

### 实验 4.2.3 声速的测量

声波是一种在弹性媒质中传播的纵波，频率从 20Hz 到 20KHz 的声波称为可听波，可以被人类分辨。频率低于 20Hz 的声波为次声波，频率高于 20KHz 的声波为超声波。由于超声波具有波长短，能定向传播等优点，在超声波波段对声速测量比较方便。由于声波的传播与媒质的特性和状态等因素有关，因此通过声速的测量，可以了解被测媒质的特性及状态的变化。此外，通过声速的测量，还可分析的气体成份、测定溶液的浓度、确定固体材料的弹性模量等。本实验的目的是了解压电换能器的工作原理，学习超声波的产生、发射和接收方法，并用驻波法和相位法测量波长和声速。

#### 实验原理

声速测量的常用方法有两类，一类测量声波传播距离  $L$  和时间间隔  $t$ ，即可根据  $v = L/t$  计算出声速  $v$ ；另一类是测出频率  $f$  和波长  $\lambda$ ，利用关系式

$$v = f \cdot \lambda \quad (1)$$

计算声速  $v$ 。本实验采用第二种方法测量。

虽然公式(1)给出的声速等于频率与波长的乘积，但是声波在空气中的传播速度与声波的频率是无关的，而只取决于空气本身的性质。声速的理论值由下式决定：

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}} \quad (2)$$

式中  $\gamma$  为空气定压比热容与定体比热容之比， $R$  为普适气体常量， $\mu$  为气体的摩尔质量， $T$  为热力学温度。在  $0^\circ\text{C}$  时，声速  $v_0 = 331.45\text{m/s}$ 。显然在  $t^\circ\text{C}$  时的声速应为：

$$v_t = v_0 \sqrt{\frac{T}{273.15}} = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \quad (3)$$

如果测到了声速，由 (2) 式还可求出空气的比热容比  $\gamma$ 。

实验中超声波是由交流电信号产生的，所以 (1) 式中声波的频率  $f$  就是交流电信号的频率，由信号发生器中的频率显示可直接读出。因此，本实验的主要任务就是测量声波的波长。

测量声波波长方法有驻波法、相位法两种。

#### 1. 驻波法

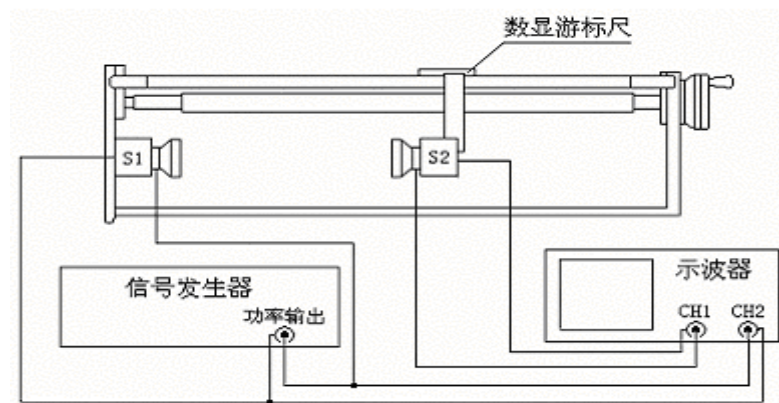


图 4. 2. 3-1 实验装置图

实验装置如图 4. 2. 3-1 所示，超声发射器  $S_1$  作为超声波源。信号发生器发出的信号接入  $S_1$  后， $S_1$  即发射出一平面超声波。超声波接收器  $S_2$ ，接收一部分超声波转换成电信号后，输入示波器进行观察，同时反射一部分超声波。这样，由  $S_1$  发出的超声波和由  $S_2$  反射的超声波在  $S_1$ 、 $S_2$  之间叠加相干而出现驻波。

设声源在  $x$  坐标轴原点，由声源发出的平面简谐波沿  $x$  轴正向传播，为入射波，经一个理想平面反射后沿  $x$  轴负方向传播，为反射波。

$$\text{入射波方程为： } x_1 = A \cos 2\pi \left( ft - \frac{x}{\lambda} \right)$$

$$\text{反射波方程为： } x_2 = A \cos 2\pi \left( ft + \frac{x}{\lambda} \right)$$

$$\text{在两波相遇处，合成的声波为： } x = (2A \cos 2\pi \frac{x}{\lambda}) \cos 2\pi f t$$

上式表明，两波合成的结果是驻波。在两波相遇处各点都在作同频率的振动，而各点的振幅  $(2A \cos 2\pi \frac{x}{\lambda})$  是位置  $x$  的余弦函数。对应于  $\left| \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \right| = 1$ ，即

$$x = \pm K \frac{\lambda}{2} \quad (K = 0, 1, 2, \dots)$$

处，振幅最大为  $2A$ ，称为波腹；对应于  $\left| \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \right| = 0$ ，

$$\text{即 } x = \pm (2K + 1) \frac{\lambda}{4} \quad (K = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

处，振幅最小为零，称为波节。

其余各点的振幅在 0 和最大值之间，两相邻波腹（或波节）间的距离均为  $\frac{\lambda}{2}$ 。

当移动  $S_2$ ，使  $S_1$  与  $S_2$  之间的距离  $l$  为半波长的整数倍时，即

$$l = n \frac{\lambda}{2} \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (4)$$

