

文章编号: 1007-2934(2010)05-0059-03

空气比热容比之声速测量法

唐亚陆, 胡光, 张俊

(淮阴工学院数理学院, 江苏 淮安 223001)

摘 要: 介绍了声速公式的理论推导, 提出了用声速测量方法测空气比热容比的实验方法; 将声速测量方法和 FD-NCD 型空气比热容比测定仪测得的空气比热容比的误差进行了比较。

关键词: 声速公式; 空气比热容比; 相位比较

中图分类号: O414.1 **文献标志码:** A

大学物理实验中的空气比热容比实验采用的大多是 FD-NCD 型测定仪, 这种装置是人工打气、放气和关闭气阀来实现空气的绝热膨胀等过程, 从而测得空气比热容比 γ 。此方法简单易操作, 但放气后靠人耳听到没气流声时才关闭气阀, 这种人工操作是容易引起误差的, 因为不同的人听觉灵敏度不一样, 反应速度也不一样。再则玻璃瓶充气后有形变, 瓶内会有水汽, 封口老化漏气等问题, 这些在实验中都没有考虑。若通过测量声速来测空气比热容比, 可避免这一系列问题。

1 空气中的声速

声波是纵波, 空气中的声速与气体的形变和弹性有关, 气体的形变是体积的压缩和膨胀, 体积的改变量 dV 与原来的体积 V 之比称为体积应变。体积的变化是由于气体压强偏离大气压引起的, 现将实际气压与大气压之差用 dp 表示。如果空气中仅激发微小的振动, 各体元仅发生微小的形变, 则 dp 与体积应变成正比, 即

$$dp = -K \frac{dV}{V} \quad (1)$$

负号表示压力增加体积减小, 压力减小体积增加, 比例系数 K 为体变模量, 将(1)式转换可得(2)

$$K = -\left(\frac{dp}{dV}\right)v \quad (2)$$

空气中的声波可看成平面简谐波, 先后将平面简谐波波方程对时间 t 求两次偏导和对坐标 x

求两次偏导, 然后联立两二阶方程可求得空气中的声速为

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (3)$$

1816 年, 法国人拉普拉斯 (P. S. M. deLaplace) 指出牛顿把声波传播认为等温过程的错误, 认为声波传播快, 来不及和外界交换热量, 而应看成绝热过程。绝热过程中的 p 和 V 应满足 $pV^\gamma = C$ (常量), 将此式微分得

$$\gamma p V^{\gamma-1} + V^\gamma \left(\frac{dp}{dV}\right) = 0$$

即

$$\gamma p = -\left(\frac{dp}{dV}\right)V \quad (4)$$

即(4)式与(2)式相比, 得

$$K = \gamma p \quad (5)$$

(5)式代入(3)式得声速

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} \quad (6)$$

由理想气体状态方程

$$p = \frac{1}{m} \rho RT \quad (7)$$

结合(6)式, (7)式得声速

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = \sqrt{\frac{\gamma R (273.15 + t)}{M}} \quad (8)$$

气体普适常量 $R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, t 为室温 ($^{\circ}\text{C}$), $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ 即空气比热容比。 M 为空气的摩尔质量, 在正常情况下, 干燥空气的平均摩尔质量

$M = 28.96 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ 。因此根据(8)式,只要测得声速 v ,就可测出空气比热容比 γ ,即

$$\gamma = \frac{v^2 M}{RT} = \frac{v^2 M}{R(273.15 + t)} \quad (9)$$

2 空气比热容比的理论值

实验证明,空气中各种气体的百分比含量,在离地面 100 km 高度以内几乎是不变的。常温常压、干燥空气中以体积含量计,氧气约占 20.93%,氮气约占 78.07%,稀有气体(氦、氖、氩、氪、氙)占 0.94%,二氧化碳占 0.03%,其他气体占 0.03%。其中稀有气体属于单原子分子气体,其空气比热容比 $\gamma = \frac{5}{3}$;氧气、氮气属于双原子分子气体,其空气比热容比 $\gamma = 1.40$;二氧化碳和其他成分属于多原子分子气体,其空气比热容比 $\gamma = \frac{4}{3}$ 。综合起来空气比 γ 热容比的理论值 $\gamma = \frac{5}{3} \times 0.94\% + (20.93\% + 78.07\%) \times 1.40 + 0.06\% \times \frac{4}{3} = 1.402$ 。

