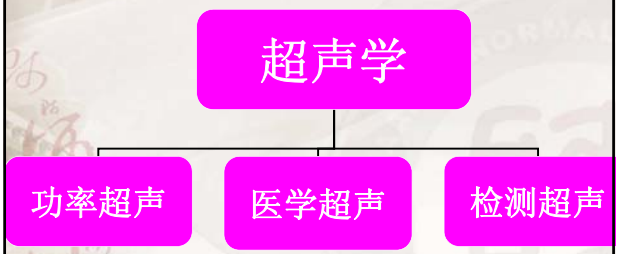
压电式功率超声换能器的研究进展

林书玉
陕西省超声学重点实验室
陕西师范大学应用声学研究所

报告内容：

一．研究背景
二．径向夹心式大功率超声换能器
三．振动模式转换全方位辐射大功率换能器
四、复合模式功率超声换能器
五、复频超声换能器
六、大功率圆柱型超声辐射器
七．级联式大功率超声换能器
八．总结

一、研究背景



功率超声换能器的特殊要求

单一频率、单一模态谐振工作
大信号、大功率连续波工作
高Q值、高效率、低的机械和介电损耗
高的功率体积（重量）比
高可靠性和稳定性

医学及检测超声换能器的特殊要求

扫频或调频模式
小信号、脉冲波工作
低Q值、宽频带
高灵敏度、高分辨率、高信噪比
高可靠性和稳定性

换能器的组成形式

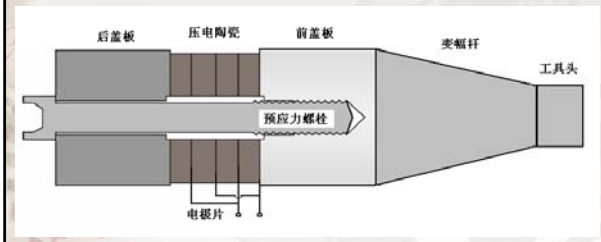
- **单元件压电陶瓷换能器**
  压电圆盘、压电圆环、压电圆管以及矩形压电器件等。
- **复合式压电陶瓷换能器**
  由压电材料与非压电材料（如各种金属及聚合物等）以不同的方式组成。
  例如：纵向复合夹心式压电陶瓷换能器（郎之万换能器）广泛应用于超声及水声技术中。

功率超声换能器

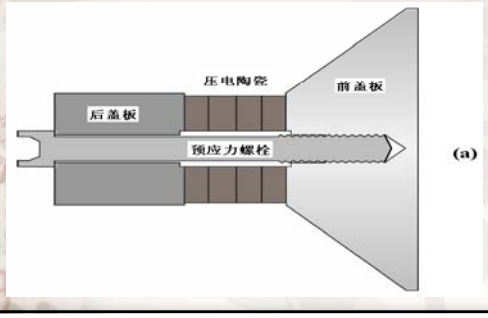
- **流体动力式**：哈特曼哨、葛尔登哨、簧片哨等
- **压　电　式**：传统的压电多晶体(PZT)、弛豫型铁电单晶铌镁酸铅-钛酸铅(PMN-PT)，铌锌酸铅-钛酸铅(PZN-PT)、压电复合材料
- **磁致伸缩式**：传统的磁致伸缩材料(金属及铁氧体)、稀土超磁致伸缩材料等

夹心式功率超声换能器
(Sandwich transducer)
郎之万式换能器
(Langevin transducer)
通匹兹换能器
(Tonpilz transducer)
复合结构换能器
(Composite transducer)

高强度功率超声换能器



低强度功率超声换能器



传统的夹心式功率超声换能器的设计理论：

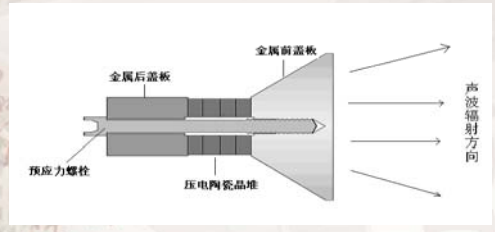
一维设计理论

要求：
- 纵向尺寸大于横向尺寸的二倍
- 横向尺寸小于四分之一波长

传统的夹心式功率超声换能器的限制

1、单个换能器的功率容量不可能太大。
（换能器辐射面积的限制）
2、声波的辐射方向是一维的。
（一维理论的限制）

传统的大功率超声振动系统



利用换能器阵列来增大系统的功率



利用不同的换能器阵列改变声波辐射方向



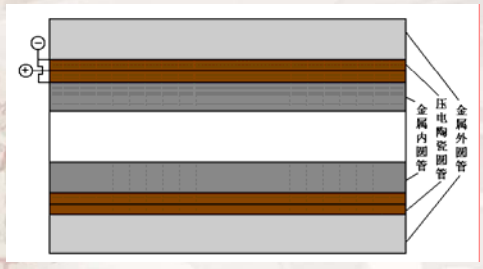
阵列换能器振动系统的缺点

1、换能器的性能（频率及阻抗等）一致性难以保证，导致系统的稳定性等难以保证。
2、结构工艺复杂、成本较高。
3、对激励电路的要求较高。

功率超声换能器面临的问题：

1、增大单一换能器的功率容量。
2、二维、三维及全方位辐射超声换能器。
3、频率可调功率超声换能器。
4、多模式工作超声换能器。

二、大功率径向夹心式压电超声换能器



基本组成部分

1、金属外圆管（一般为轻金属，如铝合金及钛合金等）
2、金属内圆管（一般为重金属，如不锈钢及铜金属等）
3、径向极化的压电陶瓷圆管（其数量一般应为偶数）
4、金属圆管形电极（一般为铍青铜等）

三种基本结构

1、长圆管型结构（高度远大于直径，属于平面应变问题）
2、薄圆环型结构（高度远小于直径，属于平面应力问题）
3、粗短圆管形结构（高度接近于直径），属于耦合振动问题）-复杂

特点

1、辐射面积大，易于声匹配，因而可产生大功率辐射。
2、声波的辐射是二维的，能够增大声波的作用范围。
3、易于管道内的声波辐射。通过选择不同的内外金属圆管材料，可实现声波的内外双方向声波辐射。

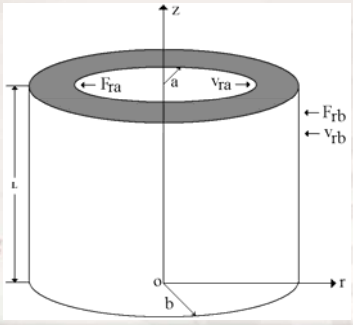
缺点

1、换能器径向预应力的施加及控制比较困难。
2、单一大尺寸压电陶瓷圆管的制作工艺比较困难，产品的几何尺寸和性能一致性难以保证。
可以采用多个短压电圆管轴向叠加的办法

研究目的

1、给出类似于传统的纵向夹心式压电换能器的机电等效电路。
2、理论上给出换能器的共振频率设计方程。
3、探讨换能器性能参数与其几何尺寸关系，为此类换能器的优化设计奠定基础。

