



“十三五”国家重点出版物  
出版规划项目



“中国制造2025”  
出版工程

# 微传感系统与应用

刘会聪 冯跃 孙立宁 编著



化学工业出版社



“十三五”国家重点出版物  
出版规划项目



# 微传感系统与应用

刘会聪 冯跃 孙立宁 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书详细介绍了硅基微传感系统和非硅基微传感系统的设计、性能、制备、特征、表征以及测试和应用，并对微传感系统相关的微纳加工技术做了简要介绍。

本书适宜从事传感系统设计以及机械、材料等相关专业人士参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

微传感系统与应用/刘会聪,冯跃,孙立宁编著. —北京:  
化学工业出版社, 2019. 8  
“中国制造 2025”出版工程  
ISBN 978-7-122-34378-9

I. ①微… II. ①刘…②冯…③孙… III. ①传感器  
IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 081029 号

---

责任编辑: 邢 涛

责任校对: 王 静

装帧设计: 尹琳琳

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 三河市航远印刷有限公司

装 订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 14 $\frac{3}{4}$  字数 274 千字 2019 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 78.00 元

版权所有 违者必究

科学是永无止境的，它是一个永恒之谜。

—— 爱因斯坦



“中国制造2025”  
出版工程

# 《“中国制造 2025”出版工程》

## 编委会

### 主任

孙优贤（院士）

### 副主任（按姓氏笔画排序）

王天然（院士） 杨华勇（院士） 吴澄（院士）

陈纯（院士） 陈杰（院士） 郑南宁（院士）

桂卫华（院士） 钱锋（院士） 管晓宏（院士）

### 委员（按姓氏笔画排序）

马正先 王大轶 王天然 王荣明 王耀南 田彦涛

巩水利 乔非 任春年 伊廷锋 刘敏 刘延俊

刘会聪 刘利军 孙长银 孙优贤 杜宇雷 巫英才

李莉 李慧 李少远 李亚江 李嘉宁 杨卫民

杨华勇 吴飞 吴澄 吴伟国 宋浩 张平

张晶 张从鹏 张玉茹 张永德 张进生 陈为

陈刚 陈纯 陈杰 陈万米 陈长军 陈华钧

陈兵旗 陈茂爱 陈继文 陈增强 罗映 罗学科

郑南宁 房立金 赵春晖 胡昌华 胡福文 姜金刚

费燕琼 贺威 桂卫华 柴毅 钱锋 徐继宁

郭彤颖 曹巨江 康锐 梁桥康 焦志伟 曾宪武

谢颖 谢胜利 蔡登 管晓宏 魏青松

# 序

制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。近十年来，我国制造业持续快速发展，综合实力不断增强，国际地位得到大幅提升，已成为世界制造业规模最大的国家。但我国仍处于工业化进程中，大而不强的问题突出，与先进国家相比还有较大差距。为解决制造业大而不强、自主创新能力弱、关键核心技术与高端装备对外依存度高等制约我国发展的问题，国务院于2015年5月8日发布了“中国制造2025”国家规划。随后，工信部发布了“中国制造2025”规划，提出了我国制造业“三步走”的强国发展战略及2025年的奋斗目标、指导方针和战略路线，制定了九大战略任务、十大重点发展领域。2016年8月19日，工信部、国家发展改革委、科技部、财政部四部委联合发布了“中国制造2025”制造业创新中心、工业强基、绿色制造、智能制造和高端装备创新五大工程实施指南。

为了响应党中央、国务院做出的建设制造强国的重大战略部署，各地政府、企业、科研部门都在进行积极的探索和部署。加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展，推动我国制造模式从“中国制造”向“中国智造”转变，加快实现我国制造业由大变强，正成为我们新的历史使命。当前，信息革命进程持续快速演进，物联网、云计算、大数据、人工智能等技术广泛渗透于经济社会各个领域，信息经济繁荣程度成为国家实力的重要标志。增材制造（3D打印）、机器人与智能制造、控制和信息化、人工智能等领域技术不断取得重大突破，推动传统工业体系分化变革，并将重塑制造业国际分工格局。制造技术与互联网等信息技术融合发展，成为新一轮科技革命和产业变革的重大趋势和主要特征。在这种中国制造业大发展、大变革背景之下，化学工业出版社主动顺应技术和产业发展趋势，组织出版《“中国制造2025”出版工程》丛书可谓勇于引领、恰逢其时。

