



2.12 超声波传感器

定义

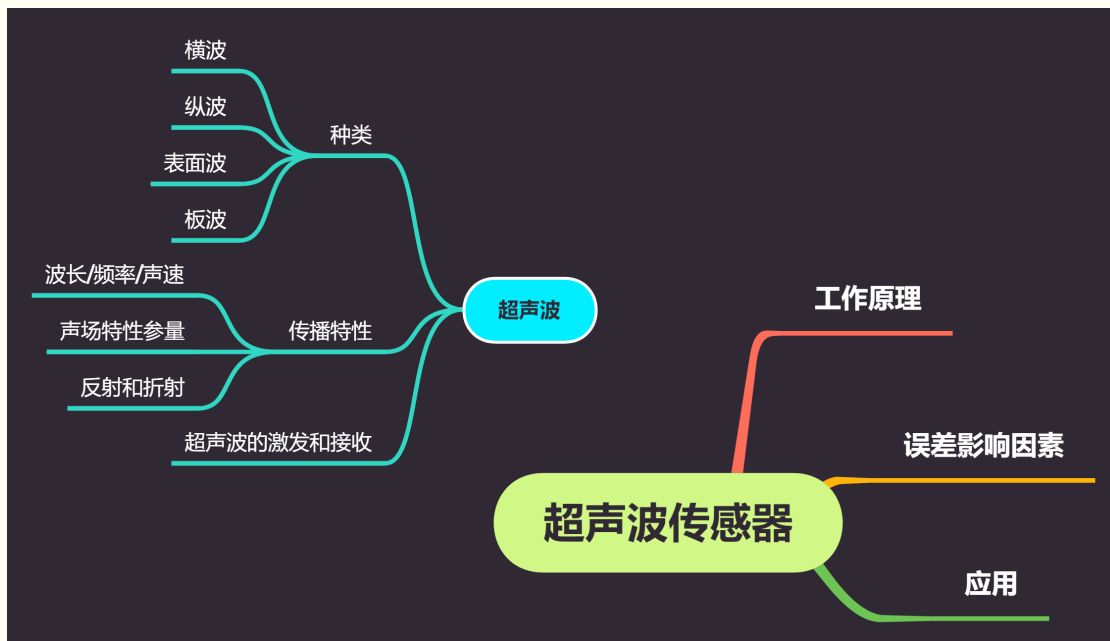
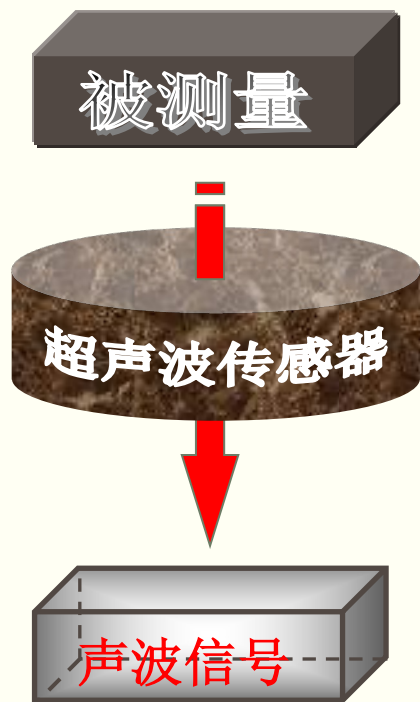
通过超声波信号的变化来实现物理量测量的传感器

距离

流量

液位

厚度



1、声波的产生与分类

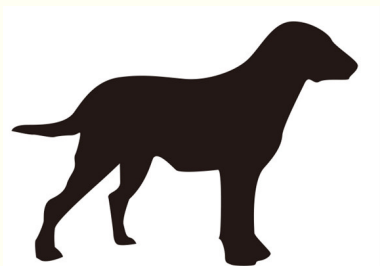
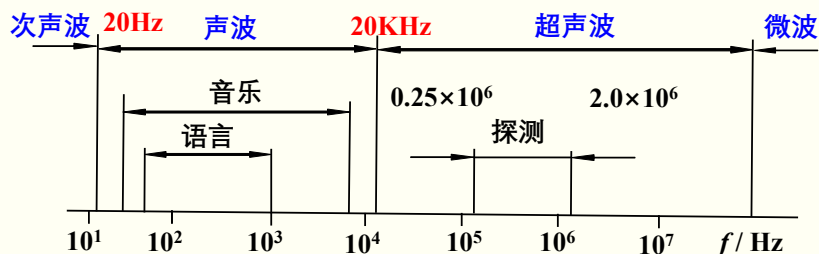
- 从本质上来讲，声波的产生就是源于物体的振动，而声波的传播则是介质中质点的振动传递过程。
- 声波必须通过中间介质（固体、液体和气体）才能传播，例如，在空气中我们可以听到声音，而在真空中却听不到

