

2026 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

MEMS 超声换能器的多物理场耦合理论与性能调控机制

二、提名者及提名意见

提名者：郑海荣、南京大学、中科院院士、数理科学

提名意见：

MEMS 超声换能器是支撑新一代微型化、智能化、高分辨超声检测技术的基础元器件，但其机电声多物理场耦合理论与高性能结构设计方法缺乏，致使我国在该领域面临严重“缺芯”问题。项目聚焦其多场耦合机理与性能调控机制研究，建立了微尺度下高精度多场耦合与性能分析理论体系，提出了系列性能提升机制与结构设计方法，奠定了 MEMS 超声换能器基础理论，揭示了微尺度下超声换能器阵列机电声多场耦合机理及关键性能参数变化规律，解决了发射声压和接收灵敏度相互制约、声串扰抑制阵列性能提升等难题。项目提出的多场耦合理论与性能调控机制促进了电容、压电和柔性三大系列共 10 余种高性能 MEMS 超声芯片的成功研制，收/发灵敏度等核心指标相较于法国 Vermon 等国际知名企业所产同类芯片提高 2.6 倍以上；应用于某型号航天火箭、航空发动机、大型掘进机（DL970 盾构）、国家电网输变电设备、人体组织成像与可穿戴健康监测等多个重大工程与民生领域，解决了航空航天等重大装备的关键参数以及人体生命体征的原位无损/无创检测难题。相关成果在 Science 子刊 Science Advances 等期刊上发表高水平 SCI 论文 44 篇、授权发明专利 32 项；相关博士学位论文获陕西省优秀博士学位论文、中国仪器仪表学会优秀博士论文提名奖（全国 5 篇/年）以及上银优秀机械博士论文佳作奖；培养国家级高层次及青年人才共 3 人，获中国青年科技奖特别奖、陕西青年科技标兵、陕西省青年科技新星等多项荣誉。

提名该项目为陕西省自然科学奖一等奖。

三、项目简介

该项目属于声学器件的力、电、声多场耦合理论研究。

超声换能器用于超声波的发射和接收，可通过非侵入方式获取人体组织或结构内部特征参数，广泛应用于医学超声成像、工业无损检测、军事声呐等领域，是国民经济和社会发展中的重要技术之一。相对于传统压电陶瓷超声换能器，MEMS 超声换能器具有微型化、宽带宽、低功耗、易于二维阵列制备及与 ICs 集成等突出优点，可有效提高超声检测系统的智能化、便携式和集成化，是发展下一代超声诊疗、无损检测以及水下声呐等仪器的核心元件。**研制高性能 MEMS 超声换能器是实现上述领域发展和相关产业技术革新的前提和基础，而其核心是攻克 MEMS 超声换能器机电声多场耦合理论与高性能结构设计方法，建立 MEMS 超声换能器设计与封装的理论基础。**本研究始于 2010 年，在国家自然科

学基金重大项目课题、面上和青年等项目的资助下，建立了 MEMS 超声换能器多物理场耦合和性能参数分析理论体系，解决了谐振频率、机电耦合系数、接收灵敏度等关键性能参数高效、高精度预测分析难题，揭示了关键结构与材料参数、静电力及工况条件对其力、电、声性能的影响规律；提出了系列高性能 MEMS 超声换能器结构设计与声阻抗匹配封装方法，解决了发射声压和接收灵敏度等性能相互制约、声串扰抑制高密度阵列性能提升等难题，奠定了 MEMS 超声换能器机电声多场耦合机理分析与高性能器件设计的理论基础，对于高性能超声芯片的发展和广泛应用具有重要科学意义。本项目主要成果和创新点包括：

