压电作动器概论

南航机械结构力学及控制国家重点实验室

胡俊辉

Email: ejhhu@nuaa.edu.cn

内容

I 压电作动器的分类和功能

II 压电作动器中驱动力及其发生机理

III 作动器中的压电换能单元

IV 压电作动器的工作原理、基本结构、设计要点、特性和应用

V 压电作动器的发展趋势

Ⅰ 压电作动器的分类和功能

压电励振结构 → 利用单层或多层压电结构，产生微纳米级位移和大推力

压电马达或超声电机 → 把电能转化为受控振动，利用该振动进行驱动转子或动子

压电泵 → 把电能转化为受控振动，利用该振动驱动流体或粉体

压电操控器件 → 把电能转化为受控超声，利用该超声引起的物理效应对物体进行操纵、控制、特种驱动和处理

II 压电作动器中的驱动力及其发生机理

除了逆压电效应直接产生的驱动力以外，被广泛使用的驱动力还包括：

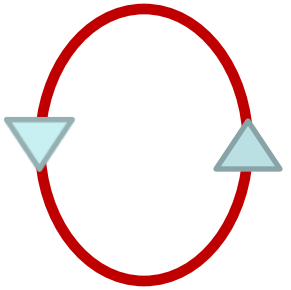
（1）质点椭圆运动引起的摩擦驱动力；

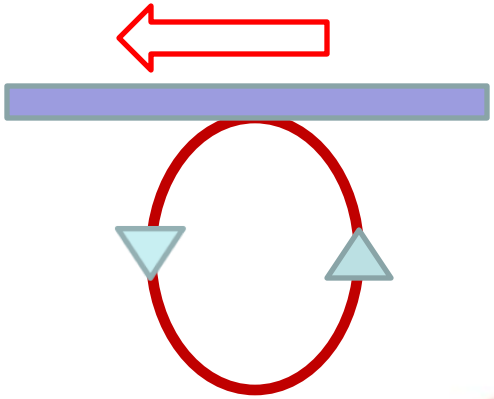
（2） 声辐射力；

（3）声学流引起的声粘性力和冲击力等

质点椭圆运动引起的摩擦驱动力

利用超声行波或振动合成技术使得振动面上的质点做椭圆运动

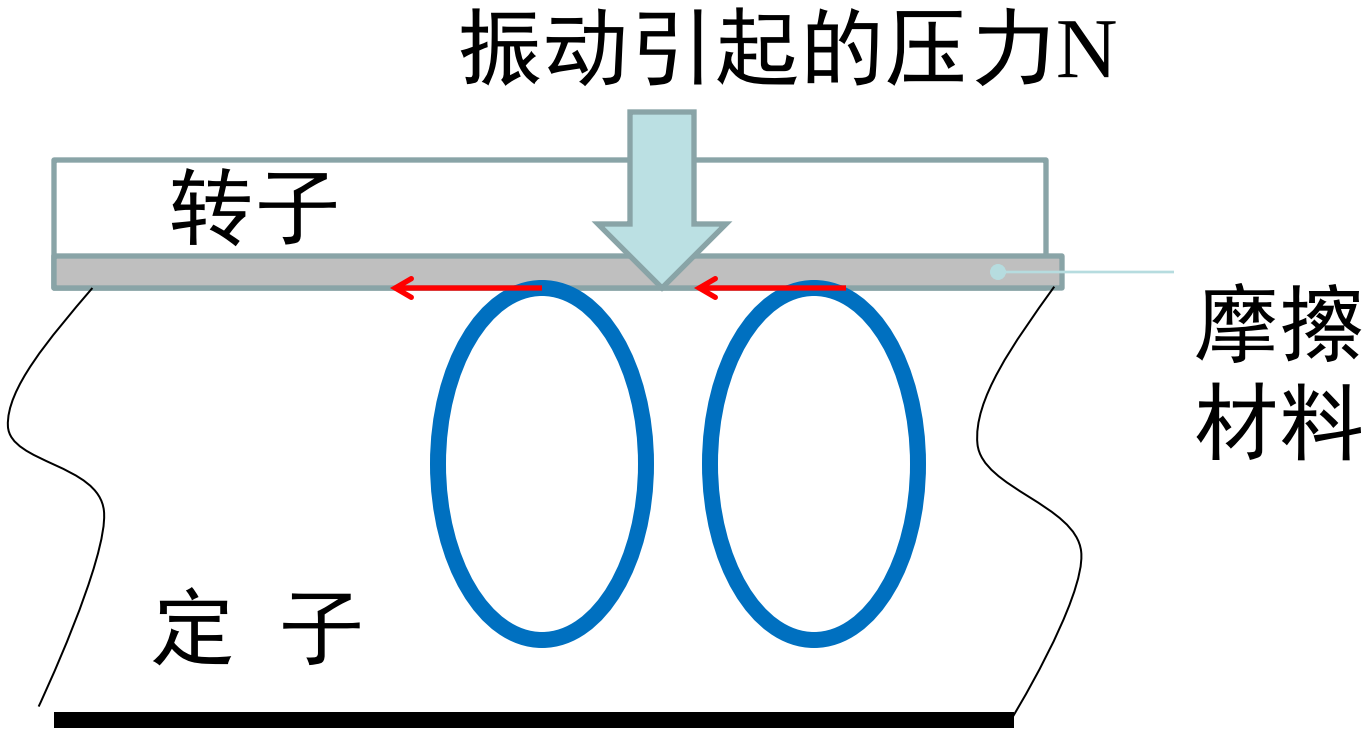




该质点与接触物体之间，会产生摩擦力。

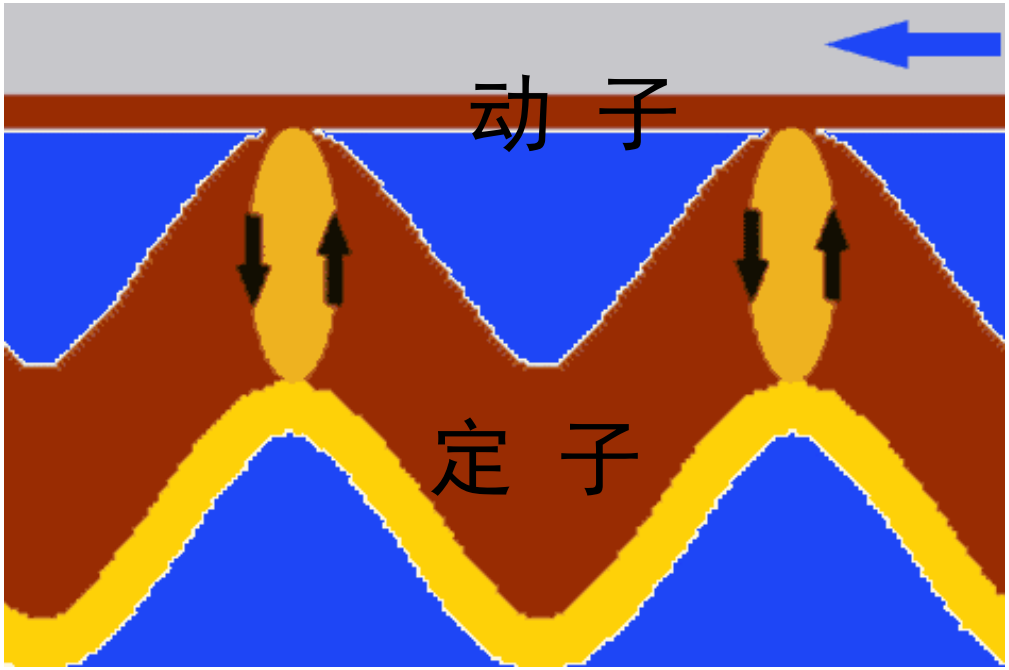
1. S. Ueha， et.al. , *Ultrasonic Motors*. Oxford: Clarendon Press, 1993.
2. 赵淳生，超声电机技术与应用，科学出版社，**2007**

质点椭圆运动引起的摩擦驱动力



定子振动 → 转子变形 → 定转子之间的压力N → 摩擦驱动力 $f = \mu N$

质点椭圆运动引起的摩擦驱动力



数学上可以证明，行波的行进方向和其产生的摩擦驱动力的方向相反

声辐射力

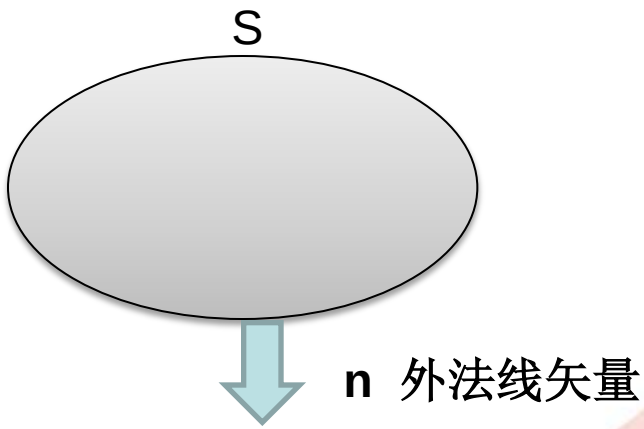
由声场动能密度和势能密度的空间不均匀性引起的、作用在声场中物体表面的不随时间变化的力。

Acoustic radiation force on a rigid object

$$\mathbf{F} = \iint_S (\langle K \rangle - \langle U \rangle)\mathbf{n}dS$$

‹K› = time average of kinetic energy density

‹U› = time average of potential energy density



声辐射力

$$\mathbf{F} = \iint_S (\langle K \rangle - \langle U \rangle)\mathbf{n}dS$$

$$K = \frac{\rho_0 v^2}{2}$$

声场的振动速度

$$U = \frac{p^2}{2\rho_0 c_0^{\ 2}}$$

声场的声压

声介质中的声速

声介质的密度

Y. Liu, J. Hu，et. al., *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 57, no. 6, pp.1443-1450, June 2010.

声辐射力近似解

- 利用Gor'kov的近似方法
- 把声场中的物体等效为小球, 等效半径为R;
- 波数k和等效半径R需满足：kR<<1;
- 引入声场的势*P* (force potential)

$$P = V[-D < K > +(1-\gamma) < U >]$$

V: 小球的体积

$$D = \frac{3(\rho_s - \rho_f)}{2\rho_s + \rho_f}$$

$$\gamma = \frac{\rho_f c_f^2}{\rho_s c_s^2}$$

s: 小球　*f*: 声介质　ρ: 密度　c: 声速

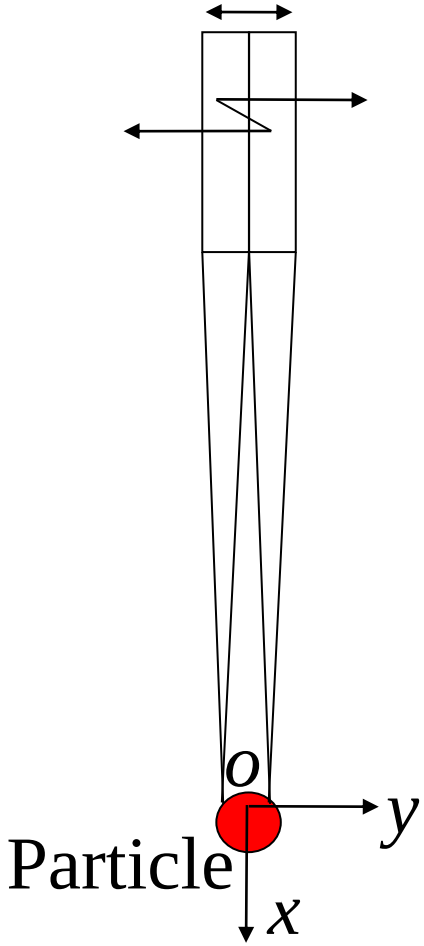
声辐射力近似解

声辐射力

$$\vec{F} = -\nabla P$$

- L. P. Gor'kov, Sov. Phys. Dokl **6**, 773 (1962).

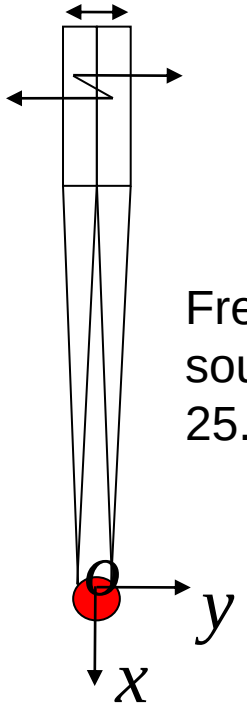
声辐射力近似解的例子



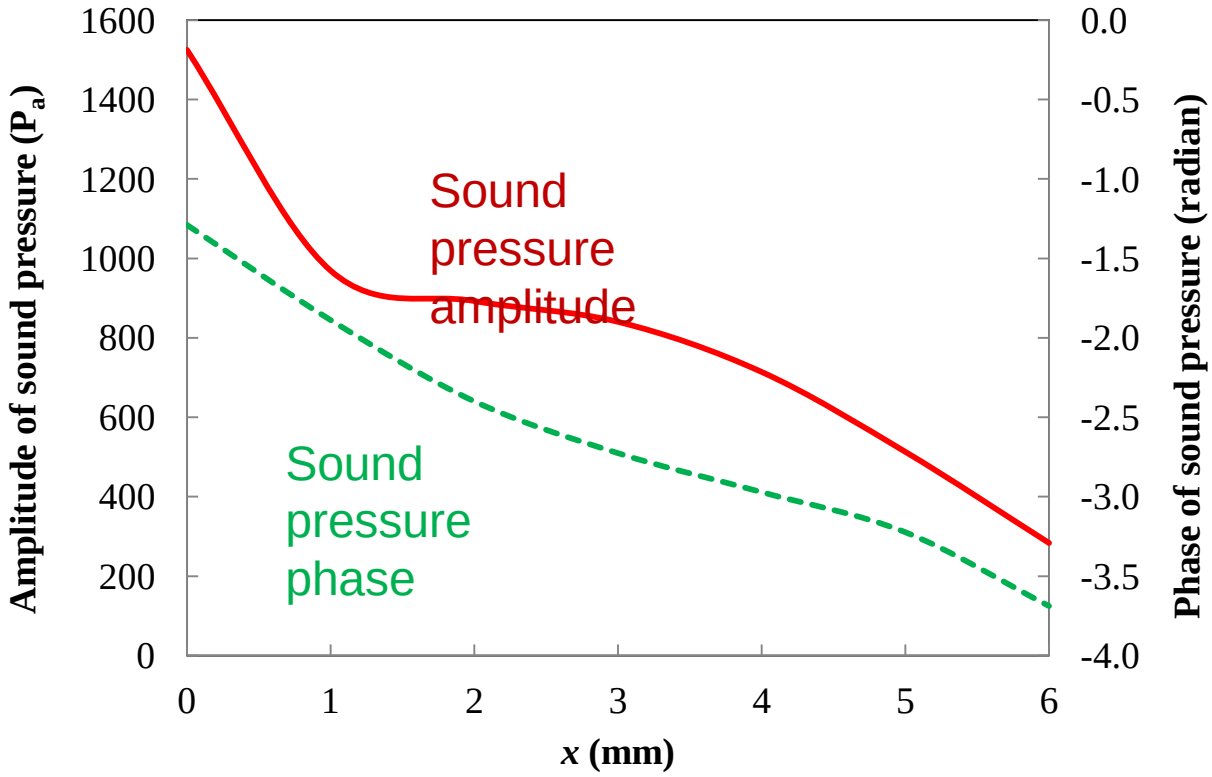
- 两块楔形振动板构成的空隙能吸引小颗粒；
- 可获得作用在小颗粒上声辐射力的近似解。

Y. Liu, J. Hu, *Journal of Applied Physics*, vol. 106, 034903, 2009.

声辐射力近似解的例子



Freq. of sound field = 25.3 kHz



$$p = p_m e^{-\alpha x} \cos[kx + \varphi_0 + \omega t]$$

声辐射力近似解的例子

$$p = p_m e^{-\alpha x}\cos[kx+\varphi_0+\omega t]$$

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\rho_0 \mathrm{div} v = 0$$

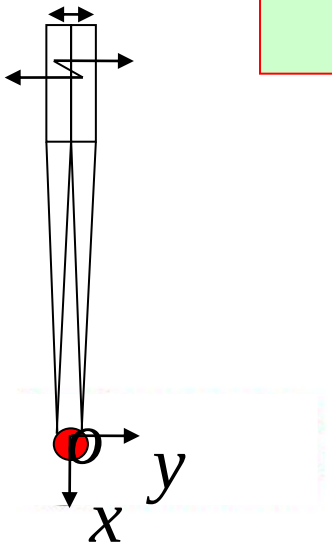
$$v = -\frac{p_m^2\sqrt{\alpha^2+k^2}}{\rho_f \omega} e^{-\alpha x}\cos(kx+\varphi_0+\omega t+\theta)$$

