

◇ 研究报告 ◇

超声换能器辐射特性的优化*

张雪晴¹ 尹冠军^{1,2†} 张家裕¹ 冉建清¹ 杨雪冰¹ 郭建中¹

(1 陕西师范大学物理学与信息技术学院 西安 710119)

(2 陕西师范大学现代教育技术教育部重点实验室 西安 710119)

摘要: 匹配层和背衬层是换能器的重要组成部分,对换能器特性有重要影响。针对发射型换能器,基于有/无匹配层和空气/树脂背衬两种条件组合,该文研究了匹配层与背衬层对换能器辐射特性的影响。结果表明,负载材料为水时,空气背衬换能器相较于树脂背衬换能器声能辐射效率更高;匹配层可以提高换能器的主瓣能量,抑制旁瓣能量及旁瓣数量。因此,针对发射型换能器的设计,背衬材料的选择应遵循与压电材料的阻抗差异越大越优的原则;匹配层的合理设计不仅可以提高超声换能器的声能辐射效率,还可以提高主瓣旁瓣峰值比,使声能更集中。

关键词: 换能器;匹配层;背衬材料

中图分类号: O426

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2023)03-0540-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2023.03.012

Optimization of radiation characteristics of ultrasonic transducer

ZHANG Xueqing¹ YIN Guanjuan^{1,2} ZHANG Jiayu¹ RAN Jianqing¹

YANG Xuebing¹ GUO Jianzhong¹

(1 College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

(2 Key Laboratory of Modern Teaching Technology of Ministry of Education, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: The matching layer and backing layer are important components of the transducer, which have important influence on the characteristics of the transducer. In this paper, the effects of matching layer and backing layer on radiation characteristics of transmitting transducer are studied based on the combination of two conditions: with/without matching layer and with air/resin backing layer. The results show that the acoustic radiation efficiency of air backed transducer is higher than that of resin backed transducer when the load material is water. The matching layer can improve the main lobe energy of the transducer and inhibit the side lobe energy and the number of side lobes. Therefore, for the design of transmitting transducers, the selection of backing materials should follow the principle of the greater the impedance difference between piezoelectric materials and the better. The rational design of matching layer can not only improve the radiation efficiency of ultrasonic transducer, but also improve the peak ratio of main lobe and side lobe, so that the sound energy is more concentrated.

Keywords: Transducer; Matching layer; Backing material

2022-01-13 收稿; 2022-03-28 定稿

*国家自然科学基金项目 (11727813, 12004237, 12034005), 中国博士后科学基金项目 (2020M683416), 陕西省科学技术协会青年人才托举计划项目 (20220523)

作者简介: 张雪晴 (1996-), 女, 黑龙江鹤岗人, 硕士研究生, 研究方向: 医学超声。

†通信作者 E-mail: yinchamp@snnu.edu.cn

0 引言

超声技术在生物医学^[1-5]、工业^[6-7]等许多领域被广泛应用,而换能器的辐射特性直接决定了其应用的精度和效果。越来越多的精准应用对换能器的辐射效率和指向性提出了更高的要求,匹配层和背衬层对换能器的辐射性能有重要影响。

近年来,各国学者对换能器的匹配层和背衬层的设计和材料选择进行了大量研究。Zhou^[8]、Zhang等^[9]用氧化铝/环氧树脂纳米复合材料作为匹配层,解决了高频超声换能器的阻抗匹配问题。Tiefensee等^[10]提出了纳米复合氧化铈聚合物匹配层,并通过理论及实验证明了使用该匹配层可以使100 MHz换能器的电压幅度增加约100%。Manh等^[11]设计制造了用于15 MHz超声换能器的硅聚合物1-3复合材料声匹配层。Fei等^[12]基于质量弹簧方法和传输线理论分别制作100 MHz金属-聚合物匹配层(聚对二甲苯-金子层)铌酸锂换能器,验证了两种设计方法可以有效实现高频换能器的阻抗匹配。Li等^[13]提出了一种二氧化硅-环氧树脂复合晶胞组成的各向异性锥形结构声学超材料匹配层。该匹配层中二氧化硅锥体的体积分数随着远离压电材料而减小,可以有效地实现声阻抗沿超声传播方向逐渐变化。实验及仿真证明,配备这种声学超材料匹配层的换能器带宽远优于传统换能器的带宽。State等^[14]用实验证明新开发的聚氨酯复合材料在热尺寸稳定性以及声阻尼性能方面都优于环氧树脂材料的背衬。Amini等^[15]设计并制造了一种由多孔陶瓷材料制成的新型超声换能器背衬材料。通过在陶瓷基体中引入不同体积分数和不同尺寸的孔,可以获得最佳的声阻抗和衰减,与当前类型的背衬元件相比,新设计的主要优势是在温度高达700℃~800℃时的稳定性,以及与压电元件的热膨胀兼容性。该设计和制造过程可用于制造具有指定中心频率和信号带宽的各种换能器的背衬元件。探索能够实现换能器到负载有效过渡的匹配层是换能器研究的重要内容。

