

智慧生态链驱动的研究生培养 MEMS 课程优化及实践

段智勇 钟英辉 马刘红 李梦珂 董馨源 张超

郑州大学 河南郑州 450001

摘要：全信息采集的前端是大量的 MEMS 器件及其阵列，支撑着当前智慧产业链的快速发展。亟需高层次技术人才，在不少高校、研究所都在开展 MEMS 人才培养的基础上，完善微机电系统设计人才的模型分析、材料、设计、制备工艺、测试表征基础是当前亟待解决的问题。人才培养和产业实际的纽带需要进一步增强，而当前部分工艺平台产线冗余，在完成设计、生产任务的同时完全可以衔接到底专业人才培养的前期过程中，降低成本、提高效率。

关键词：智能传感；微制造技术；微机电系统设计

1. 微机电系统的学科背景

自 1959 年理查德·费曼提出微纳器件的概念，MEMS 器件逐渐快速发展，近年智能化社会形态已经逐渐在改变当前的国民生产、消费电子、人体康健、国防军工、车载电子、科学研究与知识学习等。其发展基础是海量的数据获取并基于数据的训练、判断、决策、执行，在整个智慧生态链的前端就是信息获取为目标的、以 MEMS 器件为核心的智能传感、边缘计算和信息传输中继等。在驱动使能或者复杂系统精准控制方面，MEMS 驱动器也占据重要地位。同时，人类生活质量的保障提升也对 Bio MEMS 的研究和应用；与便携式消费电子系统和无人武器系统的信息获取、处理、输出相关的 RF MEMS 的研究和应用也打开了广阔的大门。应对这些海量需求，全球的电子工程人才培养体系逐渐形成了 MEMS 器件相关的功能材料、器件结构、模型仿真、微纳制备、测试表征验证、集成封装等的新的交叉学科门类。

由于历史原因，国内学科门类划分过细，但众多高校和中科院研究所也在电子科学与技术、电子信息工程、物理学、材料学、集成电路科学与工程等一级学科专业下设置了微机电系统设计的相关方向，主要开展 MEMS 微结构的设计、微纳制备工艺、光机电一体信息测试表征、系统集成与应用等的研究生培养，甚至部分高校已经在本科生培养课程体系中也增加了 MEMS 器件、半导体工艺的相关内容，培养层次提前。

2 微机电系统的产业基础

据报道，2025 年全球 MEMS 产业达到 250 亿美元，其

中中国国内接近 40%。国内的产业化工艺平台和面向市场产品开发生产的 MEMS 企业近年也获得蓬勃发展，为相关专业培养研究生的就业市场打开了广阔的空间。具有国际影响力的国内 MEMS 企业如歌尔微电子、瑞声科技、赛莱克斯微系统、台积电、海康微影基本稳定在全球前 30 位，还包括一些中试平台如广州增芯、中芯绍兴、国家智能传感中心、淄博 MEMS 研究院、郑州智能传感谷等作为产业引擎推动地方 MEMS 器件应用。而专注于 Foundry 的生产企业主要有赛莱克斯、台积电、广州奥松、华润微、华虹宏力、上海先进半导体、罕王微电子、芯动科技、多维科技、英特神斯、蚌埠华鑫微纳、西安励德、青岛芯恩、中电 49 所、原位芯片等，晶圆尺寸从 4inch 到 12inch 均有兼顾。

不少科研院所以还有一批微制造技术工艺与器件研发平台，如中科院苏州仿生所、中科院微系统所、中科院微电子所、江西省纳米技术研究院，北京大学和上海交通大学共建的微纳技术国家级实验室、东南大学 MEMS 教育部重点实验室、清华大学微纳加工中心、复旦大学微纳加工与器件公共实验室、厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院、西北工业大学宁波研究院等，则侧重于器件研发、人才培养相关的基础与前沿技术研究。尽管存在淄博研究院、赛莱克斯亦庄项目还未达到预期目标，福建西人马破产、河南智能传感器中试基地建设 6 年进展滞涩的成长阵痛，但行业整体发展趋势向好，智慧产业链基础硬件系统研发对 MEMS 器件的需求量持续增加。

