

欧米伽换能器振动辐射特性计算分析

王雨虹¹, 王德石¹, 张 恺¹, 李纯达², 张成果³

(1. 武汉海军工程大学兵器工程系新技术应用研究所, 武汉 430033; 2. 大连旅顺 91555 部队, 大连 116041;
3. 大连旅顺 91278 部队, 大连 116041)

摘要: 对一种新型的弯张换能器即欧米伽换能器的辐射特性进行了有限元分析, 并与钹式换能器进行对比。通过有限元计算, 对相同体积的欧米伽换能器与钹式换能器的电导纳、发射电压响应级以及接收灵敏度级进行了对比, 结果表明: 欧米伽换能器的低频性能和第一谐振频率处的接收灵敏度要好于钹式换能器, 而发射电压响应要低于钹式换能器, 比钹式换能器更好地解决了小体积与低工作频率之间的矛盾, 更宜实现基阵的小型化。舰船的机械噪声主要集中在 500Hz 以下, 体积较小的欧米伽换能器非常适合作为侦察舰船活动的被动声纳基元。

关键词: 弯张; 换能器; 响应级; 有限元法

中图分类号: TB565+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-01-0068-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.01.016

Sound radiation characteristics of the Omega transducer

WANG Yu-hong¹, WANG De-shi¹, ZHANG Kai¹, LI Cun-da², ZHANG Cheng-guo³

(1. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Dalian lvshun 91555 forces, Dalian 116041, China;

3. Dalian lvshun 91278 forces, Dalian 116041, China)

Abstract: The sound radiation of a new type of flextensional transducer—the Omega transducer is analyzed via finite element method. The Omega transducer is also compared with the cymbal transducer. In the case where they have the same volume, the comparisons of the admittance, the free field voltage sensitivity and the transmitting voltage response are made. The results show that the performances at low frequency and the free field voltage sensitivity of the Omega transducer are better than that of the cymbal transducer at the first resonance frequency, but the transmitting voltage response of the former is lower than that of the latter. The Omega transducer provides a better way out of the dilemma between the small volume and the low operation frequency. So, the Omega transducer is very suitably as a passive sonar element used for detecting the motion of the ship with mechanical noise below 500Hz.

Key words: flextensional; transducer; response level; finite element method

0 引言

随着海洋开发和军事对抗的发展, 声纳换能器面临着诸多挑战^[1-7]。弯张换能器为解决大功率、宽带、低频、小体积、轻重量的挑战应运而生, 其中钹式换能器就是其中的一种, 钹式换能器的诞生克服了 Moonie 换能器端帽轴向位移量不均匀, 中心最大, 在端帽边缘上减小为 0, 在粘结层上较厚的端帽中有较大的应力聚集的缺点^[8-14], Cymbal 换能器体积小、重量轻, 能产生较大的位移、速度、加速度, 并具有较大的动态范围。它不仅能用作水声

换能器、动态压力传感器和加速度传感器, 也可用作执行器^[10-12, 15-17]。对本文提出的一种弯张换能器——欧米伽换能器的水中辐射性能进行有限元分析, 并与钹式换能器进行对比。从电导纳特性、发射灵敏度和接收灵敏度等方面对两者进行比较, 并提出了该欧米伽换能器的适用范围。

1 欧米伽换能器结构与分析模型

1.1 欧米伽换能器的结构与原理

图 1 是欧米伽换能器的结构原理图。图 1(a)是外观图, 图 1(b)是剖面图, 图 1(c)是结构参数图。图中, T_p 指压电陶瓷片的厚度, T_c 指金属片的厚度, R_c 指换能器空腔顶部金属片的半径, R_p 指换能器陶瓷片的内半径, H 指换能器的空腔高度, R 指换能器压电陶瓷片的半径。该新型换能器是一种将金属帽、压电陶瓷圆片用环氧树脂粘结复合制成的弯

收稿日期: 2012-02-10; 修回日期: 2012-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005241)、

