

串叠复合材料圆环阵水声换能器设计及制备

李超,王宏伟,秦雷,王丽坤

(北京信息科技大学 传感器重点实验室,北京 100101)

摘要:提出了一种新型高频宽带压电复合材料圆环阵换能器,综合采用了压电复合材料和多模耦合振动来拓展换能器带宽。通过 ANSYS 软件对其进行有限元建模仿真,得到了该换能器谐振频率和带宽随压电陶瓷圆环厚度、高度和平均半径的变化规律,并根据仿真结果确定了换能器敏感元件最优设计方案。由最优参数加工得到用于叠堆的两个压电复合材料圆环,并将两压电复合材料圆环轴向叠堆,最终制作了双圆环叠堆压电复合材料水声换能器。经测试,该新型换能器形成了明显的双模耦合振动,其-3 dB 工作带宽为 320~410 kHz,最大发送电压响应达 147.8 dB。研究结果表明,利用复合材料和多模耦合振动可以大幅度拓展高频换能器的带宽。

关键词:压电复合材料;有限元仿真;高频;宽带;水声换能器

中图分类号:TN712

文献标识码:A

The Design and Preparation of Composite Tubes Stack Underwater Acoustic Transducer

LI Chao, WANG Hongwei, QIN Lei, WANG Likun

(Beijing Key Lab. for Sensor, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China)

Abstract: This paper proposes a new type high frequency broadband piezoelectric composite transducer and two methods which are composite materials and multi-mode coupling vibration have been used to expand the transducer bandwidth. The finite element modeling has been carried out with ANSYS software. The change rules that the resonant frequency and bandwidth change with the thickness, the height and the average radius of the piezoelectric ceramic ring have been obtained. Then we confirm the optimal design scheme of the piezoelectric sensitive element according to the simulation results. Two single composite piezoelectric ceramic rings were made according to the optimal processing parameters and finally we have fabricated a piezoelectric composite transducer by stacking the two different thickness piezoelectric ceramic rings. Through the test result, we found that the new type piezoelectric composite transducer have formed the dual-mode coupled vibration and the bandwidth of the transducer can reach to 320~410 kHz with the -3 dB fluctuation of transmitting voltage response, its maximal transmitting sound level can reach to 147.8 dB. It proves that the bandwidth of the high frequency transducer can be greatly expanded by using composite materials and multi-mode coupled vibration.

Key words: piezoelectric composite; finite element simulation; high frequency; broadband; underwater acoustic transducer

0 引言

随着水声技术迅速发展,要求换能器发射/接收更多的信息,即一个换能器需要覆盖更宽的工作频段,因此换能器宽带技术的研究越来越重要。制作中高频宽带发射换能器是众多声纳系统对换能器的

要求之一,然而对高频发射换能器来说,将其制作成宽带换能器具有一定的难度。现行拓宽换能器频带的方法主要有3种^[1-4]:

1) 通过添加复合柔性材料,增大材料机械损耗,降低换能元件的机械品质因数(Q_m)值,即复合

收稿日期:2015-06-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61302015,61471047);北京市教委创新能力提升计划基金资助项目(PXM2015_014224_0000280);北京市属高校青年拔尖人才培养计划基金资助项目(CIT&TCD201504053)

作者简介:李超(1989-),男,河北邢台人,硕士生,主要从事高频宽带水声换能器的研究。王宏伟(1967-),男,博士,副教授,主要从事宽带换能器及宽带换能器制作材料的研究。

材料。

2) 多振动模态耦合。

3) 添加匹配层。以上3种方法中,压电复合材料克服了单相压电材料的缺点,保留了压电材料的强压电性,利用其制作的换能器具有较高的机电耦合系数。此外,压电复合材料与纯压电陶瓷相比,其在工作频带内模态单一,其他寄生效应可得到有效控制^[6]。多模耦合理论主要是利用两个或两个以上的振动模态实现多模耦合振动来拓展带宽,是目前拓展换能器带宽的一种有效方法。添加匹配层也可达到拓展带宽的目的,然而随着时间的推移,匹配层的性能将发生变化,会造成换能器的性能不稳定^[6]。综合比较上述三类拓展带宽的方法,本文主要运用复合材料和多模耦合两种方法来拓展高频换能器的带宽,通过ANSYS软件对压电振子建模仿真,设计制作出性能稳定的高频宽带换能器。