(1) **基于局部静电力展开和能量等效法的高精度 MEMS 超声换能器机电耦合模型和主要力学性能参数解析式**。提出局部静电力展开法，建立了圆形和矩形薄膜电容式 MEMS 超声换能器 (CMUTs) 非线性静力学降阶新模型，考虑材料各向异性、多层复合薄板、残余应力、流体静压力等多种复杂工况条件影响，构建了 CMUTs 系列性能参数 (薄膜变形、塌陷电压、机电耦合系数) 高精度显式解析式，揭示了结构和材料参数、静电力、负载对 CMUTs 性能参数的影响规律，实现复杂工况下 CMUTs 性能参数高效高精度分析 (薄膜变形分析误差小于 5%，塌陷电压分析精度提高 3 倍)；提出能量等效法，建立基于局部静电力展开法、伽辽金法和双余弦形函数的机电耦合非线性动力学降阶模型，获得了圆形和矩形薄膜 CMUTs 在多种复杂条件 (各向异性材料、层合薄板、静电力、流体压力和残余应力) 下系列动力学性能参数 (谐振频率、振动速度与幅值等) 显式解析式，实现从零到塌陷点电压范围内 CMUTs 谐振频率等参数的高效、高精度分析 (分析误差 $\leq 5\%$)，建立 MEMS 超声换能器单元结构性能分析的理论基础。

(2) **考虑寄生电参数影响和分布参数变形函数的高精度 MEMS 超声换能器机电声多场耦合等效电路模型**。引入寄生 (寄生电容、电感及电阻) 影响，基于均方根速度函数构建 CMUTs 单元高精度等效电路模型，探明机电声场能量相互转化机理，实现了 CMUTs 等效电参数 (电容、电感及电阻) 以及阻抗-频率特性的高精度分析。提出基于振动薄膜分布参数变形函数的高精度 CMUTs 阵列结构等效电路模型，推得声学性能参数 (声场分布、带宽、收发灵敏度等) 解析式，揭示阵列结构参数 (单元排布方式、填充因子、阵列尺寸等) 对其声学性能的影响规律；基于经典薄板理论和压电本构方程，利用类比法，构建了圆形和环形薄膜压电式 MEMS 超声换能器 (PMUTs) 单元及阵列等效电路模型，揭示了单元分布、间距等参数对阵列声串扰和灵敏度的影响规律，为 MEMS 超声换能器阵列的设计与优化提供理论依据。

(3) **基于静电刚度软化效应、阵列表面声阻抗调控和声阻抗匹配封装的系列 MEMS 超声换能器性能调控机制**。提出基于静电刚度软化效应的 CMUTs 结构设计新方法，通过环形电极和 T 形空腔形成局部增强静电软化效应调控薄膜变形，解决现有结构发射和接收性能相互制约难题，在有效降低 CMUTs 工作电压的同时实现了发射声压和接收灵敏度的协同提升；提出基于压电-静电混合驱动的 CMUTs 结构设计新方法，利用压电支柱在正反极性电压下可伸缩的特性，

通过电场调控空腔高度，实现了 CMUTs 机电耦合系数、发射声压和接收灵敏度等多性能协同提升；提出环形-圆形薄膜耦合和谐振腔的 PMUTs 阵列声串扰调控机制，通过将声场能量聚集到单元内部、阻断声传播路径等有效抑制阵列单元间声串扰，实现阵列声发射功率（ $\geq 259\%$ ）和灵敏度的大幅提升；发明了基于 RTV615/ Al_2O_3 声阻抗匹配材料、自粘附凝胶的声透镜聚焦封装方法，将 MEMS 超声芯片带宽增大 31.8%，聚焦深度和声压分别提升 200% 和 100%，为 MEMS 超声换能器的性能调控提供了科学依据。

