

共聚焦超声换能器的声场优化与粒子捕获*

狄苗¹⁾ 何湘¹⁾ 刘明智¹⁾ 闫善善¹⁾ 魏龙龙¹⁾
田野¹⁾ 尹冠军^{1)2)†} 郭建中¹⁾

1) (陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710119)

2) (陕西师范大学现代教学技术教育部重点实验室, 西安 710062)

(2022年7月30日收到; 2022年9月22日收到修改稿)

超声悬浮被广泛应用于多个领域, 目前主要有驻波式和相控阵式悬浮系统. 基于共焦点排列的聚焦换能器结构, 本研究提出了一种单边式超声悬浮系统. 其基本原理是利用反相激励成对聚焦换能器在空间构建具有势阱结构的特定声场, 实现微粒的捕获与悬浮. 针对4个共焦点排列的聚焦换能器, 基于有限元仿真研究了换能器轴夹角及激励相位模式对声场分布的影响; 利用实验演示了系统的粒子捕获效果, 验证了其势阱分布情况. 结果表明, 换能器轴线与结构中轴线夹角为 45° 时, 势阱强度最高; 换能器的激励相位分别为 $0, 0, \pi, \pi$ 时, 声场中存在1处主势阱、2处次级势阱, 可以捕获3处粒子团; 换能器的激励相位分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 时, 声场中仅存在1处势阱, 只可捕获1处粒子团. 该系统具有成本低、自由度高、稳定性强、操作便捷的优点, 且能够实现单个位置或多个位置粒子团的捕获与悬浮, 可以用于流体中高密度物体操控.

关键词: 超声悬浮, 声场势阱, 聚焦换能器, 粒子捕获

PACS: 43.25.Uv, 43.38.Hz, 43.35.+d

DOI: 10.7498/aps.72.20221547

1 引言

利用超声波的非线性效应产生声辐射力^[1], 可以对流体介质中的物体进行无接触式悬浮和操控^[2]. 相较于其他物理悬浮技术, 超声悬浮技术无需对被操控微粒进行物理、化学性质修饰, 避免了对微粒的污染和损伤. 因而在细胞操控^[3,4]、材料晶体学^[5,6]、液滴动力学^[7,8]、微量生物化学研究^[9-11]、物质无容器处理^[12]等众多领域展示出了重要的应用潜力^[13,14].

目前成熟的超声悬浮技术主要有驻波式^[14]和相控阵式悬浮系统^[15-17]. 驻波式悬浮系统由超声发射端和反射端构成, 通过在空间形成驻波场使物

体悬浮于波节附近. 驻波式悬浮系统具有结构简单、操作方便的优势^[18], 但其非轴向超声辐射力小、稳定性差、空间自由度低, 且很难实现对粒子的灵活操控. 相控阵式悬浮系统利用特定相位序列激励超声换能器阵列, 在空间形成包含势阱的特殊声场^[16,18], 使物体悬浮于势阱位置. 且通过调整激励信号相位, 可以实现微粒的移动和旋转^[13]. 相控阵式悬浮系统具有空间自由度高、非轴向悬浮稳定性强的优势, 可以实现对粒子的灵活操控, 但其操控系统复杂、制作成本高^[19]. 综上, 兼具成本低、操控便捷、稳定性强、自由度高的单边式^[20]超声悬浮系统有利于拓展其在各领域的应用范围.

