

微 纳 系 统 系 列 译 丛

ENERGY HARVESTING TECHNOLOGIES

能量收集技术

[印度] 沙山克·普里亚 (S. Priya)

[美国] 丹尼尔·茵曼 (D. J. Inman)

著

黄见秋 黄庆安 译



东南大学出版社

能量收集技术

Energy Harvesting Technologies

[印度] 沙山克·普里亚(S. Priya) 著
[美国] 丹尼尔·茵曼(D. J. Inman)
黄见秋 黄庆安 译

东南大学出版社
• 南京 •

《微纳系统》译丛总序

微机电系统(MEMS)出现于 20 世纪 80 年代中后期,是指可以批量制造的、集微结构、微传感器、微执行器以及信号处理和控制电路等于一体的器件或系统。其特征尺寸一般在 $0.1\sim 100\ \mu\text{m}$ 范围。目前国际上通常将 MEMS 冠以 Inertial-, Optical-, Chemical-, Bio-, RF-, Power-等前缀以表示其不同的应用领域。MEMS 集约了当今科学技术的许多尖端成果,更重要的是它将敏感与信息处理及执行机构相结合,改变了人们感知和控制外部世界的方式。

MEMS 技术经过 20 多年的发展,诸如喷墨打印机中的喷嘴阵列、照相机中的图像稳定陀螺、手机中的振荡器和麦克风、投影显示器中的微镜阵列等消费类电子产品,以及汽车防撞气囊中的加速度传感器、胎压检测系统中的压力传感器等等已经进入大规模生产。近年来我国出现了不少 MEMS 高新技术企业,很多大学也开设了 MEMS 课程,因此,无论是 MEMS 教学或科学研究,还是工业化产品开发,都迫切需要 MEMS 技术方面的信息资料,而 MEMS 是一个快速发展的前沿技术领域,信息资料分散于期刊论文、专利以及会议文集中,缺乏系统地归纳、分析与整理,不成体系。因此,应对我国 MEMS 发展需求,特别需要这方面的专著,虽然我国一些出版社已经购买版权并翻译出版了部分国外书籍,对我国 MEMS 技术的发展起到了积极推动作用,但这些书籍是零散的、缺乏整体规划,而发达国家的出版社在 MEMS 书籍方面,进行了有效的组织和规划,例如:Springer 出版社 2005 年出版了 MEMS/NEMS Handbook: Techniques and Applications(共 5 卷)、2007 年开始出版 MEMS Reference Shelf(目前已经出版 9 本),Wiley-VCH 出版社 2004 年开始出版 Advanced Micro and Nanosystems Series(目前已经出版 7 本)。面对国外 MEMS 快速发展的形势和我国对 MEMS 书籍的迫切需求,及时系统地规划、遴选、组织并翻译出版国外

MEMS 书籍很有必要,东南大学出版社 2005 年开始出版的《微纳系统》系列译丛就是这方面的尝试。

MEMS 设计、制造、封装、可靠性以及测试等共性技术推动了 MEMS 的发展,市场与应用需求则牵引了 MEMS 技术的进步,而微米与纳米技术的结合给 MEMS 带来了许多新的机遇。

设计

MEMS 工作过程涉及机械能、电能、磁能、热能和化学能等及其之间的耦合,工作原理复杂,因此,理解其工作过程,提高或优化其性能,需要模型、算法和设计工具。

制造

MEMS 所用材料主要有半导体硅、玻璃、聚合物、金属和陶瓷等。由于所用材料不同,习惯上,将 MEMS 制造分为 IC(集成电路)兼容的制造技术和非 IC 兼容制造技术。IC 所完成的功能主要利用了硅单晶的电学特性,而硅单晶也有良好的机械特性,例如,硅单晶的屈服强度比不锈钢的高、努氏硬度比不锈钢的强、弹性模量与不锈钢的接近,同时,硅单晶几乎不存在疲劳失效。硅单晶良好的机械特性以及微电子已经建立起来的强大工业基础设施,使其成为 MEMS 的主流材料。但由于微电子制造技术基本上是一种平面制造工艺,为在芯片上制造可动部件,需要微机械加工技术。

