

模式转换环形耦合振动超声辐射器^{*}

许 龙¹ 林书玉²

(1 中国计量学院物理系 杭州 310018)

(2 陕西师范大学 应用声学研究所 西安 710062)

2011 年 10 月 14 日收到

2011 年 12 月 6 日定稿

摘要 提出了一种新型耦合振动环形超声辐射器, 辐射器由纵振换能器及变幅杆激励特定尺寸的金属圆环, 使其能有效地将纵向振动转化为圆环的径向-轴向耦合振动从而向环的径向、轴向辐射超声波, 并且在环的中心形成聚焦声场。推导了该辐射器的等效电路, 给出了等效电路法和有限元法优化设计环形超声辐射器的详细过程。研究了耦合振动环形超声辐射器的谐振特性及其辐射声场特性, 根据理论计算结果加工了相应的环形超声辐射器, 实验测试结果与理论计算结果符合得较好。本文提出的模式转换环形耦合超声辐射器可望在声化学等液体处理领域获得应用。

PACS 数: 43.35

Ultrasonic circular ring radiator with vibration mode-conversion in coupled vibration

XU Long¹ LIN Shuyu²

(1 Department of Physics, China Jiliang University Hangzhou 310018)

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

Received Oct. 14, 2011

Revised Dec. 6, 2011

Abstract This paper presents a new ultrasonic radiator, which consists of a transducer, an ultrasonic horn, and a metal circular ring. The transducer and horn in longitudinal mode are used to drive a metal circular ring which vibrates in coupled vibration mode from both the radial and axial. The circular ring can effectively transform the longitudinal vibration into the radial-axial coupled vibration and generate ultrasound in the radial and axial directions of the circular ring, meanwhile, the ultrasound can be focused to form focused ultrasound field inside the circular ring. The equivalent circuit of ultrasonic circular ring radiator is deduced. Then the geometrical dimensions of the radiator are optimized, and the resonance characteristics and radiated pressure field of an ultrasonic circular ring radiator are investigated by using the finite element package ANSYS. Finally, an ultrasonic circular ring radiator has been designed and fabricated. The experimental results are in good agreement with the calculated ones. The new ultrasonic radiator has good potential to be applied in liquid processing such as sonochemistry.

引言

近年来随着电子技术、计算机技术以及材料科学技术的飞速发展, 超声技术在各个行业中的应用范围越来越广, 特别是超声化学^[1]的发展, 使得功率超声的应用进一步拓展, 如污水处理、大容积超声清洗、二次采油、生物提取、工业管道防垢和中草药

萃取等方面引起人们的广泛关注, 所有这些对超声振动系统装置的要求更高: 大功率、高效率, 长期连续可靠稳定工作。为此许多学者及公司对大功率超声振动系统的研究做了大量的工作, 并开发了一些高性能的功率超声振动系统。西班牙学者提出的纵向换能器激励阶梯形圆盘及矩形板的大功率超声振动系统已成功应用于食品、饮料及加工等领域的工业生产中^[2]。周光平等人提出了纵径模式转换型管

^{*} 国家自然科学基金 (10974127) 和浙江省自然科学基金 (Q12A040034) 资助项目。

型超声辐射器并对其振动特性及辐射声场特性进行了大量的研究^[3-4]; 俄罗斯专家在 2007 年提出了一种多头激励的高功率超声振动系统^[5]; 美国 Crest Ultrasonics 公司推出的钛合金 Push-Pull 换能器系列产品其功率容量达到 2000 W(<http://www.crest-ultrasonic.com/push-pull.html>); 近年来德国 Hielscher Ultrasonics 公司报导他们的圆柱形超声组件已成系列, 其功率容量从 1000 W 直到 16000 W(http://www.hielscher.com/ultrasonics/i8000_p.htm)。

