二维正交复合夹心式压电环形换能器的振动特性

杜耀东¹, 许龙^{1*}, 周光平²

1. 中国计量大学理学院, 杭州 310018;

2. 深圳职业技术学院电子与通信工程学院, 深圳 518055

*联系人, E-mail: xulong@cjl.edu.cn

收稿日期: 2020-10-19; 接受日期: 2021-02-10; 网络出版日期: 2021-09-10

国家自然科学基金(编号: 12074354, 11574277)资助项目

摘要 提出了一种新型二维正交复合夹心式压电环形换能器. 换能器由内部二维正交复合夹心式压电激励源及中心锥形弹性膨胀预应力螺栓和外部金属圆环复合而成. 建立了换能器的机电等效电路模型并推导了其共振与反共振频率方程. 利用等效电路法、有限元法和实验测试对换能器的纵径耦合振动性能进行了研究, 结果表明: 通过新型的结构设计和利用内部正交复合夹心式压电激励源的正交同相纵向共振可有效激发外部金属圆环4阶径向波节模式振动, 从而实现换能器的径向全方位超声辐射. 研究成果有望在高功率超声液体处理和声呐技术中获得应用.

关键词 环形压电换能器, 机电等效电路, 有限元仿真

PACS: 43.35.+d, 43.38.+n, 43.40.+s

1 引言

环形压电超声换能器具有声波沿半径方向辐射无指向性、声辐射效率高、较高的接收灵敏度以及单一的径向振动模式等特点, 因此被广泛应用于功率超声、水声、海洋开发和超声测井等领域^[1-4]. 在功率超声中, 国内外目前应用较为广泛的径向辐射换能器主要有两种: 一种是由Walter于19世纪80年代提出的推拉式圆管换能器, 以及19世纪90年代Hielscher公司生产的UIP大功率棒形超声换能器. 它们两者都是通过将纵向振动压电超声换能器与金属圆管或圆棒复合, 利用纵径耦合振动产生超声径向辐射, 通过该类

换能器的振动模态和声辐射性能研究发现, 该类换能器的主振方向仍在纵向, 纵径转换效率较低^[5-7]. 另一种是由径向极化的压电陶瓷圆环与金属薄圆环通过热胀冷缩工艺径向嵌套复合而成的压电换能器. 由于此类换能器通过热胀冷缩工艺实现对压电陶瓷圆环施加径向预应力, 难以对施加的预应力实现精确控制^[8,9]. 为了解决径向复合压电换能器预应力难以精确控制问题, 国内学者将此类换能器的压电陶瓷圆管切割成若干个相同的径向极化弧形压电陶瓷片, 并将内部空气背衬改为金属膨胀预应力可调内芯, 从而实现对压电陶瓷晶堆预应力的精确施加^[10-13]. 从原理上来讲, 该类换能器对传统的径向换能器在结构和性能上具有较

引用格式: 杜耀东, 许龙, 周光平. 二维正交复合夹心式压电环形换能器的振动特性. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 114311
Du Y D, Xu L, Zhou G P. Vibration characteristics of two-dimensional orthogonal composite sandwich piezoelectric circular transducer (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 114311, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0417

大的提升,但对换能器的加工装配工艺要求甚高,较难实现规模化推广应用.因此,如何更好地对径向换能器精确施加预应力、降低装配加工难度和提升换能器的功率容量,成为此类换能器亟需解决的关键技术问题.

借鉴现有纵向和径向换能器的优缺点,本文提出一种新型二维正交复合夹心式压电环形换能器.其目的在于通过特殊的结构设计和振动模式耦合,解决现有纵向和径向辐射超声换能器存在的超声作用方向单一、超声辐射面积和功率容量有限、径向超声辐射强度较弱、径向预应力难以控制及结构过于复杂等不足,实现对现有的纵向和径向超声换能器的结构和振动性能的改进和提高.首先,利用能量法探讨了金属圆环径向振动对其等效质量的影响,基于弹性振动理论以及机电类比原理建立了换能器的等效电路模型和共振频率方程.其次,基于等效电路法设计了不同环壁厚度的二维正交复合夹心式压电环形换能器,利用有限元软件Comsol对换能器的振动模态及声辐射特性进行了仿真模拟.最后,基于理论分析和有限元仿真结果,加工制作了相应的换能器实验样品,对换能器的阻抗-频率特性、模态振型进行了实验测试,实验测试结果与解析理论计算和有限元仿真结果相一致.本文提出的二维正交复合夹心式压电环形换能器有望在超声污水处理、超声采油、超声中草药萃取以及超声化学反应等超声技术领域和声呐技术中获得应用.

