

# 纵弯耦合宽带换能器设计及高静水压实验分析

严伟, 郝浩琦

(杭州应用声学研究所, 杭州 310012)

**摘要:** 利用纵振换能器的前盖板弯曲振动与其纵向振动相耦合的方式来拓宽换能器的频带, 采用有限元仿真软件 ANSYS 对换能器进行整体分析, 经过大量的仿真计算, 最终优化设计出纵弯换能器, 使其电导响应和发送电压响应-3dB 带宽均达到了一个倍频程, 同时鉴于纵弯换能器耐压性能差, 对其进行高静水压下实验分析, 实验证明此换能器至少可以承受 8MPa 的静水压力。

**关键词:** 宽带; 弯曲振动; 纵向振动; 耦合; 有限元(ANSYS); 高静水压

中图法分类号: TB56

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-03-0469-04

## The design and high hydrostatic pressure analysis of flexural head tonpilz transducer

YAN Wei, HAO Hao-qi

(Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** A design to broaden the transducer's bandwidth by coupling the flexural vibration of the front mass and the longitudinal vibration of the transducer is proposed. The transducer is analyzed by the finite element simulation software ANSYS, and the optimum design dimensions of the transducer is obtained through analysis. Experiments verified that the bandwidth (-3dB) of the measured admittance and transmitting voltage response can be up to one octave. Since the transducer has a low compression resistance, a high hydrostatic pressure experiment is specially made to show that the transducer can at least endure a hydrostatic pressure of 8 MPa.

**Key words:** wideband; flexural vibration; longitude vibration; coupling; finite element method (ANSYS); high hydrostatic pressure

## 1 引言

在水声换能和基阵技术的发器展中, 宽带、低频、大功率、小尺寸以及高灵敏度的换能器和基阵依然是研究的重点。由于水声信号处理技术的迅速发展, 需要从换能器上获取更多的信息, 如果没有宽带信息, 先进的信号处理技术将很难得到应用, 故现今对水声换能器的发展除要求低频、大功率、高效率、高灵敏度和小尺寸外, 更需要能进行宽带发射与接收。宽带换能器无论在军用上还是在民用上, 都有着广泛的应用。

收稿日期: 2007-05-20; 修回日期: 2007-08-01

作者简介: 严伟(1982-), 男, 四川人, 硕士研究生, 研究方向为水声换能器及声系统。

通讯作者: 严伟, E-mail: kenyw25@sina.com

纵振换能器以其结构坚固、性能优越、易于布阵被广泛使用在声呐基阵中。中外学者为拓宽纵振换能器的工作频带进行了大量的探索, 提出了不少新的设计和实现方法, 如纵弯耦合、匹配层技术、双激励技术等等<sup>[1]</sup>。其中纵弯耦合是比较方便和经常被采用的拓宽带宽的有效方法。本文在理论分析的基础上结合有限元 ANSYS 软件设计出一种带宽为 8kHz~17kHz 的纵弯宽带换能器, 并对换能器进行了高静水压实验分析。

## 2 纵弯宽带换能器设计

换能器在设计上采用纵振频率在前, 弯曲频率在后的设计方案, 同时为了增大辐射面积、提高电声效率并充分利用压电陶瓷晶堆的功率容量, 前盖板

初步选定为喇叭形盖板。对于传统的通毕兹换能器可以利用四端网络法转化为等效电路来计算,而对于前盖板弯曲的纵振换能器要将其转化为电路来等效计算几乎是不可能的,因为它的振动模式太复杂。因此,本文先利用纵振换能器的四端网络法和计算前盖板弯曲频率的公式<sup>[2]</sup>大致确定纵振频率、弯曲频率以及换能器的大致尺寸。然后在此基础之上,再通过有限元法来仿真计算这种纵弯换能器的导纳响应、发送电压响应、接收灵敏度响应等<sup>[3]</sup>。

