

引用格式: 梁家宁, 莫喜平, 柴勇, 等. 面剪切振动模式弛豫铁电单晶换能器[J]. 声学技术, 2021, 40(4): 575-580. [LIANG Jianing, MO Xiping, CHAI Yong, et al. Relaxation ferroelectric single crystal transducer of face shear vibration mode[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(4): 575-580.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.04.022

面剪切振动模式弛豫铁电单晶换能器

梁家宁^{1,2,3}, 莫喜平¹, 柴勇^{1,3}, 刘永平^{1,3}

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100149; 3. 北京海洋声学装备工程技术研究中心, 北京 100190)

摘要: [011]极化方向、zxt-45°切型的 PIN-PMT-PT 单晶因其高剪切压电应变常数、高机电耦合系数和高柔顺系数等特点, 在水声换能器中存在广阔的应用前景。通过设计中间质量块的方法, 将单晶产生的剪切振动转换为换能器的纵向振动, 并利用辐射头的弯曲振动和圆环尾质量块振动的耦合拓宽工作频带。通过有限元仿真分析, 研究了结构参数对各阶模态振型和谐振频率的影响。最终仿真得到的换能器工作频带 6~18 kHz, 最大发送电压响应为 138 dB, 带内起伏小于 4 dB。研究表明: 采用面剪切工作模式有利于实现换能器低频、小尺寸、宽带发射。

关键词: 弛豫铁电单晶; 面剪切模式; 宽带; 小尺寸

中图分类号: TB565.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-04-0575-06

Relaxation ferroelectric single crystal transducer of face shear vibration mode

LIANG Jianing^{1,2,3}, MO Xiping¹, CHAI Yong^{1,3}, LIU Yongping^{1,3}

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149, China; 3. Beijing Engineering Technology Research Center of Ocean Acoustic Equipment, Beijing 100190, China)

Abstract: The polarization direction [011], zxt-45° cut PIN-PMT-PT single crystal has a broad application prospect in underwater acoustic transducer due to its high shear piezoelectric strain constant, high electromechanical coupling coefficient and high compliance coefficient. By using an intermediate mass block, the shear vibration generated by the single crystal is converted into the longitudinal vibration of the transducer, and the bandwidth is broadened by the coupling between the bending vibration of the circular piston and the vibration of the ring tail mass block. Through the finite element simulation analysis, the influence of the structural parameters on the vibration modes and resonance frequency is studied. Finally a virtual prototype is determined. The maximum transmitting voltage response is 138 dB with the fluctuation less than 4 dB in the frequency range from 6 kHz to 18 kHz. These results show that the use of the face shear mode is beneficial to achieving low frequency and broadband radiation performance of the transducer with compact size.

Key words: relaxation ferroelectric single crystal; face shear mode; broadband; small size

0 引 言

在水声换能器发展的一百多年历史进程中, 新型功能材料的发展是换能器性能提升的主要因素^[1]。在锆钛酸铅($\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$, PZT)压电陶瓷主导压电行业数十年后, 各种新型功能材料的研究层出不穷。弛豫铁电单晶($[\text{xPb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-(1-x)\text{PbTiO}_3]$, PMNT)和($[\text{xPb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-(1-x)\text{PbTiO}_3]$, PZNT)作为新型功能材料中性能较为突出的一种, 其在准同型相界(Morphotropic Phase Boundary, MPB)附近

存在巨压电效应, 压电应变常数 d_{33} 是 PZT 陶瓷的 5 倍, 机电耦合系数比 PZT 陶瓷增加约 30%~40%, 有利于换能器在低频小尺寸宽带工作^[2-3]。由于弛豫铁电单晶具有各向异性, 通过极化旋转和改变畴结构, 可以在晶体非自发极化方向产生新的共振模式^[4]。当菱形相单晶沿[011]方向极化时, 会形成具有“mm2”宏观对称性的“2R”畴结构, 在[100]方向上可获得更高的横向压电应变常数 d_{32} 。例如, 对[011]极化 PMN-31%PT 单晶, d_{32} 约为 $-1\,500\text{ pC}\cdot\text{N}^{-1}$ ^[5], 当[011]方向极化的单晶绕极化轴旋转 45° 时, 旋转后的 d'_{32} 和 d'_{31} 的组合会产生非常大的 d_{36} ($1\,600\sim 2\,800\text{ pC}\cdot\text{N}^{-1}$), 从而导致面剪切振动模式^[6]。面剪切振动模式相较于[001]和[111]方向极化的单晶还存在着非常高的柔顺系数 s_{66}^E ^[7], 有利于换能器小型化设计。并且相较于厚度剪切振动模

