

引用格式: 夏榕健, 仲林建, 夏铁坚. 高频宽带换能器多匹配层研究[J]. 声学技术, 2024, 43(1): 147-150. [XIA Rongjian, ZHONG Linjian, XIA Tiejian. Research on multiple matching layers of high frequency wideband transducer[J]. Technical Acoustics, 2024, 43(1): 147-150.]
DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2024.01.020

高频宽带换能器多匹配层研究

夏榕健, 仲林建, 夏铁坚

(杭州应用声学研究所, 浙江杭州 310023)

摘要: 在水声应用中, 高频换能器往往需要较宽的工作带宽, 以获得更多的目标信息。文章首先建立了等效电路模型, 利用粒子群算法对匹配层材料和厚度进行初步选定, 使得换能器具有最宽的工作频带; 其次, 通过有限元方法对匹配层换能器的导纳和发射电压响应进行分析计算; 最后, 在理论分析的基础上成功制得三匹配层高频宽带换能器, 其工作频段约为 150~430 kHz, 相对带宽为 93%, 带内发送电压响应起伏为 -6 dB。实验结果表明, 三匹配层设计方案可以有效拓宽高频换能器的工作频段。

关键词: 高频换能器; 宽带; 多匹配层

中图分类号: TB565.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2024)-01-0147-04

Research on multiple matching layers of high frequency wideband transducer

XIA Rongjian, ZHONG Linjian, XIA Tiejian

(Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: In underwater acoustic applications, high frequency transducers often need a wider working bandwidth to obtain more target information. In this paper, the equivalent circuit model is established firstly, and the material and thickness of the matching layer are selected by using particle swarm optimization so that the transducer has the widest working band. Secondly, the finite element method is used to analyze and calculate the admittance and emission voltage response of the transducer with matched layers. Finally, on the basis of theoretical analysis, the high-frequency broadband transducer with three matching layers is successfully fabricated. The working frequency band of the transducer is about 150–430 kHz, the relative bandwidth is 93%, and the fluctuation of the transmitting voltage response is -6 dB. The experimental results show that the design of three matching layers can effectively broaden the working bandwidth of high frequency transducer.

Key words: high frequency transducer; bandwidth; multi-matching layer

0 引言

随着海洋活动日益增多, 水下目标探测与水声通信等工作越来越依靠应用于高分辨率系统的高频宽带换能器。拓宽高频换能器带宽的有效手段主要有两种, 一是使用压电复合材料, 二是使用匹配层形成多峰耦合^[1]。

传统匹配层设计方法是采用切比雪夫理论等计算层声阻抗, 寻找声阻抗值接近该计算值的实际材料, 再结合 1/4 波长理论设计层厚, 使得声透射系数取得较大值。上海材料研究所的张浩等设计了一

款三匹配层医用换能器, 中心频率为 2.95 MHz, -6 dB 相对带宽为 83.2%^[2]。上海船舶电子设备研究所的卞加聪等研制了三匹配层的高频宽带水声换能器, 其工作频率为 66~176 kHz, -6 dB 相对带宽为 91%^[3]。上述研究均采用基于声透射原理的传统方法, 这会在匹配层数量增多的时候使得设计偏差增大且工作量大幅增加。国内对于三层及以上多匹配层换能器的研究仍较少。

目前, 开始有学者使用优化算法进行设计。Saffa 团队提出将遗传算法应用于匹配层参数设计中, 并进行了 2~12 层材料参数的计算^[4]。吴樵等采用人工蜂群算法, 以换能器一发一收模型中接收信号峰峰值为优化目标进行优化设计^[5]。Li 等利用神经网络来关联匹配层厚度与性能的关系, 结合粒子群算法对双匹配层进行参数优化选择^[6]。大多研究基于声透射系数进行优化, 鲜有基于其他性能指标