## 2.1 纵弯换能器有限元分析结果

换能器模型中忽略粘接层、电极片以及预应力的影响,同时考虑理想吸声水边界,用轴对称模型建立出换能器的有限元模型,通过对对其进行水中的频率响应分析得出有限元仿真结果。计算结果的导纳曲线见图1,发送电压响应曲线见图2,接收灵敏度曲线如图3。

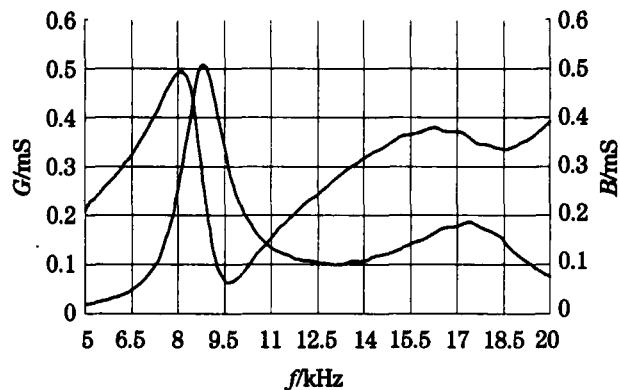


图1 导纳仿真结果  
Fig.1 Stimulated admittance

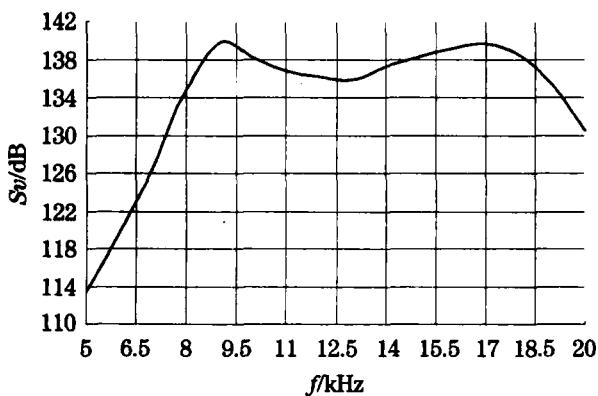


图2 发送电压响应仿真结果  
Fig.2 Stimulated transmitting voltage response

导纳曲线中,可以看出仿真结果出现两个峰,分别在8.8kHz和17.2kHz左右,第一个纵振峰电导峰值约为0.5ms,第二个弯曲峰电导峰值约为0.2ms。仿真计算的发送电压响应曲线较为平坦,在频带8kHz~19kHz中,响应起伏小于5dB。接收灵敏度响应起伏比较大,带宽约为8kHz~17kHz,起伏约为8dB。