收稿日期: 2020-06-05; 修回日期: 2020-06-19

作者简介: 梁家宁(1995—), 男, 山东济南人, 博士研究生, 研究方向为弛豫铁电单晶换能器。

通信作者: 梁家宁, E-mail: liangjianing@mail.ioa.ac.cn

式中的极化方向和电场方向垂直工作模式,面剪切振动模式的极化方向和电场方向平行,在工作时可施加更大的电压,有利于换能器在高功率条件下应用^[8]。

由于面剪切振动模式极优异的压电性能,其在加速度计、压电谐振器、压电超声马达和换能器等领域的应用被广泛研究^[9-12]。van Tol 等最早将面剪切振动模式应用在水声换能器中^[13],其极低的频率常数和高压电应变系数有利于换能器在低频大功率情况下工作。Karun Jr 等利用反相激励两组面剪切单晶^[14],设计制造了宽带水声换能器,其工作频段为 2~10 kHz,最大发送电压响应为 140 dB。目前,国内关于面剪切振动模式水声换能器的研究尚未见诸报道。

1 面剪切振动模式

面剪切振动模式也称 36 模式,利用作用在晶体面上的剪切应力产生振动。首先,在笛卡尔坐标系中建立一个立方体,其中,垂直于 x 轴的平面为 ABCD,垂直于 y 轴的平面为 DCEF。作用在平面 ABCD 上的应力向量可分解为正应力 T_{11} 和两个剪切应力 T_{31} 、 T_{21} ,作用在平面 DCEF 上的应力向量可分解为正应力 T_{22} 和两个剪切应力 T_{32} 、 T_{12} ,如图 1 所示。

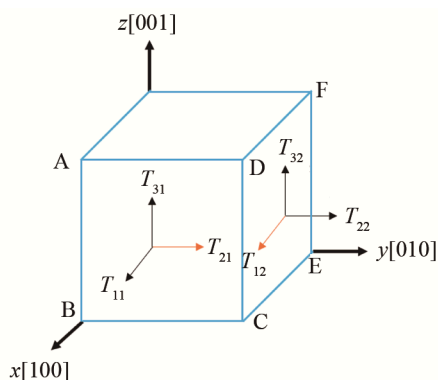


图 1 正应力和剪切应力方向示意图
Fig.1 Schematic diagram of normal stress and shear stress directions

面剪切应力 T_6 是由两个剪切应力 T_{12} 和 T_{21} 组成的,并且 $T_{12}=T_{21}$,其方向及带来的剪切变形如图 2 所示。

压电应变常数 d_{36} 为三阶张量,是 d_{312} 和 d_{321} 的简化表示。其中,第一阶下标代表极化方向,第二、三阶下标代表应变或应力,且压电应变常数 d_{36} 是 d_{31} 和 d_{32} 的函数。对 [011] 极化方向的 PIN-PMN-PT 单晶,材料一方面存在较大的横向应变常数 d_{32}

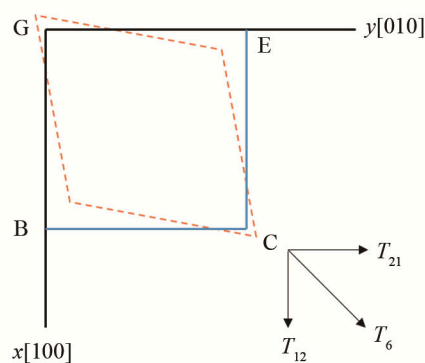


图 2 面剪切应力 T_6 方向示意图
Fig.2 Schematic diagram of the T_6 direction of surface shear stress

($-1\ 400\ \text{pC}\cdot\text{N}^{-1}$),另一方面存在较小的横向应变常数 d_{31} ($500\ \text{pC}\cdot\text{N}^{-1}$)。但是,此时晶体取向的主应变方向和剪切应变方向相等,因此 d_{36} 可忽略不计。为了产生面剪切振动模式,必须将坐标轴绕极化轴 [011] 方向旋转角度 θ ,如图 3 所示。

