

纵弯复合模式超声换能器设计

张永元¹, 张 涛^{1,2}, 吴胜举³, 韦红兵³

(1. 西安科技大学基础部, 陕西 西安 710054)

(2. 南京大学声学研究所, 江苏 南京 210093)

(3. 陕西师范大学应用声学研究所, 陕西 西安 710062)

[摘要] 设计了一种夹心式纵弯复合振动模式超声换能器, 该换能器由纵向夹心式压电超声换能器与弯曲正六边形薄板组成. 采用有限元方法, 对一定几何尺寸边界自由的正六边形薄板进行模态分析, 得到中心位移最大的某一模态, 设计以该模态的频率作为共振频率的纵弯复合模式换能器. 实验结果表明, 换能器的共振频率测试值与设计值基本吻合, 达到预期设计目标, 这种六边形辐射板换能器可应用于特殊环境的超声测量, 或应用于超声生物处理和声化学反应设备中, 对该换能器的设计和理论模拟有利于更好掌握其振动特性及其产生的声场分布, 对实际应用有指导意义.

[关键词] 纵弯复合振动, 正六边形板, 换能器, 共振频率

[中图分类号] O 426 1 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2007)01-0049-04

Design on the Longitudinal-Flexural Composite Mode Ultrasonic Transducer

Zhang Yongyuan¹, Zhang Tao^{1,2}, Wu Shengju³, Wei Hongbing³

(1. Department of Basic Courses, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

(2. Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

(3. Applied Acoustics Institute, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract In this paper, a longitudinal-flexural composite mode ultrasonic transducer composed of the sandwich longitudinal mode ultrasonic transducer and the flexural regular hexagon plate is studied. This paper adopts FEM (finite element method) to analyze the pattern of the regular hexagon plates which have a certain geometric size and a free border, and then gets a pattern which has the largest central displacement. And then this paper designs a longitudinal-flexural composite mode ultrasonic transducer with the pattern's frequency as the resonance frequency. The experiment shows the measured frequency is in agreement with the theoretical values and correspondent with the standard of design. The transducer designed and produced here is available for the measurement in special conditions, and is also available in super sonic biological treatment and sonochemistry reactor services. What we have done is beneficial to obtaining the vibration features and the acoustic field distribution of the transducer, which are significant for the application.

Key words longitudinal-flexural composite vibrations; regular hexagon thin plate; sandwiched transducer; resonance frequency

0 引言

随着超声技术的发展, 超声应用已越来越多. 在一些新的应用中, 对振动能量的传播方式以及作用形

收稿日期: 2006-10-08 修回日期: 2006-12-31

基金项目: 国家自然科学基金 (10074042, 10474061) 资助项目.

作者简介: 张永元 (1980—), 女, 硕士, 主要从事声学测量的教学与研究. E-mail: zyypaper@126.com

通讯联系人: 吴胜举 (1955—), 副教授, 主要从事声学测量和功率超声的教学与研究. E-mail: wushuj@snnu.edu.cn

式提出了不同的要求,有时单一振动模式的换能器不能满足需要,例如外科手术用的超声手术刀,需要用纵弯复合振动模式的超声换能器弯曲振动产生有效的侧向分离力,纵向振动则完成对组织的切除任务.而超声马达需要纵扭或纵弯复合振动模式的换能器,因此,关于复合振动模式换能器的研究,已得到人们的普遍关注和重视.复合模式换能器多种多样,其中之一就是由夹心式纵向换能器与弯曲振动辐射板组成的纵-弯复合模式换能器.这种换能器由于结合了纵向振动换能器大功率以及弯曲辐射板低辐射阻抗和辐射面积大等特点,在空气超声中得到了广泛的应用,在空气中主要用来测距、测厚、报警以及料位监控等^[1-3],也可应用于超声生物处理和声化学反应设备中^[4],将此类换能器用于清洗槽式声化学反应器,将会增大声波的辐射面积,并且可以提高槽内声场的均匀性,从而可以提高声化学产率.已有不少对辐射板形状为圆形和矩形的这种换能器的研究^[5-7],对于辐射板形状为正六边形的换能器,由于正六边形薄板弯曲振动的复杂性,其振动方程无解析解,其共振频率方程也不能得到.因此本文基于有限元方法,得到边界自由正六边形薄板中心位移最大的某一模态,设计以该模态的频率作为共振频率的纵弯复合模式换能器.

1 换能器结构设计

图 1 为本文设计的纵弯复合模式换能器的示意图,其中 1、2 部分为纵向振动夹心式超声换能器的前后金属盖板,其横截面为圆形,3 为产生纵向振动的两片压电陶瓷圆环,4 为产生弯曲振动的正六边形薄板.纵向夹心式换能器的各个元件是通过一根中心螺杆紧固在一起,正六边形薄板也是通过螺杆牢固的连接在夹心式换能器的前盖板上.