（一）、金属长圆管的径向振动



假设条件

1、金属圆管材料各向同性。
2、圆管的高度远大于直径。
3、圆管高度方向无形变，属平面应变问题。
4、圆管的振动位移仅发生在半径方向。

金属长圆管径向振动方程

$$\frac{d^2\xi_{r0}}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{d\xi_{r0}}{dr}+(k^2-\frac{1}{r^2})\xi_{r0}=0$$

$$\xi_{r0}=A_1J_1(kr)+A_2Y_1(kr)$$

$$k=\omega/v$$

$$v^2=c_{11}/\rho$$

$$c_{11}=E/n_1$$

$$n_1=(1+\nu)(1-2\nu)/(1-\nu)$$

应力和应变关系

$$T_r=c_{11}S_r+c_{12}S_\theta$$

$$T_\theta=c_{12}S_r+c_{11}S_\theta$$

$$c_{11}=E/n_1$$

$$n_1=(1+\nu)(1-2\nu)/(1-\nu)$$

$$c_{12}=E/n_2$$

$$n_2=(1+\nu)(1-2\nu)/\nu$$

边界条件

$$\frac{\partial\xi_r}{\partial t}|_{r=a}=v_a \qquad \frac{\partial\xi_r}{\partial t}|_{r=b}=-v_b$$

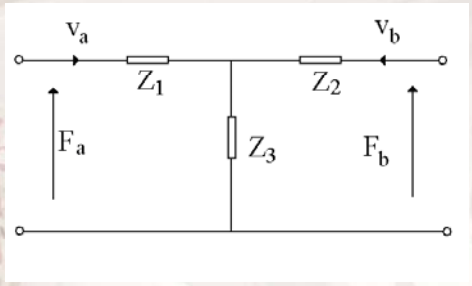
$$F_a=-S_aT_r|_{r=a} \qquad F_b=-S_bT_b|_{r=b}$$

$$S_a=2\pi aL \qquad S_b=2\pi bL$$

$$F_a = -\frac{jZ_{01}}{k}[(\frac{\Delta_1}{\Delta} - \frac{n_1}{n_2 a})v_a + \frac{2}{\Delta a\pi}v_b]$$

$$F_b = -\frac{jZ_{02}}{k}[\frac{2}{\Delta b\pi}v_a + (\frac{\Delta_2}{\Delta} + \frac{n_1}{n_2 b})v_b]$$

径向振动金属长圆管的等效电路



$$Z_1 = -\frac{jZ_{01}}{k}(\frac{\Delta_1}{\Delta} - \frac{n_1}{n_2 a} - \frac{2}{\Delta a\pi})$$

$$Z_2 = -\frac{jZ_{02}}{k}(\frac{\Delta_2}{\Delta} + \frac{n_1}{n_2 b} - \frac{2}{\Delta b\pi})$$

$$Z_3 = -\frac{2jZ_{01}}{\Delta ka\pi} = -\frac{2jZ_{02}}{\Delta kb\pi}$$

$$\Delta = J_1(ka)Y_1(kb) - J_1(kb)Y_1(ka)$$

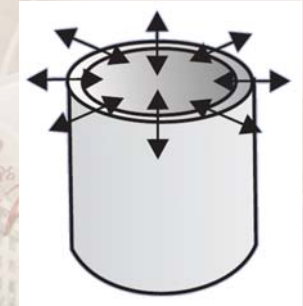
$$\Delta_1 = \frac{\Delta}{a} + k[J_1(kb)Y_0(ka) - J_0(ka)Y_1(kb)]$$

$$\Delta_2 = -\frac{\Delta}{b} + k[J_1(ka)Y_0(kb) - J_0(kb)Y_1(ka)]$$

$$Z_{01} = \rho S_a v \qquad Z_{02} = \rho S_b v$$

（二）、径向极化压电陶瓷长圆管的径向振动分析

1、压电陶瓷圆管径向极化，径向加电场激励。
2、压电陶瓷材料横向各向同性。
3、圆管的高度远大于直径。
4、圆管高度方向无形变，属平面应变问题。
5、圆管的振动位移仅发生在半径方向。



极化方向（P）
激励电场方向（E）
以及振动方向U，都沿着径向方向。

压电陶瓷圆管径向振动的分析理论

薄膜理论：薄膜理论假设管壁较薄，即圆管的壁厚远小于圆管的平均半径、高度及波长）。相对轴向应力和切向应力，剪应力是一阶小量，径向正应力是高阶小量，均可忽略不计。

薄壳理论：薄壳理论保留剪应力，忽略径向正应力，比薄膜理论更具有精确性。

但上述两种理论都是近似理论，且只适用于特殊尺寸振子，如薄壁以及纵向和径向尺寸比壁厚大多个数量级的理想情形。对于厚壁圆管则误差较大。

本研究结合平面应变理论和三维压电弹性动力学理论，对径向极化具有任意壁厚压电陶瓷细长管径向振动特性进行了研究，得到位移函数精确解，推导出其机电类比等效电路，得出了其等效电阻抗，在此基础上出了振子共振及反共振频率方程。

压电方程

$$T_\theta = c_{11}^E S_\theta + c_{13}^E S_r - e_{31} E_r$$

$$T_z = c_{12}^E S_\theta + c_{23}^E S_r - e_{32} E_r$$

$$T_r = c_{13}^E S_\theta + c_{33}^E S_r - e_{33} E_r$$

$$D_r = e_{31} S_\theta + e_{33} S_r + \varepsilon_{33}^S E_r$$

运动方程

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_r}{\partial t^2} = \frac{\partial T_r}{\partial r} + \frac{T_r - T_\theta}{r}$$

几何方程

$$S_r = \frac{\partial \xi_r}{\partial r} \qquad S_\theta = \frac{\xi_r}{r}$$

静电电荷方程

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rD_r) = 0$$

$$D_r = D_{r0} e^{j\omega t} \qquad D_{r0} = \frac{C_3}{r}$$

在简谐振动情况下，令

$$\xi_r = \xi_{r0} e^{j\omega t} \qquad E_r = E_{r0} e^{j\omega t}$$

$$E_{r0} = F_1 S_\theta + F_2 S_r + \frac{C_3}{\varepsilon_{33}^S r}$$

$$F_1 = -\frac{e_{31}}{\varepsilon_{33}^S} \qquad F_2 = -\frac{e_{33}}{\varepsilon_{33}^S}$$

$$\rho\frac{\partial^2\xi_r}{\partial t^2}=c_3\left(\frac{\partial^2\xi_r}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial\xi_r}{\partial r}-\nu^2\frac{\xi_r}{r^2}-\frac{F_1}{c_3}\frac{C_3}{r^2}\right)$$

$$\frac{d^2\xi_{r0}}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{d\xi_{r0}}{dr}+\left(k^2-\frac{\nu^2}{r^2}\right)\xi_{r0}-F_1'\frac{C_3}{r^2}=0$$

$$\nu^2=c_1/c_3$$

$$c_1=c_{11}^E+\frac{e_{31}e_{31}}{\varepsilon_{33}^S}$$

$$c_2=c_{13}^E+\frac{e_{31}e_{33}}{\varepsilon_{33}^S}$$

$$c_3=c_{33}^E+\frac{e_{33}e_{33}}{\varepsilon_{33}^S}$$

$$F_1'=F_1/c_3$$

$$V_3^2=c_3/\rho,k=\omega/V_3$$

压电圆管径向振动的位移解

$$\xi_{r0}=C_1J_\nu(kr)+C_2Y_\nu(kr)+F_1'C_3s_{-1,\nu}(kr)$$

$J_\nu(x)$ $Y_\nu(x)$ 贝塞耳函数

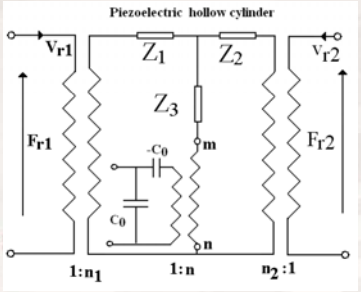
$s_{\mu,\nu}(x)$ 隆美耳函数 (Lommel)

$$V_{r0}=-\int_a^b E_{r0}dr$$

$$V_{r0}=-\frac{jkaM_a}{\omega}v_1-\frac{jkbM_b}{\omega}v_2-\frac{C_3}{t}$$

$$I_r=-\frac{dQ}{dt}=-j\omega\int_{-L}^{L}\int_0^{2\pi}\frac{C_3}{b}bd\theta dz=-j\omega4\pi LC_3$$

