

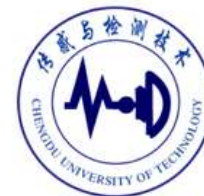
# 传感器原理与应用

S e n s o r   p r i n c i p l e   a n d   A p p l i c a t i o n

## 第7章 压电元件与超声波传感器

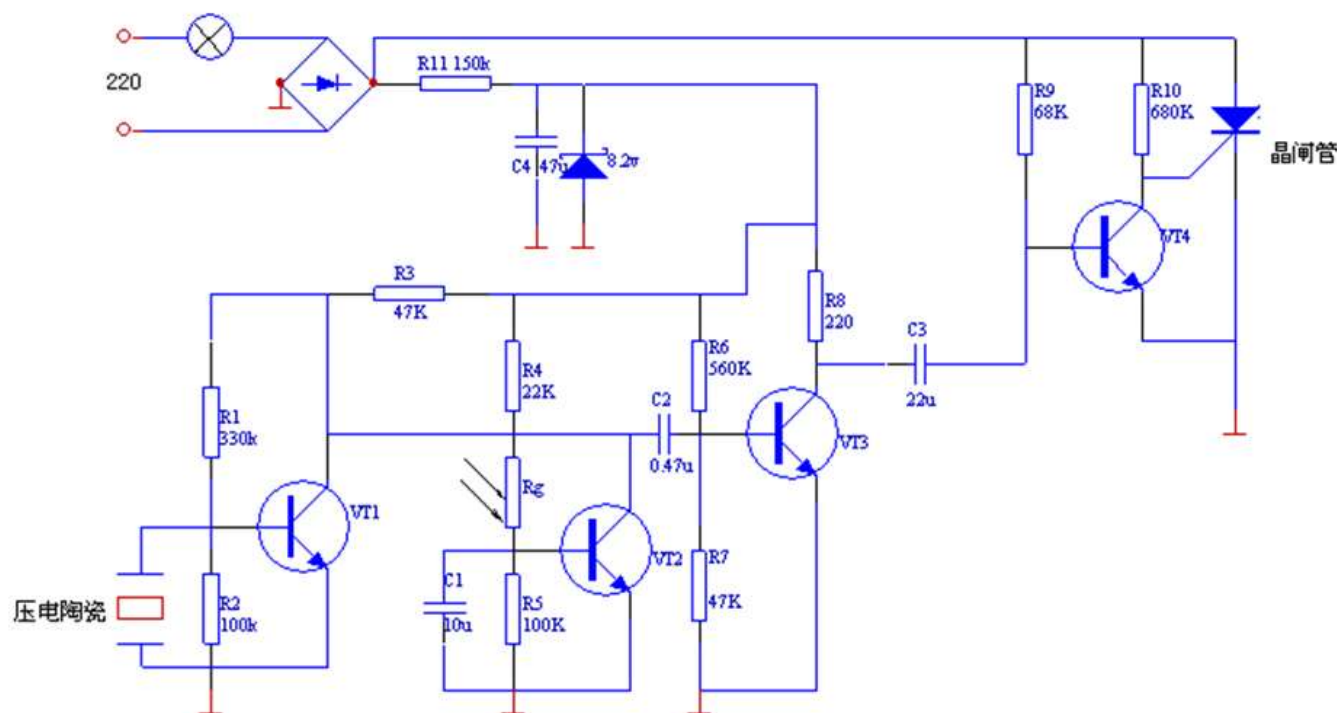


## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 7.4 压电传感器的应用

#### 晶体管声、光控开关电路



## 多选题 2分



压电元件可以用来测量的对象有（ ）

☒ A 速度

☒ B 力

☒ C 振动

☐ D 火灾

## 单选题 1分



实际应用时，通常将多片压电元件进行级联，先获得更大的输出电压，需要进行（ ）。

- ☒ A 串联
- ☐ B 并联

## 单选题 1分

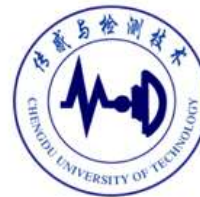


压电元件接入电路中，连接线缆长度对下列哪一种影响最小？

- ☐ A 压电元件串联后接电压放大器
- ☒ B 压电元件并联后接电压放大器
- ☐ C 压电元件串联后接电荷放大器
- ☐ D 压电元件并联后接电荷放大器



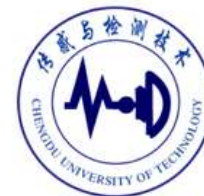
# 第7章 压电元件与超声波传感器



## 7.5 超声波传感器

- 超声波技术是以物理、电子、机械及材料学为基础的通用技术，超声波传感器是向空气中发射超声波，再通过探测来自某个物体的反射波检测物体有无或距离；
  - 超声波传感器具有多种用途：
    - 如防盗报警系统、自动门启闭装置、汽车倒车传感器及各种电子设备的遥控装置；
    - 利用超声波的各种物理特性，可以实现超声波测距、测厚、测流量、无损探伤、超声成像；
- 随着信息技术的迅猛发展，新的超声波应用领域越来越广泛，而且不断得到扩展。

## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 7.5.1 超声波及物理特性

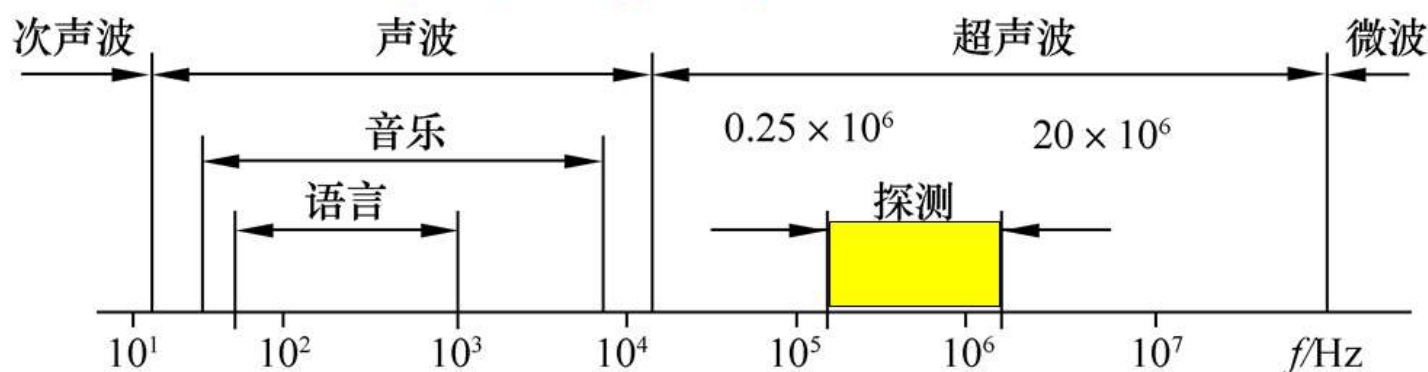
声波为一种机械波，人耳听到的频率在16Hz~20kHz；

频率低于16Hz的机械波称为次声波；

频率高于20kHz的机械波称为超声波；

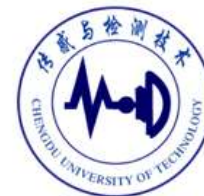
频率在300MHz~300GHz之间的波称为微波；

频率超过20kHz的声音为超声波，是人耳无法听到的。



声波频率界限

## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 7.5.1 超声波及物理特性

- 当超声波从一种介质入射到另一种介质时，在界面上会产生**反射**、**折射**和**波形转换**；
- 超声波传感器是通过超声波的**产生** → **传播** → **接收**等物理过程完成。**主要功能**是**产生**、**接收**超声波信号。