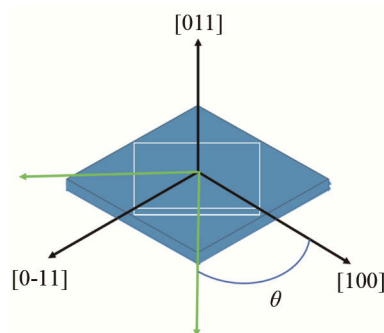


图 3 单晶绕 [011] 轴旋转角度 θ 示意图
Fig.3 Schematic diagram of the rotation angle θ of a single crystal rotating around the [011] axis

旋转后得到的压电应变常数 d'_{31} 、 d'_{32} 和 d'_{36} 分别为^[10]

$$d'_{31} = \frac{d_{31} + d_{32}}{2} + \frac{d_{31} - d_{32}}{2} \cos 2\theta \quad (1)$$

$$d'_{32} = \frac{d_{31} + d_{32}}{2} - \frac{d_{31} - d_{32}}{2} \cos 2\theta \quad (2)$$

$$d'_{36} = 2d'_{31} \sin \theta \cos \theta - 2d'_{32} \sin \theta \cos \theta \quad (3)$$

通过式(3)可知,当旋转角 $\theta = \pm 45^\circ$ 时, [011] 极化方向晶体的剪切压电应变常数 d'_{36} 最大,此时:

$$d'_{36} = \pm(d_{31} - d_{32}) \quad (4)$$

经过坐标变换后的压电应变常数矩阵为^[14]

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -696 & 935 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 935 & -696 & 0 \\ -364 & -364 & 890 & 0 & 0 & -1\ 648 \end{bmatrix}$$

因此, [011] 极化方向, $\text{zx}t\text{-}45^\circ$ 切型的 PIN-PMT-PT 单晶存在较大的剪切压电应变常数 d_{36} ($1\ 600 \sim 2\ 800\ \text{pC}\cdot\text{N}^{-1}$),同时还具有较高的机电

耦合系数 k_{36} (77%~83%) 和非常高的柔顺系数 s_{66}^E ($1.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$)。并且单晶的横向压电应变常数 d_{31} 和 d_{32} 较小 ($-300 \sim -400 \text{ pC} \cdot \text{N}^{-1}$)，当单晶形状为正方体时，横向振动模式受到较大的抑制，产生纯净的面剪切振动模式；然而当单晶形状为片状时，会存在较大的横向伸缩模式，但频率会远高于面剪切振动模式。

2 面剪切振动模式换能器模型

面剪切振动模式弛豫铁电单晶换能器 1/2 结构如图 4 所示，换能器由 8 块 [011] 极化方向 $\text{zxt-}45^\circ$ 切型的 PIN-PMN-PT 单晶驱动。8 块单晶电路并联，施加同相电压，利用单晶产生的剪切位移带动八边形质量块上下振动，从而在换能器前端辐射头处辐射声能。与传统的纵向换能器不同，面剪切振动模式换能器采用与单晶连接的 1/8 圆环作为尾质量，并且与相邻尾质量间距为 0.8 mm，这是由于开缝圆环可以降低换能器工作频率，同时消除单晶面剪切振动造成的应力集中现象。为了获得更大的前后端振速比，辐射头和与单晶连接的八边形质量块选用密度较小的铝合金材料，圆环型尾质量选用密度较大的黄铜。

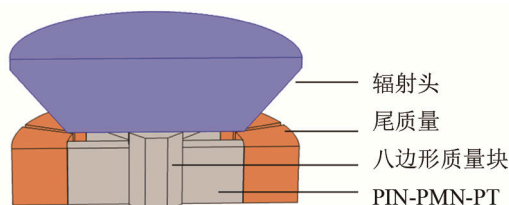


图4 面剪切振动模式弛豫铁电单晶换能器一半结构的示意图
Fig.4 Structural diagram of half the relaxation ferroelectric single crystal transducer of face shear vibration mode

换能器横截面如图 5 所示，对于传统的纵向换能器，换能器的总长度受辐射头高度、尾质量高度和压电圆片的数量影响。在面剪切换能器中，36 模式的存在将压电元件的高度降为最小，且尾质量不影响换能器的总长度，因此大大减小了换能器的纵向尺寸。

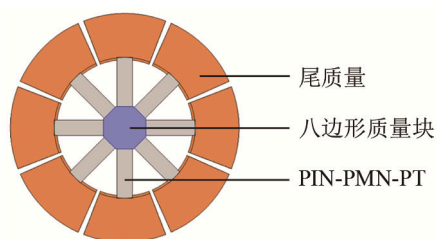


图5 面剪切模式弛豫铁电单晶换能器横截面示意图
Fig.5 Cross-section diagram of the relaxation ferroelectric single crystal transducer of face shear vibration mode

