夹心式径向复合压电超声换能器*

刘世清¹ 许 龙² 张志良¹ 陈赵江¹ 沈建国³ (1 浙江师范大学 应用声学研究所 金华 321004) (2 中国计量学院物理系 杭州 310018) (3 天津大学药物科学与技术学院 天津 300072) 2012 年 10 月 28 日收到 2013 年 1 月 17 日定稿

摘要 对夹心式径向复合压电换能器径向振动特性进行了研究。该换能器由弹性内芯、预应力金属管及柱面压电陶瓷晶堆径向复合而成。利用机电类比法,得到了换能器的径向振动等效电路及频率方程。探讨了换能器第1、2阶径向共振频率及有效机电耦合系数与其几何尺寸的关系。研究表明,换能器第1阶径向共振频率随其内芯内径及预应力管壁厚度增大而降低; 第2阶共振频率随内芯内径增大存在极小值,但随预应力管壁厚度增大单调下降。此外,采用第2阶径向共振模式能获得较高的有效机电耦合系数,并且压电陶瓷处于位移节线时,换能器有效机电耦合系数达极大值。对换能器共振频率的测试与有限元仿真表明.理论与实验及仿真结果符合较好。

PACS 数: 43.38

The sandwiched radial composite piezoelectric ultrasonic transducer

LIU Shiqing¹ XU Long² ZHANG Zhiliang¹ CHEN Zhaojiang¹ SHEN Jianguo³ (1 Applied Acoustics Institute, Zhejiang Normal University Jinhua 321004) (2 Department of Physics, China Jiliang University Hangzhou 310018) (3 Medicine institute of science and technology of Tianjin University Tianjin 300072)

Received Oct. 28, 2012

Revised Jan. 17, 2013

Abstract The radial vibration of a sandwiched radial composite piezoelectric ultrasonic transducer is studied. The transducer consists of a metal inner core, a prestress tube and a ring group of piezoelectric ceramic piles. Based on the electro-mechanical analogy, the equivalent circuit and the resonance frequency equation of the transducer in radial vibration are derived. The relationship between the first and second order resonance and anti-resonance frequency, the effective electro-mechanical coupling coefficient and the geometrical dimensions of the transducer is analyzed. It is illustrated that the first radial resonance frequency of the transducer are decreased with the inner diameter of the inner core and the wall thickness of the outer prestress tube of it are increased. The second radial resonance frequency of the transducer gets extremum value with the increase of the inner diameter of the inner core, but it decreased monotonically with the wall-thickness of the outer prestress tube increased. Besides, the effective electro-mechanical coupling coefficient of the transducer at the second order vibration mode is higher than that of the first order. Especially, it reach maximum when the piezoelectric ceramic component located in the radial displacement node line. By testing and simulating the radial resonance frequencies of some radial sandwiched transducers. It is shown that the theoretical radial resonance frequencies are in a good agreement with the measured and simulated results.

引言

在功率超声领域,纵向复合夹心式压电超声换

能器 (郎之万换能器) 应用很广。其原因在于此类换 能器不仅结构设计简单,而且功率容量大、电声效 率较高^[1-2]。但此类超声换能器为一维纵向复合结 构,其声波能量辐射亦是一维的。近年来,随着功率

* 国家自然科学基金 (11074222, 11274279, 11204284) 和浙江省自然科学基金 (LQ12A04006) 资助项目。

超声技术的不断发展,一些新的超声应用技术对超 声振动能量的辐射方式及空间作用范围提出了更高 要求。如在超声降解、二次采油、药物成分萃取以及 声化学反应等液体处理超声技术领域,迫切需要一 类作用范围广、辐射效率高、功率容量大的超声换能 器,以满足大容量液体超声处理要求。

