

纪念王威琪院士诞辰 85 周年

## 驻波型相位调控声镊操控稳定性研究\*

朱纪霖<sup>1</sup> 高东宝<sup>2†</sup> 曾新吾<sup>2†</sup> 许章林<sup>1</sup> 谢翰祥<sup>1</sup>

(1 中国人民解放军 92682 部队 湛江 524002)

(2 国防科技大学 气象海洋学院 长沙 410073)

2022 年 12 月 28 日收到

2023 年 5 月 4 日定稿

**摘要** 为研究驻波型声镊的聚焦声场特征及其操控微粒的稳定性,使用有限元方法建立了相位调控聚焦声场控制模型并搭建了声镊实验系统,测量了系统中微粒多方向移动的位置精度,并分析了聚焦声场的分布规律及其影响。理论与实验结果表明,所设计声镊系统能够在平面内完成微粒操控。相位调控声镊在微粒操控稳定性方面存在区域差异性,越靠近中心区域的声场操控稳定性越强,越靠近边界区域的声场操控稳定性越差。通过细化移动步长可一定程度上提高微粒操控的稳定性。

**关键词** 声镊,声辐射力,微粒操控,相位调控

**PACS 数** 43.25, 43.35

**DOI:** 10.12395/0371-0025.2022189

### Investigation of manipulation stability of phase-modulating acoustic tweezer in standing wave

ZHU Jilin<sup>1</sup> GAO Dongbao<sup>2†</sup> ZENG Xinwu<sup>2†</sup> XU Zhanglin<sup>1</sup> XIE Hanxiang<sup>1</sup>

(1 92682 Troop of PLA Zhanjiang 524002)

(2 College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology Changsha 410073)

Received Dec. 28, 2022

Revised May 4, 2023

**Abstract** In order to study the acoustic tweezers with standing wave field and assess the stability on particle manipulation, a phase-modulating model for focused sound field was built using finite element method and the experimental system for acoustic tweezers was constructed. The accuracy of manipulation in multiple directions is measured, and the distribution of the focused sound field and its influence on manipulation were analyzed. The theoretical and experimental results demonstrated that the acoustic tweezers designed is capable of manipulating particles in a plane. Furthermore, it is observed that phase-controlled acoustic tweezers show regional differences in manipulation stability. It is more stable when the manipulation is conducted around the center and less stable towards boundary. Refining the step size during manipulation can enhance stability to some extent.

**Keywords** Acoustic tweezer, Acoustic radiation force, Particle manipulation, Phase control

## 引言

声镊是利用声场产生的声辐射力捕获和移动目标的一种装置<sup>[1]</sup>。1990 年 Wu 等研制了第一款“声镊”装置,通过利用两束聚焦声波产生的驻波场,实现了对直径为 270  $\mu\text{m}$  的乳胶微粒和一团青蛙卵的捕获及移动<sup>[1]</sup>。声镊装置通常由单个换能器与一个

反射器或由单对换能器组成,利用超声驻波将目标置于波节或波腹处从而实现目标的操控<sup>[2-5]</sup>。随着声学技术的发展,声镊的形式得到了拓展,出现了利用行波对目标物体进行筛选和操控的装置<sup>[6-10]</sup>。然而基于单个(对)的换能器实现的声场其水平结构难以改变。为了实现可三维动态调整的声场,出现了由阵列换能器构成的声镊装置<sup>[11-13]</sup>。除此之外,利用一些特殊结构的板,通过共振、干涉等原理形成特

\* 国家自然科学基金项目(11504425, 11904406)和湖南省自然科学基金项目(2019JJ40335)资助

† 通讯作者:高东宝, gaodongbao@nudt.edu.cn; 曾新吾, xinwuzeng@nudt.edu.cn

定的声场形态,也可实现声操控<sup>[14-15]</sup>。

基于相位调控原理的声场操控是目前应用比较广泛的一种声镊技术,具有原理清晰、结构简单、易于实现等特点。目前,人们普遍关注声镊功能的可实现性,而对其具体的实用效果以及微粒在声场中的操控稳定性的研究还较少<sup>[16]</sup>。针对上述问题,本文设计了一种双侧 16 元相控阵声镊,建立了声场操控模型,搭建了实验测量系统,实现了对直径 2 mm 的微粒在平面内的多方向移动,通过对微粒移动位置精度的测量,分析了声场特征及微粒操控的稳定性。

## 1 声场的相位调控基本原理

根据 Gor'Kov 提出的理论<sup>[17]</sup>,声辐射力是声场势能的负梯度,即

$$\mathbf{F} = -\nabla U, \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{F}$  表示声辐射力,  $U$  表示声辐射力势能,  $\nabla$  为梯度算子。由此,声辐射力指向声场势能的极小值点。Gor'Kov 在其理论中也给出声场势能的表达式:

$$U = 2\pi a^3 \rho \left( \frac{p_{\text{rms}}^2}{3\rho^2 c^2} f_1 - \frac{v_{\text{rms}}^2}{2} f_2 \right), \quad (2)$$

其中,  $a$  是微粒半径,  $\rho$  和  $c$  分别是介质密度和介质声速,  $p_{\text{rms}}$  和  $v_{\text{rms}}$  分别是声压和质点振速的均方根值,  $f_1 = 1 - \rho c^2 / (\rho_0 c_0^2)$ ,  $f_2 = 2(\rho_0 - \rho) / (2\rho_0 + \rho)$ ,  $\rho_0$  和  $c_0$  分别为微粒密度和微粒中的纵波波速。空气密度远小于微粒密度,且空气中的声速远小于微粒中的声速,所以  $f_1 \approx 1$ ,  $f_2 \approx 1$ ,式(2)简化为

$$U = 2\pi a^3 \rho \left( \frac{p_{\text{rms}}^2}{3\rho^2 c^2} - \frac{v_{\text{rms}}^2}{2} \right). \quad (3)$$