结合驻波式和相控阵式悬浮系统的优势, 本文研究了基于共焦点聚焦换能器结构的单边式超声

* 国家自然科学基金(批准号: 12004237, 11727813, 12034005, 11904221)、中国博士后创新人才支持计划(批准号: BX20190193)、中国博士后科学基金资助项目(批准号: 2020M683416, 2019M663612)和陕西省科学技术协会青年人才托举计划项目(批准号: 20220523)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yinchamp@snnu.edu.cn

悬浮系统. 通过反相位激励共焦点排列的聚焦超声换能器组, 使反相的聚焦球面波在几何焦点处发生相消干涉, 产生稳定的零声压点 (声势阱), 实现微粒捕获与悬浮. 首先, 基于惠更斯声场叠加原理, 本文从理论角度论证了该系统的可行性. 然后, 基于有限元仿真研究了换能器轴与结构中心轴夹角以及激励相位模式对声场分布的影响, 分析了不同夹角下的主势阱峰值变化情况; 并根据两种相位模式下声场的声强分布和声强等值面分析了势阱的分布情况. 最后, 利用实验演示了该悬浮系统在两种激励相位模式下的粒子捕获效果, 对比仿真结果验证了其势阱分布情况.

2 理论与仿真研究

2.1 共焦点排列聚焦换能器的势阱构建理论

焦距为 R , 焦点为坐标原点 O 的聚焦超声换能器的面积微元为

$$dS = 2\pi(R \sin \alpha) \cdot R d\alpha, \quad (1)$$

其中 α 为球冠面母线与轴线的夹角. 由点声源声场公式^[15]可知, 超声换能器上每个面积微元对距离 R 处的声压贡献为

$$p_i = \frac{A}{R} e^{j(\omega t - kR)}. \quad (2)$$

设超声换能器母线与中心轴的夹角 $\alpha = \pi/6$, 每个超声换能器在 O 点的叠加总声压为

$$P = \int_0^{\pi/6} 2\pi R \sin \alpha A e^{j(\omega t - kR)} d\alpha. \quad (3)$$

图 1 是共焦点排列的两个完全相同的聚焦超声换能器, β_1 与 β_2 为两个超声换能器中心轴与 z 轴 (结构中心轴) 夹角, 当其辐射声压振幅相等 $A_1 = A_2 = A$, 相位相反 $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$ 时, 由惠更斯叠加原理^[21]可知, 两个超声换能器在 O 点处叠加

总声压为

$$P = (2 - \sqrt{3})\pi RA \left(e^{j(\omega t - kR + \varphi_1)} + e^{j(\omega t - kR + \varphi_2)} \right) = 0. \quad (4)$$

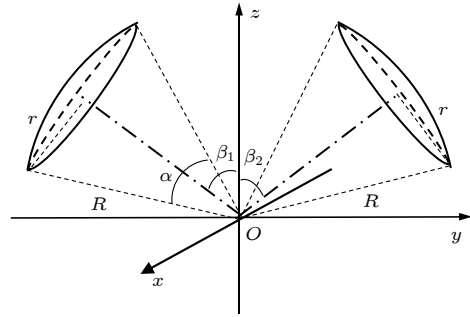


图 1 两个共焦点聚焦换能器结构

Fig. 1. Structure of two confocal ultrasound transducers.

2.2 仿真研究

针对 4 个共焦点排列的球冠状聚焦换能器组 (见图 2(a)), 本文基于有限元仿真研究了换能器轴与结构中心轴夹角 β 和激励相位模式对其声场分布的影响. 模型中 4 个换能器完全相同, 向焦点辐射聚焦球面波, 焦距 $R = 10$ mm, 声波频率为 2 MHz, 声压振幅为 0.1 MPa; 仿真区域边界设置为辐射边界, 计算网格采用自由四面体形状, 最大单元格尺寸为 1/6 波长. 图 2(b) 为两相位激励模式, 4 个换能器的激励相位分别为 $0, 0, \pi, \pi$; 图 2(c) 为四相位激励模式, 4 个换能器的激励相位分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$.

2.2.1 不同换能器夹角的势阱强度变化

设置换能器截面半径为 $r = 3$ mm, 仿真了换能器中心轴与结构中心轴夹角 (β) 在 $30^\circ - 70^\circ$ 范围内的声场分布情况. 基于仿真结果得到不同 β 情况下的主势阱峰值, 如图 3 所示. 主势阱声压级峰值随夹角 β 先增大后减小, 在 45° 达到峰值.

