

# 超声悬浮传输及驻波-行波混合驱动

董惠娟, 穆冠宇, 李天龙

哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 哈尔滨 150001

**摘要** 超声悬浮传输广泛应用于材料制备、生化分析和先进电子制造等领域, 声悬浮传输装置具有结构简单、传输形式灵活、传输速度快、传输距离远、应用范围广等优点。概括了声悬浮传输的理论基础, 即声辐射力的计算方法; 结合国内外研究, 总结了不同传输方式对被传输物体的体积、传输的范围及速度的限制; 分析了驻波-行波混合驱动进行超声悬浮传输可能存在的问题, 展望了声悬浮传输的应用前景。

**关键词** 大物体驻波悬浮; 行波长距离传输; 平行对置式换能器阵; 二维驻波声场; 振动平板

在先进制造领域, 精密零件的制造和封装等过程不仅对环境要求极高, 零件的转运也是保证质量的关键环节。例如, 中国京东方、鸿海、华星光电、中电熊猫等厂商自主研发的高世代G10.5代TFT-LCD液晶玻璃基板, 打破了美国康宁、日本旭硝子等厂商的垄断, 已在国内建设多个生产基地<sup>[1]</sup>。然而, 在制备过程中, 采用传统机械手的接触、夹持和吸附方法, 不但玻璃基板易划伤、易污染, 机械手本身也存在传输距离短、传输距离灵活性差、结构复杂、体积庞大、安装困难、占地面积大、耗资巨大等一系列问题; 而且由于存在机械夹持作用, 使2200 mm×2500 mm×0.5 mm大尺寸超薄玻璃基板发生变形, 难以满足其基板的高平整度, 以及产线良率和稳定性。针对大尺寸超薄玻璃基板, 探索一种非接触、零污染、微重力的悬浮传输技术的理论支撑基础成为目前亟待解决的问题。

在电磁悬浮传输、光悬浮传输、气悬浮传输、超导悬浮等各种非接触传输技术中, 超声悬浮传输以无法比拟的优势应运而生。相较于其他悬浮传输技术, 声悬浮技术具有以下优点: (1) 良好的生物相容性<sup>[2-5]</sup>; (2) 水平声压梯度产生的水平稳定性; (3) 对被悬浮物体没有特定属性、特定形状要求等独特性质。因此, 在各种悬浮技术或者混合悬浮技术中, 超声悬浮技术具有良好的发展前景。超声悬浮传输技术按着声波传播方式分为驻波悬浮传输和行波悬浮传输。当超声振源辐射面和反射面之间为特定距离时, 超声波在辐射面和反射面之间多次反射形成驻波, 根据辐/反射面距离可以形成多个驻波声压势阱, 悬浮物可以被捕获在声压势阱处, 由势阱位置的改变带动物体传输。与驻波悬浮传输原理不同, 行波悬浮传输依靠行波在振动弹性体内的传播, 推动被悬浮物移动。

收稿日期: 2020-07-13; 修回日期: 2022-02-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51675140)

作者简介: 董惠娟, 教授, 研究方向为驻波声悬浮, 电子信箱: dhj@hit.edu.cn

引用格式: 董惠娟, 穆冠宇, 李天龙. 超声悬浮传输及驻波-行波混合驱动[J]. 科技导报, 2022, 40(6): 73-82; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.06.009

## 1 超声悬浮传输理论

声悬浮现象是高强度声场中的一种非线性现象<sup>[6]</sup>。在驻波声场中,可以通过声辐射压力将悬浮目标捕获在声场平衡位置。对被悬浮物传输时,可以通过主动调制谐振腔中声压分布,实现驻波声场中势阱点的位置转移,从而在声场作用下实现粒子悬浮传输。对声辐射力的特性分析是超声悬浮传输的理论基础。

### 1.1 声辐射力的一般形式

1934年,King<sup>[7]</sup>第一次系统、理论地计算了置于声场中的刚性小球所受到的声辐射压力,采用线性波动方程,从理论上求解了理想媒质中的刚性小球对平面波的散射问题,得到了声压与速度势之间的关系,沿着刚性小球的表面对声压进行积分,并求解时间平均势,最终获得了作用在刚性小球上的声辐射力。1962年,Gor'kov<sup>[8]</sup>提出了与King不同的更为简便的计算声辐射力的方法,认为处于声场中的被悬浮物对声波的散射是使其受到声辐射力的根本原因,由于散射所造成的围绕该悬浮物的封闭曲面的动量变化率应该等于被悬浮物所受到的声辐射力。

在Gor'kov的声场的时间平均势理论<sup>[8]</sup>中,由于被悬浮物体对声波的散射作用,产生了声辐射力。为了能够得到声辐射力的表达式,首先要依据Gor'kov理论得到球状悬浮物的时间平均势 $U$

$$U = 2\pi R^3 \left( \frac{\overline{p^2}}{3\rho_0 c_0^2} f_1 - \frac{\rho_0 \overline{u^2}}{2} f_2 \right) \quad (1)$$

式中, $R$ 为在驻波声场中被悬浮物的半径; $\overline{p^2}$ 为在驻波声场中被悬浮物在悬浮位置的声压均方值; $\overline{u^2}$ 为在驻波声场中被悬浮物在悬浮位置的媒质质点振速均方值; $f_1, f_2$ 分别为在驻波声场中与被悬浮物体的可压缩性质有关的系数; $\rho_0$ 为媒质静态密度; $c_0$ 为声音在空气中的传播速度。

