

## 综述

## 新型球形压电超声换能器及变压器的研究进展\*

任刘娜 唐一璠† 林书玉‡

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

(2026 年 4 月 8 日收到; 2026 年 5 月 11 日收到修改稿)

作为超声振动系统中的关键部件, 压电换能器在多种应用场景中发挥着至关重要的作用. 目前, 球形换能器领域已被广泛应用于水下声学和结构健康监测领域. 针对传统球形换能器普遍面临声强与功率容量受限、机电特性固化不可调, 以及与辐射介质阻抗失配等技术瓶颈. 本文综述了近几十年来压电球形换能器及压电变压器的研究概况, 并主要介绍了相关代表性工作, 包括级联式、叠堆式、机电性能可调式和基于 1-3-2 型压电复合材料的四种球形换能器结构以及新型球形压电变压器. 通过机电等效电路模型揭示了结构参数与宏观性能的内在映射机制, 显著地提升了传统器件的功率容量、辐射效率与工作带宽. 在压电变压器的研究方面, 实现了可升压与降压双向电压转换的新型球形压电变压器. 关于球形换能器的研究有效地突破了传统压电器件的性能极限, 丰富了压电超声器件的设计理论与技术体系, 为新一代超声振动系统提供了坚实的理论基础与技术范式. 最后, 对压电换能器的未来发展趋势及其前景进行了分析与展望.

**关键词:** 球形压电换能器, 级联结构, 机电性能可调, 1-3-2 压电复合材料, 双向电压转换**DOI:** 10.7498/aps.75.20260489**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260489

## 1 引言

声学是国家“十四五”发展规划中扶持和关注的传统学科. 超声学作为声学的重要分支, 是以经典声学理论为基础, 并融合材料、机械及电子等学科发展而来的综合性高技术学科<sup>[1,2]</sup>. 超声换能器作为现代超声技术的核心器件, 在水下探测与通信、功率超声处理、医学诊断与治疗、结构健康监测及工业检测等领域应用广泛<sup>[3-12]</sup>. 随着应用场景的拓展, 实际工程对换能器的声辐射效率、辐射方向性、功率容量以及频率可调性等性能提出了更高要求. 传统超声换能器多采用平面或柱状结构, 其声场分布与辐射特性受限于几何形状, 难以实现三维全向辐射与高声强输出. 因此, 如何提高功率超声振动系统的辐射声强并扩大声处理范围, 成为当

前亟待解决的关键问题<sup>[13-15]</sup>.

过去几十年间, 压电换能器研究备受重视, 这类装置可实现电信号与机械振动之间的双向转换<sup>[16-19]</sup>. 朗之万型压电超声换能器因其设计简单、效率高、易于加工等优点, 广泛应用于超声加工、超声清洗、水下通信, 医学超声以及无损检测等领域. 然而, 随着应用环境的日益复杂, 朗之万型换能器也面临着一些限制与挑战, 例如功率容量和辐射面积有限. 这两个指标往往是决定换能器的效率、经济性和可接受程度的关键因素. 针对传统朗之万型换能器及其阵列存在的问题, 研究者们也提出了很多新型超声换能器. Lin 等<sup>[20-24]</sup>建立了环形换能器与圆柱形换能器的机电等效电路模型, 并分析了其谐振频率与结构尺寸之间的关系. Al-Budairi 等<sup>[25]</sup>研究了锥形螺旋槽纵向-扭转复合振动压电换能器, 并基于机电等效电路法和有限元法

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12574498, 12404532) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tangyifan@snnu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: sylin@snnu.edu.cn

对换能器的机电参数进行了分析. 球形压电换能器因具备优异的三维空间声场分布, 被认为是实现全向辐射的理想选择<sup>[26-30]</sup>, 现已在压电能量收集<sup>[31]</sup>、水声探测<sup>[32,33]</sup>及结构健康监测<sup>[34]</sup>等领域广泛应用. Wang 等<sup>[35]</sup>设计了一种新型的球形压电陶瓷叠堆, 该结构中两个压电陶瓷球壳粘连并保持电端并联, 可兼具发射功率与辐射面积. Wang 等<sup>[36,37]</sup>依次完成了单压电球壳精准模型构建到夹心式复合球壳通用理论拓展的研究递进, 解决了厚壁、功能梯度结构压电球形换能器分析的关键问题, 如图 1(a) 所示. Kim 等<sup>[38]</sup>展示了压电陶瓷球形超声换能器的振动性能, 并探讨了压电球体的半径与厚度与频率之间的关系. Qin 等<sup>[39]</sup>提出了一种压电球形换能器, 该换能器采用两层球形压电陶瓷堆叠结构, 其中一层用于驱动, 另一层用于通过改变电阻来调节压电球形换能器的工作频率. 在材料方面, 李晓雷等<sup>[40]</sup>通过切割、灌注、三维成型、研磨及制备电极, 制作了 1-3 型球形压电陶瓷复合材料换能器, 实现了高频宽波束发射. Zhang 等<sup>[41]</sup>将六块球面 1-3 型压电复合材料通过硅橡胶与环氧树脂封装, 制备了高频球形全向换能器. 张希等<sup>[42]</sup>构建球形换能器多目标优化数学模型, 通过第二代非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 进行了球形换能器多目标优化设计, 如图 1(b) 所示. Zhang 等<sup>[43]</sup>提出了可应用于小型水下平台胶囊状压电换能器, 显著地提升了换能器的声学探测范围与空间覆盖性能,

如图 1(c) 所示. Zhang 等<sup>[44]</sup>提出了一种纵-径复合球壳型超声换能器, 通过理论计算、数值仿真与实验测试系统研究了其振动特性, 如图 1(d) 所示.

然而, 现有球形换能器仍面临诸多技术瓶颈: 首先, 单体球形换能器的声强与功率容量有限, 难以满足高强度超声需求; 其次, 传统器件一旦成型, 其机电特性便难以实时调控, 限制了其在多频场景下的适配性; 最后, 换能器与辐射介质间易产生阻抗失配, 从而制约了辐射效率与工作带宽. 此外, 现有理论多局限于薄球壳假设, 对厚壁及复合结构的机电耦合机制研究尚不充分, 进一步制约了性能突破. 在压电变压器领域, 尽管已发展出罗森型、多层叠堆等多种结构, 但针对球形结构的探索仍处空白, 亟需能同时实现升压与降压双向转换的创新设计. 上述问题严重制约了球形器件在高功率、高灵敏度及复杂环境中的深入应用. 针对上述挑战, 本文将主要介绍本课题组在这方面的研究情况.

本文系统地介绍了本课题组近年来在球形压电超声换能器及球形压电变压器方面的研究进展, 主要包括级联式、叠堆式、机电性能可调式球形换能器、1-3-2 型压电复合材料换能器以及可实现双向电压转换的球形压电陶瓷变压器. 级联式与叠堆式结构显著提升声强与功率容量, 解决厚壁陶瓷激励难题, 显著提升了传统器件的声强和功率容量; 可调式换能器可通过外接电阻实时调控机电特性, 无需改变尺寸即可灵活调整谐振频率与机电耦合

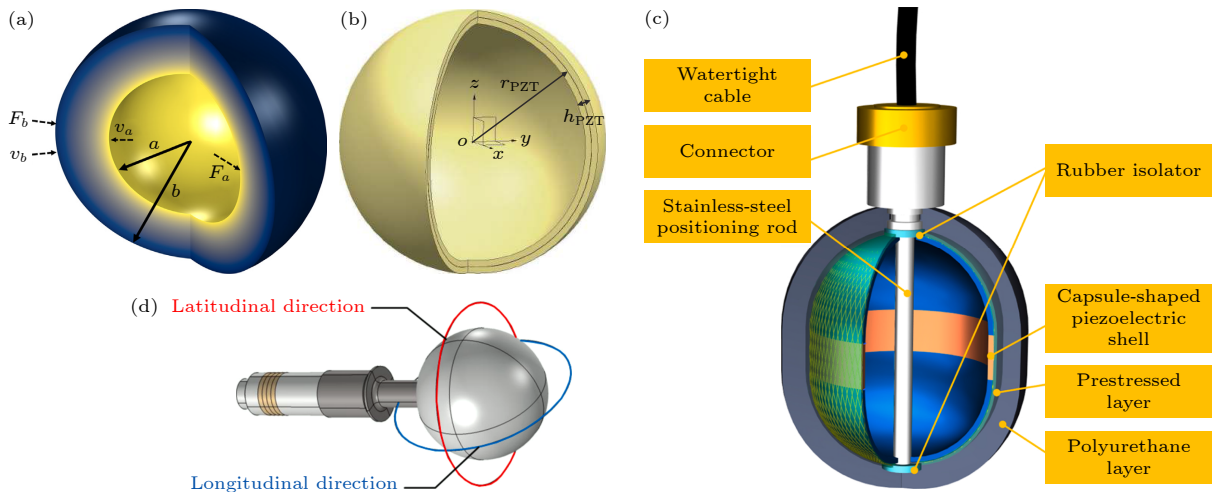


图 1 (a) FG-sPET 结构示意图<sup>[37]</sup>; (b) 利用 NSGA-II 计算的球形换能器结构示意图<sup>[42]</sup>; (c) 胶囊状换能器结构示意图<sup>[43]</sup>; (d) 纵-径复合球壳型超声换能器结构示意图<sup>[44]</sup>

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the FG-sPET structure<sup>[37]</sup>; (b) schematic diagram of the spherical transducer structure calculated using NSGA-II<sup>[42]</sup>; (c) schematic diagram of the capsule-shaped transducer structure<sup>[43]</sup>; (d) schematic diagram of the longitudinal-diameter composite spherical shell type ultrasonic transducer structure<sup>[44]</sup>.

