

超声声场激光层析成像及其扫描参数优化研究

张小丽¹, 何程昊^{1,2}, 冯秀娟¹, 张慧², 牛锋¹, 何龙标^{1*}¹中国计量科学研究院力学与声学计量科学研究所, 北京 100029;²天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

摘要 空气耦合(简称“空耦”)超声换能器具有非接触检测、适合复杂工况和原位检测等独特优势,已被广泛应用于超声无损检测等领域。声场重建对于开展空耦超声换能器声束宽度、扩散角等声场特性参数的表征,进而保障超声检测系统的横向分辨率及定位精度具有重要意义。笔者基于声光效应和层析成像技术对 50~200 kHz 空耦超声换能器的声场重建开展研究。超声声场的重建质量与空间分辨率密切相关,但高空间分辨率会导致扫描时间呈几何倍数增长。笔者从仿真和实验的角度对声场空间分辨率(即声场扫描参数)进行优化,在保证声场重建图像质量的前提下将扫描效率提高了 2~4 倍。同时,将优化后的声场重建结果与传声器在相同位置处的声场直接测量结果进行比较,验证了声光效应层析成像进行超声声场重建的可靠性。

关键词 测量; 层析成像处理; 声光效应; 激光测振仪; 声场表征; 扫描效率

中图分类号 O426.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230926

1 引言

声光效应是光与介质中声波的相互作用。该效应在光学领域的应用较为广泛,如利用声光衍射^[1]实现对激光束方向的控制和强度的调制,但声光效应在声学领域的应用^[2]还有待发掘。空气耦合(以下简称“空耦”)超声换能器是以空气作为耦合介质的超声探头,具有非接触检测、适合复杂工况和原位检测等独特优势^[3-4]。随着空耦理论、换能器材料及结构工艺的突破,空耦超声换能器已被广泛应用于超声测距、雷达、流量计、无损检测等领域^[5]。

空耦超声换能器的声场特性参数,如声束宽度和扩散角,对于超声系统的横向分辨力、抗干扰能力和定位精准度等技术指标的实现具有重要意义^[6]。数值法可以指导声场参数的设计,但仍须通过实验验证^[7]。脉冲回波法、互易法和比较法可以得到换能器的灵敏度和频率响应等,但无法表征声束宽度和扩散角等参数^[8-10]。传声器法和激光法通过声场扫描得到声场分布图像,能够直观全面地表征换能器的声场特性参数,其中:传声器法具有检测声场灵敏度高、稳定性好等特点,但现有的空气声声压基准仅覆盖至 50 kHz,在 50 kHz 以上传声器量值溯源问题尚未得到解决,而且传声器自身的尺寸也限制了声场重建的分辨力^[11];基于声光效应的激光法具有窄激光光束、高空间分辨力、宽频带范围、高灵敏度和声场非侵入等优点^[12],是一种

较为理想的方法。

1993 年, Jia 等^[13]通过马赫-曾德尔光学外差干涉仪成功测量了激光传输路径上光相位的变化,以光学法实现了声场可视化。2000 年, Bou 等^[14]将光学外差干涉仪和层析成像技术用于测量空气中静电换能器的辐射声场,成功重建了脉冲和连续工作模式下换能器的辐射声场。 Nakamura^[15]将激光多普勒测振仪(LDV)引入空气声声压测量,通过 LDV 测量声光效应,进而实现了声压测量。 Torras-Rosell 等^[16]基于声光效应研究了可听声频率范围内矩形管道和消声室内单极子声源的声场模型,并用 LDV 进行了声场测量。 Oikawa 等^[17]以及 Torras-Rosell 和 Fernandez-Grande 等^[18-19]基于声光效应和层析成像技术开展了三维声场重建或声全息等研究。

目前,研究人员主要针对可听声频段进行声光效应层析成像的声场测量。与可听声频段相比,超声换能器的声波长进一步减小。实现最佳空间分辨率和成像质量是声场重建的关键。一般通过缩短平移和旋转的步进间距得到更多声压路径积分数据来提高成像质量,但这样会降低扫描效率^[20]。因此,笔者以 50~200 kHz 空耦超声换能器的声场分布为研究对象,对声场扫描参数进行优化^[21],以期在保证声场图像重建质量的前提下提高扫描效率。首先建立仿真模型,模拟不同声场扫描参数下的重建效果,得到优化的扫描参数;然后利用 LDV 实验得到声压对路径的积分,并采用层析成

收稿日期: 2023-06-19; 修回日期: 2023-07-16; 录用日期: 2023-08-04; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 中国计量科学研究院基本科研业务费(AKYZZ2210)、国家自然科学基金(51575502)、天津市自然科学基金(22JCZDJC00140)

通信作者: *helb@nim.ac.cn

像技术^[22]的经典重建算法即滤波反投影(FBP)算法实现空耦换能器垂直于声轴方向的声场重建,对仿真结果进行验证;最后,将优化后的声场重建结果与传声器法的声场测量结果进行比较,验证了声光效应层析成像进行超声声场重建的可靠性。

2 基于声光效应的声场重建原理

2.1 层析成像声场重建原理

层析成像复现声压场的理论依据是中心切片定理,即声场函数 $p(x, y, t)$ 在某一方向上的投影函数 $r_p(x', \theta, t)$ 的一维傅里叶变换函数是原声场函数 $p(x, y, t)$ 的二维傅里叶变换函数在相应平面上沿同一方向且过原点的直线上的值。如果在不同角度下得到足够多的投影函数数据,并进行傅里叶变换,得到频域函数的全部值后,将其进行二维傅里叶逆变换,就能得到原始声场函数 $p(x, y, t)$ 的图像。

2.2 Radon 变换和逆变换

如图 1 所示,声场函数 $p(x, y, t)$ 与投影函数 $r_p(x', \theta, t)$ 之间的积分映射关系可以用 Radon 变换来描述,即

$$r_p(x', \theta, t) = \int p(x, y, t) dy'. \quad (1)$$

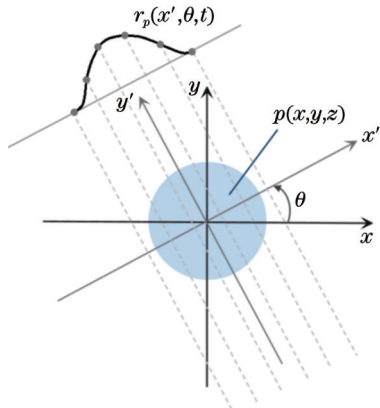


图 1 声场投影示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sound field projection

Radon 逆变换在数学上实际是一个二维傅里叶逆变换,但由于二维傅里叶逆变换计算量大、耗时长,因此,计算机对于 Radon 逆变换的具体实现方法主要为反投影法。反投影法可分为直接反投影法和滤波反投影法。笔者采用层析成像技术的经典重建算法——基于 Radon 变换的滤波反投影算法实现声场重建^[23]。

2.3 基于声光效应层析成像的声场重建

声光效应是光与介质中的声波相互作用时发生的一种现象。声场中的声压波动会导致传输介质的密度发生变化,进而导致介质的折射率发生变化。当利用 LDV 发出一束穿透声场的激光时,介质折射率的变化会导致光相位、光程等发生变化,通过检测光相位的变化即可得到相应的声场信息。

本文基于声光效应和层析成像实现二维声场分布的扫描成像。下面首先推导光相位和声压之间的关系。

声压与空气折射率 n 之间的关系^[24]为

$$n(t) \approx n_0 + \frac{n_0 - 1}{\gamma P_0} p(t), \quad (2)$$

光相位和空气折射率之间的关系为

$$\phi(t) = \int_L k_0 n(l, t) dl, \quad (3)$$

因此,光相位 $\phi(t)$ 与声压之间的关系^[25]为

$$\phi(t) = k_0 n_0 L_0 + k_0 \frac{n_0 - 1}{\gamma P_0} \int_L p(x, y, t) dl, \quad (4)$$

式中: γ 为比热容比; P_0 和 n_0 分别是空气的静态压强和静态折射率; k_0 为光波在真空中的波数, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$; L 为光波的传输路径; L_0 为传输路径的物理长度。 $k_0 n_0 L_0$ 项是在没有声场时光相位的偏移量,取决于光在介质中的路径长度 L_0 , 可以看作是静态偏移量; $k_0 \frac{n_0 - 1}{\gamma P_0} \int_L p(x, y, t) dl$ 项为光相位随声场变化的部分,称为动态偏移量。

可以进一步得到 LDV 输出的等效速度 $v(t)$,

$$v(t) = \frac{1}{k_0 n_0} \frac{d\phi(t)}{dt}, \quad (5)$$

将式(4)代入式(5),由于测量过程中反射镜固定,即 $dL_0/dt = 0$, 因此可得到

$$v(t) = \frac{n_0 - 1}{\gamma P_0 n_0} \int_L \frac{dp(x, y, t)}{dt} dl. \quad (6)$$