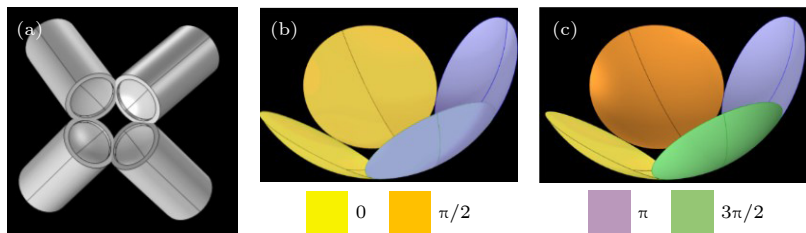


图 2 数值仿真的结构模型和相位模式 (a) 结构模型图; (b) 两相位激励模式; (c) 四相位激励模式

Fig. 2. Structure model and phase mode in the numerical simulations: (a) Structure model; (b) two-phase excitation model; (c) four-phase excitation model.

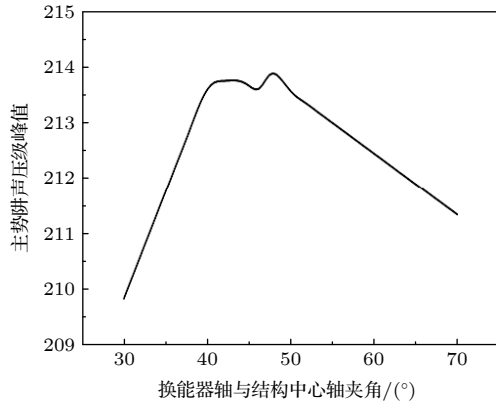


图 3 主势阱声压级峰值随换能器夹角变化图
Fig. 3. The relationship between the peak value of sound pressure level in the primary potential well and the angle of the transducer.

2.2.2 不同激励相位模式下的声场分布

根据 β 对势阱强度的影响, 设置换能器中心轴与结构中心轴夹角为 45° , 各换能器截面半径 $r = 5$ mm, 其他参数保持不变.

(1) 两相位激励模式

仿真得到两相位激励模式下的声场分布情况, 图 4 为以几何焦点为中心的声强分布截面图, 图 5

为不同大小的声强等值面. 图 4 显示声场存在 3 组明显的势阱结构, 中心位置处的势阱声压梯度较强, 两侧的两个势阱声压梯度较弱; 从 x 正方向观察, 等值面 ($I_s = 1.31$ kW/m²) 显示中心位置处 (白色实线圈) 的主势阱形状呈现为一对纺锤体, 如图 5(a) 所示; 从 x 正方向观察, 等值面 ($I_s = 0.53$ kW/m²) 显示存在次级势阱, 其形状呈现为 X 状, 如图 5(b) 所示; 从 y 正方向观察, 等值面 ($I_s = 0.53$ kW/m²) 显示中心位置两侧 (白色虚线圈) 共存在两处次级势阱, 如图 5(c) 所示.

2) 四相位激励模式

其他参数保持不变, 只改变相位激励模式, 得到四相位激励模式下的声场分布情况, 图 6 为以几何焦点为中心的声强分布截面图; 图 7 为不同大小的声强等值面. 图 6 显示只有中心位置声强为零, 且声场分布绕 z 轴中心对称; 从 x 正方向观察, 从 x 正方向观察, 声强等值面 ($I_s = 3.0$ kW/m²) 显示中心位置处 (白色实线圈) 的势阱形状呈现为 4 个大小相同的纺锤体, 如图 7(a) 所示; 分别从 y 和 z 正方向观察, 声强等值面 ($I_s = 1.2$ kW/m²) 相对中心位置呈包围状, 如图 7(b) 和 (c) 所示.