势函数方法适用于分析驻波型声镊声场中的声辐射力问题。对于小振幅或者有限振幅声波,在传播过程中,虽然波形畸变会累积产生非线性效应,但若传播的距离不是很远(当  $M_a \ll 1$  时,质点振速远小于纵波波速,声速约等于纵波波速),仍可用线性声场的理论<sup>[18]</sup>。因此可基于线性声学中质点振速和声压之间的关系,将声场势能表达为声压的函数。本文实验中  $M_a$  约为 0.004,符合线性声学基本条件,存在

$$\mathbf{v} = -\frac{1}{\rho_0} \int \nabla p dt. \quad (4)$$

对于双侧相位调控声镊装置,其单个阵元为活塞换能器,图 1 为装置示意图。假设活塞以速度  $u = u_a e^{j\omega t}$  ( $u_a$  为常数,  $\omega$  为振动圆频率,  $t$  是时间) 振动,其向半空间辐射的声场可表示为<sup>[19]</sup>

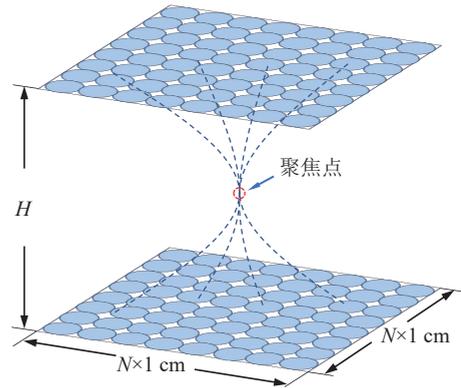


图 1 双侧  $N$  元阵列声镊装置示意图

$$p(\theta, r) = j\omega \frac{\rho_0 u_a a^2}{2r} \left[ \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] e^{j(\omega t - kr)}, \quad (5)$$

其中,  $\theta$  是目标点与换能器的连线与换能器表面法线的夹角,  $r$  是目标点与换能器之间的距离,  $k$  是波数,  $a$  是换能器半径,  $J_1(\cdot)$  是第一类贝塞尔函数。将式(4)代入式(5),得到声压和质点振速之间的关系:

$$v = \frac{jkr + 1}{j\omega \rho r} p. \quad (6)$$

则式(3)可表示为

$$U = 2\pi a^3 \Gamma p^2, \quad \Gamma = \frac{-k^2 r^2 + 3}{6\rho_0 k^2 r^2 c_0^2}. \quad (7)$$

可知,当  $r > \sqrt{3}/k$  时,  $\Gamma < 0$ 。频率为 40 kHz 的超声场中,  $\sqrt{3}/k = 2 \times 10^{-3}$  m,故贴近换能器表面附近的区域内  $\Gamma > 0$ ,其他空间范围内  $\Gamma < 0$ ,对应地  $U < 0$ 。空间范围内声场势能的极小值位置即为声压极大值位置。为获得声压在局部位置的极大值,可通过调整各换能器发射信号的相位实现空间某点处声压的聚焦。

由式(5)可知声场是关于时空变化的函数,空间某点的声压可通过时间项来调制。本文研究的声镊装置由上下两个正对放置的平面阵列组成,如图 1 所示,其中虚线表示声线,红圈表示聚焦点。每个平面上有  $N \times N$  个阵元,阵列平面相距为  $H$ 。换能器到空间任意位置的距离  $r_n$  可由几何关系计算得到。每个换能器在目标点处的声压为

$$p_n = A_n e^{-jkr_n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, 2N^2, \\ A_n = j\omega \frac{\rho_0 u_a a^2}{2r_n} \left[ \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] e^{j\omega t}. \quad (8)$$

目标点处的总声压为

$$p_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{2N^2} p_n. \quad (9)$$

合理设置换能器发射声信号的相位,使目标点处的声压实现同相叠加,以达到幅值最大化的目的。在

换能器的激励信号中引入相角  $\alpha_n$ , 此时聚焦点处的声压表达式为

$$p_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{2N^2} A_n e^{j(\alpha_n - kr_n)}. \quad (10)$$

记  $\beta_n = \alpha_n - kr_n$ ,  $f(\beta) = e^{j\beta}$  为周期函数, 一个完整的周期内  $f$  的最大值为 1。不妨设  $\beta = 0$ ,  $A_n > 0$ , 则  $p_{\text{total}}$  取得最大值时, 相角  $\alpha_n = kr_n$ , 这样就可以实现声压在目标点处的聚焦。在此基础上, 连续改变焦点位置, 可实现微粒的自由移动。

## 2 仿真分析

基于商业有限元软件 COMSOL Multiphysics, 建立了声场仿真模型 ( $N = 4$ ), 如图 2 所示。图 2(a) 为力阱形状及其范围, 色条表示声辐射力势能幅值, 单位是焦耳。图 2(b) 中沿截线  $z = H/2, y = 0$  绘制了声辐射力的分布图, 纵轴为声辐射力幅值, 横轴为  $x$  轴坐标, 虚线对应的横坐标跨度为力阱直径。

因为悬浮目标是跟随焦点的移动而移动的, 所以可通过研究不同聚焦位置情况下声场势能的分布, 判断微粒移动的有效范围和可能方向。算例中, 选择直径为 2 mm 的球形微粒作为悬浮物。上下两个