(x 方向的振动速度)

声辐射力近似解的例子

Sound pressure p & vib velocity v ⇨ *<K> <U>* ⇨ *Force potential P* ⇨ *Acoustic radiation force* **F**= –▽*P*

$$\vec{F} = -\vec{i}\,\frac{V\alpha\, \mathrm{p}_m^2 e^{-2\alpha x}}{2\rho_f}\left[\frac{D(\alpha^2+k^2)}{\omega^2}+\frac{1-\gamma}{c_f^2}\right]$$



In air

$$\vec{F} = -\vec{i}\,\frac{V\alpha\, p_m^2 e^{-2\alpha x}}{4\rho_f c_f^2}$$

声辐射力

能产生声辐射力的声场

- 驻波声场
- 聚焦声场
- 衰减的声表面波
- 具有空间衰减或梯度的行波等

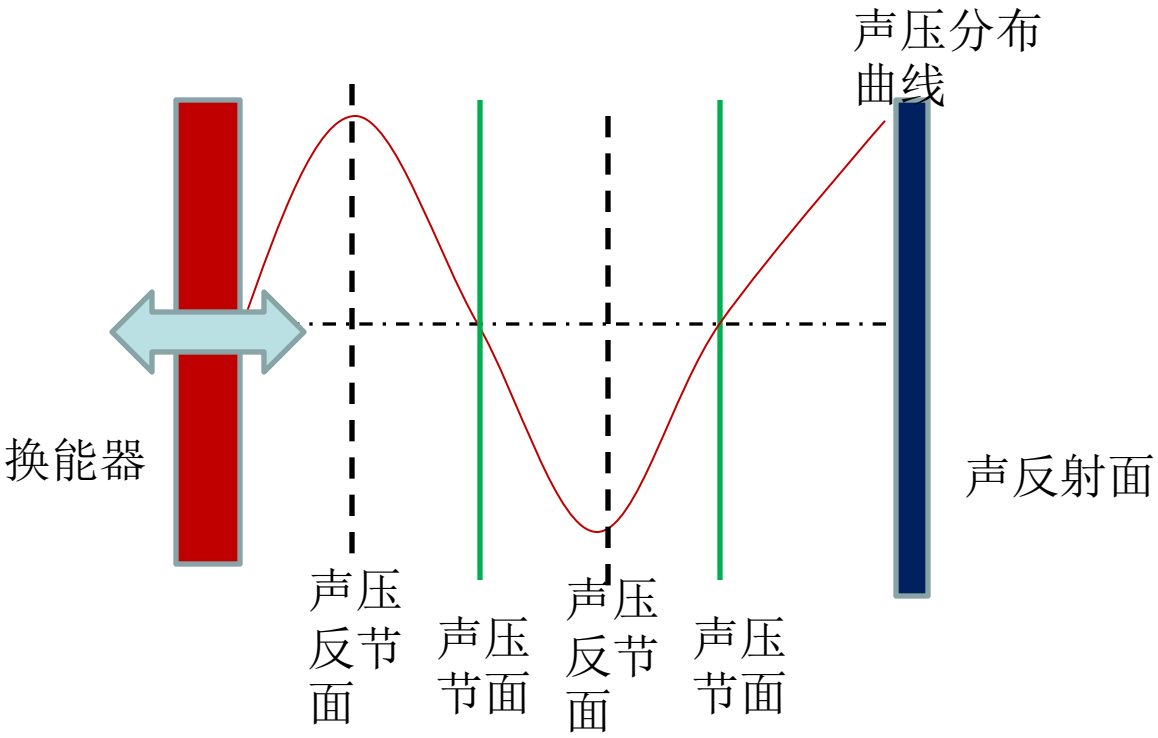
不能产生声辐射力的声场

- 不具有空间衰减和梯度的行波

（1）Junhui Hu, et. al., *Applied Physics Letters*, vol. 87, No. 9, 094104, 2005.
（2）Junhui Hu, et. al., *Applied Physics Letters*, vol. 85, No. 24, pp.6042-6044, 2004.

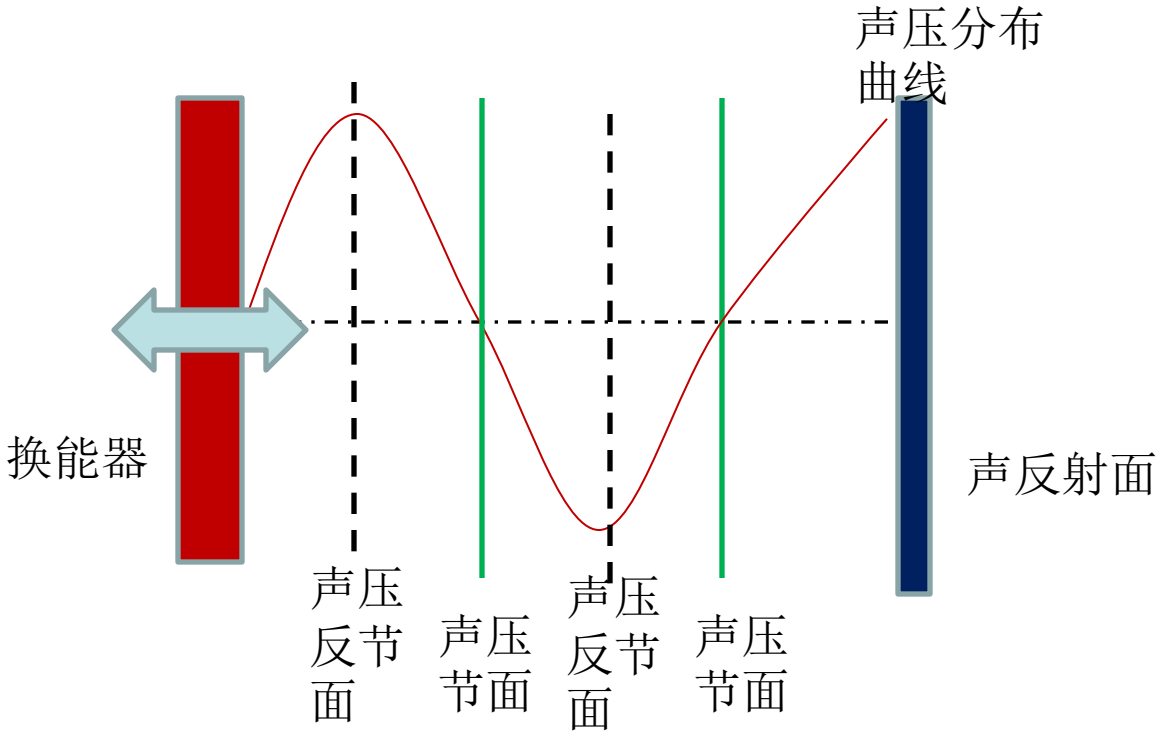
声辐射力

如何产生驻波声场？



声辐射力

驻波声场产生的声辐射力的一些重要特性



$$D=\frac{3(\rho_s-\rho_f)}{2\rho_s+\rho_f}$$

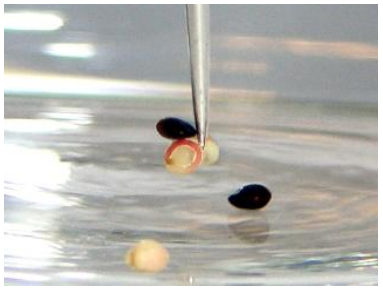
$$\gamma=\frac{\rho_f c_f^2}{\rho_s c_s^2}$$

（1）当 D+1-γ >0 （如水和空气中的固体颗粒），声辐射力驱动颗粒到声压节面；

（2) 当 D+1-γ <0 （如水中气泡），声辐射力驱动颗粒到声压反节面。

声辐射力

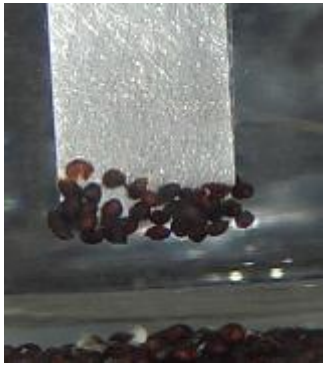
如何获得具有空间衰减或梯度的行波来产生声辐射力？



声辐射点



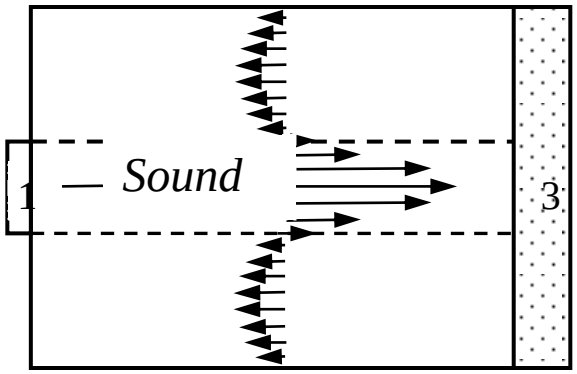
声辐射线



声辐射面

上述方法的工作原理：请参阅声辐射压近似解的例子

声学流



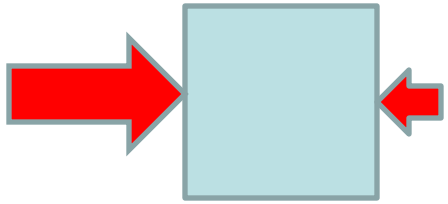
声学流：由声场振动引起的流动

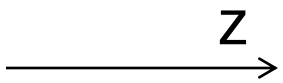
原因：单位时间内通过单位面积的动量的空间不均匀性

驱动力：

$$\mathrm{F} = \rho_0 \left\langle v\ \nabla v\ + (v\ \nabla) v \right\rangle$$

驱动力的物理意义：

$< \rho v^2(z) >$  $<\rho v^2(z+\Delta z)>$



雷诺应力的不平衡产生声学流

J. Lighthill, Waves in Fluids, Cambridge University Press, Cambridge, 1978.

声学流的解析解

求解声场的振动速度*v*

$$\Delta\Omega = \frac{1}{\upsilon} < \nabla\nabla v \times v >$$

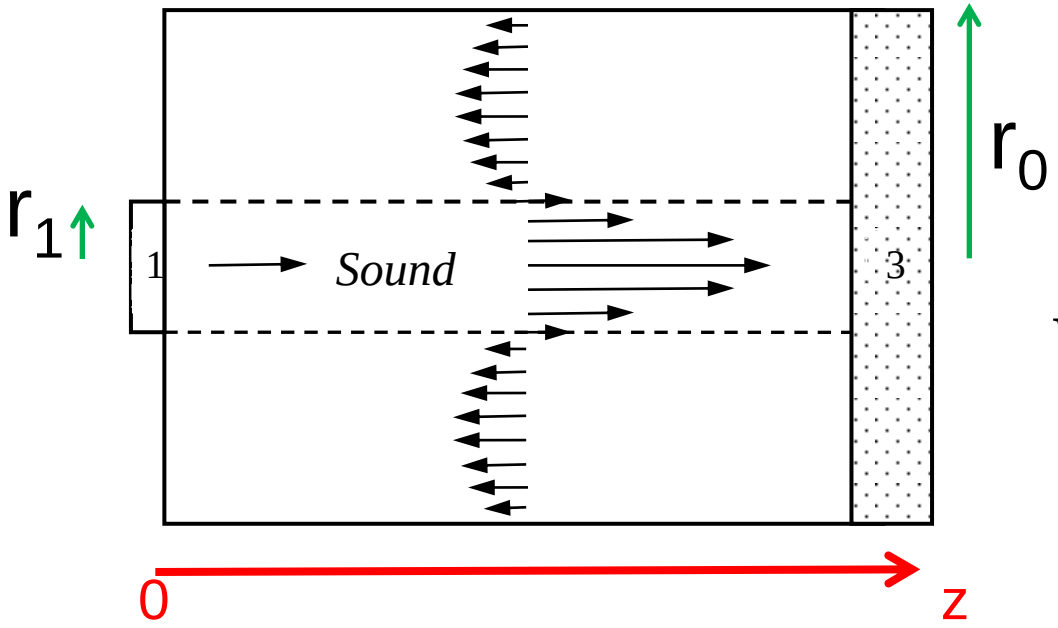
$$\Omega = \nabla \times V_a$$

获得声学流的流场

O. V. Abramov, High-Intensity Ultrasonics, Gordon and Breach Science Publishers, Singapore, 1998.

at

声学流近似解的例子



设定声场为一维，而且

$$v_z = v(r)e^{-\alpha z}\sin(\omega t - kz)$$

$$\alpha = \frac{\omega^2 b}{2\rho_f c_f^3}$$

b：由流体粘性决定的量

设定

$$v(r) = v_m \quad at \quad r < r_1$$

$$v(r) = 0 \quad at \quad r_1 < r < r_0$$

声学流近似解的例子

$$V_a=\begin{cases} V\left\{\frac{1}{2}\left(1-\frac{\psi^2}{\chi^2}\right)\left(1-\frac{1}{2}\chi^2\right)\left(1-\psi^2\right)-\ln\chi\right\}; & 0\le\psi\le\chi \\ -V\left\{\left(1-\frac{1}{2}\chi^2\right)\left(1-\psi^2\right)+\ln\psi\right\}; & \chi\le\psi\le 1 \end{cases}$$

$$\psi=\frac{r}{r_0} \qquad \chi=\frac{r_1}{r_0} \qquad V=\frac{b}{4\eta c_0}v_m^2\left(kr_1\right)^2$$