□ 分类方法

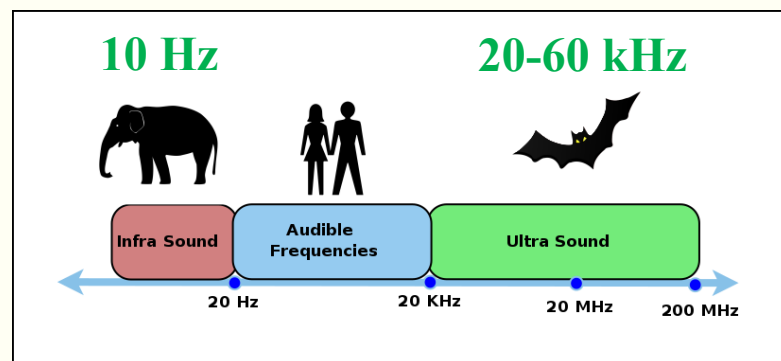
- 频率不同
- 波阵面形状不同
- 质点振动方向与声波传播方向的关

(1) 声波频率

- 可听声波：人耳可听到声音的频率范围，**20 Hz ~ 20 kHz**
- 次声波：频率**低于20 Hz**
- 超声波：频率**高于20 kHz**



能听到45 kHz
的声波



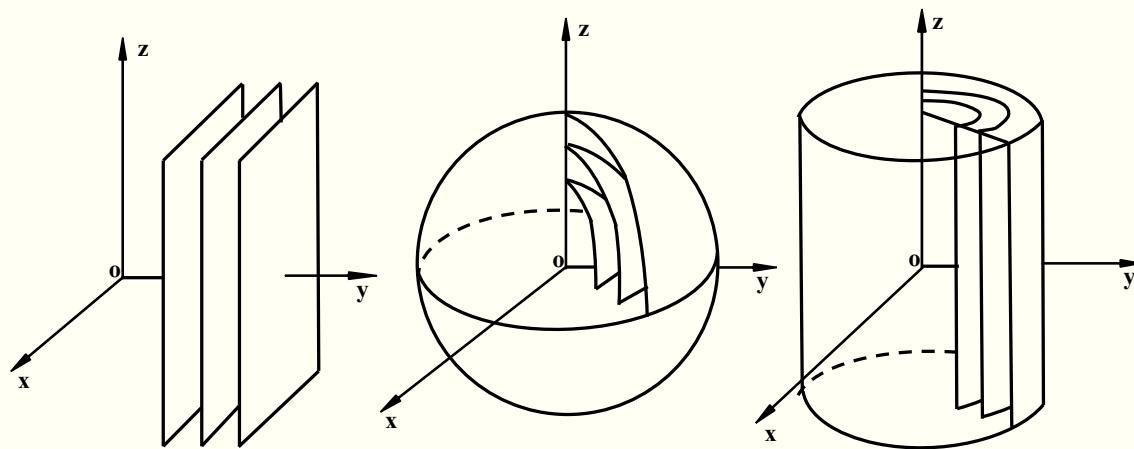
300 kHz

(2) 波阵面形状

平面波：波阵面与传播方向垂直且为互相平行的平面声波

球面波：波阵面为同心球面的声波

柱面波：波阵面为同轴圆柱面的声波



平面波

球面波

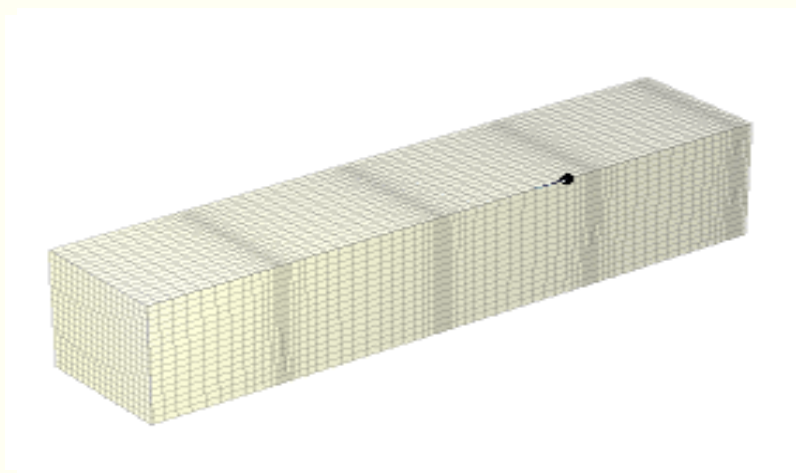
柱面波

(3) 质点振动方向与波传播方向的关系

- 纵波，L波**
- 横波，S波**
- 表面波，Rayleigh波**
- 板波，Lamb波**

① 纵波，简称L波

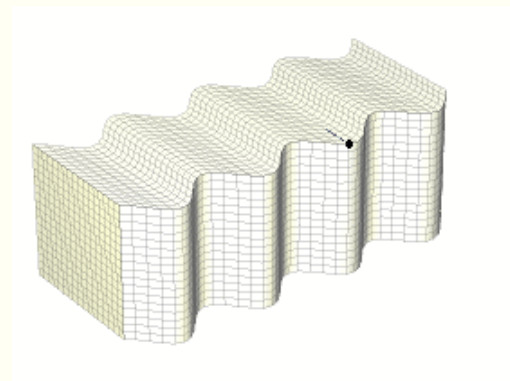
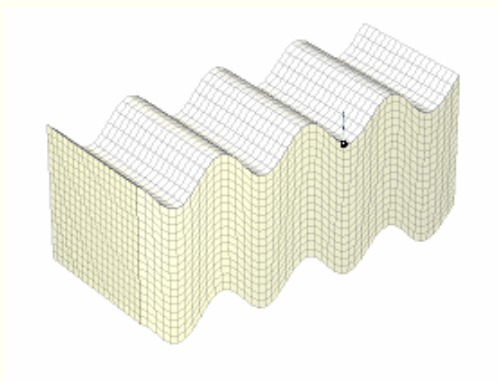
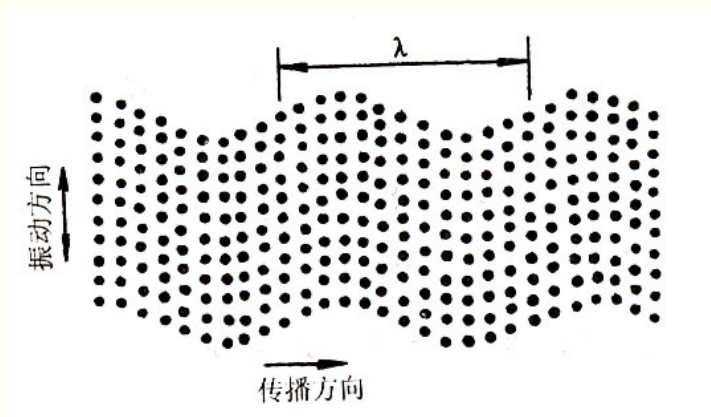
- 质点振动方向与波传播方向**一致或平行**
- 其传播是由于介质中各体元发生压缩和拉伸的变形，并产生使体元回复原状的纵向弹性力而实现的
- 在介质中传播时会产生质点稠密和稀疏部分，也称为**疏密波**



- 可在固体、液体和气体中传播
- 容易激发和接收，在参数检测中有广泛的应用

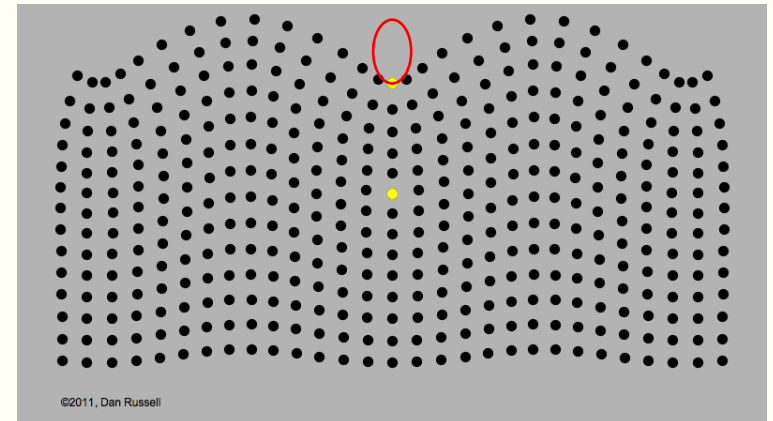
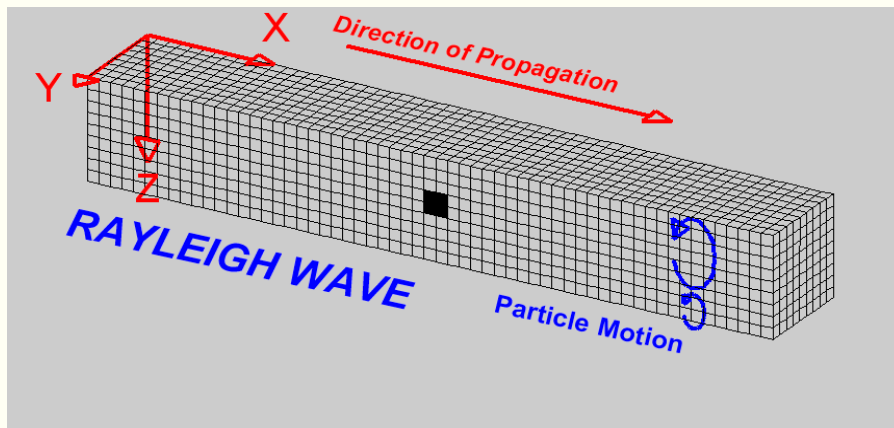
② 横波，简称S波

- 质点的振动方向与波的传播方向是**垂直**的
- 质点上下振动是可以产生横波，称为垂直偏振横波（SV波）
- 水平振动时同样可以产生横波，称为水平偏振横波（SH波）
- 横波**不能**在液体或气体介质中传播。



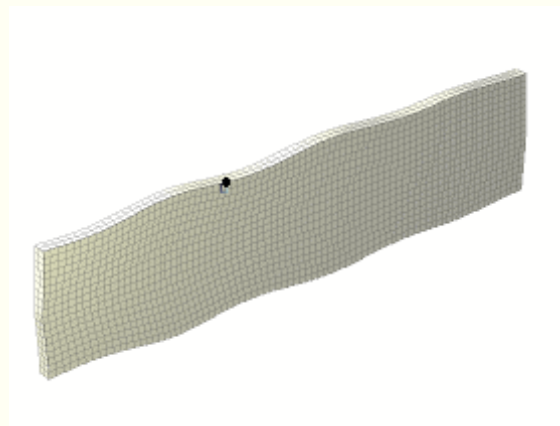
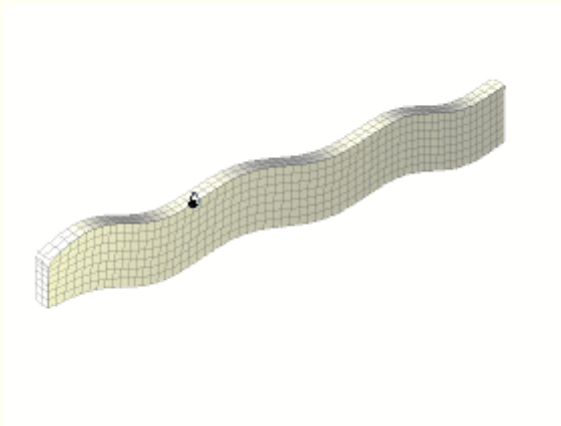
③ 表面波，瑞利波（Rayleigh波）