Gor'kov关于时间平均势的理论被广泛应用于计算尺寸远小于波长的物体受到的声辐射力<sup>[9-10]</sup>。当被悬浮物为刚性时, $f_1=f_2=1$ ,式(1)可简化为

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

声辐射力 $F_{\text{rad}}$ 可由时间平均势 $U$ 计算得到

$$F_{\text{rad}} = -\nabla U \quad (3)$$

### 1.2 驻波声场中的声辐射力

在驻波声场中,媒质质点的振动位移 $y$ 可以表示为

$$y = 2A \sin(\omega t) \cos(k_0 x) \quad (4)$$

式中, $y$ 为驻波声场中媒质质点的振动位移; $A$ 为媒质振幅; $\omega$ 为角频率, $\omega=2\pi f$ , $f$ 为辐射面振动频率; $x$ 为媒质质点与辐射面沿轴线方向的距离; $k_0$ 为波数 $k_0=\omega/c_0$ , $c_0$ 为媒介中声速。

声场中,媒质质点振速 $u$ 和声场声压 $p$ 可以表示为

$$u = \frac{\partial y}{\partial t} = u_0 \sin(k_0 x) \cos(\omega t) \quad (5)$$

$$p = -p_0 \cos(k_0 x) \sin(\omega t) \quad (6)$$

式中, $u_0$ 为媒质质点振速幅值, $u_0 = 2A\omega$ ; $p_0$ 为声压幅值, $p_0=\rho_0 c_0 u_0$ 。

根据式(5)、式(6),分别求 $u$ 和 $p$ 在周期 $T$ 内的时间平均值为

$$\overline{u^2} = \left[ \frac{u_0 \sin(k_0 x)}{\sqrt{2}} \right]^2 = \frac{[u_0 \sin(k_0 x)]^2}{2} \quad (7)$$

$$\overline{p^2} = \left[ \frac{-p_0 \cos(k_0 x)}{\sqrt{2}} \right]^2 = \frac{[p_0 \cos(k_0 x)]^2}{2} \quad (8)$$

将式(7)、式(8)代入式(2)中,可以得到驻波声场中相对时间平均势 $\tilde{U}_x$ 关于声场位置坐标 $x$ 方向分布

$$\tilde{U}_x = \frac{5}{24} \rho_0 u_0^2 \cos(2k_0 x) - \frac{1}{24} \rho_0 u_0^2 \quad (9)$$

那么实际的声辐射力 $F_x$ 为

$$\begin{aligned} F_x &= 2\pi R^3 \tilde{F}_x = -2\pi R^3 \frac{\partial \tilde{U}_x}{\partial x} \\ &= -\frac{5}{6} k_0 \rho_0 u_0^2 \sin(2k_0 x) \end{aligned} \quad (10)$$

### 1.3 流体与声耦合场中物体的声辐射力

在较为复杂的声场中,物体受到的声辐射力难以用解析方法计算。目前,可以采用有限元、计算流体力学等数值方法计算声辐射力。在计算尺寸远小于声波波长的小物体的声辐射力时,可以忽略物体引起的声反射和衍射,在直接对声场声压分布

和速度分布进行数值求解后,应用 Gor'kov 理论计算声辐射力。当被悬浮传输的物体大小与波长相当时,物体本身会干扰声场中的声压分布。可以模拟物体周围的声压场和速度场并计算声辐射力。

## 2 超声悬浮传输的研究现状

在 19 世纪声悬浮现象被发现后<sup>[11]</sup>,该技术因具

备深过冷<sup>[12]</sup>、过饱和、快速凝固、无容器特性在空间材料和高性能材料制备领域备受关注,对超声悬浮传输/操纵的研究也逐渐开始活跃。目前,声悬浮传输/操纵的方法按照声场的种类可以分为驻波调节、换能器阵列和行波驱动等方式。表 1 总结了一些有代表性的声悬浮传输研究中被传输物体的尺寸,速度和传输范围。

表 1 现有声悬浮研究中被传输物体的尺寸、速度、传输范围

种类	实际传输距离	速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	被悬浮物(尺寸)
驻波 <sup>[13]</sup>	28 mm	—	聚苯乙烯球
驻波/相位 <sup>[14]</sup>	27 mm	—	聚氯乙烯平板(25 mm×25 mm×1 mm)
驻波/相位 <sup>[15]</sup>	7 mm	—	水滴(Φ1 mm~3.5 mm)
驻波/相位 <sup>[16-18]</sup>	R13.5 mm 环形	97	聚苯乙烯球
驻波/聚焦阵列 <sup>[19]</sup>	250 mm×250 mm×100 mm 平面内	—	聚苯乙烯球(Φ0.6 mm)
驻波/聚焦阵列 <sup>[20]</sup>	—	72	聚苯乙烯球(Φ2 mm)
驻波/二维阵列 <sup>[21]</sup>	~60 mm	4.9	液滴(Φ0.84 mm)
行波/电端吸振 <sup>[22]</sup>	—	0.7	木板(90 mm×60 mm×2.7 mm)
行波/材料吸振 <sup>[23]</sup>	—	410	聚苯乙烯球(Φ2 mm)
行波/材料吸振 <sup>[24]</sup>	65 mm	2.3	乙醇液滴(Φ1.5 mm)
行驻波混合 <sup>[25]</sup>	—	138	铝滑块
行驻波混合 <sup>[26]</sup>	~120 mm	—	乙醇液滴/聚苯乙烯球