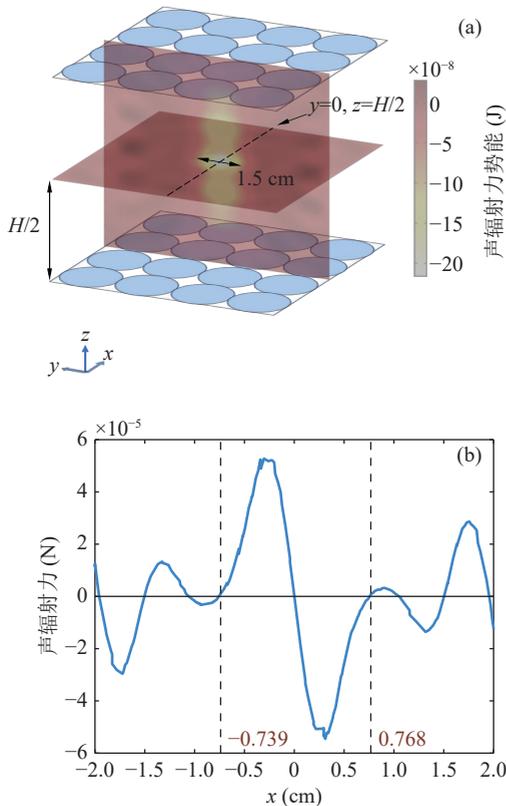


图 2 声镊聚焦声场中声辐射力分布 (a) 聚焦声场三维示意图; (b) 截线  $y = 0, z = H/2$  上的声辐射力分布

阵列平面各由 16 ( $4 \times 4$ ) 个换能器组成, 正对放置, 阵元之间紧密排列。每个换能器直径为 1 cm, 发射的声波频率为 40 kHz, 在室温 (25 °C) 下波长  $\lambda$  为 8.575 mm。阵列平面间相距  $4\lambda$ 。通过测量得到阵元正常工作时距离表面 1.2 cm 处的声压约为 141 Pa, 将其作为换能器的基本参数。仿真结果表明, 聚焦点所在的位置是声场势能的低值区。由于焦点附近的力向内汇聚, 所以称该低值区域为力阱。

本文考虑的是在二维平面内的微粒操控问题, 设操控平面高度为  $z = H/2$ 。为了便于确定焦点位置, 可人为将聚焦平面划分成正交的网格, 每个格点即焦点位置。微粒移动过程简化为在虚拟网格边界上的移动, 便于路径规划和定量分析。根据式 (3), 可计算不同格点位置声聚焦时所对应的力阱分布。在平面中心位置聚焦时形成的力阱分布如图 2(a) 所示, 在中心位置附近聚焦时, 力阱呈现球状分布。取截线  $y = 0, z = H/2$ , 计算得到沿截线的声辐射力分布, 如图 2(b) 所示, 声压聚焦而形成的力阱有一定的范围, 半径约为  $0.87\lambda$  (即 0.75 cm)。此时, 悬浮在此力阱内的微粒可以在半径为 0.75 cm 的范围内被有效捕获至中心点。

在一个正方形网格单元内, 对角线的长度是相邻格点间最大的距离, 为满足微粒移动步长最大化要求, 可将单元网格对角线的长度设为  $0.87\lambda$ , 进而得到网格边长约为  $0.58\lambda$  (0.5 cm)。理论上, 在此范围内, 微粒可稳定操控。划分的网格平面如图 3(a) 所示。理论研究结果表明, 如果网格设计得过大 (即移动步长过大) 则移动的失败率会提高。将网格细化一倍, 即网格边长为  $0.29\lambda$  (0.25 cm), 可使稳定性提高近 40% [16]。

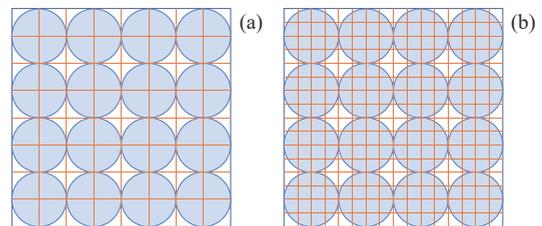


图 3 两种不同密度的网格划分方式 (a) 稀疏网格划分; (b) 细密网格划分

边界处微粒的不稳定性主要原因有两个方面。一方面是由于该区域内声辐射力强度减弱, 另一方面也与力阱的分布特性相关。在中心区域内, 力阱的分布呈圆形, 即无论向哪个方向移动微粒, 声辐射力的影响是相同的。而在边界区域, 力阱不再呈圆形对称分布, 如图 4 所示, 其中红圈指示聚焦点所在

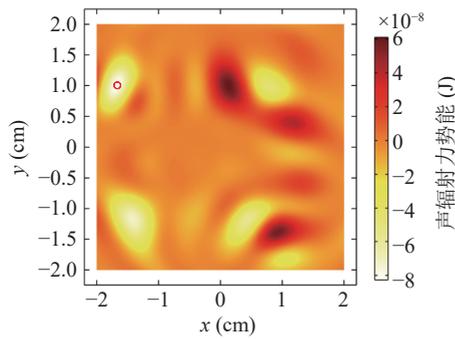


图4 聚焦点在边缘位置时的力阱形状(操控平面为  $z = H/2$ )

的位置,色条表示声辐射力势能的幅值。对于坐标位置  $(-1.75, 1)$  处形成的力阱,明显可见其呈椭圆形分布。此时,微粒在某个方向上的移动稳定性有所下降,并出现掉落现象。需要根据声辐射力分布情况,增强较弱方向的强度,维持此方向上的移动稳定性。