为了提高超声功率, 增大超声波的作用范围, 本文提出了一种新型模式转换型环形耦合振动超声辐射器, 辐射器由纵向振动换能器及变幅杆和耦合振动金属圆环组成。利用换能器及变幅杆的纵向振动激励起圆环的径向 - 轴向的耦合振动, 这样圆环的振动既有来自换能器及变幅杆传递来的纵向振动, 又有自身的径 - 轴耦合振动。因此, 当把辐射器放入处理液中, 辐射器向圆环的径向和轴向均辐射声波, 同时在圆环的中心形成一个强聚焦声场。推导了耦合振动圆环的频率方程及整个振动系统的等效电路, 为使圆环振动时在径向和轴向均有较大的位移振幅, 在用频率方程计算所得圆环初始尺寸的基础上, 用有限元软件 ANSYS 的优化设计功能, 对圆环的尺寸进行了优化, 获得了其最佳设计尺寸, 在此基础上对整个振动系统的振动特性和辐射声场进行了数值仿真研究, 结果表明: 换能器及变幅杆的纵向振动与圆环的径 - 轴耦合振动模式转换合理, 在液体中圆环的径向、轴向均有较强的辐射声压, 同时圆环的中心形成一个强聚焦声场。另外, 通过对该辐射器的仿真计算发现, 振动系统除了设计的换能器纵振动与圆环径 - 轴耦合振动模式外 (20.693 kHz), 还存在一个换能器及变幅杆纵振动与圆环三角振动相结合的振动模式 (22.802 kHz), 且圆环的三角振动模式同样具有较大的位移振幅, 因此这个振动模式也可作为辐射器的另一工作模式; 因此, 用一个振动系统即可产生效率较高 (因为这两个振动模式均是由换能器的纵向振动模式激发) 的两个双频工作模式^[6]。本文的研究结果可望在超声污水降解处理、工业管道防垢除垢、中草药提取和生物柴油制备等领域获得应用, 同时为高效复频换能器的设计提供新思路。

1 模式转换型环形耦合振动超声辐射器的理论分析

图 1 是模式转换型环形耦合振动超声辐射器的结构图, 辐射器由换能器、变幅杆和圆环三部分组

成。换能器和变幅杆的纵向振动激励圆环的径向和轴向的耦合振动, 这样环形辐射器即可同时向径向和轴向辐射声波, 且在环的中心形成聚焦声场。

换能器、变幅杆和圆环三者之间通过螺栓连接, 在设计时, 换能器和变幅杆的纵向振动和圆环的径 - 轴耦合振动谐振于同一频率。在保证圆环径 - 轴耦合振动与换能器及变幅杆纵向振动同频谐振的前提下, 圆环的尺寸可根据处理液的体积或被处理的对象来确定, 其最佳设计尺寸可在理论计算的基础上, 利用数值计算软件 ANSYS 的优化设计功能实现。

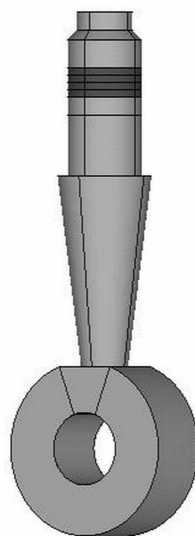


图 1 环形耦合振动超声辐射器

1.1 压电换能器及变幅杆的等效电路

对于压电换能器的分析, 等效电路法是一种简单且直观的分析方法。对于压电换能器及变幅杆, 有如下等效电路^[7-8]:

图 2 中虚线左右两边分别表示换能器和变幅杆部分的等效电路。在设计时对换能器和变幅杆部分单独设计。图中 Z_{1p} , Z_{2p} 表示换能器压电堆部分的阻抗, Z_{11} , Z_{12} 和 Z_{13} 及 Z_{21} , Z_{22} 和 Z_{23} 分别为换能器后盖板及前盖板部分的阻抗; Z_{31} , Z_{32} 和 Z_{33} 是变幅杆的阻抗; Z_{bl} 和 Z_{fl} 分别是换能器后端的负载阻抗和变幅杆前端的负载阻抗, 然而在换能器的实际设计过程中, 由于换能器的负载很难确定, 因此设计时一般忽略其前后端面的负载阻抗, 把换能器

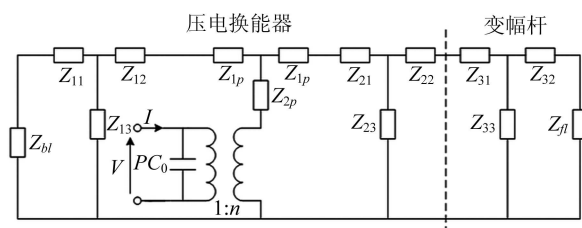


图 2 压电换能器及变幅杆的等效电路

看成是空载的。具体设计步骤如下: 首先利用电路理论, 经过一系列的变换, 分别求出换能器和变幅杆的等效输入电阻抗。其次, 令换能器及变幅杆的输入阻抗中的抗部分等于零, 得出二者的共振频率方程, 已知换能器及变幅杆的材料参数及各部分尺寸参数, 由共振频率方程即可算的其共振频率。

