

# 基于声流耦合场的超声驻波悬浮器声场分析

刘宇超<sup>1</sup>, 龙禹平<sup>1</sup>, 吴昭榕<sup>2</sup>, 李欣瑶<sup>1</sup>, 夏玉<sup>1</sup>, 杨欣<sup>3</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学机械工程学院, 上海

<sup>2</sup>上海大学材料科学与工程学院, 上海

<sup>3</sup>上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

收稿日期: 2024年12月17日; 录用日期: 2025年1月10日; 发布日期: 2025年1月17日

## 摘要

本文基于声流耦合场对超声驻波悬浮器的声场进行了仿真分析, 探讨了驻波声场在液体介质中形成的特性以及其对悬浮颗粒的影响。超声驻波悬浮技术通过压电陶瓷换能器产生的高频声波, 在液体中形成声辐射力与重力相平衡的悬浮现象。通过三维有限元仿真模型, 研究了流体入口设置、流场速度分布和声压的耦合作用, 分析了驻波节点与流体速度低速区域对颗粒悬浮稳定性的影响。仿真结果表明, 声场在液体介质中形成了稳定的驻波结构, 驻波节点区域与低流速区域的重合, 为颗粒的稳定悬浮提供了理想条件。本文的研究验证了液体介质下超声悬浮器的可行性, 为细胞悬浮培养、微粒分离等应用领域提供了重要的理论支持和技术参考。

## 关键词

驻波悬浮, 声流耦合, 细胞悬浮培养, 超声

# Acoustic Field Analysis of Ultrasonic Standing Wave Levator Based on Acoustic Flow Coupling Field

Yuchao Liu<sup>1</sup>, Yuping Long<sup>1</sup>, Zhaorong Wu<sup>2</sup>, Xinyao Li<sup>1</sup>, Yu Xia<sup>1</sup>, Xin Yang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai

<sup>3</sup>School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 17<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jan. 10<sup>th</sup>, 2025; published: Jan. 17<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

In this paper, the sound field of ultrasonic standing wave levator is simulated based on the coupling

文章引用: 刘宇超, 龙禹平, 吴昭榕, 李欣瑶, 夏玉, 杨欣. 基于声流耦合场的超声驻波悬浮器声场分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 610-617. DOI: 10.12677/mos.2025.141057

field of sound flow, and the characteristics of the standing wave sound field in liquid medium and its influence on suspended particles are discussed. The ultrasonic standing wave suspension technique is a kind of suspension phenomenon in which the sound radiation force and gravity are balanced by the high-frequency sound wave generated by the piezoelectric ceramic transducer. The coupling effects of fluid inlet setting, velocity distribution of flow field and sound pressure were studied by three-dimensional finite element simulation model. The effects of standing wave node and low velocity region on particle suspension stability were analyzed. The simulation results show that the sound field forms a stable standing wave structure in the fluid medium, and the coincidence of the standing wave node region and the low-velocity region provides an ideal condition for the stable suspension of particles. This study verifies the feasibility of ultrasonic levator in liquid medium, and provides important theoretical support and technical reference for cell suspension culture, particle separation and other applications.

## Keywords

Standing Wave Suspension, Acoustic Flow Coupling, Cell Suspension Culture, Ultrasound

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

超声驻波悬浮技术利用高强度超声波在声场中产生的声辐射力与重力相平衡,使物体悬浮。该技术由德国科学家 August Kundt [1]于 1866 年发现,并在随后的研究中不断发展。由于超声悬浮对物体的物理性质要求较低,能够悬浮各种物体,并且控制灵活、悬浮力强,在实验与操控领域有广泛应用,特别是在生物医学中的细胞培养和操控,能够避免传统方法对细胞的机械性损伤。

