

## 实验报告 - 重力加速度的测定

姓名：郑滕飞 学号：PB20000296 班级：少年班学院 6 班 日期：2021 年 4 月 3 日

共同实验人：李鉴纯 学号：PB20000311

\* [思考题与个人的其他思考将在这种括号内记录]

**实验目的：**用单摆与自由落体两种方式测定重力加速度的数值（测量精度 $\frac{\Delta g}{g} < 1\%$ ）

### 实验原理：

重力加速度  $g$  是物体在某处所受引力与其质量之比，由引力公式  $F = \frac{GMm}{r^2}$  知  $g = \frac{GM}{(R+h)^2}$ ，式中  $G$  为引力常数， $M$  为地球质量， $R$  为地球半径， $h$  为物体相对地面高度。

本次实验即通过不同方式测定  $g$  值。

自由落体法测量重力加速度：

本实验利用小球自由下落时，满足运动方程  $h = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2$ ，因此使小球自由下落，在下落过程中途径两光电门，测量小球在两光电门间的时间差  $\Delta t$ 。保持第一个光电门的位置不变，即有  $v_0$  的值不变，调整下方的光电门为不同位置，便可使  $\Delta t$  的值因  $\Delta h$  的值而发生变化。

记录多组对应的值后，将公式变形为  $\frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{1}{2} g \Delta t + v_0$ ，其即为以  $\frac{\Delta h}{\Delta t}$  为因变量，以  $\Delta t$  为自变量的一次函数。测出不同的值后利用线性拟合，所得的直线斜率的两倍即为  $g$  的测量值。

单摆法测量重力加速度：

本实验利用单摆在小摆球， $< 5^\circ$  的小角度时周期公式可近似为  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ ，变形为  $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ ，固定摆线后多次实验，每次测量  $l$  与  $T$ ，即可通过平均得出  $g$  的估计值，并计算出对应的不确定度。

### 仪器选择：

自由落体法测量重力加速度：

由本实验的公式可计算出不确定度公式  $\frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta h}{h} + 2 \frac{\Delta t}{t}$ ，由均分原理，需要  $\frac{\Delta h}{h} < 0.5\%$ ， $\frac{\Delta t}{t} < 0.25\%$ 。对于  $h$ ，由预估，实验中涉及的最小高度约为  $20\text{cm}$ ，此时计算出  $\Delta h < 0.1\text{cm}$ 。钢尺的允差  $\Delta_{\text{钢尺}} \approx 0.1\text{cm}$ ，故采用钢尺与光电门自带的刻度配合进行测量即可满足要求。对于  $t$ ，由预估，实验中涉及的最短时间约为  $100\text{ms}$ ，此时计算出  $\Delta t < 0.25\text{ms}$ ，光电门的允差为  $\Delta_{\text{光电门}} \approx 0.2\text{ms}$ ，满足要求。

由此，实验的最终器材为：

**小铁球、电磁铁与光电门组合装置（含数字毫秒计）、带沙的纸杯、钢尺**

〔思考：有关光电门〕

经过查找资料，光电门本身计时是依靠光的遮挡，所以其真正的计时点大约是在中间的位置。其真正记录的应为“从开始到小球底部达到光电门中间”的这段时间。这段时间所对应的距离为两个光电门中间的距离，而测量实际为两个光电门顶部的距离。由于距离差和时间差都与需求的一致，这样的对光电门的处理方式是合理的。〕

单摆法测量重力加速度：

由本实验的公式可计算出不确定度公式  $\frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta l}{l} + 2 \frac{\Delta T}{T}$ ，由均分原理，需要  $\frac{\Delta l}{l} <$

$0.5\%$ ， $\frac{\Delta T}{T} < 0.25\%$ 。对于  $l$ ，由预估，摆线长度约为  $70\text{cm}$ ，此时计算出  $\Delta h < 0.35\text{cm}$ 。

钢卷尺的允差  $\Delta_{\text{钢卷尺}} \approx 0.2\text{cm}$ ，且测量范围足够，故采用钢卷尺直接测量摆长即可满足

要求。对于  $T$ ，由预估，实验中秒表测量的误差（主要来自于人的反应） $\Delta_{\text{秒表}} \approx$

$0.2\text{s}$ ，计算出总测量时间  $T > 80\text{s}$ 。摆线长为  $70\text{cm}$ ，理论一个周期的时间为  $1.68\text{s}$ ，故需要测量 50 个周期。

由此，实验的最终器材为：

**单摆装置（含标尺与平面镜）、钢卷尺、秒表**

〔思考：有关不确定度均分〕

使用不确定度均分原理时曾出现过一个问题：一位朋友选择将摆线长  $l_0$  与小球半径  $r$  分开，得到公式  $\frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta l_0}{l_0+r} + \frac{\Delta r}{l_0+r} + 2 \frac{\Delta T}{T}$ ，接着三项均分。事后思考这个方式不正确的原因在于，摆线长与小球半径不确定度的分母是相同的，而若测量两项的值，利用钢卷尺测量的摆线误差为  $0.2\text{cm}$ ，而利用游标卡尺测量的半径误差为  $0.002\text{cm}$ ，因此，半径误差项相对摆线长误差项为小量，不能适用均分原理。如果使用，实际上会导致对摆线长和周期时间的过精度测量。这也意味着，均分原理的使用前提之一是涉及的每一项有大致相同的允差量级。对于两个实验中涉及的四个允差，其量级均为  $0.1\%$ ，因此使用均分原理是合理的。〕

〔思考：平面镜的作用〕

我在实验中曾提出疑问：为何装置中含有平面镜？在实际实验中，我也未能用上平面镜辅助。实验结束后，我查询到了郭大勇老师在 1997 年第 4 期《实验教学与仪器》中刊登的论文《平面镜在单摆实验中的妙用》。论文中提到了平面镜的两个作用：