单一压电陶瓷长圆管的机电等效电路



各量的表达式分别为：

$$Z_1 = -Z_{ra}\frac{jb^2M_b^2[J_\nu(kb)Y_{\nu-1}(ka)-J_{\nu-1}(ka)Y_\nu(kb)]}{\Delta_1}+\frac{j4\pi Lb^2M_b^2(c_2-c_3\nu)}{\omega}-Z_3$$

$$Z_2 = -Z_{rb}\frac{ja^2M_a^2[J_\nu(ka)Y_{\nu-1}(kb)-J_{\nu-1}(kb)Y_\nu(ka)]}{\Delta_1}+\frac{j4\pi La^2M_a^2(c_3\nu-c_2)}{\omega}-Z_3$$

$$Z_3 = -Z_{ra}\frac{j2M_abM_b}{\pi k\Delta_1} = -Z_{rb}\frac{j2M_baM_a}{\pi k\Delta_1}$$

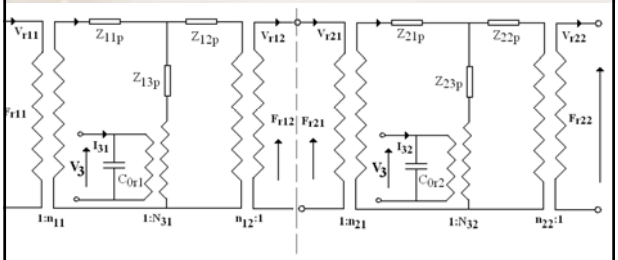
$$M_a = F_1\{(\nu-2)s_{-2,\nu-1}(ka)-\frac{(J_{\nu-1}(ka)Y_\nu(kb)-J_\nu(kb)Y_{\nu-1}(ka))s_{-1,\nu}(ka)}{\Delta_1}-\frac{2s_{-1,\nu}(kb)}{\pi ka\Delta_1}\}+\frac{F_2}{ka}$$

$$_b = F_1\{(\nu-2)s_{-2,\nu-1}(kb)+\frac{[J_{\nu-1}(kb)Y_\nu(ka)-J_\nu(ka)Y_{\nu-1}(kb)]s_{-1,\nu}(kb)}{\Delta_1}+\frac{2s_{-1,\nu}(ka)}{\pi kb\Delta_1}\}+$$

对于多个压电陶瓷圆管的组合

按照电端并联，机械端串联的关系，可得出其组合系统的机电等效电路。

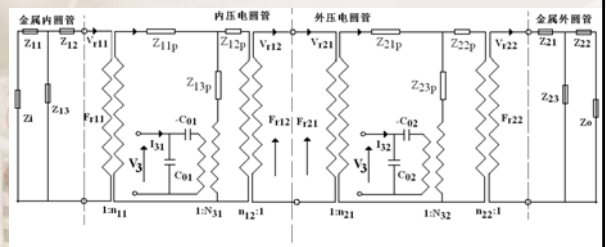
两个压电陶瓷圆管的六端机电等效电路



机械端串联
振速连续：$V_{r12}=V_{r21}$
力 连 续 ：$F_{r12}=F_{r21}$

电学端并联
电压相等：$V_3=V_{31}=V_{32}$
电流相加：$I_3=I_{31}+I_{32}$

径向夹心式圆管换能器的机电等效电路



机械端串联
振速连续：$V_{r12}=V_{r21}$
力 连 续 ：$F_{r12}=F_{r21}$

电学端并联
电压相等：$V_3=V_{31}=V_{32}$
电流相加：$I_3=I_{31}+I_{32}$

径向夹心式圆管换能器的共振频率方程

$$Z_e = \frac{V_3}{I_3}$$

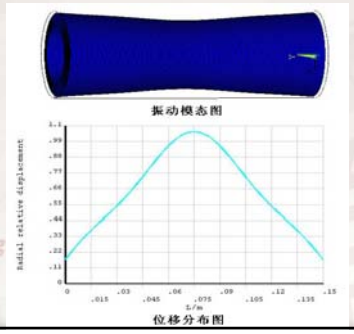
共振频率方程　$Abs(Z_e) = Minimum$

反共振频率方程　$Abs(Z_e) = Maximum$

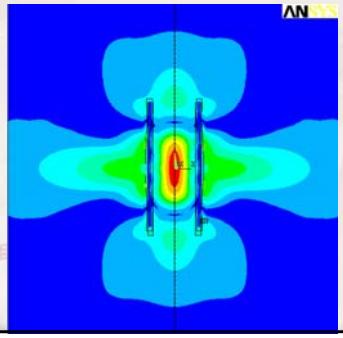
影响换能器共振频率的参数

- 材料参数
- 几何尺寸
- 振动模态
- 径向预应力
- 负载介质等

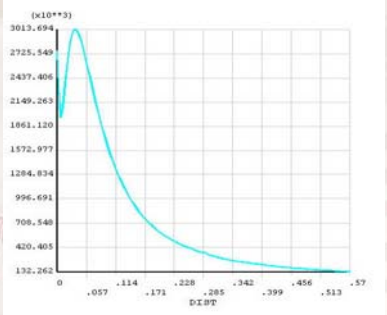
换能器的振动位移分布图



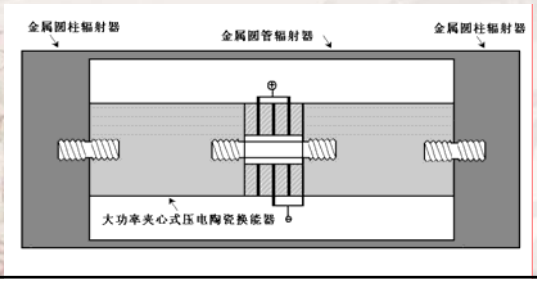
换能器径向辐射声场波束图



径向声压分布曲线



三．振动模式转换全方位辐射大功率换能器



特点一

利用换能器两端的前后金属辐射圆柱，实现了换能器的前后表面的同时辐射，克服了传统的换能器中的单面辐射问题，提高了换能器的辐射效率。

特点2

借助于泊松效应以及耦合振动理论，利用金属圆管中径向和纵向振动的耦合，实现了换能器的径向辐射。

特点3

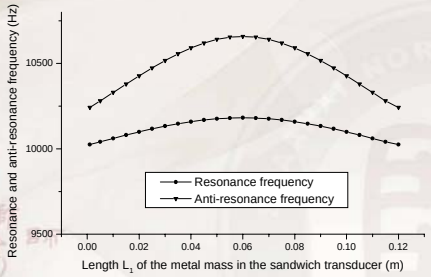
通过合理设计换能器的几何尺寸，例如金属圆管的直径和高度，可以改变换能器中纵向和径向振动之间的耦合振动，从而实现换能器金属圆管中纵向和径向振动的同时强烈共振，从而提高了换能器的辐射功率。

