

陕西省自然科学奖公示信息

(2025年度)

一、项目基本情况

项目名称	纵振动方向变换体、宽频带振动体及功率辐射体
主要完成人	贺西平，张海岛，胡静
主要完成单位	陕西师范大学

二、提名意见（适用于提各单位）

提 名 者	陕西省教育厅
<p>提名意见（不超过 600 字）：</p> <p>声振动系统在水声及民用领域中有着重要的应用。依托申请人之前分别主持过的 3 项国家自然科学基金资助项目，基于军用或民用的实际需求，本成果提出了两种纵振动方向变换体以及两种新结构宽频带振动体，和一种向空气中辐射大功率声波的辐射体。水声通讯、水下对抗、水声导航等水声设备中需要结构简捷的宽频带发射和接收型水声换能器，本成果提出了在前盖板上穿单孔和在前盖板上开矩形通孔的改进 Tonpilz 型换能器，优化后振动系统的机械品质因数小于 3，与传统 Tonpilz 换能器相比明显拓宽了工作频带；为大面积高效应用超声处理及超声加工技术，需要对现有传统的振动系统进行改进，本成果提出了夹角型、一端输入多端输出以及向空气中辐射的厚盘辐射体结构，理论推导给出了设计方程。提出的新结构振动体的设计、优化方法及其声振动性能理论计算结果与实验测试结果吻合，均系国内外首次提出。5 篇代表性论文受到国内外广泛关注，有力推动了声振动系统的应用基础研究。本成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件。</p> <p>提名该项目为陕西省自然科学奖 二等 奖。</p>	
<p>说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。项目组与提各单位沟通后，做出提名等级意见；提名项目提交后，提名等级建议不得变更。</p>	

三、项目简介

(限 2 页)

本课题属于物理学中二级学科声学领域中的声振动系统及其应用的应用性基础研究。课题中提出的纵振动方向变换体和几种新结构宽频带振动体,以及向空气中大功率辐射体的设计和优化设计方法,为军用和民用声振动系统技术领域提供了理论基础。

高频超声波具有方向性好、易携带能量、能引起许多特殊效应,且该应用技术过程中不会对环境产生有害物质,又被称为绿色、洁净技术,因此高频超声技术被广泛地应用于硬脆材料的超声辅助加工、塑料及金属焊接、超声清洗、超声辅助特种加工、超声废水处理、无损检测及医学超声、食物处理、环境保护等行业领域里,并发挥着独特的作用。为了能向流体中(空气或液体中)产生所需要的声效应或远距离传播宽频带声信息,需要向大面积的介质中传播或辐射大功率声波,或是向有夹角的管状空间中辐射声波,如生物效应(驱杀害虫等)、工业上应用(声悬浮、消气泡、声雾化、声清洗)、应用于农业或食品加工业(食品干燥、消毒杀菌)、用于清洗弯曲管子内表面、用于超声辅助弯曲机加工、用于主动大功率水下声呐等,提供高效工作的声辐射振动体。宽频带换能器则更能方便且有效地帮助实现这些应用。为了实现这些应用,本课题提出了几种新结构的设计和优化的方法,均为国内外首次提出和研究。计算结果与实验测试吻合。

第一,提出了纵振动沿有夹角方向的振动体传播的设计方法。传统纵振动系统的各构件一般为直线形。振动由声换能器产生,换能器后面连接具有振幅放大作用的直线型变幅杆,在变幅杆后面有的应用还需要再在其后连接工具头。在振动系统中,能量将沿直线方向传输。实际中的一些应用问题,需要改变振动传输方向的振动系统,例如,向有弯曲或有夹角的管状空间中辐射声波,以便能清洗弯曲管子内表面,或是用于超声辅助弯曲方向对工件进行机械加工,等等。截止本项目的论文发表以前,未见到有改变任意振动方向而又能满足所需谐振频率、振幅放大系数的振动体的计算方法或设计理论。对此,一般的做法则是对连接需改变方向的组件进行经验式的设计,若不能达到所需频率、振幅放大倍数等,需再重新加工、重新连接,如此反复,直至试验得到满意结果为止。

