

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.009

分布式近场超声悬浮装置的理论分析与实验研究

徐新雨, 陈富林

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:在太阳能电池板的生产过程中,硅片作为必备的生产材料需要在各种加工工序之间流转运输,为了避免传统接触式皮带运输给硅片表面带来的刮擦损伤问题,开展分布式近场超声悬浮装置的理论分析与实验研究,着力于验证超声悬浮效果及柔性化应用的能力。采用流体力学中的动力润滑理论,计算得到悬浮力大小。搭建一套分布式近场超声悬浮实验平台,对其悬浮性能进行验证。实验表明:该分布式近场超声悬浮装置能够为被悬浮物体提供稳定悬浮力并具有较高的柔性化应用能力。

关键词:近场超声悬浮;分布式;悬浮力;换能器;柔性化

中图分类号:TB126 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)05-0046-04

Theoretical Analysis and Experimental Study on Distributed Near-field Acoustic Levitation Device

XU Xinyu, CHEN Fulin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:In solar panel production process, silicon wafers, as essential materials, need to be transported between various processing steps. To avoid the scratching and damage issues caused by traditional contact belt transportation, theoretical analysis and experimental research are conducted on a distributed near-field ultrasonic levitation device, with the focus on validating its ultrasonic levitation effect and its flexible application capabilities. This study adopts the dynamic lubrication theory in fluid mechanics to calculate the levitation force. A distributed near-field ultrasonic levitation experimental platform is constructed to verify its levitation performance. The experiment shows that the distributed near-field ultrasonic levitation device can provide a stable levitation force for the suspended object with high flexibility in application.

Keywords:near-field acoustic levitation; distributed; levitation force; transducer; flexibility

0 引言

在太阳能电池板的生产过程中,硅片作为必备的生产材料需要在各种加工工序之间流转运输,为了避免传统接触式皮带运输给硅片表面带来的刮擦损伤问题,可考虑使用非接触运输技术避免这种问题。近场超声悬浮技术能够产生高强度超声声压为平板物体提供悬浮力,满足硅片非接触运输要求。WHYMARK^[1]在1957年第一次发现了近场超声悬浮的现象,这一研究领域吸引了许多学者在此基础上进行了更深入的理论研究,并且由于近场超声悬浮在悬浮平板物体上的优势,学者们对这项技术在工程领域的应用进行了探索^[2-6]。该技术利用辐射面沿纵向产生的弯曲模态与悬浮物体之间形成一厚度远小于悬浮物体大小的挤压气膜,其平均气压大于大气压从而实现了对悬浮物体的悬浮支撑,考虑到悬浮力会随

着悬浮高度的降低而显著增大,可以实现对悬浮物体的稳定悬浮^[7]。HASHIMOTO等^[8-10]在1995年对单个大辐射面即之万换能器用声辐射声压理论进行了研究。在研究其在纵振模态时产生的近场超声悬浮现象时发现,近场悬浮下悬浮物体的悬浮高度与单位面积悬浮物质量的平方根成反比,与辐射面的近似振幅成正比。1996年研究了平面振动板的近场超声悬浮现象,并在1998年提出并设计了一种平面传输系统,能够受近场超声悬浮支撑并在行波的驱动下实现传输,基于这一模型进行了许多改进,从而满足各种条件下平板物体的悬浮运输。但这些传输系统主要基于单个换能器或由其构成的大辐射面板,对于不同的悬浮物体需要考虑其形状、传输条件等设计相应的换能器辐射面来契合运输需求。考虑到提升近场超声悬浮运输系统的柔性化应用能力,本文对基于分布式换能器的大尺寸硅片超声悬浮运输中关

第一作者简介:徐新雨(1999—),男,安徽滁州人,硕士研究生,研究方向为机电一体化,xuxy1999@163.com。

键技术进行了研究^[11]。

1 理论研究

近场超声悬浮力产生原理如图 1 所示。悬浮系统由两个长度为 L 、悬浮距离为 h 、在十几到几百微米之间的平板组成,下方的平板为辐射面,以一定大小为 a_0 的振幅周期高频率振动时,会将辐射面与上方的被悬浮物体之间的气体不断地挤压或者吸入,但由于振动的频率特别高,悬浮缝隙内的气体没有充足的时间完全排出或者吸入,因此缝隙之间的气膜也随之高频压缩或膨胀,悬浮缝隙内因此产生周期性变化的压力作用于上方的平板,即为悬浮面提供悬浮力^[12]。