超声悬浮的发展得益于对声辐射力的深入研究。1934 年,King [2]首次计算刚性小球在超声驻波中的声辐射力;随后,Gor'kov [3]提出了简化的理论,为技术应用奠定了基础。近年来,通过应用边界元法和 Gor'kov 理论,研究者优化了悬浮器的几何参数,实现了对小甲虫、金属球等物体的稳定悬浮。同时,声场设计的优化技术进一步提升了悬浮精度。2014 年,Ochiai, Hoshi 和 Rekimoto [4]采用商用换能器组成的超声阵列实现了对物体的悬浮,通过对每个换能器的相位延迟进行控制,实现了对聚焦点位置的控制。这些研究标志着小型低功率商用换能器组成超声相控阵成为声悬浮操控最普遍的方式。然而,此时超声相控阵的声场形式依然是驻波声场。目前,超声在液体介质中的研究取得了重要进展,涵盖声悬浮、颗粒操控和生物医学应用等领域[5]。通过优化换能器阵列结构和相位控制,研究者实现了液体中微粒和细胞的精准悬浮与操控,有效避免机械性损伤。同时,声涡与声瓶等新型声场设计增强了多维悬浮的稳定性,多物理场仿真揭示了声场与流体耦合的复杂关系,为优化悬浮力和降低声流干扰提供了理论支持[6]。这些技术推动了液滴操控、药物筛选和细胞培养等应用的发展,在生物医学和材料科学领域展现了广阔前景[7]。

尽管已有多项研究取得了显著进展,超声悬浮技术仍面临一些挑战。例如,如何进一步提升悬浮的稳定性、扩大悬浮物体的范围,以及在不同介质中探索声场的悬浮稳定性等问题仍然是当前研究的热点。特别是在液体介质中的悬浮,如何实现对细胞的精准控制和长时间稳定悬浮,仍然是亟待解决的技术难题。

为了深入探讨超声与液体介质中声场的耦合情况与悬浮性能,本文基于自定义的超声细胞悬浮器三

维有限元模型,采用 COMSOL 软件进行了多物理场耦合仿真,并模拟了细胞粒子的运动和分析。该研究推动了超声悬浮技术在医学领域的应用,尤其是在非空气介质中的应用,为超声细胞悬浮培养提供了重要的理论支持,并为未来在生物医药、组织工程等领域的应用提供了新思路。

## 2. 超声驻波声场和液体流场的数学模型

超声驻波声场是由超声换能器发出的高频声波在液体或气体介质中传播,并与反射面形成驻波的结果。这个声场的特征是存在一定的压力节点和反节点,其中压力最小的节点就是物体悬浮的地方。驻波声场的数学模型通常基于声波传播方程和边界条件来描述。

### 2.1. 声波传播方程

超声波在液体中的传播可通过以下的波动方程来描述:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

式中,是压力场,是声场,是时间,是拉普拉斯算子。

这个方程描述了声压  $p$  随时间和空间的变化。为了模拟超声驻波,通常采用谐波假设,假定声波是具有频率  $\omega$  的正弦波,其中,  $k = \omega/c$  是波数。因此可以将方程转化为稳态的形式:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0$$

### 2.2. 液体流场的数学模型

液体流场通常通过 Navier-Stokes 方程来描述,这是描述粘性流体(如水或生物液体)运动的基本方程。Navier-Stokes 方程在液体流场建模中起着核心作用。Navier-Stokes 方程描述了液体中速度场和压力场的演变[5],其方程为:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{F}$$

式中,是液体密度,是液体的动力粘度,是体积力

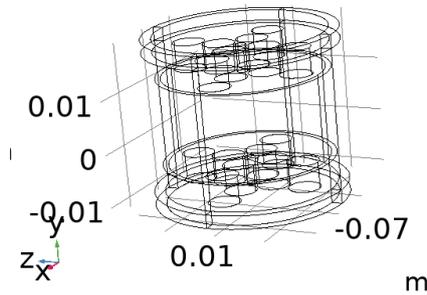
对于稳态流动,时间项被忽略,Navier-Stokes 方程简化为:

$$\rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{F}$$

在实际的超声悬浮实验中,声场和液体流场是耦合的。声波在液体中的传播不仅影响液体的压力分布,还会产生流场扰动,导致液体的运动。在 COMSOL 有限元仿真中,通常通过多物理场耦合来求解声场与流场的相互作用。

