

文章编号 1004-924X(2014)09-2423-08

## 超声波轴承用挤压式压电换能器的共振频率

李东明<sup>1\*</sup>, 崔爽<sup>1</sup>, 丛琳皓<sup>1</sup>, 王道顺<sup>1</sup>, 崔玉国<sup>2</sup>

- (1. 大连交通大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116028;
2. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:**设计了一种超声悬浮轴承用新型径向挤压式压电换能器,用于验证超声波轴承径向共振频率理论计算的正确性。基于弹性理论、压电方程和机电类比原理,建立压电换能器机电等效电路图,理论推导出了压电换能器径向振动的共振频率方程;然后,应用 Matlab 软件计算出了压电换能器的共振频率。采用有限元软件对已知结构尺寸的换能器进行模态分析,计算出压电换能器所需振型及该振型下的共振频率,数值仿真分析了换能器结构尺寸对换能器共振频率和径向振幅的影响。最后,设计了一台样机,从理论、仿真及实验三方面对其共振频率进行验证。实验结果显示:换能器径向振动共振频率的理论值与实验结果相对误差为 5.89%,仿真值与实验结果误差为 3.53%。实验结果证明了理论计算方法的正确性,为压电挤压换能器的设计提供了理论依据。

**关键词:**超声悬浮轴承;压电换能器;机电等效电路;共振频率;模态分析

**中图分类号:** TN384; TH133.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142209.2423

## Resonance frequency of extrusion type piezoelectric transducer for ultrasonic bearing

LI Dong-ming<sup>1\*</sup>, CUI Shuang<sup>1</sup>, CONG Lin-hao<sup>1</sup>, WANG Dao-shun<sup>1</sup>, CUI Yu-guo<sup>2</sup>

- (1. School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;
2. The Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

\* Corresponding author, E-mail: lidongming2001@163.com

**Abstract:** A new type radial extrusion type piezoelectric transducer for ultrasonic levitation bearings was designed to verify the correctness of the theoretical calculation of ultrasonic bearing radial resonance frequency. Based on the basic theory of elastic, piezoelectric equation, and the electromechanical analogy principle, the mechanical and electrical equivalent circuit diagram for the piezoelectric transducer was established, and the resonance frequency equation of the radial vibration of the piezoelectric transducer was deduced. Then, MATLAB software was applied to calculation of the resonant frequency of piezoelectric transducer, and the finite element software was used to analyze the modal of the known structure size of transducer, calculate the resonance frequency of the piezoelectric transducer under the required vibration mode and simulate and analyze the impact of

收稿日期:2014-02-25;修订日期:2014-03-20.

基金项目:辽宁省自然科学基金资助项目(No. 201102022);国家教育部留学回国人员启动基金资助项目;浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室开放基金资助项目;辽宁省教育厅项目(No. L2014178)

transducer structure size on resonance frequency and radial amplitude of the transducer. A prototype was designed and its resonant frequency was verified on the basis of theory, simulations and experiments. Result shows that the relative errors of theoretical and experimental results and simulation and experiment results for the radial vibration resonance frequency are 5.89%, and 3.53%, respectively. These results verify the correctness of the theoretical calculation method and provide theoretical basis for the design of extruded piezoelectric transducers.

**Key words:** ultrasonic levitation bearing; piezoelectric transducer; electro-mechanical equivalent circuit; resonance frequency; modal analysis

## 1 引言

超声波悬浮技术利用超声振动产生的辐射声压来平衡悬浮体,使之在没有任何附加效应的声场中悬浮或移动,具有超声波悬浮减摩的特点。随着超声波悬浮技术的发展,超声悬浮轴承成为该领域新的研究方向。

超声波发生器即压电换能器是超声悬浮轴承的关键器件。目前,国内外对超声悬浮轴承的研究刚刚起步,日本东京理工大学 Yoshimoto 教授 1991 年提出了超声悬浮轴承直线导轨<sup>[1]</sup>;1997 年将其结构改进为上下表面带有弹性铰链式直线导轨<sup>[2]</sup>;2006 年提出三面贴片式矩形直线导轨<sup>[3]</sup>;同年英国布鲁内尔大学 T A Stolarski 教授提出四面均带有弹性铰链的连接式直线导轨<sup>[4]</sup>。从国外对超声悬浮轴承研究来看,大多局限于对气体挤压效应的理论计算、数值仿真与实验研究,而对适于超声悬浮用新结构压电换能器理论的研究较少。国内对于压电换能器的研究已有 30 多年的历史,但对用于超声悬浮轴承系统中的压电换能器结构的振动特性等研究大多是一维平板或基于凹柱面的夹心式压电换能器<sup>[5-7]</sup>。然而,国内外对应用于水声领域中压电陶瓷圆管换能器径向振动特性的理论研究日益深入<sup>[8-9]</sup>,从最开始采用的薄膜或薄壳理论分析法<sup>[10-11]</sup>到现在建立的机电等效电路分析法<sup>[12-13]</sup>,正逐步完善复合圆管型压电换能器的理论研究。本文结合用于水声领域中圆管复合压电换能器理论,设计了一种超声悬浮轴承用新型径向挤压式压电换能器,从理论建模计算及有限元仿真的角度研究了该类型换能器的共振频率与其结构的关系,并通过了实验验证,为用于特定工作频率的超声悬浮轴承中压电换能器的结构设计奠定了理论基础。