2012 年湖北省博士后科技活动择优资助项目

作者简介: 王雨虹(1974—), 男, 河北南宫人, 博士后, 研究方向为声学换能器。

通讯作者: 王雨虹, E-mail: wyhlgx230@126.com

张换能器。从外形上看，该换能器的上下两半部分均像大写的希腊字母“Ω”，故此命名。

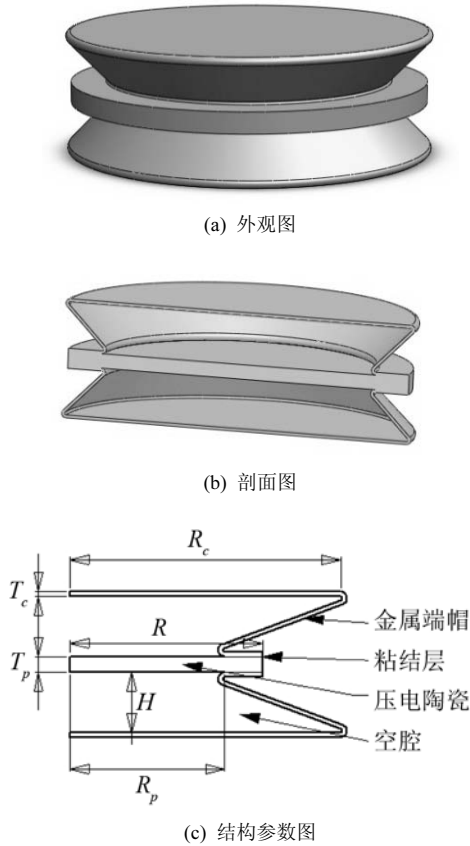


图 1 欧米伽换能器的结构原理图
Fig.1 The Omega transducer

1.2 计算模型

本文对换能器采用 ANSYS 有限元分析软件进行，所需的基本方程有^[18]：

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \dot{V} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{V} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & K_{ds} \\ K_{ds} & K_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ V \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix} \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ M_{fs} & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & C_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & K_{fs} \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{3}$$

其中，式(1)是结构分析方程，式(2)是压电分析方程，式(3)是流固耦合方程。在式(1)中， M 、 C 和 K 分别是系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。通过施加载荷力向量 F ，计算出的位移向量 u 便是结构问题的解。式(2)将压电体节点电势向量 V 与位移向量 u 组合成广义的位移向量，将节点电量向量 Q 和载荷力向量和 F 组合成广义载荷向量；广义质量阵与广义阻尼矩阵中以 0 扩充，在广义刚度阵中加入

机电耦合分量 K_{ds} 和介电矩阵分量 K_d 。式(3)在流体-结构界面上直接进行流固耦合，将节点声压向量 p 与结构位移向量 $\{u\}$ 组合而成，而在广义质量阵、广义刚度阵中加入流体-结构耦合分量 K_{fs} 与 M_{fs} ，分别用脚标 f 和 s 代表流体与结构。

2 换能器的性能分析

2.1 换能器的物理参数与形状参数

图 2 是钹式换能器图。图 2(a)是外观图，图 2(b)是结构参数图。采用 PZT5H 陶瓷片，金属端帽材料为黄铜，其物理参数采用参考文献[19]与[20]的相关参数，外部环境为水。为了进行合理比较，体积大小是需要着重考虑的，特别是对于空间大小有限的直升机、潜艇或舰艇，现在以“体积”基本相同的钹式换能器和欧米伽换能器作为对比，这里所说的“体积”指换能器能装进去的最小的长方体体积。具体形状参数参见表 1 所示。

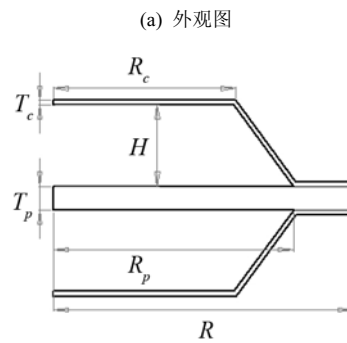
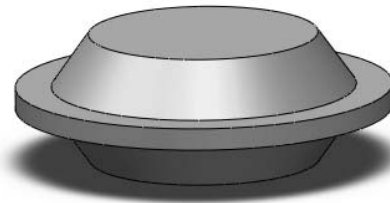


图 2 钹式换能器图
Fig.2 The cymbal transducer

表 1 两组换能器形状参数(单位: mm)

