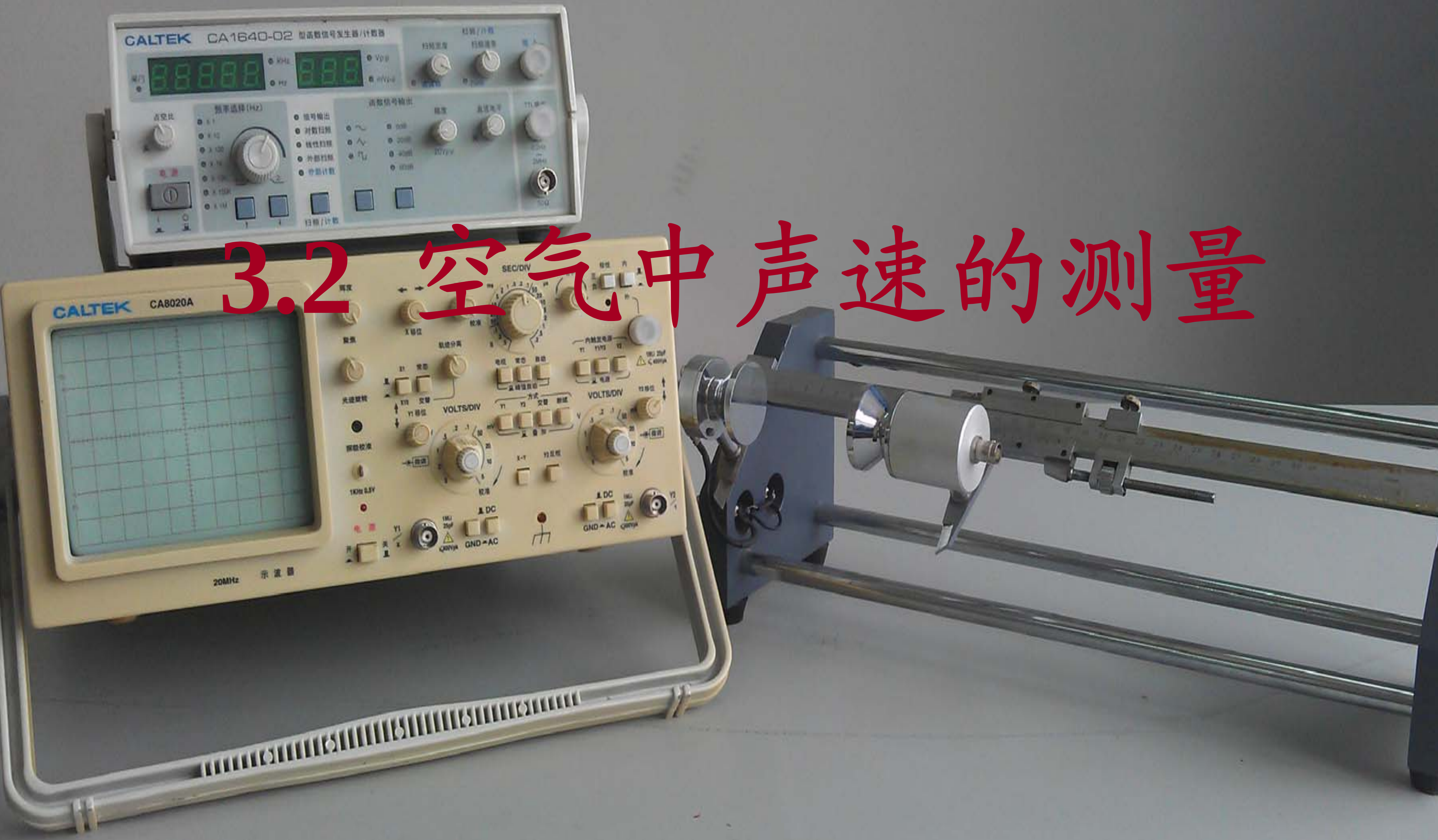
3.2 空气中声速的测量


CALTEK
CA1640-02
CALTEK
CA8020A
SEC/DIV
VOLTS/DIV
VOLTS/DIV
20MHz

实验简介

声波是一种在弹性媒质中传播的机械纵波。

可闻声波：频率在20Hz—20kHz的声波，
能被人耳听到

超声波：频率在高于20kHz的声波，

超声波：频率在低于20Hz的声波，

实验简介

声波特性的测量，如频率、波长、声速、声压、相位等，是声波检测技术中的重要内容。尤其是声速的测量，不仅可以了解媒质的特性而且还可以了解媒质的状态变化，在声波定位、探伤、测距等应用中具有重要的实用意义。

