

基于声黑洞设计理论的径向 夹心式径-弯复合换能器*

刘洋 陈诚 林书玉†

(陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西省超声重点实验室, 西安 710119)

(2023年12月19日收到; 2024年1月31日收到修改稿)

基于弯曲波在声黑洞 (acoustic black hole, ABH) 结构中振幅不断增大的特性, 提出了一种新型径向夹心式径-弯复合换能器, 该换能器由径向夹心式圆环换能器与外围的环形 ABH 结构组成. ABH 结构的存在实现了换能器径向振动与弯曲振动之间的转换, 提高了换能器的声辐射性能. 利用几何声学的方法建立了 ABH 结构弯曲振动的解析模型, 给出了其弯曲振动的本征频率, 并结合有限元方法讨论了换能器机电转换性能随尺寸变化的关系. 通过有限元方法给出了该换能器在空气中的辐射声压场、辐射声强以及辐射指向性, 仿真结果表明, ABH 结构的存在能够改善换能器弯曲振动的机电转换性能, 提高换能器的声辐射性能, 使换能器呈现出一定的辐射指向性. 最后通过实验对换能器样机的电阻抗特性以及振动模态进行测量, 实验结果与仿真相符合.

关键词: 声黑洞, 换能器, 径向振动, 弯曲振动

PACS: 43.38.+n, 43.40.+s

DOI: 10.7498/aps.73.20231983

1 引言

径向夹心式圆环换能器由金属圆环和用压电材料制成的圆环复合而成. 其性能稳定, 具有声辐射面积大、接收全指向性等优点, 被广泛应用于水声技术、地质勘探、超声化学反应等各种超声技术中^[1-3].

声黑洞是一种奇特声学现象, 由 Mironov^[4] 在 1988 年首先提出, 可简述为弯曲波在楔形结构中传播时, 其波速将随板厚减小而减小, 而振幅逐渐增大. 理想情况下, 当板厚按照二次以上幂指数减小到零时, 即可实现弯曲波的零反射, 因此这种结构被称为声黑洞. 随后 Krylov 等^[5-7] 将其应用于一维梁中, 并提出利用这种结构来操纵弯曲波, 实

现减振降噪等应用.

当弯曲波在声黑洞结构中传播时, 其振幅随厚度减小而增大的特性使得弯曲波的能量汇聚在结构尖端处并以声能的形式向外辐射出去. 声黑洞结构的这种特性被 Remillieux 等^[8,9] 提出可以用来改善换能器与空气之间的阻抗匹配, 提高换能器在空气中的辐射性能.

压电复合圆环型换能器除了径向振动模态还具有弯曲振动模态, 相对于径向振动模态, 弯曲振动模态的振动位移较大, 因此更易于空气等介质相匹配. 然而关于弯曲振动模态的研究比较少, 直到近十年来才有学者做过相关方面的研究. Aronov^[10] 在 2013 年用能量法对复合圆环型换能器的弯曲振动进行了研究, 给出了其弯曲振动模态的等效机电电路图以及有效机电耦合系数的表达式, Aronov^[11]

* 国家自然科学基金 (批准号: 12174240, 11674206, 11874253) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sylin@snnu.edu.cn

同时也研究了开槽后压电圆环的弯曲振动模式. 吴德林等^[12]在 Aronov^[10,11]的基础上对压电复合圆环型换能器弯曲振动的四极子模式进行了研究. 相对于径向振动, 复合圆环型换能器弯曲振动模式的机电转换性能较差, 这种缺点在一定程度上限制了其弯曲振动模式的应用.

本文借助振动模式转换的方法来改善圆环型换能器弯曲振动模式机电转换性能. 模式转换是一种借助多个模式进行换能器设计的方法, 能够利用两种不同振动模式的优点从而满足换能器的设计性能要求, 被广泛应用于换能器的设计中^[13-15]. 本文的主要设计思路是将一种环形的 ABH 结构应用于换能器结构设计中, 相比较于一维 ABH 梁的平直结构, 环形 ABH 能减小结构尺寸, 同时也可以与夹心式圆环换能器复合在一起, 将换能器的径向振动转换为弯曲振动, 这样既提高了换能器弯曲振动模式的机电转换性能又利用弯曲振动大位移的特性增强了换能器的声辐射能力.

2 ABH 结构的弯曲振动分析

图 1(a) 为所研究的径向夹心式径-弯复合换能器俯视图, 该换能器由一个径向夹心式圆环换能器与外围环组成. 径向夹心式圆环换能器则由两个金属环与其中间的压电环夹心而成, 压电环的极化方向沿径向.

图 1(b) 为截取外围环 1/4 部分的示意图, 其由厚度均匀部分与变厚度 ABH 部分组成, 厚度均匀部分与径向夹心式圆环换能器耦合在一起, 将径向夹心式圆环换能器的径向振动转换为 ABH 部分的弯曲振动. 外围环的厚度随弧度变化, 厚度表达式可以写为

$$h(\theta) = \begin{cases} \frac{h_1 - h_0}{(m\pi/2)^p} \theta^p + h_0, & 0 \leq \theta < m\pi/2, \\ h_1, & m\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2, \end{cases} \quad (1)$$

其中 p 为环厚度随弧度变化的幂次, h_0 为 ABH 部分 $\theta = 0$ 处的最小厚度, 而 h_1 则为 ABH 部分的最大厚度.

图 1(c) 为该换能器的振动模式示意图, 出于观察方便, 将图中换能器的振动位移进行放大, 换能器的实际振动位移小于图中示意.

为了更方便地研究该换能器的径-弯复合振动模式, 将该换能器的振动模式分成两部分来研究: ABH 部分的弯曲振动模式和径向夹心式圆环换能器的径向振动模式. 由于径向夹心式圆环换能器的径向振动模式已有较多的研究^[16-19], 因此我们主要讨论 ABH 部分的弯曲振动模式.

关于 ABH 部分的研究, 可以借助一维 ABH 梁理论, 一维 ABH 结构中弯曲振动控制方程可以写成如下形式^[5]:

$$\nabla^2 (D(\theta) \nabla^2 w) - \omega^2 \rho h(\theta) w = 0, \quad (2)$$

其中 ∇^2 为拉普拉斯算子、 w 表示挠度、 ρ 为密度、 ω 为角频率、 $D(\theta) = Eh^3(\theta) / [12(1 - \nu^2)]$ 为抗弯刚度、 ν 和 E 分别为材料的泊松比和杨氏模量. $\omega = 2\pi f$ 为角频率.