图4表明,虽然是单点聚焦,但是声场中还是会多个力阱,这主要是因为聚焦产生了旁瓣。本实验中旁瓣并未影响实验结果,因此未采取旁瓣消减措施。

竖直方向的声辐射力沿换能器轴向周期变化,如图5(a)所示,力的幅值和方向均周期性变化,该周

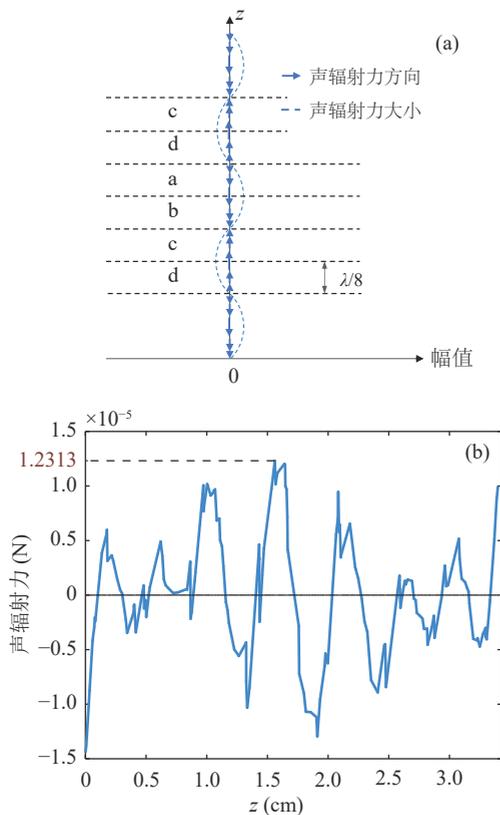


图5 垂向声辐射力分布 (a) 分布示意图; (b)  $(-1.75, 1.75)$  处声辐射力幅值沿  $z$  轴的变化

期为声波周期的一半。将每个周期内的声辐射力划分为四个区域,从上至下分别以 a、b、c、d 表示。在 a、b 或者 c、d 段内,力满足中间大两端小的对称分布规律。其中,微粒稳定悬浮的区域为 c。装置边缘处声辐射力减弱,图5(b)为聚焦点位于  $(-1.75, 1.75)$  即最边缘处时该点垂向声辐射力沿  $z$  轴的分布,此时声辐射力在竖直方向上仍周期性分布,最大值为  $1.23 \times 10^{-5}$  N,大于微粒的重力  $4.8 \times 10^{-6}$  N。因此,微粒在水平面上的移动是可以实现的。

### 3 实验

以图2中的结构为基础,设计了一种声镊实验装置,如图6所示。该装置由上下各16个超声换能器组成,中心频率40 kHz,换能器中心间距1.2 cm,安装在3D打印框架上。实验系统由信号发射模块(②和③)、信号采集模块⑥、功率转换模块④和声镊装置⑤四部分构成。此外,还包括操控端①。信号发射模块由NI PXIe-1082型控制机箱及转接板卡组成,由自编Labview程序控制。因上下对应换能器相位相同,故只需设置16路独立相位控制信号输出即可。功率转换模块由直流电源模块以及一个L298电机驱动模块组成。信号采集功能由Tektronix MDO4034C型示波器实现。

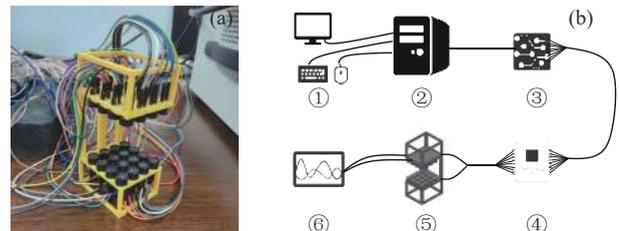


图6 驻波型声镊实验系统 (a) 实验室自制声镊装置; (b) 系统架构

实验过程中,由信号发射模块产生多通路电信号,通过转接板将生成的信号输入功率转换系统,经过该系统的调整后,信号功率可以达到换能器的正常工作要求,之后再信号传输到声镊装置中去,驱动声镊装置正常工作。实验中选用的悬浮微粒材料为聚苯乙烯,直径2 mm,操控平面选取为  $z = H/2$ 。小球密度约为  $120 \text{ kg/m}^3$ ,纵波波速约为  $1900 \text{ m/s}$ 。为了验证所设计声镊装置的可操控性和稳定性,选取两条移动路径。一条沿着  $y$  轴负方向在网格边界上移动,一条沿着  $y = -x$  即网格对角线方向移动,如图7所示。两条移动路径对应的换能器相位分布见附录A。图8给出了微粒沿路径1移动时操控平面

$z = H/2$  上的声辐射力势能的变化情况, 其中 (a)-(h) 按照时间顺序排列, 每幅图对应一个聚焦点位。

根据所制定的移动路线, 首先将微粒悬浮在起始点处, 此时焦点也在该位置。可计算出将声压聚焦于这些既定格点上所需的各换能器发射信号相位, 在 Labview 软件中产生相应的波形, 输出到功率放大模块上再传输给声镊装置。通过焦点的位置变化, 实现微粒的移动。移动过程中, 使用高分辨率相机记录微粒位置。