3 有限元模型

利用有限元软件的结构力学分析、流体分析、耦合场分析等分析场模型，可以对各式结构的换能器进行建模与仿真，进而得出换能器各种参数的数值解。首先，对单个 [011] 极化方向 $\text{zxt-}45^\circ$ 切型的 PIN-PMN-PT 单晶建立有限元模型，在建模过程中输入材料的 d 矩阵、介电常数矩阵和顺性矩阵参数，然后对单晶一端施加刚性边界条件，观察此时晶体的振型，如图 6 所示。

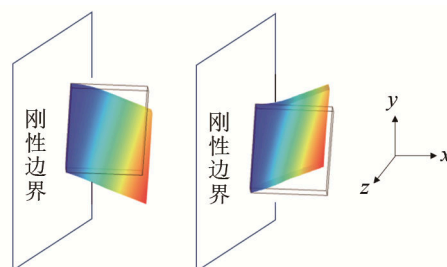


图6 施加交变电场时，固定在刚性边界上 PIN-PMN-PT 晶体的剪切位移

Fig.6 The shear displacement of the PIN-PMN-PT crystal fixed on the rigid boundary when an alternating electric field is applied

图 6 中， z 方向为极化方向和施加电场方向。深红色部分表示位移的极大值，蓝色部分表示位移的极小值；方形框代表晶体的初始形状，且彩色形状代表晶体变形后的形状。当在压电材料的电极面施加电场时，晶体自由端产生剪切位移，并且随着外加电场反向，剪切位移也反向。

3.1 空气中振动特性分析

在有限元软件中建立换能器模型，换能器的模型参数为：单晶尺寸为 $16.5 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ ；辐射头半径 26 mm；圆环厚度 10 mm，高度 13 mm；八边形质量块边长 4 mm。根据上述参数，得到换能器在空气中的导纳曲线，如图 7 所示。

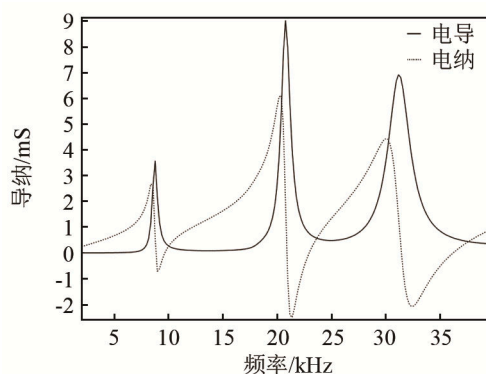


图7 换能器在空气中的导纳曲线
Fig.7 Admittance curve of the transducer in air

观察图 7 可知, 换能器在 5~35 kHz 频段内共存在三个谐振峰, 谐振频率依次为 8.5、21 和 30.5 kHz。然后, 提取换能器在各谐振点处的位移, 得到换能器的振型如图 8 所示。

