

# 天津大学本科实验报告专用纸

学院 机械工程 年级 2016 专业 工程力学 班级 - 姓名 解怡康 学号 2016201008

课程名称 声速的测量 实验日期 2017.11.13

同组实验者

成绩 96

实验题目: 声速的测量

## 一. 实验目的

1. 了解声波的特性, 加强振动合成与振动干涉的理解。
2. 学会测量声速的几种方法。
3. 利用空气中的声速求空气的摩尔质量

## 二. 实验仪器

信号发生器, 频率计, 压电陶瓷超声换能器, 仪器螺旋测微装置, 电子示波器, 干湿球温度计, 气压计。

## 三. 实验原理

### 1. 压电陶瓷超声换能器

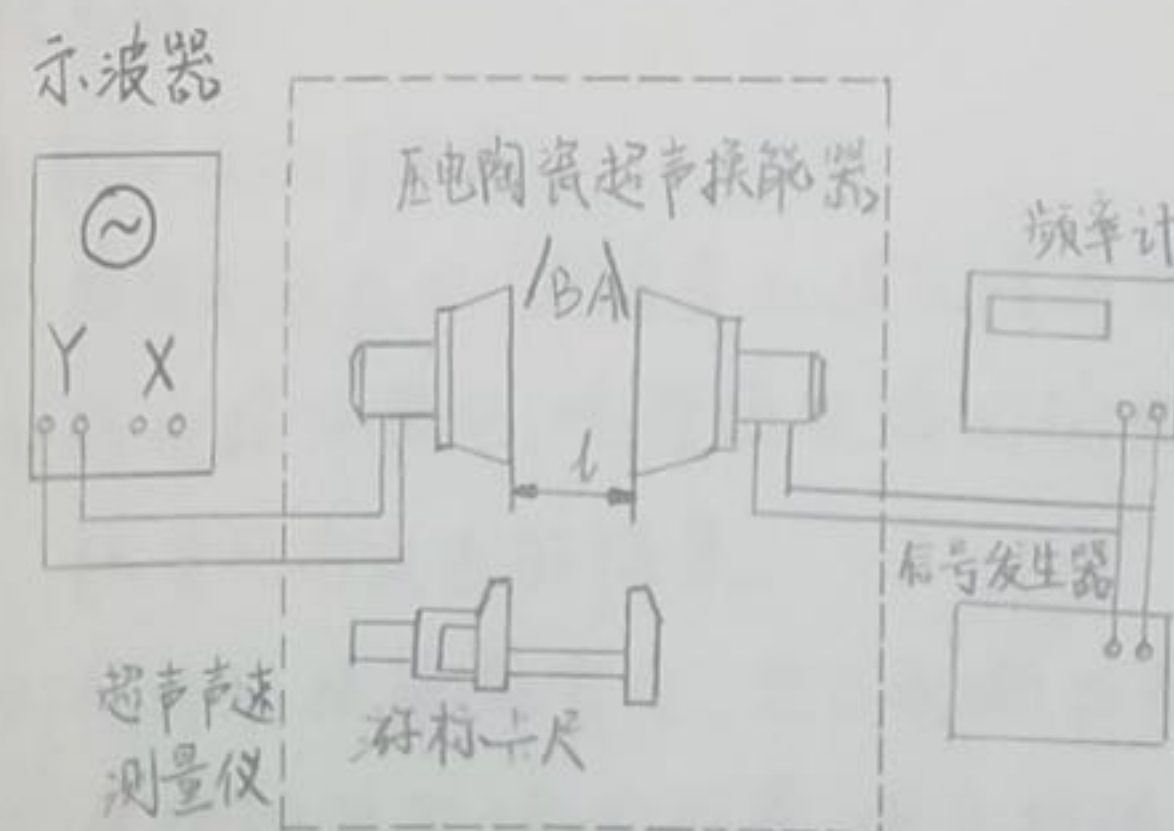
压电陶瓷超声换能器是发生和接收超声波的器件, 其核心部分是压电陶瓷片, 用多晶体结构的压电材料(如锆钛酸铅)在一定温度下经极化处理制成。压电陶瓷片两边受到的应力  $T$  与两端面间产生的电场强度  $E$  之间有简单的线性关系  $E = \sigma T$ , 这就是压电效应。反之, 在压电陶瓷片两端加一电场  $E$  时, 压电陶瓷片产生的伸缩形变  $S$  与电场  $E$  也有形变线性关系  $S = dE$ , 即逆压电效应, 比例系数  $\sigma$ ,  $d$  都称为压电应变常量, 与材料性质有关。因此, 当正弦变交流信号加在压电陶瓷片两端面时, 陶瓷片因厚度的伸缩, 而成为声波的波源; 反之, 也可以使声压变化转变为电压的变化, 即利用压电陶瓷片作为声频信号的接收器。