在二维极坐标下 ABH 部分的振动控制方程 (2) 可以写为

$$\frac{1}{r(\theta)^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{D(\theta)}{r(\theta)^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) - \omega^2 \rho h(\theta) w = 0. \quad (3)$$

选取 ABH 部分中面处为参考位置, 则 $r(\theta) = r_4 + h_1 - h(\theta) / 2$. 通过几何声学近似的方法, 可以将该方程的挠度解表示为如下复数形式:

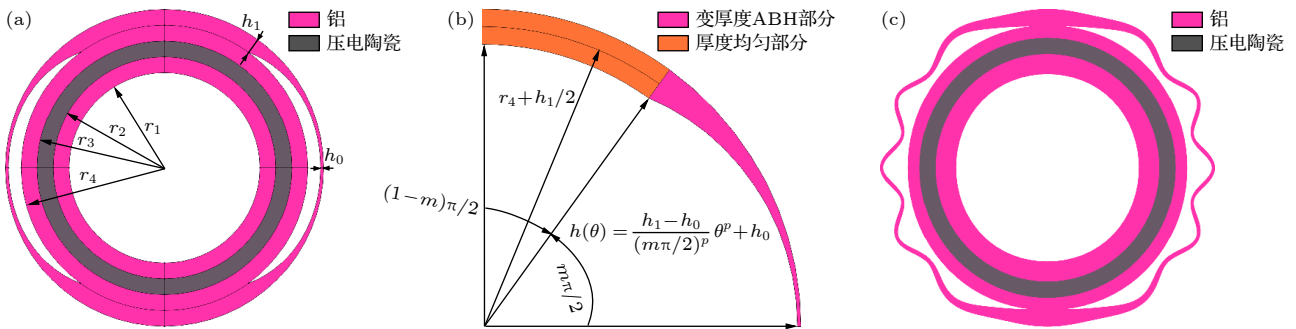


图 1 径向夹心式径-弯复合换能器示意图 (a) 换能器总体示意图; (b) 外围环 1/4 部分的示意图; (c) 换能器振动模式示意图

Fig. 1. The schematic diagram of a composite radial bending transducer: (a) The overall schematic diagram of the transducer; (b) a schematic diagram of the 1/4 part of the outer ring; (c) a schematic diagram of the vibration mode of the transducer.

$$w(\theta) = A(\theta) e^{i\Phi(\theta)}, \quad (4)$$

其中 $A(\theta)$ 和 $\Phi(\theta) = k_p s(\theta)$ 分别为弯曲波随弧度变化的幅值和累积相位, 其中 $k_p = \omega/c_p$ 为厚度均匀环中的波数, $c_p = 2c_l(1 - c_l^2/c_t^2)^{1/2}$ 为弯曲波的相速度, c_l 和 c_t 分别为材料中纵波和横波的波速. 将 (4) 式代入方程 (3) 之中, 略去 k_p 的 1, 2, 3 次项, 可以得到弯曲波的程函方程:

$$|\nabla s(\theta)|^4 = k^4/k_p^4 = R^4 \rho \omega^2 \varepsilon(\theta)^2 h(\theta) / (D(\theta) k_p^4), \quad (5)$$

∇ 为梯度算子, $R = r_4 + h_1$, $\varepsilon(\theta) = (R - h(\theta))/R$, $k(\theta) = R\omega^{1/2} \varepsilon(\theta)^{1/2} (\rho h(\theta)/D(\theta))^{1/4}$, 方程 (5) 的一个解可以表示为^[7]

$$s(\theta) = \frac{1}{k_p} \int R\omega^{1/2} \varepsilon(\theta)^{1/2} (\rho h(\theta)/D(\theta))^{1/4} d\theta. \quad (6)$$

因此弯曲波在 ABH 部分中的累计相位 $\Phi(\theta) = k_p s(\theta)$ 可以表示为

$$\Phi = \int_0^\theta k(\theta) d\theta. \quad (7)$$

弯曲波在 ABH 部分的累积相位 $\Phi(\theta)$ 可写为由 $\theta = 0$ 处到 $\theta = m\pi/2$ 的积分表达式:

$$\Phi = \int_0^{m\pi/2} k(\theta) d\theta. \quad (8)$$

(8) 式中积分的下限为 ABH 部分的最薄处, 也就是 $\theta = 0$ 处, 积分上限对应 ABH 部分的最厚处, 即 $\theta = m\pi/2$. 当变厚度部分中弯曲波的累计相位为^[20]

$$\Phi = 2n\pi, \quad (9)$$

此时 ABH 部分可以看作是对于 n 倍弯曲波波长的振子, 其中 n 的取值为 $N/2$, N 取正整数. 对方程 (9) 求解, 即得到 ABH 部分 n 阶弯曲振动模式所对应的本征频率. 需要注意的是得出上面的结果需要满足几何声学近似条件^[7]:

$$\left| \frac{1}{k^2} \frac{dk}{d\theta} \right| \ll 1. \quad (10)$$

对于本文所研究的 ABH 结构, 代入铝的材料参数以及 $k(\theta)$, (10) 式可以简化为

$$\left| \frac{1}{k^2} \frac{dk}{d\theta} \right| < 19.73 \frac{p\sqrt{\Delta h}}{(r_4 - h_1)\sqrt{(\theta_1)^p \omega}} \theta^{\frac{p}{2}-1}, \quad (11)$$

其中 $h(\theta) = \Delta h \theta^p / \theta_1^p + h_0$, $\Delta h = h_1 - h_0$, $\theta_1 = m\pi/2$. 因为 $0 \leq \theta \leq \theta_1$; 将 (11) 式进一步化简得到:

$$19.73 \frac{p\sqrt{\Delta h}}{(r_4 - h_1)\sqrt{(\theta_1)^p \omega}} \theta^{\frac{p}{2}-1} \leq 19.73 \frac{p\sqrt{\Delta h}}{(r_4 - h_1)\theta_1 \sqrt{\omega}}. \quad (12)$$

由 (12) 式可知, 对几何声学近似条件影响最大的是弯曲振动的频率, 本文研究的结构尺寸以及频率范围 (>18 kHz) 满足该近似条件.

