

浙江大学

物理实验报告

实验名称: 液体表面张力系数测定

指导教师: _____

班级号: _____

预习部分 认真书写

【实验目的】

1. 了解液体表面的性质;
2. 学习矩形金属框架测量原理和焦利氏秤工作原理;
3. 首先利用逐差法测量焦利氏秤弹簧的倔强系数, 然后利用拉脱法测量液体的表面张力系数。

【实验原理】(电学、光学画出原理图)

1. 分子受力示意图

液体表面张力产生于表面分子之间的相互作用(不同于液体内部), 由引力与斥力两部分组成, 二者均是短程力, 但斥力更短。处于液体表层以下的分子由于受到各方向来的引力与斥力, 总合力为零; 液体表面的分子则受到的合力不为零, 使表面分子有进入液体内部的收缩趋势, 即表面张力。如图 1 所示, 在液体表面设有一条分界线 AB, 将液体表面分为两部分。这两部分表面层中的分子存在相互作用引力 F_1 ,

和 F_2 , 它们大小相等, 方向相反。这一对力称为液体表面张力, 表面张力的方向与液面相切, 并与液面的任何两部分分界线垂直。它正比于表面分界的长度, 即

$$dF_{\text{拉}} = \sigma \cdot dl, \quad \sigma \text{ 即液体表面张力系数 (与液体性质、杂质和温度有关)}$$

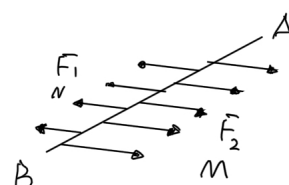


图 1

2. 矩形金属框架测量原理

将一金属片插入水中, 片底面与水面相平或略高于水面时, 由于液体表面张力的作用, 金属片的四周将带起一部分水, 使水面弯曲, 如图 2。金属片在竖直方向上受到金属片的重力 mg ; 向上的拉力 F ; 水表面面对金属片的作用力—表

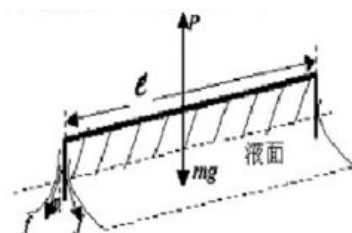


图2

面张力 $f \cos \varphi$ (φ 为液面与金属片侧面夹角)。金属片静止时有 $F = mg + f \cos \varphi$, 当 $\varphi \rightarrow 0$, $F = mg + f$

因而最终可以得到求出液体表面张力系数的公式:

$$\sigma = \frac{f}{2(l+d)} = \frac{F - mg}{2(l+d)}$$

3. 利用焦利氏秤测量 F

为了测量准确迅速测量 F , 可以应用焦利氏秤 (具体工作原理见【实验器材】)

【实验内容】（重点说明）**1. 用逐差法求弹簧的倔强系数**

- (1) 安装并调节焦利氏秤；
- (2) 测量数据：逐次向砝码托盘内放入砝码，三线对齐时分别记下对应砝码个数为 1、2、3、4、5、6 时刻度尺的读数，再逐次减少砝码，记录刻度尺读数；用逐差法或作图法处理数据，并计算弹簧的倔强系数。

2. 用金属框测量液体的表面张力系数

- (1) 用游标卡尺测量金属框横梁的长度；用螺旋测微器测量金属框金属丝的直径；
- (2) 取下砝码，将金属框挂到砝码托盘挂钩上，仍保持三线对齐，记下刻度尺读数；
- (3) 放上烧杯，当金属框浸入水面以下后，缓慢地旋转载物台微调螺丝和升降钮，烧杯下降和金属杆上升时始终保持三线对齐。当液膜刚破裂时，记下金属杆的读数。测量 6 次，取平均，计算自来水的表面张力系数。

3. 用金属环测量液体的表面张力系数

- (1) 用游标卡尺分别测量金属环外径和内径；记下只挂金属环时的焦利氏秤的刻度尺初读数；
- (2) 放上烧杯，当金属环浸入水面以下后，缓慢地旋转载物台微调螺丝和升降钮，烧杯下降和金属杆上升时始终保持三线对齐。当液膜刚破裂时，记下金属杆的读数。测量 6 次，取平均，计算自来水的表面张力系数。