1 两种拓展带宽方法的机理

1.1 复合材料拓展带宽原理

压电复合材料拓展带宽原理主要是利用压电复合材料具有较低的 Q_m 这一特性,由于换能元件带宽与材料 Q_m 值有着直接的联系,则有^[7]

$$Q_m = f / \Delta f \quad (1)$$

式中: f 为谐振频率; Δf 为电导响应下降3 dB(或6 dB)的频带宽度。由式(1)可知,换能元件的带宽与材料 Q_m 值成反比,即 Q_m 值越低,带宽 Δf 越大。所以,如何降低压电振子的机械 Q_m 值是拓展带宽的关键。压电振子的机械 Q_m 值与自身材料参数也有着直接的联系,即

$$Q_m = \frac{\omega M}{R} \quad (2)$$

式中: ω 为振动圆频率; R 为压电振子机械损耗和其自身电损耗阻之和; M 为压电振子的等效质量。由式(2)可知,压电振子 Q_m 值与 R 成反比关系。拓展带宽的一种有效的办法是增大换能材料的损耗,如在压电陶瓷中加入柔性聚合物制成压电复合材料作为换能器敏感元件,因此,压电复合材料尤其适合制作宽带换能器。

1.2 多模耦合振动拓展带宽原理

另一类拓展带宽方法为多模耦合振动,其拓宽频带的基础是多模态耦合理论^[3-10],图1为两种模态展宽带宽原理图。

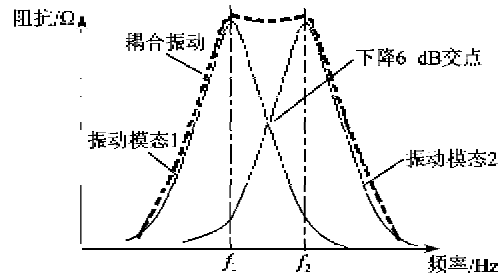


图1 两种模态展宽带宽原理图

由图1可知, f_1 和 f_2 为系统中两种振动模态的谐振频率,通过调节系统中两种模态谐振频率差,使其相互靠近,当两种振动模态频率的交点下降3 dB或6 dB时不产生间断或过深的凹谷,则两种振动模态即可产生多模耦合,从而拓展换能器带宽。

本文利用压电陶瓷圆环的厚度振动来实现换能器的高频特性,并综合采用压电复合材料和轴向叠堆两种不同壁厚的压电复合材料圆环,使其形成双模耦合振动来拓展带宽。工艺上,首先通过切割压电陶瓷圆环、浇注环氧树脂制作出压电复合材料圆环,以降低材料 Q_m 值;其次,通过轴向叠堆不同壁厚压电复合材料圆环使叠堆圆环产生双模耦合振动以进一步拓展带宽。

2 换能器压电振子设计及仿真

换能器的性能主要由叠堆压电圆环振子的厚度振动特性确定,而叠堆圆环又由复合材料单环组成,因此分析复合材料单环的性能,获得其谐振频率及带宽随圆环各参数变化规律是换能器设计的基础。

2.1 复合材料圆环谐振频率和带宽随圆环各参数变化规律

利用ANSYS软件对压电复合材料圆环进行有限元建模、仿真,找到圆环谐振频率和带宽随圆环各参数的变化规律,为后续叠堆复合材料圆环敏感元件设计及制作提供仿真依据,图2为复合材料圆环有限元模型。

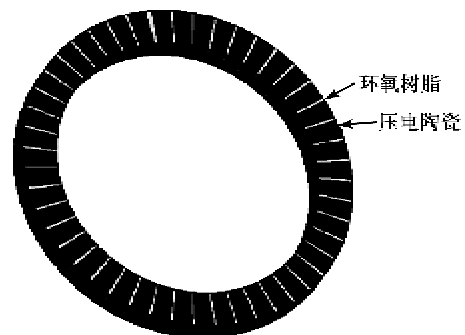


图2 压电复合材料圆环模型

该模型中,圆环外直径为 $\varnothing 25$ mm,其被分为46个周期性单元,一个周期性单元中包括陶瓷相(PZT-5)和聚合物相(环氧树脂),其中陶瓷相和聚合物相体积比约为3:1,即陶瓷相体积约占整体的75%,聚合物相约25%。由图2可知,压电振子敏感元件结构具有周期性,为减少计算量,通常选取复合材料圆环一个周期性单元进行有限元建模仿真^[11-13]。通过对周期性单元施加对称约束条件,即可模拟整个复合材料圆环振动状态,图3为振子的一个周期性单元。