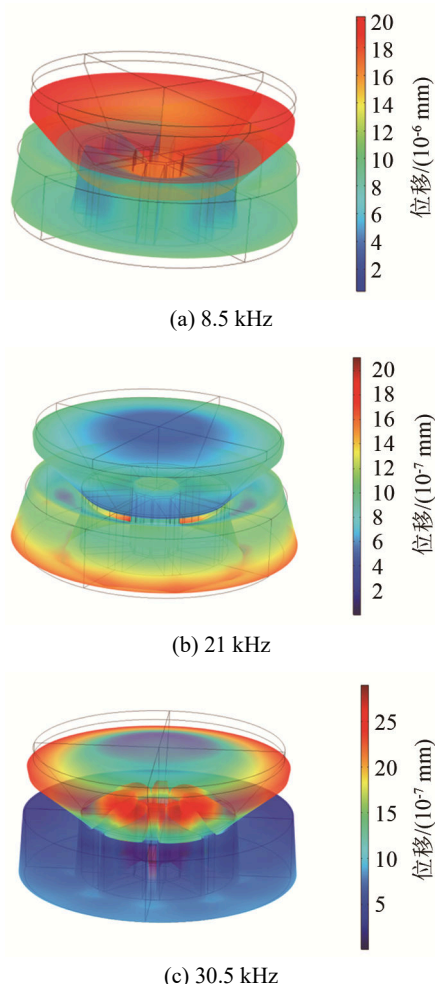


图 8 换能器谐振点振型

Fig.8 Vibration modes of the transducer at different resonance frequencies

图 8 中颜色图例代表换能器的位移值, 实线框代表换能器的初始形状, 且彩色形状代表换能器变形后的形状。由图 8 可知, 换能器第一阶谐振模式为单晶的剪切模式(36 模式), 辐射头振幅较大, 是可以利用的主要工作模式。第二阶谐振模式为 1/8 圆环尾质量的弯曲振动, 第三阶谐振模式为辐射头弯曲振动模式和单晶横向伸缩模式(31 模式)之间的耦合。

对于换能器的第二阶模式, 此时圆环的弯曲振动对声辐射贡献不大, 单从机械振动角度分析可以得到导纳曲线的谐振峰, 但不利于展宽工作带宽。

3.2 应力分析

圆环尾质量用以约束 PIN-PMT-PT 单晶位移, 防止振动时单晶振幅过大而碎裂, 同时可以增大前

后端振速比, 使声能更好地从换能器前端辐射。然而, 由于单晶的剪切振动, 圆环尾质量的引入会导致单晶与圆环接触面产生应力集中现象。因为单晶较脆, 应力过大时易碎裂, 因此有必要降低接触面的应力。本文采取将圆环开缝的方法, 通过将圆环切分为 8 等分, 可消除接触面处的应力集中现象。利用有限元软件提取圆环和单晶在一阶谐振频率处的米塞斯(von Mises)等效应力, 得到的整个圆环和开缝圆环与单晶的应力对比如图 9 所示。

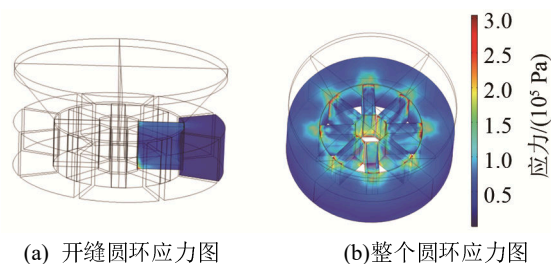


图 9 开缝的和完整的圆环尾质量块应力对比图
Fig.9 Stress comparison between the slit ring and the entire ring tail mass blocks

图 9 中颜色图例代表应力值, 深红色部分表示应力的极大值, 蓝色部分表示应力的极小值。由图 9 可知, 为了简化分析, 仅提取圆环和单晶的应力。晶体中最大应力点位于晶体与圆环接触面上端部位, 整个圆环时晶体中最大应力为 0.35 MPa, 开缝圆环情况下为 0.08 MPa。可见开缝后, 圆环与单晶接触面应力大大降低, 有助于消除应力集中现象。

3.3 水中辐射特性分析

建立换能器在水中的模型, 进行谐响应分析, 计算得到换能器轴向上的发送电压响应曲线如图 10 所示。

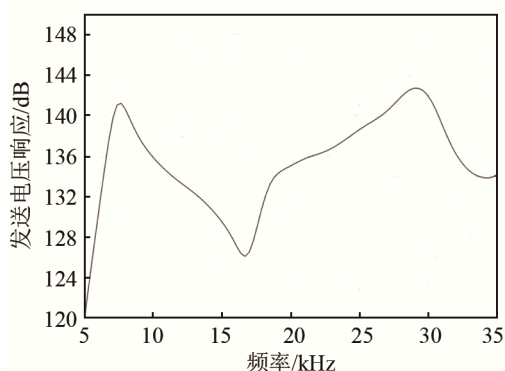


图 10 换能器发送电压响应曲线

Fig.10 The transmitting voltage response curve of the transducer

由图 10 可以看出, 换能器在 5~35 kHz 主要存在三个谐振峰: 第一阶谐振频率为 7.5 kHz, 发送电压响应为 141.5 dB; 第二阶谐振频率为 19 kHz, 发送电压响应为 135 dB, 没有形成明显峰值; 第三

阶谐振频率为 29 kHz，发送电压响应为 142.7 dB。同时，换能器在 16.5 kHz 附近响应存在较大的凹谷，这是由于第二阶振动模式辐射能力较低带来的。