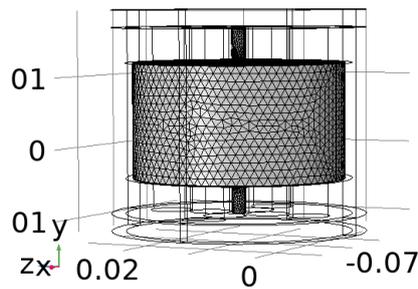
## 3. 建立超声悬浮器仿真模型

将 SOILDWORKS 建立的超声悬浮器 3D 模型导入到 COMSOL 中,如图 1 所示,是导入到 COMSOL 中的模型,给相应部分附上材料,压电陶瓷材料选用 PZT-5H,悬浮器谐振腔使用 Acrylic plastic,外部添加匹配层介质为空气。为仿真模型添加物理场设置,声学模块添加弹性波,液体模块添加湍流定义流体属性。压电陶瓷电势设置为  $50 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$ ,对液体部分添加对流波动方程,时域显式。对多物理场进行耦合,添加粒子流动仿声细胞,定义颗粒密度  $1050 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ ,粒径  $20 \text{ [um]}$ 。添加完所有的约束,从而模拟实际状态。

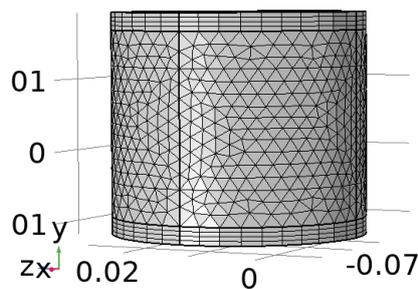


**Figure 1.** 3D simulation model of ultrasonic standing wave levitator  
**图 1.** 超声驻波悬浮器 3D 仿真模型

在网格划分方面，选择流场和声场单独划分网格，采用自由四面体的策略，以期望获更小的误差和更高的计算精度。如图 2 所示为液体介质的网格划分。采用网格和扫掠结合划分，声场网格模型。声场网格最大单元采用驻波声场的半波长  $1500 \text{ [m/s]}/275 \text{ [kHz]}/2 \text{ m}$ ，如下图 3 所示。



**Figure 2.** Liquid medium meshing model  
**图 2.** 液体介质网格划分模型



**Figure 3.** Sound field grid division model  
**图 3.** 声场网格划分模型

## 4. 模型分析

### 4.1. 求解步骤设置

研究设置稳态-CFD，用于流体流场的稳态求解。检查稳态流场的设置，确保所有相关参数和边界条

件适用于流体力学求解。在稳态流场求解完成后，流场结果需要与声场进行耦合，这通常通过映射来实现。这一步可以将流场的相关参数映射到声场中，以便在声场求解时考虑流体流动对声波传播的影响。映射变量：选择流场中的速度、压力等参数，将它们映射到声学模块中，以实现流场和声场的相互作用。例如，流场中的速度可以影响声场中的声压分布。数据传递方法：根据需要选择合适的数据传递方式，可以选择双向耦合(即声场和流场相互影响)或单向耦合(如流场影响声场，但声场不反向影响流场)。频率和时间步长：在耦合求解中，确保流场的求解结果在适当的时间步长下传递到声场模块中，尤其是当声场进行瞬态求解时，映射数据的时间同步非常重要。接着设置声学瞬态研究，在映射下求解声场。最后，为了模拟声场中微小颗粒(如悬浮粒子)的运动和悬浮位置，设置颗粒跟踪模块。通过该模块可以观察声辐射力和流体流动对颗粒运动的影响。

## 4.2. 求解结果

### 4.2.1. 流场求解结果分析

在下图 4 中，展示了系统内的流场速度分布。可以看到流体在换能器附近的速度较高，并逐渐向外衰减。这一速度分布表明，在超声波作用下，换能器产生了较强的局部流动，推动流体在声场中移动。这种速度分布对悬浮颗粒的运动路径以及稳定性具有直接影响，特别是在悬浮区域内，需要确保流速适中，以免颗粒受到过大扰动而偏离悬浮位置。

