

doi: 10.7690/bgzdh.2014.02.001

Cymbal 换能器技术的新进展

王建平

(海军装备部, 西安 710065)

摘要: 为有效提高谐振点附近的频带宽度、改善 Cymbal 换能器的耐压性能, 提高接收灵敏度, 降低频率, 减小体积, 设计双谐振 Cymbal 换能器和凹型 Cymbal 换能器。采用有限元分析方法, 借助 ANSYS 软件, 通过仿真计算电压位置及 Cymbal 壳体的空腔高度对阻抗、收发频带宽度、发送电压响应及自由场电压接收灵敏度的影响, 以及压电陶瓷环的厚度对凹型 Cymbal 换能器机电性能的影响。结果表明, 双谐振 Cymbal 换能器和凹型 Cymbal 换能器能为 Cymbal 换能器的工程应用奠定坚实的基础。

关键词: 有限元方法; 双谐振 Cymbal 换能器; 凹型 Cymbal 换能器; 电声性能

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

New Development of Cymbal Transducer Techniques

Wang Jianping

(Naval Equipment Department of PLA, Xi'an 710065, China)

Abstract: The double resonance Cymbal transducer and concave Cymbal transducer were designed to improve bandwidth including resonance frequency and compression resistance, increase receiving sensitivity, reduce resonance frequency and decrease volume. The influences of different voltage position and Cymbal cavum height on impedance, bandwidth, transmitting voltage response and receiving sensitivity were analyzed by means of finite element method (FEM) and ANSYS simulation, and the influences of different thickness of piezoelectricity ceramic ring on electromechanical characteristics of concave Cymbal transducer were analyzed by means of finite element method (FEM) and ANSYS simulation. The research result shows that the double resonance Cymbal transducer and concave Cymbal transducer would have a good base of research for engineering application of the Cymbal transducer.

Keywords: finite element method (FEM); double resonance Cymbal transducer; concave Cymbal transducer; electroacoustical characteristics

0 引言

Cymbal 换能器类似于 V 型弯张换能器, 是 Moonie 换能器的重大改进^[1], 具有较好的结构实用性和环境适应性, 广泛应用于军事、医学、环境声学等领域。作为轻型、小体积、低频、高灵敏度的水听器, 在鱼雷弦侧阵方面有着重要的应用价值。在谐振点以下的平坦频带内, Cymbal 换能器的接收灵敏度起伏较小, -3 dB 带宽很宽, 但明显比谐振点处的接收灵敏度低, 而在谐振点附近, 其接收灵敏度的带宽又较窄, 发送电压响应也具有这样的缺点。为了解决这个问题, 笔者从 Cymbal 换能器的结构入手, 设计了双谐振 Cymbal 换能器, 仿真计算了 Cymbal 壳体的空腔高度的变化及所加 1 V 电压位置对该换能器电声性能的影响, 可以达到拓展带宽的目的; 由于 Cymbal 换能器的驱动材料和金属壳体之间是用环氧树脂粘结在一起的, 因此耐压能力有限, 一般不超过 2 MPa, 只能工作在浅海区域, 为了克服这一缺点, 笔者设计了凹型 Cymbal

换能器^[2], 仿真计算了压电陶瓷^[3]片的厚度对该换能器电声性能的影响, 从而使该换能器的耐压提高到 6 MPa 左右。与 Cymbal 换能器相比, 凹型 Cymbal 换能器还具有频率低、自由场电压接收灵敏度较高、体积小等优点。为避开繁琐的理论计算, 同时又能保证求解的精度, 笔者用有限元分析方法, 借助 ANSYS 软件完成了设计。

1 双谐振 Cymbal 换能器

双谐振 Cymbal 换能器由 2 个结构不同的金属壳体及压电陶瓷片组成, 上面是 Moonie 结构的金属壳体, 下面是 Cymbal 换能器金属壳体, 结构如图 1^[4]。借助上下壳体的谐振点差异, 获得双谐振峰。依据不同的需求, 合理调整结构参数, 控制 2 个谐振峰的间距, 最终达到拓展带宽的目的。同时, 由于 Moonie 金属壳体的表面为平面, 也为阵元的硫化提供了方便。笔者分析计算了电压位置及 Cymbal 壳体的空腔高度对该换能器电声性能的影响。