1.2 金属圆环耦合振动理论及其等效电路

1.2.1 金属圆环的耦合振动理论

金属圆环的轴向尺寸较大时, 径向激励时, 由于泊松效应除了径向振动外同时也产生轴向振动, 此时圆环的振动是一个复杂的三维耦合振动, 很难得到描述其振动方程的解析解。为了简化分析, 忽略金属圆环中的剪切应力和应变, 只考虑其径向和轴向的振动, 当引入等效弹性常数和等效机械耦合系数后, 大尺寸金属圆环复杂的轴对称耦合振动可等效为两个方向上的伸缩振动, 一个是沿径向的平面径向振动, 另一个是沿轴向的轴向伸缩振动, 且这两个方向上的等效振动是通过等效机械耦合系数相互联系的。根据文献 9 和文献 10, 金属圆环径向及轴向耦合振动的等效弹性常数分别为:

$$E_r = \frac{E(1 - \nu n')}{(1 + \nu n')(1 - \nu - 2\nu n')}, \quad (1)$$

$$E_z = \frac{E}{1 - \nu/n'}, \quad (2)$$

E 和 ν 分别是金属圆环的杨氏模量和泊松比, $n' = T_z/(T_r + T_\theta)$ 是等效机械耦合系数, 其中 T_z , T_r 和 T_θ 分别是金属圆环所受的轴向、径向和周向应力。

基于弹性动力学理论, 对于轴对称金属圆环的耦合振动, 当忽略其剪切应力和应变、圆环的径向及轴向边界自由时, 经过一系列推导可得各向同性大尺寸金属圆环的径向和轴向耦合振动的谐振频率方程^[10] 分别为:

$$\frac{k_r a J_0(k_r a) - (1 - \nu - 2\nu n')/(1 - \nu n') J_1(k_r a)}{k_r b J_0(k_r b) - (1 - \nu - 2\nu n')/(1 - \nu n') J_1(k_r b)} = \frac{k_r a Y_0(k_r a) - (1 - \nu - 2\nu n')/(1 - \nu n') Y_1(k_r a)}{k_r b Y_0(k_r b) - (1 - \nu - 2\nu n')/(1 - \nu n') Y_1(k_r b)} \quad (3)$$

$$\sin(k_z h) = 0, \quad (4)$$

其中 k_r 和 k_z 分别是等效径向和轴向波数, a , b 和 h 分别是圆环的外半径、内半径和高, $J_0(k_r a)$, $J_1(k_r a)$, $Y_0(k_r a)$ 和 $Y_1(k_r a)$ 均是贝塞尔函数。方程 (3) 和 (4) 描述了各向同性金属圆环耦合振动时的材料参数、几何尺寸、振动模式和谐振频率之间的相互关系。当金属圆环的材料参数和几何尺寸给定后, 求解方程 (3) 和 (4), 可得两组解, 分别对应于金属圆环的径向耦合振动的谐振频率 f_r 、等效机械耦合系数 n'_1 和轴向耦合振动的谐振频率 f_z 、等效机械耦合系数 n'_2 。

由以上分析可知, 在推导圆环轴对称耦合振动的频率方程时, 为了简化分析, 忽略了圆环的剪切应力和应变, 且认为其径向及轴向边界自由。然而, 对于该环形超声辐射器在大功率工作时, 由于金属圆环的径-轴耦合振动是通过激励源 (换能器及变幅杆) 的纵向振动所激发, 且激励源并非是轴对称激发圆环振动。因此, 该环形超声辐射器在实际工作时, 由于圆环内存在一定的剪切应力和应变, 同时其径向边界也不是完全自由, 这将造成理论计算条件和实际情况存在一定的偏差。

1.2.2 耦合振动金属圆环的等效电路

由式 (1) 和式 (2) 可知金属圆环径向及轴向耦合振动的等效弹性常数分别为: E_r 和 E_z 。根据一维振动理论, 可得弹性常数分别为 E_r 和 E_z 的薄圆环及细长管的一维等效电路。

(1) 弹性常数为 E_r , 内外半径分别为 b 和 a 的薄圆环的等效电路

由文献 12 知, 薄圆环径向振动的等效电路如图 3。

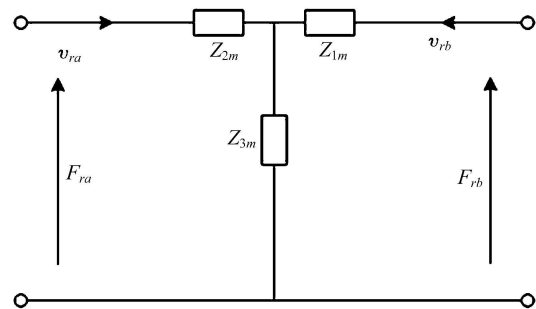


图 3 薄圆环的径向振动等效电路

其中:

$$Z_{1m} = j \frac{2Z_{rb}}{\pi k_r b [J_1(k_r a) Y_1(k_r b) - J_1(k_r b) Y_1(k_r a)]} \left[\frac{J_1(k_r a) Y_0(k_r b) - J_0(k_r b) Y_1(k_r a) - J_1(k_r b) Y_0(k_r b) + J_0(k_r b) Y_1(k_r b)}{J_1(k_r b) Y_0(k_r b) - J_0(k_r b) Y_1(k_r b)} \right] - j \frac{2Z_{rb}(1 - \nu)}{\pi (k_r b)^2 [J_1(k_r b) Y_0(k_r b) - J_0(k_r b) Y_1(k_r b)]},$$

$$Z_{2m} = j \frac{2Z_{rb}}{\pi k_r b [J_1(k_r a) Y_1(k_r b) - J_1(k_r b) Y_1(k_r a)]} + \left[\frac{J_1(k_r b) Y_0(k_r a) - J_0(k_r a) Y_1(k_r b) - J_1(k_r a) Y_0(k_r a) + J_0(k_r a) Y_1(k_r a)}{J_1(k_r a) Y_0(k_r a) - J_0(k_r a) Y_1(k_r a)} \right] + j \frac{2Z_{ra}(1-v)}{\pi (k_r a)^2 [J_1(k_r a) Y_0(k_r a) - J_0(k_r a) Y_1(k_r a)]},$$

$$Z_{3m} = j \frac{2Z_{rb}}{\pi k_r b [J_1(k_r a) Y_1(k_r b) - J_1(k_r b) Y_1(k_r a)]} = j \frac{2Z_{ra}}{\pi k_r a [J_1(k_r a) Y_1(k_r b) - J_1(k_r b) Y_1(k_r a)]},$$

式中:

$$Z_{ra} = \rho V_r S_{ra}, \quad Z_{rb} = \rho V_r S_{rb}, \quad k_r = \frac{\omega}{V_r}, \quad V_r = \sqrt{\frac{E_r}{\rho}}, \quad S_{ra} = 2\pi a h, \quad S_{rb} = 2\pi b h.$$

(2) 弹性常数为 E_z , 内外半径分别为 b 和 a 的细长圆管的等效电路

由细长管的一维等效电路, 可得图 4。图中, $Z_{1n} = j\rho V_z S_{zh} \tan(k_z h/2)$, $Z_{2n} = \rho V_z S_{zh} / (j \sin(k_z h))$, $k_z = \omega/V_z$, $V_z = \sqrt{E_z/\rho}$, $S_{zh} = \pi(a^2 - b^2)$ 。

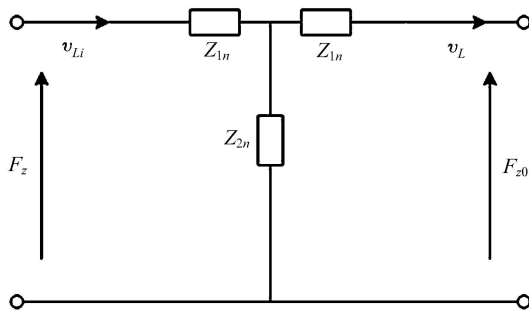


图 4 细长圆管纵振动等效电路

(3) 耦合振动金属圆环的等效电路

根据表观弹性法的基本思想, 金属圆环的振动, 在只考虑伸缩形变而不考虑剪切形变的条件下, 可以看作是由两个互相垂直的纵向波及径向波耦合而成, 当考虑到两种波有不同的等效弹性常数 (即等效杨氏模量) 时, 这两种波可分别由细长管的纵向振动波及薄圆环的径向振动波来表示, 两者通过等效机械耦合系数互相耦合成为圆环的振动^[9-11]。在准静态下近似认为圆环的周向应力等于其径向应力, 可得等效机械耦合系数 $n' = T_z/(T_r + T_\theta) = T_z/2T_r$, 利用图 3 及图 4, 可得以下各式:

$$F_{ra} = v_{ra} Z_{2m} + (v_{ra} + v_{rb}) Z_{3m}, \quad (5)$$

$$F_{rb} = -v_{rb} Z_{1m} + (v_{ra} - v_{rb}) Z_{3m}, \quad (6)$$

$$F_z = v_{Li} Z_{1n} + (v_{Li} - v_L) Z_{2n}, \quad (7)$$

$$F_{z0} = -v_L Z_{1n} + (v_{Li} - v_L) Z_{2n}, \quad (8)$$

$$F_z = F_{ra} \frac{a^2 - b^2}{ah} n'. \quad (9)$$

由式 (5) — 式 (9) 可得金属圆环耦合振动的等效电路, 见图 5。图中 $N = F_z/F_{ra} = [(a^2 - b^2)/ah]n'$, 定义为金属圆环径向振动与纵向振动之间的力转换系数。 N 的大小决定了两者之间的耦合程度。关于图 5 中的等效电路的几点讨论:

(1) 金属圆环二维等效电路由两个支路组成, 一个代表金属薄圆环的径向振动, 另一个代表细长圆管的纵向振动, 两者通过力转换系数 N 互相耦合成为金属圆环的耦合振动。

(2) 当 $h/[(a^2 - b^2)/a] \rightarrow 0$ 时, $N \rightarrow 0$, 图 5 可简化成图 3 的形式, 即金属薄圆环径向振动的等效电路。

(3) 当 $h/[(a^2 - b^2)/a] \rightarrow \infty$ 时, $N \rightarrow \infty$, 图 5 可简化成图 4 的形式, 即细长金属圆管的一维振动的等效电路。

(4) 当 $0 < h/[(a^2 - b^2)/a] < \infty$ 时, N 为有限值, 金属圆环的振动是径向与纵向两种振动的耦合, 耦合程度由 N 的大小决定。

由图 3、图 4 和图 5 即可得图 1 所示环形耦合振动超声辐射器的等效电路如图 6 所示。

图 6 为环形耦合振动超声辐射器的等效电路, 其中 Z_L 和 Z_{rL} 分别为环形辐射器轴向和径向负载阻抗。对于该环形超声辐射器, 在设计时各组成部分单独设计, 首先由各组成部分的等效电路得出其输入阻抗表达式, 令每一组成部分输入阻抗的抗为零,

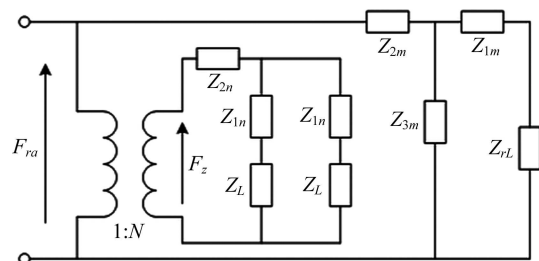


图 5 耦合振动金属圆环的等效电路

$a = 60 \text{ mm}$ 固定后, 以圆环内半径 b 和高 h 为设计变量, 频率 f 为状态变量, 圆环径向位移与轴向位移的差为目标函数, 采用零阶方法进行优化, 第 21 步达到优化结果, 最终优化尺寸为: $b = 25 \text{ mm}$, $h = 50 \text{ mm}$ 。图 8 是优化次数与目标函数的关系曲线。

图 9 和图 10 是用 ANSYS 软件对振动系统在频率为 $15 \sim 30 \text{ kHz}$ 进行模态分析后得到的模态振型图。由图 9 知, 换能器及变幅杆的纵振动激励起圆环的径-轴耦合振动 (20.69 kHz), 圆环除了径向具有较大位移振幅, 由于泊松效应, 轴向也有一定的位移振幅, 这正是我们所期望的。图 10 是换能器和变幅杆的纵向振动和圆环三角模式振动的一个耦合模态 (22.80 kHz)。由图 10 可见, 圆环的三角振动模式也具有较大的位移振幅, 所以这一振动模式也可作为系统的另一个工作模式。由于这两个振动模式均由换能器的纵向振动模式激发, 所以可以用单个超声波发生器驱动此振动系统即可实现双频模式工作, 这在超声液体处理中是非常有利的, 解决了单频超声在液体中产生驻波场的弊端。