适应于应用需要,一类新型的径向振动超声换 能器发展起来并获得应用。径向振动超声换能器具 有辐射面积大、辐射效率高、指向性均匀以及声波 作用范围广,因而特别适合大容量液体超声处理。 目前国内外对径向振动超声换能器的研究主要是模 式转换型。此类换能器利用纵向振动压电超声换能 器对圆管、圆环或棒进行激励,通过振动模式的转换 (或耦合)产生径向振动。如美国 Crest 公司及德国 Hielscher 公司推出的 Push-Pull 圆柱换能器^[3-4];利 用纵径振动模式转换的管形超声辐射器以及模式转 换环形耦合振动超声换能器等^[5-8]。

为进一步提高径向振动超声换能器的功率密度 及效率,近年来一类径向复合型压电超声换能器逐 步发展起来。此类换能器主要由压电陶瓷元件与金 属元件直接径向复合而成。文献 9 和文献 10 提出一 种盘形压电超声换能器,由轴向极化压电陶瓷薄圆 盘与金属薄圆环径向复合而成。文献 11 对一种径向 复合管形压电换能器径向振动特性进行了研究。该 换能器直接通过金属圆管对内部的径向极化压电陶 瓷短圆管提供径向预应力,以提高换能器的功率密 度及电声效率。

在前一篇文章中作者对一种径向复合圆柱压电 超声换能器进行了研究 [12]。该换能器通过对径向极 化薄壁压电陶瓷管进行分割处理,将其径向振动模 的横向机电耦合系数 k31 转化为准厚度模机电耦合 系数 kt, 以提高换能器的机电转换能力。但换能器的 压电陶瓷为单层柱面薄片,其功率容量有限,并且换 能器基频振动模式的有效机电耦合系数相对较小。 为解决上述问题,本文提出利用柱面压电陶瓷晶堆 组驱动的径向复合圆柱压电换能器。类似于夹心式 纵向复合棒,该型压电换能器亦可看作一种径向夹 心式结构。其优点在于,一方面采用径向层叠压电 陶瓷晶堆可提高此类径向复合压电换能器的功率容 量;另一方面,将单一柱面压电薄片的径向准厚度模 振动转换为压电陶瓷晶堆的长度伸缩模,相应的机 电耦合系数由 kt 转变为纵向机电耦合系数 k33, 可进 一步提高此类压电换能器的机电转换能力。此外,该 结构可实现换能器内外同电极性,即内外可连通,从 而能有效利用其内部中空部分所形成的柱面聚焦声 场。本文拟对该径向复合压电换能器的第1、2阶径 向振动特性进行理论分析和实验研究,并进行有限 元仿真。

1 夹心式径向复合压电换能器振动 分析

如图 1 所示的夹心式径向复合压电超声换能器,分为三部分。内部为环形可膨胀内芯,其内、 外半径分别为 d 和 a;外部为金属预应力管,其内、 外半径分别为 b 和 c;中间夹层部分为环形压电陶瓷 晶堆,它由一系列几何及性能参数一致的柱面压电 陶瓷晶堆环形排列而成。相邻两柱面压电陶瓷晶堆 沿周向去耦,如填充去耦材料或为空气间隙。每个柱 面压电陶瓷晶堆由若干柱面压电陶瓷薄片沿径向层 叠而成 (图中为 2 片),相邻两层叠柱面压电片均沿半 径方向极化,且方向相反,并在两晶片之间夹以柱面 金属薄片,一般作为正电极,如图 2 所示。



为便于分析, 假定换能器高度 h 甚小于其直径。 实用中的径向极化薄壁压电陶瓷管, 其高度一般约为 直径的二分之一或更小, 而其管壁厚度约为直径的 十分之一。若外加激励电压 V_r 频率与换能器的径向 机械谐振频率一致,则可近似认为换能器作纯径向 振动。