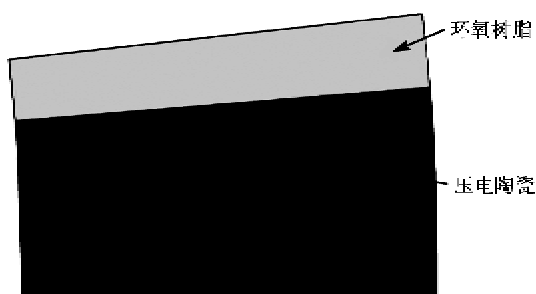
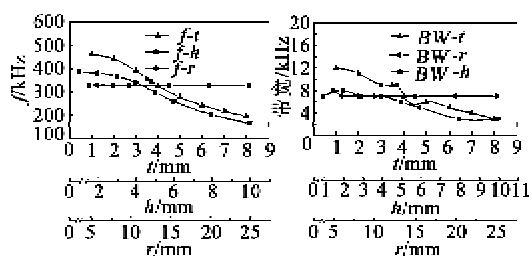


图3 压电振子的一个周期性单元

该周期性单元包括压电陶瓷相和聚合物相,其中压电陶瓷相采用三维耦合场单元 Solid5,聚合物相采用 Solid45 三维耦合场固体单元。划分网格后,在单元内环面加载0电压,外环面加载1 V电压,并对单元施加相应的对称约束条件,通过对其进行谐响应分析,计算得出电导图,由电导图即可得出圆管谐振频率及带宽。此外,通过微调材料各参数(厚度 t 、高度 h),平均半径(r),仿真得到复合材料圆环谐振频率 f 和带宽 BW 随压电复合材料圆环 t 、 h 、 r 等参数的变化规律,如图4所示。



(a) 随圆环各参数变化规律 (b) 带宽随圆环各参数变化规律

图4 复合材料圆管谐振频率和带宽随圆环各参数变化规律

由图4可知,圆环谐振频率随圆环 t 和 h 的增加而降低,随 r 无变化;圆环带宽 BW 也随圆管厚度 t 和高度 h 的增加而降低,随 r 无变化,即压电振子谐振频率及带宽主要取决于压电振子的 t 和 h 。

2.2 叠堆压电复合材料敏感元件设计及仿真

为保证叠堆后压电振子实现多模耦合,根据图

4仿真结果,本文选取圆环壁厚分别为3 mm和3.5 mm,高均为3 mm的两压电复合材料陶瓷圆环进行轴向叠堆仿真。图5为叠堆压电复合材料敏感元件有限元模型。

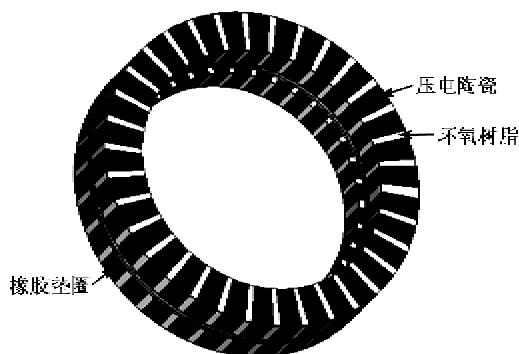


图5 叠堆复合材料圆环模型

同样地,为减少计算量我们只选取敏感元件的一个周期性单元进行仿真计算,最终得到叠堆敏感元件在空气中的仿真电导频谱图,如图6所示。

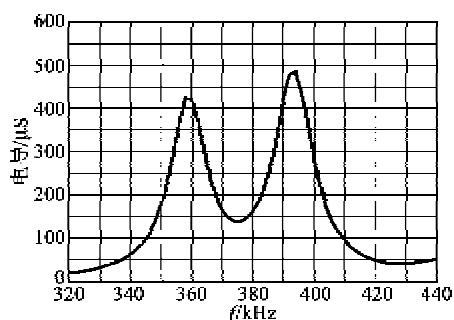


图6 叠堆复合材料敏感元件仿真电导频谱图

由图6可知,通过轴向叠堆高度相等、壁厚不等的两个复合材料圆环在360 kHz和390 kHz附近产生了两个谐振峰,且两谐振峰的频率分别对应各圆环自身的厚度振动频率,说明通过上、下叠堆两复合材料圆环来拓展换能器带宽具有可行性。

3 压电复合材料圆管敏感元件制备

根据图6的仿真结果,我们选取壁厚分别为3 mm和3.5 mm,高度均为3 mm的两压电陶瓷圆环进行切割,试制双圆环叠堆复合材料换能器样机,并对其进行水下发送电压响应测试,以验证该方案的可行性。