本实验是测量超声波在实验室空气中的波速，超声波的波长较短，它具有易于定向发射和不易被干扰等特点。

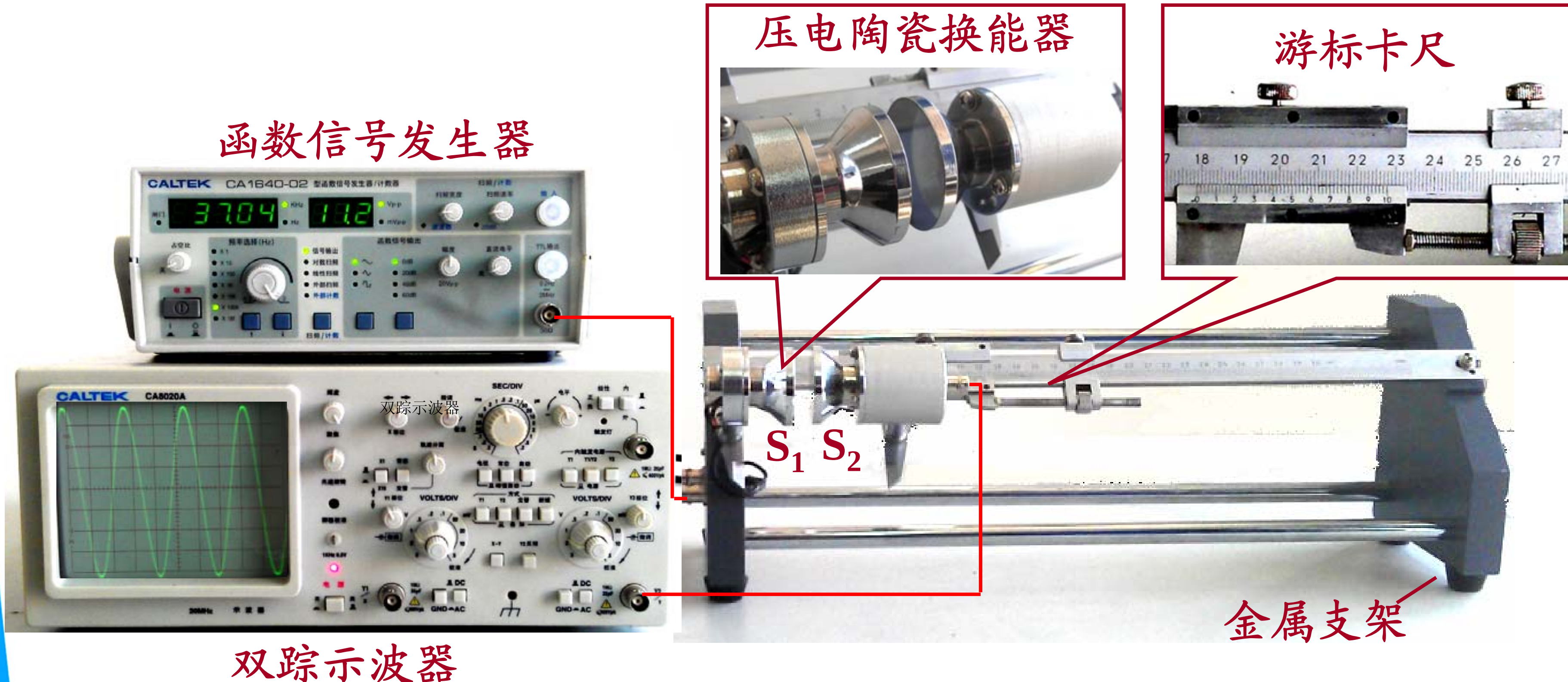
实验目的

1. 了解压电陶瓷换能器的功能。
2. 用驻波共振干涉法和相位比较法测量空气中的声速。
3. 熟悉示波器、信号发生器常用仪器的使用。
4. 掌握用最小二乘法处理数据的方法。

实验仪器

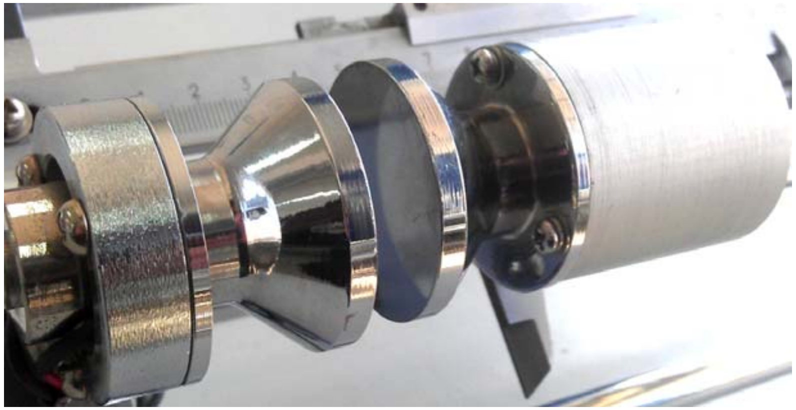
1. 超声声速测定仪（**SV1型**，$\Delta_{仪}=0.02\ \text{mm}$）；
2. 函数信号发生器（**CA1640-02型**，$\Delta_{仪}=5\,\text{Hz}$）；
3. 双踪示波器（**CA8020A型**）。

密立根油滴仪结构图


函数信号发生器
CALTEK CA1640-02
37.04
11.2
压电陶瓷换能器
游标卡尺
CALTEK CA8020A
双踪示波器
S1 S2
金属支架
双踪示波器

压电陶瓷换能器可用来实现声压和电压之间的转换。在压电陶瓷片的两个底面加上正弦交变电压，它就会按正弦规律发生纵向伸缩，从而发出超声波。同样压电陶瓷可以在声压的作用下把声波信号转化为电信号。

