

文章编号:1005-4642(2021)04-0045-07

基于双轴超声列阵驻波原理的固体颗粒悬浮操控实验

朱琳琳^{a,b}, 严雅琳^{a,b}, 黎廷丰^{a,b}, 唐小煜^{a,b}, 蔡伟博^{a,b}, 黎 铭^{a,b}

(华南师范大学 a. 物理与电信工程学院; b. 物理国家级实验教学示范中心, 广东 广州 510006)

摘 要:针对传统超声阵列悬浮技术悬浮稳定性较弱等问题,基于双轴超声列阵驻波原理,设计了平面-凹球面组合超声阵列悬浮装置.利用 COMSOL Multiphysics 软件进行仿真实验,利用 FPGA、超声波换能器等搭建装置,实现对固体颗粒的束缚及定位移动的互动式操控,根据装置在运动过程中悬浮小球的抖动情况分析装置的稳定性.实验表明:该装置可以精确地控制粒子移动,提高了悬浮稳定性.

关键词:平面-凹球面双轴超声列阵;定位操控;COMSOL Multiphysics;悬浮稳定性

中图分类号: O426

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.04.007

超声驻波悬浮技术是利用超声振动产生的辐射声压使悬浮体在没有任何附加效应的声场中悬浮或移动^[1],因其具有非接触,材料独立,不需要对小球预处理,可以悬浮固体、液体和气体等优点被广泛应用在物理、化学、生物、材料科学等领域.目前,一维单轴式轴对称声悬浮器是目前应用最多的一种声悬浮装置^[2].郭木铎^[3]等建立单轴式声悬浮实验装置,实现对多层泡沫球的稳定悬浮,同时肯定凹球面反射面对于提高声悬浮器的悬浮能力的作用;范皓然^[4]等基于超声相控阵构建复杂声场,通过调节发射反射面的几何参量,利用单轴式超声悬浮系统实现了样品的悬浮;朱怡^[5]等基于单轴式声悬浮仪结构,通过调节超声波的频率和电压实现目标的静止到悬浮.这类装置虽然能够实现悬浮物的悬浮,但产生的驻波声场比较弱,因而悬浮能力较小,其次不能使得悬浮物在谐振腔内移动,限制其使用与应用推广.本文结合双轴超声列阵驻波机理,创新设计了平面-凹球面组合超声列阵悬浮模型,自主搭建了悬浮装置,实现了单粒子的束缚及定位移动,并测试了装置的稳定性.

1 声悬浮原理

1.1 超声波驻波

驻波是由频率和振动方向相同而传播方向相反的 2 列波叠加而成^[6],根据所发射超声波的波长,设超声波双发射端之间的距离为声波半波长的整数倍.发射器两端所发射超声波波动方程分别为^[5]

$$p_1 = p_0 \cos(\omega t - kz), \quad (1)$$

$$p_2 = p_0 \cos(\omega t + kz), \quad (2)$$

其中 $p_0 = \rho_0 c_0 u$ 为无声扰时介质的压强.所以叠加后的驻波声场声压分布为

$$p = p_1 + p_2 = 2p_0 \cos(kz) \cos(\omega t), \quad (3)$$

设 z 轴与两发射端声波的传播方向平行.如图 1 所示,声压在 z 轴方向呈现周期性变化,波节之间距离为半波长的整数倍.

1.2 超声波换能器阵列

在实际的超声波悬浮实验中,若上下两端都是单个换能器的组合,源于仪器的功率问题,其所能提供的声辐射力不足,使得仪器很难浮起轻小物体,或者导致悬浮稳定性不佳.为了得到更大的声场能量,将超声波换能器以某种特定的规律

收稿日期: 2020-11-11; **修改日期:** 2021-03-03

基金项目: 广州市高校创新创业教育项目资助 (No. 2019HD206); 广东省大学生创新创业训练项目资助 (No. S202010574090)

作者简介: 朱琳琳 (1999-), 女, 广东河源人, 华南师范大学物理与电信工程学院 2018 级本科生. E-mail: 20182331016@m.scnu.edu.cn

