

# 一款水声通信换能器研究

童 晖, 张 涛, 张 彬, 王佳麟

(中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 201815)

**摘要:** 随着声呐技术的迅速发展, 水声通信在海洋科学研究及海洋开发中发挥着非常重要的作用, 水声通信换能器是水声通信设备中负责电声转换的重要部件。研究了一款带底座的溢流圆管换能器, 通过有限元仿真计算了换能器发送电压响应和方向性等参数, 优化了换能器中的陶瓷元件和底座的结构尺寸, 制作并测量得到一款半空间指向性的水声通信换能器, 换能器的工作频段为 11~23 kHz, 带内起伏为 3 dB, 最大发送电压响应为 133 dB, -3 dB 垂直开角大于 180°。

**关键词:** 半空间; 溢流圆管; 通信换能器

中图分类号: TB552

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2017)-04-0390-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.04.016

## A study of underwater acoustic communication transducer

TONG Hui, ZHANG Tao, ZHANG Bin, WANG Jia-lin

(Shanghai Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201815, China)

**Abstract:** With the quick development of sonar technology, underwater acoustic communication plays an important role in marine scientific research and ocean development. Underwater acoustic communication transducer is the important part of the electric sound conversion system for acoustic communication. This paper studies a kind of underwater acoustic communication transducer using free-flooded ring typed tube. The ceramic components and shell structure of the transducer are optimized by the finite element simulation. A half-space directional underwater acoustic communication transducer is made and measured with the specifications as follows: 11~23 kHz working band with 3 dB fluctuation, 133 dB maximum transmitting voltage response and the -3 dB vertical angle of greater than 180 degrees.

**Key words:** half-space directional; free-flooded ring tube; communication transducer

## 0 引 言

近年来, 随着科学技术的发展, 水声通信技术也得到了飞速的提高。换能器是水声通信设备的重要组成部分, 有多种类型<sup>[1-2]</sup>, 比如复合棒、圆管、三叠片、弯张换能器等。其中圆管换能器由于其水平方向性为全向, 在水声通信运用中较普遍。圆管换能器具有制作工艺简单、结构简单、带宽较宽<sup>[3]</sup>、性能可靠的特点。圆管换能器从结构上分为两种类型, 一类为空气背衬换能器, 另一类为溢流圆管换能器<sup>[4]</sup>。溢流圆管换能器具有内外压力平衡、几乎不受水深限制的特点而广泛应用于水声通信。

本文介绍一种溢流式圆管换能器, 该换能器由压电陶瓷圆管、金属底座和水密包覆材料等组

成, 该换能器存在一个半开口的液腔。通过液腔与陶瓷圆管的径向振动耦合, 拓宽换能器的带宽; 金属底座<sup>[5]</sup>可以改善换能器的垂直方向性, 同时优化换能器的发送电压响应, 在换能器底座增加吸声橡胶以减小换能器的后辐射, 从而达到较为理想的半空间指向性<sup>[6]</sup>。

## 1 换能器理论及有限元仿真

本文中溢流圆管换能器的结构如图 1 所示, 溢流圆管换能器的谐振模态为圆管的呼吸模态, 陶瓷圆管及极化方向为径向极化, 其谐振频率可用式(1)来表示:

$$f = c / \pi D \quad (1)$$

其中:  $c = \sqrt{\frac{1}{\rho S_{11}^E}}$ ,  $c$  为陶瓷圆管中声波的声速,  $\rho$  为陶瓷密度,  $S_{11}^E$  为陶瓷的柔顺系数,  $D$  为陶瓷圆管的直径。因此可以根据圆管陶瓷的尺寸大小确定陶瓷的谐振频率。

收稿日期: 2016-12-05; 修回日期: 2017-03-05

作者简介: 童晖(1986—), 男, 江西抚州人, 硕士, 研究方向为水声换能器。

通讯作者: 童晖, E-mail: tonghui27@163.com

换能器液腔谐振的频率可根据 G.W.Mcmahon 给出的方程(2)计算<sup>[7]</sup>:

$$0.106\Omega^2 - \left(\frac{h}{D_m} + 0.633\right)\Omega = \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

$$0.33 < \Omega < 3.3$$

式中: 无量纲频率参数  $\Omega = \frac{\pi D_m}{c_0} f_c$ ;  $h$  为换能器的高度;  $D_m$  为换能器的内径;  $c_0$  为液腔中水柱的声速。由于溢流环壳体对水柱的影响, 溢流环内部水柱的声速  $c_0$  比无限开放的水域中的声速  $c$  要小,  $c_0$  与  $c$  满足以下关系<sup>[7]</sup>:

$$c_0 = c \left(1 + \frac{BD_m}{Yt}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中:  $B$  为水的体积弹性模量;  $Y$  为溢流环换能器材料的弹性模量;  $t$  为溢流环换能器的壁厚。