I 压电作动器的分类和功能

II 压电作动器中的驱动力及其发生机理

III 作动器中的压电换能单元

IV 压电作动器的工作原理、基本结构、设计要点、特性和应用

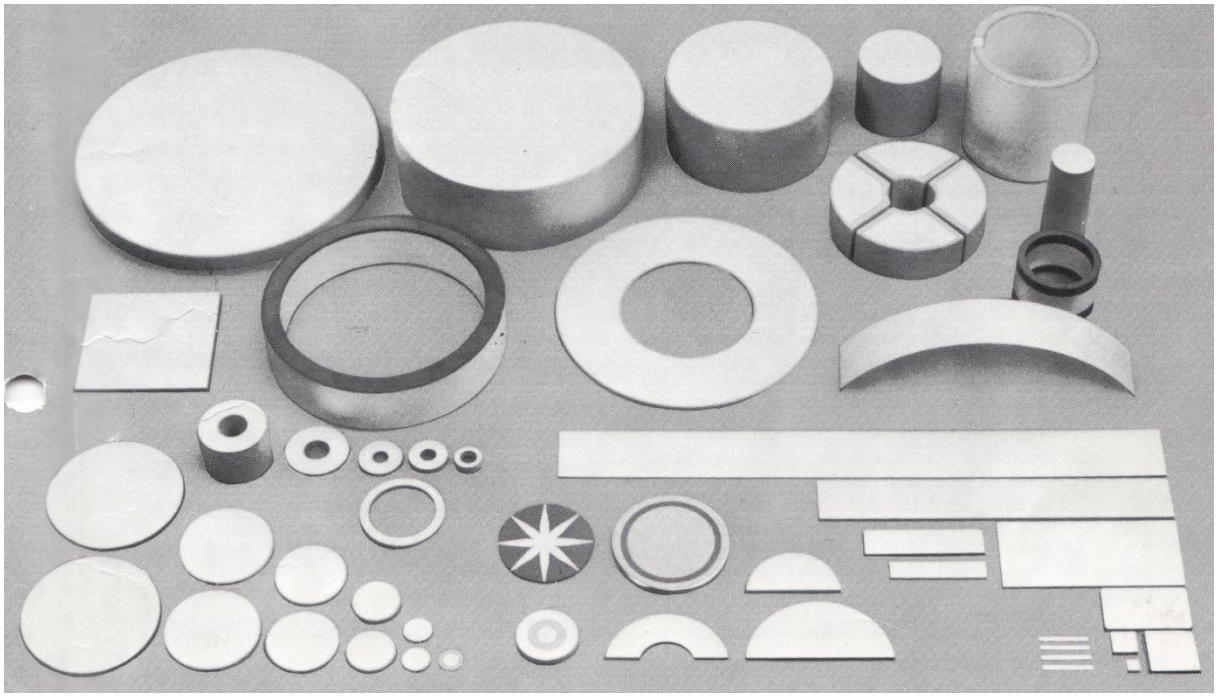
V 压电作动器的发展趋势

III 压电作动器中的换能单元

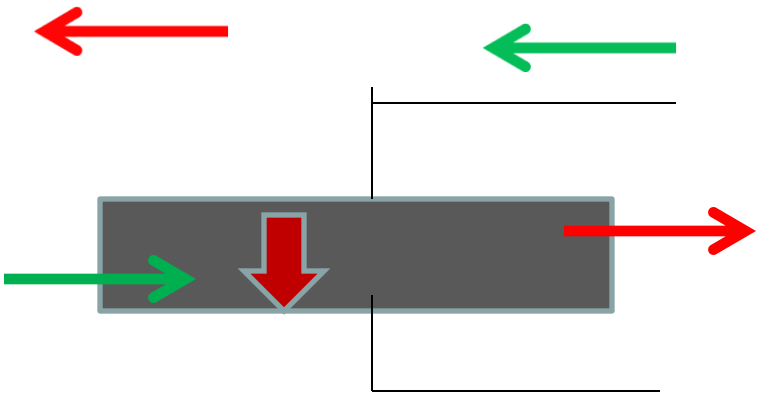
功能：
把电能转化为受控声能；
是各类压电作动器的励振单元。

种类：
（1） 单个压电元件；
（2） 夹心式换能器等

压电元件



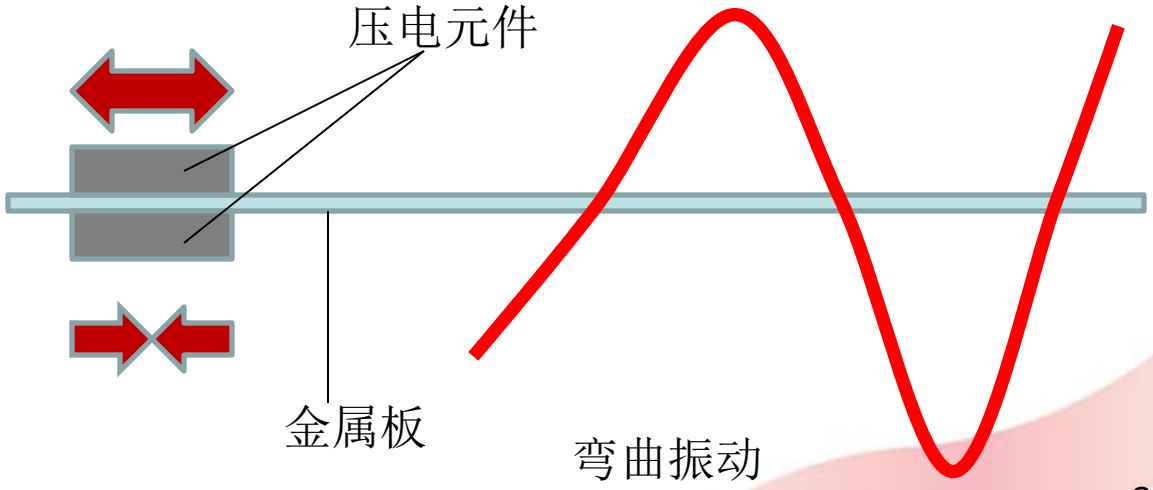
单个压电元件的常用工作模态



长度或宽度伸缩振动模态

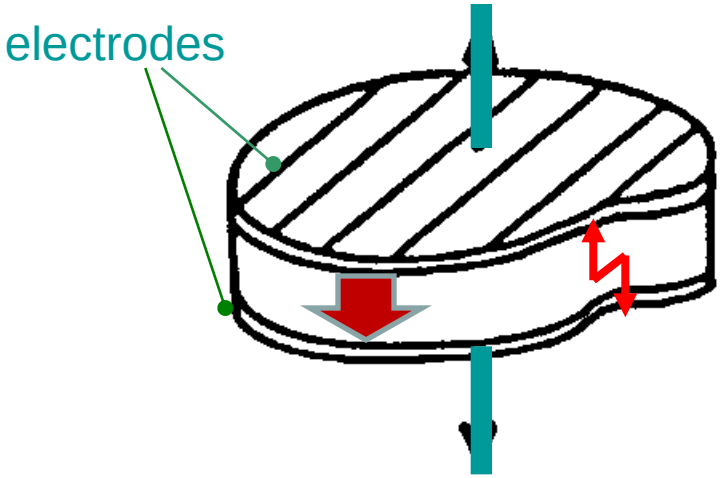
应用：在超声电机、压电泵和压电操控器件中激励弯曲振动

应用例



单个压电元件的常用工作模态

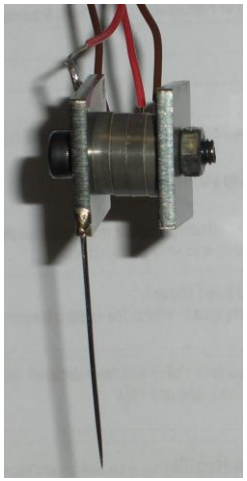
厚度振动模态



Thickness mode of a PZT plate or disk

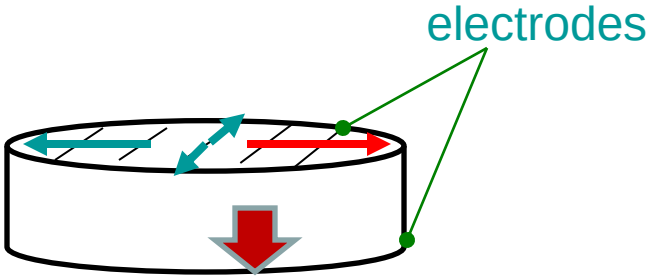
应用：非共振式压电马达及各类夹心式换能器的励振结构

应用例： 超声针



单个压电元件的常用工作模态

径向振动模态

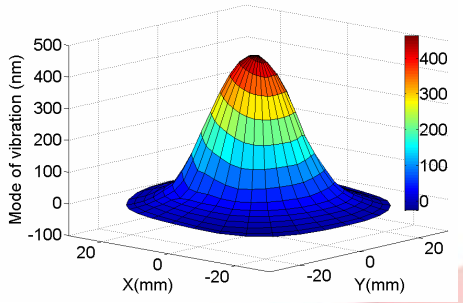


Radial mode of a PZT disk

应用：单相超声电机、超声操控器件和压电泵等

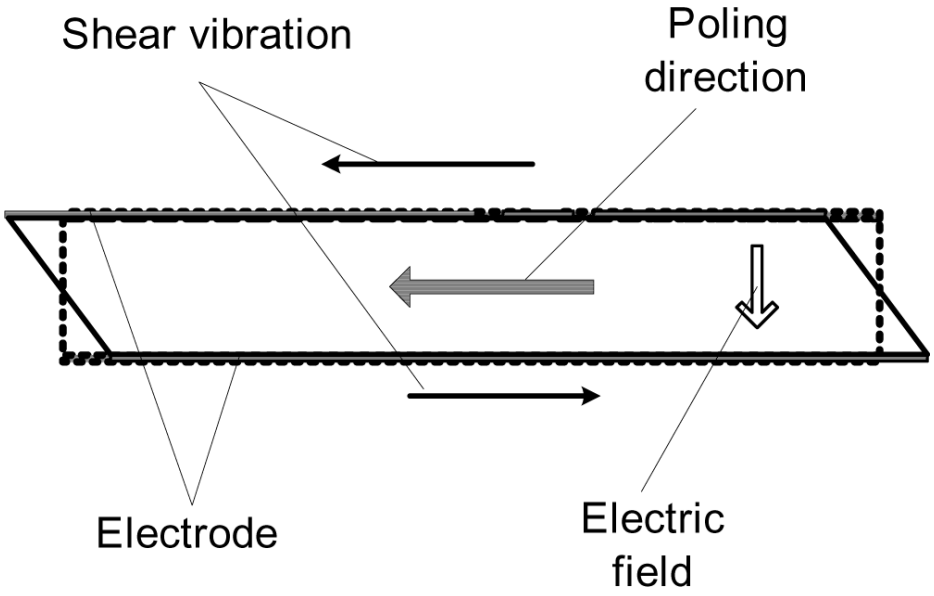
应用例：超声操控台





单个压电元件的常用工作模态

切向振动模态



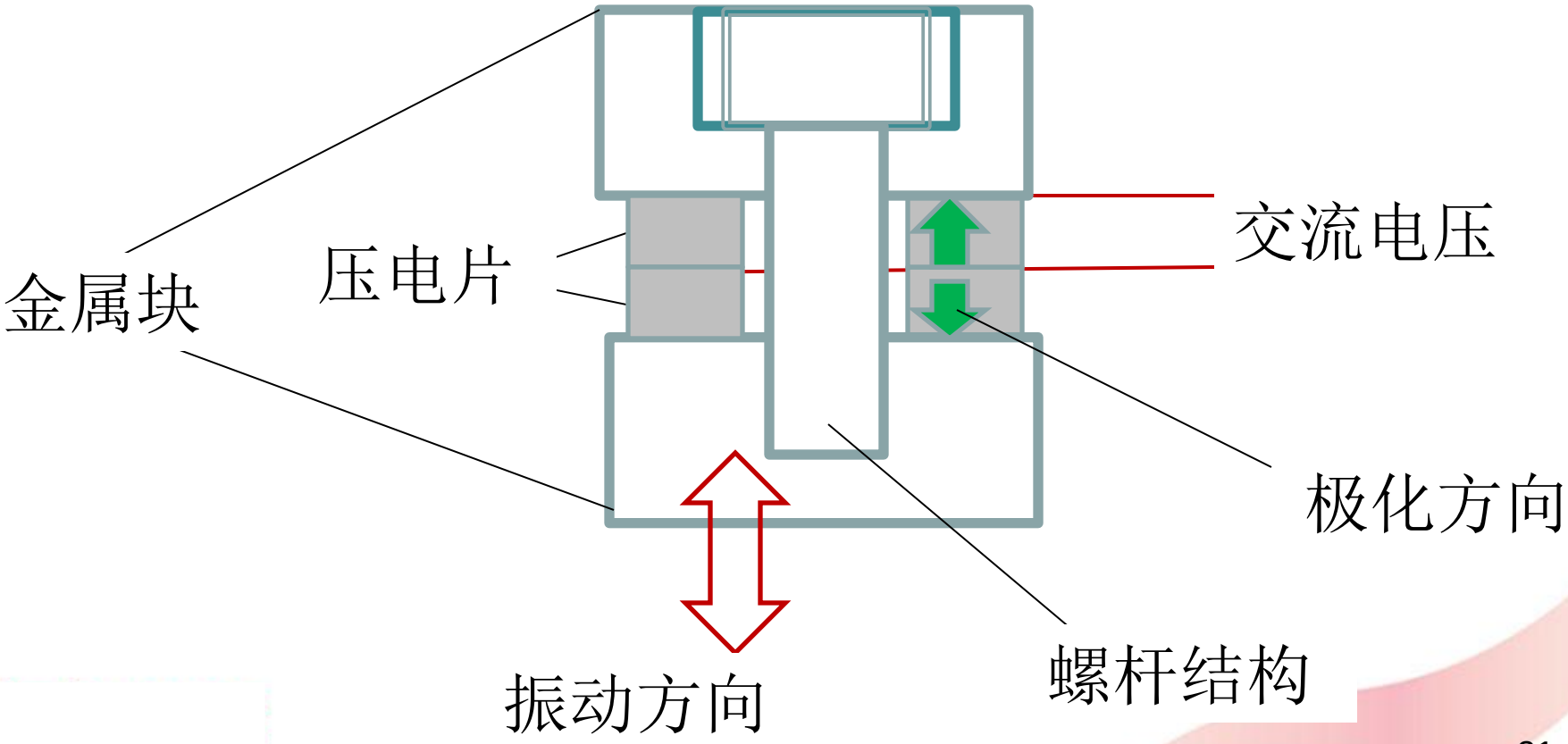
应用：单相超声电机

应用例：超声电机



压电作动器中的夹心式换能器（Langevin Transducer）

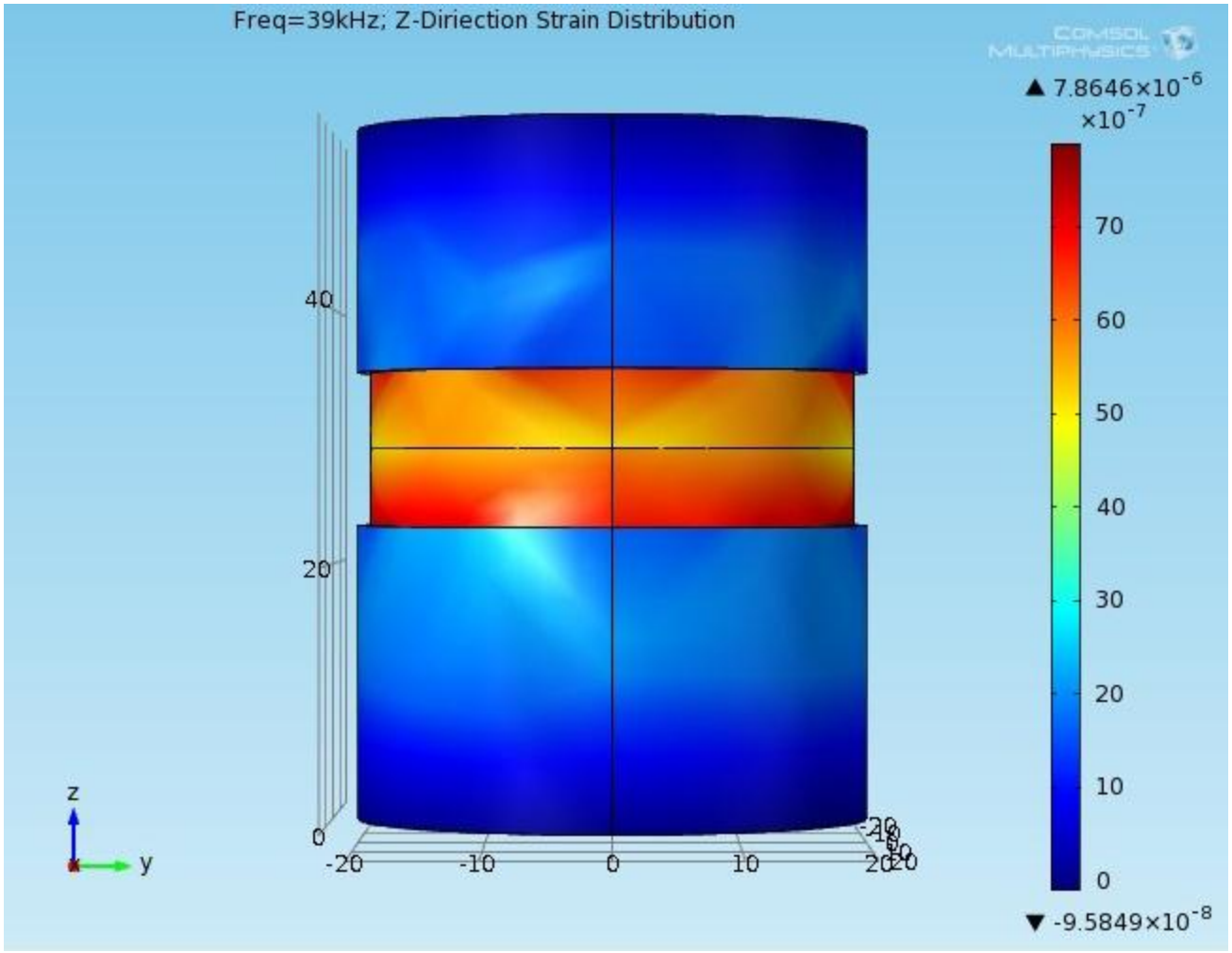
纵向振动夹心式换能器



压电作动器中夹心式换能器的分类

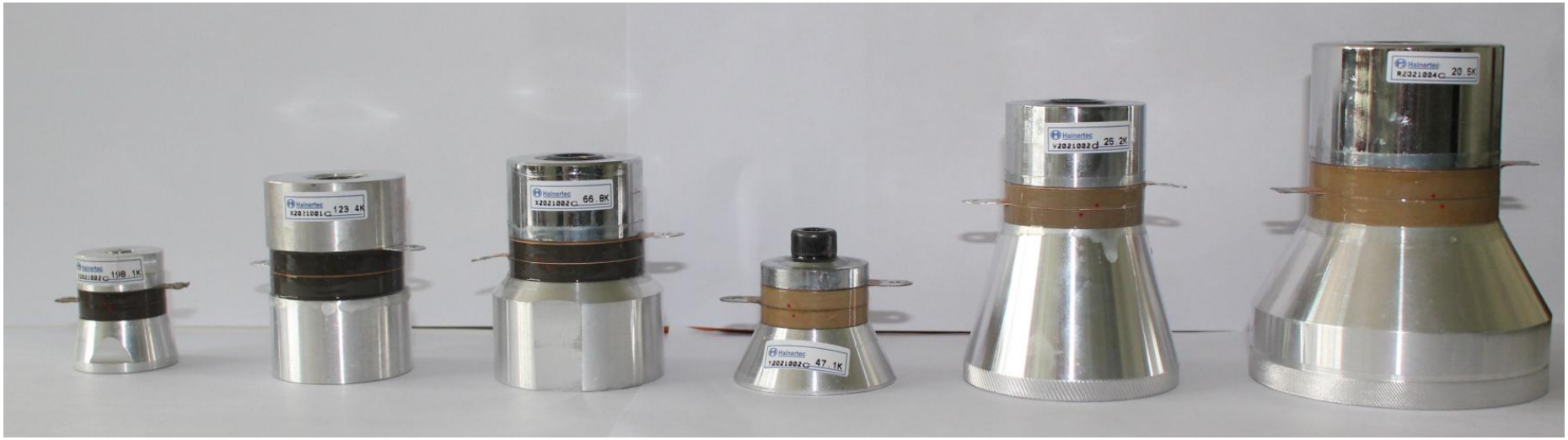
- 纵向振动夹心式换能器（Langevin 换能器）
- 弯曲振动夹心式换能器
- 纵-弯振动夹心式换能器
- 纵-扭振动夹心式换能器

