

小型图像声呐发射换能器优化设计

陆炜文^{1,2}, 周博文¹, 童晖^{1,3}, 张彬¹

(1. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 201815; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 在复杂水下环境中, 图像声呐因其高分辨率、高效率的探测优势, 在水下目标识别时发挥着重要作用。多波束图像声呐的发射换能器多采用弧形阵, 其具有大波束开角, 但存在指向性边缘起伏较大的问题, 影响信号强度均匀性。此外, 图像声呐发射换能器通常用匹配层技术拓宽工作带宽, 以获取更多信息, 同时, 匹配层的阻抗介于激励源和介质之间, 更有利于声能的辐射。该文设计了一款弧形发射换能器, 通过对阵列加权的方式来控制波束, 减小指向性起伏, 并添加了一层匹配层, 用以拓展带宽。实际测试结果表明, 换能器在 130° 水平开角内的指向性起伏从 3 dB 降低至 1.5 dB, 中心频率为 402 kHz, 带宽拓宽至 217.3 kHz, 优化效果显著。

关键词: 1-3 压电复合材料; 指向性; 换能器; 弧形阵

中图分类号: TB565.1

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.21.021

Optimization design of small image sonar transmission transducer

LU Weiwen^{1,2}, ZHOU Bowen¹, TONG Hui^{1,3}, ZHANG Bin¹

(1. Shanghai Acoustics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201815, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In complex underwater environment, image sonar plays an important role in underwater target recognition due to its high-resolution and high-efficiency detection advantages. The transmission transducer of multi-beam image sonar often uses arc-shaped array, it has a large beam opening angle, but there is a problem of larger directionality edge fluctuations to affect uniformity of signal strength. In addition, image sonar transmission transducer usually uses matching layer technique to broaden working bandwidth, and obtain more information. At the same time, impedance of matching layer is between excitation source and medium, it is more conducive to radiation of sound energy. Here, an arc-shaped transmission transducer was designed to control wave beam by weighting array to reduce directionality fluctuations, and add a matching layer to expand bandwidth. The actual testing results showed that the directionality fluctuation of the designed transducer within a horizontal opening angle of 130° is reduced from 3.0 dB to 1.5 dB; the transducer has a center frequency of 402 kHz and a bandwidth of 217.3 kHz, the optimization effect is significant.

Key words: 1-3 piezoelectric composite material; directionality; transducer; arc-shaped array

多波束声呐具有探测效率高、探测距离远、使用方便等特点^[1-3]。各类多波束声呐换能器中, 大多采用收发分置的结构, 发射通常为弧形发射阵, 用于探测一定角度范围内的目标, 再配合一个平面多波束接收阵, 用

于接收声学目标反射回波^[4-7]。1-3 复合材料具有阵元一致性好、形状可塑性强、高发射接收响应、制造成本低等独特优势, 被广泛应用于水下图像声呐换能器的制作^[8-9]。

弧形发射阵具有宽波束开角和高声源级的特点, 但在水平指向性 -3 dB 的波束开角内, 指向性边缘会存在明显的起伏, 影响声呐图像质量。对此, 不少学者对弧形阵列指向性进行了深入研究。Zhao 等^[10]研究了不同半径和阵元数对圆弧阵指向性的变化趋势。黄水兵等^[11]用多层交错的换能器阵列叠加来弥补辐射声能量不均匀的情况。赵慧等^[12-13]采用渐进排列的换能

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3206900; 2022YFB3206902-1); 中国科学院声学研究所自主部署“前沿探索”项目(QYTS202113); 上海市产业协同创新项目(HCXBCY-2022-034); 中国科学院声学研究所东海研究站育新计划项目资助(YXJH202202)

收稿日期: 2023-12-19 修改稿收到日期: 2024-04-07

第一作者 陆炜文 男, 硕士生, 2000 年生

通信作者 童晖 男, 博士生, 副研究员, 1986 年生

器阵元分布来减小截断误差。优化可采取的方式有多种,但在实际工艺制作中难免与理论计算存在一定误差,因此优化的结果有限。

此外,高频换能器在发射声波时需要足够带宽来获取更多信息,拓宽换能器带宽主要用模态耦合,通过调整换能器的各阶模态或是添加匹配层来实现^[14-15]。对于匹配层的研究,Saffar等^[16]通过透射系数的推导比较了三种传统匹配层理论的适用情况。童晖等^[17]用等效电路法研究了匹配层密度、声速、厚度对阻抗的影响。卞加聪等^[18-19]用流体混合物填充圆锥体的结构提出了一种梯度匹配层,带宽比双匹配层时高出14%。目前对于匹配层技术的理论研究已较为成熟,更多是在工艺制作上的困难,因此工程上大多还是对换能器添加一到两层传统匹配层进行制作。