当信号发生器的输出频率与压电陶瓷管的固有频率相同时，产生共振，超声波振幅达到相对最大。



实验测量原理

本实验通过测量声波的频率 f 和波长 λ ，从而根据公式

$$\boxed{v = f \cdot \lambda}$$

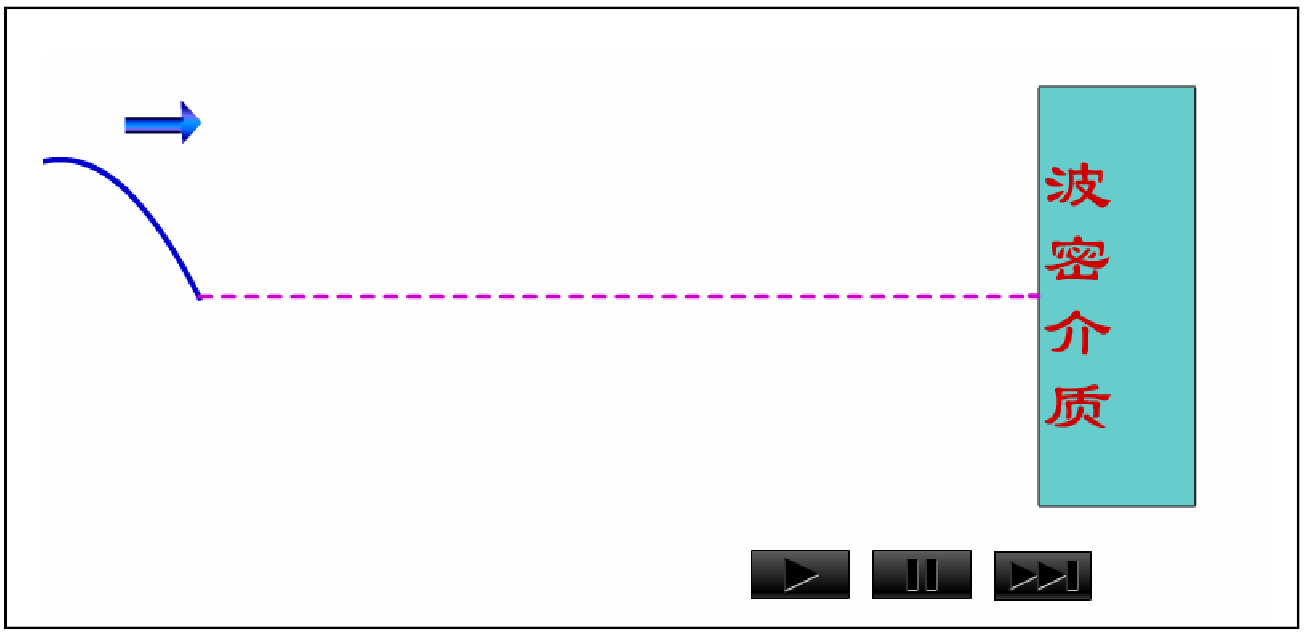
间接测量空气中声波的传播速度

1. 驻波法（共振干涉法）

半波损失现象 波疏介质 ——→ 波密介质

波疏介质

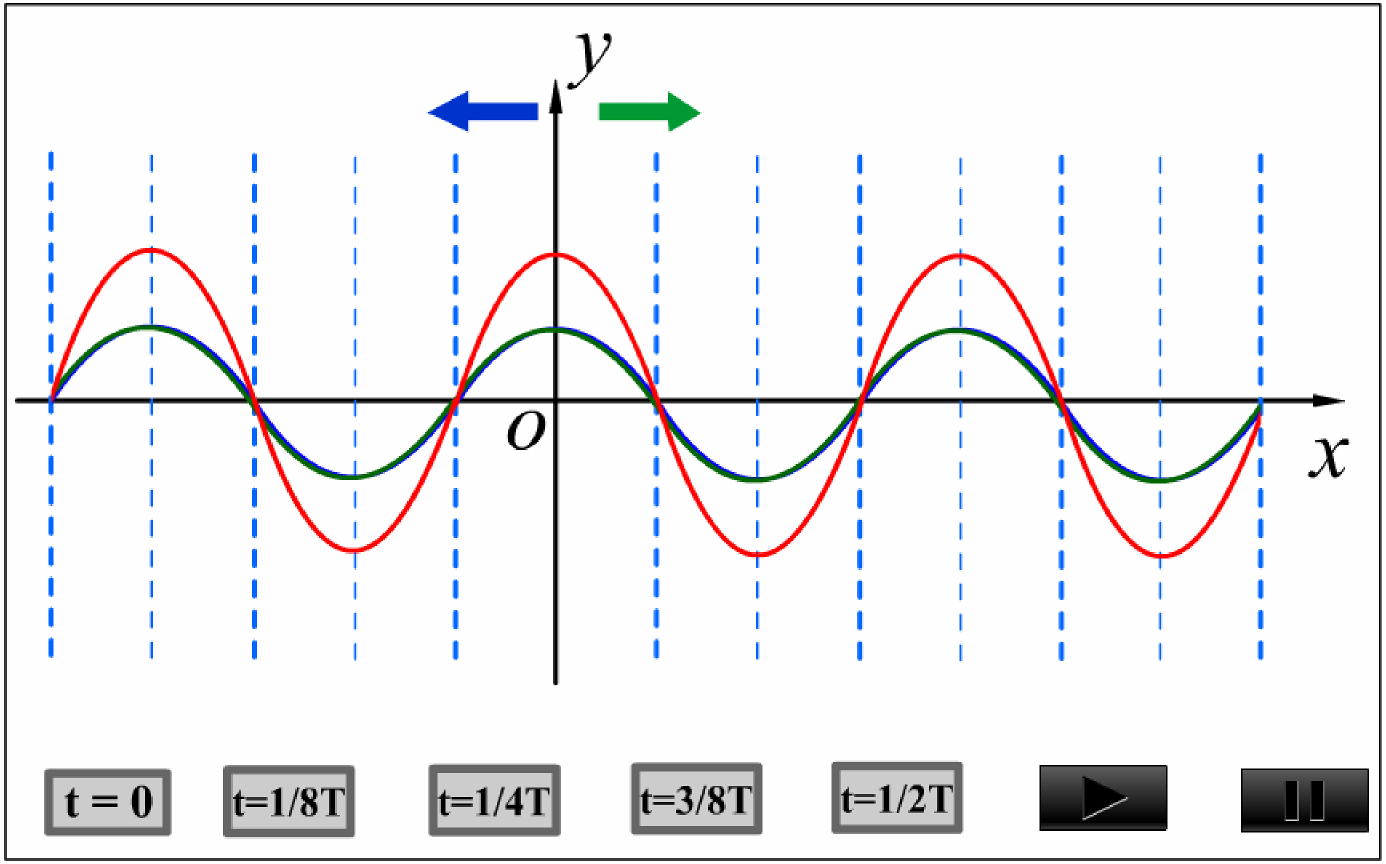
ρu 较小



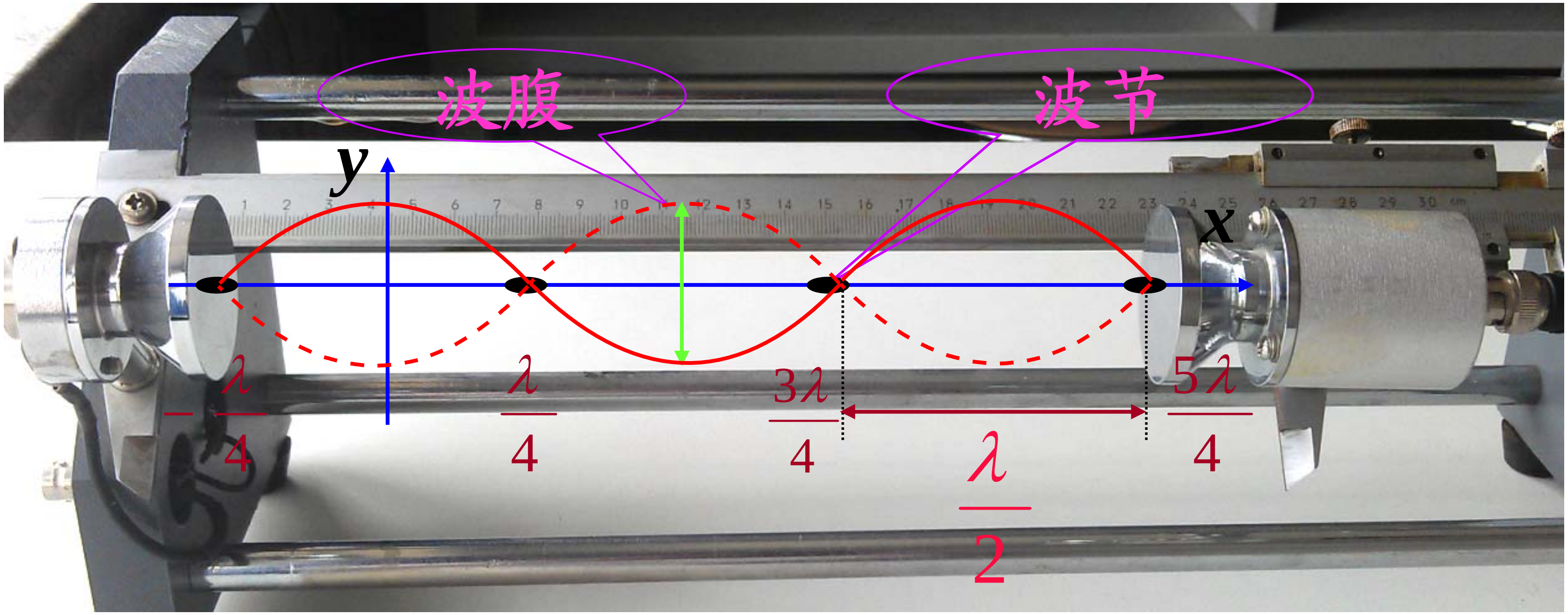
波密介质

ρu 较大

驻波的形成



驻波的特点是分段的振动



