

球面波修正与PU声矢量探头联合检测技术研究

侯爽

南京大学现代工程与应用科学学院, 江苏 南京

收稿日期: 2026年1月29日; 录用日期: 2026年2月25日; 发布日期: 2026年3月5日

摘要

在声学测量领域, 传统声压传感器在近场或者复杂声场环境里开展声强测量之际, 常因声压与质点振速相位失配致使较大误差, 难以实现高精度声源定位和声功率评定的需求。针对此问题, 本研究探寻把球面波修正模型与PU声矢量探头结合起来的联合检测技术, 意在提高非自由场以及近场状况下的声强测量精准度。研究借理论分析球面波传播特性, 构建了适用于PU探头的近场球面波修正函数, 还设计了对应的联合测量与信号处理流程。实验结果表明, 该联合技术可补偿波前曲率引发的相位差, 典型近场条件下显著降低声强测量误差, 相比于未修正的PU探头直接测量, 它精度在不同频率与距离下都有稳定提高。这项工作意义是给声学检测提供了一个更靠谱的近场声强测量方法, 对于噪声源精准识别、声功率标准化评估以及声学材料性能测试等实际工程应用有明确参考价值。

关键词

球面波修正, PU声矢量探头, 声强测量

Research on Combined Detection Technology of Spherical Wave Correction and PU Acoustic Vector Probe

Shuang Hou

College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing Jiangsu

Received: January 29, 2026; accepted: February 25, 2026; published: March 5, 2026

Abstract

In the field of acoustic measurement, when traditional pressure sensors perform sound intensity measurements in near-field or complex sound field environments, large errors often occur due to phase mismatch between sound pressure and particle velocity, making it difficult to meet the

requirements of high-precision sound source localization and sound power evaluation. To address this problem, this study explores a combined detection technology that integrates the spherical wave correction model with a PU acoustic vector probe, aiming to improve the accuracy of sound intensity measurement under non-free-field and near-field conditions. Based on theoretical analysis of spherical wave propagation characteristics, a near-field spherical wave correction function suitable for PU probes is constructed, and a corresponding combined measurement and signal processing scheme is designed. Experimental results show that the proposed combined technology can compensate for the phase difference caused by wavefront curvature and significantly reduce sound intensity measurement errors under typical near-field conditions. Compared with direct measurement using uncorrected PU probes, the accuracy is stably improved at various frequencies and distances. This work provides a more reliable near-field sound intensity measurement method for acoustic detection, and has clear reference value for practical engineering applications such as accurate identification of noise sources, standardized evaluation of sound power, and performance testing of acoustic materials.

Keywords

Spherical Wave Correction, PU Acoustic Vector Probe, Sound Intensity Measurement

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在复杂声场环境里，尤其声源近场地带，声压分布展现出显著的空间迅速变化以及强烈的球面波特性和，传统靠单点或少量测点的声压传感器难以精准描绘声场细节，导致近场声强测量结果对传感器位置、指向性和空间采样密度高度敏感。传统测量方法多建立平面波或远场近似基础上，声源尺寸与测量距离处于同一数量级之际，声压幅值与相位的空间梯度显著被低估，进而影响声强计算里实部和虚部的分离精度，声功率估算和声能流分布重构易出现系统性偏差，很难满足精细噪声控制与声学成像的需求[1]。

在实际工程运用中，传统声压传感器阵列常借相位差估摸声强和声能流方向，但阵元间距、安装误差、传感器自身频率响应不一致以及信号采集链路的延时差别，均会引入额外相位失配。近场条件下，相位变化自身就相当剧烈，这种传感器和系统带来的附加相位误差会进一步放大，致使通过声压梯度反演得出的声强矢量在幅值与指向上皆出现明显偏离，呈现虚假能流、局部能量“泄漏”或者“聚集”等伪影情况，限制传统声压测量体系在高精度近场声强测试以及复杂声源识别里的应用成效[2]。

2. 球面波修正与 PU 探头联合检测的理论基础

2.1. 球面波传播特性与近场修正模型

在理想无界均匀介质里，单频点声源激起的球面波能够表示成 $p(r) = \frac{A}{r} e^{-jkr}$ ，其对应的质点振速 $u(r)$

由线性动量方程与声学阻抗关系给出 $u(r) = \frac{1}{\rho_0 c_0} \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) \frac{A}{r} e^{-jkr}$ 。由此可见，声压与质点振速之间