在频域上对式(6)两边作傅里叶变换,得

$$V(\omega) = \frac{n_0 - 1}{\gamma P_0 n_0} \int_L j\omega p(x, y, \omega) dl = j\omega \frac{n_0 - 1}{\gamma P_0 n_0} r_p(x', \theta, \omega), \quad (7)$$

式中: $V(\omega)$ 为振动速度; $r_p(x', \theta, \omega)$ 为声场 $p(x, y, \omega)$ 沿 L 方向的投影积分。

对比式(7)和式(1)可知,声场的 Radon 变换为激光测振仪测得的振动速度。已知振动速度 $V(\omega)$, 可由 Radon 逆变换即滤波反投影算法计算得到声场的声压分布 $p(x, y, \omega)$, 即

$$p(x, y, \omega) = R^{-1}[r_p(x', \theta, \omega)] = \frac{\gamma P_0 n_0}{j\omega(n_0 - 1)} R^{-1}[V(\omega)]. \quad (8)$$

对 $p(x, y, \omega)$ 进行傅里叶逆变换求出时域声压 $p(x, y, t)$, 就可实现声场重建。

3 声场扫描参数的仿真分析

当观测点位于换能器远场时声束呈现较好的一致性,因此通常采用远场的径向声压分布来表征换能器的声束扩散特性。根据瑞利积分,超声换能器在空间任意位置点处的声压是换能器上各点源辐射在该点处

声压的叠加。声波在空气中的衰减系数与声波频率的二次方成正比,在计算空耦合换能器的辐射声场时将该

衰减因素考虑在内,可推导出圆形换能器远场点所在径向平面的声压分布^[26]为

$$P(r, \theta, \alpha) = \frac{kc_0\rho_0u_0\pi a^2}{2\pi r} \sqrt{\frac{4J_1^2(\kappa) + [J_0(\kappa) - J_2(\kappa)]^2\chi^2}{\kappa^2 + \chi^2}} \exp[-\alpha(\omega)r], \quad (9)$$

式中: ρ_0 为介质密度,取 1.21 g/cm^3 ; c_0 为介质声速,取 343 m/s ; k 为波数且 $k = \omega/c_0 = 2\pi f/c_0$,其中 ω 为角频率, f 为频率; a 为换能器辐射面半径; u_0 为换能器表面质点的法向速度分布; r 为换能器中心到远场点的距离; J_n 为 n 阶贝塞尔函数; $\alpha(\omega) = \alpha_0\omega^2$ 为衰减参数,其中 α_0 为空气衰减常数,取 $1.59 \text{ dB}/(\text{cm}\cdot\text{MHz}^2)$; $\kappa = k\text{asin}(\theta)$; $\chi = \alpha(\omega)\text{asin}(\theta)$ 。

采用 MATLAB 平台编写程序建立仿真模型,换能器在坐标原点处,测量面处于声轴法线上且平行于换能器的辐射面。根据所选超声换能器,声源频率分别设置为 86、100、200 kHz,辐射面半径对应设置为 1.25、1.25、1 cm。在考虑衰减的情况下,仿真得到三种换能器的近场长度依次为 3.7、4.2、7.7 cm,如图 2 所示。

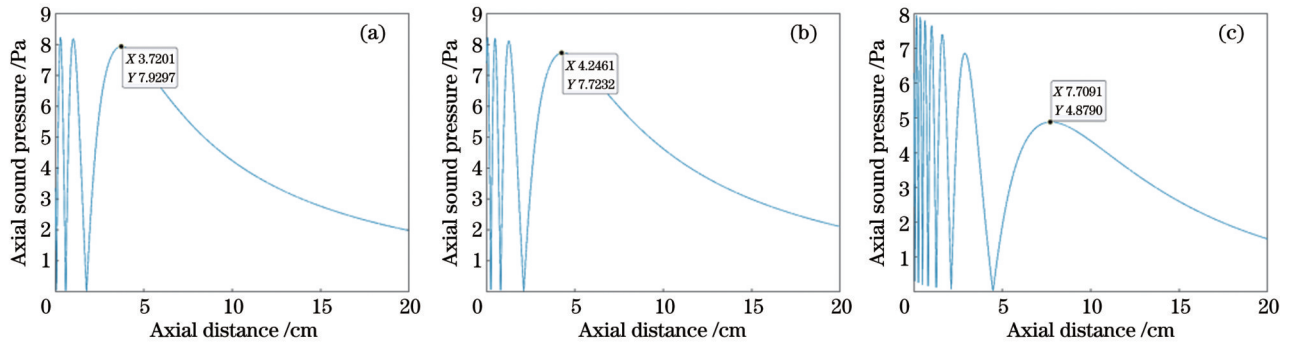


图 2 三种换能器的近场长度仿真结果。(a) 86 kHz; (b) 100 kHz; (c) 200 kHz

Fig. 2 Simulation results of near-field length for three transducers. (a) 86 kHz; (b) 100 kHz; (c) 200 kHz

由上述分析可知,宜将测量面设置在换能器远场,本文分别选取远场距离为 4、7、10 cm。根据式(9)对圆形空

耦超声换能器辐射的声场分布进行仿真,得到了三种换能器在相应远场距离处的径向声场分布,如图 3 所示。

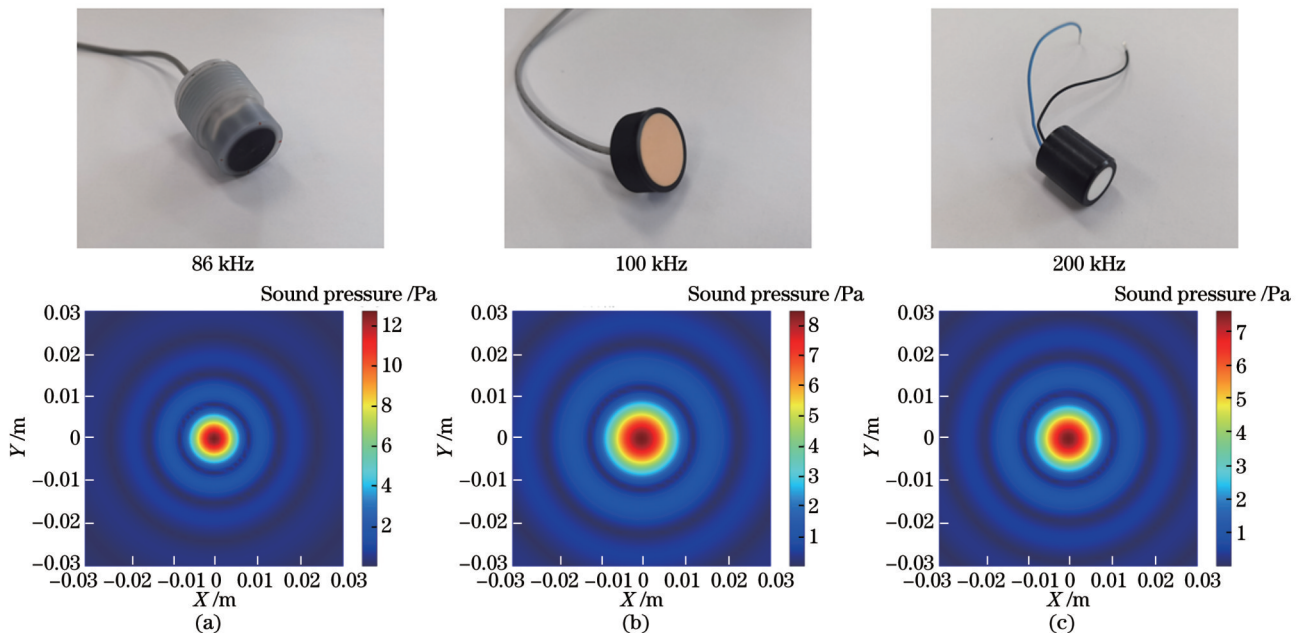


图 3 三种换能器在对应远场处径向声场分布的仿真结果。(a) 86 kHz 换能器在 4 cm 处; (b) 100 kHz 换能器在 7 cm 处; (c) 200 kHz 换能器在 10 cm 处

Fig. 3 Simulation of radial sound field distribution for three transducers at corresponding far-field positions. (a) 86 kHz transducer at 4 cm; (b) 100 kHz transducer at 7 cm; (c) 200 kHz transducer at 10 cm

根据激光干涉法测量原理,声场重建分辨率受激光光束直径的限制,当扫描空间分辨率大于光束直径

时,激光将无法被看作是理想的线性光束。本实验所采用的平移台为北京北光世纪仪器有限公司的

MTS302,其机械步进精度为 $0.32\ \mu\text{m}$,精度较高。所采用 LDV 的激光光束直径为 $50\ \mu\text{m}$,因此需要扫描步进间距大于 $50\ \mu\text{m}$ 。此外,为保证声场的重建效果,一般要求步进间距小于声波波长的 $1/2$ 。随着频率增大,需要综合考虑扫描效率和扫描精度,故而对步进间距的要求有所降低。对于 $50\sim 200\ \text{kHz}$ 换能器,其在空气中的 $1/2$ 声波波长为 $0.8\sim 3.1\ \text{mm}$ 。综合考虑上述各因素,将平移步进间距 Δx 依次设置为 $1, 2, 3, 4\ \text{mm}$;在每种平移步进间距下,将旋转步进间距 $\Delta\theta$ 分别设置