2 切向去耦环形压电陶瓷堆径向振动 等效电路

如图3所示的环形排列柱面压电陶瓷晶堆组,可 分别看作由两个 (或多个) 不同直径的径向极化压电 陶瓷薄壁管沿纵向等分切割并沿径向层叠而成。各 压电圆管的管壁厚度相等,但径向极化方向相反;各 柱面压电陶瓷堆之间为机械串联,电路并联。设切割 数为 N, 若 N 较大, 并使所切得的各柱面压电陶瓷 晶堆单元的横向尺寸小于四分之一波长,那么经过 多层陶瓷片叠堆后,依据网络级联理论,晶堆中的各 单层柱面压电片的振动模可等效为一个沿轴向极化 的压电陶瓷细长棒的长度伸缩模[11]。相应地,若所 切压电陶瓷管直径较大,并甚大于其管壁厚度,则由 一系列柱面压电陶瓷堆经周向去耦排列而成的环形 压电陶瓷堆可近似看作同尺寸的矩形压电薄片径向 层叠而成。在径向电场激励下,其径向振动模可按电 场平行于长度的长度伸缩模处理。而对于 p 个同尺 寸的压电陶瓷薄片级联的等效电路如图 4 所示^[13]。 相应的各机械阻抗为:

$$Z_{21} = Z_{22} = j\rho v S \tan\left(\frac{1}{2}pkl\right), \qquad (1)$$

$$Z_{23} = \frac{\rho v S}{j \sin(pkl)},\tag{2}$$

式中 l 为单个晶片的径向长度; $C_0 = S/l\overline{\beta}_{33}$ 为一维 截止电容, $\overline{\beta}_{33} = \beta_{33}^T [1 + g_{33}^2/(s_{33}^D\beta_{33}^T)]$, β_{33}^T 为恒应力 下的介电隔离率; g_{33} 为压电电压常数; s_{33}^D 为恒电 位移下柔性常数; $n = g_{33}S/(ls_{33}^D\overline{\beta}_{33})$ 为机电转换系 数; S 为环形压电陶瓷堆的平均侧面积; $k = \omega/v$, $v = [1/(\rho s_{33}^E)]^{1/2}$ 为压电陶瓷堆中的等效径向声速; s_{33}^E 为恒电场下柔性常数。

相应的各机械阻抗为:



图 4 切向去耦环形压电陶瓷堆等效电路

3 换能器机电等效电路及频率方程

换能器的外部预应力管及内部弹性内芯均为薄 圆环,其径向振动机电类比等效电路可采用文献 9 中 的结果。依据换能器各部分接触面上径向力和质点振 速连续的边界条件,不计机械振动阻尼及损耗,得径 向自由的夹心式径向复合压电超声换能器机电等效 电路如图 5 所示。



图 5 夹心式径向复合压电换能器机电等效图

$$Z_{11} = j \frac{2Z_b}{\pi k_1 b [J_1(k_1 c) Y_1(k_1 b) - J_1(k_1 b) Y_1(k_1 c)]} \left[\frac{J_1(k_1 c) Y_0(k_1 b) - J_0(k_1 b) Y_1(k_1 c)}{J_1(k_1 b) Y_0(k_1 b) - J_0(k_1 b) Y_1(k_1 b)} - 1 \right] - j \frac{2Z_b(1 - \nu_1)}{\pi (k_1 b)^2 [J_1(k_1 b) Y_0(k_1 b) - J_0(k_1 b) Y_1(k_1 b)]},$$

$$Z_{12} = j \frac{2Z_b}{\pi k_1 b [J_1(k_1 c) Y_1(k_1 b) - J_1(k_1 b) Y_1(k_1 c)]} \left[\frac{J_1(k_1 b) Y_0(k_1 c) - J_0(k_1 c) Y_1(k_1 b)}{J_1(k_1 c) Y_0(k_1 c) - J_0(k_1 c) Y_1(k_1 c)} - 1 \right] + j \frac{2Z_c(1 - \nu_1)}{\pi (k_1 c)^2 [J_1(k_1 c) Y_0(k_1 c) - J_0(k_1 c) Y_1(k_1 c)]},$$
(3)

$$Z_{13} = j \frac{2Z_b}{\pi k_1 b [J_1(k_1 c) Y_1(k_1 b) - J_1(k_1 b) Y_1(k_1 c)]}, \quad (5)$$

而 Z₃₁, Z₃₂, Z₃₃ 的表达式与式 (3) — 式 (5) 形式相同, 只需将 b 和 c 置换为 d 和 a 即可。其余各参量的物理意义参见文献 9。