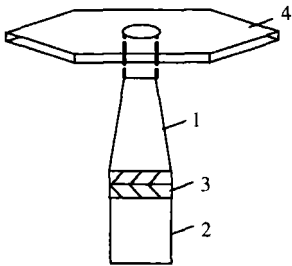


图 1 复合模式换能器的示意图

Fig.1 Sketch map of the longitudinal-flexural composite mode ultrasonic transducer

2 复合振动模式换能器的设计理论

由于研究的振动系统包括纵向振动的夹心式换能器以及弯曲振动正六边形薄板,为了保证复合系统的高效工作,振动系统必须处于共振状态,因此必须研究系统的共振频率.

2.1 纵向振动夹心式压电换能器

所设计的夹心式压电换能器如图 2 所示,该换能器的前后金属盖板分别为圆台形和圆柱形,且换能器的节面位于压电陶瓷内部,则换能器可看成是两个 $\frac{1}{4}$ 波长振子的组合,其共振频率方程为^[8-9]:

$$\tan k_0 l_{01} \tan k_2 l_2 = \frac{\rho_0 c_0}{\rho_2 c_2}, \tag{1}$$

$$\tan k_0 l_{02} = \frac{\rho_0 c_0}{\rho_1 c_1} \frac{F k_1 l_1 [(1 + F) k_1 l_1 - \tan k_1 l_1]}{\rho_1 c_1 [l_1 + F(F + 1) (k_1 l_1)^2] \tan k_1 l_1 - k_1 l_1 }; \tag{2}$$

(1)、(2) 两式分别为半波长换能器节面前后两部分的共振频率方程,式中 l_1 、 l_2 、 l_{01} 及 l_{02} 分别为前盖板、后盖板以及节面前后压电陶瓷片的长度,其中 $l_{01} = l_{02} = l_0$, ρ_0 、 ρ_1 、 ρ_2 以及 c_0 、 c_1 、 c_2 分别为压电陶瓷片、前、后盖板材料的密度、纵向声速, $F = \frac{r_1}{r_2} - r_1$ 为延展系数, r_2 、 r_1 分别为前盖板前后端面的半径, $k_0 = \frac{\omega}{c_0}$, $k_1 = \frac{\omega}{c_1}$, $k_2 = \frac{\omega}{c_2}$ 分别为各部分的波数, $\omega = 2\pi f$, f 为振子的共振频率.

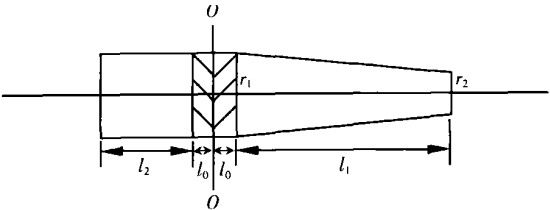


图 2 纵向夹心式换能器示意图

Fig.2 Sketch map of the sandwich longitudinal ultrasonic transducer

2.2 弯曲振动正六边形薄板

由于正六边形薄板弯曲振动的复杂性,其振动方程无解析解,其共振频率方程也不能得到,因此采用有限元方法,对一定几何尺寸的正六边形薄板进行模态分析.

对边长为 $a = 0.05\text{m}$,厚度为 $h = 0.0045\text{m}$ 边界自由的正六边形薄钢板进行模态分析,其材料参数分别为:泊松比 $\sigma = 0.28$ 杨氏模量 $E = 19.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$,密度 $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.得到中心位移幅值最大的模态振形如图 3所示.以该模态频率 32.337 kHz 作为整个复合系统的共振频率,设计纵弯复合模式换能器.

3 实验

以边界自由正六边形薄板弯曲振动频率 $f = 32.337 \text{ kHz}$ 为整个复合系统的共振频率,设计加工了纵弯复合模式换能器.图 4为加工的纵弯复合模式换能器.其中纵向换能器的前后金属盖板分别为硬铝和 45号钢,材料参数取值为: $\rho_1 = 2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\rho_2 = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $c_1 = 5040\text{m/s}$, $c_2 = 5050\text{m/s}$ 压电陶瓷片为 PZT-4薄圆环,其规格为 $\phi 38 \times \phi 16 \times 5$ 压电陶瓷材料几何尺寸:外直径为 38mm ,内径为 16mm ,厚度为 5mm .其材料参数分别为: $\rho_0 = 7.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $c_0 = 2950\text{m/s}$

用 型压电阻抗分析系统对所设计的纵弯复合模式换能器的共振频率进行测量,得到了纵向换能器以及复合换能器的导纳圆图和和谐振曲线分别如图 5(a)、(b) 所示,整理的测量结果见表 1 其中 f_{Td} 以及 f_{Tm} 分别为夹心式纵向换能器共振频率的理论设计值与实验测量值, f_{bd} 为正六边形薄板弯曲振动的理论设计值, f_c 为纵弯复合模式换能器共振频率的实验测量值.