### 2.1 基于单轴式装置驻波节点调节的小物体悬浮传输

驻波悬浮时,声波在对称的谐振腔中反复叠加形成驻波声场,物体悬浮在声压节点附近。因此,可以控制频率、谐振腔长度和相位改变声压节点位置,在驻波悬浮的基础上进行传输。

Kozuka 等<sup>[27]</sup>使用线聚焦悬浮装置,通过调整声源频率和对换能器输出面的分区驱动,实现了氧化

铝小球的二维移动,如图 1(a)所示。文献[28]通过改变谐振腔长度的方式移动声压节点,使用单换能器实现了小液滴的超声驻波传输,如图 1(b)。此外,若通过调整相位的方式,可以获得更为连续稳定的一维悬浮传输能力<sup>[15,29-32]</sup>。早在 1995 年,Mat-sui 等<sup>[29]</sup>就采用对置式换能器装置,对声源相位差与悬浮位置和声辐射力的关系进行了实验研究,如图 1(c)所示。

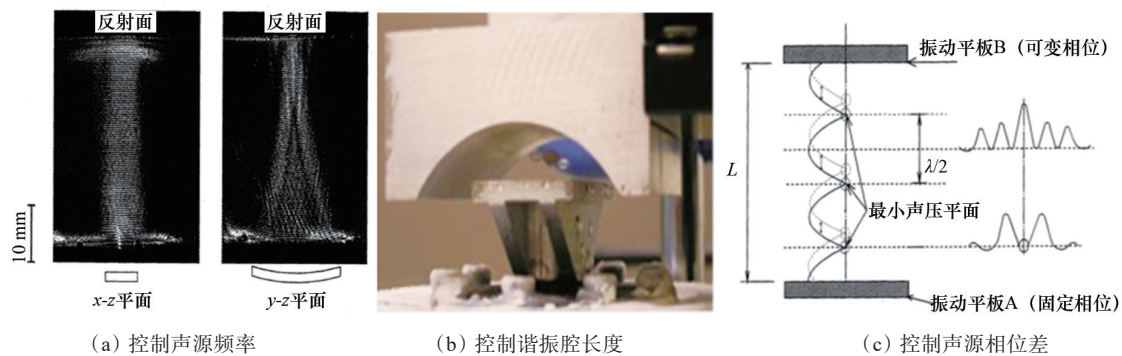
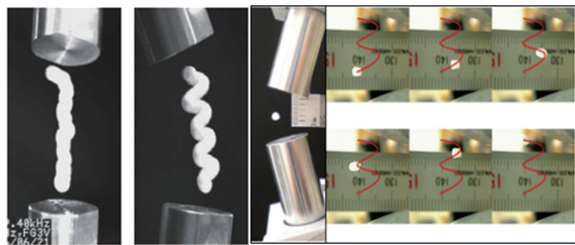
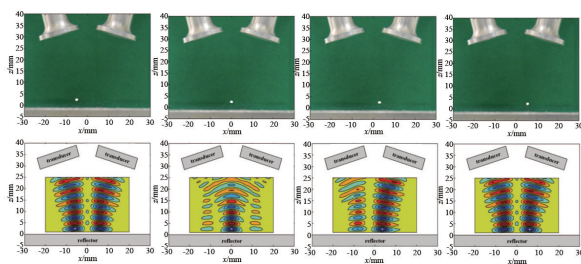


图 1 改变驻波节点位置实现小物体的传输

为了扩大传输的范围,增加声场的多样性,除了调制声场本身的参数以外,还可以设计不同形式的谐振腔。文献[33]研制了非轴对称超声悬浮装置,对交叉的声束形成的声场声压分布进行了计算和仿真,并实现聚苯乙烯小球的正弦型和椭圆型轨迹传输,如图2(a)所示,结果表明,相较于调频和调幅,调相的方法传输范围更大,传输过程更平稳。文献[34]研制了二维轴线交叉装置,实现悬浮物水平方向直线传输12 mm,并通过矩阵法计算声场,其数值计算结果与实验相符,如图2(b)所示。可见,采用调节2个换能器的激励相位差和幅值的方法,可以实现小物体的连续超声驻波悬浮传输。



(a) 椭圆形传输



(b) 水平传输

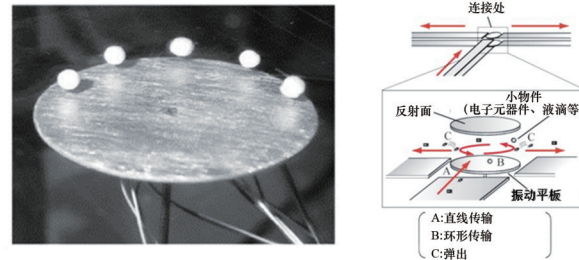
图2 基于2个换能器的超声驻波悬浮传输实例

## 2.2 基于换能器阵声场调制的物体悬浮传输

单轴式的悬浮装置传输范围有限,为了实现长距离和大范围的悬浮传输,可以将多个单轴式的装置组合起来,形成换能器阵列。

文献[16-18]搭建了由24个压电换能器组成的环形压电换能器阵,该装置通过切换电极片间的输入信号,旋转激励平面与反射面间的驻波声场,在直径为30 mm的激励平面上实现了7.5°的移动精度,完成了聚苯乙烯小球圆形悬浮运动,如图3(a)所示。并后续在此基础上,与直线传输装置结合,

