
2025 年度拟提名陕西省技术发明奖项目公示内容

一、项目名称

超分辨声学成像关键技术及应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

面向“如何提高各领域关键装备的声学成像精度”国家重大需求，针对现有声学成像技术及设备存在“测量精度低、测量干扰大、测量频带窄”的突出问题，项目深入研究了超分辨声源定位原理，建立了基于稀疏优化架构的超分辨声源定位模型，发现了传声器阵列中声源定位与稀疏性、超分辨率之间的一般规律。发明了低信噪比下压缩感知超分辨声学成像技术，攻克了现有算法难以处理低频噪声源、扩展噪声源、负噪声源和假噪声源等关键技术。发明了基于超分辨声学成像原理的空腔气动噪声源主动控制方法，解决了不同流速下如何降低空腔驻波噪声的重大难题。发明了基于超分辨声学成像原理的泄漏超声定位识别方法。研制了用于超分辨声学成像的仪器，具有测量参数全、综合测量精度高、测量效率高等显著优点。项目通过了东莞市三航军民融合创新研究院组织的科技成果鉴定，整体处于国际领先水平。其中声学成像仪器通过了深圳市计量质量检测研究院的校准计量，仪器处于国际先进水平。项目授权国家发明专利 30 项，软件著作权 15 项，发表高水平学术论文 61 篇。项目成果已在航空重大装备、侵彻弹定位、海洋舰船装备、高铁关键部件、民生重大工程中得到应用，取得了显著社会效益和经济效益。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省技术发明奖提名条件。

提名该项目为陕西省技术发明奖 二 等奖。

三、项目简介

该项目属于声学测量方法、机械动力学与振动、信号检测等学科的前沿研究内容，可应用于航空、舰船、高铁、能源等多个领域的工程装备。

借助基于传声器阵列的声学成像技术，可以更直观的认识声源、声波、以及声场的产生、传播及分布机理、为工业产品的低噪声设计、机械故障检测提供理论及技术支撑。然而，由于传声器阵列较高的硬件成本以及所带来的较低的空间分辨性能，严重局限了声学成像技术在各领域关键装备中的应用。因此，如何在有限的阵元数目以及阵列拓扑结构下获得足够高的空间分辨率是声学成像系统设计中亟待解决的重要问题。

面向“如何提高各领域关键装备的声学成像精度”国家重大需求，针对现有声学成像技术及设备存在“测量精度低、测量干扰大、测量频带窄”的突出问题，该项目在国家自然科学基金项目、重点实验室基金等课题的支持下，深

入研究了超分辨声源定位原理，建立了基于稀疏优化架构的超分辨声源定位模型，发现了传声器阵列中声源定位与稀疏性、超分辨率之间的一般规律，实现了大范围、远距离应用场景中的定位误差 $\leq 0.1\text{m}$ 的工程化应用。发明了低信噪比下压缩感知超分辨声学成像技术，攻克了现有算法难以处理低频噪声源、扩展噪声源、负噪声源和假噪声源等关键技术。

相较于常规波束形成方法，发明的压缩感知超分辨声学成像技术的分辨率能够提高 56.5%，突破了瑞利极限的限制，实现了超分辨率声学成像。发明了基于超分辨声学成像原理的空腔气动噪声源主动控制方法，解决了不同流速下如何降低空腔驻波噪声的重大难题，使空腔驻波噪声得到有效控制，总声压级减少了 2.94dB，主模态声压级减少了 6.89dB，并以此为基础揭示了空腔气动噪声的传播机理。

研制了用于超分辨声学成像的仪器，具有测量参数全、综合测量精度高、测量效率高等显著优点，已在航空重大装备、侵彻弹定位、海洋舰船装备、高铁关键部件、民生重大工程中得到应用，取得了显著社会效益和经济效益。主要发明点有：