本文用有限元法^[20-21]设计一款谐振频率在400 kHz的1-3复合材料弧形阵列。通过对发射波束加权来优化水平指向性起伏不均匀的情况^[22],再基于等效电路法对匹配层特性阻抗和厚度进行分析,选择合适的匹配层参数,最后制作换能器样品,通过试验测试来证明设计方案的可行性。

1 有限元仿真分析

本文用有限元软件 ANSYS 对 1-3 复合材料进行仿真建模,1-3 复合材料主要利用其厚度振动模态,压电陶瓷柱横向尺寸和纵向尺寸之比需要足够小才能减小横向振动模态和厚度振动模态间的耦合。此外,陶瓷柱阵元间距也会影响横向振动模态的频率,阵元间距通常需要满足 $1/2$ 波长的条件,陶瓷柱厚度也直接影响厚度振动模态的谐振频率。通过仿真分析,结合实际制作工艺,拟设计压电陶瓷阵元的截面尺寸为 $1.26 \text{ mm} \times 1.26 \text{ mm}$,厚度为 4.1 mm ,阵元间距 0.34 mm ,弧形阵列数 12×72 ,圆弧半径 40 mm ,压电陶瓷采用 PZT-4,聚合物为环氧树脂。

1.1 模态分析

压电陶瓷柱在 1-3 复合材料中呈周期性分布,由于仿真整个 1-3 复合材料计算量较大,通常可通过仿真单个阵元的周期模型来表征 1-3 复合材料整体性能。在单个陶瓷柱周围添加 0.17 mm 的环氧树脂,对环氧树脂施加对称边界条件约束,建立有限元模型如图 1 所示,在阵元上下两极耦合电压自由度并施加电荷载荷激励出厚度振动模态。模态分析解得其厚度振动频率为 400.6 kHz ,图 2 为厚度振动模态的矢量图,说明当压电陶瓷柱的厚度定在 4.1 mm 时,其谐振频率为 400 kHz 。

1.2 谐响应分析

再对阵元模型进行水中的谐响应分析,在陶瓷柱上表面建立流体单元的半圆模拟 1-3 复合材料在水中

的情况,在半圆外边界面处设置无限吸收边界,如图 3 所示,球的半径尺寸需要满足远场条件,对流体单元网格尺寸的划分需足够小。谐响应分析求解后得到 1-3 复合材料导纳曲线如图 4 所示,此时 1-3 复合材料在水中的谐振频率为 391 kHz ,电导值为 41.9 mS ,水作为负载降低了换能器的谐振频率。

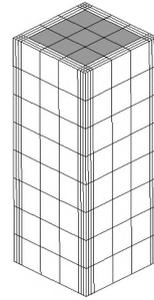


图 1 1-3 复合材料阵元模型

Fig. 1 1-3 piezoelectric composite element model

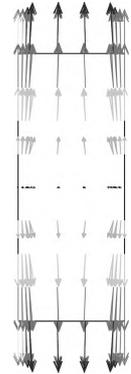


图 2 厚度振动模态矢量图

Fig. 2 Thickness vibration vector diagram

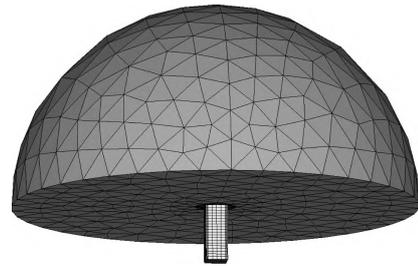


图 3 水中阵元谐响应分析示意图

Fig. 3 Harmonic analysis of underwater elements

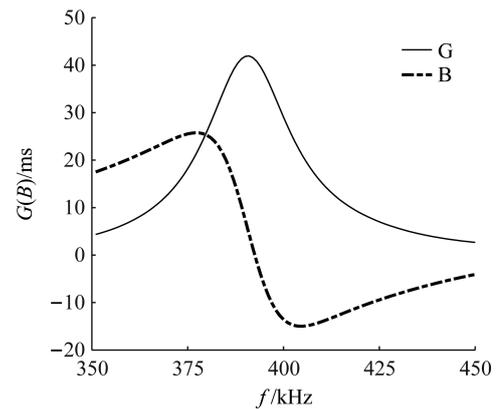


图 4 1-3 复合材料导纳曲线

Fig. 4 Admittance curves of 1-3 piezoelectric composite

2 弧形发射阵指向性优化

指向性作为换能器重要的性能参数,直接影响收发信号的优劣。对于多波束图像声呐,理想指向性是在波束开角足够宽的情况下又有平稳的波束起伏,而要满足高频大开角的性能要求,通常采用弧形的阵元分布来实现。因此本文先对弧形阵的水平指向性进行

