

3.1 声速的测定

[实验目的]

1. 了解超声波产生和接收的原理；
2. 学习一种测量空气中声速的方法，加深对波相位的理解。

[实验原理]

1. 声波在空气中的传播速度

在理想气体中，声波的传播速度为

$$V = \sqrt{\frac{rRT}{M}} \quad (3.1.1)$$

式中 r 为比热容比，即气体定压比热容与定容比热容的比值， M 是气体的摩尔质量， T 是绝对温度， $R = 8.31441 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 为普适气体常数。由式 (3.1.1) 可见，声速和温度 T 、摩尔质量 M 和比热容比 r 三个因素有关，后两个因素与气体成分有关。因此，测定声速可以推算出气体的一些参量。

在正常情况下，干燥空气成分按重量比为：氮：氧：氢：二氧化碳 = 78.084 : 20.946 : 0.934 : 0.033，它的平均摩尔质量为 $M_a = 28.964 \times 10^{-3} \text{ kg} / \text{mol}$ 。在标准状态下，干燥空气中在摄氏 0°C 时的声速为 $V_0 = 331.45 \text{ m} / \text{s}$ 。在室温 t 时，干燥空气中的声速为

$$V = V_0 \sqrt{1 + \frac{t}{T_0}} = V_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (3.1.2)$$

上式中 t 为摄氏温度， $T_0 = 273.15 \text{ K}$ ，式 (3.1.2) 可作为空气中声速的理论计算公式。

2. 声速的测量方法

根据波动理论，声波的传播速度 v 与声波频率 f 及波长 λ 的关系为

$$v = f\lambda \quad (3.1.3)$$

只要精确测出声波的频率和波长，就可以求出声速。由于本实验使用交流电信号来激励换能发声器产生声波，所以声波的频率就是电信号与发声器谐振时的频率。电信号的频率可由信号源直接读出，这样声波的频率就知道，剩下的任务就是测量声波波长，也就是本实验的主要任务，波长可用相位法测出。

在图 3.1.1 中，当发声器 s_1 发出的超声波到达接收器 s_2 时，发射波与接收波之间有 $\Delta\varphi$ 的相位差。设 s_1 与 s_2 之间距离为 x ，则有

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{x}{\lambda} \quad (3.1.4)$$

从式(3.1.4)可以看出，当 x 变化一个 λ 时， $\Delta\varphi$ 变化 2π 。因此，可以反过来通过观测 s_1 处的发射波与 s_2 处的接收波之间的相位差变化来测定声波的波长，也就是观测 $\Delta\varphi$ 每变化一个 2π 时， s_2 移动的距离必然等于声波的一个波长 λ 。

判断相位差的变化常用以下两种办法：

一种方法是利用双踪示波器直接比较发声器的激励信号和接收器的

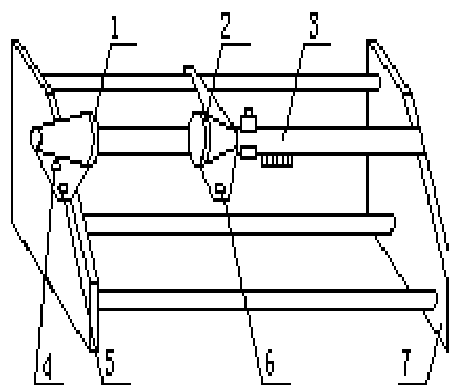


图 3.1.1 声速测定仪结构图

- 1-发声换能器；2-接收换能器；3-游标尺；
4-谐振指示灯；5-信号输入插孔；
6-信号输出插孔；7-支架

转换电信号之间的相位，同时沿传播方向移动接收器寻找同相点。在图 3.1.2 所示的示波器图形中，由图 3.1.2 (a) 变为图 3.1.2 (b) 时相位差变化了 π ；由图 3.1.2 (a) 变为图 3.1.2 (c) 时相位差变化了 2π 。