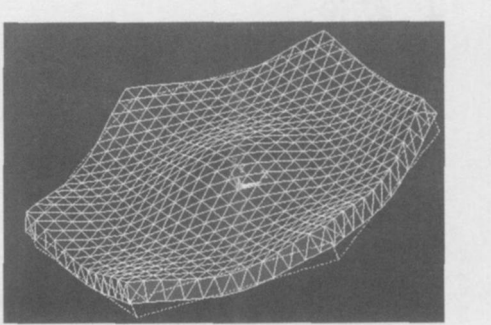


图 3 正六边形薄板模态振形
Fig.3 Modal shape of a thin hexagonal plate

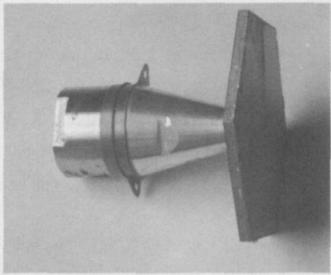


图 4 加工的纵弯复合模式换能器
Fig.4 The longitudinal-flexural composite mode ultrasonic transducer

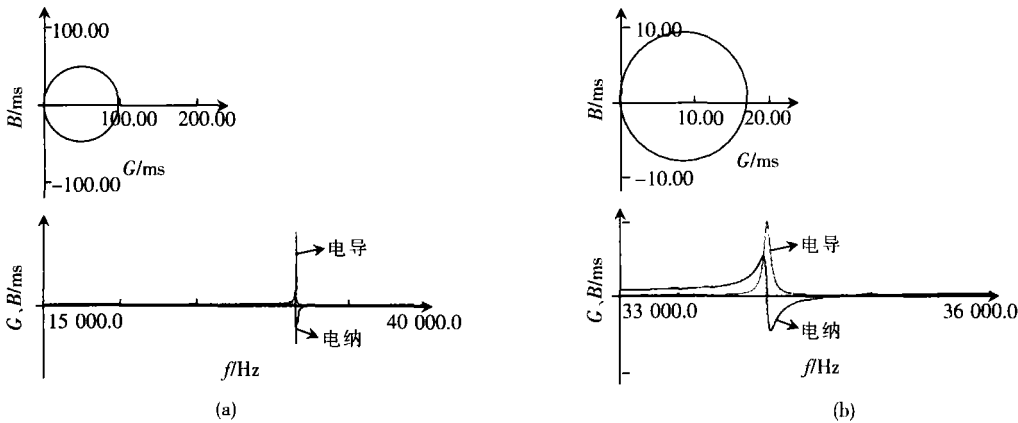


图 5 导纳圆图和和谐振曲线
Fig.5 Admittance chart and resonance curve

表 1 纵弯复合模式换能器共振频率的设计值以及测量值
Table 1 The calculated and them easured resonance frequency

h/mm	a/mm	f_{Td}/kHz	f_{Tm}/kHz	f_{bd}/kHz	f_c/kHz
4.5	50.0	32.337	31.544	32.337	34.196

从表 1可以看出,纵弯复合模式换能器各个部分的共振频率的理论设计值与实验测量值基本一致,纵弯复合模式换能器的共振频率与各个部分的共振频率也符合较好.

实验值与理论值间的误差在允许的范围内,产生误差的主要原因是设计纵向换能器时未考虑预应力

螺栓以及横向振动的影响,若需要更精确的设计该型换能器,则应将上述效应考虑进去.且谐振性能测量是在小信号条件下进行,要应用于较大功率场合,还需校准谐振频率.

4 结论

我们设计并加工的纵弯复合振动模式的六边形辐射面超声换能器,辐射面的振动模式与理论设计模式一致,换能器的谐振频率与理论值符合较好,能够达到应用需求的谐振频带和振动模式.这种换能器有望应用于实际的超声测量、超声粉碎、超声生物处理以及声化学等专业与学科中.

[参考文献]

- [1] 尚志远. 检测声学原理及应用 [M]. 西安: 西北大学出版社, 1996
- [2] Hickling R, Martin S. The use of ultrasonics for gauging and proximity sensing in air [J]. J Acoust Soc Am, 1986, 79(4): 1151-1160
- [3] 林书玉. 弯曲振动超声换能器的振动特性及辐射声场研究 [J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2003, 31(3): 32-39
- [4] 戴君勇, 张双全, 刘平. 人 B 淋巴细胞刺激因子的真核表达以及表达条件的筛选 [J]. 南京师大学报: 自然科学版, 2001, 24(2): 87-90
- [5] Gallego-Juarez JA, Rodriguez-Corral G, Gate-Garreton L. An ultrasonic transducer for high power applications in gases [J]. Ultrasonics, 1978, 16(6): 267-271
- [6] Barone A, Gallego-Juarez JA. Flexural vibration free-edge plates with stepped thicknesses for generating high directivity ultrasonic radiation [J]. J Acoust Soc Am, 1972, 51(3): 953-959
- [7] 张光斌, 林书玉. 气介式弯曲振动换能器的辐射声压及其指向性 [J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 1999, 27(3): 45-49
- [8] 路德明. 水声换能器原理 [M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1999
- [9] 陈桂生. 超声换能器的设计 [M]. 北京: 海洋出版社, 1989

[责任编辑: 丁 蓉]