

聚焦换能器声场特性的快速检验方法

马蕊生¹, 李文溢¹, 胡济民², 李禹志¹, 郭各朴¹, 马青玉¹

(1.南京师范大学计算机与电子信息学院, 江苏 南京 210023)

(2.江苏省医疗器械检验所, 江苏 南京 210019)

[摘要] 高强度聚焦超声(HIFU)已在无创肿瘤治疗方面展示出巨大的应用潜力,而换能器聚焦性能的优劣对疗效起到至关重要的作用,因此声场的精确测量成为实际应用的重要保障. 由于加工工艺和安装精度的限制,聚焦换能器的实际声场和理想声场可能存在一定偏差. 针对传统三维扫描测量存在速度慢和精度低的问题,提出了一种基于双平面双精度测量的聚焦换能器声场特性快速检验方法. 通过沿理想 z 轴的高精度一维扫描确定换能器倾斜角范围,在声压极值点所在横截面内利用低精度和高精度变邻域搜索法实现最大声压点的精准定位,进一步通过焦域内双平面最大声压点构建声场的实际轴线,完成实际声场焦点的精确定位,最后基于实际焦平面内轴向与径向的高精度测量结果,计算获得焦域尺寸、旁瓣大小、分布对称性和声功率等性能参数. 利用构建的声场扫描实验系统对聚焦换能器声场进行三维扫描和快速测量,结果表明在相同的测量精度(0.1 mm)下可以有效提高测量速度百倍以上,具有测量速度快、测量精度易于调节和性能分析全面等优点. 方法为聚焦换能器检验提供一种高精度的快速声场测量新技术,在超声治疗仪器的检验中具有重要的指导意义与应用价值.

[关键词] 聚焦换能器声场, 双平面双精度测量, 变邻域搜索法, 性能参数

[中图分类号] TB551 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2024)02-0020-08

A Fast Field Testing Method for Focused Transducer

Ma Ruisheng¹, Li Wenyi¹, Hu Jimin², Li Yuzhi¹, Guo Gepu¹, Ma Qingyu¹

(1.School of Computer and Electronic Information, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.Jiangsu Institute of Medical Device Testing, Nanjing 210019, China)

Abstract: The high intensity focused ultrasound (HIFU) has shown great applied potential in non-invasive tumor treatment, and the focusing performance of the transducer plays a crucial role in the therapeutic effect. Hence, the accurate measurement of the focused acoustic field shows great significance to guarantee treatment accuracy of practical HIFU therapy. However, due to the limitation of fabrication technology and installation accuracy, some difference between the actual and ideal field of the focused transducer may be produced. In this paper, to solve the low-speed and low-accuracy of the traditional three-dimensional scanning, a rapid inspection method for focused acoustic field is proposed on the basis of the dual-precision measurement in double planes. The inclination angle range of the transducer is first determined by the extreme point in the focal distance based on the high-precision one-dimensional scanning along the ideal axis. And then, the pressure-peak position is accurately located in the cross section by applying the variable neighborhood search algorithm in both low and high precisions. The actual beam axis is further constructed by the pressure-peak points in double planes within the focal region, and the precise location of the focus is achieved. Finally, based on the high-precision axial and radial measurements in the actual focal plane, the performance parameters such as the focal field size, side lobe level, field symmetry and acoustic power are obtained. Compared with the experimental three-dimensional measurements, the measurement efficiency can be greatly enhanced by the proposed fast inspection method by over 100 times, with the advantages of high speed, flexible accuracy and comprehensive performance analysis. This study provides a new high-precision fast measurement technology for focused transducers, and exhibits prosperous perspectives in the inspection of ultrasonic therapeutic instruments.

Key words: acoustic field of focused transducer, dual-precision measurement in double planes, variable neighborhood search algorithm, performance parameter

收稿日期: 2023-12-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(11934009、11974187、12174198、12227808)、江苏省自然科学基金项目(BE2022814).

通讯作者: 马青玉, 博士, 教授, 研究方向: 声学, 电子技术和生物医学超声. E-mail: maqingyu@njnu.edu.cn

高强度聚焦超声因其无创性、安全性和有效性,被广泛应用在肿瘤治疗^[1-3]中,而聚焦换能器是超声治疗系统中的能量来源,换能器的设计、制造和安装等都会影响其声场分布,进而决定其聚焦特性和声功率,最终决定超声治疗疗效。超声换能器的声学参数测量是衡量设备安全性和有效性的重要指标,是超声设备应用的关键,因此研发高效准确的聚焦声场测量技术具有极其重要的应用价值。

目前有多种声场和声功率的测量方法。辐射力天平法^[4]通过测量声辐射力来间接测量声功率,其测量精度依赖于天平的灵敏度,不确定性较强,量热法^[5]通过测量介质的温度变化来间接计算声功率,要求系统和外界无热交换,但实际测量中难以阻止热量散失,导致测量功率比实际功率偏低。互易法^[6]是根据声场的衍射规律,推导换能器发射的声功率,但它易受非线性效应的影响。近场互谱法^[7]通过近场区域内测量声压和频谱信息,利用互功率谱密度来计算声源功率,但需要在声源近场区域内进行测量,更适合小型换能器。上述测量方法均只能测量出声功率一个指标,不能整体反映声场特性,无法全面计算声场性能参数,同时也无法上实现焦点的精准定位。光学检测法^[8-10]利用光的干涉或散射现象来获得声场信息,但环境光的影响会增大测量误差,不宜用于实际测量。光学纹影法^[11]根据声场中的声波引起的折射率变化,形成一系列的亮暗纹影来获得声场分布,虽然该方法可以实现快速声场分布测量,但声压测量精度较低。红外热成像法^[12-14]通过检测声场引起物体或介质的热辐射变化来推断声场的分布和特性,适合空气测量,但在测量水中声场时会因水具有较高的导热率而产生更大的误差。