为 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ 和 20° ;声场重建区域是以换能器声轴为中心的 $6\ \text{cm}\times 6\ \text{cm}$ 的平面,扫描角度范围为 $0^\circ\sim 180^\circ$ 。

根据设定的扫描分辨率,基于 MATLAB 平台编写程序,对仿真出的声场进行 Radon 变换,得到声压对路径积分的空间分布数据;并利用 FBP 算法重建声场,同时用不同的指标评价重建性能。图 4 是利用 FBP 算法使用 Hamming 滤波算子对 $100\ \text{kHz}$ 换能器声场的模拟重建结果。 $86\ \text{kHz}$ 和 $200\ \text{kHz}$ 换能器声场的仿真结果与之类似。

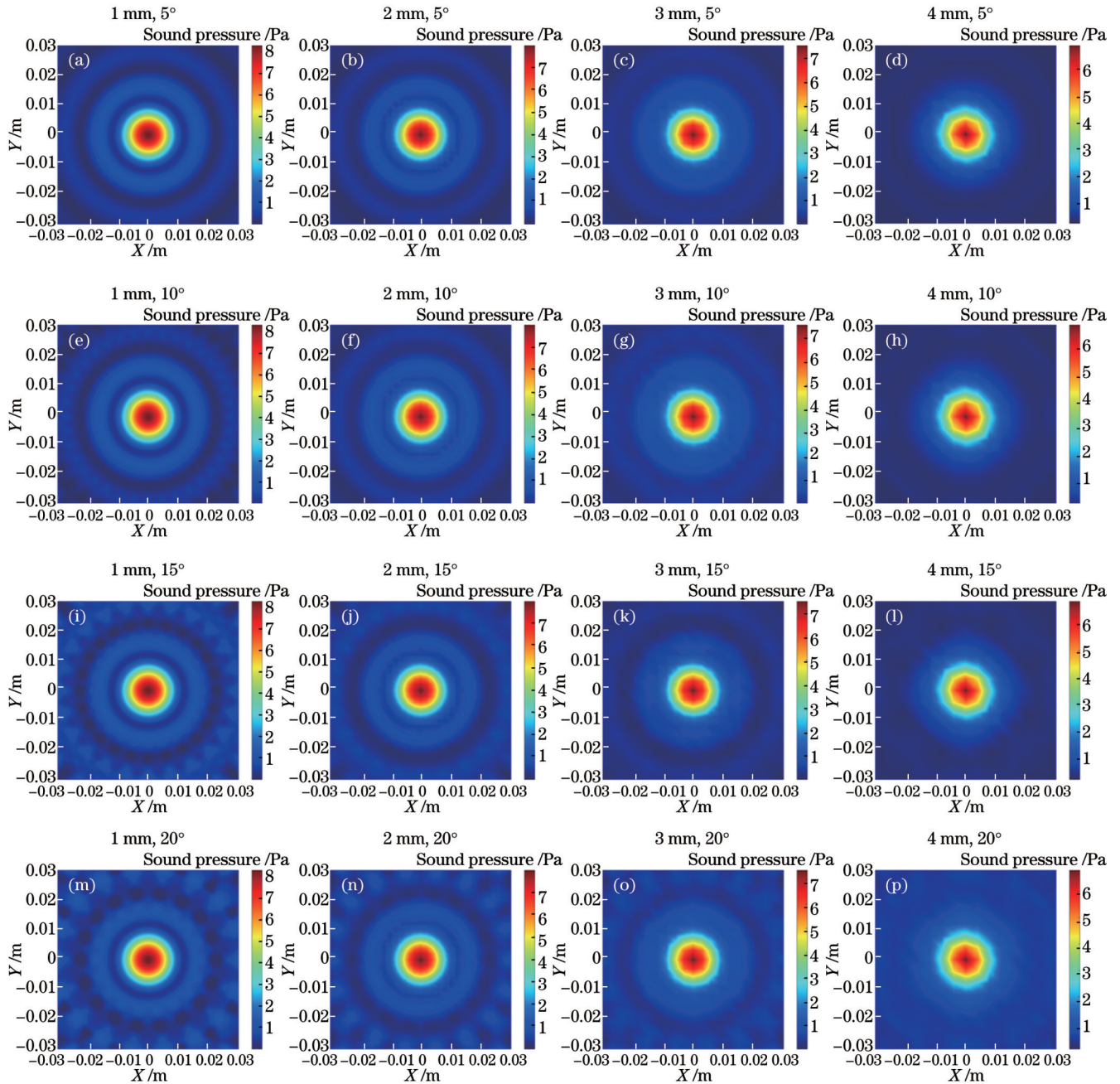


图 4 利用 FBP 算法在不同扫描分辨率下对 $100\ \text{kHz}$ 换能器声场的模拟重建结果

Fig.4 Simulated reconstruction results of sound field for $100\ \text{kHz}$ transducer using FBP algorithm under different scanning resolutions

针对三种频率的空耦换能器,当 $\Delta x=1\ \text{mm}$ 和 $\Delta\theta=5^\circ$ 时,声场重建图像的分辨率最高。当旋转步进间距不变时,随着平移步进间距增大,声场重建图像开始逐

渐变得模糊并且边缘出现不光滑的特征,但声场中心的整体分布轮廓仍能保持;当平移步进间距增大到 $4\ \text{mm}$ 时,重建图像质量较差。这是因为 FBP 算法在

重建过程中,平移步进间距越小,投影数据经一维傅里叶变换到波数域后,中心区域的数据点越密集,在反投影数据分配过程中,该区域的图像分辨率越高。

在相同的平移步进间距下,当旋转步进间距取 5° 或 10° 时,重建效果差别不是很大;随着旋转步进间距增大,声场图像会出现伪影。此外,伪影和平移步进间距也有关系,当旋转步进间距一致时,平移步进间距越小,伪影越显著,即:在相同的旋转步进间距下,平移步进间距的减小会加快伪影的产生。这是由于在较高的平移分辨率时,单投影线上的数据较多,而投影线分布

稀疏,导致FBP重建算法的反投影数据分配误差增大。因此,当平移分辨率较高时,需要较高的旋转角度分辨率才能保证较好的重建质量;同样,当平移分辨率降低时,对旋转角度分辨率的要求也会降低。

通过重建图像的评价指标对比分析FBP重建算法在不同扫描分辨率下重建图像的质量,对比结果如表1所示。结构相似性(SSIM)的取值范围为0~1,当两张图像一模一样时,SSIM值为1。平均绝对误差(MAE)越接近0,表明重建图像的质量越高。信噪比(SNR)越大,证明重建图像含有的噪声越少,重建图像越清晰。

表1 不同扫描分辨率下声场重建图像的评价指标

Table 1 Evaluation indicators of sound field reconstruction images under different scanning resolutions

Scanning parameter	86 kHz			100 kHz			200 kHz		
	SSIM	MAE	SNR	SSIM	MAE	SNR	SSIM	MAE	SNR
1 mm, 5°	0.769	0.034	18.2	0.668	0.041	17.3	0.655	0.021	18.2
1 mm, 10°	0.706	0.039	17.5	0.659	0.042	17.1	0.621	0.023	17.8
1 mm, 15°	0.499	0.104	13.3	0.616	0.051	16.3	0.551	0.035	16.0
1 mm, 20°	0.340	0.340	8.1	0.531	0.074	14.7	0.452	0.075	12.7
2 mm, 5°	0.758	0.078	14.4	0.700	0.042	17.0	0.596	0.030	16.5
2 mm, 10°	0.751	0.078	14.4	0.703	0.042	17.0	0.583	0.030	16.5
2 mm, 15°	0.604	0.102	13.2	0.694	0.043	16.9	0.537	0.035	15.9
2 mm, 20°	0.408	0.208	10.1	0.601	0.057	15.6	0.464	0.054	13.9
3 mm, 5°	0.646	0.163	11.1	0.655	0.075	14.3	0.564	0.057	13.6
3 mm, 10°	0.602	0.165	11.0	0.649	0.075	14.3	0.568	0.056	13.6
3 mm, 15°	0.608	0.169	10.9	0.643	0.077	14.2	0.514	0.059	13.4
3 mm, 20°	0.413	0.207	10.0	0.608	0.081	14.0	0.501	0.065	13.0
4 mm, 5°	0.550	0.283	8.0	0.585	0.127	11.4	0.604	0.085	11.2
4 mm, 10°	0.542	0.284	8.0	0.581	0.128	11.4	0.613	0.085	11.2
4 mm, 15°	0.543	0.287	8.0	0.598	0.127	11.4	0.592	0.085	11.2
4 mm, 20°	0.483	0.295	7.8	0.560	0.131	11.2	0.554	0.089	11.0