由等效电路图 5, 可得径向自由时换能器的电输 入阻抗为:

$$Z_i = \frac{V_r}{I} = \frac{Z_e}{n^2 + j z_e \omega p C_0},\tag{6}$$

式中:

$$Z_e = Z_{23} + \frac{(Z_{1e} + Z_{21})(Z_{22} + Z_{3e})}{Z_{1e} + Z_{21} + Z_{22} + Z_{3e}},$$
(7)

上式中, Z_{1e} 和 Z_{3e} 分别为外部预应力管及内部弹性 内芯的等效机械阻抗,其表达式分别为:

$$Z_{1e} = \frac{Z_{11}Z_{12} + Z_{11}Z_{13} + Z_{12}Z_{13}}{Z_{11} + Z_{13}},$$
(8)

$$Z_{3e} = \frac{Z_{31}Z_{32} + Z_{31}Z_{33} + Z_{32}Z_{33}}{Z_{32} + Z_{33}},\tag{9}$$

由式(6)得换能器径向自由振动的共振频率方程为:

$$\operatorname{Im}(Z_i) = 0, \tag{10}$$

以及反共振频率方程为:

$$\operatorname{Im}(Z_i) \to \infty,$$
 (11)

有效机电耦合系数是表征压电换能器机电转换能力的重要参数之一。其定义参看文献 13。

显然,频率方程反映了换能器共振频率与其几何 尺寸及材料特性之间的依赖关系。本文利用 Mathematica 软件对其进行了数值求解。

作为算例, 计算了内芯为钢, 压电陶瓷为 PZT4, 外部预应力管为硬铝的夹心式径向复合压电换能器 的径向共振频率及机电耦合系数与其几何尺寸之间 的关系。计算参数为: a = 19.5 mm, b = 25.5 mm, l=3 mm, h=36 mm 均为定值; 材料参数分别为: 铝: $\rho = 2700$ kg/m³, E = 71.5 GPa, $\nu = 0.34$; 钢: $\rho = 7800$ kg/m³, E = 209 GPa, $\nu = 0.29$; PZT4: $\rho = 7500$ kg/m³, $c_{33}^D = 15.9 \times 10^{10}$ N/m², $s_{33}^E = 15.5 \times 10^{-12}$ m²/N, $s_{33}^D = 7.9 \times 10^{-12}$ m²/N, $\varepsilon_{33}^S / \varepsilon_0 = 635.0$, $g_{33} = 26.1 \times 10^{-3}$ Vm/N, $d_{33} = 289 \times 10^{-12}$ C/N, $\beta_{33}^T = g_{33}/d_{33}$.

图 6 — 图 8 为外部预应力金属管壁厚度 t = 6 mm 时,换能器的第1、2 阶径向共振和反共振频 率以及有效机电耦合系数与内芯内半径 d 之间的关系。由图可以看出,换能器的第1 阶径向共振及反 共振频率随内芯内半径 d 增大而单调下降并趋于重

合。意味着其有效机电耦合系数随 d 增大而减小, 如图 8 所示; 而换能器第 2 阶径向共振及反共振频 率随着 d 增大, 开始下降而后单调上升。这是由于 第2阶径向共振时,换能器管壁中存在一条位移节 圆线,可近似看作沿其管壁的厚度振动。此外,从 图 8 可以看出, 在本文给定参数下, 换能器第 2 阶 径向共振的有效机电耦合系数甚大于第1阶,并存 在极值,其极大值对应的 d 约为 15 mm。进一步分 析发现,此时环形压电陶瓷堆位于换能器第2阶径 向共振的位移节线处。图 9 为利用 ANSYS 有限元仿 真得到的换能器管壁中径向位移沿半径 r 的分布曲 线。由图 9 可见,对应位移节点的 r 约为 22.1 mm, 该位置处于环形压电陶瓷堆的中间电极面附近。众 所周知, 位移节点处为应力波腹。可见, 对于复合型 压电换能器,压电陶瓷元件位于位移节点或应力波 腹附近时,具有较高的有效机电耦合系数。这也解释