仿真分析。

2.1 点源圆弧阵理论

在远场条件下,可将复合材料中的陶瓷小柱近似看作有余弦指向性的点声源,在水平面内有 N 个阵元均匀排列在直径为 d ,开角为 β 的圆弧上。考虑第 i 个阵元指向性时,入射声线的方位角用 θ_α 表示, θ 表示入射声线与第 i 个阵元主极大方向的夹角,根据乘积定理乘以点源的余弦指向性,弧形阵的指向性函数可以用式(1)表示。

$$D(\theta_\alpha) = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{-j\frac{\pi d}{\lambda} [\cos(\theta_\alpha - \frac{\pi-\beta}{2} - \frac{\beta}{N-1}i)]} \right| \cos(\theta) \quad (1)$$

将弧形阵的各参数代入式(1),计算得到其水平指向性如图 5,此时 -3 dB 的波束开角为 137° ,开角内的最大波束起伏在 2.6 dB。

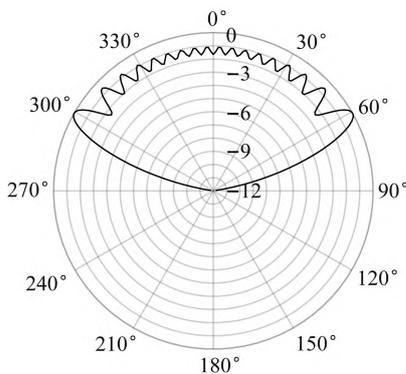


图 5 弧形阵水平指向性仿真曲线

Fig. 5 Horizontal directivity simulation curve of arc array

2.2 指向性优化

从图 5 可以看到,该弧形阵的水平指向性存在明显的波束起伏不均匀情况,在越靠近边缘位置波束起伏越大。这种情况是由于在阵列边缘处产生了截断效应,通常可以通过调整阵元间距或控制发射波束幅值来对指向性进行优化。由于在高频下压电陶瓷阵元的尺寸非常小,对于本文设计的弧形阵列,考虑工艺上的可实现性,间距的调整对水平指向性优化有限,而单独控制发射波束对工艺要求较高,不利于批量制作。为便于制作工艺上的实现,本文用一种加权的方式实现发射波束幅值的控制,将弧形阵垂直方向上的线列阵视为一个整体,通过调整每一列线列阵中被覆电极的阵元数量来近似对水平方向进行加权。如图 6 所示,弧形阵的每一列有 12 个阵元,在被覆电极时,每一列阵元被覆电极的阵元数量不同,从而实现波束幅值的控制。

在式(1)的指数项前乘以权重因子 w_i 得到式(2),调试发现,改变单个或者某一范围内的权重会导致周围波束起伏更加明显。原因是阵列各个方向的指向性是所有线列阵在该方向上的累加结果,仅调整单个线列阵权重并不能单独影响该方向上的指向性。通过初

步调试,给边缘处阵元施加递增的权重可以减小边界效应的影响从而得到较平稳的指向性图案,因此本文对边缘阵列的权重进行遍历计算来寻找最优的分配方案。波束起伏大小可用指向性的方差来表征,目标函数为式(3),在确定最大波束起伏在 $(\theta, \pi - \theta)$ 范围内的情况下,通过遍历计算该范围内式(3)的最小值即是最优的指向性加权方案。方案 1 为 $(35^\circ, 145^\circ)$ 范围内的最小值方案,求解发现只需对 9 列线阵进行加权,结果如图 7 中方案 1 曲线所示。此时方案 1 指向性波束起伏已趋于平稳,但与优化前相比,水平波束开角变小,原因是给边缘线列阵上的权重较低,因此考虑适当扩大方差范围进行计算,不同方案设置的范围及结果如表 1 所示,表 2 给出各方案下各列需要被覆电极的阵元数量。

$$D'(\theta_\alpha) = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i e^{-j\frac{\pi d}{\lambda} [\cos(\theta_\alpha - \frac{\pi-\beta}{2} - \frac{\beta}{N-1}i)]} \right| \cos(\theta) \quad (2)$$

$$\min Var = \frac{1}{N} \sum_{\theta_\alpha=\theta}^{\pi-\theta} (D(\theta_\alpha) - \bar{D}(\theta_\alpha))^2 \quad (3)$$

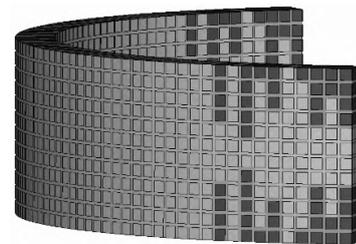


图 6 1-3 复合材料加权示意图(对称)

Fig. 6 Weighted schematic diagram of 1-3 piezoelectric composite (symmetry)