3 中原地区 MEMS 产业及人才培养

河南省域内有 300 余家传感器企业，而郑州的传感器

研究和生产是重点产业，聚集了汉威科技、日立信、光力科技、威科姆、新天科技、辉煌科技等国内传感产业龙头企业。郑州世界传感器大会已连续召开 4 届，形成了较大的影响力。郑州大学的电子科学与技术、电子信息工程等相关专业已有 27 年的本科人才培养历史 [1-2]；在 2021 年河南省设立第一批未来技术学院，郑州大学集成电路未来技术学院获得立项；2023 年开始集成电路科学与工程硕士专业的招生；2024 年开始集成电路设计与集成系统本科专业的招生。相关学科自 2009 年首先在中原地区逐步开始微纳制造与微纳器件的科学研究和高层次实验室建设，目前已已有 100-1000 级超净间面积超过 600 平米、微纳制造与测试表征设备原值超 7000 万元。在微流控、磁操控、微能量、管道输流检测等 MEMS 器件方面开展工作并取得了一批重要成果。2014 年开始在电子科学与技术硕士一级培养学科、电子信息专业硕士学位点内开设微纳制造、微机电系统设计等研究生课程，培养 MEMS 行业高层次专业人才。已经培养毕业的研究生一般都在中科院研究所、985 高校继续攻读博士学位或者在行业领先企业、中电科集团从事相关技术研究工作。具体到微机电系统设计课程，主要讲述微传感器、微驱动器、RF MEMS、MOEMS、Bio MEMS、微流控和 Lab on Chip，近年增加了环境能量采集、智能尘埃、单电子器件等内容，一般按照器件的基本原理、实现方法、表征分析、性能测试开展教育教学。微（纳）机电系统作为一门课程内容逐渐完善。

4 面向智慧产业链的 MEMS 课程体内容建设

微机电系统是高速发展的前沿技术领域，结合当前智慧产业链的浪潮。为了让修学本门课程的研究生既要掌握 MEMS 的基础知识，还需要紧密结合到当前的产业发展动态。在研究生课程的教学过程中需要在教学内容、实践方法等方面做进一步的提升，基于原有教材、课件、实验教学过程中主要采用了以下几方面的提升。

1) 增强功能材料的专门介绍。甚至可以在研究生基础课程中专门增加功能材料的专题，在原有功能材料基础上将近年新涌现的新材料、新功能、新应用展示给研究生，包括金刚石、SiC、AlN、掺钪 AlN、钙钛矿、Bi₂Te₃ 和 GeSi 等热释电材料，只有熟悉 MEMS 器件设计的各种功能材料，才能够提出响应的设计结构，并结合到可制造性设计理念。

2) 教材的选用和引进。在现有国内教材，包括部分译著教材的使用基础上，注重引进世界名校电子工程专业的原版教材以及课件。一方面拓展研究生的学术视野，另一方面也增强研究生阅读、使用原版教材的能力，如《Fundamentals of Microelectromechanical Systems》，《MEMS Introduction and Fundamentals》，《MEMS and NEMS Systems, Devices, and Structures》和《MEMS Reliability》等。将最新发表的学术论文以及 IRDS 中的部分内容引入到上课内容，最大程度保障教学内容与 MEMS 器件发展的国际前沿无缝衔接。