通过比较SSIM可以发现:1)86 kHz和200 kHz换能器在 $\Delta x=1\text{ mm}$ 、 $\Delta\theta=5^\circ$ 时、100 kHz换能器在 $\Delta x=2\text{ mm}$ 、 $\Delta\theta=10^\circ$ 时,基于FBP算法重建图像的SSIM最接近1,即重建结果更接近原始声场。86 kHz换能器在 $\Delta x=1\text{ mm}$ 、 $\Delta\theta=5^\circ$ 和 $\Delta x=2\text{ mm}$ 、 $\Delta\theta=5^\circ$ 时,重建图像的SSIM值很接近。这与反投影数据分配的合理性有关,也表明并非精度越高重建相似性越好。此外还可以发现重建图像质量与换能器频率有关,平移步进间距在 $1/2$ 波长附近取值时SSIM值更大。2)当 Δx 分别为1、2、3、4 mm时,均表现为旋转步进间距越小,SSIM值越大,这与前述“平移步进间距越小,投影数据经一维傅里叶变换到波数域后,中心区域的数据点越密集,在反投影数据分配过程中,该区域的图像分辨率越高”一致。这表明平移步进间距相同时,旋转步进间距越小,图像分辨率越高。随着频率增大,不同扫

描参数下重建图像的SSIM值差别越来越小,这可能是因为频率较高时声场更加集中,扫描路径积分误差减小。3)当 $\Delta\theta$ 分别取 5° 、 10° 、 15° 和 20° 时,基本上分别对应 Δx 在1、2、3、4 mm时,SSIM值较大。该发现与前述“在相同的旋转步进间距下,平移步进间距的减小会加快伪影的产生”一致,即:当旋转角度分辨率较低时,需要降低平移分辨率才能保证较好的重建相似性。同时,对于每一个旋转步进间距,均对应着其最佳的平移步进间距,即:对于确定的旋转步进间距,平移步进间距过小或过大都会降低重建图像与原图像的结构相似性。

通过比较MAE可以发现:1)对于三种换能器,当 Δx 分别为1、2、3、4 mm时,均表现为旋转步进间距越小,MAE值越小,即基于FBP算法重建后的图像失真越小。2)对于86 kHz换能器,当 $\Delta\theta$ 取 5° 、 10° 、 15° 和 20°

时,分别对应 Δx 在 1、1、2、3 mm 时,MAE 最小,与 SSIM 的规律类似。当频率高于 100 kHz 时,该规律不明显。3) 在相同的平移和旋转步进间距下,随着频率增大,MAE 整体呈现下降趋势并且不同扫描参数下重建图像的 MAE 值差别越来越小。这表明在其他条件不变时,随着频率升高,声场更加集中,投影数据分配误差减小。

通过比较 SNR 发现三种换能器基本上都遵循如下规律:扫描数据点越密集,SNR 值越大,图像越清晰。当 $\Delta\theta$ 为 15° 和 20° 时, Δx 取 2 mm 时比取 1 mm 时 SNR 更小,该现象主要受 $\Delta x=1$ mm 和 $\Delta\theta=15^\circ$ (或 $\Delta\theta=20^\circ$) 时伪影的影响。

通过对比不同分辨率下的重建结果可以得出改变平移步进间距与旋转步进间距对重建图像质量的影响方式不同:当旋转步进间距不变时,平移步进间距越小,使用 FBP 算法重建出的图像数据点越多,重建图像分辨率越高;旋转间距主要影响图像伪影的产生。SSIM 和 MAE 指标需要考虑平移和旋转步进间距综合作用后的重建效果,SNR 主要取决于扫描数据量和伪影。随着换能器频率增大,不同分辨率下的 MAE 和 SNR 差别减小。

如表 2 所示,对于 86 kHz 换能器,若要求重建结果接近原始声场,则取 $\Delta x=2$ mm 和 $\Delta\theta=10^\circ$;若同时要求图像失真小且图像信噪比高,优选 $\Delta x=1$ mm 和

$\Delta\theta=10^\circ$ 。对于 100 kHz 和 200 kHz 换能器,优选 $\Delta x=2$ mm 和 $\Delta\theta=10^\circ$,此时各指标相较于最佳值均差别不大。可见,随着频率升高,减小平移步进间距会降低重建图像质量的改善效果,可选择声场扫描参数的范围变大。相较于 $\Delta x=1$ mm、 $\Delta\theta=5^\circ$ 的参数组, $\Delta x=1$ mm、 $\Delta\theta=10^\circ$ 和 $\Delta x=2$ mm、 $\Delta\theta=10^\circ$ 参数组下的扫描时长均缩短,分别缩短为 $\Delta x=1$ mm、 $\Delta\theta=5^\circ$ 参数组下的 1/2 和 1/4。因此,选择表 2 中优化后的声场扫描参数可将扫描效率提高 2~4 倍。若降低对图像重建质量的要求,还可进一步提高扫描效率。

从声场表征角度看,若要计算平均声功率、平均声强等参数,则需要考虑声场图像的整体重建质量,选取 $\Delta x=1$ mm 和 $\Delta\theta=5^\circ$ 最佳;若要计算声束直径、声束扩散角等参数,则只要求声场图像中心区域的分辨率较高,不考虑边缘伪影的影响,选取 $\Delta x=1$ mm (或 $\Delta x=2$ mm) 和 $\Delta\theta=5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 均可;若要求声场图像不产生伪影,并且保证平移间距和旋转间距的适应性,则可根据实际需求依次考虑 $\Delta x=1$ mm 和 $\Delta\theta=5^\circ$ 、 $\Delta x=2$ mm 和 $\Delta\theta=10^\circ$ 、 $\Delta x=3$ mm 和 $\Delta\theta=15^\circ$ 、 $\Delta x=4$ mm 和 $\Delta\theta=20^\circ$ 。

综上所述,根据实际需求选择声场扫描参数,可以减少声场扫描时间,提高重建效率。最终扫描方案的选择需要综合考虑重建效率和重建精度。

4 实验验证

在不同频率和不同分辨率下进行空耦超声换能器的声场重建,需要在不同分辨率下对换能器的声场进行扫描,得到不同位置各个方向的声压路径积分。

4.1 实验扫描装置

在计算机中编写 MATLAB 控制程序,通过扫描路径的控制、换能器驱动信号的发射、激光测振仪输出信号的采集和重建算法的同步实现,完成整个声场的扫描过程。整个控制框架和实物图分别如图 5 和图 6 所示。控制 NI 采集卡输出相应频率的声源驱动信号,

表 2 不同情况下声场扫描参数的选择

Table 2 Selection of sound field scanning parameters under different conditions

Frequency of transducer /kHz	The optimal parameters for requiring close to original sound field with minimal distortion and clear image
86	$\Delta x=1$ mm, $\Delta\theta=10^\circ$
100	$\Delta x=2$ mm, $\Delta\theta=10^\circ$
200	$\Delta x=2$ mm, $\Delta\theta=10^\circ$

