

引用格式: 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, 2020, 40(1): 143-146. [BIAN Jiacong, ZHAO Hui, SHEN Mingjie. Research on matching layer technology of underwater high frequency acoustic transducer[J]. Technical Acoustics, 40(1): 143-146.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.01.022

高频水声换能器匹配层技术研究

卞加聪, 赵 慧, 沈明杰

(上海船舶电子设备研究所, 上海 201108)

摘要: 在复杂的海洋环境中, 为提高对目标的探测效果以获得更多的信息, 高频声呐需要更宽的工作频带。首先, 通过声透射原理对不同匹配层材料进行选取与设计; 其次, 通过有限元仿真对不同匹配层换能器的透射系数、电导谱和发送电压响应展开了分析计算; 最后, 在理论分析、解析计算和有限元仿真计算的基础上成功研制了单层、双层和三层匹配层高频宽带水声换能器, 其工作频带分别为 79~150 kHz, 74~163 kHz 和 66~176 kHz, 带内发送电压响应起伏为-6 dB。实验结果表明: 匹配层层数越多, 换能器的带宽越宽, 该工作为实现宽频带换能器在实际工作中的应用提供了方向。

关键词: 匹配层; 宽带; 高频换能器

中图分类号: TB565.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-05-0143-04

Research on matching layer technology of underwater high frequency acoustic transducer

BIAN Jiacong, ZHAO Hui, SHEN Mingjie

(Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: In a complex marine environment, high-frequency sonar often requires broadband operation to obtain more target information and improve the detection effect of the target. Firstly, matching layer materials are selected and designed according to the acoustic transmission principle; then the transmission coefficient, conductivity spectrum and transmitting voltage response of the transducers with matching layers are analyzed and calculated by using finite element simulation; finally, based on theoretical analysis, analytical calculations and finite element simulations, the high-frequency broadband acoustic transducers with single, double and triple matching layers are successfully developed and the bandwidths of these transducers are 79~150 kHz, 74~163 kHz and 66~176 kHz respectively, the fluctuation of the transmitting voltage response is -6 dB. The experimental results show that the more the matching layers, the wider the bandwidth of transducer is. This work points out a direction for the application of broadband transducers in practical work.

Key words: matching layer; broadband; high-frequency transducer

0 引 言

随着声呐系统中水声信号处理技术的不断发展以及海洋开发的日益深入, 高频声呐越来越受到人们的重视^[1]。根据工作要求, 高频声呐常需要宽频带工作来获取更多的目标信息和提高对目标的探测效果。高频宽带换能器是高频声呐信号产生和获取的基础, 匹配层技术是拓展高频换能器带宽的有效手段^[2-3]。2008 年, 陕西师范大学李珺等^[4]通过理论和仿真计算了双匹配层参数对换能器带宽的影响; 2013 年, 中国科学院声学所童晖等^[1]研制一款单匹

配层宽带换能器, 带内发送电压响应起伏为-3 dB, 并在 2020 年研制了一款宽带圆柱阵, 其工作频带为 20~30 kHz, 带内发送电压响应起伏为-3 dB^[5]; 2020 年, 上海材料研究所张浩等^[6]通过三层匹配层和背衬的设计方案研制了中心频率为 2.95 MHz, -6 dB 相对带宽约为 83.2% 的医用相控阵换能器。虽然国内对单层和双层匹配层水声换能器的研究颇多, 但对于三层匹配层水声换能器的研究还甚少。

因此, 本文通过声波透射理论、Mason 等效电路解析计算和有限元仿真对单层、双层和三层匹配层换能器进行了理论研究, 在此基础上研制了三种高频宽带水声换能器, 满足了水声换能器宽频带下的工作需求。

1 宽带换能器设计

宽带换能器主要是由背衬、压电陶瓷、匹配层

收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2020-07-29

基金项目: 国防科技重点实验室基金(6142108181011)资助项目。

作者简介: 卞加聪(1992-), 男, 江苏盐城人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为高频水声换能器。