进行了被传输物体的弹出与捕获,实现曲线与直线传输轨迹的转换,如图3(b)所示。



(a) 实物照片

(b) 原理示意

图3 环形压电换能器阵/环形悬浮传输

文献[21,35]研制了多个15 mm×15 mm换能器组成的阵列(langevin piezoelectric transducer, LPT),通过控制相邻换能器的振幅,使直径1.5 mm的悬浮液滴在阵元之间平滑的移动与融合,并研究了液滴间悬浮混合、固液间悬浮混合、细胞DNA转染等技术,该装置也能实现细长型物体的传输,如图4(a)<sup>[25]</sup>所示。在此基础上<sup>[35]</sup>,换用弹性反射面,利用声压引起的反射面变形增强声场强度,实现了直径5 mm,重5 g的钢球悬浮传输,如图4(b)<sup>[26]</sup>所示。Dong等<sup>[36-37]</sup>使用类似的技术,实现了聚苯乙烯小球的多层悬浮传输,如图4(c)<sup>[28]</sup>所示。

换能器阵列也可以实现三维传输,Hoshi<sup>[19]</sup>和Ochia等<sup>[20]</sup>利用相控阵聚焦技术,使用三维换能器阵式悬浮装置,可在空间任意位置产生驻波,实现直径为0.6 mm的多个聚苯乙烯的三维位置改变,如图5(a)<sup>[19]</sup>所示。该装置可以悬浮起最大密度为5 g/cm<sup>3</sup>的物体组成图形,并应用于毫米级物体的模拟,如图5(b)<sup>[20]</sup>所示。因此,利用多个换能器组成的换能器阵,调节相邻阵元间的激励相位差和幅值,也可以实现小物体的连续超声驻波悬浮传输。

## 2.3 基于行波驱动的对象悬浮传输

驻波悬浮传输时,被捕获在节点的物体随节点位置的移动而移动,这不仅只能传输球形且尺寸小于波长的物体,还限制了传输速度与传输距离。行波悬浮传输依靠行波在振动弹性体内的传播,推动被悬浮物移动,可以突破驻波悬浮传输对被悬浮物尺寸、移动范围和移动速度的限制。