3 换能器的有效机电耦合系数分析

当改变 ABH 部分的 m 参数也即变厚度部分的长度时, ABH 部分弯曲振动某一 n 阶本征频率与该换能器的谐振频率将在某一 m 值处相等, 径向夹心式圆环换能器与外围环的耦合最强点将出现在该 m 值附近. 此时径向夹心式圆环换能器的径向振动与 ABH 部分 n 阶弯曲振动的耦合达到最强, 换能器在该点的辐射性能也最佳.

换能器的机电耦合系数是描述换能器在能量转换过程中能量相互耦合程度的一个物理量, 在这里我们用换能器的有效机电耦合系数来描述 ABH 部分与夹心式圆环换能器的耦合程度. 当二者之间的耦合达到最强时, 换能器的有效机电耦合系数最大.

换能器的有效机电耦合系数 k_{eff} 定义为^[21] $k_{\text{eff}}^2 = (f_n^2 - f_m^2)/f_n^2$, 其中 f_m 为最大导纳频率, 即回路中电流最大时所对应的换能器谐振频率, f_n 为最小导纳频率, 即回路中电流最小时所对应的频率.

本文设计了 3 种不同尺寸的径向夹心式径-弯复合换能器 (换能器的具体尺寸见表 1), 并对换能器有效机电耦合系数随 m 的变化关系进行讨论. 径向夹心式径-弯复合换能器的有效机电耦合系数 k_{eff} 通过 COMSOL Multiphysics 有限元仿真给出.

表 1 几种不同换能器的尺寸
Table 1. The sizes of several different transducers.

换能器编号	r_1/mm	r_2/mm	r_3/mm	r_4/mm	p	h_1/mm	h_0/mm
a	30	35	40	45	3	5	1.0
b	30	35	40	45	2	5	1.5
c	30	35	40	45	2	5	2.0
d	30	35	40	45	—	—	—

表 1 给出的是几种不同换能器的尺寸, 其中 a, b, c 为径向夹心式径-弯复合换能器, d 为夹心式圆环换能器.

图 2 给出了 a, b, c 三种换能器在不同 m 下的有效机电耦合系数 k_{eff} , 径向夹心式径-弯复合换能器的谐振频率以及 ABH 部分所对应的 n 阶弯曲振动本征频率. 换能器的谐振频率以及有效机电耦合系数 k_{eff} 由有限元仿真给出, ABH 部分 n 阶弯曲振动本征频率由求解方程 (9) 给出. 从图 2 可

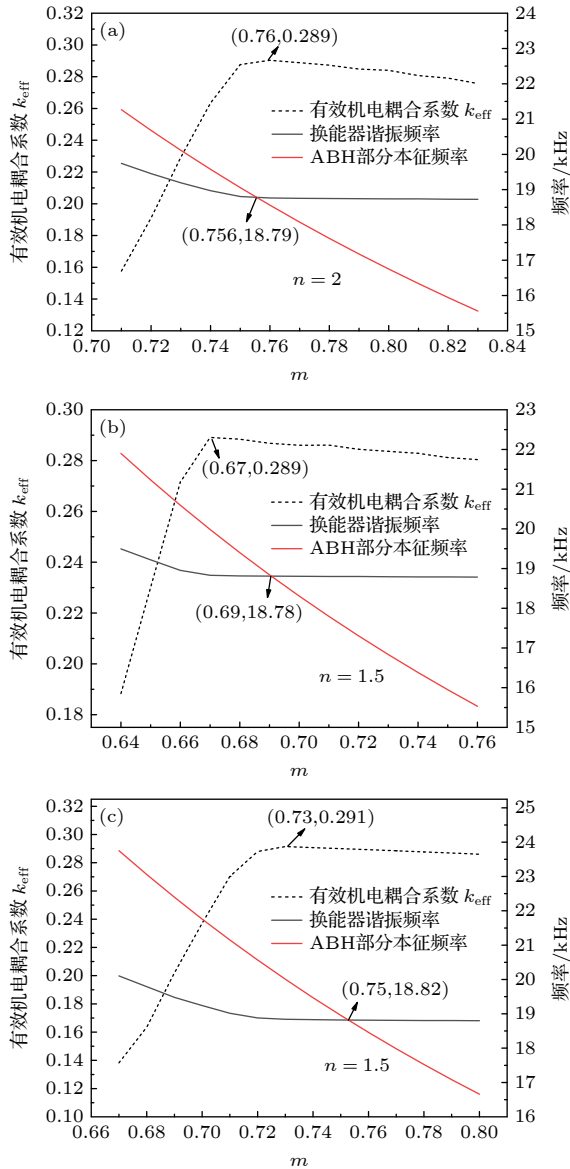


图 2 不同 m 下换能器的有效机电耦合系数、谐振频率以及 ABH 部分的弯曲振动本征频率 (a) a 型号换能器; (b) b 型号换能器; (c) c 型号换能器

Fig. 2. Effective electro-mechanical coupling coefficient, resonant frequency of transducer and eigen frequency of bending vibration of ABH part with different m : (a) Model a transducer; (b) model b transducer; (c) model c transducer.

以看到, 随着 m 的变化换能器的 k_{eff} 将会出现一个最大值. 换能器 a 的 k_{eff} 最大值约为 0.289, 换能器 b 的 k_{eff} 最大值约为 0.289, 换能器 c 的 k_{eff} 最大值约为 0.291.

Aronov^[10] 给出了圆环换能器弯曲振动模式的有效机电耦合系数, 其得到的弯曲模式的有效机电耦合系数 $k_{\text{eff}} \approx 0.6k_{31}$. 本文使用的压电材料为 PZT-4, 其 k_{31} 为 0.33, 因此其弯曲模式所对应的 $k_{\text{eff}} \approx 0.198$. 在吴德林等^[12] 的论文中, 其复合圆环换能器弯曲振动四极子模式的最大 k_{eff} 不超过 $0.6k_{31}$, 而从图 2 中可以看到, 我们所设计的 3 种径向夹心式径-弯复合换能器的最大 k_{eff} 都大于复合圆环弯曲振动模式的有效机电耦合系数 $0.6k_{31}$. 这充分说明借助径向振动所激发的弯曲振动的机电转换性能优于复合圆环换能器的弯曲振动模式.