微粒按照路径 1 的移动过程记录在图 9 中。微

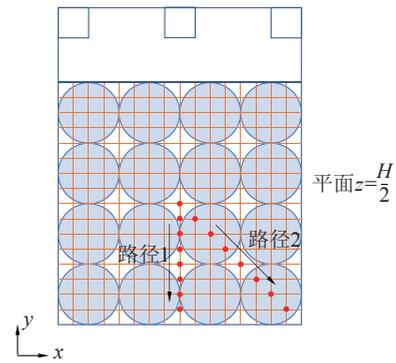


图 7 实验方案设计的两条移动路径

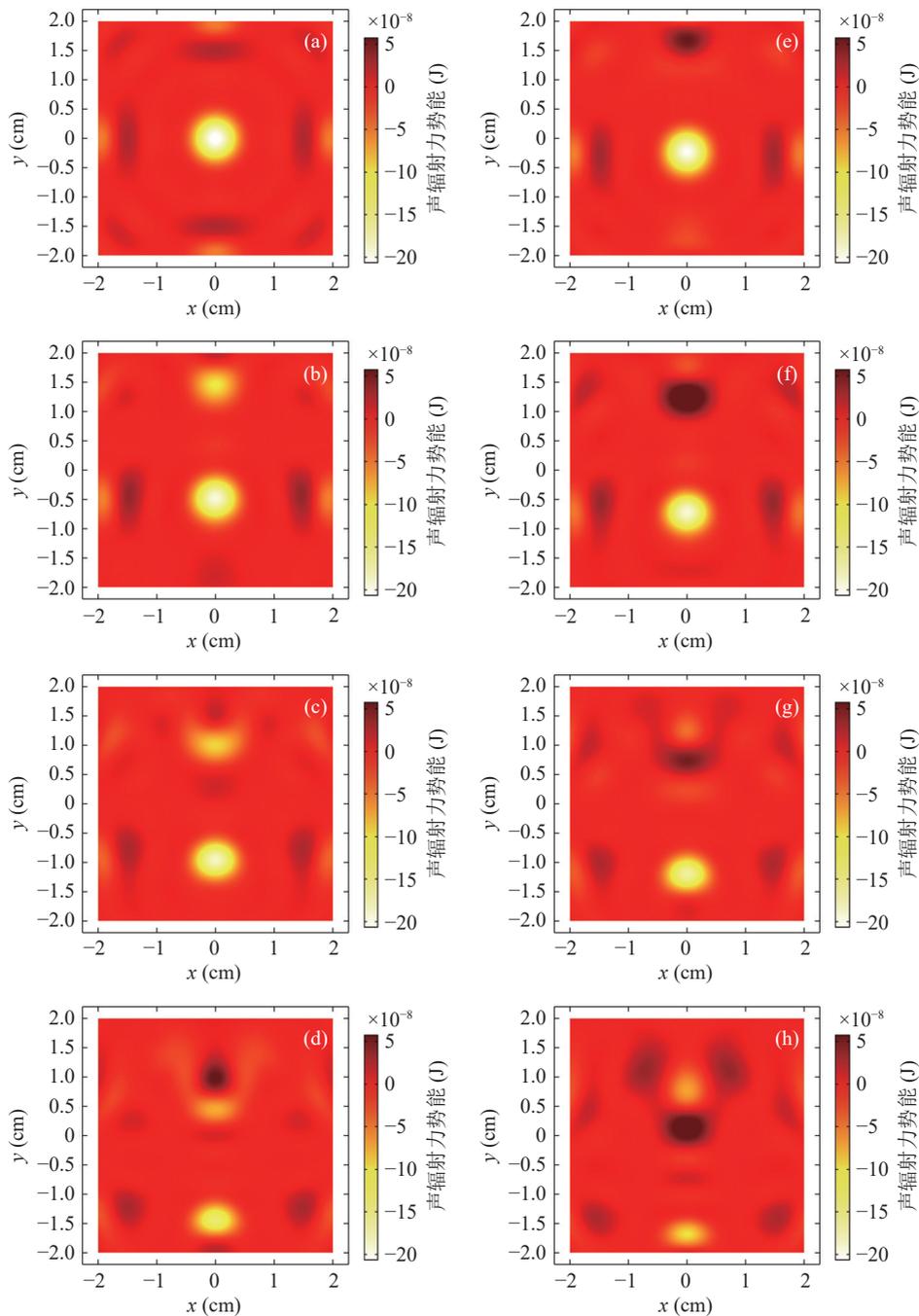


图 8 微粒移动不同时刻声辐射力势能分布 (粒子沿路径 1 移动的过程中平面  $z = H/2$  上势能的变化, (a)-(h) 按移动的先后顺序排列)

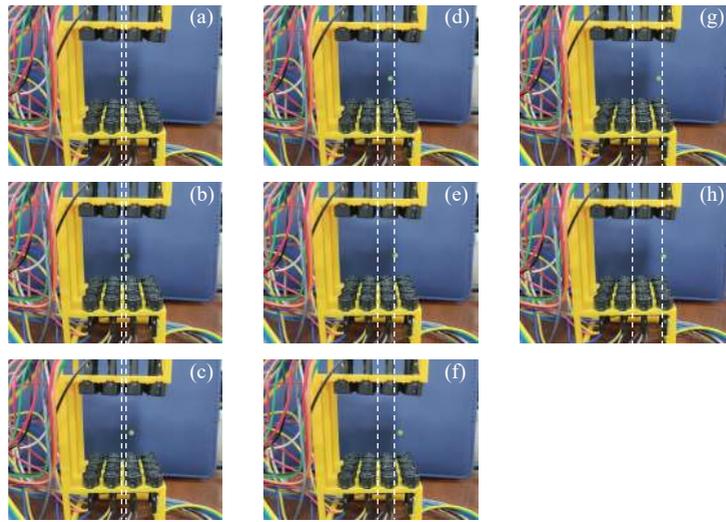


图 9 按照路径 1 进行操控的微粒位置记录 ((a)-(h) 依序排列)

粒的移动包含 7 步, 经过每个预设点位的状态记录分别如图 9(a-h) 所示。每幅图片中画有两条参考线, 靠左侧的是装置中心线, 8 幅子图一致; 另一条虚线分别对应于图 (b)(e)(h) 中微粒的位置。以此两条虚线为参照可以较为量化地标记出微粒的运动位置。实验表明, 微粒在沿该路径移动过程中, 全程没有掉落。文献 [16] 中对此情况进行了理论分析, 结果表明沿路径 1 移动过程前后的水平声辐射力分布和竖直方向的声辐射力分布稳定。实验与仿真结果相吻合, 证明了实验系统的有效性。

图 10 (a-d) 所示为微粒按路径 2 移动的轨迹。记录的规则与路径 1 一致。由于在第 4 步的移动过程中微粒发生了掉落, 所以相机仅记录下四个位置的微粒状态。文献 [16] 给出的结果也表明, 微粒在沿对角线移动的过程中, 会在第 5 步失败。仿真结论与实验结果出现了一定的偏差, 实验中微粒提前一步发生了掉落。这一现象可能是实际声镊装置中换能器排布不紧密造成的。此时, 换能器到聚焦点的距离相比理论仿真情况有所增加。由式 (5) 可知, 活塞型换能器发射的声压在空气中的量级与距离呈

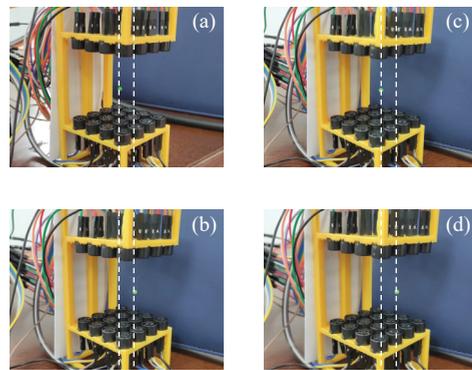


图 10 按照路径 2 进行操控的微粒位置记录 (4 个位置, (a)-(d) 依序排列)

反比关系, 在距离增加的情况下, 声压会衰减。焦点声压强度的减小使得声压梯度和声场势能的梯度相应减小, 进而导致整体声辐射力减小, 所以实验中力阱覆盖范围较理论值偏小, 在跨越网格对角线这样的长距移动时易掉落。