系数; 1-3-2 压电复合材料设计有效解决阻抗失配问题, 大幅提升辐射效率与工作带宽, 实现全向宽带声发射, 而新型球形压电陶瓷变压器则在径向振动模式下成功兼具了升压和降压的双向输出特性. 这些研究工作不仅突破了传统球形换能器的设计局限, 也为功率超声换能器系统的进一步创新与发展提供了重要的理论支撑与技术方案.

## 2 级联式和叠堆式球形压电换能器

### 2.1 级联式球形压电换能器

针对传统单层球形换能器在输出声强、功率容量受限, 以及厚压电陶瓷极化与激励困难等方面存在的先天局限, 级联式与叠堆式结构设计突破了常规单一结构的壁垒, 为高性能全向超声器件的研发提供了两种极为高效的创新途径. 相比于 Kim 等 [38] 仅探讨单层压电球壳半径与厚度对基础振动性能影响的研究, 在级联式换能器的设计中, 将多层金属球壳与压电陶瓷球壳在径向空间上进行交替复合. 这种结构在力学传递上保持串联, 在电学输入上实现并联, 从而极大地增加了压电活性材料的总有效体积. 依托逆压电效应, 并联输入的信号能够高效地转化为径向全向振动. 这一构型显著

地弥补了传统单壳层器件辐射能力弱、功率上限低的缺陷, 更成功实现了高强度、宽频带且完美的三维全向声辐射, 极其契合现代大功率超声技术的应用需求.

图 2(a) 与图 2(b) 分别展示了径向级联球形压电换能器的整体结构与径向剖面 [45]. 该器件由内、中、外三层同心金属球壳 (M) 以及夹于其间的两层压电陶瓷球壳 (P) 构成. 金属球壳的内外半径由内至外依次设定为  $R_0, R_1, R_2, R_3, R_4$  和  $R_5$ ; 两层压电陶瓷球壳的内外半径则分别为  $R_1, R_2$  与  $R_3, R_4$ . 在结构上, 该换能器可等效为两个在机械端串联、电端并联的径向夹心式压电球形换能器. 当外部超声发生器将电信号施加于压电陶瓷层时, 器件能够产生全向声辐射. 特别地, 当激励频率与换能器的共振频率一致时, 其径向振动振幅达到极值. 由于两个压电球壳由同一电信号并联激励, 换能器的整体输入电功率得以显著提升. 为揭示共振与反共振频率同基础几何尺寸之间的内在联系, 构建了综合考虑机械损耗、介电损耗及负载机械阻抗的机电等效电路模型, 如图 2(c) 所示 [45], 以分析换能器的机电特性. 图中网络 1, 3, 5 分别对应内、中、外层金属球壳, 网络 2, 4 则对应内、外层压电陶瓷球壳;  $V_i$  为系统的输入电压.

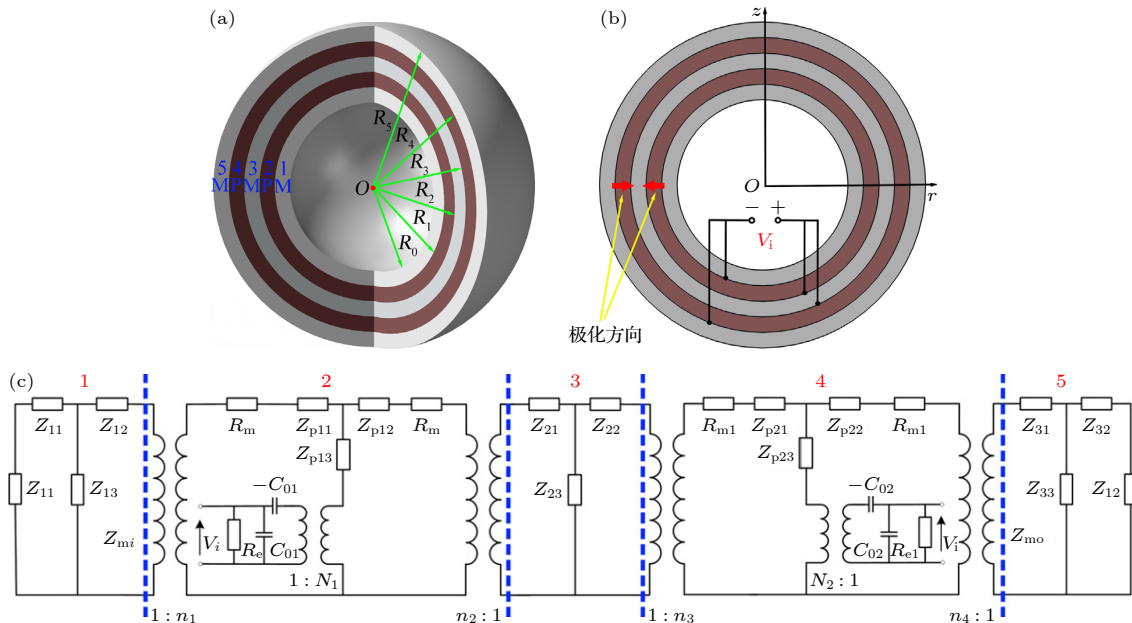


图 2 (a) 径向级联球形压电换能器结构示意图 [45]; (b) 级联球形压电换能器的径向剖面图 [45]; (c) 径向级联球形压电换能器的机电等效电路 [45]

Fig. 2. (a) Schematic diagram of the radial cascaded spherical piezoelectric transducer structure [45]; (b) radial cross-sectional view of the cascaded spherical piezoelectric transducer [45]; (c) the electromechanical equivalent circuit of the radial cascaded spherical piezoelectric transducer [45].

由图 2(c) 可知, 径向级联球面压电换能器的输入电阻抗  $Z_e$  可按下式求得:

$$Z_e = \frac{Z_{e1} Z_{e2}}{Z_{e1} + Z_{e2}}, \quad (1)$$

式中,  $Z_{e1}$  和  $Z_{e2}$  分别为径向级联换能器两个压电球壳的输入电阻抗. 它们的表达式分别为

$$Z_{e1} = \frac{Z_{mr1} R_e}{Z_{mr1} + R_e(j\omega Z_{mr1} C_{01} + n_5^2)}, \quad (2)$$

$$Z_{e2} = \frac{Z_{mr2} R_{e1}}{Z_{mr2} + R_{e1}(j\omega Z_{mr2} C_{02} + N_2^2)}, \quad (3)$$

$$Z_{mr1} = \frac{(Z_{n1} + Z_{n5})(Z_{n1} + Z_{n4}) - Z_{n1}^2}{(Z_{n1} + Z_{n5}) - N_2/n_5 Z_{n1}}, \quad (4)$$

$$Z_{mr2} = \frac{(Z_{n1} + Z_{n5})(Z_{n1} + Z_{n4}) - Z_{n1}^2}{(Z_{n1} + Z_{n4}) - n_5/N_2 Z_{n1}}, \quad (5)$$

式中,  $R_e$  和  $R_{e1}$  分别为内外球形压电陶瓷壳的介质损耗;  $C_{01}$  和  $C_{02}$  分别为内外压电陶瓷球壳的钳定电容;  $\omega$  是角频率;  $N_2$  是机电转换系数;  $n_5$  是常

量;  $Z_{n1}$ ,  $Z_{n4}$  和  $Z_{n5}$  是化简等效电路时引入的电阻抗. 可得径向级联球面压电换能器的共振频率方程、反共振频率方程以及有效机电耦合系数为

$$Z_e(f_r) = \frac{Z_{e1} Z_{e2}}{Z_{e1} + Z_{e2}} = 0, \quad (6)$$

$$Z_e(f_a) = \frac{Z_{e1} Z_{e2}}{Z_{e1} + Z_{e2}} \rightarrow \infty, \quad (7)$$

$$K_{\text{eff}} = \sqrt{1 - f_r^2/f_a^2}, \quad (8)$$

式中,  $f_r$  和  $f_a$  分别为级联球面压电换能器的共振和反共振频率. 对于给定的径向级联球面压电换能器的材料参数和几何尺寸, 可以得到不同振动模式下的共振和反共振频率.