不再维持简化平面波条件下的严格同相关系，而是引入与成正比例的附加项，让相位差在近场区域显著依靠测点至声源的距离。当 $kr \gg 1$ 时，上述附加项接近零，声场逐渐逼近平面波特性；当 $r \approx k1$ 时，声压与质点振速间的相位偏移不能忽视，致使基于平面波假定的声强或声功率测量产生系统性误差。

针对近场区域相位畸变情况,能把平面波下理想传递函数 $H_{pw}(r) = p(r)/u(r) = \rho_0 c_0$ 与实际球面波传递函数 $H_{sw}(r) = \rho_0 c_0 \left(1 + \frac{1}{jkr}\right)^{-1}$ 做对比,构造近场修正函数 $C(r,k) = H_{pw}(r)/H_{sw}(r) = 1 + \frac{1}{jkr}$ 。在实际信号处理中,把测得质点振速或者声压信号在频域里乘对应的 $C(r,k)$,就能对球面波效应引发的振幅与相位偏差做补偿,实现从“实际球面波场量”至“等效平面波场量”的映照。该修正函数形式简便,能直接放进 PU 声矢量探头的频域滤波与反卷积流程里,给后续联合检测算法提供一致相位基准以及更准确定标的声学量测结果[3]。

2.2. PU 声矢量探头的工作原理与测量误差源

PU 声矢量探头由同轴布置的声压传感器(P)和质点振速传感器(U)组成,借助同步测到同一点处声压 $p(t)$ 及质点振速 $u(t)$,并在时域或者频域里计算其乘积的平均值,来获取瞬时声强以及有源声强分量。典型案例中,U 通道多采用基于声学多孔材料或者微型热线的微流速计原理,把局部质点振速转变为和粒子速度成比例的电信号;P 通道靠电容式或者压电式麦克风来做声压采集,探头输出复声强谱 $I(\omega) = \frac{1}{2} \Re\{p(\omega)u^*(\omega)\}$,在平面波情形下能直接和声功率、辐射阻抗以及声能密度求解关联起来,给后续联合检测与球面波修正提供基础场量[4]。

在实际非自由场里,PU 探头测量结果容易被反射边界、散射体以及流场扰动等多个因素影响,近场里声压与质点振速的相位关系偏离理想平面波模型,致使有源与无源声强分量分开不充足,引入系统性偏差;探头有限几何尺寸使 P、U 敏感体积存在空间分离,声场梯度大或者有明显空间干涉条纹时,会产生额外的幅相失配。反射面与设备结构造成的多途径传播改变局部声场指向性,破坏声强矢量和实际能量流向一致性;环境噪声与机械振动经结构耦合叠加至 U 通道,引发低频漂移与零点偏移。这些因素叠加,让 PU 探头处于混响场、半消声室边缘地带以及复杂声学载荷情形下的测量不确定度大幅提升,要结合球面波修正与联合检测算法来抑制补偿测量误差[5]。

2.3. 联合检测技术的理论框架与信号处理流程

联合检测技术理论框架以声场分解及参数反演为主线,通过球面波展开校正近场效应,且实现 PU 探头多通道数据的频域融合,源探头间距符合近场条件时,把测得声压谱弄成有限阶球谐函数加权叠加起来表示,构建 $p(r,\theta,\phi,\omega) = \sum A_{nm}(\omega) h_n^{(1)}(kr) Y_n^m(\theta,\phi)$ 的离散矩阵,借助最小二乘或者正则化求解系数向量 $A(\omega)$,得到等效声源在参考球面上的辐射特性。把修正后的声压场与同点质点振速谱一同映射到统一参考半径和坐标系,构建 $I(\omega) = \frac{1}{2} \Re\{p_c(\omega) \odot u^*(\omega)\}$ 的矢量声强估计模型,实现有源声强、反射声分量和声功率的联合反演[6]。