当两个换能器之间的距离l与波长λ的关系满足

$$l = \frac{n\lambda}{2}$$

时能得到振幅最大且稳定的驻波。

波节处: 声波压强最大

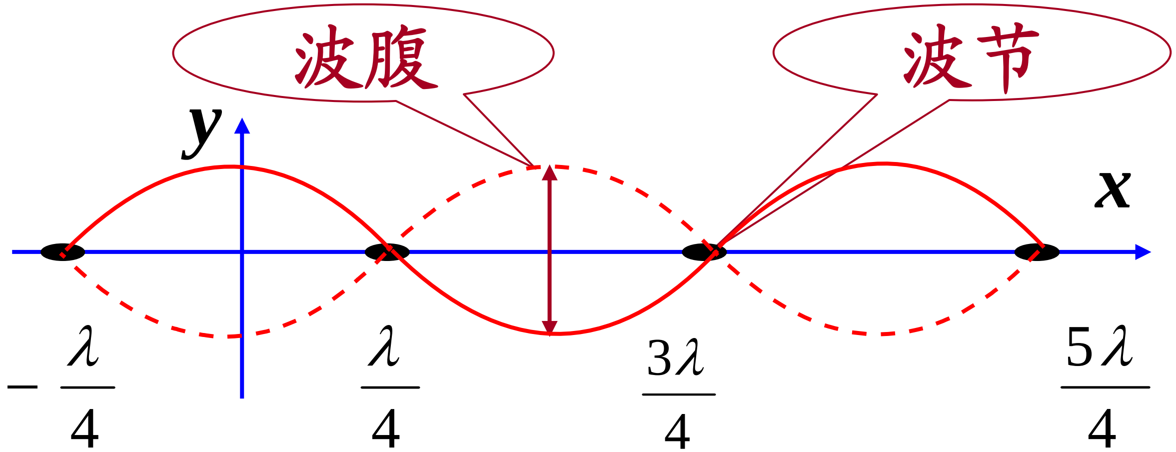
纵驻波波幅最小

电信号最强

波腹处: 声波压强最小

纵驻波波幅最大

电信号最弱



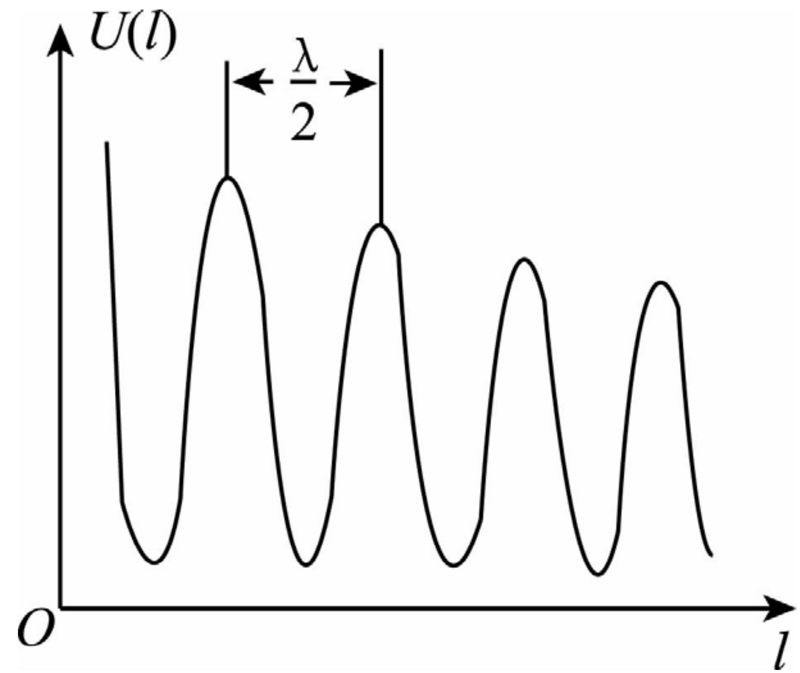
相邻波节和波腹的距离为 $\frac{\lambda}{4}$ 因此S_1和S_2之间距离

$$l=\frac{(2n+1)\lambda}{4}$$

时由S_2转换输出的电信号最弱。