通讯作者: 唐小煜 (1980-), 男, 广东汕尾人, 华南师范大学物理与电信工程学院讲师, 博士, 研究方向为教育信息化、人工智能与控制系统. E-mail: tangxy@scnu.edu.cn



排列起来,形成超声波换能器列阵加强声场能量.根据波的叠加原理,在某一方向上传播相同频率的多列超声波,会在空间中干涉,共同构建出能量更大的超声波声场^[7].当仅有 1 对换能器发射超声波时,其声压在 $-1.5 \sim 1.5$ Pa 之间;而当有 5 对换能器发射超声波时,其空间声压可达 $-2.5 \sim 2.5$ Pa.

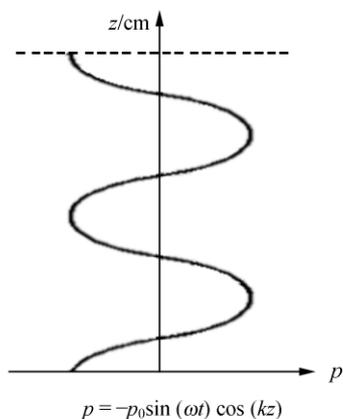


图 1 驻波场中 z 轴传播的声压变化图

若超声波列阵探头中每个晶片都独立,都有自己的接口、延时电路和 A/D 转换器,并且晶片之间彼此绝缘,那么此时超声波换能器列阵可作为超声波相控阵.目前的超声波换能器列阵主要分为平面列阵和凹面列阵,二者都有聚焦干涉的作用,但因为凹面列阵具有自聚焦性,其聚焦性能要优于平面列阵.为了简化装置,本实验将列阵中所有换能器并联起来以便统一操控.

1.3 声悬浮原理

根据 Gor'Kov 的声悬浮理论,从动量交换的角度分析,该理论认为声场中声辐射力的大小等于介质质点在悬浮小球表面这一封闭面上的动量变化率,所以在超声波驻波悬浮中引入声辐射力的时间平均势的概念^[8],Gor'Kov 的理论指出,在悬浮小球半径远小于悬浮声场内的声波波长时,悬浮小球所受声辐射力的时间平均势的表达式为^[2]

$$U = 2\pi R^3 \left(\frac{\overline{p^2}}{3\rho_0 c_0^2} - \frac{\rho_0 \overline{v^2}}{2} \right), \quad (4)$$

其中, $\overline{p^2}$ 为悬浮物体所在位置的声压均方差, $\overline{v^2}$ 为在悬浮物体所在位置的介质质点振速均方差, c_0 为声波在静止介质中的传播速度, ρ_0 为介质的静

密度, R 为悬浮小球的半径.其中质点振速和声场中声压 p 的关系有:

$$v = -\frac{1}{j\omega\rho} \nabla p, \quad (5)$$

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla p. \quad (6)$$

根据(6)式即可通过悬浮空间中的声场分布测量相应的质点振速,在已知流体介质静密度 ρ_0 及声波在静止介质中的传播速度 c_0 的前提下,可通过(4)式和(6)式计算出不同半径的悬浮小球在空间声场中所受声辐射力的时间平均势 U .当然为表述方便,一般用相对时间平均势:

$$\tilde{U} = \frac{U}{2\pi R^3}, \quad (7)$$

代替时间平均势.根据势能与力的关系,易得:

$$F = -\nabla U. \quad (8)$$

根据(8)式,可计算出半径为 R 的小球在 c_0 和 ρ_0 一定时,在声场中所受 z 方向上的声辐射力为

$$F_z = -\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{5\pi R^3 k p_0^2}{6} \rho_0 \sin(2kz). \quad (9)$$

由于此声辐射力的方向沿着 z 轴方向,故在重力场作用下,声辐射力在某些位置可以抵消重力,创建局部的悬浮区域,使得半径为 R 的悬浮粒子可以悬浮在该区域内,且这一区域为超声波驻波场波节附近区域^[3,9].