#### 波动的种类

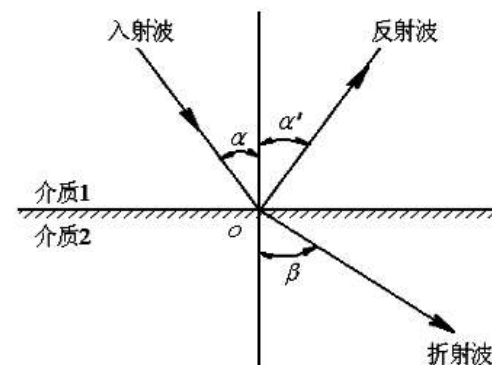
机械波、电磁波、物质波

#### 波源

作机械振动的物体（声带，乐器等）

#### 介质

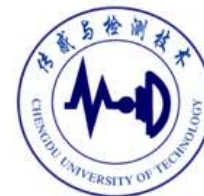
能传播机械振动的媒质（空气，水，钢铁等）



超声波的反射和折射



## 第7章 压电元件与超声波传感器

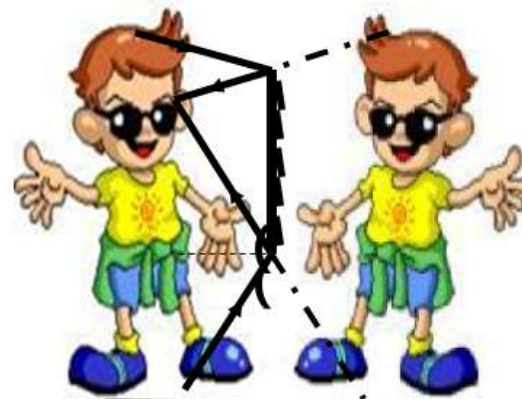


### 7.5.1 超声波及物理特性

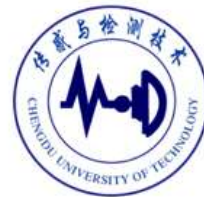
超声波以直线传播方式，频率越高绕射越弱，但反射越强，利用这种性质可以制成超声波测距传感器；  
超声波在液体、固体中衰减很小，穿透能力强，特别是不透光的固体能穿透几十米，利用这种性质可以制成超声波探伤传感器。

几种常用介质的折射率

媒质	折射率
空气	1.00029
水	1.333
普通玻璃	1.468
冕牌玻璃	1.516
火石玻璃	1.603
重火石玻璃	1.755



## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 7.5.1 超声波及物理特性

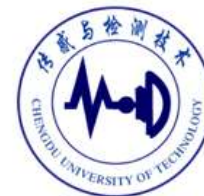
超声波在空气中传播速度较慢，为344m/s（20℃时）速度低、波长短，意味着可获得较高的距离、方向分辨率。（电磁波的传播速度为 $3 \times 10^8$ m/s），

这一特点使得超声波应用变得非常简单，测量时可获得较高的精确度，可以通过测量波的传播时间，测量距离、厚度等。

波在媒质中传播的速度决定于媒质的弹性（弹性模量）和惯性（密度），传播速度与介质密度有关：

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho B_{\alpha}}}, \rho \text{ 为介质密度, } B_{\alpha} \text{ 为绝对压缩系数}$$

## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 7.5.1 超声波及物理特性

例如，声波在**空气中**速度  $340\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

**钢铁中**  $5000\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

**在水中**  $1500\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

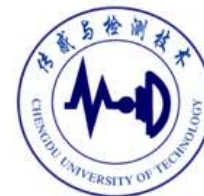
**液体中**声速传播速度在 **$900\sim 1900\text{m/s}$** ，在液体和气体中只有**纵波**的传播。

金属、木材、玻璃、混凝土、橡胶和纸张可近乎**反射100%的超声速**，因此检测这些物体时较容易发现。

而棉花、布、绒毛等物体**吸收超声波**，因此很难用超声波检测。



## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 7.5.1 超声波及物理特性

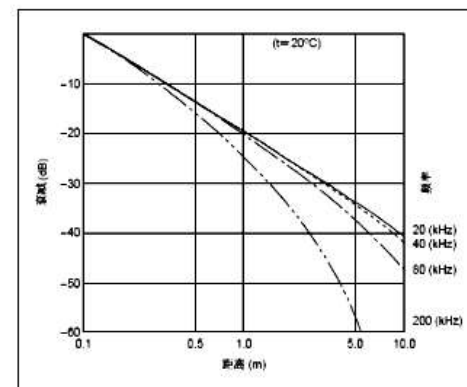
声波在介质中传播时随距离的增加能量逐渐衰减,其衰减的程度与声波的扩散、散射及吸收等因素有关, **衰减规律**用两个能量描述:

$$\text{声压} \quad p_x = p_0 e^{-\alpha x} \quad \text{声强} \quad I_x = I_0 e^{-2\alpha x}$$

式中:  $x$  声波与声源之间距离;  
 $\alpha$  衰减系数  $\text{Np/m}$  (奈培/米)

$P_0$   $I_0$  分别为  $x=0$  处的声压、声强;

声波随距离增加,声能减弱较快,所以超声波 **不能进行较远距离传播**;  
频率越高衰减越快。



声压在不同距离上的衰减特性

## 第7章 压电元件与超声波传感器

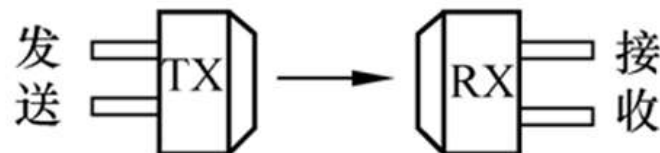
### 7.5.2 超声波传感器

#### 超声波传感器工作形式

- ✓ 超声波传感器有压电式、磁致伸缩式、电磁式，其中最常用的是压电式。
- ✓ 压电式超声波探头主要有压电晶体和压电陶瓷，利用压电材料的压电效应工作，分为发射、接收两部分

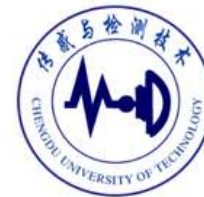
**发射元件：**利用压电材料的逆压电效应，将高频电振动转换为机械振动产生超声波，将电能→机械能；

**接收元件：**利用压电材料正压电效应，将超声波振动转换为电信号，将机械能→电能。





## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 超声波传感器的工作形式

发射探头 (TX)

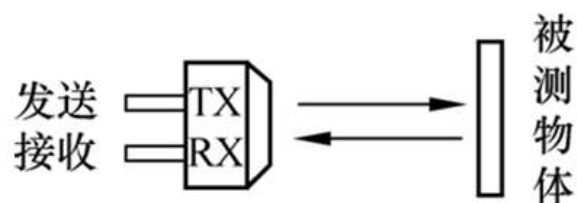
接收探头 (RX)