纵向振动夹心式换能器的结构特点



压电片位于轴向位移为零或轴向正应力最大的位置。

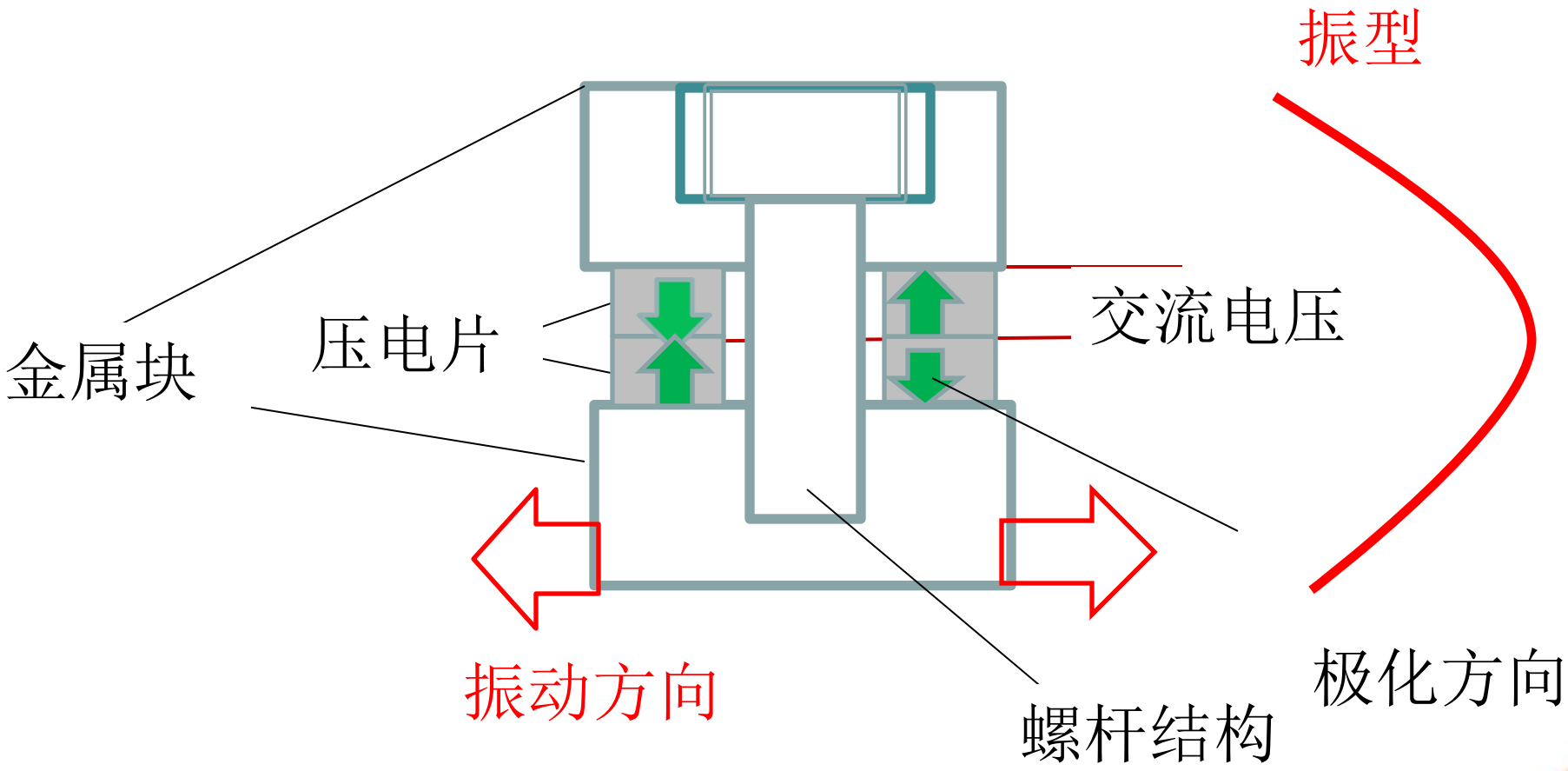
纵向振动夹心式换能器的设计要点



198.1 kHz　123.4 kHz　66.8 kHz　47.1 kHz　25.2 kHz　20.5 kHz

一般来讲，随共振频率增加，换能器变小。

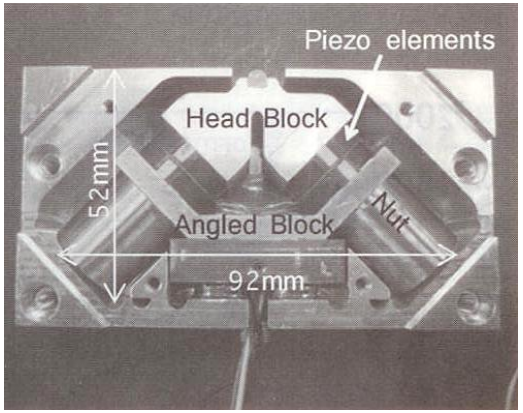
弯曲振动夹心式换能器



夹心式换能器的应用

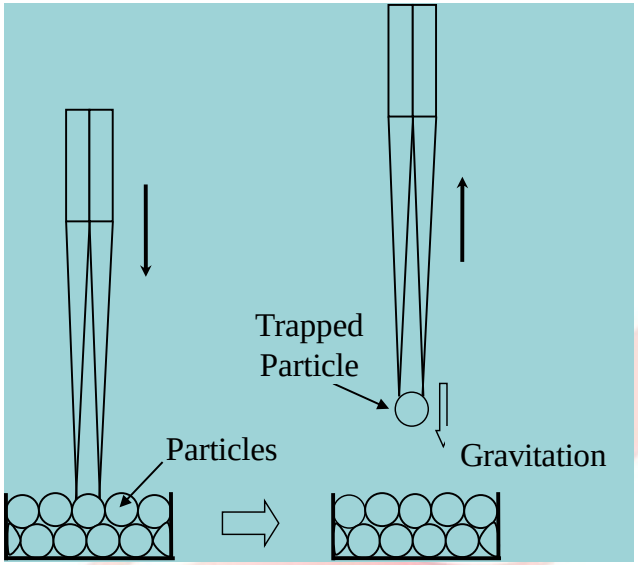
- 大力矩和大功率超声电机
- 高低温环境工作的超声电机

V型直线超声电机



- 声学钳等





Ⅰ 压电作动器的分类和功能

Ⅱ 压电作动器中的驱动力及其发生机理

Ⅲ 作动器中的压电换能单元

Ⅳ 压电作动器的工作原理、基本结构、设计要点、特性和应用

Ⅴ 压电作动器的发展趋势

IV 压电作动器的工作原理、基本结构、设计要点、特性和应用

超声电机

- 接触式
- 非接触式

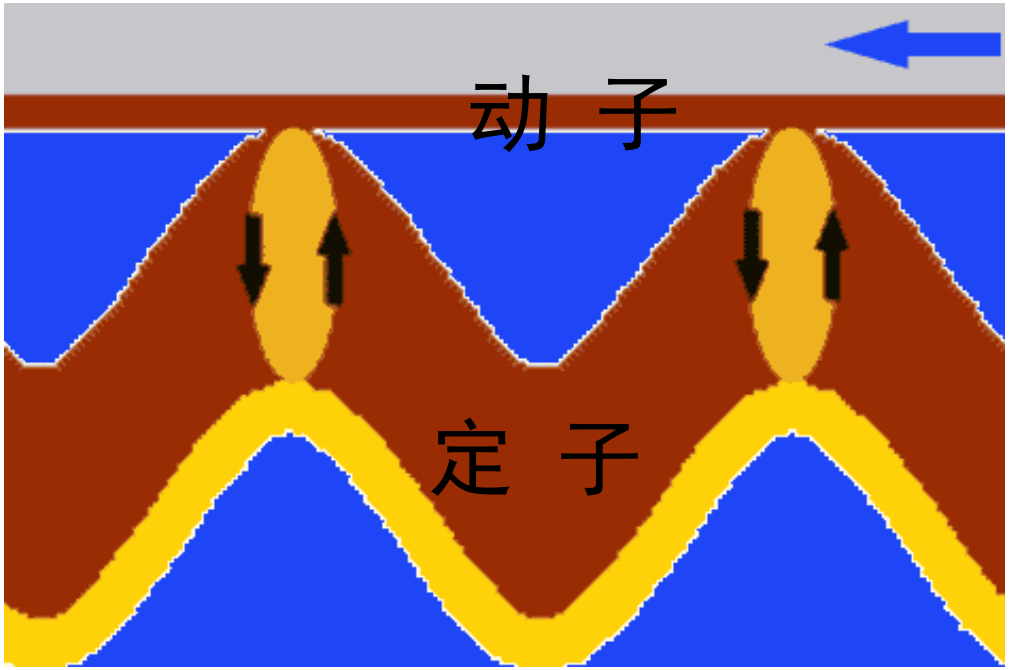
压电泵

操控器件

- 作动技术的多样性
- 微纳操控和微液滴操控

接触式超声电机的工作原理

椭圆驱动型



借助于定子的行波振动或特殊的励振方式

使得定子表面的驱动部做椭圆运动

再利用定转子间的摩擦，驱动转子或动子

应用最为广泛的一种驱动原理

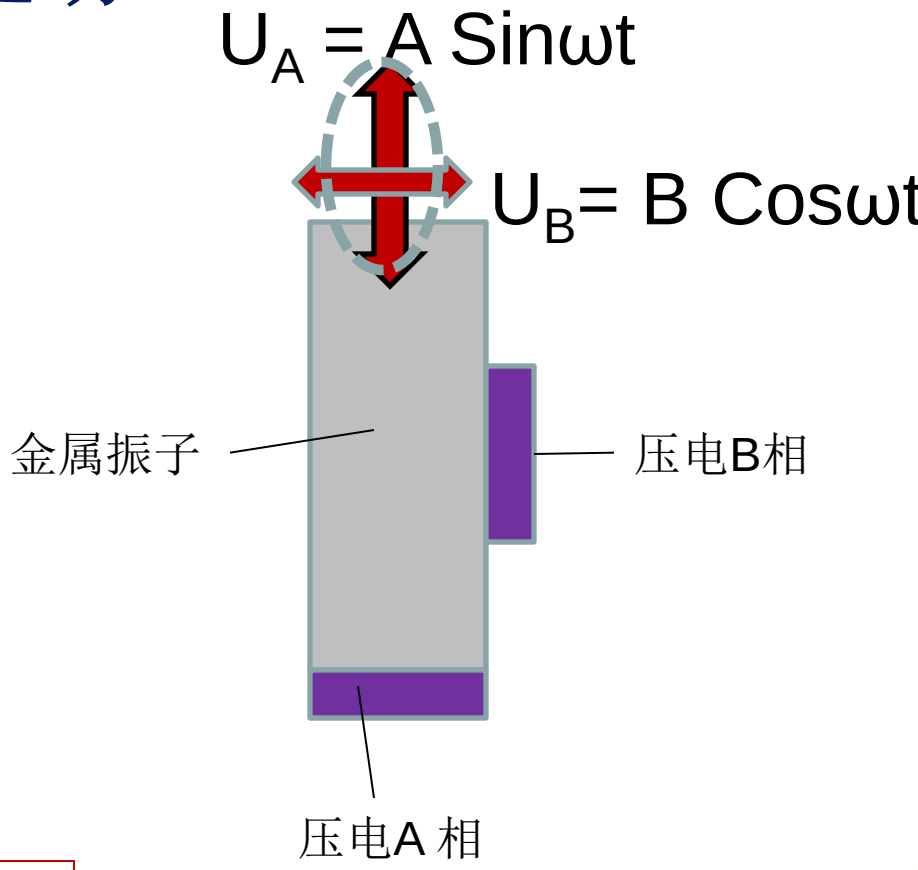
如何在驱动部产生椭圆运动？

方法I： 把时间相位相差90度、空间相位相差90度的两个驻波合成为行波。



如何在驱动部产生椭圆运动？

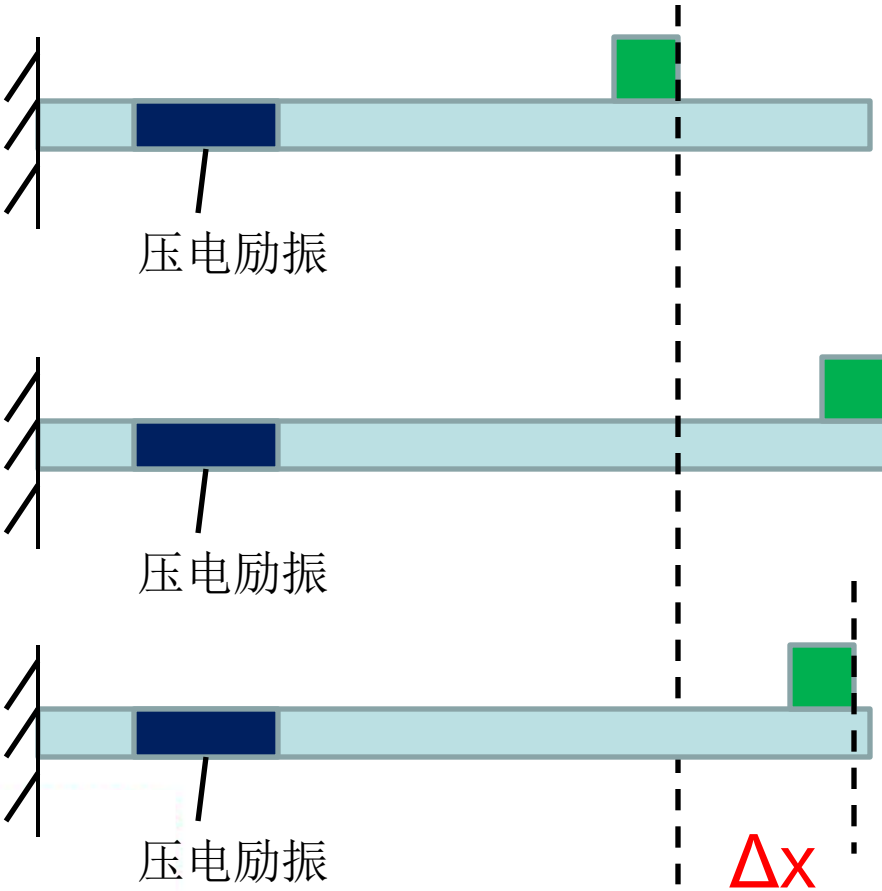
方法II： 激励时间相位相差90度、振动方向相互垂直的两个振动，并进行合成。

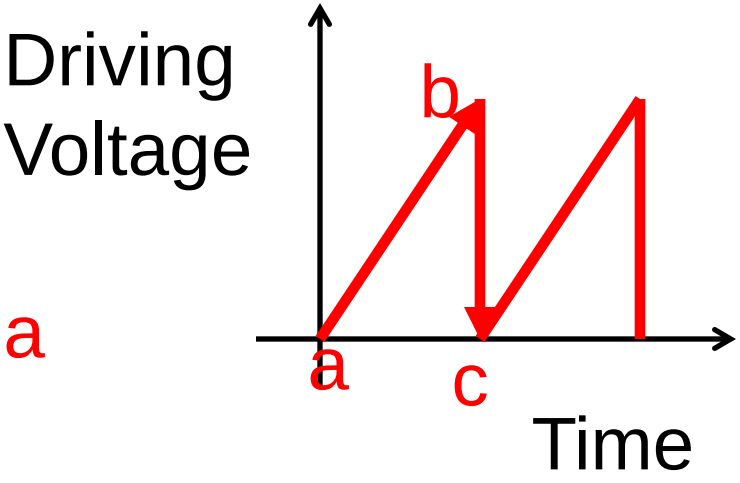


$$\left(\frac{U_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{U_B}{B}\right)^2 = 1$$