- 在半无限大固体介质与气体介质的交界面产生的波
- 运动轨迹为椭圆形，可视为纵波和横波的合成
- 表面波**不能**在液体或者气体介质中传播
- 表面波常用于材料表面缺陷的检测



④ 板波，兰姆波（Lamb波）

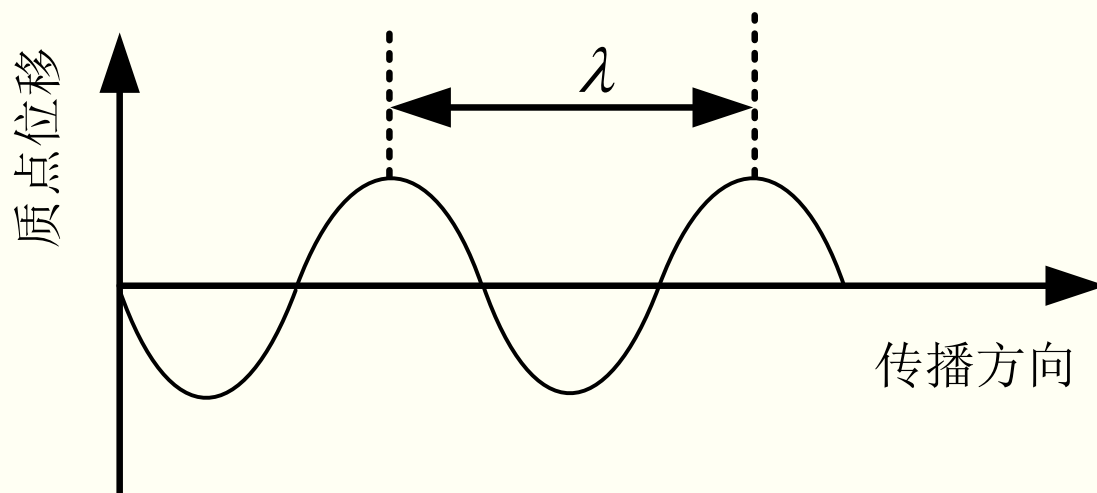
- 在板厚与波长相当的薄板中传播的波
- 兰姆波是板波中最重要的一种波
- 可看成是两个Rayleigh波在板的上下表面上相互作用的结果
- 可用于检测板厚、分层和裂纹等缺陷



2、声波的传播特性

(1) 波长、频率和声速

波长：在声波的传播方向上，相邻两个振动相位相同的点之间的距离称为波长



声波的传播特性

速度:

$$C = f \cdot \lambda$$

➤ 主要取决于材料特性：弹性系数、介质的密度以及声阻抗

➤ 对于气体介质

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

γ 为气体的定压比热与定容比热之比；
 R 为理想气体常数； T 为绝对温度； M
为气体的摩尔质量。

➤ 对空气，声波的传播速度约为344 m/s； T 越高， c 越大

➤ 对于固体和液体介质

$$c_s = M \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

E 介质的杨氏弹性模量；
 M 与波型有关的常数

$$c_l = \sqrt{\frac{1}{\rho k_j}}$$

ρ 是液体的密度；
 k_j 是绝热压缩系数

声波的传播特性

(2) 声场参量

- 声波在介质中传播就会引起内部压强的变化，形成**声场**
- 描述声场特性的参量主要有
 - 声压
 - 声强
 - 声阻抗
 - 声能量

声压

- 某一点的瞬时压强与没有声波时该点的静压强之差

$$p = \rho cv$$

ρ 为介质密度, c 为介质中声速,
 v 为质点振动速度

- 声压是个交变量, 即同一时刻不同体积单元、以及同一体积单元不同时刻的声压是不同的
- 对于简谐声波, 设声压的振幅 p_a , 则有效声压为 $p_e = \frac{p_a}{\sqrt{2}}$
- 声压的大小反应了声音的强弱。
 - 人耳对于1 kHz声音的可听阈约为 2×10^{-5} Pa,
 - 微风吹动树叶的声音约为 2×10^{-4} Pa
 - 在房间内高声谈话的声音(相距1 m处)为0.05-0.1 Pa
 - 飞机发动机发出的声音(相距5 m处)约200 Pa。

声阻抗

声阻抗 Z_a 是指在波阵面的一定面积上，声压与通过该面积的体积速度的比值

$$Z_a = \frac{p}{U}$$

由于体积速度 U 的含义是不明确的，因此通常使用质点振动速度 v 来代替，得到声阻抗率 Z_s ，即介质中某一点的声压与该点的质点振动速度的比值。

$$Z_s = \frac{p}{v} = \rho c$$

声强

□ 声强是单位时间内通过垂直于声波传播方向的单位面积的声能量。

$$I = \bar{\varepsilon}c = \frac{p_e^2}{\rho c} = \frac{p_a^2}{2\rho c}$$

声场参量的级与分贝

为什么需要用分贝来表示？

① 声振动的能量范围非常宽，例如，人讲话的声功率只有约 10^{-5} W，而火箭发射的噪声功率却可以高达 10^9 W，两者相差十几个数量级。

② 从声音接收的角度，人耳感受到的“响度感觉”并不正比于声音强度的绝对值，而是更接近于与强度的对数成正比。

③ 在声学以及电子、通讯等领域，人们更感兴趣的是信号的相对比值，而非其绝对值。

基于以上这些原因，在声学领域普遍使用对数标度来表示这些声场参量，并称之为“级”，如声压级、声强级等，单位为分贝（dB）。

声压级与声强级

声压级

$$SPL = 20 \lg \frac{p_e}{p_{ref}}$$

p_{ref} 为基准声压，或称为参考声压。
在空气中， $p_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ ，是正常人耳刚刚能觉察到的声压。

声强级

$$SIL = 10 \lg \frac{I}{I_{ref}}$$

I_{ref} 为基准声强，对应于基准声压的声强值

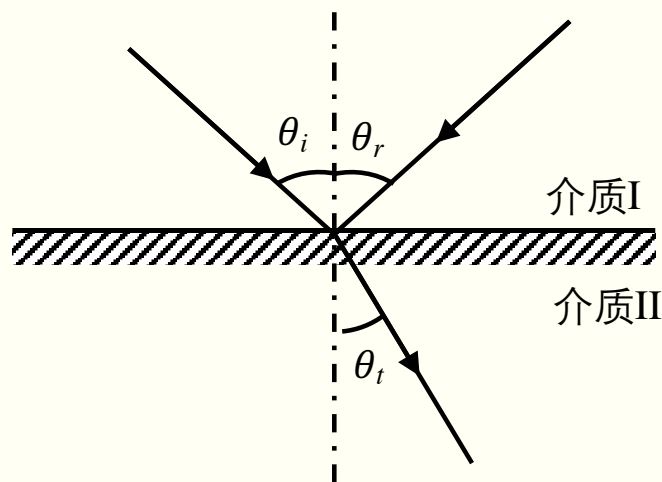
- 对于人耳，从可听阈声压 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 到痛阈声压 20 Pa ，两者相差100万倍，而使用声压级表示的范围则是0~120 dB
- 人耳对于1 kHz声音的可听阈为 0 dB，微风吹动树叶的声音约为 14 dB，在房间内高声谈话的声音（相距1 m处）为 68~74 dB，飞机发动机发出的声音（相距5 m处）约 140 dB。