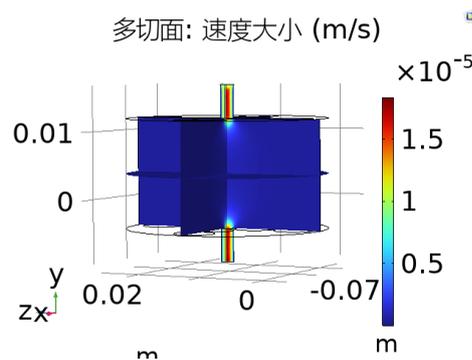


Figure 4. Liquid medium flow field velocity field  
图 4. 液体介质流场速度场

如下图 5 所示，这种压力分布有助于形成稳定的驻波节点和反节点，使得颗粒能够在节点处悬浮。压力分布的对称性也表明该系统中的流场相对均匀。有助于提高颗粒悬浮的稳定性。

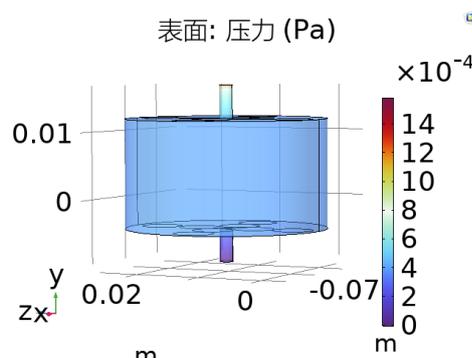


Figure 5. Fluid pressure field in liquid medium  
图 5. 液体介质流体压力场

#### 4.2.2. 声流耦合场求解结果分析

下图6所示,红蓝交替的区域展示了声压的分布情况,红色表示高声压区域,蓝色表示低声压区域。这种颜色的交替变化代表了驻波的形成,在不同位置形成声压波峰和波谷。

驻波的形成表明声场在流体介质中得到了稳定的传播。声压在反节点处达到最大值,在节点处接近零。这种分布特征符合驻波的特性,有助于悬浮颗粒在节点位置保持稳定。

由于流场介质的存在,声压的分布可能会受到一定的扰动,但图中仍然显示出清晰的驻波结构,说明声场与流场在此模型中有效耦合,保证了声压的稳定性。

这种声压分布可以产生足够的声辐射力,使得悬浮颗粒在声压最低的节点处获得平衡位置。该平衡点的形成有助于颗粒的稳定悬浮,尤其是在流动的液体介质中。

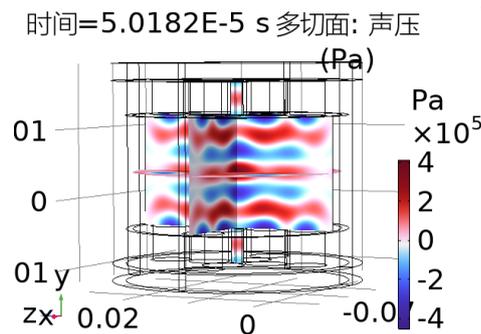


Figure 6. Sound pressure field under sound flow coupling  
图6. 声流耦合下的声压力场

下图7中的箭头表示流体的流动方向和流速大小。箭头的长度代表流体速度的大小,箭头越长表示速度越大。通过箭头分布可以观察到流体在不同位置的流动特征。

蓝色区域表示声速的分布情况,颜色从浅到深反映了声速的变化。整体上,声速分布在图中较为均匀,表明声波在液体介质中传播较稳定。

在箭头所指的区域,可以看到声速的方向和流体流动方向之间的关系。在流速较高的区域,声波的传播可能受到流体运动的影响,导致声速的微小波动。这种流体与声速的耦合作用会影响声波的传播路径和驻波的形成。

从图7中观察,流体在中央区域呈现出向内流动的趋势,而在外部区域速度较小,说明流体在声场中产生了循环流动。这种流动模式可能会影响驻波声场中的声压分布,从而影响到悬浮颗粒的稳定性。