参数	欧米伽		钹式	
	第 1 组	第 2 组	第 1 组	第 2 组
黄铜厚度	0.20	0.20	0.25	0.25
陶瓷半径	23.00	12.00	6.50	6.50
陶瓷厚度	1.00	1.00	1.00	1.00
顶部半径	9.60	23.00	1.50	6.50
底部半径	21.60	9.60	4.20	5.00
空腔高度	3.40	3.40	0.90	0.90

2.2 钹式换能器与欧米伽换能器的导纳特性对比

在时间历程后处理器(post26)中,在正电极电压耦合部中选取节点序号最低的节点,提取节点反作用力解数据电荷值 CurrentFlow, 记为 Q , 已知激励电压 V , 那么导纳 Y 及其电导电纳分量可以通过式(4)计算^[18]:

$$Y = \frac{\partial Q / \partial t}{V} = j\omega \frac{Q}{V} = j2\pi f \frac{Q}{V} \quad (4)$$

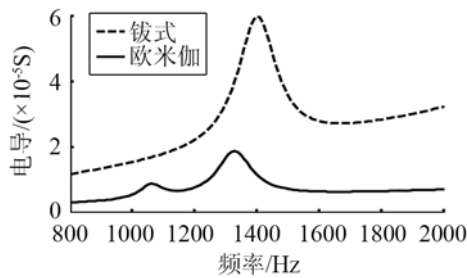
若 G 表示电导, B 表示电纳, 则导纳可写成如下形式:

$$Y = G + jB \quad (5)$$

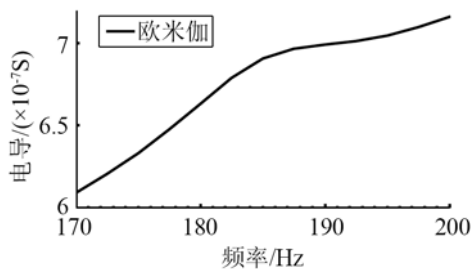
图 3~6 是钹式换能器和欧米伽换能器的导纳对比图, 表 2 为第一谐振频率对应的导纳值。从图 3~6 以及表 2 中可以看到, 欧米伽换能器的第一阶谐振频率均比钹式换能器低, 更容易满足对弯张换能器低频的要求; 欧米伽换能器的电导值和电纳值在大部分频段内均比钹式换能器低, 也就是说在相同的激励电压下, 钹式换能器比欧米伽换能器发射的远场声功率要高, 近场效应也要强, 如果欧米伽换能器要获得较大的发射声功率, 需要在条件允许的情况下加大激励电压。

2.3 钹式换能器与欧米伽换能器发射电压响应级之间的对比

在声轴上满足远场条件的某一节点 a , 提取节点自由度解 Pressure, 记为 p_a , a 点距离声中心距离为 r_a , 已知激励电压 V , 可根据式(6)计算发射电