硅微机械加工技术主要包括表面微机械加工技术、体微机械加工技术、硅片直接键合技术以及这些技术的相互融合。

1965 年美国 Westinghouse 电气公司的 H. C. Nathanson 等人提出硅表面微机械加工技术,在 20 世纪 80 年代中后期得到发展,20 世纪 90 年代出现的气相 HF 牺牲层释放技术,大大提高了表面微机械加工技术的生产成品率和效率,利用表面微机械加工技术制造的典型产品有 ADI 公司加速度传感器、TI 公司的微镜阵列投影显示器等等。

硅体微机械加工技术包括湿法刻蚀和干法刻蚀,KOH 湿法各向异性刻蚀于 1967 年由美国 Bell Lab 的 H. A. Waggner 等人提出,在 20 世纪 80 年代中后期得到发展,20 世纪 90 年代由日本京都大学 O. Tabata 等人发明的 TMAH 湿法各

向异性刻蚀与 IC 工艺线兼容,进入工业化应用;反应离子刻蚀(RIE)是 IC 工艺,1994 年,德国 Bosch 公司采用电感耦合等离子(ICP)方法发明了 DRIE(深反应离子刻蚀)技术,它是硅体微机械加工的基本技术之一,利用体微机械加工技术制造的典型产品有 Freescale 公司的压力传感器、ST-microelectronics 公司的加速度传感器、Akustica 公司的麦克风、SiTime 公司和 Discera 公司的振荡器、HP 公司的喷墨打印机微喷嘴阵列等等。

1986 年,美国 IBM 公司的 J. B. Lasky 等人和日本东芝公司的 M. Shimbo 等人分别独立开发出硅片直接键合技术,它是硅三维结构制造的主要技术之一,利用硅片直接键合技术制造的典型产品有 NovaSensor 公司的压力传感器等。

由于硅材料耐磨性差以及特殊环境的使用问题,非 IC 兼容加工技术的发展可满足 MEMS 不同材料和结构的需要以及特定应用(如生物化学环境和高温环境等)的需要,1985 年德国 W. Ehrfeld 小组开发出的 LIGA(光刻电铸成型)技术以及后来发展起来的 UV-LIGA(紫外光—光刻电铸成型)技术是非 IC 兼容的主要加工技术,此外还有激光三维加工技术、微细电火花加工技术、热压/注射成型加工技术、微纳米压印技术等。

集成化

MEMS 微传感器需要信号放大、信号处理和校准,MEMS 微执行器需要驱动和控制。因此,在应用中,MEMS 器件需要和微电子专用电路(ASIC)集成,这种集成可以是单片集成也可以是多片集成,至于采用那种方式集成,取决于系统要求和成本。单芯片集成是将传感器及执行器与处理电路及控制电路同时集成在一块芯片上,多片集成实际上涉及了封装技术。

CMOS MEMS 技术是一种单芯片集成技术,它利用集成电路的主流 CMOS 工艺制造 MEMS。MEMS 器件与电路单片集成的主要优点有:

(1) 可以实现高信噪比。一般而言,随着传感器的面积减小,其输出的信号也变小,对于输出信号变化在 nA(电流输出)、 μ V(电压输出)或 fF(电容输出)量级的传感器,敏感位置与外部仪器引线的寄生效应会严重影响测量,而单片集成可降低寄生效应和交叉影响。

(2) 可以制备大阵列的敏感单元。大阵列的单元信号连接到片外仪器时,互连线制备及可靠性是主要问题。对于较小阵列,引线键合等技术就可以满足要求,

但对于较大阵列,互连问题会影响生产成本和器件成品率,甚至不可能实现大的阵列。因此,采用片上多路转换器串行读出,不仅降低了信号调理电路的复杂性,而且大大降低了键合引线的数量,提高了可靠性和成品率。

