

高频宽带换能器研究

童 晖，周益明，王佳麟，翁汝莲

(中国科学院声学所东海研究站，上海 200032)

摘要：主要研究高频换能器的匹配层技术，通过匹配层技术拓宽换能器的频带，首先利用等效电路法分析高频匹配层换能器，其次通过 Matlab 仿真分析匹配层材料的密度、声速、厚度变化对换能器电声参数性能的影响，进而对其电声性能进行优化设计，最终制作出一高频宽带换能器。通过实验测得结果与仿真结果基本一致，实验测得换能器的最大发送电压响应为 178 dB，工作频带为 260~370 kHz，带内发送电压响应起伏为 -3 dB，300 kHz 时换能器指向性 -3 dB 开角为 6.5°。

关键词：匹配层；高频；宽带换能器

中图分类号：TB552

文献标识码：A

文章编号：1000-3630(2013)-06-0524-04

DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2013.06.017

Study of high frequency broadband transducer

TONG Hui, ZHOU Yi-ming, WANG Jia-lin, WENG Ru-lian

(Shanghai Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

Abstract: This paper mainly investigated the matching layer technique for high frequency transducers. High-frequency transducer with a matching layer was first analyzed with equivalent circuit method. Then, the effect of matching layer parameters on the acoustic transducer performance was summarized by simulation. And its electro-acoustic characteristics were optimized. Finally, a high frequency broadband transducer was designed. Experimental results are in agreement with the theoretical values. It was shown that (i) the maximal transmitting sound level can reach 178 dB; (ii) the bandwidth of the transducer is 260~370 kHz; (iii) the fluctuation of the transmitting voltage response is -3 dB; (iv) the transducer has a directional angle of 6.5 degree with -3 dB @ 300 kHz.

Key words: matching layer; high frequency; broadband transducer

0 引言

随着声纳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，高频换能器越来越受到人们的重视^[1,2]。通常高频换能器的 Q 值较高，工作带宽较窄，所获得的声信息较少，因此高频换能器的宽带特性是目前重要的研究方向之一。目前拓宽换能器带宽主要是通过多模态的耦合来实现^[3,4]。本文主要研究换能器的匹配层技术，选择具有适当特性阻抗的材料作为换能器的匹配层，采用匹配层技术^[5,6]使其产生两个谐振频率，从而实现高频换能器的宽带性能。

1 匹配层换能器的等效电路

换能器的匹配层^[7]技术是指在换能器辐射表面

与水介质之间增加了一层具有一定声阻抗的材料层，增加匹配层材料的密度，即增加换能器自身的负载质量，换能器的基频就会降低，同时由于匹配层材料的特性阻抗小于换能器上任一部件的特性阻抗，故换能器的第二阶谐振频率同样下降，这样就形成了两个谐振峰，实现了换能器频带的拓宽。图 1 为空气背衬条件下圆片匹配层换能器的等效电路，其中虚框部分为匹配层部分。

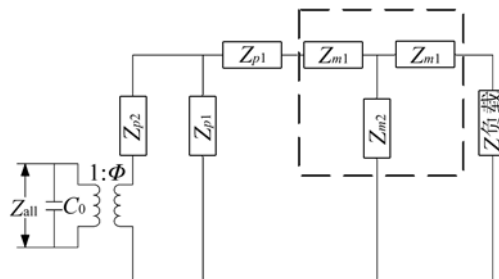


图 1 匹配层换能器的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of the transducer with a matching layer