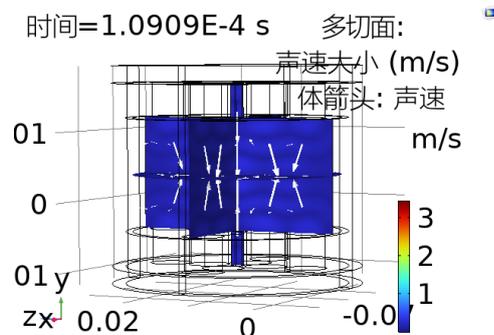


Figure 7. Acoustic velocity field under acoustic flow coupling  
图7. 声流耦合下的声速度场

从图 8 中可以看到，颗粒主要集中分布在某些高度范围内，形成了明显的悬浮层。这些颗粒在声场中处于相对稳定的悬浮位置，显示出声压和流体的共同作用形成的稳定平衡。

结合之前的声压分布图和流场速度分布图，这些颗粒悬浮区域与驻波节点的位置高度一致。驻波节点处声压最低，而声辐射力达到平衡，有助于颗粒在这些区域悬浮并维持稳定。这种声压分布有利于颗粒集中在驻波节点处，从而形成悬浮层。

在流场速度较低的区域，颗粒悬浮更为稳定。流场速度分布图显示，靠近驻波节点的区域流体流速较低，因此流体对颗粒的干扰较小，使颗粒更易于保持在悬浮位置，避免因流动扰动而移动。

此外，从图中可以看到颗粒在各个节点处的分布具有一定的密度差异，这可能与声压强度的微小差异有关。在声压略高或流速较大的区域，颗粒会受到一定的扰动，使得悬浮颗粒分布不完全均匀。

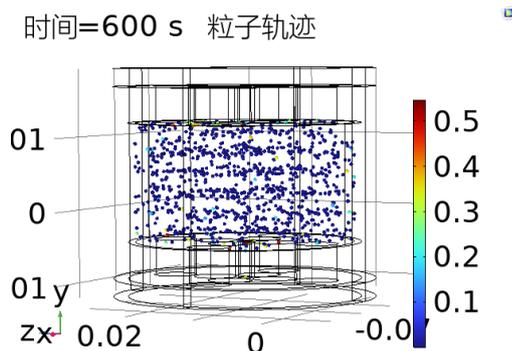


Figure 8. Ultrasonic standing wave cell suspension tracking in liquid media  
图 8. 液体介质中超声驻波细胞悬浮追踪

### 4.3. 求解结果分析

通过对悬浮器的声场、流场及其耦合特性的全面分析，研究发现声场在液体介质中能够形成稳定的驻波结构，使驻波节点成为颗粒悬浮的理想位置。这种驻波节点区域为颗粒提供了稳定的悬浮条件，同时流场的低速区域与声压节点的重合进一步提升了悬浮的稳定性，有效降低了流体扰动对悬浮颗粒的影响。仿真验证了基于声场与流场耦合的细胞液体培养悬浮器的稳定性与可行性。

此外，这种耦合特性不仅优化了液体介质中的超声悬浮性能，还为实现多粒子悬浮、动态操控和高密度悬浮培养提供了理论支持。通过精确设计声场与流场的参数(如换能器相位、频率、阵列布局等)，可以更好地适应不同液体介质和颗粒特性需求。

## 5. 结论

本研究的仿真模型和结果不仅为优化超声悬浮系统设计提供了指导，也为未来在不同介质中的超声悬浮应用拓展了思路。进一步的研究可以结合实际实验数据对仿真模型进行校准，并针对多种液体特性和复杂流场条件下的悬浮性能开展研究，以期提升超声悬浮技术在微纳操控、细胞三维培养、微反应器等先进技术中的应用广度和深度[8]。综上所述，本研究通过仿真深入分析了超声驻波悬浮器在液体介质中声场与流场的耦合特性及其对颗粒悬浮稳定性的影响。结果表明，驻波节点与流场低速区的重合显著增强了颗粒悬浮的稳定性，有效降低了流体扰动。并且，超声在液体中悬浮力的表现受声场特性、流场耦合和液体介质特性的综合影响。驻波节点的位置对悬浮力的稳定性至关重要，节点与低速流场区域的重合能够显著降低流体扰动并增强悬浮效果。同时，液体的粘性和密度影响声场的传播和悬浮力的有效性，高粘度或高密度介质需要更高的声强和优化的声场设计。颗粒的尺寸与材料特性也对悬浮力的分布