表 1 不同计算范围以及指向性开角

Tab. 1 Different calculation range and directivity angle			
方案	方差范围/(°)	-3 dB 最大起伏/dB	-3 dB 开角/(°)
未优化		2.6	137
方案 1	35 ~ 145	0.2	129
方案 2	30 ~ 150	0.3	131
方案 3	26 ~ 154	0.6	133

表 2 各列需要被覆电极的阵元数量

Tab. 2 The number of elements need to be coated per column									
方案	列 1	列 2	列 3	列 4	列 5	列 6	列 7	列 8	列 9
方案 1	2	3	6	7	9	10	10	12	11
方案 2	4	3	9	7	11	10	11	12	11
方案 3	7	4	11	7	12	10	12	12	12

对优化方案结果分析发现加权有以下特点:

- (1) 给定范围内优化的权重分配方案并非一种,不同加权方案也能得到相近的优化结果。
- (2) 在给阵列加权时,每一列需要被覆电极的阵元数量并非线性增加,会呈现一定的波动趋势。
- (3) 指向性开角的优化范围越大,需要改动的线

列阵数量越少。

(4) 优化后开角范围越小,开角内的指向性就越平稳。

图7是不同方案下的水平指向性图,从图7可以看出,经过加权,水平指向性波束起伏明显减小,但也损失掉部分开角。由于本文需要满足一定的开角范围,因此将方案3作为最后的权重分配方案进行设计。

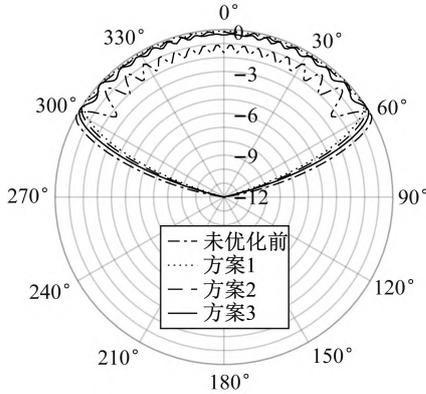


图7 水平指向性曲线对比(仿真)

Fig. 7 Comparison of horizontal directional curves (Simulated)

3 匹配层设计

由于换能器特性阻抗和水的特性阻抗差别较大,换能器发出的声波直接入射到水中透射系数低,而匹配层的特性阻抗介于换能器和水之间,声波通过匹配层进入水中可以减小声波的反射,有利于声波进入水中。此外,添加匹配层增加了换能器质量,换能器的基频降低,基频附近会出现第二谐振频率,通过调整匹配层参数可以使得两个谐振峰靠近从而拓宽换能器带宽。理论上可以通过添加多层匹配层达到理想情况,但实际能应用到匹配层的材料有限,通常添加一层或者两层匹配层就能满足指标需求。

3.1 等效电路法

根据理论推导,单层时匹配层的特性阻抗应设为 $Z_p = \sqrt{Z_0 Z_1}$, 双层时,特性阻抗应设为 $Z_{1p} = \sqrt[4]{Z_0^3 Z_1}$ 和 $Z_{2p} = \sqrt[4]{Z_0 Z_1^3}$, 其中 Z_0 为换能器材料特性阻抗, Z_1 为负载的特性阻抗。匹配层的厚度一般取为 $1/4$ 波长为宜,此时满足透射原理,换能器的透射系数达到最大。但在实际制作匹配层的过程中,一般会对理论值进行适当调整来获得理想的带宽曲线。

1.2节用有限元法计算1-3复合材料在水中的导纳曲线,但有限元法计算量大,求解效率较低,这里根据1-3复合材料的厚度振动方程,用等效电路法来计算换能器的匹配阻抗。添加匹配层后的换能器在水中的厚度振动机电等效电路如图8所示,虚线部分表示一层匹配层时的等效电路。

图9中各参数公式如下

$$Z_{1p} = j\rho_1 c_1 S \tan(k_1 t_1 / 2), Z_{2p} = \rho_1 c_1 S / j \sin(k_1 t_1),$$

$$Z_{1m} = j\rho_2 c_2 S \tan(k_2 t_2 / 2), Z_{2m} = \rho_2 c_2 S / j \sin(k_2 t_2),$$

$$Z_s = \rho_w c_w S, n = S e_{33} / t_1, C_0 = S \epsilon_{33}^s / t_1 \quad (4)$$

式中: Z_{1p} 、 Z_{2p} 、 Z_{1m} 、 Z_{2m} 为复合材料和匹配层的等效阻抗; Z_s 为水为负载时的阻抗; n 为截至电容; C_0 为机电转换系数; S 为截面积; t 、 k 、 ρ 、 c 分别为厚度、波数、密度、声速; e_{33} 、 $\epsilon_{s,33}$ 分别为压电常数和介电常数。由于等效电路法将压电陶瓷和环氧树脂视为一个集总参数模型,因此在进行仿真时, e_{33} 、 $\epsilon_{s,33}$ 、 ρ_1 、 c_1 用等效参数理论^[23]进行等效计算。

