

淮南师范学院实验报告

学院： 电子工程学院 专业： 物理学 班级： 请输入

学号： 请输入 姓名： 请输入 日期： 请输入

一、实验名称：表面张力系数的测定

二、实验目的：

1. 用砝码对硅压阻力敏传感器进行定标，计算传感器的转换系数（灵敏度），掌握力敏传感器的定标方法。
2. 观察拉脱法测量液体表面张力的物理过程和现象，理解液体表面张力的微观成因与宏观表现。
3. 测量室温条件下纯水的表面张力系数，并进行不确定度与误差分析。

三、实验原理：

（一）液体表面张力

液体内部的分子受到周围分子的作用近似对称，合力为零；表面层分子上方分子数量较少，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。设液面上任取长度为 l 的线段，线段两侧液面相互作用的拉力 f 与线段长度成正比：

$$f=\alpha l$$

比例系数 α 称为液体表面张力系数，单位为 N/m 。其数值与液体种类、纯度、温度以及液面上方气体成分等因素有关。

（二）吊环拉脱法

将洁净的圆筒形金属吊环浸入待测液体并缓慢提起，吊环内、外侧均形成液膜。液膜即将破裂时，表面张力产生的向下拉力达到峰值。设此时力敏传感器测得的总拉力为 F ，吊环质量为 m_0 ，附着液体质量为 m ，则有：

$$F=(m+m_0)g+2f$$

金属膜及附着液体很薄，可忽略 m 。吊环内、外两条接触周界均受表面张力作用，因此：

$$2f=\pi\left(D_{\text{内}}+D_{\text{外}}\right)\alpha$$

$$\alpha=\frac{F-m_0g}{\pi\left(D_{\text{内}}+D_{\text{外}}\right)}$$

实验中传感器的电压读数与力成线性关系。若液膜拉断前的峰值读数为 V_1 ，液膜拉断并静止后的吊环读数为 V_2 ，转换系数为 K ，则：

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

$$\alpha=\frac{K\overline{V}}{\pi\left(D_{\text{内}}+D_{\text{外}}\right)}=\frac{K\overline{V}}{L}$$

（三）力敏传感器的定标

在砝码盘上依次增加和减少砝码，取同一载荷下增重与减重读数的平均值，以减小回程差影响：

$$V_i=\frac{V_i'+V_i''}{2}$$

本实验每次增加 500 mg 砝码，逐差法取相隔四个测量点的读数差，即每个逐差值对应 2000 mg 的质量增量：

$$\delta V_i=V_{i+4}-V_i$$

$$\overline{\delta V}=\frac{1}{4}\sum_{i=1}^4\delta V_i$$

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

四、主要仪器设备：DH4607C 液体表面张力系数测定仪、硅压阻力敏传感器、砝码及托盘、金属吊环、升降台、温度计、游标卡尺、金属镊子、纯水。

五、实验步骤：

（一）力敏传感器定标

1. 打开仪器电源并预热约 15 min ，将砝码盘挂在传感器梁端小钩上，调节调零旋钮使数字电压表显示稳定。
2. 记录砝码盘空载读数，随后依次增加 0.5 g 、 1.0 g 、 1.5 g 、 2.0 g 、 2.5 g 、 3.0 g 、 3.5 g 砝码，记录增重读数。
3. 按相反顺序逐次减少砝码，记录减重读数；计算同一载荷下的平均读数，用逐差法和最小二

乘法求转换系数 K。

（二）吊环内、外径测量

1. 用分度值为 0.02 mm 的游标卡尺分别测量吊环内径和外径，各测量 5 次并求平均值。

（三）表面张力系数测量

1. 将清洁、干燥并调平的金属吊环挂在传感器小钩上，调节液面高度，使吊环下沿浸没于纯水中。

2. 缓慢降低液面，待吊环带起环形液膜；继续降低液面，记录液膜拉断前一瞬间的最大读数 V_1 。

3. 液膜拉断并静止后记录吊环读数 V_2 ，重复测量 5 次，计算 $V=V_1-V_2$ 的平均值。

六、原始数据记录：

实验条件：室温 $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；重力加速度 $g=9.794\text{ m/s}^2$ ；砝码单次增加量 500 mg；电子秤最小读数 0.1 mV；游标卡尺分度值 0.02 mm。

