

矩形辐射器压电多频超声换能器的研究^{*}

鲜晓军[†] 林书玉

(陕西师范大学应用声学研究所 西安 710062)

摘要 研究了一种具有多个共振频率的矩形辐射器夹心式超声换能器,换能器由圆柱形后盖板、压电陶瓷晶堆及矩形六面体辐射器前盖板组合而成。利用表观弹性法和一维近似理论给出了多频换能器横向及纵向理论共振频率方程。对一种特殊情况下的此类换能器进行了有限元及实验分析,给出了各自的频率输入导纳曲线。对理论和实验结果进行分析后表明,此类矩形辐射器夹心式超声换能器可以在不同的振动模态上工作,具有多个共振频率。

关键词 多频换能器,矩形辐射器,共振频率,振动模态,谐响应

Study on the multi-frequency piezoelectric ultrasonic transducer with a rectangular radiator

XIAN Xiao-Jun LIN Shu-Yu

(Institute of Applied Acoustics, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062)

Abstract A new kind of multi-frequency transducer with a rectangular radiator is analyzed in this paper. The transducer consists of metal cylinder, piezoelectric ceramic pile and rectangular radiator. The fundamental modes of the coupled vibration of rectangular radiator are analyzed, and the frequency equations of the fundamental modes in the transverse directions are given by means of the apparent elasticity method. Meantime, based on the one dimensional longitudinal vibration theory, the resonance frequency equation in longitudinal direction of the multi-frequency ultrasonic transducer is derived out. One ultrasonic transducer of this kind is designed and simulated by finite element method, and modal shapes and harmonic response are analyzed. The ultrasonic transducer is also designed and manufactured. The resonance frequencies are measured and compared with the theoretical results. It is shown experimentally and theoretically that the compound multi-frequency ultrasonic transducer has two resonance frequencies.

Key words Multi-frequency transducer, Rectangular radiator, Resonance Frequency, Mode shape, harmonic response

2006-12-08 收稿; 2007-06-01 定稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目(10674090)

作者简介:鲜晓军(1981—),男,四川绵阳人,陕西师范大学硕士生,从事超声工程研究。

林书玉(1963—),男,教授,博士,博士生导师。

[†] 通信联系人 E-mail: xianxiaojun@stu. snnu. edu. cn

1 引言

随着超声技术的发展,换能器的种类越来越多,同时对换能器的性能要求也越来越高。在超声清洗中,为了避免产生清洗“盲区”,提高清洗效率,可以通过在清洗槽中产生复频声场来消除驻波的影响^[1,2];此外,在超声提取和超声粉碎中,频率和超声处理效果有着十分重要的联系,为了获得最佳的处理效果,也要求超声换能器具有多个不同的共振频率^[3]。通常采用扫频和调谐技术,以及通过安装多组压电陶瓷或不同形状的换能器来产生多个共振频率,满足多个共振频率和具有较宽的带宽要求^[4-5]。但由于要设计和加工多种类型的换能器,所以其费用将会较高。让单一换能器能够产生多个共振频率将是降低费用的有效途径之一,为了使超声换能器具有多个共振频率,常采用的方法有:利用多组压电陶瓷片,使换能器在不同的模式下工作^[6];利用一个纵向振动夹心式压电振子和一个弯曲振动薄圆板复合而成,由于弯曲圆盘振动模式很多,利用纵向振子与圆盘的相互作用,使复合系统具有多个共振频率^[7];利用不同的激发电路和不同的电端匹配电路,让单一换能器产生不同的共振频率,实现多频换能器的功能^[8-10]。

本文设计了一种新型的具有多个共振频率的矩形辐射器夹心式超声换能器,即将传统夹心式换能器的圆柱形辐射前盖板改为矩形六面体前盖板。利用矩形六面体基模的耦合振动,在三个轴向上有着不同的谐振频率 f_x, f_y 及 f_z ,从而使振动系统具有多个共振频率,达到了利用同一尺寸的超声换能器产生多个共振频率的目的。

2 矩形辐射器夹心式多频超声换能器的理论分析

图 1 为一矩形辐射器夹心式多频超声

换能器的示意图,其后盖板为等截面圆柱,底面直径为 d ,高为 l_1 ,中间为压电陶瓷晶堆,晶堆的直径同为 d ,高为 l_2 ,矩形辐射器的长为 a ,宽为 b ,高为 l_3 。