《“中国制造2025”出版工程》丛书是紧紧围绕国务院发布的实施制造强国战略的第一个十年的行动纲领——“中国制造2025”的一套高水平、原创性强的学术专著。丛书立足智能制造及装备、控制及信息技术两大领域，涵盖了物联网、大数

据、3D 打印、机器人、智能装备、工业网络安全、知识自动化、人工智能等一系列核心技术。丛书的选题策划紧密结合“中国制造 2025”规划及 11 个配套实施指南、行动计划或专项规划，每个分册针对各个领域的一些核心技术组织内容，集中体现了国内制造业领域的技术发展成果，旨在加强先进技术的研发、推广和应用，为“中国制造 2025”行动纲领的落地生根提供了有针对性的方向引导和系统性的技术参考。

这套书集中体现以下几大特点：

首先，丛书内容都力求原创，以网络化、智能化技术为核心，汇集了许多前沿科技，反映了国内外最新的一些技术成果，尤其使国内的相关原创性科技成果得到了体现。这些图书中，包含了获得国家与省部级诸多科技奖励的许多新技术，因此，图书的出版对新技术的推广应用很有帮助！这些内容不仅为技术人员解决实际问题，也为研究提供新方向、拓展新思路。

其次，丛书各分册在介绍相应专业领域的新技术、新理论和新方法的同时，优先介绍有应用前景的新技术及其推广应用的范例，以促进优秀科研成果向产业的转化。

丛书由我国控制工程专家孙优贤院士牵头并担任编委会主任，吴澄、王天然、郑南宁等多位院士参与策划组织工作，众多长江学者、杰青、优青等中青年学者参与具体的编写工作，具有较高的学术水平与编写质量。

相信本套丛书的出版对推动“中国制造 2025”国家重要战略规划的实施具有积极的意义，可以有效促进我国智能制造技术的研发和创新，推动装备制造业的技术转型和升级，提高产品的设计能力和技术水平，从而多角度地提升中国制造业的核心竞争力。

中国工程院院士

潘雲鶴

# 前言

微系统是一门融合机、电、光、磁、生、化等多个交叉前沿学科的领域，具有微型化、集成化、智能化、低成本、高性能、可批量化等优点，已经并将继续在生物医疗、能源环境、汽车电子、消费电子、无线通信、军事国防、航空航天等领域产生深远影响。

本书以微系统中最具代表性的微传感系统为核心，结合当前的无线通信以及物联网技术、能源收集技术、柔性电子技术等新兴前沿科技，对广义微传感系统的相关技术进行了全面系统介绍，包括微系统加工技术、硅基微传感技术、非硅基微传感技术、自供电微传感与微能源技术。同时也介绍了微传感系统在智慧工业、智慧农业、生物医疗、军事、航空航天等各个应用领域中所发挥的重要作用。本书以微传感系统的主要技术为主，结合代表性应用案例进行编写，共分为6章。

第1章微传感系统概述。主要介绍微传感系统的基本概念、静态动态特性、分类、材料特性以及发展趋势。

第2章微系统制造技术。主要介绍典型的硅基、非硅基的MEMS制造工艺，以及特种微加工方法、封装与集成。

第3章硅基微传感技术与应用。主要介绍常用的硅基压阻式、电容式、压电式微传感系统设计、制造方法及典型案例。

第4章非硅基柔性传感技术。主要介绍非硅基柔性传感器的主要特点和常见材料，介绍了典型柔性触觉传感器的基本原理和发展趋势，生物信号的感知测量原理及关键技术问题，并阐述了非硅基柔性传感器在机器人、医疗健康和虚拟现实领域的应用。