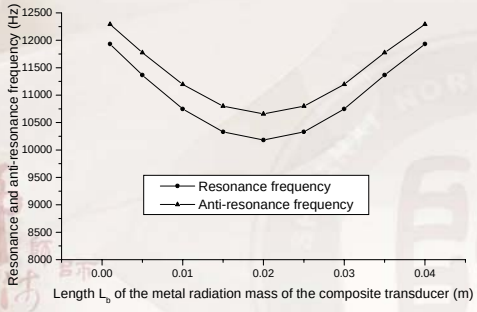
特点4

由于换能器的辐射面积增大，可以改善换能器的匹配，从而提高此类换能器的电声转换效率。

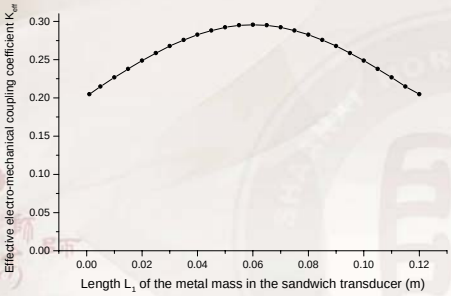
通过换能器的结构创新设计，实现了换能器超声功率的三维辐射。

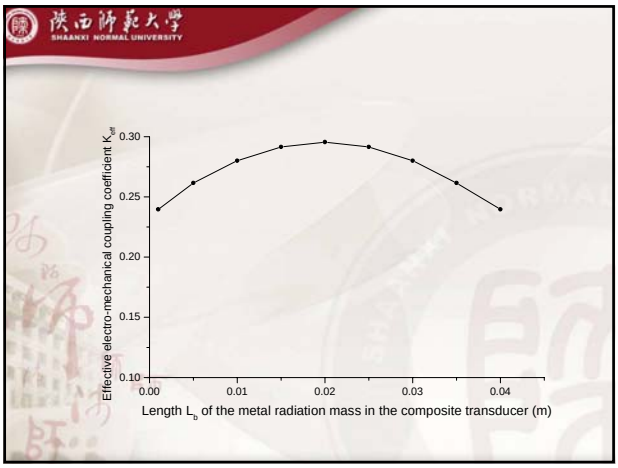
共振频率与几何尺寸之间的关系

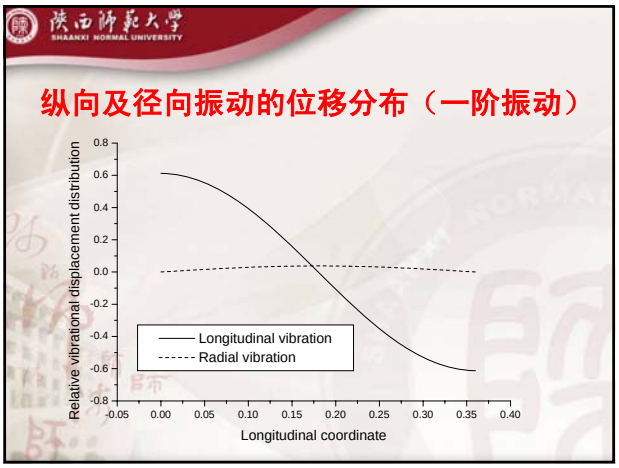


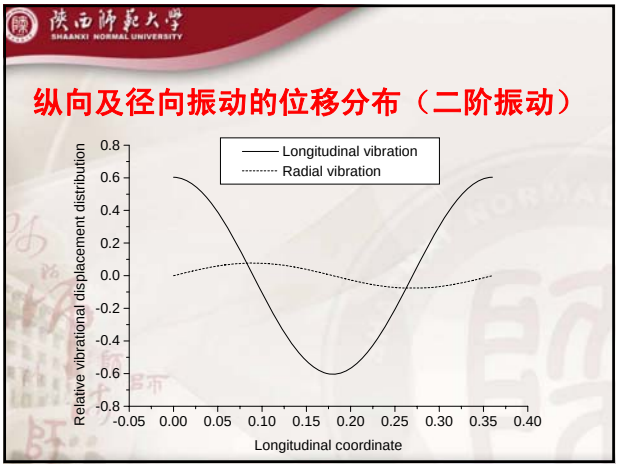


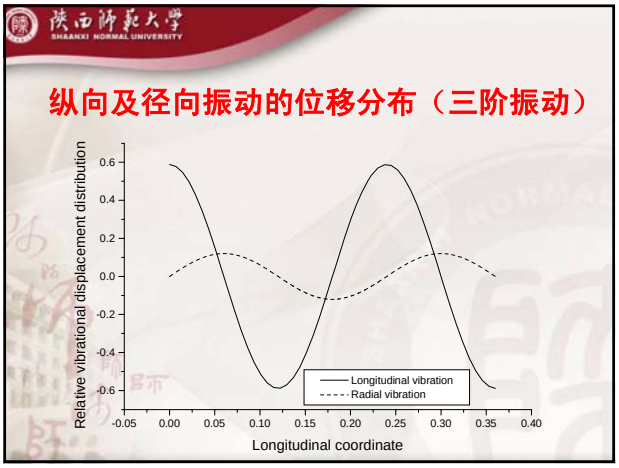
有效机电耦合系数与几何尺寸的关系

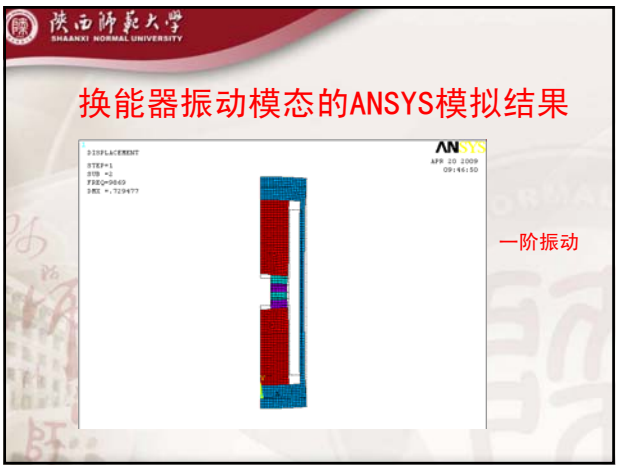


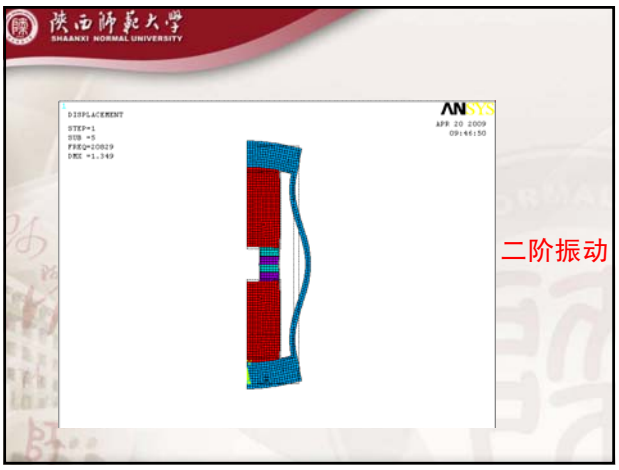

Effective electro-mechanical coupling coefficient K_{33}^3
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.00
0.01
0.02
0.03
0.04
Length L_b of the metal radiation mass in the composite transducer (m)