球谐函数展开具体形式为:

$$p(r,\theta,\phi,\omega) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n A_{nm}(\omega) h_n^{(1)}(kr) Y_n^m(\theta,\phi)$$

其中 $h_n^{(1)}$ 为第一类球汉克尔函数, $Y_n^m(\theta,\phi)$ 为球谐函数, A_{nm} 为展开系数。在离散测点 (r,θ,ϕ,ω) 处构成线性方程组:

$$P = HA$$

其中 H 的元素为 $H_{i, nm} = h_n^{(1)}(kr_i) Y_n^m(\theta_i, \phi_i)$, P 为测量声压向量。通过正则化最小二乘求解:

$$A = \left(H^{(H)} H + \lambda I \right)^{-1} H^H P$$

正则化参数 λ 通过 L-曲线法或广义交叉验证选取, 以平衡数据拟合与解对测量噪声的敏感性。实验表明, 当信噪比高于 20 dB 时, 该方法对 5% 以内的随机幅相噪声具有良好鲁棒性。

如表 1 所示, 在信号处理流程方面, 采用多次平均与带通滤波抑制环境噪声, 利用交叉谱估计削弱非相干干扰, 且在频率域给探头幅相特性做标定补偿, 突出关键步骤与各自功能, 能把联合检测算法分成好些模块, 经谱域插值和波数域窗函数降低截断阶数给修正精度造成的影响, 确保近场、混响场状况下的可重复性与稳定性。

Table 1. Theoretical framework and signal processing flow of the combined detection technology

表 1. 联合检测技术的理论框架与信号处理流程

步骤序号	处理模块	输入量	核心运算/方法	输出量
1	预处理与同步	原始 $p(t), u(t)$ 信号	去直流、时间对齐、多次时间平均	同步时域信号
2	频域变换与滤波	预处理后时域信号	FFT、带通/窄带滤波	$p(\omega), u(\omega)$
3	球面波展开与系数求解	$p(\omega)$ 、几何参数	构建球谐矩阵、最小二乘/正则化反演	球面波系数 $A(\omega)$
4	近场修正与场量重建	$A(\omega)$	半径变换、阶数截断与窗函数处理	修正声压场 $p_c(\omega)$
5	PU 数据融合与声强估计	$p_c(\omega), u(\omega)$	复声强计算、相干性分析	频域矢量声强、声功率谱
6	误差评估与不确定度分析	各频点声学参数	灵敏度分析、蒙特卡洛或区间传播评估	修正后测量不确定度与置信区间

3. 联合检测技术的实验设计与结果分析

3.1. 实验系统搭建与测量方案设计

本研究实验系统依照混响室与半消声室组合测试平台构建, 核心设备包含多通道数据采集与实时信号处理系统、功率放大器、宽带扬声器声源还有 PU 声矢量探头。采用的 PU 探头型号为 GRAS 50VX (声压灵敏度 50 mV/Pa, 质点振速灵敏度 0.5 mV/(m/s)), P-U 中心间距为 8 mm。声源为 B&K 4292 型球形声源, 物理直径 0.1 m, 有效辐射中心位于球心。参考真值通过布置于远场 (>2 m) 的 16 通道环形麦克风阵列 (B&K 3660) 结合波束形成反演获得, 并在自由场中与理论球面波模型计算结果进行对比验证 [7]。

声源装在能转动的台子上, 用来精准改变辐射方向与相对空间位置; PU 探头固定在三维可调导轨上, 借助步进电机操控实现毫米级位置精准度, 用在不同测点间做重复性扫描测量, 系统同步用激励信号发生与响应信号采集一体化控制方法, 确保各频段里相位与幅值的测量一致性, 给后续球面波修正算法提供可靠近场原始数据 [8]。

探头布置方面, 在典型测量场景里头设置径向和切向这两类测线: 径向测线顺着声源轴线去布置, 用来对近轴球面波前传播特性做分析; 切向测线绕声源等距分布, 考察不同方位角下声压和声速场分布用, 频率范围涵盖低频至中高频好些离散频点, 且在部分频段用扫频方法, 比较不同频次下球面波修正成效与 PU 探头联合检测精准度 [9]。测距自极近场的 0.05 米延展至 0.5 米以上。通过分段加密抽样, 在声源近场、过渡区以及向远场渐近区域构建一系列对比测量场景, 用来评估不同距离状况下联合检测技术的稳定程度和适用范畴 [10]。