连续改变S_1与S_2之间距离l值，有S_2转换输出的电压信号将在示波器上显示出最大和最小之间的周期性变化，相邻两次信号最大（或最小）对应的距离就是声波的半波长$\lambda/2$。

由于声波在传输过程中的衍射和其它损耗（非平面波、反射面小及介质吸收等因素造成），使声压极大值随 S_1与S_2的距离l的增大而逐渐减小，示波器观察到的各极大值的幅度是逐渐衰减的。



声压幅度的衰减并不影响波长的测定，我们只需要找到各周期中的极大值所对应的S_2的位置即可。

2. 相位比较法

波是振动状态的传播，也是相位的传播，均匀空气中沿波传播方向距离为**l**两点的相位差为

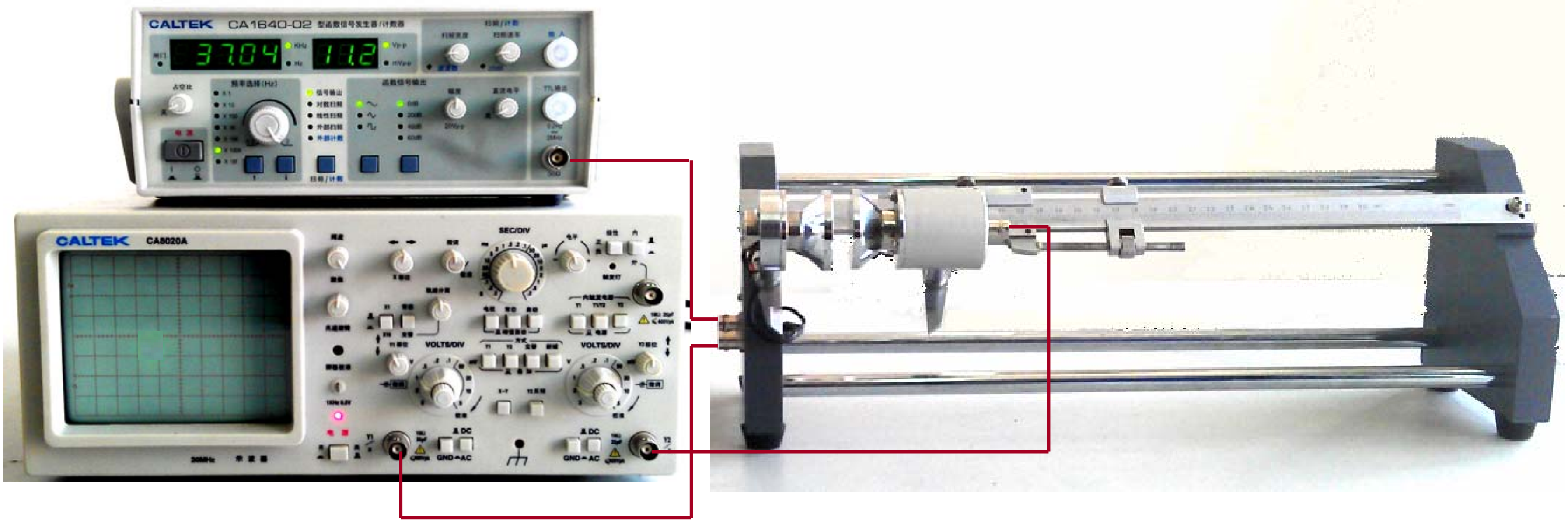
$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} l$$

