

# 感测技术教学实践创新设计案例——柔性超声换能器研制

孙长河 张亚丽 施晟佳 张员  
长江大学电子信息与电气工程学院  
DOI:10.32629/mef.v8i21.18325

**[摘要]** 针对感测技术课程教学存在理论与实践脱节、学生创新能力培养不足的问题,亟需培养具备器件设计与研发能力的创新人才。考虑传统超声换能器曲面贴合难、机电耦合系数低等痛点,本研究构建“器件研发+教学实践”融合的创新案例,采用带直角梯形空腔的柔性印制电路板基底,设计了一种工作于厚度弯曲振动模式的柔性压电超声换能器。首先经仿真优化确定器件的最佳参数,然后采用柔性印刷电路工艺制备器件试样,最后实验测得其谐振频率为280.2kHz,机电耦合系数为8.5%,频率偏差小于0.7%,兼具机电转换性能高、柔韧贴合、制作成本低等优势。该案例可让学生参与全流程实践,实现理论教学与创新应用的良性循环,为新工科感测技术人才培养及教学改革提供可复制范例。

**[关键词]** 柔性超声换能器; FPCB工艺; 教学实践; 有限元仿真  
**中图分类号:** G42 **文献标识码:** A

## Innovative Design Case of Sensing Technology Teaching Practice – Development of Flexible Ultrasonic Transducers

Changhe Sun Yali Zhang Shengjia Shi Yuan Zhang

School of Electronic Information and Electrical Engineering, Yangtze University

**[Abstract]** In response to the problems of the separation of theory from practice in the teaching of sensing technology courses and the insufficient cultivation of students' innovation capabilities, it is urgent to cultivate innovative talents with the ability to design and develop devices. Considering the pain points such as the difficulty in surface fitting of traditional ultrasonic transducers and the low electromechanical coupling coefficient, this research has constructed an innovative case integrating "device development + teaching practice". Using a flexible printed circuit board substrate with a right-angled trapezoidal cavity, a flexible piezoelectric ultrasonic transducer operating in the thickness bending vibration mode was designed. Firstly, the optimal parameters of the device were determined through simulation optimization. Then, the device samples were fabricated using the flexible printed circuit process. Finally, the resonant frequency of the device was experimentally measured to be 280.2 kHz, with an electromechanical coupling coefficient of 8.5%, and a frequency deviation of less than 0.7%. It has the advantages of high electromechanical conversion performance, flexible fitting, and low production cost. This case enables students to participate in the entire process of practice, achieving a virtuous cycle of theoretical teaching and innovative application, and providing a replicable example for the cultivation of new engineering sensing technology talents and teaching reform.

**[Key words]** flexible ultrasonic transducer; FPCB process; teaching practice; finite element simulation

感测技术作为信息技术三大支柱之一,是现代工业、科研与日常生活的核心支撑,通过敏感元件与转换机制将物理、化学或生物量转化为可处理电信号,实现对客观世界的感知与量化。在高等工科教育中,《感测技术》是自动化、电气、仪器等专业的必修课程,核心目标不仅是传授传感器原理、特性等理论知识,更在于培养学生面向实际问题的创新设计与工程实践能力。传

统教学实验多依赖商业化标准传感器,学生局限于“使用”而非“创造”,实验以验证性操作为主,缺乏从材料选择、结构设计、工艺实现到性能测试的全流程创新训练<sup>[1-2]</sup>。这种“重理论轻实践、重验证轻创新”的模式,导致学生多学科知识整合与实操能力不足,与新工科对创新复合型人才的需求严重脱节<sup>[3-4]</sup>。为此,本文设计“基于柔性印刷电路板(FPCB)的柔性超声换能器

研制”教学实践案例,将前沿科研成果与本科教学深度融合,实现教学重心从“知识传授”向“能力培养”转移<sup>[5]</sup>。依托FPCB工艺成熟、成本可控、适配本科教学的优势<sup>[6]</sup>,学生需综合运用多学科知识,自主完成电极设计、压电复合材料制备、封装与性能测试,完整经历“原理—材料—工艺—系统”工程实践闭环<sup>[7]</sup>。