在平面镜上作水平标记可以利用重合来确保视线水平，减少测量摆长时的读数误差；在平面镜上作竖直标记可以利用重合来确定小球是否处于平衡位置，减少测量周期时的误差。总体来说，平面镜将对齐改进为重合，减小了视差，从而降低了各种机械误差的数值。如果实验时能查到这个方法，数据应该能得到一定的改进。〕

**实验步骤：**

自由落体法测量重力加速度：

1. 组装光电门、电磁铁等仪器，并在小铁球掉落的对应地面位置摆放好盛有沙子的纸杯。

2. 调整上方的光电门，使其落在与起点竖直距离20cm处。
3. 调整下方的光电门，使其与起点竖直距离至少35cm。
4. 使用钢尺配合刻度测量出两个光电门分别的位置，得到距离差。
5. 将小球吸附在电磁铁上，待其稳定，按动开始，并记录两光电门的时间数据，得到时间差。
6. 重复进行步骤 3-5，每次将下方的光电门调整至不同位置，记录六组不同数据。

〔思考：实验方案细节〕

a. (思考题) 采用双光电门而不用单光电门的原因

若采用单光电门，则为利用  $h = \frac{1}{2}gt^2$  直接计算，但这么做会产生两个问题：第一个是，由于电磁铁消磁需要时间，测出的  $t$  实际上是开始消磁到通过光电门的时间。经过资料查找，这个时间一般在几十毫秒左右，因此测量中的  $\frac{\Delta t}{t}$  可达10%，并不可取。第二个是，之前的思考中提到过，下落的距离应为从起点的小球底部到光电门中心的距离。这个下落距离中，光电门中心的位置并不容易测量。因此，单光电门测出的  $h$  和  $t$  均不准确，无法得到可靠的结果。

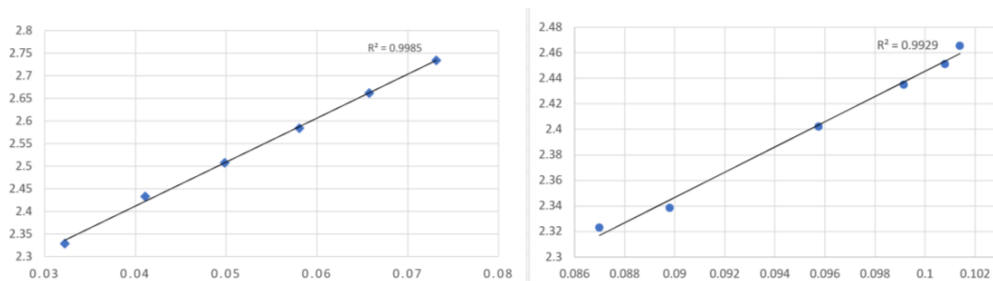
b. (思考题) 光电门 1 与光电门 2 位置的选取

光电门 1 应与起点保留一定的距离，已确定其完全进入了自由落体的阶段，减小测量误差。同样的道理，光电门 2 若是与光电门 1 太近，由于  $\Delta t$  恒定， $\frac{\Delta t}{t}$  也会变大。在之前已计算过，为控制误差，释放到光电门 1 的时间应保证在100ms以上，估算得其至少离起点5cm，光电门 2 与光电门 1 的距离则一般控制在20cm以上。

c. 多次测量中光电门 2 的位置调整

我们组的自由落体实验重做了一次，原因是，第一次实验中光电门 2 的位置调整的幅度太小，容易导致不精确（也即附有的数据记录上被叉去的六组数据）。

为了探究具体的不精确程度，我将两组数据处理后都进行了线性拟合：



左侧的数据为重新实验后（具体的结果将在下方数据分析中给出），右侧的数据为重新实验前。左侧  $\Delta h$  的变化范围为15~40cm，右侧仅为40~50cm。从图上可以直观看出，右侧的数据的线性程度不如左侧，计算相关系数的结果也说明了这一点（）。

由此，计算结果时，右侧的不确定度会更高，也即左侧更加精确。这说明，光电门 2 位置的调整幅度确实会对实验造成一定的影响，在较大的幅度进行均匀调整更易得到可靠的结果。

d. (思考题) 瞬时速度的测定

由公式  $\frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{1}{2}g\Delta t + v_0$ , 在线性拟合时其实得到了两个量。一方面, 斜率的两倍为测出的  $g$  值, 另一方面, 截距则为某处的瞬时速度  $v_0$ 。结合之前关于光电门的讨论可知, 实际测出的是小球的底部在经过光电门 1 中心时的瞬时速度。由此, 用这个方法可以测出瞬时速度。但是, 若要求测量在某点处的速度, 由于不好直接将光电门的中心与要求位置对齐, 还需要对方案进行调整。

例如, 增加用游标卡尺测量光电门直径的步骤, 并将结果的一半作为中心位置的估计, 计算出光电门 1 顶部所处的位置并利用其他测量设施 (如钢尺) 调整至符合要求的位置。这样以后, 便可继续按照此实验的实验方案获得数据并进行处理。

e. (思考题) 利用相同装置实现其他对重力加速度的测量方案

由于此方案可以测定速度, 可使用速度估算重力加速度。例如, 先用相同方法测量出小球在光电门 1 的速度  $v_0$ , 再结合上方方法, 利用游标卡尺与钢尺测量出下落距离  $x$ , 则由  $g = \frac{v_0^2}{2x}$  亦可以得到重力加速度的值。

但是, 由于对下落距离的预估问题以及需要比原方案多进行一步计算, 这个测量方案存在误差较大的可能。相比较而言, 原方案仍更为可靠。」

单摆法测量重力加速度:

1. 组装单摆装置, 调整至立柱竖直。
2. 调节标尺高度, 使其上沿中点距悬挂点约  $50\text{cm}$ 。
3. 调节摆线长度, 使摆长尽量接近  $70\text{cm}$ 。
4. 使用钢卷尺测量摆长并记录长度数据。
5. 将小球水平拉开  $3^\circ$  左右, 静止释放。
6. 从小球第一次经过平衡位置秒表开始计时, 每经过两次平衡位置成为一个周期, 经历 50 个周期后结束计时并记录时间数据。
7. 重复进行步骤 4-6, 共记录六组数据。