相关成果在 Science 子刊 Science Advances、中国工程院院刊 Engineering、Nature 旗下唯一工程类期刊 Microsystems & Nanoengineering 等高水平刊物上发表 SCI 论文 44 篇，在机械工程学报和高水平国际学术会议上发表 EI 论文 33 篇；授权中国发明专利 32 项；受邀撰写 Springer 英文书籍 1 章（《Micro Electro Mechanical Systems》：“Modeling of Electrostatically Actuated Microplates”）。其中，5 篇代表性论文发表于 Adv. Funct. Mater.、Compos. Struct.、IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 等高水平期刊，中科院 Top 期刊 3 篇，代表性论文总他引 481 次，其中 Web of Science 核心集他引 414 次，ESI 高被引和封面论文各 1 篇。参加学术会议报告 60 余次，其中大会主旨报告 35 次。成果受到英国皇家工程院 Ashwin A. Seshia 院士，加拿大工程院 John T.W. Yeow 院士，ASME Fellow Dumitru I. Caruntu 教授，国家级人才张文栋、薛晨阳等国内外 120 名学者的正面评价：“提出了高精度塌陷电压和薄膜变形显式解析表达式”，“发明了一种新颖的高填充因子 PMUT 阵列设计，显著提高阵列灵敏度”。相关博士学位论文获陕西省优秀博士学位论文、中国仪器仪表学会优秀博士论文提名奖（全国 5 篇/年）以及上银优秀机械博士论文佳作奖。三位完成人分别入选教育部长江学者和中组部“万人计划”青年拔尖人才，获中国青年科技奖特别奖，陕西青年科技标兵、陕西省青年科技新星等多项荣誉，并获批陕西省创新能力支撑计划科技创新团队。

基于上述理论成果，成功研制了 CMUTs、PMUTs 和柔性压电超声共三大系列 10 余种高性能超声芯片，芯片频率范围覆盖 70 kHz 至 23 MHz，性能达到国际先进水平（系列高性能 CMUT 芯片分数带宽大于 154%，发射灵敏度达 6.9 kPa/V，接收灵敏度达 37.6 mV/kPa），部分芯片性能相较于法国 Vermon、比利时微电子中心等国际知名企业所产芯片提高 2.6 倍以上。芯片通过新产品鉴定，专家组认为：“突破了芯片结构设计、高密度阵列制备等关键技术，拥有自主知识产权，填补了国内自主研制 MEMS 电容式超声换能器芯片产品的空白，打破了国外的技术垄断”。系列超声换能器芯片已在西安航空 618 所、南京航空 609 所、西安航天 165 所、安徽北方微电子院、国网、北京安贞医院等 10 余家单位应用，解决了某型号航天火箭、航空发动机、大型掘进机（DL970 盾构）等重大装备的流量、气液分布、应力、游隙等关键参数及人体组织成像与生理特征参数原位无损/无创检测难题。该项目研究成果填补了 MEMS 超声换能器基础理论及高性能器件设计方法空白，解决了我国在新一代超声检测技术领域面临的“缺芯”难题，促进了该类芯片的广泛工程应用。

四、客观评价

本项目研究成果的客观评价和影响如下：

(1) 成果一 “高精度 MEMS 超声换能器机电耦合模型和主要力学性能参数解析式”的客观评价

1) 上述研究成果在 Compos. Struct., J. Phys. D-Appl. Phys., IEEE/ASME JMEMS, 等高水平期刊上发表 SCI 论文 7 篇, 在机械工程学报期刊发表 EI 论文 2 篇; 受 MEMS 领域知名学者黄庆安教授 (国家杰青, IEEE Fellow) 邀请撰写 Springer 出版书籍《Micro Electro Mechanical Systems》章节 “Modeling of Electrostatically Actuated Microplates” (86 页, 1.5 万字); 博士学位论文《电容式微加工超声传感器的关键技术研究》获 2019 年中国仪器仪表学会优秀博士学位论文提名奖 (全国 5 篇/年)。