反射式

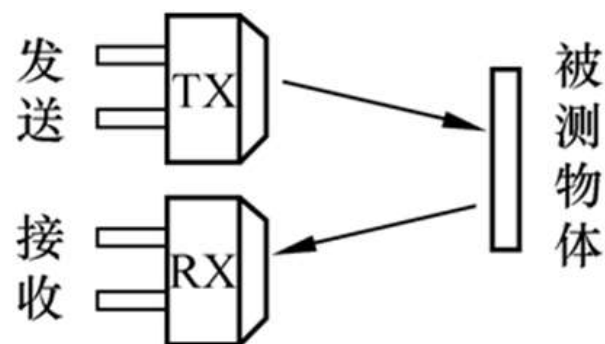
直射式 (透射式)

专用型;

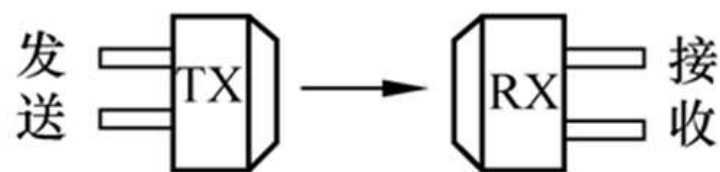
兼用型;



a) 兼用型

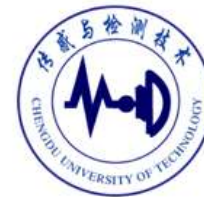


b) 分离型反射式



c) 分离型直射式

## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 超声波传感器的工作形式

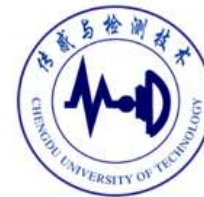
目前市场销售的超声波传感器有两种工作形式：  
**专用型**、**兼用型**。

产品通常标有中心谐振频率：  
23kHz、40kHz、75kHz、200kHz、400kHz。

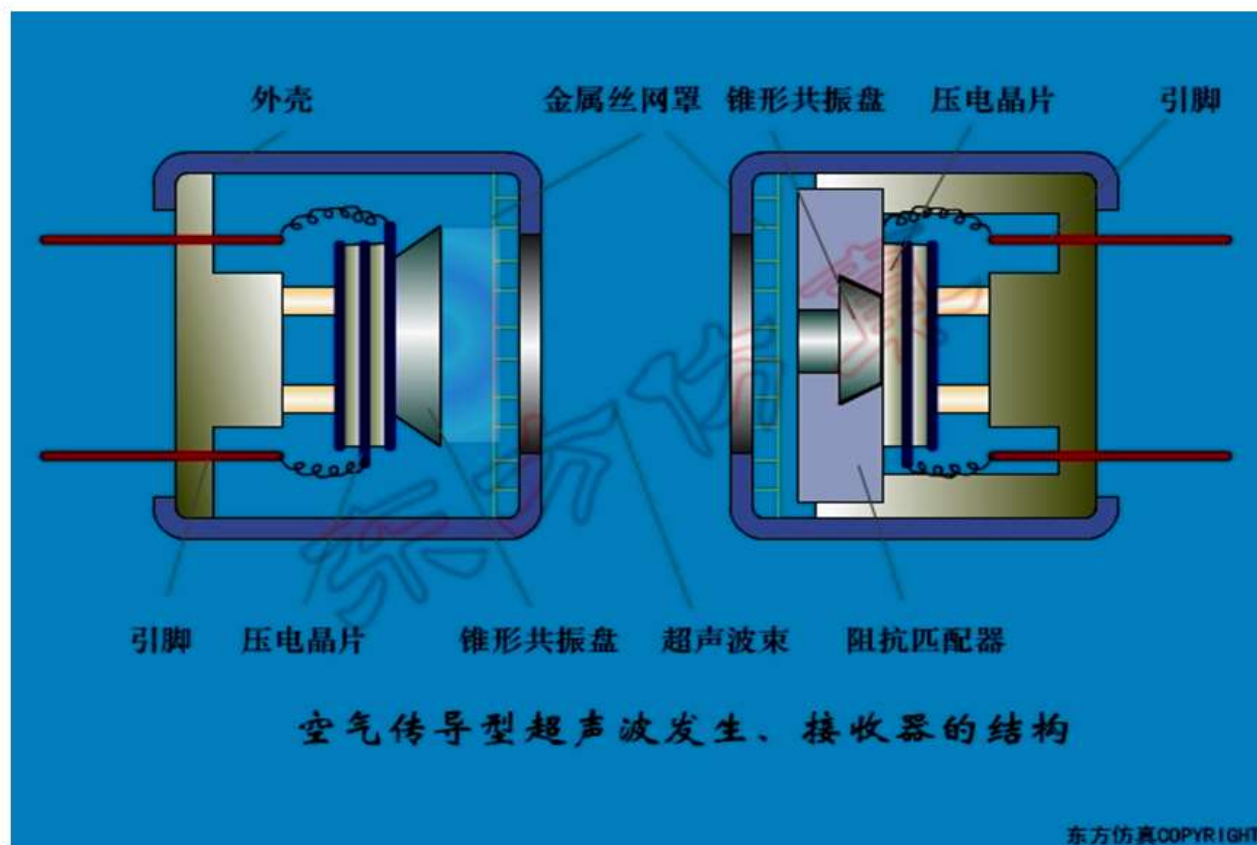


各种超声波传感器产品

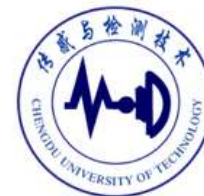
## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 超声波传感器类型结构



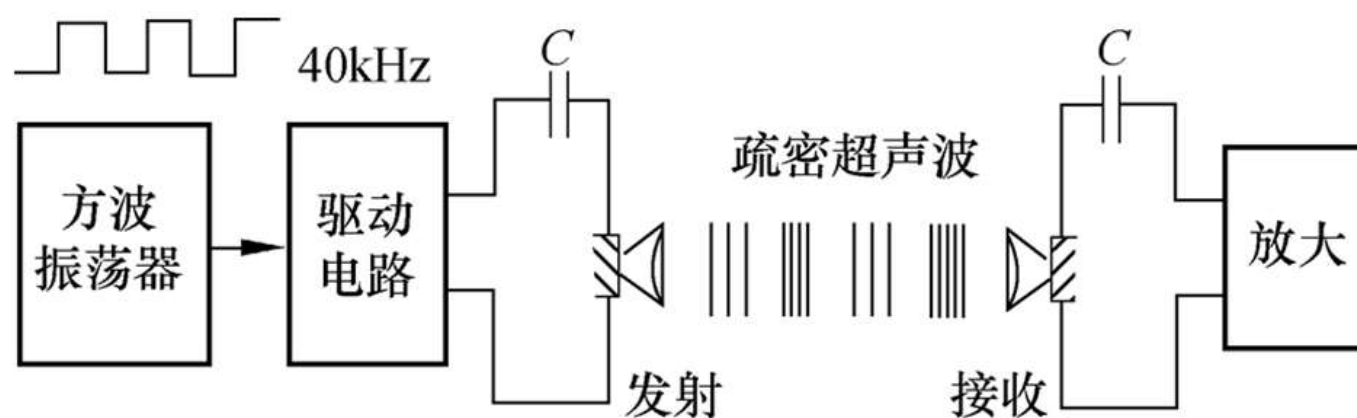
## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 7.5.3 超声波传感器基本电路