纵波在有夹角的、有限长度的两振动部件中传播,会从一个振动部件经过连接处传输到另一个振动部件中而产生透射波,两振动部件的交界处会存有反射和波形转换后的波型。由边界条件和两部件连接处的位移、力、弯矩和转角连续,推导得到了 12 个待定系数组成的 12 阶线性齐次方程组。因涉及到具有四阶微分的弯曲振动本构方程,推动得到的方程组形式比较复杂。由此得到了设计所需的频率方程,并对振幅放大系数(输出端与输入端的振幅之比)的研究表明,振幅放大系数与两振动部件的长度、半径与之间的夹角有关。根据所得多变量的方程,可进行优化设计。

第二,提出了一种单端输入多端输出的半球形(或圆柱体)纵振动转换体,由此可同时超声处理或辅助超声加工多个工作对象。通常一个换能器一般只有一个输出端,这就意味着一套振动系统只能连接一个工具头,只能超声加工、超声处理一个对象,不利于大面积应用、不利于生产效率的提高。本课题则提出了一种单端输入多端输出的半球形(或圆柱体)纵振动转换体,即换能器的输出端连接到该半球形的平面端的直径方向,其他多个输出端则从该半球面上空间对称分布而伸出,实现多端输出,每个输出端将输入端的振动能量按几何性质分配后再传播下去。如此,多个输出端则可同时超声辅助加工或处理多个应用对象。

第三，本成果提出两种结构简捷、易实现的 Tonpilz 换能器，与传统的 Tonpilz 换能器相比，明显拓宽了工作频带宽度。军用上的宽频带水声换能器能在较宽频带范围内能高效率工作宽频带换能器在军用及民用中都有重要应用，拓宽频带的方法有多种，如利用单一振动模态、多模态振动耦合、电端匹配等方法，改进后的结构一般比较复杂。本成果提出的两种结构简捷、易实现，拓宽后的机械品质因素可小于 3，频带较宽，便于应用。军用上的宽频带水声换能器能在较宽频带范围内能高效率工作，采用脉冲压缩等现代信息技术工作时也能保证信号不失真，同时亦有较高的时域分辨率和对外界负载变化较强的适应性。例如，在声自导鱼雷上的宽带换能器可大幅度提高回波信息量，利于目标识别、参数估计和抗干扰水声对抗能力；宽频带换能器在医学超声、超声清洗、超声检测、超声加工等领域中也有广泛应。又如，超声清洗中一般需在大量的换能器中挑选频率和阻抗相互比较接近的一些换能器来组成，这样无形中增加了生产成本，带来了实际的困难，宽频带换能器的出现就能解决这个的问题。超声波焊接机、超声波洁牙机用宽频带换能器，在负载变化的情况下，换能器的带宽越大，工作范围就越宽，不至于由于谐振点的变化而使电路失谐引发停振。

本研究提出了一种在前盖板处开有横向矩形通孔的 Tonpilz 型换能器，输出端除纵振动外还可有弯曲振动，改变通孔尺寸从而调节换能器各谐振峰的相对位置与高度来拓宽频带，优化后在水中可扩展频带宽度大于二分之一倍频程，实现了宽带发射性能，同时具备制造工艺简单、电声效率高、功率容量大及性能稳定等优点。提出并研究的另一种结构是在前盖板上穿一圆台形单孔，以此降低换能器的等效质量及机械品质因数，优化后水中的机械品质因数小于 3。

