DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2006.01.019
2006年 1月 北京航空航天大学学报 January 2006
第32卷 第1期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol.32 No.1

聚焦式超声悬浮

潘祥生 邢立华 李 勋 张德远

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100083)

摘 要：超声悬浮技术在无容器材料制备以及地面空间状态模拟等方面有着广泛的应用前景.利用超声聚焦的原理，把换能器的辐射端设计成曲面，建立了一种单轴式的超声悬浮系统，旨在提高系统的悬浮性能.从理论上分析了此结构中声场的分布情况及其特性，并且对声场作了进一步的数值模拟分析.最后根据此理论设计了几种不同参数的超声悬浮器，进行了一系列的实验验证.实验结果表明此种结构能够提高系统的悬浮性能，系统的悬浮能力以及悬浮稳定性要比平面式超声悬浮系统高.

关 键 词：超声换能器；声辐射器；聚焦；数值分析

中图分类号：TB 559

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2006)01-0079-04

Focusing ultrasonic levitation

Pan Xiangsheng Xing Lihua Li Xun Zhang Deyuan

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The technique of ultrasonic levitation has a wide application in the containerless processing and manufacturing of materials and the status simulation of space on the Earth. Taking advantage of the principle of ultrasonic focusing, a single axis ultrasonic levitation system was set up with the radiator designed into a concave circular one so as to improve the system's capability of levitation. The distributions and characteristics of the sound field were investigated theoretically. The further research based on the numerical analysis was also conducted. Three sorts of ultrasonic levitation configurations were fabricated and a series of experiments were carried out consequently. The results show that the capability of levitation is directly proportional to the curvature radius of the radiator, as well as the distance between it and the reflector. And the results also proved that the performance of the focusing ultrasonic levitation system is higher than that of the conventional one.

Key words: ultrasonic transducers; acoustic radiators; focusing; numerical analysis

声悬浮是指在重力或微重力空间利用高强度声场中的声辐射压力，使之与悬浮体的重力相平衡，而使物体稳定悬浮在声场中的技术.

声悬浮现象最早是1866年由德国人August Kundt发现的，但是直到20世纪70年代以后，声悬浮技术才迅速发展起来[1]，用于流体的力学性能研究、物性测量[2]、无容器的材料处理和制备[3,4]、地面空间状态模拟、太空实验等方面.超声悬浮通常指的是声场的激励频率在18 kHz以上，属于超声频范围，一般的声悬浮技术都是利用超声频，因为超声频容易产生高强度的能量.

超声悬浮中最关键的问题在于以下2个方面：一是如何产生足够大的声悬浮力；二是如何保持声悬浮稳定性.传统的超声悬浮装置中，换能器的变幅杆顶端都是平面，反射板也以平面结构为主.为了提高悬浮能力，人们又把反射板设计成凹球面，即采用一定曲率半径的曲面反射板，来提高系统的悬浮性能.

本文受到超声聚焦原理的启发，从另一种途径出发，把超声辐射端做成凹球面，反射板仍为平

收稿日期：2004-10-28

基金项目：留学回国人员科研启动基金

作者简介：潘祥生(1978—)，男，江苏扬州人，博士生，pxsben@163.com.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

面结构，把超声辐射端做成凹球面之后，这就利用了声透镜的原理，使其具有聚能特性，并搭建了这样的聚焦式超声悬浮系统，旨在提高系统的悬浮能力和悬浮稳定性.

1 辐射端的设计

超声悬浮系统(图 1)主要包括超声电源、超声换能器振子、变幅杆、反射板、悬浮工作台等部分.这里，换能器辐射端是设计的重点，辐射端实际上就是超声变幅杆的顶端，本文根据超声聚焦的原理分别设计制作了 3 种不同的变幅杆.

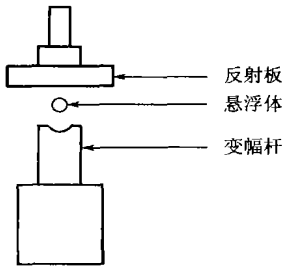


图 1 超声悬浮系统示意图

对相同条件下的声场来说，辐射端和反射板的距离越短，则声场强度越大，声场的悬浮能力也就越大.在第一个变幅杆中，把声透镜的焦点设计在物体悬浮位置的中心，根据以前的实验可知，对所使用的平面式超声悬浮系统来说，为使物体稳定悬浮，辐射端和反射板之间的最小距离约为 9 mm，因此应该使声透镜的声焦距 F_{ac} 为 4.5 mm.声透镜的几何焦距为

$$F=\frac{R}{1-\frac{c}{c_0}}=\frac{R}{1-\frac{340}{5\,200}}\approx R \tag{1}$$

又因为

$$1.27\lambda=1.27\times 17>9 \tag{2}$$

所以根据文献[1]取近似值：

$$0.75F=F_{ac} \tag{3}$$

综合以上各式可得

$$R=6\,\text{mm} \tag{4}$$

并取波阵面的开角为 60°.