1.4 移动原理

超声波驻波场中波节的位置与超声波的相位有关,而波节位置又是悬浮区域的位置,所以可以通过控制超声波相位的方法,使得悬浮粒子随波节移动而移动.如图 2 所示,运用数字电路设计出与超声波频率相同方波信号,占空比为 50%,以此作为超声波列阵的相控信号.

为解决串行切换带来相位误差,实验采用了 FPGA 芯片,通过并行输出解决此问题.在相控方面采取如图 2 所示的切换控制信号的方式.通过 FPGA 开发板的时钟将内部信号分频为频率 40 kHz,分别对上下 2 个换能器列阵输入 2 路相位相反的 PWM 信号,差分形成方波信号,通过软件编程命令方波信号按照指定规律移动.然后控制信号经过 H 桥驱动电路放大接入超声换能器中,使之正常工作.通过触发 FPGA 板上的命令按钮,控制相位变化,使换能器发出相位变化的信号,从而使悬浮目标移动^[8].

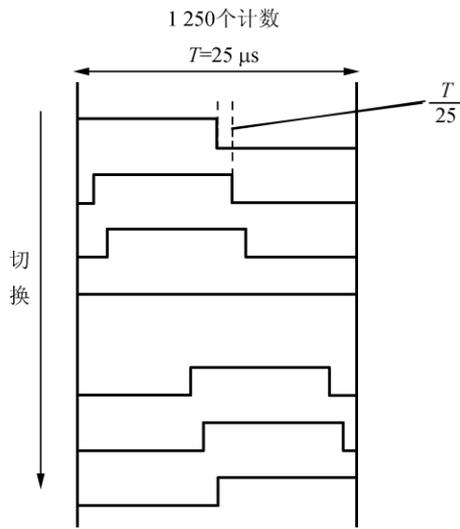
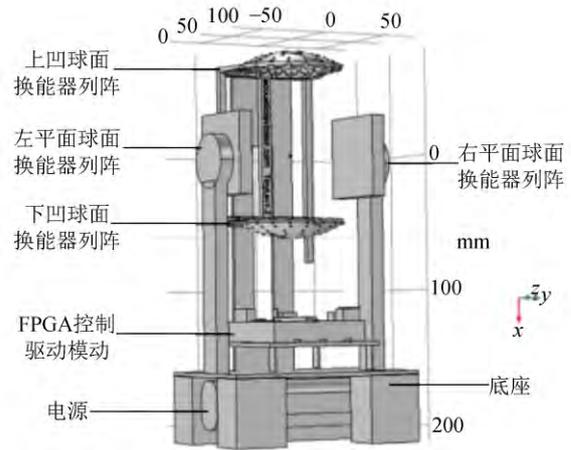


图 2 控制信号相位变化图

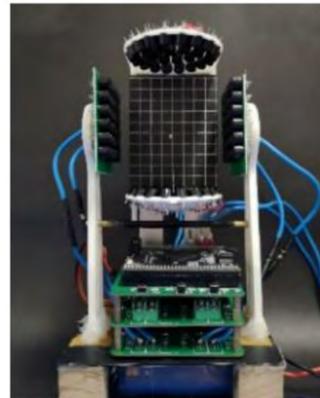
2 实验装置

自主搭建了双轴超声列阵驻波原理的固体颗粒悬浮操控实验平台,图 3(a)为利用 COMSOL Multiphysics 软件建模而成的 3D 装置图,图 3 (b)为装置的实物图. 实验平台主要由底座、超声发生电源、控制模块、悬浮装置部分等构成. 其中底座由木块和金属板组成,底座的镂空设计便于放置移动电池;超声发生电源可用 7.2 V 的移动电源或者实验室可调稳压电源,根据实验条件选择合适的供电设备,通过导线与控制模块相连,控制模块集成设计成 3 层板,通过在 FPGA 产生 PWM 信号,差分后形成方波控制信号,再通过驱动电路放大后,驱动悬浮部分的超声波换能器;悬浮部分由上下左右各 36 个超声换能器振子分别固定在凹球面-平面上,并用导线相互连接形成回路,通过控制模块驱动,产生 40 kHz 超声波,使上下左右的超声阵列振动,从而形成驻波声场,实现颗粒的悬浮与操控.