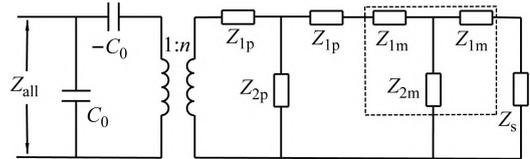


图8 添加匹配层的厚度振动机电等效电路图

Fig. 8 Equivalent circuit of thickness-mode oscillations with a matching layer

本文先用等效电路法仿真了1-3复合材料的电导曲线,如图9所示,谐振频率为392.7 kHz,电导值为47.6 mS,与1.2节有限元法的仿真结果进行对比,两种方法得到结果相近,相互验证了理论的一致性。

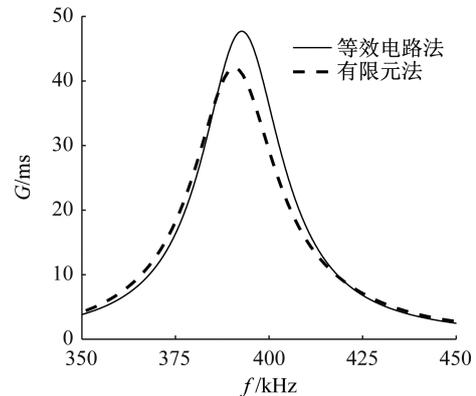


图9 仿真电导曲线对比

Fig. 9 Comparison of simulated admittance curves

3.2 匹配层参数优化

匹配层参数的选择与2.2节思路相似,由于导纳曲线的变化只与匹配层的特性阻抗以及厚度有关,因此可以遍历计算出不同阻抗和厚度下匹配层的电导值,再筛选理想的电导曲线。方案1表示带宽曲线最平稳时的情况,方案2表示在(300 kHz, 500 kHz)范围内方差最小的宽带曲线,方案3表示在-3 dB内带宽最宽的情况。表3记录了不同方案下的匹配层参数,并与理论方案进行比较,图10为不同方案下的电导曲线。

在一层匹配层的情况下,匹配层特性阻抗在3.3 MΩ时两种模态间耦合得到的带宽最平稳,随着匹配层特性阻抗的增加,带宽渐渐出现凹谷,中心频率也在增

高,直到增加到 4.8 MΩ 时,此时是 -3 dB 范围内的最宽带宽。在实际制作匹配层时,往往会根据要求的指标,结合现有材料参数,对匹配层特性阻抗进行选择,再通过调整 1/4 波长附近的厚度来获得理想的带宽。

表 3 添加一层匹配层的优化方案

Tab. 3 Optimization scheme for adding a matching layer

方案	特性阻抗/ MΩ	厚度	带宽/kHz	中心频率/ kHz
理论	5.7	0.25λ	118.8	403.2
方案 1	3.3	0.26λ	166.9	396.2
方案 2	4.1	0.26λ	206.1	397.2
方案 3	4.8	0.26λ	222.8	397.8

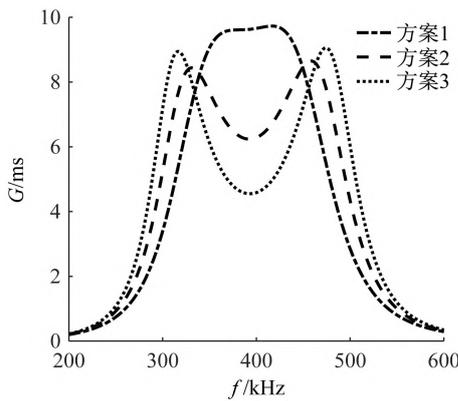


图 10 一层匹配层的电导曲线对比(仿真)

Fig. 10 Conductivity curves of one matching layer (simulated)

本文结合实验室现有材料,拟对换能器添加一层阻抗为 4.4 MΩ,厚度为 1.8 mm 的匹配层,在匹配层上灌注一层聚氨酯后,仿真计算得到的电导曲线如图 11 所示,此时换能器带宽为 225 kHz,中心频率在 398 kHz。

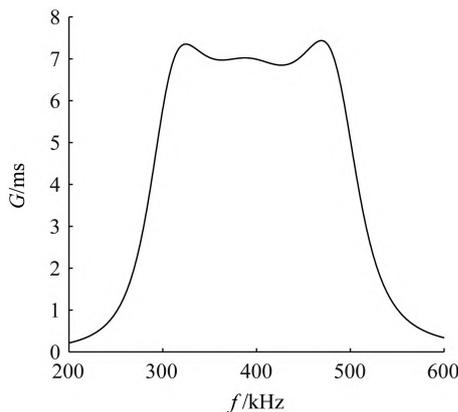


图 11 匹配层设计方案仿真

Fig. 11 Simulation of matching layer design scheme

4 实测与讨论

按照上述设计方案,本文采用排列-浇筑法来制备 1-3 复合材料,用模具制备弧形角度为 149°的 1-3 复合材料弧形陶瓷阵列,并分别制作了加权和不加权两个发射换能器进行对比,对换能器添加匹配层后,在灌注