径向级联球形压电换能器的几何尺寸为  $R_0 = 11$  mm,  $R_1 = 13$  mm,  $R_2 = 15$  mm,  $R_3 = 17$  mm,  $R_4 = 19$  mm 和  $R_5 = 21$  mm. 采用有限元法 (FEM) 仿真软件以及机电等效电路模型 (EECM), 分析其导纳特性及一阶、二阶振动模式, 结果如图 3(a)

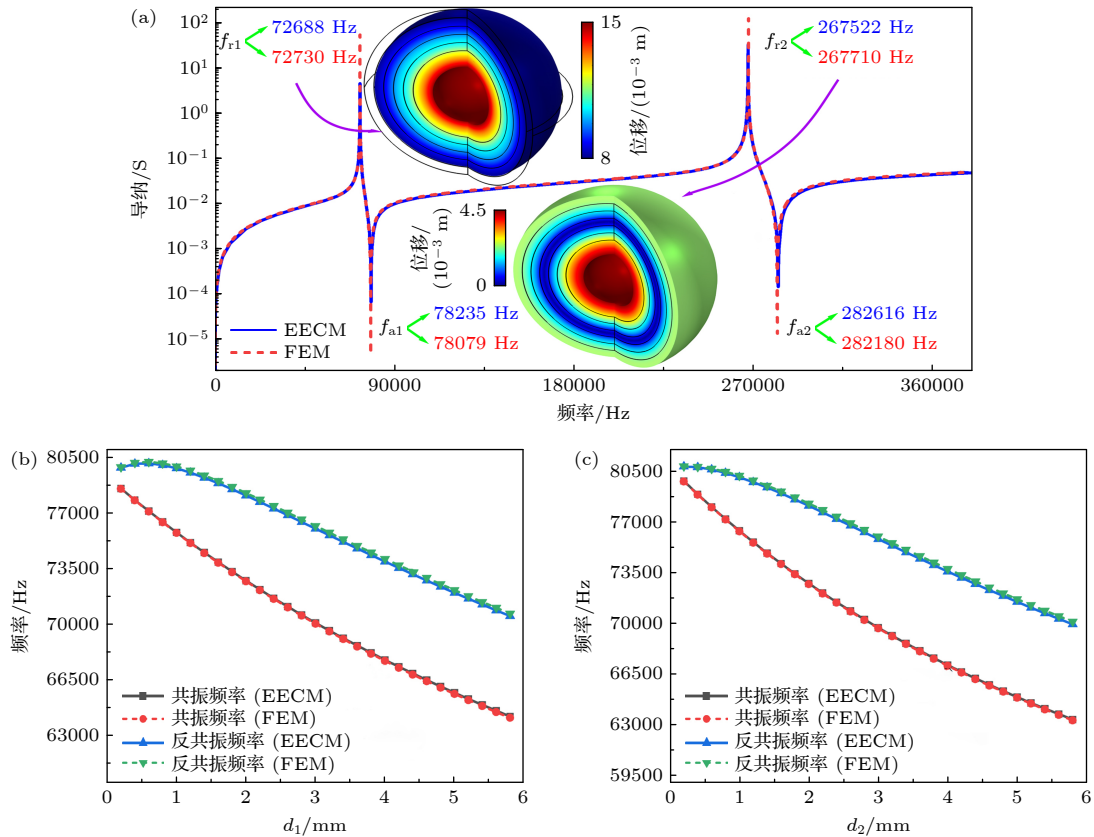


图 3 (a) 级联式球形换能器理论分析与数值模拟的导纳图和一阶及二阶振动模式<sup>[45]</sup>; (b) 第一模式的共振频率和反共振频率与内压电陶瓷壳厚度的关系<sup>[45]</sup>; (c) 第一模式的共振频率和反共振频率与外压电陶瓷壳厚度的关系<sup>[45]</sup>

Fig. 3. (a) Impedance diagram and the first and second vibration modes of the cascaded spherical transducer theory analysis and numerical simulation<sup>[45]</sup>; (b) the relationship between the resonant frequency and anti-resonant frequency of the first mode and the thickness of the internal piezoelectric ceramic shell<sup>[45]</sup>; (c) the relationship between the resonant frequency and anti-resonant frequency of the first mode and the thickness of the external piezoelectric ceramic shell<sup>[45]</sup>.

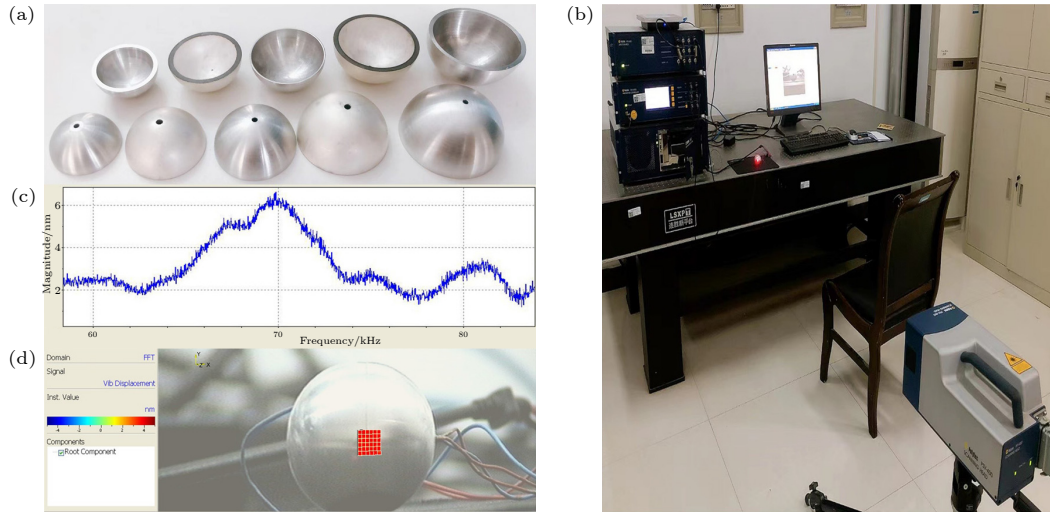


图 4 (a) 金属和陶瓷半球壳的实验样品<sup>[45]</sup>; (b) 实验装置<sup>[45]</sup>; (c) 振动位移频率响应<sup>[45]</sup>; (d) 一阶共振频率下的振动位移分布<sup>[45]</sup>

Fig. 4. (a) Experimental samples of metal and ceramic hemispherical shells<sup>[45]</sup>; (b) experimental setup<sup>[45]</sup>; (c) frequency response of vibration displacement<sup>[45]</sup>; (d) distribution of vibration displacement at the first-order resonant frequency<sup>[45]</sup>.

所示<sup>[45]</sup>. 从图 3(a) 可以看出, 由机电等效电路模型得出的级联球形换能器的一阶和二阶共振频率、反共振频率分别为 72688 Hz, 78235 Hz(一阶) 和 267522 Hz, 282616 Hz(二阶). 有限元法计算的一阶和二阶共振频率、反共振频率分别为 72730 Hz, 78079 Hz(一阶) 和 267710 Hz, 282180 Hz(二阶). 有限元法得出的导纳与等效电路法计算的结果十分吻合. 为了深入探究径向级联球形压电换能器的性能, 在固定相关损耗及外部负载参数、保持其他几何尺寸不变的情况下, 分析内、外压电陶瓷壳厚度  $d_1$ ,  $d_2$  对换能器性能的影响. 图 3(b) 和图 3(c) 为第一模态的共振频率和反共振频率与内外压电陶瓷壳厚度的关系<sup>[45]</sup>. 当参数  $d_1$ ,  $d_2$  增加时, 共振频率和反共振频率均呈下降趋势.

为验证理论分析的准确性, 制备了金属球壳与压电陶瓷半球壳的实验样品, 如图 4(a) 所示<sup>[45]</sup>. 在装配过程中, 采用导电胶连接电极, 环氧树脂进行黏结封装. 图 4(b) 和图 4(c) 为采用激光测振仪输出扫频激励信号以及测量得到换能器球面的振动位移频响曲线<sup>[45]</sup>, 其中 69478 Hz 处的位移峰值对应器件的一阶共振频率. 此外, 利用 Polytec PSV-400 激光扫描头获取了该频率下输出端表面的实测振动位移分布, 如图 4(d) 所示<sup>[45]</sup>. 实验测得的共振频率与理论预测结果具有良好的一致性, 有力证明了前述级联球形压电换能器理论模型的正确性.

## 2.2 叠堆式球形压电换能器

针对传统厚壁压电陶瓷球壳在制备时极化不

均, 以及在实际工作时面临高驱动电压和难以稳定激励等核心痛点, 尽管 Wang 等<sup>[37]</sup> 此前推进了夹心式复合球壳的通用理论, Qin 等<sup>[39]</sup> 也曾提出利用双层陶瓷堆叠以调控频率的设想, 但叠堆式的设计给出了解决高压驱动与大功率输出瓶颈的绝佳解决方案. 该设计巧妙地将两层极化方向截然相反的压电陶瓷球壳在径向上直接叠堆, 并将其紧密夹持在内外金属球壳之间. 这种独特的夹心构型使得两层压电陶瓷在电学上形成并联激励, 大幅降低了整体的等效电阻抗和所需的驱动电压; 而在力学输出上则保持串联叠加, 实现了径向振动位移的有效放大. 通过这种精巧的叠堆机制, 换能器不仅彻底打破了压电陶瓷在制造工艺上的厚度限制, 在较低的工作电压下便成倍提升了系统的声源级与辐射功率.