为进一步研究实验中微粒的移动位置精度, 将不同路径下的微粒移动测量结果分别绘制于图 11 和图 12。引入位置误差  $E$  来表征微粒移动过程中的位置精度, 其定义为

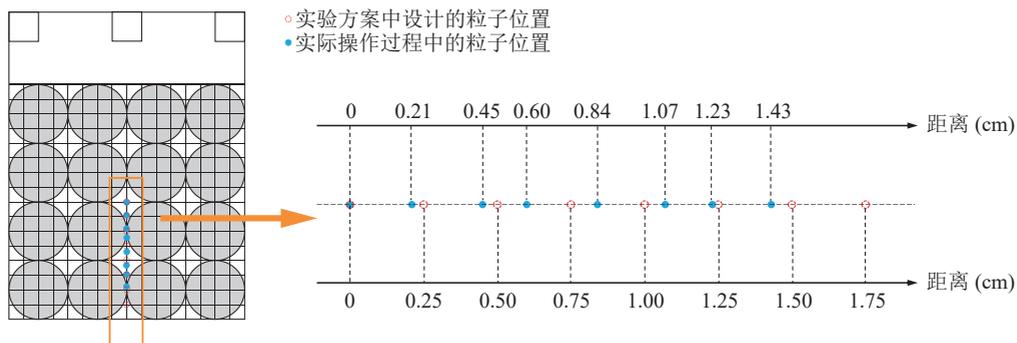


图 11 按照路径 1 进行操控的微粒实际点位与预计点位之间的对比

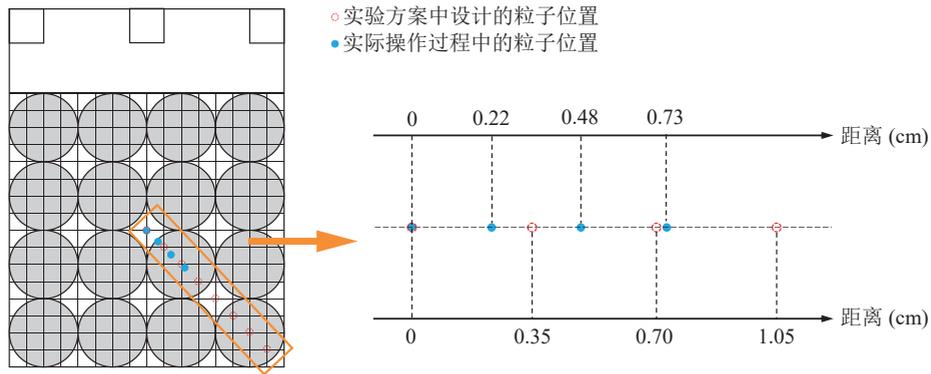


图 12 按照路径 2 进行操控的微粒实际点位与预计点位之间的对比

$$E = \frac{|x_m - x_i|}{L}, \quad (11)$$

其中,  $x_m$  表示微粒位置的测量值,  $x_i$  表示微粒位置的  
理论值,  $L$  表示移动步长。研究表明, 微粒在路  
径 1 上移动的位置误差最大为 40%, 而在路径 2 上移  
动的位置误差最大为 37.1%。出现这一现象, 一方面  
与实际系统中换能器排列不紧密有关, 另一方面还  
可能是换能器阵列平面由于重力等的影响产生变形  
所导致。

经重新测量, 所搭建的声镊实验装置中, 上阵列  
平面的倾角大约为  $5^\circ$ , 阵元中心间距为 1.2 cm。据  
此修正仿真模型参数, 分析结构参数误差带来的影

响。图 13 和图 14 分别是两种路径下微粒在不同位  
置处时移动方向上的声辐射力分布情况。由仿真结  
果可见, 随着微粒移动位置的变化, 声辐射力在空  
间的分布变得更复杂, 某些情况下周期性被打破, 力  
阱对微粒的束缚性降低, 最终导致微粒脱落。可根  
据仿真结果提取力阱中心点位置, 即微粒移动的节  
点位置, 并将其与实验测量值和预期位置绘于图 15  
和图 16。

在图 15 和图 16 中, 定义路径的偏差量  $Q = (1/n) \cdot \sqrt{\sum (d_i - d)^2}$ , 其中  $n$  是步数,  $d$  是理论步长,  $d_i$  是实  
测步长或仿真步长。根据路径 1 的相关数据, 仿真结  
果与理论结果的偏差量为  $2.2223 \times 10^{-4}$  m, 而实测结

