反馈控制	163
5.3 脉冲驱动	177
5.4 谐振驱动	187
5.5 微机电系统的传感器和特殊元器件	194
第 6 章 损耗机理与发热	210
6.1 压电体的迟滞和损耗	210
6.2 压电体中的发热	228
6.3 硬性和软性压电材料	234
第 7 章 压电结构有限元法简介	241
7.1 背景知识	241
7.2 定义问题的方程	242
7.3 有限元法的应用	244
第 8 章 伺服位移传感器的应用	253
8.1 变形镜	253
8.2 显微镜载物台	258
8.3 高精度线性位移装置	259
8.4 伺服系统	263
8.5 VCR (录像机) 磁头跟踪致动器	268
8.6 振动抑制和噪声消除系统	269
第 9 章 脉冲驱动电机应用	273
9.1 成像系统的应用	273
9.2 尺蠖装置	276
9.3 点阵打印机机头	280
9.4 喷墨打印机	286
9.5 压电继电器	289
9.6 自适应悬挂系统	292
第 10 章 超声波电机的应用	295
10.1 超声波电机的概述及分类	295
10.2 驻波电机	300
10.3 混合模态电机	304
10.4 行波电机	307
10.5 模态旋转电机	317
10.6 不同超声波电机的性能比较	319

10.7	微型步行机械	320
10.8	超声波电机速度和推力的计算	322
10.9	设计超声波电机的要点	325
10.10	超声波电机的其他应用	331
10.11	磁电机	334
10.12	超声波电机的可靠性	334
第 11 章	微机械电子系统中陶瓷致动器的展望	341
11.1	从专利统计看发展趋势	341
11.2	压电致动器/超声波电机市场	342
11.3	致动器设计的未来趋势	345
索引		356