1、建立了超分辨声源定位模型

在固定阵列测量中，将超分辨最优解表达成稀疏欠定问题的优化形式，通过卡尔曼滤波器提高了模型的抗噪性，揭示了固定阵列测量中声源定位与声源稀疏性、超分辨率之间的一般规律，构建了声源稀疏超分辨优化架构。在移动阵列测量中，通过小孔径原型阵列的移动测量获得合成大孔径阵列的声源定位结果，解决了阵列声源定位中无法同时降低硬件成本和提高空间分辨率的问题，突破了小孔径阵列超分辨声源定位的窄频带限制，实现了大范围、远距离应用场景中的超分辨声源定位。

2、开发了压缩感知超分辨声学成像技术

基于超分辨声源定位模型，结合噪声源的空间稀疏性和宽频带特性，与可见光/红外图像融合，发明了低信噪比下压缩感知超分辨声学成像技术，解决了现有算法难以处理宽频带噪声源、扩展噪声源、负噪声源和假噪声源等问题，最终建立了完备的超分辨声学成像技术。

3、发明了基于超分辨声学成像原理的空腔气动噪声源主动控制方法

基于超分辨声学成像原理实现了低信噪比环境下不同频带空腔气动噪声源识别，发明了基于超分辨声学成像原理的空腔气动噪声源主动控制方法，使用安装于空腔内的机械装置调节空腔前壁面、底面及后壁面的倾斜角度，解决了不同流速下如何降低驻波噪声的重大难题，揭示了空腔气动噪声的传播机理，实现了空腔气动噪声源的准确定位和空腔驻波噪声的有效控制。

4、研发了面向不同装备的声学成像仪器

采用 FPGA 实时并行采集、网络高速传输、边缘计算、人工智能、增强现实等技术，自主研发了面向不同领域装备的声学成像仪器，实现了对声场的高精度空间采样。

该项目已授权国家发明专利 30 项，软件著作权 15 项，发表论文 61 篇。研究成果已应用到中国飞机强度研究所、中国人民解放军 63672 部队、中国人民解放军 92493 部队计量测试研究所、西安漫威智能科技有限公司等多家单位的国家重大项目及商业产品中，解决了多项技术难题。研究成果还被国家重点新闻网站——“中国网”的创新频道专题报道，其先进性得到了国内外的广泛认可，学术价值高，具有重大的推广应用价值。该项目通过了东莞市三航军民融合创新研究院组织的科技成果鉴定，整体处于国际领先水平。其中声学成像仪器通过了深圳市计量质量检测研究院的校准计量，仪器处于国际先进水平。

四、客观评价

1、学术评价

(1) 发明和建立了超分辨声源定位模型

美国加利福尼亚大学尔湾分校 Dimitri Papamoschou 教授将超分辨声源定位模型为基础的块厄米矩阵补全波束形成算法作为互谱矩阵补全技术的典型声源定位模型进行了正面评价 (AIAA Journal, 2023, 61(1): 429-443); 哈尔滨工程大学肖友洪教授将该超分辨声源定位模型作为中高频声源定位的典型方法进行了正面评价 (MSSP, 2023, 188: 109996); 里昂大学 Jérôme Antoni 教授对用于空间声源定位的三维测量高分辨率声源定位模型进行了正面评价 (JSV, 2024, 575:118266); 哈德斯菲尔德大学 Andrew David Ball 教授将超分辨声源定位模型为基础的截断核范数矩阵补全波束形成算法作为典型声源定位模型进行了正面评价 (ISA transactions, 2025, 158:537-555)。

(2) 突破了低信噪比声学成像瓶颈，开发了压缩感知超分辨声学成像技术

上海交通大学蒋伟康教授指出，低信噪比环境下的高效压缩感知算法能够提高声场重建结果的准确性，并将其作为气动声学领域中典型压缩感知波束形成技术进行介绍 (MSSP, 2021, 149: 107220; MSSP, 2022, 165: 108294); 清华大学王天杨教授指出该方法结合正交匹配追踪和奇异值分解，适用于低信噪比或低频环境中的声场重建 (JSV, 2021, 500: 116017; MSSP, 2022, 170: 108869); 重庆大学褚志刚教授在其论文 (JSV, 2022, 517: 116549; JASA, 2020, 148(3): 1337-1348) 中评价压缩感知超分辨声学成像技术：宽广的声源定位空间、适用于相干和非相干声源、成像清晰；南方科技大学刘宇教授评价压缩感知超分辨声学成像技术能够显著清除声学图中旁瓣 (MSSP, 2021, 151: 107370); 燕山大学孟宗教授在其论文 (MSSP, 2021, 157: 107647) 中正面评价压缩感知超分辨声学成像技术：可以直接从信号中获取少量观测值来实现信号的高精度重构。