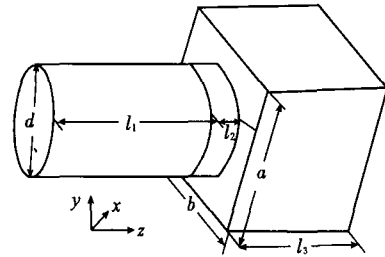


图 1 矩形辐射器夹心式多频超声换能器示意图

2.1 横向(x, y 方向)共振频率方程

根据表观弹性法的基本原理^[11-12],将六面体的振动近似看成 x, y 及 z 方向的一维纵向振动的相互耦合,可得到矩形六面体辐射器各方向的频率方程:

$$k_x l_x = i\pi \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

$$k_y l_y = j\pi \quad j = 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

$$k_z l_z = m\pi \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

式中 k_x, k_y 及 k_z 分别为 x, y, z 三个轴向的表观波数。频率方程(1)、(2)及(3)中,当 $i = j = m = 1$ 时,即是矩形六面体的基频的耦合振动。泊松系数 ν 、振动圆频率 ω 、纵波声速 c 、几何尺寸 l_x, l_y 及 l_z 和耦合系数 n_1, n_2 及 n_3 在 $i = j = m = 1$ 时满足如下关系式:

$$[1 - \nu(n_3 + 1/n_1)]l_x^2 = c^2 \pi^2 / \omega^2 \quad (4)$$

$$[1 - \nu(n_1 + 1/n_2)]l_y^2 = c^2 \pi^2 / \omega^2 \quad (5)$$

$$[1 - \nu(n_2 + 1/n_3)]l_z^2 = c^2 \pi^2 / \omega^2 \quad (6)$$

式中, $n_1 = \sigma_x / \sigma_y, n_2 = \sigma_y / \sigma_z, n_3 = \sigma_z / \sigma_x$, 其中 σ 为各方向上的等效正应力,不难看出 n_1, n_2 和 n_3 满足如下关系式:

$$n_1 n_2 n_3 = 1 \quad (7)$$

令 $c^2 \pi^2 / \omega^2 = A$, 由(4)(5)(6)(7)式可得,矩形六面体辐射器耦合振动的基模谐振

频率的总体频率方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{A^3}{l_x^2 l_y^2 l_z^2} - \left(\frac{1}{l_x^2 l_y^2} + \frac{1}{l_y^2 l_z^2} + \frac{1}{l_x^2 l_z^2} \right) A^2 \\ & + A(1 - v^2) \left(\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} + \frac{1}{l_z^2} \right) \\ & + 2v^3 + 3v^2 - 1 = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式是一个关于A的一元三次方程,三个互异的实根代表基模耦合振动的共振频率 f_x , f_y 及 f_z 互不相等,这种情形对应长宽高互不相等的六面体的耦合振动。

对于一种特殊情况,当矩形六面体横截面为正方形并满足 $l_x = l_y \neq l_z$ 时,有如下关系式:

$$n_1 = 1, n_2 = 1/n_3 \quad (9)$$

频率方程简化为:

$$\alpha_y^2 n_3^2 - (l_y^2 - \alpha_y^2 - l_z^2) n_3 - 2\alpha_x^2 = 0 \quad (10)$$

此时耦合振动的谐振基频在 x 和 y 方向上相等,即:

$$f_x = f_y \quad (11)$$

2.2 纵向(Z方向)共振频率方程

在设计中,为了实现纵向共振,要求换能器的纵向几何尺寸满足半波振子的要求,设计理论与前后盖板均为等截面圆柱的超声换能器的理论相似^[13],其频率方程为:

$$\tan k_e l_d = \frac{\rho c_e s}{\rho_1 c_1 s_1} \cdot \cot k_1 l_1 \quad (12)$$

$$\tan k_e l_{e2} = \frac{\rho c_e s}{\rho_2 c_2 s_2} \cdot \cot k_2 l_3 \quad (13)$$

其中 k_1 、 k_e 及 k_2 分别为后盖板、压电陶瓷晶堆及前盖板的纵波波数, l_1 为后盖板高度,

$l_{e1} + l_{e2} (= l_2)$ 为压电陶瓷晶堆的厚度, l_3 为矩形前盖板的高度, s_1 、 s 及 s_2 分别为后盖板、压电陶瓷晶堆和前盖板的横截面积, c_1 、 c_e 及 c_2 为后盖板、压电陶瓷晶堆及前盖板的纵波声速。