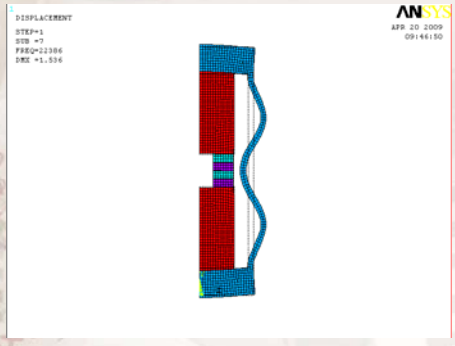

纵向及径向振动的位移分布（一阶振动）
Relative vibrational displacement distribution
Longitudinal vibration
Radial vibration
Longitudinal coordinate


纵向及径向振动的位移分布（二阶振动）
Relative vibrational displacement distribution
Longitudinal vibration
Radial vibration
Longitudinal coordinate


纵向及径向振动的位移分布（三阶振动）
Relative vibrational displacement distribution
Longitudinal vibration
Radial vibration
Longitudinal coordinate

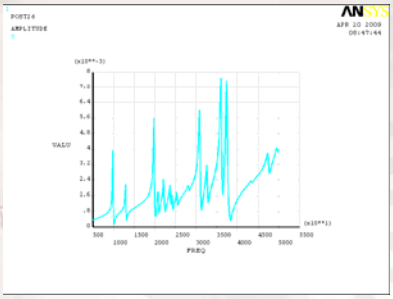

换能器振动模态的ANSYS模拟结果
一阶振动


二阶振动

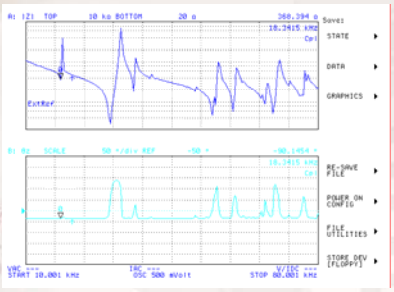


三阶振动

导纳-频率曲线图（数值模拟）



阻抗-频率曲线图（实验测试）



两种不同的激励方式

1、换能器的前后金属圆柱产生活塞式振动（金属圆柱的厚度较大）。

2、换能器的前后金属圆柱产生弯曲振动（金属圆柱的厚度较小）。

金属圆柱产生活塞式振动

1、要求前后金属圆柱的厚度大于其直径的四分之一。

2、金属圆柱与夹心式换能器组成一个共振系统，金属圆柱的尺寸影响整个系统的共振频率。

金属圆柱产生弯曲振动

1、要求前后金属圆柱的厚度小于其直径的五分之一。

2、金属圆柱与夹心式换能器分别组成两个单独的共振系统，其共振频率必须保持一致。

四、复合模式功率超声换能器

- 纵扭复合模式超声换能器
- 纵弯复合模式超声换能器
- 模式转换型纵扭复合超声换能器

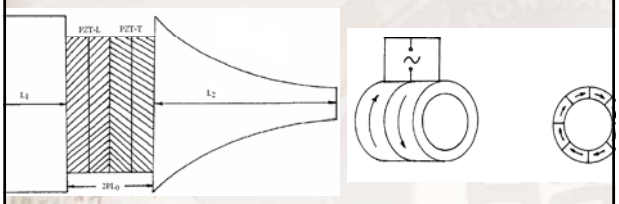
复合模式超声换能器的应用

- 超声马达
- 超声塑料及金属焊接
- 超声手术刀
- 超声加工，包括超声钻孔、超声疲劳试验

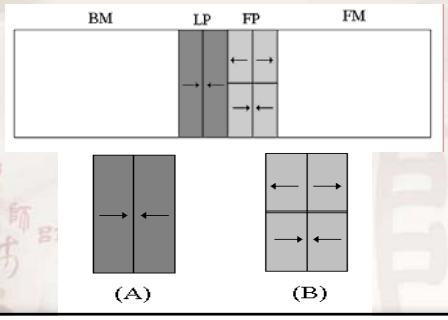
复合模式超声换能器的研究内容

- 同频共振、阻抗匹配及频率跟踪问题
- 换能器性能参数的频率特性（阻抗、效率及带宽等）
- 负载特性
- 不同振动模式之间的耦合及相互作用规律

纵扭复合模式超声换能器



纵弯复合模式超声换能器



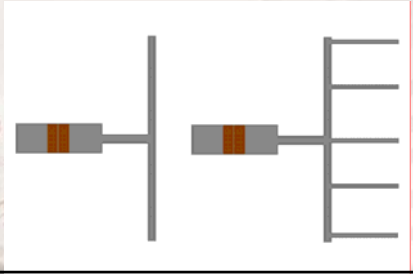
模式转换功率超声换能器

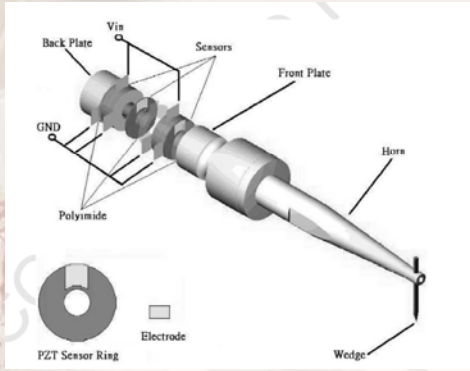
- 纵弯模式转换功率超声换能器
- 纵扭模式转换功率超声换能器

纵弯模式转换功率超声换能器

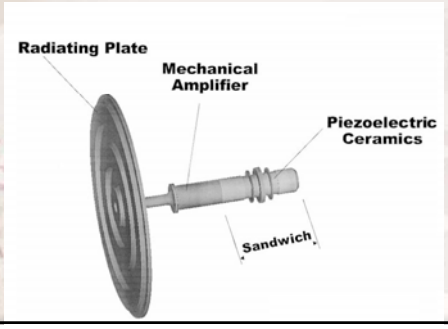
- 夹心式纵向换能器与金属细棒组成的模式转换功率超声换能器；主要用于超声金属焊接以及超声加工等。
- 夹心式纵向换能器与金属薄板（圆形和矩形板）组成的模式转换功率超声换能器；主要用于超声除尘、超声干燥、超声消除泡沫以及超声消雾等