第二个变幅杆中，设计声透镜的焦点处于反射板的位置，计算得 $R=12$ mm，其他尺寸参数相同.第三个变幅杆设计成传统的顶端为平面的结构，其它尺寸参数相同.

2 悬浮声场的研究

2.1 悬浮声场的理论分析

声学理论已经证明，各种换能器的辐射声场均可由亥姆霍兹-基尔霍夫积分定理来计算.对嵌于无限大障板上作单面辐射的振动表面，当辐射面边沿自由，作均匀振动时，声压可以表示为

$$p=\rho_0\frac{\partial\Phi}{\partial t}=\frac{\mathrm{j}\omega\rho_0 u_0 e^{\mathrm{j}\omega t}}{2\pi}\iint_s\frac{e^{-\mathrm{j}kr}}{r}\mathrm{d}s \tag{5}$$

其中，$u_0e^{j\omega t}$ 表示辐射端的表面振速；ω 为角频率；k 为波数；ρ_0 为介质密度；r 为声场中某点到原点的距离.对于本文所设计的变幅杆，可以看作圆环平面和凹球面的组合(图 1).其计算坐标及参数如图 2 和图 3 所示.

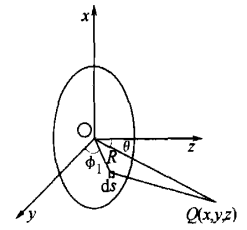


图 2 圆环平面的计算坐标

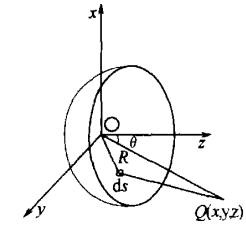


图 3 凹球面的计算坐标

通过计算得

$$p=\frac{\mathrm{j}\omega\rho_0 u_0 e^{\mathrm{j}\omega t}}{2\pi}\left(\int_0^{2\pi}\int_0^{b}\frac{e^{-\mathrm{j}kr_1}}{r_1}R_1\mathrm{d}R_1\mathrm{d}\beta+\int_0^{2\pi}\int_{a_1}^{a_2}\frac{e^{-\mathrm{j}kr_2}}{r_2}R_2\mathrm{d}R_2\mathrm{d}\beta\right) \tag{6}$$

其中，B 代表曲面边缘到原点的距离；a_1，a_2 代表圆环面的内外半径；R_n 代表辐射面上某点到原点的距离，r_n 代表声场中某点到原点的距离.

对于所设计的超声悬浮系统，考虑反射板的作用，根据声学理论中的镜像原理，刚性壁对声源的影响等效于一个虚声源的作用，即相当于在反射板的另一端相同位置放置了一个相同的声源.于是悬浮声场中任一点的声场强度可以表达为

$$p_1=\frac{\mathrm{j}\omega\rho_0 u_0 e^{\mathrm{j}\omega t}}{2\pi}\left(\int_0^{2\pi}\int_0^{b}\frac{e^{-\mathrm{j}kr_1}}{r_1}R_1\mathrm{d}R_1\mathrm{d}\beta+\int_0^{2\pi}\int_{a_1}^{a_2}\frac{e^{-\mathrm{j}kr_2}}{r_2}R_2\mathrm{d}R_2\mathrm{d}\beta+\int_0^{2\pi}\int_0^{b}\frac{e^{-\mathrm{j}kr_3}}{r_3}R_3\mathrm{d}R_3\mathrm{d}\beta+\int_0^{2\pi}\int_{a_1}^{a_2}\frac{e^{-\mathrm{j}kr_4}}{r_4}R_4\mathrm{d}R_4\mathrm{d}\beta\right) \tag{7}$$

在声源附近的声场中，换能器辐射面上不同部分辐射的声波到达观察点时，其振幅与相位都不一样，计算起来比较困难，并且不能得到简明解析表达结果[5]，所以主要研究沿中心轴上的声场，知道了中心轴上的声场分布规律，也就可以预计偏离轴向位置上的声场的一些规律.