2 理论分析

2.1 结构及工作原理

图1所示为二维正交复合夹心式压电环形换能器.其结构是在径向辐射金属圆环内设置中心耦合块的4个夹心式压电激励器,并按纵向正交方式复合形成环

图1 (网络版彩图)二维正交复合夹心式压电环形换能器

Figure 1 (Color online) A two-dimensional orthogonal composite sandwich piezoelectric circular transducer.

形换能器的内部激励源,且中心耦合块的中心处设置锥形弹性膨胀预应力螺栓,通过调节锥形弹性膨胀预应力螺栓产生由内向外的径向力,并协同外部金属圆环对4个夹心式压电激励器的压电陶瓷晶堆产生内外双向的径向预应力,从而大幅提高换能器的功率密度及功率容量.其工作原理是换能器内部的正交复合夹心式压电激励器设计在正交同相纵向共振^[14,15]模式下工作.该正交同相纵向共振直接驱动外部金属圆环作径向波节振动,从而实现圆环向外径向辐射声波.

2.2 外部金属圆环径向振动分析

如图2所示的薄壁金属圆环,将其管高度、内半径、外半径以及圆环厚度分别表示为 h , a , b , c ,且平均半径表示为 $R_0=(a+b)/2$.并且为了便于分析,假设其壁厚远小于外半径,高度远小于其平均直径,即 $c \ll b$, $h \ll 2R_0$.可知,金属圆环的径向振动方程和金属圆环简谐振动时的径向位移方程分别为^[16]

$$M \frac{\partial^2 \xi_r}{\partial t^2} + \frac{1}{C_M} \xi_r = F_r, \quad (1)$$

$$\xi_r = \xi_m \exp(j\omega t). \quad (2)$$

联立以上两式并利用 $\xi'_r = j\omega \xi_r$ 得到金属圆环内侧力 F_r 与圆环管壁质点振速 ξ'_r 的关系为

$$F_r = \left(j\omega M + \frac{1}{j\omega C_M} \right) \xi'_r, \quad (3)$$

图2 薄壁圆环径向振动示意图

Figure 2 Schematic diagram of radial vibration of the thin-walled circular ring.

其中 $M=2\pi R_0\rho hc$ 为圆环的等效质量, $C_M=R_0/2\pi hcE$ 为圆环的等效弹性力顺. 通过式(3)可得到如图3所示的机电等效电路来描述外部金属圆环的径向振动^[16].

圆环的径向振动包括不同阶的波节振动模式^[17], 图4所示为圆环的前4阶径向振动模式, 由本文提出的换能器的工作原理可知, 圆环壳在换能器稳定工作时的形状变化为图4中 $n=4$ 的波节模式.

由图3所示圆环径向振动的等效电路可知, 圆环的径向振动可等效为一个弹簧和等效质量. 对于圆环的不同径向振动模式, 其等效质量将与振动模式有关, 本文参考文献[18]中运用能量法, 通过振动能量的变化, 分析圆环径向振动增加的附加动能, 对圆环的等效质量进行修正, 可得圆环修正之后的等效质量为^[18]

$$M_r = \frac{M}{n} \left[1 + \frac{(2n+1)^2 \pi^2 \sigma^2}{4} \cdot \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right], n = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

图3 薄壁圆环径向振动机电等效电路图

Figure 3 Electromechanical equivalent circuit of the thin-walled circular ring in radial vibration.

图4 圆环径向振动的波节模式示意图

Figure 4 Schematic diagram of the nodal mode of a circular ring vibrating in radial direction.