夹心式纵向换能器与金属细棒组成的模式转换功率超声换能器

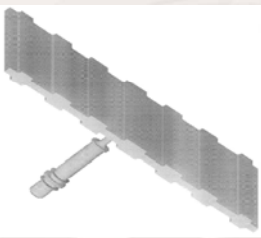


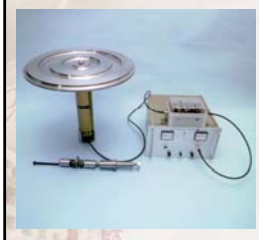


夹心式纵向换能器与金属板组成的模式转换功率超声换能器

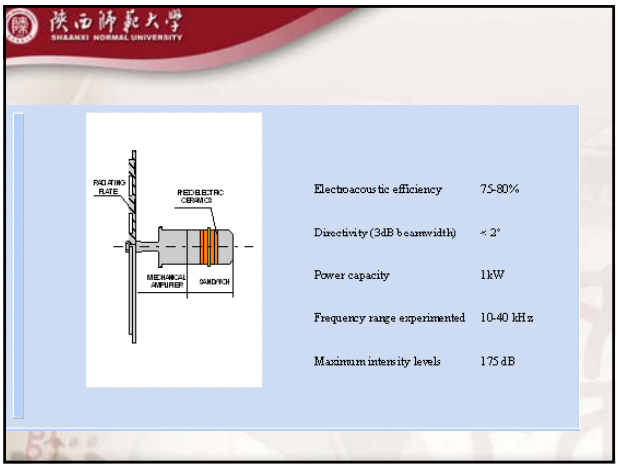




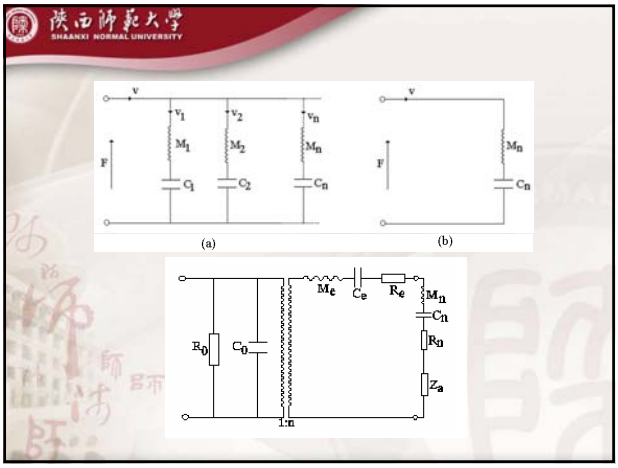


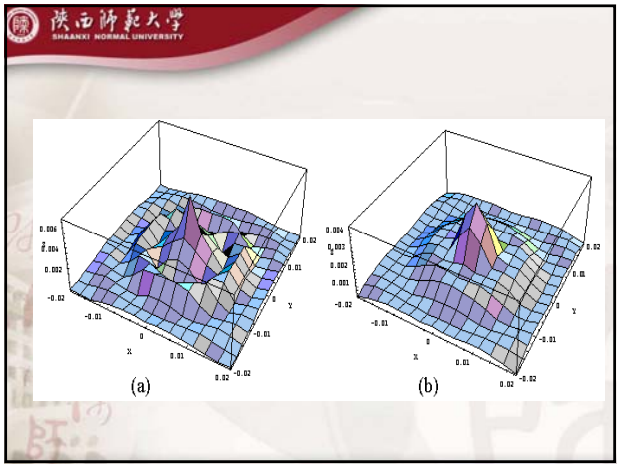






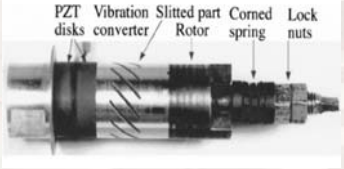


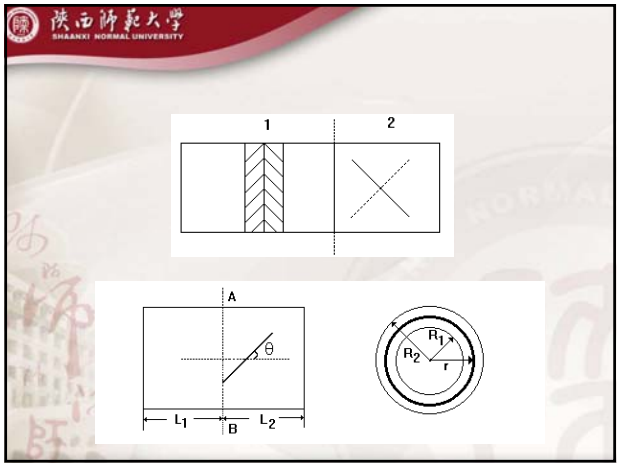


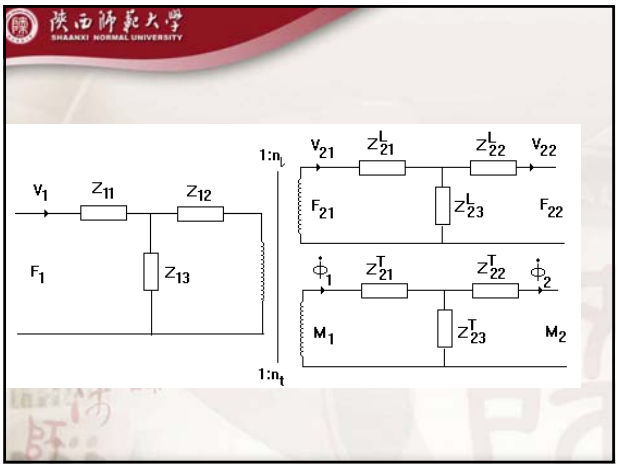


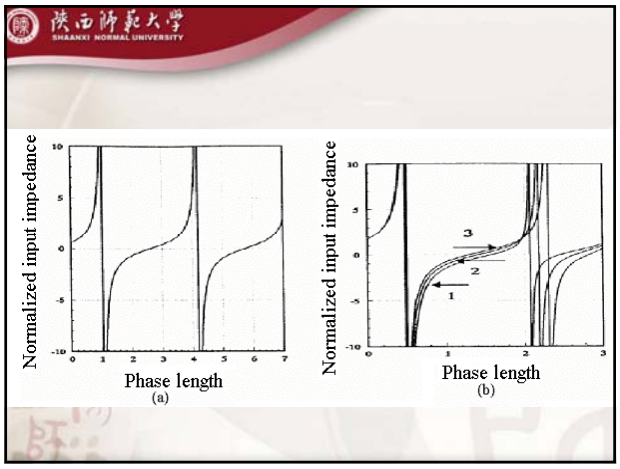
纵扭模式转换功率超声换能器







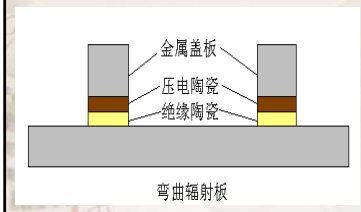




五、复频超声换能器

- 利用弯曲振动辐射板的复频功率超声换能器
- 利用换能器纵向和径向耦合振动的复频及宽频换能器
- 利用换能器前盖板弯曲振动的复频及宽频换能器
- 利用电端匹配电路拓宽换能器的频带及改变换能器的共振频率