(3) 可以实现智能化。除信号处理功能外,诸如校准、控制以及自测试等功能也可以在芯片上实现。单片集成方式已经促成了多种 MEMS 产品商业化,如加速度传感器、数字光处理器以及喷墨头。

但是,使用 CMOS MEMS 技术,可用材料被限制到 CMOS 材料以及和 CMOS 工艺兼容的材料,其制备与封装工艺也有较多限制。

封装

MEMS 封装的目的是为其提供物理支撑和散热,保护其不受环境的干扰与破坏,同时实现与外界信号、能源及接地的电气互连。MEMS 含有可动结构或与外界环境直接接触,因此 MEMS 封装比 IC 封装更复杂。一般来说,IC 制造中采用的低成本封装技术只能适用于一部分 MEMS,而大多数 MEMS 器件中含有可活动部件,往往需要采用特殊的技术和材料才能实现其电信号与非电信号的相互作用,而且器件种类繁多,大大增加了封装的难度和成本。MEMS 封装包括单芯片封装、多芯片封装、圆片级封装和系统封装(SiP)等封装技术,可实现非气密、气密和真空封装,封装过程需要考虑电性能、电磁性能、热性能(等物理场)、可靠性等问题。

可靠性

MEMS 可靠性指长期暴露在外界时可靠工作的能力。MEMS 可靠性一般分为制造过程中的可靠性(包括制造过程、划片、超声键合引线、封装等)、工作过程中的可靠性以及环境影响可靠性。为了保证 MEMS 的可靠性,还需要对材料、工艺、器件、系统等的可靠性进行测试、表征和预测。MEMS 在工作过程中的可靠性可以分为四类:

- (1) 没有可动的部件(例如压力传感器、微喷嘴等);
- (2) 有可动但没有摩擦或表面相互作用的部件(例如谐振器、陀螺等);
- (3) 有可动和表面相互作用的部件(例如继电器、泵等);
- (4) 有可动并有摩擦和表面相互作用的部件(例如光开关、光栅等)。

MEMS 机械失效机制主要是由于 MEMS 器件表面接触、滑动和摩擦引起。

机械装置的运动包括弹性运动和刚体运动(或整体运动),弹性装置借助柔性结构(如弹簧和扭转杆等)运动;而刚体装置借助铰链和轴承运动。刚体装置允许部件积累位移,而弹性装置将部件限制在固定点或固定轴附近运动。由于 MEMS 器件表面接触、滑动和摩擦引起的诸多问题还没有解决,因此目前 MEMS 产品均使用了柔性连接方式。

应用

MEMS 具有微型化的特征以及可高精度批量制造,与其他科学技术的结合,会产生新的应用领域,例如:

1970 年,美国 Kulite 公司研制出硅加速度传感器原型,1991 年,美国 Draper 实验室 P. Greiff 等人发明硅微机械陀螺。陀螺传感器与加速度传感器构成了惯性传感器及其系统,目前在电子类消费品、汽车、航空航天以及军事等领域有广泛应用。

1987 年,美国 UC Berkeley 的 R. S. Muller 小组和 Bell Lab 的 W. N. S. Trimmer 小组利用多晶硅表面微机械加工技术,研制出自由移动的微机械结构(微马达、微齿轮);1991 年,美国 UC Berkeley 的 K. J. Pister 小组研制出多晶硅铰链结构,自此,微机械操作、微组装、微机器人成为新的研究分支。

1989 年,美国 UC Berkeley 的 R. T. Howe 小组研制出横向驱动梳状谐振器,它是目前微机械振荡器、微机械滤波器、加速度传感器、角速度传感器(陀螺)、电容式传感器等的基本结构。

1980 年,美国 IBM 公司的 K. E. Petersen 发明硅扭转扫描微镜,它是光学扫描仪、数字微镜器件、光学开关等的基本结构;1992 年,美国 Stanford 大学 O. Solgaard 等人发明 MEMS 光栅光调制器,实现了微机械对光的操作,自此,Optical MEMS(光微机电系统)分支出现。光 MEMS 在光通讯技术、显示技术、光谱分析技术等领域有广泛应用。