水听器^[15-19]能够将水声信号转为电信号,具有良好的声压探测灵活性和较高的精确性,是声场扫描最常用的工具之一,配合三维运动机构的位置和方向调控可实现声场的全方位扫描。理论上,声场的声强正比于声压的平方,通过声强对面积的积分可计算声功率,因此通过测量声场每一点的声压值就能够计算出焦域大小、旁瓣强弱、声功率等性能参数。然而,由于聚焦换能器的声场焦域较小,焦点声压较高,需要使用高强度水听器进行高精度扫描测量才能获得较准确的结果。目前基于水听器的三维扫描测量普遍存在测量速度慢和精度低问题,迫切需要寻找一种高精度的聚焦换能器声场快速检验方法。

本文针对聚焦换能器的实际检验需求,提出了一种基于双平面双精度测量的聚焦换能器声场特性快速检验方法。首先,利用沿 z 轴的声压测量结果来判断换能器的倾斜角范围并实现扫描平面的初步定位。然后,采用双平面双精度的方法进行快速扫描实现测量平面中心的精准定位,并沿实际声场轴线进行高精度扫描,实现焦点的精确定位,完成焦平面内的高精度径向扫描。最后,根据高精度的轴向与径向声压测量结果计算声场焦域尺寸、旁瓣大小、声场对称性和声功率等性能参数,并给出检测报告。本方法为超声仪器设备检测提供了理论与技术支持,在聚焦换能器的检验与测量领域具有重要价值。

1 聚焦换能器声场快速测量原理和方法

聚焦换能器的声场计算模型如图1所示,理想凹球壳聚焦换能器的焦点位置位于系统 z 轴的标称焦距上,根据换能器的标称说明,换能器输出中小功率的线性声场,可用瑞利积分^[20]计算空间观测点 $Q(x, y, z)$ 的声压 $p(x, y, z)$,

$$p(x, y, z) = p_0 \int_0^{2\pi} \int_0^a \frac{e^{-ikr}}{r} R_1 dR_1 d\varphi. \quad (1)$$

式中, $k=2\pi f/c$ 为波数, f 为声波频率, c 为介质声速, a 为换能器半径, $p_0=(jk\rho c u_0)/(2\pi)$ 为一常数项, u_0 为换能器的表面振速, ρ 为介质密度, (R_1, φ) 为积分面元 ds 的坐标, Q 到 ds 距离 r 为

$$r = \sqrt{(y - R_1 \cos\varphi)^2 + (x - R_1 \sin\varphi)^2 + [z - (F - \sqrt{F^2 - R_1^2})]^2}. \quad (2)$$

式中, F 为换能器焦距,进一步得到声场 z 轴上的声压分布,

$$p(0, 0, z) = p_0 \int_0^{2\pi} \int_0^a \frac{e^{-ikr}}{r} R_1 dR_1 d\varphi. \quad (3)$$

然而由于换能器制作工艺和安装精度问题,测量换能器与系统 z 轴存在倾斜角 α ,导致实际焦点位置偏离轴线并产生位置前移,引入旋转矩阵^[21]得到

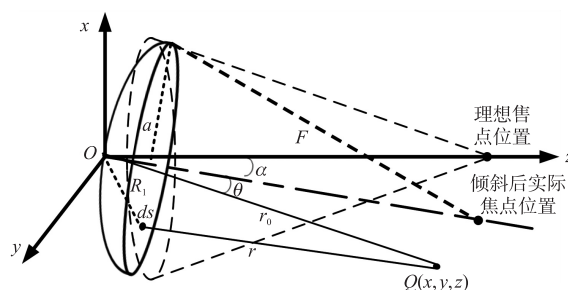


图1 聚焦换能器声场计算模型

Fig. 1 Calculation model for focused acoustic field

$$\begin{bmatrix} x_\alpha & y_\alpha & z_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式中, $x_\alpha = x \cos \alpha + z \sin \alpha$, $y_\alpha = y$, $z_\alpha = z \cos \alpha - x \sin \alpha$, 聚焦换能器倾斜 α 后的声场 $p_\alpha(x, y, z)$ 为

$$p_\alpha(x, y, z) = p_0 \int_0^{2\pi} \int_0^a \frac{e^{-ikr'}}{r'} R_1 dR_1 d\varphi. \quad (5)$$

式中, $r' = \sqrt{(y_\alpha - R_1 \cos \varphi)^2 + (x_\alpha - R_1 \sin \varphi)^2 + [z_\alpha - (F - \sqrt{F^2 - R_1^2})]^2}$.

根据声场计算公式, 对 $a=30 \text{ mm}$, $F=75 \text{ mm}$ 和 $f=1 \text{ MHz}$ 的实验聚焦换能器进行声场仿真, 得到如图 2(a) 所示的不同倾斜角情况下的 z 轴声压分布, 结果显示换能器的标称焦域范围大约为 $[64.2 \text{ mm}, 85.8 \text{ mm}]$. 在 $\alpha=0$ 时, 在标称焦距处声压最大, 随着 α 的增大, 焦域的声压极大值逐渐降低, 最终转变为极小值. 标称焦距处的声压由极大值转变为极小值必然存在一个倾斜临界角 α_c , 该角度受换能器的焦距和焦域短轴尺寸影响, 主要用于判断极值点是否在声场焦域内, 并且根据声压极值大小可以判断实际倾斜角度与换能器倾斜临界角的关系. 如图 2(b) 给出 z 轴声压分布中标称焦距处的声压对 z 的二阶导数随倾斜角的分布, 可见标其随倾斜角增大而增大. 当倾斜角为零时, 换能器焦域临界角为倾斜角, 因此可以根据标称焦距处的声压极值特征来确定声场测量方案.

