

# 用传感器测空气相对压力系数

电 62 唐庆虎 2016010931

实验编号：15 做实验日期：4 月 28 日

## 【实验目的】

- 1、加深对理想气体状态方程和查理定律的理解；
- 2、初步了解铜电阻温度传感器和硅压阻式差压传感器的工作原理并掌握其使用方法；
- 3、学习用作图法和计算机作直线拟合法处理实验数据。

## 【实验仪器】

- 1、空气相对压力系数测量仪
- 2、传感器工作电源
- 3、加热、搅拌装置
- 4、真空泵
- 5、数字气压计

## 【实验原理】

### 1、查理定律

在定容条件下，理想气体满足：

$$p = \frac{p_0 T}{T_0} = p_0 \frac{T_0 + t}{T_0} = p_0 (1 + \alpha_p t) \quad (1)$$

其中， $t$  为气体的摄氏温度， $T_0 = 273.15\text{K}$ ，

$p_0$  和  $p$  分别为气体在  $0^\circ\text{C}$  和  $t$  时的压强，

$\alpha_p$  即为相对压力系数，定义为  $\alpha_p = \frac{\Delta p}{p_0 \Delta t}$ ，

对于理想气体， $\alpha_p = \frac{1}{T_0} = 3.66 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，

实际气体（如空气）也可近似为理想气体，其相对压力系数近似为  $\alpha_p$

## 2、铜电阻温度传感器

利用金属或半导体的电阻随温度按一定规律变化的特性制成的温度计成为电阻温度计。在  $-50\sim 100^{\circ}\text{C}$  范围内，铜丝的电阻  $R$  与温度  $t$  有较好的线性关系：

$$R = R_0(1 + \alpha_R t) \quad (2)$$

式中， $R_0$  为  $0^{\circ}\text{C}$  时的电阻值， $\alpha_R$  称为电阻温度系数。

在本实验中，已知  $\alpha_R = 4.26 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}^{-1}$

由欧姆定律知，当铜丝通过恒定电流  $I$  时，铜丝两端电压  $U_t$  与温度  $t$  满足：

$$U_t = U_{R_0}(1 + \alpha_R t) \quad (3)$$

式中， $U_{R_0}$  为  $0^{\circ}\text{C}$  时的电压。

在本实验中，由于  $U_{R_0}$  测量不便，故采用测纯水沸点时的铜丝两端电压  $U_{t_b}$  并利用大气压强换算出沸点  $t_b$  来测量温度  $t$

$$t = \frac{U_t}{U_{t_b}} \left( \frac{1}{\alpha_R} + t_b \right) - \frac{1}{\alpha_R} \quad (4)$$

## 3、扩散硅压阻式差压传感器

半导体材料因受力而产生应变时，由于载流子的浓度和迁移率的变化导致电阻率发生变化的现象称为压阻效应。利用压阻效应可以制成压阻式差压传感器。

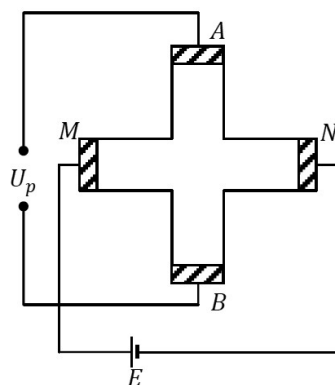


图1 十字形四端应变片

如图 1 所示，当传感器膜片受应力时，如果将一恒定电压  $E$  加在  $M$  和  $N$  两端上，在切应力作用下，从  $A$  和  $B$  两端会输出一与压差  $\Delta_p$  成线性关系的电压  $U_p$

$$U_p = U_0 + k_p \Delta p \quad (5)$$

式中， $U_0$  是压差为零时的输出电压，系数  $k_p$  为常数。

将传感器一个接口通大气，另一个接口通被测介质，则可测得被测介质的压强

$$p = p_c + \frac{U_p - U_0}{k_p} \quad (6)$$

式中， $p_c$  为大气压强

### 【实验步骤】

#### 1、差压传感器定标

- (1) 测量大气压强，同时记下室温值
- (2) 缓慢转动三通活塞，使压差传感器的  $C$  口与  $B$  管相通而与玻璃泡断开，此时  $C$  管通大气。将塑料管接在接头上使  $D$  口与机械泵相连。将电压表接在差压传感器的输出端上。