声波的传播特性

(3) 声波的反射、折射与透射

□ 声波在产生反射、折射时，遵循类似于几何光学的反射定律和折射定律

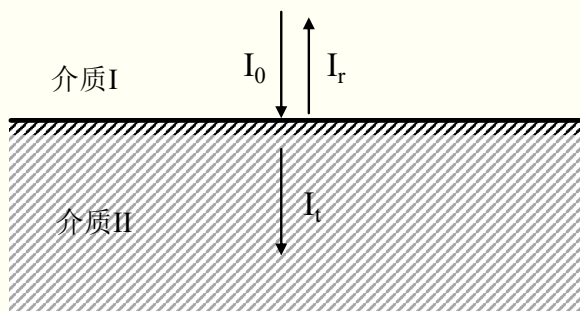
$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_t} = \frac{c_1}{c_2}$$



$$r = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_2 / \cos\theta_t - Z_1 / \cos\theta_i}{Z_2 / \cos\theta_t + Z_1 / \cos\theta_i}$$

$$t = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2 \times Z_2 / \cos\theta_t}{Z_2 / \cos\theta_t + Z_1 / \cos\theta_i}$$

垂直入射



$$r = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$t = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

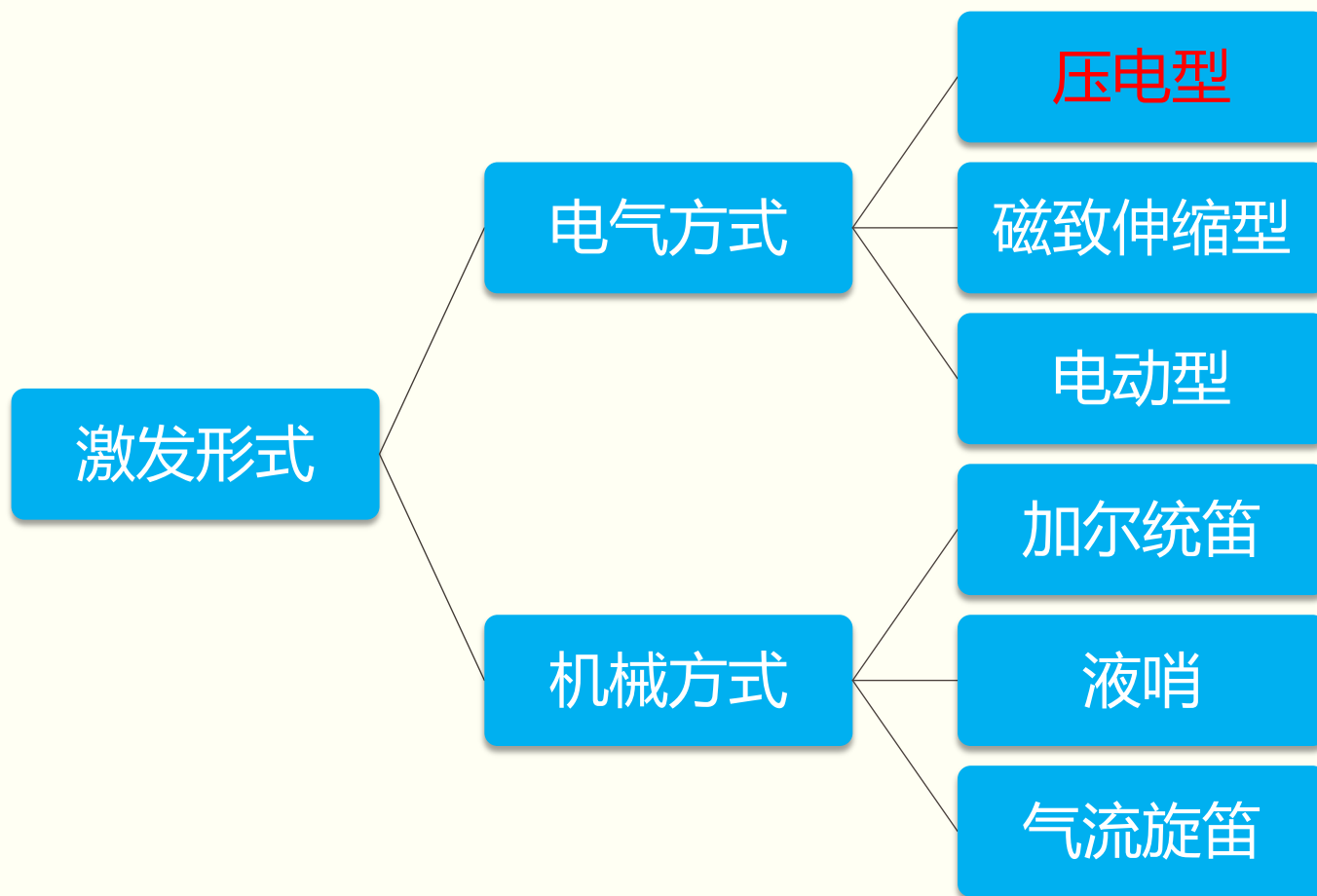
$$R = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad T = \frac{I_t}{I_i} = 1 - R = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

① 当 $Z_2=Z_1$ 时, $r=0$, 没有反射, 即全透射, 也就是说即使存在两种不同的介质分界面, 只要它们的特性特性阻抗相同, 是不会有反射发生的, 就好像分界面不存在一样。

② 当 $Z_2>Z_1$ 时, $r>0$, 反射波声压与入射波声压相位相同, 在界面上的合成声压增大。当 $Z_2\gg Z_1$ 时, $r\approx 1$, 即发生全反射; 此时, 反射波声压与入射波声压相位相同、大小相等, 在界面上的合成声压是入射声压的2倍

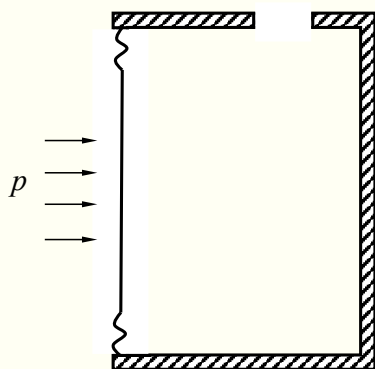
③ 当 $Z_2<Z_1$ 时, $r<0$, 反射波声压与入射波声压相位相反, 在界面上的合成声压减小。类似地, 当 $Z_2\ll Z_1$ 时, $r\approx -1$, 即也会发生全反射