(3) 发明和开发了基于超分辨声学成像原理的气动噪声源分析及测量技术

基于平面传声器阵列及超分辨声学成像原理的气动噪声源分析及测量技术得到了意大利马尔凯理工大学 Paolo Castellini 教授的正面评价，在关于噪声源定位的波束形成综述中将该方法作为典型的应用于三维气动噪声源分析及测量技术进行了引用 (MSSP, 2019, 120: 422-448)，同时将该技术作为使用平面阵列进行三维气动噪声源识别的技术进行了介绍 (JSV, 2020, 473: 115208)。

2、应用评价

中国飞机强度研究所【附件 2-1、2-2】：“本单位将西北工业大学发明的超分辨声学成像压缩感知技术成功应用于起落架、内埋弹舱等飞机机体结构的噪声源定位中，通过开口射流试验验证了超分辨声学成像压缩感知技术能够有效去除背景噪声干扰，准确定位起落架及内埋弹舱中的主要噪声源位置，为我国民机及军机的低噪声设计提供了良好的技术手段。”

中国人民解放军 63672 部队【附件 5-1】：“西北工业大学提出的超分辨声学定位技术为高速侵彻定位提供了一种思路，该技术应用于高速侵彻战斗部侵彻参数测量，通过现场试验考核了该技术中的传声器阵列的可行性及搜索匹配声源定位算法的实时性，得到的平均定位响应时间满足试验需求。该技术使用方便，具有一定的应用价值和应用前景。”

西安漫威智能科技有限公司【附件 5-3】：“已将西北工业大学发明的超分辨声学成像技术为基础的传声器阵列安装在巡检机器人上，形成了本单位的核心商业产品：管道智能感知巡检机器人。成功应用于综合管廊内燃气管道巡检，实现了综合管廊泄漏智能识别技术、泄漏智能定位技术。管廊智能感知巡检机器人提高了巡检的实时性、效率、识别率和智能化水平。”

中国铁路上海局集团有限公司南京动车段【附件 2-3】：“…西北工业大学研发的便携式人工智能超声成像仪的各项功能正常，提高了受电弓泄漏故障检测的效率与准确度。”

五、应用情况和效益

1.应用情况

本项目研究成果形成的关键技术已在多个单位获得应用，包括：

（1）已应用于中国飞机强度研究所的起落架、内埋弹舱等飞机机体结构噪声源定位中【附件 2-1、2-2】，通过开口射流试验验证了超分辨声学成像压缩感知技术，去除背景噪声干扰，在不同频带上均能准确定位起落架及内埋弹舱中的主要噪声源位置，起落架测试试验表明：无论起落架模型是否带机轮均能较好的对不同频段的噪声源进行定位，低频部分主要噪声源由机轮产生，中高频以后主要噪声源由侧撑支柱产生，同时在高频处还能定位出反射干扰声源的位置，在 0.45 马赫和 0.7 马赫时均能在不同频带上对内埋弹舱中的声源进行准确定位，定位结果与弹舱内埋传声器测试结果吻合。

（2）已应用于中国人民解放军 63672 部队的高速侵彻弹声学定位系统中【附件 5-1】，自主开发了分布式传声器阵列，根据侵彻弹的爆炸特性开发了适用于侵彻定位以及爆点定位的搜索匹配算法，可精确判断高速侵彻弹命中多层目标建筑物后撞击点以及最终引爆点。

（3）已应用于中国人民解放军 92493 部队计量测试研究所的宽带泄漏声源模拟试验台【附件 5-2】，能够验证高频宽带传声器阵列对不同类型声信号的检测能力，验证利用声学图像与可见光图像、红外图像融合，实现气体泄漏快速检测