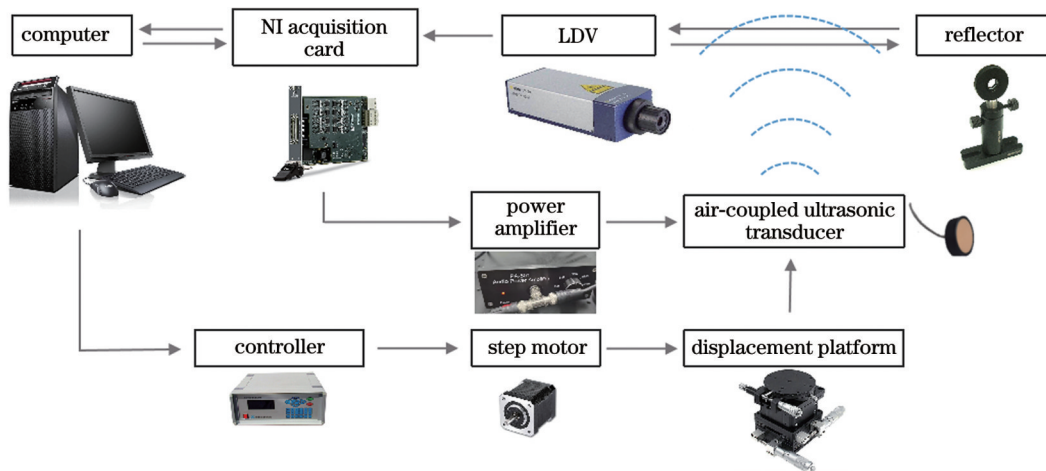


图 5 声场自动扫描装置控制框架及构成

Fig. 5 Control framework and components of sound field automatic scanning system

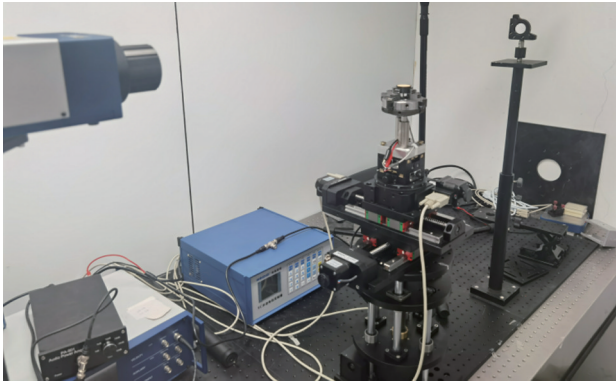


图 6 声场自动扫描装置实物图

Fig. 6 Photo of sound field automatic scanning system

该信号通过功率放大器放大后加载到空耦超声换能器上。激光测振仪发出的激光穿过换能器发出声场,声

场经反光镜返回到激光测振仪中,通过激光测振仪解调出与被测声压路径积分相关的速度信号,将速度信号输出至 NI 采集卡,最后由计算机获取激光测振仪的输出信号。

4.2 声场扫描方案

为了提高空间分辨率,将激光束焦点调整到声轴位置,焦斑直径远小于 1 mm。扫描由步进平移和步进旋转构成,电机带动换能器在不同区域内运动。先向激光器左侧移动至负极大位置,进行数据采集,如图 7(a)所示;然后按设定的旋转步进间距逆时针旋转 180° 并进行测量,如图 7(b)所示,再向右侧平移并按设定的步进间距进行扫描,如图 7(c)所示。重复上述运动直至扫描结束,如图 7(d)所示。至此,激光测振仪完整地收集到扫描数据。

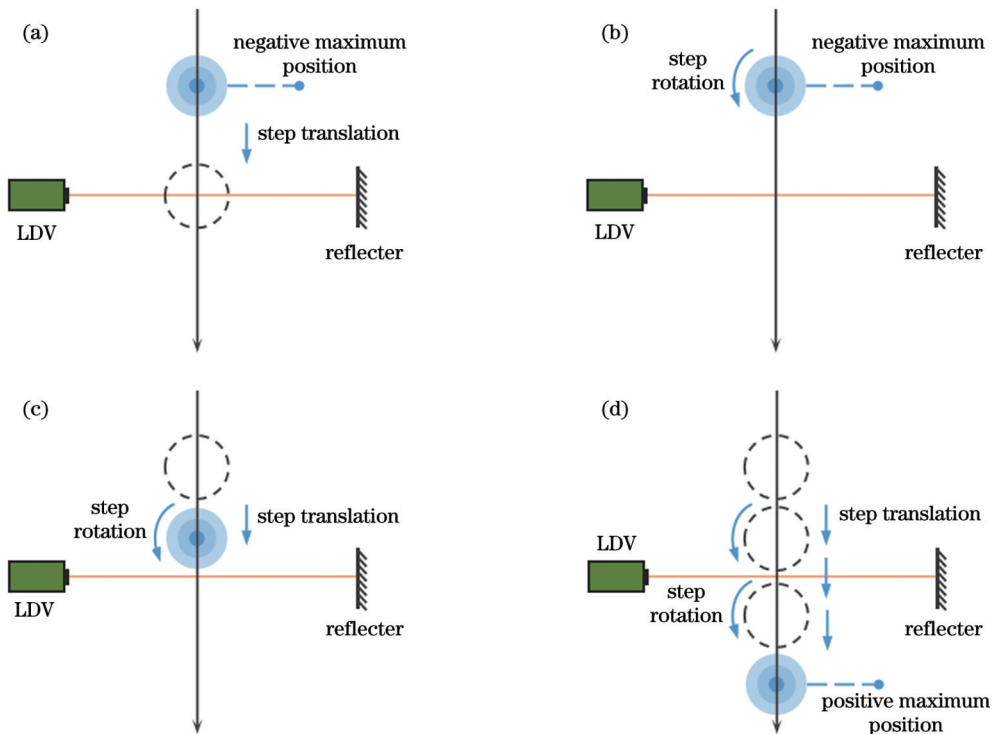


图 7 声场扫描方案

Fig. 7 Sound field scanning scheme

4.3 实验结果与讨论

激光测振仪型号为 Polytec OFV 505/5000,灵敏度设为 $2 \text{ mm}/(\text{s}\cdot\text{V})$,换能器正弦驱动信号的峰峰值设为 8 V。为了验证 LDV 法测量结果的可靠性,针对 100 kHz 换能器,分别采用 1/8 英寸 B&K 4138 传声器和 LDV 对换能器轴向 7 cm 处的径向声压分布进行测量。传声器法扫描的平移步进间距取 2 mm,LDV 法扫描的平移步进间距 Δx 取 2 mm,旋转步进间距 $\Delta \theta$ 取 5° ,声场测量区域均为 $6 \text{ cm}\times 6 \text{ cm}$ 。通过 MATLAB 平台控制信号发送与采集的同步触发,经数据处理后,得到了两种方法测得的声场分布,如图 8 所示。

可以看出,使用激光层析成像法可以获得与传声

器法相近的声压振幅和径向声压分布。测量平面即换能器轴向 7 cm 处,LDV 法和传声器法得到的 -3 dB 声束宽度分别为 1.41 cm 和 1.73 cm,声束扩散角分别为 11.46° 和 14.25° 。由于两次测量无法做到在完全相同的位置上进行,并且受传声器本身以及 LDV 法测试过程中外在干扰因素的影响,两种方法测得的声场分布存在一定差别。该实验验证了采用 LDV 法进行超声声场重建的可靠性。

按 4.2 节所述声场扫描方案,在不同频率和不同分辨率下进行空耦超声换能器的声场重建。调整运动电机开展重复实验,其中平移步进间距 Δx 依次取 1、2、3 mm,在每种平移步进间距下,旋转步进间距 $\Delta \theta$ 分