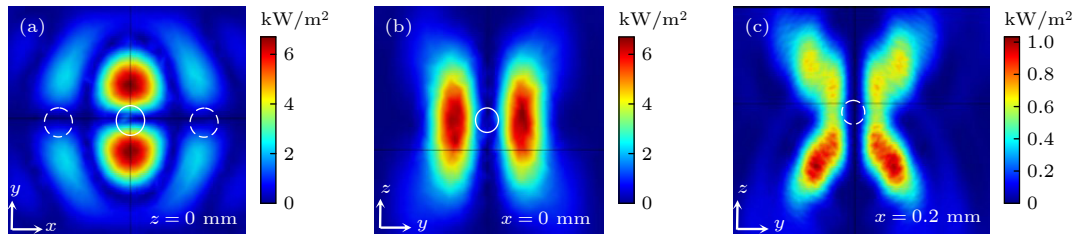


图 4 两相位模式的声强切面图 (白色实线圈为主势阱位置, 白色虚线圈为次级势阱位置) (a) x - y 截面 ($z = 0$ mm); (b) y - z 截面 (主势阱) ($x = 0$ mm); (c) y - z 截面 (次级势阱) ($x = 0.2$ mm)

Fig. 4. Sound intensity of the two-phase model (The white solid coil is the main potential well position, and the white dashed coil is the secondary potential well position): (a) x - y section ($z = 0$ mm); (b) y - z section (the primary potential well) ($x = 0$ mm); (c) y - z section (the secondary potential well) ($x = 0.2$ mm).

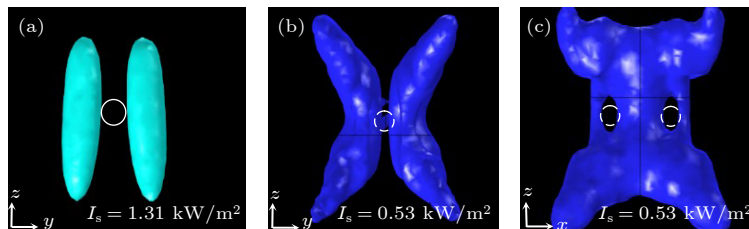


图 5 两相位模式的声强等值面 (白色实线圈为主势阱位置, 白色虚线圈为次级势阱位置) (a) $I_s = 1.31$ kW/m²; (b) $I_s = 0.53$ kW/m²; (c) $I_s = 0.53$ kW/m²

Fig. 5. Equipotential surface of sound intensity of the two-phase model (The white solid coil is the main potential well, and the white dashed coil is the secondary potential well.): (a) $I_s = 1.31$ kW/m²; (b) $I_s = 0.53$ kW/m²; (c) $I_s = 0.53$ kW/m².

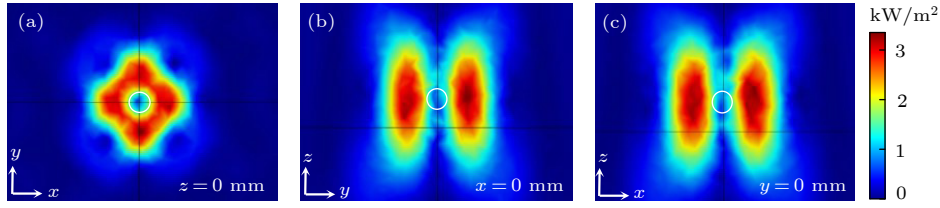


图 6 四相位模式的声强切面图 (白色实线圈为主势阱位置) (a) x - y 截面 ($z = 0$ mm); (b) y - z 截面 ($x = 0$ mm); (c) x - z 截面 ($y = 0$ mm)
 Fig. 6. Sound intensity of the four-phase model (The white solid coil is the main potential well): (a) x - y section ($z = 0$ mm); (b) y - z section ($x = 0$ mm); (c) x - z section ($y = 0$ mm).