2.3 内部正交复合夹心式压电激励源等效电路

由图1可知, 内部正交复合夹心式压电激励源由中心耦合质量块、过渡圆台、压电陶瓷晶堆和前辐射块正交复合而成, 对于中心耦合块可用4个T型网络耦合^[14,15]表示、压电陶瓷晶堆可用梅森等效电路表示、过渡圆台和前辐射块可用T型网络^[14,19]表示, 由各组成部分之间机械上串联和电学上并联的边界条件即可得内部正交复合夹心式压电激励源的等效电路, 如图5所示. 图5中, 区块1-4所示分别为中心耦合块、过渡圆台、压电陶瓷晶堆、前辐射块的等效电路.

2.4 二维正交复合夹心式压电环形换能器等效电路

由于换能器的内部正交复合夹心式压电激励源与外部金属圆环在交界处的径向振速和径向力都是连续的, 结合图3和5可得如图6所示的换能器整体机电等效电路. 由图6可知, 换能器的内部激励源机电等效电路的四个支路并联, 且四个支路各部分阻抗都分别相等, 由电路电阻的并联法则可以将图6的机电等效电路简化为图7所示的机电等效电路, 其中各部分等效阻抗均为原来的四分之一, 即

$$Z'_{ml1} = \frac{Z_{ml1}}{4}, Z'_{ml2} = \frac{Z_{ml2}}{4}, Z'_{lf} = \frac{Z_{lf}}{4},$$

$$Z'_{2f} = \frac{Z_{2f}}{4}, Z'_{3f} = \frac{Z_{3f}}{4}, Z'_{4f} = \frac{Z_{4f}}{4},$$

$$Z'_{21p} = \frac{Z_{21p}}{4}, Z'_{22p} = \frac{Z_{22p}}{4}, Z'_{M2} = \frac{Z_{M2}}{4}.$$

根据图7所示机电等效电路, 由传输线阻抗转移变换可得二维正交复合夹心式压电环形换能器的机械阻抗 Z_0 为

$$Z_0 = Z'_{22p} + \frac{Z'_c \cdot Z'_b}{Z'_c + Z'_b}, \quad (5)$$

$$Z'_c = Z'_{lf} + Z'_{21p} + \frac{Z'_{2f} \cdot (Z'_{lf} + Z'_{M2} + Z'_{Ma})}{Z'_{2f} + Z'_{lf} + Z'_{M2} + Z'_{Ma}}, \quad (6)$$

$$Z'_{Ma} = j\omega M_r + \frac{1}{j\omega C_M}, \quad (7)$$

$$Z'_b = Z'_{21p} + Z'_{3f} + \frac{Z'_{4f} \cdot Z'_a}{Z'_{4f} + Z'_a}, \quad (8)$$

$$Z'_a = Z'_{ml1} + Z'_{3f} + \frac{Z'_{ml1} \cdot Z'_{ml2}}{Z'_{ml1} + Z'_{ml2}}, \quad (9)$$

其中, Z_a, Z_b, Z_c 为计算过程中的中间变量, 由此可得二维正交复合夹心式环形压电换能器的输入机电阻

Figure 5 Electromechanical equivalent circuit of the piezoelectric excitation source.

Figure 6 Electromechanical equivalent circuit of the two-dimensional orthogonal composite sandwich piezoelectric circular transducer.

图 7 简化后的二维正交复合夹心式压电环形换能器机电等效电路

Figure 7 Simplified electromechanical equivalent circuit of the two-dimensional orthogonal composite sandwich piezoelectric circular transducer.

抗 Z_e 为

$$Z_e = \frac{Z_0}{N_1^2 + j\omega \cdot 4C_2 \cdot Z_0}. \quad (10)$$

当换能器的输入机电阻抗为零时, 可得其共振频率方程:

$$\text{Im}(Z_e) = 0. \quad (11)$$

当输入阻抗为无穷时, 可得其反共振频率方程:

$$\text{Im}(Z_e) = \infty. \quad (12)$$

3 振动性能研究

基于图7所示换能器的机电等效电路及共振频率方程, 利用数值计算软件Maple计算了换能器的共振频率. 在此基础上运用有限元软件Comsol对换能器的振动模态径向辐射声场进行了仿真. 理论计算及有限元仿真中, 换能器中心耦合块部分材料为不锈钢, 其余各部分材料均为硬铝, 压电陶瓷晶堆由四片PZT-8压电陶瓷圆环片组成. 以上三种材料的特性参数分别为: 硬铝, 密度 $\rho=2790 \text{ kg/m}^3$, 杨氏模量 $E=7.15 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, 泊松比 $\nu=0.34$; 不锈钢, 密度 $\rho=7910 \text{ kg/m}^3$, 杨氏模量 $E=1.96 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, 泊松比 $\nu=0.30$; PZT-8压电陶瓷环片, 密度 $\rho=7600 \text{ kg/m}^3$, $c_{33}^D=16.9 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0=600.0$, $e_{33}=14.0 \text{ m}^2/\text{C}$. 换能器各部分的几何尺寸分别为: 外部金属圆环壳内半径 $a=0.064 \text{ m}$, 外半径 $b=0.079 \text{ m}$, 圆环厚度 $c=0.015 \text{ m}$, 圆环高度 $h=0.08 \text{ m}$, 中心耦合块(立方体)边长 $h_1=0.045 \text{ m}$, 压电陶瓷环片半径 $r=0.0225 \text{ m}$, 与中心耦合块相连的过渡圆柱高度 $h_2=0.002 \text{ m}$, 与前辐射块相连的过渡圆柱高度 $h_3=0.003 \text{ m}$, 前辐射块高度 $h_4=0.015 \text{ m}$.

图8为有限元软件仿真所得的圆环壁厚为 0.015 m 的换能器在 17221 Hz 的模态振型图. 由图8可知, 利用换能器内部的正交复合夹心式压电激励源的同相振动^[14,15]可有效激发外部金属圆环的4阶(图4中 $n=4$ 对应的波节振动模式)波节振动模式. 在该振动模式下既利用了传统的纵向夹心式压电换能器的结构简单、功率容量高和机电转换效率高的优点, 又利用了圆环径向振动时径向全方位声辐射的优点, 从而有助于解决现有纵向和径向辐射超声换能器存在的超声作用方向单一、超声辐射面积和功率容量有限、径向超声辐射强度较弱、径向预应力难以控制及结构过于复杂等不足, 实现对现有的纵向和径向超声换能器的结构和振动性能改进和提高的目的. 图9为换能器在图8所示振动模态下的径向辐射声场云图, 由此可知在该振动模式下换能器能够在径向全方位辐射声波.

此外, 为了验证本文建立的换能器等效电路模型的可靠性, 分别用等效电路法、有限元法计算了不同圆环壁厚换能器的共振频率, 如表1所示. 同时, 选择

图 8 (网络版彩图)换能器模态振型图

Figure 8 (Color online) Mode shape diagram of the transducer.

图 9 (网络版彩图)换能器的径向辐射声场云图
Figure 9 (Color online) Radial radiation sound field diagram of the transducer.

壁厚为15 mm的换能器加工制作了相应的实验样品. 利用PV-70A阻抗分析仪和LV-S01激光测振仪分别对换能器的频响特性和模态振型进行了测试. 图10为阻抗分析仪测试所得的换能器频响曲线. 由图10可知, 换能器的共振频率为17224 Hz. 为了验证该共振频率下换能器的振动模态是否为本文所设计的模态振型, 在该频率下激发换能器振动, 利用LV-S01激光测振仪测量换能器辐射圆环外侧面周向等间隔点的径向位移, 测试装置如图11所示. 利用测试得到的换能器辐射面周向各点的径向位移数据, 在极坐标系下作图, 得到如图12所示的沿外部圆环周向的径向位移振幅分布图. 实验测试的圆环径向位移振幅分布图像与上文中图4的理论分析和图8的仿真模拟结果一致.

从表1可以看出, 在不同的圆环壁厚下, 理论计算、有限元仿真和实验测试的换能器共振频率基本一致, 相对误差介于0.69%–5.45%之间, 满足工程设计需

图 10 (网络版彩图)换能器频响曲线
Figure 10 (Color online) Frequency response curve of the transducer.

图 11 (网络版彩图)换能器外部金属圆环位移振幅的实验测试装置
Figure 11 (Color online) Experimental device for measuring the displacement distribution of the circular ring of the transducer.