该案例既深化学生对核心理论的理解,又通过项目式学习强化跨学科整合、动手与创新能力<sup>[8]</sup>,构建“设计—制造—测试”一体化实践载体<sup>[9]</sup>,为解决传统教学痛点提供新路径。其蕴含的产教融合、教研协同理念<sup>[10]</sup>,为培养卓越工程师提供有效支撑,可为相关课程教学改革提供可复制推广的实践范式。

### 1 柔性超声换能器结构与仿真优化

#### 1.1 结构设计

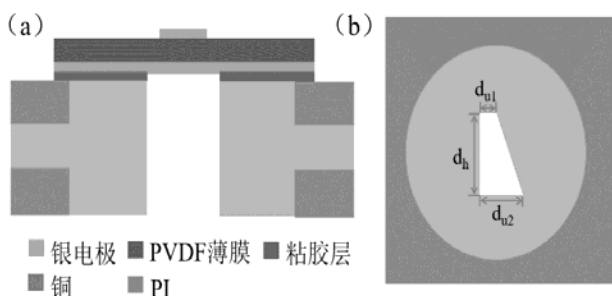
柔性超声换能器的工作频率与其应用领域密切相关,一般低频(<1MHz)的换能器应用于超声探测、超声测距、超声治疗等,而高频(≥1MHz)的换能器应用于超声成像,这主要是因为超声波在传播过程中的能量衰减程度依赖于超声波信号的频率,频率越高,能量耗散越快。柔性超声换能器的工作频率取决于换能器的工作模式、结构与材料,当工作于厚度弯曲振动模式(d31模式)时,振动薄膜越厚,有效振动面积越小,则刚度越大,工作频率越高,其计算公式如式(1.1)所示:

$$f_0 = \alpha_0 \frac{t}{A} \sqrt{\frac{D}{\rho}} \quad (1.1)$$

式中,  $\alpha_0$  为一阶弯曲振动因子,  $t$ 、 $A$ 、 $D$  和  $\rho$  分别为振动薄膜的厚度、有效面积、抗弯刚度和密度。 $N$ 层膜的抗弯刚度 $D$ 定义为:

$$D = \int \frac{E_N}{(1-\nu_n^2)} z^2 dz = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^N \frac{E_n}{(1-\nu_n^2)} (h_n^3 - h_{n-1}^3) \quad (1.2)$$

式中,  $E_n$  和  $\nu_n$  分别为第 $n$ 层的杨氏模量和泊松比,  $h_n$  为第 $n$ 层膜的顶部到中性面的距离。



(a) 剖视图 (b) 基底横截面

图1 柔性压电薄膜超声换能器原理图

基于 $d_{31}$ 模式的柔性压电薄膜超声换能器的剖视图和基底横截面如图1所示,该器件由一个带双面银电极的PVDF压电薄膜构成,为了获得尽可能大的薄膜振动位移,上电极采用部分覆盖形式设计。选用聚酰亚胺(PI)作为FPCB的柔性连接层,为了提高

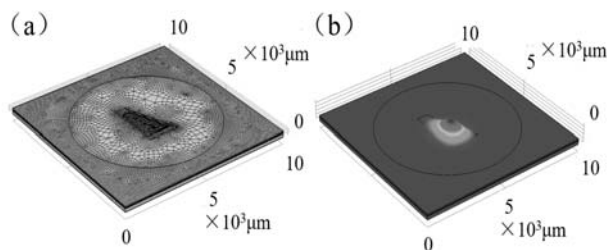
其能量转换效率和输出声压,在FPCB基底上设计直角梯形空腔。柔性压电薄膜超声换能器的结构参数如表1所示,通过FPCB技术精准控制直角梯形空腔尺寸,可设计实现不同工作频率的超声换能器。

表1 柔性压电薄膜超声换能器的结构参数

名称	符号	数值(μm)
直角梯形空腔的上底	$d_{u1}$	300-900
直角梯形空腔的下底	$d_{u2}$	1200-2700
直角梯形空腔的高度	$d_b$	2100-3600
基底总厚度	$H$	180
粘胶层厚度	$t_a$	30
压电层厚度	$t_p$	28
上、下电极厚度	$t_e$	5

#### 1.2 有限元仿真与参数优化

为了验证柔性压电薄膜超声换能器的设计有效性,采用COMSOL有限元仿真软件建立了多物理场耦合的三维模型,分析其振动模式和频响特性,如图2(a)所示。为了使该模型与后续制作的器件结构参数尽可能一致,仿真中考虑了粘胶层,FPCB基底由两个60 μm厚的PI膜与中间60 μm厚的铜膜层合成。激励电压设为1V,通过模式分析得到柔性压电薄膜超声换能器结构的振动形态与频率特性,如图2(b)所示,第一阶模态振型表明该器件工作在厚度弯曲振动模式。