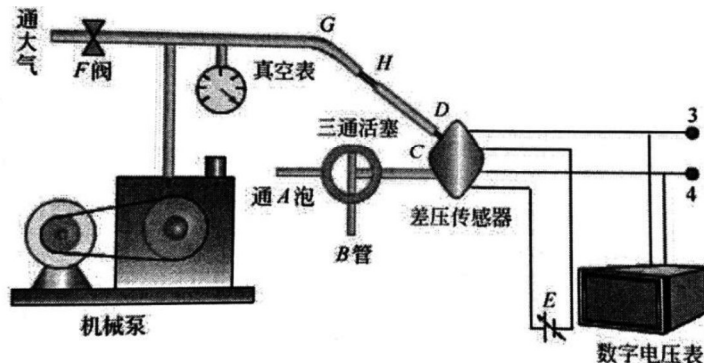


图2 差压传感器定标装置示意图

- (3) 启动机械泵，从  $D$  口抽气。待电压表读数稳定（应为最大）时， $D$  口气压可视为 0，此时  $\Delta p = p_c$ ，差压传感器的输出电压记为  $U_m$ 。
- (4) 停机械泵，从接头  $H$  上拔去塑料管  $G$ ，使得  $D$  口也通大气。此时， $\Delta p = 0$ ，差压传感器输出电压即为  $U_0$ 。

由式 (5) 可得，

$$k_p = \frac{U_m - U_0}{p_c} \quad (7)$$

2、测量初始状态的 $U_t$ ，估算读数间隔 $\Delta U_t$

按图 2 接线，缓慢转动三通活塞使 C 口与 A 泡相通。记下室温时的 $U_t$ 和 $U_p$

3、测量若干组 $(U_t, U_p)$ 的值

(1) 启动磁力搅拌器和加热器，每隔 $\Delta U_t$ 记录一组 $(U_t, U_p)$ ，一共 10 组

(2) 将水加热至沸腾，记下 $(U_{t_b}, U_{p_b})$

4、实验完毕，再次测量大气压并记下室温值

### 【实验数据及分析处理】

1、大气压测量及沸点 $t_b$ 的计算

	$p_c / \text{kPa}$	$t / ^\circ\text{C}$
实验前	99.46	26.4
实验后	99.34	27.6

$$\bar{p} = \frac{1}{2}(p_{\text{实验前}} + p_{\text{实验后}}) = \frac{1}{2}(99.46 + 99.34)\text{kPa} = 99.400\text{kPa}$$