求. 表1中, $\Delta_1 = |f_{\text{理论}} - f_{\text{仿真}}| / f_{\text{仿真}}$, $\Delta_2 = |f_{\text{仿真}} - f_{\text{实验}}| / f_{\text{实验}}$. 三种方法所得换能器的共振频率之间的误差主要来源于:

表 1 二维正交复合夹心式压电环换能器共振频率的理论计算、仿真模拟和实验测试值

Table 1 Theoretical, simulation and experimental values of the resonance frequency of a two-dimensional orthogonal composite sandwich piezoelectric circular transducer

圆环壁厚 (mm)	理论值 (Hz)	仿真值 (Hz)	实验值 (Hz)	相对误差	
				理论仿真 Δ_1	仿真实验 Δ_2
12.5	17705	17072	—	3.71%	—
15.0	17339	17221	17224	0.69%	0.001%
17.5	17048	17395	—	1.94%	—
20.0	16810	17548	—	4.15%	—
22.5	16614	17353	—	4.81%	—
25.0	16449	17197	—	5.45%	—

图 12 (网络版彩图)沿外部圆环周向的径向位移振幅分布图
Figure 12 (Color online) Diagram of the radial displacement distribution along the circumferential direction of the outer ring.

第一, 理论计算时所用的圆环的等效电路是在薄壁理论下基于能量法对圆环的等效质量进行修正得到的近似计算理论, 对于一定壁厚的圆环, 薄壁理论必然产生误差, 另外对于不同壁厚的圆环, 其等效弹性系数也应当进行修正, 这些工作将在后续进一步的完善; 第二, 换能器的实际材料参数与理论计算中所设置的值存在一定的差别; 第三, 为了对换能器实验测试样品的压电陶瓷晶堆施加预应力, 中心耦合块内存在膨胀螺栓, 并且对中心耦合块进行切割处理, 这些因素使得实际换能器样品与理论计算及有限元仿真时采用的简化模型存在偏差。

本文研究的二维正交复合夹心式压电环换能器在超声液体处理领域应用时, 需要在其上下底面分别加上密封盖。图 13 为利用 COMSOL 软件得到的换能器加密封盖后的模式振型图。由模式分析可知, 当上下底盖的厚度为 10 mm 时, 换能器内部的正交复合夹心式压电激励源的同相振动激发外部金属圆环的 4 阶波节振动与上下盖的弯曲振动模式, 由此可实现换能器在空间中的轴向与径向全方位超声辐射, 在该振动模式下换能器的共振频率为 20614 Hz。图 14 为用阻抗分析仪测试的加密封盖后换能器的频响曲线, 由此可知换能器的共振频率为 20429 Hz。对比加盖前后换能器的共振频率可知, 加盖后换能器的共振频率升高 3 kHz 左右, 其主要原因是当换能器的外部金属圆环通过螺纹连接两个金属盖后“束缚”了金属圆环的径向振动, 即

图 13 (网络版彩图)换能器加密封盖后的模式振型图
Figure 13 (Color online) Mode shape diagram of the transducer with sealing covers.

图 14 (网络版彩图)换能器加密封盖后的频响曲线
Figure 14 (Color online) Frequency response curve of the transducer with sealing covers.

外部金属圆环的径向刚度增加, 从而引起换能器的整体复合共振频率升高。

为了确认通过阻抗分析仪测试的加密封盖换能器的共振频率(20429 Hz)所对应的模式是否与有限元仿真模式(图 13)一致, 利用激光测振仪分别对加密封盖换能器外部金属圆环的周向位移振幅分布、密封盖表面沿直径方向的轴向位移振幅分布进行了测量, 实验测试装置如图 15 所示, 圆环的周向位移振幅分布和沿金属盖直径方向的轴向位移振幅分布分别如图 16 和 17 所示。由实验结果可知, 换能器外部金属圆环周向位移分布与仿真结果一致, 但可以明显看出加密封盖后两压电激励源之间的金属圆环处的位移振幅明显减小, 这是由于加上密封盖后换能器的刚度变大, 振动受到

图 15 (网络版彩图)加密封盖后换能器的各部分位移分布测试装置

Figure 15 (Color online) Experimental device for measuring the displacement distribution of each part of the transducer with sealing covers.

图 16 (网络版彩图)换能器加密封盖后圆环周向位移分布图
Figure 16 (Color online) Diagram of the radial displacement distribution of the outer ring of the transducer with sealing covers.