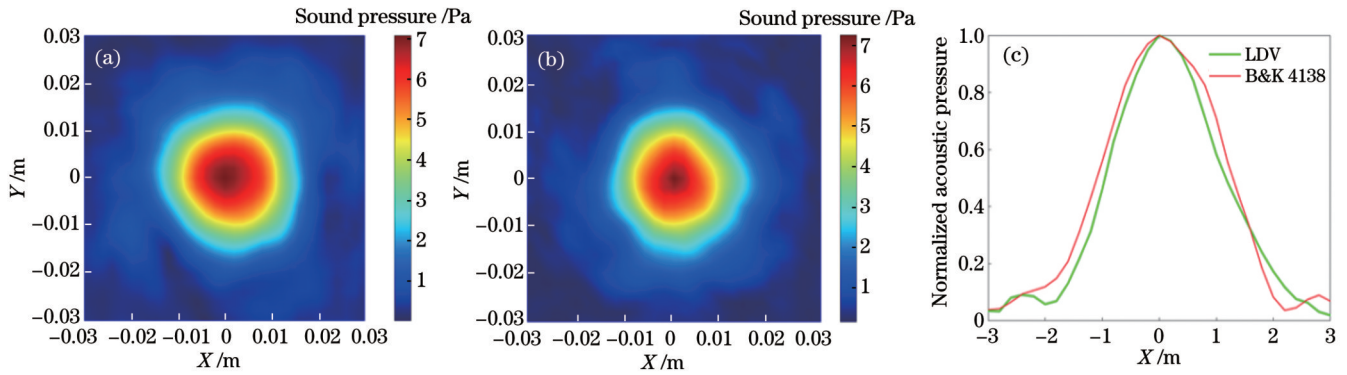


图 8 传声器法和 LDV 法的声场测量结果对比。(a) 传声器法; (b) LDV 法; (c) 径向声压分布对比

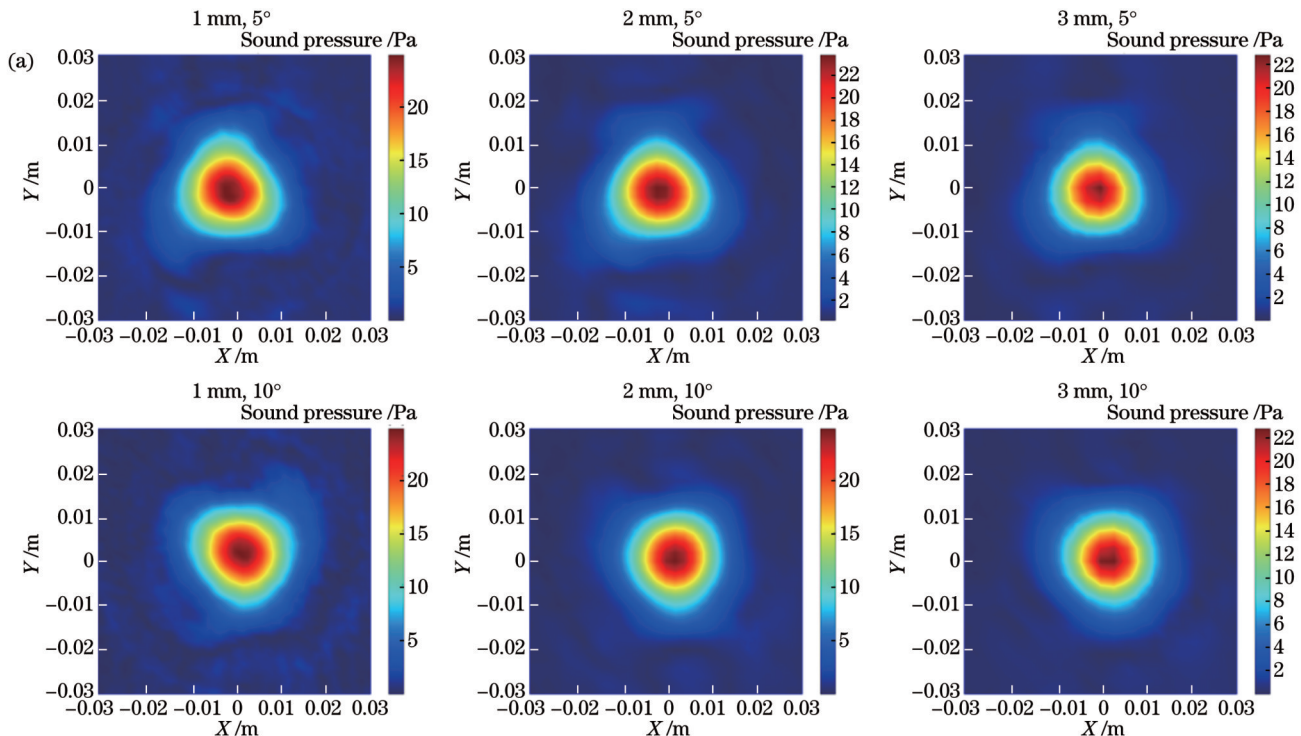
Fig. 8 Comparison of sound field measurement results between microphone and laser-based methods. (a) Microphone method; (b) LDV method; (c) comparison of radial sound pressure distribution

别取 5° 和 10° 。根据实际采用的换能器,将激励频率对应设置为 86、100、200 kHz,通过 MATLAB 平台控制信号发送与采集的同步触发,实现空耦超声换能器瞬时声压的扫描,其中采样频率为 1 MHz,声场测量重建区域的尺寸为 $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 。利用 FBP-Hamming 重建算法实现周期内不同瞬态声场的重建后,将其合成为有效声压,得到三种频率下重建分辨率分别为 $\Delta x = 1\text{ mm}$ 和 $\Delta\theta = 5^\circ$ 、 $\Delta x = 1\text{ mm}$ 和 $\Delta\theta = 10^\circ$ 、 $\Delta x = 2\text{ mm}$ 和 $\Delta\theta = 5^\circ$ 、 $\Delta x = 2\text{ mm}$ 和 $\Delta\theta = 10^\circ$ 、 $\Delta x = 3\text{ mm}$ 和 $\Delta\theta = 5^\circ$ 、 $\Delta x = 3\text{ mm}$ 和 $\Delta\theta = 10^\circ$ 的声压有效值重建图像,如图 9 所示。

从实验结果可以看出,基于声光效应测量空耦超声换能器声场有效值是可行的,且重建声压呈中心对称,与仿真结果一致,符合圆形活塞超声换能器声压分布规律。通过对比图 9 和图 4 可以发现实验数据重建图像不及仿真图像质量,这是因为实际测量过程中影

响因素较多,如环境中的噪声扰动、反光镜的微弱振动、换能器的摆放位置等。当扫描分辨率较高时,扫描时间较长,机械系统和声场稳定性将会对测量数据和图像重建结果产生影响,因此精度高未必可以获得更好的重建结果。

对比图 9 所示不同频率和不同分辨率下的重建声场图像可发现:1) 在 $\Delta x = 1\text{ mm}$ 和 $\Delta\theta = 5^\circ$ (或 $\Delta\theta = 10^\circ$) 时,声场波峰波谷较为明显;随着扫描和旋转步进间距的增大,声场波峰波谷的界限以及重建声场图像(特别是中心处的声压分布)均开始变得模糊,这也说明重建分辨率越高,图像越清晰。2) 对于 100 kHz 换能器, $\Delta x = 2\text{ mm}$ 时的重建效果较 $\Delta x = 1\text{ mm}$ 时的更好,与仿真结果一致。这主要是由于在较高的平移分辨率时,单投影线上的数据较多,而投影线分布稀疏,导致 FBP 重建算法的反投影数据分配误差增大,同时说明扫描精度高未必可以获得更好的结果。3) 保持平移步进间距



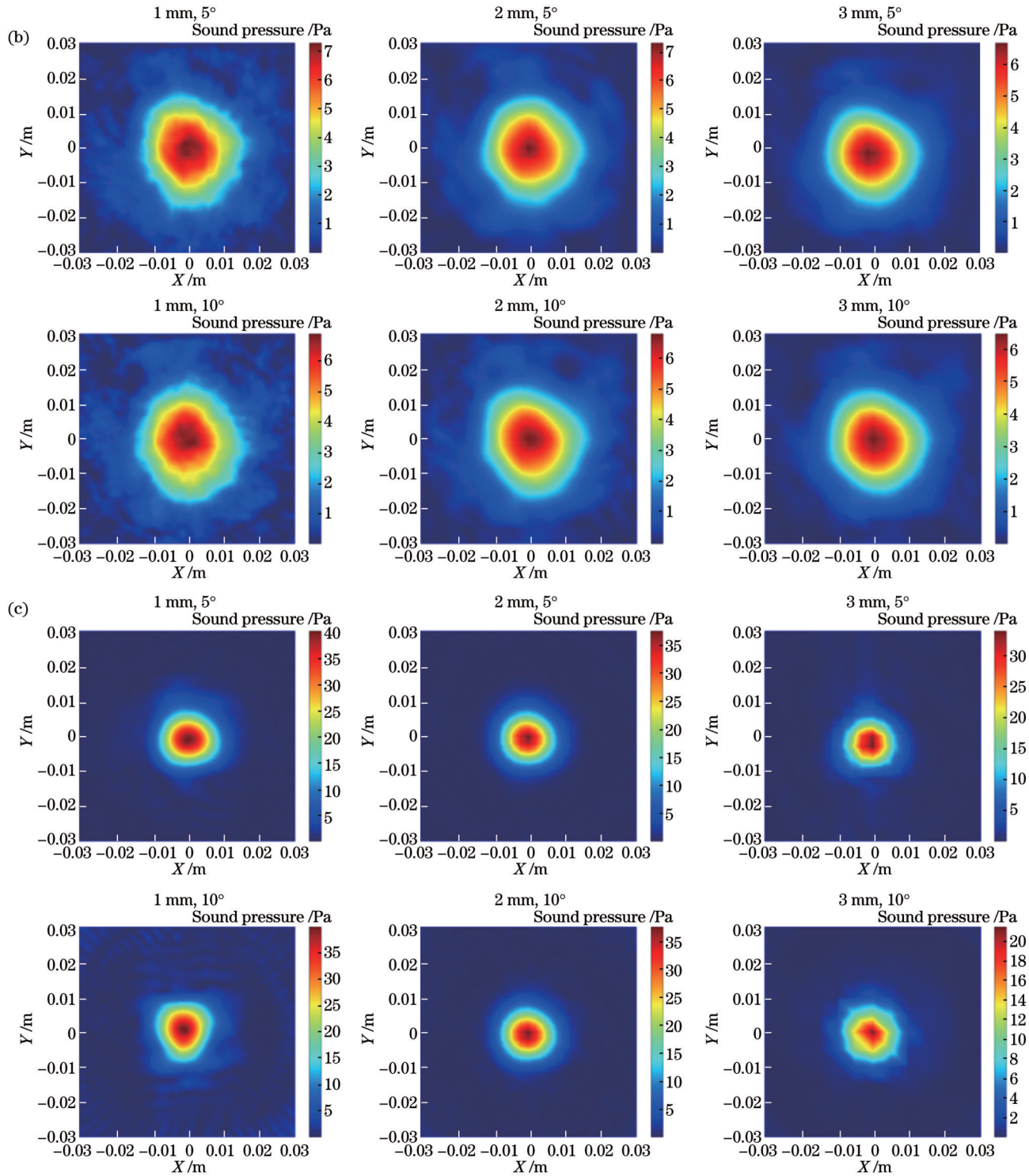


图 9 不同频率和不同分辨率下声场的实验重建结果。(a) 86 kHz; (b) 100 kHz; (c) 200 kHz

Fig. 9 Experimental reconstruction results of sound field for three transducers at different frequencies and resolutions. (a) 86 kHz; (b) 100 kHz; (c) 200 kHz