(a) 仿真模型 (b) 振动模式

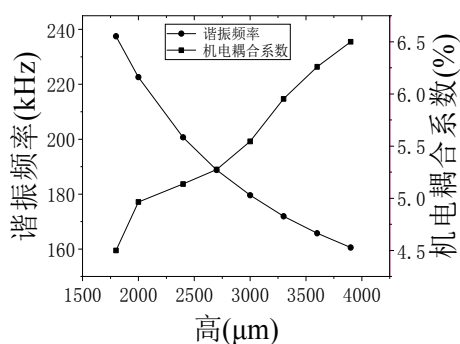
图2 所设计的柔性压电薄膜超声换能器的三维有限元模型

仿真研究了超声换能器结构参数对其模态频率和机电耦合系数的影响,谐振频率与空腔尺寸之间的关系如图3(a)、(b)所示。随着下底和高的增大,换能器的机电耦合系数近似线性增大,而谐振频率分别下降了约56%和34%,表明空腔尺寸对机电耦合系数和谐振频率均具有显著调控作用。综合考虑频率稳定性和

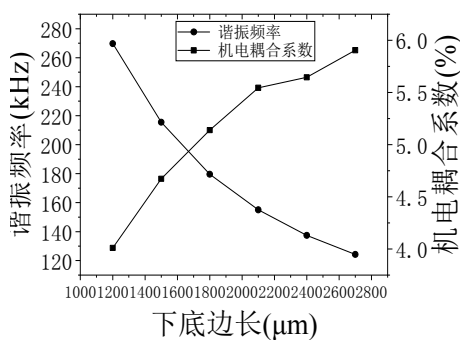
结构可靠性<sup>[11]</sup>,当空腔尺寸按上底600 μm、下底1800 μm、高3000 μm设计时,可以更好地兼顾器件的谐振频率与输出性能。然后,进一步研究了粘胶层厚度对谐振频率和机电耦合系数的影响,如图3(c)所示,结果表明,粘胶层越厚,谐振频率越低,机电耦合系数越小。因此,在后续的器件设计中粘胶层厚度应尽可能小,鉴于现有粘接工艺限制,粘胶层厚度最终设计为30 μm。图3(d)为机电耦合系数随上电极覆盖面积占比的变化情况。随上电极占比增大,机电耦合系数和谐振频率同步呈现先增后减趋势,当上电极占比控制为60%~90%,器件兼具良好的机电耦合能力与稳定的谐振特性。

## 2 柔性超声换能器制作与测试

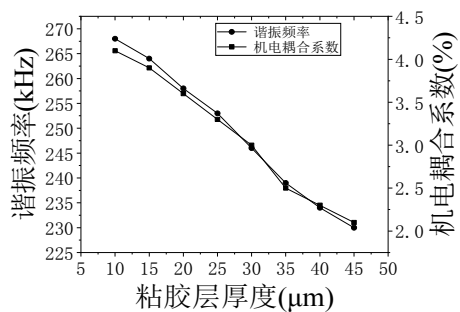
### 2.1 器件制作



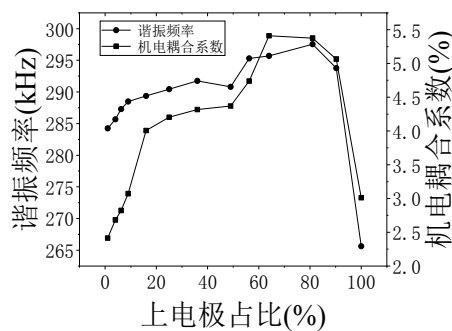
(a)



(b)



(c)



(d)

(a)高 (b)下底边长 (c)粘胶层厚度 (d)上电极占比

图3 柔性压电薄膜超声换能器结构参数的影响

所提出的柔性压电薄膜超声换能器采用简易的室温胶粘工艺制备,制作流程如图4所示:(I)清洁、准备好FPCB基底;(II)在FPCB基底的一面涂抹粘胶,为了降低粘胶层对柔性压电薄膜超声换能器的性能影响,粘胶层应尽可能薄而均匀地涂抹均匀;(III)准备好所需要的压电器件,并对上电极进行图形化处理;(IV)将连接好两端电极的压电器件转移到支撑层上方并粘接;最后,手工小心剥去表面多余的粘胶剂,将粘接后的样品放入真空箱中,在40° C下烘烤2h使结构胶固化。