第5章自供能微传感系统。主要介绍了自供能微传感系统的概念以及关键技术，主要包括压电式、电磁式、静电式、摩擦电式振动能量收集技术和风能收集技术，最后阐述自供能微传感系统在诸多领域的潜在应用。

第6章新兴微传感系统应用展望。主要介绍新型功能材料在微传感系统中的应用，以及新兴微传感系统在智慧工业、农业和军事航空航天领域的诸多应用前景。

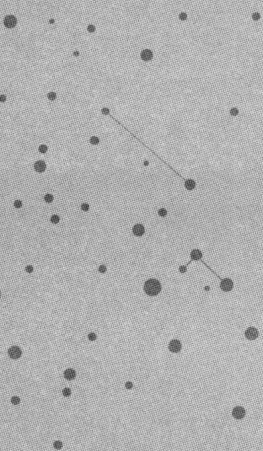
本书第1章、第6章由刘会聪、冯跃、孙立宁教授共同编写；第2章、第3章由冯跃编写；第4章、第5章由刘会聪编写。在此要衷心感谢为本书插图和资料整理做了大量工作的研究生，他们是苏州大学的夏月冬、黄曼娟、耿江军、房艳、韩玉

杰、袁鑫；北京理工大学的韩炎晖、唐绪松、钟科航、周子隆。本书在编写过程中参阅了国内外同行的研究成果，在此向原著者谨致谢意！

由于作者水平、知识背景、研究方向限制，书中不足之处，恳请各位读者、专家不吝指正。

编著者

2018年冬于苏州大学



## 1 第1章 微传感系统概述

- 1.1 微系统概述 / 2
  - 1.1.1 微系统的概念 / 2
  - 1.1.2 微系统的基本特点 / 3
- 1.2 微传感系统的概念 / 5
  - 1.2.1 微传感器 / 5
  - 1.2.2 集成微传感器 / 6
  - 1.2.3 微传感器系统 / 7
  - 1.2.4 微传感系统的主要特点 / 8
- 1.3 微传感系统的基本特性 / 10
  - 1.3.1 微传感器的静态特性 / 10
  - 1.3.2 微传感器的动态特性 / 14
  - 1.3.3 微传感器的分类 / 15
- 1.4 微传感系统的常用材料 / 17
  - 1.4.1 单晶硅与多晶硅 / 17
  - 1.4.2 氧化硅和氮化硅 / 19
  - 1.4.3 半导体敏感材料 / 19
  - 1.4.4 陶瓷敏感材料 / 20
  - 1.4.5 高分子敏感材料 / 23
  - 1.4.6 机敏材料 / 25
  - 1.4.7 纳米材料 / 26
- 1.5 微传感系统的产业现状与发展趋势 / 27
  - 1.5.1 产业现状 / 27
  - 1.5.2 发展趋势 / 29
- 参考文献 / 32

## 33 第2章 微系统制造技术

- 2.1 微制造概述 / 34
- 2.2 硅基 MEMS 加工技术 / 37
  - 2.2.1 体微机械加工技术 / 38



- 2.2.2 表面微机械加工技术 / 41
- 2.2.3 小结 / 44
- 2.3 聚合物 MEMS 加工技术 / 45
  - 2.3.1 SU-8 / 46
  - 2.3.2 聚酰亚胺 (PI) / 49
  - 2.3.3 Parylene C / 51
- 2.4 特种微加工技术 / 55
  - 2.4.1 电火花微加工技术 / 55
  - 2.4.2 激光束微加工技术 / 57
  - 2.4.3 电化学微加工技术 / 60
- 2.5 封装与集成技术 / 63
  - 2.5.1 引线键合技术 / 65
  - 2.5.2 倒装芯片技术 / 66
  - 2.5.3 多芯片封装技术 / 67
  - 2.5.4 3D 封装技术 / 68
- 参考文献 / 68