为了拓宽换能器的工作频段，消除发送电压响应凹谷对换能器带宽性能的影响，考虑换能器的单晶剪切模态和辐射头弯曲模态作为主要工作模态，尾质量弯曲振动作为辅助调整。

首先，仿真计算了圆环厚度变化时换能器的发送电压响应，如图 11 所示。

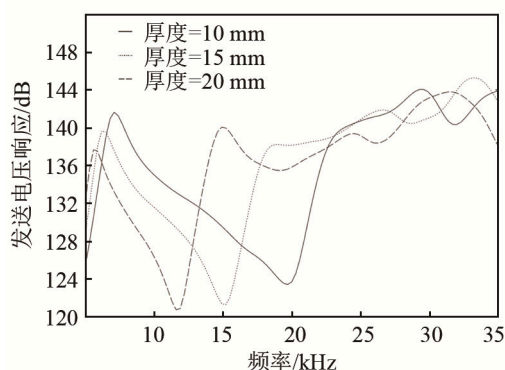


图 11 圆环厚度变化时，换能器发送电压响应曲线
Fig.11 Variation of the transmitting voltage response curve of the transducer with ring thickness

由图 11 可知，随着圆环厚度的增加，换能器一阶谐振频率降低，发送电压响应减小，这是由于换能器尾质量增大导致的。由于尾质量的增加，使主要工作模态频率降低，同时增大了弯曲刚度，使圆环弯曲频率升高。同样，三阶辐射头弯曲振动的谐振频率降低，发送电压响应减小。圆环厚度对凹谷处和二阶谐振频率影响最大。随着圆环厚度的增加，凹谷频率和二阶谐振频率均大大降低，并且一阶谐振频率和凹谷处的频率间距变窄。因此，合理地改变圆环厚度可以有效地拓宽换能器工作频段和增大发送电压响应。

然后，调节辐射头的结构参数，以达到使其弯曲振动频率前移的目的。辐射头的弯曲振动模态频率主要由辐射头的高度、半径及辐射面与侧面夹角决定。出于对小尺寸换能器设计方面的考虑，为了达到最小的换能器直径，换能器的辐射面半径应与下方圆环厚度和晶堆长度的和一致。因此，调节辐射头高度 H 从而降低三阶辐射头弯曲振动频率。不同辐射头高度的换能器发送电压响应如图 12 所示。

从图 12 中可以看出，随着辐射头高度 H 的减小，换能器一阶谐振频率和发送电压响应略微降低。原本的二阶谐振峰逐渐消失，并且在发送电压响应凹谷前产生新的二阶谐振峰。这是由于辐射头高度 H 比较大的时候，二阶谐振模态是由辐射头的

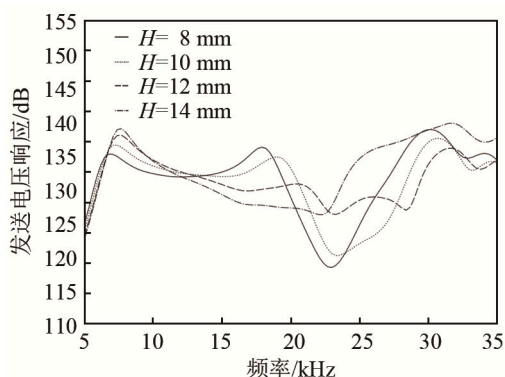


图 12 辐射头高度 H 变化时，换能器发送电压响应曲线
Fig.12 Variation of the transmitting voltage response curve of the transducer with the height of the radiation head

纵向振动和圆环纵向弯曲振动耦合导致的。随着辐射头高度 H 减小，二阶谐振模态变为辐射头的弯曲振动和圆环的纵向弯曲振动耦合而成，此时谐振峰的频率大大降低，并移至反相区前。

因此，合理地选择换能器的结构参数，可以获得较为平坦的宽带发送电压响应。设计的面剪切振动模式弛豫铁电单晶换能器总长度为 28 mm，半径为 26 mm，其中 PIN-PMN-PT 单晶的尺寸为 11 mm×3.5 mm×13 mm。换能器工作频段为 6~18 kHz，换能器在该频段内的最小发送电压响应为 134 dB，最大响应为 138 dB，起伏约为 4 dB，结果如图 13 所示。相较于传统的纵向换能器，在具备相似工作性能时，直径尺寸并未增大，而长度约为传统纵向换能器长度的 1/5。因此，面剪切模式极大减小了换能器的尺寸，有利于实现换能器低频小尺寸宽带工作。