3 声速测量

3.1 声速测量的实验装置及操作步骤

按图 1 接线,将发射器 S_1 的输入端和示波器的 X 输入端(CH_1)并联接到信号发生器的电压输出端,将接收器 S_2 的输出端接到示波器的 Y 输入端(CH_2)。

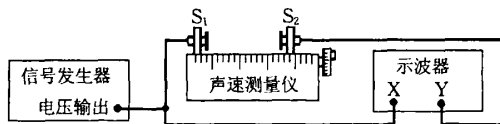


图 1 实验装置

3.1.1 调节共振频率

本仪器中换能器 S_1 、 S_2 里面的元件采用的是锆钛酸铅压电晶体,其共振频率在 40 KHz 左右。

(1) 将信号发生器的正弦波电压信号频率先粗调到 40 KHz。

(2) 显示示波器的 Y 输入端(CH_2)信号,调节扫描速度和垂直衰减器,使显示屏上显示稳定的正弦波形,见图 2。

(3) 进一步精确调节信号发生器的频率旋

钮,使示波器的波形最大,此频率为共振频率,记录此时信号源频率 f 。

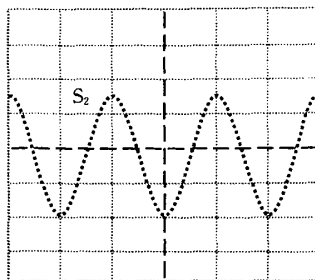


图 2 示波器上 Y 输入端显示的 S_2 波形

3.1.2 相位比较法

(1) 选择“MODE”中的“DUAL”,并在“SOURCE”中选择 CH,则 S_1 、 S_2 两信号波形在荧光屏上显示出来,见图 3,此即示波器处于两个通道信号的双踪显示状态。

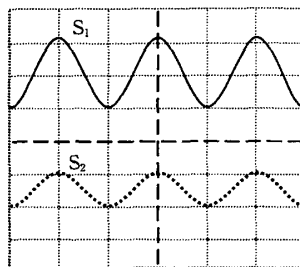


图 3 示波器显示的 S_1 、 S_2 波形

(2) 通过调节相应偏转因数、时基因数使波形大小、宽窄适当,如图 3,可发现两波形频率、波长相同。

(3) 旋动鼓轮,缓慢移动接收器 S_2 ,声源 S_1 的信号波形静止不动,接收器 S_2 的信号波形在水平方向发生移动。接收器 S_2 左移时, S_2 的信号波形向左移动,接收器 S_2 右移时, S_2 的信号波形跟着右移,当 S_1 、 S_2 两个波形的峰和峰对齐时,说明 S_1 、 S_2 同相。记录接收器 S_2 的位置。

(4) 继续同方向缓慢摇动接收器 S_2 ,当 S_1 和的波峰和波峰再一次对齐时,则 S_2 信号波的相位变化了 2π ,说明 S_2 移动了一个波长 λ 的距离,记录 S_2 此时的位置。

(5) 继续同方向摇鼓轮移动接收器 S_2 ,连续记录 10 个波峰重合时 S_2 的位置。

3.2 数据记录及处理

(1) 室温 $t = 9.5 \text{ }^\circ\text{C}$,共振频率 $f = 39.68 \text{ kHz}$

(2) 用相位比较法测波长

波峰对齐位置	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
l_i (mm)	116.02	107.586	99.072	90.555	82.044
波峰对齐位置	l_6	l_7	l_8	l_9	l_{10}
l_{i+5} (mm)	73.522	65.000	56.482	47.980	39.470
$\Delta l_i = l_{i+5} - l_i$	42.580	42.586	42.59	42.575	42.574
$\bar{\Delta l} = \frac{1}{5} \sum \Delta l_i = 42.581 \text{ mm}$	$\lambda = \frac{\bar{\Delta l}}{5} = 8.516 \text{ mm}$				