1990 年,美国 Hughes 实验室的 L. E. Larson 等人研制出微机械微波开关。自此,RF MEMS(射频/微波微机电系统)分支出现,用微机械加工技术制造芯片上无源元件(电容、电感、开关等)、组件(滤波器、移相器)以及单芯片微波系统研究进入热潮。RF MEMS 在雷达、通讯等领域有广阔的应用前景。

1990年,瑞士Ciba-Geigy制药公司的A. Manz等人研制出微全分析系统(μ TAS)或称为芯片上实验室(Laboratory on a chip),这是目前微流控分析芯片的原型。自此开始了微型泵、微型阀门、微型混合器、微型通道等对微尺度下的流体操作器件研究。微流控在生物领域的应用是近年来MEMS最活跃的方向之一,具有降低分析成本、缩短反应时间、提高精度、多功能集成等优点,在分析化学、医疗、药物筛选等领域有广阔应用前景。

1995年,美国MIT的J. H. Lang, A. H. Epstein和M. A. Schmidt等人开始了微型气动涡轮发动机研究;2000年,美国Minnesota大学Kelley小组研制出基于MEMS技术的微型直接甲醇燃料电池原型。另外,诸如压电振动能量收集、热电能量收集、电磁能量收集等技术的发展,促进了Power-MEMS(动力微机电系统)分支出现。动力微机电系统在无线传感网、医疗、结构健康监测等领域有广阔的应用前景。

☛ 微米/纳米技术的结合

试验已经证实,硅基NEMS器件能够提供高达 10^9 Hz频率、 10^5 的品质因数、 10^{-24} N的力感应灵敏度、低于 10^{-24} K的热容、小到 10^{-15} g的质量以及 10^{-17} W的功耗。由于纳米尺度材料或结构的量子效应、局域效应以及表面/界面效应所呈现的奇特性质,可以大幅度提高MEMS/NEMS的性能,也可能使以前不可能实现的器件或系统成为可能。例如,2004年英国University of Manchester的K. S. Novoselov和A. K. Geim成功制备出可在外界环境中稳定存在的单层石墨烯(Graphene),其特异的性质如量子霍尔效应、超高迁移率、超高热导率和超高机械强度已经引起人们的广泛重视,是目前材料和凝聚态物理领域的研究热点之一,而当气体分子吸附在石墨烯表面时,吸附的分子会改变石墨烯中的载流子浓度,引起电阻突变,可实现单分子检测。但实际上,只有将纳米结构与微米结构互连后,才能与宏观世界联系起来,通过微米技术进行集成,可将基于纳效应的功能和特性转变成新的器件和系统,因此,MEMS技术可作为纳米科学走向纳米技术的桥梁。例如,20世纪80年代出现的隧道扫描显微镜、原子力显微镜以及近场显微镜等,它的探针最前面的部分是“纳”,后面就是“微”和“电”,三者集成在一起,协调工作。因此,微米纳米技术相互融合已成为趋势和发展主流。

市场

据有关咨询机构(例如 Yole, iSuppli, SPC, MANCEF, NEXUS, ITRS)的统计与预测分析, MEMS 产业在 2000 年全球销售总额约为 40 亿美元, 2005 年约为 68 亿美元, 2010 约为 100 亿美元。目前的主要产品包括微型压力传感器、惯性测量器件、微流量系统、读写头、光学系统、打印机喷嘴等, 其中汽车工业和信息产业的产品居主导地位, 占总销售额 80% 左右。

一方面, MEMS 前期开发的技术已经开始进入产业化, 另一方面, MEMS 与纳米技术等其他新技术的交叉研究方兴未艾。面临这种发展趋势, 无论是高等学校教学或科学研究, 还是工业部门产品开发, 都需要及时系统地学习并总结前人的知识和经验。