图 1 中各参数公式如下：

$$C_0 = \frac{\epsilon_{33}^T S_1}{l} (1 - k_{33}^2) \quad (1)$$

收稿日期：2013-06-07；修回日期：2013-09-28

作者简介：童晖(1986—)，男，浙江淳安人，硕士，研究方向为高频宽带换能器。

通讯作者：童晖，E-mail: tonghui27@163.com

$$\Phi = \frac{S_1}{l} \left(\frac{\epsilon_{33}^T}{S_{33}^E} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$Z_{p1} = j\rho_1 c_1 S_1 \tan(k_1 l / 2) \quad (3)$$

$$Z_{p2} = \rho_1 c_1 S_1 / j \sin(k_1 l) \quad (4)$$

$$Z_{m1} = j\rho_2 c_2 S_2 \tan(k_2 h / 2) \quad (5)$$

$$Z_{m2} = \rho_2 c_2 S_2 / j \sin(k_2 h) \quad (6)$$

$$Z_{\text{负载}} = R_s + jX_s \quad (7)$$

其中： C_0 为陶瓷静电容， Φ 为机电转换系数， Z_{p1} 、 Z_{p2} 为陶瓷等效参数， Z_{m1} 、 Z_{m2} 为匹配层等效参数， Z 负载为换能器的负载阻抗。 S_1 为陶瓷的表面积， S_2 为匹配层的表面积， l 为陶瓷厚度， h 为匹配层厚度。

2 高频宽带换能器设计

本文中用到的高频换能器是由 Pzt-8 陶瓷圆片构成，主要是利用陶瓷片厚度方向的纵振产生出一个频率为 300 kHz 的高频换能器。由于陶瓷圆片在高频条件下的厚度振动具有较强的径向耦合，因此将陶瓷圆片沿水平和垂直方向切割处理，消除了高次径向耦合，得到一个比较纯的厚度振动模态换能器。

2.1 匹配层换能器设计

在切割后的压电陶瓷圆片上加入匹配层，根据声波在不同介质中的反射和透射情况可以得知，当 $Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3}$ 时，声波的透射系数 T 为

$$T = \frac{1}{\left[\frac{Z_1 + Z_3}{2\sqrt{Z_1 Z_3}} \right] \cos^2 k_2 l + \sin^2 k_2 l} \quad (8)$$

其中： Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别为陶瓷中声阻抗、匹配层材料声阻抗、水中声阻抗； l 为匹配层材料的厚度。当 $l = \lambda_2 / 4$ ，声波经过匹配层的透射系数最大，即满足 1/4 波长全透射条件。

2.2 匹配层参数优化

对高频匹配层换能器进行仿真，调节匹配层材料的密度、声速、厚度变化，从而分析换能器的声性能。

2.2.1 匹配层密度变化

当高频匹配层换能器中匹配层材料的声速及厚度一定时，换能器在水中的电导曲线随匹配层密度的变化如图 2 所示，图中 $c=2330 \text{ m/s}$ ， $h=1.95 \text{ mm}$ 。随着匹配层材料密度的增加，换能器在水中谐振点附近电导逐渐降低，这是因为匹配层材料密度变大，匹配层材料的质量随之增大，相当于换能器增

大了自身的负载质量。随着密度的增大，换能器出现了两个谐振频率，然而，随着密度继续增大，两谐振频率间的凹谷也随之增大。

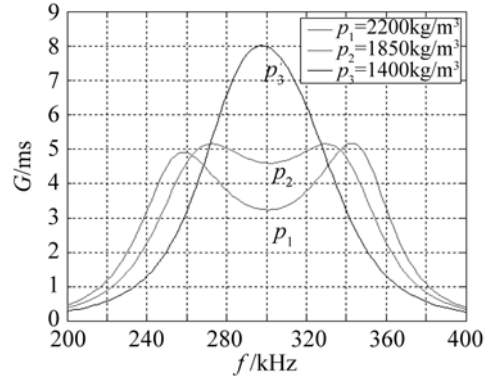


图 2 不同密度条件下高频匹配层换能器的电导曲线
Fig.2 Conductance curves of high frequency transducer with a matching layer of different densities