1期

了为什么在纵向复合夹心式压电换能器设计时,通 常将压电晶片设计在位移节面附近。所不同的是,纵 向振动基频具有一个位移节面,而径向振动第2阶 共振时才有一条位移节圆线。

图 10 — 图 12 为 *d*=0 时,换能器径向共振及反 共振频率以及有效机电耦合系数随其外部金属管壁 厚度 *t* 的变化关系。由图可以看出,换能器第1、2





图 12 有效机电耦合系数与预应力管壁厚度关系

阶径向共振及反共振频率均随 t 增大而单调下降。 这是因为随着 t 增加,换能器直径增大。由图 12 可 知,当 t 变化从 0 到 30 mm 时,换能器第 1、2 阶 径向共振模式的有效机电耦合系数均存在极大值。 并且第 2 阶共振的有效机电耦合系数极大值显著大 于第 1 阶共振。因此,就机电耦合系数而言,采用薄 壁预应力外管及第 2 阶径向振动模式较好。特别地 由图还可以看出,采用第 2 阶径向共振模式,还可获 得一类大尺寸的,高频大功率超声换能器。这在工程 应用上很有价值。

4 实验及仿真

研制了一些预应力管壁厚度不同的夹心式径向 复合压电超声换能器。预应力管材料均为硬铝;膨胀 内芯材料为钢,其结构及功能作者已在前一篇文章中 进行了详细论述^[12];压电陶瓷为 PZT4。双层环形压 电陶瓷堆包含 9 个柱面晶堆, 堆中所夹薄铜片电极 厚度为 0.2 mm。相邻两柱面压电晶堆之间沿周向以 空气间隙去耦。装配后的夹心式径向复合压电超声 换能器如图 13 所示。利用 HP4294A 精密阻抗分析 仪对换能器第1、2阶径向共振频率进行了测试,结 果列于表 1 和表 2。其中 f1r 和 f1a 及 f1rm 和 f1am 分别为换能器第1阶径向共振频率及反共振频率的 理论与实验值; f_{2r} 和 f_{2a} 及 f_{2rm} 和 f_{2am} 分别为 换能器第2阶径向共振频率及反共振频率的理论与 实验值; f_{1n} 和 f_{2n} 分别为利用 ANSYS 仿真得到的 第1、2阶径向共振频率结果; $\Delta_1 = |f_{1r} - f_{1rm}|/f_{1rm}$, $\Delta_2 = |f_{1a} - f_{1am}| / f_{1am} \not\boxtimes \Delta_3 = |f_{2r} - f_{2rm}| / f_{2rm},$ $\Delta_4 = |f_{2a} - f_{2am}| / f_{2am}$ 分别为对应的相对误差。由 表1可知,换能器第1、2阶径向共振基频及反共 振频率均随其外部预应力管壁厚度的增加而降低。 这是由于预应力管壁厚度越大,换能器直径越大,共 振频率降低。换能器基频共振频率的理论与实验结 果符合较好,而第2阶共振频率相对误差较大。误差 主要来源除了材料实际参数与标称值会存在一定差



图 13 夹心式径向复合压电超声换能器照片

编号	$2a \ (mm)$	2b (mm)	t (mm)	$d \pmod{2}$	f_{1r} (Hz)	f_{1a} (Hz)	f_{1n} (Hz)	f_{1rm} (Hz)	f_{1am} (Hz)	Δ_1 (%)	Δ_2 (%)
1	39	51	6	0	53920	56443	50379	56184	58345	4.03	3.26
2	39	51	9	0	50133	52770	48261	51467	53080	2.59	0.58