## 71

# 第 3 章 硅基微传感技术与应用

- 3.1 硅基压阻式传感器 / 72
  - 3.1.1 硅基压阻式传感器原理 / 72
  - 3.1.2 典型的硅基压阻式传感器 / 72
- 3.2 硅基电容式传感器 / 78
  - 3.2.1 电容式传感器原理 / 78
  - 3.2.2 典型的硅基电容式传感器 / 78
- 3.3 硅基压电式传感器 / 83
  - 3.3.1 压电式传感器原理 / 83
  - 3.3.2 MEMS 压电触觉传感器 / 83
  - 3.3.3 MEMS 电流传感器 / 88
  - 3.3.4 MEMS 声学传感器 / 91
  - 3.3.5 MEMS 力磁传感器 / 92
  - 3.3.6 MEMS 病毒检测传感器 / 94
- 参考文献 / 95

## 98

# 第 4 章 非硅基柔性传感技术

- 4.1 柔性传感器的特点和常用材料 / 99
  - 4.1.1 柔性传感器的特点 / 99
  - 4.1.2 柔性基底材料 / 101
  - 4.1.3 金属导电材料 / 101

- 4.1.4 碳基纳米材料 / 104
- 4.1.5 纳米功能材料 / 106
- 4.1.6 导电聚合物材料 / 107
- 4.2 非硅基柔性触觉传感器 / 108
  - 4.2.1 柔性触觉传感原理 / 109
  - 4.2.2 柔性触觉传感器发展趋势 / 118
- 4.3 生理信号传感技术 / 119
  - 4.3.1 柔性温度传感 / 119
  - 4.3.2 柔性心率传感 / 121
  - 4.3.3 柔性血压传感 / 125
  - 4.3.4 生物传感器 / 126
  - 4.3.5 关键技术挑战 / 128
- 4.4 非硅基柔性传感技术应用举例 / 130
- 参考文献 / 135

## 第5章 自供能微传感系统

- 5.1 自供能微传感系统与能量收集技术 / 139
  - 5.1.1 自供能微传感系统概述 / 139
  - 5.1.2 能量收集技术 / 139
- 5.2 振动能量收集技术 / 142
  - 5.2.1 压电式振动能量收集技术 / 142
  - 5.2.2 电磁式振动能量收集技术 / 153
  - 5.2.3 静电式振动能量收集技术 / 163
  - 5.2.4 摩擦电式振动能量收集技术 / 167
- 5.3 风能收集技术 / 176
  - 5.3.1 旋转式风能收集技术 / 177
  - 5.3.2 颤振式风能收集技术 / 179
  - 5.3.3 涡激振动式风能收集技术 / 181
  - 5.3.4 共振腔式风能收集技术 / 184
- 5.4 自供电微传感系统应用举例 / 186
- 参考文献 / 192

## 第6章 新兴微传感系统应用展望

- 6.1 新兴功能材料在微纳传感系统的应用展望 / 200
  - 6.1.1 金属功能材料 / 200
  - 6.1.2 非金属功能材料 / 201
  - 6.1.3 有机高分子材料 / 204
  - 6.1.4 量子点 / 207



- 6.2 新兴微传感系统在智慧工农业领域的应用 / 207
  - 6.2.1 新兴微传感系统在智慧工业物联网领域的应用 / 208
  - 6.2.2 新兴微传感系统在智慧农业领域的应用 / 211
- 6.3 新兴微传感系统在生物医疗领域的应用展望 / 214
  - 6.3.1 可穿戴医疗设备 / 214
  - 6.3.2 植入式医疗设备 / 218
- 参考文献 / 221



## 第1章

# 微传感系统 概述

## 1.1 微系统概述

### 1.1.1 微系统的概念

微系统 (microsystems) 也称微机电系统 (microelectromechanical Systems, MEMS) 或微电子机械系统。一般可定义为通过微米加工技术 (micromachining 或 microfabrication) 和集成电路 (integrated circuits, IC) 制造技术, 集成微传感器、微执行器、驱动控制电路、接口电路、通信电路、电源等为一体的微型系统。微系统包括感知外界信息 (机械、温度、声、光、电、磁、生物、化学) 的微型传感器、控制外界信息的微型执行器以及信号处理和电路。如图 1.1 所示为典型的微系统 (MEMS) 组成示意图, 首先传感器将外界信息转换成电信号并传递给信号控制处理电路, 经过信号转换 (包括模拟/数字信号的变换)、处理、分析、决策后, 将指令传递给执行器, 执行器根据指令对外界发生响应、操作、显示或通信等作用。传感器可以实现能量的转化, 信号处理部分可以进行信号转换、放大、计算等处理, 执行器则根据指令自动完成人们所需要的操作, 这样就形成具有感知、决策、通信和反应控制能力的智能集成系统。