收稿日期: 2022-06-30; 修回日期: 2022-08-31

作者简介: 夏榕健(1998—), 男, 浙江杭州人, 硕士研究生, 研究方向为高频水声换能器。

通信作者: 仲林建, E-mail: 13858078840@163.com

如发射电压响应、发射声功率等进行优化的研究。

粒子群算法是通过模拟鸟群觅食行为而发展起来的一种基于群体协作的随机搜索算法该算法具有鲁棒性好、收敛快且对于多参数问题的搜索路径沿着全局最优解方向等优点，符合匹配层参数多的特点。本文利用粒子群算法优化换能器的-6 dB发射电压响应带宽，得到的择优结果进一步使用有限元法仿真优化，最终设计并研制出了一款三匹配层高频宽带水声换能器。

1 理论模型

高频水声换能器的主体为压电陶瓷、背衬以及匹配层。本文使用1-3型压电复合材料研制中心频率仅为300 kHz的高频宽带水声换能器，为了阻抗过渡平滑且实现较大工作带宽，使用三层匹配层。

机电等效网络是理论法研究换能器的常用方法，通过复合压电方程，将换能器机电类比为为一个等效电路进行分析，十分有效且简单。图1为三匹配层条件下的换能器等效电路图。

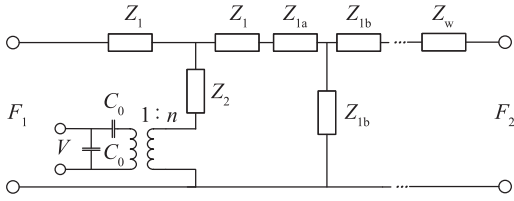


图1 三匹配层换能器等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of the transducer with three matching layers

图1中, Z_1 、 Z_2 、 Z_{1a} 、 Z_{1b} 、 Z_w 的计算公式分别为

$$Z_1 = j\rho v s \tan\left(\frac{k_c h}{2}\right) \quad (1)$$

$$Z_2 = \frac{\rho v s}{j \sin(kh)} \quad (2)$$

$$Z_{1a} = j\rho_i v_i s \tan\left(\frac{k_i d_i}{2}\right) \quad (3)$$

$$Z_{1b} = \frac{\rho_i v_i s}{j \sin(k_i d_i)} \quad (4)$$

$$Z_w = \rho_w v_w s \quad (5)$$

其中： C_0 、 n 、 ρ 、 v 、 s 、 k_c 、 h 、 V 分别为压电材料的静态电容、机电转换系数、密度、声速、横截面积、波数、厚度以及激励电压， ρ_i 、 v_i 、 k_i 、 d_i 分别为第*i*层匹配层的密度、声速、波数和厚度， ρ_w 、 v_w 分别为水的密度、声速。自由振动时，认为两个力学端 F_1 、 F_2 短路，由此可以计算换能器的导纳特性、发射电压响应等相关性能。

由于1-3型复合材料较为纯净的厚度振动模式，

圆形平面纵振型换能器可以看作是一个刚性障板上的圆形活塞辐射器，其辐射声场的某点远场声压函数为

$$P(r) = \frac{j\omega\rho_w a^2 v_0 e^{j(\omega t - k_w r)}}{2r} \cdot \frac{2J_1(k_w a \sin\theta)}{k_w a \sin\theta} \quad (6)$$

其中： a 为圆形辐射面的半径， r 为离开端面距离， v_0 为端面振动速度值， k_w 为水介质波数， $J_1(x)$ 为一阶贝塞尔函数， θ 为该点与端面中点连线和端面中心线的夹角。而端面振动速度 v_0 可由机电类比，计算水负载端电流获得^[7]。