倾斜放置聚焦换能器声场快速测量示意图如图 3 所示.

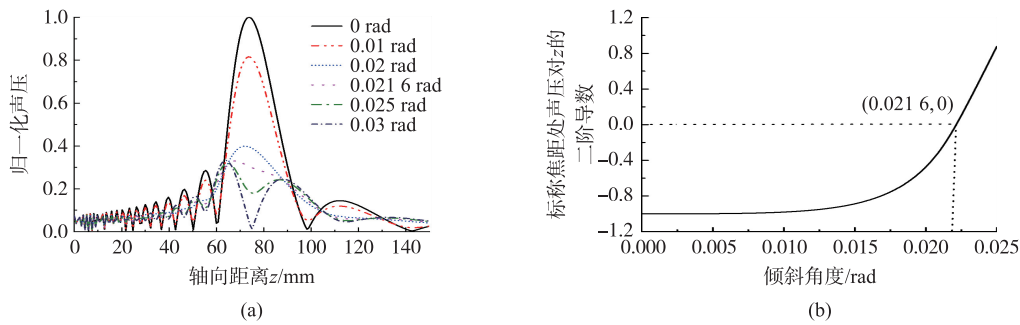


图 2 (a) 不同倾斜角条件下声场 z 轴的声压分布 (b) 理想焦点声压对 z 的二阶导数随倾斜角的变化关系

Fig. 2 (a) Axial pressure distributions along the z axis of the focused acoustic field with different tilt angles and (b) dependence of the second order derivative of the pressure at the ideal focal center over z on the tilt angle

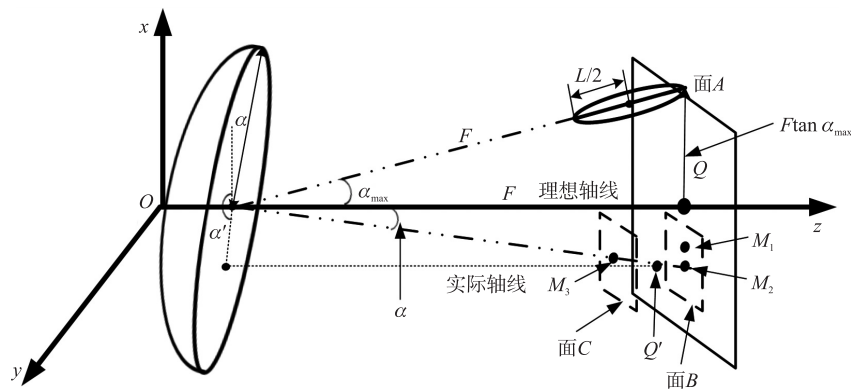


图 3 倾斜安装的聚焦换能器声场快速测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of rapid measurement for focused acoustic field generated by a tilt transducer

将聚焦换能器安装于三维扫描系统的换能器夹持机构中心, 其圆柱形换能器外壳尾部中心位于坐标原点 $O(0, 0, 0)$ 处, 保证其外壳轴线和 z 轴重合, 而聚焦换能器实际轴线和 z 轴存在倾斜角 α , 标记换能器相对于 x 轴的方位角为 α' , 理想情况下 α 与 α' 均应为 0° . 根据聚焦换能器的参数, 计算得到声场的标称焦域的轴向范围近似为 $[F-L/2, F+L/2]$, 其中 $L=2.3\lambda F^2/a^2$ 为焦点声压 6 dB 衰减的焦域轴向长度, 进一步得到本换能器的最大可测量倾斜角为 $\alpha_{\max} = \arccos[F/(F+L/2)]$, 可以用该测量限制条件来确保换能器的理想焦点所在横截面内包含焦域, 最大可测量倾斜角 α_{\max} 远大于临界角 α_c .

在可测量倾斜角范围内,聚焦换能器声场快速测量方法的流程如图4所示.通过步进电机控制水听器沿 z 轴扫描测量声压分布,根据标称焦域内的声压极值点 $Q(0,0,z_1)$ 的声压极值情况分析换能器倾斜角 α 与焦域临界角 α_c 的关系,并判断 Q 点是否在实际声场焦域内.

当 Q 处的声压为极小值时, $\alpha > \alpha_c$, Q 点不在焦域内.当倾斜角度小于最大可测量倾斜角 α_{\max} 时, Q 点所在横截面穿过声场焦域,可采用双精度快速扫描法实现双平面内声压峰值点的精准定位,具体步骤如下:

(1)如图3所示,以 Q 点为中心建立垂直扫描平面 A ,采用低精度变邻域搜索法^[22-24]获得平面内的声压峰值点 $M_1(x_1, y_1, z_1)$,扫描步长由换能器焦域径向半峰全宽 $d = 0.703\lambda F/a$ 决定,要求粗扫步长 $s_1 < d/2$,精扫步长 $s_2 < d/20$.为了便于测量计算,具体步长在 $U = \{0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5\}$ mm中选取.然后以 Q 为中心、 s_1 为步长建立邻域,对邻域进行逐点扫描测量并寻找邻域内最大声压点,不断更新中心点位置,直到最大阶邻域内不存在高于中心点声压的点.

(2)以 M_1 为中心构建范围为 $4s_1 \times 4s_1$ 的垂直扫描平面 B ,采用高精度变邻域搜索法精准定位声压峰值点 $M_2(x_2, y_2, z_2)$,即以 M_1 为中心、 s_2 为步长建立邻域,具体步长仍在 U 中选取,精细扫描测量并寻找邻域内最大声压点,实现该平面内声压峰值点 M_2 的精确定位,其中 $z_2 = z_1$.