接触式超声电机的工作原理

惯性驱动型

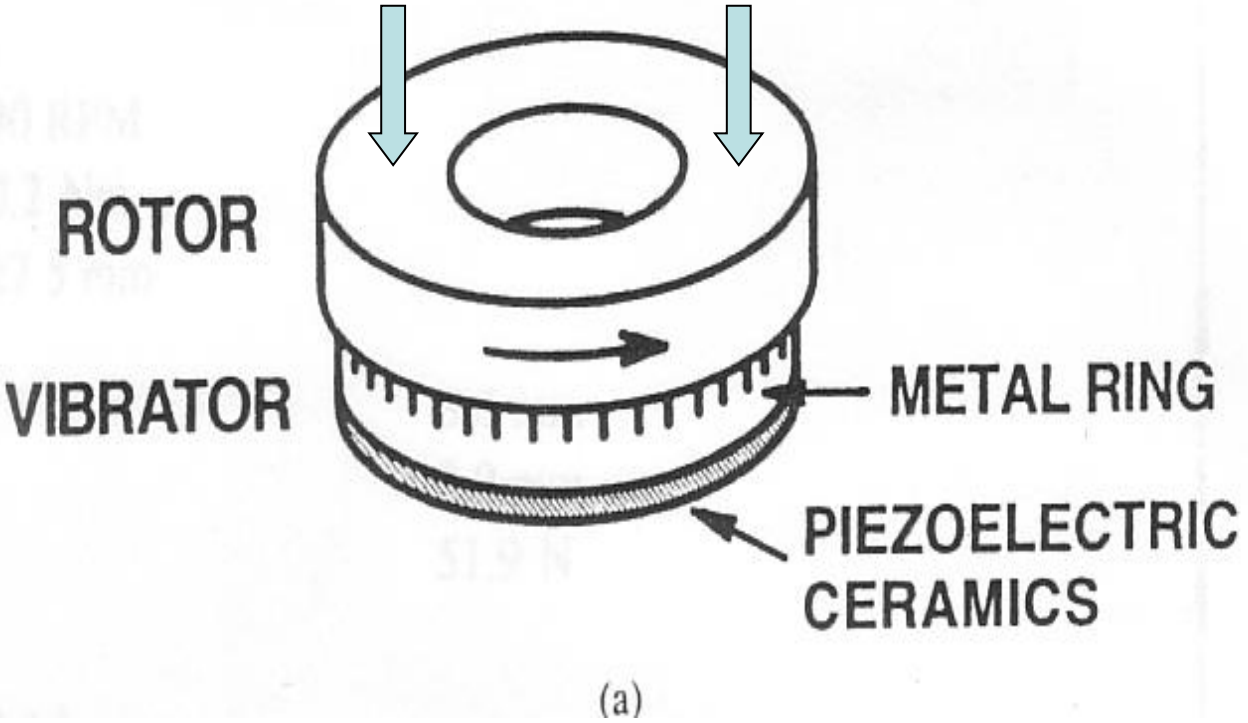




具有驱动精度高的优点

接触式超声电机的结构

行波型旋转超声电机



1. S. Ueha， et al. , *Ultrasonic Motors*. Oxford: Clarendon Press, 1993.
2. 赵淳生，超声电机技术与应用，科学出版社，**2007**

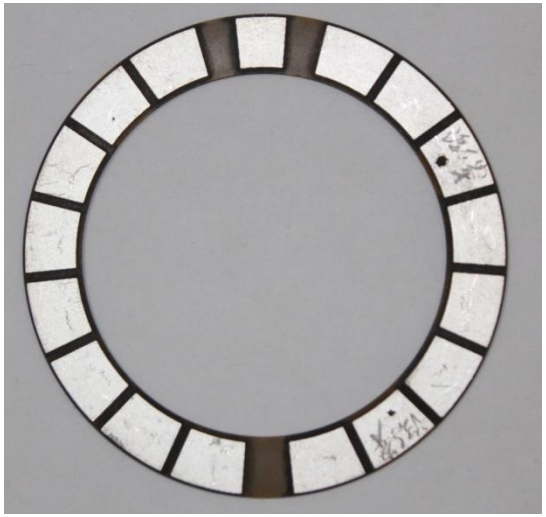
行波型旋转超声电机的结构



定子的正面



定子的背面



定子背面的压电片

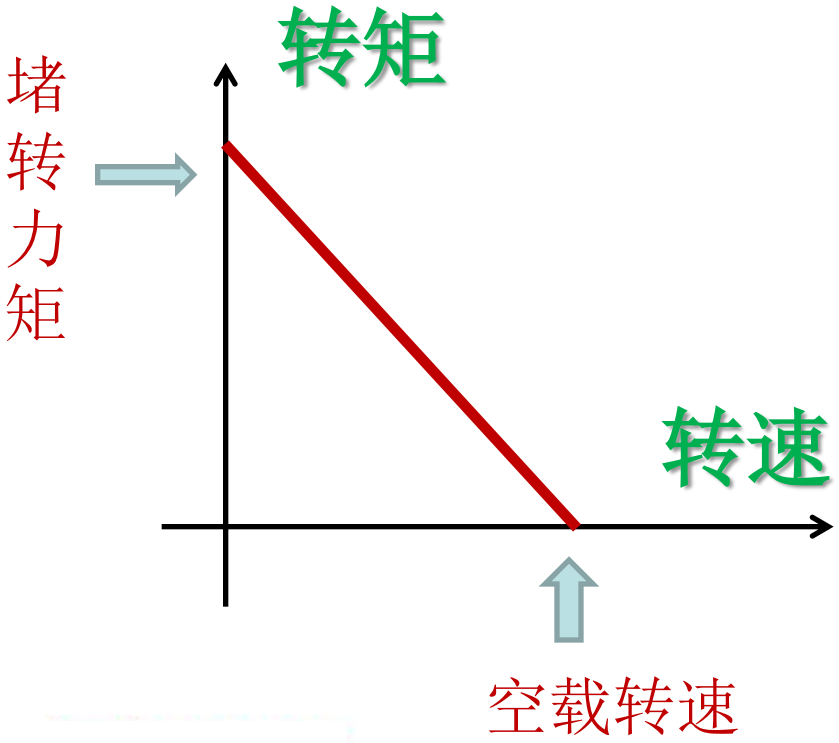
行波型旋转超声电机的结构



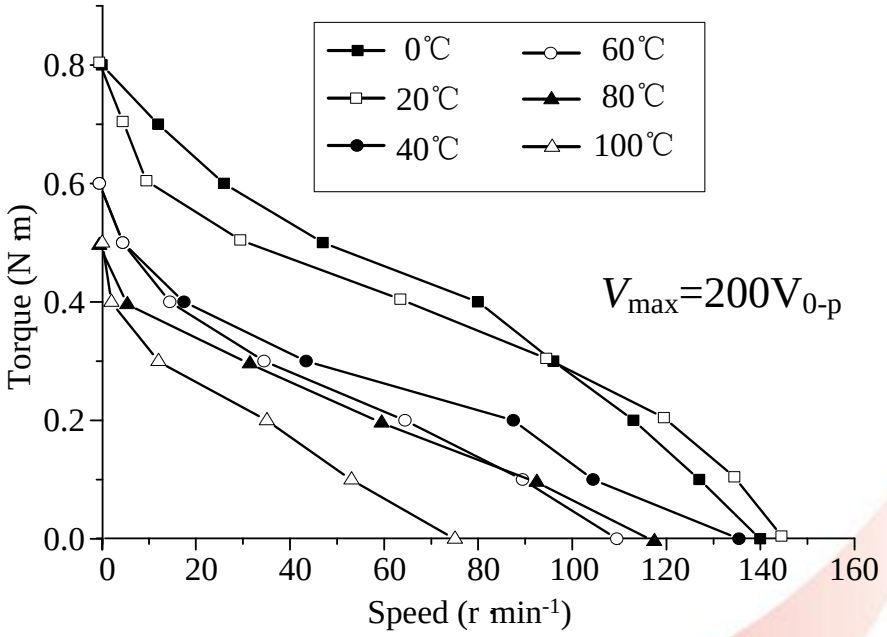
转子及其被驱动面

接触式超声电机的转矩-转速特性

理想特性

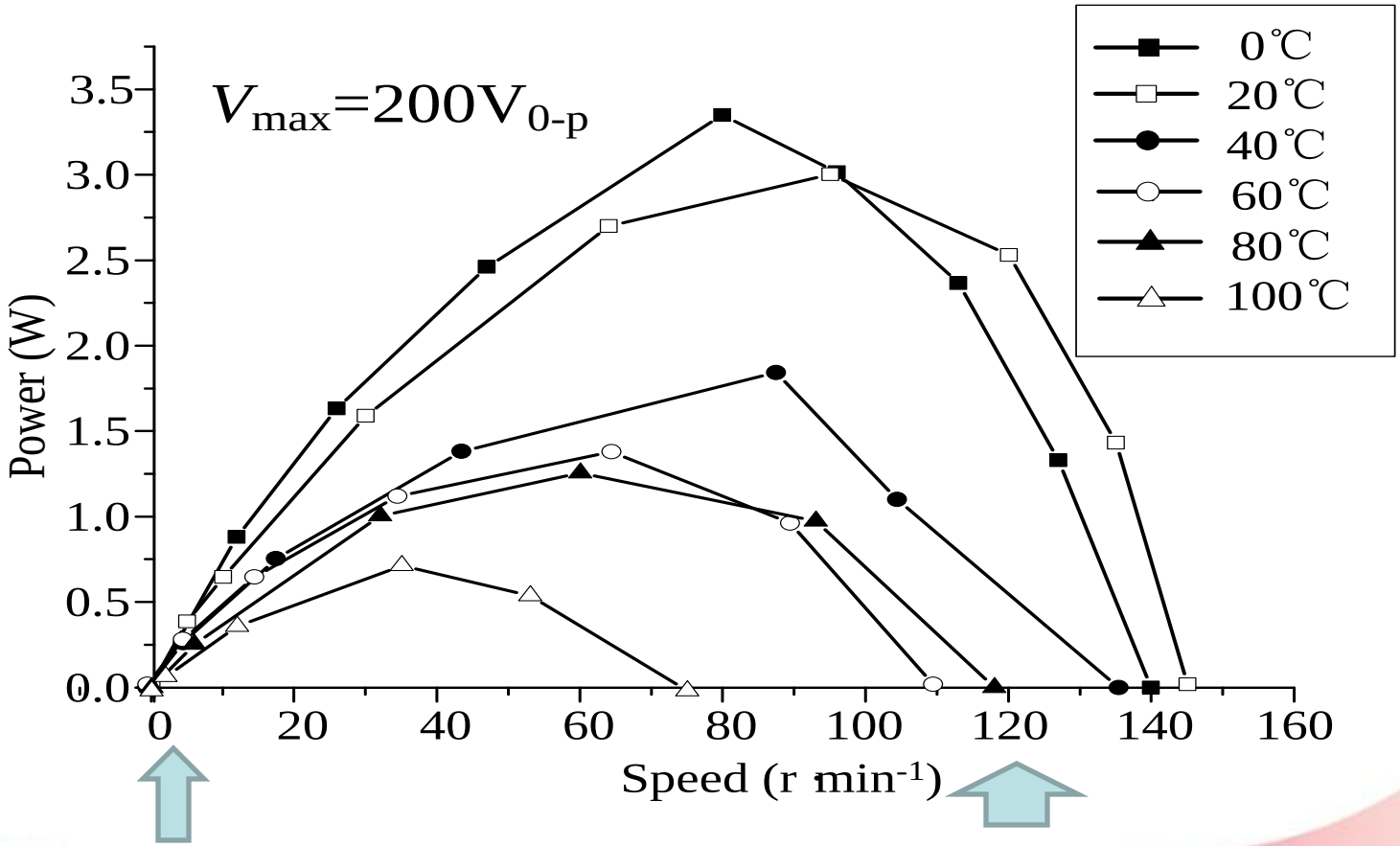


定子外径30mm的 行波型旋转超声电机 的特性



接触式超声电机的输出功率

定子外径30mm的 行波型旋转超声电机



堵转

空载

接触式超声电机的特点和已有的应用

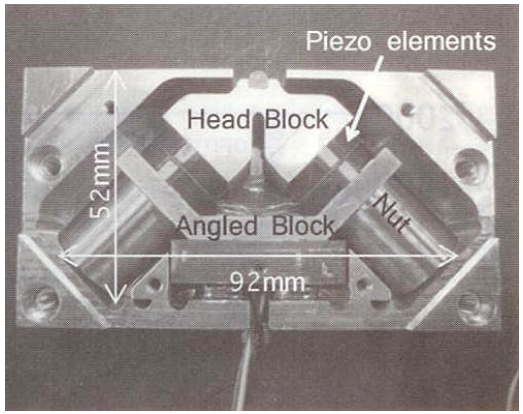
- 扭矩/ 重量比大（为电磁电机的 5-10 倍）；
- 低速大扭矩、不需减速齿轮箱；
- 精度高、反应快等



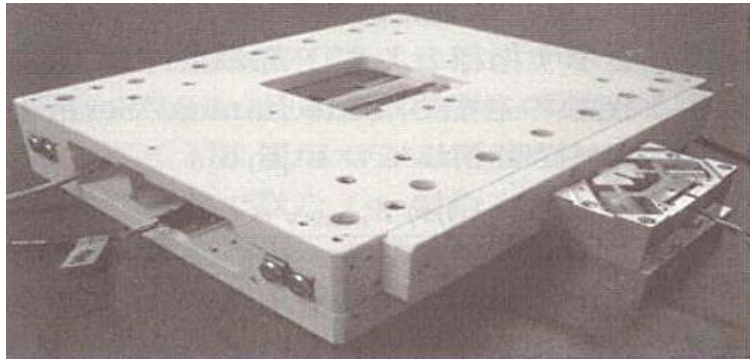
- 照相机聚焦系统
- 航空航天、武器系统
- 手表、窗帘、复印机
- 机器人等