3、超声波的激发与接收

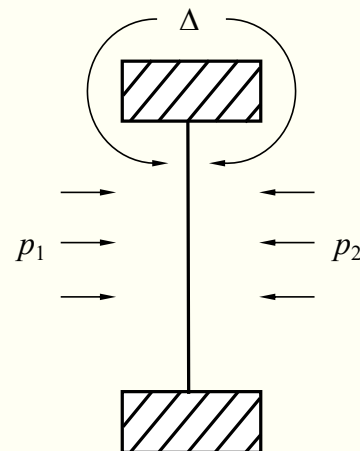


声波的接收

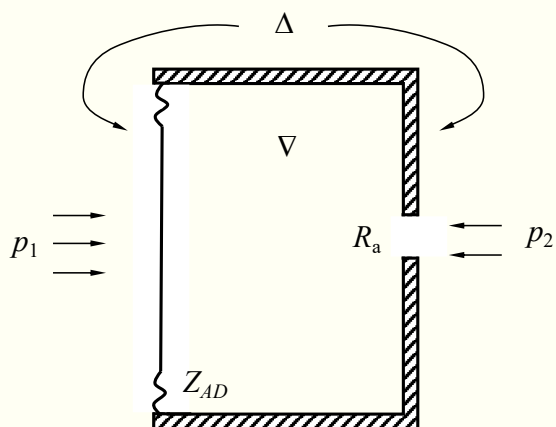
接收原理



压强原理

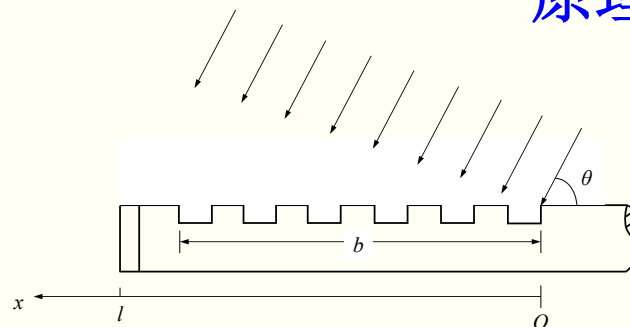


差压原理



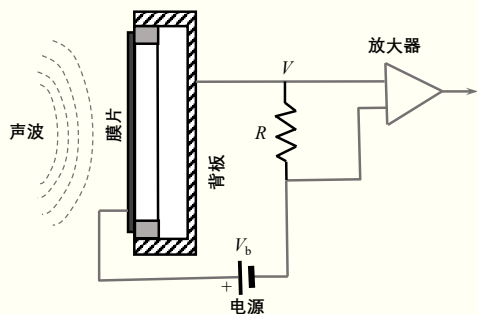
压强差压
复合

多声道干涉
原理

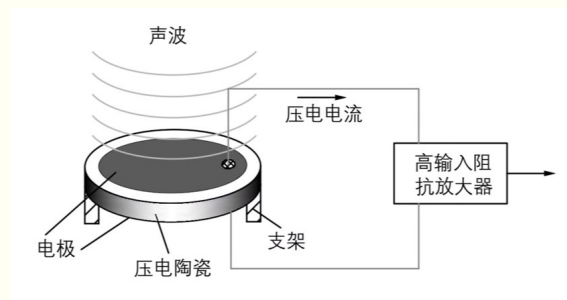


声波的接收

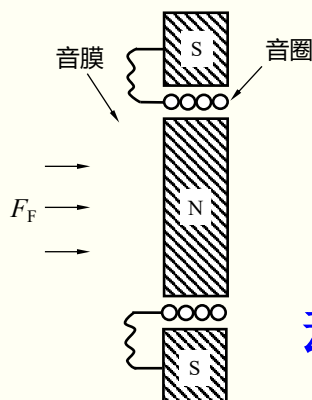
常见传声器



电容式传声器



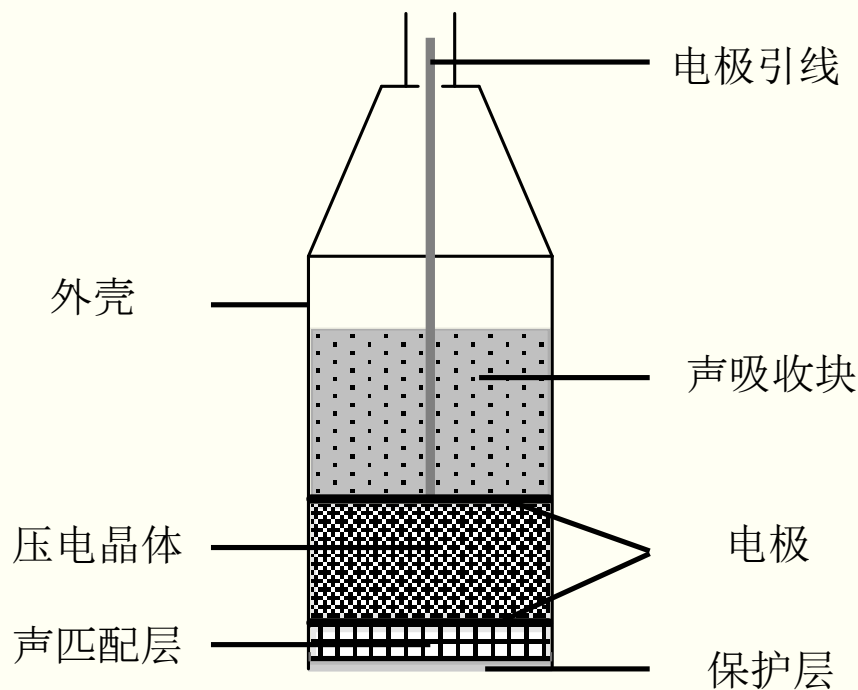
压电式传声器



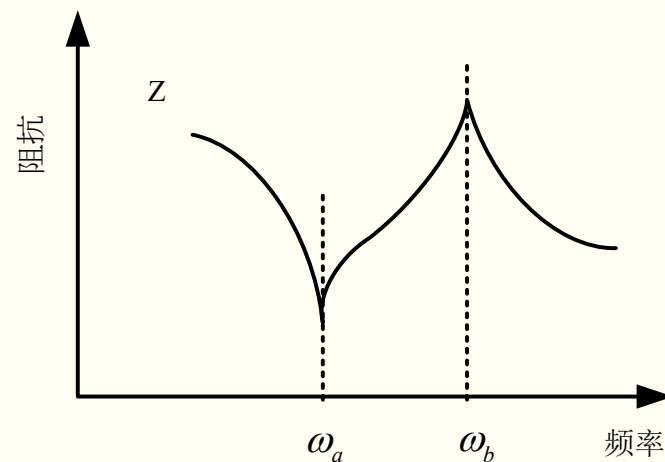
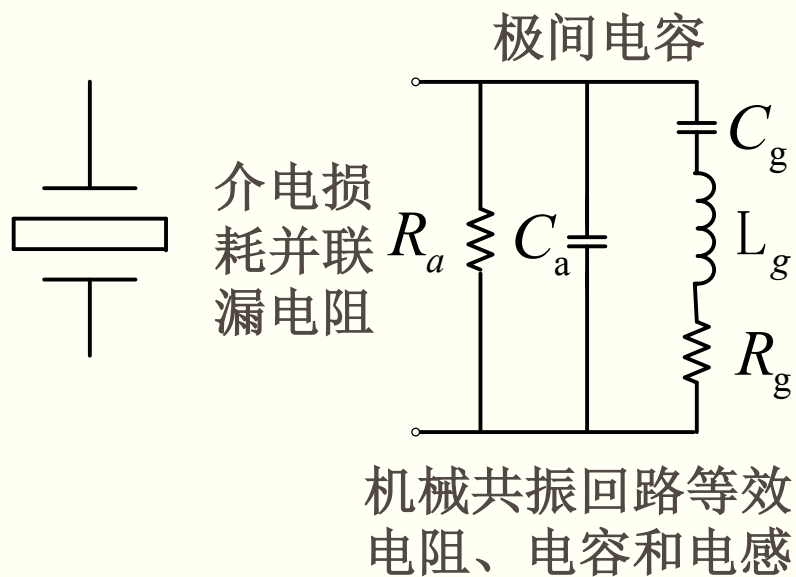
动圈式传声器

探头类型

- 直探头（纵波）
- 斜探头（横波）
- 表面波探头（表面波）
- 兰姆波探头（兰姆波）
- 可变角探头（纵波、横波、表面波、兰姆波）
- 双晶探头（一个探头内含两个晶片，一个用于发射，另一个用于接收）
- 聚焦探头（将声波聚集为一细束）



等效电路



等效电阻

$$Z = \frac{1 - LC\omega^2 + j\omega RC}{j\omega C' \left[\left(1 + \frac{C}{C'} \right) - LC\omega^2 + j\omega RC \right]}$$