(3)将垂直扫描平面 B 沿 z 轴向换能器方向平移 $L/4$,构建垂直扫描平面 C ,进一步按照步骤(2)实现该平面内声压峰值点 $M_3(x_3, y_3, z_3)$ 的精确定位.

当标称焦域 z 轴 Q 处声压为极大值时, $\alpha < \alpha_c$, Q 点肯定在声场焦域内,因此可以直接以 Q 为中心构建小范围的垂直扫描平面 B ,并按照上述步骤(2)、(3)实现双平面内声压峰值点 M_2 和 M_3 的精准定位.

如图4所示,不论 Q 点声压为极大值还是极小值,均利用双平面内的声压峰值点 M_2 和 M_3 构建聚焦换能器的实际声轴 M_2M_3 ,无需精确测量聚焦换能器的中心位置,可以消除换能器外壳中心和换能器球面顶点位置差异的影响.沿实际声轴 $\frac{x-x_3}{x_2-x_3} = \frac{y-y_3}{y_2-y_3} = \frac{z-z_3}{z_2-z_3}$ 方向,以 M_2 为中心、 s_2 为步长,在 $[-F/2, F/2]$ 范围内进行高精度的一维扫描测量,得到实际焦点 $Q'(x_4, y_4, z_4)$.

然后,过实际焦点 Q' 在垂直于实际声轴的平面(焦平面)内分别沿方位角 β 为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 135° 方向构建四条轨迹方程

$$\begin{cases} (x_2-x_3)(x-x_4) + (y_2-y_3)(y-y_4) + (z_2-z_3)(z-z_4) = 0, \\ (y-y_4) \cos \beta = (x-x_4) \sin \beta. \end{cases} \quad (6)$$

并在焦平面内对其进行以 s_2 为细扫步长、长度为 $a/2$ 的高精度一维扫描测量.进一步,根据 Q' 计算得到换能器的实际倾斜角度为

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{|\mathbf{a}| |\mathbf{b}|} \right), \quad (7)$$

其中 $\mathbf{a} = (x_2-x_3, y_2-y_3, z_2-z_3)$ 和 $\mathbf{b} = (0, 0, z_4)$ 分别为实际声轴和 z 轴的方向向量, $\alpha' = \arctan(y_4/x_4)$ 为实际声轴相对于 x 轴的方位角.

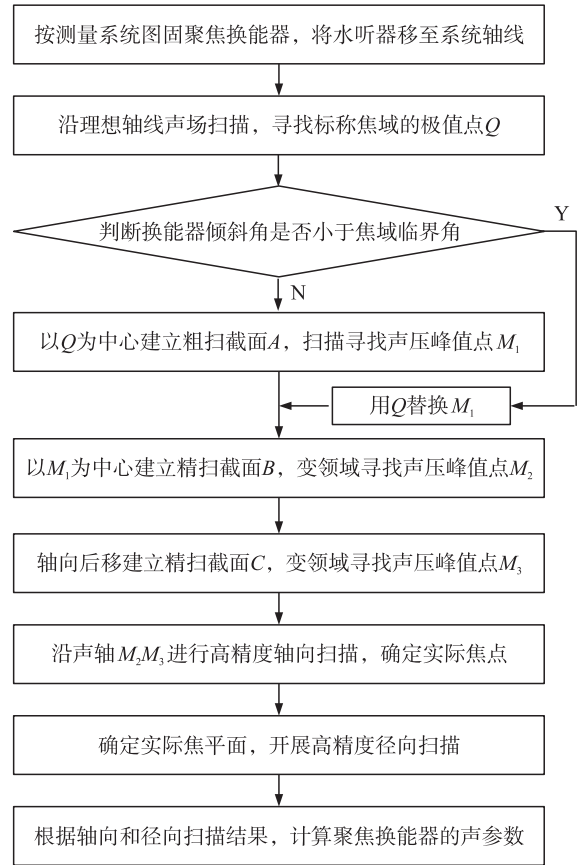


图4 聚焦换能器声场快速测量方法的流程图

Fig. 4 Flow chart of rapid field measurements method for focused transducers

最后,基于过实际声场焦点的径向和轴向声压分布,计算相应的声场参数,具体包括:(1)焦域的长轴尺寸.对所测量的轴向声压分布主瓣部分进行高斯拟合,并以焦点为中心计算 6 dB 衰减区域的径向距离.(2)焦域轴向次极大声压及衰减.从焦点(p_{\max})沿声轴向内查找第二声压极大值 p_{sm} ,用 $L_{\text{sm}} = 20\lg(p_{\text{sm}}/p_{\max})$ 计算轴向次极大的声压衰减.(3)焦平面内的-3 dB、-6 dB、-12 dB 宽度.将所测量的径向声压分布主瓣部分进行高斯拟合,以焦点为中心计算 3 dB、6 dB 和 12 dB 衰减区域的径向距离.(4)最大旁瓣声压及衰减.在焦平面内沿径向查找第二声压峰值 p_{asm} ,用 $L_{\text{asm}} = 20\lg(p_{\text{asm}}/p_{\max})$ 计算最大旁瓣衰减.(5)-6 dB 焦域面积 S .根据焦平面内测量的四条径向声压分布的-6 dB 宽度,计算其平均值作为焦域直径,从而计算得到焦域面积.(6)焦域声强和声功率.根据焦平面内的径向声压分布,利用 $I = p^2/(\rho c)$ 计算出每一点的声强,并用 $P = \iint_S I dS$.计算焦平面内的声功率.(7)焦平面对称性.根据 4 个径向声压分布的-3 dB、-6 dB 和-12 dB 宽度分别计算其误差,分析焦域声场的对称性.