# 天津大学本科实验报告专用纸

超声换能器是在压电陶瓷片的表面前后黏贴两块金属组成的夹心型振子, 头部用轻质铝合金做成喇叭型, 尾部用钢材做成锥形, 中部为压电陶瓷环片, 这种结构增大了辐射面积, 增强了振子与介质的耦合作用。

## 2. 驻波法测量声速

如图所示, 把超声信号发射器输出功率输出的电信号加在换能器A上, 使其因逆压电效应成为超声波发射源, 发出一束平面波, 在空气中发射到换能器B, 如果发射面与接收面相互平行, 就使一部分超声波被接受面反射回去。在一定条件下入射波与反射波发生干涉形成驻波, 接收面处为介质位移的波节, 声压的波腹, 改变接受面与发射面之间的位移  $l$ , 在一系列特定的距离上, 传播介质中出现稳定的驻波现象, 图10-2以介质的位移表明了这种现象, 对应的  $l$  与波长的关系为  $l_n = n \frac{\lambda}{2}$ ,



声速测量实验装置示意图

换能器B将接收到的声波转换成电信号后输入示波器, 在移动换能器B的过程中, 示波器显示的波型就会有周期性的变化, 每出现一个极大值,  $l$  改变  $\lambda/2$ , 由此测得的波长值入与信号源显示

教师签字:

年 月 日

14



# 天津大学本科生实验报告专用纸

学院\_\_\_\_\_ 年级\_\_\_\_\_ 专业\_\_\_\_\_ 班级\_\_\_\_\_ 姓名\_\_\_\_\_ 学号\_\_\_\_\_

课程名称\_\_\_\_\_ 实验日期\_\_\_\_\_ 成绩\_\_\_\_\_

同组实验者\_\_\_\_\_

的频率值  $f$  相乘即得声速

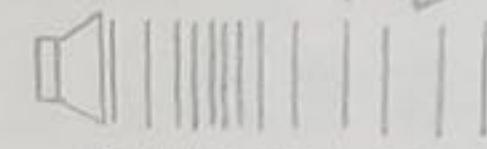
$$c = \lambda f$$



$$l_1 = \frac{\lambda}{2}$$



$$l_2 = \lambda \times 2$$



$$l_3 = \frac{\lambda}{2} \times 3$$



$$l_4 = \frac{\lambda}{2} \times 4$$

声源 (v-定)

反射面

## 3. 相位比较法测声速

发射波通过空气介质传播到接受器, 在同一时刻, 发射面与接收面两处振动的相位差

$$\varphi = \frac{2\pi l}{\lambda}$$

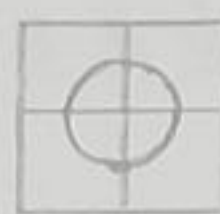
可以看出, 当  $l = n\lambda$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ )

时,  $\varphi = 2n\pi$ , 发射面与接收面同相; 而当  $l = (n - \frac{1}{2})\lambda$  时,  $\varphi = (2n - 1)\pi$ , 两面振动反相, 在 1 图的基础上,

把换能器 A 与示波器 X 轴输入连接, 就能在屏幕上观察到两个频率相同, 方向垂直的振动合成的图形, 即李萨如图形, 若把换能器 B 从某一个同相位置调到下一个同相位置, 该换能器移动的距离就是一个波长  $\lambda$ , 随着换能器的移动, 示波器上两信号相同的图形会周期性地出现。



$$\varphi = 0$$



$$\varphi = \frac{\pi}{2}$$



$$\varphi = \pi$$



$$\varphi = \frac{3\pi}{2}$$



$$\varphi = 2\pi$$

相互垂直振动的合成

## 4. 理想气体中的声速值

声波在理想气体中的传播可认为是绝热过程, 声速可表示为:

# 天津大学本科生实验报告专用纸

$$c = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}}$$

式中,  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ , 是气体的比热容比;  $R = 8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ , 为摩尔气体常量;  $M$  是气体的摩尔质量;  $T$  是气体的热力学温度, 若按摄氏温度  $t$  计算, 则  $T = T_0 + t$  ( $T_0 = 273.15 \text{ K}$ ) 代入式 (10-4) 得

$$c = \sqrt{\frac{\gamma R}{M} (T_0 + t)} = \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{M}} \cdot \sqrt{1 + \frac{t}{T_0}} = c_0 \sqrt{1 + \frac{t}{T_0}}$$

如把干燥空气看作理想气体, 则  $0^\circ\text{C}$  时的声速  $c_0 = 331.45 \text{ m/s}$ , 若同时考虑大气压和空气中水蒸气的影响, 声速可表示为

$$c = 331.45 \sqrt{(1 + \frac{t}{T_0}) (1 + \frac{0.3192 p_w}{p})} \text{ (m/s)}$$

式中,  $p$  为大气压;  $p_w$  是水蒸气的分压, 它等于温度为  $t$  时水的饱和蒸汽压乘以当时的相对湿度。

## 四. 实验步骤

### 1. 驻波法测量声速

(1) 按图连接线路, 经检查无误后接通电源预热。

(2) 移动换能器 B, 观察接收端的输出显示, 同时调节示波器, 使正弦波形有适当的幅度。

(3) 使两端换能器靠近, 然后逐渐拉开, 在测得一个声压极大值后, 连续移动接收端的位置, 测量相继出现的 20 个极大值的位置, 用逐差法求出声波波长  $\lambda$ , 并计算其不确定度。

教师签字:

年 月 日



# 天津大学本科生实验报告专用纸

学院\_\_\_\_\_ 年级\_\_\_\_\_ 专业\_\_\_\_\_ 班级\_\_\_\_\_ 姓名\_\_\_\_\_ 学号\_\_\_\_\_

课程名称\_\_\_\_\_ 实验日期\_\_\_\_\_ 成绩\_\_\_\_\_

同组实验者\_\_\_\_\_

(4) 用式  $c = \lambda f$  求声速。

2. 相位比较法测声速

- (1) 在上一个实验电路图基础上, 把发射换能器与示波器 X 输入连接, 并将接收换能器端面斜调一个小角度, 即可利用示波器荧屏上的李萨如图形来测量发射波与接收波的相位差, 必要时调节示波器 Y 轴的灵敏度, 可获得较满意的李萨如图形。
- (2) 使两换能器端面靠近, 再逐渐拉开, 从相位差  $\varphi = 0$  开始读取换能器端面的位置, 以后相位差每增加  $\pi$  (移动半个波长) 读取一次位置数, 可测 16 组数据, 从而求得声波的波长和声速。

3. 根据环境条件, 计算声速的理论值

(1) 读取福廷气压计的气压值

(2) 读取干湿球温度计的两个温度值

(3) 由表查出空气的饱和蒸汽压和相对湿度

五、数据表格及数据处理

干泡温度

湿泡温度

大气压  $1.0208 \times 10^5 \text{ Pa}$

驻波法频率  $38849 \text{ Hz}$

相位比较法频率  $39587 \text{ Hz}$

# 天津大学本科生实验报告专用纸

驻波法测声速 ( $f = 38849 \text{ Hz}$ )

| $l_n(\text{mm})$ | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                  | 20.608 | 25.261 | 30.023 | 34.525 | 39.300 | 44.169 | 48.612 | 53.378 | 56.755 |
|                  | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     | 15     | 16     | 17     | 18     |
|                  | 61.290 | 65.801 | 70.675 | 75.269 | 79.617 | 84.418 | 88.594 | 93.048 | 97.768 |
| $\Delta l_n$     | 40.682 | 40.440 | 40.652 | 40.744 | 40.317 | 40.249 | 39.982 | 39.670 | 41.013 |