## 2 换能器结构设计与理论计算

### 2.1 压电换能器结构设计及工作原理

图 1 所示为超声波轴承用径向挤压式压电超声换能器结构示意图,它主要由矩形压电陶瓷(PZT-4)薄片、开有矩形槽的金属圆筒和带有螺栓孔的支撑座组成。压电片和支座各 3 组均匀分布在圆柱壳体外表面上,每组间隔夹角为  $120^\circ$ ,压电陶瓷薄片通过环氧树脂粘贴在圆柱上,这种换能器辐射面为金属圆筒内表面,辐射面积大且均匀、挤压膜效应强、被悬浮轴的对中性好。

在压电陶瓷薄片上加载一定频率的交变电压后,压电片产生周期性高频振动,带动弹性金属圆筒一起振动。由于金属圆筒具有一定的弹性,金属圆筒径向端面会产生三角型径向挤压变形,在交变电压作用下,三角形变反复挤压换能器内壁与轴承之间的空气薄膜,从而形成具有一定承载能力的挤压空气薄膜。这种超声振动的挤压膜效应可用来实现轴承悬浮支撑,降低轴承摩擦系数、提高轴承旋转精度和工作效率。为取得最佳挤压效果,需要设计满足一定频率要求的挤压器,因此必须研究换能器共振频率及径向振幅与换能器结构尺寸的关系,以设计出满足要求的振动挤压器,使之能在要求的频率下工作。

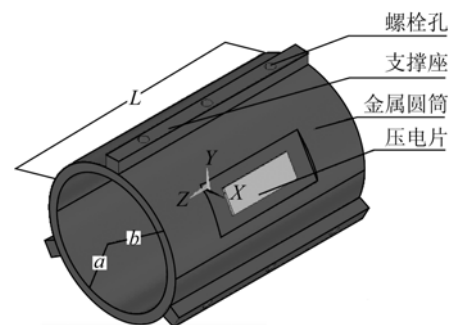


图 1 压电换能器结构

Fig. 1 Framework of piezoelectric transducer

### 2.2 压电换能器理论计算

为简化计算,忽略支撑座及金属圆筒表面凹槽部分的影响,分别计算了金属圆筒机电等效电路、矩形压电陶瓷薄片机电等效电路、以及金属圆筒与矩形压电陶瓷薄片复合而成的压电换能器机电等效电路和共振频率方程。

#### 2.2.1 金属圆筒机电等效电路<sup>[14]</sup>

金属圆筒在受到一定频率的正弦激励下,各质点都只作轴对称径向挤压振动。在柱坐标系下,假设圆筒内外半径和长度分别为  $a$ 、 $b$ 、 $L$ 。根据弹性力学理论知识,圆筒径向振动理论研究可转化为平面应变问题研究,即可得到金属圆筒径向振动运动方程:

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{1}{r^2} u_r = \frac{1}{u_m^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2}, \quad (1)$$

其中:  $u_m = \sqrt{E_m/n_1 \rho_m}$  是径向振动波的传播速度。

圆筒在简谐振动下,其径向振动方程可整理为:

$$\frac{\partial^2 \varphi(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi(r)}{\partial r} + \left( k_m^2 - \frac{1}{r^2} \right) \varphi(r) = 0, \quad (2)$$

其中:  $k_m = \omega_m / u_m$  为等效波数。式(2)为贝塞尔微分方程,可用通解形式表示径向振动位移函数:

$$\varphi(r) = A J_1(k_m r) + B Y_1(k_m r). \quad (3)$$

其中:  $J_1(k_m r)$ 、 $Y_1(k_m r)$  分别为一阶一类和二类贝塞尔函数,  $A$ 、 $B$  为待定系数,圆筒内外壁振动边界速度为:

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} \Big|_{r=a} = v_a, \quad \frac{\partial u_r}{\partial t} \Big|_{r=b} = -v_b. \quad (4)$$

由式(3)和(4)可得出  $A$ 、 $B$  常数值:

$$\begin{aligned} A &= -\frac{j Y_1(k_m b)}{\Delta \omega} v_a - \frac{j Y_1(k_m a)}{\Delta \omega} v_b, \\ B &= \frac{j J_1(k_m b)}{\Delta \omega} v_a + \frac{j J_1(k_m a)}{\Delta \omega} v_b, \end{aligned} \quad (5)$$