第四，提出了能承受大功率、大强度的厚圆盘作为向空气中辐射强功率声波的振动辐射体及其设计方法。因压电材料或金属的声阻抗与空气的声阻抗严重失配（相差 5 个数量级），压电换能器通过压电或金属材料向空气中辐射超声波效率极低。为了向空气中能辐射大功率的声波，本成果利用弯曲振动阻抗低的特性，研究了能承受大功率、大强度的厚圆盘作为向空气中辐射强功率声波的振动辐射体。厚圆盘的厚跨比往往大于 1/5 时，常用的 Kirchhoff 经典弯曲振动理论局限性大，只能用于薄圆盘。厚圆盘必须考虑厚盘具有剪切、挤压和转动惯量的效应。本研究项目考虑了边界条件为自由、简支、固定时，结合 Mindlin 板理论，推导了厚圆盘弯曲振动径向位移和横向位移的解析表达式，并得到相应设计的频率方程。过程推导较为复杂。在此基础上，可进一步求得厚圆盘辐射声场的指向性。这项作为强功率、厚圆盘弯曲振动辐射体的设计提供了理论基础。

本课题进行理论推导、计算后，加工了多个纵振动方向转换体、宽频带振动体和功率辐射体，结果表明，计算结果与测试结果相吻合。本课题申请中国发明专利 7 项，相关成果在 中国科学、物理学报、声学学报、振动与冲击、Ultrasonics、Jap. J. Appl. Phys.、J. Acoust. Soc. Am.、Acta Acust.、J. Vib. & Control 等国内外知名学术期刊发表论文 40 余篇，相关研究成果受到国内外学术界广泛关注，在国际和国内学术会议上宣讲多次。本课题的代表性论文 5 篇总被引用百余次，引用文献包括 物理学报、声学学报、J. Acoust. Soc. Am.、Appl. acoust.、sensors、IEEE sensors J.等国内外著名期刊，引用者当中有许多声学领域内著名专家领导的研究团队，如中国科学院声学研究所莫喜平研究员、哈尔滨工程大学周天放和蓝宇教授、西北工业大学陈克安教授、西安交通大学大学吴九汇教授、韩国庆北国立大学 Yongrae Roh 教授、安卡拉伊迪迪林贝雅兹大学 Cihangir Duran 教授等。

四、客观评价

本项目五项代表性论文公开发表后,受到国内外学术界广泛关注,总被引 121 次,其中他引 108 次。引用本项目论文的国内外著名学术期刊有:中国科学、物理学报、声学学报、Ultrasonics、J. Acoust. Soc. Am.、Applied acoustics 和 J. Vib. & Control 等。本项目还包含有 7 项国家专利权授权的发明专利以及作为本课题后期应用的这两项合同书(通过横向合作形式分别为中国舰船研究设计中心,和高新企业西安创亿达微电子测控系统有限公司,研制了板盘振动体以及向空气中辐射大功率声波的辐射体),均在陕西省科技成果登记系统中都有备案。论文、专利发表或公开后,诸多公司研发人员或科技工作者来电、邮等形式咨询,我们都耐心地做了答复或交流。

1. 与当前国内外同类学科技术研究现状相比较,本项研究成果的主要特点如下。

1) 纵振动一般是沿直线传播,本成果创新性提出并推导、设计了纵振动沿与产生方向有一定角度的振动组件上传播,在此基础上实现了在一端产生的纵振动,经过提出的振动方向变换体传振后,可多个端点传播(或输出)纵振动,为声振动系统大面积、同时处理多个工作对象的应用技术奠定了基础。