【实验器材及注意事项】

【实验仪器】

砝码托盘、金属环、金属框、镊子、砝码盘（实验台上盛放砝码）、游标卡尺、螺旋测微器、烧杯

焦利氏秤：由固定在底座上的秤框、可升降的金属杆和锥形弹簧秤等部分组成，如右图所示。普通的弹簧秤是

固定上端，通过下端移动的距离来称衡，而焦利氏秤则是在测量过

程中保持下端固定在某一位置，靠上端的位移大小来称衡。其次，

为了克服因弹簧自重引起弹性系数的变化，把弹簧做成锥形。由于

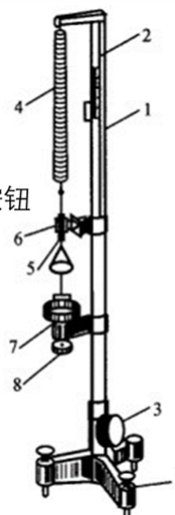
焦利氏秤的特点，在使用中应保持让小镜中的指示横线、平衡指示

玻璃管上的刻度线及其在小镜中的像三者对齐（三线对齐）作为弹

簧下端的固定起算点。因而，相比于普通的弹簧秤，焦利氏秤可以

用于迅速测量出水时的拉力 F 的大小

- 1-秤框
- 2-升降金属杆
- 3-金属杆高度调节按钮
- 4-锥形弹簧
- 5-带小镜子的挂钩
- 6-平衡指示玻璃管
- 7-载物台
- 8-载物台调节螺丝
- 9-底脚螺丝；



【注意事项】

- ① 实验过程中要时刻保持焦利氏秤反射镜上三线对齐
- ② 金属环尽可能地保持水平，每偏差 1° 大概会引入结果误差 0.5%；偏差 2° 引入结果误差 1.6%
- ③ 测量金属框金属丝的直径时，注意螺旋测微器的零点误差
- ④ 调节液面升降时，应该尽可能地缓慢，以减小液面波动

数据结果 不得涂改

【实验数据与结果】

1. 计算弹簧的倔强系数 K

砝码质量/mg	增重读数/cm	减重系数/cm	平均值/cm
0	10.51	10.49	10.50
500	10.90	10.92	10.91
1000	11.50	11.50	11.50
1500	12.00	12.00	12.00
2000	12.55	12.55	12.55
2500	13.10	13.10	13.10
3000	13.62	13.66	13.64
3500	14.14	14.16	14.15

每增加 3 个砝码	L5-L1	L6-L2	L7-L3	L8-L4
读数差/cm	2.05	2.19	2.14	2.15

$\bar{\Delta l} = 2.1325\text{cm}$, $g = 9.793\text{m/s}^2$, $m = 0.5\text{g}$, 计算得到倔强系数 $k = \frac{4mg}{\Delta l} = 0.90676\text{N/m}$

不确定度: $u_A = \sqrt{\frac{1}{3 \times 4} \sum_{i=1}^4 (\Delta l_i - \bar{\Delta l})^2} = 0.03\text{cm}$, 焦利氏秤的最大允差未告知 (且搜不到), 咨询老师后, 选

择忽略 B 类不确定度, 因此 $u_l = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.03\text{cm}$

$\frac{u_k}{k} = \sqrt{\left(\frac{u_l}{\Delta l}\right)^2}$, $u_k = k \cdot \frac{u_l}{\Delta l} = 0.013\text{N/m}$, 因此 $k = (0.907 \pm 0.013)\text{N/m}$

2. 用金属环测量方法计算出液体表面张力系数

	1	2	3	4	5	6	平均
内直径/cm	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
外直径/cm	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200

	拉脱读数 h1/cm	初始读数 h0/cm	表面张力读数 Δh /cm
1	3.45	2.38	1.07
2	3.46	2.38	1.08
3	3.44	2.38	1.06
4	3.45	2.38	1.07
5	3.45	2.38	1.07
6	3.45	2.38	1.07
平均	3.45	2.38	1.07

$$\text{表面张力系数 } \alpha = \frac{F - mg}{\pi(D_1 + D_2)} = \frac{\Delta h K}{\pi(D_1 + D_2)} = \frac{1.07 \times 0.907}{\pi(4.200)} = 0.073552 \text{ N/m}$$

$$\text{A 类不确定度: } u_A(D_1) = \sqrt{\frac{1}{6 \times 5} \sum_{i=1}^6 (\overline{D_1} - D_{1i})^2} = 0, u_A(D_2) = \sqrt{\frac{1}{6 \times 5} \sum_{i=1}^6 (\overline{D_2} - D_{2i})^2} = 0$$

$$u_A(\Delta h) = \sqrt{\frac{1}{6 \times 5} \sum_{i=1}^6 (\overline{\Delta h} - \Delta h_i)^2} = 0.0026 \text{ cm}$$