不变,当旋转步进间距 $\Delta\theta$ 从 5° 变为 10° 时,重建效果类似。4)保持旋转步进间距不变,改变平移步进间距,声场重建质量的改变更为显著。因此,在旋转步进间距较小的情况下进行实际声场的重建时,平移步进间距的重要性高于旋转步进间距。以上均与仿真图中得到的结论一致。

绘制了不同分辨率下仿真和实验重建声场的径向

声压分布,如图 10 所示。

可以看出:1)对于 86 kHz 和 100 kHz,实验得到的声束宽度较仿真结果偏大,这是由于仿真时参数设置得较为理想,而实际换能器参数会有所变化。2)实验图中关于 $x=0$ 非对称的情形主要是由换能器中心和扫描中心存在偏离导致的。3)在对图像进行归一化后,同一频率、不同分辨率下的声束宽度相差较小;随

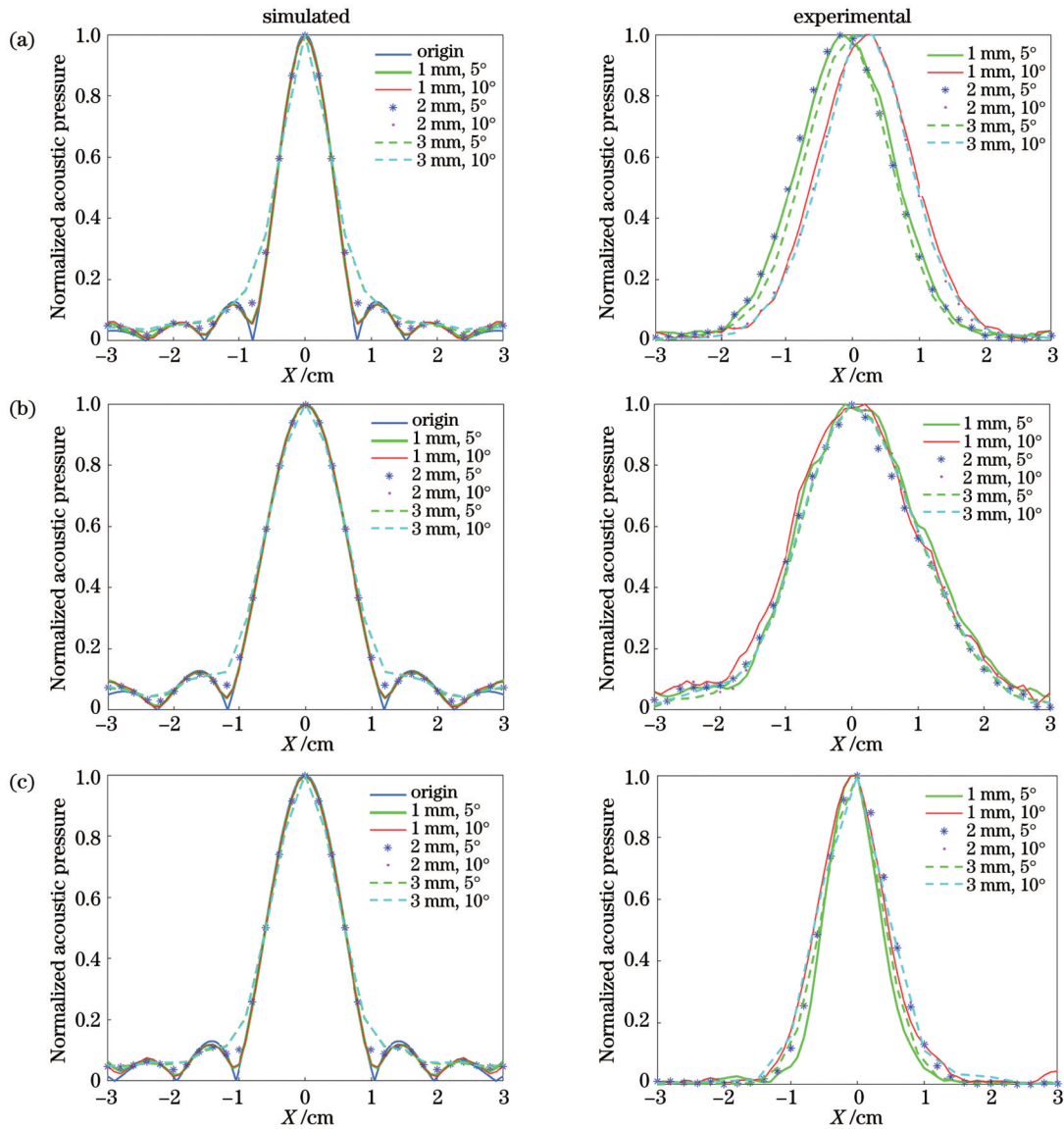


图 10 不同分辨率下仿真和实验重建声场的径向声压分布对比图。(a)86 kHz;(b)100 kHz;(c)200 kHz

Fig. 10 Comparison of simulated and experimental radial sound pressure distributions of reconstructed sound field at different resolutions. (a) 86 kHz; (b) 100 kHz; (c) 200 kHz

着扫描分辨率降低,重建点数减少,在 $\Delta x=3$ mm时重建声压分布曲线由圆峰变成尖峰,重建精度降低。因此,针对这三种换能器,可以参照表2选取扫描参数,在保证声场重建图像质量的前提下降低声场扫描分辨率,将扫描效率提高2~4倍。4)从径向声场分布图中可以明显看到FBP算法不能对旁瓣进行重建,这归因于该算法的缺陷,本课题组正在研究其他声场重建算法。

5 结 论

本文研究了基于声光效应激光层析成像的50~200 kHz空耦超声换能器垂直于声轴截面上的声场重建。首先通过仿真获得考虑空气衰减条件的超声换能器的声场分布,然后利用Radon变换和Radon逆变换对不同声场扫描参数下的声场重建效果进行仿真,得到空间域声场扫描参数的优化策略,在保证声场重建图像质量的前提下将扫描效率提高2~4倍。搭建测

量系统进行实验验证。首先通过与传声器直接测量结果比较验证了基于声光效应层析成像进行超声声场重建的正确性,然后通过实验得到不同分辨率下空耦超声换能器的声场重建图像,实验结果与仿真结果保持了良好的一致性。本研究为基于声光效应层析成像的超声声场扫描参数优化提供了有效途径,对于空耦超声换能器等的超声声场重建具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 毕然, 陈力荣, 李晋鹏, 等. 任意偏振光保偏的声光衍射效率增强系统的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0123002.
Bi R, Chen L R, Li J P, et al. Acousto-optic diffraction efficiency enhancement system for polarization maintaining of arbitrarily polarized light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0123002.
- [2] 蔡旺, 王栋梁, 冯伟, 等. 基于激光传感的水下声学目标高分辨跟踪方法[J]. 中国激光, 2022, 49(18): 1810004.
Cai W, Wang D L, Feng W, et al. High-resolution tracking