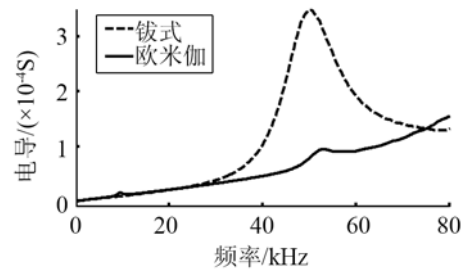
(a) 电导对比图



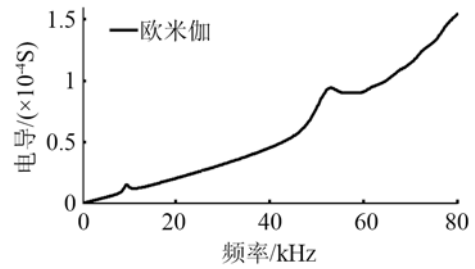
(b) 欧米伽换能器的电导图

图 3 第一组换能器电导

Fig.3 Conductance of the first group of transducers



(a) 电导对比图



(b) 欧米伽换能器电导图

图 4 第二组换能器电导

Fig.4 Conductance of the second group of transducers

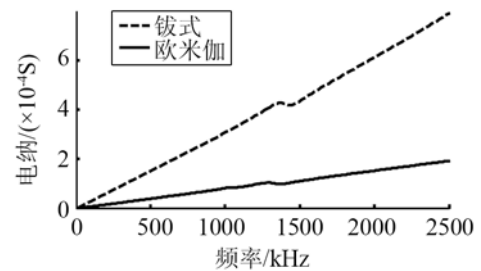


图 5 第一组电纳对比图

Fig.5 Susceptance of the first group of transducers

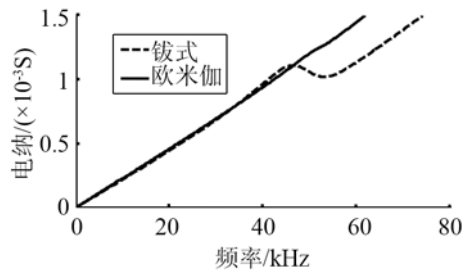


图 6 第二组电纳对比图

Fig.6 Susceptance of the second group of transducers

表 2 第一阶谐振频率对应的导纳值
Table 2 Admittance at the first resonance frequency

	钹式 第 1 组	欧米伽 第 1 组	钹式 第 2 组	欧米伽 第 2 组
f_0 /kHz	1.40	0.19	50.25	9.60
G /μs	59.70	0.70	348.80	15.20
B /μs	423.30	14.90	1054.80	217.20

压响应级^[18]：

$$TVR = \text{Re} \left[20 \lg \frac{p_a r_a}{V} \right] + 120 \quad (6)$$

式中，声压 p_a 是复数，Re 指取复数的实部。单位是 dB，参考值是 1V/ μPa 。

图 7、8 为换能器发射电压响应，表 3 为发射电压响应级下机械品质因数与带宽。由图 7、8 及表 3 可见，除了第一阶谐振频率附近外，欧米伽换能器在其余大部分频段范围内均比钽式换能器的发射响应低，其机械品质因数也比钽式换能器高。在相同体积的情况下，欧米伽换能器的频率要低，用于主动声纳换能器时，相对于钽式换能器，欧米伽换能器可以发射窄带信号。

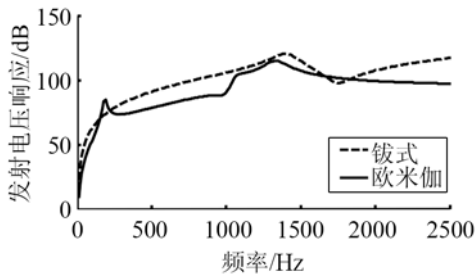


图 7 第一组换能器发射电压响应

Fig.7 Transmitting voltage response of the first group of transducers

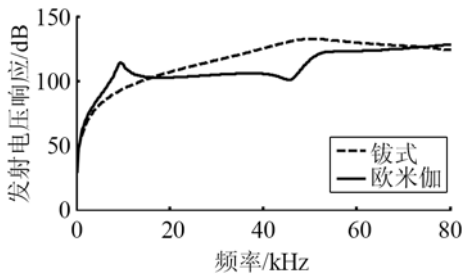


图 8 第二组换能器发射电压响应

Fig.8 Transmitting voltage response of the second group of transducers

表 3 发射电压响应级下机械品质因数与带宽

Table 3 Mechanical quality factor and bandwidth on the transmitting voltage response level

	钽式 第 1 组	欧米伽 第 1 组	钽式 第 2 组	欧米伽 第 2 组
f_0/kHz	1.40	0.19	50.25	9.60
Q_m	9.50	10.60	3.40	7.00
$\Delta f/\text{Hz}$	146.70	17.60	15545.70	1386.30

2.4 钽式换能器与欧米伽换能器接收灵敏度级之间的对比

接收灵敏度级 FFVS 的定义如下^[18]：

$$FFVS = \text{Re} \left[20 \lg \left(\frac{p_a r_a}{j Q \pi \rho f^2} \right) \right] - 120 \quad (7)$$