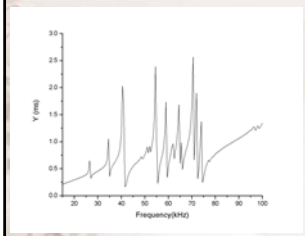
弯曲振动板复频功率超声换能器



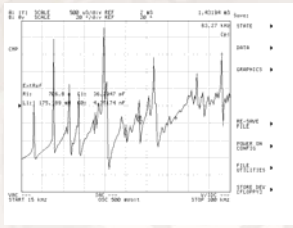


弯曲振动辐射板复频功率超声换能器的阻抗频率特性

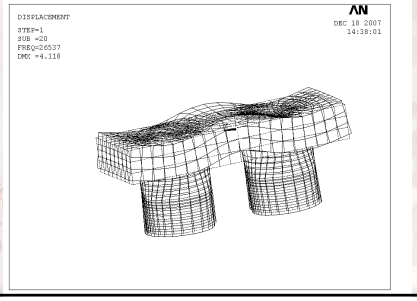
有限元模拟结果



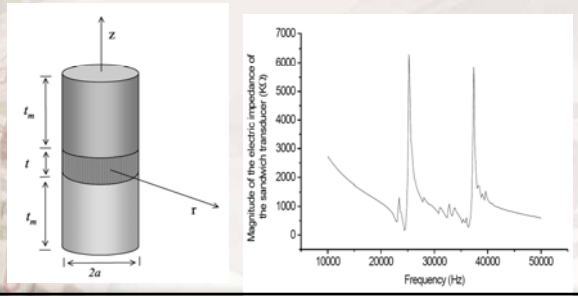
实验测试结果



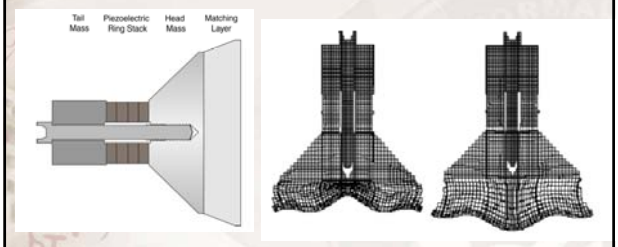
数值模拟振型图



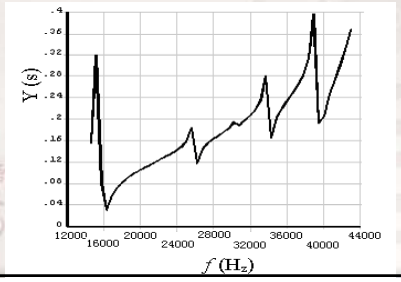
利用换能器纵向和径向耦合振动的复频夹心式换能器



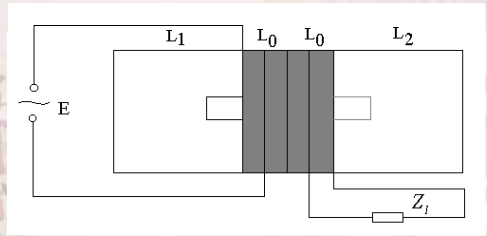
利用换能器的前盖板弯曲振动的复频及宽频换能器



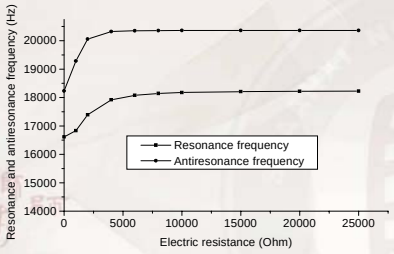
复频超声换能器电导纳的数值模拟结果



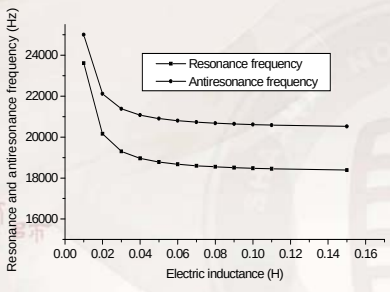
利用电负载拓宽换能器的频带及改变换能器的共振频率



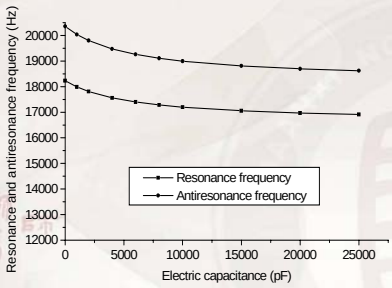
换能器共振频率与负载电阻的关系



换能器共振频率与负载电感的关系



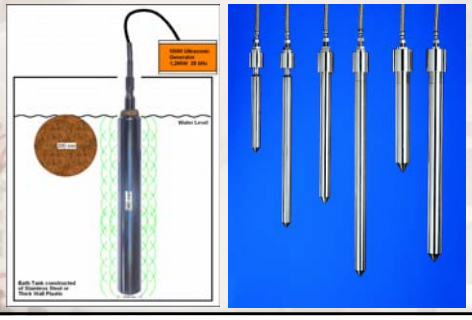
换能器共振频率与负载电容的关系

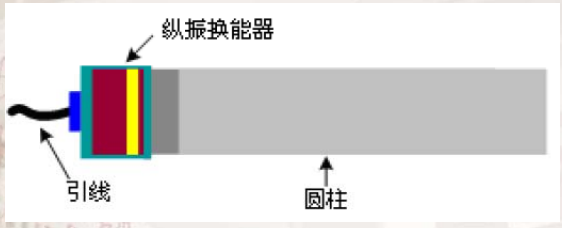


六、大功率圆柱型超声辐射器

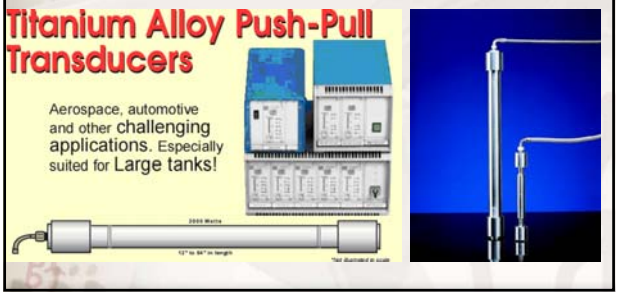
- 基本构成：大功率夹心式纵向模式换能器＋圆柱型超声辐射器（圆柱或圆筒状）
- 工作原理：圆柱的纵向与径向耦合振动
- 应用范围：大功率超声液体处理、超声提取等