通过计算自由场声压有效值 P 即可得到换能器发射电压响应：

$$S_{VL} = 20\lg\left(\frac{P}{V}\right) + 120 \quad (7)$$

2 优化设计

本文采取鲁棒性好且收敛速度快的粒子群法进行参数优化设计，以式(7)为优化函数，对已经建立的常用材料库进行分析，选取各层声阻抗值以及厚度，使得优化结果为带宽值最大。在若干种材料具有相同声阻抗的条件下，将优先选取声速较小的材料以获得较小材料厚度。材料库中包含材料的声阻抗值，且与其密度、声速等相关联。厚度在一个给定区间内连续取值。

本文使用的压电复合材料厚7.3 mm，辐射面为直径50 mm的圆形，谐振频率约为210 kHz。通过计算，得到换能器最优带宽为304 kHz，工作频段为149~453 kHz，最大发射电压响应为171 dB，带内电压响应起伏为-6 dB，满足设计需求。基于等效电路法计算得到的匹配层参数如表1所示。

表1 匹配层材料参数
Table 1 Parameters of matching layers

| 层数 | 密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 纵波速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 声阻抗/ ($\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$) | 厚度/ mm |
|-----|--|---|--|-----------|
| 第一层 | 2 883 | 5 632 | 16.24 | 2.5 |
| 第二层 | 1 930 | 3 300 | 6.37 | 2.0 |
| 第三层 | 1 180 | 2 720 | 3.21 | 2.1 |

由于有限元方法更接近实际情况，故利用有限元软件，建立换能器模型进行下一步仿真优化。由于1-3型压电材料具有周期性，所以可以建立1/4周期模型以节省计算时间。模型添加了水域及完美匹配层，1/4周期有限元模型如图2所示。

通过调整层参数，如替换声阻抗相近的材料、匹配层厚度等，利用有限元软件的谐波响应分析功能进行分析，使得发射电压响应更平稳最终计算得到

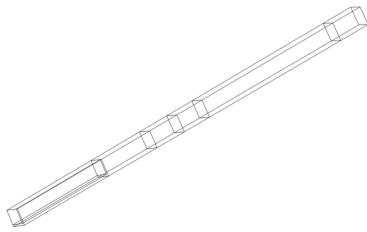


图2 1/4周期有限元模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of one-fourth period finite element model

换能器在水中的发射响应曲线及其导纳曲线如图3、4所示。由图3可知，发射响应的峰值约为169 dB。由图4可知，三匹配层高频宽带换能器的-6 dB带宽为145~465 kHz。