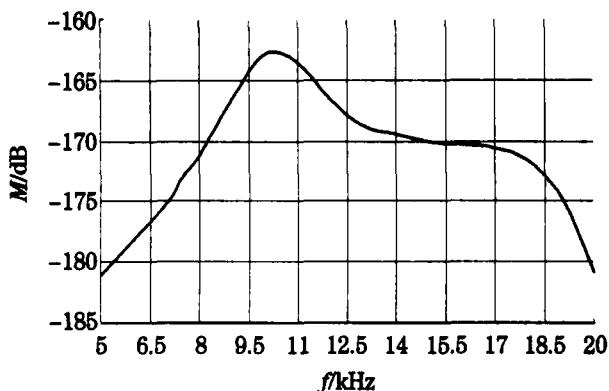


图3 接收灵敏度仿真结果  
Fig.3 Stimulated receiving sensitivity

## 2.2 纵弯换能器测试结果

在经过了大量的理论和仿真计算之后,选择得出最优计算结果的仿真模型并以此制作出实际换能器样品,该换能器采用橡胶硫化与聚氨酯灌注水密,见图4。

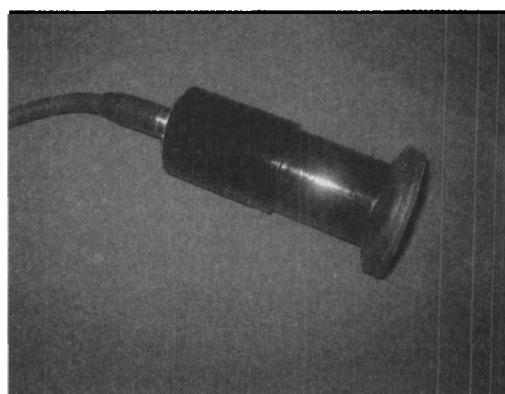


图4 换能器样品图  
Fig.4 Picture of the sample transducer

图5~图7分别是换能器在水中的导纳曲线和发送电压响应曲线和接收灵敏度响应曲线。

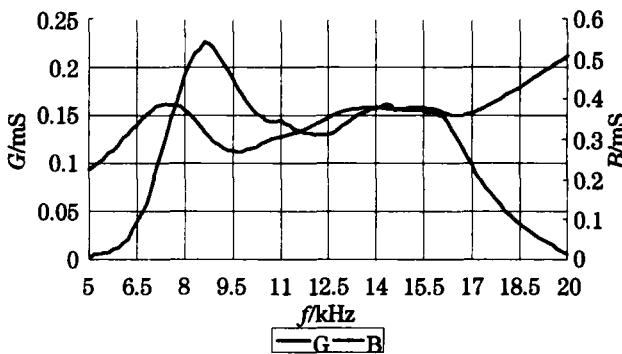


图5 实测换能器导纳曲线图  
Fig.5 Measured admittance

由于仿真计算时,所建立的模型没有考虑换能器外表面所包覆的橡胶硫化层,同时计算时设定的材料参数也与实际应用的不一致,再加上仿真计算

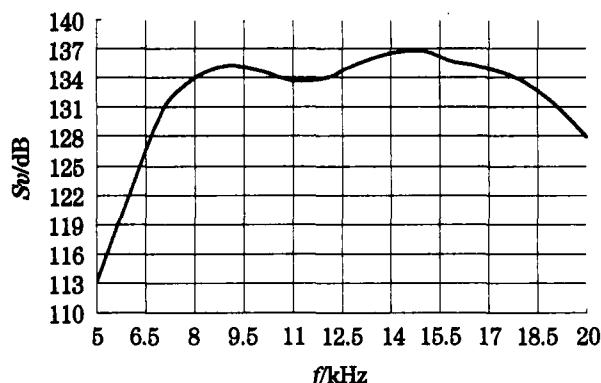


图 6 实测换能器发送电压响应曲线图  
Fig.6 Measured transmitting voltage response

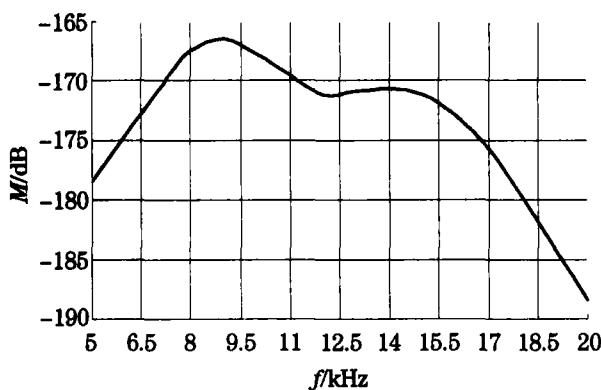


图 7 实测换能器接收灵敏度曲线图  
Fig.7 Measured receiving sensitivity

取定的阻尼与实际的差异。这样导致文中实际测量的结果与理论计算结果不是完全吻合,存在一定的差异。

从实际测试的结果中可知,换能器在水中有两个谐振点,分别是纵向谐振频率  $f_1=8.6\text{kHz}$  和弯曲谐振频率  $f_2=14.3\text{kHz}$ ,电导值分别为  $0.23\text{ms}$  和  $0.16\text{ms}$ ,其半功率点带宽可从  $7.4\text{kHz}$  到  $16.8\text{kHz}$ ,超过一个倍频程的宽度。换能器在  $7.8\text{kHz}\sim18\text{kHz}$  频带内,发送电压响应起伏在  $3\text{dB}$  之内,同时接收灵敏度响应  $-5\text{dB}$  带宽为  $6.5\text{kHz}\sim16\text{kHz}$ 。