收稿日期: 2013-09-18; 修回日期: 2013-10-17

作者简介: 王建平(1970—), 男, 浙江人, 硕士, 高级工程师, 从事鱼雷总体、制导技术及产品质量可靠性研究。

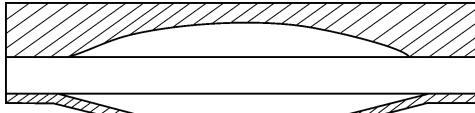


图 1 双谐振 Cymbal 换能器

1.1 模态分析

笔者仿真计算了双谐振 Cymbal 换能器的 6 阶模态振型，由于该型换能器用作水听器时，仅考虑无节点圆的模态；因此，笔者给出了前三阶模态振型及对应的谐振频率，结果如表 1 和图 2 所示。

表 1 双谐振 Cymbal 换能器的前三阶谐振频率

模态振型(阶)	第一阶	第二阶	第三阶
谐振频率/kHz	18.299	19.759	35.887



(a) 第一阶振型 (b) 第二阶振型 (c) 第三阶振型

图 2 双谐振 Cymbal 换能器前三阶模态振型图

对于未加改进的 Cymbal，其无节点圆的模态振型只出现在第一阶，而结构经过特殊设计的 Cymbal 换能器的无节点圆模态振型则出现在前两阶，体现了双谐振的特点，对提高 Cymbal 换能器的带宽具有重要意义。

1.2 电压分析

由于 Cymbal 换能器结构的特殊性，仿真计算了所加 1 V 电压的不同位置(压电陶瓷的 2 个电压面)对双谐振 Cymbal 换能器电声性能的影响。笔者仅给出了 Cymbal 壳体的空腔高度为 1.1 mm 的计算结果如表 2、图 3 和图 4 所示，当 Cymbal 壳体的空腔高度为其它值时，反应了相似的变化规律。

表 2 电压位置与换能器声学性能的关系

电压位置	上电压	下电压	电压位置	上电压	下电压
S_{V1}/dB	125.24	128.89	Me/dB	-194.0	-188.8
$S_{V1}(-3)\text{dB}/\text{kHz}$	3.50	3.80	$Me(-3)\text{dB}/\text{kHz}$	3.6	3.4

其中， $S_{V1}(-3)\text{dB}$ 和 $Me(-3)\text{dB}$ 分别表示双谐振 Cymbal 换能器的发送电压响应和自由场电压接收灵敏度的-3 dB 带宽。

从表 2、图 3 和图 4 可以看出，当在压电陶瓷片的下面电极上加 1 V 电压时，与电压加在上面电极上相比，其性能具有明显的优越性：谐振频率降低 1 kHz，发送电压响应提高 3.6 dB，自由场电压接收灵敏度提高 5.2 dB。另外，阵元的阻抗由 699.2 Ω 提高到 736.4 Ω ，属于低阻水声换能器。在设计双谐振 Cymbal 换能器时，最好将 1 V 电压加在压电陶瓷片的下电压上。

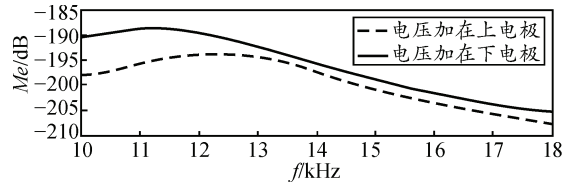


图 3 双谐振 Cymbal 换能器的接收灵敏度~频率曲线

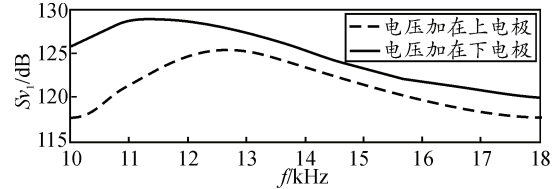


图 4 双谐振 Cymbal 换能器的发送电压响应~频率曲线

1.3 Cymbal 壳体的空腔高度分析

在掌握 Cymbal 换能器空腔高度与电声性能关系的基础上，为了有效地拓展谐振点附近的带宽，笔者仿真计算了 3 种不同的 Cymbal 壳体空腔高度对双谐振 Cymbal 换能器电声性能的影响，其结果如表 3、图 5 和图 6 所示。