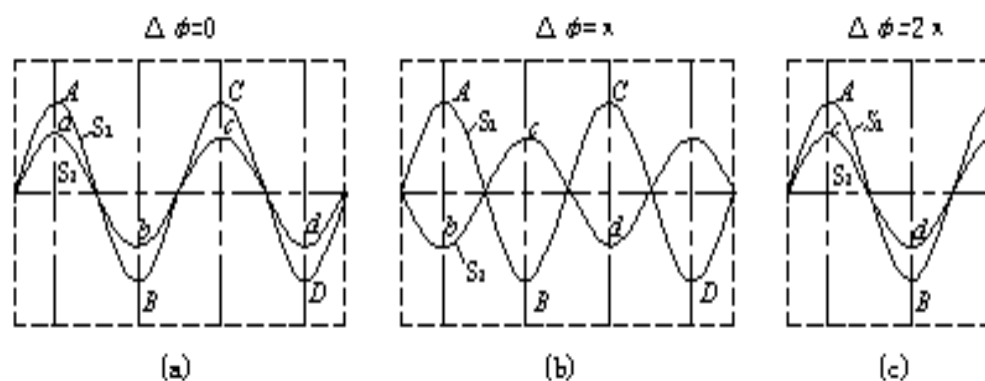


图 3.1.2 不同相位差 s_2 相对 s_1 的图形

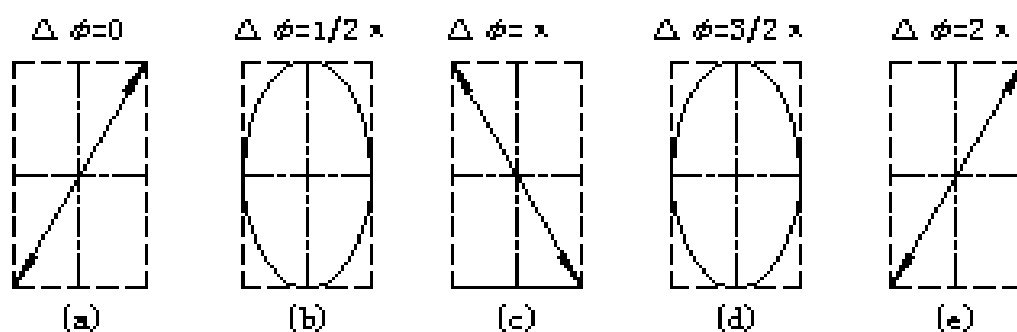


图 3.1.3 不同相位差时的椭圆图形

另一种方法是利用李萨如图形进行测量，将电信号 s_1 及 s_2 的电信号分别送至示波器的 X、Y 偏转板，在示波器上将会出现李萨茹图形。该图形为椭圆，而且椭圆的长轴、短轴和方向由相位差 $\Delta\phi$ 决定，当 $\Delta\phi$ 由 $0 \sim 2\pi$ 变化时，椭圆的形状也随之变化，如图 3.1.3 所示。每当相位差变化 2π 时，椭圆变到原来的形状。利用这种图形随 s_1 与 s_2 距离的周期性变化，即可测出波长 λ 。

以上两种方法都可用来准确的判断相位差的变化，从而能准确地测量波长。

[实验仪器]

1. 声速测定仪

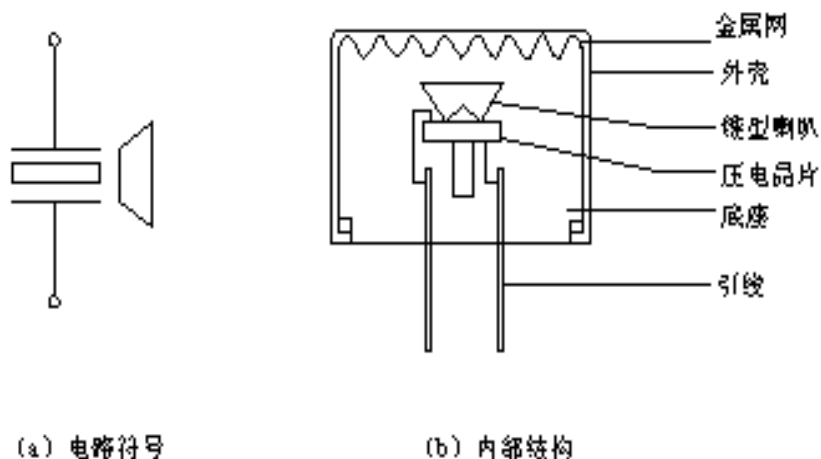


图 3.1.4 压电陶瓷换能器

声速测定仪由压电陶瓷超声换能器 s_1 、 s_2 以及游标尺组成，如图 3.1.1 所示。压电陶瓷超声换能器是用来产生和接收超声波的，其外形及内部结构如图 3.1.4 所示。它是由压电陶瓷晶片、锥形辐射喇叭、底座、引线、金属外壳及金属网构成。其中压电陶瓷晶片是传感器的核心，它是利用压电体的逆压电效应产生超声波，即在交变电压作用下，压电体产生机械振动而在空气中激发出声波，它还能利用压电体的压电效应接收超声波。锥形辐射喇叭使发射和接收的超声波比较集中，使发射和接收超声波有一定的方向角。本实验中压电陶瓷晶片的振荡频率为 40KHZ 左右。