起关键作用，小尺寸颗粒在驻波节点更易稳定悬浮，而大颗粒可能受散射力影响。该研究为优化液体中的超声悬浮技术提供了理论支持，推动其在生物工程、药物传输和微纳操控中的应用。该仿真验证了超声悬浮技术在液体介质下的可行性和优势，为生物工程和微粒操控领域提供了理论支持，尤其在细胞悬浮培养、药物传输和无容器材料加工方面展现出潜力[9]。

此外，本研究的模型和结果为优化超声悬浮系统设计提供了指导，并为超声悬浮技术在不同介质环境中的应用拓展了思路。未来研究可结合实验校准模型，并探索多种液体和复杂流场条件下的悬浮性能，以推动超声悬浮技术在微纳操控和生物工程中的更广泛应用[10]。

## 参考文献

- [1] Olofsson, K., Carannante, V., Takai, M., Önfelt, B. and Wiklund, M. (2021) Ultrasound-Based Scaffold-Free Core-Shell Multicellular Tumor Spheroid Formation. *Micromachines*, **12**, Article 329. <https://doi.org/10.3390/mi12030329>
- [2] Kvåle Løvmo, M., Deng, S., Moser, S., Leitgeb, R., Drexler, W. and Ritsch-Marte, M. (2024) Ultrasound-Induced Reorientation for Multi-Angle Optical Coherence Tomography. *Nature Communications*, **15**, Article No. 2391. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46506-2>
- [3] Li, J., Crivoi, A., Peng, X., Shen, L., Pu, Y., Fan, Z., et al. (2021) Three Dimensional Acoustic Tweezers with Vortex Streaming. *Communications Physics*, **4**, Article No. 113. <https://doi.org/10.1038/s42005-021-00617-0>
- [4] Hoshi, T., Ochiai, Y. and Rekimoto, J. (2014) Three-Dimensional Noncontact Manipulation by Opposite Ultrasonic Phased Arrays. *Japanese Journal of Applied Physics*, **53**, 07KE07. <https://doi.org/10.7567/jjap.53.07ke07>
- [5] Rabiet, L., Arakelian, L., Jeger-Madiot, N., García, D.R., Larghero, J. and Aider, J. (2024) Acoustic Levitation as a Tool for Cell-Driven Self-Organization of Human Cell Spheroids during Long-Term 3D Culture. *Biotechnology and Bioengineering*, **121**, 1421-1433. <https://doi.org/10.1002/bit.28651>
- [6] Im, G., Kim, Y., Lee, T.I. and Bhang, S.H. (2022) Subaqueous Free-Standing 3D Cell Culture System for Ultrafast Cell Compaction, Mechano-Inductive Immune Control, and Improving Therapeutic Angiogenesis. *Bioengineering & Translational Medicine*, **8**, e10438. <https://doi.org/10.1002/btm2.10438>
- [7] Jiao, X., Liu, G., Liu, J., Li, X., Liu, X. and Lu, S. (2013) Research on Levitation Coupled with Standing Wave Levitation and Electromagnetic Levitation. *Strojniški Vestnik—Journal of Mechanical Engineering*, **59**, 763-771. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2013.1093>
- [8] Oyama, T., Imashiro, C., Kuriyama, T., Usui, H., Ando, K., Azuma, T., et al. (2021) Acoustic Streaming Induced by MHz-Frequency Ultrasound Extends the Volume Limit of Cell Suspension Culture. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **149**, 4180-4189. <https://doi.org/10.1121/10.0005197>
- [9] 卓恒力. 面向 3D 打印的超声驻波悬浮装置的研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2021.
- [10] 姜良旭. 面向声悬浮操控的声场构建与运动控制方法研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2024.