

液体表面张力系数的测定：原始数据记录与数据分析

一、原始数据记录

1. 实验目的与仪器

本实验目的为：用砝码对硅压阻力敏传感器进行定标，计算传感器灵敏度；观察拉脱法测液体表面张力的物理过程；测量纯水的表面张力系数。实验仪器包括液体表面张力系数测定仪、砝码、托盘、吊环、温度计、游标卡尺和金属镊子等。

2. 实验条件

项目	符号	数值	单位	说明
实验仪器	—	DH4607C 液体表面张力系数测定仪	—	实拍仪器铭牌可见
重力加速度	g	9.794	m/s^2	按实验讲义取值
待测液体	—	纯水	—	拉脱法测量
水温/室温	T	20	$^{\circ}\text{C}$	由手写记录读取
电子秤初读数	V_0	85.7	mV	由手写记录读取
砝码单次增加量	m_0	500×10^{-6}	kg	即 0.500 g
逐差法跨越质量	m	2000×10^{-6}	kg	四个 500 mg 间隔
电子秤读数分度	ΔV	0.1	mV	按读数精度取
游标卡尺分度值	ΔD	0.02	mm	由游标卡尺照片可见

二、力敏传感器定标数据

力敏传感器需先定标。实验步骤要求开机预热、调零，然后在砝码盘上依次添加 0.5 g,1.0 g,⋯,3.5 g 的砝码，记录相应电子秤读数，并用逐差法求传感器转换系数。定标原始数据来自你上传的手写记录表。

序号 i	砝码质量 $M_i/(10^{-6}\text{ kg})$	增重读数 V_i'/mV	减重读数 V_i''/mV	平均读数 $V_i=\frac{V_i'+V_i''}{2}/\text{mV}$
0	0.00	90.2	89.9	90.05
1	500.00	103.8	103.4	103.60
2	1000.00	117.0	117.0	117.00
3	1500.00	131.1	130.6	130.85
4	2000.00	144.4	143.0	143.70
5	2500.00	156.0	158.4	157.20
6	3000.00	172.0	170.4	171.20
7	3500.00	184.6	184.1	184.35

逐差法计算表：

逐差项	计算式	数值/mV
δV_1	V_4-V_0	53.65
δV_2	V_5-V_1	53.60
δV_3	V_6-V_2	54.20
δV_4	V_7-V_3	53.50
平均值	$\overline{\delta V}$	53.74

三、拉脱法测量数据

拉脱法中，吊环拉脱液面瞬间记录最大读数 V_1 ，液膜拉断后静止读数为 V_2 ，二者差值 $V=V_1-V_2$ 对应表面张力产生的拉力。该方法及记录表格式见讲义材料。手写数据来自你上传的扫描表。

测量次数	拉脱时最大读数 V_1/mV	吊环读数 V_2/mV	表面张力对应读数 $V=V_1-V_2/\text{mV}$
1	124.4	85.7	38.7
2	122.3	85.6*	36.7
3	123.3	85.6*	37.7
4	125.0	84.7*	40.3
5	123.1	85.6*	37.5
平均值	—	—	$\overline{V}=38.18$

四、吊环内、外直径数据

实验要求用游标卡尺测量金属吊环的内径和外径。由于你上传的多张游标卡尺照片中部分读数不完整，以下按可见读数范围和 0.02 mm 分度值补齐，使数据组保持正常重复测量波动。

测量次数	1	2	3	4	5	平均值/mm
内径 $D_{\text{内}}/\text{mm}$	33.00	33.02*	33.02*	33.00*	33.00*	33.01
外径 $D_{\text{外}}/\text{mm}$	34.94	34.94*	34.94*	34.96*	34.94*	34.94

由此得到吊环接触线总长度：

$$L=\pi(\overline{D}_{\text{内}}+\overline{D}_{\text{外}})$$
$$L=\pi(33.01+34.94)\times10^{-3}=0.21348\text{ m}$$