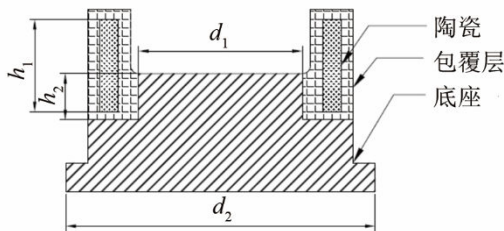


图1 溢流圆管结构示意图  
Fig.1 Structure diagram of free-flooded ring typed tube

当确定换能器谐振频率时, 可通过公式(1)计算出陶瓷外形尺寸, 并通过公式(2)计算出换能器的液腔谐振频率。通过换能器的两个谐振频率拓宽换能器的带宽, 但由于实际结构中具有不规则腔体, 并不能精确地计算腔体谐振频率, 因此在计算带腔体谐振频率时都采用有限元软件。

通过图 1 结构示意图, 建立有限元仿真模型, 其中  $h_1$  为陶瓷高度,  $h_2$  为底座凸台高度,  $d_1$  为底座凸台直径,  $d_2$  为底座外径。在不同高度  $h_2$  条件下, 圆管的发送电压响应曲线如图 2 所示。

高度  $h_2$  的改变将影响陶瓷圆管内部液腔的大小, 在不同高度条件下, 内部的液腔界面反射所形成的声场将不同, 从而对换能器的发送电压响应以及换能器的垂直指向性起到了决定性的作用。

由图 2 可见, 随着  $h_2$  的增加, 腔体的谐振频率逐渐向高频移动, 然而圆管径向谐振响应逐渐减小, 这主要是由于换能器内部液腔响应与圆管径向响应叠加的结果, 通过选取合适的液腔高度可以获得较理想的发送电压响应  $SVL$  曲线。

直径  $d_1$  的改变也将改变陶瓷圆管内部界面的反射条件, 通过有限元仿真得到  $d_1$  与发送电压响应的关系如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 随着的  $d_1$

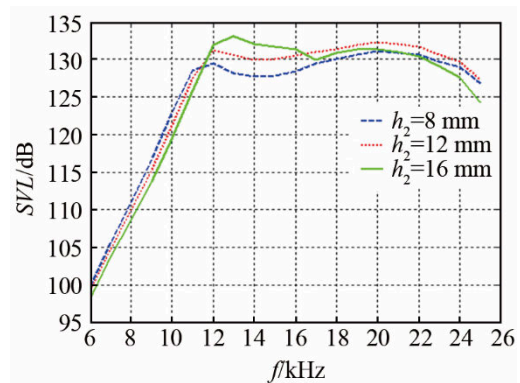


图2 发送电压响应随  $h_2$  变化曲线  
Fig.2 The transmitting voltage response curves for different values of  $h_2$

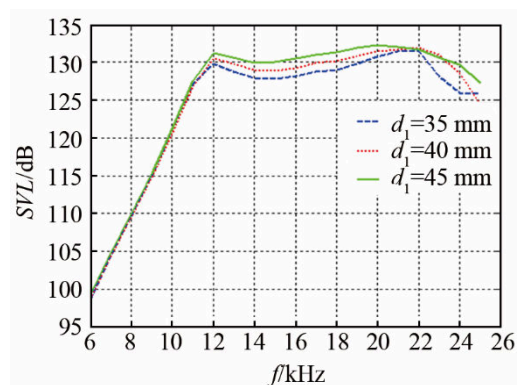


图3 发送电压响应曲线随  $d_1$  变化曲线  
Fig.3 The transmitting voltage response curves for different values of  $d_1$

的增加, 液腔谐振频率以及陶瓷圆管径向谐振频率不会改变, 然而发送电压响应幅度随着  $d_1$  的增加而增加, 且响应曲线趋于平坦。 $d_1$  的大小具有局限性, 不能无限增加,  $d_1$  应小于陶瓷圆管的内径。