单位是 dB，参考值是 1V/ μPa 。

图 9、10 分别是两组换能器接收灵敏度级对比图，表 4 为该接收灵敏度级下的机械品质因数与带宽。由图 9、10 及表 4 可知，当作为接收换能器时，随着第一阶共振频率的升高，钽式换能器和欧米伽换能器的频带宽度均加宽，但机械品质因数会有一定程度的降低。在相同体积大小的情况下，欧米伽换能器的一阶共振频率均比钽式换能器低，接收灵敏度均比钽式换能器高，相对于钽式换能器来讲，欧米伽换能器更适用于作为低频接收换能器应用。特别需要说明的是，舰船的航行噪声集中在 500 Hz 以下，特别是推进系统的轴频和叶频，从图 9 和图 10 中可以看出，第一组换能器中的欧米伽换能器在低于 500 Hz 时接收灵敏度均高于 -185 dB，最高可达到 -158 dB，特别适合作为低频被动声纳使用，以用来侦察舰船的活动。

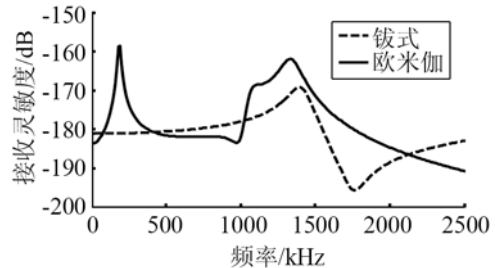


图 9 第一组换能器接收灵敏度级

Fig.9 Free field voltage sensitivity of the first group of transducers

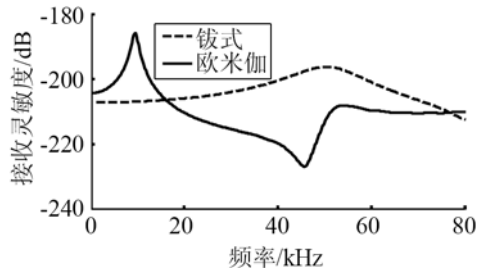


图 10 第二组换能器接收灵敏度级

Fig.10 Free field voltage sensitivity of the second group of transducers

表 4 接收灵敏度级下的机械品质因数与带宽

Table 4 Mechanical quality factor and bandwidth on the free field voltage sensitivity level

	钽式 第 1 组	欧米伽 第 1 组	钽式 第 2 组	欧米伽 第 2 组
f_0/kHz	1.40	0.19	50.25	9.60
Q_m	8.50	11.00	3.40	7.00
$\Delta f/\text{Hz}$	162.10	16.80	14703.90	1344.10

3 结论与展望

通过欧米伽换能器与钽式换能器的对比发现：在体积、金属片厚度、空腔高度和陶瓷片厚度相等

的情况下, 欧米伽换能器的接收性能要好于钹式换能器, 低频性能具有非常明显的优势, 而发射性能低于钹式换能器, 机械品质因数高于钹式换能器, 主要原因是随着频率的降低, 品质因数有增加的趋势, 而欧米伽换能器的谐振频率要比钹式换能器低一个数量级左右, 比钹式换能器具有更好地解决低频与小体积之间矛盾的能力, 具有一定的研究价值。另外, 为了增加频带宽度, 可以采用多个不同工作频率的欧米伽换能器组成基阵, 以实现增加带宽的目的。因此, 特别适合作为被动声纳使用在直升机、潜艇和舰艇等声纳空间使用受限的平台上并被用来侦察舰船的活动情况。

下一步将研制欧米伽换能器, 并进行实验分析, 以全面系统地确定各项参数对欧米伽换能器性能指标的影响规律, 并在该新型换能器的基础上, 通过合理设计提高该换能器的发射能力、增加其频带宽度等, 以扩大其应用范围。