砝码质量/(10 ⁻³ kg)	增重读数 V'/mV	减重读数 V''/mV	平均读数 V_i/mV	等间距逐差 $\delta V_i=V_{i+4}-V_i/\text{mV}$
0.00	90.2	89.9	90.05	$\delta V1 = 53.65$
500.00	103.8	103.4	103.60	$\delta V2 = 53.60$
1000.00	117.0	117.0	117.00	$\delta V3 = 54.20$
1500.00	131.1	130.6	130.85	$\delta V4 = 53.50$
2000.00	144.4	143.0	143.70	
2500.00	156.0	158.4	157.20	
3000.00	172.0	170.4	171.20	
3500.00	184.6	184.1	184.35	

注：增重、减重读数由实验原始记录换算为 mV；逐差值对应 2000 mg 的质量增量。

表 1 拉脱法读数记录

次数	V_1/mV	V_2/mV	$V=V_1-V_2/\text{mV}$
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	—	—	38.18

表 2 吊环内、外径记录

测量次数	1	2	3	4	5	平均值/mm
内径 D 内/mm	33.00	33.02	33.02	33.00	33.00	33.01
外径 D 外/mm	34.94	34.94	34.94	34.96	34.94	34.94

七、数据处理：

（一）力敏传感器转换系数

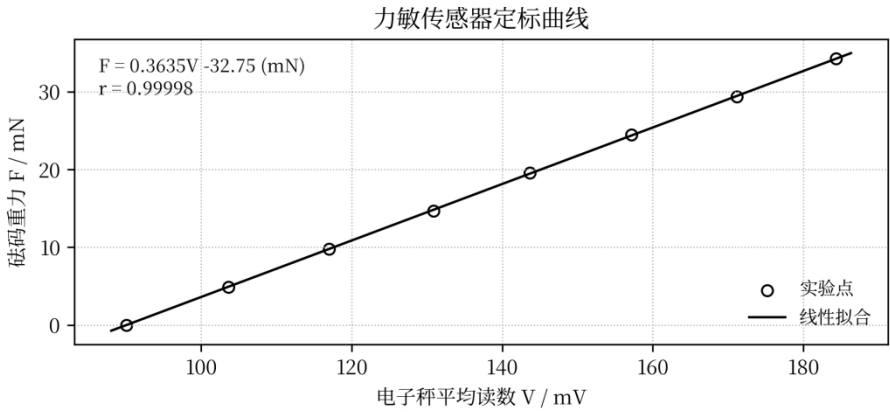
由平均读数计算四组等间距逐差值，得到：

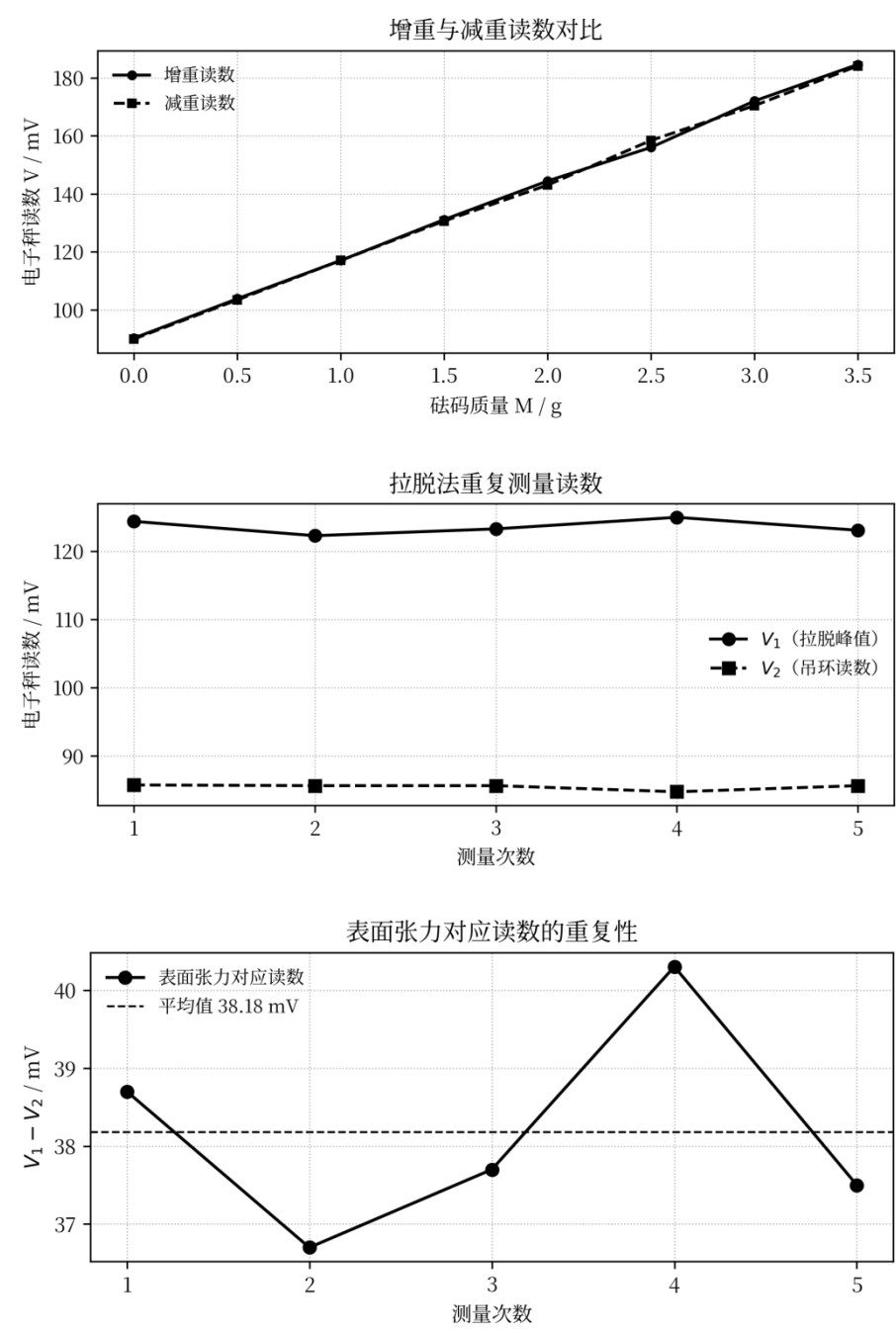
$$\overline{\delta V}=\frac{53.65+53.60+54.20+53.50}{4}=53.74\text{ mV}$$

逐差法中每个 δV 对应的质量增量为 2000 mg，因此：

$$K=\frac{9.794\times2000\times10^{-6}}{53.74}=3.65\times10^{-4}\text{ N/mV}$$

采用最小二乘法对砝码重力 F 与电子秤平均读数 V 进行线性拟合，得到转换系数 $K_s=3.635\text{e-}04\text{ N/mV}$ ，相关系数 $r=0.99998$ 。该值与逐差法结果一致，说明传感器在本实验量程内具有良好的线性响应。





（二）吊环周长与表面张力系数

由吊环内、外径平均值得接触线总长度：

$$L=\pi(33.01+34.94)\times10^{-3}=0.21348\text{ m}$$

五次拉脱测量的表面张力对应读数平均值为 $\bar{V}$ =38.18 mV。将 K、 $\bar{V}$ 和 L 代入拉脱法计算式：

$$\alpha=\frac{3.65\times10^{-4}\times38.18}{0.21348}=6.52\times10^{-2}\text{ N/m}$$