设换能器谐振频率与 ABH 部分 n 阶本征频率随 m 的变化曲线的交点为 m_1 , 径向夹心式径-弯复合换能器最大机电耦合系数所对应的 m 为 m_2 . 从图 2 中可以看出, 径向夹心式径-弯复合换能器最大机电耦合系数所对应的 m_2 值处于换能器谐振频率与 ABH 部分弯曲振动谐振频率交点值 m_1 附近. 设 m_1 与 m_2 之间的绝对差值 $\Delta = |m_2 - m_1|$, 从图 2 中可以看出, 换能器 a 的 $\Delta_a = 0.004$ 、换能器 b 的 $\Delta_b = 0.02$ 、换能器 c 的 $\Delta_c = 0.02$.

这种寻找曲线交点的方法一方面有助于分析出与夹心式圆环换能器径向振动所耦合的 ABH 部分弯曲振动模式的阶数, 图 2 分别标注出了 ABH 部分所对应弯曲振动模式的阶次, 图 2(a) 中 $n = 2$, 而图 2(b), (c) 中 $n = 1.5$. 除此之外我们也可以通过计算换能器的谐振频率给出其频率随尺寸参数 m 变化的曲线, 并求解方程 (9) 给出 ABH 部分本征频率随尺寸参数 m 变化的曲线, 然后根据两条曲线的交点确定耦合最强时 m 值的大致范围, 从而可以大大减少仿真的计算量. 因为换能器谐振频率及 ABH 部分 n 阶弯曲振动本征频率与 m 的关系接近于线性, 所以可以借助少量的计算进行曲线拟合来找到曲线交点的位置, 并进一步通过有限元法确定耦合最强点所对应的 m 值.

4 径向夹心式径-弯复合换能器的声场分析

本节给出了 a, b, c 三种不同型号径向夹心式

径-弯复合换能器其最大导纳频率 f_m 所对应的空气中辐射声压分布、声强分布以及指向性图案. 在仿真的过程中采用二维平面建模. 仿真中使用的压电材料为 PZT-4, 压电材料的极化方向沿径向, 压电环内外两壁面施加的有效电压差为 1 V. 仿真中所用铝材料的杨氏模量和泊松比分别为 $E = 70 \text{ GPa}$, $\nu = 0.33$, 密度 $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$.

4.1 声压分布

图 3 给出的是几种换能器在空气中的辐射声压分布以及对应的谐振频率 f_m , 其中 a, b, c 为表 1 给出的 3 种径向夹心式径-弯复合换能器, 3 种换能器的 m 尺寸参数为图 2 中机电耦合系数最大时对应的值, 图 3(d) 则为夹心式圆环换能器的辐射声压图.

由上述分析可知, 对 ABH 部分的尺寸进行合理优化设计, 使得 ABH 结构与夹心式圆环换能器的耦合达到最强, 可以提高换能器的声辐射能力.

4.2 声强分布

图 4 中 a, b 和 c 为 3 种具有不同尺寸径-弯复合换能器的辐射声强分布图, 图 4(d) 为夹心式圆环换能器的辐射声强分布图, 图中声强的单位为 W/m^2 . 从图 4 可以看到, 具有 ABH 结构的径向夹

心式径-弯复合换能器其最大辐射声强相较于圆环型换能器有大幅度的提高. 其中以换能器 b 的辐射能力最强. 换能器 a, c 的最大辐射声强也有不同程度的提高. 相较于图 3, 图 4 可以反映出声能量的辐射方向, 由于 ABH 部分处于换能器的左右两侧, 因此 3 种换能器的声辐射主要集中在换能器的两侧.

4.3 指向性分析

图 5 给出的是距离换能器中心 1 m 处 4 种换能器的指向性图. 图 5 中 a, b 和 c 为图 3 中 3 种不同尺寸径-弯复合换能器的指向性图案, d 为夹心式圆环型换能器的指向性图案. 相较于夹心式圆环型换能器的全指向性, 径-弯复合换能器的指向性图案出现较多小旁瓣, 且左右两侧的旁瓣较为尖锐. ABH 结构的存在使得换能器向左右两侧的辐射能力得到提升. 相比图 5 中 a 型号换能器, b, c 型号换能器指向性图案中左右两侧瓣更为尖锐. b, c 型号换能器与 ABH 部分 $n = 1.5$ 阶弯曲振动相耦合, 而 a 型号换能器则与 $n = 2$ 阶弯曲振动相耦合. 由仿真结果和上述分析可知, 当换能器与 ABH 部分较低阶弯曲振动相耦合时, 其左右两侧的辐射指向性更强.

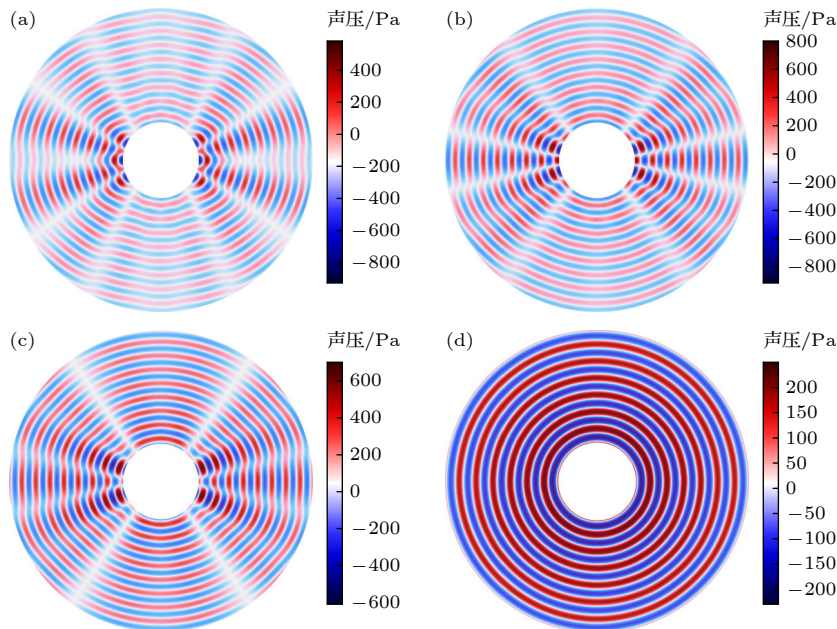


图 3 四种不同换能器在空气中的辐射声压分布图 (a) a 型号换能器, $f_m = 18.766 \text{ kHz}$; (b) b 型号换能器, $f_m = 18.829 \text{ kHz}$; (c) c 型号换能器, $f_m = 18.841 \text{ kHz}$; (d) d 型号换能器, $f_m = 19.01 \text{ kHz}$