低频共振点

$$\omega_a^2 = \frac{1}{LC}$$

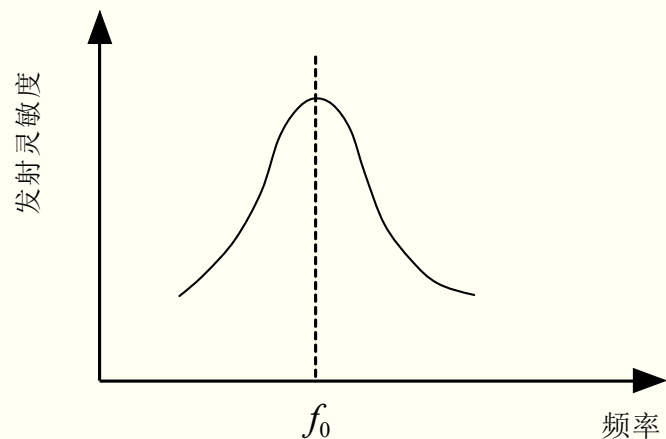
发射

高频共振点

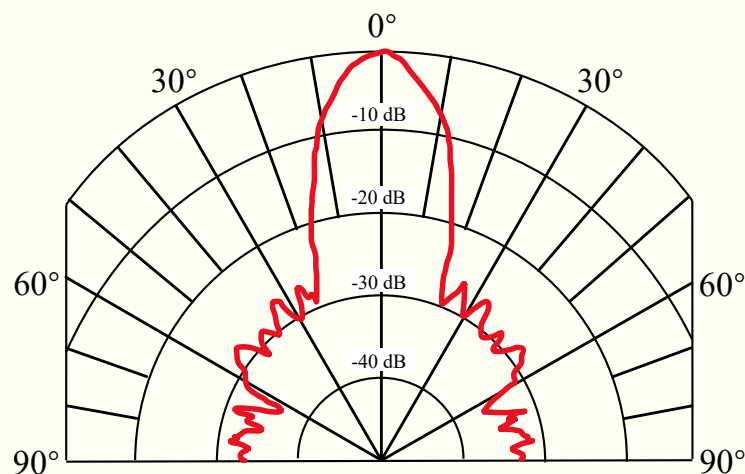
$$\omega_b^2 = \omega_a^2 \left(1 + \frac{C}{C'} \right)$$

接收

频率特性、方向性



- 超声波信号在中心频率处最强，即超声声压能级最高
- 采用工作在中心频率的稳定交流电压来激励



- 沿着探头中轴线方向上的超声辐射能量最大

6、超声波传感器工作原理

- 在确定的介质中，其传播速度是确定的
 - 空 气：344 m/s
 - 自来水：1430 m/s
 - 海 水：1500 m/s
 - 钢 铁：5800 m/s
- 超声波纵波在气体中的传播速度最低，液体次之，固体最高
- 在固体中，横波声速为纵波的一半，表面波声速为横波声速的90%

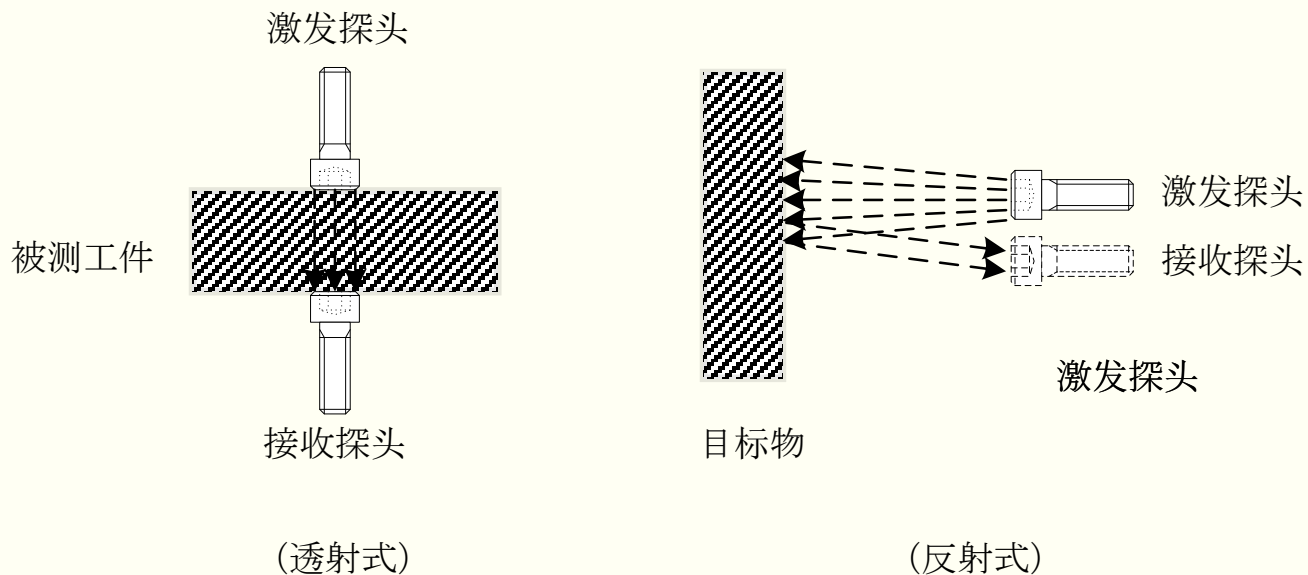
□ 工件厚度

□ 液体液位

□ 流体流速

□ 物体距离

探头布置方式



从激发到接收的时间

$$L = \frac{1}{2} v \cdot t$$

误差影响因素

- 超声波在空气中的传播速度受**温度**影响

$$v = \sqrt{\frac{rRT}{M}}$$

v —— 超声波传播速度

M —— 气体的摩尔质量

r —— 气体的定压比热 C_p 与定容比热 C_v 之比

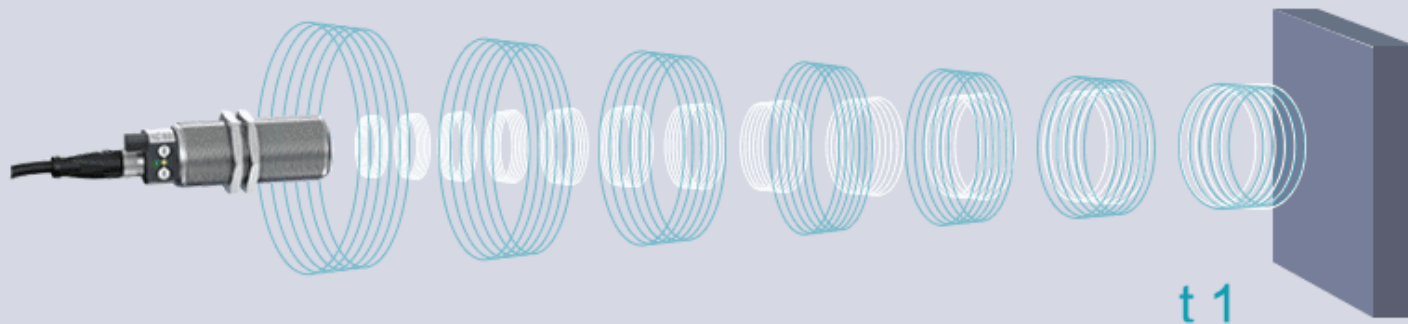
T —— 热力学温度

$$v = 331.5 + 0.607t$$

4、应用

移动机器人测距和避障

$$S = \frac{t \cdot c}{2}$$



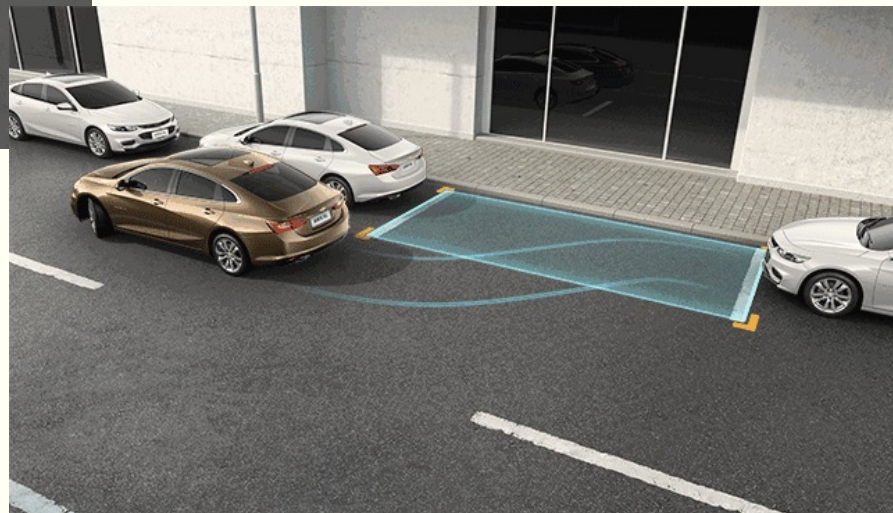
$$t_1 = 2.905 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$c = 344 \text{ m / s}$$