与成像的方法。

（4）已成功应用于西安漫威智能科技有限公司的综合管廊内燃气管道巡检【附件 5-3】，实现了综合管廊泄漏智能识别技术、泄漏智能成像技术。

（5）已成功应用于中国铁路上海局集团有限公司南京动车段的高铁受电弓泄漏检测【附件 2-3】，提高了受电弓泄漏故障检测的效率与准确度。

（6）已成功应用于微系统重点实验室的超密集微声阵列【附件 5-4】，提出了超密集微声阵列设计方案，研究了超密集微声阵列的阵型布局优化，开发了基于虚拟子阵的声源空间成像算法。

另外，研究成果还被国家重点新闻网站——“中国网”的创新频道专题报道【附件 6-8】：“.....随着我国工业化进程的不断推进，在众多行业中存在着各类泄漏引起的重大安全事故，如天津港爆炸、江苏响水爆炸等，在给国家财产安全带来巨大损失的同时，对人民生命安全也造成了极大威胁.....由西北工业大学机电学院宁方立教授联合西安电子科技大学韦娟教授带领团队所研发的便携式人工智能超声成像仪提供了突破性的解决方案.....经试验，便携式人工智能超声成像仪现已成功应用于气体管道泄漏，高铁受电弓泄漏检测，以及电气设备放电检测等领域。并得到了南京动车段的高度认可，且已与部分单位就泄漏故障检测问题展开合作研究.....”。

主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用的技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人
1	中国飞机强度研究所	空腔噪声主动控制方法	飞机起落架、内埋弹舱	2016-01-01 至 2019-12-31	燕群
2	中国人民解放军 63672 部队	高速侵彻声学定位技术	高速侵彻弹声学定位系统	2021-11-02 至 2022-11-02	张鑫
3	中国人民解放军 92493 部队计量测试研究所	便携式高频宽带噪声测量成像系统	宽带泄漏声源模拟试验台	2022-02-21 至 2022-06-13	徐孙庆
4	西安漫威智能科技有限公司	超分辨声学成像原理及应用技术	综合管廊智能感知巡检机器人	2019-01-01 至 2022-12-31	张鹏
5	中国铁路上海局集团有限公司南京动车段	便携式人工智能超声成像仪	高铁受电弓	2021-01-01 至 2021-06-30	潘超
6	微系统国防科技重点实验室	超密集微声阵列设计及声源空间定位算法	超密集微声阵列	2020-09-30 至 2022-11-24	郜伟伟

2.应用效益

已在航空重大装备、侵彻弹定位、海洋舰船装备、高铁关键部件、民生重大工程中得到应用，取得了显著社会效益和经济效益，具体应用效果如下：

（1）已应用于中国飞机强度研究所的起落架、内埋弹舱等飞机机体结构噪声源定位中【附件 2-1、2-2】，通过开口射流试验验证了超分辨声学成像压缩感知技术，去除背景噪声干扰，准确定位起落架及内埋弹舱中的主要噪声源位置，为我国民机及军机的低噪声设计提供了良好的技术手段。

（2）已成功应用于西安漫威智能科技有限公司的综合管廊内燃气管道巡检【附件 5-3】，提高了管廊智能感知巡检机器人巡检的实时性、效率、识别率和智能化水平。在保障城镇居民人身安全、防止公共安全事故发生方面能够发挥巨大作用，并具有广阔的应用前景和良好的直接经济效益与间接经济效益，能够发挥巨大的社会价值。

