

DOI: 10.7652/xjtuxb201305010

超声悬浮-气浮混合式悬浮的承载力特性研究

刘家郡¹, 江海^{1,2}, 尤晖², 焦晓阳¹, 刘建芳¹, 杨志刚¹

(1. 吉林大学机械科学与工程学院, 130022, 长春; 2. 中国科学院合肥智能机械研究所, 230031, 合肥)

摘要: 为了确保在一定的振动幅度和精度的条件下提高气动悬浮的承载力, 提出了一种采用超声悬浮-气浮混合式悬浮方式来提高气动悬浮承载力的新方法。通过 ANSYS 软件对超声悬浮核心部件(压电换能器)进行优化设计加工, 制作了混合式悬浮装置实验样机, 并进行了悬浮能力的测试, 得到的实验测试结果与理论计算结果相一致。优化后的圆盘压电换能器可悬浮起质量为 3 kg 的物体, 单位面积的悬浮质量可达 59.7 g/cm²。实验结果表明, 该混合式悬浮装置的悬浮承载力大于超声悬浮与气动悬浮的承载力之和, 当供气压力为 0.2 MPa 时, 混合式悬浮承载力约等于 2 倍的超声悬浮承载力与气动悬浮承载力之和。因此, 该混合式悬浮装置可大幅度地提高气浮支承的悬浮能力, 并且不改变气浮支承的振动幅度和精度。

关键词: 超声悬浮; 混合式悬浮; 气动悬浮; 圆盘压电换能器

中图分类号: O426 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)05-0056-05

Bearing Capacity of Ultrasonic Levitation and Pneumatic Suspension

LIU Jiajun¹, JIANG Hai^{1,2}, YOU Hui², JIAO Xiaoyang¹, LIU Jianfang¹, YANG Zhigang¹

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: To improve the bearing capacity of pneumatic suspension with certain vibration amplitude and precision, a new way to synthesize ultrasonic levitation and pneumatic suspension is put forward. The core component piezoelectric transducer of the ultrasonic levitation is optimized with ANSYS. Then the hybrid suspension prototype is manufactured following the optimized design and the experiments of suspending power are conducted, and the results well coincide with the theoretical calculations. The optimized one enables to suspend body of 3 kg, and the suspension weight per unit area of gets to 59.7 g/cm². The bearing capacity of hybrid suspension is larger than the sum of the bearing capacity of ultrasonic levitation and pneumatic suspension and the capacity is approximately equal to the sum of the pneumatic suspension and twice ultrasonic levitation with constant vibration amplitude and precision, when the supply pressure is 0.2 MPa.

Keywords: ultrasonic levitation; hybrid suspension; pneumatic suspension; disk piezoelectric transducer

随着社会和科学技术的发展, 传统的接触式运动技术受到许多国内外学者的关注, 例如磁悬浮技

术^[1]、静电悬浮技术^[2]、光悬浮技术^[3]、气动悬浮技术^[4]、声悬浮技术^[5-8], 其中气动悬浮技术已被广泛

收稿日期: 2012-10-15。 作者简介: 刘家郡(1979—), 男, 博士生; 刘建芳(通信作者), 男, 副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075181, F040703); 中国科学院“百人计划”基金资助项目(中科院人教字(2012)77 号)。

网络出版时间: 2013-03-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130315.1137.010.html>

应用。由于气动悬浮要通过提高进气压力才能提高悬浮的承载力,而随着进气压力的增大,整个气浮平台的振动强度也得到了加强^[9],因此,如何在确保振动幅度不变的前提下提高气动悬浮的承载力是问题的关键。研究发现,在确保振动幅度和精度不变的前提下,虽然可以通过其他方式的混合悬浮来提高气浮支承的悬浮能力,但这些混合悬浮方式都有一定的局限性,如受到材料的限制,其悬浮力的提高不是很明显。基于此,本文提出了一种超声悬浮-气浮混合式悬浮的方式,这种方式可悬浮起任何材料的物体,且混合悬浮力要大于超声悬浮和气浮各自悬浮力之和。