发送电压响应随  $d_2$  的变化曲线如图 4 所示, 从图 4 中可以看出, 直径  $d_2$  的变大, 对于陶瓷圆管液腔谐振是没有影响的, 但是在陶瓷径向谐振点上, 响应逐渐增大, 同时向低频部分移动, 这主要是由于  $d_2$  变大后, 在  $d_2$  断面处同样出现了一个反射的界面层, 不同直径的反射对于换能器的响应有不同的

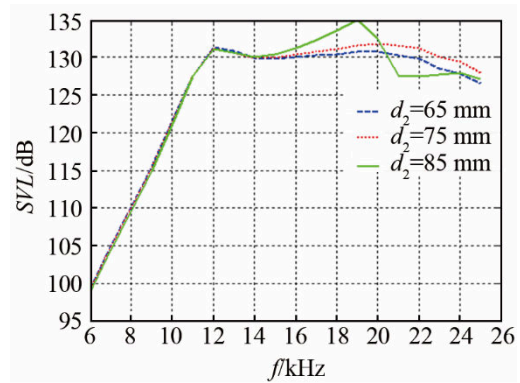


图4 发送电压响应曲线随  $d_2$  变化曲线  
Fig.4 The transmitting voltage response curves for different values of  $d_2$

影响。因此通过仿真选取适当的 $d_2$ 直径,可以得到较宽的带宽以及较大的发送电压响应曲线。

通过上述仿真参数可以优化确定换能器的各项参数,最佳参数条件下的发送电压响应曲线如图5所示。

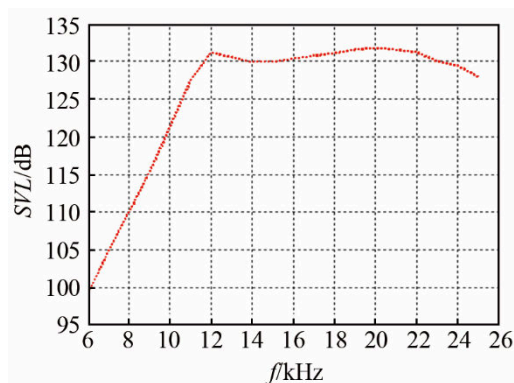


图5 优化后的发送电压响应曲线  
Fig.5 Optimized transmitting voltage response curve

## 2 换能器的电声性能测量

通过上述仿真可以得出换能器的基本参数,考虑到水声通信换能器需长时间处于海水当中,因此选取钛合金材料作为换能器的底座材料,选取聚氨酯材料作为换能器的包覆材料,通过上述仿真得出换能器的基本参数,最终制作出一个 $\phi 75\text{ mm} \times 45\text{ mm}$ 的水声通信换能器,其中底座外直径为75 mm,换能器样机如图6所示。

在 $10\text{ m} \times 8\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的消声水池中测量换能器的发送电压响应曲线并与仿真结果的对比情况如图7所示。从图7中可以看出,仿真曲线与实测曲线能较好地吻合,在工作频段 $11 \sim 23\text{ kHz}$ 内,换能器



图6 水声通信换能器样机  
Fig.6 Prototype of underwater acoustic communication transducer

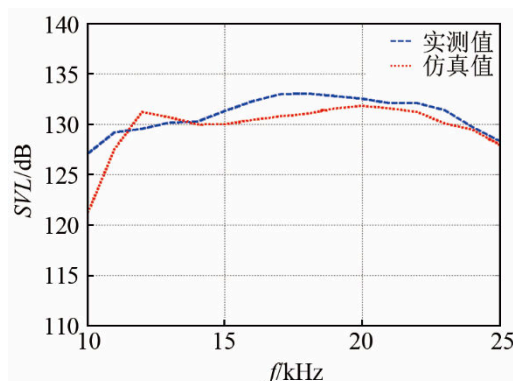


图7 发送电压响应实测与仿真对比  
Fig.7 Comparison between the measured and the simulated transmitting voltage response curves

的起伏小于3 dB,最大发送响应为133 dB。

由于水声通信换能器通常需要半空间的指向性,因此在换能器的底部增加了一个吸声障板,这样可以有效地降低换能器的后辐射,同时不影响换能器的半空间指向性。实验中测得换能器在整个频段内的指向性都大于 $180^\circ$ ,23 kHz时换能器的指向性如图8所示,图9为增加吸声材料后的换能器在