通信作者: 卞加聪, E-mail: 1653656651@qq.com

和水密透声层组成。为了实现压电材料和水之间的阻抗过渡以满足宽频带的工作需求,一方面可以对压电陶瓷材料进行切割制作成复合材料,另一方面可以选择单层或者多层匹配层对压电材料进行匹配。本文将采用以上方式研制工作中心频率为 100 kHz 左右的不同宽频带的高频宽带水声换能器,换能器水中示意图如图 1 所示,图中虚线框为换能器结构。

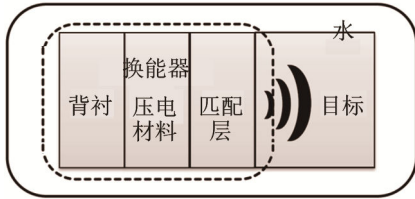


图 1 换能器水中示意图

Fig.1 Schematic diagram of the transducer in water

1.1 匹配层声透射原理

匹配内声波透视示意图如图 2 所示。最基本的三层材料匹配理论的物理基础是声波的反射和透射理论(平面波垂直入射的情况),结合波动方程和边界条件的方法得到匹配层的声强透射系数^[7]:

$$\tau_r = \frac{4Z_1Z_3}{(Z_1+Z_3)^2 \cos^2(k_2D) + (Z_2+Z_1Z_3/Z_2)^2 \sin^2(k_2D)} \quad (1)$$

其中: Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别表示第一种、第二种和第三种媒质的声特性阻抗; k_2 代表第二种介质的波数; D 代表第二种媒质的厚度。

由式 (1) 可以发现: 当 $D=(2n-1)\lambda_2/4$, $n=1,2,3,\dots$, 且 $Z_2=\sqrt{Z_1Z_3}$ 时, $\tau_r=1$, 这就是超声技术常用的 $\lambda/4$ 波片匹配全透射技术。对多匹配层也可进行类似考虑。

根据契比雪夫(Chebyshev)理论,可以得到多层匹配层的声特性阻抗的计算公式^[8]:

$$Z_{v,\mu} = \sqrt{Z_{v-1,\mu-1} \times Z_{v,\mu+1}}, \mu \geq 3 \quad (2)$$

其中: μ 代表一共有几层媒质(包括压电材料和水), v 代表第几层媒质, $Z_{v,\mu}$ 代表的是 μ 层媒质中的第 v 层媒质的声特性阻抗。

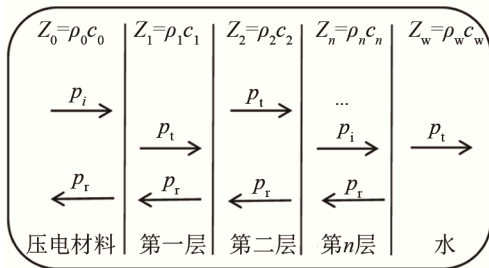


图 2 匹配层内声波透射示意图

Fig.2 Schematic diagram of sound wave transmission in matching layers

1.2 匹配层材料的选取和研制

本文均采用 PZT4 压电陶瓷制作中心频率为 100 kHz 左右的高频宽带水声换能器。为了使压电陶瓷与水有较好的匹配,采用 1-3 型复合压电陶瓷材料是一种常用的有效途径。1-3 型复合材料一方面减少了横向振动,使纵向振动模式变得更加纯净;另一方面可获得较低的声阻抗、较宽的带宽和低机械品质因素等性能。

本文将采用对 PZT 材料切割填充环氧树脂的方式来制作压电复合材料,制作的压电复合材料的声特性阻抗为 $17 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$,负载为水,根据式(2)可以推导出单层、双层、三层匹配层对应的声特性阻抗值,根据理论计算并结合实际研制出了与理论较为接近的实际匹配层材料的参数,如表 1 所示。

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

匹配层	层数	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	纵波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	声特性阻抗/ ($\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)
一层匹配层	第一层	1 802	2 639	4.8
两层匹配层	第一层	4 730	2 027	9.6
	第二层	1 186	2 544	3.0
三层匹配层	第一层	5 255	2 129	11.2
	第二层	1 802	2 639	4.8
	第三层	1 186	2 544	3.0