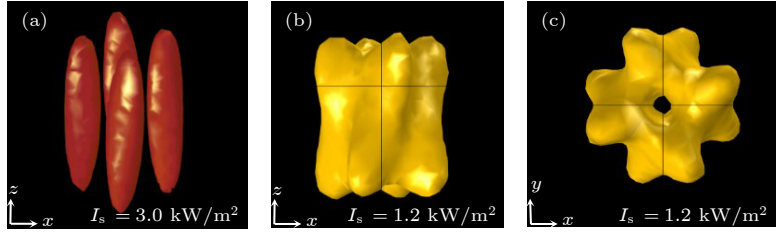


图 7 四相位模式的声强等值面图 (a) $I_s = 3.0$ kW/m²; (b) $I_s = 1.2$ kW/m²; (c) $I_s = 1.2$ kW/m²

Fig. 7. Equipotential surface of sound intensity of the four-phase model: (a) $I_s = 3.0$ kW/m²; (b) $I_s = 1.2$ kW/m²; (c) $I_s = 1.2$ kW/m².

3 实验研究

为了展示共焦点聚焦换能器结构的微粒捕获与悬浮效果, 验证其声势阱分布特性, 本研究搭建了一套试验系统, 如图 8 所示. 利用球冠状压电陶瓷片 ($r = 5$ mm, $R = 10$ mm, 基频谐振频率为 2 MHz) 制作了共聚焦换能器结构, 换能器中心轴与结构中心轴的夹角为 45°. 信号发生器 (T3AEG120, TELEDYNE) 输出 4 列频率相同、相位不同的电信号, 经功率放大器 (ATA-43151, Aigtek) 放大, 驱动对应的 4 个聚焦换能器. 同时, 用示波器 (HDO4104A-MS, TELEDYNE) 监测驱动换能器的信号电压和相位.

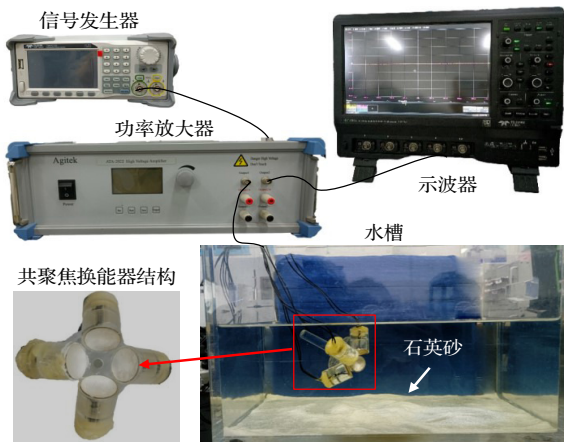


图 8 实验设置

Fig. 8. Experimental settings.

用玻璃棒搅拌水槽中的石英砂 (密度 2.56×10^3 kg/m³, 粒径 0.2 mm), 产生悬浊液后停止搅拌; 然后, 观察系统捕获的石英砂粒子团分布情况; 最后, 快速晃动共聚焦换能器结构, 观察各位置粒子团的稳定性. 两相位激励模式下捕获了 3 处粒子团, 主势阱位置处粒子团的体积较大, 两侧悬浮的粒子团较小且容易脱落, 如图 9(a) 所示. 四相位激励模式下只在焦点位置捕获了 1 处粒子团, 其悬浮稳定性高于两相位激励模式主势阱位置的粒子团, 在快速晃动过程中不易脱落, 如图 9(b) 所示.

4 分析讨论

4.1 夹角对势阱的影响

随换能器中心轴与结构中心轴夹角的增大, 主势阱声压级峰值呈现先增大后减小的趋势, 且在 45°附近达到极值 (图 3). 结果表明当 $\beta = 45^\circ$ 时势阱强度最大, 能够保证最佳的粒子捕获效果. 因此, 在设计共聚焦换能器悬浮系统时, 应选择换能器中心轴与结构中心轴夹角约为 45°.