针对匹配层和背衬材料对发射型超声换能器辐射特性的影响,基于有/无匹配层和空气/树脂背衬两种条件的随机组合,本文设计了4种换能器,分别为无匹配层树脂背衬换能器、无匹配层空气背衬换能器、有匹配层树脂背衬换能器以及有匹配层空

气背衬换能器。首先,基于超声换能器的单匹配层声阻抗值计算公式,得到匹配层的声阻抗理论值。然后,基于有限元仿真软件,对4种换能器的辐射声场进行数值计算,并得到4种换能器的指向特性。最后,基于实验室前期工作中对匹配层材料制作比例和声特性阻抗的测试结果,制作了与仿真参数对应的4种换能器,并通过实验测得4种换能器的声场分布。通过系统地分析仿真与实验结果,讨论了匹配层和背衬材料对换能器辐射性能的影响。

1 换能器声场辐射仿真研究

1.1 匹配层设计与制作

常规的超声换能器结构包括匹配层、压电晶片及背衬层,如图1所示。

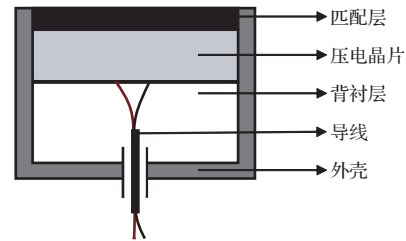


图1 超声换能器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic transducer structure

基于串并联机械阻抗相等理论,空气背衬超声换能器的单匹配层声特性阻抗值 Z_M 的计算公式为^[16-17]

$$Z_M = \sqrt[3]{2Z_0Z_L^2}, \quad (1)$$

其中, Z_0 为压电元件的声特性阻抗, Z_L 为负载的声特性阻抗。

本文选用的压电晶片材料为PZT-8,密度 $\rho_1 = 7600 \text{ kg/m}^3$,声速 $c_1 = 3500 \text{ m/s}$,特性阻抗 $Z_0 = \rho_1 c_1 = 26.6 \text{ MRayl}$,中心频率 $f = 500 \text{ kHz}$;换能器的目标负载为水或声特性阻抗接近水的生物组织,密度 $\rho_2 = 1000 \text{ kg/m}^3$,声速 $c_2 = 1450 \text{ m/s}$,特性阻抗 $Z_L = \rho_2 c_2 = 1.45 \text{ MRayl}$;根据公式(1)计算得到匹配层的声特性阻抗值为 $Z_M = 4.82 \text{ MRayl}$ 。

通常很难找到一种特性阻抗恰好等于理论值的自然材料,因此在换能器的设计中匹配层材料更多为人工复合材料。本文在前期工作中选择粒径为 $2 \mu\text{m}$ 的钨粉作为填料,环氧树脂E51和胺类固化剂

W93 以 10 : 3 的质量比混合作为基体, 测试掺入不同质量分数的钨粉时匹配层的密度及声速, 以此获得匹配层的声特性阻抗, 如表 1 所示。测试结果表明, 当掺入钨粉质量分数为 45% 时, 匹配层的密度 $\rho_3 = 2063 \text{ kg/m}^3$, 声速 $c_3 = 2247 \text{ m/s}$, 特性阻抗 $Z = \rho_3 c_3 = 4.64 \text{ MRayl}$, 与计算得到的理论值相近。因此, 本文以 ρ_3 和 c_3 作为仿真中匹配层的声参数, 并选择占匹配层质量 45% 的钨粉填料用于实验中换能器的匹配层制作。

1.2 4 种换能器声场辐射仿真设置

基于有限元方法, 研究了 4 种换能器的声场辐射情况。仿真模型如图 2 所示, 图 2(a)~图 2(d) 分别为无匹配层树脂背衬换能器、无匹配层空气背衬换能器、有匹配层树脂背衬换能器、有匹配层空气背衬换能器的仿真模型。其中匹配层的半径为 10 mm, 厚度为 $h = c_3/(4f) = 1.123 \text{ mm}$ ^[17]。匹配层材料的声速和密度为 c_3 与 ρ_3 。压电晶片的半径为 10 mm, 高度 4 mm, 材料为 PZT-8, 中心频率