由表中数据作图，利用内插法可以得到，该大气压下，水的沸点

$$t_b = 99.467^\circ\text{C}$$

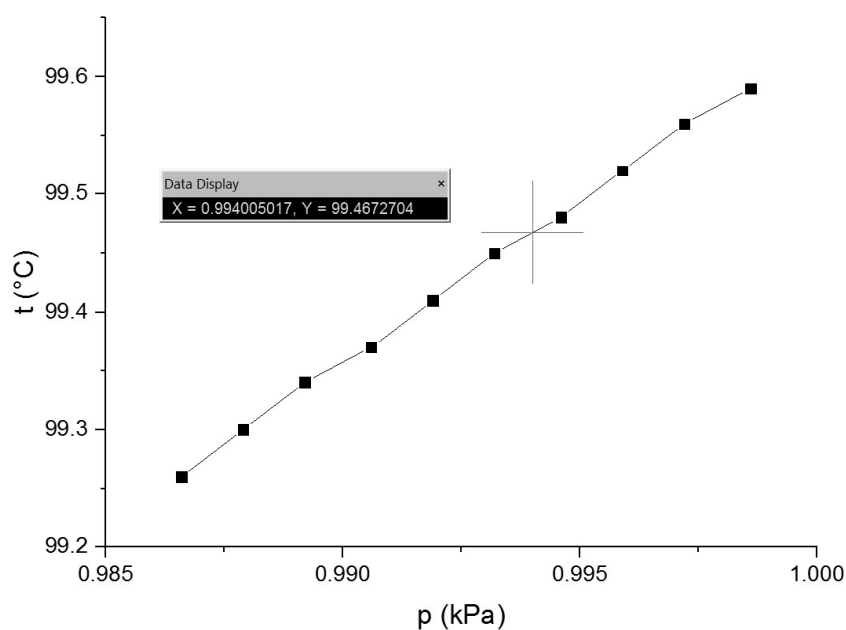


图 3 内插法求水的沸点

## 2、差压传感器定标

$U_m / \text{mV}$	$U_0 / \text{mV}$
39.34	0.04

$$k_p = \frac{U_m - U_0}{p_c} = \frac{39.34 - 0.04}{99.400} \text{mV/kPa} = 0.39537 \text{mV/kPa}$$

## 3、测量初始状态的 $U_t$ ，估算读数间隔 $\Delta U_t$

$i$	$U_{t_i} / \text{mV}$	$U_{p_i} / \text{mV}$
1	110.57	0.04

又先前测得，此刻室温  $t = 26.4^\circ\text{C}$

将该组数据带入（3）式，估算可得

$$U_{R_0} = \frac{U_{t_i}}{1 + \alpha_R t_1} = \frac{110.57}{1 + 4.26 \times 10^{-3} \times 26.4} \text{mV} = 99.392 \text{mV}$$

由（3）式，两边微分可得

$$\Delta U_t = U_{R_0} \alpha_R \Delta t \quad (8)$$

将室温至  $75^\circ\text{C}$  均分为  $10-1=9$  份，可得

$$\Delta U_t = U_{R_0} \alpha_R \Delta t = 99.392 \times 4.26 \times 10^{-3} \times \frac{75 - 26.4}{9} \text{mV} = 2.286 \text{mV}$$

## 4、测量若干组 $(U_t, U_p)$ 的值，换算得到 $(t, p)$

$i$	$U_{t_i} / \text{mV}$	$t_i / ^\circ\text{C}$	$U_{p_i} / \text{mV}$	$p_i / \text{kPa}$
1	110.57	26.822	0.04	99.400
2	112.94	32.429	0.81	101.348
3	115.14	37.633	1.53	103.169
4	117.52	43.263	2.28	105.066
5	119.66	48.326	2.95	106.760
6	122.06	54.003	3.68	108.607
7	124.38	59.491	4.30	110.175
8	126.50	64.506	5.00	111.945
9	128.86	70.089	5.72	113.766

10	131.12	75.436	6.40	115.486
$b$	141.28		9.41	

注：表中， $t_i = \frac{U_{t_i}}{U_{t_b}} \left( \frac{1}{\alpha_R} + t_b \right) - \frac{1}{\alpha_R}$ ， $p_i = p_c + \frac{U_{p_i} - U_0}{k_p}$

对  $i=2$  的换算过程：

$$t_2 = \frac{U_{t_2}}{U_{t_b}} \left( \frac{1}{\alpha_R} + t_b \right) - \frac{1}{\alpha_R} = \left( \frac{112.94}{141.28} \left( \frac{1}{4.26 \times 10^{-3}} + 99.467 \right) - \frac{1}{4.26 \times 10^{-3}} \right) ^\circ\text{C}$$

$$= 32.429^\circ\text{C}$$

$$p_2 = p_c + \frac{U_{p_2} - U_0}{k_p} = \left( 99.400 + \frac{0.81 - 0.04}{0.39537} \right) \text{ kPa}$$