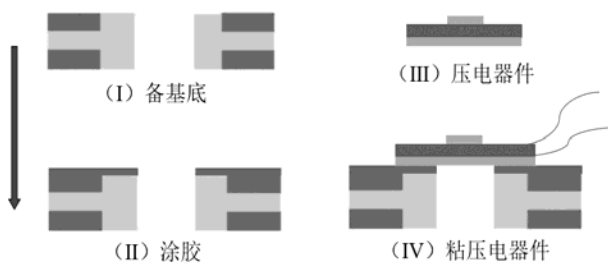
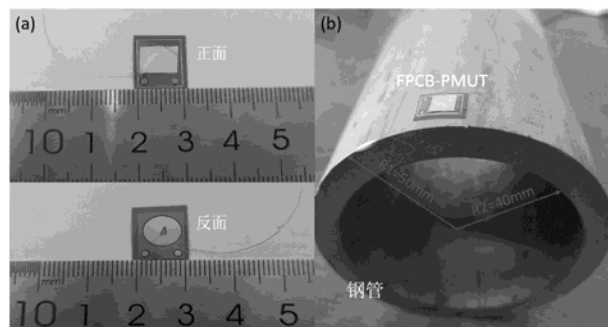


图4 柔性压电薄膜超声换能器制作流程

制作完成的器件实物正、反面如图5(a)所示,通过图5(b)可以观察到柔性压电薄膜超声换能器可以实现与钢管的共形贴合。



(a)器件的正、反面 (b)弯曲状态下的器件

图5 柔性压电薄膜超声换能器实物图

## 2. 2性能测试

为表征分析所研制的柔性压电薄膜超声换能器的频响性能,采用LCR-8110G型阻抗分析仪对器件展开阻抗特性测试,以获取谐振频率、反谐振频率等关键参数,并通过式(2.1)计算机电耦合系数:

$$K_{\text{eff}} = \sqrt{1 - \left(\frac{f_r}{f_a}\right)^2} \quad (2.1)$$

式中 $f_r$ 为谐振频率, $f_a$ 为反谐振频率。

鉴于该柔性压电薄膜超声换能器的一阶厚度弯曲模态频率仿真值为282.6kHz,测试时将频率扫描区间设为260kHz~320kHz。测试前,先将器件固定在测试平台以规避附加振动干扰;采用镀金微型探针接触器件电极,通过屏蔽双绞线连接至阻抗分析仪以抑制电磁干扰;测试全程保持标准大气环境(温度 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ,相对湿度 $40 \pm 5\%$ ),同步采集阻抗幅频与相位特性曲线。图6为器件在空气中的典型阻抗特性曲线,在280.2kHz处出现显著谐振峰,对应一阶厚度弯曲振动模态,与仿真模态频率偏差小于0.7%,计算出器件机电耦合系数为8.5%,该数据比国内外公开报道的厚度弯曲振动模式压电薄膜超声换能器的机电耦合系数相当或略高<sup>[12-14]</sup>,表明所研制的柔性超声换能器具有优异的机电转换能力。

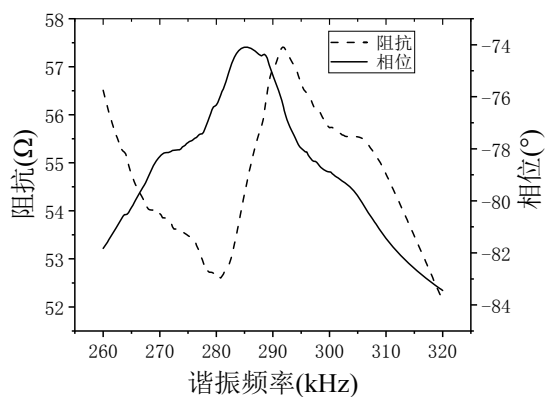


图6 柔性压电薄膜超声换能器的电阻抗和相位响应谱

上述过程构建了“理论公式—实测数据—性能参数”的闭环推导体系。对八组同批次样品进行一致性测试,结果表明研制器件的谐振频率与仿真频率偏差均小于3%,不仅印证了制备工艺的稳定性与设计方案的可靠性,更为学生开展“批量制备与一致性分析”提供了直接实践参考,同时在测试实操与数据验证中有效强化了学生的工程实践能力与科研素养。