500 kHz。背衬层的半径为 10 mm, 高度 7 mm, 材料分为空气或环氧树脂两种情况, 其中空气的声速为 343 m/s, 密度为 1.205 kg/m³; 环氧树脂的声速为 2368 m/s, 密度为 1170 kg/m³。换能器的激励信号为正弦波, 电压振幅为 10 V, 信号频率为 0.5 MHz。仿真中的负载为水, 计算范围为对应波长的 40 倍。

1.3 4 种换能器声场辐射的仿真结果

1.3.1 换能器声场分布

仿真计算得到各换能器的声强分布如图 3 所示。图 3(a)~图 3(d) 分别为无匹配层树脂背衬换能器、无匹配层空气背衬换能器、有匹配层树脂背衬换能器、有匹配层空气背衬换能器的声强分布图。

1.3.2 换能器中心轴线声强分布

基于仿真得到 4 种换能器中心轴线上的声强变化如图 4 所示, 图 4(a)~图 4(d) 分别为无匹配层树脂背衬换能器、无匹配层空气背衬换能器、有匹配层树脂背衬换能器、有匹配层空气背衬换能器的结果。

表 1 样品密度、声速及特性阻抗结果

Table 1 Sample density, sound velocity and characteristic impedance results

质量分数/%	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
密度/(kg·m ⁻³)	1137	1260	1333	1396	1480	1570	1702	1800	1872	2063	2347	2532	2729	3083	3521	4245	4936
声速/(m·s ⁻¹)	2799	2701	2699	2603	2574	2517	2492	2449	2437	2247	2202	2175	2143	2130	2032	1936	1897
特性阻抗/MRayl	3.18	3.40	3.60	3.63	3.81	4.15	4.24	4.41	4.56	4.64	5.17	5.51	5.68	6.57	7.12	8.22	10.0