Fig. 3. The radiation sound pressure distribution of four different transducers in the air: (a) Model a transducer, $f_m = 18.766 \text{ kHz}$; (b) model b transducer, $f_m = 18.829 \text{ kHz}$; (c) model c transducer, $f_m = 18.841 \text{ kHz}$; (d) model d transducer, $f_m = 19.01 \text{ kHz}$.

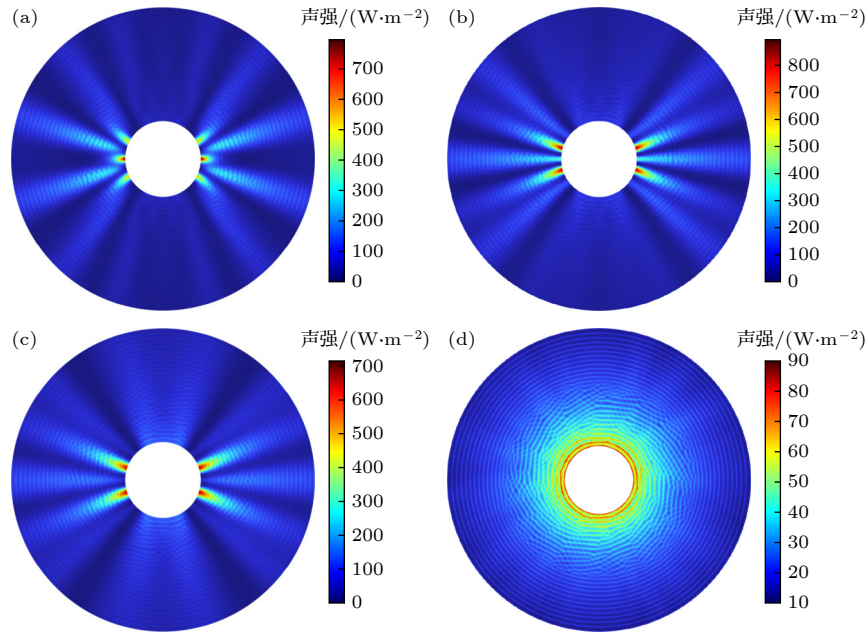


图 4 四种不同换能器在空气中的辐射声强分布图 (a) a 型号换能器, $f_m = 18.766$ kHz; (b) b 型号换能器, $f_m = 18.829$ kHz; (c) c 型号换能器, $f_m = 18.841$ kHz; (d) d 型号换能器, $f_m = 19.01$ kHz

Fig. 4. The radiation sound intensity distribution of four different transducers in the air: (a) Model a transducer, $f_m = 18.766$ kHz; (b) model b transducer, $f_m = 18.829$ kHz; (c) model c transducer, $f_m = 18.841$ kHz; (d) model d transducer, $f_m = 19.01$ kHz.

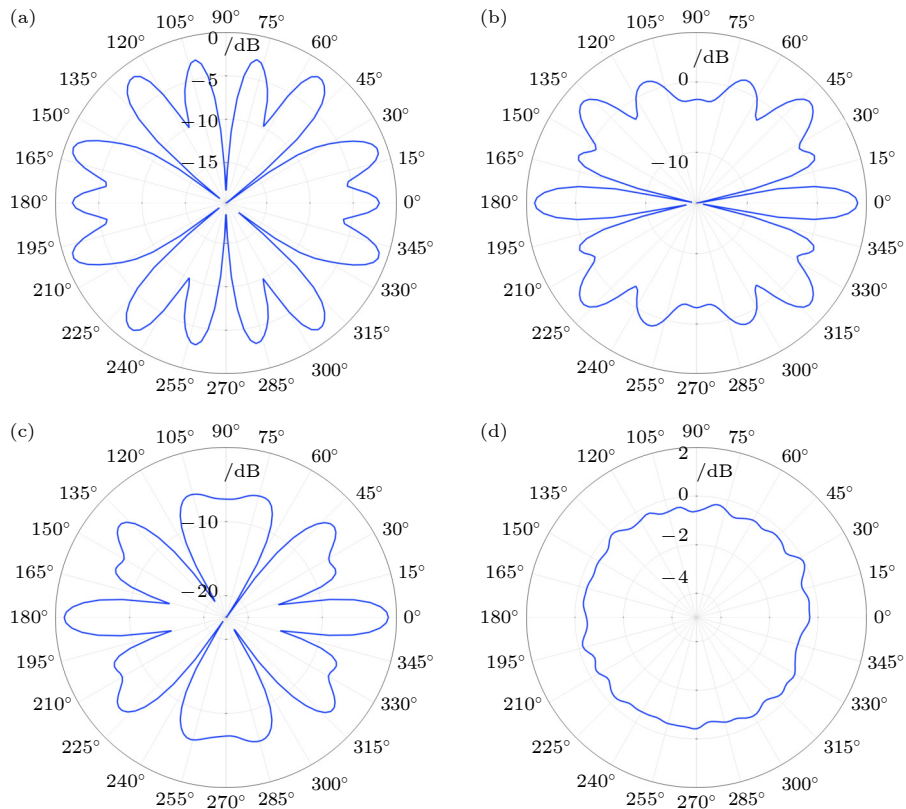


图 5 四种换能器的声场指向性图 (a) a 型号换能器, $f_m = 18.766$ kHz; (b) b 型号换能器, $f_m = 18.829$ kHz; (c) c 型号换能器, $f_m = 18.841$ kHz; (d) d 型号换能器, $f_m = 19.01$ kHz

Fig. 5. Four types of transducer sound field directionality graphics: (a) Model a transducer, $f_m = 18.766$ kHz; (b) model b transducer, $f_m = 18.829$ kHz; (c) model c transducer, $f_m = 18.841$ kHz; (d) model d transducer, $f_m = 19.01$ kHz.