本文采用的是圆盘压电换能器,与普通压电换能器相比,其辐射圆盘振子的面积比较大,与空气的阻抗匹配性好^[10]。通过 ANSYS 软件分别对影响圆盘压电换能器声压值的 2 个因素进行优化,并设计出最佳的圆盘压电换能器。通过采用优化后的圆盘压电换能器制作了超声悬浮-气浮混合式悬浮实验样机,并通过理论和实验方法验证了这种混合式悬浮的优越性。

1 圆盘压电换能器的优化

1.1 结构示意图

超声波换能器是实现超声波近声场悬浮的核心部件。本文基于气浮支承结构,设计了一种圆盘压电换能器(见图 1)。当气浮支承工作时,圆盘表面可作为气浮支承的基座使用,振动圆盘的加入不但能增大换能器的辐射面积与辐射阻抗,而且能减小换能器振子端面与空气的声阻抗^[10]。采用 ANSYS 软件对圆盘压电换能器进行了仿真,确定了最佳的圆盘尺寸。

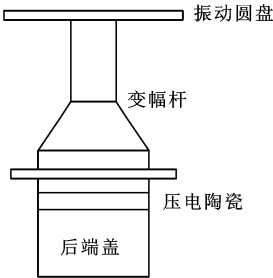


图 1 圆盘换能器的结构示意图

1.2 圆盘压电换能器声压分析

如图 2 所示,根据点声源理论,可设想把圆盘看作是一个表面为 S 的声源。该声源表面可以划分为无数个小面元 ds ,在每个 ds 上,各点的振动可看

成是均匀的。把这些小面元作为点声源,则 N 点处的声压^[11]为

$$p_s = j \frac{k_0 \rho_0 c_0}{2\pi d} A ds \exp[j(\omega t - k_0 d)], \quad k_0 = \omega / c_0 \tag{1}$$

式中: k_0 为波数; c_0 为气体传播速度; d 为 N 点到声源处的距离; ρ_0 为空气密度; ω 为声源频率; A 为圆盘的振动速度幅值。由式(1)可得 N 点处的声压为

$$p(l, \theta, t) = \iint_S j \frac{k_0 \rho_0 c_0}{2\pi d} A \exp[j(\omega t - k_0 d)] ds \tag{2}$$

由式(2)可知,当辐射端的振幅越大时,声压也越大,即超声波的悬浮力就越大。

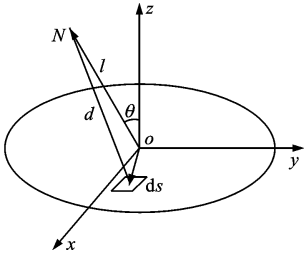


图 2 弯曲振动圆盘辐射声压的坐标示意图

1.3 圆盘压电换能器谐振分析

利用 ANSYS 软件来模拟分析圆盘压电换能器的声压分布,分析时需在模型上施加边界条件:在压电陶瓷上施加正弦变化的电压值;在压电换能器的节面位置施加固定约束。图 3 是圆盘振子在半径 R 为 40 mm、厚度 h 为 4 mm 时的声压分布图。

由于圆盘振子的半径 R 、厚度 h 会影响圆盘压电换能器的声压分布,因此分别根据 R 、 h 这 2 个因素来分析圆盘压电换能器的声压变化。分析中施加的边界条件相同,获取的超声波声场的声压分布如图 4 所示。

从图 4 可看出,当圆盘振子的 $R=40\text{ mm}$ 、 $h=4\text{ mm}$ 时,圆盘压电换能器的声压最大,即悬浮能力最强,因此在此条件下,超声波近声场悬浮装置的悬浮性能是最好的。实验发现,与超声悬浮装置的最