北京航天航空大学的张德远教授(中国机械工程学会特种加工超声分会主任)2025 年在《Actuators》上发表论文,引用本研究为“超声清洗弯曲形管道需要改变纵振动传播方向,为此,2017 年贺西平等提出并设计了一种在具有夹角形状的纵振动结构杆中传播纵振动的方法。在他们的设计中,半径 7.5mm 的两个杆部件用螺钉安装在一起组成一弯曲型变幅杆”,在张教授论文中,借鉴本成果**代表性论文 1**中提出的纵振动在有夹角型振动组件中传播的思想,设计了超声辅助弯曲工具头机加工部件,解决了特殊工件加工的需求问题。河南理工大学的赵波教授(中国机械工程学会特种加工超声分会副主任)2022 年在 Smart Mater. Struct.上发文,引用了本成果的**代表性论文 1**,“在本文中,基于贺西平提出的矩阵分析方法[22],得到非对称结构变幅杆(ASH)的频率方程。由此可以计算出特定频率下 ASH 的尺寸参数,通过建模和有限元分析软件验证了计算结果的准确性。比较几组变幅杆的仿真和计算结果,探讨了变幅杆的各种结构参数对放大系数和谐振频率的影响。基于对几组变幅杆进行仿真分析和计算,进一步优化了变幅杆的设计结果,并分别采用分段和整体的方式对 ASH 进行实际安装后测试。阻抗分析和超声振动激励测试,观察了实际谐振频率与理论谐振频率之间的误差。通过测量变幅杆输出端面的振幅,对不同结构参数的不对称变幅杆结构进行了研究”,在赵教授论文中提出新的超声辅助机加工系统即带有夹角传播的纵振动体,以及设计用该振动体的所有方程均来自于本成果**代表性论文 1**。中国计量大学(浙江省一流专业“声学专业”负责人),中国声学学会功率超声分会及中国声学学会教育分会委员许龙教授在 2019 年《Chin J. of Acoustics》发文引用本成果**代表性论文 2**,“贺西平教授等提出了单端输入多端输出的纵振动方向转换体”。

2) 为拓宽换能器的工作带宽,常用的方法有单一振动模态、多模态振动耦合、电端匹配等方法,但这些常用方法确定需要构造振动体的体积较庞大、结构较复杂。本成果提出在距前盖板输出端面一定距离处开一横向矩形通孔的 Tonpilz 型换能器,以及提出的在 Tonpilz 型换能器前盖板上穿一一定几何尺寸的圆台形或一圆柱形单孔,均可拓宽换能器的发射或接收工作频带,优化其机械品质因数能达到小于 3,既可单独使用也可作为基阵中的阵列单元,结构简捷,效果良好,方便应用。

中国科学院声学研究所莫喜平教授(换能器实验室主任,中国声学标准化技术委员会委员及超声水声分技术委员会主任)2025 年在《J. Acoust. Soc. Am.》发文,为展宽换能器频带宽度,引用了本项目成果**代表性论文 3**,“这种方法包括利用振动系统不同振动形式或利用同振动形式的不同阶次的有效耦合来展开频带宽度,例如纵弯耦合振动”;哈尔滨

工程大学水声工程学院蓝宇、周天放教授 2025 年在《J. Acoust. Soc. Am.》发文，同样引用了本项目成果代表性论文 3；韩国庆北国立大学教授 Yongrae Roh 于 2021 年在《Sensors》上发文，引用了本项目成果代表性论文 4，“贺西平等设计了一种具有单孔结构的新型 Tonpilz 换能器获得了低机械品质因素”；土耳其安卡拉伊迪迪林贝亚兹大学 Cihangir Duran 教授 2019 年在《Applied acoustics》发文”，引用了本项目成果代表性论文 4，评述为“近些年来，学者们为提高换能器性能参数做了不少工作。贺西平和胡静研究了具有一孔型前质量块的 Tonpilz 换能器获得了较宽的工作频带”。

3) 为了向空气中辐射强功率声波，本项目提出了厚圆盘作为辐射声场的辐射体。

提出并研究推导了厚圆盘在自由、简支及固定边界条件下设计厚圆盘的振动频率方程，并计算了厚圆盘弯曲振动辐射声场的指向性。推导出的三种边界条件下的厚圆盘频率方程的计算结果与仿真计算及试验结果相符，可为空气中大功率辐射应用提供设计方法。