在声场轴上，以上各参数之间的关系可以简化为

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$r_1 = r_0 \tag{8}$$

$$r_2 = r_0 + h \tag{9}$$

$$r_3 = L - r_0 \tag{10}$$

$$r_4 = L - r_0 + h \tag{11}$$

其中,L 表示辐射端到反射板的距离;h 表示坐标原点到曲面中心的距离;r_0 表示声场轴上某点到原点的距离.得到声场轴线上任意点的声压表达式,再由 Gor'kov 的在任意声场中的声辐射压力的计算公式:

$$U = 2\pi R^3\left[\left(p_{in}^2/3\rho c^2\right) f_1 - \left(\rho v_{in}^2/2\right) f_2\right] \tag{12}$$

$$F = -\operatorname{grad} U \tag{13}$$

其中

$$f_1 = 1 - \rho c^2/\rho_s c_s^2 \tag{14}$$

$$f_2 = 2(\rho_s - \rho)/(2\rho_s + \rho) \tag{15}$$

$$v = \operatorname{grad}\phi \tag{16}$$

$$p = -\rho\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} \tag{17}$$

其中,ρ 是介质的密度;ρ_s 是悬浮体的密度;c_s 是悬浮体中的声速.当悬浮体为刚体时,

$$f_1 = f_2 = 1 \tag{18}$$

根据以上各关系式,就能推导出声场轴线上时间平均势和声辐射压力的表达式,由于方程较复杂,这里就不再列出.

2.2　悬浮声场的数值模拟分析

前面给出的计算公式,在一般条件下很难得出解析解,计算机以及大型数学软件的发展能够实现复杂的运算,极大地节省了人力、物力,对设计研究有非常重要的参考价值.把理论推导得到的声压表达式(7)结合 Gor'kov 的计算公式,在计算机的帮助下,绘出了 3 种悬浮装置声场轴线上声辐射压力的曲线图(图 4).为方便起见,声辐射压力采用相对值表示.

从图 4 可以看出,与平面式的超声悬浮系统相比,凹球面系统的悬浮性能有明显的提高.并且随着曲率半径的增大,悬浮性能会进一步提高.由

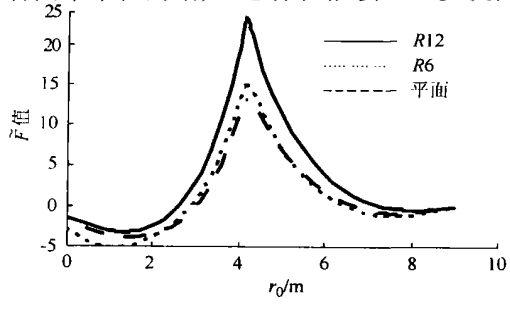


图 4　声辐射压力 $\tilde{F}$ 与曲率半径 r_0 的关系

于在计算中,没有采取任何近似,因此,以上的计算结果是轴上声场的严格解.

接下来研究系统各个参数和悬浮性能之间的关系.首先,在辐射端曲率半径一定的情况下(取 12mm),分别考察声场轴上某点到原点的距离 r_0、反射端到辐射端的距离 L 与声辐射压力 $\tilde{F}$ 之间的关系,绘出的三维曲线如图 5 所示.

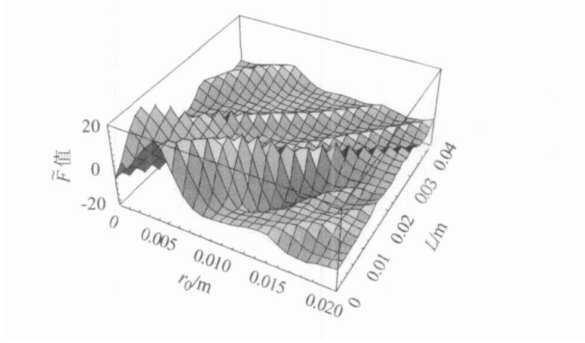


图 5　r_0, L 与 $\tilde{F}$ 之间的关系

其次,在辐射端到反射板距离一定的情况下(取 9mm),再分别考察声场轴上某点到原点的距离 r_0、辐射端曲率半径 r 和声辐射压力 $\tilde{F}$ 之间的关系,绘出的三维曲线如图 6 所示.

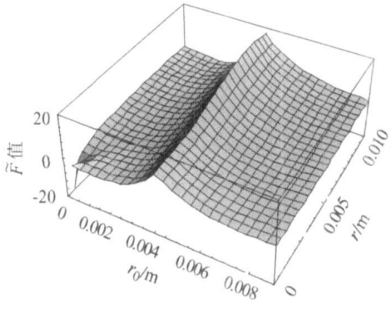


图 6　r_0, r 与 $\tilde{F}$ 之间的关系

由以上的三维曲线图可以看出,声场轴上的声辐射压力与辐射端到反射板的距离成正比,也与辐射端的曲率半径成正比.当然这里的曲面是有一定要求的,即波阵面的开角都是 60°.