1.3 多种匹配层换能器仿真设计

本文根据设计好的匹配层参数对单匹配层、双匹配层、三匹配层高频水声换能器的水中声强透射系数进行了有限元仿真分析。图 3 是水中的换能器模型。

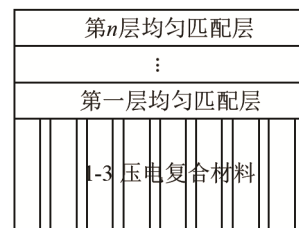


图 3 水中的换能器模型图

Fig.3 The model of the transducer in water

如图 4 所示,通过有限元仿真对比分析发现,不同匹配层换能器水中声强的半功率带宽的大小关系为:三层匹配层>两层匹配层>一层匹配层,满足了不同频带的性能要求。

1.4 多种匹配层换能器等效电路

由于压电复合材料和水之间的阻抗失配比较明显,为了满足换能器不同宽频带的性能要求,常制作成单匹配层或者多匹配层换能器。所得到的匹配层压电复合材料换能器的静态特性如等效导纳

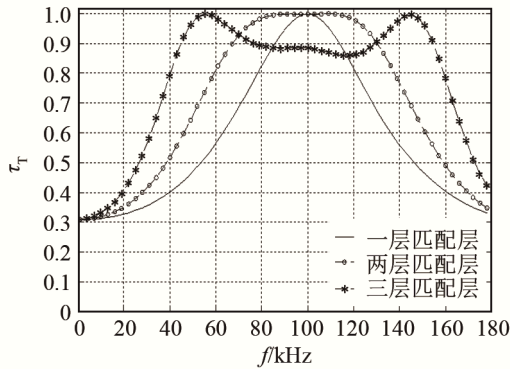


图 4 匹配层换能器水中声强透射系数

Fig.4 The energy transmission coefficient of the transducer with matching layers

谱等,可采用等效电路计算。其中的 Mason 等效电路分析和计算,可采用复合压电方程,导出考虑损耗的匹配层压电复合材料振动 Mason 等效电路,由此计算的等效导纳更接近实际情况^[9-10]。

单层、双层和三层匹配层换能器的振动 Mason 等效电路可由推导给出,如图 5 所示。图 5 中虚线框内为无源材料匹配层的等效电路,可根据所需要的匹配层的数量来增加或者减少匹配层。

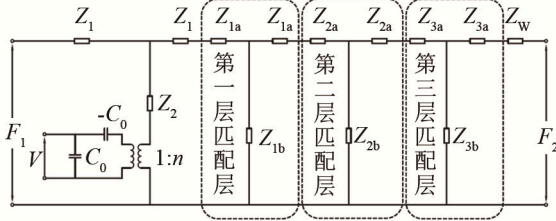


图 5 多匹配层换能器等效电路

Fig.5 Mason equivalent circuit of the transducer with multi-matching layers

等效电路参数及其意义分别说明如下:

$$Z_1 = j\rho v S \tan(kt/2) \quad (3)$$

$$Z_2 = \rho v S / [j \sin(kt)] \quad (4)$$

$$Z_{ia} = j\rho_i v_i S_i \tan(k_i t_i/2), \quad i=1, 2, 3 \quad (5)$$

$$Z_{ib} = \rho_i v_i S_i / [j \sin(k_i t_i)], \quad i=1, 2, 3 \quad (6)$$

$$Z_w = \rho_w v_w S \quad (7)$$

其中, C_0 、 n 、 ρ 、 v 、 S 、 k 、 t 分别为晶片的静态电容、机电转换系数、密度、声速、横截面积、波数和厚度, ρ_i 、 v_i 、 S_i 、 k_i 、 t_i 分别为第 i 层匹配层的密度、声速、横截面积、波数和厚度, ρ_w 、 v_w 分别为水的密度、声速。自由振动时,认为两个力学端短路,可以计算换能器的导纳特性。