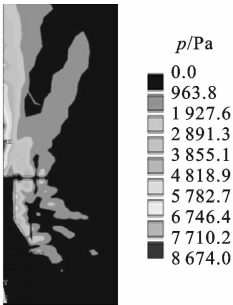


图 3 圆盘压电换能器的声压分布图

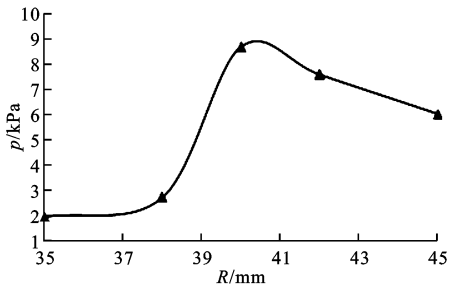
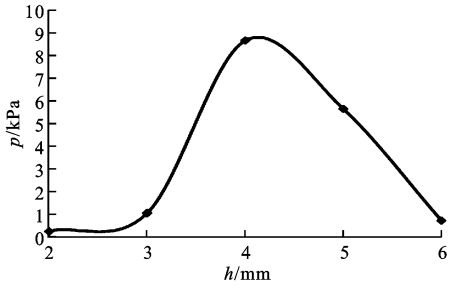
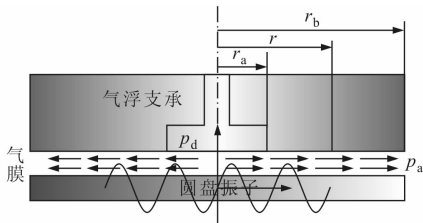
(a) $h=4$ mm(b) $R=40$ mm

图4 圆盘振子在不同条件下的声压变化曲线

大悬浮质量^[12] (830 g)、单位面积的悬浮质量 (12.53 g/cm²) 相比, 优化后的圆盘压电换能器的最大悬浮质量为 3 kg, 单位面积的悬浮质量为 59.7 g/cm²。

2 混合式悬浮物理模型的建立

当超声波近声场悬浮时, 在圆盘振子与悬浮物之间会形成一层薄薄的气膜, 而气浮支承工作时, 也会在气浮支承与圆盘振动板之间形成一层气体薄膜, 因此可应用纳维-斯托克斯方程来描述混合式悬浮时薄膜层内的气体运动状态。混合式悬浮的物理模型如图5所示。



p_a : 环境压力; p_d : 压力腔内压力; r_a : 压力腔半径; r_b :

气浮支承半径; r : 气浮支承上某处的位置半径

图5 混合式悬浮物理模型

假设在混合式悬浮与单独超声悬浮工况的气膜内, 气体运动均是等熵过程且熵值是相等的, 则有

$$\frac{p_1}{\rho_0} = \frac{p_2}{\rho_0} = CT \quad (3)$$

式中: p_1 为介质为空气时超声悬浮气膜内的声压; p_2 为混合式悬浮时超声悬浮作用在气膜内的声压; ρ_0 为空气密度; ρ_1 为混合式悬浮时气膜内的气体密度; C 为气体常数; T 为气膜内温度。混合式悬浮时气膜内的压力为

$$p_5 = p_3 + p_2 = p_3 + p_1 \frac{\rho_1}{\rho_0} \quad (4)$$

式中: p_3 为单独气动悬浮时的气膜内压力。由于压力腔的容积比较小, 所以可近似认为压力腔内压力是恒定的。同理, 可得到混合式悬浮时的压力腔内压力为

$$p_d = p_{dm} + p_{dn} = p_{dm} + p_4 \frac{\rho_1}{\rho_0} \quad (5)$$

式中: p_{dm} 为单独气浮支承工作时的压力腔内压力; p_{dn} 为混合式悬浮时超声悬浮作用在压力腔的内压力; p_4 为介质为空气时超声悬浮作用在压力腔的内压力。由图5可知混合式悬浮的承载力为