表 3 Cymbal 壳体空腔高度与双谐振换能器电声性能的关系

高度/mm	S_{V1}/dB	$S_{V1}(-3)\text{dB}/\text{kHz}$	Me/dB	$Me(-3)\text{dB}/\text{kHz}$
0.8	126.0	2.3	-189.1	2.4
1.0	125.2	3.0	-193.7	3.3
1.1	128.9	3.8	-188.9	3.4

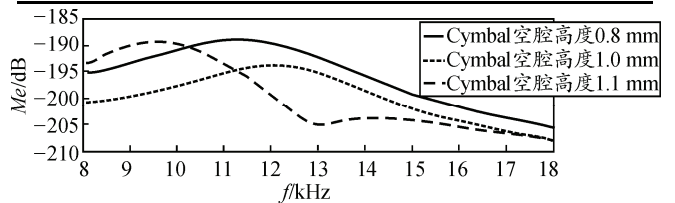


图 5 双谐振 Cymbal 换能器的接收灵敏度~频率曲线

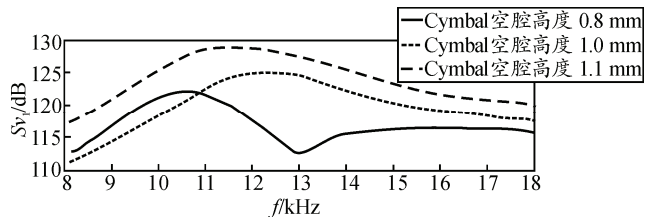


图 6 双谐振 Cymbal 换能器的发送电压响应~频率曲线

由表 3、图 5 和图 6 可见，当 Cymbal 壳体的谐振频率与 Moonie 壳体的谐振频率较接近时，拓展带宽的效果更好。另外在制作中，考虑阵元的硫化边界条件，可调整结构参数，达到拓展带宽的目的。

笔者仅围绕 Cymbal 壳体的空腔高度一个结构参数进行了分析，虽然具有较好的效果，但有一定的局限性，还可以从材料参数和其他的结构参数方面进行全面的分析。

2 凹型 Cymbal 换能器

凹型 Cymbal 换能器是由压电陶瓷环和凹型

Cymbal 壳体组成, 结构如图 7^[5]所示。与 Cymbal 换能器相比, 其体积明显减小, 耐压性能有了显著提高, 同时降低了基频、提高了能量转化效率。

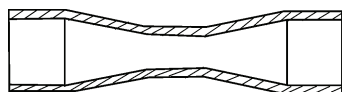


图 7 凹型 Cymbal 换能器

2.1 模态分析

通过有限元计算, 提取了凹型 Cymbal 换能器的前三阶模态振型, 得到了谐振频率, 其结果如表 4 及图 8 所示。

表 4 凹型 Cymbal 换能器的前三阶谐振频率

模态振型(阶)	第一阶	第二阶	第三阶
谐振频率/kHz	11.917	31.291	63.121



(a) 第一阶振型 (b) 第二阶振型 (c) 第三阶振型

图 8 凹型 Cymbal 换能器前三阶模态振型图

当凹型 Cymbal 换能器用作水听器时, 仅考虑无节点圆的振动模态, 因其具有最大的辐射声功率。

2.2 压电陶瓷环的厚度分析

对于凹型 Cymbal 换能器, 径向尺寸和材料的厚度不仅决定了换能器的体积大小, 且是影响换能器性能的决定因素。为了与前面的研究对照, 笔者计算了压电陶瓷环的厚度变化对凹型 Cymbal 换能器的谐振频率、阻抗、发送电压响应及自由场电压接收灵敏度的影响。其结果如表 5 及图 9~图 12。

表 5 压电陶瓷片厚度与凹型 Cymbal 电声性能的关系

陶瓷厚度/mm	f_r /kHz	Z /k Ω	S_{V1} /dB	Me /dB
2.0	7.2	5.811	113.3	-182.8
2.4	7.3	6.840	112.3	-182.3
2.6	7.3	7.380	111.9	-182.2