2) 中北大学张文栋教授 (国家杰青、何梁何利基金“科学技术创新奖”获得者) 等肯定了 CMUTs 机电耦合非线性动力学性能研究 (J. Phys. D-Appl. Phys., 46(19):195108, 2013) 工作: “利用能量等效法建立了同时作用于膜上的压力和静电力两个载荷时谐振频率的近似解, 这些结果为 CMUTs 的压力测试应用奠定了坚实的理论基础, 对本研究具有一定的参考价值”; “开发了一种 350°C 的低温晶圆直接键合工艺, 实现了最小空腔高度低于 100nm 的 CMUT 芯片制备, 从而解决了使用辅助层键合会增加空腔高度, 进而增大塌陷电压、降低器件性能的难题”。

3) 澳门大学 Sio Hang Pun 教授 (国际医学与生物工程联合会执行委员会委员) 共 5 次引用研究工作 (IEEE TUFFC, 68(5), 2021; IEEE/ASME JMEMS, 24(2):474-485, 2015); J. Phys. D-Appl. Phys., 46(19): 195108, 2013), 认为“仅 $(1-w/d_0)$ 项采用泰勒级数展开, 这将更精确, 因为静电力的非线性被考虑进去”, “此外, 这种泰勒级数展开法还被用于其他领域。Li 等结合伽辽金法建立在静电力、残余应力和流体压力作用下的各向异性层合薄板降阶模型, 用于塌陷电压和薄膜变形分析”, “建立了谐振频率与直流电压和压力之间函数关系的显式公式, 用于均匀薄膜 CMUTs 谐振频率分析”。(引文 IEEE Sens. J., 23(3): 2364-2374, 2023; Micromachines, 12(6):714, 2021 & 11(2):217, 2020)。

4) 美国纽约州立大学 Mohammad I. Younis 教授 (Nonlinear Dyn.、J. Vib. Control 和 J. Comput. Nonlinear Dyn. 期刊副主编) 多次肯定了 CMUT 静电耦合静力学行为分析工作: “采用线性平板理论和 Galerkin 方法开展了静电力作用下的薄板力学行为分析研究, 构建了降阶模型, 提出了高精度塌陷电压和平板挠度的显式解析表达式”。

(2) 成果二“高精度 MEMS 超声换能器机电声多场耦合等效电路模型”的客观评价

1) 围绕 MEMS 超声换能器等效电路模型, 在 IEEE Trans. Ind. Electron., IEEE

Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, IEEE Sens. J.等高水平期刊上发表 SCI 论文 5 篇, 以该部分内容为核心的博士论文《压电式微加工超声传感器的关键技术研究》获得 2022 年陕西省优秀博士学位论文和 2021 年第十一届上银优秀机械博士学位论文佳作奖。

2) 武汉大学刘胜院士团队孙成亮教授(新加坡工程师学会卓越工程成就奖(国家级)获得者)累计 10 次引用我们在阵列设计方面的研究工作(IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, 66(11): 1760-1776, 2019; 67(10): 2103-2118, 2020; 67(4): 789-800, 2020; 68(11): 3396-3405, 2021), 认为“证明了施加到 PMUTs 单元上的互阻抗会引起多个多峰现象, 从而可有效拓宽带宽”, 并直接采用了本成果中的建模方法及多个理论公式。

3) 捷克共和国布尔诺国防大学 Josef Bajer 教授(航空技术系主任)肯定了我们 CMUTs 等效电路模型的研究工作(IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs, 70(5):1799-1803, 2023), 直接采用我们所建立的等效电路模型, 实现了等效电参数(电容、电感、电阻等)的提取, 并基于改模型开展了进一步的算法优化研究。(IEEE Access, 12:29024-29034, 2024)

(3) 成果三“基于静电软化效应、阵列表面声阻抗调控和声阻抗匹配封装的系列 MEMS 超声换能器性能调控方法”的客观评价

1) 围绕 MEMS 超声换能器设计, 在 Sci. Adv., Adv. Funct. Mater., IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, IEEE Sens. J.等高水平期刊上发表 SCI 论文 6 篇, 在机械工程学报、国际会议上发表 EI 论文 7 篇, 以该内容为核心的博士论文《压电式微加工超声传感器的关键技术研究》获得 2022 年陕西省优秀博士学位论文和 2021 年第十一届上银优秀机械博士学位论文佳作奖。