其中:  $\Delta = J_1(k_m a) Y_1(k_m b) - J_1(k_m b) Y_1(k_m a)$ 。

已知  $S_a = 2\pi a L$ ,  $S_b = 2\pi b L$  分别为圆筒内外壁辐射面面积,得金属圆筒径向边界挤压振动力:

$$F_a = -S_a \sigma_r \Big|_{r=a}, \quad F_b = -S_b \sigma_r \Big|_{r=b}. \quad (6)$$

由式(3)、(5)、(6)得:

$$\begin{aligned} F_a &= -\frac{j \rho_m u_m S_a}{k_m} \left[ \left( \frac{\Delta_1}{\Delta} - \frac{n_1}{n_2 a} \right) v_a + \frac{2}{\Delta a \pi} v_b \right], \\ F_b &= -\frac{j \rho_m u_m S_b}{k_m} \left[ \frac{2}{\Delta b \pi} v_a + \left( \frac{\Delta_2}{\Delta} + \frac{n_1}{n_2 b} \right) v_b \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

其中,

$$\Delta_1 = \Delta / a + k_m [J_1(k_m b) Y_0(k_m a) - J_0(k_m a) Y_1(k_m b)],$$

$$\Delta_2 = -\Delta / b + k_m [J_1(k_m a) Y_0(k_m b) - J_0(k_m b) Y_1(k_m a)].$$

采用机电类比法将圆筒径向挤压的二维振动简化为一维振动,并建立一个 T 型网络等效电路来等效径向机械振动。图 2 所示为金属圆筒在径向挤压振动状态下机电等效电路。

其中:

$$\begin{aligned} Z_{1m} &= -\frac{j \rho_m u_m S_a}{k_m} \left[ \frac{\Delta_1}{\Delta} - \frac{n_1}{n_2 a} - \frac{2}{\Delta a \pi} \right], \\ Z_{2m} &= -\frac{j \rho_m u_m S_b}{k_m} \left[ \frac{\Delta_2}{\Delta} + \frac{n_1}{n_2 b} - \frac{2}{\Delta b \pi} \right], \\ Z_{3m} &= -\frac{j \rho_m u_m S_a}{k_m} \cdot \frac{2}{\Delta a \pi} = -\frac{j \rho_m u_m S_b}{k_m} \cdot \frac{2}{\Delta b \pi}. \end{aligned}$$

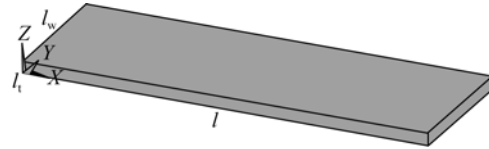


图 2 金属圆筒的机电等效电路

Fig. 2 Electromechanical equivalent circuit of metal cylinder

#### 2.2.2 矩形压电陶瓷薄片机电等效电路<sup>[15-16]</sup>

图 3 所示为矩形压电陶瓷薄片,其激发电极被覆盖在  $z$  面上。

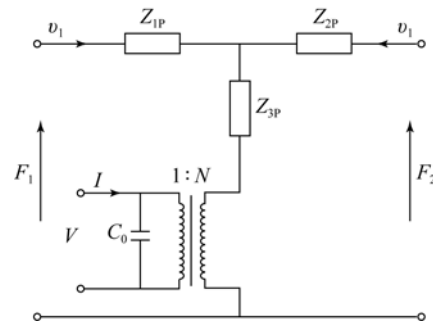


图 3 矩形压电陶瓷薄片

Fig. 3 Rectangular piezoelectric ceramic chip

在直角坐标系下,选取第一类压电方程:

$$\begin{aligned} S_1 &= \epsilon_{11}^E T_1 + d_{31} E_3, \\ D_3 &= d_{31} T_1 + \epsilon_{33}^T E_3. \end{aligned} \quad (8)$$

设  $u_1$  为质点  $x$  方向位移,且有  $S_1 = \partial u_1 / \partial x$ ,结合牛顿第二定律和压电方程,得矩形压电陶瓷薄片运动方程:

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2}, \quad (9)$$

其中:  $v = \sqrt{1/\rho s_{11}^E}$  为沿长度方向传播速度,波数  $k = \omega / v$ 。在交变电压  $E_3 = E_0 e^{j\omega t}$  下,矩形压电陶