相差一个波长的两点的振动状态完全相同（不考虑能量损耗）。因此振动相同两点之间的距离**l**满足

$$l = n\lambda$$

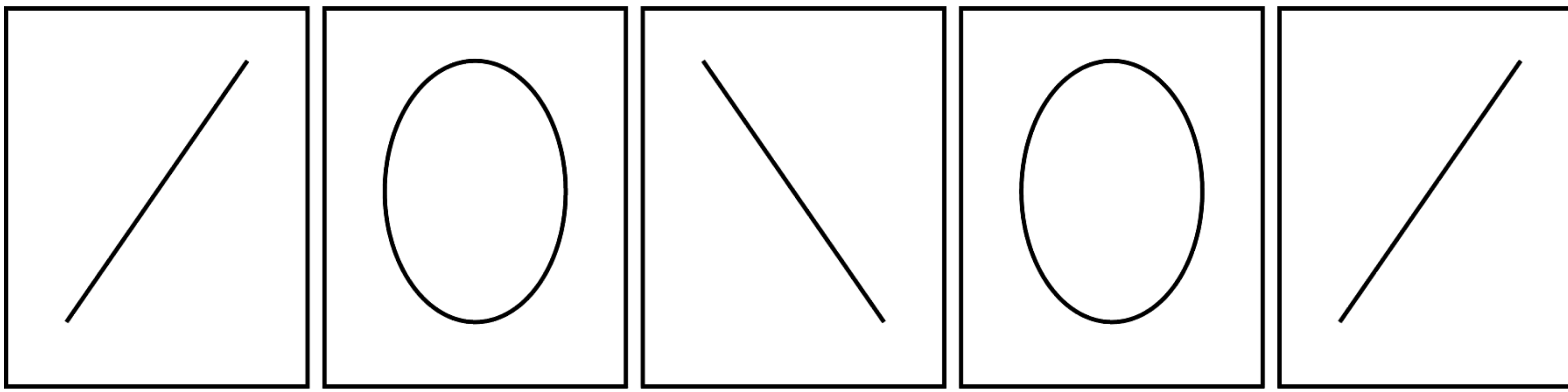
n为整数

相位差可以根据两个互相垂直的简谐振动合成所得到的利萨如图形来测定。



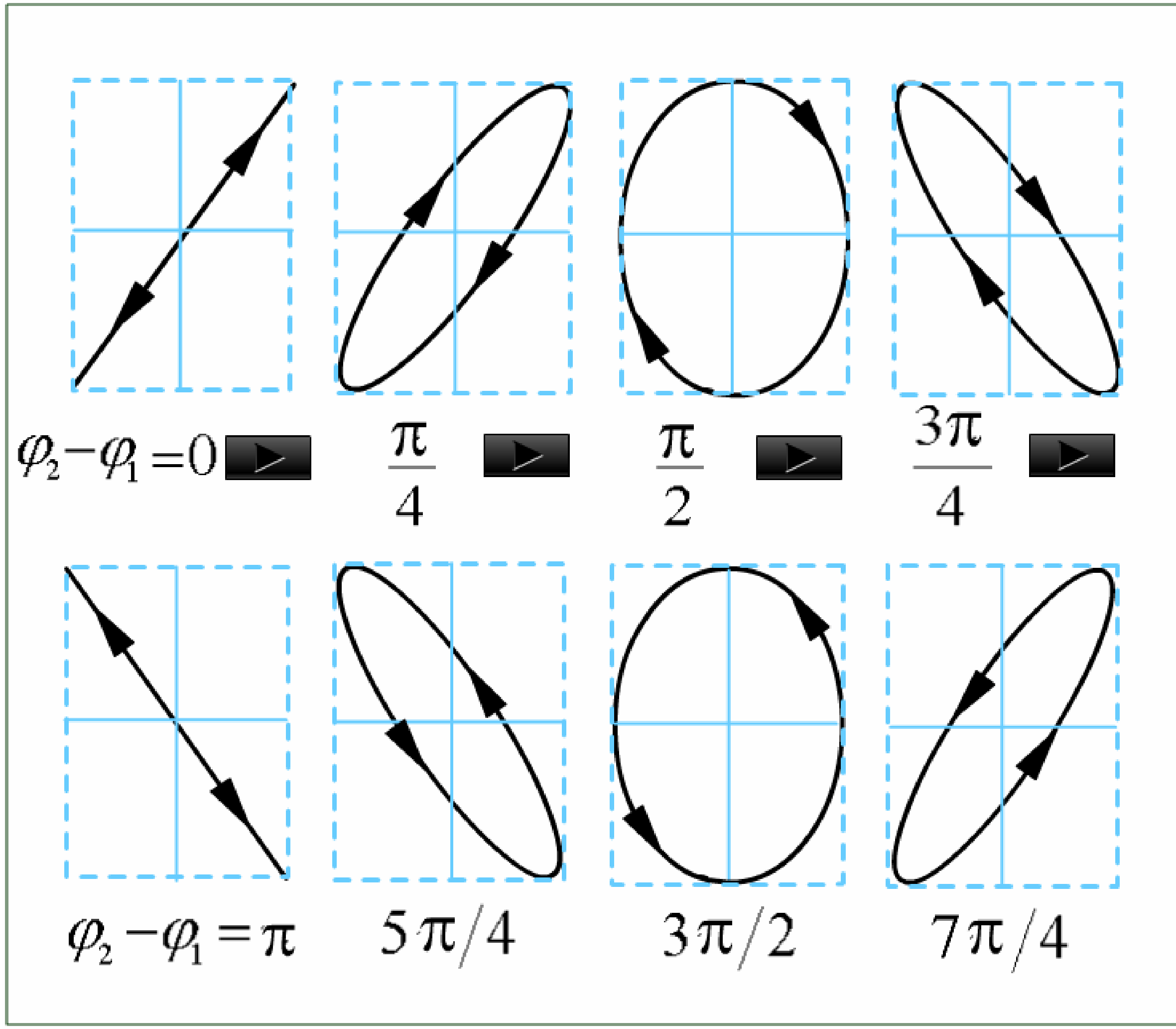
相位比较法接线图

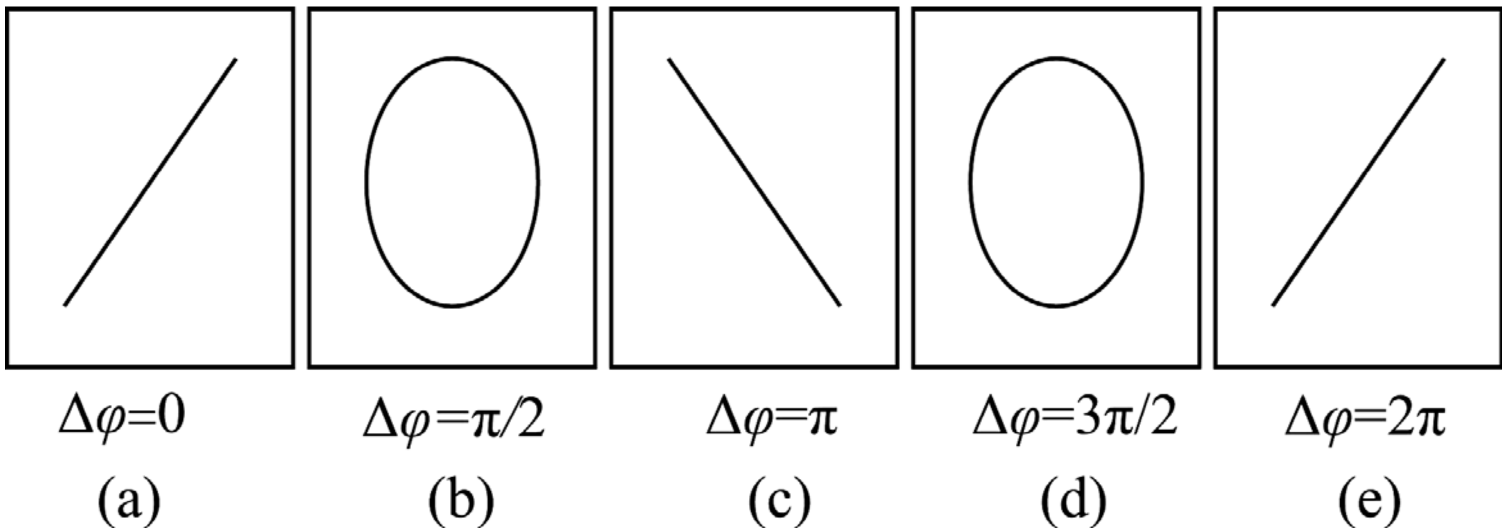
由于S_1端和S_2端电信号频率完全一致，因而示波器将呈现简单利萨如图形。



$\Delta\varphi=0$	$\Delta\varphi=\pi/2$	$\Delta\varphi=\pi$	$\Delta\varphi=3\pi/2$	$\Delta\varphi=2\pi$
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)

两相互垂直同频率不同相位差简谐运动的合成图





假如初始时图形如 **(a)**，连续移动$\mathbf{S_2}$一个波长距离（$l=\lambda$）时，图形逐渐变化为**(e)**，又回到**(a)**的图形，二者对应的相位差 $\Delta\varphi=2\pi$