图 5(a) 和图 5(b) 分别展示了叠堆式球形换能器的整体结构图和径向剖面图<sup>[46]</sup>. 该换能器由内外两层球形金属壳 (图中呈灰色) 以及夹于其间的两层压电陶瓷壳组成. 其中, 压电陶瓷材料为 PZT-4, 金属球壳材质为铝. 内层 (绿色) 与外层 (蓝色) 压电陶瓷壳的极化方向分别向内与向外. 这种新型夹心式结构能显著增强换能器的振动能力; 在相同几何尺寸与电激励条件下, 其振动性能较传统夹心式球形换能器有显著提升. 为验证结构设计的优越性, 将改进后的叠堆式球形换能器与传统单层球形换能器的电阻抗与径向位移进行了对比分析. 模型选取的几何尺寸为:  $r_1 = 11$  mm,  $r_2 = 13$  mm,  $r_3 = 15$  mm,  $r_4 = 17$  mm,  $r_5 = 19$  mm; 计算得出其共振频率为 73466 Hz, 反共振频率为 80589 Hz. 图 5(c)

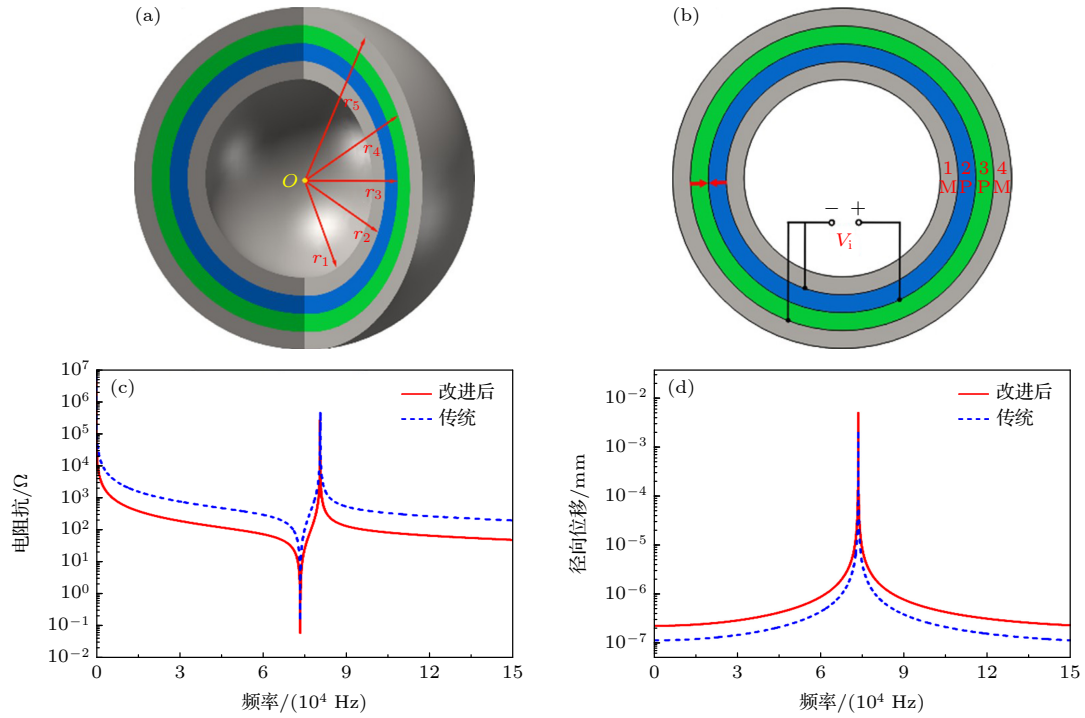


图 5 (a) 叠堆式球形换能器的结构示意图<sup>[46]</sup>; (b) 叠堆式球形换能器的径向剖面图<sup>[46]</sup>; (c) 传统式和叠堆式夹心球形换能器的电阻抗与频率的关系<sup>[46]</sup>; (d) 传统式和叠堆式夹心球形换能器的径向位移与频率的关系<sup>[46]</sup>

Fig. 5. (a) Structural schematic diagram of the stacked spherical transducer<sup>[46]</sup>; (b) radial section view of the stacked spherical transducer<sup>[46]</sup>; (c) the relationship between impedance and frequency for traditional and stacked sandwich spherical transducers<sup>[46]</sup>; (d) the relationship between radial displacement and frequency for traditional and stacked sandwich spherical transducers<sup>[46]</sup>.

和图 5(d) 分别对比了传统式 (单层压电陶瓷壳) 与叠堆式夹心球形换能器的电阻抗和径向位移随频率的变化关系<sup>[46]</sup>. 由图 5(c) 和图 5(d) 可知, 叠堆式换能器的电阻抗显著减小; 在一阶共振频率下, 其电阻抗较传统结构减少了 84%. 这主要是因为两层压电陶瓷球壳在电学上形成并联, 从而大幅降低了系统整体的等效电阻抗. 同时, 叠堆式换能器的径向位移也明显优于传统结构; 在一阶共振频率下, 其径向位移达到了传统夹心式球形换能器的 1.26 倍. 其内在机制在于: 在恒压源驱动下, 系统等效电阻抗越小, 产生的驱动电流越大, 进而激发更大的振动位移<sup>[46]</sup>.

### 3 性能可调的球形换能器与压电复合材料超声换能器

#### 3.1 性能可调的球形换能器

随着水声工程与医学超声等前沿领域对复杂声场环境适应性要求的不断攀升, 传统单一纯陶瓷实体或机电特性完全固化的换能器局限性日益凸显, 其难以在多变的介质负载中保持高效的声能传

递. 在性能可调设计方面, 相比于 Qin 等<sup>[39]</sup> 此前仅探讨通过改变单一电阻来微调双层陶瓷堆叠换能器工作频率的初步尝试, 本研究组提出了一种更为系统且完备的双层压电陶瓷与三层金属球壳复合结构. 该设计在完全不改变器件基础几何尺寸的前提下, 创新性地构建了“内激外调”与“外激内调”两种高自由度的协同电控模式. 通过在外部调谐回路中全面引入不同阻抗元件, 器件能够利用逆压电效应与外部负载的耦合主动干预系统的总等效阻抗. 这种机制实现了对换能器机电响应的实时、宽频带精准动态干预, 彻底解决了传统器件一旦成型便频带狭窄、难以适配多频段复杂应用场景的核心痛点.

图 6(a) 展示了该可调谐结构的示意图<sup>[47]</sup>. 该设计的核心创新在于: 在压电陶瓷壳内外表面集成附加电路, 并引入外部阻抗  $Z_e$  (如电阻、电感、电容等), 以实现性能的动态调控. 图 6(b) 和图 6(c) 分别定义了两种工作模式: 模式 1 (内层激励、外层调谐) 与模式 2 (外层激励、内层调谐)<sup>[47]</sup>. 其调控机理为: 当无源压电陶瓷壳接入阻抗负载时, 逆压电效应将改变其转换机械阻抗, 进而重塑整体换能器的输入电阻抗, 最终实现对共振频率、反共振频率及

有效机电耦合系数的主动调控<sup>[47]</sup>. 为探究外部阻抗对器件性能的具体影响, 图 6(d) 呈现了模式 1 下, 共振与反共振频率随外接电阻、电感及电容变化的响应规律<sup>[47]</sup>. 当外接电阻增大时, 共振与反共振频率均呈上升趋势; 其中, 频率在低阻值区间变化显著, 而在高阻值区间则趋于饱和. 随着外接电感的增加, 共振频率、反共振频率及有效机电耦合系数均单调递减. 特别地, 在模式 1 的有限元仿真中, 共振频率可从 72730 Hz 大幅下移至 42928 Hz, 展现出优异的宽频调谐能力. 当外接电容增大时, 共振与反共振频率同样降低, 但有效机电耦合系数却随之增大; 这主要归因于电容的改变重构了换能器的转换机械阻抗与输入电阻抗. 从等效电路角度理解, 外部阻抗元件的接入与器件固有的等效阻抗相叠加, 构成了全新的“总等效阻抗”. 系统的谐振点必然随外接阻抗参数的变化而偏移, 这正是该可调谐换能器实现主动重构的根本物理机制.

图 7(a) 展示了所制备的金属与压电陶瓷半球壳部件及最终组装样机, 样机的几何尺寸与理论模型保持一致<sup>[47]</sup>. 阻抗特性的测量采用 WK6500B 精密阻抗分析仪 (图 7(b))<sup>[47]</sup>. 图 7(c) 给出了外接

电阻为  $0\ \Omega$  时, 模式 1 下输入电阻抗模量随频率变化的模拟与实验对比曲线<sup>[47]</sup>. 值得注意的是, 在粘贴两个压电陶瓷半球时用的环氧树脂胶, 这是为了避免内外电极的导通. 在粘贴压电陶瓷球壳和金属球壳时用的是导电胶. 实验中通过专用夹具来夹紧两个压电陶瓷以及金属球壳, 以确保压电陶瓷球壳和金属球壳之间没有小气泡. 样品制备过程中的装配误差和实验材料参数的差异, 是构成模拟与实验结果间误差的主要来源.