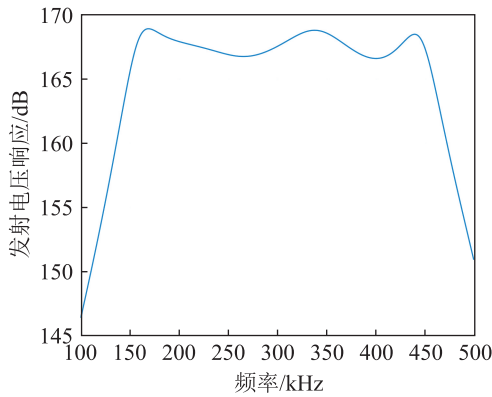


图3 三匹配层换能器发射电压响应

Fig.3 Transmitting voltage response of the transducer with three matching layers

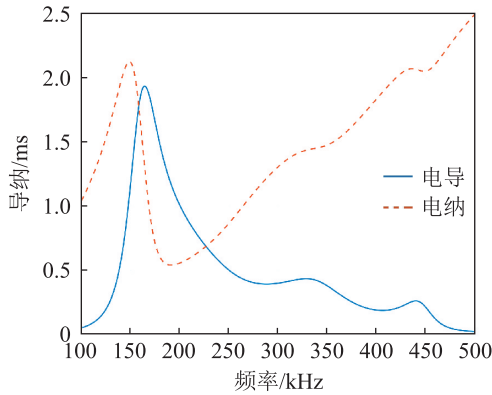


图4 三匹配层换能器导纳曲线

Fig.4 Admittance of the transducer with three matching layers

3 换能器研制及测试

根据有限元仿真，按照设计尺寸，研制了三匹配层高频宽带换能器。三匹配层换能器样品如图5所示。

对该换能器在空气中的阻抗特性进行分析，结果如图6所示。由图6可知，其一阶谐振峰约为162 kHz，二阶谐振峰约为224 kHz，三阶谐振峰约

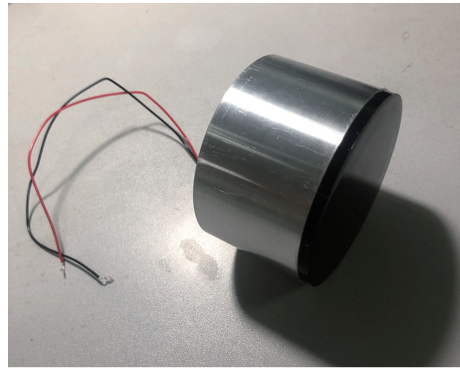


图5 三匹配层换能器样品图

Fig.5 Sample of three matching layer transducer

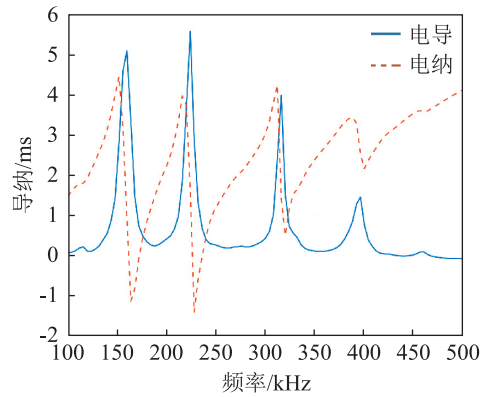


图6 三匹配层换能器在空气中的导纳曲线

Fig.6 Admittance of the transducer with three matching layers in air

为320 kHz，四阶谐振峰约为396 kHz。

对该换能器在水中的阻抗特性进行分析，导纳曲线如图7所示。由图7可知，其一阶谐振峰约为160 kHz，二阶谐振峰约为220 kHz，三阶谐振峰约为316 kHz，四阶谐振峰约为396 kHz。

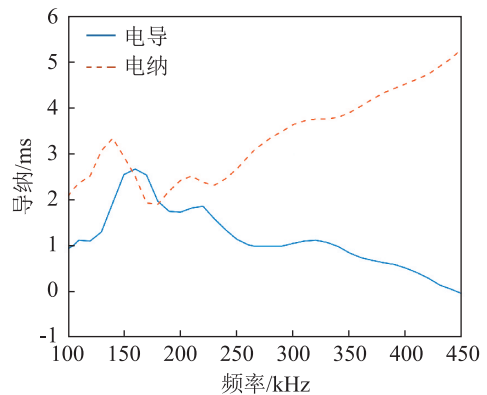


图7 三匹配层换能器在水中的导纳曲线

Fig.7 Admittance of the transducer with three matching layers in water

在空气中，由于空气密度小，共振质量可以忽略，但在水这样稠密的流体中，共振重量不可忽略。这导致换能器发射共振频率较空气中有所下降且幅值有所降低。

利用脉冲法进行换能器发射电压响应测试,结果如图8所示。由图8可知,实际制作的换能器的工作频段为150~430 kHz,带内响应起伏为-6 dB,相对带宽为93%,发射响应峰值为169.3 dB。

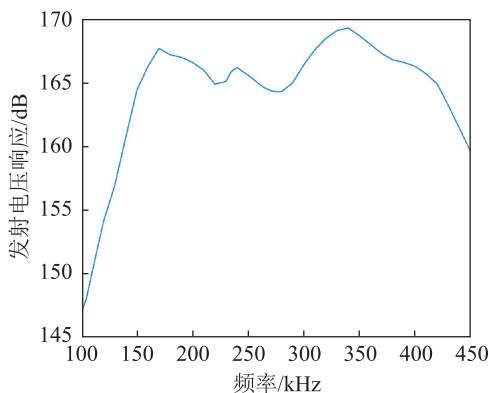


图8 三匹配层换能器的测试发射电压响应

Fig.8 Measured transmitting voltage response of the transducer with three matching layers