时添加了线列接收阵形成收发分置的结构,成型后的换能器样品如图 12 所示。

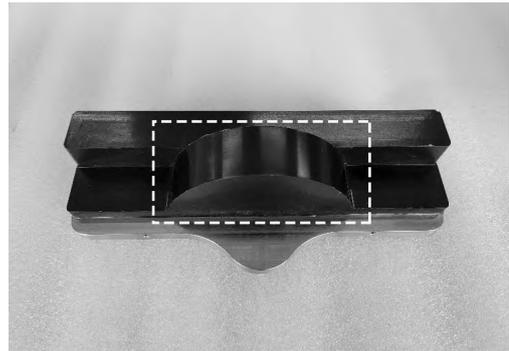


图 12 制作的弧形发射换能器样品(虚线部分)

Fig. 12 Sample of arc emission transducer (Dashed line)

将两个换能器样品置于消声水池进行性能测试,其发射换能器的水平指向性实测结果如图 13 所示,未加权的水平指向性开角为 136°,最大波束起伏为 3 dB,加权后水平指向性开角为 130°,波束起伏为 1.5 dB,从图 13 可以看到,加权后水平指向性的波束起伏有明显减小。实测得到加权后换能器水平开角减小 6°,主要由于加权后的陶瓷阵元没有振动导致阵列边缘的发射波束减少,响应变小;其次在换能器制作时工艺上会有一定误差,无法保证每次制作的换能器具有完全相同的指向性开角。换能器带宽测试的电导曲线如图 14 所示,带宽为 217.3 kHz,中心频率在 402.6 kHz,由于实际的材料参数和厚度与仿真参数会有部分偏差,因此测量的电导曲线与仿真的电导曲线略有不同,但整体趋势相近。

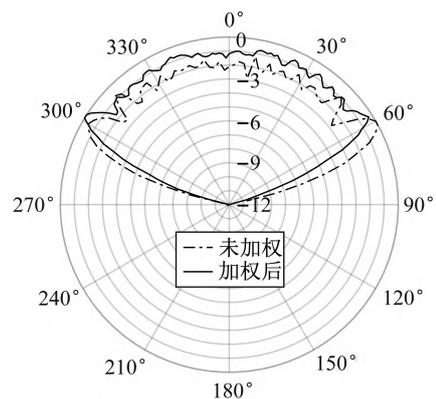


图 13 水平指向性曲线对比(实测)

Fig. 13 Comparison of horizontal directional curves (Measured)

对于水平指向性,实际测试值与仿真指向性存在一定误差,结合制作工艺分析,误差可能出现在以下几点:

- (1) 压电陶瓷柱阵元一致性存在误差。
- (2) 在给复合材料连通电路时,对复合材料边缘阵列的振动起到了一定抑制作用。
- (3) 在给陶瓷柱间填充环氧树脂定形时,环氧树

脂固化后会轻微收缩,导致弧形轻微变形。

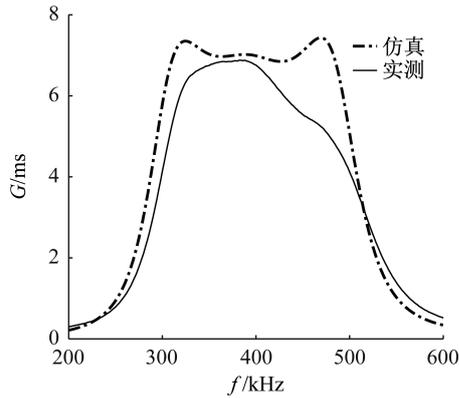


图 14 优化后的电导曲线(实测)

Fig. 14 Optimized conductivity curve (Measured)

综合上述情况,在仿真时对弧形阵的阵列形状略微调整,并在计算指向性时对每一列添加 0.95 ~ 1.00 的随机权重作为阵元一致性的随机误差,修正后水平指向性的仿真结果如图 15 所示,可以看出模型修正后的仿真曲线与实测结果能够较好地符合。