$$= 101.348 \text{ kPa}$$

5、用最小二乘法对  $(t, p)$  数据进行线性拟合

利用最小二乘法对  $p = a + bt$  进行线性拟合

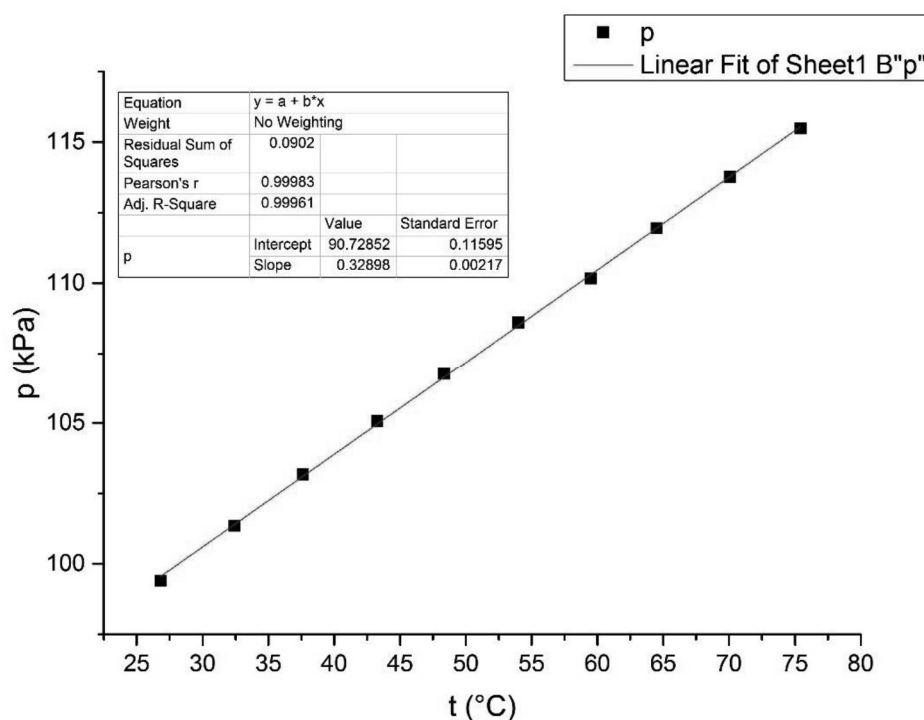


图 4 最小二乘法拟合

由拟合结果可得，

相关系数  $r = 0.99983 > 0.999$

$$a = 90.72852 \text{ kPa}$$

$$b = 0.32898 \text{ kPa} / ^\circ\text{C}$$

带入 (1) 式可得

$$\alpha_p = \frac{b}{a} = \frac{0.32898}{90.72852} ^\circ\text{C}^{-1} = 3.626 \times 10^{-3} ^\circ\text{C}^{-1}$$

#### 6、用作图法对 $(t, p)$ 数据进行线性拟合

如附图 1 所示，做  $p-t$  关系图，并用直线拟合

$$\text{斜率 } k = 0.3282 \text{ kPa} / ^\circ\text{C}$$

$$\text{纵截距 } b = 90.736 \text{ kPa}$$

带入 (1) 式，可得

$$\alpha_p = \frac{k}{b} = \frac{0.3282}{90.736} ^\circ\text{C}^{-1} = 3.617 \times 10^{-3} ^\circ\text{C}^{-1}$$

#### 7、系统误差修正

利用经验公式

$$\delta\alpha_p = (0.018 + \frac{5v}{V}) \times 10^{-3} ^\circ\text{C}^{-1} \quad (9)$$

可得，

$$\begin{aligned} \delta\alpha_p &= (0.018 + \frac{5v}{V}) \times 10^{-3} ^\circ\text{C}^{-1} = (0.018 + 5 \times 0.02) \times 10^{-3} ^\circ\text{C}^{-1} \\ &= 0.118 \times 10^{-3} ^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned}$$