接触式超声电机的最新应用例

V型直线超声电机



单轴纳米步进平台



最高速度： 1 m/s； 推力：40 N； 分辨率： 1 nm；
负载重量：10 kg； 行程：20 mm（±1nm）

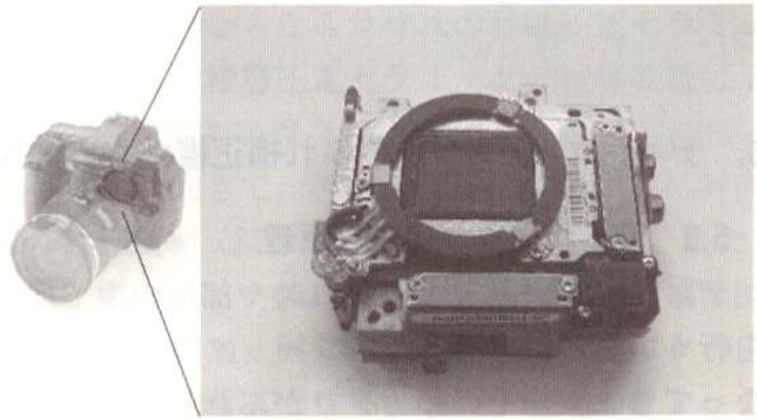
微电子：提升集成电路光刻技术的精度；
光电子：光纤对接；
生物医学：细胞操控

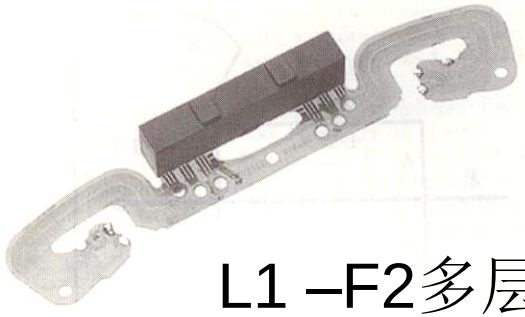
49

接触式超声电机的最新应用例

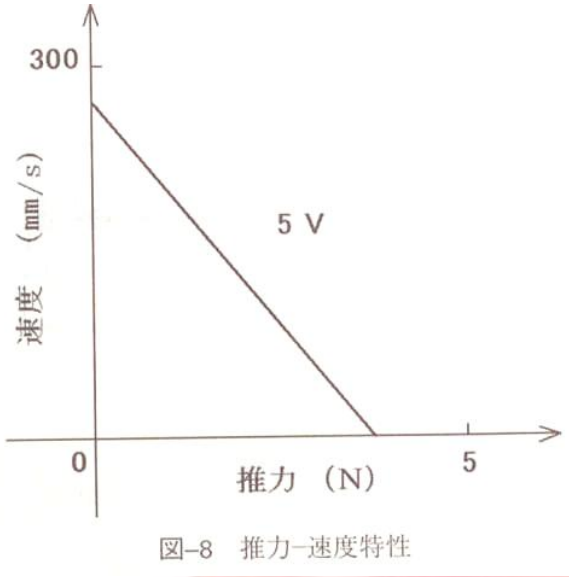
图像稳定单元

OLYMPUS
CORPORATION





L1 –F2多层压电直线马达



図–8 推力–速度特性

接触式超声电机的最新应用例



直径0.68 m

大型天文望远镜系统

超声电机用于天文望镜（日本）

转速(空载)
1.3 rad/s(0.88m/s)

堵转力矩
8.3 Nm

接触式超声电机的设计

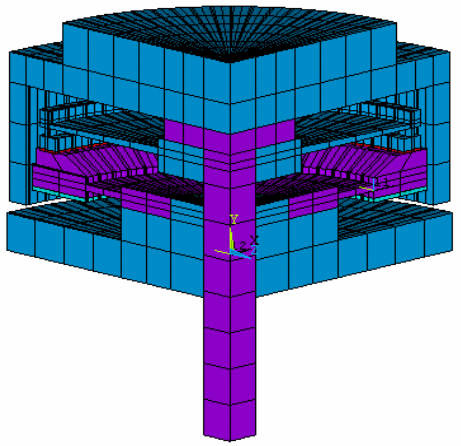
根据使用要求，确定
励振方式和结构

参照现有电机的性能，
提出电机的初步尺寸

利用有限元计算，确认
振动模态并调整尺寸

样机制作、性能测试

设计方法：
实验和理论计算相结合。



IV 压电作动器的工作原理、基本结构、设计要点、特性和应用

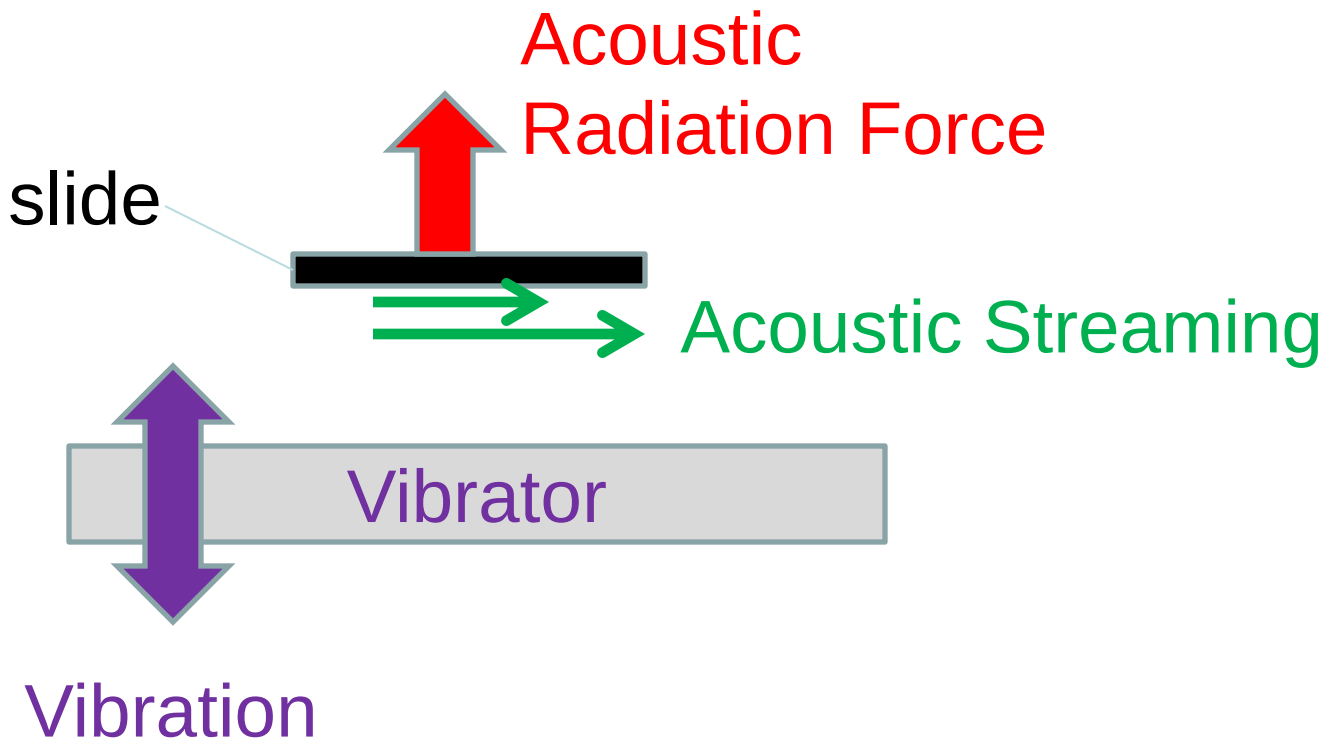
超声电机

- 接触式
- 非接触式

压电泵

操控器件

非接触式超声电机的工作原理

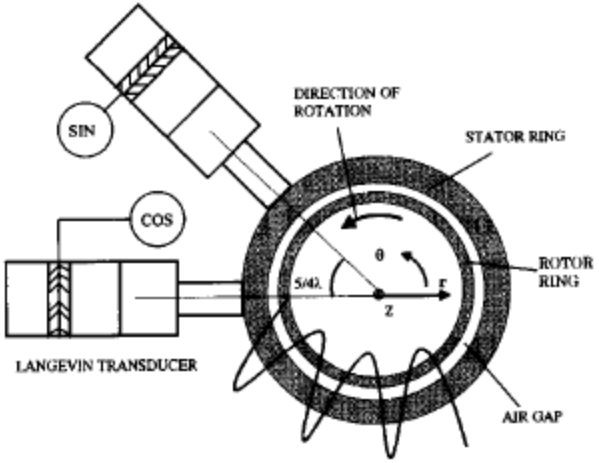


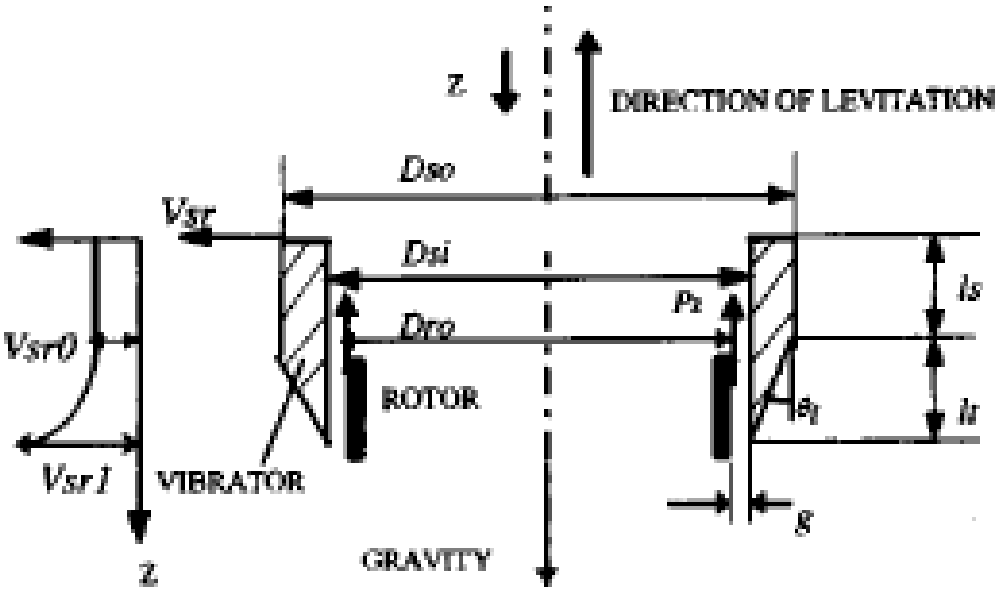
利用声辐射力或声粘性力悬浮物体，同时利用声学流或声粘性力驱动该物体。

非接触式超声电机的结构分类及驱动原理

旋转型

- 定转子之间有一行波声场；
- 转子被声粘性力悬浮；
- 转子被声粘性力驱动。



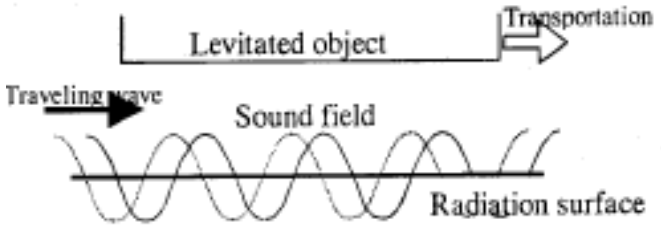


J. Hu, et al., *Electronics and Communications in Japan (Part III)*, Vol. 82, Issue 4, pp. 56-63, 1999, John Wiley & Sons, Inc. USA.

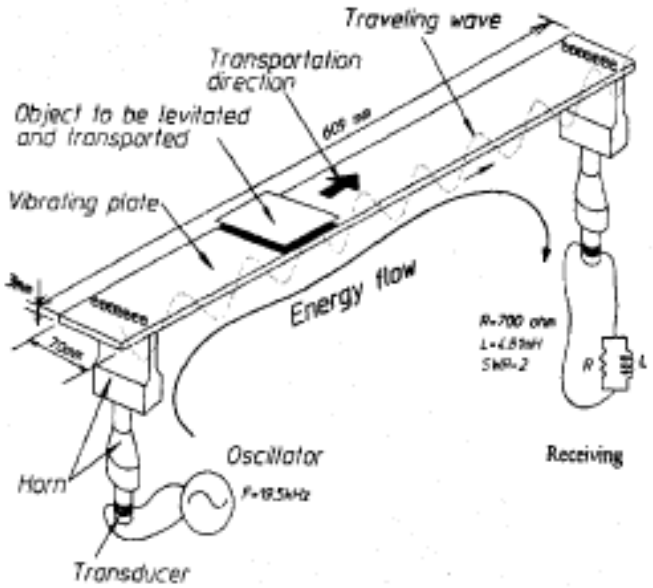
非接触式超声电机的结构分类及驱动原理

直线型

- 定子做弯曲行波振动；
- 动子处于悬浮状态；
- 动子被定动子之间的行波声场所引发的声学流所驱动



(a)

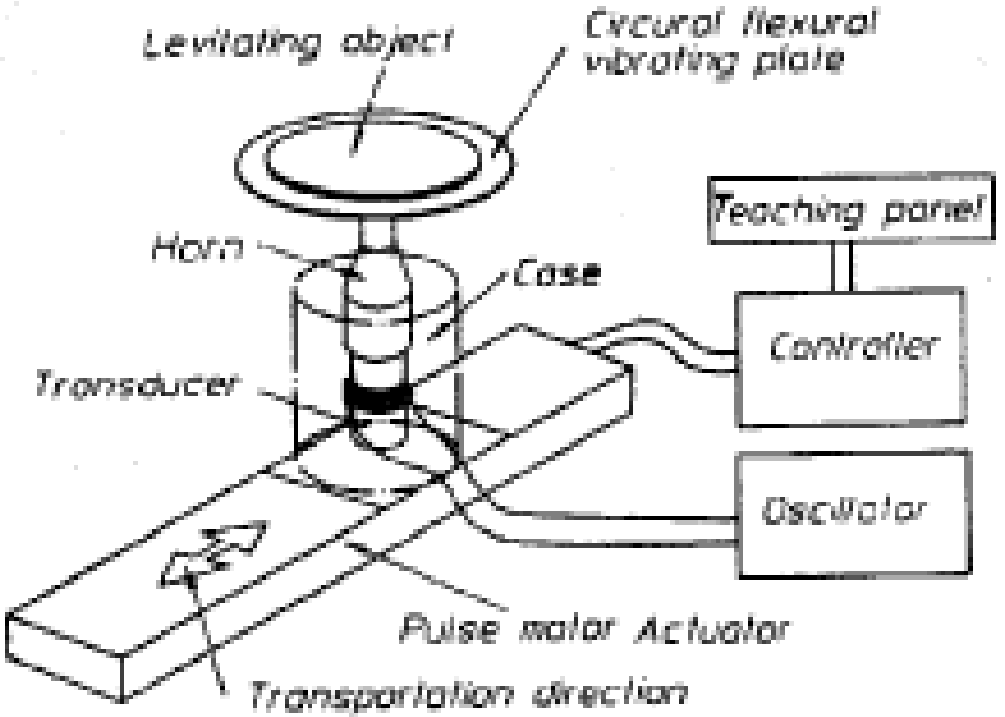


(b)

非接触式超声电机的结构分类及驱动原理

直线型

- 圆盘状物体被驻波声场所悬浮；
- 声悬浮系统安装在导轨上，被直线电机驱动。

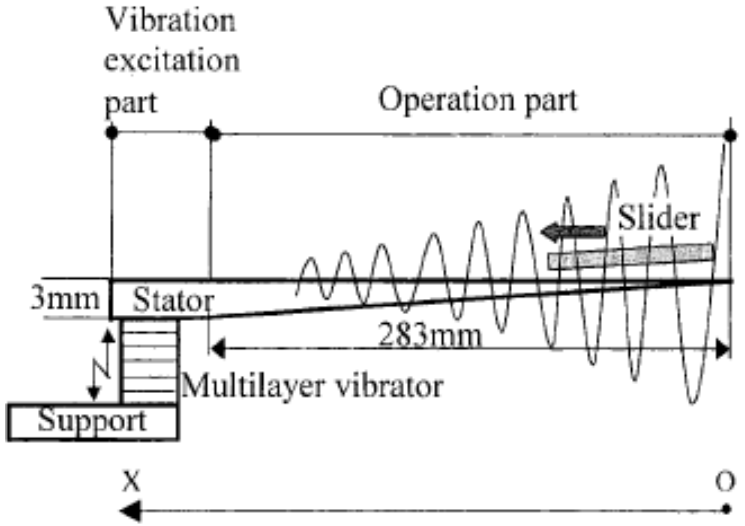


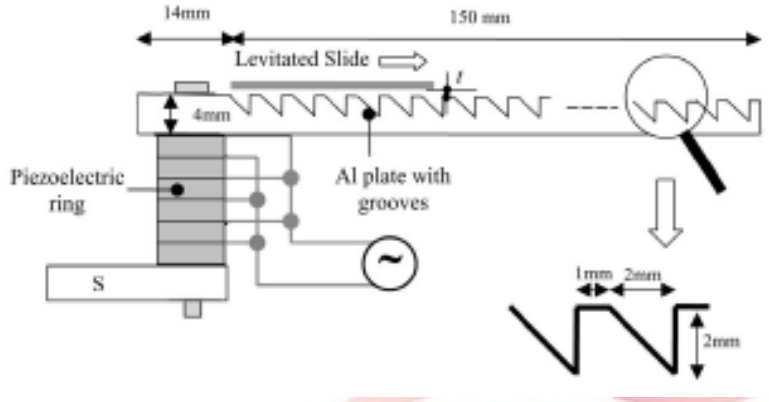
J. Hu, et al., *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control,* Vol. 50, No.2, pp.117-127, 2003.