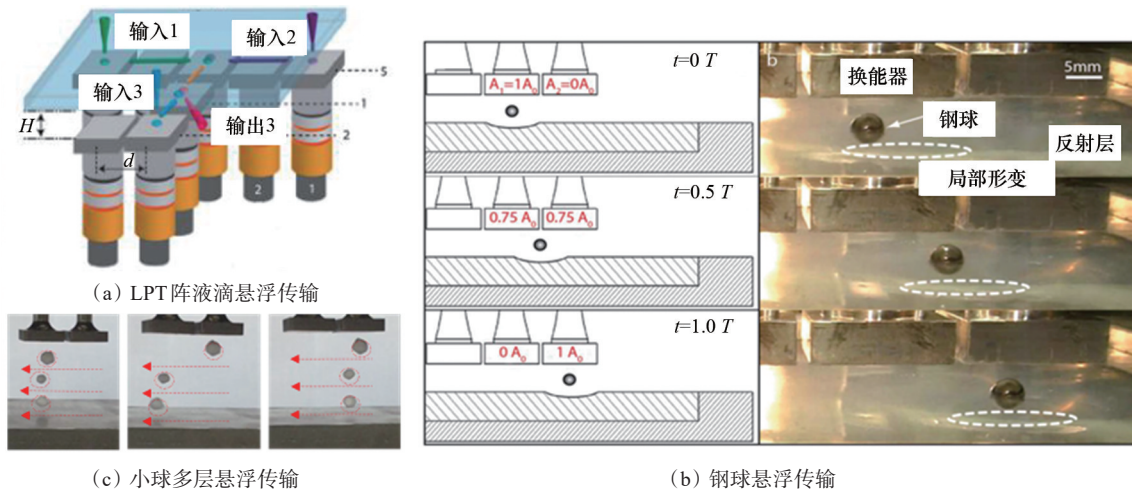


图4 矩形换能器阵进行小球传输

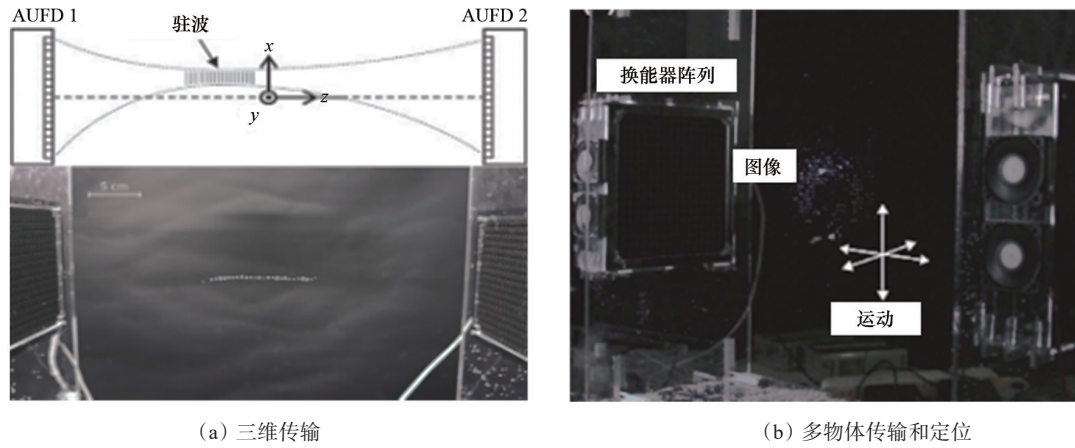
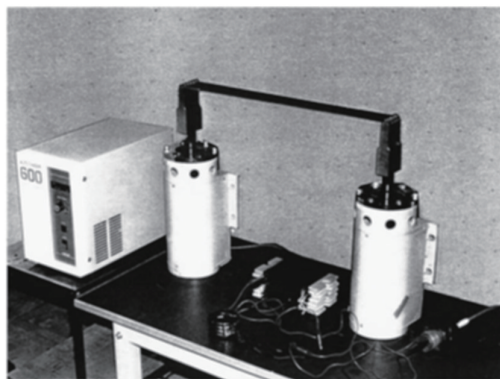


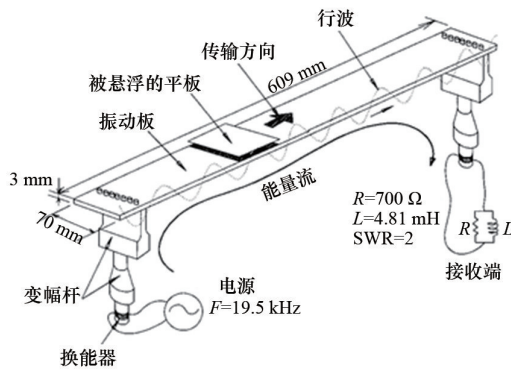
图5 基于换能器阵式的驻波悬浮传输装置实例

Hashimoto<sup>[22]</sup>首次采用行波传输实现了基于行波驱动的大物体、快速、长距离超声悬浮传输。悬浮传输的平板物体尺寸90 mm×60 mm,重8.6 g,传

输速度达到0.7 m/s。该长距离超声悬浮传输采用2个换能器“激振-吸振”模式,其中一个换能器吸振,在振动平面上形成行波,如图6<sup>[22]</sup>所示。当吸振



(a) 照片



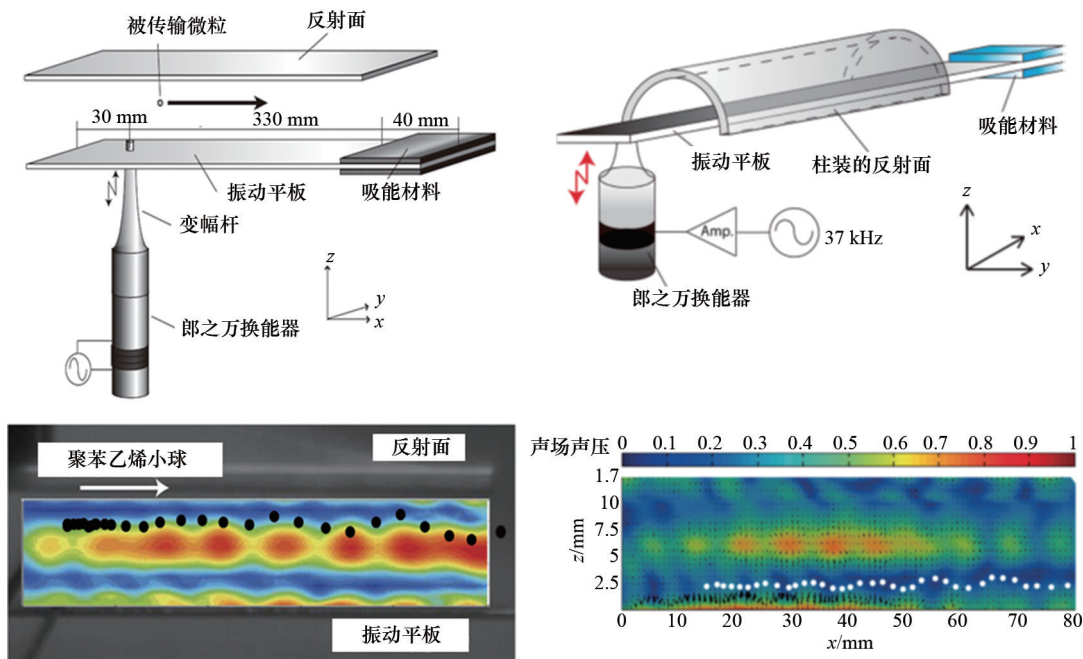
(b) 原理示意图

图6 采用换能器吸振的大物体行波悬浮传输实例(近场悬浮)

换能器接入的匹配电路参数调制合适时,这种方法可获得纯行波。他们还对振动弹性体的横截面形态加以改进,增强了传输的横向稳定性<sup>[38]</sup>。

在实际应用中,受换能器发热或老化,导致电声参数变化等影响,需要引入额外的测量和控制方法对匹配电路的参数进行实时调整,导致了这种方法的实用化成本较高、控制难度大。在“激振-吸