在本文的所有实验中,皆是采用直径约为 1.5 mm,密度为 0.91 g/cm³ 的聚苯乙烯泡沫塑料小球作为悬浮目标,采用的超声换能器振子型号是响应频率为 (40.0 ± 1.0) kHz,输入峰值电压为 40 V 的 NU40C10T-2 开放型. 利用外部电源供电,通过按键控制 FPGA 模块产生控制信号,经过驱动电路作用于平面-凹球面换能器阵列. 装置系统框图如图 4 所示.



(a) 装置 3D 建模图



(b) 装置实物图

图 3 装置整体图

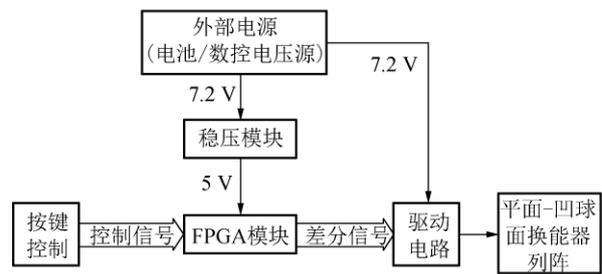


图 4 装置系统框图

3 实验过程与数据分析

3.1 实验仿真

在正式实验开始之前,采用 COMSOL Multiphysics 模拟软件进行仿真预实验,模拟凹球面阵列与平面阵列组合的双轴悬浮声场分布,如图 5 所示. 从理论上证实阵列组合的可行性. 设置凹球面部分和双边平面部分发射 40 000 Hz 的球

面波,其他部分的边界区域则设置为开放边界条件,由仿真结果得,仿真图中心区域的淡橙色部分为声压节点位置,即粒子悬浮区域.对比平面-平面组合,凹球面和平面列阵组成的双轴悬浮装置所产生的声场也出现“网格”状的声场分布,对比单轴凹球面的悬浮装置,此组合模型聚焦性能更强,旁瓣较少,容易实现粒子的悬浮和定位操控.对比双轴凹球面-凹球面的悬浮装置,虽然声场的聚焦性更强,但是过强的聚焦性难以实现对粒子的定位移动操控.因此凹球面-平面列阵组合的双轴悬浮模型是可行的.

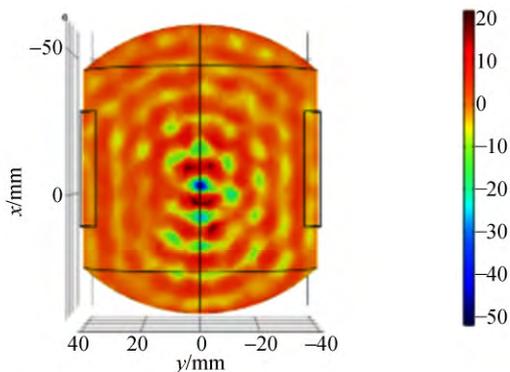


图 5 模拟驻波场声压分布图

3.2 单粒子的悬浮

利用设计的实验装置实现悬浮目标的稳定悬浮.将悬浮粒子送入装置内进行悬浮,待稳定悬浮,记录悬浮目标的位置,重复多次实验,同时对实验全程进行录制,实验后将视频导入 Tracker 软件,分析得到悬浮目标的悬浮位置(图 6).为了探究悬浮目标悬浮的准确程度,将实际悬浮实验中悬浮目标的悬浮高度与仿真实验中声压节点高度(图 7)进行对比,计算其相对偏差,得到数据如表 1 所示.