「思考: 实验方案细节

这个实验方案在实际做实验时发现, 比起想象中的操作难度要高很多。第一步中竖直的校正并不容易进行; 测量摆长时, 摆球一直在做小幅摆动, 难以在悬垂状态测量; 拉开小球时很难保证完全水平, 会产生其他方向的摆动。前两个问题容易引起摆长的测量值偏小, 从而导致结果偏小。第三个问题理论上来说不会影响测量结果, 但容易影响开始与结束的准确性。

测量中另一个容易出现的问题是周期的计数。**非常遗憾, 我们组在测量时计数方式有误, 导致我们本以为是 50 个周期的结果实际为 49.5 个周期的时间。**具体的情况为: 我们选择将小球第一次向右摆过平衡位置时开始计数。若测量 50 个周期, 实际应以小球第 51 次向右摆过平衡位置为结束时间, 但我们错以第 50 次向左摆过平衡位置结束, 导致测量的周期比实际少了半个。所幸, 在这次实验中对结果的影响不大, 仍然可以直接套用公式, 但为了避免此类情况再次出现, 在预习时就应定好方案的细节, 尤其关注容易失误的地方。」

实验数据:

(以下数据均来自附有的原始数据表格)

自由落体法测量重力加速度:

$L_1/cm$	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
$L_2/cm$	60.00	55.00	50.00	45.00	35.00	40.00
$t_1/ms$	203.3	203.3	203.3	203.2	202.6	203.3
$t_2/ms$	349.6	334.8	319.4	302.9	267.0	285.5

单摆法测量重力加速度:

$l/cm$	69.74	69.65	69.75	69.69	69.74	69.70
$49.5T/s$	82.49	82.84	82.16	82.82	82.60	83.10

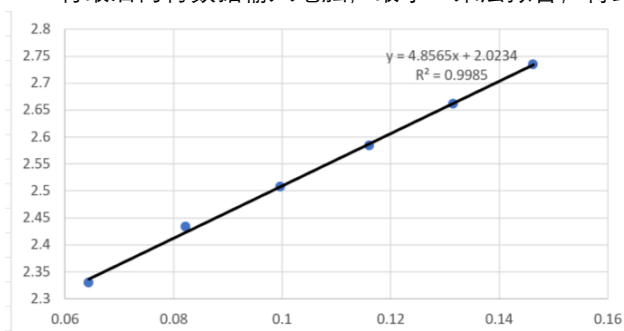
数据处理:

自由落体法测量重力加速度:

首先, 根据原始数据算出对应的 $\Delta h, \Delta t, \frac{\Delta h}{\Delta t}$ :

$L_1/cm$	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
$L_2/cm$	60.00	55.00	50.00	45.00	35.00	40.00
$t_1/ms$	203.3	203.3	203.3	203.2	202.6	203.3
$t_2/ms$	349.6	334.8	319.4	302.9	267.0	285.5
$\Delta h/m$	0.4000	0.3500	0.3000	0.2500	0.1500	0.2000
$\Delta t/s$	0.1463	0.1315	0.1161	0.0997	0.0822	0.0644
$\Delta h \cdot \Delta t^{-1}/m \cdot s^{-1}$	2.7341	2.6616	2.5840	2.5075	2.4331	2.3293

将最后两行数据输入电脑, 最小二乘法拟合, 得到



方程为 $y = 4.8565x + 2.0234$ , 故斜率乘 2 得  $g$  的测量值为 9.7130

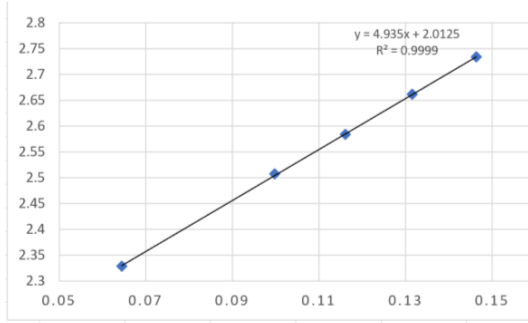
尝试按照讲义里附加部分进行了不确定度评定:

斜率  $m$  的标准差为  $s_m = m \sqrt{\left(\frac{1}{R^2} - 1\right) / (n - 2)}$  代入  $R^2 = 0.9985, n = 6$  有  $s_m = 0.0941$

扩展不确定度  $u_m = s_m t_{0.95} = 2.78 s_m = 0.262$

因此最终得到结果为  $g = 9.7 \pm 0.5 m/s^2$

很奇怪的是, 线性回归的不确定度大得离谱, 几乎完全使测量数据失去了精度, 达到了 5%, 远超过预期的 1% 以内。为了探究是线性回归本身对精度要求更高还是测量数据的问题, 我尝试观察不同数据的情况, 然后发现, 在去除最后一组数据的情况下, 可以得到显著更好的结果,  $R^2 = 0.9999$ 。由此, 基本可以确定是由于最后一次数据测量时, 高度调整地不够精准, 从而产生了偏点。因此, 舍弃偏点所对应的数据, 重新利用最小二乘法进行线性拟合后, 可以得到结果:



方程为  $y = 4.935x + 2.0125$ ，故斜率乘 2 得  $g$  的测量值为 9.8700  
 不确定度评定：

斜率  $m$  的标准差为  $s_m = m \sqrt{\left(\frac{1}{R^2} - 1\right) / (n - 2)}$  代入  $R^2 = 0.9999, n = 5$  有  $s_m = 0.0285$