2) 英国皇家工程院院士、剑桥大学工程系 Ashwin A. Seshia 教授(IEEE Fellow)正面评价了 PMUT 阵列设计的研究工作: “所提出的高密度阵列具有更好的声压级响应、带宽、方向性和传输距离等性能”, “所设计的谐振腔 PMUT 结构可以有效缓解阵列单元间声串扰, 并进一步提高声发射性能”。

3) 美国佛罗里达大学终身正教授、北京理工大学谢会开教授(IEEE Fellow、SPIE Fellow)多次引用并高度肯定了 PMUT 阵列设计研究工作: “提出了一种用于减少声串扰的谐振腔式 PMUT 创新结构设计”, “能够通过 PMUT 单元之间设置机械隔离来减少声串扰, 是 PMUTs 设计的主要发展方向”

4) 意大利米兰理工大学 Alberto Corigliano 教授(Eur. J. Mech. A-solids 期刊主编、欧洲力学学会会士)正面评定了 PMUT 阵列设计研究工作: “发明了一种新颖的高填充因子 PMUTs 阵列设计, 与传统 PMUTs 阵列相比, 显著提高阵列的灵敏度”。

五、代表性论文专著目录（不超过 8 条，其中代表性论文不超过 5 篇，代表性专著不超过 3 部）

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码（xx 年 xx 卷 xx 页）	发表时间	通讯作者	第一作者	国内作者	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	Nonlinear Behavior Analysis of Electrostatically Actuated Multilayer Anisotropic Microplates with Residual Stress	Composite Structures	Zhikang Li, Libo Zhao*, Jie Li, Yihe Zhao, Tingzhong Xu, Zichen Liu, Guoxi Luo, Shiming Zhang, Kaiming Hu, Tyler Hoffman, Shahid Saghir, Dejiang Lu, Wenming Zhang*, Zhuangde Jiang	2021 年 255 卷 112964 页	2021 年 1 月 1 日	Libo Zhao, Wenming Zhang	Zhikang Li	李支康、赵立波、李杰、赵一鹤、徐廷中、刘子晨、罗国希、卢德江、蒋庄德	11	Web of Science 核心集	是
2	An analytical equivalent circuit model for optimization design of a broadband piezoelectric micromachined	IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency	Tingzhong Xu, Libo Zhao*, Zhuangde Jiang, Shuaishuai Guo, Zhikang Li, Guoxi Luo, Lin Sun, and Liangchi Zhang	2019 年 66 卷 1760-1776 页	2019 年 7 月 11 日	Libo Zhao	Tingzhong Xu	徐廷中、赵立波、蒋庄德、郭帅帅、李支康、罗国希、孙林	31	Web of Science 核心集	是

	ultrasonic transducer with an annular diaphragm	Control									
3	Array design of piezoelectric micromachined ultrasonic transducers with low crosstalk and high emission performance	IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control	Tingzhong Xu, Libo Zhao*, Zhuangde Jiang, Shuaishuai Guo, Zhikang Li*, Ping Yang, Lin Sun, Guoxi Luo and Liangchi Zhang	2020 年 67 卷 789-800 页	2020 年 4 月 4 日	Libo Zhao, Zhikang Li	Tingzhong Xu	徐廷中、赵立波、蒋庄德、郭帅帅、李支康、杨萍、孙林、罗国希	38	Web of Science 核心集	是
4	Highly conductive, stretchable, durable, breathable electrodes based on electrospun polyurethane mats superficially decorated with carbon nanotubes for	Chemical Engineering Journal	Guoxi Luo, Jiaqi Xie, Jielun Liu, Qiankun Zhang, Yunyun Luo, Min Li*, Wenke Zhou, Ke Chen, Zhikang Li, Ping Yang, Libo Zhao*, Kwok Siong Teh*, Xiaozhang Wang, Linxi Dong, Ryutaro Meada, Zhuangde Jiang	2023 年 451 卷 138549 页	2023 年 1 月 1 日	Min Li, Libo Zhao	Guoxi Luo	罗国希、谢嘉琦, 刘桀仑, 张乾坤, 罗运运, 李敏, 周文科, 陈科, 李支康, 杨萍, 赵立波, 王小章, 董林玺, 蒋庄德	120	Web of Science 核心集	是