2 系统构建与实验测量

三维扫描测量实验系统装置如图 5 所示.根据实验换能器标称参数,信号发生器(HMF2550, ROHDE&SCHWARZ, USA)输出中心频率 1 MHz,周期数 50,重复频率 100 Hz 的正弦周期信号,经功率放大器(BBA150, ROHDE&SCHWARZ, USA)放大和阻抗匹配后激励实验聚焦换能器($a = 30$ mm, $F = 75$ mm, $f = 1$ MHz).利用固定在三维电机上的针状水听器(直径 1 mm, SZA-1000, NCET, China)扫描测量声场声压,接收到的波形由数字示波器(TELEDYNE LECROY, WavePro 404HD, USA)采集并存储到计算机中,并根据校准特性获得声场的实际声压.

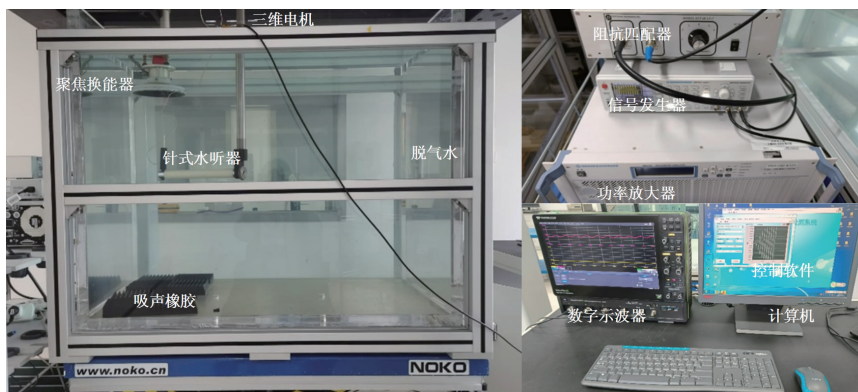


图 5 快速测量系统实验装置图

Fig. 5 Pictures of the experimental rapid measurements system

基于图 4 的流程,用 LabVIEW 研发了全自动测量和控制软件,通过聚焦换能器的标称参数设置,自动完成声场的快速扫描和参数计算.首先,通过沿 z 轴的一维快速扫描,得到如图 6 所示的两种倾斜角条件下的声压分布,证明聚焦换能器标称焦域内存在最大和最小声压,为倾斜角的大小判断和快速测量提供了重要依据.然后,截取标称焦域范围内的轴向声压分布进行高斯拟合,分别根据极值点声压对 z 的二阶导数的正负判断倾斜角与换能器临界角的关系,并使用双精度变邻域搜索法完成平面内的峰值声压点定位,倾斜角大于和小于临界角条件下平面 A、B 和 C 内的声压测量结果如图 7 所示.另外,在相同的条件下采用传统二维平面扫描,得到平面 A、B 和 C 内声压分布如图 8 所示,可见两种方法测量得到的峰值声压大小和位置几乎相同,证明双精度变

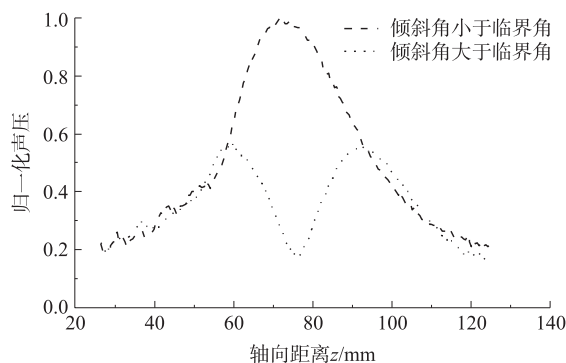


图 6 实验聚焦换能器在两种倾斜角度下沿 z 轴的声压分布(精度 0.5 mm)

Fig. 6 Axial pressure distributions along the z axis of the experimental focused transducer at two tilt angles (step 0.5 mm)

邻域搜索法声压峰值定位的准确性. 进一步,基于双平面内的声压峰值点,沿实际声轴 M_2M_3 进行扫描测量,得到如图 9(a) 所示的声压分布,其和仿真计算以及三维扫描结果基本一致,焦域位置和声压几乎相同,由于换能器的加工工艺原因,实验测量的轴向宽度略大于理论仿真结果. 焦平面内的 4 条高精度径向声压分布如 9(b) 所示,实验结果的主瓣几乎完全相同,仅旁瓣略有差异,证明实验换能器具有良好的对称性,同时证明快速测量方法的正确性和有效性.