**发送器**：在双压电振子上施加一定频率（40KHz）的电压，通过**逆压电**效应，将电能转换为机械能，送出超声波信号；

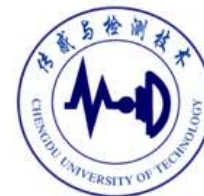
**接收探头**：经**正压电**效应将机械能转换成电信号，转换电路将接收到的信号放大处理。



超声波传感器的工作原理



## 第7章 压电元件与超声波传感器



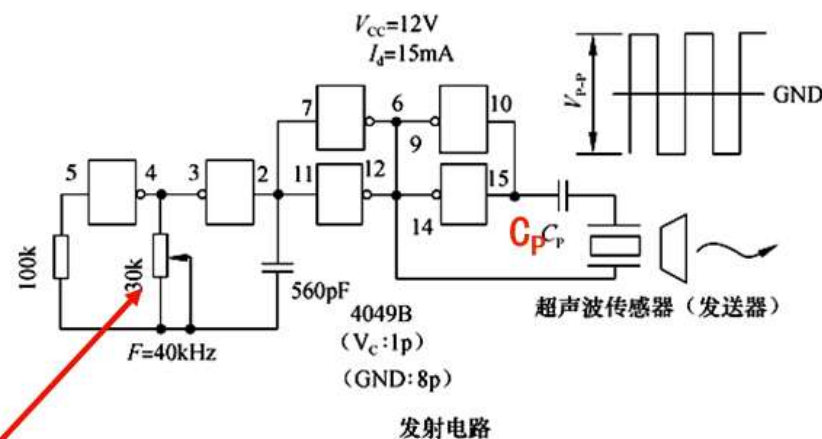
### 7.5.3 超声波传感器基本电路

超声波传感器基本电路包括振荡发射电路、检测电路两部分组成。

#### 超声波发射电路：

由反向器组成RC振荡器，  
经门电路完成功率放大，  
经 $C_p$ 耦合传递给超声波振子产生超声发射信号。

$C_p$ 电容防止传感器长期处于直流电压下工作。

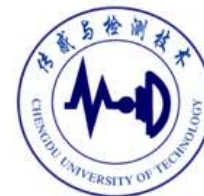


调整振荡器频率

超声波传感器发射电路



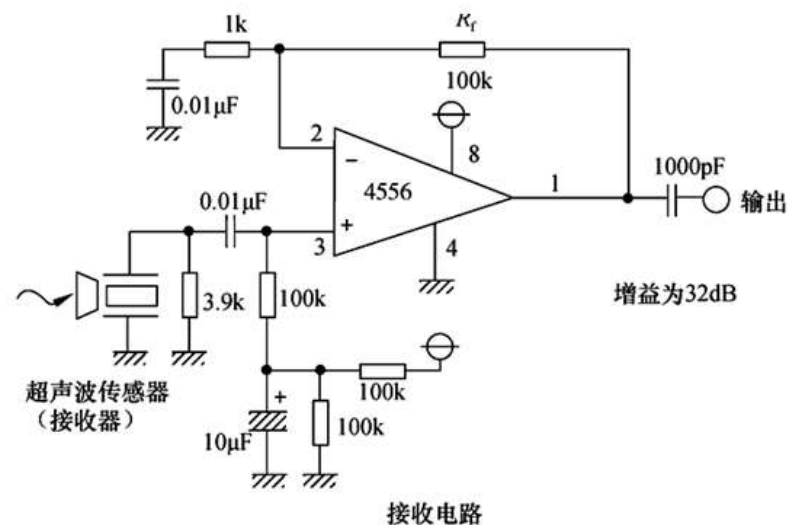
## 第7章 压电元件与超声波传感器



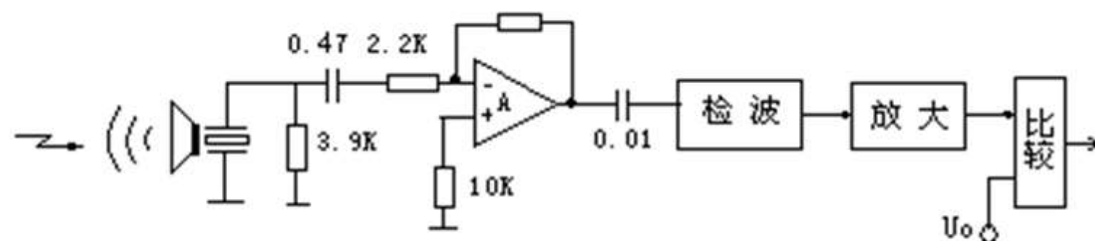
### 7.5.3 超声波传感器基本电路

#### 超声波检测电路：

接收到的超声波信号极微弱，需要**高增益**的放大电路用于检测反射波，输出的高频信号电压接检波、放大、开关电路输出或报警。

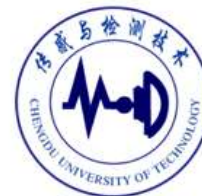


#### 超声波传感器接收报警电路

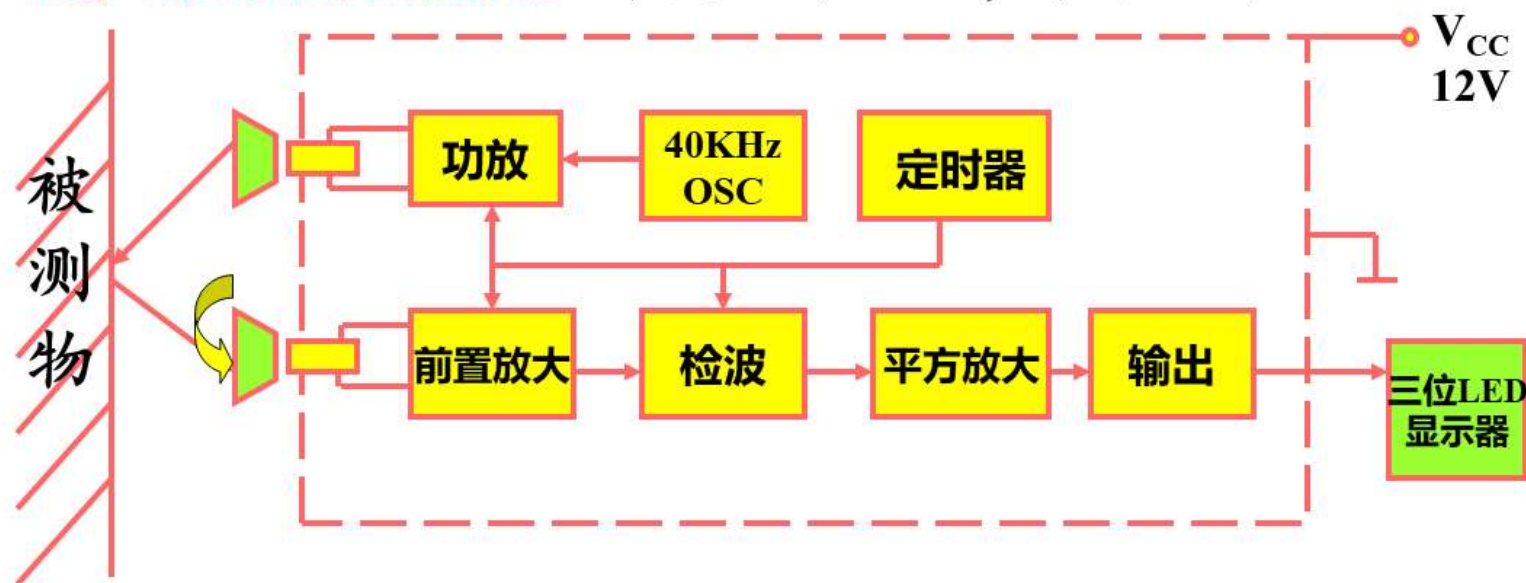


## 第7章 压电元件与超声波传感器

### 7.5.3 超声波传感器基本电路

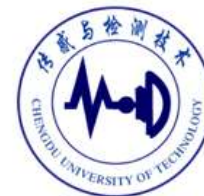


超声波测距集成模块：最大距离600cm，最小距离2cm



**发送电路：**555构成多谐振荡器，产生40KHz等幅波放大送功放输出；  
**接收电路：**放大、检波，信号处理根据被测物体的距离设定反射脉冲时间，调整振荡器触发时间。定时器控制触发电路和门电路。

## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 超声波传感器测距原理

40kHz高频信号与20Hz周期信号调制成短脉冲群向外发送:周期  $T=1/20=50\text{ms}$ , 超声波在空气中传播速度为:

$$340\text{m/s} \times 50\text{ms} = 17\text{m}, 17\text{m}/2 = 850\text{cm}$$

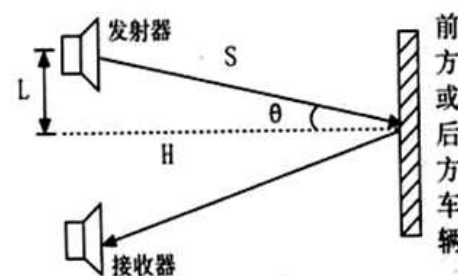
测距通过定时控制电路、触发电路、门电路变换为与距离有关的信号;