3 矩形辐射器夹心式多频超声换能器的有限元分析及实验测试

ANSYS软件融结构、流体、电磁场、声场和耦合场分析于一体,特别是它的多物理场模块可以分析和解决多学科问题,在工程领域应用极为广泛,其计算结果已成为各类工业产品设计和性能分析的可靠依据,该软件为超声换能器的设计和分析提供了极大的方便^[14-15]。本文对前盖板几何尺寸 $a \times b \times l_3$ 为60.0mm×60.0mm×52.0mm,后盖板 d 为40.0mm、 l_1 为63.8mm,压电陶瓷晶堆的直径 d 为40.0mm、 l_2 为10.0mm的超声换能器进行有限元分析,同时按照设计尺寸加工了一个此类超声换能器。换能器前后盖板的材料均为硬铝,其材料参数为 $E = 7.02 \times 10^{10}$ N/m², $\rho = 2.70 \times 10^3$ kg/m³, $v = 0.34$, $c = 5.10 \times 10^3$ m/s,压电陶瓷晶堆的材料为PZT-4,理论计算、数值模拟及实验测试结果见表1。表中 f_c 为换能器共振频率的理论计算结果, f_1 为数值模拟结果, f_m 为实验测试结果。从表中数据看出,共振频率的理论计算、数值模拟以及实验测试结果基本符合。

表1 矩形辐射器夹心式多频超声换能器理论、数值计算及实验结果

内 容	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	f_m (Hz)	$\frac{ f_1 - f_c }{f_c}(\%)$	$\frac{ f_m - f_c }{f_c}(\%)$
纵向共振频率	16470	17176	15819	4.28	3.95
横向共振频率	40066	42565	43210	6.23	7.84

为了验证超声换能器在频率为 17176 Hz 和 42565 Hz 附近是否处于谐振状态,利用 ANSYS 软件对换能器进行了谐响应分析,换能器的激励电压为 1 V,其频率输入导纳数值模拟曲线如图 2 所示。同时对加工的换能器用 HP4294A 精密阻抗分析仪进行扫频分析,扫频范围为 15000 Hz ~ 45000 Hz,其频率输入导纳实验测试曲线如图 3 所示。从图 2 和图 3 中不难看出,换能器在纵向和横向共振频率附近能够发生谐振,两个谐振频率分别对应半波阵子纵向共振和矩形六面体横向共振时的频率。