- method of underwater acoustic target based on laser sensing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 49(18): 1810004.
- [3] Bente K, Rus J, Mooshofer H, et al. Broadband air-coupled ultrasound emitter and receiver enable simultaneous measurement of thickness and speed of sound in solids[J]. Sensors, 2023, 23(3): 1379.
- [4] Fang Y M, Lin L J, Feng H L, et al. Review of the use of air-coupled ultrasonic technologies for nondestructive testing of wood and wood products[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 137: 79-87.
- [5] Kang L, Feeney A, Dixon S. The high frequency flexural ultrasonic transducer for transmitting and receiving ultrasound in air [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(14): 7653-7660.
- [6] American Society for Testing and Materials International. Standard practice for evaluating characteristics of ultrasonic search units: ASTM E1065/E1065M-14[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2014.
- [7] 李骥, 张旻, Bogdan P. 空气耦合超声换能器声场的时域计算方法[J]. 无损检测, 2020, 42(5): 59-62.
- Li J, Zhang M, Bogdan P. An approach to compute transient acoustic field radiated by air-coupled transducer[J]. Nondestructive Testing Technology, 2020, 42(5): 59-62.
- [8] 高依然, 韩露. 超声压电换能器灵敏度特性研究[J]. 科技风, 2014(14): 118.
- Gao Y R, Han L. Study on sensitivity characteristics of ultrasonic piezoelectric transducer[J]. Technology Wind, 2014(14): 118.
- [9] Anderson M J, Liu X. Use of reciprocity to characterize ultrasonic transducers in air above 100 kHz[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1996, 100(4, Supplement): 2672.
- [10] Li X B, Dai Z J, Zhang G D, et al. Determining the responsivity of air-coupled piezoelectric transducers using a comparative method: theory and experiments[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2021, 68(10): 3114-3125.
- [11] 吴君豪, 何双起, 罗明, 等. 空气耦合超声探头声场及其对检测的影响[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(2): 73-77.
- Wu J H, He S Q, Luo M, et al. Acoustic field of air-coupled ultrasonic probe and its effect on detection[J]. Aerospace Materials & Technology, 2018, 48(2): 73-77.
- [12] Torras-Rosell A, Barrera-Figueroa S, Jacobsen F. Sound field reconstruction using acousto-optic tomography[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 131(5): 3786-3793.
- [13] Jia X, Quentin G, Lassoued M. Optical heterodyne detection of pulsed ultrasonic pressures[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1993, 40(1): 67-69.
- [14] Bou M O, Pizarro L, Certon D, et al. Characterization of airborne transducers by optical tomography[J]. Ultrasonics, 2000, 38(1/2/3/4/5/6/7/8): 787-793.
- [15] Nakamura K. Sound field measurement through the acousto-optic effect of air by using laser Doppler velocimeter[C]//Technical Digest. CLEO/Pacific Rim 2001. 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (Cat. No. O1TH8557), July 15-19, 2001, Chiba, Japan. New York: IEEE Press, 2002.
- [16] Torras-Rosell A, Barrera-Figueroa S, Jacobsen F. An investigation of sound fields based on the acousto-optic effect[C]//18th International Congress on Sound and Vibration, July 10-14, 2011, Rio de Janeiro, Brazil. Lyngby: DTU Library, 2011.
- [17] Oikawa Y, Hasegawa T, Ouchi Y, et al. Visualization of sound field and sound source vibration using laser measurement method [C]//Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, August 23-27, 2010, Sydney, Australia. Lyngby: DTU Library, 2010.
- [18] Torras-Rosell A, Fernandez-Grande E, Jacobsen F, et al. Investigating the use of the acousto-optic effect for acoustic holography[C]//Inter-Noise, August 19-22, 2012, New York, USA. Lyngby: DTU Library, 2012.
- [19] Fernandez-Grande E, Torras-Rosell A, Jacobsen F. Holographic reconstruction of sound fields based on the acousto-optic effect[C]//Inter-Noise, September 15-18, 2013, Innsbruck, Australia. Lyngby: DTU Library, 2013.
- [20] Oikawa Y, Goto M, Ikeda Y, et al. Sound field measurements based on reconstruction from laser projections[C]//Proceedings of ICASSP'05. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, March 23, 2005, Philadelphia, PA. New York: IEEE Press, 2005: 661-664.
- [21] 郑晓钊, 姚纪阳, 李华军, 等. 基于遗传算法的光学层析成像的结构优化[J]. 光学学报, 2023, 43(3): 0311001.
- Zheng X Z, Yao J Y, Li H J, et al. Configuration optimization of optical tomography based on genetic algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(3): 0311001.
- [22] 刘一凡, 胡以华, 张鑫源, 等. 基于调制传递函数的激光反射层析成像质量评价方法[J]. 中国激光, 2023, 50(6): 0610001.
- Liu Y F, Hu Y H, Zhang X Y, et al. Imaging quality evaluation method of laser reflective tomography based on modulation transfer function[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(6): 0610001.
- [23] 潘孙强, 陈哲敏, 张建锋. 声场的直接测量[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3077-3082.
- Pan S Q, Chen Z M, Zhang J F. Direct measurement of sound field [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(11): 3077-3082.
- [24] 王浩宇, 冯秀娟, 祝海江, 等. 二维声场的光学扫描方法[J]. 计量学报, 2018, 39(3): 381-385.
- Wang H Y, Feng X J, Zhu H J, et al. Two-dimensional sound-field scanning based on optical method[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(3): 381-385.
- [25] Torras-Rosell A, Jacobsen F, Barrera-Figueroa S. A beamforming system based on the acousto-optic effect[C]//EURONOISE 2012-9th European Conference on Noise Control, June 10-13, 2012, Prague. Stuttgart: S. Hirzel Verlag GmbH, 2012: 1048-1053.
- [26] 李骥, 李力, 邓勇刚, 等. 空气耦合超声换能器的频域声场研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(10): 10-16.
- Li J, Li L, Deng Y G, et al. Study on acoustic field of air-coupled ultrasonic transducer in frequency domain[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(10): 10-16.

Laser Tomography Imaging and Optimization of Scanning Parameters for Ultrasound Field

Zhang Xiaoli¹, He Chenghao^{1,2}, Feng Xiujuan¹, Zhang Hui², Niu Feng¹, He Longbiao^{1*}

¹*Institute of Mechanics and Acoustic Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;*

²*School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

Abstract

Objective Air-coupled ultrasonic transducers offer unique advantages such as non-contact testing, adaptability to complex working

conditions, and *in situ* testing. They are widely used in areas such as ultrasonic ranging, radar, flow meters, and nondestructive testing. Sound field reconstruction holds importance for characterizing the sound field parameters of air-coupled ultrasonic transducers, including beam width and diffusion angle, ensuring the transverse resolution and positioning accuracy of the ultrasonic testing system. The laser method, drawing on the acousto-optic effect, exhibits advantages such as a narrow laser beam, high spatial resolution, extensive frequency range, high sensitivity, and a non-invasive sound field. This makes it an ideal approach for sound field reconstruction. Achieving optimal spatial resolution and superior imaging quality remains pivotal when using laser tomography for sound field reconstruction. Typically, improving the imaging quality involves reducing the translation and rotation step spacing (often to less than half the sound wavelength) to secure more comprehensive sound pressure path data. Given the short wavelength of ultrasonic transducers, the scanning efficiency of ultrasound field reconstruction decreases considerably. This study, therefore, centers on the sound field reconstruction of air-coupled ultrasonic transducers within the 50–200 kHz frequency range and seeks to optimize the scanning parameters. The goal is to enhance scanning efficiency while maintaining the quality of the reconstructed sound field image. We aim for our fundamental strategy and insights to aid in the realization of ultrasound field reconstruction and the enhancement of scanning efficiency via laser tomography.

Methods This study investigated the sound field reconstruction of air-coupled ultrasonic transducers at frequencies of 50–200 kHz based on acousto-optic effects and tomography technology. The spatial resolution of the sound field was optimized through simulations and experiments. Initially, a model was established to simulate the reconstruction effect under various scanning parameters. By exploring the rules and analyzing the outcomes from the perspective of measurement principles and algorithms, optimized scanning parameters were determined. Subsequently, a two-dimensional sound field scanning system was constructed, and a laser Doppler vibrometer (LDV) was employed to measure the integration of the sound pressure along the path. Employing the classic reconstruction algorithm of tomography technology, the filtered back projection (FBP) algorithm, sound field reconstruction of the air-coupled transducer perpendicular to the sound axis direction was completed, and the simulation results were validated. The reliability of acousto-optic effect tomography for ultrasound field reconstruction was confirmed by comparing the reconstruction outcomes of the sound field with the measurement findings from the microphone method.

Results and Discussions The translation and rotation step spacings have different effects on the quality of the reconstructed sound field image. When the rotational step spacing remains unchanged, a smaller translation step spacing results in a higher-resolution reconstructed image. The rotation spacing primarily affects the generation of image artifacts (Fig. 4). As the frequency increases, reducing the translation step spacing weakens its impact on improving the quality of the reconstructed images. The range of the sound-field scanning parameters can expand, and selecting the optimized sound-field scanning parameters can increase the scanning efficiency by 2–4 times (Tables 1, 2). Laser tomography allows for the capture of sound pressure amplitudes and radial sound pressure distributions similar to those of the microphone method, verifying the reliability of the LDV for sound field reconstruction (Fig. 8). Experiments yield the reconstructed sound field images of the air-coupled ultrasonic transducer under various resolutions, which show strong consistency with the simulation results (Figs. 9 and 10). To compute parameters, such as sound power or sound intensity, fine sound field scanning parameters are essential. For parameters, such as the beam width and diffusion angle, only a high resolution in the central area of the image is necessary, and the requirement for rotation step spacing diminishes. If artifacts appear unexpectedly in the sound field image, then optimal combination parameters exist for the translation and rotation step spacing.

Conclusions This article investigates the ultrasound field reconstruction of the cross section perpendicular to the acoustic axis of air-coupled ultrasonic transducers at frequencies of 50–200 kHz, drawing on the acousto-optic effect and laser tomography method. Initially, a simulation provides the original sound field distribution of the ultrasonic transducer, considering air attenuation. Radon and inverse Radon transforms simulate the reconstructed sound field images under various scanning parameters, from which optimization strategies for the sound field scanning parameters emerge. This optimization enhances scanning efficiency by 2–4 times while preserving the quality of the reconstructed sound field image. For experimental verification, a measurement system is constructed. The accuracy of laser tomography for ultrasound field reconstruction is first validated by comparing measurement results to those from the microphone method. Following this, acoustic field reconstruction images of the air-coupled ultrasonic transducer at different scanning parameters are experimentally acquired, showcasing strong alignment with simulation outcomes. This research offers an efficient methodology for optimizing the scanning parameters of the ultrasound field based on acousto-optic tomography imaging, holding significant guidance for ultrasound field reconstruction.

Key words measurement; tomography imaging processing; acousto-optic effect; laser vibrometer; sound field characterization; scanning efficiency