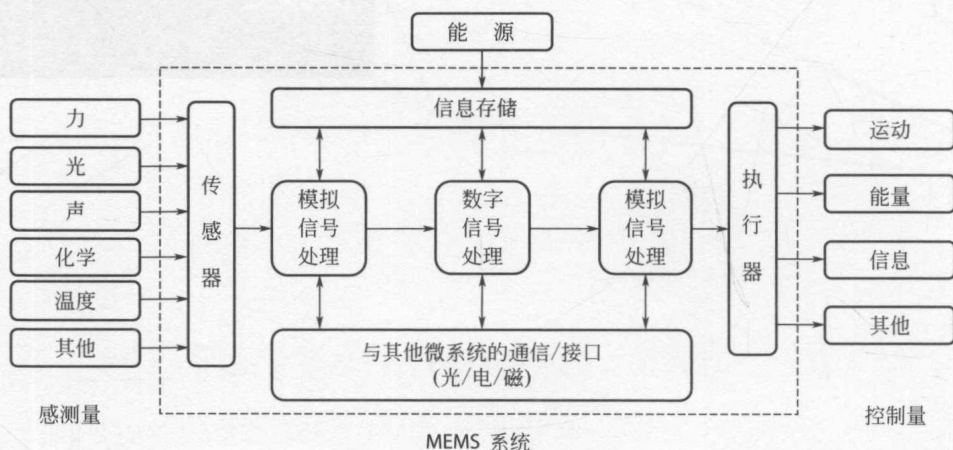


图 1.1 微系统组成示意图

微系统融合机、电、光、磁、生、化等多个领域, 具有微型化、集

成化、智能化、成本低、性能高、可批量生产等优点，已经被广泛应用于生物医疗、能源环境、汽车电子、消费电子、无线通信、国防、航空航天等领域，并将继续对人类的科学技术、工业生产、能源化工、国防等领域产生深远影响。

微系统的概念通常指上述较为全面的功能集成体，但由于制造能力、集成封装技术等限制，目前多数微系统只包含了微机械结构、微传感器、微执行器中的一种或几种，以及部分控制处理电路。这种情况下通常用 MEMS 这一名词来代替“微系统”，目前 MEMS 已被世界各国广泛接受，根据不同的场合，可以指微系统的“产品”，也可以指设计这种“产品”的方法和制造技术手段。

## 1.1.2 微系统的基本特点

MEMS 的最大特点是尺寸微小，其结构特征尺寸一般在微米级到毫米级。常见的 MEMS 产品尺寸一般在  $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ ，甚至更小。例如美国 ADXL 单轴、双轴、三轴全系列加速度传感器的结构特征尺寸在一百到几百微米 [图 1.2(a)]。德州仪器发布的微型投影芯片 nHD，仅有几颗米粒的大小，超轻超薄的设计也使其发热量和功耗进一步减小 [图 1.2(b)]。微纳操作器的局部尺寸仅在微米级甚至纳米级水平。MEMS 的这一优势，可以大幅减小重量和体积，意味着有效空间的增加和功耗的大幅降低，这为卫星、航行器、汽车、手机等高集成度系统带来巨大的发展潜力。未来，MEMS 产品甚至可以进入血管、细胞等人体狭小空间内执行功能和复杂操作，如疏通血栓、靶向给药治疗等。