东南大学黄庆安教授长期从事 MEMS 教学和科研工作, 经常关注国际微米/纳米技术的最新进展及有关 MEMS 技术信息, 他带领的团队在 MEMS CAD、RF MEMS、CMOS MEMS、MEMS 可靠性、MEMS 以及微传感器等方面进行了长期研究, 此次东南大学 MEMS 教育部重点实验室与东南大学出版社合作, 组织翻译出版《微纳系统》系列译丛, 将会促进我国 MEMS 教学、科研以及产业化发展。《微纳系统》系列译丛涉及面广, 从选题、翻译、编校到出版等工作量巨大, 为此, 向为翻译该书付出辛勤劳动的师生们表示敬意。

希望《微纳系统》系列译丛的出版对有志从事微米/纳米技术及 MEMS 研发的广大师生和科研人员有所帮助。

中国工程院院士 丁衡高

2010 年 10 月

译者序

自 MEMS 技术出现后,一直倡导、关心和支持我国 MEMS 发展的丁衡高院士在百忙中为本书中文版作序,并对翻译工作一直给予鼓励,使我们深感鼓舞。

从 2004 年开始,东南大学 MEMS 教育部重点实验室与东南大学出版社合作,组织翻译出版《微纳系统》系列译丛,我们在选择国际上出版的书籍时,主要基于以下考虑:(1)书籍是国际知名专家所写,以保证内容的权威性;(2)书籍是近期出版的,以保证技术的先进性;(3)国内还没有同类书籍翻译,避免重复引进;(4)本实验室也在进行该方向的研究,以保证翻译质量。

《微纳系统》译丛将覆盖 MEMS 设计、制造、封装、可靠性及测试等共性的技术以及射频 MEMS、光 MEMS、动力 MEMS 等各种应用的技术。

据我所知,本书是目前能量收集技术领域唯一的著作,由美国弗吉尼亚理工大学的知名学者 S. Priya 和 D. J. Inman 教授组织国际 40 余名专家撰写,内容涉及压电能量收集、热电能量收集、电磁能量收集、薄膜电池等各种能量收集技术及其在生物、医疗、结构健康监测等领域的应用。我们翻译书籍的目的主要有两个:(1)使实验室的教师和研究生通过翻译工作系统地学习能量收集技术领域内容;(2)让国内从事能量收集技术领域的科技人员及研究生作为参考书,该书的翻译出版希望有助于我国正在兴起的物联网之发展。要感谢 Springer 出版公司将简体中文版授权东南大学出版社,才使本书中文版成为可能。

本书翻译由黄见秋博士和我负责组织,东南大学 MEMS 教育部重点实验室相关课题组的研究生参加,具体翻译分工如下:黄见秋(第 1、3、4、6 章、附录)、陈婧婧(第 2 章)、陈璐(第 5 章)、丁卯(第 7 章)、刘岩(第 8 章)、王雷(第 9 章)、吴昊(第 10 章)、李冰(第 11 章)、徐宝馨(第 12 章)、施立立

(第 13 章)、张聪(第 14 章)、童魁(第 15 章)、孙世虎(第 16 章)、张广庆(第 17 章)、张晓艳(第 18 章)、陆伟(第 19 章)。其中第 2、5、7~12 章由黄见秋校对,第 1、3、4、6、13~19 章以及附录由我校对,黄见秋对全书进行了统稿。在这里对参加翻译的研究生们表示感谢。

在翻译过程中,我们对书中专用名词、术语及相关问题进行定期讨论与商榷,但由于翻译水平有限、加之时间紧迫,书中肯定有这样或那样的错译、误译或不恰当之处,恳请读者批评指正。

黄庆安

东南大学 MEMS 教育部重点实验室

2010 年 10 月

原 书 序

能量收集材料和系统已经成为一个重要的研究领域并且发展迅速。能量收集器应用广泛,包括用于结构健康监测的分布式传感器节点、用于医疗的嵌入式或植入式传感器节点、为大型系统的电池充电、为汽车轮胎压力监测系统供电、为无人飞行器供电以及为家用安全系统供电等。微型部件或器件是目前的研究方向,它涵盖了材料、电子器件和集成技术等多个方面。能量收集器的需求不断增长促使了本书的出版,给出能量收集领域目前的研究现状是本书的目的所在。