用时钟脉冲对这个信号的发送和接收之间的延迟时间进行计数, 计数器的输出值就是检测的距离。

时钟周期  $T=1/40\text{kHz}=25\mu\text{s}$

$340\text{m/s} (n \times 25\mu\text{s}) = \text{往返距离}$

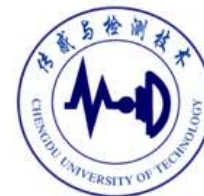
单程距离 = 往返距离/2



图一 超声波测距原理



## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 超声波传感器测距原理

40kHz高频信号与20Hz周期信号调制成短脉冲群向外发送:

周期  $T = 1/20\text{Hz} = 50\text{ms}$

超声波在空气中传播速度

$340\text{m/s} \times 50\text{ms} = 17\text{m}$

$17\text{m}/2 = 850\text{cm}$

测距通过定时控制电路、触发电路变换为与距离有关的信号;

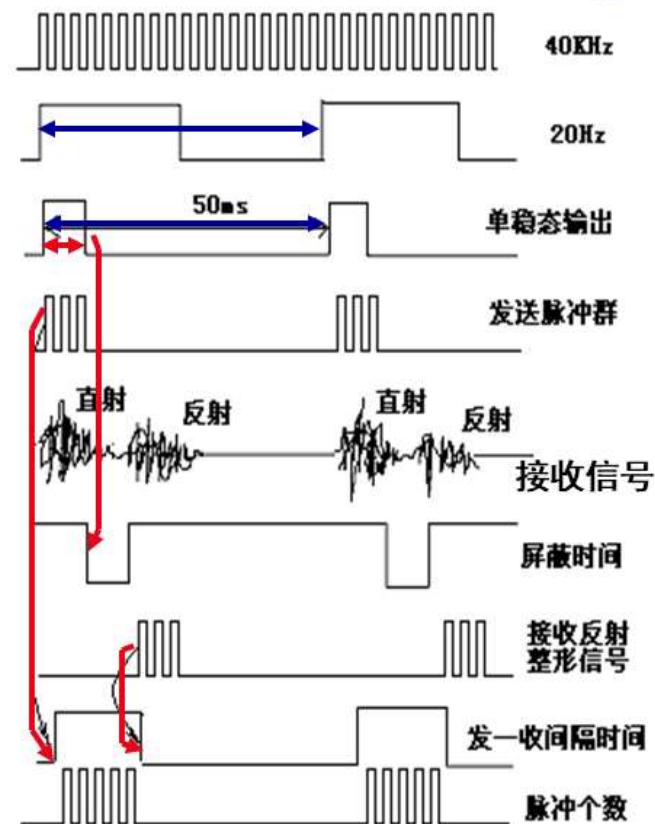
用时钟脉冲对这个信号的发送和接收之间的延迟时间进行计数, 计数器的输出值就是检测的距离。

时钟周期  $T = 1/40\text{kHz} = 25\mu\text{s}$

$340\text{m/s} \times (n \times 25\mu\text{s}) = \text{往返距离}$

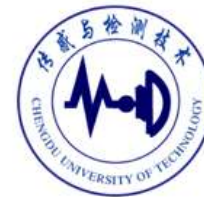
单程距离 = 往返距离/2

最大往返距离



超声波测距原理时序波形示意图

## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 7.5.4 超声波传感器应用



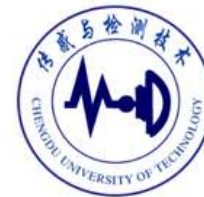
医学超声波检测  
采用多普勒效应



超声波频谱  
分析测流量



## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 7.5.4 超声波传感器应用

超声波测厚



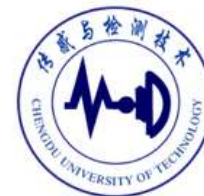
超声波液位计





序号	作用方法	工作原理 (S: 发送器 R: 接收器)	应用
1	检测连续波的信号电平 接收连续信号		计数器 <u>近似开关</u> <u>停车计时器</u>
2	测量脉冲反射时间 接收脉冲信号		自动门 液面计 交通信号的自动转换 <u>汽车倒车声纳 (测距)</u>
3	利用多普勒效应 接收信号被调制		<u>防盗报警系统</u>
4	测量直接传播时间 直接传播信号		<u>浓度计</u> <u>流量计</u>
5	测量卡门涡流		流量计