了限制而导致振幅减小. 另外, 密封盖上沿直径分布各点的位移振幅结果表现为, 越靠近密封盖板中心, 位移振幅越大, 远离密封盖板中心时, 位移振幅不断减小, 其位移分布规律与有限元仿真得到的盖板轴对称弯曲振动结果基本一致.

图 17 密封盖上沿直径方向各点的位移振幅分布图

Figure 17 Diagram of displacement distribution along the diameter of the sealing covers.

4 结论

本文提出了一种新型二维正交复合夹心式压电环形换能器, 建立了其机电等效电路模型及频率设计方程, 探讨了圆环厚度对换能器共振频率的影响, 并通过模拟得到了换能器工作时的径向声场云图. 研究表明, 数值计算、仿真模拟结果与实验测试结果基本符合. 本文提出的换能器内部压电激励源可有效激发外部金属圆环的4阶波节振动模式, 使换能器能在径向全方位辐射声波. 换能器在该振动模式下既利用了传统的纵向夹心式压电换能器的结构简单、功率容量高和机电转换效率高的优点, 又利用了圆环径向振动径向全方位声辐射的优点, 从而有助于解决现有纵向和径向辐射超声换能器存在的超声作用方向单一、超声辐射面积和功率容量有限、径向超声辐射强度较弱、径向预应力难以控制及结构过于复杂等不足, 实现对现有的纵向和径向超声换能器的结构和振动性能改进和提高的目的. 此外, 也可将该类换能器, 进行多个同轴并联, 连接成一个更大功率的棒形换能器阵列, 从而应用在一些大容量的超声液体处理工业领域, 如有望在超声污水处理、超声采油、超声中草药萃取以及超声化学反应等超声技术领域和声呐技术中获得推广应用.

参考文献

- 1 Sun W H, Huang B, Guo X Y, et al. Design of finite element analysis of piezoelectric tube transducer (in Chinese). Ship Electr Eng, 2016, 36: 176–