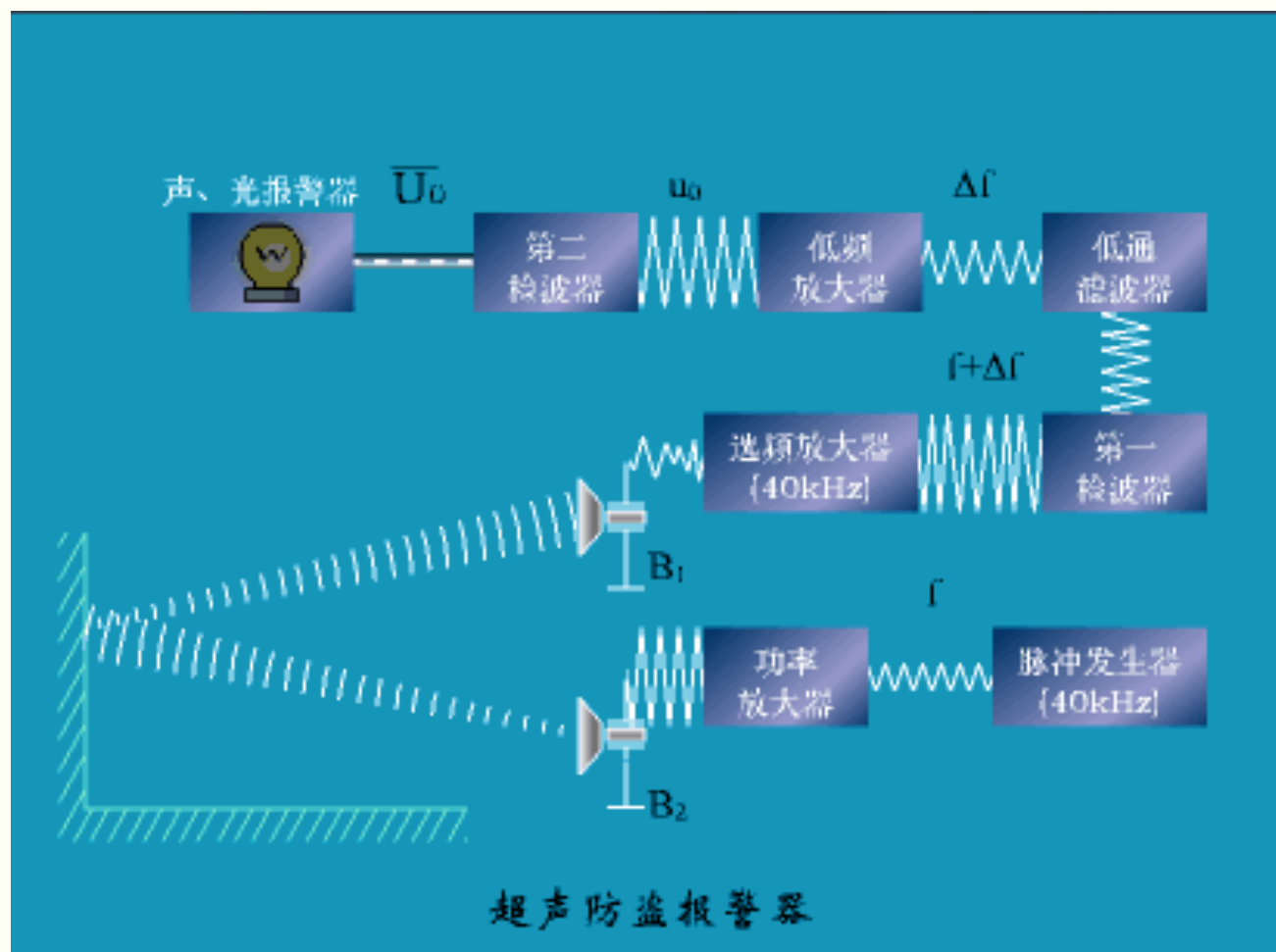
$$S_1 = 0.99932 \text{ m}$$

应用

汽车雷达

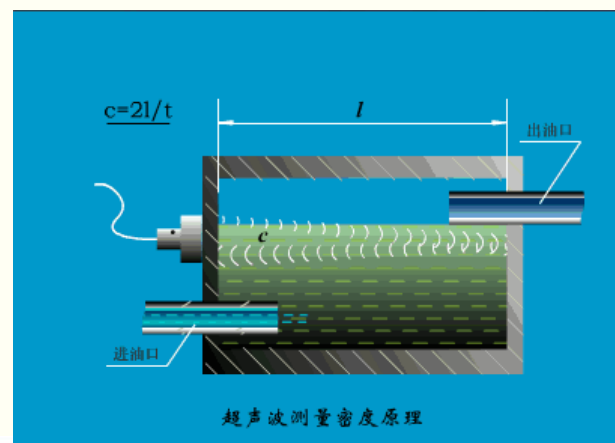
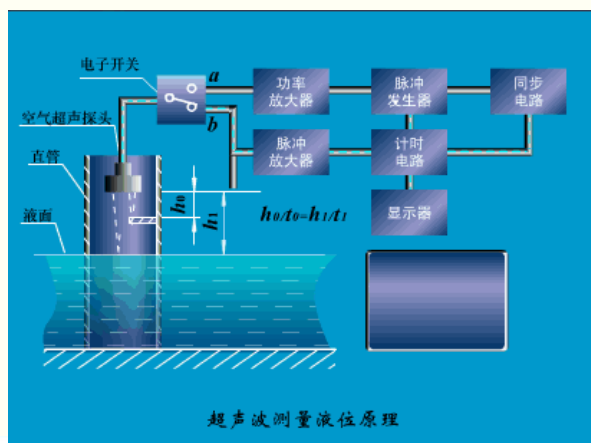
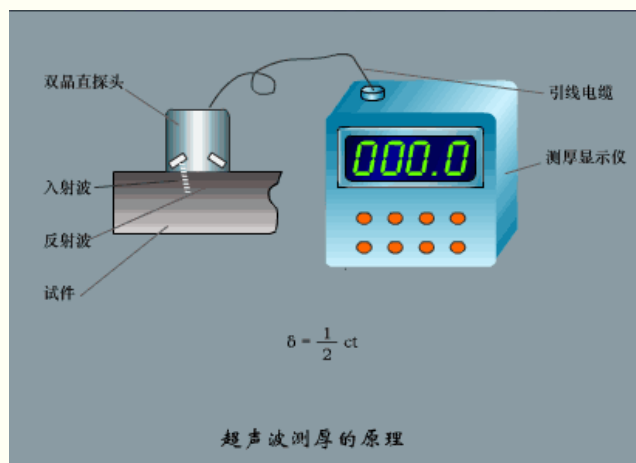