2.2.2 匹配层声速变化

当匹配层材料的密度、厚度一定时，高频匹配层换能器在水中的电导曲线随声速的变化如图 3 所示，图中 $\rho=1850 \text{ kg/m}^3$ ， $h=1.95 \text{ mm}$ 。从图 3 中可知匹配层换能器具有两个峰值频率 f_H 、 f_L ， f_H 为较高的频率， f_L 为较低的频率，随着声速的增加， f_L 电导值增大， f_H 电导减小，当声速为一定值时，匹配层材料厚度等于 1/4 的波长时的声速，换能器具有最佳的带宽。随着声速的继续增加， f_L 电导值继续增大， f_H 电导继续减小，然而换能器的谐振点 f_H 、 f_L 基本保持不变。这主要是由于匹配层材料声速的变化直接改变了匹配层材料中声波的波长，同时影响换能器匹配层材料在不同频率下的透声系数。

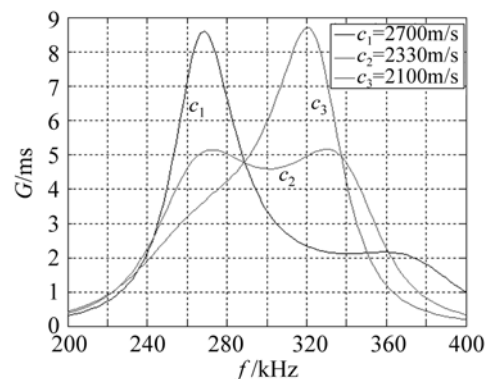


图 3 不同声速条件下高频匹配层换能器的电导曲线
Fig.3 Conductance curves of high frequency transducer with a matching layer of different acoustic velocity

2.2.3 匹配层厚度变化

当匹配层材料的密度、声速一定时，高频匹配层换能器在水中的电导曲线如图 4 所示，图中 $\rho=1850 \text{ kg/m}^3$ ， $c=2330 \text{ m/s}$ 。从图 4 可以看出，随着

匹配层材料厚度的增加,换能器水中谐振频率 f_H 电导逐渐增大, f_L 电导逐渐减小,当匹配层厚度为 $1/4$ 波长时,发生全透射,换能器具有较理想的电导曲线。随着厚度的继续增大,换能器水中电导曲线中的 f_H 电导继续增大, f_L 电导继续减小。

通过仿真调整匹配层材料的密度、声速以及厚度,设计出一高频宽带换能器,换能器的电导曲线如图 5 所示。换能器的工作频段为 250~350 kHz,电导最大值为 5.2mS。通过仿真得到换能器的发送电压响应曲线如图 6 所示。

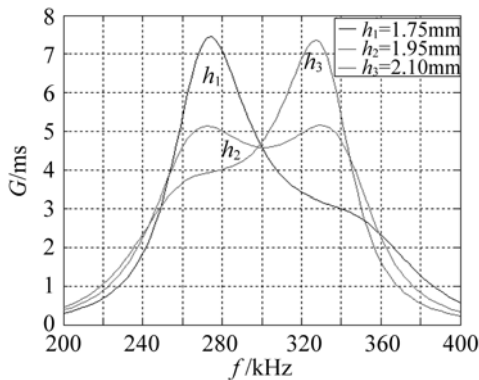


图 4 不同厚度条件下高频匹配层换能器的电导曲线
Fig.4 Conductance curves of high frequency transducer with a matching layer of different thicknesses

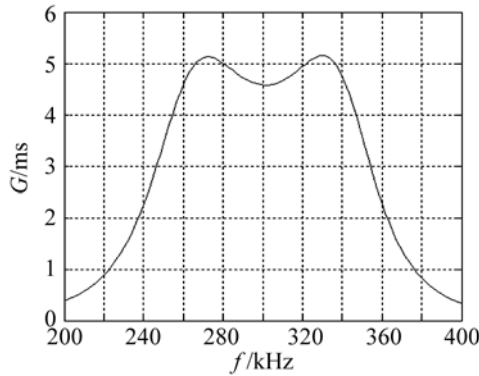


图 5 最佳匹配条件下高频匹配层换能器的电导曲线
Fig.5 Conductance curve of high frequency transducer with a matching layer under the best matched condition