测试结果与仿真有一定的出入,最主要的是因为换能器进行水密操作后实际上可视为增加了一层匹配层,换能器的负载阻抗增大,导致其余谐振峰向中间靠拢,声透射减小,发射电压响应幅值也有所降低。另外,由于实际加工过程中使用的材料参数与仿真设置的参数有一定程度的差别,且存在电极、粘接胶层等材质的影响,最终导致误差出现。

研究在300 kHz频率下该换能器指向性,将信号最大幅值进行归一化处理。在水池中指向性的实测结果如图9所示。理论上该换能器指向性的

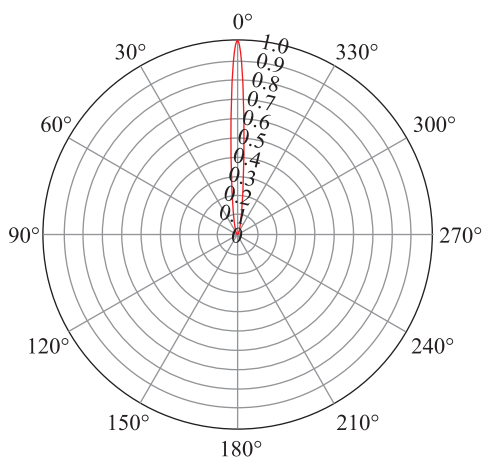


图9 300 kHz时换能器指向性图

Fig.9 The directivity diagram of the transducer at 300 kHz

-3 dB开角为 5.9° 。该换能器样品的实际-3 dB开角约为 6.3° 。

4 结论

本文基于等效电路法,利用粒子群算法,将换能器模型的发射电压响应作为优化目标进行了设计,再使用有限元法进行仿真优化,最终研制出一款三匹配层高频宽带水声换能器样品,其工作频段为150~430 kHz,相对带宽为93%,带内电压响应起伏为-6 dB,发射响应峰值为169.3 dB。在匹配层较多以及材料库较大时,利用智能算法进行相似材料的筛选能大大节省设计时间与试错次数。另外,该算法也可以应用于分别赋予不同权重的多性能参数的组合优化等。本文仿真结果与制作的样机实测结果表明该算法可靠、有效且设计方案可行。

参考文献

- [1] HAO S, WANG H, ZHONG C, et al. Research and fabrication of high-frequency broadband and omnidirectional transmitting transducer[J]. *Sensors*, 2018, **18**(7): 1.
- [2] 张浩,赵程,史秀梅,等.基于2-2型压电陶瓷复合材料的三匹配层宽带医用超声相控阵换能器研制[J]. *机械工程材料*, 2020, **44**(6): 88-92.
ZHANG H, ZHAO C, SHI X M, et al. Development of three matching layer broadband medical ultrasonic phased array transducer with 2-2 piezoelectric ceramic composite [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2020, **44**(6): 88-92.
- [3] 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.
- [4] SAFFAR S, ABDULLAH A. Determination of acoustic impedances of multi matching layers for narrowband ultrasonic airborne transducers at frequencies <math>< 2.5\text{ MHz}</math>-application of a genetic algorithm[J]. *Ultrasonics*, 2012, **52**(1): 169-185.
- [5] 吴樵,陈秋颖,廉国选.基于人工蜂群算法的多层匹配层优化设计[C]//中国声学学会第十一届青年学术会议.
- [6] LI Z X, CHEN D D, LI D, et al. Optimization design of ultrasonic transducer with multimatching layer[J]. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 2021, **68**(6): 2202-2211.