### 3.2 压电复合材料超声换能器

在复合材料设计领域, 不同于 Kim 等<sup>[38]</sup> 主要侧重于纯压电陶瓷球壳几何尺寸的常规探讨或基础物理堆叠, 针对纯陶瓷材料声阻抗过高的固有缺陷, 本节介绍了本课题组提出的 1-3-2 型压电复合材料球形换能器. 这种精密的复合结构将 1-3 型压电复合层与纯陶瓷基层在三维曲面上完美融合, 巧妙地引入了低声阻抗的高分子聚合物以替代部分高刚度陶瓷柱, 从而大幅降低了系统整体的等效刚度与声阻抗. 通过严谨的机电等效电路与有限元分析证实, 该换能器在稳定的一阶呼吸振动模式下不

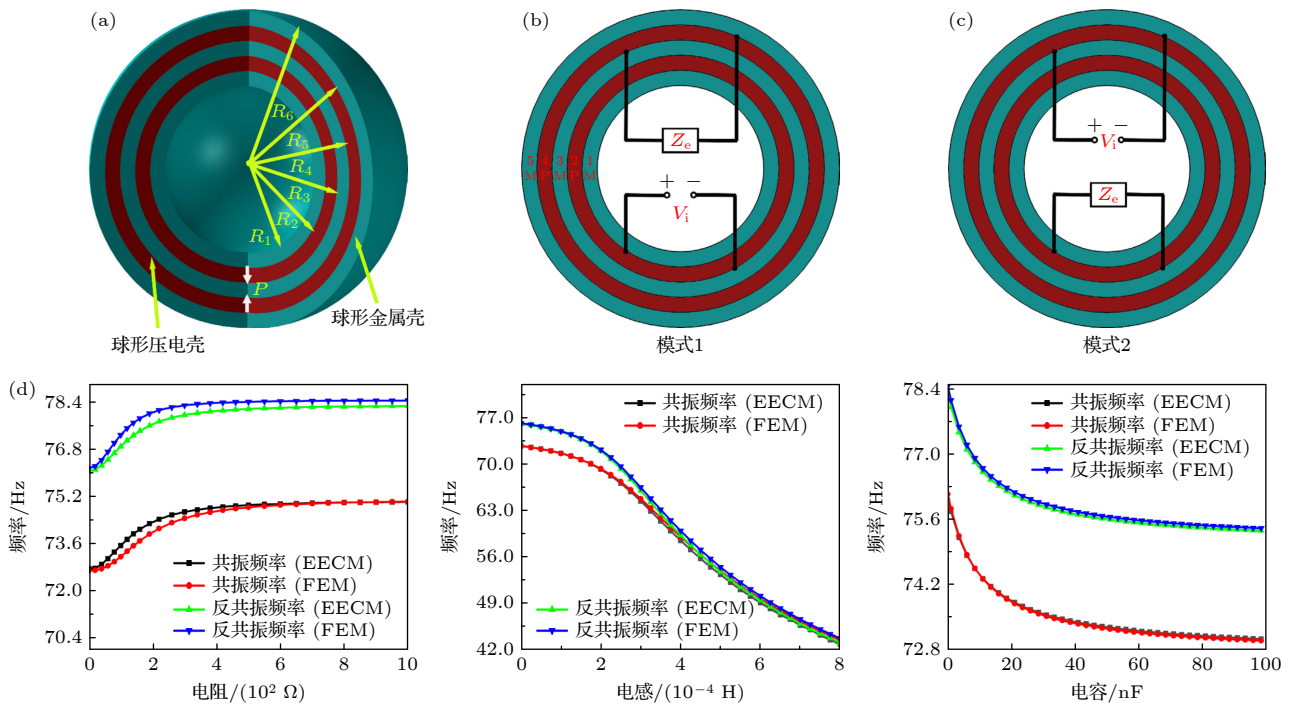


图 6 (a) 可调谐球形压电换能器的结构示意图<sup>[47]</sup>; (b) 内激外谐<sup>[47]</sup>; (c) 外激内谐<sup>[47]</sup>; (d) 模式 1 的共振/反共振频率与电阻、电感、电容之间的关系<sup>[47]</sup>

Fig. 6. (a) Schematic diagram of the tunable spherical piezoelectric transducer<sup>[47]</sup>; (b) internal excitation, external resonance<sup>[47]</sup>; (c) external excitation, internal resonance<sup>[47]</sup>; (d) the resonant frequencies of case 1 and their relationship with resistance, inductance, and capacitance<sup>[47]</sup>.

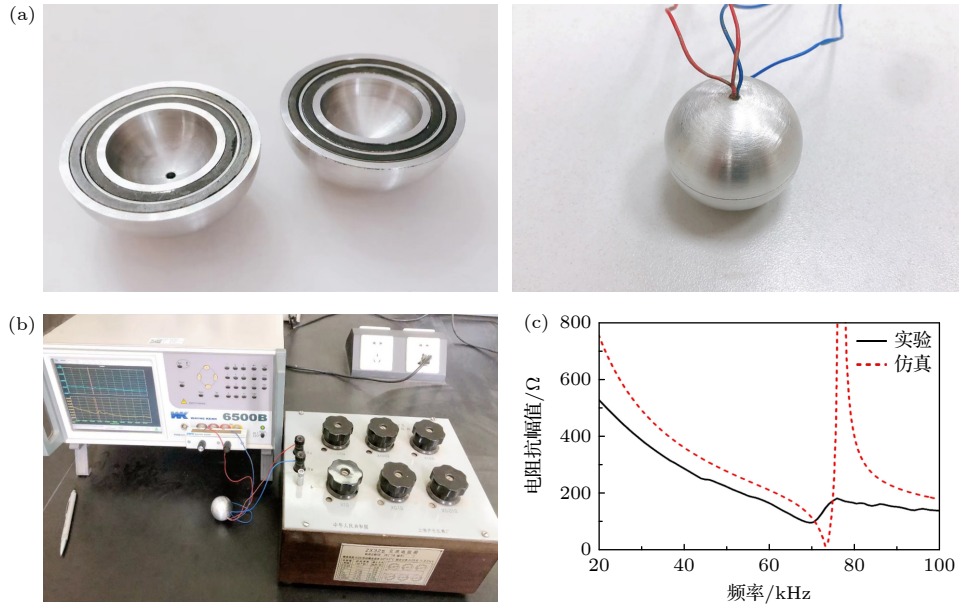


图 7 (a) 金属和压电陶瓷半球形外壳及实验样品<sup>[47]</sup>; (b) 测量所得装置的实验装置<sup>[47]</sup>; (c) 模拟结果和实验结果的输入电阻抗模量的频率依赖性<sup>[47]</sup>

Fig. 7. (a) Metal and piezoelectric ceramic hemispherical casings and experimental samples<sup>[47]</sup>; (b) experimental apparatus for the measured device<sup>[47]</sup>; (c) frequency dependence of the input impedance modulus of the simulation results and experimental results<sup>[47]</sup>.

仅实现了完美的无盲区全向辐射, 还有效地抑制了高次干扰模式. 其较低的机械品质因子使得系统的谐振工作带宽远超传统纯压电陶瓷球形器件, 不仅实现了靶向辐射介质的完美阻抗匹配, 更在宏观上实现了机电转换性能与声频辐射效率的跨越式提升.

图 8(a) 展示了一种基于压电复合材料的全向宽带球形换能器, 整体结构由 6 个相同的、具有球面曲率的 1-3-2 型压电复合材料拼接组成<sup>[48]</sup>. 图 8(b) 和图 8(c) 分别展示了该换能器六分之一结构的放大视图及其基本单元构型<sup>[48]</sup>. 该复合材料分为两层: 外层为 1-3 型压电复合材料 (其中紫色代表环氧树脂, 棕色代表压电陶瓷柱), 内层为同样具备球面曲率的整块方形压电陶瓷; 两层在水平和垂直方向上均顺应球面呈现  $90^\circ$  的弯曲弧度. 在几何尺寸上, 内层的内外半径分别为  $r_1$  和  $r_2$ , 外层的内外半径分别为  $r_2$  和  $r_3$ ; 外层压电陶瓷柱的半径为  $R$ , 高度为  $r_3 - r_2$ . 电学与力学配置方面, 内、外层压电陶瓷采用反向极化, 并在电端并联、机械端串联. 内外层结构通过粘接成型; 得益于整体结构的高度对称性, 拼接而成的 6 个组件在工作时表现出高度一致的振动幅值与相位<sup>[48]</sup>. 图 8(d) 展示了有效机电耦合系数与共振/反共振频率随内半径  $r_1$  的变化规律<sup>[48]</sup>. 可以看出: 在其他几何尺寸保持

不变的前提下, 当  $r_1$  增大时, 器件的径向总厚度减小, 导致共振与反共振频率降低, 而有效机电耦合系数则相应增大. 图 8(e) 进一步给出了内半径分别为 33 和 36 mm 时, 器件在 24164 与 21691 Hz 频率下的振动模式<sup>[48]</sup>. 另外, 图 8(f) 展示了有效机电耦合系数与共振/反共振频率随外半径  $r_3$  的变化规律<sup>[48]</sup>. 在其他几何尺寸固定时, 随着  $r_3$  的增大, 共振与反共振频率同样呈现减小趋势, 而有效机电耦合系数增大. 图 8(g) 则呈现了外半径分别为 39 和 44 mm 时, 器件在 24338 与 20685 Hz 频率下的对应振动模式<sup>[48]</sup>. 总体而言, 无论是增加内半径  $r_1$  还是增加外半径  $r_3$ , 器件的有效机电耦合系数与共振/反共振频率均表现出高度一致的变化趋势.