扩展不确定度  $u_m = s_m t_{0.95} = 3.18 s_m = 0.090$

因此**最终得到结果为  $g = 9.87 \pm 0.18 \text{ m/s}^2$**

[思考：线性回归的不确定度

最终的  $\frac{\Delta g}{g} = 1.8\%$ ，这个误差的主要来源应为实验操作中对具体长度控制的不精确。在预估最大不确定度时，我们采取了常规的方式，但事实上，由于线性回归中各变量的相互影响，对长度产生的一点变化将会直接导致  $R^2$  和斜率估计值产生较大变化（例如，若将偏点的  $\Delta h$  从 20 改为 19.9， $R^2$  立刻从 0.9985 变为 0.9998，实际产生的效果远超这个单个数据 0.05% 的改变）。因此，在线性回归时，要更加注重保持测量的准确性，以进行更合理的预估。

这个实验中消除误差的方式，亦主要在于长度控制的精确，与光电门、起点之间的距离不要太小。 $\Delta h$  从 20 改为 19.9 完全在钢尺的最大允差内，为避免这样的误差，可采取精度更高的长度测量方式（游标卡尺、千分尺等）。]

单摆法测量重力加速度：

摆长的平均值  $\bar{l} = 69.711 \text{ cm}$ ，测量次数  $n = 6$ ，标准差  $\sigma = 0.0353 \text{ cm}$ ，误差  $\Delta_B = 0.2 \text{ cm}$ ，查表可得  $C = 3, t_p = 2.57, k_p = 1.96$ ，计算不确定度为  $U_{0.95} = \sqrt{\left(2.57 \times \frac{0.0353}{\sqrt{6}}\right)^2 + \left(1.96 \times \frac{0.2}{3}\right)^2} = 0.136 \text{ cm}$ ， $\frac{U_l}{l} = 0.19\%$

周期总时间的平均值  $\bar{T} = 82.668 \text{ s}$ ，测量次数  $n = 6$ ，标准差  $\sigma = 0.298 \text{ s}$ ，误差  $\Delta_B = 0.2 \text{ s}$ ，查表可得  $C = 3, t_p = 2.57, k_p = 1.96$ ，计算不确定度为  $U_{0.95} = \sqrt{\left(2.57 \times \frac{0.298}{\sqrt{6}}\right)^2 + \left(1.96 \times \frac{0.2}{3}\right)^2} = 0.339 \text{ s}$ ， $\frac{U_T}{T} = 0.41\%$

由  $g = \frac{4 \cdot 49.5^2 \pi^2 l}{T^2}$  得到  $g$  的测量值为  $9.8673 \text{ m/s}^2$ ，利用不确定度合成， $\frac{U_g}{g} = \sqrt{\frac{U_l^2}{l^2} + 4 \frac{U_T^2}{T^2}} = 0.84\%$ ，得**最终结果为  $g = 9.86 \pm 0.08 \text{ m/s}^2$**

[思考（思考题）：单摆的误差分析与改进

最终的  $\frac{\Delta g}{g} = 0.84\%$ ，这个误差在预定的 1% 范围内，达成了实验目标。想要更加减小误

差，可以从如下几个方面入手：

在实验设计方面，增加摆长、减小摆角、换用更小的球，都可以起到效果。如果增添铅垂仪，可以更好地判定铅锤，也能对误差起到减小作用。

在长度测量方面，如果不直接测量摆长，而是选择先测摆线长，再测悬挂点到小球底部的长度取平均，可以减少目测球心的误差，之前亦分析过，利用平面镜可以减小视差，从而减小误差的范围。

在时间测量方面，如果如自由落体一样采取光电门，一方面提高了实验效率（只需测一个周期），一方面也提升了精度。而在使用秒表时若希望精度有所提升，除了锻炼反应外还可以选择额外测量一些周期，或是通过比对将反应时间的误差通过专门一项来消除。

除了这些之外，在具体操作中放慢速度，提高操作本身的完成度，也能减小误差。」

### 实验反思：

这次的两个实验中，我的操作都出现了较为严重的失误。

在自由落体实验中，由于错误估算了长度的微小改变引起的线性拟合程度变化，没能细致地控制长度而导致出现了偏点。这同时提醒了，相同容许误差下，回归比起取平均更需要实验操作地精确。这次自由落体实验没能做到规定的误差，往后做这类图像实验时，需要更加细致。而第一次的失败的实验，则提醒了对于所需的数据类型、组数等应有一个提前的判断，而不是到场后再临时决定，否则临场的思考容易出现偏差。

在单摆实验中，由于没有预先设计好周期的计算方式，我错将周期漏算了 0.5 个。因此，实验方案本身应当写成能具体操作的程度，尤其是其中可能涉及操作失误的部分，一定要预先算好，确认计量方式没有问题，再开始实验。

总而言之，实验前应做好完善的准备，考虑到实际操作时的情况，而实验中则应重视数据的细节，不能想当然地认为误差不大。

## 实验报告-混合法测金属比热容

姓名：郑滕飞 学号：PB20000296 班级：少年班学院 6 班 日期：2021 年 4 月 13 日

\* [思考题与个人的其他思考将在这种括号内记录]

**实验目的：**利用混合法测量锌粒的比热容，并与标准比热 $0.386J/(g \cdot K)$ 对比，分析误差。

### 实验原理：

比热容是物质的一种属性，代表单位质量的物质升降单位温度的热量变化。

实验为使用混合法测定锌粒的比热容，先将一定质量的锌粒在沸水环境隔水加热，再放入初温已知的水与量热筒、搅拌器中，测量得出终温。利用与外界独立的孤立热学体系中吸热与放热相同，理想状态下可以由公式 $m_x c_x (T' - T_2) = (mc + m_1 c_1 + 2.0VJ \cdot$

$K^{-1}cm^{-3})(T_2 - T_1)$ 得出锌粒比热容 $c_x = \frac{(mc + m_1 c_1 + 2.0VJ \cdot K^{-1}cm^{-3})(T_2 - T_1)}{m_x(T' - T_2)}$ ，其中 $T', T_1, T_2$ 分别为