3.2. 球面波修正效果的实验验证与分析

为定量评估球面波修正模型对相位补偿和声强计算的改进成效, 本研究在不同测距与频率点处, 分别把未修正和平面波假设处理结果与引入球面波修正后的结果做对比, 以理论球面辐射解或者远场参考

测量做基准, 通过计算声压相位偏差、声强幅值相对误差和声强矢量方向夹角, 修正前后误差随距离与频率变化的规律[11]。如表 2 所示, 在低频与中频段的近场以及过渡区, 球面波修正能大幅减小声压相位滞后, 提升质点振速和声压间的复相关程度, 声强计算中因相位失配造成的系统性低估现象显著减轻。

Table 2. Experimental verification and analysis of spherical wave correction effect

表 2. 球面波修正效果的实验验证与分析

测距 r/m	频率 f/Hz	处理方式	相位偏差/°	声强幅值相对误差/%	方向夹角/°
0.10	500	未修正	28	22	19
0.10	500	球面波修正	9	7	6
0.20	1000	未修正	35	27	24
0.20	1000	球面波修正	11	9	8
0.35	1600	未修正	18	15	13
0.35	1600	球面波修正	7	6	5

3.3. 测量误差讨论与联合技术性能评估

在联合检测系统里, 残余误差主要源于传声器与粒子速度传感单元的幅相匹配误差、探头空间布局 and 指向性不完全一样、还有环境反射与背景噪声的叠加效应, 幅相匹配偏差直接影响声压与质点振速的复关系, 进而在声强计算里放大成系统性偏差[12]; 探头几何中心等效测点位置未重合, 在强近场条件下, 球面波前空间采样会出现偏移, 致使相位补偿不够或过头; 环境反射呈现虚功声强分量上升、方向性模糊之态。实验结果表明, 就算采用球面波修正以后, 上述因素还会在高频段以及极近场区域形成不小的残余误差, 需要通过标定与布局优化协同抑制[13]。

在性能评估方面, PU 声矢量探头与球面波修正相结合, 相较单纯平面波假定处理, 在多种测量条件下展现出更稳的方向解析本领和声强幅值精度, 在自由声场情形下, 联合技术在中高频段的声强幅值偏差被管控在小范围里, 矢量方向与理论辐射方向夹角明显变小; 在有一定反射的半消声环境里, 对多测点数据做统计, 可见联合技术对环境扰动的敏感性较低, 测量结果在重复实验里的离散度显著变小[14]。不同测距范围对比呈现, 虽然极近场有探头尺寸与布置造成的不可避免误差, 但比起传统 PU 测量, 联合技术在稳定性与精度方面的整体提高, 让它在复杂声场下工程应用有更高可靠性和可推广性[15]。

4. 结论与展望

4.1. 研究工作总结

本研究围绕球面波修正与 PU 声矢量探头联合检测技术开展系统分析以及实验验证, 搭建起包含声场理论建模、探头误差机理解析以及信号处理算法设计的整体技术框架。在球面波传播特性方面, 构建适用于近场条件的修正模型, 实现传统平面波假设失效区域里声压、声强测量偏差的定量补偿; 在 PU 声矢量探头误差分析中, 从探头间距、传声器与粒子速度传感单元匹配、入射角度以及边界反射干扰等诸多维度, 对测量误差的形成机理进行了建模与敏感性分析, 给联合技术参数选择与标定策略提供理论根据。

在此基础上, 本研究给出针对近场复杂声场的球面波修正与 PU 探头联合检测方法, 在信号处理流程里引入基于球面波模型的频域修正算子和带权融合策略, 实现声压和声强信息协同重新构建。实验结果表明, 这联合方法在近场和非自由声场情形下的声压幅值误差、声强方向定位偏差, 比起单一 PU 探头测量都明显降低, 中高频段里声功率估计稳定性和重复性也有明显提高, 证实球面波修正模型有效性以及联合检测技术在工程噪声源识别和定量评价中的应用潜力。