在声速测定仪中， s_1 为发射器， s_2 为接收器。 s_1 固定不动， s_2 可相对 s_1 移动，移动的距离（或位置）由游标尺读出。当信号源激励信号的频率和发射器 s_1 的固有频率（振荡频率）相同时， s_1 调谐指示灯最亮， s_1 发出超声波。

2. 信号源

信号源输出频率为 $30 \sim 45 \text{ KHZ}$ 的正弦波，频率调节有粗调和细调，频率在数码管上显示。输出电压值为 10V 左右。

3. 示波器

本实验所用示波器为双踪示波器，其使用方法这里不再叙述，可参看实验讲义中的相关内容。

[实验操作]

1. 仪器调整

按图 3.1.5 接好电路， s_1 、 s_2 的输入和输出插口均为红色，黑色为接地插口。松开 s_2 下面的紧固螺母，调节 s_1 、 s_2 的两个端面稍偏离平行位置，调节信号源上的频率粗调旋钮，使 s_1 上的指示灯点亮，再调节频率微调，使 s_1 上的指示灯达到最亮。

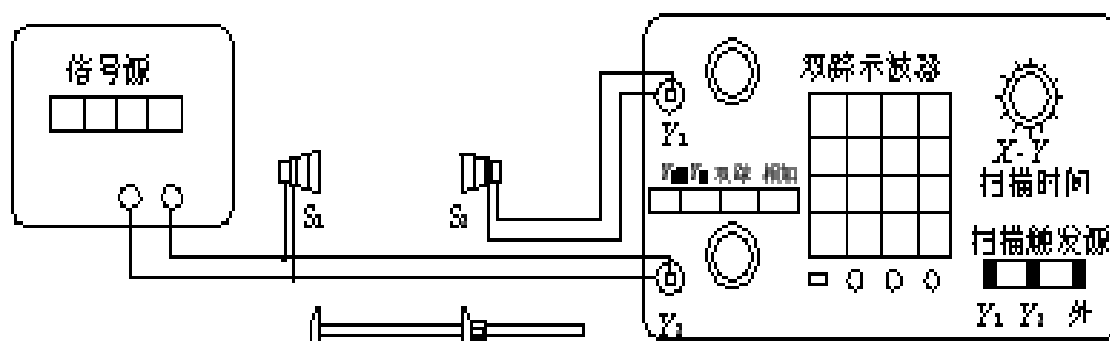


图 3.1.5 声速测量接线图

2. 用双踪示波器直接测波长

在图 3.1.5 中把双踪示波器的“垂直显示模式”置于“双踪”位置，找到 s_1 、 s_2 超声信号的图形，调整两个图形大小适当并稳定。移动 s_2 使示波器显示的图形如图 3.1.2(a) 所示，记录 s_2 的起始位置，并记录信号源上的频率值。然后移动 s_2 使示波器上的图形变为图 3.1.2(c) 也就是相位差 $\Delta\varphi$ 变化了 2π ，这样每变化一次，记录一次 s_2

的位置，依次连续记录 9 个 s_2 的位置。最后记录下信号源上的频率值。取开始和结束时信号源频率的平均值作为计算速度的频率值，波长的计算采用逐差法处理。数据记录表格自拟。

3. 利用李萨如图形测波长

在图 3.1.5 中将示波器的“扫描速度”置于“X-Y”档，“垂直显示模式”置于“Y₁”，“扫描触发源”置于“Y₂”。在示波器上调出 s_1 发射信号与 s_2 接收信号合成的李萨茹图形，由于 s_1 和 s_2 两个信号的频率一样，所以合成的李萨茹图为椭圆。移动 s_2 ，使示波器上显示如图 3.1.3(a)所示的图形，记录下 s_2 的位置和信号源的频率值。然后移动 s_2 使示波器上的图形变为图 3.1.3(e)，也就是 s_1 与 s_2 信号的相位差变化了 2π ， s_2 移动的距离就必然是一个波长。这样每变化一次，记录一次 s_2 的位置。依次连续记录 9 个 s_2 的位置，最后再记录下信号源的频率值。数据处理同用双踪示波器直接测波长。

4. 在测量开始和结束时，先后测量并记录室温，取平均值通过公式 3.1.2 计算出声速作为理论值，将测量值与其比较，计算相对误差。

5. 注意事项：在测量波长的过程中，严禁 s_1 、 s_2 两换能器前端面接触在一起，要求 s_1 与 s_2 两端面间距大于 5cm，避免损坏换能器。

声速的测定实验视频：

https://v.youku.com/v_show/id_XMTk3Mzc2Nzky.html