### 3 纵弯换能器高静水压下实验

纵弯换能器前盖板的弯曲振动受边界条件影响很大,故普遍认为其耐静水压能力比普通的纵向振动的换能器要差。那么纵弯换能器耐静水压的能力究竟怎么样,究竟能够承受多大的静水压力呢?考虑到目前国内没有给出相关的资料,故本文对设计的纵弯换能器进行高静水压实验,并对实验数据进行整理分析,希望对以后的纵弯换能器设计在耐静水压方面能够提供一定的参考。

#### 3.1 高压消声水罐系统

高静水压下纵弯宽带换能器的性能测试是在高压消声水罐中进行的,高压消声水罐的结构示意图如图 8 所示。它是一个具有特殊结构的封闭式水池,密封后可加很高的静水压以模拟深海大洋中的高静水压;通过调节水罐内的水温,可以模拟海洋环境的温度变化。并在罐体外围配备有温度和压力控制系统进行变温和变压控制。同时,为得到良好的测试声场,减少声波在罐体内的混响时间,在罐体内敷设了经特殊处理的木质尖劈作为吸声器件。该系统的压力控制范围为  $0.1\text{MPa}\sim10\text{MPa}$ ;水温控制范围为  $4^\circ\text{C}\sim40^\circ\text{C}$ ;有大小两个安装孔,其直径分别为  $1.8\text{m}$  和  $0.76\text{m}$ ,最大承重可达  $2000\text{kg}$ ,且大小安装孔上的吊杆都可作  $360^\circ$  回转,小安装孔上的吊杆可作最大  $500\text{mm}$  升降。

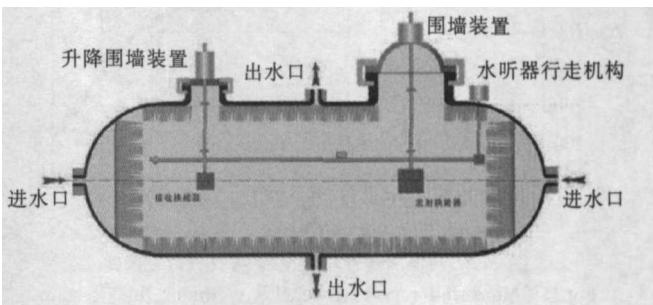


图 8 高压消声水罐的结构示意图  
Fig.8 Sketch of high pressure anechoic tank

#### 3.2 纵弯换能器高静水压下实验结果分析

在实验中,首先是从常压开始测试换能器的导纳、发送电压响应和接收灵敏度,然后根据情况以  $1\text{MPa}$  或者  $2\text{MPa}$  的步长施加压力,由于设备原因最高压力只能加到  $8\text{MPa}$ 。下面给出换能器从常压开始增加压力一直到  $8\text{MPa}$  时,各个压力下换能器的电导曲线、发送电压响应曲线和接收灵敏度曲线分别画在同一幅图中,这样可以看出随着静水压力不断增大对换能器性能影响的规律和趋势,如图 9-图 11 所示。

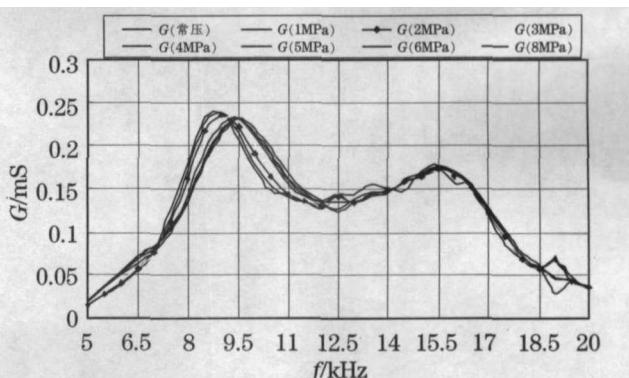


图 9 实测换能器常压-8MPa 导纳曲线  
Fig.9 Measured admittance under the pressure 0.1MPa to 8MPa