（3）已成功应用于中国铁路上海局集团有限公司南京动车段的高铁受电弓泄漏检测【附件 2-3】，提高了受电弓泄漏故障检测的效率与准确度。

六、主要知识产权证明目录（限 10 条）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家 (地区)	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	基于压缩感知的三维声源定位方法	中国	CN107247251B	2020-04-03	3739138	西北工业大学	宁方立；刘勇；韦娟；张超
2	发明专利	基于无线声传感器网络的 K 均值聚类加权声源定位方法	中国	CN106940439B	2019-05-21	3385421	西安电子科技大学	韦娟；赵满；岳凤丽；计永祥；宁方立；付卫红
3	发明专利	基于卷积神经网络的气体管道泄漏识别方法	中国	CN110185939B	2021-04-02	4338719	西北工业大学；东莞市三航军民融合创新研究院；西安电子科技大学	宁方立；段爽；韩鹏程；韦娟
4	发明专利	无线声传感器网络下压缩气体泄漏的声源方位估计方法	中国	CN106908755B	2019-03-26	3308292	西安电子科技大学	韦娟；王文静；岳凤丽；计永祥；宁方立；付卫红
5	发明专利	基于近似平滑 L0 范数的压缩感知信号重构方法	中国	CN105846826B	2018-11-16	3149263	西安电子科技大学	付卫红；田德艳；李聪；韦娟；黑永强；刘乃安；李晓辉

6	发明专利	基于无线声传感器网络的多节点信息融合声源定位方法	中国	CN106231553B	2019-03-29	3312061	西北工业大学	宁方立；赵满；韦娟；王文静；牛俊儒
7	发明专利	基于单层感知机的欠定盲源分离源信号恢复方法	中国	CN106202756B	2019-06-18	3422293	西安电子科技大学	付卫红；农斌；刘乃安；韦娟；李晓辉；黑永强
8	发明专利	一种可变形空腔装置	中国	CN106864737B	2019-07-05	3443584	西北工业大学	宁方立；刘哲；石旭东；宁舜山；韦娟
9	发明专利	可变形空腔装置	中国	CN105751869B	2018-09-21	3080366	西北工业大学	宁方立；卫金刚；韦娟；石旭东；刘勇
10	发明专利	一种基于声源定位的增强现实系统与方法	中国	CN112285648B	2022-11-01	5548624	西北工业大学	宁方立；盛浩；姚克强

七、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
宁方立	1	无	教授	西北工业大学 机电学院	西北工业大学	<p>1.负责总体规划,设计项目技术路线,建立了完善的研究体系,组建科研团队,指导项目组成员工作,主持国家省部级基金项目,负责科研经费来源等【附件 6-9 至 6-12】,从基础上保证项目的顺利完成。</p> <p>2.深入研究了传声器阵列超分辨声学成像原理,建立了新的数学模型,并利用实验数据验证了原理和技术的正确性和有效性【附件 1-1、1-2、1-3、6-3、6-5 至 6-7】。</p>

韦娟	2	无	教授	西安电子科技大学 通信工程学院	西安电子科技大学	对应主要技术发明所列第(1)、(2)、(4)项科技创新，研究超分辨声学成像，参与建立基于压缩感知联合稀疏重构的噪声源分析理论体系，负责超分辨率声学成像技术为气体泄漏监测难题的解决方案实施，并成功应用于综合管廊内燃气管道巡检，实现了综合管廊泄漏智能识别技术、泄漏智能定位技术，提高了巡检的实时性、效率、识别率和智能化水平。并最终建立完备的噪声源分析系统【附件 1-2、6-1 至 6-6】。
韩鹏程	3	无	工程师	中国飞机强度研究所 航空声学研究室	西北工业大学	对应主要技术发明所列第(2)、(3)项科技创新，主要负责超分辨声学成像非同步测量技术在低信噪比环境下综合燃气管廊泄漏源识别研究，提出了移动传声器阵列定位方法，提高了巡检的实时性、效率、识别率和智能化水平。【附件 1-3】。

付卫红	4	无	教授	西安电子科技大学 通信工程学院	西安电子科技大学	对应主要技术发明所列第(2)项科技创新，研究压缩感知信号重构方法、欠定盲源分离源信号恢复方法，为压缩感知超分辨声学成像技术开发奠定了理论基础。【附件 1-2、6-1、6-2、6-4】。
蒙迪	5	无	无	西北工业大学 机电学院	西北工业大学	对应主要技术发明所列第(2)、(4)项科技创新，研究超分辨原理的气动噪声源分析及测量技术。主要负责超分辨率声学成像技术解决气体泄漏监测问题的硬件搭建工作，以及部分理论建设及算法编写，建立完备的气动噪声源分析系统等。
刘勇	6	无	工程师	中国科学院 西安光学精密机械研究所	西北工业大学	对应主要技术发明所列第(1)、(2)项科技创新，研究压缩感知超分辨声学成像技术，建立完备的气动噪声源分析系统。主要负责传声器阵列搭建，分析平面阵列布局及性能，完成了传声器阵列布局优化，并参与了联合稀疏表达模型以及相应的噪声源定位重构算法【附件 1-1】。