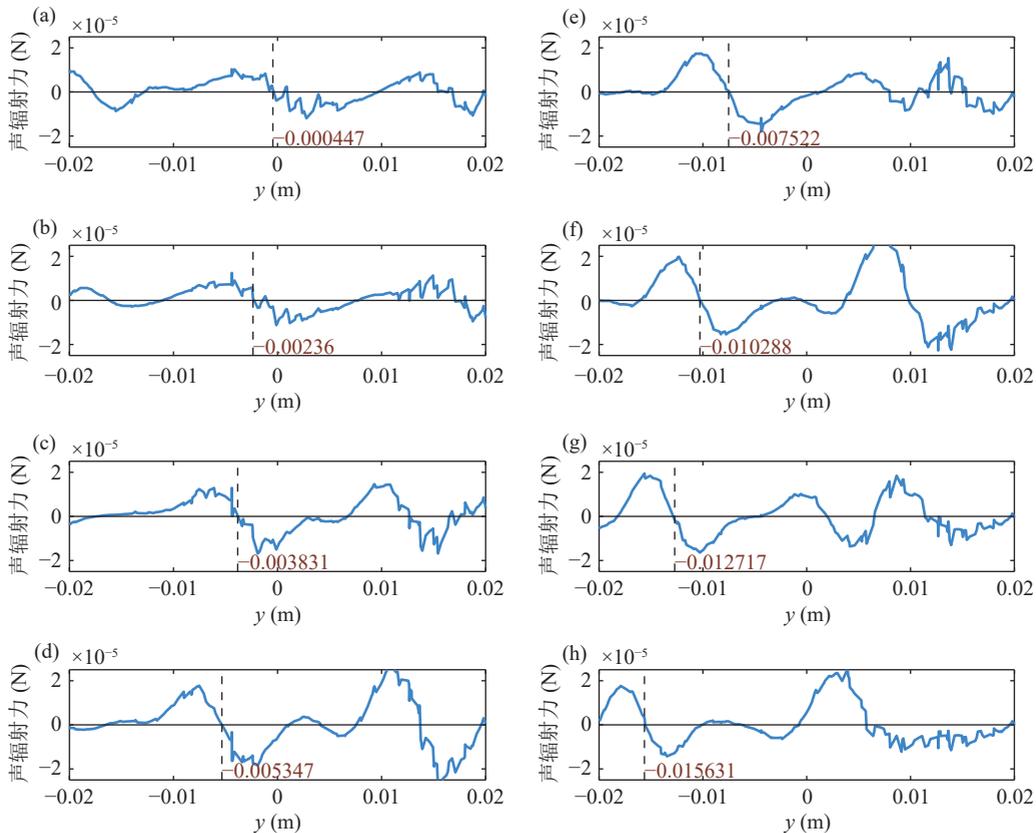


图 13 各聚焦点处声辐射力沿截线  $y = 0$  的分布情况 (路径 1, (a)-(h) 对应粒子由中心向边缘移动的先后顺序)

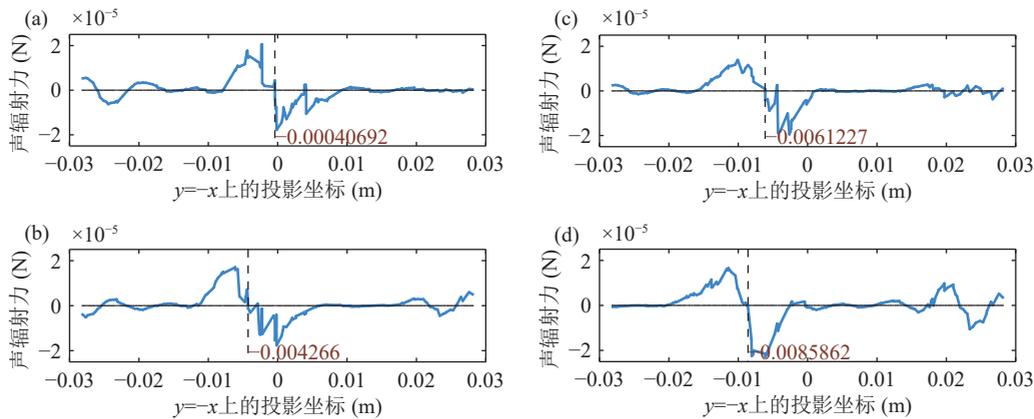


图 14 各聚焦点处声辐射力沿截线  $y = -x$  的分布情况 (路径 2, (a)-(d) 对应粒子由中心向边缘移动的先后顺序)

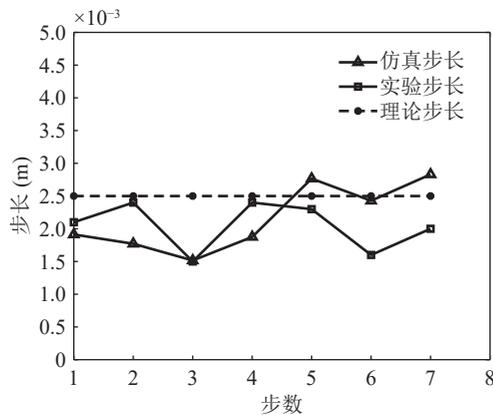


图 15 路径 1 中仿真步长、实验步长与理论步长的对比

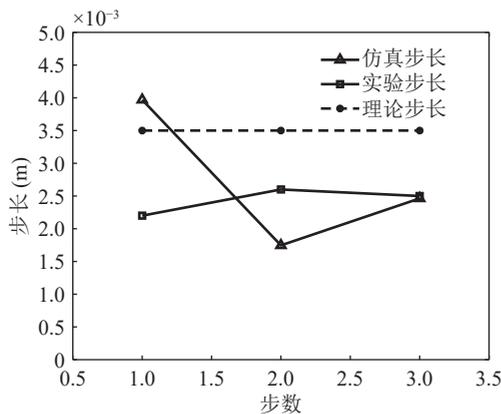


图 16 路径 2 中仿真步长、实验步长与理论步长的对比

果与理论结果的偏差量为  $2.1571 \times 10^{-4}$  m。仿真与实测的误差仅为 3%。路径 2 的数据表明, 仿真结果与理论结果偏差量为  $6.9687 \times 10^{-4}$  m, 而实测结果与理论结果的偏差量为  $6.2361 \times 10^{-4}$  m。仿真与实测的误差为 11.7%。这表明, 换能器的不紧密排列和上平面倾斜可以认为是导致实验步长变小的原因之一 (路径 2 由于样本量偏少, 误差偏大, 具有一定的偶然性)。

## 4 结论

为提高驻波型声镊的实用性, 研究了驻波型声镊声辐射力特性, 分析了聚焦声场中微粒操控的方法及其稳定性。理论仿真与实验结果表明, 通过对换能器阵列的相位连续调控可实现微粒移动路径操控。受聚焦声场分布不均匀性的影响, 微粒操控稳定性具有区域特征。越靠近声场中心位置, 焦斑分布越规则, 微粒移动的稳定性越好, 位置精度越高。越靠近声场边缘区域, 焦斑变形越明显, 微粒操控稳定性越差, 位置精度越低。可通过对换能器发射信号相位的调节, 减小移动步长, 提高微粒移动位置精度和稳定性。后续将进一步改善系统装配精度, 减小参数影响, 利用聚焦声场旁瓣抑制技术, 提高微粒操控稳定性。

