

## 【实验目的】

- ①了解声波的特性,加深振动合成和运动干涉理论的理解.
- ②学会使用相位差法和驻波法测定声波在空气中传播的速度.
- ③学会示波器和信号发生器的使用.

## 【实验原理】 (电学、光学画出原理图)

### ①超声波传播速度

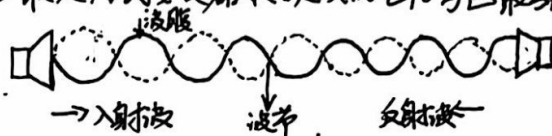
(1) 声波在理想气体中的传播可认为绝热过程,其传播速度为  $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$ , 其中  $M$  为气体摩尔质量,  $R$  为摩尔气体常量,  $R = 8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$  为气体的比热容比,  $T$  为气体的热力学温度(单位为  $\text{K}$ ). 在  $0^\circ\text{C}$  时声速  $v_0 = 331.45 \text{ m/s}$ .

故在温度为  $t$  时声速为  $v_t = 331.45 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \text{ m/s}$

(2) 声波在不同介质中传播速度不同,最简便的方法是直接测量声波的振动频率  $f$  和波长  $\lambda$  可得  $v = \lambda f$ . 常用波长测量方法有驻波法和相位比较法.

### ②驻波法测定超声波波长

由于入射声波与反射声波相干叠加,两个换能器之间可形成下图的共振驻波现象,波中振幅达到极大.由纵波性质可知,振动位移多处于波节时,声压处于波腹,即接收器端面振动位移为一波节时,才接收到的声压最大,经接收器转换成的电信号也最强.



驻波共振条件是发射面到接收面间距  $L$  恰等于半波长整数倍,即  $L_n = n \cdot \frac{\lambda}{2} (n=1, 2, \dots)$ .

将接收器信号输入示波器就可看到最大的振幅,接收端的移动距离  $\Delta L$  使示波器上再次观察到最大振幅,有  $\Delta L = L_{n+1} - L_n = \frac{\lambda}{2}$ , 从而求得超声波波速.

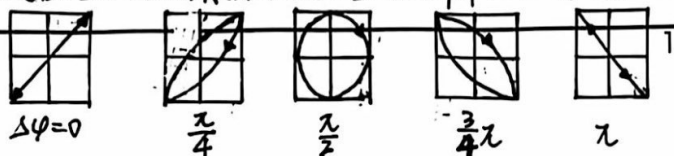
### ③相位比较法测定超声波波长

(1) 原理:沿波传播方向上的任何两点,其振动状态相同,或者说其相位差为  $2\pi$  的整数倍时,两点间的距离应等于  $\lambda$  的整数倍.

(2) 若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相位.沿传播方向移动接收器时,总可以找到一个位置使得接收到的信号与发射的信号同相,移过的这段距离必然等于超声波波长  $\lambda$ .

(3) 为了测定相位差,可以利用双踪示波器直接比较发射和接收的信号,也可以利用李萨如图形寻找相对相位图退化为斜直线的点.

(4) 改变接收端和发射端距离,即改变了相位差  $\Delta\varphi$ ,李萨如图形发生变化,接收端移动距离  $\Delta L$  与相位有关.因此只要观察示波器上直线斜率从正到负变化,就知道  $\Delta L = \frac{\lambda}{2}$ .



## 【实验内容】（重点说明）

### ①系统调节

信号的频率与两个具有相同固有频率的换能器的频率一致。

- (1) 将移动端换能器尽量靠近固定端换能器
- (2) 调节两端面平行，将接收端信号输入示波器Y轴在信号发生器上调节频率旋钮，选择谐振频率（约40kHz），即发射端换能器固有频率。
- (3) 微调信号发生器频率旋钮，直到示波器上出现最大振幅，此时显示频率是实验所需的谐振频率。

### ②驻波法测量声速

- (1) 调节好超声换能器至最佳工作状态。
- (2) 将移动端在标尺上来回移动，观察干涉现象
- (3) 缓慢移动接收端，使示波器上出现最大振幅波形，从标尺上读出此时位置 $L_1$
- (4) 继续同一方向移动接收端，逐次读出相邻最大振幅位置 $L_i$
- (5) 连续记录8个数据，同时记下频率 $f$ ，若显示频率有微小增减，可读记起始频率 $f_1$ 和结束测量时频率 $f_2$ ，计算声速时 $f = \frac{1}{2}(f_1 + f_2)$ 。