3　实验结果

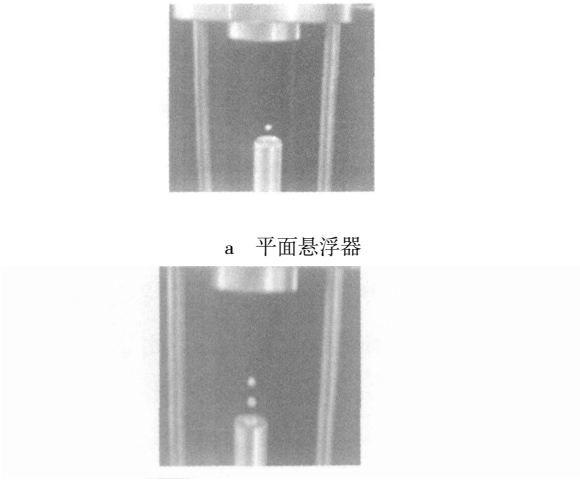
利用上面所设计的 3 种换能器进行了一系列的实验研究.首先,测定这 3 种悬浮系统各自所能悬浮起的最大试样.被悬浮试样的体积和密度是衡量系统悬浮性能的一个重要指标,这里采用密度为 7 800kg/m^3 的铁球作为试样,在换能器振幅为 12μm,辐射端到反射板距离均是 9mm 的时候,实验结果如表 1 所示.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 系统悬浮性能和曲率之间的关系

曲率半径/mm	悬浮铁球的最大直径/mm	试样稳定悬浮的时间/s
平面	不能浮起	不能浮起
6	8	＞120
12	9	＞120

接下来，又针对密度较小的泡沫塑料小球试样做了考察.当辐射端到反射板距离均约为62mm的时候，在相同条件下，平面悬浮器只能稳定浮起一个小球，曲率半径为6mm的悬浮器能同时稳定浮起2个小球，而曲率半径为12mm的悬浮器能同时稳定浮起3个小球(见图7).



a 平面悬浮器

b 曲率半径为6mm的悬浮器

c 曲率半径为12mm的悬浮器

图7 泡沫塑料小球在3种悬浮器中的悬浮

随着换能器振幅的变化，系统的悬浮性能也会有所不同.因此测量了当在系统中稳定悬浮一个泡沫塑料小球时，在不同的振幅下，辐射端和反射端之间所能达到的最大距离.得到图8所示的实验曲线.

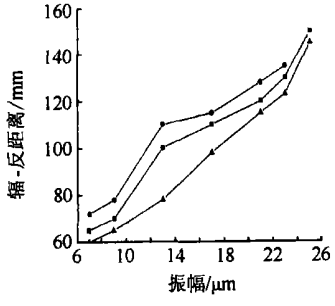


图8 振幅和辐射端-反射板最大距离关系曲线

综上所述，一方面，随着换能器振幅的增加，系统的悬浮性能会成比例的提高；另一方面，随着换能器辐射端曲率半径的增加，系统的悬浮性能也会相应的提高.

4 结束语

本文设计了一种聚焦式超声悬浮器，通过理论分析给出了声场轴线上声场的计算公式，并且对悬浮声场进行了数值模拟分析，绘制了声场特性曲线.通过理论分析计算及数值模拟，我们可以得出以下结论：①声场轴上的声辐射压力与辐射端到反射端的距离成正比；②声场轴上的声辐射压力与辐射端的曲率半径成正比.

最后，在所设计的悬浮系统上做了一系列的实验，实验结果表明，聚焦式超声悬浮系统的悬浮性能要比平面式超声悬浮系统高，能产生更大的声辐射压力，提供更好的悬浮稳定性，因而从实验上进一步对理论分析进行了验证.

参考文献 (References)

[1] 冯 若. 超声手册[M]. 南京：南京大学出版社，1999. 699
Feng Ruo. Ultrasonics handbook[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1999. 699(in Chinese)

[2] Robert E A. Technique for measuring the adiabatic compressibility, density, and sound speed of submicroliter liquid samples[J]. J Acoust Soc Am, 1976, 59(2): 339～343

[3] Gao J R, Cao C D, Wei B. Containerless processing of materials by acoustic levitation[J]. Adv Space Res, 1999, 4(10): 1293～1297

[4] Youming Cao, Wenjun Xie, Jun Sun, *et al*. Preparation of epoxy bledns with nanoparticles by acoustic levitation technique[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 86: 84～89

[5] 杜功焕，朱哲民，龚秀芬. 声学基础[M]. 上海：上海科学技术出版社，1986. 112
Du Gonghuan, Zhu Zhemin, Gong Xiufen. Base of sound[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1986. 112(in Chinese)

[6] Gor'kov L P. On the forces acting on a small particle in an acoustic field in an ideal fluid[J]. Sov Phys Dokl, 1962, 6: 773

[7] 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，1998, 48(2): 250～255
Xie Wenjun, Cao Chongde, Wei Bingbo. Experiment research and numerical simulation analysis of acoustic levitation[J]. Journal of Physics, 1998, 48(2): 250～255(in Chinese)

[8] Rudolf Tuckermann, Bernd Neidhart, Ernst G Lierke, *et al*. Trapping of heavy gases in stationary ultrasonic field[J]. Chemical Physics Letters, 2002, 363: 349～354

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net