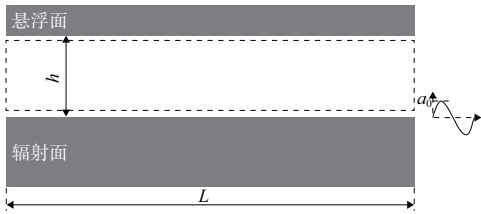


图 1 近场超声悬浮原理示意图

近场超声悬浮所能支持的悬浮距离远小于辐射面振动产生的超声波波长,因此不能用常规情况下声波传播产生的声辐射压力理论来研究近场超声悬浮的实际声压力大小^[13]。基于流体力学的模型在此种情况下更能反映真实情况。两平板之间的悬浮距离为

$$h(t) = h_0 + a_0 \cdot \sin \omega t \quad (1)$$

式中 ω 为角速度。假设在两平板运动时两平面始终保持平行,间隙内气膜成轴对称分布,相应的一维雷诺方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{ph^3}{12\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{\partial(ph)}{\partial t} \quad (2)$$

式中: η 为气体动力黏度; t 为时间; p 为气膜压力; h 为间隙气膜厚度; x 为平板长度方向坐标。对公式中的变量无量纲化后可得:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{12\omega\eta L^2}{p_b h_0^2}, T = \omega t \\ X = \frac{x}{L}, H = \frac{h}{h_0}, P = \frac{p}{p_b} \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ 为挤压数,它反映两平面间隙中气膜挤压的强度; h_0 为初始悬浮距离; p_b 为大气压强。气膜的特征长度 L 为 68 mm, T 为无量纲时间,角频率 $\omega = 2\pi f$,系统在 20 kHz 频率下工作。把式(3)代入式(2)得

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(PH^3 \frac{\partial P}{\partial X} \right) = \sigma \frac{\partial(PH)}{\partial T} \quad (4)$$

式(4)为无量纲化后的修正雷诺方程,需要保证初始时悬浮间隙中初始压力和环境大气压相等, $P(X, T=0) = 1$, 还需要气膜边缘的压力等于环境大气压, $P\left(X = \frac{1}{2}, T\right) = 1$, 气膜中心的气压在气膜中大小都是一致的, $\frac{\partial P(X=0, T)}{\partial X} = 0$ 。

气膜各时刻的气体压力是不同的,对其进行求解,再求出一个周期内气压的平均值从而得到气膜各点的平均压力 $\bar{P}$, 获得压力分布为

$$\bar{P}(X) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} P(X, T) dT \quad (5)$$

对得到的平均压力在悬浮面上进行积分得到总悬浮力 F_1 为

$$F_1 = S p_b \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} [\bar{P}(X) - 1] dX \quad (6)$$

式中 S 为辐射和悬浮面的等效重合面积。

2 实验研究

2.1 声压分布分析

为了验证超声换能器对目标物体有良好的悬浮效果,对实验采用的 CN2045-68LB P8 型号换能器进行仿真研究,换能器设计振动频率 20 kHz,功率最大 100 W,大头直径 68 mm,小头直径 45 mm,高 94 mm;声波在空气中传播,声速和密度分别设置为 343 m/s 和 1.18 kg/m³。对换能器在频率 20 kHz、电压 150 V 激励下声压分布情况进行仿真,仿真模型及其结果如图 2 和图 3 所示。PML 层为完美匹配层,考虑仿真对象的对称性,对模型进行了对称分割处理,得到图 3(a)换能器声压正截面分布情况和图 3(b)声压归一化处理后换能器中轴线上声压大小分布的仿真结果。

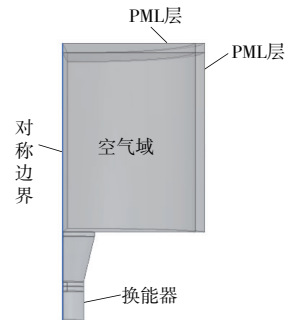


图 2 换能器声压分布仿真模型

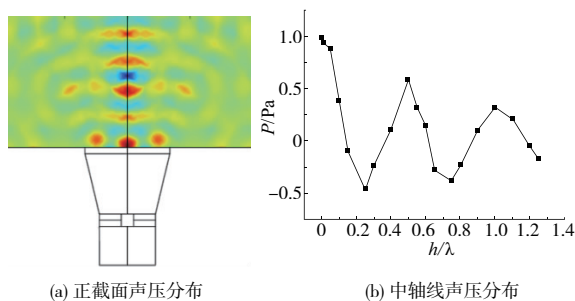


图3 仿真分析结果

从图3(b)中轴线声压分布可以看出,超声悬浮在近场范围内能够给被悬浮物体提供远大于半波长处的悬浮力,且越靠近辐射面,被悬浮物体获得的悬浮力越大,能够满足大部分情况下悬浮需求。