振”模式的研究中<sup>[23-24]</sup>,也采用硅橡胶等减振材料用于物理“吸振”,如图 7<sup>[23-24]</sup>所示。这种减振材料的选择难度大、体积计算复杂、安装困难。最致命的问题是,无论是采用换能器“吸振”,还是采用硅橡胶等减振材料“吸振”,这种“激振-吸振”模式的行波悬浮传输都无法实现传输的启停、传输方向和传输速度的自动控制。



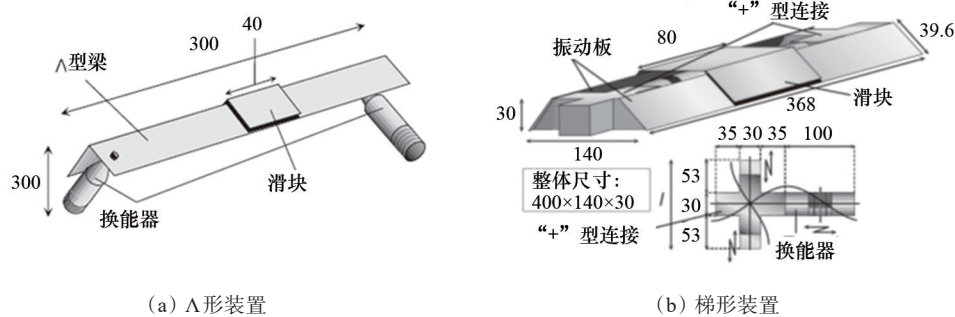
(a) 利用行波传输聚苯乙烯小球

(b) 利用行波传输乙醇液滴

图 7 利用减振材料吸振的行波悬浮传输实例(近场悬浮)

此外,机械波在传递过程中产生消耗,行波在振动弹性体上的振幅一端高、一端低,导致了悬浮力分布不均匀。Ide 和 Koyama 等<sup>[25,39-40]</sup>搭建了如图 8 所示的 2 种超声传输装置,改善了“激振-吸振”方

法中存在的悬浮力不均匀问题,提出了两侧换能器同时激励振动的方式,通过实验发现,存在特定的两换能器激励相位差  $\Delta\theta$ ,能够在直线导轨上形成行波,以 138 mm/s 的速度传输 90 g 的滑块。



(a) A形装置

(b) 梯形装置

图 8 利用减振材料吸振的行波悬浮传输实例(近场悬浮,单位:mm)

## 2.4 基于行波-驻波混合驱动的物体悬浮传输

行波传输可以长距离、高速度的传输较大的平板物体,然而,对行波声场的计算和仿真有一定难度,对行波传输的研究尚停留在对振动分布、声辐射力和悬浮距离的探讨层面。为了更好地研究行波的形成条件,近年来,对行波-驻波混合驱动传输物体时,激励相位差和悬浮高度、传输速度、传输方向的关联性的研究广泛开展。

目前,基于控制激励相位差的方法已经被应用于超声长距离悬浮传输。文献[26]使用平行对置式换能器装置,如图9(a)所示,通过连续调节两换能器的驱动相位差,移动沿振动平板方向的驻波,

带动聚苯乙烯小球、乙醇液滴等小物体的直线悬浮传输,如图9(b)、图9(c)所示。Mu等<sup>[11]</sup>在类似的装置上实现了长度为265 mm的行波声场。

文献[13]在此基础上对结构进行拓展,在四角布置换能器的170 mm×170 mm声辐射面内进行悬浮传输,通过连续调节相位720°实现了小球28 mm的位移,如图10(a)<sup>[13]</sup>所示。文献[14]对平板形物体对驻波声场声压分布的影响进行了仿真计算,并随后采用控制激励相位差的方法,进行了25 mm×25 mm×1 mm聚苯乙烯平板的悬浮传输实验,如图10(b)<sup>[14]</sup>所示,并观察到特定相位时行波成分较高,物体位移显著增强。