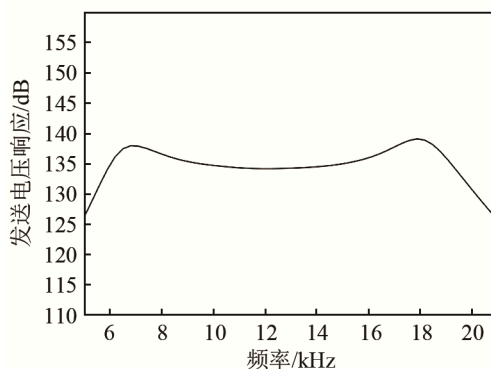


图 13 结构参数合理选择的面剪切模式弛豫铁电单晶换能器发送电压响应图
Fig.13 The transmitting voltage response curve of the relaxation ferroelectric single crystal transducer of face shear vibration mode with reasonable structure parameters

4 结论

本文设计了一种[011]极化方向 zxt-45° 切型的

PIN-PMT-PT 弛豫电单晶驱动的面剪切模式换能器。首先,介绍了面剪切振动模式的产生,对晶体进行合理的取向和切割可以获得大的面剪切模式下的压电应变常数。然后,利用有限元软件对换能器进行建模仿真,分析了换能器的各阶振动模态和发送电压响应,并利用辐射头的弯曲振动和圆环尾质量弯曲振动的耦合拓宽了换能器的工作频带,可以实现一个倍频程以上的宽带平坦发射。另外,工作在面剪切模式下的 PIN-PMN-PT 单晶,工作频率主要受单晶长度限制,且圆环尾质量并不影响换能器的总高度,因此可以大幅减小换能器的纵向尺寸,与使用 PZT 制造的纵向换能器相比,可以实现更低的工作频率和更小的尺寸。为低频小尺寸换能器的研究提供新的思路。

参 考 文 献

- [1] 莫喜平. 水声换能器发展中的技术创新[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 1-12, 133.
MO Xiping. Technical innovations with progress of underwater transducers[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2018, 46(3): 1-12, 133.
- [2] SHERLOCK N P, MEYER R J. Modified single crystals for high-power underwater projectors[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012, 59(6): 1285-1291.
- [3] OAKLEY C G, ZIPPARO M J. Single crystal piezo-electrics: a revolutionary development for transducers[C]//2000 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. An International Symposium (Cat. No.00CH37121). San Juan, PR, USA. IEEE, 2000: 1157-1167.
- [4] ZHANG S J, LI F. High performance ferroelectric relaxor-PbTiO₃ single crystals: Status and perspective[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(3): 031301.
- [5] MCLAUGHLIN E A, LIU T Q, LYNCH C S. Relaxor ferroelectric PMN-32%PT crystals under stress and electric field loading: I-32 mode measurements[J]. Acta Materialia, 2004, 52(13): 3849-3857.
- [6] ZHANG S J, LI F, JIANG W H, et al. Face shear piezoelectric properties of relaxor-PbTiO₃ single crystals[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(18): 182903.
- [7] ZHANG S J, JIANG W H, MEYER R J, et al. Measurements of face shear properties in relax-or-PbTiO₃ single crystals[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(6): 064106.
- [8] YAN W L, HAN P D, JIANG Z B. Piezoelectric 36-shear mode for [011] poled 24%Pb(In_{1/2}Nb_{1/2})O₃-Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃ ferroelectric crystal[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(3): 034107.
- [9] KIM K, ZHANG S J, JIANG X N. Surface load induced electrical impedance shift in relaxor-PbTiO₃ crystal piezoelectric resonators[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(25): 253501.
- [10] GOLJAH S, GALLAGHER J, ZHANG S J, et al. A relaxor ferroelectric single crystal cut resulting in large 312 and zero 311 for a shear mode accelerometer and related applications[J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(5): 055005.
- [11] LI S Y, JIANG W H, ZHENG L M, et al. A face-shear mode single crystal ultrasonic motor[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(18): 183512.
- [12] CI P H, LIU G X, CHEN Z J, et al. High-order face-shear modes of relaxor-PbTiO₃ crystals for piezoelectric motor applications[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(24): 242911.
- [13] van Tol D, Meyer Jr R J. Acoustic transducer: US 0309198 [P/OL]. 2008-03-09. <https://patents.google.com/patent/US20080309198>.
- [14] RONALD K J. Design and testing of a single-crystal, low-frequency, dual-resonant shear-mode transducer for sonar applications[D]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2018.