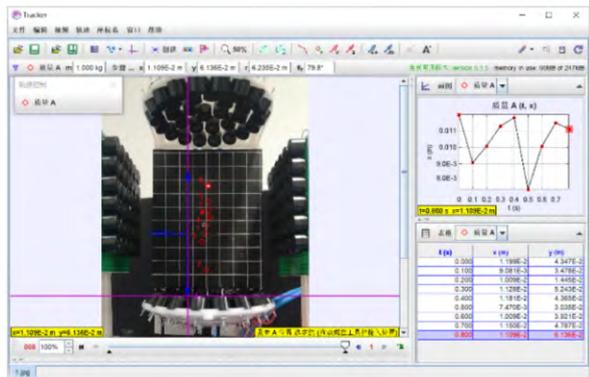


图 6 使用 Tracker 软件对悬浮粒子进行定位

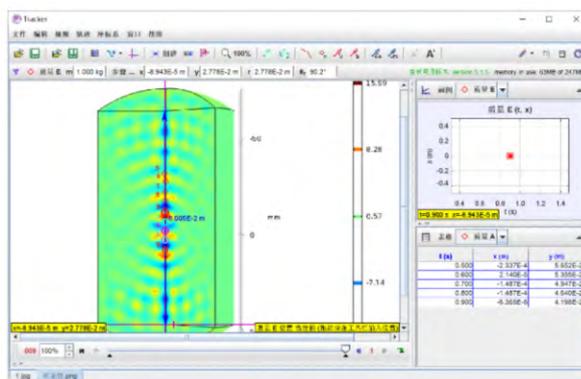


图 7 使用 Tracker 软件对仿真模型中声压节点进行定位

表 1 仿真得到的声压节点位置与实际悬浮位置对比

n	$h_{\text{理论}}/\text{m}$	$h_{\text{实验}}/\text{m}$	E_r
1	0.031 9	0.031 1	2.49%
2	0.035 1	0.035 3	0.79%
3	0.038 8	0.039 5	2.00%
4	0.049 5	0.048 7	1.67%
5	0.053 9	0.053 0	1.62%
6	0.061 3	0.062 3	1.50%

从表 1 可以看出,实际悬浮实验中悬浮目标的悬浮位置与仿真实验吻合度较高,相对偏差较小,多次实验平均相对偏差为 $E_r = 1.67\%$.因此实验装置的实际悬浮高度与理论的悬浮高度匹配度较高.

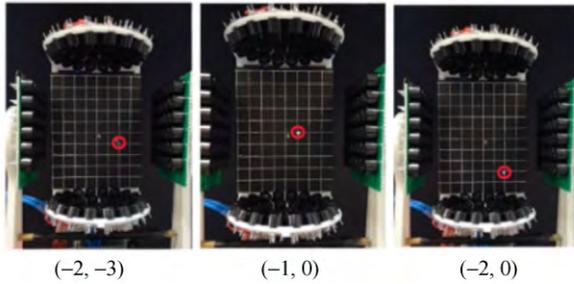
3.3 单粒子的操控

超声阵列结构具有较强的悬浮能力和移动能力,尤其是凹球面超声阵列的悬浮能力由于曲面聚焦效应而大大增强^[8].基于超声阵列悬浮的基础,超声阵列能够实现悬浮目标的稳定悬浮,但是仍存在不足之处.不论是李文斌^[7]等设计搭建的开放式阵列悬浮试验平台,还是王英伟^[8]等设计搭建的凹球面阵列超声悬浮系统,或者是武二永^[10]等搭建的基于换能器阵列的超声悬浮实验装置,尚未实现对悬浮目标的二维、三维移动以及定位操控.因此,本文以此为研究焦点,探究在超声阵列悬浮的基础上实现对粒子的二维移动,从而定向操控粒子的运动情况.

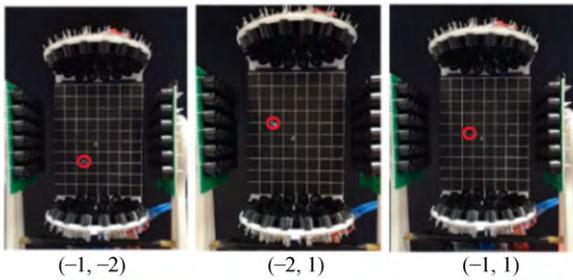
基于本文设计搭建的平面-凹球面阵列,进行单粒子悬浮定位操控的实验操作.首先将单粒子悬浮在装置中心偏下方位置,以便观察粒子在径向、轴向上的运动情况,待粒子稳定后,观察控制板上的显示灯,若显示灯不亮,表示装置处于上下控

制模式, 按压控制板块上的按键, 改变输入信号, 实现悬浮目标的上下移动; 按压控制板块的模式按键, 切换控制模式, 使得装置处于左右控制模式, 此时按键控制并实现悬浮目标的左右移动.