瓷运动方程解的形式可表示为:

$$u = (C \sin kx + D \cos kx) e^{j\omega t}. \quad (10)$$

由边界条件  $D = u_1 = u|_{x=0}$ ;  $C = -u_2 = u|_{x=l}$  代入式(10)可得压电片位移方程为:

$$u = \frac{u_1 \sin k(l-x) - u_2 \sin kx}{\sin kl} e^{j\omega t}. \quad (11)$$

压电片中每点分布力为:

$$F = T_1 S = \frac{1}{s_{11}^E} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) S - \frac{d_{31}}{s_{11}^E} E_3 S. \quad (12)$$

$F_1$ 、 $F_2$  分别是  $x=0$ 、 $l$  处外力, 由力平衡条件  $F_1 = -T_1 S|_{x=0}$ ;  $F_2 = -T_1 S|_{x=l}$ , 解式(12)得:

$$\begin{cases} -F_1 = \frac{S}{s_{11}^E} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} - \frac{d_{31}}{s_{11}^E} S E_3, \\ -F_2 = \frac{S}{s_{11}^E} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=l} - \frac{d_{31}}{s_{11}^E} S E_3. \end{cases} \quad (13)$$

已知  $E_3 = V/t$ ,  $n = \omega d_{31} / s_{11}^E$  为机电转换系数,  $v_1$ 、 $v_2$  分别为  $x=0$ 、 $l$  处速度, 联立方程(11)和(13), 得到矩形压电片机械振动方程式:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{\rho v S}{j \sin kl} (v_1 + v_2) + j \rho v S t a n \frac{kl}{2} \cdot v_1 + n V, \\ F_2 = \frac{\rho v S}{j \sin kl} (v_1 + v_2) + j \rho v S t a n \frac{kl}{2} \cdot v_2 + n V. \end{cases} \quad (14)$$

已知  $C_0 = \omega l \bar{\epsilon}_{33} / t$  为压电片的一维截止电容, 由电路基本理论可推出压电片的电路状态方程为:

$$I = \int_0^l \int_0^w D_3 dx dy = j \omega C_0 V - n (v_1 + v_2). \quad (15)$$

采用机电类比法将矩形压电片的机械振动方程(14)和电路状态方程(15)相结合, 得矩形压电片长度伸缩型的机电等效电路, 如图 4 所示。

其中,  $Z_{1P} = Z_{2P} = j \rho v S t a n \frac{kl}{2}$ ,  $Z_{3P} = \frac{\rho v S}{j \sin kl}$ .

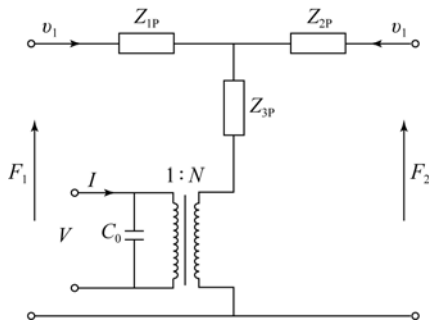


图 4 矩形陶瓷的机电等效电路

Fig. 4 Electromechanical equivalent circuit of rectangle ceramic

### 2.2.3 复合压电换能器机电等效电路与频率方程

假设在金属圆筒和矩形压电陶瓷的黏结处的径向振动速度与径向黏结力是连续的, 基于金属圆筒和矩形压电陶瓷薄片的机电等效电路, 建立径向复合圆筒径向挤压式压电换能器的机电等效电路。

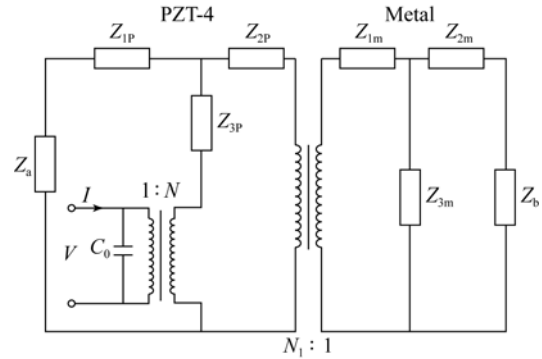


图 5 压电换能器的机电等效电路

Fig. 5 Electromechanical equivalent circuit of piezoelectric transducer

图 5 所示为机电等效电路, 左侧为电端输入端, 右侧为机械端输出;  $I$  为施加在矩形压电陶瓷片极化方向上的工作电压产生的工作电流;  $Z_a$ 、 $Z_b$  为压电换能器内外辐射面的等效负载阻抗, 空载状态下均可视为 0;  $Z_{1P}$ 、 $Z_{2P}$ 、 $Z_{3P}$ 、 $Z_{1m}$ 、 $Z_{2m}$ 、 $Z_{3m}$  分别与矩形压电片和金属圆筒等效电路中给出的值相同;  $N = n$ 、 $N_1$  为机电转化系数。