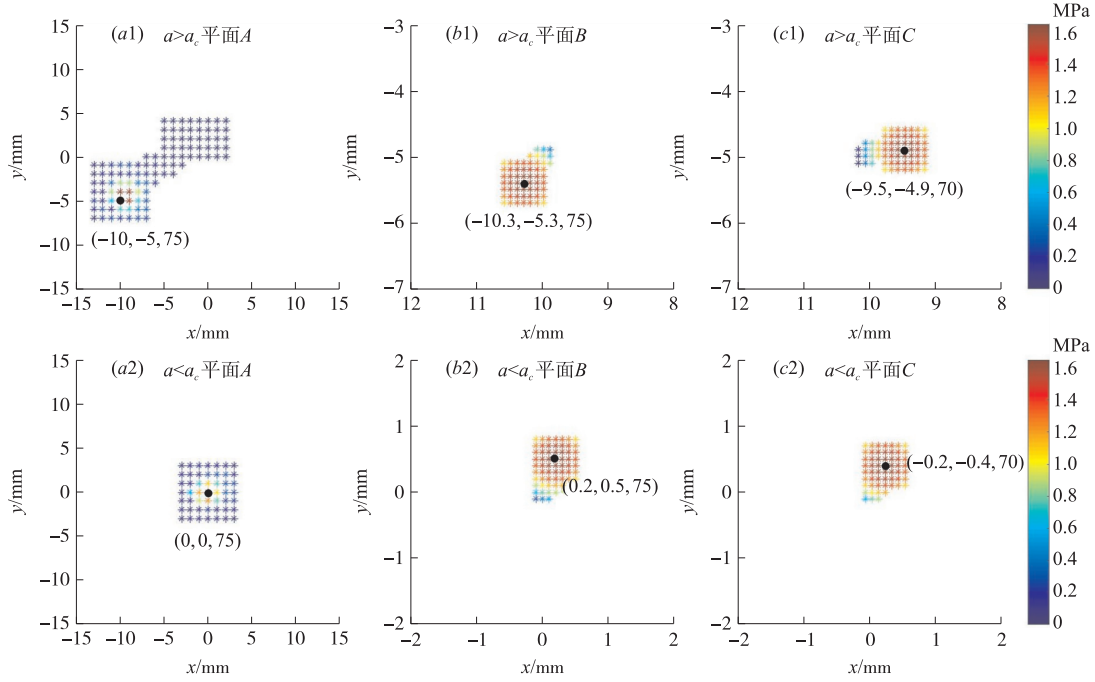


图 7 倾斜角大于和小于临界角条件下,采用双精度(1 和 0.1 mm)变邻域搜索法实现声压峰值点精确定位

Fig. 7 Accurate pressure peak locations based on the dual-precision

(1 and 0.1 mm) measurement in double planes, for the tilt angle greater and less than the critical angle

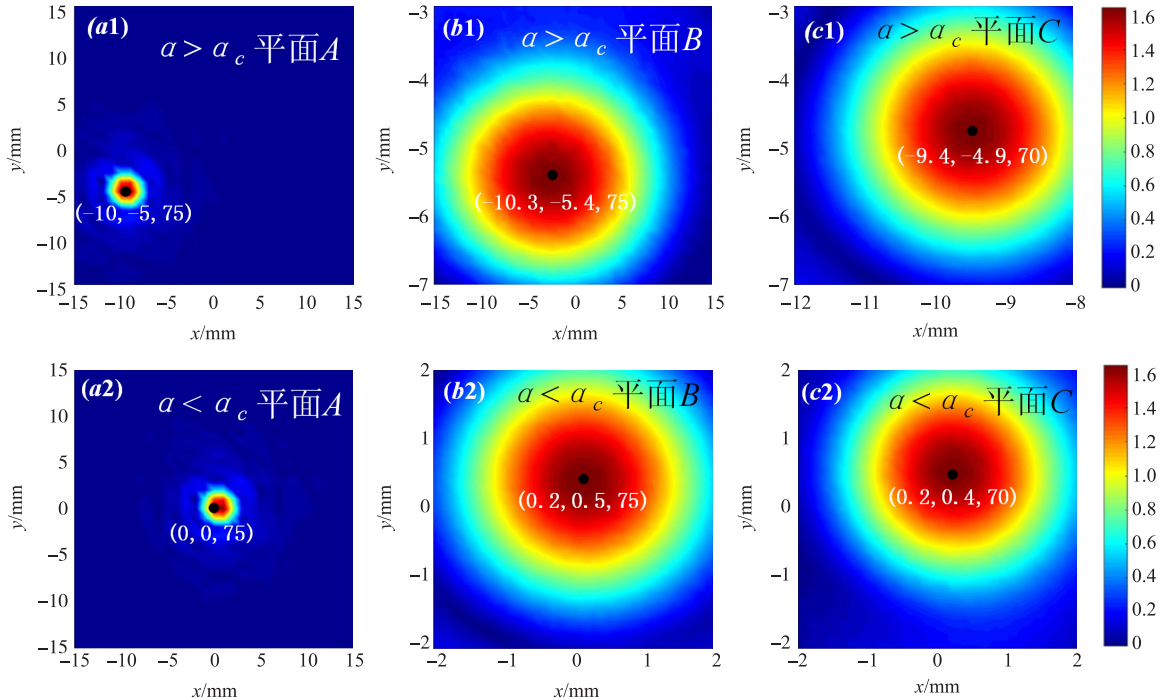


图 8 倾斜角大于和小于临界角条件下,采用双精度(1 和 0.1 mm)二维声场扫描得到的声压分布

Fig. 8 Pressure distributions obtained by the dual-precision

(1 and 0.1 mm) measurement in double planes, for the tilt angle greater and less than the critical angle

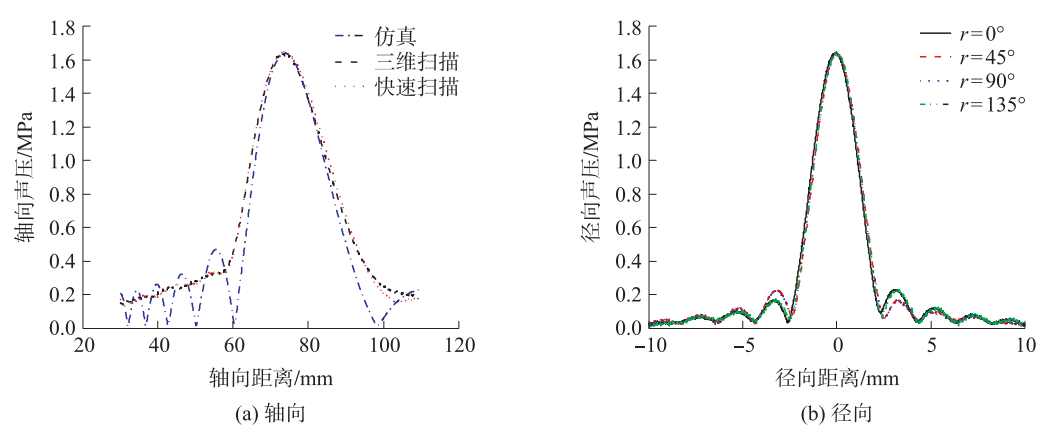


图 9 具有一定倾斜角换能器实际的声压分布实验结果(精度 0.1 mm)
Fig. 9 Actual pressure distributions for the experimental transducer with a tilt angle(step 0.1 mm)