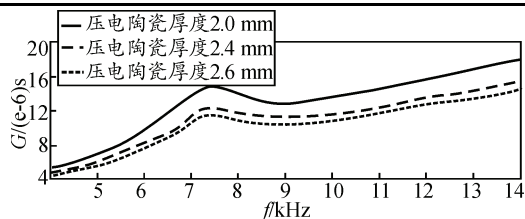


图 9 凹型 Cymbal 换能器水域介质 $Y \sim f$ 曲线

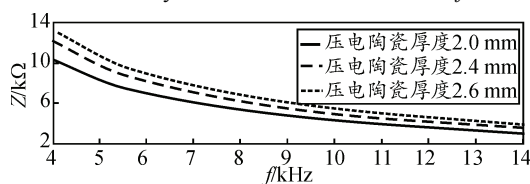


图 10 凹型 Cymbal 换能器水域介质 $Z \sim f$ 曲线

由表 5 及图 9~图 12 可以看出, 随着压电陶瓷片厚度的增大, 阻抗逐渐增大, 发送电压响应逐渐减小, 谐振频率和自由场电压接收灵敏度无明显变

化。与先前研究的 Cymbal 换能器相比, 该凹型 Cymbal 换能器的体积明显减小, 谐振频率较低, 耐压性能、自由场电压接收灵敏度及能量转化效率显著提高, 但发送电压响应明显减小。

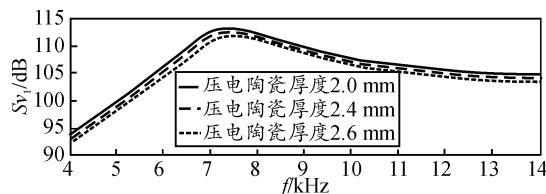


图 11 凹型 Cymbal 换能器水域介质 $S_{V1} \sim f$ 曲线

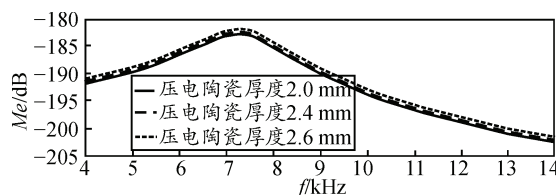


图 12 凹型 Cymbal 换能器水域介质 $Me \sim f$ 曲线

3 结论

对于双谐振 Cymbal 换能器, 通过仿真计算可知, 当在压电陶瓷片的下电压上加 1 V 电压时, 其发送电压响应和自由场电压接收灵敏度均提高了 3 dB 以上; 谐振频率也有不同程度的降低; 在谐振点附近接收灵敏度和发送电压响应的 -3 dB 带宽有了明显增大, 合理调整结构参数, 效果会更好。对于凹型 Cymbal 换能器, 压电陶瓷的厚度变化对该换能器性能的影响较小, 但与 Cymbal 换能器相比, 能量转化效率及自由场电压接收灵敏度提高, 体积减小, 频率降低, 尤其承压能力大大增强。双谐振 Cymbal 换能器和凹槽 Cymbal 换能器^[4-6]的研究为 Cymbal 换能器的工程应用奠定了坚实基础。

参考文献:

- [1] Tressler J.F, Howarth T.R. A comparison of the underwater acoustic performance of Cymbal-based projectors to 1-3 piezocomposite materials[J]. J.Electroceram, August 2002, 102(8): 175-186.
- [2] 柴勇, 莫喜平, 等. 磁致伸缩-压电联合激励凹筒型发射换能器[J]. 声学学报, 2006, 31(6): 523-526.
- [3] 谢国兵, 刘卫国, 高爱华. 基于压电陶瓷的激光谐振腔长控制技术[J]. 兵工自动化, 2012, 31(3): 75-78.
- [4] Powell D.J., Reynolds P., Tressler J. Virtual prototyping of Cymbal-Based Underwater Sound Projector Panels[C]. IEEE ULTRASONICS SYMPOSIUM, 1999: 1061-1066.
- [5] James F Tressler, Robert E Newnham, Hughes W Jack. Capped ceramic underwater sound projector: the Cymbal transducer[J]. J Acoust Am, 1999, 105(2): 591-600.
- [6] Newnham R.E., Dogan A., Markley D.C., et al. Size Effects in Capped Ceramic Underwater Sound Projectors[J]. IEEE OCEAN, 2002, 162(4): 2315-2321.