西北工业大学航海学院的陈克安教授（陕西省声学学会理事长）2014 年在《物理学报》上发文，引用了本本项目成果代表性论文 5，在求解板、盘问题时，评论为“研究者大多针对弦、棒、膜和薄板这类简单规则结构采用了有限差分这类数值方法，它们具有建模简单、计算精度高等特点。但对于实际声目标识别，研究对象通常为潜艇、军舰或渔船等，其声源形状不规则且结构更复杂，导致模型的自由度、阻尼建模以及声场复杂度增加，使得建模和求解更为困难”。

2. 应用情况

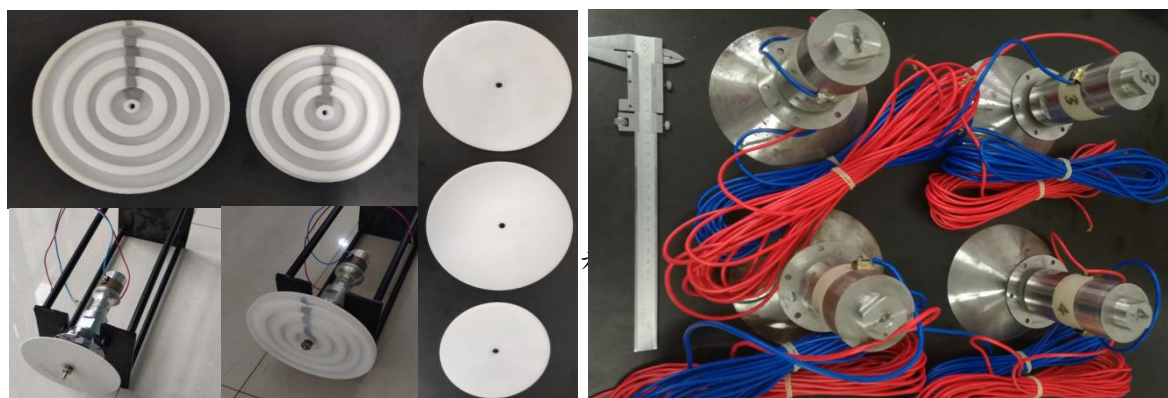
作为本项目的后期应用，主持人通过横向合作形式为两个单位研制了有关产品（技术合同见附件）。

A: 为中国舰船研究设计中心研制大幅面、大振幅振动系统，作为振动机械天线使用

中国舰船研究设计中心需要一种甚低频(10~30 kHz)新型的低频电磁发射机械天线，不能使用金属材料，因其易被极化而产生反向电偶极矩，会影响振动式机械天线的效率。研制了压电换能器驱动选择的大幅圆面 POM 材料作为振动基座。

B: 为西安高科技创亿达微电子测控系统有限公司研制了大功率气介声换能器

为研制声雷达，满足舰艇上日常训练的需要，西安创亿达微电子测控系统有限公司为军方供货，需要研制发送电压响应 TVR 要大于 55dB、-3dB 束宽小于等于正负 20°等所需指标的在空气中能发射大功率声波换能器。根据本课题的提出的有关设计方法，理论计算、优化计算、机加工、装配后，研制的产品经测试，符合应用需要。



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，应公开发表 2 年以上，即 2023 年 8 月 1 日前)

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 (年月日)	通讯作者 (含共同)	第一作者 (含共同)	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	Analytical and experimental study of an ultrasonic horn with a bend angle of an ultrasonic horn with a bend angle Journal of vibration and control He, XP;	Journal of vibration and control	He, XP; Zhang, HD	2018 ,24(1 9): 4383-4394	2018 年 08 月 01 日	He, XP	He, XP	贺西平, 张海岛	7	WOS 核心合集	是
2	单端输入多端 输出的纵振动 转换体的研究	中国科学：物理学 力学 天 文学	贺西平, 张海岛	2016 ,46(3):034 301, 1-9	2016 年 03 月 01 日	贺西平	贺西平	贺西平, 张海岛	15	CNKI 引用	是
3	A wideband tonpilz transducer with a transverse through-hole in the radiating head	J. Acoust. Soc. Am.	Xiping He, Xingmin Zhu, Zihao Wu, Xiaoya	2021 , 150(4): 2655 2663	2021 年 10 月 01 日	Xipi ng He	Xipi ng He	贺西平, 朱行旻, 吴梓豪, 康晓妍, 汪彦军	10	WOS 核心合集 +CSCD 引用	是
4	Study on the broadband tonpilz transducer with a single hole	Ultrasonics	He Xiping, Hu Jing	2009 , 49:4 19 423	2009 年 04 月 01 日	He Xipi ng	He Xipi ng	贺西平, 胡静	9	WOS 核心合集	是
5	厚圆盘弯曲振动研究	物理学报	潘晓娟, 贺西平	2010 ,59(1 1):79 11 7916	2010 年 11 月 01 日	贺西平	潘晓娟	潘晓娟, 贺西平	67	WOS 核心+CSCD 引用+CNKI 引用	是
合 计									108		