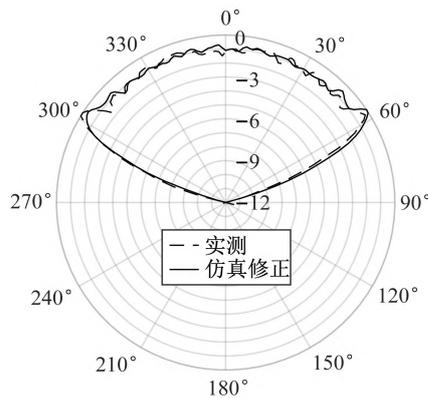


图 15 修正后的仿真曲线

Fig. 15 The corrected simulation curve

5 结论

本文用 1-3 复合材料制作了一款 400 kHz 的弧形发射换能器并对其指向性和带宽进行了优化。对垂直方向上的线列阵加权来减小水平方向的波束起伏,通过对阵元采用不被覆电极的方式实现。制作出的发射换能器在 130°水平开角内的波束起伏能控制在 1.5 dB 范围内,并利用实测结果对模型进行了修正,有利于后续得到更优的权重方案。此外,基于等效电路法给 1-3 复合材料添加一层匹配层,将换能器 -3 dB 带宽拓宽至 217.3 kHz,实际测量值与仿真计算值较为符合。本文实现了对 1-3 复合材料波束幅值的加权,该方法制作简易,能有效减小波束开角内的起伏,为复合材料指向性的优化提供了一种思路。

参考文献

[1] XIA W J, JIN X, DOU F W. Thinned array design with minimum number of transducers for multibeam imaging sonar

[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2017, 42 (4): 892-900.

- [2] 李海森,魏波,杜伟东. 多波束合成孔径声呐技术研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1760-1769.
LI Haisen, WEI Bo, DU Weidong. Technical progress in research of multibeam synthetic aperture sonar [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46 (10): 1760-1769.
- [3] 周博文,童晖,张彬,等. 八波束相控阵换能器的研制[J]. 振动与冲击, 2022, 41(8): 217-222.
ZHOU Bowen, TONG Hui, ZHANG Bin, et al. Development of eight-beam phased array transducer [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(8): 217-222.
- [4] 姜科,王忠康. 前视避障声呐综述[J]. 声学与电子工程, 2022(4): 43-50.
JIANG Ke, WANG Zhongkang. Review of forward looking obstacle avoidance sonar [J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2022(4): 43-50.
- [5] 周天,欧阳永忠,李海森. 浅水多波束测深声呐关键技术剖析[J]. 海洋测绘, 2016, 36(3): 1-6.
ZHOU Tian, OUYANG Yongzhong, LI Haisen. Key technologies of shallow water multibeam bathymetric sonar [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2016, 36 (3): 1-6.
- [6] LIU Z. Research on high frequency arc transducer array directivity[C]//2015 International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference. Paris: Atlantis Press, 2015.
- [7] AHMAD K A, OSMAN M K, HUSSAIN Z, et al. Design and characterization piezoelectric acoustic transducer for sonar application[C]//2018 8th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE). Penang, Malaysia: IEEE, 2018.
- [8] BENJAMIN K C. Recent advances in 1-3 piezoelectric polymer composite transducer technology for AUV/UUV acoustic imaging applications[J]. Journal of Electroceramics, 2002, 8(2): 145-154.
- [9] 王嘉程,王丽坤,仲超. 1-3 型压电复合材料研究进展[J]. 电子元件与材料, 2021, 40(3): 219-228.
WANG Jiacheng, WANG Likun, ZHONG Chao. Recent advance in 1-3 piezoelectric composites [J]. Electronic Components and Materials, 2021, 40(3): 219-228.
- [10] ZHAO X, PANPAN H. Study on directivity of underwater circular transducer array[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2477(1): 012001.
- [11] 黄水兵,李勤博,王洪亮. 一种改善宽波束发射换能器指向性的方法和换能器:CN201911044828[P]. 2023-06-20.
- [12] 赵慧,马昌鑫,王艳,等. 图像声呐换能器指向性优化研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(23): 182-186.
ZHAO Hui, MA Jingxin, WANG Yan, et al. Directivity optimization of image sonar transducer [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(23): 182-186.
- [13] 赵慧,李海森,周天,等. 低指向性起伏弧形发射换能器阵:CN201811447773[P]. 2019-04-12.
- [14] MENGMEI W, LILI X, HONGWEI W, et al. Design, fabrication and testing of a high frequency broadband hydroacoustic transducer for sonar systems[J]. Results in