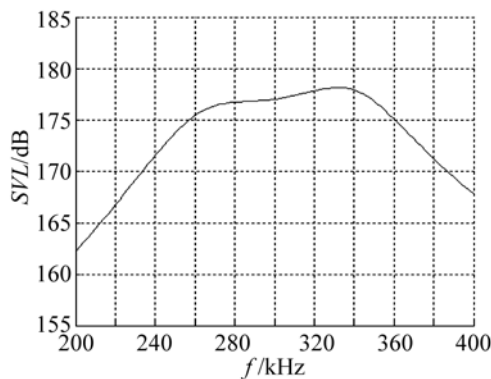


图 6 最佳匹配条件下换能器的发送电压响应曲线
Fig.6 The transmitting voltage response curve of the transducer under the best matched condition

3 换能器电声性能测量

通过上述仿真得出换能器的基本参数,最终制作出一个 $\Phi 55\text{mm}$ 、总厚度为 7.72mm 的高频宽带换能器,如图 7 所示。利用 Agilent4294A 阻抗分析仪测得换能器水中的导纳曲线如图 8 所示。与图 5 相比有稍许差异,其一是换能器在水中的仿真所给的阻尼系数为经验值,与实际换能器有一定的误差。其二是在高频条件下,换能器的电缆对于传输过程中有一定的损耗,在实验仿真中并未考虑进去。

在水中测得换能器的发送电压响应曲线如图 9



图 7 高频宽带换能器样机图
Fig.7 The prototype of the high frequency broadband transducer

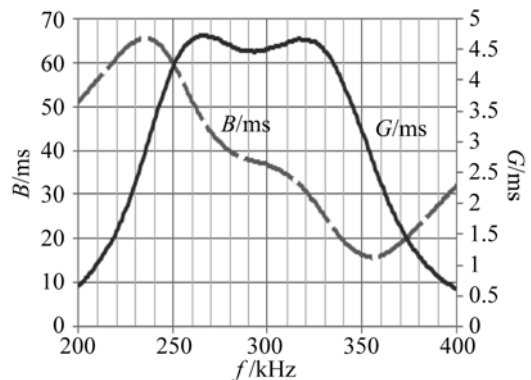


图 8 实测高频宽带换能器的水中导纳曲线
Fig.8 The measured admittance curve of the high frequency broadband transducer

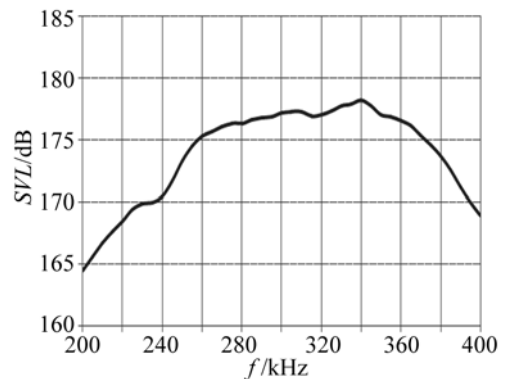


图 9 实测高频宽带换能器的发送电压响应曲线
Fig.9 The measured transmitting voltage response curve of the high frequency broadband transducer

所示。由图9可见, 该高频换能器的最大发送电压响应为178 dB, 工作带宽为260~370 kHz, 带内起伏为-3 dB, 同时测得换能器在300 kHz频率时的最大声源级为217 dB。

测得换能器在300 kHz频率下的指向性如图10所示, 换能器的-3 dB开角为6.5°。

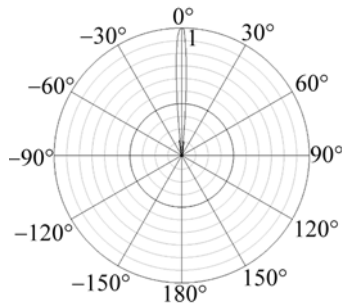


图10 300kHz 高频宽带换能器的指向性图

Fig.10 The directivity diagram of the high frequency broadband transducer at 300 kHz