2 多种匹配层换能器样品研制与测试

根据换能器不同宽频带的实际需求并结合声

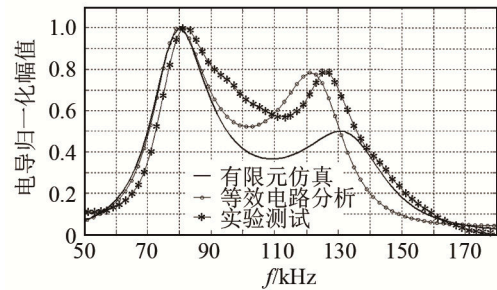
透射理论、Mason 等效电路和有限元仿真设计研制了三种类型的高频宽带水声换能器:单匹配层换能器、双匹配层换能器和三匹配层换能器。

2.1 换能器电导谱

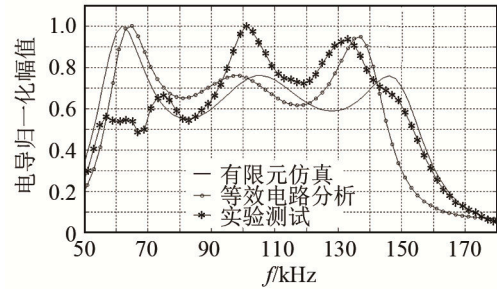
通过 Mason 等效电路和有限元仿真对三种类型的高频宽带换能器进行了水中导纳曲线的模拟计算、分析并与实测结果进行对比,结果如图 6 所示。仿真与实验结果存在着一定的差异,初步分析是匹配层的实际参数与仿真和等效电路模拟参数存在偏差所致。从图 6 中可以发现,随着匹配层数量的增加,其对应的电导响应工作频带也随之增加,分别为 73~135 kHz, 70~153 kHz 和 63~158 kHz。

2.2 换能器的发送电压响应

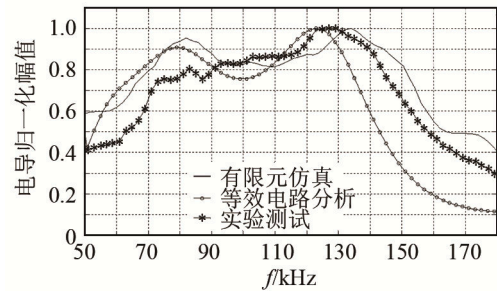
经有限元仿真和实际测试的三种宽带换能器



(a) 单层匹配层



(b) 双层匹配层



(c) 三层匹配层

图 6 通过有限元仿真、等效电路分析和实验测试得到的三种类型换能器电导谱

Fig.6 Conductivity spectrum of three types of transducers obtained by finite element simulation, equivalent circuit analysis and experimental measurement

水中发送电压响应曲线如图 7 所示。单层、双层和三层匹配层换能器的最大发送电压响应分别为 140.3、139 和 136.7 dB，其工作频带分别为 79~150 kHz，74~163 kHz 和 66~176 kHz，带内发送电压响应起伏为 -6 dB。经过计算，三种换能器的中心频率分别为 114、118 和 121 kHz，其 -6 dB 相对带宽分别为 62%、75% 和 91%。实验表明：本文研制的三种类型换能器与传统的中心频率为 320 kHz、-6 dB 相对带宽为 41.2% 的单匹配层换能器和中心频率为 2.95 MHz、-6 dB 相对带宽为 83.2% 的带有背衬的三层匹配层医学超声换能器相比，相对带宽有了明显的提高。