2.2 频率响应分析

实验装置中,超声换能器是将电能转换成机械能,产生高频振动从而提供悬浮力的重要装置。根据压电效应,当压电片正负两极受到特定频率正弦信号激励时,其压电堆叠会在纵向产生相同频率的伸缩振动,与压电陶瓷相连的辐射头受到激励能够产生沿着 z 方向的弯曲模态,发出的高频振动信号会挤压其与硅片间的气膜形成向上的悬浮力,使物体悬浮在一定高度。换能器三维建模与模态分析如图4所示。由有限元模态分析计算得到换能器的纵向共振频率为20.02 kHz。

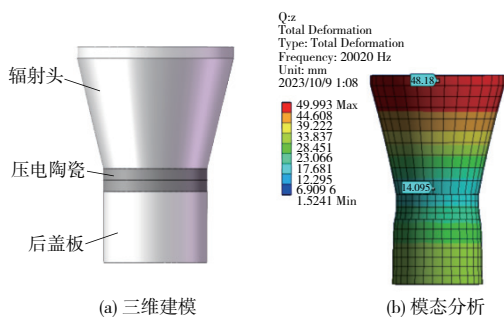


图4 换能器三维建模与模态分析

在ANSYS中对上述模态分析得到的结果进行进一步谐响应分析,以获得更精确的换能器辐射面振幅在不同工作频率下的分布情况,谐响应分析结果如图5所示。换能器在一定频率下工作可以获得更高的辐射面振幅,产生更大的悬浮声压,其最佳工作频率为20.04 kHz。

通过对ANSYS有限元仿真分析得到的换能器模态分析和谐响应分析的结果分析可知,换能器纵振工作频率在20 kHz左右与设计值吻合。

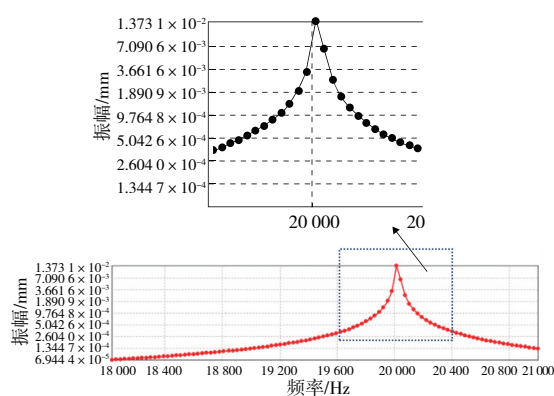


图5 换能器谐响应分析

2.3 悬浮性能实验分析

为了改善目前基于单个大辐射面即之万换能器传输系统在应对不同悬浮情况和悬浮要求时柔性化应用能力不足的情况,搭建基于分布式换能器的悬浮实验平台,可以改变换能器的位置、数量、分布情况等来应对不同的悬浮要求,大大提升了装置的柔性化应用能力。开展实验对该分布式近场超声悬浮装置的悬浮性能进行验证,确保装置的可用性。

实验平台示意图如图6所示。主要包括换能器阵列、超声波发生器、激光位移传感器、硅片及计算机(测试软件)等部分,实验平台实物图如图7所示。其中,超声发生器能够在0~3 000 W范围自由调节输出功率,频率调节范围为19.5~21.5 kHz。激光位移传感器采用HG-C1030(NPN),测量中心距离30 mm,测量范围 ± 5 mm,检测精度0.01 mm,可读数精度0.001 mm。通过激光位移传感器测量硅片悬浮的高度值,可以在数字显示屏上直接读取数值,亦可以通过模拟量接口通过计算机程序读取其数值。

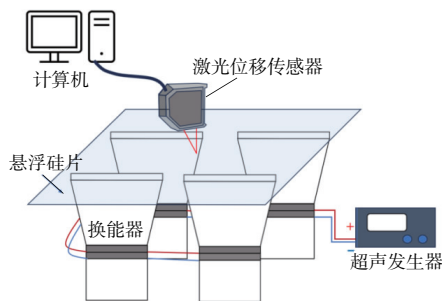


图6 实验装置示意图

实验中,被悬浮物体为一片182 mm×182 mm近正方形硅片,质量13.2 g,单位面积质量0.040 g/cm²。

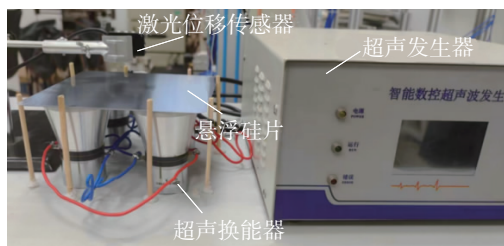


图7 装置实物图

令超声发生器产生固定频率 20 kHz 的激励信号,调节超声发生器的输出功率,超声换能器所受激励电压大小随之改变,不断增大超声发生器输出功率的大小,随激励电压的增大,换能器产生的悬浮声压也越大,被悬浮硅片的悬浮高度也随之变化。使用激光位移传感器对硅片的悬浮高度进行测量,每个激励电压下测量 3 次并取其平均值以降低误差。在不同激励电压作用下,经测量得到硅片悬浮高度变化曲线如图 8 所示。