$$\Delta \bar{l}_n = 40.417 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda} = 8.981 \text{ mm}$$

$$S_{\Delta \bar{l}_n} = 0.138 \text{ mm}$$

$$S_{\bar{\lambda}} = 0.031 \text{ mm}$$

$$c = \lambda f = 0.8981 \times 38849 \times 10^{-2} = 348.90 \text{ m/s}$$

$$U_{\lambda} = \sqrt{U_{\lambda}^2 + U_{\lambda}^2} \text{ 若取误差限 } \Delta_{\lambda} = 0.01 \text{ mm}, \Delta f = 60 \text{ Hz, 则:}$$

$$U_{\lambda} = \sqrt{U_{\lambda}^2 + U_{\lambda}^2} = \sqrt{S_{\bar{\lambda}}^2 + \left(\frac{\Delta_{\lambda}}{\bar{\lambda}}\right)^2} = \sqrt{0.031^2 + \left(\frac{0.01}{8.981}\right)^2} = 0.031 \text{ mm}$$

$$U_f = \Delta f = 60 \text{ Hz} \quad \frac{U_c}{c} = \sqrt{\left(\frac{U_{\lambda}}{\bar{\lambda}}\right)^2 + \left(\frac{U_f}{f}\right)^2}$$

$$\text{代入得: } U_c = 1.32 \text{ m/s}$$

$$\therefore c = (348.90 \pm 1.32) \text{ m/s} \quad (P \approx 68\%)$$

相位比较法测声速

| 序号                    | 1      | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       |
|-----------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $l(\text{mm})$        | 33.345 | 43.299  | 52.344  | 61.022  | 69.833  | 78.841  | 87.370  |
| 序号                    | 8      | 9       | 10      | 11      | 12      | 13      | 14      |
| $l(\text{mm})$        | 96.085 | 105.220 | 114.018 | 122.422 | 131.163 | 139.949 | 148.539 |
| $\Delta l(\text{mm})$ | 62.740 | 61.921  | 61.674  | 61.400  | 61.330  | 61.108  | 61.169  |

$$\Delta \bar{l} = 61.620 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda} = 8.803 \text{ mm}$$

$$S_{\Delta \bar{l}} = 0.213 \text{ mm}$$

$$S_{\bar{\lambda}} = 0.030 \text{ mm}$$

教师签字:

年 月 日



# 天津大学本科生实验报告专用纸

学院\_\_\_\_\_ 年级\_\_\_\_\_ 专业\_\_\_\_\_ 班级\_\_\_\_\_ 姓名\_\_\_\_\_ 学号\_\_\_\_\_

课程名称\_\_\_\_\_ 实验日期\_\_\_\_\_ 成绩\_\_\_\_\_

同组实验者\_\_\_\_\_

$$C = \lambda f = 8.803 \times 10^{-3} \times 39587 = 348.48 \text{ m/s}$$

$$\frac{u_c}{C} = \sqrt{\left(\frac{u_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{u_\lambda}{\lambda}\right)^2} = 3.7 \times 10^{-3}$$

$$u_c = 1.31 \text{ m/s}$$

$$C = (348.48 \pm 1.31) \text{ m/s} \quad (P \approx 68\%)$$

声速的理论值

干泡温度:  $24.0^\circ\text{C}$  湿泡温度:  $23.5^\circ\text{C}$   $P_w: 2983.6 \text{ Pa}$

$$C = 331.45 \sqrt{\left(1 + \frac{t}{273}\right) \left(1 + \frac{0.3192 P_w}{P}\right)} \quad (\text{m/s})$$

$$\text{代入得: } C = 347.31 \text{ m/s}$$

则驻波法与相位比较法声速测量值与理论值比较:

$$C_1: 348.90 \text{ m/s} \quad C_2: 348.48 \text{ m/s} \quad C_3: 347.31 \text{ m/s (理论值)}$$

$$E_{r1} = \frac{|C_1 - C_3|}{C_3} \times 100\% = 0.46\%$$

$$E_{r2} = \frac{|C_2 - C_3|}{C_3} \times 100\% = 0.34\%$$

## 六、结果分析与讨论

### 1. 结果分析

# 天津大学本科生实验报告专用纸

(1) 实验中所用螺旋测微器最小分度值  $0.01 \text{ mm}$ , 其理论仪器 B 类误差限应为  $0.01 \text{ mm}$ , 但实际测量的误差主要来自于极值对准过程, 因此误差限远大于  $0.01 \text{ mm}$ 。