示波器上可观察到信号幅度的极大值（或极小值）。相邻两极值点之间的距

离为 $\frac{\lambda}{2}$ 。

## 2. 相位比较法

从发射器 $S_1$ 发出的超声波近似于平面波，沿着此波传播方向上，相位相同或相位差为 $2\pi$ 的整数倍的任意两点位置之间的距离 $l$ 等于波长的整数倍，即 $l = n\lambda$ （ $n$ 为正整数）。当接收器端面垂直于波的传播方向时，其端面上各点都具有相同的位相。沿传播方向移动接收器 $S_2$ 时，总可找到一个位置使得接收到的信号与激励信号即函数信号发生器发出的信号同相。继续移动 $S_2$ ，直到接收到的信号再一次和激励信号同相时，移过的这段距离必然等于超声波的波长。

相位差可根据两个互相垂直的简谐振动的合成所得到的李萨如图来测定。将信号发生器发出的信号接入示波器的通道 1（CH1）输入端，将 $S_2$ 接收到的电信号接到示波器的通道 2（CH2）输入端，并使两路信号叠加一起，由于两端电信号频率相同，因而叠加合成如下图的李萨如图形，图的形状由两信号的相位差 $\Phi$ 决定。假如初始时图形如图 4. 2. 3-2（a）， $S_2$ 移动距离为半波长 $\frac{\lambda}{2}$ 时，图形变化为图 4. 2. 3-2（e）； $S_2$ 移动距离为 $\lambda$ 时，图形变回图 4. 2. 3-2（a），所以通过对李萨如图形的观测，就能确定声波的波长。

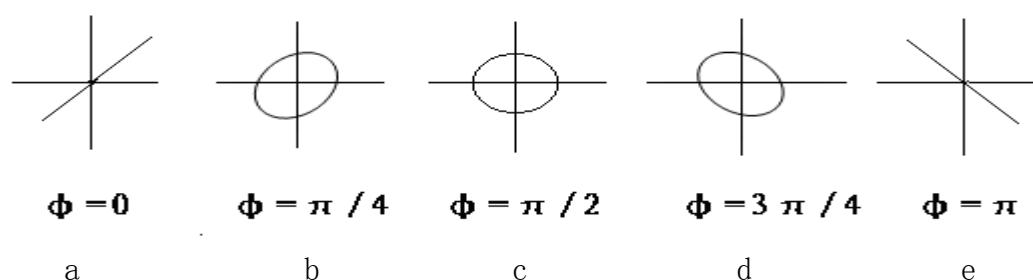


图 4. 2. 3-2 同频率互相垂直的谐振动合成的李萨如图形

## 实验内容

### 实验仪器

信号发生器，示波器，超声声速测定仪等

### 1. 调整仪器使系统处于最佳工作状态

（1）实验装置和接线如图 4. 2. 3-1 所示。调节发射换能器的端面 $S_1$ ，使其与游标卡尺滑动方向垂直；接收换能器 $S_2$ 的端面与 $S_1$ 平行。

(2) 寻找系统的谐振频率，并调整低频信号发生器，使其输出频率为系统的谐振频率。具体方法是：旋转右侧手轮，移动游标和接收换能器 S2，使 S1 和 S2 端面距离 5cm 左右，调整低频信号发生器的输出强度和接收增益，同时调整示波器，使示波器屏幕上有适当的信号幅度；然后旋转手轮移动游标和 S2，找到信号最强的位置，再调节信号发生器的输出频率，使示波器上的信号幅度最大。此时，信号发生器的输出频率即为本系统的谐振频率。上述过程反复数次，以寻找本系统准确的谐振频率  $f_0$ 。

## 2. 用共振干涉法（又称驻波法）测量波长和声速

(1) 调整信号发生器输出频率为本系统准确的谐振频率  $f_0$ 。

(2) 测量前旋转手轮，将 S2 从一端缓慢移向另一端，并来回几次，观察示波器上信号幅度的变化，了解波的干涉现象。测量时，选择一个信号幅度最大处为起点，记下 S2 的位置，缓慢移动 S2，增大（或减小）S1 与 S2 的间距，依次记录每次信号幅度最大时 S2 的位置  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  共 12 个值。

(3) 用逐差法处理数据，求出超声波的波长，再用公式  $v = f \times \lambda$ ，计算声速。

## 3. 用相位比较法测量波长和声速

(1) 调整信号发生器输出频率为本系统准确的谐振频率  $f_0$ 。增加一根导线，把信号发生器的输出信号直接接入示波器的 X 输入端（CH1 通道），调节示波器使屏上出现李萨如图形。

(2) 缓慢移动 S2，增大（或减小）S1 与 S2 的间距，示波器上就会反复出现周期性的李萨如图形。选择李萨如图形为直线时为起点，S2 每移动整个波长，就会出现一次直线图形。依次记录示波器上出现直线时 S2 所对应的位置  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  共 12 个值。

(3) 用逐差法处理数据，求出超声波的波长，再用公式  $v = f \times \lambda$ ，计算声速。

## 4. 查找文献, 计算实验内容 2 中驻波法的不确定度

### 思考题

1、 固定两换能器的距离改变频率，以求声速，是否可行？

2、 各种气体中的声速是否相同，为什么？

#### 参考资料

1. 谢行恕，康士秀，霍剑青主编. 大学物理实验（第二册）. 北京：高等教育出版社，2005.