$\lambda = 8.516 \text{ mm}, v = f \cdot \lambda = 39.68 \times 8.516 = 337.915 \text{ m/s}$, 将 λ, v 代入(9) 式得

$$\gamma_{\text{测}} = \frac{v^2 M}{R(273.15 + t)} = 1.408$$

相对误差

$$E_r = \frac{|\gamma - \gamma_{\text{测}}|}{\gamma} \times 100\% = \frac{|1.402 - 1.408|}{1.402} \times 100\% = 0.4\%$$

4 FD-NCD 型空气比热容比测定仪测得的空气比热容比及误差

4.1 操作步骤

(1) 用 Forton 气压计测出室内大气压 P_0 。

(2) 用打气球把空气缓慢的地打入贮气瓶内, 记录瓶内气体稳定时的压强 P_1 (即数字电压表读数 U_1) 和温度显示值 T_0 (即数字电压表读数)。

(3) 迅速打开活塞放气, 当贮气瓶的空气压强降低至环境大气压强 P_0 时 (这时放气声消失), 迅速关闭活塞。

(4) 当贮气瓶内空气的温度再次上升至温度显示值 T_0 时, 读出此时贮气瓶内气体的压强 P_2 (即数字电压表读数 U_2)。

(5) 重复实验过程 4 次, 记录每次的数据。

4.2 数据记录及处理

瓶内气压 P 与电压读数 U 的换算关系为:

$$P_1 = P_0 + \frac{U_1}{200} \times 10^4 (\text{Pa}),$$

$$P_2 = P_0 + \frac{U_2}{200} \times 10^4 (\text{Pa}),$$

$$\bar{\gamma} = 1.357;$$

相对误差:

$$E_r = \frac{|\bar{\gamma} - 1.402|}{1.402} \times 100\% = 3.2\%.$$

P_0 (Pa)	次数	U_1 (mv)	U_2 (mv)	P_1 (Pa)	P_2 (Pa)	$\gamma = \lg(\frac{P_1}{P_0}) / \lg(\frac{P_2}{P_0})$
103 060	1	127.6	31.1	109 440	104 615	1.332
	2	126.4	33.2	109 380	104 720	1.367
	3	126.8	34.3	109 400	104 775	1.382
	4	131.2	32.9	109 620	104 705	1.345

5 结束语

声速测量实验方法全为仪器操作, 避免了 FD-NCD 型空气比热容比测定仪实验中的人为因素的影响。声速测量方法测得的空气比热容比误差比用 FD-NCD 型空气比热容比测定仪测得的误差小, 精度高。在声速测量实验方法中采用双踪显示能直观显示两声波波形大小及相位关系, 比用李萨如图形更能让学生理解声波波形的物理意义。在声速测量实验方法中除了能看到 S_1, S_2 两波形相对移动的同时, 还能看到 S_2 波形峰值也在周期性变化, 说明了 S_1, S_2 之间的声波的产生了共振干涉, 形成了驻波, 因此双踪显示的方法融合了相位比较法和共振干涉法 (驻波法)。

参考文献:

- [1] 赵亚林, 周在进. 大学物理实验教程[M]. 南京: 南京大学教育出版社, 2006.
- [2] 漆安慎, 杜焯英. 力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [3] 张三慧. 大学基础物理学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

By using the Sound Velocity Measure Air Specific Heat Ratio

TANG Ya-lu, HU Guang, ZHANG Jun

(Huaiyin Institute of Technology, Jiangsu, Huaian 223001)

Abstract: This paper presents the theoretical derivation of the formula speed of sound; Proposed using sound velocity to measure air specific heat ratio; The errors of the sound velocity measurement method and of the FD-NCD type air-specific heat ratio detector measurement method were compared.

Key words: speed of sound formula; air specific heat ratio; phase comparison