B 类不确定度：五十分度游标卡尺最大允差为 0.002 cm ，焦利氏秤的最大允差未告知（且搜不到），咨询老师

$$\text{后，选择忽略其 B 类不确定度 } u_B(D_1) = u_B(D_2) = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.0012 \text{ cm}$$

$$\text{合成不确定度: } u(D_1) = \sqrt{u_A^2(D_1) + u_B^2(D_1)} = 0.0012 \text{ cm}, u(D_2) = \sqrt{u_A^2(D_2) + u_B^2(D_2)} = 0.0012 \text{ cm}$$

$$u(\Delta h) = \sqrt{u_A^2(\Delta h) + u_B^2(\Delta h)} = 0.0026 \text{ cm}$$

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\Delta K}{K}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta h)}{\Delta h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D_1}{D_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D_2}{D_2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.013}{0.907}\right)^2 + \left(\frac{0.0026}{1.07}\right)^2 + \left(\frac{0.0012}{2.000}\right)^2 + \left(\frac{0.0012}{2.200}\right)^2}$$

$$\Delta \alpha = 0.0011 \text{ N/m}$$

$$\text{结果表达式 } \alpha = \bar{\alpha} \pm \Delta \alpha = (0.0736 \pm 0.0011) \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

3. 用金属框测量方法计算出液体表面张力系数

	1	2	3	4	5	6	平均
长度 l/cm	4.500	4.500	4.500	4.500	4.500	4.500	4.500
直径 d/cm	0.0810	0.0810	0.0810	0.0810	0.0810	0.0810	0.0810

螺旋测微器零点误差 0.0010 cm ，金属框的直径需要减去 0.0010 cm

	拉脱读数 h1/cm	初始读数 h0/cm	表面张力读数 $\Delta h/\text{cm}$
1	11.20	10.45	0.75
2	11.21	10.45	0.76
3	11.20	10.45	0.75
4	11.20	10.45	0.75
5	11.19	10.45	0.74
6	11.20	10.45	0.75
平均	11.20	10.45	0.75

$$\text{表面张力系数 } \alpha = \frac{\Delta h K}{2(l+d)} = \frac{0.75 \times 0.907}{2(4.500 + 0.0800)} = 0.0742631 \text{ N/m}$$

$$\text{A 类不确定度: } u_A(l) = \sqrt{\frac{1}{6 \times 5} \sum_{i=1}^6 (\bar{l} - l_i)^2} = 0, u_A(d) = \sqrt{\frac{1}{6 \times 5} \sum_{i=1}^6 (\bar{d} - d_i)^2} = 0$$

$$u_A(\Delta h) = \sqrt{\frac{1}{6 \times 5} \sum_{i=1}^6 (\bar{\Delta h} - \Delta h_i)^2} = 0.0026 \text{ cm}$$

B 类不确定度：螺旋测微器最大允差为 0.0004 cm ，五十分度游标卡尺最大允差为 0.002 cm ，焦利氏秤的最大允差未告知（且搜不到），咨询老师后，选择忽略其 B 类不确定度

$$u_B(l) = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.0012 \text{ cm}, u_B(d) = \frac{0.0004}{\sqrt{3}} = 0.00023 \text{ cm}$$

$$\text{合成不确定度: } u(l) = \sqrt{u_A^2(l) + u_B^2(l)} = 0.0012 \text{ cm}, u(d) = \sqrt{u_A^2(d) + u_B^2(d)} = 0.00023 \text{ cm}$$

$$u(\Delta h) = \sqrt{u_A^2(\Delta h) + u_B^2(\Delta h)} = 0.0026 \text{ cm}$$

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\Delta K}{K}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta h)}{\Delta h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.013}{0.907}\right)^2 + \left(\frac{0.0026}{0.75}\right)^2 + \left(\frac{0.0012}{4.5}\right)^2 + \left(\frac{0.00023}{0.08}\right)^2}$$

$$\Delta \alpha = 0.0012 \text{ N/m}$$

$$\text{结果表达式 } \alpha = \bar{\alpha} \pm \Delta \alpha = (0.0743 \pm 0.0012) \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