锌粒初温、水与量热筒初温、平衡后的终温， $m_x, m, m_1$ 分别为锌粒质量、水质量、量热筒/搅拌器质量， $c, c_1$ 为水比热容、量热筒比热容， $2.0VJ \cdot K^{-1}cm^{-3}$ 为温度计吸热，其中 $V$ 为温度计浸入水中体积。

### 减小误差：

- 1、核心方法：补偿法，通过计算使水的初温比室温低 3-4 度升至比室温高 3-4 度，此时可近似认为从环境中吸热与放热相抵。  
实验中称量锌粒 $250g$ ，标准比热容 $0.386J \cdot K^{-1}g^{-1}$ ，量热筒与搅拌器的总质量为 $153.63g$ ，材料为白铜，标准比热容 $0.39J \cdot K^{-1}g^{-1}$ ，水比热容为 $4.2J \cdot K^{-1}g^{-1}$ ，室温 $23^\circ C$ ，取沸水温度 $100^\circ C$ ，水与量热筒从 $19.5^\circ C$ 升至 $26.5^\circ C$ 。可估算（先忽略温度计项）所需水的质量约为 $226g$ ，故应使水与量热筒、搅拌器总质量 $380g$ 左右（实际操作时可使质量比之稍大，最终称量总质量为 $406.81g$ ）。
- 2、减小实验过程中的热交换，将量热筒放在绝热装置中，避免壁上有水蒸发吸热，并尽量缩短操作时间，减少操作过程中的损失。
- 3、测量气压以校正沸点，测量温度计在水中体积以校正温度计吸热，通过修正可能的影响项以减小误差。

[思考：有关质量和温度的误差

通过计算可以估计最大不确定度，( $t = 2.0J \cdot K^{-1}cm^{-3}$ )

$$\frac{\Delta c_x}{c_x} = \frac{mc}{mc + m_1 c_1 + Vt} \frac{\Delta m}{m} + \frac{m_1 c_1}{mc + m_1 c_1 + Vt} \frac{\Delta m_1}{m_1} + \frac{Vt}{mc + m_1 c_1 + Vt} \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta m_x}{m_x} + \left( \frac{T_2}{T' - T_2} + \frac{T_2}{T_2 - T_1} \right) \frac{\Delta T_2}{T_2} + \frac{T_1}{T_2 - T_1} \frac{\Delta T_1}{T_1}$$

由对方系数的估算可知， $\frac{T_2}{T_2 - T_1}$ 与 $\frac{T_1}{T_2 - T_1}$ 的大小至少为 40（温度单位为K），在同量级意

义下，其他误差几乎可以忽略，因此，对温度 $T_1, T_2$ 的测量构成主要误差，对质量、体积等测量构成次要误差。由此对质量、体积无需多次测量，并可以选取托盘天平精度较低的工具进行测量。]

[思考题：补偿法对其他测量的作用



a、进阶内容：利用现有仪器测量冰溶解热

实验设计：先利用沸水将水、量热筒、搅拌器温度提升至比室温高 3-4 度，称量出量热筒、搅拌器的质量与总质量。计算将其温度降低至比室温低 3-4 度所需冰块质量，并将对应质量的冰水混合物环境中的冰块放入，测量初温与平衡后终

温。设  $T'$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  分别为  $0^\circ\text{C}$ 、水与量热筒初温、平衡后的终温， $m_x, m, m_1$  分别为冰块质量、水质量、量热筒/搅拌器质量， $c, c_1$  为水比热容、量热筒比热容， $2.0\text{VJ} \cdot \text{K}^{-1}\text{cm}^{-3}$  为温度计吸热，单位质量冰块融化吸热  $q$ ，则  $qm_x + cm_x(T_2 - T') = (cm + c_1m_1 + 2.0\text{VJ} \cdot \text{K}^{-1}\text{cm}^{-3})(T_1 - T_2)$ ，因此

$$q = \frac{(cm + c_1m_1 + 2.0\text{VJ} \cdot \text{K}^{-1}\text{cm}^{-3})(T_1 - T_2) - cm_x(T_2 - T')}{m_x}$$

b、高阶内容：设计测量液体比热容方案

在已知比热容大致范围的情况下，利用已知比热容的不溶解且不与液体发生化学反应的固体，仍可利用公式  $mc(T' - T_2) = (m_x c_x + m_1 c_1 + 2.0\text{VJ} \cdot \text{K}^{-1}\text{cm}^{-3})(T_2 - T_1)$  计算（下标  $x$  的为待测液体），实验设计与本实验基本相同：先控制待测液体与量热筒的温度、质量，再将沸水环境加热的已知固体放入，测量初温、终温。解出

$$c_x = \frac{mc(T' - T_2) - (m_1 c_1 + 2.0\text{VJ} \cdot \text{K}^{-1}\text{cm}^{-3})(T_2 - T_1)}{m_x(T_2 - T_1)}$$

」

**实验仪器：** 锌粒、水、隔水加热锅、毛巾、量热筒、搅拌器、绝热容器、电子温度计、托盘天平、电子天平、量筒、粉笔、气压计

**实验步骤：**

- 1、使用托盘天平称量出  $250\text{g}$  锌粒，并转移入试管。
- 2、将试管放入隔水加热锅，在沸水环境中加热  $15\text{min}$ 。
- 3、称量出量热筒与搅拌器总质量，并在其中加入一定量水，使总质量略低于  $380\text{g}$ 。
- 4、在水中加入冰块与水调整，使得温度达到预设的  $19.0\sim 20.0^\circ\text{C}$ 。
- 5、称量出此时水与量热筒、搅拌器总质量，并转移入绝热容器。
- 6、待温度开始回升时开始计时，每分钟记录一次温度，持续  $5\text{min}$ 。
- 7、从隔水加热锅中用毛巾取出试管，打开绝热容器，快速倒入锌粒。
- 8、关闭绝热容器，开始搅拌， $15\text{s}$  记录一次温度，直到温度基本稳定后每分钟记录一次温度，直到测量时间达到  $15\text{min}$ 。
- 9、取出温度计，用粉笔标注水痕，放入含水量筒中使水面触碰粉笔记号，记录放入前后的体积。