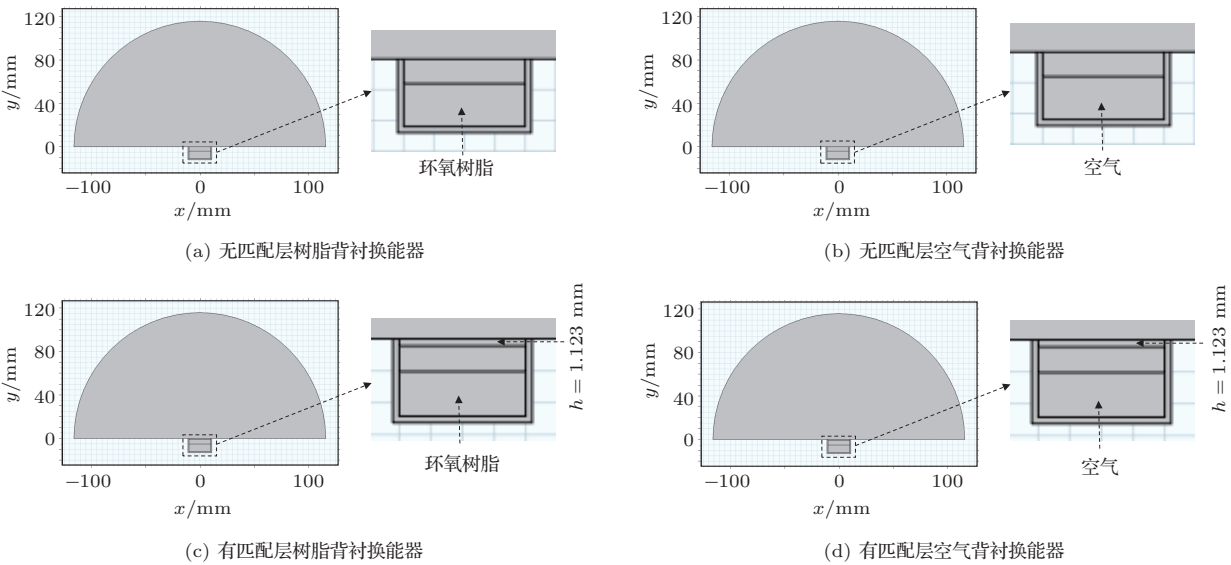


图 2 超声换能器声场仿真模型

Fig. 2 Sound field simulation model of ultrasonic transducer

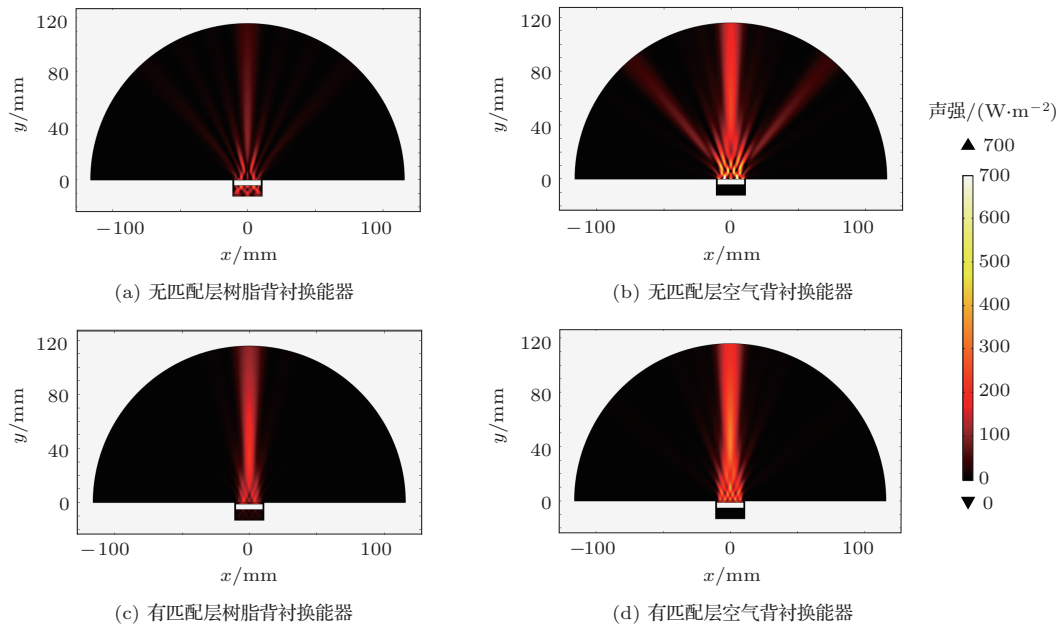


图3 超声换能器声场分布图

Fig. 3 Sound field distribution of ultrasonic transducer

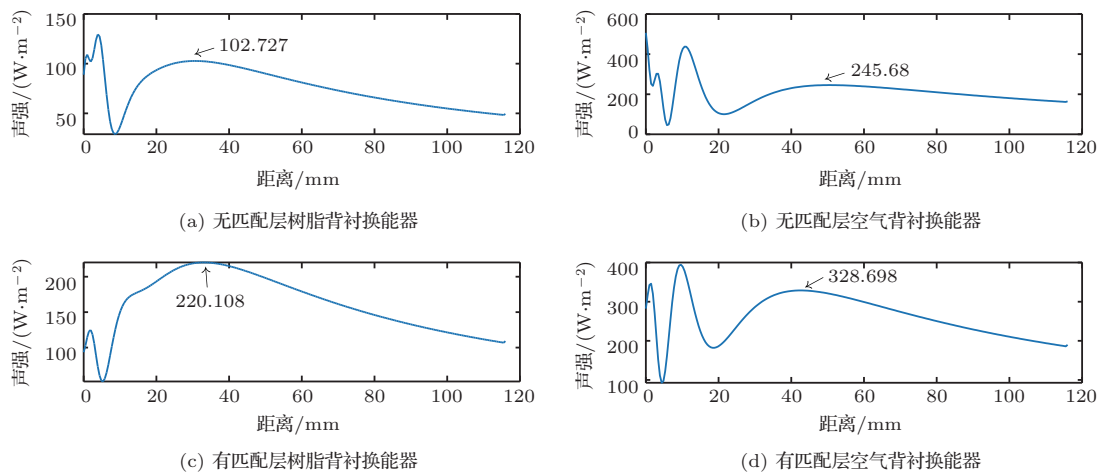


图4 超声换能器中心轴线声强分布

Fig. 4 Distribution of acoustic intensity on the central axis of ultrasonic transducer

由图4可以得到各换能器在远近场临界位置处的声强大小,其中无匹配层树脂背衬换能器(图4(a))为 107.727 W/m^2 ;无匹配层空气背衬换能器(图4(b))为 245.680 W/m^2 ;有匹配层树脂背衬换能器(图4(c))为 220.108 W/m^2 ;有匹配层空气背衬换能器(图4(d))为 328.698 W/m^2 。

1.3.3 换能器空间指向性

基于仿真得到4种换能器的声场指向性如图5所示。图5(a)~图5(d)分别为无匹配层树脂背衬换能器、无匹配层空气背衬换能器、有匹配层树

脂背衬换能器、有匹配层空气背衬换能器的指向性图。声压级参考压力设置为水的参考压力 $P_{\text{ref,SPL}} = 1 \mu\text{Pa}$ 。

可以得到无匹配层树脂背衬换能器(图5(a))的主瓣为 189.506 dB ,旁瓣为 182.915 dB ;无匹配层空气背衬换能器(图5(b))的主瓣为 195.045 dB ,旁瓣为 188.595 dB ;有匹配层树脂背衬换能器(图5(c))的主瓣为 192.954 dB ,旁瓣为 170.811 dB ;有匹配层空气背衬换能器(图5(d))的主瓣为 195.390 dB ,旁瓣为 178.528 dB 。