#### 4 新型球形压电变压器

随着电子技术发展, 大量设备需要升降压电源, 压电变压器凭借逆压电或压电效应实现电压转换, 被广泛应用. 现有研究已发展出 Rosen 型、厚度振动型、径向振动型、多层堆叠型等多种结构. Rosen 型变压器为长条状陶瓷结构, 具备 kV 级高压增益与 90% 以上的转换效率, 主要应用于高压电源与 LCD 背光驱动, 但其体积偏大、工作频率

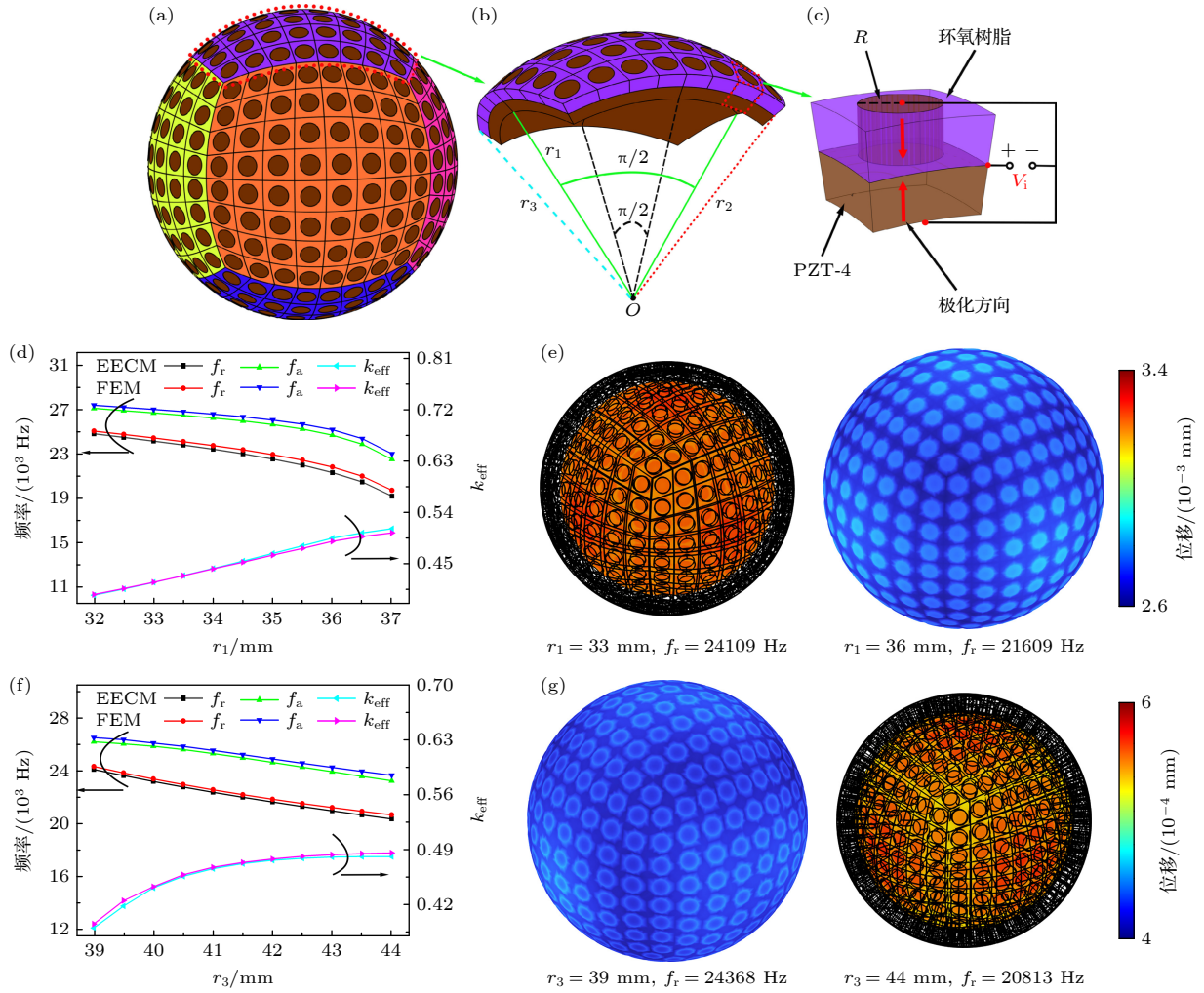


图 8 (a) 1-3-2-PCST 结构图<sup>[48]</sup>; (b) 六分之一 1-3-2-PCST 的放大结构<sup>[48]</sup>; (c) 小单元构型<sup>[48]</sup>; (d) 有效机电耦合系数与共振/反共振频率随内半径  $r_1$  的变化规律<sup>[48]</sup>; (e)  $r_1 = 33$  mm,  $f_r = 24109$  Hz 和  $r_1 = 36$  mm,  $f_r = 21609$  Hz 的振动模式<sup>[48]</sup>; (f) 有效机电耦合系数与共振/反共振频率随内半径  $r_3$  的变化规律<sup>[48]</sup>; (g)  $r_1 = 39$  mm,  $f_r = 24368$  Hz 和  $r_1 = 44$  mm,  $f_r = 20813$  Hz 的振动模式<sup>[48]</sup>

Fig. 8. (a) 1-3-2-PCST structure diagram<sup>[48]</sup>; (b) enlarged structure of one-sixth 1-3-2-PCST<sup>[48]</sup>; (c) small unit configuration<sup>[48]</sup>; (d) the variation laws of the effective electromechanical coupling coefficient and the resonant/anti-resonant frequencies with the inner radius  $r_1$ <sup>[48]</sup>; (e) vibration modes with  $r_1 = 33$  mm,  $f_r = 24109$  Hz and  $r_1 = 36$  mm,  $f_r = 21609$  Hz<sup>[48]</sup>; (f) the variation laws of the effective electromechanical coupling coefficient and the resonant/anti-resonant frequencies with the inner radius  $r_3$ <sup>[48]</sup>; (g) vibration modes with  $r_1 = 39$  mm,  $f_r = 24368$  Hz and  $r_1 = 44$  mm,  $f_r = 20813$  Hz<sup>[48]</sup>.

处于 kHz 级, 限制了小型化与高频场景的适配性. 厚度振动型变压器结构紧凑、高频兼容性好, 适用于微型化设备与无线能量传输系统, 但功率容量有限, 散热性能不足. 径向振动型 (圆盘或环形) 变压器结构简单, 适配中低压转换与超声发生器, 但其功率输出与工作带宽均存在明显瓶颈. 多层堆叠型变压器通过多陶瓷层结构实现了高功率密度与灵活电压输出, 适用于大功率工业设备与能量采集场景, 但设计复杂度高, 易出现层间脱粘失效问题. 径向振动型 (球壳) 变压器采用球形壳结构, 支持升压与降压双模式输出, 适配便携电子充电器, 但其对制造加工精度要求极高. 但径向振动球形压电陶

瓷变压器 (SPCT) 尚未被系统研究, 针对便携电子充电器等应用对器件同时实现升压与降压输出的需求, 提出一种由三层同心金属球壳与两层径向极化压电陶瓷球壳组成的新型球形压电陶瓷变压器.

图 9(a) 为新型球形压电陶瓷变压器的结构示意图<sup>[49]</sup>. 图 9(b) 为该器件横截面视角下的工作电路, 其中内、外层压电陶瓷壳分别被设定为能量传输系统的输入端与输出端<sup>[49]</sup>. 具体而言, 输入端连接信号发生器, 输出端连接负载电阻. 其工作机制如下: 输入端利用逆压电效应将电能转化为径向机械振动, 该振动经中间金属壳传递至输出端后, 输出端再通过正压电效应将机械能重新转化为电

能, 从而实现电压转换. 最终的输出电压与功率可通过调节外部负载进行调制<sup>[49]</sup>. 为全面评估新型球形压电陶瓷变压器在实际工作环境下的动态输出特性, 图 9(c)–(f) 分别详细地展示了外部负载电阻对系统共振频率、反共振频率、有效机电耦合系数、电压增益及功率增益的调控规律<sup>[49]</sup>. 外部负载的改变显著重塑了系统的电学边界条件: 随着负载电阻的增加, 器件逐渐从近似短路状态向开路状态过渡, 系统等效刚度随之增加, 从而导致共振频率与反共振频率在初始阶段迅速上升. 值得注意的是, 当负载电阻达到一定阈值后, 系统逐渐逼近完全开路边界, 一阶共振频率、反共振频率以及有效机电耦合系数的变化率随之逐渐衰减并最终趋于饱和和稳定状态. 此外, 在电压传输特性方面, 当负载电阻相对较小时, 外部负载在总阻抗中占据主导, 不同内在损耗条件对电压增益增长率的影响微乎其微, 曲线基本重合; 然而, 随着负载电阻的进一步大幅增大, 系统内阻的压降效应凸显, 不同机械与介电损耗条件下的电压增益差异逐渐显现并

持续扩大. 最后, 就核心的功率传输效率而言, 功率增益曲线呈现出典型的先增后降特征; 当负载电阻为  $200\ \Omega$  时, 系统实现了最佳阻抗匹配, 功率增益达到峰值, 随后由于严重失配而呈下降趋势. 这一最佳负载阻抗的确定, 为球形压电变压器在实际电路中的适配与应用提供了关键的设计准则.

图 10(a) 展示了测量球形压电变压器性能的实验平台<sup>[49]</sup>: 采用 RIGOL DG1022U 函数发生器提供激励信号, 并利用两台 Agilent 34401-A 数字万用表分别监测输入与输出电压. 图 10(b) 和图 10(c) 分别对比了 SPCT 电压增益与功率增益的理论分析、数值模拟及实验测量结果<sup>[49]</sup>. 在实验环节, 函数发生器的单频信号固定为  $71596\ \text{Hz}$ , 负载电阻设定为  $300\ \Omega$ ; 作为对比, 理论计算与数值模拟得出的谐振频率分别  $74516\ \text{Hz}$  和  $75453\ \text{Hz}$ . 实验结果表明, 电压增益随负载电阻增大而增速放缓并最终趋于饱和; 功率增益则在负载为  $125\ \Omega$  时达到峰值, 整体实测趋势与理论和模拟结果高度吻合.

