

5.7.4.5 由实验数据计算线密度 ρ

由于实验室给出的线弦密度数据可能误差较大,试直接用 $\rho = \left(\frac{n}{2L\nu}\right)^2 T = \left(\frac{n}{2L\nu}\right)^2 mg$, 根据前面已经测过的近 20 组数据,用等权平均的方法分别求出两弦的线密度 ρ_1 和 ρ_2 来。

5.7.5 有研究性、探索性内容的可选实验层次

- (1) 观察弦振动过程中两种偏振态之间的耦合现象,分析影响耦合强弱的因素。
- (2) 查阅弦振动实验中产生非线性振动的有关文献或著作,探索如何实现弦的分频非线性振动^[5, 27]。

5.8 气体、液体和固体中的声速测量

5.8.1 实验概述与实验目的

波动是振动状态的传播。声波是一种在弹性媒质中传播的波,在无限大的空气或液体中传播的声波是纵波。声波速度(声速)就是弹性媒质中振动状态的传播速度。与一般的一维平面简谐波类似,描述平面声波的也可以用振幅 a 、角频率 ω 和波速 v 这三个量。

超声波是频率为 $2 \times 10^4 \sim 10^9$ Hz 的机械波,具有波长短、能定向传播等优点。在超声测距与定位、液体流速测定、弹性模量测量、气体温度瞬间测量等应用中,确定声速 v 十分重要。本实验的目的是

- (1) 了解声波在空气中传播速度与气体状态参量的关系;了解超声波产生和接收的原理。
- (2) 学习、掌握空气中声速的测量方法。了解并实践液体、固体中的声速测量方法。
- (3) 对于(行波近似下的)相位比较法、(驻波假设下的)振幅极值法及(测量波传播时间的)脉冲法这三种声速测量方法作初步的比较研究。

5.8.2 实验原理与实验方法

5.8.2.1 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

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (5.8.1)$$

式中 $\gamma = c_p/c_v$ 称为质量热容比,也称“比热[容]比”(ration of specific heats),它是气体的质量定压热容 c_p (massic heat capacity at constant pressure) 与质量定容热容 c_v (massic heat capacity at constant volume) 的比值; M 是气体的摩尔质量, T 是绝对温度, $R = 8.314472 \times (1 \pm 1.7 \times 10^{-6}) \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 为摩尔气体常量(molar gas constant)。由式(5.8.1)可见,声速 v 既和 \sqrt{T} 成正比,也和 $\sqrt{\gamma/M}$ 成正比。质量热容比 γ 与摩尔质量 M 及气体成分有关,因此,测定声速可以推算出气体的一些参量。

标准干燥空气的平均摩尔质量为 $M_{\text{st}} = 28.966 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$,其主要成分的体积比为 $\text{N}_2 : \text{O}_2 : \text{Ar} : \text{CO}_2 = 78.084 : 20.948 : 0.934 : 0.0314$ 。在标准状态下 ($T_0 = 273.15 \text{ K}$, $p = 101.3 \text{ kPa}$),干燥空气中的声速为 $v_0 = 331.5 \text{ m/s}$ 。在室温 $t^\circ\text{C}$ 下,干燥空气中的声

速为^[5.28]

$$v = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{T_0}} \quad (5.8.2)$$

式(5.8.2)中, $T_0 = 273.15\text{K}$ 。实际空气总会有一些水蒸气。当空气中的相对湿度为 r 时, 若气温为 $t^\circ\text{C}$ 时饱和水汽压为 p_s , 则水汽分压为 rp_s 。经过对空气平均摩尔质量 M 和质量热容比 γ 的修正, 在温度为 t 、相对湿度为 r 的空气中, 声速为

$$v = 331.5 \sqrt{\left(1 + \frac{t}{T_0}\right) \left(1 + 0.16 \frac{rp_s}{p}\right)} \quad \text{m/s} \quad (5.8.3)$$

上式为空气中声速的理论计算公式, 它等于式(5.8.2)乘以修正因子 $(1 + 0.16rp_s/p)$ 。大气压可近似取 $p \approx 101\text{kPa}$; 相对湿度 r 可从干湿温度计上读出(请实验时再阅读干湿温度计使用说明书)。温度 $t^\circ\text{C}$ 时的饱和水汽压 p_s ^[5.29] 可由下式算出(单位为 Pa)^[5.30]

$$\lg p_s = 10.286 - \frac{1780}{237.3 + t} \quad (5.8.4)$$

式(5.8.3)的计算结果与实际的超声声速值可能有一定偏差。引起偏差的原因有: 状态参量的测量误差、理想气体理论公式的近似性、实际超声声速还与频率有关的声“色散”现象等。

注 5.7 声压

声学中更常用振动速度 u 而较少用振幅 a 。平面声波中媒质质点位移 $a = A \sin \omega(t - l/v)$, 质点振动速度 $u = da/dt = A\omega \sin(\omega(t - l/v) + \pi/2)$ 。声强(传过单位面积的声功率)正比于振动速度的平方。下文所述的实验中对声波用声探测器所获得的电信号与声压 p_{sound} (单位为 Pa)成正比。声压 p_{sound} 与振动速度 u 之比定义为声阻抗 $z = p_{\text{sound}}/u = \rho v$, 它等于波速 v 与媒质密度 ρ 之积。

注 5.8 声学测温法^[5.31]

利用式(5.8.1)的函数关系还可测量温度。近年国际学术界酝酿的 7 个基本物理单位定义方案之一是: 固定玻耳兹曼常量 $k_B = 1.380\,650\,5 \times 10^{-23}\text{J/K}$ 为无误差的准确值, 来定义热力学温度 K。固定阿伏加德罗常数 $N_A = 6.022\,141\,5 \times 10^{23}$ 来定义摩尔, 这样式(5.8.1)中的气体常量 $R = k_B N_A$, 可以用 $T = v^2 \frac{M}{\gamma k_B N_A}$ 来实现声学测温法这一基本测温法。

5.8.2.2 测量声速的实验方法

(1) 脉冲法: 利用声波传播时间与传播距离计算声速

实验中可用脉冲法测声速。具体测量从脉冲声源(声发射器)到声探测器之间的传播时间 t_{SD} 和距离 l_{SD} , 进而可算出声速 v 。实验中声源与探测器之间基本是同一被测媒质。

$$v = \frac{l_{\text{SD}}}{t_{\text{SD}}} \quad (5.8.5)$$

(2) 利用声速与频率、波长的关系测量

声速 v 与频率 f 、波长 λ 的关系为

$$v = f\lambda \quad (5.8.6)$$

测出声波的频率和波长, 就可以求出声速。声波频率等于声源的电激励信号频率, 该频率可由数字频率计测出, 或由信号发生器上的频率显示直接给出。测波长的方法有