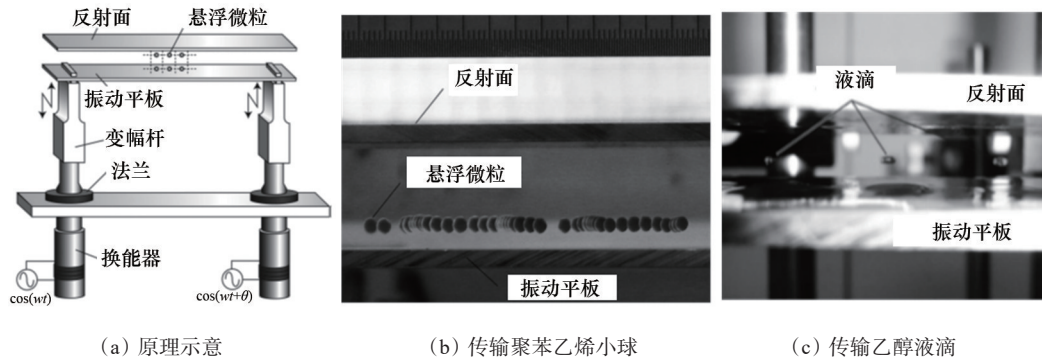


图9 应用调节相位方法的驻波悬浮传输实例

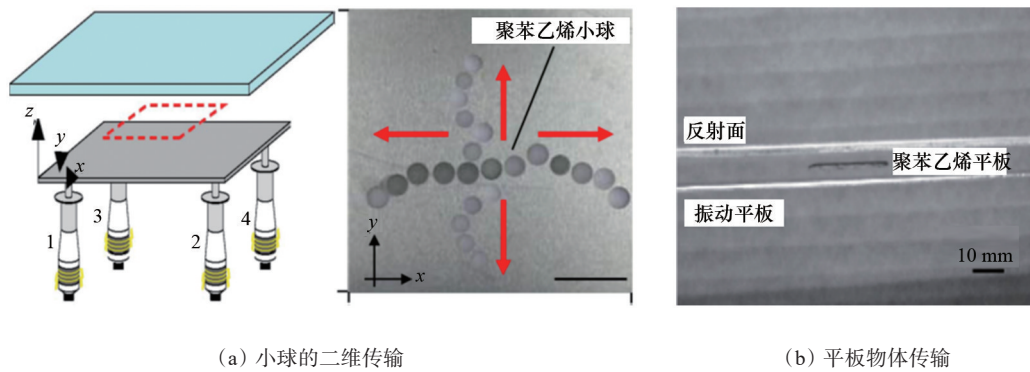


图10 其他应用调节相位方法的进行驻波悬浮传输实例

## 3 结论

超声悬浮传输技术具有微重力、无容器的环境特点,并且能够实现对悬浮物的非接触操控,可以很好地模拟空间实验条件。相较于其他悬浮技术,

超声悬浮传输技术对被悬浮物体没有特定属性要求,横向稳定性较好,有良好的生物相容性,可以为研究提供一个稳定、均匀、无污染的理想环境。超声悬浮传输技术可广泛应用于材料科学、生物化学、液滴动力学等科学领域。

在材料科学领域,超声传输技术可以控制被悬浮物体的位置及高度等,不仅可以使被分析的小液滴完全的远离容器壁以避免污染,还可以实现全方位监测,避免容器壁对检测的影响。可用于新型材料的制备与检测。在制造业和生物技术领域,超声传输技术可以实现晶圆和微机电系统(MEMS)零件的稳定翻转、定速运动等操作,在非接触的情况下完成晶圆的精密定位和MEMS的准确装配。在液滴动力学的研究中,超声传输技术可以保障液滴准确并稳定的撞击,从而高效的完成动力学性能的分析的实验。

随着中国在先进电子制造领域和微机电系统技术领域的进步,对精密器件的转运提出了更高的要求。超声悬浮传输具备巨大的发展潜力和广泛的应用前景。为了尽快将该技术其实用化,还需要进一步改进系统集成度,完善动态声场下物体传输的机理,并解决被传输物体的位置、方向、速度的控制问题,推进中国在先进电子制造领域和MEMS技术领域的发展。

### 参考文献(References)

- [1] 刘建党, 刘攀, 肖子凡, 等. TFT-LCD 基板玻璃的市场现状及发展趋势[J]. 玻璃, 2018, 45(2): 16-20.
- [2] Sundvik M, Nieminen H J, Salmi A, et al. Effects of acoustic levitation on the development of zebrafish, *Danio rerio*, embryos[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 1-11.
- [3] Wood B R, Heraud P, Stojkovic S, et al. A portable Raman acoustic levitation spectroscopic system for the identification and environmental monitoring of algal cells[J]. Analytical Chemistry, 2005, 77(15): 4955-4961.
- [4] Santesson S, Andersson M, Degerman E, et al. Airborne cell analysis[J]. Analytical Chemistry, 2000, 72(15): 3412-3418.
- [5] Xie W, Cao C, Lü Y, et al. Acoustic method for levitation of small living animals[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(21): 214102.
- [6] Beyer R T. Radiation pressure—The history of a mislabeled tensor[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1978, 63(4): 1025-1030.
- [7] King L V. On the acoustic radiation pressure on spheres [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A—Mathematical and Physical Sciences, 1934, 147(861): 212-240.
- [8] Gor'kov L P. On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid[J]. Soviet Physics Doklady, 1962, 6: 773-775.
- [9] Xie W, Wei B. Dependence of acoustic levitation capabilities on geometric parameters[J]. Physical Review E, 2002, 66(2): 026605.
- [10] Xie W, Cao C, Lü Y, et al. Levitation of iridium and liquid mercury by ultrasound[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(10): 104304.
- [11] Kundt A. Ueber eine neue Art akustischer Staubfiguren und über die Anwendung derselben zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern und Gasen[J]. Annalen der Physik, 1866, 203(4): 497-523.
- [12] Weber R J, Benmore C J, Tumber S K, et al. Acoustic levitation: Recent developments and emerging opportunities in biomaterials research[J]. European Biophysics Journal, 2012, 41(4): 397-403.
- [13] Kashima R, Koyama D, Matsukawa M. Two-dimensional noncontact transportation of small objects in air using flexural vibration of a plate[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control, 2015, 62(12): 2161-2168.
- [14] Masuda K, Koyama D, Matsukawa M. Noncontact transportation of planar object in an ultrasound waveguide[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control, 2018, 65(11): 2160-2166.
- [15] Weber J, Rey C, Neufeind J, et al. Acoustic levitator for structure measurements on low temperature liquid droplets[J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(8): 083904.
- [16] Kashima R, Murakami S, Koyama D, et al. Design of a junction for a noncontact ultrasonic transportation system [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control, 2014, 61(6): 1024-1032.
- [17] Nakamura K, Koyama D. Non-contact transportation system of small objects using Ultrasonic Waveguides[C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Madrid: IOP Publishing, 2012: 012014.
- [18] Koyama D, Nakamura K. Noncontact ultrasonic transportation of small objects in a circular trajectory in air by flexural vibrations of a circular disc[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control, 2010, 57(6): 1434-1442.
- [19] Hoshi T, Ochiai Y, Rekimoto J. Three-dimensional non-