3 实验数据及分析

基于所提出的快速扫描和传统三维扫描(范围为 $a \times a \times (F/2)$,等步长为 0.5 mm)方法对被测聚焦换能器进行声场测量,得到的声场焦域参数对比如表 1 所示,结果表明换能器的主要声学参数的测量误差较小,均在 10%甚至 5%以内,完全满足声学测量要求. 另外,所提出的快速测量法可以提高测量精度,同时大幅度减少了扫描点数,在保证测量结果的前提下缩短扫描时间.

表 1 实验换能器的快速扫描和传统三维扫描的测量结果比较

Table 1 Experimental results for the transducer achieved by the rapid measurement and traditional three-dimensional scanning methods

| 参数 | 三维扫描 | 快速扫描 | 误差 |
|----------------------|-----------|-----------|--------|
| 轴向尺寸/mm | 11.974 9 | 11.816 7 | 1.32 % |
| 径向-3 dB 宽度/mm | 1.005 9 | 0.987 5 | 1.83 % |
| 径向-6 dB 宽度/mm | 1.367 0 | 1.344 7 | 1.63 % |
| 径向-12 dB 宽度/mm | 1.834 7 | 1.779 6 | 3.01 % |
| 焦域面积/mm ² | 1.467 6 | 1.420 2 | 3.23 % |
| 最大旁瓣级/dB | -16.039 3 | -15.050 4 | 6.17 % |
| 轴向次极大级/dB | -14.022 2 | -13.052 8 | 6.91 % |
| 声功率/W | 2.69 | 2.560 0 | 4.83 % |

为了分析聚焦换能器快速检测方法的性能,对声场测量的精度和计算点数进行分析,结果如表 2 所示. 在本研究的实验测量中,在快速扫描和三维扫描精度分别为 0.1 mm 和 0.5 mm 条件下,测量结果基本相同,三维扫描的测量时间可以缩短时间 90 倍以上. 若将三维扫描改用变步长扫描方式^[25]以提高扫描精度,即先用 0.5 mm 的精度进行粗扫,找到焦域范围(4 mm×4 mm×26 mm)后以 0.1 mm 的步长进行精扫,尽管扫描精度提升至与快速扫描相同,且对三维扫描进行了优化,但扫描点数仍需约 68.6 万个,因此在保证相同测量精度前提下,快速测量速度可以提高两百倍以上,大幅降低测量时间和资源消耗,提高了聚焦换能器性能检验的效率.

表 2 三维扫描和快速扫描的扫描点数与扫描时间

Table 2 Scanning points and times for the rapid measurement and traditional three-dimensional scanning methods

| | | 三维扫描 | 快速扫描 | | | 三维扫描 | 快速扫描 |
|------|-----------|---------|-------|------|-----------|--------|--------|
| 扫描点数 | 精度 0.5 mm | 270 000 | 750 | 扫描时间 | 精度 0.5 mm | 37.5 h | 0.15 h |
| | 精度 0.1 mm | 686 000 | 2 800 | | 精度 0.1 mm | 95.3 h | 0.4 h |

本研究中,测量声场所用的针式水听器直径为 1 mm,扫描精度为 0.1 mm,所测声场分布误差较小,但仍可以通过使用更高灵敏度、更低失真的水听器,并缩短扫描步长(电机允许测量的最高精度为 5 μm)来获得更高的精度测量和准确性. 在测量前,根据聚焦换能器的规格和标称说明,选择适当的驱动参数,确保所选的驱动频率和功率在线性区域内,不超过聚焦换能器和水听器的额定限制,避免损坏水听器. 此外,检验测量的声功率是基于实验室的固定信号激励,若声压过大声场则会产生非线性,测量波形失真,因

此在快速测量的基础上,针对非线性测量结果进行有效处理以准确计算出非线性条件下的声功率将具有重要的意义。

4 结论

本文针对传统三维扫描测量存在的问题,提出了一种基于双平面双精度测量的聚焦换能器声场特性快速检验方法。首先,基于聚焦换能器的声辐射理论,建立倾斜换能器的声场测量模型,分析了 z 轴标称焦域内的极值情况,确定倾斜程度和粗扫平面。然后,采用双平面双精度快速扫描实现测量平面的峰值声压点的精准定位,无需准确测量换能器中心即可准确计算出实际声轴方程与倾斜角度,通过高精度的声场轴线扫描和焦点定位,以及焦平面内的径向扫描。最后,计算出换能器的性能参数。所提出的快速测量方法可以在保证测量精度的前提下提高测量速度百倍以上,完全满足换能器的测量要求,在超声换能器的检测领域具有重要应用价值,为聚焦超声治疗仪器的检验提供了新技术。

[参考文献] (References)