由于平面-凹球面模型的特殊性, 在阵元数量、圆环间距和凹球面半径等因素的多重影响下, 导致声场呈现比理论仿真更为复杂的声场分布. 因此, 在复杂的声场中并不能实现悬浮粒子的任意移动, 经过多次实验, 发现悬浮目标能够实现图 8 所示的移动.



(a) 粒子原位置



(b) 粒子移动后位置

图 8 相位控制操纵粒子移动实验

在单粒子的定位移动操控中, 每次触发相位改变按键, 悬浮目标都将进行一定的位移, 但是对于粒子操控的准确性并未有较为数据化的体现. 因此为检验粒子操控的准确性, 以上下移动为例, 仅让悬浮粒子在竖直方向上移动(图 9). 将视频导入 Tracker 软件, 分析计算出每 12 步长(1 个周期)悬浮小球走过的距离, 并与理论值进行对比, 如图 10 和表 2 所示.

实验现象以及相关实验数据显示悬浮粒子的重力有较大的影响, 因此将悬浮粒子的移动分为由下往上运动以及由上往下运动. 首先计算由下往上运动的误差. 计算 A 类不确定度: $u_A = 0.2 \text{ mm}$, 取 B 类不确定度 $u_B = 0.1 \text{ mm}$, 则不确定度: $u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.2 \text{ mm}$, 得出悬浮粒子间距

为 $\bar{D}_{\text{由下往上}} = (9.0 \pm 0.2) \text{ mm}$, 相对偏差为 $E_r = 2.2\%$. 其次, 计算由上往下运动的误差. 计算 A 类不确定度: $u_A = 0.06 \text{ mm}$, 取 B 类不确定度 $u_B = 0.1 \text{ mm}$, 则不确定度: $u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.1 \text{ mm}$, 得出悬浮粒子间距为 $\bar{D}_{\text{由上往下}} = (6.1 \pm 0.1) \text{ mm}$, 相对偏差为 $E_r = 1.6\%$.

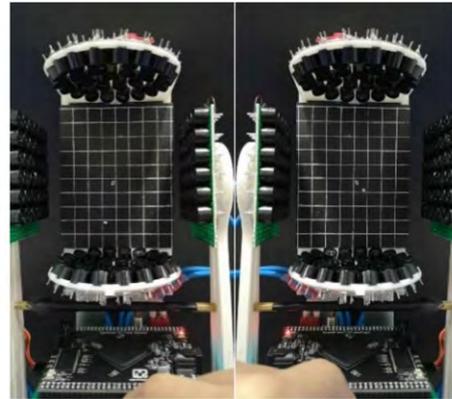


图 9 操纵粒子上下移动



(a) 向上运动



(b) 向下运动

图 10 粒子在竖直方向移动时 Tracker 软件追踪得到的竖直方向位置变化图

在移动过程中, 相位变化会使粒子出现逃离原来的波节, 被吸引到新波节的情况. 纵使对悬浮目标的操控的准确度存在一定的误差, 但是在超声阵列悬浮系统中实现对悬浮目标的移动与定

位也是研究的一大进步。

表 2 悬浮粒子在竖直方向的移动距离

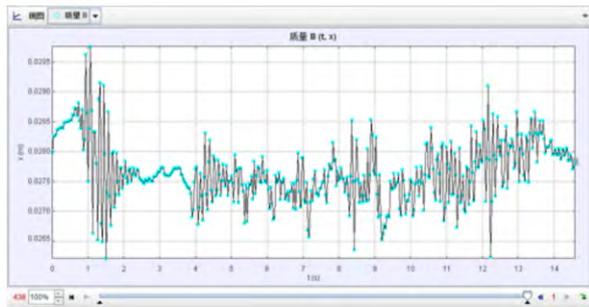
运动情况	s/mm	\bar{s}/mm
由下往上运动	9.4	9.03
	8.7	
	9.0	
由上往下运动	6.0	6.10
	6.1	
	6.2	