5 实验验证

为了验证基于声黑洞理论设计径-弯复合换能器的实际可行性,制作了如图6所示的换能器样机,其中金属内外环材料为铝,压电陶瓷为径向极化的PZT-4圆环,换能器的尺寸参数见表2.利用阻抗分析和激光测振实验对换能器样机的电参数特性以及振动模态进行实验分析.

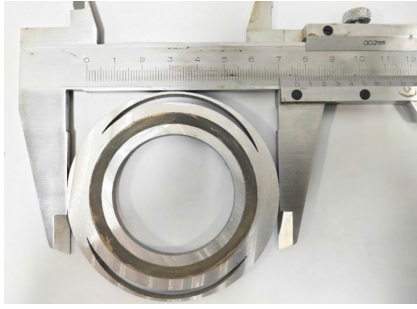


图6 换能器样机图片

Fig. 6. The picture of the prototype transducer.

表2 换能器尺寸参数

Table 2. Size parameters of the transducer.

尺寸参数	r_1/mm	r_2/mm	r_3/mm	r_4/mm	p	h_1/mm	h_0/mm	m
	22	26	30	34	2	4	1	0.65

5.1 换能器阻抗分析实验

图7为有限元仿真所得到的换能器阻抗随频率的变化曲线,从图中可知换能器的仿真谐振频率 f_{FEM} 约为23.682 kHz.为了验证仿真结果,采用WK6500B精密阻抗分析仪对换能器的阻抗进行了测量.从图8(b)可以看出,阻抗分析仪测得换

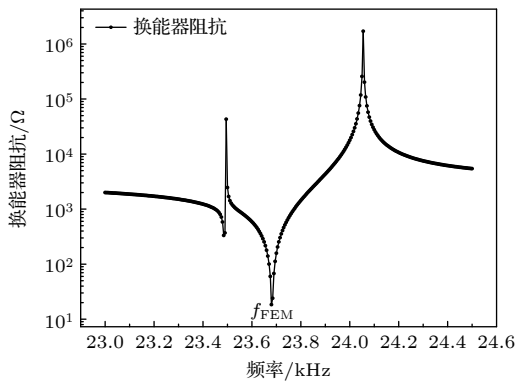


图7 换能器阻抗仿真结果曲线

Fig. 7. Simulation result of the transducer electrical impedance curve.

能器的谐振频率 f_{EX} 约为23.323 kHz,实验测量结果与仿真的误差 $\Delta = |f_{\text{FEM}} - f_{\text{EX}}| / f_{\text{EX}} = 1.54\%$.误差的主要来源有:1)在理论分析和数值模拟中,使用了标准的材料参数,而换能器实物的材料参数与仿真参数有一定差距;2)在仿真中忽略了换能器的机械/介电损耗,但是在实验测量中不能忽略;3)由于实物加工精度以及换能器装配的原因,使得仿真模型与实物有一定的区别.同时由于换能器样机的谐振频率低于仿真值,使得换能器另一个弯曲模态(对应图7中第一个谷点)也被激发出,因此在23 kHz附近出现两个谐振点.

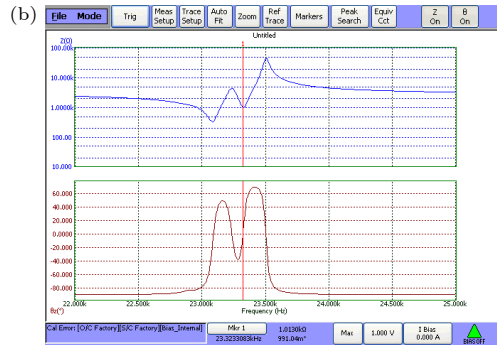
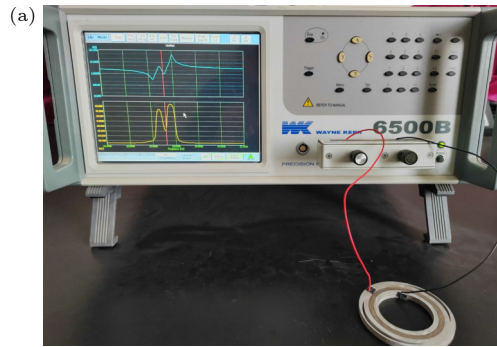


图8 换能器阻抗分析实验装置以及阻抗测量结果 (a) WK6500B阻抗分析仪及换能器; (b) 换能器阻抗曲线

Fig. 8. Impedance analyzer experimental equipment of transducer and impedance measurement results: (a) WK6500B impedance analyzer and transducer; (b) impedance curves of the transducer.

5.2 换能器模态分析实验

图9为利用有限元仿真测得的换能器在谐振频率23.682 kHz时的振型.为进一步验证仿真结果,使用图10(a)的Polytec PSV-400全场扫描式激光振动测量系统对换能器侧边ABH环部分的振型进行测量并与仿真结果进行对比.

图10(b)为利用激光测振仪对换能器侧边ABH环位移振幅频响的测量结果,实验中换能

器两端施加的是电压幅值为 1 V 的扫频电信号. 测量结果中, 换能器位移共振峰所对应的频率为 23.305 kHz, 与阻抗分析仪所测的谐振频率值接近. 从图 10(b) 的振型测量结果可以看出, 换能器侧边 ABH 环的振型与图 9 有限元仿真结果的振型相一致, 测量结果中换能器侧边 ABH 环厚度最小

处的位移振幅最大, 这也符合弯曲波在声黑洞结构中振幅随壁厚减小而不断增大的特性. 综上可知, 借助 ABH 结构将换能器径向振动转换为 ABH 部分弯曲振动的方法是切实可行的.

6 结 论

本文利用环形 ABH 结构设计了一种新型径向夹心式径-弯复合换能器, 实现了换能器径向振动与弯曲振动之间的转换, 并通过实验对换能器的径-弯复合模态进行验证, 利用阻抗分析仪测得的换能器谐振频率与仿真的误差为 1.54%, 利用激光测振仪测得的换能器的振型与仿真结果一致. 从理论计算与仿真结果可以得到以下几点结论.