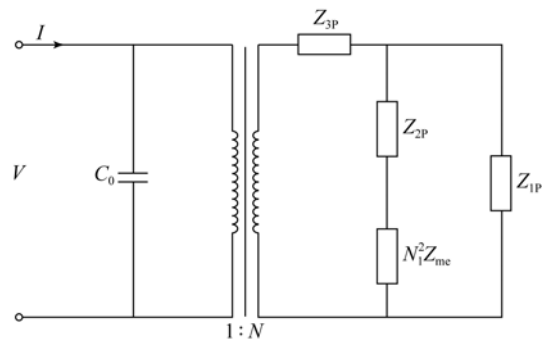


图 6 机电等效电路简化 1

Fig. 6 Simplification 1 of electromechanical equivalent circuit

根据电学理论, 将图 5 简化为图 6, 其中  $Z_{me}$  为金属圆筒的机械等效阻抗:

$$Z_{me} = Z_{1m} + Z_{2m} \cdot Z_{3m} / (Z_{2m} + Z_{3m}).$$

图 7 中,  $Z/N^2$  为换能器的机械等效阻抗,其中:

$$Z = Z_{3P} + \frac{Z_{1P} \cdot (Z_{2P} + N_1^2 Z_{me})}{(Z_{1P} + Z_{2P} + N_1^2 Z_{me})}$$

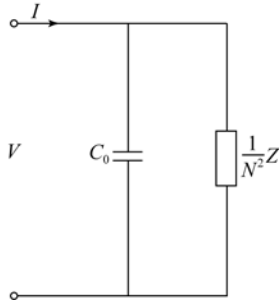


图 7 机电等效电路图简化 2

Fig. 7 Simplification 2 of electromechanical equivalent circuit

已知压电片的等效电阻抗  $Z_C = 1/j\omega C_0$ , 则压电换能器等效总阻抗  $Z_{total}$  为:

$$Z_{total} = \frac{Z_C \cdot Z_M}{Z_C + Z_M} = \frac{Z}{j\omega C_0 + N^2}. \quad (16)$$

由此可得压电换能器的共振频率方程:

$$\frac{Z}{j\omega C_0 + N^2} = 0. \quad (17)$$

式(17)为含有一阶一类和一阶二类贝塞尔函数的超越方程,可通过 Matlab 数学软件数值求解出换能器径向共振频率  $f_1$ 。此外,式(17)中含有金属圆筒和矩形压电片的材料参数和结构几何尺寸变量,因此通过数值法可以分析出换能器材料参数结构几何尺寸与换能器径向共振频率之间的关系,可根据金属圆筒和矩形压电片的材料参数和几何尺寸变量反求出换能器径向共振频率,也可根据所需的共振频率合理选择换能器材料和结构尺寸。

### 3 换能器共振频率数值计算

共振频率和振型是超声系统的重要参数,决定了振动系统能否实现最佳的功率转换和传递。采用有限元分析软件对压电换能器进行模态分析,找到使压电换能器径向呈现均匀的三角形挤压变形的(3,0)振动模式,当压电换能器的径向振幅值较大时,其共振频率值尽可能小。

#### 3.1 模态分析

通过 ANSYS 软件中实体建模技术进行建

模,忽略铜电极的影响,采用直接耦合分析方法分析压电换能器,压电陶瓷和圆筒材料分别为压电陶瓷锆钛酸铅 PZT-4、铝镁合金(铜),单元类型分别定义为 Solid5、Solid95,单元类型定义为换能器材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数  
Tab. 1 Parameters of materials

压电片	
$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	1 300
$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 500
$S_{11}^E / (\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	$12.3 \times 10^{-12}$
$S_{12}^E / (\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	$-4.05 \times 10^{-12}$
$S_{13}^E / (\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	$-5.31 \times 10^{-12}$
$S_{33}^E / (\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	$15.5 \times 10^{-12}$
$d_{15} / (\text{C} \cdot \text{N}^{-1})$	$496 \times 10^{-12}$
$d_{31} / (\text{C} \cdot \text{N}^{-1})$	$-123 \times 10^{-12}$
$d_{33} / (\text{C} \cdot \text{N}^{-1})$	$496 \times 10^{-12}$
$\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$	1 475

金属基体铝镁合金和铜:

$$\rho_{\text{Al,Mg}} = 2\,700 \text{ kg/m}^3, E_{\text{Al,Mg}} = 1.0 \text{ GPa}, \nu_{\text{Al,Mg}} = 0.345; \rho_{\text{Cu}} = 8\,900 \text{ kg/m}^3, E_{\text{Cu}} = 12.5 \text{ GPa}, \nu_{\text{Cu}} = 0.3.$$

综合考虑精确度和计算速度,对压电陶瓷片采用的映射网格划分,其它部分采用智能网格划分。模态分析时,对压电换能器的 3 个支撑座位置进行位移约束设置,选择计算精度高、速度快的 BLOCK LANCZOS 方法提取前  $n$  阶模态。通过后处理查看换能器径向变形云图,确定所求振型对应的频率值以及径向最大振幅。