「思考：有关实验操作的注意事项

第一步中，转移时要轻压试管的塞子，避免加热时被弹出，亦避免难以拔出而在转移时浪费时间。第二步中注意保证加热时间才能视为温度为沸水水温。三至五步中，由于温度构成主要误差，优先控制温度，后控制质量。第六步中需要在冰融化后温度回升时再计时。第七步注意操作要迅速，打开绝热装置。第八步应在关闭后立刻开始搅拌，以充分热交换。」

### 原始数据:

锌粒质量: 250.0g 内筒质量: 153.63g 内筒与水质量和: 406.81g

(已知量: 内筒比热容 $0.39J \cdot K^{-1}g^{-1}$ , 水比热容 $4.2J \cdot K^{-1}g^{-1}$ )

大气压: 1017hPa

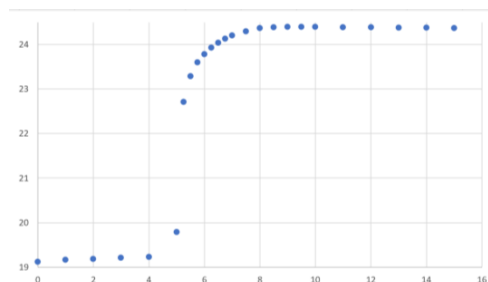
(查表得此时水的沸点约 $100.17^{\circ}C$ )

水在放 2 温度计前体积为3.50mL, 放入后4.15mL

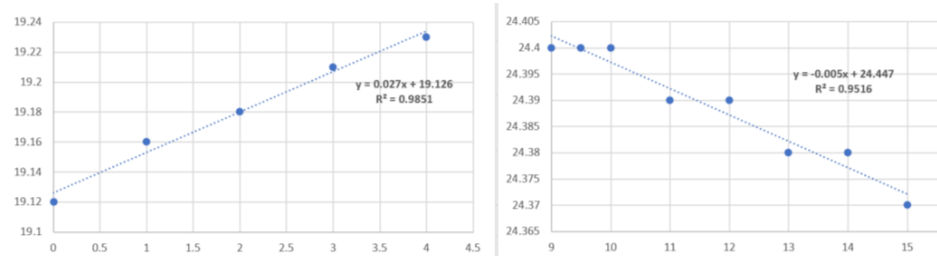
时间/min	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	5.25
温度/ $^{\circ}C$	19.12	19.16	19.18	19.21	19.23	19.79	22.71
时间/min	5.50	5.75	6.00	6.25	6.50	6.75	7.00
温度/ $^{\circ}C$	23.29	23.60	23.78	23.93	24.04	24.13	24.20
时间/min	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	11.00
温度/ $^{\circ}C$	24.30	24.37	24.39	24.40	24.40	24.40	24.39
时间/min	12.00	13.00	14.00	15.00			
温度/ $^{\circ}C$	24.39	24.38	24.38	24.37			

### 数据处理:

利用原始数据表格, 作出散点图效果如下。



分别线性拟合 0-4 分钟与 19 分钟后的温度, 得到初温/终温趋势线:



加入锌粒时间为4.75min时, 温度稳定约为8.75min时, 代入知 $T_1 = 19.25^{\circ}C$ ,  $T_2 =$

$24.40^{\circ}C$ 。温度计水中体积 $V = V_2 - V_1 = 0.65mL$ 。

代入公式 $c_x = \frac{(mc + m_1c_1 + 2.0VJ \cdot K^{-1}cm^{-3})(T_2 - T_1)}{m_x(T' - T_2)}$ , 算出 $c_x = 0.306J \cdot K^{-1}g^{-1}$  (通过计算知有效数字为三位)。

[思考题: 补偿措施与误差分析

实验测出的值要比实际值小较多, 这意味着实验中出现了较多的热量损失。实验中为

了使吸热与放热大致相同，核心措施为补偿法的运用。但是，最终的终温离补偿法提升7度的预期效果差距较大，较可能的原因为搅拌等问题导致锌粒并未与水充分热量交换，从而产生大量热量损失。

平衡吸放热的措施亦包括利用密闭绝热容器减少影响幅度。实验中，操作时间并不长，因此认为这一项没有产生过大的误差。

措施还包括去除其他放热途径，例如量热筒上的冷凝水。实验中，我初始将冰块放入过多而导致温度达到了 $15^{\circ}\text{C}$ ，经提醒才想起加水平衡温度。但以观察和擦拭避免了量热筒在开始测量后产生冷凝水。

由此，我认为误差的最大来源为水与锌粒热量交换不够充分，导致补偿法的计算平衡未能完全成立。此实验中为避免类似情况，可在计算中取较小温度提升量，并在实际操作时更注意均匀搅拌，提升热量传导效率。]

## 实验报告-分光计

姓名：郑滕飞 学号：PB20000296 班级：少年班学院 6 班 日期：2021 年 5 月 3 日

\* [思考题与个人的其他思考将在这种括号内记录]

**实验目的：**利用分光计精确测算出三棱镜的顶角与最大偏向角，从而计算出三棱镜的折射率。

### 实验原理：

折射率是透明物质的一种属性，揭示了光在物质中传播的速率。

实验中使用分光计通过正对光面时的反射测量出三棱镜的顶角，通过绿光谱线位置确定三棱镜的最大偏向角，再由公式  $n = \frac{\sin \frac{A+\delta_{min}}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$  计算出三棱镜对绿光的折射率。