本书适用于能量收集领域的学生、研究人员、应用工程师、教师、开发人员以及制造商。各章的内容主要由能量收集系统设计和制造的技术综述、技术讨论和基础知识构成。本书为全世界能量收集及其相关领域的顶尖研究者们提供了一个平台,全面介绍了能量收集领域的各种基础知识和发展现状。本书由学术界、工业界和美国国家实验室的研究者们共同完成。讨论了包括压电、电磁感应、热电和微型电池在内的各种重要的能量收集技术。此外,本书深入讨论了能量收集电路的原理和设计规则。讨论能量收集技术应用的相关章节为读者了解这一领域的应用前景提供了必要的认识。

本书的第一部分讨论了基于体材料和基于 MEMS 的振动式能量收集系统的设计和制造,介绍了相关背景知识、理论模型、等效电路模型、集总参数模型、分布参数模型和基本原理。第二部分介绍了高效电子器件制造所需的理论和设计规则。第三部分讨论了热电能量收集系统的发展现状。第四部分讨论了储能系统中的重要问题。第五部分介绍了目前已报道的一些运用能量收集技术的原型器件。第六部分报道了振动能量收集技术的相关标准(草案),它由学术界和工业界研究者们组成的委员会制定。这些标准为振动能量收集技术的研究和报道提供了基本规则。这些标准于能量收集年

会结束后发表。接下来的第四届年会将于 2009 年 1 月 28—29 日在弗吉尼亚理工大学召开。值得一提的是,随着学术界和工业界的不断参与,在过去的三年中,会议的规模和人数不断壮大。

本书主要由各章的受邀作者直接提交的技术文本构成。编者对各章的质量和组织没有做任何评价,这些将留给读者。因此,编者不为各章出现的任何技术错误承担责任,这些应与相关章节的作者直接讨论。

很荣幸可以编辑此书,它由很多博学而慷慨的同行共同完成。感谢所有作者在本书编写过程中的及时协助与合作。没有他们的不断支持,这项工作将不可能完成。我们希望读者能够感到本书翔实而具有指导意义,并且提供宝贵的意见和建议,使得第二版的内容可以获得进一步改善。

Blacksburg, VA

Shashank Priya and Dan J. Inman

目 录

1 压电能量收集技术	1
1.1 能量收集技术基础	2
1.2 案例研究:压电片粘合于长悬臂梁,悬臂梁末端带有质量块	4
1.3 压电材料	6
1.3.1 压电多晶陶瓷	6
1.3.2 压电单晶材料	8
1.3.3 压电和电致伸缩聚合物	10
1.3.4 压电薄膜	11
1.4 压电换能器	12
1.5 介观-宏观尺度的能量收集器	14
1.5.1 激光微加工制备的机械能量收集器	14
1.5.2 使用压电纤维的机械能量收集器	16
1.6 微型压电发电机	17
1.6.1 压电微悬臂梁	17
1.7 能量收集电路	20
1.8 提高能量收集器性能的方法	21
1.8.1 多模式能量收集	21
1.8.2 磁电复合物	24
1.8.3 自调谐	25
1.8.4 频率泵浦	26
1.8.5 宽带换能器	26
1.9 应用举例	27
1.9.1 边境安全检测传感器	27
1.9.2 生物医学应用	29
1.10 总结	29
参考文献	30
2 悬臂梁式压电能量收集器的机电模型	34
2.1 引言	34
2.2 集总参数模型的幅值修正	36