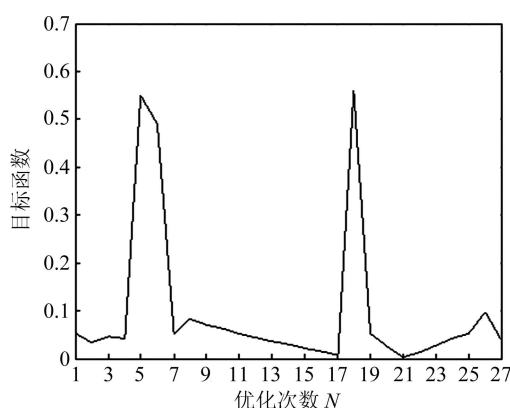


图 8 优化次数与目标函数的关系

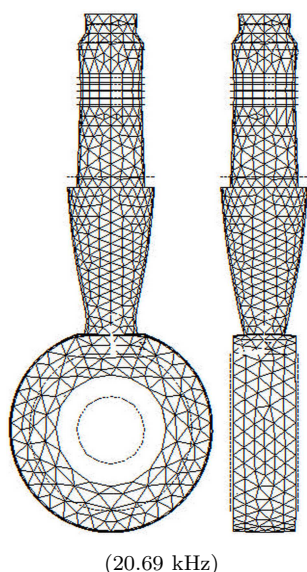


图 9 辐射器径-轴耦合振动对应的模态振型图

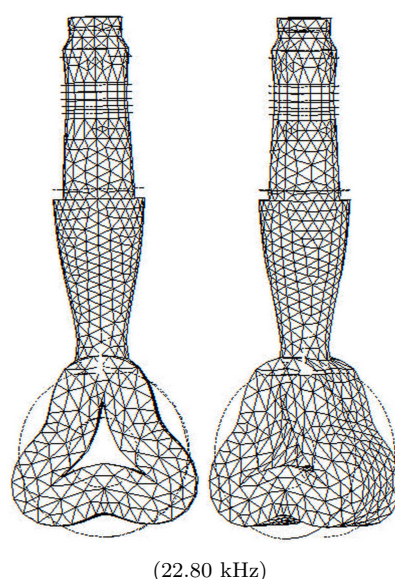


图 10 辐射器三角振动模式对应的模态振型图

2.2 振动系统的谐响应分析和辐射声场特性

图 11 是用 ANSYS 软件在频率区间为 $19 \sim 24 \text{ kHz}$ 时, 通过谐响应计算所得的环形辐射器的电导纳-频率及相角-频率变化曲线^[13]。图 11 中, 实线表示辐射器的电导纳-频率变化曲线, 虚线表示相角-频率变化曲线。由电导纳-频率变化曲线可知, 换能器在这一频率范围内有两个谐振峰, 其对应的频率值即为换能器的谐振频率值, 分别为 20.6 kHz 和 22.8 kHz , 由模态分析结果知, 这两个频率对应的振动模式正好是图 9 和图 10 所示辐射器的振动模式。由谐响应分析再次证实, 这两个振动模式均可作为辐射器的工作模式。

为了研究圆环在径-轴耦合振动时其声场辐射特性, 计算了圆环在水中的辐射声场^[14]。由于圆环具有轴对称结构, 同时考虑到计算机的运算能力和计算时间, 计算时采用二维轴对称模型。计算时所用的单元类型和材料属性参数如下: 圆环: Plane42 轴对称单元, 材料钢; 外围流体(水); 与圆环接触流体采用带结构 fluid29 轴对称单元, 最外层流体为 fluid29 轴对