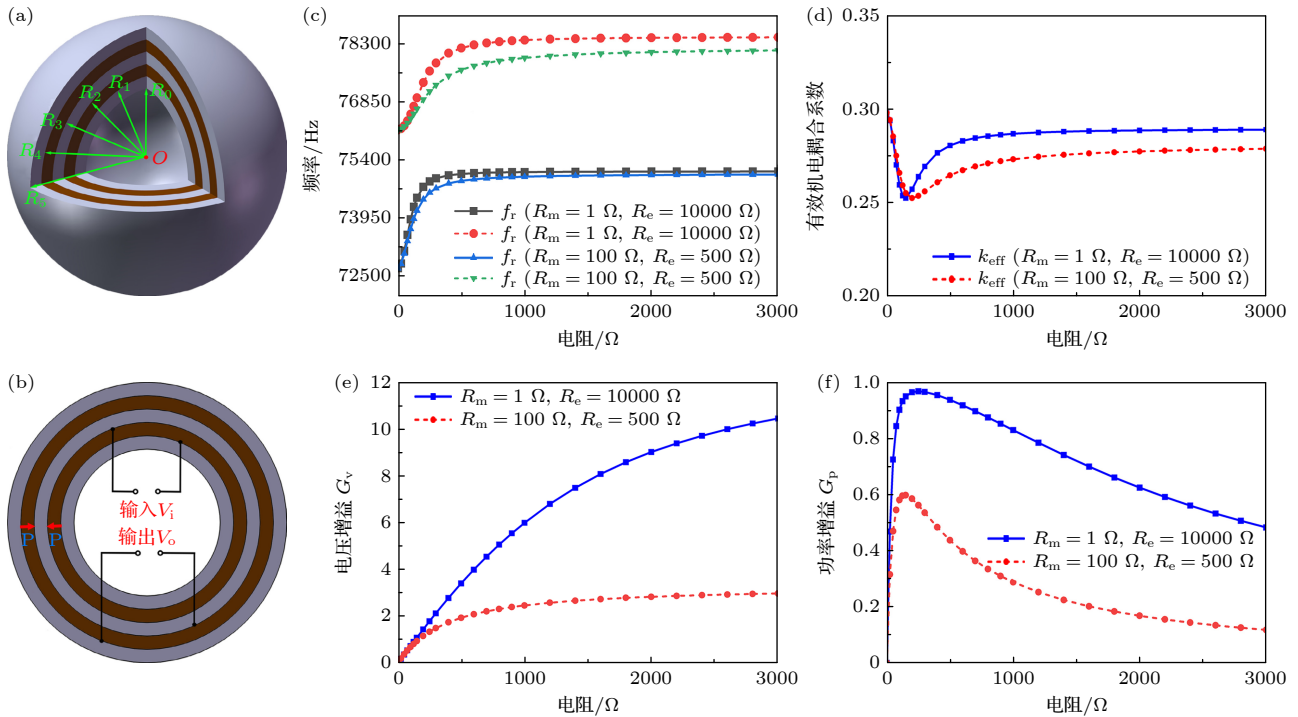


图 9 (a) SPCT 结构示意图<sup>[49]</sup>; (b) 输入、输出方向相反极化的球形压电陶瓷壳截面视图中的工作电路<sup>[49]</sup>; (c) 负载电阻对 SPCT 共振和反共振频率的影响<sup>[49]</sup>; (d) 负载电阻对 SPCT 有效机电耦合系数的影响<sup>[49]</sup>; (e) 负载电阻对 SPCT 电压增益的影响<sup>[49]</sup>; (f) 负载电阻对 SPCT 功率增益的影响<sup>[49]</sup>

Fig. 9. (a) Schematic diagram of the SPCT structure<sup>[49]</sup>; (b) working circuit in the cross-sectional view of the spherical piezoelectric ceramic shell with opposite polarized input and output directions<sup>[49]</sup>; (c) the influence of the load resistance on the resonance and anti-resonance frequencies of SPCT<sup>[49]</sup>; (d) the influence of the load resistance on the effective electromechanical coupling coefficient of SPCT<sup>[49]</sup>; (e) the influence of the load resistance on the voltage gain of SPCT<sup>[49]</sup>; (f) the influence of the load resistance on the power gain of SPCT<sup>[49]</sup>.

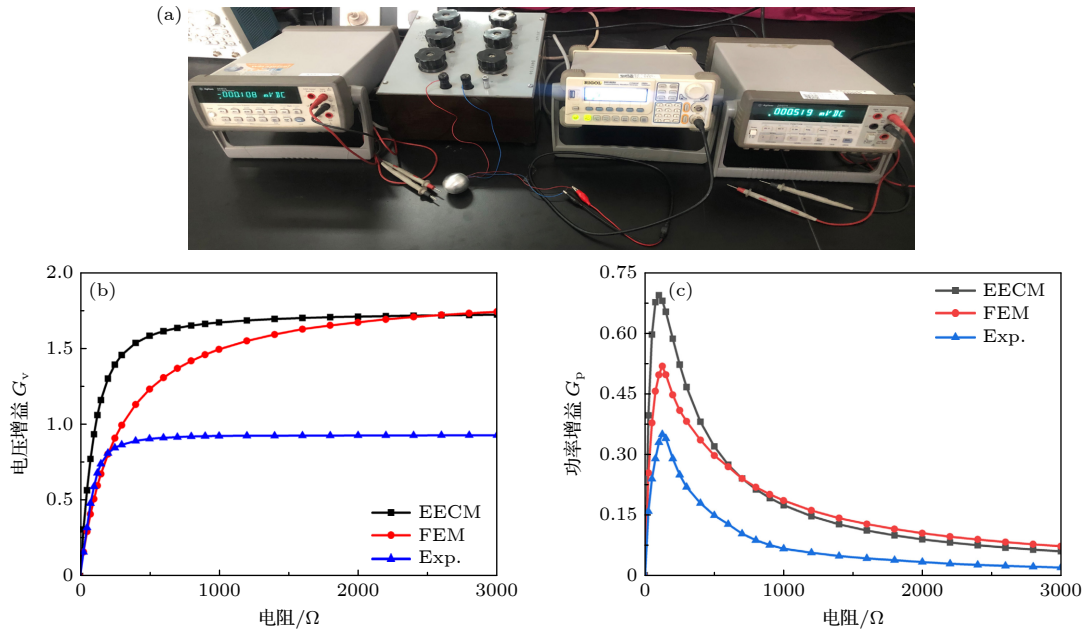


图 10 (a) 测量电压增益的实验装置<sup>[49]</sup>; (b) 电压增益<sup>[49]</sup>; (c) 功率增益<sup>[49]</sup>

Fig. 10. (a) Experimental setup for measuring voltage gain<sup>[49]</sup>; (b) voltage gain<sup>[49]</sup>; (c) power Gain<sup>[49]</sup>.

## 5 结 论

本文对近几十年来压电球形换能器及压电变压器的基本理论及相关研究进展进行了综述,并系统地介绍了本研究组近年来在球形压电超声换能器及球形压电变压器方面的工作.针对传统球形压电换能器声强受限、阻抗失配及特性固化等瓶颈,本课题组提出了四种球形换能器结构及一种新型球形压电变压器.级联式与叠堆式结构大幅提升了功率容量与能量转换效率,其中叠堆式等效阻抗较传统结构降低 84%,径向位移提升 1.26 倍.频率可调式设计通过外接电学负载实现了 73—76 kHz 范围内的稳定灵活调频.1-3-2 型复合材料换能器显著优化了水下的声辐射特性与声阻抗匹配.球形压电变压器实现了升压与降压的双向输出,为便携式设备与无线电能传输提供了新方案.面对下一代大功率、宽频带及极端环境应用需求,球形压电换能器的未来发展应跳出纯力学结构的改良,向智能化和微纳化方向演进.在后续的研究中,球形换能器将向着“感知-计算-驱动”一体化系统发展,这类器件在水下声通信、医学超声以及结构健康监测领域等领域具有潜在的应用价值.

## 参考文献

[1] Lin S Y 2009 *Physics* **38** 141 (in Chinese) [林书玉 2009 物理 **38** 141]

[2] Cheng J C, Li X D, Yang J 2021 *Current Status and Future Development Trends of Acoustics* (Beijing: Science Press) pp280–283 (in Chinese) [程建春, 李晓东, 杨军 2021 声学学科现状以及未来发展趋势 (北京: 科学出版社) 第 280—283 页]

[3] Li J, Dong X, Zhang G, Guo Z, Zhang G, Shi C 2021 *IEEE Access* **9** 10951

[4] Cui Z, Bai X 2021 *Ultrason. Sonochem.* **70** 105309

[5] Xu B, Azam S R, Feng M, Wu B, Yan W, Zhou C, Ma H 2021 *Ultrason. Sonochem.* **81** 105855

[6] Villegas I F, Moser L, Yousefpour A, Mitschang P, Bersee H E 2013 *J. Thermoplast. Compos. Mater.* **26** 1007

[7] Wagner G, Balle F, Eifler D 2012 *JOM* **64** 401

[8] Kumar S, Wu C S, Padhy G K, Ding W 2017 *J. Manuf. Process.* **26** 295

[9] Yang Z, Zhu L, Zhang G, Ni C, Lin B 2020 *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **156** 103594

[10] Zhou H L, Zhang J F, Yu D W, Feng P F, Wu Z J, Cai W C 2019 *Adv. Mech. Eng.* **11** 1

[11] Hadizade A, Kamali S H, Moallem M 2023 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **72** 1

[12] Lin S Y 2008 *J. Shaanxi Normal Univ. (Nat. Sci. Ed.)* **36** 26 (in Chinese) [林书玉 2008 陕西师范大学学报 (自然科学版) **36** 26]

[13] Yao Y, Pan Y, Liu S 2020 *Ultrason. Sonochem.* **62** 104722

[14] Harvey G, Gachagan A, Mutasa T 2014 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **61** 481