4.2 激励相位模式对势阱的影响

1) 两相位激励模式

两相位激励模式下, 仿真结果显示声场中存在 3 处势阱 (图 4 和 5), 主势阱强度大于次级势阱, 且主势阱等值面上下对称, 次级势阱等值面上下不

对称; 实验结果显示悬浮系统捕获了 3 处石英砂粒子团 (图 9(a)), 主势阱位置捕获的粒子团尺寸大于次级势阱位置处的粒子团, 在捕获粒子团后的晃动过程中, 主势阱位置的粒子团稳定, 次级势阱位置处的粒子团较易脱落, 仿真与实验结果均表明主势阱强度大于次级势阱强度。

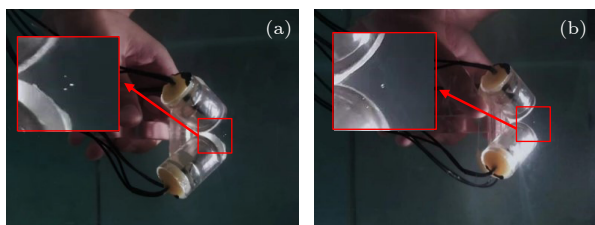


图 9 实验结果图 (a) 两相位模式结果; (b) 四相位模式结果

Fig. 9. Picture of experimental results: (a) Result of two-phase model; (b) result of four-phase model.

(2) 四相位激励模式

四相位激励模式下, 仿真结果显示声场中存在 1 处势阱 (图 6 和 7), 其等值面对中心区域呈包围状, 且其声压梯度和相应的势阱强度高于两相位激励模式的主势阱 (图 5(a) 与图 7(a)); 实验结果显示悬浮系统捕获了 1 处石英砂粒子团 (图 9(b)), 在捕获粒子团后的快速晃动过程中, 势阱位置的粒子团非常稳定. 实验中结构能够精确捕获单个粒子团, 与仿真声场中只明显存在一处势阱相符. 在四相位激励模式下, 包围状的声场分布会使势阱范围内的粒子受到向中心的声辐射力, 当粒子有脱离平衡位置向外运动趋势时, 指向势阱中心的声辐射力会充当回复力, 限制粒子运动, 其悬浮稳定性高于两相位激励模式。

5 结 论

本文基于共焦点排列的球冠状聚焦换能器结构设计了一种单边式超声悬浮系统, 研究了换能器排列角度和相位激励模式对其声场分布及悬浮效果的影响. 结果表明, 换能器轴与结构中心轴夹角为 45° 时, 其主势阱强度最高; 两相位激励模式下, 声场中存在 1 处主势阱及 2 处次级势阱, 可以同时捕获 3 个粒子团, 主势阱的强度大于次级势阱, 且粒子团悬浮更稳定; 四相位激励模式下, 声场中只存在 1 处势阱, 只能捕获 1 个粒子团, 其势阱强度

高于两相位激励模式的主势阱, 且粒子团悬浮更稳定. 该单边式悬浮系统能够实现单个或多个位置粒子团捕获, 悬浮稳定性高且驱动电路简单, 可以结合机械臂对流体中高密度物体进行无接触操控。