## 3 结论

针对《感测技术》课程理论与工程实践脱节、前沿技术融入不足的痛点,本文设计实现了基于FPCB工艺的柔性压电薄膜超声换能器,构建“技术研发—教学转化”一体化实践创新案例,

通过有限元建模仿真明确结构参数调控规律并完成原型制备测试,实测器件谐振频率280.2kHz、机电耦合系数8.5%,与仿真频率偏差小于0.7%,验证了全流程教学路径的科学性;该案例深度融合前沿柔性电子技术与课程教学,贯通核心教学环节,器件兼具工艺简易、成本可控优势,既提供新型传感技术方案,又构建一体化实践教学载体,可提升学生多学科整合与工程创新能力,为感测技术类课程教改提供可复制范式,对培养创新型工程人才意义重大,后续将拓展其教学应用场景。

## [基金项目]

国家自然科学基金(PMUT多模态调控与超宽频带响应机理及阵列器件研究,批准号:52205587);湖北省高等学校教学研究项目(基于创新应用人才培养的感测技术课程教学研究与实践,批准号:2023274)。

## [参考文献]

- [1]徐力昊,蔡志端.以应用与创新为导向的传感器教学模式[J].电气电子教学学报,2025,47(02):79-82.
- [2]张总,刘哲,王春梅,等.基于虚实结合的传感器原理与应用教学研究与探索[J].仪器仪表用户,2021,28(04):96-99+12.
- [3]宋志勇.新工科背景下的虚实结合传感器实践教学——以传感器原理及应用课程为例[J].现代信息技术,2024,8(21):194-198.
- [4]赵雪娟,王荣,邵璐,等.新工科背景下以应用为导向的传感器课程教学改革探索[J].实验室研究与探索,2025,44(10):175-179.
- [5]魏颖,解令海.科研成果向本科实验教学转化的探索[J].科技视界,2017,(08):99+72.
- [6]陈孝喆,高荣科,于连栋.基于石墨柔性压力传感器的实践教学方案设计[J].实验技术与管理,2024,41(03):238-243.
- [7]孙彦招,张华,尧万,等.流量传感器仿真实验项目设计[J].科技风,2025,(08):16-18.
- [8]洪金华,程宝,程鹏.柔性压力传感器教学实验平台设计与实现[J].实验室研究与探索,2024,43(05):28-31+121.
- [9]祝阳露,陈巧珍,霍新明,等.面向创新和实践能力培养的实验教学模式探索——以“生物医学传感器”课程为例[J].教育教学论坛,2025,(25):101-104.
- [10]李娜.虚拟仪器技术在“感测技术”课程实践教学中的应用研究[J].北京工业职业技术学院学报,2011,10(02):68-71.
- [11]Gong Y,Zhang M,Sun S,et al.Piezoelectric micromachined ultrasonic transducers with superior frequency control[J].Journal of Microelectromechanical Systems,2023,32(6):513-515.
- [12]Liu W,Zhu C,Wu D.Flexible piezoelectric micro ultrasonic transducer array integrated on various flexible substrates[J].Sensors and Actuators A: Physical,2021,317:112476.

[13]Luo Z,Shao S, Wu T.A10.78 Sc0.22N Lamb wave contour mode resonators[J].IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics,and Frequency Control,2021,69(11):3108–3116.

[14].Örnek M, Uhlenhake K E, Zhou Y, et al. Preparation and characterization of multifunctional piezoenergetic polyvinylidene fluoride/aluminum nanocomposite films[J]. Journal of Applied Physics,2022,131(5).

**作者简介：**

孙长河(1991--),男,汉族,湖北随州人,博士,长江大学,副教授,主要从事先进声学器件(如超声换能器、声波测井换能器、水听器等)设计; MEMS传感器(如温度、压力、流量、超声等信息感知的微纳传感器)及微系统设计; 检测电路及智能仪器设计; 线性与非线性超声无损检测技术; 环境微弱能量收集及自驱动智能感知技术等方面的工作。