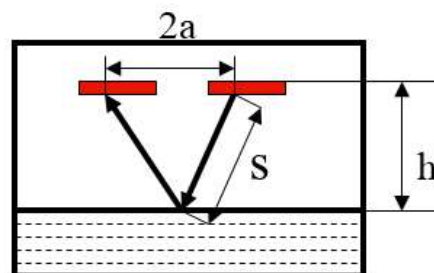
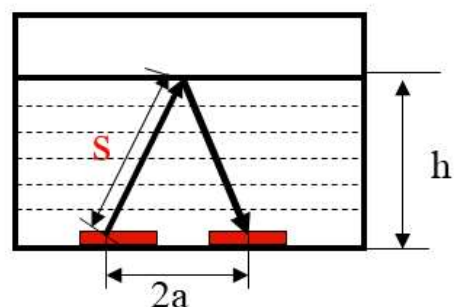
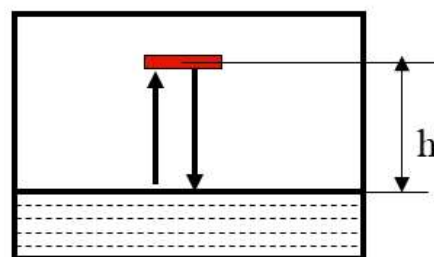
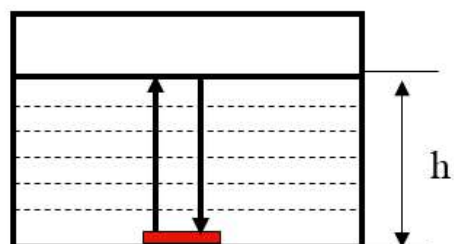
## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 超声波检测液位