- contact manipulation by opposite ultrasonic phased arrays[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 53(7S): 07KE07.
- [20] Ochiai Y, Hoshi T, Rekimoto J. Pixie dust: Graphics generated by levitated and animated objects in computational acoustic-potential field[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2014, 33(4): 1-13.
- [21] Foresti D, Nabavi M, Klingauf M, et al. Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(31): 12549-12554.
- [22] Hashimoto Y, Koike Y, Ueha S. Transporting objects without contact using flexural traveling waves[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, 103(6): 3230-3233.
- [23] Ito Y, Koyama D, Nakamura K. High-speed noncontact ultrasonic transport of small objects using acoustic traveling wave field[J]. *Acoustical Science Technology*, 2010, 31(6): 420-422.
- [24] Ding M, Koyama D, Nakamura K. Noncontact ultrasonic transport of liquid using a flexural vibration plate[J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(9): 097301.
- [25] Ide T, Friend J R, Nakamura K, et al. A low-profile design for the noncontact ultrasonically levitated stage[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(6S): 4662.
- [26] Koyama D, Nakamura K. Noncontact ultrasonic transportation of small objects over long distances in air using a bending vibrator and a reflector[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control*, 2010, 57(5): 1152-1159.
- [27] Kozuka T, Tuziuti T, Mitome H, et al. Control of a standing wave field using a line-focused transducer for two-dimensional manipulation of particles[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1998, 37(5S): 2974.
- [28] Foresti D, Nabavi M, Poulikakos D. Contactless transport of matter in the first five resonance modes of a line-focused acoustic manipulator[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 131(2): 1029-1038.
- [29] Matsui T, Ohdaira E, Masuzawa N, et al. Translation of an object using phase-controlled sound sources in acoustic levitation[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1995, 34(5S): 2771.
- [30] Kozuka T, Yasui K, Tuziuti T, et al. Noncontact acoustic manipulation in air[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(7S): 4948.
- [31] Marzo A, Barnes A, Drinkwater B W. TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(8): 085105.
- [32] Dong H, Jia L, Guan Y, et al. Experiments and simulations of the standing wave acoustic field produced by two transducers mounted in contraposition[C]//*Proceedings of Meetings on Acoustics 61CU*. Honolulu, Hawaii: Acoustical Society of America, 2017: 065002.
- [33] Park J K, Ro P I. Noncontact manipulation of light objects based on parameter modulations of acoustic pressure nodes[J]. *Journal of Vibration Acoustics*, 2013, 135(3): 031011.
- [34] Andrade M A, Perez N, Buiocchi F, et al. Matrix method for acoustic levitation simulation[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control*, 2011, 58(8): 1674-1683.
- [35] Foresti D, Sambatakakis G, Botton S, et al. Morphing surfaces enable acoustophoretic contactless transport of ultrahigh-density matter in air[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 3176.
- [36] Dong H, Liu S, Guan Y, et al. Simulation of particle transportation trajectory in acoustic standing wave field [C]// *2016 22nd International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. Piscataway: IEEE, 2016: 208-211.
- [37] 贾串玲. 超声驻波悬浮传输装置的研制与实验[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [38] Ueha S, Hashimoto Y, Koike Y. Non-contact transportation using near-field acoustic levitation[J]. *Ultrasonics*, 2000, 38(1-8): 26-32.
- [39] Koyama D, Ide T, Friend J R, et al. An ultrasonically levitated noncontact stage using traveling vibrations on precision ceramic guide rails[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control*, 2007, 54(3): 597-604.
- [40] Ide T, Friend J, Nakamura K, et al. A non-contact linear bearing by ultrasonic levitation[C]// *Proceedings of the World Congress on Ultrasonics 2003*. Paris, France, 2004: 471-472.
- [41] Mu G, Zhao J, Dong H, et al. Structural parameter study of dual transducers-type ultrasonic levitation-based transportation system[J]. *Smart Materials and Structures*, 2021, 30(4): 045009.

## Application of standing wave-traveling wave hybrid drive in acoustic levitation and transportation

DONG Huijuan, MU Guanyu, LI Tianlong

State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

**Abstract** The acoustic levitation and transportation is widely used in the fields of the material preparation, the biochemical analysis and the advanced electronic manufacturing. The devices for that purposes often have a simple structure, can make flexible transportations, with a fast speed and a long distance, and enjoy a wide application range. The calculation methods of the acoustic radiation force, as the theoretical basis of the acoustic levitation and transportation, are reviewed; as well as the limitations of different methods with respect to the size of the object, the distance and the speed of the transportation; finally, some potential problems of the standing wave-traveling wave hybrid drive method in the acoustic levitation and transportation are analyzed and the potential applications of the acoustic levitation and transportation are prospected.

**Keywords** large object levitated by acoustic; long distance transportation by traveling wave; the paralleled counterposition transducer array; two-dimensional standing wave acoustic field; vibration plate ●



(责任编辑 刘志远)