$$W = \pi r_a^2 p_d + \int_{r_a}^{r_b} 2\pi r p dr - \pi r_b^2 p_a \quad (6)$$

或简化为

$$\begin{aligned} W &= \pi r_a^2 p_d + p_5 (\pi r_b^2 - \pi r_a^2) = \\ &[\pi r_a^2 p_{dm} + (\pi r_b^2 - \pi r_a^2) p_3] + \\ &\frac{\rho_1}{\rho_0} [\pi r_a^2 p_4 + (\pi r_b^2 - \pi r_a^2) p_1] \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知, 混合式悬浮的承载力与气体介质特性有关, 其中式(7)由气动悬浮的承载力和混合式悬浮时超声悬浮作用在气浮支承上的声压构成。由式(4)可知, 压力与气体密度成正比, 当供气压力为 0.2 MPa 时, $\rho_1/\rho_0=2$, 此时混合式悬浮承载力等于 2 倍的超声悬浮承载力与气动悬浮承载力之和, 但实际上由于气浮支承内存在着沿程压力的损失, 因此是一种近似的等于。

3 混合式悬浮实验测量与结果

3.1 混合式悬浮实验测试系统

混合式悬浮实验测试系统由混合式悬浮实验样机、超声波信号发生器、示波器、激光测微仪、电脑、稳压阀、隔振实验平台和空气压缩机等组成。实验采用自制的圆盘压电换能器与配制的超声波信号发生器, 其谐振频率可自动追踪, 并随着悬浮物负载的变化而变化。实验发现, 当负载加重时, 悬浮物的高度也会降低, 换能器的谐振频率会略有降低。在实验中, 可以通过调节超声波信号发生器上的电流来改变换能器的激励电压, 使换能器的声压发生改变, 且悬浮间隙也随之发生变化。实验可分为超声悬浮

工况、气浮工况和混合式悬浮工况,当这 3 个悬浮工况稳定以后,可用激光测微仪测量各个工况下气浮支承的悬浮高度。

3.2 实验数据的测量

超声悬浮工况:把气浮支承放置在圆盘振子上,尽量确保气浮支承的轴线与圆盘振子的轴线重合,打开超声波信号发生器,圆盘压电换能器会自动根据负载变化达到谐振状态,此时在圆盘压电换能器前端面的圆盘振子上产生声压,推动气浮支承脱离圆盘表面,使之悬浮起来,从而使圆盘与气浮支承之间产生一层空气薄膜。通过调节超声波信号发生器的电流,可使超声悬浮高度在稳定的悬浮位置处上、下移动。

气浮工况:由空气压缩机出来的高压气体进入到稳压阀,调节稳压阀可给气浮支承提供恒定压力。混合式悬浮工况:当超声悬浮工况和气浮工况同时稳定工作时,即组成了混合式悬浮工况,采用 LK-0H20 激光测微仪分别对各个悬浮工况下不同负载的悬浮高度 H 进行测量,当供气压力为 0.2 MPa、负载为 1 kg 和 2 kg 时,测量各个工况下的悬浮高度,结果如图 6 所示。

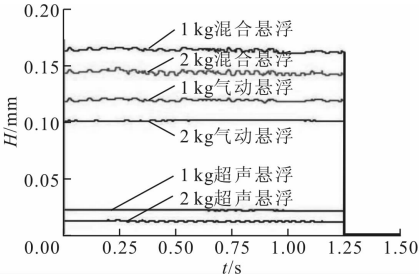


图 6 负载在各个工况下的悬浮曲线

从图 6 中可看出,随着负载的增加,各个悬浮工况的悬浮高度都随之减小,其中更为重要的是,当负载分别为 1 kg 和 2 kg 时,混合式悬浮高度比气动悬浮高度与超声悬浮高度之和还要大。这是由于气动悬浮时,气浮支承与大圆盘之间会形成一层薄薄的气膜,其内部压力比外界大气压高,从而使得气膜内的气体密度大于 1.29 kg/m^3 所致。由式(2)可知,随着气体密度的增加,声悬浮力也随之增加,因此超声的悬浮高度高于介质为空气时的悬浮高度。当供气压力为 0.2 MPa 时,由图 6 可知,混合悬浮的承载力约等于 2 倍的超声悬浮承载力与气动悬浮承载力之和,从而验证了式(7)的推导。