超声波传感器可用于测量钻井泥浆液位传感器；因为钻井过程中自始至终要监测泥浆液面。钻井过程中液位传感器有着重要的意义，它确保快速、优质安全钻井。

超声波在空气中传播衰减大但在液体中传播衰减小



单换能器

从发射到接收的时间

$$t = 2h/C$$

传感器到液面的距离

$$h = ct/2$$

双换能器

经过的路程：

$$2S = ct$$

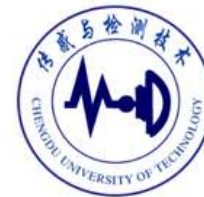
液位高度：

$$h = \sqrt{s^2 - a^2}$$

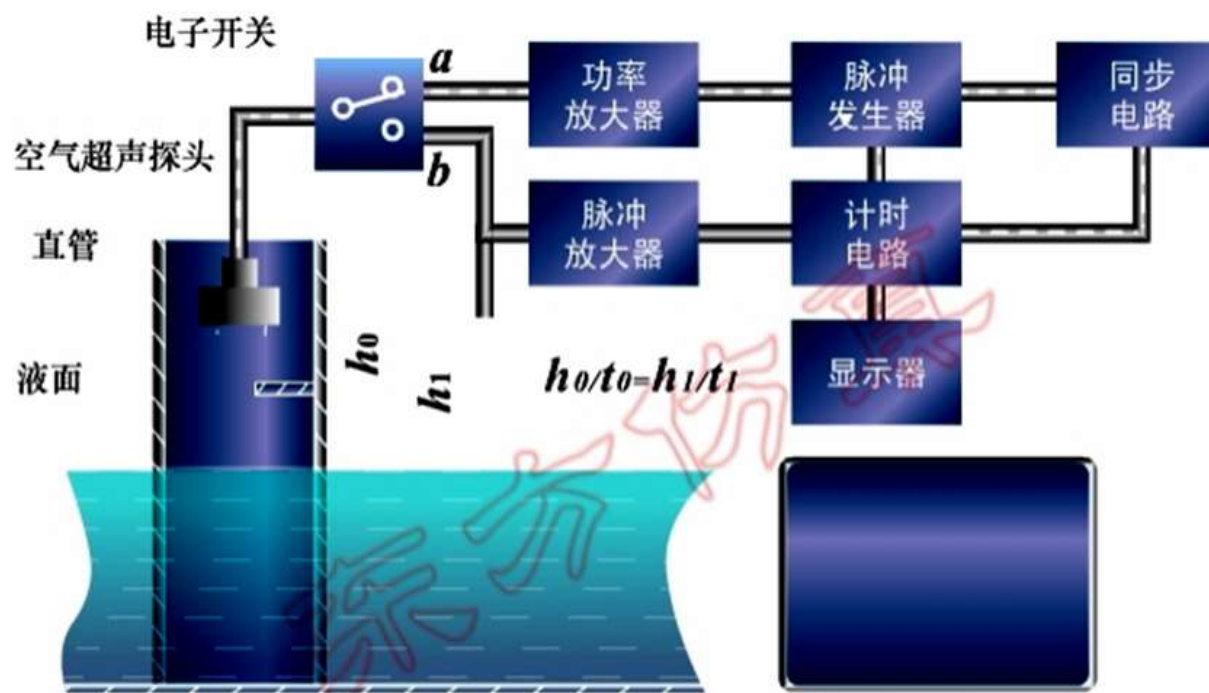
$C$  -- 超声波在介质中传播速度



## 第7章 压电元件与超声波传感器



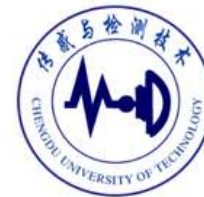
### 超声波检测液位



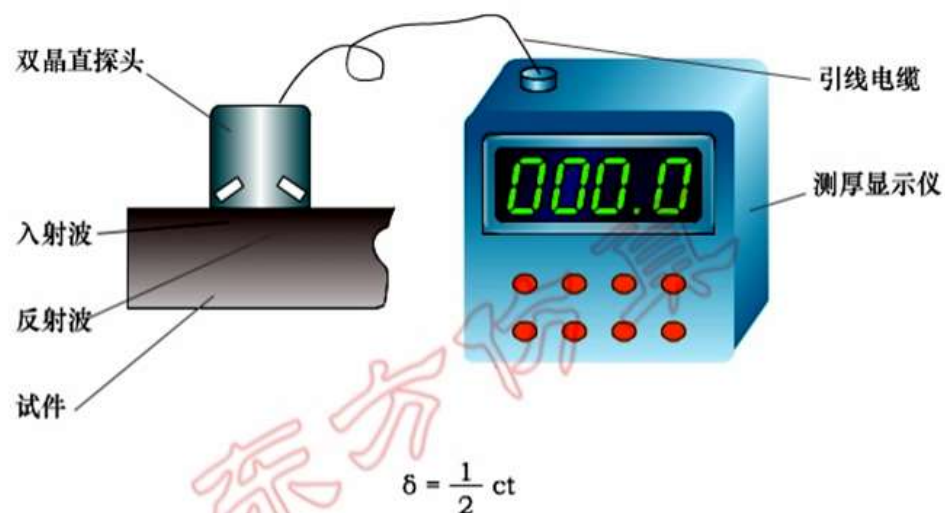
超声波测量液位原理



## 第7章 压电元件与超声波传感器



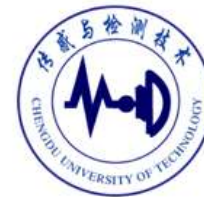
### 超声波检测厚度



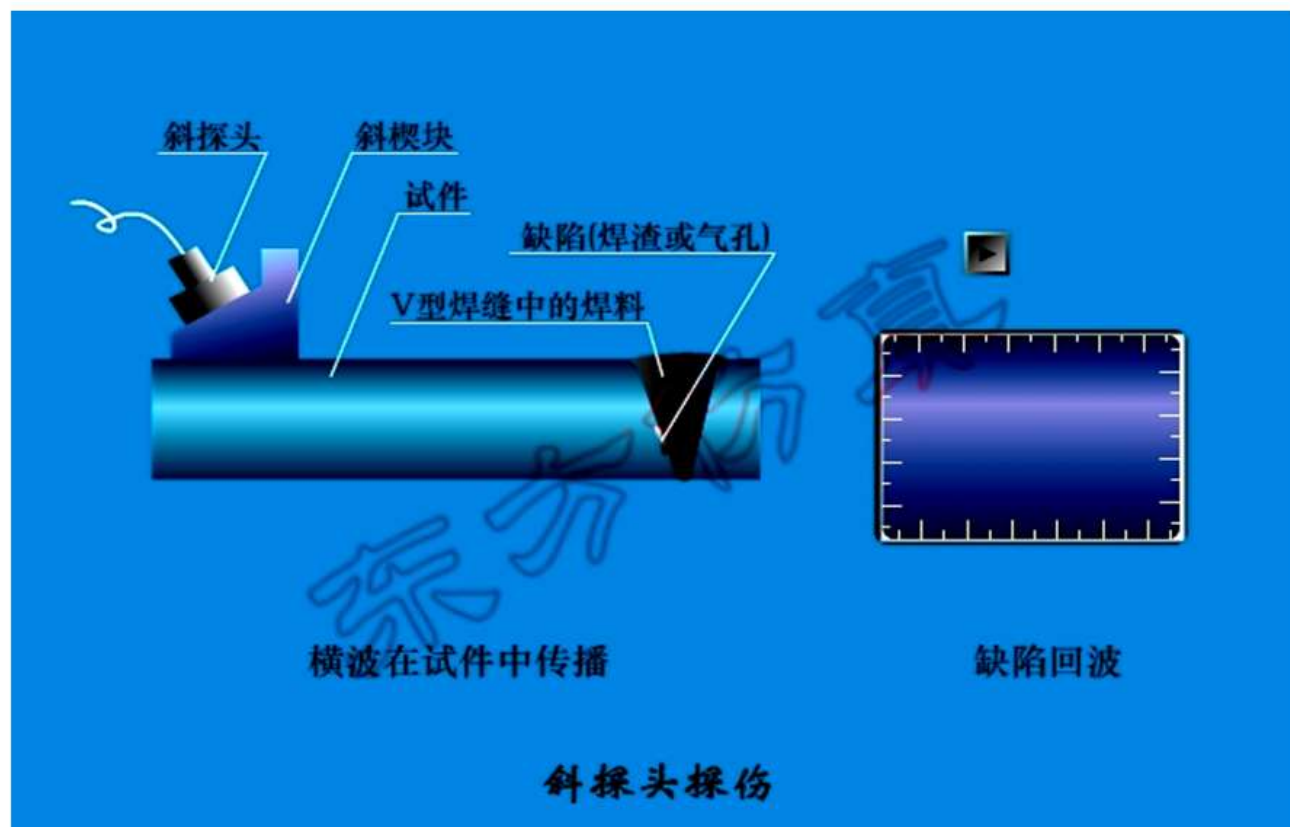
超声波测厚的原理



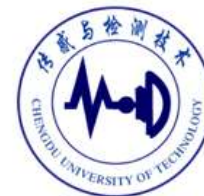
## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 超声波探伤传感器



## 第7章 压电元件与超声波传感器



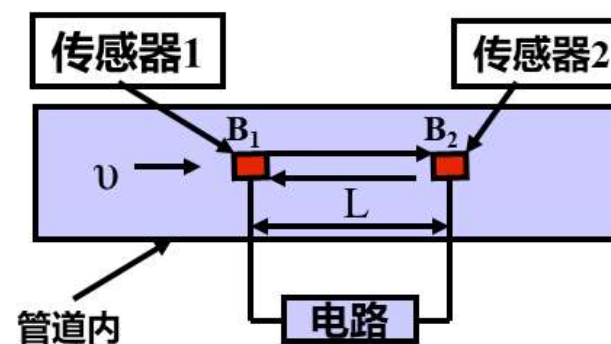
### 超声波流速检测

超声波在静止流体和流动流体中的传播速度是不同的, 分别在流体上游和下游放两个传感器, 同时发送、接收, 顺流和逆流超声波传播时间分别为:

$$\text{顺流: } t_1 = \frac{L}{c+v}, \text{ 逆流: } t_2 = \frac{L}{c-v}, \text{ 时间差: } \Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2Lv}{c^2 - v^2}$$

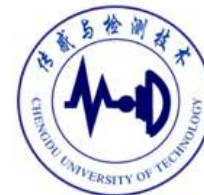
流体流速  $v$  远小于超声波在流体中传播速度  $c \gg v$  ;  
可求出近似流速:

$$v \approx \frac{c^2}{2L} \Delta t$$



超声波流速测量

## 第7章 压电元件与超声波传感器



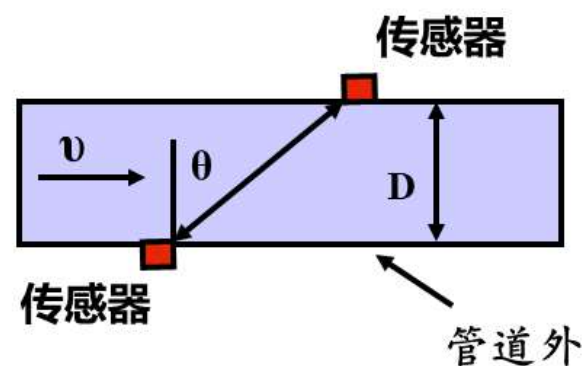
### 超声波流速检测

实际应用中传感器安装在管道外  
传播时间为：

$$t_1 = \frac{D / \cos \theta}{c + v \sin \theta}$$

$$t_2 = \frac{D / \cos \theta}{c - v \sin \theta}$$

$$v \approx \frac{c^2}{2Lv \cos \theta} \Delta t$$



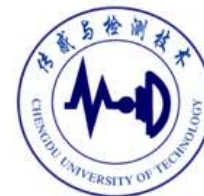
### 超声波流速测量

这种方法必须准确求出介质中**超声波速度** $c$ ，否则会引入误差。

如何不用声速求流速？



## 第7章 压电元件与超声波传感器

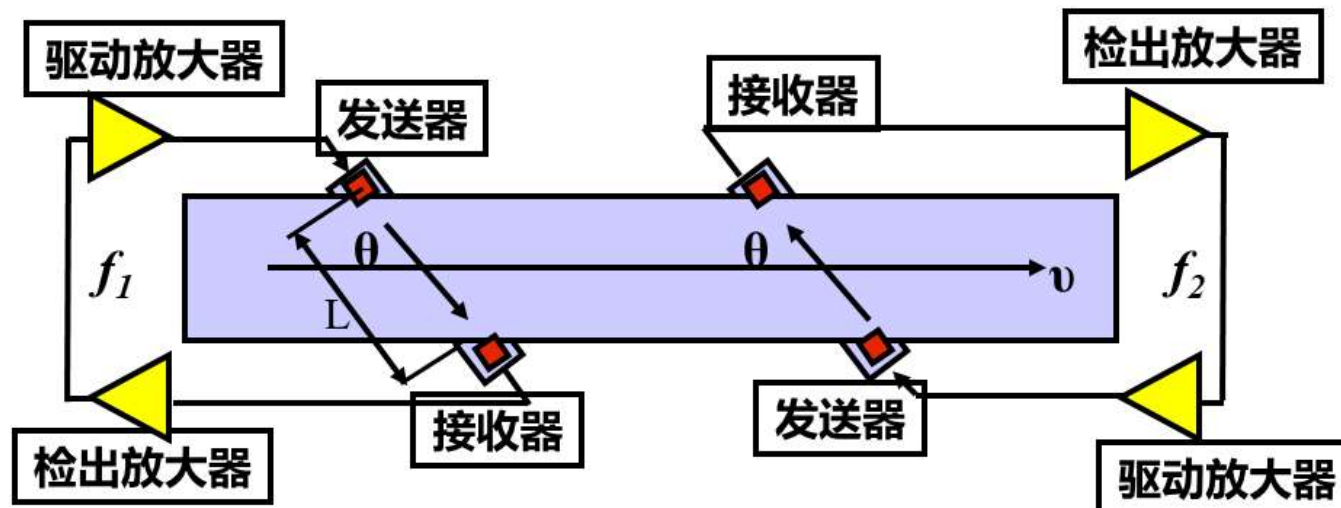


### 超声波流速检测

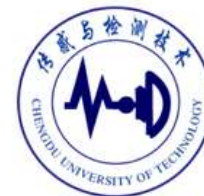
**辛格法流速测量（频率差）：**发送的超声波由接收器检出后，再发射下一个超声波脉冲，形成连续的脉冲发射状态，脉冲的发射频率为：

$$f = \frac{1}{t} = \frac{c \pm v \cos \theta}{l}$$

求出流速：  
不用声速求流速  $v = \frac{l(f_1 - f_2)}{2 \cos \theta}$



## 第7章 压电元件与超声波传感器

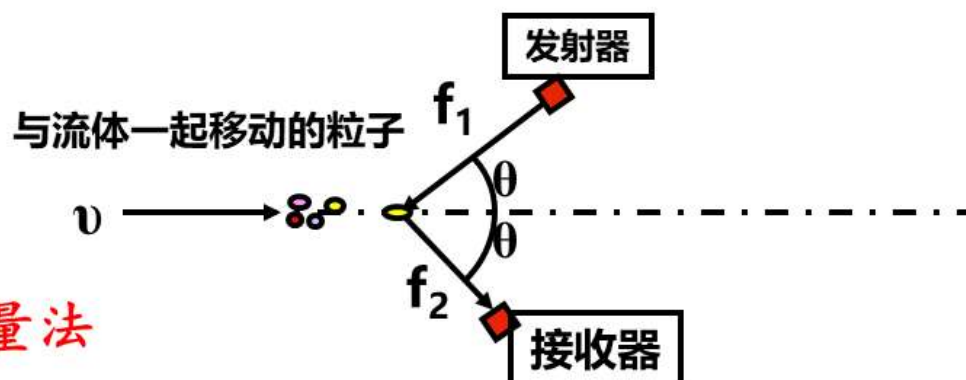


### 超声波流速检测

**多普勒流速测量法**: 流体内的微小颗粒物与流体有相同的移动速度, 利用超声波遇到物体会产生反射, 并且传播频率发生变化;

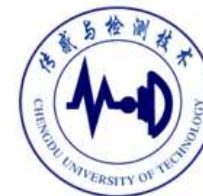
这种多普勒效应可以求出流速: 接收频率 $f_1$ 和发送频率 $f_2$ 的差, 称多普勒频率 $f$

$$f = f_2 - f_1 = \frac{2v \cos \theta}{c} f_2$$

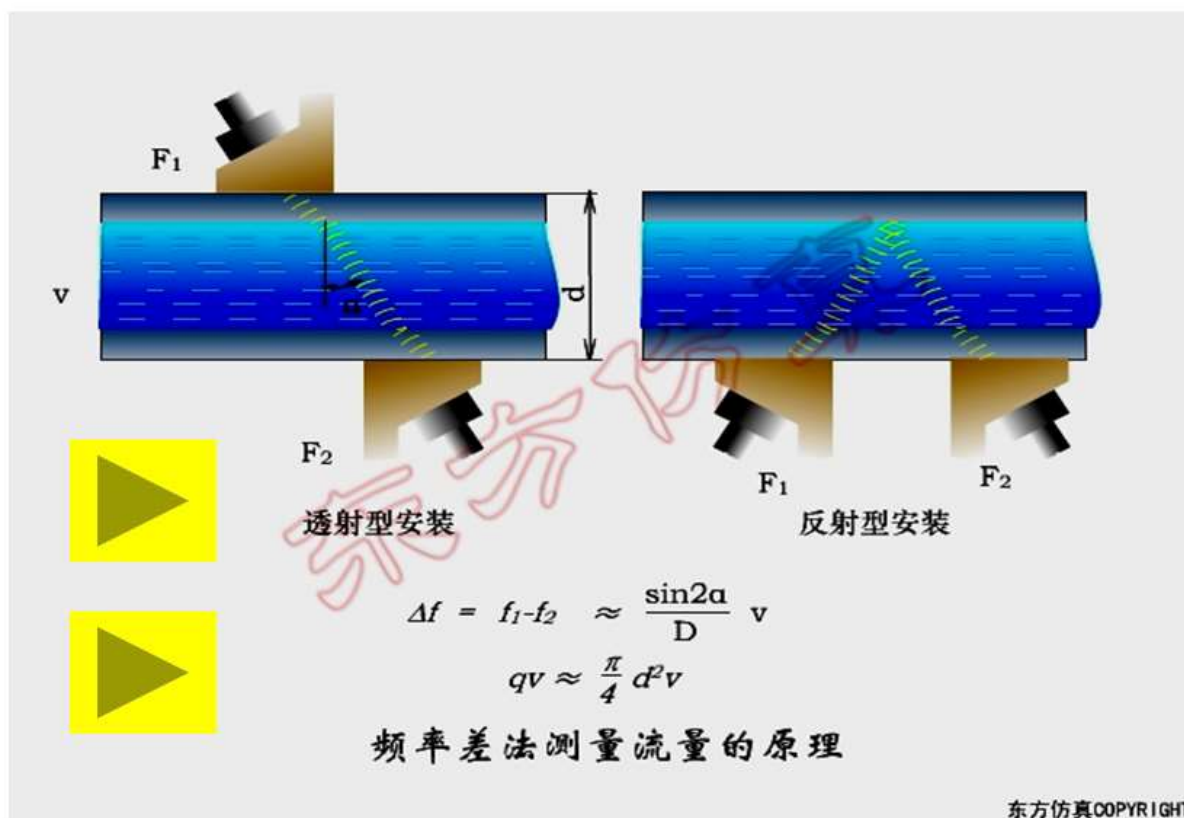


**多普勒流速测量法**

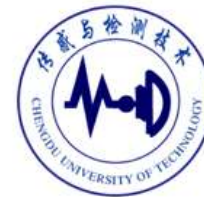
## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 超声波流量计



## 第7章 压电元件与超声波传感器



### 本章小结

压电效应、压电材料、压电元件及结构形式；  
压电传感器等效电路

测量电路

(1) 电压放大器

(2) 电荷放大器；

压电传感器的应用

超声波传感器及超声波传感器测距原理。



## 填空题 3分



5. 压电传感器输出信号很弱，必须接入 [填空1] 电路，其作用是： [填空2] [填空3]

## 主观题 4分



6.采用超声波传感器测距时，内部电路中低频振荡信号作用是什么？中心频率的作用是什么？