- [1] GÉLAT P, SHAW A. Relationship between acoustic power and acoustic radiation force on absorbing and reflecting targets for spherically focusing radiators[J]. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2015, 41(3): 832–844.
- [2] RISCHMANN P, GELET A, RICHE B, et al. Focal high intensity focused ultrasound of unilateral localized prostate cancer: A prospective multicentric hemiablation study of 111 patients[J]. *European Urology*, 2017, 71(2): 267–273.
- [3] COTERO V, GRAF J, MIWA H, et al. Stimulation of the hepatoportal nerve plexus with focused ultrasound restores glucose homeostasis in diabetic mice, rats and swine[J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2022, 31(6): 683–705.
- [4] 寿文德, 余立立, 胡济民, 等. 使用辐射力天平的超声治疗换能器的电声特性测量方法研究[J]. *声学技术*, 2012, 31(2): 107–116.
- [5] WILKENS V. Basic ultrasonic field measurement: Overview of standardized methods and expected developments[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, 141(5): 4007.
- [6] YU L J, ZHENG H F. Research on sound power measurement of multi-element ultrasonic focusing transducer based on cross-spectrum method[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(11): 115105.
- [7] 郭成成, 姚磊, 郑慧峰, 等. 基于近场互谱法的医用聚焦超声场多参数检测[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(3): 39–46.
- [8] PARSONS J E, CAIN C A, FOWLKES J B. Cost-effective assembly of a basic fiber-optic hydrophone for measurement of high-amplitude therapeutic ultrasound fields[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 119(3): 1432–1440.
- [9] HE L P, ZHU F H, CHEN Y M, et al. Ultrasonic power measurement system based on acousto-optic interaction[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(5): 231–239.
- [10] SHEN B, ZENG B S, LIU X J, et al. Accuracy optimization method of ultrasonic power measurement system based on acousto-optic effect[J]. *Optical Review*, 2021, 28(2): 207–214.
- [11] XU Z, CHEN H, YAN X, et al. Quantitative calibration of sound pressure in ultrasonic standing waves using the Schlieren method[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20401–20409.
- [12] PRADERE C, GROZ M, ABISSET-CHAVANNE E, et al. 3D reconstruction of thermal volumetric sources from surface temperature fields measured by infrared thermography[C]//*Proceedings of Thermosense: Thermal Infrared Applications XLII*. Yokohama, Japan: SPIE, 2020, 11309: 114090L.
- [13] 沈国峰, 余瑛, 张鹤林, 等. 红外热成像聚焦超声声场测量方法综述[J]. *声学技术*, 2019, 38(1): 1–4.
- [14] KHOKHLOVA V A, SHMELEVA S M, GAVRILOV L R, et al. Infrared mapping of ultrasound fields generated by medical transducers: Feasibility of determining absolute intensity levels[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 134(2): 1586–1597.
- [15] WEN S Z, JUN H B, HONG G C, et al. Organic axial stretching DFB fiber laser hydrophones: Theoretical and experimental study of eccentricity[J]. *AIP Advances*, 2022, 12(5): 055026.
- [16] ALDIABAT H, O'BRIEN P D, LIU D L, et al. Wideband transskull refocusing of ultrasound beams using dual-mode ultrasound arrays: Ex vivo results[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 143(3): 1731.
- [17] MARHENKE T, SANABRIA S J, CHINTADA B R, et al. Acoustic field characterization of medical array transducers based on unfocused transmits and single-plane hydrophone measurements[J]. *Sensors*, 2019, 19(4): 863–880.

(下转第 49 页)

- [24] 张凯华,臧明伍,张哲奇,等. 微波复热时间对预制猪肉饼过熟味、脂肪氧化和水分布特性的影响[J]. 食品科学, 2020,41(9):50-56.
- [25] 郇延军,周光宏,徐幸莲. 脂类物质在火腿风味形成中的作用[J]. 食品科学,2004,25(1):186-190.
- [26] 章辰飞,谢晓鸿,汪庆昊,等. 云锦杜鹃不同花期挥发性成分的 HS-SPME-GC-MS 检测与主成分分析[J]. 广西植物, 2020,40(7):1033-1045.
- [27] 范睿,郝朝运,秦晓威,等. 胡椒叶片挥发性成分 HS-SPME-GC/MS 分析[J]. 热带作物学报,2015,36(12):2276-2282.
- [28] OLIVEIRA J M,FARIA M,SÁ F,et al. C6-alcohols as varietal markers for assessment of wine origin[J]. Analytica Chimica Acta,2005,563(1):300-309.
- [29] 卓志航,杨伟,徐丹萍,等. 云斑天牛寄主核桃树皮及树叶的挥发性成分[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016,44(5):205-214.

[责任编辑:严海琳]

(上接第 27 页)

- [18] MARTIN E,TREEBY B. Investigation of the repeatability and reproducibility of hydrophone measurements of medical ultrasound fields[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,2019,145(3):1270-1282.
- [19] YU L,YU L,ZHENG H,et al. Research on sound power measurement of multi-element ultrasonic focusing transducer based on cross-spectrum method[J]. Review of Scientific Instruments,2021,92(11):115105.
- [20] HERRIN D W,MARTINUS F,WU T W,et al. An assessment of the high frequency boundary element and Rayleigh integral approximations[J]. Applied Acoustics,2006,67(8):819-833.
- [21] JIANG Y J,ZHANG H,QIU Y M,et al. Givens coordinate descent methods for rotation matrix learning in trainable embedding indexes[J/OL]. arXiv Preprint arXiv:2203.05082,2022.
- [22] GRULER A,QUINTERO-ARAUJO C,CALVET L,et al. Waste collection under uncertainty:a simheuristic based on variable neighborhood search[J]. European Journal of Industrial Engineering,2017,11(1):228-255.
- [23] FAN C L,FU Q,LONG G Z,et al. Hybrid artificial bee colony algorithm with variable neighborhood search and memory mechanism[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics,2018,29(2):405-414.
- [24] KALATZANTONAKIS P,SIFALERAS A,SAMARAS N. A reinforcement learning-Variable neighborhood search method for the capacitated Vehicle Routing Problem[J]. Expert Systems with Applications,2022,213:118812.
- [25] 江湛,白景峰,余瑛. 应用 LabVIEW 的聚焦声场测量系统[J]. 中国医疗器械杂志,2014,38(3):181-185.

[责任编辑:陈 庆]