非接触式超声电机的结构分类及驱动原理

直线型

利用振幅不均匀的驻波





(1) J. Hu*, et al., *IEEE TUFFC*, vol. 51, no.10, pp.1206-1208, 2004.

(2) J. Hu*, et al., *IEEE TUFFC,* Vol. 48, No. 3, pp.699-708, 2001.

IV 压电作动器的工作原理、基本结构、设计要点、特性和应用

超声电机

压电泵

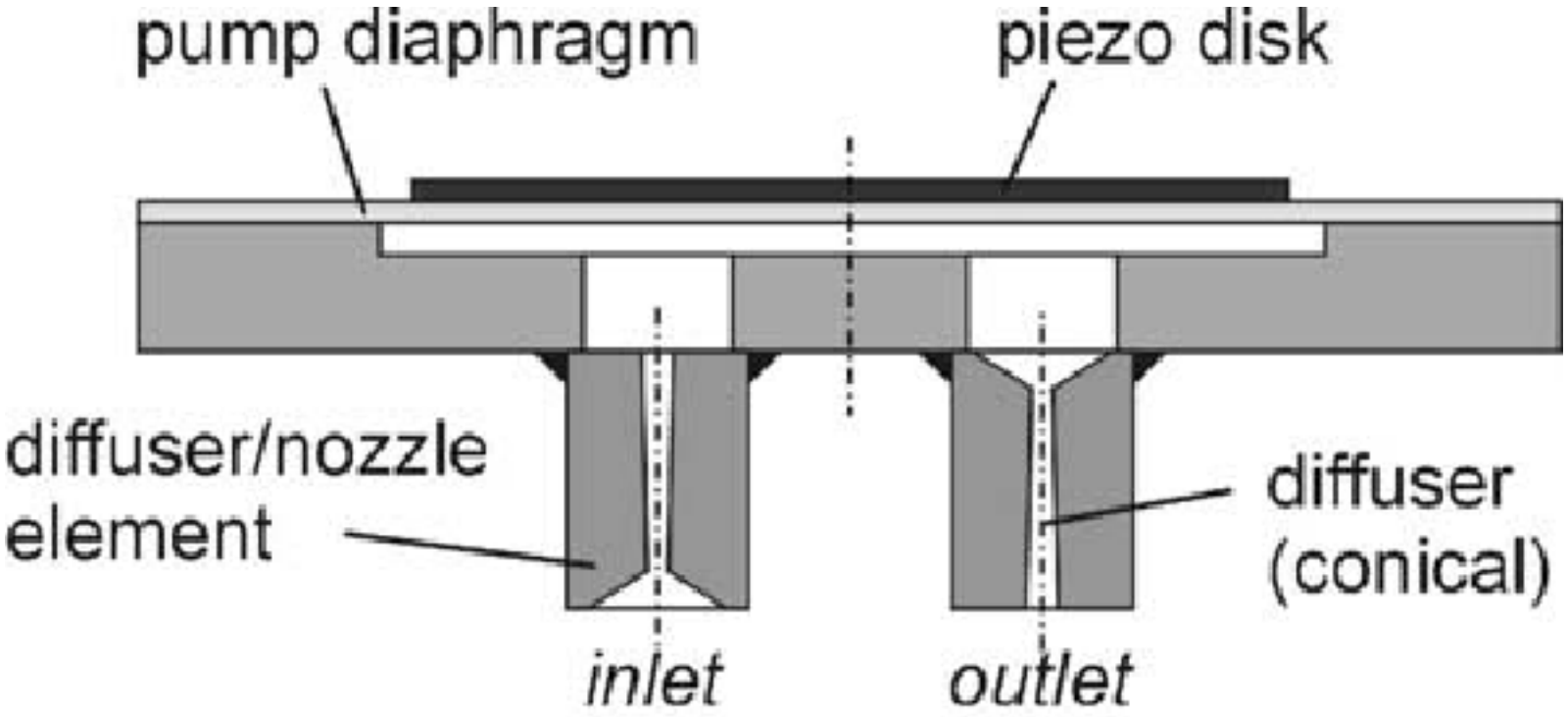
- 压电液体泵
- 压电颗粒泵

超声操控器件

压电泵

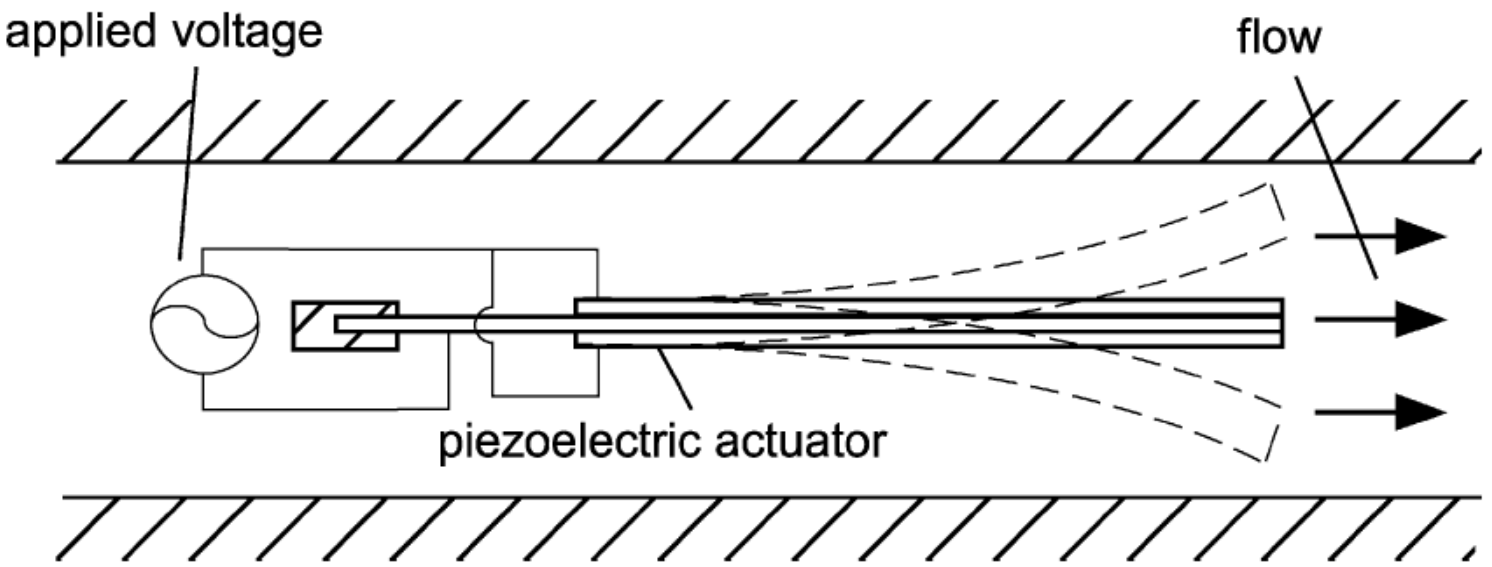
利用压电振动产生的泵腔体内的静压力的变化，对流体和固体颗粒进行受控驱动的器件。

压电无伐泵



Stemme E, Stemme G. A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump. Sensors and Actuators A,1993, 39: 159-167.

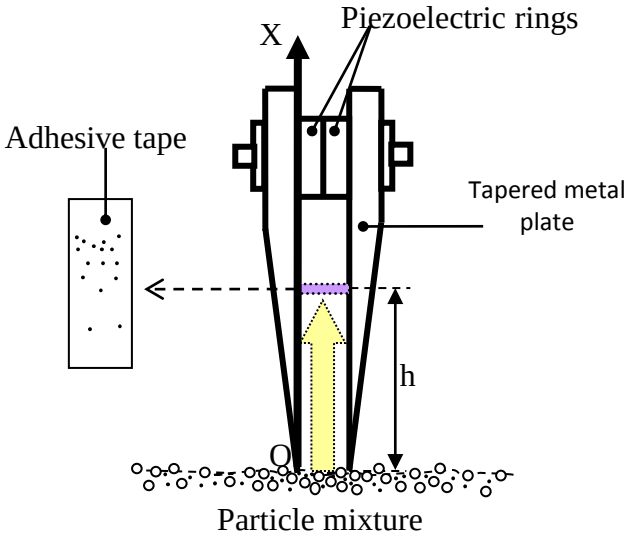
压电仿生泵



Cícero R. de Lima, et al. A biomimetic piezoelectric pump: Computational and experimental characterization. Sensors and Actuators A, 2009, 152: 110-118.

压电颗粒泵





J. Hu, *Ultrasonics*, 45, pp. 15-21, Dec. 2006.

IV 压电作动器的工作原理、基本结构、设计要点、特性和应用

超声电机

压电泵

超声操控器件

- 作动技术的多样性
- 微纳操控和微液滴操控

作动技术的多样性

超声电机和其它电机的共同点：
驱动动子做直线或旋转运动

实际应用中，还要求
（1）对固体和软物质进行捕捉、移动、释放、分离、拉伸、旋转和去除；
（2）实现液滴的发生、输送、驱动、分裂和合并等过程；
（3）对悬浊液浓度的空间分布进行控制。

作动技术的多样性

传统技术

马达 + 机械变换机构



部分满足作动功能的多样性



能否用作动器直接实现上述作动功能、使得作动系统更加有效、方便使用和可靠？

作动技术的多样性

利用激光、超声、磁力、静电力、微流体、**MEMS/NEMS**等对物体进行直接操控的技术。

IV 压电作动器的工作原理、基本结构、设计要点、特性和应用

超声电机

压电泵

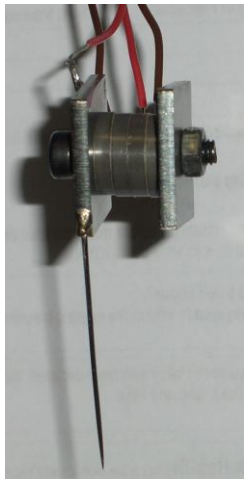
超声操控器件

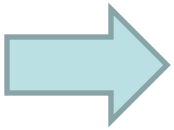
- 作动技术的多样性
- 微纳操控和微纳液滴操控



优点：对样品的选择性小；对样品的热损害小；器件重量轻、易操作并容易移动。

声辐射点捕捉微颗粒的例子







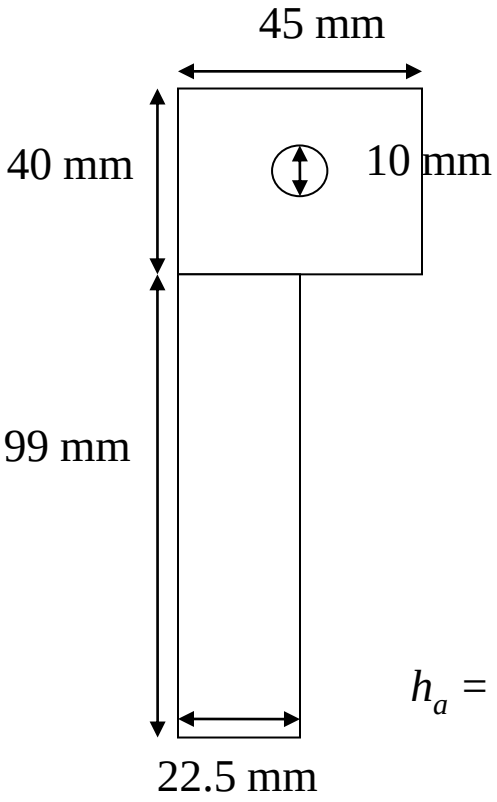


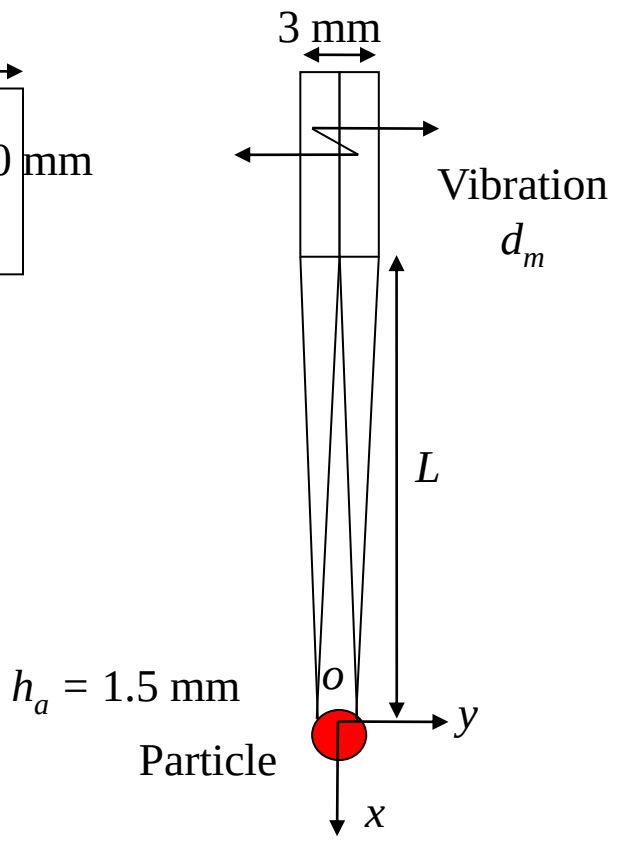
(1) J. Hu, et.al. *Applied Physics Letters,* vol. 87, No. 9, 094104, 2005.
(2) J. Hu, *Sensors and actuators: A Physical*，vol. 138, pp.187-193, April 2007.

超声辐射线捕捉微颗粒的例子

W状超声作动器

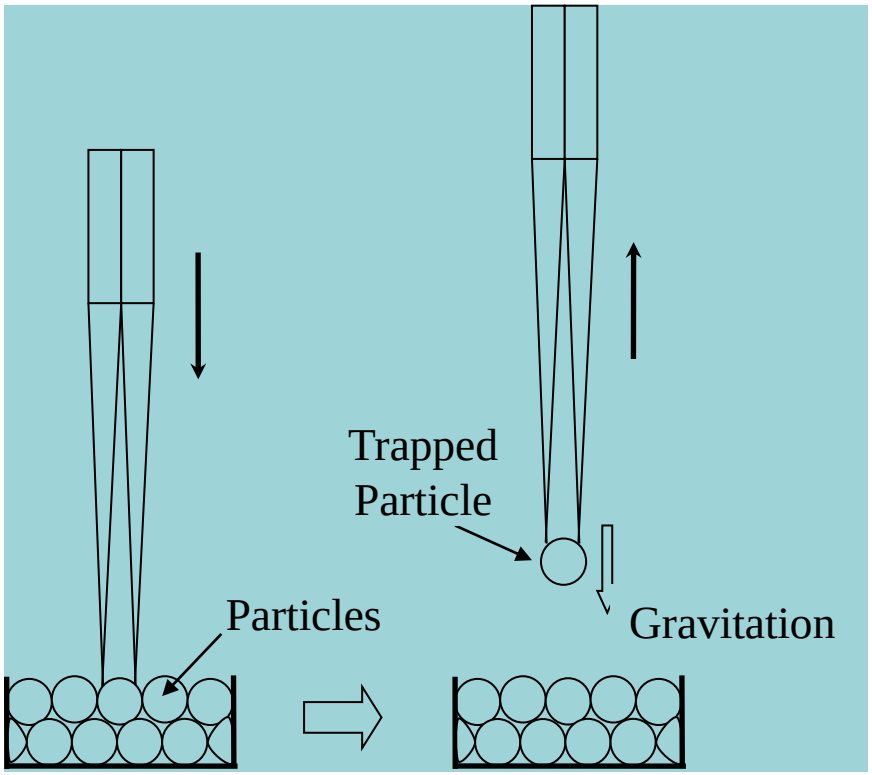






(a) (b) (c)

超声辐射线捕捉微颗粒的例子



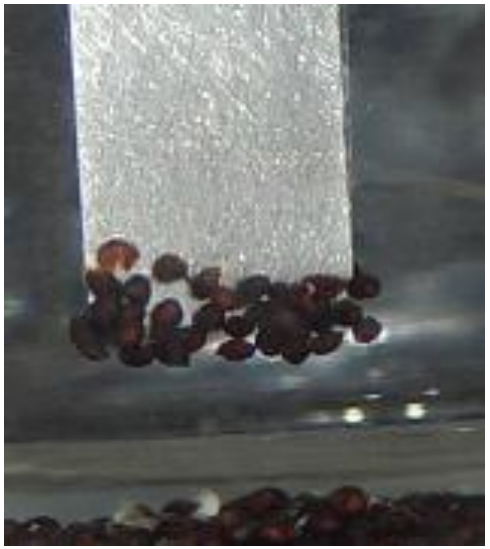




利用声辐射压进行捕捉

（1）Y. Liu, J. Hu, *Journal of Applied Physics*, vol. 106, 034903, 2009.
（2）J. Hu, et al., *Applied Physics Letters*, vol. 85, No. 24, pp.6042-6044, 2004.