参 考 文 献

- [1] 王雨虹, 王江安, 宗思光, 等. 激光致声声纳换能器设计[J]. 声学学报, 2008, 33(6): 562-565.
WANG Yuhong, WANG Jiangan, ZONG Siguang, et al. Design of sonar transducer based on the laser-induced sound[J]. Acta Acustica, 2008, 33(6): 562-565.
- [2] 王雨虹, 王江安, 宗思光, 等. 激光致声换能器的实验与应用论证[J]. 声学学报, 2011, 36(1): 20-26.
WANG Yuhong, WANG Jiangan, ZONG Siguang, et al. Experiment and application argumentation of the laser induced sound transducer[J]. Acta Acustica, 2011, 36(1): 20-26.
- [3] 王炳辉, 陈敬军. 声纳换能器的新进展[J]. 声学技术, 2004, 23(1): 67-69.
WANG Binghui, CHEN Jingjun. Recent developments of sonar transducers[J]. Technical Acoustics, 2004, 23(1): 67-69.
- [4] 闫向宏. 圆台型自聚焦超声压电换能器研究[J]. 声学技术, 2005, 24(2): 125-127.
YAN Xianghong. Self-focusing ultrasonic piezoelectric transducer with a truncated cone shape[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(2): 125-127.
- [5] 蓝宇, 王智元, 王文芝. 弯张换能器的有限元设计[J]. 声学技术, 2005, 24(4): 268-271.
LAN Yu, WANG Zhiyuan, WANG Wenzhi. Design of flexensional transducer based on finite element method[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(4): 268-271.
- [6] 贾杨, 沈建中. 阶梯形变幅杆的频率特性分析[J]. 声学技术, 2006, 25(2): 154-159.
JIA Yang, SHEN Jianzhong. Frequency response of stepped ultrasonic horn[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(2): 154-159.
- [7] 林书玉. 夹心式功率超声压电陶瓷换能器的工程设计[J]. 声学技术, 2006, 25(2): 160-164.
LIN Shuyu. Design of sandwich piezoelectric ceramic ultrasonic transducer[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(2): 160-164.
- [8] 王光灿, 田文杰, 林国广, 等. Cymbal 换能器的力电性能[J]. 声学学报, 2005, 30(3): 279-288.
WANG Guangcan, TIAN Wenjie, LIN Guoguang, et al. Mechanical and electrical characteristics of cymbal transducer[J]. Acta Acustica, 2005, 30(3): 279-288.
- [9] Onitsuka K, Dogan A, Tressler J F. Metal - ceramic composite transducer: The "Moonie"[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1995, 6(4): 447-455.
- [10] XU Q C, Yoshikawa S, Belsick J R, et al. Piezoelectric composites with high sensitivity and high capacitance for use at high pressures [J]. IEEE Trans. UFFC, 1991, 38(6): 631-636.
- [11] Sugawara Y, Onitsuka K, Newnham R E. Metal - ceramic composite actuators[J]. Communications of the American Ceramic Society, 1992, 75(4): 996-998.
- [12] Dogan A, Uchino K, Newnham R E. Composite piezoelectric transducer with truncated conical endcaps Cymbal[J]. IEEE Trans. UFFC, 1997, 44(3): 597-605.
- [13] 林书玉, 许龙. 一种新型 Cymbal 换能器的研究[J]. 声学学报, 2011, 36(1): 27-36.
LIN Shuyu, XU Long. Study on a new type of Cymbal ultrasonic transducer[J]. Acta Acustica, 2011, 36(1): 27-36.
- [14] ZHANG J D, Hughes W J, Meyer R J, et al. A class V flexensional transducer: the Cymbal[J]. Ultrasonics, 1999, 37(6): 387-393.
- [15] Newnham R E, Dogen A. Metal-electroactive ceramic composite transducer[P]. U. S. Patent 5, 1998, 729, 077.
- [16] Fernfindez J F, Dogan A, Fielding J T. Tailoring the performance of ceramic-metal piezocomposite actuators, 'cymbals'[J]. Sensors and Actuators, 1998, 60(3): 228-237.
- [17] 王德石, 杜贻群. 低频钹式换能器性能与设计规律研究[J]. 鱼雷技术, 2009, 17(5): 30-35.
WANG Deshi, DU Yiqun. Performance analysis and design of cymbal transducer with low frequency[J]. Torpedo technology, 2009, 17(5): 30-35.
- [18] 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, 26(6): 1279-1290.
MO Xiping. Simulation and analysis of acoustics transducers using the ANSYS software[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(6): 1279-1290.
- [19] 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, 93-95.
LUAN Guidong, ZHANG Jinduo, WANG Renqian. Piezoelectric transducers and arrays[M]. Beijing: Beijing University Press 2005, 93-95.
- [20] 王荣津. 水声材料手册[M]. 北京: 科学出版社, 1983, 86-147.
WANG Rongjin. Handbook of underwater acoustic materials[M]. Beijing: Science Press, 1983, 86-147.