表 1 夹心式径向复合压电换能器第 1 阶径向共振频率理论及测试值

表 2 夹心式径向复合压电换能器第 2 阶径向共振频率理论及测试值

编号	2a (mm)	2 <i>b</i> (mm)	t (mm)	$d \pmod{2}$	f_{2r} (Hz)	f_{2a} (Hz)	f_{2n} (Hz)	f_{2rm} (Hz)	f_{2am} (Hz)	Δ_3 (%)	Δ_4 (%)
1	39	51	6	0	124914	146577	126502	136727	153854	8.64	4.73
2	39	51	9	0	113153	128655	115956	125381	135515	9.75	5.06



图 14 1 号换能器第 1 阶径向共振模态振型

别外,理论分析未考虑振动耦合及螺栓与薄电极的 影响,且换能器第2阶共振时的耦合振动较强,表面 出现弯曲振动,如图 14 和图 15 所示,分别为1号 换能器的第1、2阶共振模态振型图。此外,径向预 应力的施加很难精确控制,其大小差异也会对换能 器的共振频率产生较大影响。

5 结论

对夹心式径向复合压电超声换能器径向振动机 电特性进行了研究,给出了其机电类比等效电路及 共振频率方程;探讨了换能器的第1、2阶径向共 振频率、反共振频率及其有效机电耦合系数与其几 何尺寸之间的依赖关系,并进行了数值仿真与实验 验证。

研究表明,第1阶径向共振时,换能器共振频率 随其内部膨胀内芯内径及外管壁厚度增大而降低, 其有效机电耦合系数随内芯内径增大而下降,而随 其外管壁厚度增大存在极大值;第2阶共振频率随 内芯内径增大存在极小值,但随其外管壁厚度增大



图 15 1 号换能器第 2 阶径向共振模态振型

单调下降,而有效机电耦合系数随外管壁厚度变化 存在极值。并且换能器第2阶径向共振的有效机电 耦合系数极大值显著大于第1阶。

显然,采用压电陶瓷层叠堆的方式能大幅提高 径向复合压电换能器的功率容量及其有效机电耦合 系数,并可实现内外同电极性连接。对于径向复合型 压电换能器,要获得较高的有效机电耦合系数,采用 第2阶径向振动模式及薄壁预应力外管较好,并且 压电陶瓷元件应尽量设计在位移节线附近。此外,采 用第2阶径向振动模式能获得一类有效机电耦合系 数高的大尺寸、高频大功率压电超声换能器。

参考文献

- 1 张云电. 夹心式压电换能器及其应用. 北京: 科学出版社, 2006
- 2 林书玉著. 超声换能器的原理与设计. 北京: 科学出版社, 2004
- Walter M. Crest group products [EB/OL]. (2007-09-18) [2010-04-16]. http://www.crest-ultrasonics.Com/Push-Pull.htm.
- 4 Hielscher. UIP8000-industrial ultrasonic processor 8000 watts [EB/OL]. (2007-09-18) [2010-04-16]. http://www. hielscher.com/ultrasonics/i8000_p.htm.

- 5 Zhou G P, Liang Z F, Li Z Z et al. A tubular focused sonochemistry reator. Chin. Sci. Bull., 2007; 52(14): 1902—1905
- 6 Liang Z F. Vibration analysis and sound field characteristics of a tubular ultrasonic radiator. Ultrasonics, 2006; 45: 146—151
- 7 Xu Long, Lin Shuyu, Hu Wenxu. Optimization design of high power ultrasonic circular ring radiator in coupled vibration. Ultrasonics, 2011; 51: 815—823
- 8 梁召峰,莫喜平,周光平.超声管形振子的振动分析.声学学报, 2011; 36(4): 369—376
- 9 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.声学学报,2007
- 10 Lin S Y. The radial composite piezoelectric ceramic transducer. Sensors and Actuators A, 2008; 141: 136—143
- 11 刘世清,姚晔. 复合管功率超声压电换能器的径向振动特性. 机 械工程学报, 2008; 44(10): 239—244
- 12 刘世清,杨先莉,张志良,陈赵江. 径向复合圆柱压电超声换能器. 声学学报, 2013; 38(2): 188-194
- 13 栾桂冬,张金铎,王仁乾编著.压电换能器和换能器阵(修订版).北京:北京大学出版社,2005