[15] Gallego-Juárez J A, Rodríguez G, Acosta V, Riera E 2010 *Ultrason. Sonochem.* **17** 953

[16] Ranz-Guerra C, Ruiz-Aguirre R D 1975 *J. Acoust. Soc. Am.* **58** 494

[17] Qiu H, Chen M, Li F 2022 *Ultrasonics* **124** 106731

[18] Lin S Y, Xu C 2008 *Smart Mater. Struct.* **17** 065008

[19] Li G, Qu J, Xu L, Zhang X, Gao X 2022 *Ultrasonics* **121** 106683

[20] Lin S 2006 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **53** 1671

[21] Lin S 2007 *J. Sound Vib.* **306** 192

- [22] Lin S 2007 *Ultrasonics* **46** 51
- [23] Lin S, Fu Z, Zhang X, Wang Y, Hu J 2013 *Smart Mater. Struct.* **22** 015005
- [24] Lin S Y 2005 *Appl. Acoust.* **24** 140 (in Chinese) [林书玉 2005 *应用声学* **24** 140]
- [25] Al-Budairi H, Lucas M, Harkness P 2013 *Sens. Actuator, A* **198** 99
- [26] Chen W Q, Wang L Z, Lu Y 2002 *J. Sound Vib.* **251** 103
- [27] Chen W Q 2001 *J. Acoust. Soc. Am.* **109** 41
- [28] Hasheminejad S M, Mojahed A 2016 *Wave Motion* **62** 1
- [29] Aronov B, Brown D A, Yan X, Bachand C L 2011 *J. Acoust. Soc. Am.* **130** 753
- [30] George J, Ebenezer D D, Bhattacharyya S K 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **128** 1712
- [31] Diab D, Lefebvre F, Nassar G, Smagin N, Isber S, El Omar F, Naja A 2019 *Rev. Sci. Instrum.* **90** 075005
- [32] Li X F, Peng X L, Lee K Y 2010 *Smart Mater. Struct.* **19** 035010
- [33] Sadeghpour S, Meyers S, Kruth J P, Vleugels J, Kraft M, Puers R 2019 *Sensors* **19** 757
- [34] Kong Q, Fan S, Mo Y L, Song G 2017 *Smart Mater. Struct.* **26** 095051
- [35] Wang L, Qin L, Li W, Zhang B, Lu Y, Li G 2015 *Ceram. Int.* **41** S856
- [36] Wang S, Lin S 2020 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **68** 760
- [37] Wang S, Chen C, Hu L Q, Lin S 2022 *J. Acoust. Soc. Am.* **152** 193
- [38] Kim J O, Lee J G, Chun H Y 2005 *Ultrasonics* **43** 531
- [39] Qin L, Wang J, Liu D, Tang L, Song G 2019 *Smart Struct. Syst.* **24** 435
- [40] Li X L, Teng C, Zhou Y 2020 *Audio Eng.* **44** 78 (in Chinese) [李晓雷, 滕超, 周瑜 2020 *电声技术* **44** 78]
- [41] Zhang Y, Wang L, Qin L, Zhong C, Hao S 2020 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **68** 1791
- [42] Zhang X, Li H G, Zhao X, Xiong H L, Meng G 2023 *Acta Acust.* **48** 872 (in Chinese) [张希, 李鸿光, 赵颀, 熊翰林, 孟光 2023 *声学学报* **48** 872]
- [43] Zhang X, Li H, Xiong H, Sun S, Ling Z, Shen G, Meng G 2024 *Sens. Actuator, A* **373** 115393
- [44] Zhang H D, Xu L, Li J, Li F M, Zhao P, Wang W Z, Qu M L, Chen C, Yao L 2025 *Ultrasonics* **150** 107597
- [45] Tang Y F, Lin S Y 2023 *J. Acoust. Soc. Am.* **154** 1838
- [46] Tang Y F, Chen C, Tian H, Lin S Y 2024 *Smart Mater. Struct.* **33** 035002
- [47] Tang Y F, Lin S Y 2024 *Ultrasonics* **136** 107155
- [48] Tang Y F, Chen C, Wang C H, Lin S Y 2025 *Mech. Syst. Sig. Process.* **224** 111996
- [49] Tang Y F, Lin S Y 2025 *IEEE Trans. Power Electron.* **40** 18489

## REVIEW

Research progress on the new type of spherical piezoelectric ultrasonic transducer and transformer<sup>\*</sup>REN Liuna    TANG Yifan<sup>†</sup>    LIN Shuyu<sup>‡</sup>*(Shaanxi Provincial Key Laboratory of Ultrasound, School of Physics and Information Technology,**Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)*

( Received 8 April 2026; revised manuscript received 11 May 2026 )

## Abstract

As a core component in ultrasonic vibration systems, piezoelectric transducers play a crucial role in various application scenarios. Although spherical transducers have high application value in fields such as underwater acoustics and structural health monitoring due to their perfect three-dimensional omnidirectional radiation characteristics, traditional structures generally face many technical bottlenecks: limited sound intensity and power capacity, fixed and unadjustable electromechanical characteristics after the device is formed, and severe acoustic impedance mismatch with the radiation medium. To address these limitations, this paper systematically reviews the latest research progress on novel spherical piezoelectric ultrasonic transducers and piezoelectric transformers, focusing on representative structural innovations. First, a cascaded spherical transducer structure is introduced, which alternately composites metal spherical shells and piezoelectric ceramic spherical shells in radial space, effectively increasing the total effective volume of piezoelectric active materials and achieving high-intensity, wideband, and perfect three-dimensional omnidirectional acoustic radiation. Second, a stacked spherical transducer is introduced, which radially stacks two piezoelectric ceramic spherical shells with opposite polarization directions and sandwiches them between metal layers to overcome the excitation difficulty of thick-walled piezoelectric ceramics; compared with the traditional structure, this configuration drastically reduces the first-order equivalent electrical impedance of the system by 84%, while increasing the radial vibration displacement to 1.26 times that of the traditional sandwich spherical transducer. Third, an electromechanically tunable spherical transducer is introduced. Without changing the basic geometric dimensions of the device, the design dynamically reconstructs the total equivalent impedance of the system through external electrical loads such as resistors, inductors, and capacitors, successfully achieving a wide range of frequency tuning capability and significantly broadening the operating bandwidth of the transducer. Fourth, a spherical transducer based on 1-3-2 type piezoelectric composite material is introduced. This design effectively solves the impedance mismatch bottleneck by introducing low-acoustic-impedance high-molecular polymers into the spherical shell structure, which not only effectively suppresses interference modes but also significantly improves the acoustic radiation efficiency of the system. Fifth, a novel spherical piezoelectric ceramic transformer operating in the radial vibration mode is introduced, which fills the gap in the research field of spherical transformers by realizing bidirectional voltage conversion with both step-up and step-down outputs and optimized power gain. Ultimately, this review demonstrates that these structural innovations effectively break through the performance limits of traditional piezoelectric ultrasonic devices; in addition, this paper also outlines the future development trend of piezoelectric transducers evolving toward intelligent “sensing-computing-driving” integrated systems and micro-nano structures, providing a solid theoretical foundation and technical paradigm for the innovation and development of a new generation of advanced ultrasonic vibration systems.

**Keywords:** spherical piezoelectric ultrasonic transducer, cascaded structure, adjustable electromechanical performance, 1-3-2 piezoelectric composite material, bidirectional voltage conversion

DOI: [10.7498/aps.75.20260489](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260489)CSTR: [32037.14.aps.75.20260489](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260489)

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12574498, 12404532).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [tangyifan@snnu.edu.cn](mailto:tangyifan@snnu.edu.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [sylin@snnu.edu.cn](mailto:sylin@snnu.edu.cn)

## 新型球形压电超声换能器及变压器的研究进展

任刘娜 唐一璠 林书玉

### Research progress on the new type of spherical piezoelectric ultrasonic transducer and transformer

REN Liuna TANG Yifan LIN Shuyu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 181001 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260489

CSTR: 32037.14.aps.75.20260489

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260489>

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

#### 柱状和声学表面结构的压电超声换能器

Piezoelectric ultrasonic transducers with columnar and acoustic surface structures

物理学报. 2025, 74(21): 214304 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250901>

#### 表面与缺陷调控型大功率压电超声换能器

Surface and defect controlled high power piezoelectric ultrasonic transducers

物理学报. 2025, 74(9): 094301 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250047>

#### 织构(Ba, Ca)(Zr, Ti)O<sub>3</sub>陶瓷全矩阵机电性能及超声换能器应用

Full matrix electromechanical properties and applications to ultrasonic transducer of textured (Ba, Ca)(Zr, Ti)O<sub>3</sub> ceramics

物理学报. 2025, 74(18): 187701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250835>

#### 管柱型近周期声子晶体点缺陷结构的大尺寸压电超声换能器

Large-scale piezoelectric ultrasonic transducers with tubular near-period phononic crystal point defect structure

物理学报. 2023, 72(9): 094301 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230195>

#### 高温压电振动传感器及其压电材料研究进展

Research progress of high-temperature piezoelectric vibration sensors and piezoelectric materials

物理学报. 2025, 74(2): 027702 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20240906>

#### 基于传输矩阵法的任意变厚度环型压电超声换能器

Arbitrary variable thickness annular piezoelectric ultrasonic transducer based on transfer matrix method

物理学报. 2023, 72(5): 054304 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222110>