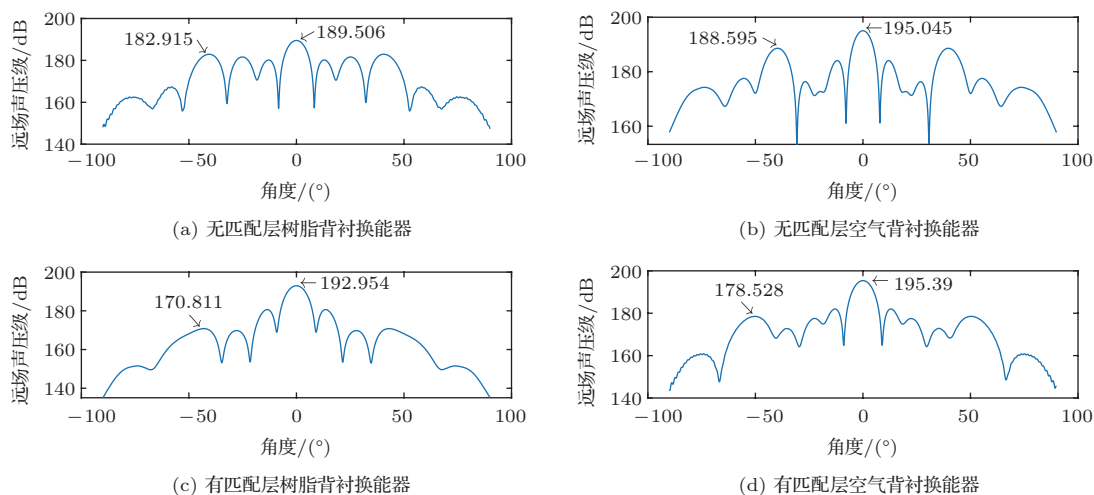


图5 超声换能器指向性

Fig. 5 Directivity of ultrasonic transducer

2 实验研究

制作了与仿真参数相同的4种换能器, 每种换能器均制作了2个样品, 其中压电陶瓷的半径为10 mm, 厚度为4 mm, 如图6所示。并搭建了不同的实验系统测量了换能器的声功率及声场分布。

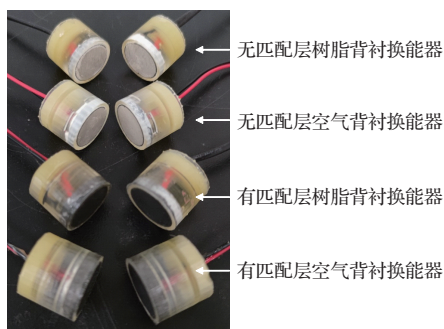


图6 超声换能器实物图

Fig. 6 Physical picture of ultrasonic transducer

2.1 实验测量换能器辐射声功率

测量声功率的实验装置示意图如图7所示。信号发生器(TELEDYNE T3AFG120)输出频率 $f = 500$ kHz、电压峰峰值为5 Vpp的连续波正弦信号, 经过功率放大器(ATA-2022, Agitek)将电压峰峰值放大到20~100 V激励换能器发出超声波, 并使用超声功率计(美国 Ohmic UPM-DT-1000PA)测量出在上述激励电压下换能器的声功率大小, 其中示波器(HDO4104A-MS, TELEDYNE LECROY)用来监测加载到换能器的电压信号。

利用搭建的测试系统测得了4种换能器的声功率随激励电压的变化关系, 如图8所示。其中, 相同图形代表同种类型换能器, 红色、黑色两种不同颜色的线代表不同样品。

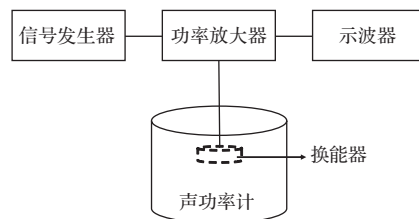


图7 声功率测量装置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of sound power measuring device