4 结论

本文通过采用等效电路法以及 Matlab 仿真设计并制作出一个高频宽带换能器, 并得出高频匹配层换能器中匹配层材料参数对换能器电声性能的影响, 最终制作了一个工作频带为260~370 kHz、带内最大发送电压响应为178 dB的宽带换能器。测量结果与仿真基本一致, 因此, 通过匹配层技术实现高频换能器的宽带特性是一种可行的方法。

参 考 文 献

- [1] 田洪亮, 夏铁坚, 刘强. 由小振子组成的高频圆柱换能器宽方向性初探[J]. 声学及电子工程, 2008, 91(3): 31-33.
TIAN Hongliang, XIA Tiejian, LIU Qiang. From small high-frequency oscillating cylinder width direction of the transducer[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2008, 91(3): 31-33.
- [2] Kim C Benjamin, Sheridan Petrie. The design, fabrication, and measured acoustic performance of a 1-3 piezoelectric composite navy calibration standard transducer[A]. J. Acoust. Soc. Am, 2001, 109(5 Pt 1): 1973-1978.
- [3] 俞宏沛, 宋兰英. 采用多模态振动拓宽换能器频带的几种方法[J]. 声学及电子工程, 1999, 55(3): 23-27.
YU Hongpei, SONG Lanying. Multi-modal vibration transducer band widening in several ways[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 1999, 55(3): 23-27.
- [4] 陈航, 张允孟, 李志舜. 具有阻抗匹配层的宽度纵振压电换能器设计[J]. 应用声学, 2001, 20(2): 30-34.
CHEN Hang, ZHANG Yunmeng, LI Zhishun. Design of wide-band longitudinal mode piezoelectric transducers with impedance matching layers[J]. Applied Acoustics, 2001, 20(2): 30-34.
- [5] Mark R. Draheim, Wenwu Cao. Finite element and experimental study of impedance matching layer optimization[J]. Ultrasonic Transducer Engineering, 1997, 3037: 135-139.
- [6] Yeong-Chin Chen. Sean Wu. Multiple acoustical Matching layer design of ultrasonic transducer for medical application[J]. Japan Society of Applied Physics, 2002, 41(10): 6098-6107.
- [7] 刘望生, 俞宏沛, 周利生. 双激励匹配层宽带水声换能器研究[J]. 声学技术, 2008, 27(2): 283-286.
LIU Wangsheng, YU Hong-pei, ZHOU Lisheng. The study of broadband underwater acoustic transducer with doubly exciting plus a matching layer[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(2): 283-286.

上海市声学学会组团参加第六届两岸声学技术交流研讨会

2013年11月14~15日, 第六届两岸声学技术交流研讨会在台湾科技大学举行, 上海声学学会组织了来自学会办公室、中国科学院声学研究所东海研究站、《声学技术》编辑部、中国船舶重工集团公司第726研究所、同济大学声学研究所、章奎生声学设计研究所及上海申华声学装备有限公司一行12人的团队参与此次交流会。此次会议共60余人参会, 会上交流了12篇学术报告, 其中上海方面提交了5篇学术报告, 是由章奎生声学设计研究所提交。14日一天的学术交流时间紧凑, 讨论热烈, 收效甚好。《声学技术》编辑部主编姚蓝教授和上海市声学学会副秘书长丁玉薇老师代表《声学技术》编辑部对会议优秀论文发出了刊登邀请。15日上午台湾方面还组织了对台湾戏曲学院的参观访问, 现场观看了戏曲学院学员课堂教学实况, 并观看了戏曲学院综艺团精彩的表演。

两岸声学技术交流研讨会是由章奎生声学设计研究所章奎生教授于2008年发起, 已经先后于2008年在香港(第一届), 2009年在台北(第二届), 2010年在上海(第三届), 2011年在杭州(第四届), 2012年在香港(第五届), 第六届又轮值台湾举行。此次会后, 两岸代表还对下届会议相关事宜进行了讨论, 初步确定轮值大陆举行的第七届两岸声学学会交流研讨会将于2014年8月底9月初在我国云南省境内召开。