3.4 稳定性实验

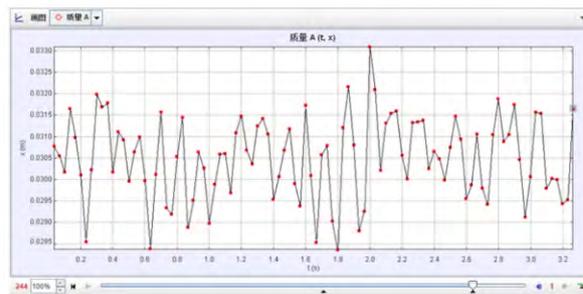
评价悬浮装置的稳定性如何,可通过对悬浮物的稳定悬浮时间来进行初步验证^[11]。无论是解文军^[12]等研制的磁致伸缩式单轴超声悬浮装置,还是江海^[11]等设计的超声驻波悬浮装置均能实现超过 30 min 的稳定悬浮,而在实验中本装置也能实现超过 30 min 的稳定悬浮,因此采用悬浮时间作为悬浮物稳定性方案的判断并不全面,参考朱怡^[5]等利用转动平台以及倾斜轨道验证整体装置的稳定性。

借助智能小车,带动整体装置分别做 180, 380, 560 mm/s 匀速运动,并以双摄像头形式分别拍摄远景和近景视频(为方便观测,将两侧的平面列阵拆下),将视频导入 Tracker 软件,分析装置随小车的运动情况。

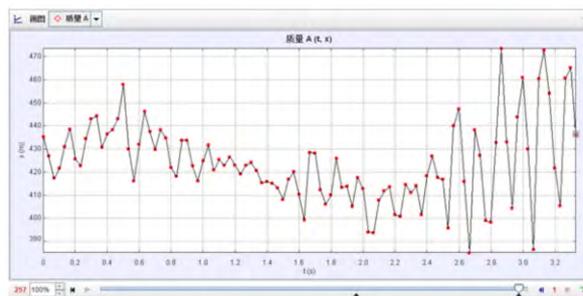
远景视频分析悬浮目标在水平方向的运动轨迹,近景视频分析悬浮目标在平衡目标附近的轻微扰动程度。虽然悬浮目标会因为装置的运动产生偏离平衡位置的轻微扰动,但从图 11 和表 3 总体看,3 个速度的抖动方差差距不大,说明整体装置较为稳定。



(a)180 mm/s



(b)380 mm/s



(c)560 mm/s

图 11 不同速度下悬浮小球抖动趋势图

表 3 装置不同速度运动中悬浮粒子悬浮抖动情况

$v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	σ
180	9.096×10^{-8}
380	1.303×10^{-7}
560	4.094×10^{-7}

实验中发现若装置能够在起始至达到匀速过程中保持稳定,则在匀速状态中均能保持稳定悬浮,为了深入探究悬浮目标脱离装置的临界情况,遥控智能小车加速运动,使用手机传感器 Phyphox 软件加速度传感器模块^[13]实时记录实验中加速度大小(图 12),测得装置在加速度为 $3.0 \sim 7.5 \text{ m/s}^2$ 时,悬浮目标脱离装置。