[思考：折射率公式的证明

利用讲义中的此图进行计算。当入射角为  $i_1$  时，入射时有方程

$\sin i_1 = n \sin i_1'$ ，第二次入射角有方程  $i_1' + i_2 = A$ ，出射时有方程

$\sin i_2' = n \sin i_2$ ，而偏向角  $\delta = i_1 + i_2' - A$ 。代入即为计算

$\arcsin(n \sin x) + \arcsin(n \sin(A - x)) - A$  在  $x$  变化时的最小值。求

导可知  $x = \frac{A}{2}$  时取到最小值，化简得此时有  $n = \frac{\sin \frac{A+\delta_{min}}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$ 。

\*注意到，这个解合理的前提是  $n \sin \frac{A}{2} < 1$ 。在不满足这个条件时，由于  $i_1' + i_2 = A$ ，可算出光不可能从另一面出射。]

**实验仪器：**分光计、双面反射镜、待测三棱镜

### 实验步骤：

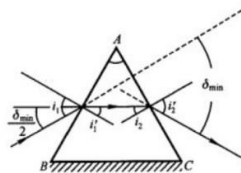
#### 1、调整分光计

先从侧面观察，粗调镜筒、载物台与平行光管至基本水平，调节准焦螺旋使分划板刻线清晰可见。接着在载物台上沿棱线放上双面反射镜，目镜调焦后锁紧螺钉，通过旋转调整水平位置，对半调整法调整竖直位置使绿十字与分划板上方十字线重合。再旋转至镜子另一面，如此反复几次，直到两面均重合，这时望远镜已调整完成。

取下双面反射镜，移动狭缝筒使狭缝清晰可见，并调整狭缝宽度。先旋转 90 度，通过调整平行光管高度使狭缝与分划板下方刻度线重合，再转回竖直，锁紧螺钉。

- 2、关闭后方的平行光源，对准载物台上的棱线放上三棱镜，粗调至三棱镜光面大致与望远镜筒垂直。
- 3、观察黯淡的绿十字，通过调整载物台后方的螺钉使绿十字与分划板上方十字线重合。
- 4、转动载物台使望远镜筒朝向另一个光面，调整此时载物台后方的螺钉使绿十字与分划板上方十字线重合。
- 5、重复步骤 3-4，直到两个绿十字均可对应重合，记录下此时在两个光面处的底座读数（为消除偏心差，底座有两个对称的读数位置，注意事先标注 12 以区分）。

\*取下三棱镜并重新放上，重复步骤 2-5，共记录三组数据，



- 6、打开平行光源，粗调使其侧面入射三棱镜，调整望远镜筒至大致能接收到出射光的位置。
- 7、观察绿光谱线，小幅左右移动载物台，使绿光谱线落在可能的最右侧（即无论向左/右调节都会左移的位置），转动望远镜使绿光谱线落在分划板中心竖线上，并记录此时读数。
- 8、转动望远镜至狭缝的光落在落在分划板中心竖线上，并记录此时读数。  
\*取下三棱镜并重新放上，重复步骤 6-8，共记录三组数据。

〔思考题：分光计的调节〕

思考题回答：未必是因为望远镜光轴未调好，更可能是由于载物台表面与度盘不平行，因此在重新放上后平面镜方向与已调好的不同。〕

〔思考：载物台的调节〕

每次调节载物台时都只调节在后方的螺钉，可以保证两次调整不互相冲突，并且在理想情况下，两个被调整的螺钉将与第三个平齐。不过在实际操作中，其实很难保证最终的完全平行。〕

原始数据：

A	第一次	第二次	第三次
$\theta_1$	143°14'	26°10'	170°28'
$\theta_2$	323°16'	206°11'	355°26'
$\theta_1'$	263°14'	266°10'	290°29'
$\theta_2'$	83°16'	86°12'	110°28'

$\delta_{min}$	第一次	第二次	第三次
$\theta_1$	303°42'	304°20'	32°54'
$\theta_2$	123°42'	124°23'	212°55'
$\theta_1'$	249°43'	250°24'	338°52'
$\theta_2'$	69°43'	70°24'	158°53'

数据处理：

顶角数据计算对应的  $\frac{|Y_1+Y_2|}{2}$  ( $\gamma$ 为底座转过的角度) 分别为  $120^\circ 00' 00''$ ,  $119^\circ 59' 30''$ ,  $120^\circ 01' 30''$ ,

取平均为  $120^\circ 00' 20''$ ，标准差  $51''$ 。误差  $\Delta_b = 60''$ 。查表可得  $C = \sqrt{3}$  (分光计误差分布应类似于游标卡尺)，由于实验精确性较高，取置信概率 0.99，因此  $t_p = 9.93, k_p = 2.58$ ，计算知不确定度为  $306''$ ，化简知顶角测量值为  $60^\circ 00' \pm 5'$ 。

最小偏向角对应的  $\frac{|Y_1+Y_2|}{2}$  分别为  $53^\circ 59' 00''$ ,  $53^\circ 57' 30''$ ,  $54^\circ 02' 00''$ ，取平均为  $53^\circ 59' 30''$ ，标准差

$112''$ 。误差  $\Delta_b = 60''$ 。查表可得  $C = \sqrt{3}$  (分光计误差分布应类似于游标卡尺)，由于实验精确性较高，取置信概率 0.99，因此  $t_p = 9.93, k_p = 2.58$ ，计算知不确定度为  $648''$ ，化简知顶角测量值为  $54^\circ 00' \pm 11'$ 。

代入公式得折射率测量值为 1.6773，由不确定度合成公式 (下方公式已化简) 可计算出不确定度

$$\text{为 (此处 } U_A, U_\delta \text{ 为弧度) } \frac{U_n}{n} = \sqrt{\cos^2 \frac{A+\delta}{2} \frac{U_A^2 + U_\delta^2}{4 \sin^2 \frac{A+\delta}{2}} + \cos^2 \frac{A}{2} \frac{U_A^2}{4 \sin^2 \frac{A}{2}}} = 0.17\%$$

**1.677 ± 0.003。**

实验反思：

实验中我在测量顶角时有一组数据偏差较大，后来只能重新测量。分析原因为锁止游标盘时，紧固螺钉使游标盘发生了移动，由此，操作时应更加注意不要导致仪器的微小转动而破坏结果。