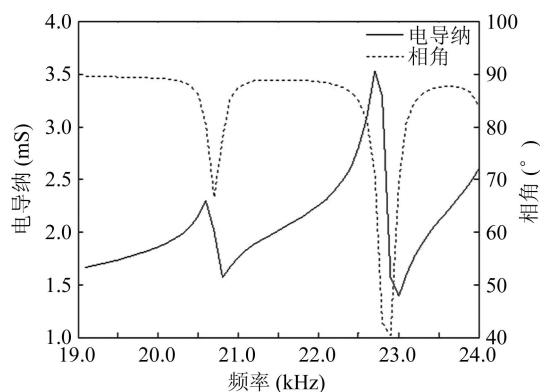


图 11 环形超声辐射器的电导纳及相角随频率的变化曲线

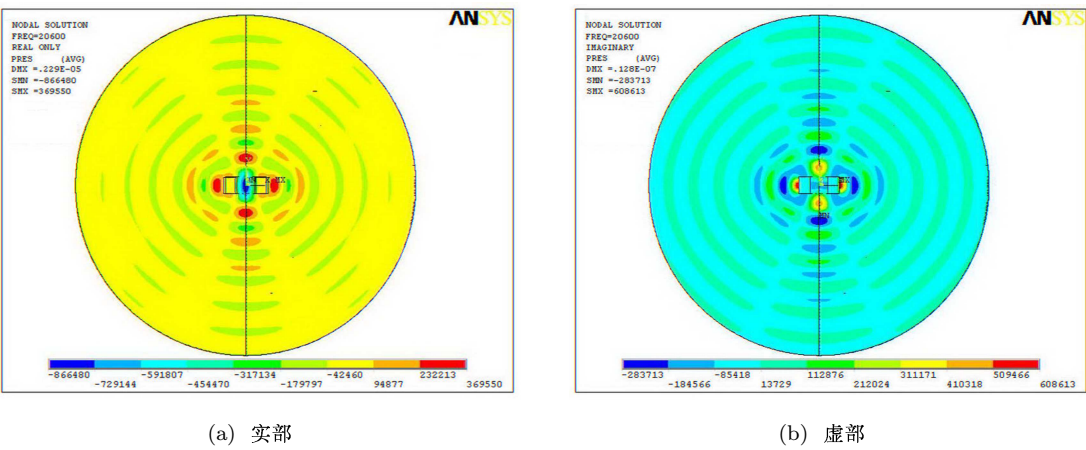


图 12 圆环径 - 轴耦合振动辐射声压场分布

称单元, 设置为无限吸收边界, 其余部分为不带结构的 floud29 轴对称单元, 流体为水, 密度 1000 kg/m^3 , 声速 1500 m/s 。

图 12 为在频率为 20.6 kHz 时, 分别读取结果数据的实部和虚部, 显示节点自由度解 (Pressure), 给出的圆环径 - 轴耦合振动时在液体中 (水) 辐射声场波动效果图, 其中图 12(a) 显示的是辐射声压实部对应的云图, 图 12(b) 为辐射声压虚部对应的云图。声压自由度解的实部和虚部都可以代表声场的波动特性, 在近场区域有显著差异表明有复杂的相位分布。仅用实部和虚部描述声压场还不够全面, 可以提取声压自由度解的模值, 来描述压力波幅度分布情况, 即辐射波束图。图 13 显示了圆环径 - 轴耦合振动时在液体中 (水) 辐射波束图, 由图 13 可知, 圆环在径 - 轴耦合振动时, 环中心的声压值最大, 即在环中心形成聚焦声场 (红色表示), 圆环在径 - 轴耦合振动时其径向和轴向均有较大的辐射声压, 且近场声压大, 远场声压小。

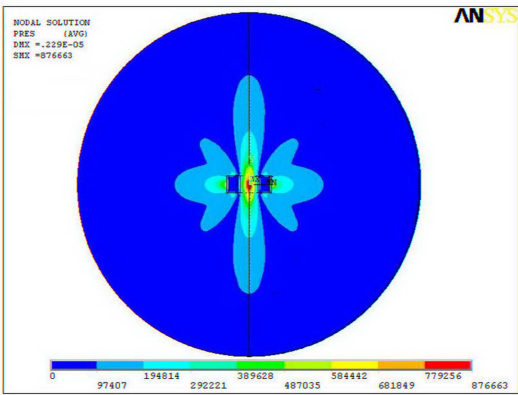


图 13 圆环径 - 轴耦合振动辐射波束图

3 实验测试

为了验证理论和数值计算的正确性, 加工了图 14 所示的环形耦合振动超声辐射器, 在小信号下用 HP4294A 精密阻抗分析仪测试了该振动系统的阻抗和相角随频率的变化特性曲线, 在大信号下, 用宽频带超声波发生器激励该环形超声辐射器, 在频率为 20.18 kHz 和 21.80 kHz 时, 观察到了辐射器的径 - 轴耦合振动模态和三角振动模态。为了比较理论计算、数值仿真和实验测试结果, 把三者所得结果列于表 1。其中, f_{tt} , f_{ht} , f_{ct} 和 f_{rt} 分别为由等效电路法计算的换能器、变幅杆、金属圆环及整个环形辐射器的谐振频率值; f_{tA} , f_{hA} 和 f_{cA} 分别为由 ANSYS 有限元软件仿真计算所得的换能器、变幅杆、金属圆环的谐振频率值; f_{rA1} 和 f_{rA2} 为 ANSYS 有限元软件仿真计算所得整个环形辐射器径 - 轴耦合振动模态和三角振动模态对应的频率值; f_{rm1} 和 f_{rm2} 是在小信号下由 HP4294A 精密阻抗分析仪测试的环形辐射器径 - 轴耦合振动模态和三角振动模态对应的



图 14 环形耦合振动超声辐射器实物照片

表 1 环形耦合振动超声辐射器的谐振频率值

频率	f_{tt}	f_{tA}	f_{ht}	f_{hA}	f_{ct}	f_{cA}	f_{rt}	f_{rA1}	f_{rA2}	f_{rm1}	f_{rm2}	f'_{rm1}	f'_{rm2}
kHz	20.93	20.58	20.96	20.66	20.60	20.64	20.58	20.6	22.8	20.21	22.06	20.18	21.80

频率值; f'_{rm1} 和 f'_{rm2} 是在大信号激励下测试的环形辐射器径 - 轴耦合振动模式和三角振动模式对应的频率值。

由表 1 可知, 由一维等效电路 (如图 2 所示) 计算的换能器和变幅杆的谐振频率 (f_{tt} 和 f_{ht}) 略高于用有限元法计算的相应频率 (f_{tA} 和 f_{hA}), 其原因在于用一维理论计算其谐振频率时, 忽略了横向振动对纵向谐振频率的影响。耦合振动理论得出的圆环等效电路 (如图 5 所示) 计算的其等效径向谐振频率 (f_{ct}) 与有限元法计算的频率值 (f_{cA}) 十分接近。由环形耦合振动超声辐射器的等效电路 (如图 6 所示) 计算的其径 - 轴耦合振动对应的频率 (f_{rt}) 与有限元法计算的对应频率 (f_{rA1}) 和实验测试频率 (f_{rm1} 和 f'_{rm1}) 同样符合的较好; 同样, 环形耦合振动超声辐射器另外一个三角振动模式对应的有限元法计算的频率 (f_{rA2}) 和实验测试频率 (f_{rm2} 和 f'_{rm2}) 也较接近。