八、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）
西北工业大学	1	<p>西北工业大学作为本项目的总负责和承担单位，自 2014 年以来，承担了国家自然科学基金：基于压缩感知联合稀疏重构的起落架气动噪声源分析研究（51375385）、可变形状的空腔噪声主动控制中驻波产生机理及关键技术研究（51675425）、综合管廊内燃气管道泄漏超声的定位识别机理及关键技术研究（52075441）、空间站舱体泄漏超声成像机理及关键技术研究（52475132）；重点实验室基金：超密集微声阵列设计及声源空间定位算法研究（6142804200405）；战略支援部队某部委托项目：高速侵彻声学定位技术服务（202112080）项目；国家重点研发计划项目：高速精密电驱动减速器关键技术研究（2023YFB3406500）、耐高温干运转齿轮传动关键技术（2024YFB3410300）。解决了关键装备声学成像“测量精度低、测量干扰大、测量频带窄”等技术难题。</p> <p>主要创新工作包括：研究了超分辨声源定位原理，建立了基于稀疏优化架构的超分辨声源定位模型，发明了低信噪比下压缩感知超分辨声学成像技术，发明了基于超分辨声学成像原理的空腔气动噪声源主动控制方法。形成了涵盖不同规模的声学成像仪器，为我国航空重大装备、侵彻弹定位、海洋舰船装备、高铁关键部件、民生重大工程提供关键装备。</p>

西安电子科技大学	2	<p>西安电子科技大学是中央部属高校，是中国最早的国防工业重点军事院校。西安电子科技大学作为第 2 完成单位，与第 1 完成单位共同承担了国家自然科学基金：基于压缩感知联合稀疏重构的起落架气动噪声源分析研究（51375385）、空间站舱体泄漏超声成像机理及关键技术研究（52475132）等项目，解决了压缩感知超分辨声学成像理论及技术难题。</p> <p>主要创新工作包括：研究超分辨声学成像，参与建立基于压缩感知联合稀疏重构的噪声源分析理论体系；研究压缩感知信号重构方法及欠定盲源分离源信号恢复方法，为超分辨声学成像技术开发奠定了理论基础；参与建立气体泄漏监测难题的解决方案实施，建立完备的噪声源分析系统，实现了综合管廊泄漏智能识别技术、泄漏智能定位技术，提高了巡检的实时性、效率、识别率和智能化水平。</p>
	3	

九、完成人合作关系说明

在本项目中，我作为第一完成人，与项目团队成员紧密合作，共同应对了多项技术挑战，成功完成了本项目的各项技术发明。我与第二完成人西安电子科技大学韦娟教授长期合作致力于压缩感知超分辨声学成像技术研究，共同发明了本项目中低信噪比下压缩感知超分辨声学成像关键技术。项目第三完成人韩鹏程在我的课题组获得硕士学位，毕业后一直在中国飞机强度研究所航空声学研究室工作，韩鹏程的主要研究方向为本项目中综合燃气管廊泄漏源识别方法研究。我与第四完成人西安电子科技大学付卫红教授长期合作致力于压缩感知超分辨声学成像技术研究，共同发明了本项目中低信噪比下压缩感知超分辨声学成像关键技术。项目第五完成人蒙迪在我的课题组获得硕士学位，毕业后继续在我的课题组攻读博士学位，蒙迪的研究方向为本项目中超分辨率声学成像仪器研制及应用用于气体泄漏监测的研究工作；项目第六完成人刘勇在我的课题组获得硕士学位，毕业后一直在中国科学院西安光学精密机械研究所工作，刘勇的主要研究方向为本项目中基于压缩感知的超分辨声学成像算法。