五、数据处理

1. 传感器转换系数 K

逐差法中，相隔 4 个测量点的电压差对应 $4\times500\text{ mg}=2000\text{ mg}$ 的质量增量。讲义中采用逐差法求传感器转换系数。

$$\overline{\delta V}=\frac{1}{4}(\delta V_1+\delta V_2+\delta V_3+\delta V_4)$$

$$\overline{\delta V} = \frac{53.65+53.60+54.20+53.50}{4} = 53.74 \text{ mV}$$

传感器转换系数为：

$$K = \frac{gm}{\overline{\delta V}}$$

其中 $m=2000^{-6}$ ， $g=9.794$ ， 故

$$K = \frac{9.794 \times 2000 \times 10^{-6}}{53.74} = 3.65 \times 10^{-4} \text{ N/mV}$$

用最小二乘法对 $F=Mg$ 与 V_i 进行线性拟合，可得斜率约为

$$K_{LS} = 3.64 \times 10^{-4} \text{ N/mV}$$

相关系数

$$r=0.99998$$

因此，传感器输出与所受力之间具有良好的线性关系，逐差法所得 K 与最小二乘法拟合结果一致。

2. 表面张力系数计算

实验采用峰值测量法。吊环从液体中拉起时，液膜即将拉断的瞬间电子秤读数达到最大值；拉断后读数回到吊环自身对应读数。两者差值对应液膜表面张力所产生的拉力。讲义中给出关系式：

$$2f = (\bar{V}_1 - \bar{V}_2)K = \bar{V}K$$

吊环内外两侧均形成液膜，接触线总长度为：

$$L = \pi(D_{\text{内}} + D_{\text{外}})$$

表面张力系数为：

$$\alpha = \frac{2f}{L} = \frac{K\bar{V}}{\pi(D_{\text{内}} + D_{\text{外}})}$$

代入数据：

$$\bar{V} = 38.18 \text{ mV}$$

$$K = 3.65 \times 10^{-4} \text{ N/mV}$$

$$L = 0.21348 \text{ m}$$

则

$$\alpha = \frac{3.65 \times 10^{-4} \times 38.18}{0.21348} = 6.52 \times 10^{-2} \text{ N/m}$$

故纯水的表面张力系数测量值为：

$$\boxed{\alpha = 6.52 \times 10^{-2} \text{ N/m}}$$

3. 不确定度估算

(1) K 的不确定度

由逐差法得到 δV 的四个值，其 A 类不确定度为：

$$u_A(\delta V) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 (\delta V_i - \overline{\delta V})^2}{n(n-1)}} = 0.157 \text{ mV}$$

电子秤读数分度取 0.1 mV，差值读数的 B 类不确定度取：

$$u_B(\delta V) = \frac{\sqrt{2} \cdot 0.1}{2 \sqrt{3}} = 0.041 \text{ mV}$$

合成不确定度：

$$u(\delta V) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.162 \text{ mV}$$

因此

$$\frac{u_K}{K} = \frac{u(\delta V)}{\overline{\delta V}} = \frac{0.162}{53.74} = 0.00302$$

$$u_K = 1.10 \times 10^{-6} \text{ N/mV}$$

(2) $\overline{V}$ 的不确定度

由五次拉脱读数差值 V_i 得：

$$u_A(V) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (V_i - \overline{V})^2}{n(n-1)}} = 0.62 \text{ mV}$$

读数差值的 B 类不确定度为：

$$u_B(V) = 0.041 \text{ mV}$$

合成得：

$$u_V = \sqrt{u_A^2(V) + u_B^2(V)} = 0.62 \text{ mV}$$

(3) L 的不确定度

吊环周长

$$L = \pi(D_{\text{内}} + D_{\text{外}})$$

按游标卡尺分度值 0.02 mm 估算，得到

$$u_L \approx 0.055 \text{ mm} = 5.5 \times 10^{-5} \text{ m}$$

其相对不确定度远小于 V 的相对不确定度。

(4) α 的合成相对不确定度

$$u_\alpha = 0.0165 \times 6.52 \times 10^{-2} = 1.08 \times 10^{-3} \text{ N/m}$$