实验内容与数据处理

1. 驻波共振法测量超声声速

(1) 按图接线（示波器选择x工作方式）

(2) 调节信号发生器输出正弦信号的频率， 达到**与换能器共振**。将信号发生器的输出频率调至压电晶体谐振频率**f=36000~38000Hz** 附近，调节S_1与S_2的距离约1cm，缓慢移动S_2，增大两者距离。

当在示波器上看到正弦波首次出现振幅较大时，固定S_2，再仔细微调信号发生器的输出频率，使荧光屏上图形振幅达到最大，读出共振频率f_0，记录与表3-2中。注意调节S_1和S_2的位置，使它们同轴且两端面平行。

表 3-2　声速测量数据（f_0 = ____ Hz，t = ____℃）

次数 x_0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
驻波法 l_i /mm										
相位法 l_i' /mm										

(3) 在共振条件下，将S_2移近S_1, 在缓慢移开S_2，当示波器上第一次出现振幅最大时，记下S_2的位置l_0，随后由近及远慢慢移动S_2，逐次记下各波幅极值点（示波器中观察）S_2的位置l_1，l_2，l_3，…l_9，记下实验室的温度，将数据记在表3-2中。

2. 相位比较法测量超声声速

(1) 调节实验装置和仪器，得到李萨如图形。

将输入S1的信号接入示波器的*x*输入端，将接收信号电压接到示波器的*y*输入端，示波器选择*x-y*工作方式。

(2) 改变S_2的位置，从找到第一个斜线型利萨如图形开始测量，记下S_2的位置 l_0'，连续移动S_2，每次得到与前次相同的利萨如图形时，读出S_2的位置坐标 $l_1', l_2', l_3', \cdots l_9'$, 记录与表3-2中。

3. 数据处理及误差分析

(1) 用最小二乘法分别处理两种方法得到的数据，计算波长 λ 和声速 v。

驻波法： $$l(n)=l_0+\frac{\lambda}{2}n$$

波长等于斜率的2倍

相位比较法： $$l'(n)=l'_0+\lambda\cdot n$$

波长等于斜率

声速：

$$\boxed{v=f_0\cdot\lambda}$$

(2) 由 $v = f \cdot \lambda$ 分别计算两种方法声速的不确定度 U_v。分别给出实验结果表达式

$$v = (\bar{v} \pm U_v)\ \mathbf{m/s}$$

将测量的声速与温度为t℃，相对湿度为r的空气声速理论值进行比较。

$$v = 331.5\sqrt{(1+\frac{t}{273.15})(1+0.319\frac{rp_s}{p})}$$

式中，p_s为室温时空气的饱和水蒸汽压（有表可查），p以标准状态下的大气压带入，r可由干湿温度计读出。。

注意事项

(1) 实验中S_2的移动时要缓慢，并时刻注意示波器上图形的变化，不能因为图形变化过度而使S_2向后移动。

(2) 实验中声波频率应于压电陶瓷换能器的共振频率一致，这时接收器的灵敏度最高。

思考题

(1) 实验要求信号源与换能器固有频率一致，在谐振情况下进行测量，为什么这样要求?

(2) 在驻波共振干涉法测声速时，要求实验装置中**S1**和**S2**严格平行，这是为什么？在相位比较法中是否仍然要求**S1**和**S2**端面严格平行?说明理由。

附录

利用最小二乘法计算声速数据处理

驻波法: $$l(n)=l_0+\frac{\lambda}{2}n$$

斜率 $$k=\frac{\bar{n}\cdot\bar{l}_n-\overline{nl_n}}{\bar{n}^2-\overline{n^2}}=\frac{\lambda}{2}\qquad \lambda=2\cdot\frac{\bar{n}\cdot\bar{l}_n-\overline{nl_n}}{\bar{n}^2-\overline{n^2}}$$

驻波法声速: $$\bar{v}=f_0\cdot\lambda$$

声速不确定度: $$U_v=v\cdot\sqrt{\left(\frac{U_f}{f}\right)^2+\left(\frac{U_\lambda}{\lambda}\right)^2}$$

声速不确定度：$U_v = v \cdot \sqrt{(\frac{U_f}{f})^2 + (\frac{U_\lambda}{\lambda})^2}$

$$U_f = 5\,\mathrm{Hz} \qquad U_\lambda = 2S(\frac{\lambda}{2})$$

$$S(\frac{\lambda}{2}) = \frac{1}{\sqrt{9[\overline{n^2} - \overline{n}^2]}} \cdot S(l)$$

$$S(l) = \sqrt{\frac{1}{9-2}\sum_{i=1}^{9}[l_n - (l_0 + \frac{\lambda}{2}n)]^2}$$

相位比较法： $l'(n) = l'_0 + \lambda n$

$$\lambda = k = \frac{\bar{n} \cdot \bar{l}'_n - \overline{n l'_n}}{\bar{n}^2 - \overline{n^2}}$$

驻波法声速： $\bar{v} = f_0 \cdot \lambda$

声速不确定度： $U_v = v \cdot \sqrt{\left(\frac{U_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{U_\lambda}{\lambda}\right)^2}$

$$U_f = 5\,\mathrm{Hz} \qquad U_\lambda = 2S(\lambda)$$

$$S(\lambda) = \frac{S(l')}{\sqrt{9[\overline{n^2} - \bar{n}^2]}} \qquad S(l') = \sqrt{\frac{1}{9-2}\sum_{i=1}^{9}[l'_n - (l'_0 + \frac{\lambda}{2} n)]^2}$$