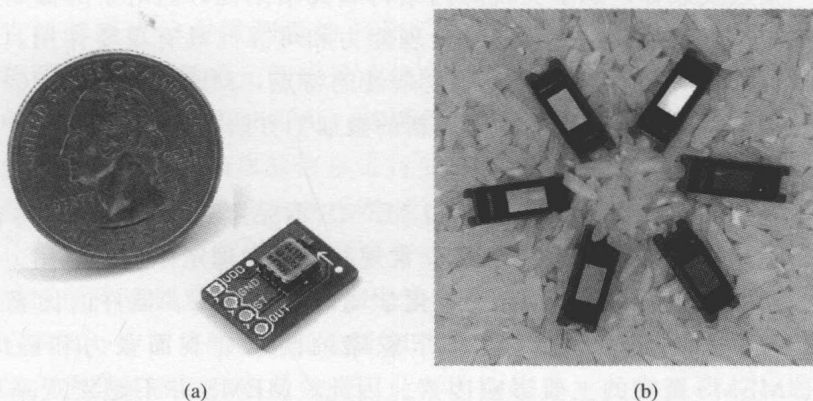


图 1.2 (a)ADXL 加速度传感器和 (b) 德州仪器 nHD 芯片

MEMS 的另一个显著特点是智能化和集成化。MEMS 系统集成了各种不同功能的传感器、执行器、微能源和信号处理单元，可以独立与外界进行信息和能量交换控制，从而实现智能化系统。例如美国 Case Western Reserve 大学研究开发的集成 MEMS 流体处理系统，包括各种微阀门和微量泵。这一装置将传感、传动和控制单元集成到一个单片式流体控制系统中，系统将通过压力强度、流速或温度控制流体流动<sup>[1]</sup>。目前，国内外正在研制的微纳卫星，采用 MEMS 技术，可将常规卫星上的许多部件微型化，例如气相分析仪、环形激光光纤陀螺、图像传感器、微波收发射机、电动机、执行器等，制作成专用集成微型部件或仪器，甚至在同一芯片上构成芯片级卫星，提高卫星信息获取和防御能力，降低卫星制作和发射成本<sup>[2]</sup>。

MEMS 的另一个不可忽视的特点是交叉性和渗透性。MEMS 是典型的多学科交叉的前沿性研究领域，涉及自然科学及工程技术的绝大多数领域，如电子工程、机械工程、物理科学、化学科学、生物医学、材料科学、能源科学等。因此，MEMS 为智能系统、消费电子、可穿戴设备、智能家居、合成生物学、微流控、航空航天、军事武器、无线通信等领域开拓了广阔的应用空间。常见的产品包括 MEMS 加速度计、MEMS 麦克风、微马达、微泵、微振子、MEMS 压力传感器、MEMS 陀螺仪、MEMS 湿度传感器、射频 MEMS 等以及它们的集成外延产品<sup>[3]</sup>。

另外，MEMS 还具有成本低和易于批量化生产等特点。微系统是在微电子的基础上发展而来的，由于采用了微加工和集成电路（IC）制造技术，因此可以像集成电路产品一样大批量并行制造，且力求与 IC 技术集成或兼容，易于实现阵列结构和冗余结构，这对于降低制造成本、减小噪声和干扰、提高信号处理能力和可靠性具有重要作用。但是，由于 MEMS 结构多样性和功能复杂性的特点，MEMS 制造和 IC 制造的差异很大，其制造工艺引入多种新的微加工方法，因此 MEMS 产品的生产线工艺研发成本较高。

MEMS 的尺寸效应是指 MEMS 不完全是宏观对象尺寸的按比例缩小。在 MEMS 尺度范围内，常规的宏观物理定律仍然适用，但影响和控制因素更加复杂多样。物理化学场的耦合作用、器件的比表面积和比体积急剧增大，使宏观状态下忽略的因素如表面张力和静电力等成为 MEMS 范畴的主要影响因素。因此，MEMS 并不是宏观系统的简单缩小，而是包含了新原理和新功能。例如适用于微小构件夹持和操作定位的微夹持器在设计上需要综合考虑微操作过程中占主导地位的范德华力、