	multifunctional wearable electronics										
5	Gelatin methacryloyl-ba sed tactile sensors for medical wearables	Advanced Functional Materials	Zhikang Li, Shiming Zhang*, Yihang Chen, Haonan Ling, Libo Zhao*, Guoxi Luo, Xiaochen Wang, Martin C. Hartel, Hao Liu, Yumeng Xue, Reihaneh Haghniaz, KangJu Lee, Wujin Sun, HanJun Kim, Junmin Lee, Yichao Zhao, Yepin Zhao, Sam Emaminejad, Samad Ahadian, Nureddin Ashammakhi, Mehmet R. Dokmeci, Zhuangde Jiang, Ali	2020 年 30 卷 2003601 页	2020 年 9 月 6 日	Shimi ng Zhang *, Libo Zhao*, Ali Khade mhoss eini*	Zhika ng Li	李支康, 赵 立波, 罗国 希, 蒋庄德	214	Web of Science 核心集	是

			Khademhosseini*								
6	Modeling of Electrostatically Actuated Microplates	Springer	Libo Zhao, Zhuangde Jiang, Zhikang Li, Yihe Zhao	2018 年 ISBN: 978-981- 10-5944- 5, 99-153 页	2018 年 4 月 20 日	Zhuan gde Jiang	Libo zhao	赵立波、蒋 庄德、李支 康、赵一鹤	2	Web of Science 核心集	是
合 计									416		

六、主要完成人情况（不超过 6 人）

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
赵立波	1	仪器科学与技术学院 执行院长	教授	西安交通大学	西安交通大学	规划了项目研究技术路线，提出电容和压电式 MEMS 超声换能器机电声多场耦合模型与等效电路模型建模思路。基于经典薄板理论和压电本构方程，利用类比法，构建了圆形和环形薄膜压电式超声换能器单元及阵列等效电路模型，揭示了单元分布、间距等参数对阵列声串扰和灵敏度的影响规律；提出了基于环形电极的单元结构设计方法以及基于谐振腔的声串扰抑制机制及阵列设计方法，利用静电软化效应和阵列声阻抗调控实现单元及阵列性能提升。
李支康	2	仪器科学与技术学院 智能传感与系统研究所 副所长	教授	西安交通大学	西安交通大学	开展了电容式 MEMS 超声换能器（CMUTs）机电耦合力学行为及结构设计方法研究，建立了基于局部静电力展开法和伽辽金法的机电耦合非线性静力学降阶新模型，创建了多种复杂工况条件下不同膜形状 CMUTs 系列静力学性能参数高精度显式解析式，实现塌陷电压、薄膜变形等系列参数的高精度预测与分析；提出基于能量等效和局部静电力展开法的 CMUTs 机电耦合非线性动力学行为解析新方法，构建了多种复杂条件下圆形薄膜 CMUTs 动力学性能参数显式解析式，揭示静电力及多负载作用下 CMUTs 谐振频率、振幅等变化规律；提出了基于静电软化效应的 T 形空腔 CMUTs 结构设计方法，实现了工作电压、收发灵敏度等多性能协同提升。
赵一鹤	3	无	助理教授	西安交通大学	西安交通大学	开展了电容式 MEMS 超声换能器（CMUTs）机电声多场等效电路模型及结构设计方法研究，引入寄生电参数（寄生电容、电感、阻抗等）影响，利用类比法，建立了 CMUTs 单元及阵列高精度新型等效电路模型，构建了声阻抗、声压、灵敏度等性能参数解析式，揭示了 CMUTs 机电声多场能量耦合传递机理，以及寄生电参数对 CMUTs 阻抗、相位、电