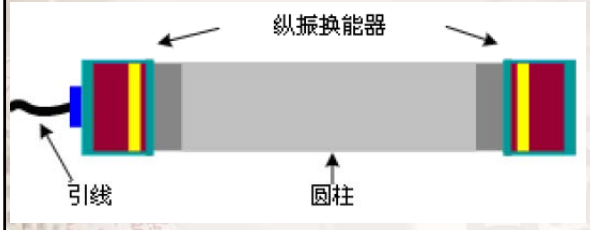
单面激励式





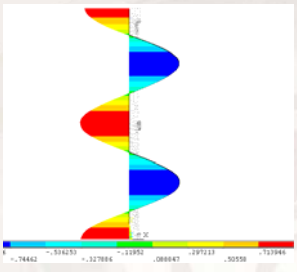
双面激励式

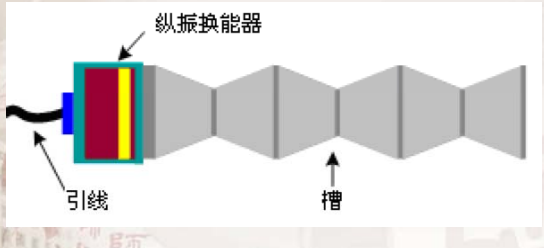




阶梯圆盘式





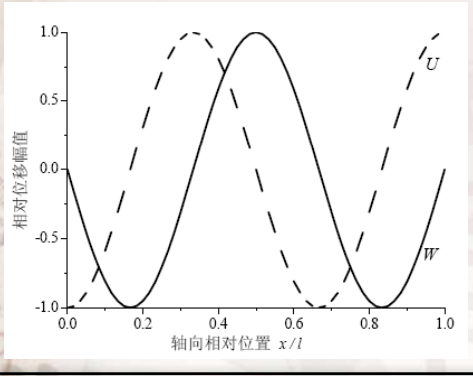


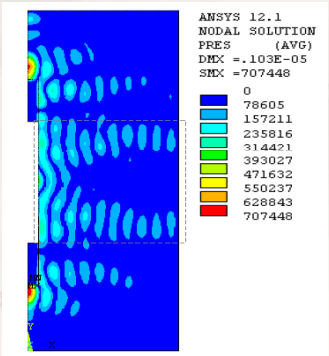
圆柱辐射器的振动模式分析

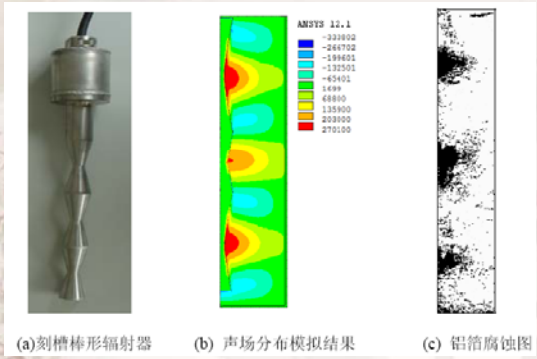


圆柱型大功率超声换能器的特点

圆柱型换能器的功率与其长度成正比
长度是半波长的整数倍
圆柱型超声辐射器的振动以纵向振动为主，径向振动为辅

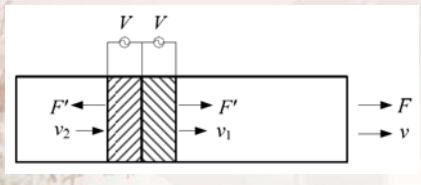




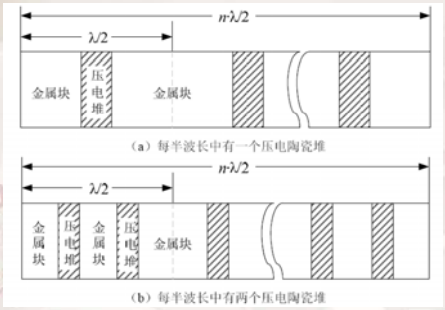


(a)刻槽棒形辐射器　(b) 声场分布模拟结果　(c) 铝箔腐蚀图

七、级联式大功率超声换能器







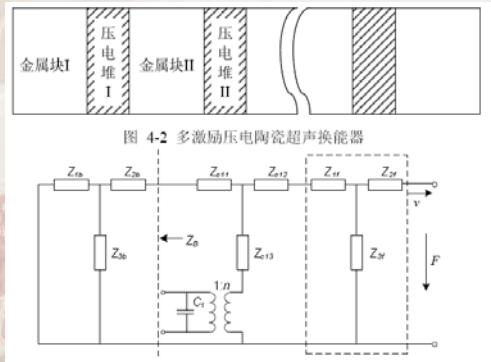
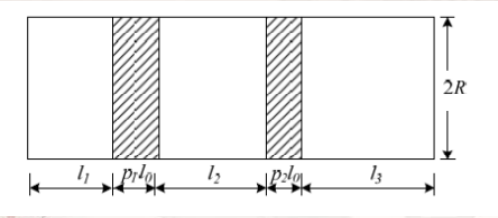
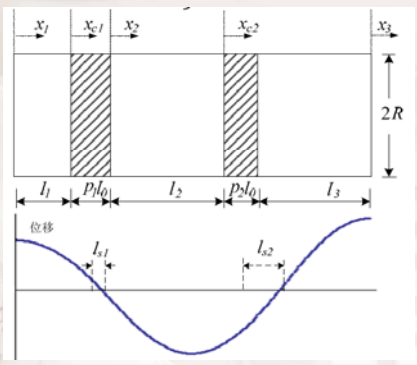
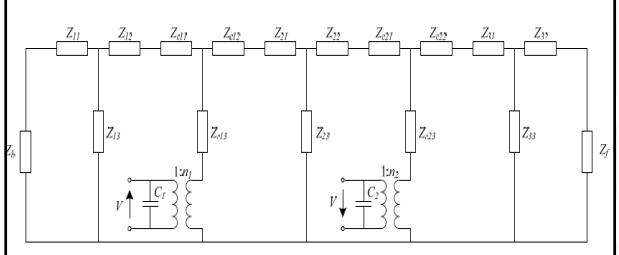


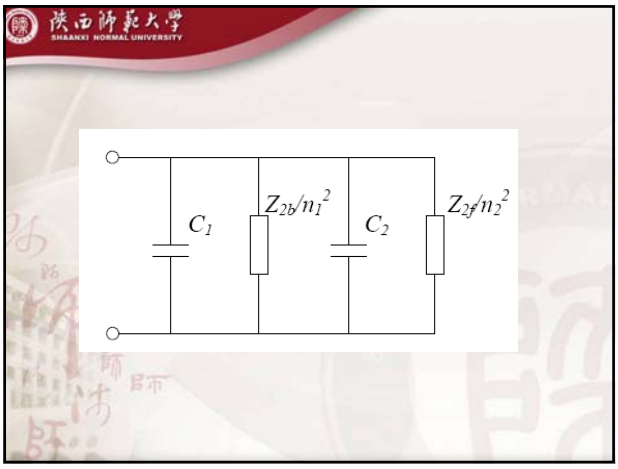
图 4-2 多激励压电陶瓷超声换能器

全波长级联式大功率超声换能器







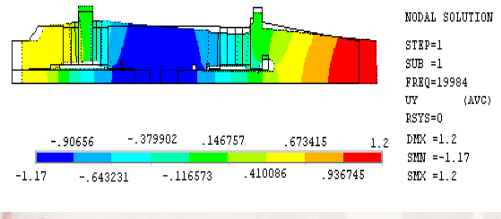


$$Z_i = \frac{1}{\mathrm{j}\omega(C_1 + C_2) + \dfrac{n_1^2}{Z_{2b}} + \dfrac{n_2^2}{Z_{2f}}}$$

$$\mathrm{j}\omega(C_1 + C_2) + \frac{n_1^2}{Z_{2b}} + \frac{n_2^2}{Z_{2f}} = 0$$



大功率双激励全波长超声换能器



双激励全波长压电陶瓷超声换能器的振动模态

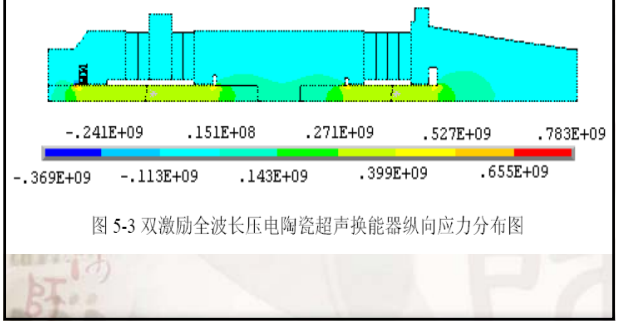
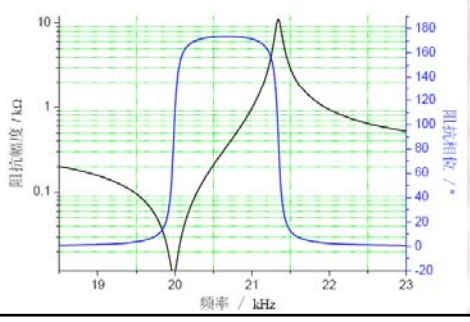
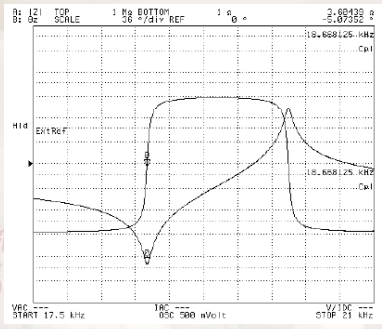


图 5-3 双激励全波长压电陶瓷超声换能器纵向应力分布图

数值模拟的阻抗频率曲线



测试的阻抗频率曲线



八．总结

- 研发新的换能材料，包括压电以及磁致伸缩换能材料。例如压电单晶和稀土材料等。
- 改善及提高传统郎之万功率超声换能器的性能，提高单元振子功率及效率。
- 研发新的换能器结构及新型功率超声换能器。
- 传统应用精细化，实验室应用规模化。
- 开拓新领域。

谢谢大家！