3) 依托本校微纳实验室开展研究生微机系统设计的教学工作。如各个课题组自有微纳实验室或者校级层面的公共共享微纳技术实验室。也可以是具有一定生产功能的中试平台，比如苏州仿生所平台，合肥研究院平台，上海微系统所平台、北京大学微纳实验室等，这些平台机台冗余度高，通线技术多，在支撑常规的中试服务、设计与流片服务外，常常开设 MEMS 器件设计相关的公共资源共享时间，可以保障研究生实实在在接触到微纳制造机台操作，还能增加国内各个平台间、相关课题组简的学术交流，互通有无，充分提高现有硬件机台设施的利用效率，也有效解决微纳实验耗材的资金短缺问题。依托实验室平台开展工作，让研究生尽快熟悉 COMSOL、ANSYS、Autocad 和 Solidworks 等仿真分析软件，加快科研任务研究进度，掌握光刻、干法和湿法刻蚀、键合工艺、die 切割分离、电及机电特性测试表征。强调研究生的动手能力和面临课题需求的设计能力。

4) 完善上课课件内容，鉴于难以使用某专门的单一教材。任课教师制作 PPT 课件工作尤为重要，需要结合 MEMS 器件的发展水平和进度，将实时资讯融入到课堂课件中。使用 PPT、音频资料、视频动画资料多方面手段促使学生直观掌握课堂内容，便于学生掌握国内外整个产业的发展生态。也尽快了解当前涌现的新技术、新方法、新材料。借鉴 MIT、UBC、MSU 等微机电系统全球强校的教学内容，并结合本校实际补充到现有上课内容中去。

5) 拓展课程宽度。在前期已经增加环境 Harvester、智能尘埃专题的基础上，进一步拓展可穿戴 MEMS 器件、LiDAR 等、单兵和无人机载 MEMS 系统、智慧子弹、MEMS 测试表征新方法等教学内容，如果在现有 32 课时难以完成

教学内容的情况下，可以考虑将上课课时增加到 48 课时。课程宽度的拓展有利于拓展研究生的学习面，但可以降低理论深度和详细解析表达方面的要求，将这部分内容交给模型分析。

6) 加强课后小设计的训练补充。作为对动手能力要求较强的研究生专业课程，在课后的习题练习方面不能仅仅局限于文字内容、习题推导。根据某特定应用场景，要求研究生提出相应的器件结构设计，能够清楚的阐述设计思路、动力学机制、基于有限元软件获得其模态分析。设计亮点要突出，必要时借助相关依托实验室和支撑实验室对所设计微系统进行实验制备和测试验证。

5 结论

MEMS 器件有时也被称为“芯片”，但有别于常规意义上的 IC 芯片。IC 芯片类似于人类大脑，主要功能是解决信息计算和信息存储；而 MEMS 伴随 IC 的发展而快速发展，部分工艺技术甚至是相同的，其主要功能相当于人类的五官和四肢，是信息获取和执行的关键部分。这两部分构成电子信息器件的微“芯片”大家族，也是近年我国常常被发达国家技术限制的核心区。

近年智慧产业链跨越式发展，对观察对象全信息的获

取极为依赖，领域在拓宽、数据量在爆发，作为产业发展基础的人才队伍培养也需要紧跟发展现状。增厚基础知识来源，与产业实际需求密切嫁接，搭建贯通高校和企业的人才培养纽带，保障所培养研究生在毕业后在用人单位能够即插即用，尽快上手。

参考文献：

- [1] 段智勇, 马刘红, 李梦珂, 钟英辉, 路书祥. 物理院系中工科专业发展 [J]. 电气电子教学学报, 2018, 40(4):8-10.
- [2] 段智勇, 弓巧侠, 罗荣辉, 郭茂田, 袁斌. 集成电路设计人才培养课程体系改革 [J]. 电气电子教学学报, 2010, 32(5).

作者简介：段智勇（1974—），男，汉族，博士，微纳制造及 MEMS 器件。

基金项目：郑州大学优质研究生课程项目，微机电系统设计，编号：YZKC202510；郑州大学教育教学改革研究与实践项目 2025ZZUJGXM058，河南省研究生教育改革与质量提升工程案例项目 YJS2025AL16，郑州大学教育教学改革研究与实践项目 2024ZZUJGXM008，郑州大学专业学位研究生教学案例项目 XJ2024AL10