图 15 是由 HP4294A 精密阻抗分析仪测试的该环形耦合超声辐射器阻抗及相角随频率的变化曲线。其中上面一条曲线表示阻抗 - 频率变化关系曲线, 下面的曲线表示相角 - 频率变化关系曲线。由阻抗 - 频率变化关系曲线可知, 在测试的频率范围内 (19 ~ 24 kHz), 辐射器的阻抗曲线有两个较明显的峰值和谷值, 其中两个谷值对应的频率值即为辐射器的两个谐振频率值; 20.21 kHz 和 22.06 kHz, 这与用有限元软件 ANSYS 计算的谐振频率值 20.6 kHz 和 22.8 kHz (图 11 所示) 比较吻合。

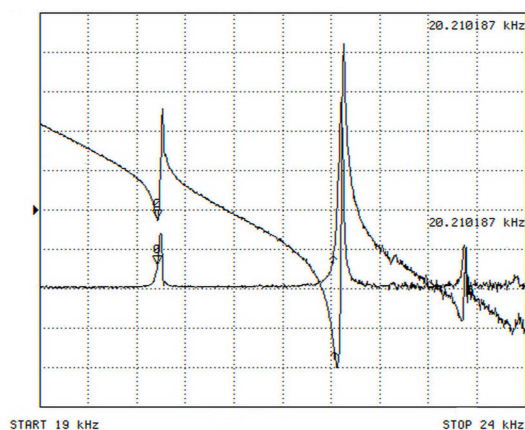


图 15 实验测试环形超声辐射器的阻抗及相角随频率的变化曲线

4 结论

推导了环形耦合振动超声辐射器的等效电路, 给出了等效电路法和有限元法优化设计环形超声辐射器的详细过程。研究了该辐射器的振动特性及其

辐射声场特性, 根据理论计算结果加工了相应的环形超声辐射器, 实验测试结果与理论计算结果符合的较好。该环形耦合振动超声辐射器结构简单, 安装方便, 用一个振动系统即可获得圆环的径 - 轴耦合振动和三角振动的双频振动模式, 可望在超声污水处理、中草药提取和生物柴油制备等领域获得应用。

致谢

论文受到了浙江省物理实验教学示范中心建设项目的支持, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 应崇福. 新世纪内声空化声致发光的研究进展 —— 兼论声致热核聚变和声 (致) 化学. 中国科学 G 辑: 物理学力学天文学, 2007; **37**(2): 129—136
- 2 Gallego-Juárez J A. High-power ultrasonic processing: Recent developments and prospective advances. *Physics Procedia*, 2010; **3**(1): 35—47
- 3 Zhou G P, Liang Z F, Li Z Z *et al.* A tubular focused sonochemistry reactor. *Chin. Sci. Bull.*, 2007; **52**(14): 1902—1905
- 4 Liang Z F, Zhou G P, Zhang Y H *et al.* Vibration analysis and sound field characteristics of a tubular ultrasonic radiator. *Ultrasonics*, 2006; **45**(1-4): 146—151
- 5 Vladimir N, Khmelev, Levin S V *et al.* 8th INTERNATIONAL SIBERIAN WORKSHOP AND TUTORIALS EDM 2007. Erlagol: July 1-5, 2007. SESSION V
- 6 Liu H L, Hsieh C M. Single-transducer dual-frequency ultrasound generation to enhance acoustic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2009; **16**(3): 431—438
- 7 林书玉. 超声换能器的原理及设计. 北京: 科学出版社, 2004: 99—111
- 8 林仲茂. 超声变幅杆的原理和设计. 北京: 科学出版社, 1988: 36—126
- 9 Mori E, Itoh K, Imamura A. Analysis of a short column vibrator by apparent elasticity method and its applications. *Ultrasonics International Conference Proceedings*, 1977: 262—264
- 10 Lin S Y. Coupled vibration of isotropic metal hollow cylinders with large geometrical dimensions. *Journal of Sound and Vibration*, 2007; **305**(1-2): 308—316
- 11 许龙, 林书玉. 模式转换型超声塑焊振动系统的设计. 声学学报, 2010; **35**(6): 688—693
- 12 林书玉. 径向复合压电陶瓷超声换能器的径向振动特性研究. 声学学报, 2007; **32**(4): 310—315
- 13 莫喜平. Terfenol-D 鱼唇式弯张换能器. 声学学报, 2001; **26**(1): 25—28
- 14 王成会, 林书玉. 超声场中气泡的耦合振动. 声学学报, 2011; **36**(3): 325—331