### ③相位差法测量声速

- (1) 将发射端信号输入示波器X轴，接收端输入Y轴，屏幕上显示合成后的李萨如图形
- (2) 移动接收端直到在示波器上得到I、IV象限的直线，从标尺上读出位置 $L_1$
- (3) 继续移动接收端直到在示波器上得到II、IV象限的直线，从标尺上读出位置 $L_2$
- (4) 同时记下此时的 $f$ ，连续记录8个数据。

## 【实验器材及注意事项】

### ①实验器材

#### (1) 声速测定仪

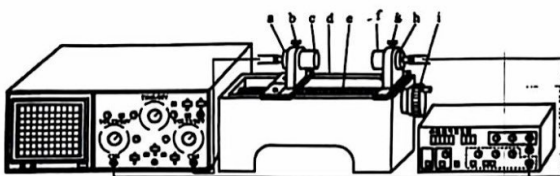


图 2-9-3

(a—接收器，b—可移动支脚螺钉，c—压电陶瓷头，d—标尺，e—螺杆，f—压电陶瓷头，g—固定支脚螺钉，h—发射器，i—读数鼓轮)

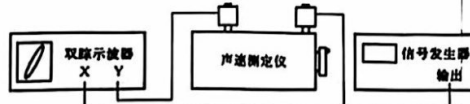


图 2-9-4

#### (2) 压电陶瓷头

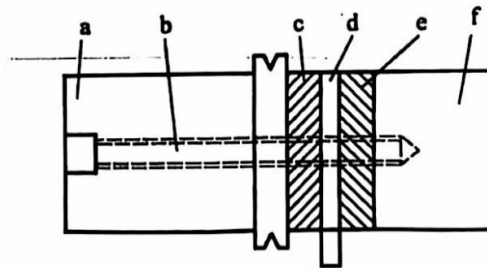


图 2-9-5

(a—尾部重金属，b—紧固螺钉，c、e—压电陶瓷环片，d—铜箔引线，f—头部轻金属)

### ②注意事项

- (1) 微调信号发生器频率旋钮直到示波器上出现最大振幅。
- (2) 若显示频率有微小增减，可读记起始频率 $f_1$ 和结束测量时频率 $f_2$ ，计算声速时 $f = \frac{1}{2}(f_1 + f_2)$





## 【数据处理与结果】

经测定,实验时环境温度  $t=20.1^{\circ}\text{C}$ 代入  $v_t = 331.45 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}}$  m/s, 得声速理论值  $v_t = 343.4$  m/s

谐振频率	$f=40.12\text{kHz}$		环境温度	$t=20.1^{\circ}\text{C}$	
驻波法	接收端位置读数/mm		相位差法	接收端位置读数/mm	
1	L1	11.740	0	L1	12.580
2	L2	16.260	$\pi$	L2	16.890
3	L3	20.500	$2\pi$	L3	21.100
4	L4	24.760	$3\pi$	L4	25.400
5	L5	29.230	$4\pi$	L5	29.760
6	L6	33.550	$5\pi$	L6	34.140
7	L7	38.070	$6\pi$	L7	38.560
8	L8	42.410	$7\pi$	L8	42.960
$\bar{\lambda}$	8.750		$\bar{\lambda}$	8.681	
$v$	351.0		$v$	348.3	
相对误差	2.2%		相对误差	1.4%	

$$U_{A\lambda_1} = \sqrt{\frac{1}{7(7-1)} \sum_{i=1}^7 (\lambda_i - \bar{\lambda})^2} = 0.091\text{mm}$$

$$U_{A\lambda_2} = \sqrt{\frac{1}{7(7-1)} \sum_{i=1}^7 (\lambda_i - \bar{\lambda})^2} = 0.055\text{mm}$$

$$U_{B\lambda_1} = \frac{4\lambda}{\sqrt{3}} = 0.006\text{mm}$$

$$U_{B\lambda_2} = \frac{4\lambda}{\sqrt{3}} = 0.006\text{mm}$$

$$U_{\lambda_1} = \sqrt{U_{A\lambda_1}^2 + U_{B\lambda_1}^2} = 0.091\text{mm}$$

$$U_{\lambda_2} = \sqrt{U_{A\lambda_2}^2 + U_{B\lambda_2}^2} = 0.055\text{mm}$$

$$\text{由 } v = \lambda f \Rightarrow \ln v = \ln \lambda + \ln f \Rightarrow \frac{\partial \ln v}{\partial \ln \lambda} = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow U_v = v \sqrt{\left(\frac{U_{\lambda_1}}{\lambda_1}\right)^2} = v \cdot \frac{U_{\lambda_1}}{\lambda_1}$$