- Physics, 2023, 52: 106872.
- [15] 米徐慧, 秦雷, 廖擎玮. 1-1-3 型压电复合材料的振动模式研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(1): 223-228.
MI Xuhui, QIN Lei, LIAO Qingwei. Vibration modes mode of 1-1-3 piezoelectric composites[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(1): 223-228.
- [16] SAFFAR S, ABDULLAH A. Determination of acoustic impedances of multi matching layers for narrowband ultrasonic airborne transducers at frequencies < 2.5 MHz; application of a genetic algorithm [J]. Ultrasonics, 2012, 52 (1): 169-185.
- [17] 童晖, 周益明, 王佳麟, 等. 高频宽带换能器研究[J]. 声学技术, 2013, 32(6): 524-527.
TONG Hui, ZHOU Yiming, WANG Jialin, et al. Study of high frequency broadband transducer [J]. Technical Acoustics, 2013, 32(6): 524-527.
- [18] 卞加聪, 赵慧, 沈明杰. 高频水声换能器匹配层技术研究[J]. 声学技术, 2021, 40(1): 143-146.
BIAN Jiacong, ZHAO Hui, SHEN Mingjie. Research on matching layer technology of underwater high frequency acoustic transducer[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(1): 143-146.
- [19] 卞加聪, 王艳, 刘振君, 等. 高频声呐换能器梯度匹配层声学特性研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(7): 153-158.
BIAN Jiacong, WANG Yan, LIU Zhenjun, et al. Acoustic characteristics of gradient matching layer of high frequency sonar transducer[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(7): 153-158.
- [20] 莫喜平. ANSYS 软件在模拟分析声学换能器中的应用[J]. 声学技术, 2007(6): 1279-1290.
MO Xiping. Simulation and analysis of acoustics transducers using the ANSYS software [J]. Technical Acoustics, 2007 (6): 1279-1290.
- [21] 李邓化, 居伟骏, 贾美娟, 等. 新型压电复合换能器及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [22] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [23] CHAN H L W, UNSWORTH J. Simple model for piezoelectric ceramic/polymer 1-3 composites used in ultrasonic transducer applications [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1989, 36 (4): 434-441.

~~~~~

(上接第 146 页)

- [33] CHEN G, ZHOU Z, SUN T, et al. Shear modulus and damping ratio of sand-gravel mixtures over a wide strain range [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2019, 23(8): 1407-1440.
- [34] TSANG H H, TRAN D P, HUNG W Y, et al. Performance of geotechnical seismic isolation system using rubber-soil mixtures in centrifuge testing[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(5): 1271-1289.
- [35] TSANG H H, PITILAKIS K. Mechanism of geotechnical seismic isolation system; analytical modeling [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 122: 171-184.
- [36] QU Z, ZHU B, CAO Y, et al. Rapid report of seismic damage to buildings in the 2022 M6. 8 Luding earthquake, China [J]. Earthquake Research Advances, 2023, 3 (1): 100180.
- [37] 广州大学, 中国建筑标准设计研究院有限公司. 建筑隔震设计标准: GB/T 51408—2021[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局, 2021.
- [38] 谭平, 徐凯, 王斌, 等. 基于新型简易隔震支座的村镇建筑隔震性能研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(5): 64-70.  
TAN Ping, XU Kai, WANG Bin, et al. Research on seismic isolation performance of village buildings based on new simple seismic isolation bearings[J]. Journal of Civil Engineering, 2013, 46(5): 64-70.
- [39] 朱宏平, 周方圆, 袁涌. 建筑隔震结构研究进展与分析[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 6.  
ZHU Hongping, ZHOU Fangyuan, YUAN Yong. Research progress and analysis of seismic isolation structures for buildings[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 1-10.
- [40] 刘德稳, 赵洁, 刘阳, 等. 考虑 SSI 的层间隔震结构在三维长周期地震下的响应研究[J]. 应用力学学报, 2024, 41(3): 642-650.  
LIU Dewen, ZHAO Jie, LIU Yang, et al. Study on the response of mid-story isolation structure considering SSI subjected to three-dimensional long period earthquake[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2024, 41(3): 642-650.
- [41] 于旭, 宰金珉, 王志华. 铅芯橡胶支座隔震钢框架结构体系振动台模型试验研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26 (3): 30-36.  
YU Xu, ZAI Jinmin, WANG Zhihua. Study on shaking table modeling of steel frame structure system isolated by lead-core rubber bearings[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(3): 30-36.

~~~~~

(上接第 179 页)

- [19] PELTIER L J. Estimating turbulent-boundary-layer wall-pressure spectra from CFD RANS solutions [J]. Journal of Fluids and Structures, 2007, 23(6): 920-937.
- [20] HU N. CFD-based study on one- and two-point statistics of wall pressure fluctuations [C]//28th AIAA/CEAS Aeroacoustics 2022 Conference. Southampton, UK: AIAA, 2022.
- [21] BLAKE W K. Mechanics of flow-induced sound and vibration, volume 1 general concepts and elementary sources [M]. London, UK: Academic Press, 2017.
- [22] HWANG Y F, BONNESS W K, HAMBRIC S A. Comparison of semi-empirical models for turbulent boundary layer wall pressure spectra[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 319(1/2): 199-217.