- 180 [孙卫华, 黄波, 郭小宇, 等. 压电圆管换能器有限元分析设计研究. 舰船电子工程, 2016, 36: 176–180]
- 2 Hu Y F. Sensitivity analysis of thin-wall piezoelectric tube hydrophone (in Chinese). *Acoust Electr Eng*, 2017, 4: 25–27, 39 [胡银丰. 薄壁压电圆管水听器灵敏度分析. 声学及电子工程, 2017, 4: 25–27, 39]
- 3 Cao X S, Wang Y M, Wang S. Finite element analysis of effects of pressure load on acoustics logging tube transducer (in Chinese). *Well Logg Technol*, 2015, 39: 160–164 [曹雪坤, 王易敏, 王申. 压力载荷对声波测井圆管换能器影响有限元分析. 测井技术, 2015, 39: 160–164]
- 4 Zhang H D, He X P. Investigation of the design method of an angled ultrasonic longitudinal solid horn (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2015, 45: 106–113 [张海岛, 贺西平. 具有夹角结构纵振动变幅杆的设计方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 106–113]
- 5 Yu H P, Zhong L J, Sun H G, et al. Application and development of cylindrical high-power transducer (in Chinese). *Acoust Electr Eng*, 2007, 4: 1–4 [俞宏沛, 仲林建, 孙好广, 等. 圆柱大功率换能器的应用与发展. 声学及电子工程, 2007, 4: 1–4]
- 6 Liang Z F, Mo X P, Zhou G P. Vibration analysis of ultrasonic tubular resonators (in Chinese). *Acta Acust*, 2011, 36: 369–376 [梁召峰, 莫喜平, 周光平. 超声管形振子的振动分析. 声学学报, 2011, 36: 369–376]
- 7 Xu J, Lin S, Ma Y, et al. Analysis on coupled vibration of a radially polarized piezoelectric cylindrical transducer. *Sensors*, 2017, 17: 2850
- 8 Liu S Q, Ma L L. The development and application of radial vibration piezoelectric ultasonic transducer (in Chinese). *J Shaanxi Normal Univ (Nat Sci Ed)*, 2020, 48: 60–66 [刘世清, 麻磊磊. 径向振动压电超声换能器的发展及应用. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2020, 48: 60–66]
- 9 Xu J, Lin S. Analysis on the three-dimensional coupled vibration of composite cylindrical piezoelectric transducers. *J Acoust Soc Am*, 2018, 143: 1206–1213
- 10 Xu J, Lin S. Electromechanical equivalent circuit of the radially polarized cylindrical piezoelectric transducer in coupled vibration. *J Acoust Soc Am*, 2019, 145: 1303–1312
- 11 Xu J, Lin S, Hu J. Electromechanical equivalent circuit and coupled vibration of the radially composite cylindrical piezoelectric transducer. *Sens Actuat A-Phys*, 2019, 286: 133–145
- 12 Xu J, Lin S Y. Research on the annular piezoelectric ceramic composite transformer in radial vibration (in Chinese). *J Northwest Univ (Nat Sci Ed)*, 2017, 47: 50–55 [徐洁, 林书玉. 径向振动环状压电陶瓷复合变压器的研究. 西北大学学报(自然科学版), 2017, 47: 50–55]
- 13 Xu J, Lin S Y. Analysis on the coupled vibration of the radially polarized cylindrical piezoelectric transducer (in Chinese). In: *Proceedings of the 2018 National Acoustics Conference D Power Ultrasound. The Acoustical Society of China*, 2018. 2 [徐洁, 林书玉. 径向极化圆管形压电换能器的耦合振动分析. 见: 2018年全国声学大会论文集D功率超声. 中国声学学会, 2018. 2]
- 14 Xu L, Qiu X J, Zhou J C, et al. A 2D dual-mode composite ultrasonic transducer excited by a single piezoceramic stack. *Smart Mater Struct*, 2019, 28: 025017
- 15 Xu L, Zhou J C, Chang Y, et al. Equivalent circuit of the two-dimensional vibration direction converter in coupled vibration (in Chinese). *Acta Acoust*, 2018, 43: 786–792 [许龙, 周锦程, 常燕, 等. 二维振动方向变换器的耦合振动及其等效电路. 声学学报, 2018, 43: 786–792]
- 16 Liu S Q, Lin S Y. The analysis of the electro-mechanical model of the cylindrical radial composite piezoelectric ceramic transducer. *Sens Actuator A-Phys*, 2009, 155: 175–180
- 17 Qu W D. *Mechanical Vibration Handbook* (in Chinese). 1st ed. Beijing: Machinery Industry Press, 1992 [屈维德. 机械振动手册. 北京: 机械工业出版社, 1992]
- 18 Liu S Q, Long W G, Fu M L. The influence of radial vibration on the equivalent mass of spring (in Chinese). *Guangxi Phys*, 2000, 3: 31–32 [刘世清, 龙卫国, 付茂林. 径向振动对弹簧等效质量的影响. 广西物理, 2000, 3: 31–32]
- 19 Lin S Y. *Principle and Design of Ultrasonic Transducer* (in Chinese). 4th ed. Beijing: Science Press, 2004 [林书玉. 超声换能器的原理及设计. 北京: 科学出版社, 2004]

Vibration characteristics of two-dimensional orthogonal composite sandwich piezoelectric circular transducer

DU YaoDong¹, XU Long^{1*} & ZHOU GuangPing²

¹ College of Sciences, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

² College of Electronic and Communication Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China

A new type of two-dimensional orthogonal composite sandwich piezoelectric circular transducer is proposed in this paper. The transducer is composed of an internal two-dimensional orthogonal composite sandwich piezoelectric excitation source, a central cone-shaped elastic expansion prestressed bolt and an external metal ring. The electromechanical equivalent circuit model of the transducer is established and the resonance and anti-resonance frequency equations are derived. The equivalent circuit method, finite element method and experimental test are used to study the longitudinal and radial coupled vibration performance of the transducer. The results show that the use of the new structure design of the orthogonal in-phase longitudinal resonance of the internal orthogonal composite sandwich piezoelectric excitation source can effectively excite the 4th-order radial node mode vibration of the outer metal ring. This enables the transducer to radially radiate ultrasonic energy in all directions outward. The research results are expected to be applied in high-power ultrasonic liquid processing and sonar technology.

circular piezoelectric transducer, electromechanical equivalent circuit, finite element simulation

PACS: 43.35.+d, 43.38+n, 43.40.+s

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0417](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0417)