六、主要完成人情况表

姓 名	贺西平	排 名	1
行政职务	无	技术职称	教授
工作单位	陕西师范大学	完成单位	陕西师范大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>对本项目主要学术贡献： 项目总负责人。全面负责项目总体方向的确定、研究思路的提出以及研究方案的设计、论文写作和发表、专利 申请等。对该项目创新点中的第 1-3 项创新做出了创造性工作（代表性论文 1-5）。</p>			

姓 名	张海岛	排 名	2
行政职务	无	技术职称	讲师
工作单位	中国计量大学	完成单位	陕西师范大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为项目主要完成人之一，该同志参与了具有夹角结构的纵振动传振体和单端输入多端输出的纵振动方向转换体的研究工作，负责推导这两种振动体或振动转换体的工作在谐振频率上所需设计的频率方程以及随后的实验 测试工作。对该项目创新点 1 做出了贡献（代表作 1，2）。</p>			

姓 名	胡静	排 名	3
行政职务	无	技术职称	副教授
工作单位	陕西师范大学	完成单位	陕西师范大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为项目主要完成人之一，该同志参与了一种在声换能器前盖板上穿一圆台形或一圆柱形单孔，以此降低换能 器的等效质量及机械品质因数的研究工作，推导了声换能器的等效质量、频带宽度等声性能参数表达式，并作了优化计算和实验测试工作（代表作 4）。</p>			

七、主要完成单位情况表

单位名称	陕西师范大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为本项目的依托单位，陕西师范大学为本项目的顺利完成做出了重要贡献，主要表现为：</p> <ol style="list-style-type: none">1) 组织并完成了项目策划和实施工作；2) 为项目的顺利实施提供了人力资源与优质的工作环境与场所；3) 提供了本项目所需的设备、能源、图书资料和数据库等资源。	

八、完成人合作关系说明

本项目完成人为贺西平、张海岛、胡静。贺西平为陕西师范大学教师。张海岛现为中国计量大学教师，参加项目期间为陕西师范大学博士生。胡静为陕西师范大学教师，参加项目期间为陕西师范大学硕士研究生。团队成员共同完成成果“纵振动方向变换体、宽频带振动体及功率辐射体”的相关工作。

贺西平带领其研究生团队（包括博士生张海岛）参与了项目“弱非线性、可变方向的大面积大功率高指向性辐射体研究”。贺西平(通讯作者)与张海岛共同发表了代表性论文 1 和代表性论文 2.

贺西平、胡静参与了“宽频带声换能器”的研究工作。贺西平(通讯作者)、胡静共同合著了代表性论文 4。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	论文合著	贺西平（1），张海岛（2）	2016.01-2018.8.31	Journal of Vibration and Control, 2018, 24(19):4383–4394.	代表性论文 1
2	论文合著	贺西平（1），张海岛（2）	2016.01-2018.8.31	中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(3): 034301, 1-9.	代表性论文 2
3	论文合著	贺西平（1），胡静（3）	2009.01.01-2009.12.31	Ultrasonics, 2009, 49(4-5):419-423	代表性论文 4