1) 当换能器总体谐振频率与 ABH 部分某一阶弯曲振动本征频率接近时, 换能器径-弯复合模态的有效机电耦合系数最大.

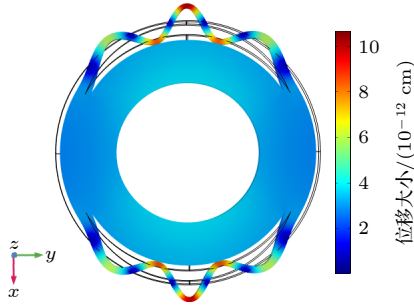


图 9 换能器振型仿真结果, 频率为 23.682 kHz

Fig. 9. Simulation result of transducer vibration mode, the frequency is 23.682 kHz.

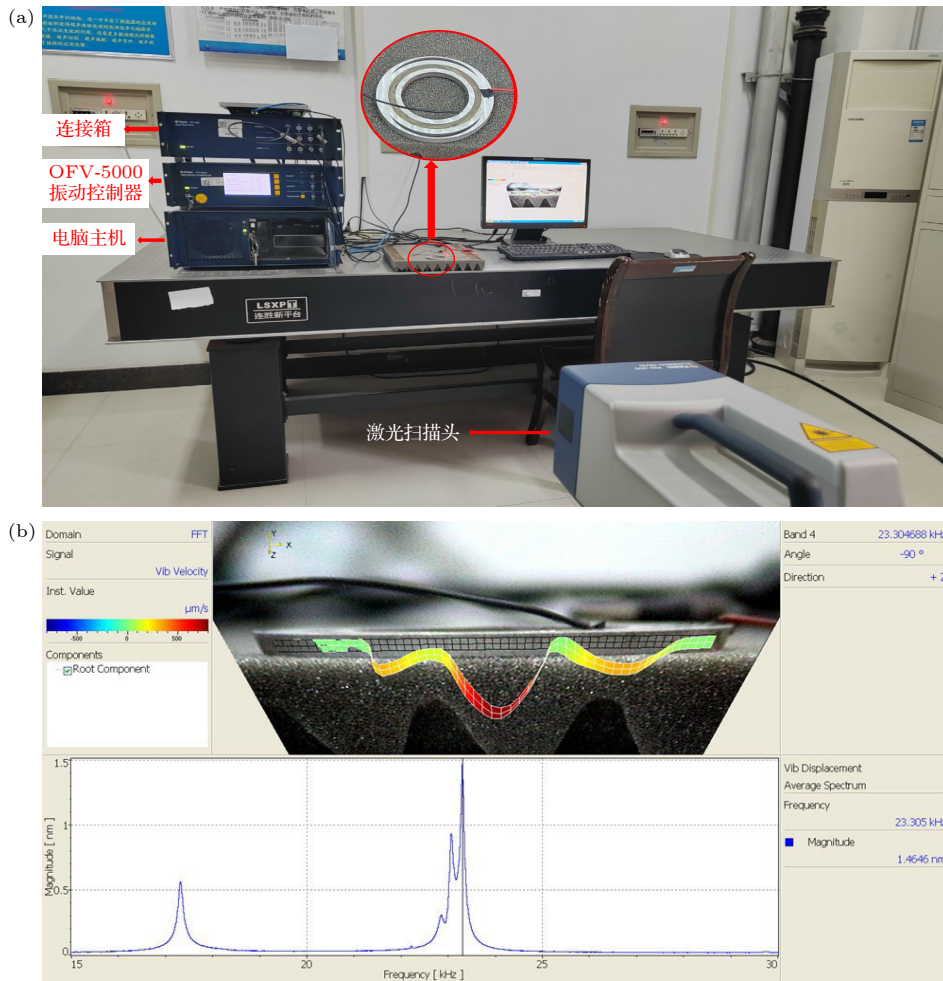


图 10 PSV-400 全场扫描式激光振动测量系统及换能器振幅分布测量结果 (a) 激光测振实验装置; (b) 换能器侧面振幅测量结果
Fig. 10. PSV-400 laser vibrometer measurement system and transducer displacement distribution measurement result: (a) Laser vibrometer experimental equipment; (b) the side displacement measurement result of the transducer.

2) 换能器径-弯复合模态的最大有效机电耦合系数是大于复合压电圆环型换能器的弯曲振动模态的。

3) 借助 ABH 部分将夹心式圆环换能器径向振动转换为弯曲振动的径-弯复合模态可以提高换能器的声辐射能力。

4) 不同于径向夹心式圆环换能器的无指向性, 具有 ABH 结构的径向夹心式径-弯复合换能器表现出一定的指向性, ABH 结构提高了换能器向左右两侧的辐射能力, 并且与换能器相耦合的 ABH 部分的弯曲振动阶数越低, 其左右两侧的辐射指向性越强。