#### 3.2 共振频率与振幅的数值分析

图 8 所示为不同材料的压电换能器共振频率和径向振幅与换能器壁厚的关系曲线图。换能器金属圆筒内径  $2a=20 \text{ mm}$ ,长  $L=40 \text{ mm}$ ,压电陶瓷片尺寸长、宽、厚分别为  $20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ,改变金属材料、将圆筒壁厚  $H$  从  $2 \text{ mm}$  增大到  $3.6 \text{ mm}$ 。从图 8 中可以看出,对于同一材料、壁厚不同的换能器,其共振频率随换能器基体壁厚增大而增大,其径向振幅随壁厚增大而减小,且壁厚为  $2 \text{ mm}$  时,频率小而振幅大;对于相同结构尺寸、不同材料的换能器,金属铜的共振频率明显大于铝镁合金的共振频率,而金属铜的径向振

幅明显小于铝镁合金的径向振幅。

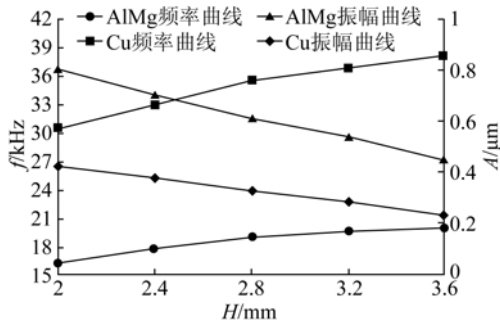


图 8 不同材料换能器频率和振幅与壁厚关系

Fig. 8 Relationship between frequency, amplitude of transducer and wall thickness for different material transducers

对换能器长度及压电片结构尺寸分析中,换能器材料均为铝镁合金、壁厚为 2 mm。

将换能器长度  $L$  从 30 mm 压电陶瓷片尺寸增长到 50 mm, 分析换能器共振频率和振幅与换能器长度的关系, 如图 9 所示。可以看出, 对于内径 20 mm、壁厚 2 mm 的压电换能器, 换能器共振频率随换能器长度增长而逐渐减小, 径向振幅随换能器长度增长而先增大后减小, 特别在 45~50 mm 处, 频率值和振幅值变化比较小。

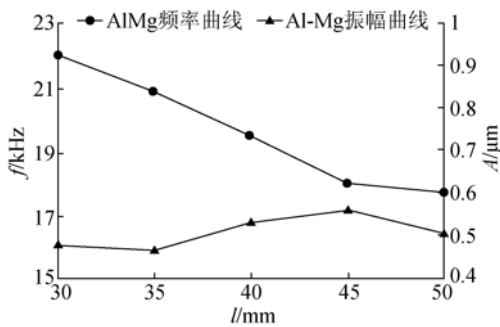


图 9 换能器的频率、振幅与其长度的关系

Fig. 9 Relationship between frequency, amplitude of transducer and its length

换能器长度  $L$  为 45 mm, 压电陶瓷片尺寸长、宽不变, 改变压电片的厚度从 0.1~0.9 mm, 分析压电片厚度对换能器共振频率和径向振幅的影响。

从图 10 中可以看出, 换能器共振频率随压电片厚度增加而增加, 其频率增加率很小; 但换能器振幅随压电片厚度增加呈现先增加后减小的趋

势, 在片厚  $h = 0.5$  mm 处, 振幅存在最高点  $0.538 \mu\text{m}$ , 其振幅变化率很小。

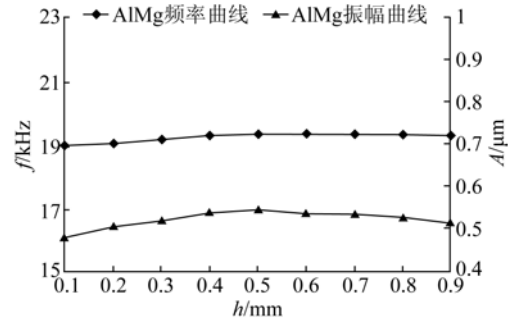


图 10 换能器的频率、振幅与陶瓷片厚度关系

Fig. 10 Relationship between frequency, amplitude of transducer and ceramic thickness

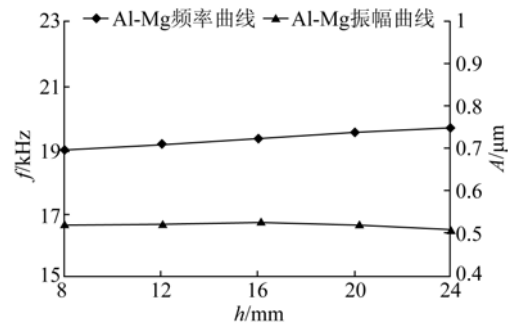


图 11 换能器的频率和振幅与陶瓷片长度关系

Fig. 11 Relationship between frequency, amplitude of transducer and ceramic length