当负载为 1 kg、气压为 0.2 MPa 时,不同电压下各个工况的悬浮高度如图 7 所示。由图 7 可看

出,混合悬浮高度大于气动悬浮与超声悬浮之和的高度。同时还发现,当超声波信号发生器的工作电压分别为 286、363 V 时,随着电压的增大,超声悬浮工况和混合悬浮工况的悬浮高度也会随之增加,这是由于当供气压力一定时,提高电压会使得换能器的振幅增大,从而驱使圆盘振子高频激励气膜内的气体剧烈运动,即使得超声悬浮声压增大,超声悬浮能力增强,引起悬浮高度增加,因此混合悬浮的高度也随之得到增加。

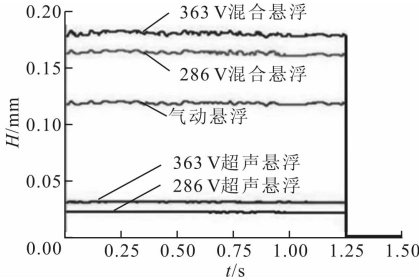


图 7 相同负载在不同电压下的悬浮高度

研究发现,当气压一定时,混合悬浮的悬浮能力只与超声悬浮的悬浮能力有关,混合悬浮高度的增加幅度与超声悬浮高度的增加幅度是相等的,因此可通过改变超声波近声场的悬浮特性来改善混合悬浮的特性。从图 8 可看出,混合式悬浮与气动悬浮工作时,整个气浮支承平台的振动情况没有多大变化,即超声悬浮的加入没有对气动悬浮的振动有所影响。

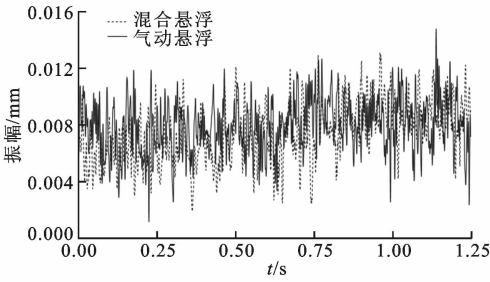


图 8 2 种悬浮工况下气浮支承的振动曲线

4 结束语

本文通过软件优化设计,制作出声压值较大的圆盘压电换能器。经优化后制作的圆盘压电换能器可悬浮质量为 3 kg 的物体,单位面积悬浮质量为 59.7 g/cm^2 。通过理论分析和混合式悬浮实验,验证了本文所提出的可通过超声悬浮-气浮混合式悬浮来提高气动悬浮承载力方式的合理性。在保证气浮支承振动幅度和精度不变的情况下,可通过超声

悬浮-气浮混合式悬浮方式来提高气动悬浮的承载力,而且这种混合式悬浮的承载力大于超声悬浮与气动悬浮的承载力之和,既保证了振动幅度和精度的要求,又使承载力得到了很大的提高。

参考文献:

- [1] KANG B J, HUNG L S, KUO S K. 2 DOF control for the motion of a magnetic suspension positioning stage driven by inverter-fed linear motor [J]. *Mechatronics*, 2003, 13(7): 677-696.
- [2] PARADIS P F, ISHIKAWA T, YODA S. Non-contact measurements of surface tension and viscosity of niobium, zirconium, and titanium using an electrostatic levitation furnace [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2002, 23(3): 825-842.
- [3] ASHKIN A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure [J]. *Physics Review Letters*, 1970, 24(4): 156-159.
- [4] HENNET L, CRISTIGLIO V, KOZAILY J. Aerodynamic levitation and laser heating: application at synchrotron and neutron sources [J]. *The European Physical Journal*, 2011, 196(1): 151-165.
- [5] VANDAELE V, LAMBERT P, DELCHAMBRE A. Non-contact handling in microassembly: acoustical levitation [J]. *Precision Engineering*, 2005, 29(4): 194-505.
- [6] TSKASAKI M, TERADA D, KATO Y. Non-contact ultrasonic support of minute objects [J]. *Physics Procedia*, 2010, 3(1): 1059-1065.
- [7] SHEN Changle, XIE Wenjun, HONG Zhenyu, et al. The development and application of acoustic suspension technology [J]. *Modern Physics*, 2010, 22(3): 10-13.
- [8] XIE Wenjun, CAO Chongde, LV Yongjun. Levitation of iridium and liquid mercury by ultrasound [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(10): 1-4.
- [9] 叶隼玺. 超精密运动平台中气浮支承振动特性的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [10] 林书玉. 气介式弯曲振动功率超声复合换能器的振动特性研究 [J]. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2001, 20(1): 33-38.
LIN Shuyu. Vibration characteristics of air-coupled high power ultrasonic compound transducer [J]. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2001, 20(1): 33-38.

- [11] 林书玉. 气介式功率超声复合换能器的声辐射特性研究 [J]. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2001, 20(1): 13-18.
LIN Shuyu. Study on the radiation acoustic field characteristics of air-coupled high power compound transducers in flexural vibration [J]. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2001, 20(1): 13-18.
- [12] 孙运涛, 陈超. 基于近声场的超声悬浮试验 [J]. *振动、测试与诊断*, 2011, 31(5): 578-581.
SUN Yuntao, CHEN Chao. Experimental study of ultrasonic levitation based on near-sound-field [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2011, 31(5): 578-581.

[本刊相关文献链接]

- 周权, 侯予, 陈汝刚. 应用于高速透平膨胀机的箔片动压气体止推轴承的试验研究. 2012, 46(11): 49-52.
- 苏文军, 孙岩桦, 虞烈. 可控磁悬浮系统的转子周期性振动抑制. 2010, 44(7): 55-58.
- 伍宏亮, 毛军红. 单级悬浮工作台平面运动测量系统对准误差分析. 2010, 44(1): 51-55.
- 庞晓平, 陈进, 王家序. 采用通用膜厚方程的动压径向轴承形状优化. 2009, 43(1): 57-61.
- 景敏卿, 刘恒, 梁金星, 等. 二维高精度磁悬浮定位平台的研究. 2008, 42(11): 1377-1381.
- 景敏卿, 刘恒, 沈园, 等. 新型挤压膜气体轴承的研究. 2008, 42(7): 799-802.
- 张东升, 梅雪松, 郝晓红, 等. 磁悬浮系统的电流控制方法. 2007, 41(9): 1096-1100.
- 成林, 钟力生, 张跃, 等. 采用动电方法的生物细胞介电特性研究. 2011, 45(6): 85-90.
- 霍宗权, 沈振兴, 田晶, 等. 西安市大气 PM10 中水溶性有机碳的季节变化及来源分析. 2010, 44(9): 128-132.
- 冯武卫, 孟庆丰, 谢友柏. 利用压电换能器电信号检测引线键合质量. 2010, 44(9): 64-68.
- 石胜君, 姚郁, 陈维山, 等. 具有模态解耦构型的纵弯直线超声电机. 2010, 44(8): 101-105.
- 方杰, 韦穗, 霍修坤. 超声衍射层析成像的高精度核卷积插值重建算法. 2009, 43(10): 94-98.
- 赵学涛, 陈维山, 郝铭. 纵弯复合多自由度超声电机的研究. 2009, 43(8): 107-111.
- 王新月, 高强, 王占学. 混压式超声速进气道喉道长度的设计与数值研究. 2009, 43(3): 106-109.

(编辑 管咏梅)