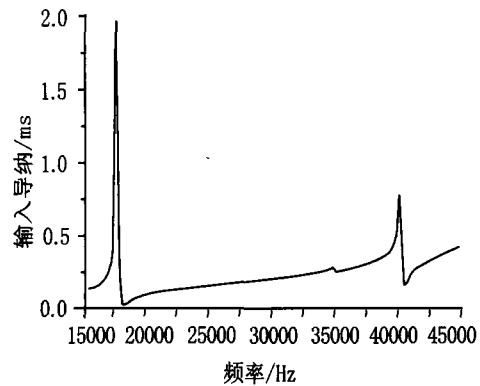


图 2 多频超声换能器频率输入导纳数值模拟曲线

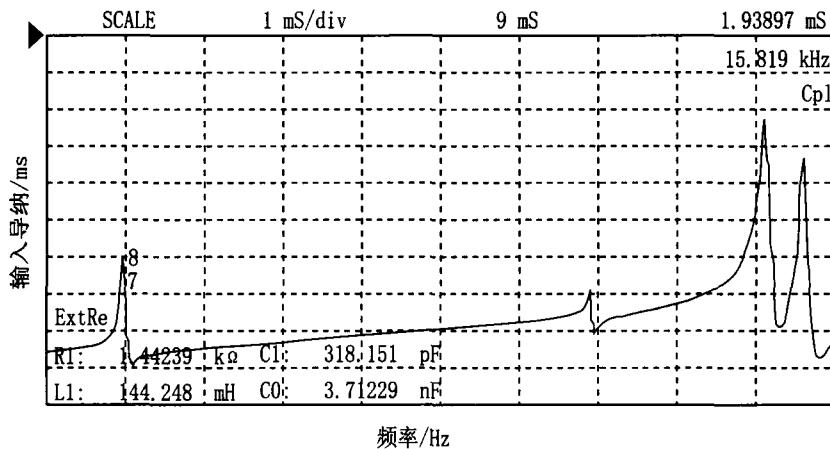


图 3 多频超声换能器频率输入导纳实验测试曲线

4 分析和讨论

本文对矩形辐射器夹心式多频超声换能器进行了简要分析和能够产生多个谐振频率的机理作了初步讨论。为了能够使换能器实现纵向共振,设计中要求换能器的纵向尺寸满足半波阵子的要求;换能器纵向和横向方向的共振频率和矩形六面体对应振动模态的固有频率不同,但在整个振动系统中,由于纵向振动和横向振动相互耦合,即使激发频率不等于矩形六面体横向振动的固有频率,矩形六面体也能够向横向方向上

实现共振;当矩形六面体辐射器几何尺寸满足 $l_x = l_y \neq l_z$ 时,其在 x 和 y 方向上的共振频率相等,即在 x 和 y 方向上同时实现共振。理论计算、有限元分析结果和实验测试数据之间存在着一定的偏差,主要来源于理论计算采用了一维近似理论和有限元分析过程中模型的简化,以及实验加工和测试也会产生误差。此外,换能器在频率为 34304 Hz 附近时也处于共振状态,对振动模态进行提取后发现,在该频率时换能器纵向方向谐振,分析结果表明此频率为超声换能器纵向振动的二次谐频。

5 结论

通过上文的理论分析及实验验证,总结如下:

(1) 由于三维耦合振动的理论分析及计算的复杂性,本文通过简化模型和利用表观弹性法,得出了矩形辐射器夹心式多频超声换能器横向和纵向振动的共振频率方程。

(2) 纵向共振频率理论设计时,假设换能器的位移节面位于压电陶瓷晶堆的中间,纵向方向就可以看成由两个四分之一波长的振子组成,利用这两个四分之一波长的振子求出其各自的频率方程,从而得出换能器纵向方向上振动的频率方程。

(3) 矩形辐射器各向的共振频率由其具体的几何尺寸决定,通过调整几何尺寸,可以改变其各方向的共振频率。

(4) 矩形辐射器夹心式多频超声换能器达到了同一尺寸下换能器产生多个共振频率的目的,利用矩形辐射器具有丰富的谐振频率的特性,可为多频和宽频换能器的研究提供一条可行的途径。

参 考 文 献

- [1] 汪承灏. 夹心式压电换能器的参数对有效电耦合系数的影响. 声学学报, 1981, 18(6): 194 - 199.
- [2] 任金莲, 牛勇, 张明铎, 等. 复频超声波清洗器的研制. 压电与声光, 2006, 28(3): 305 - 307.
- [3] 丘泰球, 曾荣华, 张晓燕. 双频超声强化提取的机理. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(8): 89 - 93.
- [4] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵(上). 北京: 北京大学出版, 1990, 185 - 197.
- [5] 石焕文, 尚志远. 复频聚焦超声压电换能器声场及频谱的研究. 压电与声光, 2002, 22(2): 98 - 100.
- [6] 林书玉. 夹心式压电超声复频换能器的研究. 压电与声光, 1995, 17(5): 19 - 23.
- [7] 林书玉. 复频超声换能器的研究. 声学电子工程, 1995, (01): 9 - 13.
- [8] Coates R, Mathams R F. Design of matching networks for acoustic transducers. Ultrasonics, 1988, 26 (2): 59 - 64
- [9] 俞宏沛, 袁崇尧. 换能器与发射机的阻抗匹配. 声学技术, 1991, (1): 22 - 29.
- [10] 林书玉. 夹心式复频功率超声压电换能器及其电端匹配电路的研究. 声学电子工程, 1997(03): 24 - 28.
- [11] 周光平, 梁明军, 王家宣, 等. 超声振动体的偶合振动研究. 声学技术, 2004 (3): 183 - 188
- [12] 林书玉, 张福成, 郭孝武. 超声频矩形六面体的三维耦合振动. 声学学报, 1991, 16(2): 91 - 97.
- [13] 林书玉. 超声换能器的原理与设计. 北京: 科学出版社, 2003, 91 - 111.
- [14] Kagawa Y, Yamabuchi T. Finite element approach for a piezoelectric circular rod. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 1976, 23 (6): 379 - 385.
- [15] 梁召峰, 周光平, 张亦慧. ANSYS 在功率超声领域中的应用. 机械与电子, 2005, (8): 10 - 13.