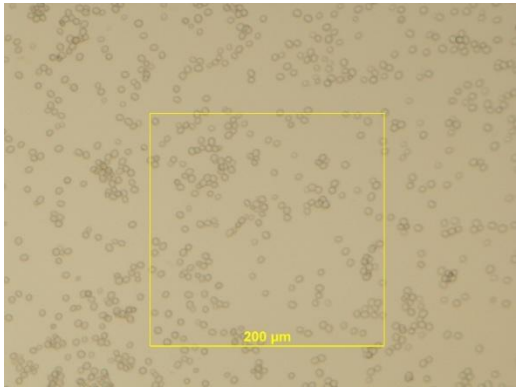
超声辐射面捕捉微颗粒的例子

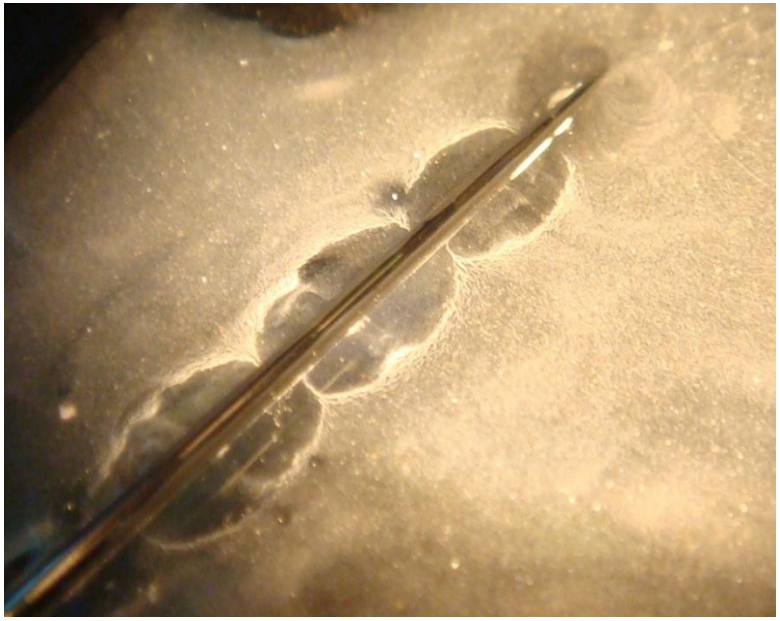




Junhui Hu*, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 53, no. 3, pp.571-578, 2006.

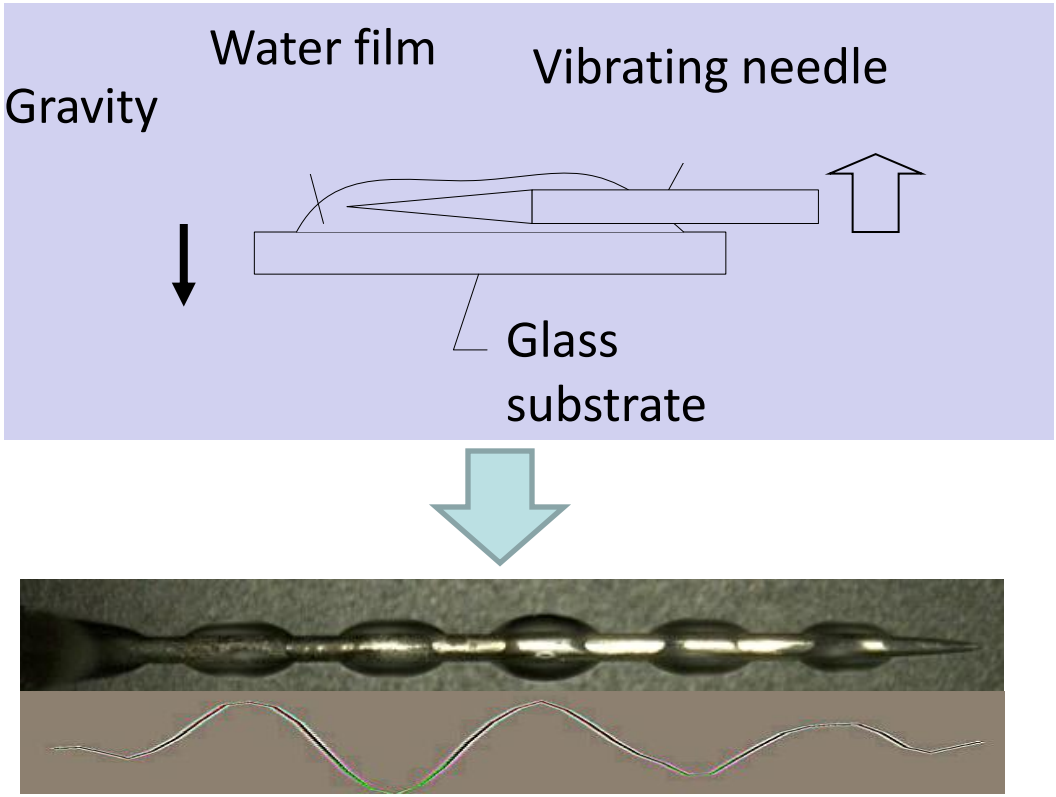
微颗粒浓度分布的超声控制





Junhui Hu, et al. *Sensors and actuators A:Physical,*vol. 167, pp.77-83, Feb. 2011.

微液滴的超声吸附和抽取（无腔体）

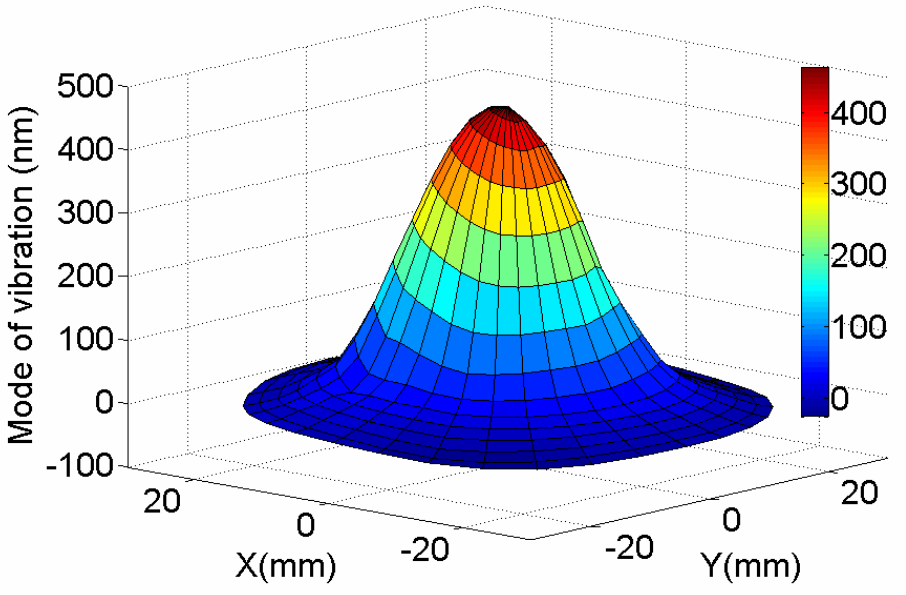


Junhui Hu, et al., *Journal of Applied Physics*, vol. 110, 054901, Sept. 2011.

超声台在纳米操控中的应用

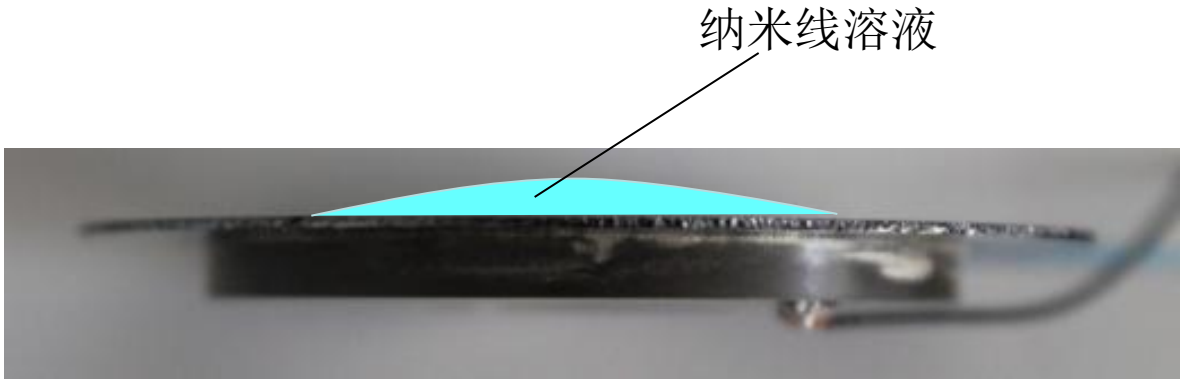




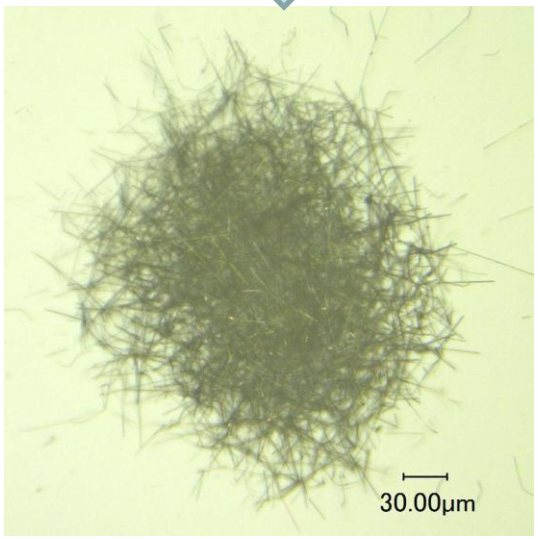


Yujie Zhou, Huaqing Li, and Junhui Hu*, *Review of Scientific Instruments* 83, 045004, 2012.

超声台在纳米操控中的应用

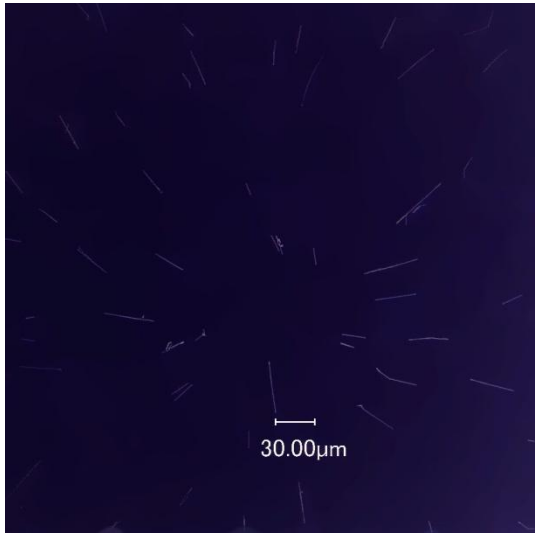


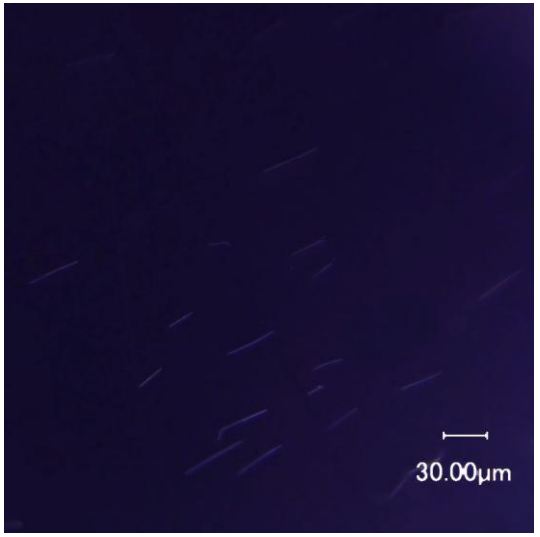
声学流把AgNWs带向超声台的中央



在超声台的中央形成纳米线的斑点

超声台在纳米操控中的应用





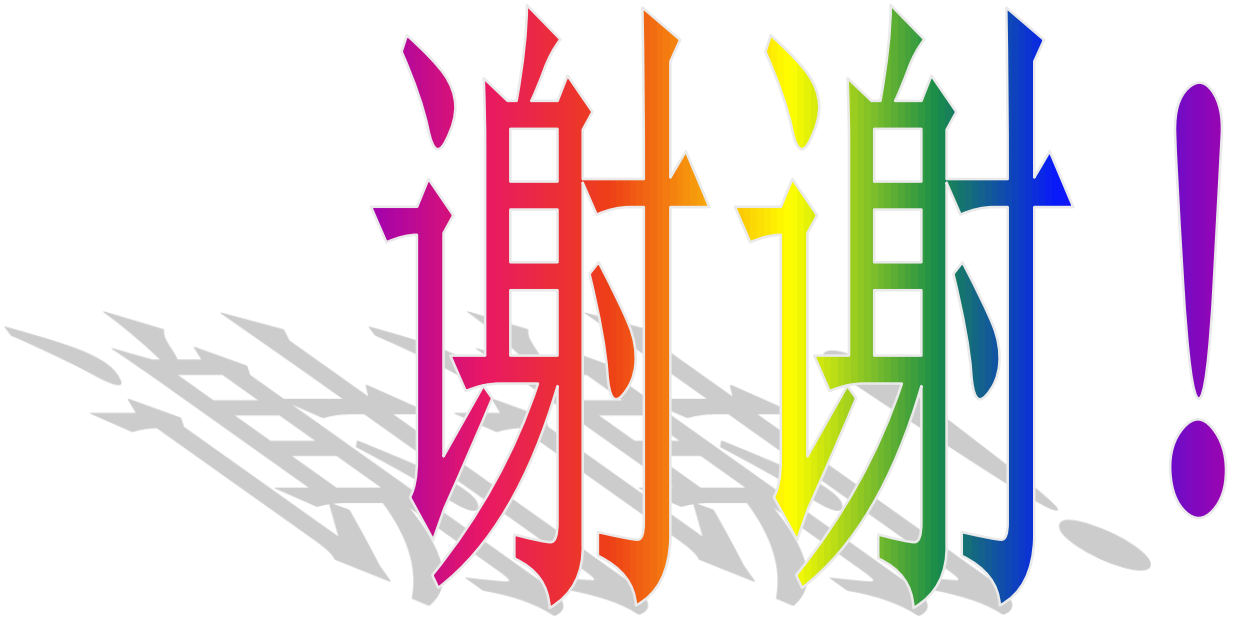
纳米线被排列在指向超声台中央的方向

能否用超声操控单个的纳米物体？

V 压电作动器的发展趋势

微纳制造、生物技术和环保技术的发展 → 功能多样化 → 微纳尺度的固体物质进行捕捉、移动、微驱动、分离、聚集和去除等；微纳流体的…

生物技术、航空航天、新能源技术的发展 → 高性能化 → 高效；
高环境适应性；
高驱动精度；
结构紧凑；
性能可靠等


谢谢！