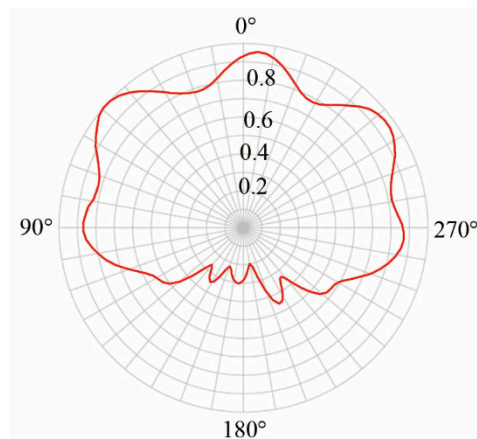


图8 23 kHz时换能器的发射指向性图  
Fig.8 Transmitting directional diagram of the transducer at 23 kHz

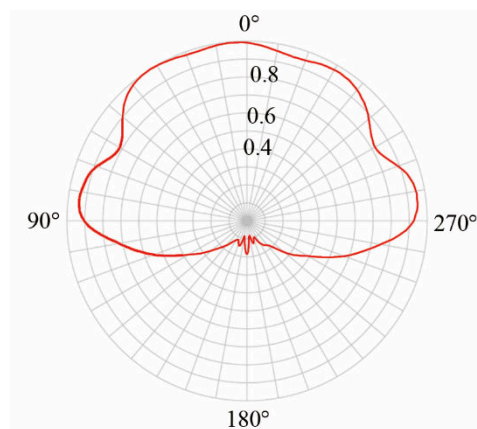


图9 吸声障板条件下23 kHz时换能器的发射指向性图  
Fig.9 With acoustical baffle transducer transmitting directional diagram at 23 kHz

23 kHz 的指向性图。

从图中可以看出，换能器 3 dB 开角大于  $180^\circ$ ，工作频带内前后辐射差在 14 dB 以上。

### 3 结论

本文通过有限元仿真优化了一种水声通信换能器，运用换能器的液腔谐振以及陶瓷圆管的径向谐振耦合实现换能器的宽带特性，同时运用换能器的液腔界面反射，实现换能器半空间指向性。最终制作出一个换能器，其频带范围为 11~23 kHz，带内起伏为 3 dB，最大发送电压响应为 133 dB，带内垂直开角大于  $180^\circ$ 。测量结果与仿真结果基本吻合，这类换能器广泛适用于水声通信中。

#### 参 考 文 献

- [1] 周利生, 胡青. 水声发射换能器技术研究综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(7): 932-937.  
ZHOU Lisheng, HU Qing. Summarization of underwater acoustic projector technologies[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(7): 932-937.
- [2] 刘慧生, 莫喜平. 纵向换能器宽带研究设计进展[J]. 声学技术, 2014, 33(6): 564-571.  
LIU Huiheng, MO Xiping. Progress in research and design of broadband longitudinal transducers[J]. Technical Acoustics, 2014, 33(6): 564-571.
- [3] 姚纪元, 徐余, 孙好广. 宽带压电圆管换能器的设计[J]. 声学技术, 2013, 32(6): 283-284.  
YAO Jiyuan, XU Yu, SUN Haoguang. The design of a wide-band piezoelectric ring transducers[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(6): 283-284.
- [4] 腾舵, 陈航, 朱宁, 等. 溢流式嵌镶圆管发射换能器的有限元分析[J]. 鱼雷技术, 2008, 16(6): 44-47.  
TENG Duo, CHEN Hang, ZHU Ning, et al. Finite element analysis of free-flooded segmented ring transducer[J]. Torpedo Technology, 2008, 16(6): 44-47.
- [5] 胡久龄. 指向性障板圆管换能器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.  
HU Jiuling. The study of baffled cylindrical directional transducer[D]. Harbin: Harbin Engineering University. 2009
- [6] Sherman C H, Butler J L. Transducers and arrays for underwater sound[M]. Newyork: Springer, 2007.
- [7] MCMAHON G W. Performance of open ferroelectric ceramic cylinders in underwater transducers[J]. J. Acoust. Soc.Am., 1964, 36(3): 528-533.