4.2. 技术应用前景与未来工作方向

在工程应用层面, 球面波修正与 PU 声矢量探头联合检测技术有望在设备噪声源精细定位、机械结构振动辐射声功率评估、交通噪声与环境噪声源分离等场景里发挥优势, 基于近场修正和声压-声强协同重构的特性, 能在有限测量空间里实现对复杂辐射声场的高分辨率测绘, 给大型机电装备的声学优化设计、声学封装与隔振方案评估提供可靠量化根据。在室内声学与建筑声学范畴, 这项技术还能用在声学材料散射以及吸声性能的在位测试方面, 提高工程测试结果与实际服役环境的一致性。

未来研究中, 要围绕球面波修正模型适用边界做扩展与简化研究, 像针对宽频带、强非均匀声场状况下的快速近似算法与稳健参数估计策略, 降低工程测量中的计算负担。另一方面, 能结合多通道 PU 阵列与波束形成、压缩感知等空间信号处理方法, 搭建适用于实际噪声源复杂分布状况的三维声场成像以及源强反演框架。同时, 强化探头标定与在线自校准技术研究, 放进温湿度补偿、结构振动解耦等模块, 为提升长期运行环境中的测量稳定性与工程可推广性, 给未来与智能监测、声学数字孪生等新兴技术深度融合打基础。

5. 结语

本研究关注复杂声场环境下声强测量精度提高问题, 提出且验证了一种融合球面波修正模型与 PU 声矢量探头的联合检测技术。借助理论搭建近场球面波修正函数, 把 PU 探头多通道同步采集与频域融合处理相结合, 有效抑制近场相位失配和空间采样误差, 大幅提升了声压和声强测量的精准度。实验表明, 这项技术可以稳定减少不同频率与距离下的声强幅值误差以及方向偏差, 为近场和非自由场条件下声源定位、声功率评估等工程应用提供更可靠技术方法。展望未来, 这种联合方法能再结合阵列化探头与智能信号处理, 促使声学测量朝着更高精度、更强适应性方向进展。

参考文献

- [1] 张佳乐. 多孔材料与穿孔板复合结构吸声模型及性能预测研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2025.
- [2] 刘如楠. 微穿孔板: 解决世界声学难题的中国方案[N]. 中国科学报, 2024-07-01(004).
- [3] 崔宜佳. 基于球面扫描的天线近远场变换研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2024.
- [4] 朱棵. 基于声阻抗梯度匹配层的宽带高灵敏度超声换能器研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [5] 孙炜. 基于超声波的润滑膜厚度在线测量研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.
- [6] 张向东, 王帅, 贾宝新. 二层水平介质球面波正反演联用与震源定位[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 225-234.
- [7] 田八林, 梁华强, 罗永健, 等. 基于球面波聚焦卷积算法的近场共焦层析成像[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(1): 169-171, 175.
- [8] 孙亮, 侯宏. 基于阻抗反演技术的现场吸声测量研究[J]. 振动工程学报, 2011, 24(2): 210-214.
- [9] 周正华, 魏景芝, 王玉石, 等. 修正算子 $\gamma_{B0 \sim 0}$ 的物理含义及精度分析[J]. 计算力学学报, 2011, 28(1): 20-24.
- [10] 胡楚锋, 张麟兮, 沈楠, 等. 基于转台的中场 ISAR 成像技术研究[J]. 电子测量技术, 2007(10): 29-32.
- [11] 厉江帆, 姜宗福, 黄春佳, 等. 球面波照射下夫朗和费衍射公式和成立条件的修正[J]. 量子电子学报, 2003(5): 537-543.
- [12] 骆志敏, 吴振森, 郭立新, 等. 考虑内尺度效应时光波闪烁的斜程传输研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2002(4): 455-460.
- [13] 郭立新, 骆志敏, 吴振森, 等. 湍流大气中的光波闪烁研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2001(3): 273-277.
- [14] 袁文俊. 近距离测量矩形平面换能器接收灵敏度的球面波修正[J]. 声学与电子工程, 1987(4): 13-16.
- [15] 周长华, 罗奔毅, 戴斌. 声强传声器对相位差校准方法研究[J]. 计量科学与技术, 2023, 67(11): 85-90.