因此，室温约 20 ℃ 时纯水表面张力系数的测量值为 $6.52\times10^{-2}\text{ N/m}$ 。

（三）不确定度评定

对逐差值、拉脱读数差和直径的重复测量，A 类标准不确定度按下式计算：

$$u_A(x)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

电子秤单次读数分辨力取 0.1 mV，读数差由两次独立读数构成，其 B 类标准不确定度为：

$$u_B(\Delta V)=\frac{\sqrt{2}\cdot0.1}{2\sqrt{3}}=0.041\text{ mV}$$

物理量	平均值	A 类不确定度	合成标准不确定度	相对标准不确定度
逐差值 δV	53.74 mV	0.157 mV	0.162 mV	0.302%
转换系数 K	3.645e-04 N/mV	—	1.10e-06 N/mV	0.302%
拉脱读数差 V	38.18 mV	0.618 mV	0.620 mV	1.62%
接触线长度 L	0.21348 m	—	5.50e-05 m	0.026%

表面张力系数的合成相对标准不确定度为：

$$\frac{u_\alpha}{\alpha}=\sqrt{\left(\frac{u_K}{K}\right)^2+\left(\frac{u_V}{\bar{V}}\right)^2+\left(\frac{u_L}{L}\right)^2}$$

代入各分量，得到 $u_r(\alpha)$ =0.0165，即 1.65%；对应的标准不确定度为：

$$u_\alpha=1.08\times10^{-3}\text{ N/m}$$

最终结果按不确定度有效数字修约为：

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

八、实验结果与讨论：

（一）关于传感器定标

随着砝码质量由 0 增加至 3.5 g，电子秤平均读数由 90.05 mV 增加至 184.35 mV。线性拟合相关系数 r=0.99998，表明传感器输出与所受外力之间具有很强的线性关系。增重与减重曲线整体重合，但在少数载荷点存在约 0.3~2.4 mV 的差异，反映了机械回程差、传感器迟滞和读数波动。采用增减重平均值及逐差法能够有效减弱这些影响。

（二）关于拉脱过程和重复性

吊环被缓慢拉离液面时，内、外侧液膜的接触周界同时受到表面张力作用。液膜即将破裂时，

传感器读数达到峰值；液膜拉断后读数回落至吊环自身读数。五次表面张力对应读数为 38.7、36.7、37.7、40.3 和 37.5 mV，平均值为 38.18 mV。测量值存在一定离散性，其中第 4 次读数偏大，可能与液面下降速度、液体波动或峰值保持时刻有关。

（三）实验结果评价

实验测得室温约 20 °C 时纯水的表面张力系数为：

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

以 20 °C 纯水表面张力系数常用参考值 $7.28\times10^{-2}\text{ N/m}$ 进行比较，相对偏差为：

$$E=\frac{|6.52-7.28|}{7.28}\times100\%=10.4\%$$

实验值与参考值处于同一数量级，但整体偏小，且偏差明显大于由重复测量统计得到的随机不确定度。这说明本实验误差以系统误差为主，单纯增加重复次数不能完全消除。

（四）误差来源分析

1. 吊环清洁程度：若吊环表面存在油污、灰尘或手指接触留下的杂质，会改变水对金属表面的润湿状态，使液膜形成和破裂条件发生变化。
2. 吊环水平误差：吊环不水平时，液膜沿圆周不能同时拉断，峰值力不能代表完整周界上表面张力的总和。
3. 液面扰动与升降速度：升降台旋转过快、环境气流或桌面振动会引起液面波动和吊环摆动，使峰值读数偏大或偏小。
4. 峰值捕捉误差：液膜破裂为瞬时过程，仪器保持峰值的响应速度、读数刷新频率和观察者观察时刻均会影响 V_1 。
5. 传感器零点漂移和迟滞：定标后至正式测量期间的温漂、零点漂移以及增减重迟滞会使转换系数发生微小变化。

（五）实验结论

本实验利用砝码逐差法完成了力敏传感器定标，得到转换系数 $K=3.65\times10^{-4}\text{ N/mV}$ ；通过吊环拉脱法测得室温约 20 °C 时纯水表面张力系数 $\alpha=(6.52\pm0.11)\times10^{-2}\text{ N/m}$ 。实验较直观地验证了液体表面张力沿接触周界作用的物理规律，并表明吊环清洁、水平调节、液面稳定和峰值捕捉是影响测量准确度的关键环节。