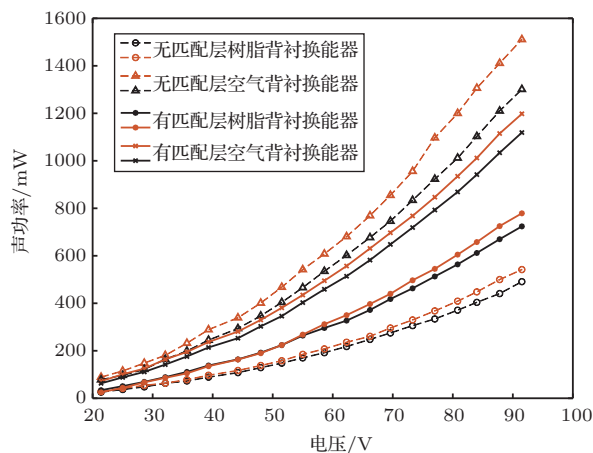


图8 超声换能器声功率测量

Fig. 8 Measurement of acoustic power of ultrasonic transducer

2.2 实验扫描换能器声场分布

搭建声场扫描实验平台装置示意图如图9所示。信号发生器(TELEDYNE T3AFG120)发出重复频率100 Hz、中心频率 $f = 500$ kHz、电压峰值为5 V_{pp}的调制正弦脉冲信号,通过功率放大器(ATA-2022, Agitek)将信号电压峰峰值放大至36.4 V激励换能器发出超声波。针式水听器(SN2876, Precision Acoustics)将接收到的声信号通过超声C扫系统(加拿大TecScan-LISU-3)转换为电信号,由计算机处理后最终转换为图像信息显示在计算机上。实验中设置换能器的中心轴向为 x 轴,扫描区域为 xz 面,大小为230 mm $\times$ 100 mm的横截面, x 、 z 方向步进均为1 mm,扫描速度为17 mm/s。

利用搭建的声场扫描实验平台对4种换能器进行声场扫描,扫描后的结果如图10所示。图10(a)~图10(d)分别为无匹配层树脂背衬换能器、无匹配层空气背衬换能器、有匹配层树脂背衬换能器、有匹配层空气背衬换能器的声场分布图。

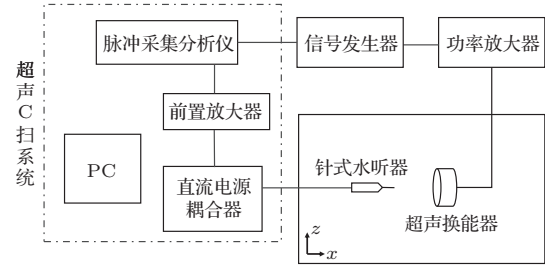


图9 声场扫描装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of sound field scanning device

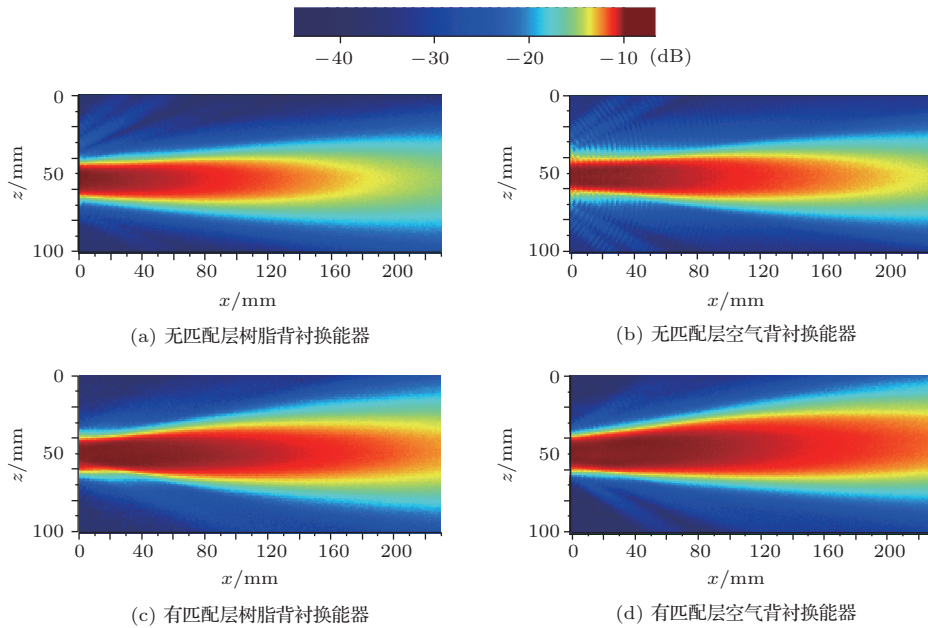


图10 超声换能器声场扫描

Fig. 10 Sound field scanning of ultrasonic transducer

3 分析与讨论

3.1 背衬材料对换能器辐射声场的影响

从仿真结果(图3、图4、图5)可以看到,无论换能器有/无匹配层,空气背衬换能器(图3(b)和图3(d))声能量几乎不向背衬层传播,树脂背衬换能器(图3(a)和图3(c))有一部分能量向背衬层传播,空气背衬换能器在负载中的辐射声强高于树脂背衬换能器;空气背衬换能器(图4(b)和图4(d))相较于树脂背衬换能器(图4(a)和图4(c))