分析合理 善于思考

【误差分析】

- ① 在开始实验时, 应该对焦利氏秤进行调平, 否则会引入系统误差
- ② 由于表面张力吸附的水膜的重力会使表面张力偏大, 要随机考虑在水膜即将破裂时仍处于液面下的部分受手的浮力使表面张力测量值偏小。忽略金属丝框的浮力或忽略水膜的重力会引入误差, 应该予以修正
- ③ 在实际测量中, 金属框的长度难以准确测量, 因其并非是完全直的, 环也未必是标准的圆
- ④ 在仿真中对焦利氏秤上烧杯调节的幅度比较大, 难以调到水膜即将破裂处。在点击时一定要轻点鼠标, 不能双击或者短时间内连续点击
- ⑤ 砝码可能质量有偏差, 在使用其测量倔强系数时可能引入误差

【实验心得及思考题】

【实验心得】

由于本次实验是线上实验, 对焦利氏秤的调节难度较大, 难以真正做到像线下一样连续调节。并且本次实验实验器材较多、操作步骤多、所需测量数据较多, 较为繁琐, 还是非常考量耐心的。

【思考题 1】

不合理, 虽然忽略金属丝框的浮力或忽略水膜的重

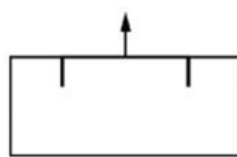


图 1 金属丝框贴紧水面图

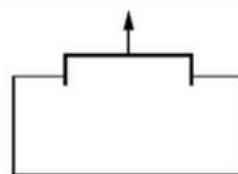


图 2 拉脱水面图

力, 都会给测量结果引入误差 (前一项对测量结果影响较大, 有 2%-5% 左右), 但是大学物理实验的精准度要求

并没有那么高。金属丝框上表面与液面相平时, 金属丝框所受的浮力应为 $F_{\text{浮}1} = \frac{1}{4} \pi d^2 (l + 2l_0) \rho g$,

l 为金属丝框的宽度, l_0 为浸在水中部分金属丝的长度; 考虑即将拉脱时, 如图 2 所示, $F_{\text{浮}2} = \frac{1}{2} \pi d^2 (l_0 - h) \rho g$,

其中 d 为金属丝直径, l_0 为金属丝竖直方向长度, h 为水膜高度, 当 l_0 在设计实验时尽可能地靠近 h , 将浮力

的干扰降低到最低, 由于线上实验不方便对比, 因此, 本实验中可以近似认为忽略浮力的作用是合理的。如果

严谨来说, 应该引入浮力修正: 当金属丝框上表面液面相平时, 诸力的平衡条件为 $F_1 + F_{\text{浮}1} = mg$; 水膜即将

破裂时, 诸力的平衡条件为 $F_2 + F_{\text{浮}2} = mg + f + ldh\rho g$, 其中 $ldh\rho g$ 为水膜重力。四个式子联立, 得到对浮

力的修正式： $F_2 - F_1 = f + \frac{1}{4}\pi d^2(2h + l)\rho g + ldh\rho g$

【思考题 2】

可行，实际上，在本实验中就另外用了金属框来进行测量。但是需要注意：需要能精确获得物体全部浸在液面中的周长，使用金属环实际上是为了减少周长测量的误差。若测得的周长偏小，则计算得到的液体表面张力系数将偏大。反之同理。

【思考题 3】

需要增加一个加装加热装置和冷却装置（可以采用化学冷却的方法）的大烧杯，待温度合适（也需要用热敏电阻进行测量）后通过导管使得大烧杯中的液体流入小烧杯，同时向小烧杯（用于浸没金属框、金属环的烧杯）中放置热敏电阻进行温度的测量（也可以用温度计，但是热敏电阻更加灵敏且最小分度更小），同上述操作即可，测完后将小烧杯的水倒回大烧杯，不断重复即可。注意热敏电阻的应该完全浸没在水中，在小烧杯中时应靠近测量物体。升温或降温过程中，需要不断用磁力棒搅拌使受热均匀。

仔细读数 认真记录