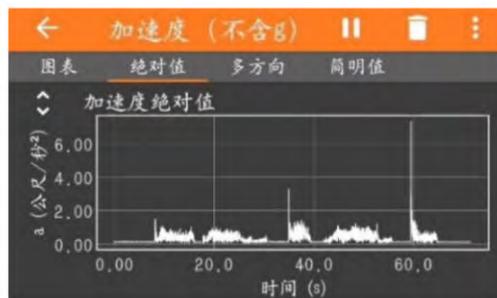


图 12 Phyphox 软件测量得到装置运动加速度

4 结 论

为了利用超声阵列结构实现固体颗粒的悬浮操控装置,设计了平面-凹球面的双轴发射极的超声阵列。通过预实验仿真软件优化设计,确定了平面-凹球面的双轴悬浮模型的理论可行性,并搭建了超声阵列悬浮实验装置。在装置中实现了单粒子的稳定悬浮,其中悬浮粒子与仿真理论值对比,平均相对偏差为 1.67%;在悬浮的基础上,还实现了对单粒子的定位移动操控,不仅实现了悬浮粒子的径向移动,同时也实现了悬浮粒子的轴向移动,并以竖直移动为例探究粒子移动的准确度,得出悬浮粒子从上到下运动的相对偏差为 1.6%,从下到上运动的相对偏差为 2.2%。最后,通过装置在运动过程中水平方向的直线轨迹偏离情况以及在平衡位置附近的轻微扰动程度表征悬浮目标的稳定性^[14]情况。实验表明,当运动加速度为 3.0~7.5 m/s² 时,悬浮目标脱离装置。

参考文献:

- [1] 李新波,王英伟,王宇昆,等. 凹球面双发射极超声阵列悬浮能力研究[J]. 西安交通大学学报,2018,52(11):106-111.
- [2] 张鹏,高辉,宋起超,等. 基于双反射面声悬浮器的非接触传输方法[J]. 黑龙江工程学院学报,2020,34(2):1-4.
- [3] 郭木铎. 超声驻波声悬浮能力及其稳定性仿真与实验[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [4] 范皓然. 基于单轴式超声悬浮系统的复杂声场的构建[D]. 西安:陕西师范大学,2017.
- [5] 朱怡,房毅. 驻波声悬浮中对悬浮小物件的操控研究[J]. 物理实验,2019,39(6):50-54.
- [6] 黄智勇,喻秋山,张泽玉,等. 声驻波演示仪[J]. 物理实验,2019,39(12):19-23.
- [7] 李文斌. 基于FPGA超声相控阵动态悬浮系统研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2019.
- [8] 王英伟. 凹球面超声阵列驻波悬浮系统设计及驱动控制方法[D]. 长春:吉林大学,2019.
- [9] 焦晓阳,刘建芳,刘晓论,等. 超声驻波悬浮能力特性[J]. 吉林大学学报(工学版),2013,43(2):340-345.
- [10] 武二永,韩焯,李立强,等. 大尺寸板状构件超声阵列悬浮技术[J]. 浙江大学学报(工学版),2019,53(11):2058-2066.
- [11] 江海,张莎莎,顾守东,等. 谐振管对驻波悬浮稳定性的分析与实验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2016,48(5):210-216.
- [12] 解文军,曹崇德,魏炳波. 声悬浮的实验研究和数值模拟分析[J]. 物理学报,1999,48(2):3-5.
- [13] 刘银奎. 利用智能手机演示声波的相关实验[J]. 物理实验,2020,40(7):58-61.
- [14] 金硕,严琪琪,李成翊,等. 驻波声场中悬浮临界密度及稳定性研究[J]. 大学物理,2020,39(5):20-26.

Solid particle suspension control based on standing wave of biaxial ultrasonic array

ZHU Lin-lin^{a,b}, YAN Ya-lin^{a,b}, LI Ting-feng^{a,b}, TANG Xiao-yu^{a,b}, CAI Wei-bo^{a,b}, LI Ming^{a,b}

(a. School of Physics and Telecommunication Engineering; b. National Demonstration Center for Experimental Physics Education, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To overcome the weak suspension stability of traditional ultrasonic array, an innovative levitation device for the planar concave spherical biaxial ultrasonic array was designed based on the two-axis ultrasonic array standing wave principle. COMSOL Multiphysics software was used for simulation. The experiment device was built up using FPGA, ultrasonic transducer, and other components to achieve the binding of solid particles and the interactive control of positioning and movement. According to the jitter of the suspended ball during the movement, the stability of the innovative device was analyzed. The experimental results demonstrated that the device could accurately control the movement of particles and improve the suspension stability.

Key words: planar concave spherical biaxial ultrasonic array; positioning control; COMSOL Multiphysics; suspension stability

[责任编辑:郭伟]