可以大幅度提高远近场临界位置的最大声强,其中无匹配层空气背衬换能器(图4(b))远近场临界位置的最大声强为245.680 W/m²,相较于无匹配层树脂背衬换能器(图4(a)) 107.727 W/m²提高了128.1%,有匹配层空气背衬换能器(图4(d)) 328.698 W/m²相较于有匹配层树脂背衬换能器(图4(c)) 220.108 W/m²提高了49.3%;空气背衬换能器(图5(b)和图5(d))相较于树脂背衬换能器

(图5(a)和图5(c))可以提高主瓣和旁瓣的声压级峰值,其中无匹配层空气背衬换能器(图5(b))的主瓣195.045 dB和旁瓣188.595 dB相较于无匹配层树脂背衬换能器(图5(a))的主瓣189.506 dB和旁瓣182.915 dB分别提高了2.9%和3.1%;有匹配层空气背衬换能器(图5(d))的主瓣195.390 dB和旁瓣178.528 dB相较于有匹配层树脂背衬换能器(图5(c))的主瓣192.954 dB和旁瓣170.811 dB分别提高了1.3%和4.5%。实验结果(图8)也表明,当激励电压相同时,空气背衬换能器的声功率要高于树脂背衬换能器的声功率。

因此,无论换能器有/无匹配层,空气背衬均可以提高声辐射效率。其原因是空气背衬与换能器压电晶片的声阻抗差异大,声波在压电晶片与空气背衬的分界面处几乎完全被反射回压电晶片方向,不向空气背衬方向辐射,使声能利用率得到提高。

3.2 匹配层对换能器辐射声场的影响

3.2.1 匹配层对辐射效率的影响

从仿真结果(图3、图4)可以看到,无论换能器的背衬材料为环氧树脂/空气,有匹配层的换能器(图3(c)和图3(d))与无匹配层换能器(图3(a)和图3(b))相比,声能前向辐射效率增加,且对于树脂背衬换能器,添加匹配层后声能向背衬层传播的能量明显减弱;有匹配层的换能器(图4(c)和图4(d))相较于无匹配层的换能器(图4(a)和图4(b))可以大幅度提高远近场临界位置的声强,其中有匹配层树脂背衬换能器(图4(c)) 220.108 W/m^2 相较于无匹配层树脂背衬换能器(图4(a)) 107.727 W/m^2 提高了104.3%,有匹配层空气背衬换能器(图4(d)) 328.698 W/m^2 相较于无匹配层空气背衬换能器(图4(b)) 245.680 W/m^2 提高了33.8%。

实验结果(图8)显示当激励电压相同时,对于树脂背衬换能器,有匹配层的换能器比无匹配层的换能器的辐射声功率高;但对于空气背衬换能器,有匹配层的换能器比无匹配层的换能器的辐射声功率低。这一反常现象的原因是换能器的背衬材料为空气时,已经极大提高了声能辐射效率;因为仿真中设置的匹配层是无衰减的,所以仿真中的空气背衬换能器添加匹配层后声能辐射效率提高,而实验中制作的匹配层具有一定的衰减系数,所以实验中空气背衬换能器添加匹配层后声能反而有略微减小。

因此,无论换能器的背衬材料为环氧树脂/空气,添加匹配层均可以提高换能器的声能辐射效率。原因是匹配层可以使换能器与负载的声阻抗得到有效过渡,提高向负载方向辐射声能效率,声能利用率得到显著提高。在实验过程中,还发现随着激励电压的增大,测量时间的增长,无匹配层的换能器声功率波动较大,有匹配层的换能器声功率相对稳定。

3.2.2 匹配层对指向性的影响

从仿真结果(图3、图5)可以看到,无论换能器的背衬材料为环氧树脂/空气,无匹配层换能器(图3(a)和图3(b))有明显的旁瓣,而有匹配层换能器(图3(c)和图3(d))旁瓣数量明显减少;有匹配层的换能器(图5(c)和图5(d))相较于无匹配层的换能器(图5(a)和图5(b))可以提高主瓣峰值,压缩旁瓣峰值,其中有匹配层树脂背衬换能器(图5(c))的主瓣192.954 dB和旁瓣170.811 dB相较于无匹配层树脂背衬换能器(图5(a))的主瓣189.506 dB和旁瓣182.915 dB,主瓣提高了1.8%,旁瓣降低了6.6%,有匹配层空气背衬换能器(图5(d))的主瓣195.390 dB和旁瓣178.528 dB相较于无匹配层空气背衬换能器(图5(b))的主瓣195.045 dB和旁瓣188.595 dB,主瓣提高了0.2%,旁瓣降低了5.3%;实验结果(图10)也表明,有匹配层的换能器(图10(c)和图10(d))相较于无匹配层的换能器(图10(a)和图10(b))旁瓣被抑制。