## 参 考 文 献

- 1 Wu J R. Acoustical tweezers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1991; **89**(5): 2140–2143
- 2 Xie W J, Cao C D, Lu Y J, *et al.* Acoustic method for levitation of small living animals. *Appl. Phys. Lett.*, 2006; **89**(21): 214102
- 3 Jungwoo L, Changyangm L, Hyung H K, *et al.* Targeted cell immobilization by ultrasound microbeam. *Biotechnol. Bioeng.*, 2011; **108**(7): 1643–1650
- 4 Courtney C R P, Ong C K, Drinkwater B W, *et al.* Manipulation of microparticles using phase-controllable ultrasonic standing waves. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2010; **128**(4): 195–199
- 5 Marco A, Asier M. Numerical and experimental investigation of the stability of a drop in a single-axis acoustic levitator. *Phys. Fluids*, 2019; **31**(11): 117101
- 6 Lam K H, Li Ying, Li Yang, *et al.* Multifunctional single beam acoustic tweezer for noninvasive cell/organism manipulation and tissue imaging. *Sci. Rep.*, 2016; **6**: 37554
- 7 Marzo A, Seah S A, Drinkwater B W. Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. *Nat. Commun.*, 2015; **6**: 8861

- 8 Ma Z, Collins D J, Guo J, *et al.* Mechanical properties based particle separation via traveling surface acoustic wave. *Anal. Chem.*, 2016; **88**(23): 11844–11851
- 9 Baresch D, Thomas J, Marchiano R. Observation of a single-beam gradient force acoustical trap for elastic particles: Acoustical tweezers. *Phys. Rev. Lett.*, 2016; **116**(2): 024301
- 10 Seki I, Shinichi M, Tomohiro I, *et al.* Acoustic macroscopic rigid body levitation by responsive boundary hologram. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2019; **145**(1): 328–337
- 11 Foresti D, Nabavi M, Klingauf M, *et al.* Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 2013; **110**(31): 12549–12554
- 12 Marzo A, Drinkwater B W. Holographic acoustic tweezers. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 2019; **116**(1): 84–89
- 13 Ochiai Y, Hoshit T, Rekimoto J. Pixie dust: Graphics generated by levitated and animated objects in computational acoustic-potential field. *ACM Trans. Graphics*, 2014; **33**(4): 85
- 14 Melde K, Mark A G, Tian Q, *et al.* Holograms for acoustics. *Nature*, 2016; **537**(7621): 518–522
- 15 Li F, Cai F Y, Liu Z Y, *et al.* Phononic-crystal-based acoustic sieve for tunable manipulations of particles by a highly localized radiation force. *Phys. Rev. Appl.*, 2014; **1**(5): 051001
- 16 朱纪霖, 高东宝, 曾新吾. 基于相位变换声镊的单个微粒平面移动操控. *物理学报*, 2021; **70**(21): 214302
- 17 Gor'kov L P. On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1961; **140**(1): 88–91
- 18 钱祖文. 非线性声学. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2009: 24–25
- 19 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础. 第 3 版. 南京: 南京大学出版社, 2012: 223–225

## 附录 A

表 A1 和表 A2 中给出了实现图 9 和图 10 中的移动所需换能器的相位分布, 其中路径 1 从开始到结束经过的各点位命名为 F1-F8, 路径 2 为 S1-S8。

表 A1 完成路径 1 所需的 16 个换能器的输出相位 (单位: rad)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
1	23.139	24.272	25.485	26.77	28.115	29.512	30.955	32.437
2	19.174	20.526	21.948	23.427	24.953	26.518	28.115	29.739
3	19.174	20.526	21.948	23.427	24.953	26.518	28.115	29.739
4	23.139	24.272	25.485	26.77	28.115	29.512	30.955	32.437
5	19.174	19.692	20.362	21.17	22.101	23.139	24.272	25.485
6	14.137	14.832	15.711	16.745	17.907	19.174	20.526	21.948
7	14.137	14.832	15.711	16.745	17.907	19.174	20.526	21.948
8	19.174	19.692	20.362	21.17	22.101	23.139	24.272	25.485
9	19.174	18.821	18.642	18.642	18.821	19.174	19.692	20.362
10	14.137	13.654	13.406	13.406	13.654	14.137	14.832	15.711
11	14.137	13.654	13.406	13.406	13.654	14.137	14.832	15.711
12	19.174	18.821	18.642	18.642	18.821	19.174	19.692	20.362
13	23.139	22.101	21.17	20.362	19.692	19.174	18.821	18.642
14	19.174	17.907	16.745	15.711	14.832	14.137	13.654	13.406
15	19.174	17.907	16.745	15.711	14.832	14.137	13.654	13.406
16	23.139	22.101	21.17	20.362	19.692	19.174	18.821	18.642

表 A2 完成路径 2 所需的 16 个换能器的输出相位 (单位: rad)

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
1	23.139	23.284	23.712	24.409	25.353	26.518	27.875	29.398
2	19.174	20.197	21.485	22.994	24.683	26.518	28.471	30.519
3	19.174	21.011	22.994	25.087	27.267	29.512	31.811	34.151
4	23.139	25.353	27.633	29.964	32.334	34.735	37.162	39.61
5	19.174	18.461	18.093	18.093	18.461	19.174	20.197	21.485
6	14.137	14.373	15.057	16.133	17.528	19.174	21.011	22.994
7	14.137	15.496	17.141	18.998	21.011	23.139	25.353	27.633
8	19.174	21.011	22.994	25.087	27.267	29.512	31.811	34.151
9	19.174	17.528	16.133	15.057	14.373	14.137	14.373	15.057
10	14.137	13.153	12.633	12.633	13.153	14.137	15.496	17.141
11	14.137	14.373	15.057	16.133	17.528	19.174	21.011	22.994
12	19.174	20.197	21.485	22.994	24.683	26.518	28.471	30.519
13	23.139	21.011	18.998	17.141	15.496	14.137	13.153	12.633
14	19.174	17.528	16.133	15.057	14.373	14.137	14.373	15.057
15	19.174	18.461	18.093	18.093	18.461	19.174	20.197	21.485
16	23.139	23.284	23.712	24.409	25.353	26.518	27.875	29.398