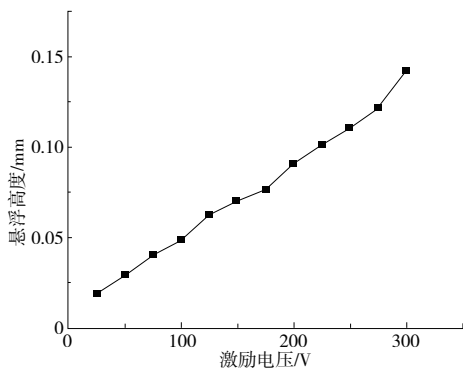


图8 硅片悬浮高度随激励电压变化

从图 8 中可以观察到,随着超声发生器输出功率的不断提高,激励电压不断变化的情况下,被悬浮硅片的悬浮高度随激励电压的增大而提高,实验结果表明悬浮高度随激励电压大小呈线性变化,能够通过改变激励电压大小得到需要的悬浮高度。

令超声发生器产生固定频率 20 kHz 的激励信号,固定超声发生器为一定大小的输出功率,换能器的激励电压大小为 300 V。准备多个相同规格的硅片,每次悬浮实验开始前,改变被悬浮硅片数量,以等比例改变单位面积上悬浮物体质量,使用激光位移传感器测定超声发生器工作前与工作后硅片高度,消除硅片本身厚度和硅片之间气隙对结果的影响,多次测量取平均值。硅片悬浮高度与硅片数量关系结果如图 9 所示。近场悬浮下悬浮物体的悬浮高度与单位面积悬浮物质量的平

方根成反比。被悬浮物体质量的改变对悬浮高度的影响也是可控的。

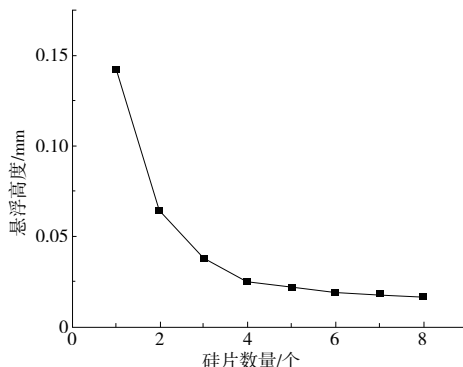


图9 硅片悬浮高度随悬浮硅片数量变化

3 结语

本文对分布式近场超声悬浮装置进行了理论研究,并搭建分布式悬浮实验平台开展实验,验证悬浮装置的悬浮性能。

1) 近场悬浮下悬浮物体的悬浮高度随换能器所受激励电压大小线性变化,能够通过改变激励电压大小得到需要的悬浮高度。

2) 近场悬浮下悬浮物体的悬浮高度与单位面积悬浮物质量的平方根成反比,被悬浮物体质量的改变对悬浮高度的影响是可控的。

由于硅片尺寸、形状和质量的变化,对悬浮装置的悬浮面形状、尺寸等有特殊要求时能够通过改变装置中换能器数量、布局等以满足各种不同情况对装置悬浮能力的要求。该分布式近场超声悬浮装置能够为被悬浮物体提供稳定悬浮力并具有较高的柔性化应用能力。

参考文献:

- [1] WHYMARK R R. Acoustic field positioning for containerless processing[J]. Ultrasonics, 1975, 13(6): 251-261.
- [2] NOMURA H, KAMAKURA T, MATSUDA K. Theoretical and experimental examination of near-field acoustic levitation[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 111(4): 1578-1583.
- [3] MINIKES A, BUCHER I, HABER S. Levitation force induced by pressure radiation in gas squeeze films[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 116(1): 217-226.
- [4] 马希直,王挺,王胜光. 近场超声悬浮启停瞬态行为的理论分析及实验测试[J]. 声学学报, 2014, 39(1): 93-98.

(下转第 121 页)

- 收稿日期: 2023-11-13

100(4):2057-2061.

- 收稿日期: 2023-10-26