压电陶瓷片尺寸宽、厚不变, 分析压电片长度对换能器共振频率和径向振幅的影响。从图 11 中可以看出, 其频率和振幅的变化情况与压电片厚度对换能器频率和振幅的影响相似, 压电片长度从 8~24 mm, 换能器的频率 18.991~19.671 kHz, 从对换能器频率的影响角度, 压电片片长比片厚影响大; 其振幅的变化趋势也是先增加后减小, 最高点在片长 16 mm 处, 振幅值为  $0.532 \mu\text{m}$ , 从对换能器振幅的影响角度, 压电片片长比片厚影响小。

### 3.3 换能器优化结构的共振频率

根据分析影响换能器共振频率和振幅的因素, 优化换能器的材料与结构, 换能器金属材料选择铝镁合金, 压电片材料为 PZT-4, 且结构尺寸为  $15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ , 换能器结构设计尺寸如表 2 所示。

铝镁合金材料的压电换能器在 12 阶模式时

呈现三角型径向挤压变形,如图 12 所示,此时换能器共振频率为 19.146 kHz,径向最大振幅为 0.538  $\mu\text{m}$ 。

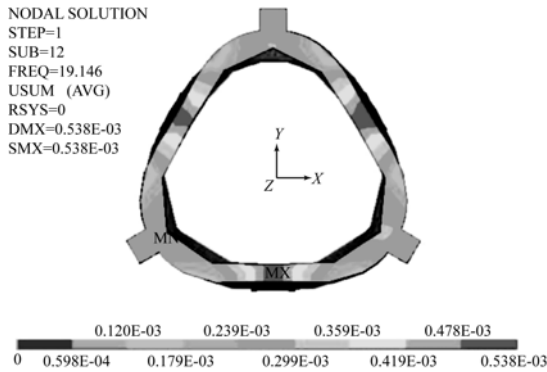


图 12 换能器径向变形云图

Fig. 12 Radial transformation of piezoelectric transducer

#### 4 测量实验与结果

为验证理论与数值计算的正确性,设计并制作了一台用于超声悬浮轴承用的径向挤压式压电换能器,样机如图 13 所示。



图 13 压电换能器样机

Fig. 13 Prototype of piezoelectric transducer

由信号发生器产生 75 V 正弦交流信号通过功率放大器后加载在压电片上,使用数据采集卡采集换能器振动数据,并通过上位机中 LABVIEW 程序进行处理,实现对换能器在空气

中的共振频率的测试<sup>[17]</sup>。同时,将压电换能器共振频率的实验测试结果与 ANSYS 有限元仿真计算结果,以及利用共振频率方程进行的共振频率理论计算结果三者进行对比。

表 2 共振频率的理论、仿真与实验结果

Tab. 2 Theory, simulation and experiment results of resonance frequency

结构尺寸			共振频率			误差	
内径	壁厚	长度	理论值	仿真值	实验值	误差 1	误差 2
$d/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$l/\text{mm}$	$f_t/\text{kHz}$	$f_s/\text{kHz}$	$f_e/\text{kHz}$	$\Delta_1/\%$	$\Delta_2/\%$
20	2	45	18.678	19.146	19.847	5.89	3.53

从表 2 中可以看出,换能器谐振频率的理论值与仿真值和实验值比较一致, $\Delta_1 = |f_t - f_e| / f_e$  为理论与实验相对误差, $\Delta_2 = |f_s - f_e| / f_e$  为仿真与实验相对误差, $\Delta_2$  在 5% 以内,能够满足工程设计需要;而  $\Delta_1 = 5.89\%$ ,其误差原因分析,一方面是理论计算忽略了金属圆筒外表面矩形凹槽和支撑座的影响,另一方面是换能器制作加工误差和实验测量误差。

#### 5 结 论

本文采用机电等效电路法推导出超声悬浮轴承用压电换能器共振频率方程,并确定了共振频率与其结构尺寸和材料参数的关系。利用有限元软件分析了影响换能器共振频率和径向振幅的最大因素,以及换能器在三角型挤压变形模态下共振频率较小、径向振幅较大的结构尺寸。最后,制作了一台压电换能器样机并进行了共振频率实验测试。研究表明:理论与实验相对误差为 5.89%,仿真与实验误差为 3.53%,能够满足工程实际要求,不仅验证了建模与仿真计算的正确性,还为用于超声悬浮轴承中的径向挤压式压电换能器的设计提供了理论依据。

#### 参考文献:

[1] YOSHIMOTO S, ANNO Y. Rectangular Squeeze film gas bearing using a piezoelectric actuator

application to a linear motion guide [J]. *Japanese Journal of Tribology*, 1991, 36.