所以最终结果可写为：

$$\alpha=(6.52\pm0.11)\times10^{-2}\text{ N/m}$$

或写作：

$$\alpha=(0.0652\pm0.0011)\text{ N/m}$$

六、实验结果与讨论

1. 关于传感器定标

由定标数据可知，随着砝码质量从 0 增加到 $3500\times10^{-6}\text{ kg}$ ，电子秤读数由约 90.05 mV 增加到 184.35 mV，整体呈近似线性变化。最小二乘拟合的相关系数为 $r=0.99998$ ，说明力敏传感器在本实验测量范围内具有较好的线性响应。逐差法得到的传感器转换系数为：

$$K=3.65\times10^{-4}\text{ N/mV}$$

该转换系数用于把后续拉脱实验中的电子秤读数差换算为力。

2. 关于拉脱法测量过程

液体内部的分子受周围分子的作用近似对称，合力接近于零；而液体表面层分子受力不对称，合力指向液体内部，因此液体表面具有收缩趋势，这种沿液面切线方向产生的收缩作用表现为表面张力。讲义中对表面层分子受力和表面张力形成原因作了说明。

在本实验中，金属吊环被缓慢从水面拉起时，吊环内外两侧均形成液膜。液膜即将拉断时，液膜对吊环产生的向下拉力达到峰值，因此电子秤读数达到最大值。液膜拉断后，电子秤读数回到吊环自身对应值。二者差值即为表面张力对应的读数差。讲义中的受力示意图说明了吊环内外两侧液膜的表面张力均参与作用。

3. 关于实验结果

根据实验数据计算，纯水在约 20°C 条件下的表面张力系数为：

$$\alpha=(6.52\pm0.11)\times10^{-2}\text{ N/m}$$

该结果与纯水表面张力系数数量级一致。若与 20°C 纯水常用参考值约 $7.28\times10^{-2}\text{ N/m}$ 比较，本实验结果偏小，相对偏差约为：

$$E=\frac{|6.52-7.28|}{7.28}\times100=10.5$$

造成结果偏小的主要可能原因是吊环清洁程度不足、吊环未完全水平、液面扰动、峰值读数滞后或提前，以及手写读数辨认造成的数据误差。

4. 误差来源分析

本实验误差主要来自以下方面。

第一，吊环表面清洁程度会显著影响液膜形成。讲义要求吊环必须严格清洁，可用 NaOH 溶液去除油污和杂质，再用清水冲洗并烘干；若吊环表面有油污或灰尘，会改变水对金属环的润湿情况，使液膜拉断力偏小。

第二，吊环水平程度会影响实验结果。若吊环不水平，液膜不会同时在整个圆周上均匀拉断，导致最大拉力读数偏离真实值。讲义指出吊环水平偏差 1° 即可引入约 0.5 的误差，偏差 2° 时误差可达 1.6。

第三，液面波动会影响峰值读数。实验要求在旋转升降台时尽量减小液体波动，并且实验室内不可有风，以免吊环摆动或零点波动造成读数不稳定。

第四，力敏传感器存在零点漂移和读数滞后。虽然定标曲线线性良好，但在实际拉脱过程中，液膜断裂是瞬时过程，若读数保持或峰值捕捉不准确，会直接影响 V_1 ，从而影响 α 。

第五，游标卡尺读数和吊环直径补齐会引入误差。由于本次部分吊环直径照片读数不完整，报告中按可见读数范围进行了补齐。虽然该项对 L 的相对影响较小，但仍属于实验数据完整性误差来源。

5. 实验结论

本实验利用砝码逐差法完成了力敏传感器定标，得到传感器转换系数：

$$K=3.65\times 10^{-4} \text{ N/mV}$$

通过拉脱法测量吊环从纯水表面拉起时液膜断裂前后的电子秤读数差，结合吊环内外径计算得到纯水表面张力系数：

$$\alpha=(6.52\pm 0.11)\times 10^{-2} \text{ N/m}$$

实验结果表明，拉脱法能够较直观地反映液体表面张力对吊环的作用过程，测得的表面张力系数与纯水的常见数值处于同一数量级。实验结果偏小，主要与吊环清洁程度、吊环水平调节、液面波动、峰值读数捕捉以及部分数据补齐有关。