故，对最小二乘法结果修正后

$$\alpha_p' = \alpha_p + \delta\alpha_p = (3.626 + 0.118) \times 10^{-3} ^\circ\text{C}^{-1} = 3.744 \times 10^{-3} ^\circ\text{C}^{-1}$$

对作图法结果修正后

$$\alpha_p' = \alpha_p + \delta\alpha_p = (3.617 + 0.118) \times 10^{-3} ^\circ\text{C}^{-1} = 3.735 \times 10^{-3} ^\circ\text{C}^{-1}$$

#### 【课后问题回答】

1、差压传感器定标时，若先测  $U_0$  后测  $k_p$ ，应如何操作？若传感器的  $D$  口漏

气，对定标结果有何影响？

操作步骤：

(1) 仍按图 2 接线，缓慢转动三通活塞，使压差传感器的  $C$  口与  $B$  管相通

而与玻璃泡断开，此时  $C$  管通大气。先不接塑料管，直接读出电压表示数为  $U_0$

(2) 将塑料管接在接头上使  $D$  口与机械泵相连。启动机械泵，从  $D$  口抽气。待电压表读数稳定（应为最大）时，差压传感器的输出电压记为  $U_m$

(3) 停机械泵，从接头  $H$  上拔去塑料管  $G$

(4) 利用 (7) 式可以计算得到  $k_p$

若  $D$  口漏气，则会造成  $\Delta p < p_c$ ，从而由 (7) 式可知，算得的  $k_p$  偏小

## 2、对水加热时，为什么要控制好平衡？升温过快有什么问题？

控制好热平衡是为了使系统处于平衡态时测量  $(U_t, U_p)$ 。首先，气体状态方程仅对平衡态成立；其次，非平衡态测得的铜丝附近温度可能与气体温度有一定偏差。因此未控制好热平衡会对实验造成系统误差。

若升温速度过快，则由于换向有一定时间差，所以测量所得的  $(U_t, U_p)$  并非同一状态下的数据。并且升温过快会导致控制热平衡更加困难。

## 3、转动三通活塞时要注意什么？若需要换水时应如何操作？

转动三通活塞时要缓慢，另一只手要扶住玻璃外壳。同时注意应尽量将活塞向内顶而不能向外拉，从而避免活塞处漏气。

若需要换水，则要先将加热器电源断开，避免加热器干烧。然后再将玻璃系统拿下放在备用的空烧杯上，将水浴杯内的水直接倒入实验室准备的热水回收桶，以便凉后再次使用，同时注意不能倒掉搅拌子。然后在烧杯内注入新水，重新开始实验。

## 4、实验中保持水沸腾时，若数字表 $U_p$ 的读数单调下降，可能是什么问题？

可能是三通活塞处漏气。由于沸腾时， $A$  泡内气压较大，易发生漏气。如果发生漏气，则由克拉珀龙方程  $pV = nRT$ ， $n$  不断减小，故  $p$  单调下降。

## 【实验总结反思】

### 1、作图法与最小二乘法优劣比较

将修正后的结果与标准值对照，计算百分差



$$E_{\text{最小二乘法}} = \frac{|3.744 - 3.66|}{3.66} \times 100\% = 2.3\%$$

$$E_{\text{作图法}} = \frac{|3.735 - 3.66|}{3.66} \times 100\% = 2.0\%$$

可以看出，利用作图法得到的结果更加接近标准值。

其原因是作图法可以主动发现并回避偏离较大的点，从而降低误差

## 2、测量结果偏大分析

对整个实验过程进行分析，发现由于设备条件所限，抽真空时无法达到绝对真空，故会有  $\Delta p < p_c$ ，从而由（7）式可知，算得的  $k_p$  偏小，从而导致  $p$  的计算值偏大，造成  $\alpha_p$  的计算值偏大。该误差属于系统误差。