本文在现有陶瓷切割基础上,采用切割压电陶瓷圆环—灌注柔性聚合物(如环氧树脂)—打磨整形—被覆电极等工艺制得复合材料圆环阵列,工艺流程如图7所示。

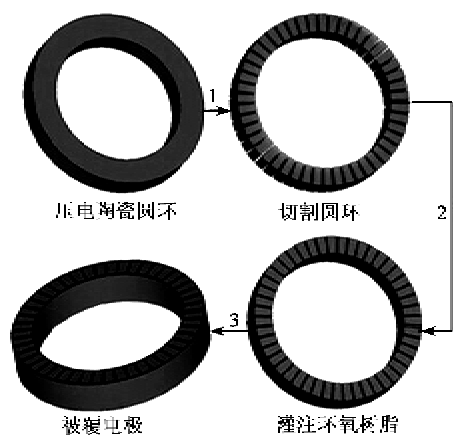


图7 压电复合材料圆管阵列制备流程

根据图7可知,首先,利用精密陶瓷切割机对外径(为 $\varnothing 25\text{ mm}$)相等,壁厚(分别为 3 mm 和 3.5 mm)不等的两压电陶瓷圆环进行切割,并在切缝间浇注环氧树脂,经固化、打磨、镀电极等一系列工艺制得压电复合材料圆环阵列。其次,将两复合材料圆环进行同轴叠堆,叠层间以薄橡胶垫进行粘结,最终制得该换能器敏感元件,如图8所示。

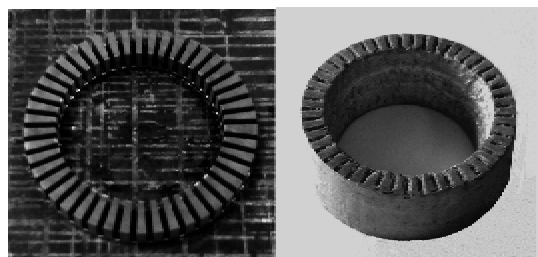


图8 叠堆压电复合材料敏感元件

4 换能器测试与分析

设计换能器的封装器具,将图8中的敏感元件进行封装。图9为最终制得的换能器样品。

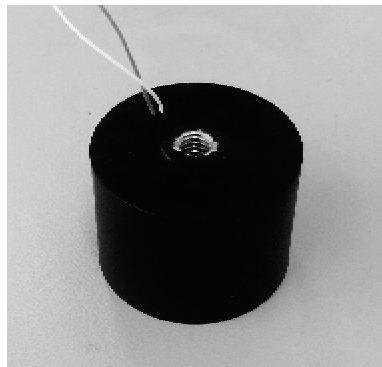


图9 换能器样品

根据测试标准,将换能器样品放入消声测试水池中浸泡 2 h ,室温下利用脉冲法对换能器发送电压响应进行水下测试,测试结果如图10所示。

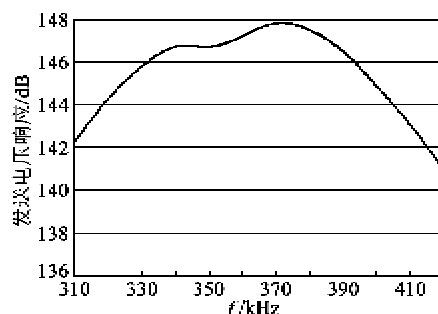


图10 换能器发送电压响应

由图10可知,换能器最大发送电压响应为 147.8 dB ,该换能器的两谐振频率分别为 340 kHz 和 375 kHz ,并在水中于 -3 dB 处可实现良好的双模耦合振动,其 -3 dB 工作频带为 $320\sim 410\text{ kHz}$,即其 -3 dB 带宽可拓展至 90 kHz ,与现行复合材料高频换能器的带宽(约 20 kHz)相比,其带宽拓展了近4倍。此外,该换能器谐振频率与空气中仿真结果对比,其谐振频率有一定的降低,这主要是由于在振子外封装了一定厚度的聚氨酯和水负载的缘故。

5 结束语

利用ANSYS有限元仿真软件,设计了一种新型叠堆压电复合材料圆环阵列结构的换能器。工艺上采用切割压电陶瓷圆环、切缝间浇注环氧技术,制备出2-2型压电复合材料圆环,并将两壁厚不等的压电复合材料圆环进行轴向叠堆,实现压电复合材料圆环叠堆结构。通过将叠堆振子进行封装,最终制作出一种新型的高频宽带换能器,并对该新型换能器进行水下发送电压响应测试。测试结果表明,该新型结构换能器在水中可实现良好的双模态耦合振动,能够大幅度地拓展高频换能器的带宽。

参考文献:

- [1] 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):567-569.
- [2] RAMADAS S N,OLEARY R L,GACHAGAN A, et al. A wideband annular piezoelectric composite transducer configuration with a graded active layer profile [C]//S. I.; IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2009: 2742-2745.
- [3] CERENELMASLI I, KOYMEN H. A wideband and a wide-beam width acoustic transducer design for underwater acoustic communications [C]//S. I.; IEEE, 2006: 1756-1759.
- [4] 韩宝栋. 匹配层结构 Tonpilz 水声换能器的有限元分析[J]. 四川兵工学报, 2013(2): 54-56.

(下转第234页)