2.2.1	非耦合集总参数基座激励模型	37
2.2.2	非耦合分布参数基座激励模型	38
2.2.3	集总参数模型的修正因子	41
2.2.4	压电耦合集总参数方程中的修正因子	45
2.3	耦合分布参数模型与封闭解	46
2.3.1	模型假设	46
2.3.2	数学基础	46
2.3.3	压电单晶片结构	49
2.3.4	压电双晶片结构	52
2.3.5	单模机电方程	54
2.3.6	实验验证	56
	参考文献	62
3	振动式压电能量收集器的性能计算	65
3.1	引言	65
3.1.1	宏观压电发电机	67
3.1.2	微型压电发电机	68
3.1.3	转换效率和电致阻尼	68
3.1.4	能量存储电路	69
3.2	方法	70
3.2.1	标准 AC-DC 收集电路	70
3.2.2	SSHI 收集电路	74
3.3	结果	76
3.3.1	标准接口电路	76
3.3.2	SSHI 接口电路	80
3.4	总结	84
	参考文献	84
4	压电等效电路模型	91
4.1	基于模型的设计过程	91
4.1.1	压电发电器的基本结构	91
4.2	压电材料的线性本构方程	92
4.3	固定边界条件下系统的压电等效电路模型	93
4.3.1	准静态特性	93
4.3.2	动态特性的单自由度模型	94
4.3.3	动态特性的多自由度模型	96
4.3.4	实验参数确定	96

4.3.5 案例研究	98
4.4 解析法确定等效电路模型参数	99
4.4.1 解析法建立压电双晶片模型的一般步骤	99
4.4.2 利用解析模型确定压电等效电路的模型参数	101
4.5 基座激励压电系统的等效电路模型	102
4.6 利用压电等效电路模型对整个 PEG 系统进行分析	103
4.6.1 带有负载电阻的压电等效电路模型	103
4.6.2 最大输出功率分析	103
4.6.3 基座激励下压电等效电路模型的实验验证	105
4.6.4 几何效应	106
4.6.5 PEG 与激励源耦合模型,多自由度问题	107
4.7 总结	108
参考文献	108
5 电磁能量收集技术	110
5.1 引言	110
5.2 基本原理	111
5.3 绕线线圈的特性	112
5.4 微加工线圈	114
5.5 磁性材料	115
5.6 振动式电磁发电器的按比例缩小	117
5.7 电磁阻尼按比例缩小	120
5.8 电磁发电机功率优化	122
5.9 现有器件综述	122
5.10 微型器件	123
5.11 宏观器件	127
5.12 商用器件	129
5.13 总结	132
参考文献	133
6 利用压电叠层结构的振动能量收集器优化	136
6.1 引言	137
6.2 一维机电解析模型	139
6.3 功率优化	142
6.4 并联 RL 电路的优化	143
6.4.1 纯电阻电路	145
6.4.2 并联 RL 电路	152

6.5	串联 RL 电路	156
6.5.1	串联 RL 电路的优化结果	157
6.6	总结	159
	参考文献	160
7	无线传感器的能量收集	162
7.1	引言	162
7.2	背景	162
7.3	利用能量收集无线传感器跟踪直升机部件的载荷	163
7.4	利用太阳能无线传感器监测大跨度桥梁	170
7.5	关于 MicroStrain 公司	172
	参考文献	172
8	利用非线性技术的能量收集	174
8.1	引言	174
8.2	非线性技术及其在振动控制方面的应用	175
8.2.1	基本原理	175
8.3	稳态条件下用于能量收集的非线性技术	183
8.3.1	技术原理	184
8.3.2	无阻尼振动分析	185
8.3.3	阻尼效应	188
8.3.4	实验验证	193
8.4	脉冲工作方式的能量收集	195
8.4.1	SSHI 技术	195
8.4.2	性能比较	200
8.4.3	实验验证	201
8.5	其他非线性能量收集技术	203
8.5.1	串联 SSHI 技术	203
8.5.2	考虑阻尼效应的理论分析	206
8.5.3	同步电荷提取 (SECE) 技术	208
8.5.4	实验验证	212
8.6	宽带激励下的能量收集技术	215
8.6.1	多模振动	216
8.6.2	随机振动	216
8.7	总结	217
	参考文献	218