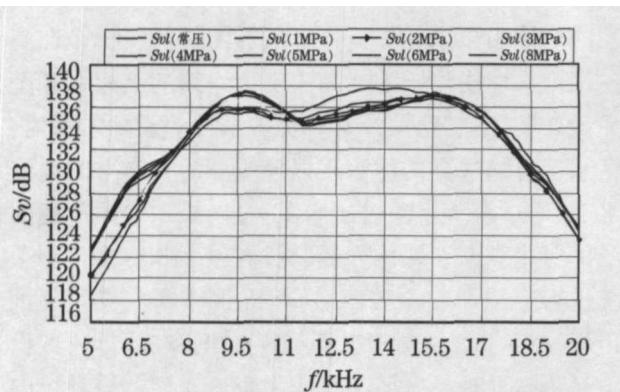


图 10 实测换能器常压-8MPa 发送电压响应曲线

Fig.10 Measured transmitting voltage response under the pressure 0.1MPa to 8MPa

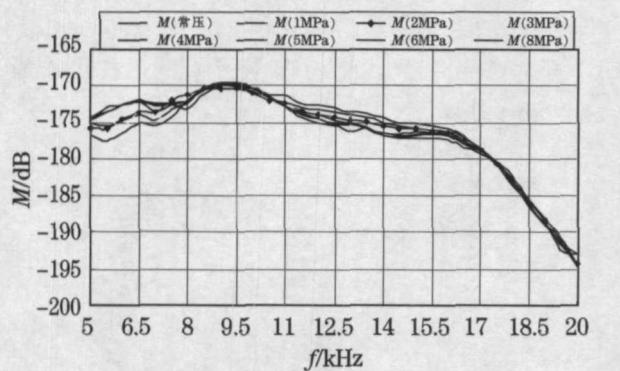


图 11 实测换能器常压-8MPa 接收灵敏度曲线

Fig.11 Measured receiving sensitivity under the pressure 0.1MPa to 8MPa

从图 9~图 11 可以非常明显地看出在不同压力下换能器性能的变化趋势。当换能器承受的静水压力不断增大时,换能器电导曲线第一个谐振峰频率值略微增大,谐振峰电导值略微减小;第二个谐振峰基本无变化;换能器发送电压响应曲线第一个谐振峰频率升高,电压响应级增大;频带内凹点频率略微升高;第二个谐振峰频率值升高,电压响应级降低;

换能器接收灵敏度曲线第一个峰处基本无变化,第一个谐振峰前频带内灵敏度级升高;第二个峰基本也没有变化;两个峰之间的频带内的灵敏度级降低。从实际的使用中来看,可以认为换能器承受静水压力从常压增至 8MPa 时,换能器的性能基本没有变化,也就是说文中设计的换能器可以承受至少 8MPa 的静水压力。

## 4 小 结

本文介绍了一种利用前盖板弯曲振动与换能器纵向振动相耦合的方法来拓宽换能器频带,该换能器具有结构简单、频带宽的特点。理论分析与实际有较好的吻合,由仿真得出的规律在实践中得到较好的验证,因而在理论的指导下成功设计出换能器,其电导和发送电压响应实测-3dB 带宽均可达到一个倍频程。同时针对纵弯换能器耐压能力差,本文对其进行高静水压实验分析,结果表明文中所设计的纵弯换能器至少可以承受 8MPa 的压力。

## 参 考 文 献

- [1] 徐钧. 纵振换能器拓宽频带的方法综述[J]. 声学与电子工程, 2003, 72(4): 17-21.  
XU Jun. The summary of broadening the tonpilz transducer's bandwidth[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2003, 72(4): 17-21.
- [2] THURSTON E G. On the lowest flexural resonant frequency of a circular disk of linearly varying thickness driven at its center[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1956: 926-931.
- [3] YAO Qingshan, Leif B. Broadband tonpilz underwater acoustic transducers based on multimode optimization[J]. IE-EE Transactions On Ultrasonics Ferroelectrics And Frequency Control, 1997, 44(5): 1060-1066