防盗报警

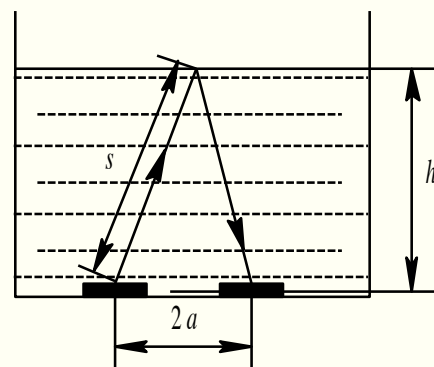
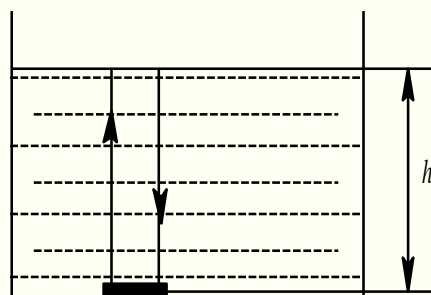


应用

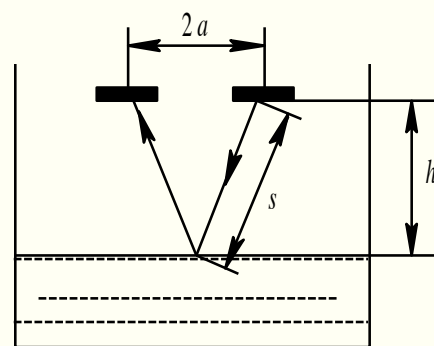
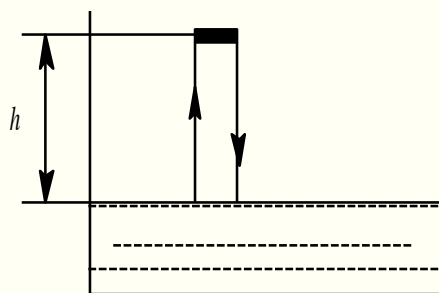
材料厚度、密度、液位



物位传感器



(a)

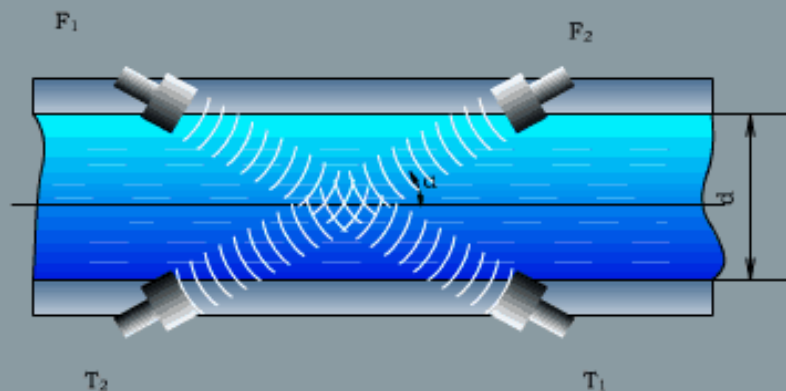


(b)

(a) 超声波在液体中传播; (b) 超声波在空气中传播

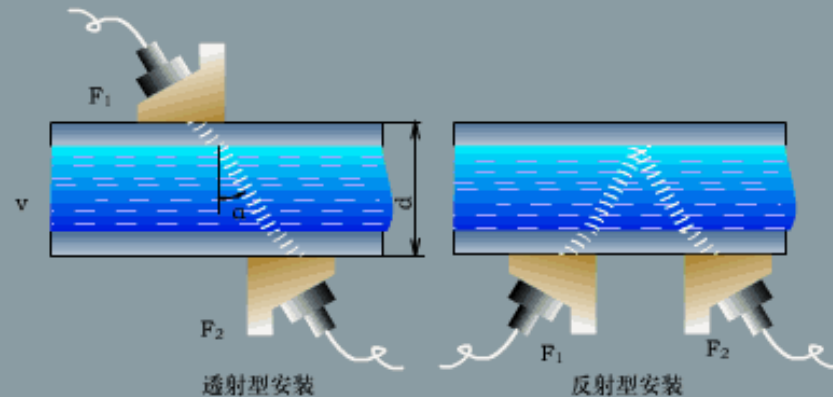
应用

流速、流量



$$qv \approx \frac{\pi}{4} d^2 v = \frac{\pi}{8} d c^2 \tan \alpha \Delta t$$

超声波流量计的原理

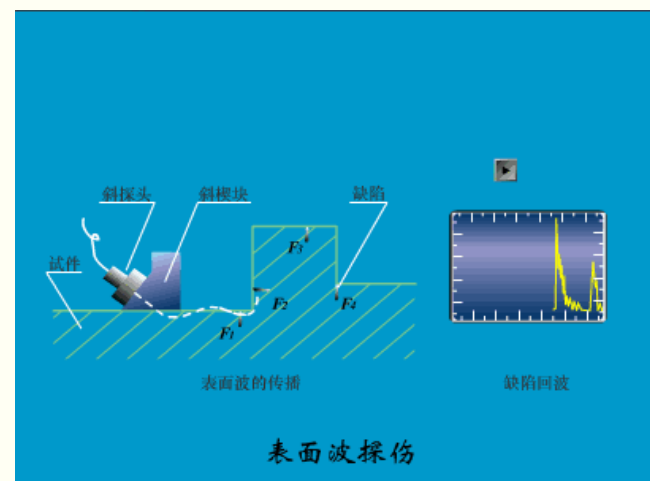
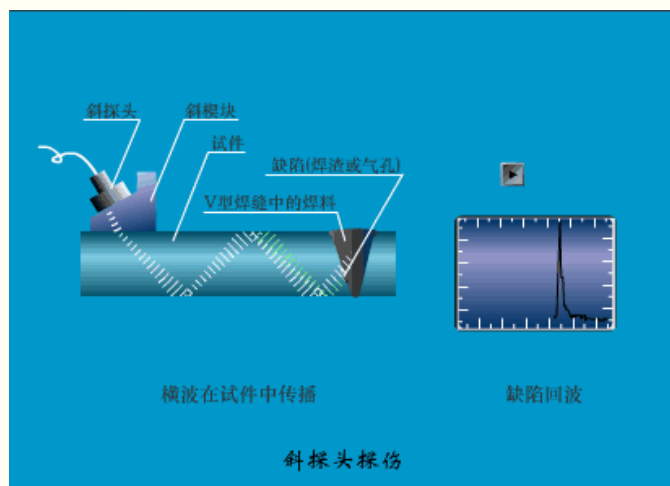
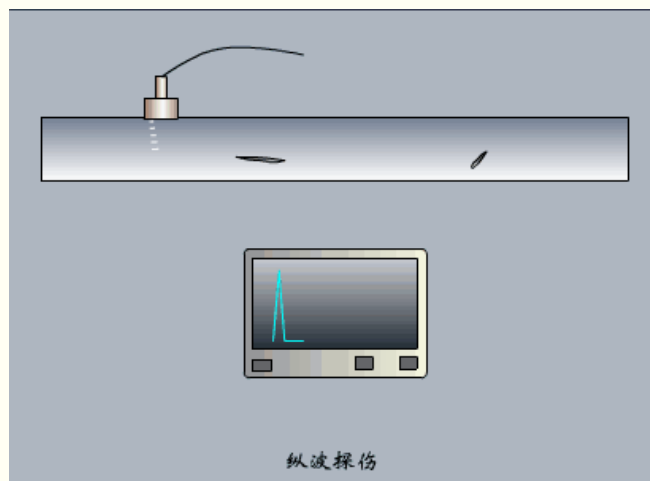


$$\Delta f = f_1 - f_2 \approx \frac{\sin 2\alpha}{D} v$$

$$qv \approx \frac{\pi}{4} d^2 v$$

频率差法测量流量的原理

零件内部缺陷



作业

请列表说明检测元件的种类、原理（基础效应）、特点、测量参数、误差因素、以及适用范围