本研究不仅证明在换能器设计中加入声黑洞结构的可行性, 也为径-弯复合换能器的设计提供了参考模型。

参考文献

- [1] Hu Y F 2017 *Acoust Electr Eng.* **39** 25 (in Chinese) [胡银丰 2017 声学电子工程 **39** 25]
- [2] Cao X S, Wang Y M, Wang S 2015 *Well Logging Technol.* **39** 160 (in Chinese) [曹雪神, 王易敏, 王申 2015 测井技术 **39** 160]
- [3] Liu S Q, Ma L L 2020 *J. Shaanxi Normal Univ. (Nat. Sci. Ed.)*. **48** 60 (in Chinese) [刘世清, 麻磊磊 2020 陕西师范大学学报 (自然科学版) **48** 60]
- [4] Mironov M A 1988 *Sov. Phys. Acoustics.* **34** 318
- [5] Krylov V V 1989 *Sov. Phys. Acoustics.* **35** 176
- [6] Krylov V V 1990 *Mosc. U. Phys. B+*. **45** 65
- [7] Krylov V V, Tilman F 2004 *J. Sound Vib.* **274** 605
- [8] Remillieux M C, Anderson B E, Le Bas P Y, Ulrich T J 2014 *Ultrasonics* **54** 1409
- [9] Anderson B E, Remillieux M C, Le Bas P Y, Ulrich T J, Pieczonka L 2015 *Ultrasonics* **63** 141
- [10] Aronov B S 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **134** 1021
- [11] Aronov B S 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **133** 3875
- [12] Wu D L, Dai Y Y, Chen H, Zhang H L, Wang X M 2020 *Acta Acustica.* **45** 103 (in Chinese) [吴德林, 戴郁郁, 陈浩, 张海澜, 王秀明 2020 声学学报 **45** 103]
- [13] Lin S Y, Xian X J 2014 *J. Shaanxi Normal Univ. (Nat. Sci. Ed.)*. **42** 31 (in Chinese) [林书玉, 鲜小军 2014 陕西师范大学学报 (自然科学版) **42** 31]
- [14] Xu L, Lin S Y 2012 *Acta Acustica.* **37** 408 (in Chinese) [许龙, 林书玉 2012 声学学报 **37** 408]
- [15] Li F M, Liu S Q, Xu L, Zhang H D, Zeng X M, Chen Z J 2023 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **53** 198 (in Chinese) [李凤鸣, 刘世清, 许龙, 张海岛, 曾小梅, 陈赵江 2023 中国科学: 物理学 力学 天文学 **53** 198]
- [16] Dong Y L, Chen C, Lin S Y 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 054304 (in Chinese) [董宜雷, 陈诚, 林书玉 2023 物理学报 **72** 054304]
- [17] Gao B S, Lin S Y 2010 *J. Appl. Acoust.* **29** 217 (in Chinese) [高炳山, 林书玉 2010 应用声学 **29** 217]
- [18] Hu J, Lin S Y, Wang C H, Mo R Y 2015 *J. Northwest Univ. (Nat. Sci. Ed.)* **45** 709 (in Chinese) [胡静, 林书玉, 王成会, 莫润阳 2015 西北大学学报 (自然科学版) **45** 709]
- [19] Wang S, Lin S Y 2011 *J. Shaanxi Normal Univ. (Nat. Sci. Ed.)* **39** 23 (in Chinese) [王帅军, 林书玉 2011 陕西师范大学学报 (自然科学版) **39** 23]
- [20] Krylov V V 2020 *J. Sound Vib.* **468** 115100
- [21] Lin S Y 2004 *The Theory and Design of Ultrasonic Transducers* (Beijing: Science Press) p20 (in Chinese) [林书玉 2004 超声换能器的原理及设计 (北京: 科学出版社) 第 20 页]

Radial sandwich radial-bending composite transducer designed based on acoustic black hole theory*

Liu Yang Chen Cheng Lin Shu-Yu †

(*Shaanxi Key Laboratory of Ultrasonics, School of Physics and Information Technology,*

Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

(Received 19 December 2023; revised manuscript received 31 January 2024)

Abstract

A novel radial sandwich radial bending composite transducer is proposed based on the increasing amplitude of bending waves in the structure of an acoustic black hole (ABH). The transducer consists of a radial sandwich circular ring transducer and an outer acoustic black hole structure. The existence of the ABH structure realizes the conversion between radial vibration and bending vibration of the transducer, and improves the acoustic radiation performance of the transducer. Based on the one-dimensional acoustic black hole bending vibration theory, the bending vibration equation of the circular ABH structure is given. An analytical model of the ABH structure bending vibration is established by using the method of geometrical-acoustics, and the eigen frequency of its bending vibration is given. The relationship between the electromechanical conversion performance and the size of the transducer is discussed by using the finite element method, and the results show that when the eigen frequency of the bending vibration of the ABH structure is close to the resonant frequency of the transducer, the electromechanical coupling coefficient of the transducer reaches a maximum value. The radiation sound pressure field, radiation sound intensity, and radiation directionality of the transducer in the air are also analyzed by the finite element method. The results indicate that the presence of the ABH structure can improve the electromechanical conversion performance of the bending vibration of the transducer, enhance the acoustic radiation performance of the transducer, make the transducer exhibit radiation directionality and the lower order of the bending vibration mode of the ABH structure, the stronger radiation directionality of the transducer towards the left side and the right side. Finally, in order to verify the accuracy of the simulation and theory, we made a prototype transducer and carried out the experimental test of transducer electrical impedance and vibration mode. The measured results are in good agreement with the simulation results. The displacement distribution of the radiation surface of the transducer at resonance frequency is measured, which verifies the bending vibration mode of the ABH structure. This type of transducer is expected to be used as acoustic projector in the air or water.

Keywords: acoustic black hole, transducer, radial vibration, bending vibration

PACS: 43.38.+n, 43.40.+s

DOI: [10.7498/aps.73.20231983](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231983)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12174240, 11674206, 11874253).

† Corresponding author. E-mail: sylin@snnu.edu.cn

基于声黑洞设计理论的径向夹心式径-弯复合换能器

刘洋 陈诚 林书玉

Radial sandwich radial-bending composite transducer designed based on acoustic black hole theory

Liu Yang Chen Cheng Lin Shu-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 084302 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231983

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231983>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于2-2型压电复合材料的新型宽频带径向振动超声换能器

A new broadband radial vibration ultrasonic transducer based on 2-2 piezoelectric composite material

物理学报. 2021, 70(1): 017701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201352>

基于二维声子晶体的大尺寸夹心式换能器的优化设计

Optimal design of large-sized sandwich transducer based on two-dimensional phononic crystal

物理学报. 2019, 68(2): 024303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181955>

黏弹介质包裹的液体腔中气泡的动力学分析

Dynamic analysis of bubble in liquid cavity wrapped by viscoelastic medium

物理学报. 2021, 70(12): 124301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201876>

洛伦兹破缺理论与Vaidya黑洞弯曲时空中的Dirac粒子隧穿辐射特征

Lorentz-violating theory and tunneling radiation characteristics of Dirac particles in curved spacetime of Vaidya black hole

物理学报. 2019, 68(19): 190401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190437>

类声子晶体结构对超声塑料焊接工具横向振动的抑制

Suppression of lateral vibration in rectangular ultrasonic plastic welding tool based on phononic crystal structure

物理学报. 2018, 67(22): 224207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181150>

有限长管内包膜微泡在磁-声复合场作用下的振动行为

Vibrational behavior of coated microbubble in finite tube under magneto-acoustic composite field

物理学报. 2021, 70(21): 214303 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210559>