因此,无论换能器的背衬材料为环氧树脂/空气,添加匹配层均可以改善换能器空间指向性,这一特性可以为发射/检测两用的中低强度超声换能器设计提供技术参考。

4 结论

本文主要研究匹配层和背衬层对超声换能器声场特性的影响,由仿真及实验结果可以得出以下结论:(1)背衬材料的特性阻抗与压电材料的特性阻抗差异越大,换能器的声能效率越高;(2)匹配层既可以提高换能器的声能辐射效率,又可以提高主瓣旁瓣峰值比,改善换能器空间指向性,使声能更为集中;(3)特别是针对空气背衬换能器,匹配层更重要的作用是提高换能器的空间指向性。根据本文的研究结果,在制作换能器时,背衬材料应选用与压电材料特性阻抗值差异大的材料;添加合适的匹配层

不仅可以提高换能器的声辐射效率,而且可以改善换能器的空间指向性,这一特性可以为发射/检测两用的中低强度超声换能器设计提供理论基础,提高换能器应用效果。

参 考 文 献

- [1] Huang X W, Niu L L, Meng L, et al. Transcranial low-intensity pulsed ultrasound stimulation induces neuronal autophagy[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2021, 68(1): 46–53.
- [2] Ye J, Tang S Y, Meng L, et al. Ultrasonic control of neural activity through activation of the mechanosensitive channel MscL[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(7): 4148–4155.
- [3] Errico C, Pierre J, Pezet S, et al. Ultrafast ultrasound localization microscopy for deep super-resolution vascular imaging[J]. *Nature*, 2015, 527(7579): 499–502.
- [4] Li P, Yang X B, Yin G J, et al. Skeletal muscle fatigue state evaluation with ultrasound image entropy[J]. *Ultrasonic Imaging*, 2020, 42(6): 235–244.
- [5] Zhou H, Niu L L, Xia X X, et al. Wearable ultrasound improves motor function in an MPTP mouse model of Parkinson's disease[J]. *IEEE Transactions on Bio-medical engineering*, 2019, 66(11): 3006–3013.
- [6] Chaki S, Bourse G. Guided ultrasonic waves for non-destructive monitoring of the stress levels in prestressed steel strands[J]. *Ultrasonics*, 2009, 49(2): 162–171.
- [7] Alobaidi W M, Alkuam E A, Al-Rizzo H M, et al. Applications of ultrasonic techniques in oil and gas pipeline industries: a review[J]. *American Journal of Operations Research*, 2015, 5(4): 274–287.
- [8] Zhou Q F, Cha J H, Huang Y H, et al. Alumina/epoxy nanocomposite matching layers for high-frequency ultrasound transducer application[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2009, 56(1): 213–219.
- [9] Zhang R, Cao W W, Zhou Q F, et al. Acoustic properties of alumina colloidal/polymer nano-composite film on silicon[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2007, 54(3): 467–469.
- [10] Tiefensee F, Becker-Willinger C, Heppe G, et al. Nanocomposite cerium oxide polymer matching layers with adjustable acoustic impedance between 4 MRayl and 7 MRayl[J]. *Ultrasonics*, 2010, 50(3): 363–366.
- [11] Manh T, Jensen G U, Johansen T F, et al. Microfabricated 1–3 composite acoustic matching layers for 15 MHz transducers[J]. *Ultrasonics*, 2013, 53(6): 1141–1149.
- [12] Fei C L, Ma J G, Chiu C T, et al. Design of matching layers for high-frequency ultrasonic transducers[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(12): 123505.
- [13] Li Z, Yang D Q, Liu S L, et al. Broadband gradient impedance matching using an acoustic metamaterial for ultrasonic transducers[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(6): 42863.
- [14] State M, Brands P J, van de Vosse F N. Improving the thermal dimensional stability of flexible polymer composite backing materials for ultrasound transducers[J]. *Ultrasonics*, 2009, 50(4): 458–466.
- [15] Amini M H, Coyle T W, Sinclair T. Porous ceramics as backing element for high-temperature transducers[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2015, 62(2): 360–372.
- [16] Souquet J, Defranould P, Desbois J. Design of low-loss wide-band ultrasonic transducers for noninvasive medical application[J]. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1979, 26(2): 75–80.
- [17] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004.