$$\therefore U_{v_1} = v_1 \frac{U_{\lambda_1}}{\lambda_1} = 3.7\text{m/s}, U_{v_2} = v_2 \frac{U_{\lambda_2}}{\lambda_2} = 2.2\text{m/s}$$

$$\therefore v_1 = (351.0 \pm 3.7)\text{m/s}, v_2 = (348.3 \pm 2.2)\text{m/s}$$



## 【误差分析】

- ① 由于压电陶瓷头声电转换误差,发射端和接收端之间形成的不是严格的驻波,在一定时间范围内示波器上波形最高点会在某个位置活动,确定谐振频率时有误差。
- ② 用驻波法测声速时,对于最大振幅波形的选定存在人为习惯误差;用相位差法测量时,示波器上的李萨如图、斜直线图象不稳定,且线条较粗,肉眼观察存在误差。
- ③ 信号发生器的信号输出频率会在选定值附近波动,计算时产生误差。
- ④ 标尺间距存在误差,停止转动后可能会有略微偏移,且由于齿轮间隙,若不沿固定方向转动会受回程差影响,产生读数误差。
- ⑤ 声速理论值计算公式未考虑湿度。

## 【实验心得及思考题】

## ① 实验心得

本次实验我深入了解了声波的特性,加深了振动合成和波动干涉理论的理解,学会使用相位差法和驻波法测定声波在空气中传播的速度,学会了示波器和信号发生器的使用。实验中明显可以感受到相位差法更加精确,由于驻波法肉眼难以确定最大振幅,而相位差法的直线更加清晰。整体来说实验过程较为顺利,误差也在可接受的范围内。

## ② 思考题

- (1) Q: 同频率时相互垂直的振动合成中,当相位差为 $2\pi$ 的整数倍时,李萨如图形为三象限的直线,当相位差为 $\pi$ 的奇数倍时是二、四象限的直线。试证明之。

A: 由  $\begin{cases} x = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \\ y = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2) \end{cases}$  当  $\Delta\varphi = 2k\pi (k \in \mathbb{Z})$  时,  $y = \frac{A_2}{A_1}x$ , 为三象限直线  
 当  $\Delta\varphi = (2k+1)\pi (k \in \mathbb{Z})$  时,  $y = -\frac{A_2}{A_1}x$ , 为二、四象限直线。  
 $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$

- (2) Q: 实验前为什么要调整测试系统的谐振频率?

A: 只有信号频率与两个具有相同固有频率的换能器的频率一致时,才能较好进行声波转化,使接收端收到的信号振幅最大,才能更精确测定声波波长,否则会产生较大的观测误差。

- (3) Q: 如果超声波发生器的频率  $f = 40.00 \text{ kHz}$ , 不确定度  $U_f = 10 \text{ Hz}$ , 测入时引起波长的不确定度为  $U_\lambda = 0.030 \text{ mm}$ ,  $\lambda = 8.560 \text{ mm}$ , 则实验中所测得的声波相对不确定度  $\frac{U_v}{v}$  是多少?

A:  $\frac{U_v}{v} = \sqrt{\left(\frac{U_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{U_\lambda}{\lambda}\right)^2} = 3.5 \times 10^{-3}$





【数据记录及草表】

谐振频率	$f = 40.12 \text{ kHz}$		环境温度	$t_f = 20.1^\circ\text{C}, t_{\text{湿}} = ^\circ\text{C}$	
驻波法	接收端位置读数/mm		相位差法	接收端位置读数/mm	
1	L1	11.740	0	L1	12.580
2	L2	16.260	$\pi$	L2	16.890
3	L3	20.500	$2\pi$	L3	21.100
4	L4	24.760	$3\pi$	L4	25.400
5	L5	29.230	$4\pi$	L5	29.760
6	L6	33.550	$5\pi$	L6	34.140
7	L7	38.070	$6\pi$	L7	38.560
8	L8	42.410	$7\pi$	L8	42.960
$\bar{\lambda}$	8.750		$\bar{\lambda}$	8.681	
$v$	351.0		$v$	348.3	

$v_{\text{理论}} = 343.43 \text{ m/s}$   
 $2.2\%$

$1.4\%$

教师签字: 