(2) 用相位比较法测声速时  $\phi = \frac{(2k+1)\pi}{2} \quad (k \in \mathbb{Z}^*)$  的比萨如图形实际中很难得到, 通常只能出现椭圆和近似圆, 但  $\phi = k\pi \quad (k \in \mathbb{Z}^*)$  容易获得, 其图形取  $\phi = \pi$  可以减小误差。

## 又. 思考题

(1) 用驻波法测量声速, 接收器在移动中, 当示波器显示波形极大值和极小值时, 接收器所在位置的介质质点振动位移和声压各处于什么状态?

答: 在极大值时, 接收面处为介质位移的波节, 声压的波腹; 在极小值时, 接收面处为介质位移的波腹, 声压的波节。

(2) 当接收器移动到示波器显示的波形极小的位置时, 接收器端面处于声压波的波节的位置, 但此时示波器显示并不为零, 为什么?

答: 因为在极小位置时, 接收器端面处为介质位移的波腹, 所以示波器的显示并不为零。

(3) 用相位比较法测量声速时, 示波器的荧屏上显示的两个互相垂直的简谐振动合成后的图形(比萨如图形), 随着两振动的相位差变化按图所示由左向右的顺序连续变化, 现有一个中间态的向右倾斜的椭圆图形, 试判断它的旋转方向是左旋还是右旋? 教师签字:

答: 旋转方向是右旋。

年 月 日



# 实验记录

## 一. 驻波法测量声速 ( $f = 38849 \text{ Hz}$ , $\Delta l_n = \frac{1}{2}\lambda$ )

| $l_n(\text{mm})$ |        |    | $\Delta l_n(\text{mm})$ |
|------------------|--------|----|-------------------------|
| 1                | 20.608 | 10 | 61.290                  |
| 2                | 25.361 | 11 | 65.801                  |
| 3                | 30.023 | 12 | 70.675                  |
| 4                | 34.525 | 13 | 75.269                  |
| 5                | 39.300 | 14 | 79.617                  |
| 6                | 44.169 | 15 | 84.418                  |
| 7                | 48.612 | 16 | 88.594                  |
| 8                | 53.378 | 17 | 93.048                  |
| 9                | 56.755 | 18 | 97.768                  |

$$\Delta \bar{l}_n = 40.417 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda} = 8.981 \text{ mm}$$

$$S_{\Delta \bar{l}} = 0.138 \text{ mm}$$

$$S_{\bar{\lambda}} = 0.031 \text{ mm}$$

## 二. 相位比较法测声速 ( $f = 39587 \text{ Hz}$ , $\Delta l = 1\lambda$ )

| $l(\text{mm})$ |        | $\Delta l(\text{mm})$ |
|----------------|--------|-----------------------|
| 1              | 33.345 | 8                     |
| 2              | 43.299 | 9                     |
| 3              | 52.344 | 10                    |
| 4              | 61.022 | 11                    |
| 5              | 69.833 | 12                    |
| 6              | 78.841 | 13                    |
| 7              | 87.370 | 14                    |

$$\Delta l = 61.620 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda} = 8.803 \text{ mm}$$

$$S_{\Delta \bar{l}} = 0.213 \text{ mm}$$

$$S_{\bar{\lambda}} = 0.030 \text{ mm}$$

## 三. 声速理论值

大气压:  $1.0208 \times 10^5 \text{ Pa}$  干泡温度:  $24.0^\circ \text{C}$  湿泡温度:  $23.5^\circ \text{C}$

$$P_w = 2983.6 \text{ Pa}$$

$$C = 331.45 \times \sqrt{\left(1 + \frac{23.5}{273.15}\right) \cdot \left(1 + \frac{0.3192 \times 2983.6}{1.0208 \times 10^5}\right)} = 347.02 \text{ m/s}$$

201620

96

1, 2

电子

电陶瓷

理制成

有简单

加-电

$S = dZ$

性质有

厚度取

的变化