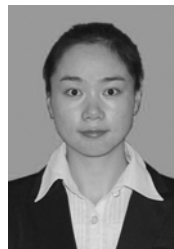
[2] YOSHIMOTO S, ANNO Y. Float characteristics of squeeze-film gas bearings with elastic hinges [J]. *JSME Int J Ser*, 1997, 40-2: 353-9.

- [3] YOSHIMOTO S. Float characteristics of a squeeze-film air bearing for a linear motion guide using ultrasonic vibration [J]. *Tribology International*, 2007, 40(3):503-511.
- [4] STOLARSKI T A. Self-lifting contacts; from physical fundamentals to practical applications [C]. *Mechanical Engineering Science*, 2006, 48:1211-1219.
- [5] 景敏卿, 刘恒, 沈园, 等. 新型挤压膜气体轴承的研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(7):799-802.  
JING M Q, LIU H, SHEN Y, *et al.*. New style squeeze film air bearing [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(7):799-802. (in Chinese)
- [6] 常颖, 吴博达, 程光明, 等. 超声波轴承用压电换能器模态分析及实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(5):752-754, 789.  
CHANG Y, WU B D, CHENG G M, *et al.*. Analysis of vibration mode on piezoelectric ceramic actuator for ultrasonic vibration bearing and experimental study of the anti-friction [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(5):752-754, 789. (in Chinese)
- [7] 顾晓丹, 刘传绍, 张昌娟. 夹心式压电超声换能器的等效电路设计法[J]. 声学与电子工程, 2007(3):28-30.  
GU X D, LIU CH SH, ZHANG CH J. Equivalent circuit design method of sandwich piezoelectric ultrasonic transducer [J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 2007(3):28-30. (in Chinese)
- [8] 林书玉, 桑永杰, 田华. 径向复合压电陶瓷超声换能器的径向振动特性研究[J]. 声学学报, 2007, 32(4):310-315.  
LIN SH Y, SANG Y J, TIAN H. Study on the radial vibration of radial composite piezoelectric ultrasonic transducers [J]. *Acta Acustica*, 2007, 32(4):310-315. (in Chinese)
- [9] LIU SH, YAO Y. Radial vibration characteristics of composite pipe power piezoelectric ultrasonic transducer [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(10):239-245.
- [10] EBENEZER D D, ABRAHAM P. Eigenfunction analysis of radially polarized piezoelectric cylindrical shells of finite length [J]. *Acoustical Society of America*, 1997, 102(3):1549-1558.
- [11] EBENEZER D D, ABRAHAM P. Piezoelectric thin shell theoretical model and eigenfunction analysis of radially polarized piezoelectric ceramic cylinders [J]. *Acoustical society of America*, 1999, 105(1):154-163.
- [12] LIU SH Q, YAO Y. Investigation on radial composite round tube piezoelectric ceramic ultrasonic transducer [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2011, 45(2):0252-0256.
- [13] 林书玉, 王帅军, 付志强, 等. 径向极化压电陶瓷长圆管复合超声换能器的径向振[J]. 声学学报; 2013, 38(3):354-363.  
LIN SH Y, WANG SH J, FU ZH Q, *et al.*. Radial vibration for a radially polarized piezoelectric composite transducer [J]. *Acta Acustica*, 2013, 38(3):354-363. (in Chinese)
- [14] 王帅军. 新型径向复合压电超声换能器的研究[D]. 陕西: 陕西师范大学, 2011.  
WANG SH J. *Study on the new type of radial composite piezoelectric ultrasonic transducer* [D]. Shaanxi: Shaanxi Normal University, 2011. (in Chinese)
- [15] MASON W P. *Piezoelectric crystals and their application to ultrasonics* [D]. New York: Van Nostrand Company Inc., 1950.
- [16] 张沛霖, 张仲渊. 压电测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983:178-185.  
ZHANG P L, ZHANG ZH Y. *Piezo-electric measurement* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1983:178-185. (in Chinese)
- [17] WANG C, AU Y H J. Study of design parameters for squeeze film air journal bearing-excitation frequency and amplitude [J]. *Mechanical Sciences*, 2011, 2:147-155.

#### 作者简介:



李东明(1971—),男,吉林松原人,博士,教授,2004年于大连理工大学获得博士学位,主要从事传感器与执行器技术;精密加工技术。E-mail: lidongming2001@163.com



崔爽(1988—),女,辽宁凌海人,硕士研究生,2011年于辽宁工业大学获得学士学位,主要从事传感器与执行器技术;精密加工技术。E-mail: cs0103@126.com