参考文献

- [1] Stindt A, Andrade M A B, Albrecht M, Adamowski J C, Panne U, Riedel J 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 015
- [2] Brandt E H 1989 *Science* **243** 349
- [3] Li J, Jamieson W D, Dimitriou P, Xu W, Rohde P, Martinac B, Baker M, Drinkwater B W, Castell O K, Barrow D A 2022 *Nat. Commun.* **13** 4125
- [4] Tait A, Glynne-Jones P, Hill A R, Smart D E, Blume C, Hammarstrom B, Fisher A L, Gossel M C, Swindle E J, Hill M, Davies D E 2019 *Sci. Rep.* **9** 9789
- [5] Polychronopoulos S, Memoli G 2020 *Sci. Rep.* **10** 4254
- [6] Morris R H, Dye E R, Axford D, Newton M I, Beale J H, Docker P T 2019 *Sci. Rep.* **9** 12431
- [7] Feng Y T, Ji X L, Zhang Y J, Muhammad M M, Zang D Y 2021 *Sci. Sin-Phys. Mech. Astron.* **5** 147 (in Chinese) [冯乙婷, 姬晓亮, 张永建, Muhammad M M, 臧渡洋 2021 中国科学: 物理学 力学 天文学 **5** 147]
- [8] Zhang Z H, Liu K Q, Di W L, Chen Z, Zang D Y 2020 *Sci. Sin-Phys. Mech. Astron.* **50** 113 (in Chinese) [张泽辉, 刘康祺, 邸文丽, 陈阵, 臧渡洋 2020 中国科学: 物理学 力学 天文学 **50** 113]
- [9] Kepa M W, Tomizaki T, Sato Y, Ozerov D, Sekiguchi H, Yasuda N, Aoyama K, Skopintsev P, Standfuss J, Cheng R, Hennig M, Tsujino S 2022 *Sci. Rep.* **12** 5349
- [10] Watanabe A, Hasegawa K, Abe Y 2018 *Sci. Rep.* **8** 1
- [11] Wei Y J, Zhang J, Deng S C, Zhang Y J, Yang Y J, Liu S H, Chen H 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 184702 (in Chinese) [魏衍举, 张洁, 邓胜才, 张亚杰, 杨亚晶, 刘圣华, 陈昊 2020 物理学报 **69** 184702]
- [12] Foresti D, Nabavi M, Klingauf M, Ferrari A, Poulikakos D 2013 *PNAS* **110** 12549
- [13] Qin X P, Geng D L, Hong Z Y, Wei B B 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 124301 (in Chinese) [秦修培, 耿德路, 洪振宇, 魏炳波 2017 物理学报 **66** 124301]
- [14] Hong Z Y, Lyu Y J, Xie W J and Wei B B 2006 *Chin. Sci. Bull.* **1** 2714 (in Chinese) [洪振宇, 吕勇军, 解文军, 魏炳波 2006 科学通报 **1** 2714]
- [15] Ruan Y D, Liang X 2020 *Sci. Sinica Tec.* **50** 1226 (in Chinese) [阮永都, 梁旭 2020 中国科学: 技术科学 **50** 1226]
- [16] Marzo Pérez A, Seah S A, Drinkwater B W, Sahoo D R, Long B, Subramanian S 2015 *Nat. Commun.* **6** 8661
- [17] Fushimi T, Yamamoto K, Ochiai Y 2021 *Sci. Rep.* **11** 12678
- [18] Fan H R, Yin G J, Li P, Guo J Z 2018 *Acta Acust.* **43** 364 (in Chinese) [范皓然, 尹冠军, 李盼, 郭建中 2018 声学学报 **43** 364]
- [19] Roslyakov S, Emelyanov F, Erzakova N, Sivkov E 2019 *IOP Conference* **516** 012033
- [20] Wei L L, Yin G J, Han H, Guo J Z 2021 *International Ultrasonics Symposium (IUS)* Xi'an, China, November 16, 2021 pp1-4
- [21] Zhu Z M, Gong X F, Du G H 2012 *Fundamentals of Acoustics* (Vol. 3) (Nanjing: Nanjing University Press) pp211-220 (in Chinese) [朱哲民, 龚秀芬, 杜功焕 2012 声学基础(第三版) (南京: 南京大学出版社) 第211—220页]

Sound field optimization and particle trapping of confocal ultrasonic transducer*

Di Miao¹⁾ He Xiang¹⁾ Liu Ming-Zhi¹⁾ Yan Shan-Shan¹⁾ Wei Long-Long¹⁾
Tian Ye¹⁾ Yin Guan-Jun^{1)2)†} Guo Jian-Zhong¹⁾

¹⁾ (*School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China*)

²⁾ (*Key Laboratory of Modern Teaching Technology of Ministry of Education, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China*)