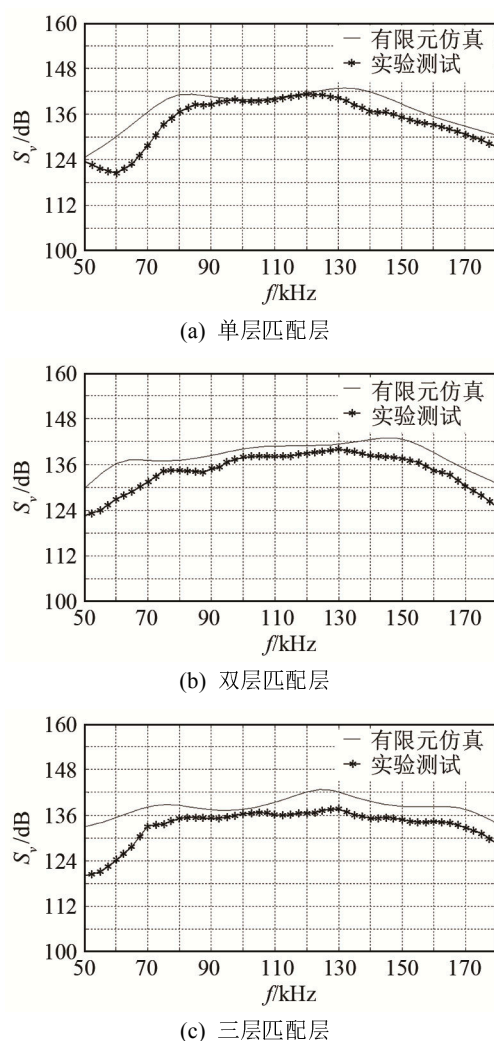


图 7 有限元仿真和实验测试得到的三种类型换能器水中发送电压响应

Fig.7 Transmitting voltage responses of three types of transducers in water obtained by finite element simulation and experimental measurement

3 结 论

本文采用声透射原理计算了换能器所需的匹

配层参数并通过实验研制了和理论较为接近的实际匹配层材料，在此基础上进一步通过有限元仿真计算了三种类型换能器水中声强透射系数；其次，通过 Mason 等效电路和有限元分析，计算了三种类型换能器水中电导谱，并与实际测试的结果进行对比分析；最后，在此基础上研制了单层、双层和三层匹配层换能器，从测试结果可知，其工作频带分别为 79~150 kHz，74~163 kHz 和 66~176 kHz，带内发送电压响应起伏为 -6 dB。实验表明，本文研制的三种类型换能器突破了传统换能器带宽窄的缺点。该工作为实现宽频带换能器在实际工作中的应用提供了方向。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 王宏伟, 王丽坤, 秦雷, 等. 堆叠压电复合材料圆环换能器研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(3): 484-488.
WANG Hongwei, WANG Likun, QIN Lei, et al. Research on the stacked piezoelectric composites ring transducer[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(3): 484-488.
- [3] 林金虎. 匹配层厚度振动换能器研究[J]. 声学技术, 2010, 29(5): 551-555.
LIN Jinhu. Study of thickness-vibrating transducers with matching layers[J]. Technical Acoustics, 2010, 29(5): 551-555.
- [4] 李珺, 贺西平, 张峰, 等. 换能器双匹配层参数的计算[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(12): 106-108.
LI Jun, HE Xiping, ZHANG Feng, et al. Parameters calculation of acoustical matching layers of ultrasonic transducers[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(12): 106-108.
- [5] 童晖, 周博文, 张彬, 等. 一款宽带圆柱阵研究[J]. 声学技术, 2020, 39(6): 779-782.
TONG Hui, ZHOU Bowen, ZHANG Bin, et al. A study of broadband cylindrical array transducer[J]. Technical Acoustics, 2020, 39(6): 779-782.
- [6] 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 Hao, ZHAO Cheng, SHI Xiumei, et al. Development of three matching layer broadband medical ultra-sonic phased array transducer with 2-2 piezoelectric ceramic composite[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44(6): 88-92.
- [7] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京大学出版社, 2001: 218-219.
- [8] 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.
- [9] 卞加聪, 胡文祥, 周八妹. 多匹配层空气耦合压电超声换能器[J]. 应用声学, 2018, 37(1): 96-100.
BIAN Jiacong, HU Wenxiang, ZHOU Bamei. Multi-matching layer air-coupled piezocomposite ultrasonic transducer[J]. Applied Acoustics, 2018, 37(1): 96-100.
- [10] 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: 109-118.