						导等电学特性、薄膜振动速度及位移等机械特性和声场特性的影响规律，实现了电、声等参数的精确分析；提出基于静电-压电混合驱动的 CMUTs 结构设计方法，实现发射声压、收发灵敏度等多性能协同提升。
李杰	4	机电工程学院 智能科学与技术专业 主任	副教授	陕西科技大学	陕西科技大学	开展了方形薄膜电容式 MEMS 超声换能器（CMUTs）机电耦合动力学行为研究，利用伽辽金法和双余弦函数构建了静电力、残余应力等负载作用下 CMUTs 机电耦合非线性动力学降阶模型，推导了谐振频率动力学性能参数解析式，实现了静电力和残余应力等负载作用下方形薄膜 CMUTs 谐振频率的高精度分析；引入材料各向异性、多层复合薄膜等复杂工况条件，建立了各向异性层合薄膜 CMUTs 动力学模型和谐振频率等性能参数解析表达式，实现了复杂工况条件下 CMUTs 谐振频率和振动特性等力学性能参数的准确分析。
李敏	5	无	副教授	西安交通大学	西安交通大学	发明了基于 RTV615/A1203 声阻抗匹配材料、自粘附凝胶的声透镜聚焦封装方法，有效提升超声芯片机电耦合系数、带宽、聚焦深度以及声压，为 MEMS 超声换能器的性能调控提供了科学依据。
罗国希	6	前沿科学与技术学院副院长	教授	西安交通大学	西安交通大学	开展了压电式 MEMS 超声换能器阵列声串扰抑制机制及结构设计研究，提出环形-圆形薄膜耦合 PMUTs 和反相激励的阵列声串扰调控方法，从而实现阵列单元间声串扰的有效抑制，实现了阵列发射声压的显著提升。该方法为 MEMS 超声传感器阵列设计与优化提供了理论依据。

七、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西安交通大学	1	在本研究成果的申报过程中，西安交通大学提供了宝贵的支持和资源。学校先进的微纳加工国家重点实验室和研究中心为 MEMS 超声换能器的设计和制造提供了关键的实验平台。西安交通大学丰富的学术资源，如图书馆和在线数据库，也为获取最新研究成果提供了便利。
陕西科技大学	2	陕西科技大学对本成果做出了很多贡献，首先，单位为本成果参与人设立校级项目，提供了一定的资金作为支持；其次，单位为本成果中芯片性能测试部分提供了部分设备支持；再次，单位为本成果相关课题的申报、争取及结项等工作做出一定的贡献；最后，单位为本成果的参评提供了咨询、指导及其他相关工作服务。

八、完成人合作关系说明

本项目由第 1 完成人赵立波、第 2 完成人李支康、第 3 完成人赵一鹤、第 4 完成人李杰、第 5 完成人李敏与第 6 完成人罗国希合作完成。项目完成人在国家自然科学基金项目等支持下，从事 MEMS 超声换能器研究，在其多物理耦合理论、性能提升方法等关键科学问题方面开展了大量研究工作，突破系列关键难题，获得了多项原创性成果，建立了静电力、环境压力、残余应力等多种条件下不同薄膜结构机-电-声多场耦合模型及等效电路模型，给出了主要性能参数的解析式；提出了基于静电刚度软化效应、阵列表面声阻抗调控和声阻抗匹配封装的系列 MEMS 超声换能器性能提升新方法，实现了发射声压、收发灵敏度、带宽等多性能协同提升，奠定了 MEMS 超声换能器机电声多场耦合与器件性能提升的坚实理论基础，具有重要科学价值。

以上 6 位完成人共同发表了 5 篇代表性论文和 1 篇专著，合作成果包括建立了 MEMS 超声换能器多场耦合理论体系，以及提出了系列高性能 MEMS 超声换能器性能调控机制。