(Received 30 July 2022; revised manuscript received 22 September 2022)

Abstract

The nonlinear effect of high-intensity sound waves produces the acoustic radiation force (ARF), which are used for acoustic levitation and manipulation practical. With no special requirement for the physical and chemical properties of the controlled objects, acoustic levitation owns a promising application prospect. The common levitation scheme includes the standing-wave system and phased-array levitation system. The standing-wave system has poor performance in the aspects of the degree of spatial freedom, the ARF along the non-axial direction, and the levitation stability. The phased-array system requires a complex control system and a high production cost. Here, we propose a single-side acoustic levitation system based on the paired confocal focused transducers. By driving the transducer pairs with reverse phase mode, two anti-phase focused spherical waves interfere with each other, resulting in constant sound pressure of 0 Pa at the focus. The resulting potential well can achieve stable particle capturing and levitating. First, we verified the theoretical feasibility of the system according to Huygens' principle. Then, using the finite element method, we analyzed the influences of structural and driving parameters on the sound field distribution, such as the angle between the transducer axis and the central axis of the structure and the excitation phase modes. Finally, we demonstrated the particle trappings under two kinds of excitation phase modes of the levitation system experimentally. The results show that, 1) the intensity of the dominating potential well reaches a strongest value when the structural angle is 45° ; 2) as the excitation phases are $0, 0, \pi$, and π , the sound field owns three potential wells which can capture three clusters of quartz sands, the primary potential well is stronger than the secondary one; 3) as the excitation phases are $0, \pi/2, \pi$, and $3\pi/2$, the sound field owns one potential well and captures one cluster of quartz sands. The isosurface of wave intensity around the potential well is more comprehensive than in the previous phase mode. The four-phase excitation improves the levitation stability better. The proposed levitation scheme can realize stable single- or multi-position capture of high-density objects in the fluid. Moreover, it has the advantages of low cost and a high degree of freedom.

Keywords: acoustic levitation, acoustic potential well, focused transducer, particle capture

PACS: 43.25.Uv, 43.38.Hz, 43.35.+d

DOI: 10.7498/aps.72.20221547

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12004237, 11727813, 12034005, 11904221), the China National Postdoctoral Program for Innovative Talents (Grant No. BX20190193), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 2020M683416, 2019M663612) and the Young Talent Fund of Association for Science and Technology in Shaanxi, China (Grant No. 20220523).

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



共聚焦超声换能器的声场优化与粒子捕获

狄苗 何湘 刘明智 闫善善 魏龙龙 田野 尹冠军 郭建中

Sound field optimization and particle trapping of confocal ultrasonic transducer

Di Miao He Xiang Liu Ming-Zhi Yan Shan-Shan Wei Long-Long Tian Ye Yin Guan-Jun Guo Jian-Zhong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 014301 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221547

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221547>

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

超声悬浮甲醇液滴的热诱导雾化现象

Phenomenon study on heat induced atomization of acoustic levitated methanol droplet

物理学报. 2020, 69(18): 184702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200562>

基于粒子群算法的超振荡超分辨率聚焦声场设计

Super-resolution acoustic focusing based on the particle swarm optimization of super-oscillation

物理学报. 2022, 71(20): 204304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220898>

基于换能器驱动信号特征的高强度聚焦超声焦域损伤实时监测

Real-time monitoring of high intensity focused ultrasound focal damage based on transducer driving signal

物理学报. 2022, 71(3): 037201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211443>

超声场中空化泡对弹性粒子微流的影响

Effect of micro-bubble in ultrasonic field on microstreaming of elastic particle

物理学报. 2019, 68(24): 244301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191253>

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>

基于聚焦声场模型的光声层析成像时间延迟快速校正反投影方法

Back-projection method with fast time-delay correction for photoacoustic tomography reconstruction based on a focused sound field model

物理学报. 2022, 71(7): 078102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212019>