## 实验报告-半导体温度计

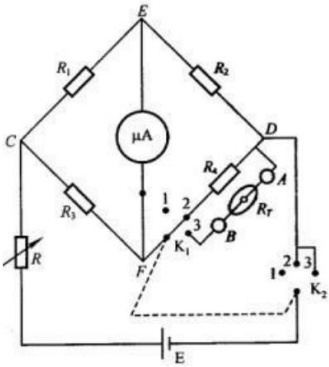
姓名：郑滕飞 学号：PB20000296 组号：204 序号：05 日期：2021年5月12日

\* [思考题与个人的其他思考将在这种括号内记录]

**实验目的：**利用热敏电阻自制半导体温度计，并以此测量温度。

### 实验原理：

温度是物质的一种属性。负温度系数的热敏电阻在小电流、一定温度范围内，阻值随温度提升而降低。由此，可以利用热敏电阻将温度转化为电学量进行测量。



实验中，为精确测定电阻阻值，采取电桥法连接电路，如图所示。为最大限度利用电流表表盘，需使测温下限 $20^{\circ}\text{C}$ 时电桥平衡示数为0，测温上限 $70^{\circ}\text{C}$ 时电流表满偏，且为方便实验使电桥为对称电桥 ( $R_1 = R_2, R_{T_1} = R_3$ ) 由此结合热敏电阻阻值与电流表参数可计算出 $R_1 = R_2$ 的阻值为 $\frac{2V_{CD}}{I_G} \left( \frac{1}{2} - \frac{R_{T_2}}{R_{T_1} + R_{T_2}} \right) - 2 \left( R_G + \frac{R_{T_1} R_{T_2}}{R_{T_1} + R_{T_2}} \right)$ ，由此逐步对电阻进行调整直到完成，温度计可正常运行。

实验中通过可变电阻器 $R$ 控制 $V_{CD} = 1\text{V}$ ，用电阻箱代替热敏电阻对表盘进行标度。在测量时，根据标度结果由局部线性估计测量值，并与水银温度计测量结果比较。

[思考：计算 $R_1$

分析可知测温上限时电流计中电流方向为由E向F，设C到E电流为 $I_1$ ，C到F电流为 $I_2$ ，则可以列出方程组

$$\begin{aligned} I_1 R_1 + (I_1 - I_G) R_1 &= V_{CD} \\ I_2 R_{T_1} + (I_2 + I_G) R_{T_2} &= V_{CD} \\ I_1 R_1 + I_G R_G &= I_2 R_{T_1} \end{aligned}$$

由此可计算出 $I_1 = \frac{V_{CD} + R_1 I_G}{2R_1}$ ,  $I_2 = \frac{V_{CD} - I_G R_{T_2}}{R_{T_1} + R_{T_2}}$ ，再代入第三个式子中可解出公式对应的结果。]

**实验仪器：**电路板、导线、烙铁、万用表、待测恒温水浴箱，水银温度计

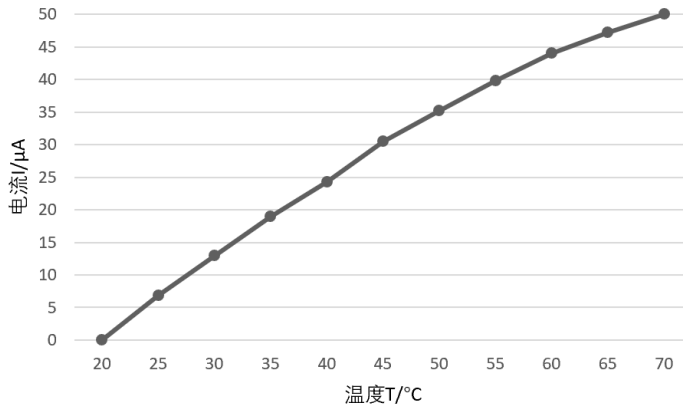
### 实验步骤：

- 1、根据已知条件计算出 $R_1, R_2$ 的阻值，并用万用表调节其阻值为比测量值稍小的值。
- 2、焊接电路，注意焊接时保证开关在1档，E与+两点最后焊接，并避免虚焊。
- 3、开关调至3档接入电阻箱，将电阻箱电阻调为 $R_{T_1}$ ，调节 $R_3$ 使电桥平衡。
- 4、将电阻箱电阻调至 $R_{T_2}$ ，调节 $R$ 使微安计满偏。
- 5、开关调至2档，调节 $R_4$ 使微安计满偏。
- 6、开关调至3档，将电阻箱调至热敏电阻不同温度时的阻值，标定电流计表盘。
- 7、开关调至1档，改接热敏电阻后调至3档，放入恒温水浴箱测量，记录示数。
- 8、将测量值与水银温度计测量结果对比，计算误差。

### 数据与处理：

标定结果：

电流 $I/\mu A$	0.0	6.8	13.0	19.0	24.3	30.5	35.2	39.8	44.0	47.2	50.0
温度 $T/^\circ C$	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0



测量值:

水银温度计 $32.0^\circ C$  读数 $14.8\mu A$

水银温度计 $59.0^\circ C$  读数 $42.7\mu A$

结果计算:

$$13.0 < 14.8 < 19.0, T_A = 30.0 + 5.0 \frac{14.8-13.0}{19.0-13.0} = 31.5^\circ C, \text{ (以摄氏度看) 误差为} 1.6\%$$

$$39.8 < 42.7 < 44.0, T_A = 55.0 + 5.0 \frac{42.7-39.8}{44.0-39.8} = 58.5^\circ C, \text{ (以摄氏度看) 误差为} 0.8\%$$

〔思考: 误差分析

除热敏电阻自身的不稳定外, 本实验的误差来源于观察电流表表盘是否正确, 与调节电阻时的精准程度。此外, 局部线性估计也可能带来误差, 尤其在于刻度线密集的高温区域。〕

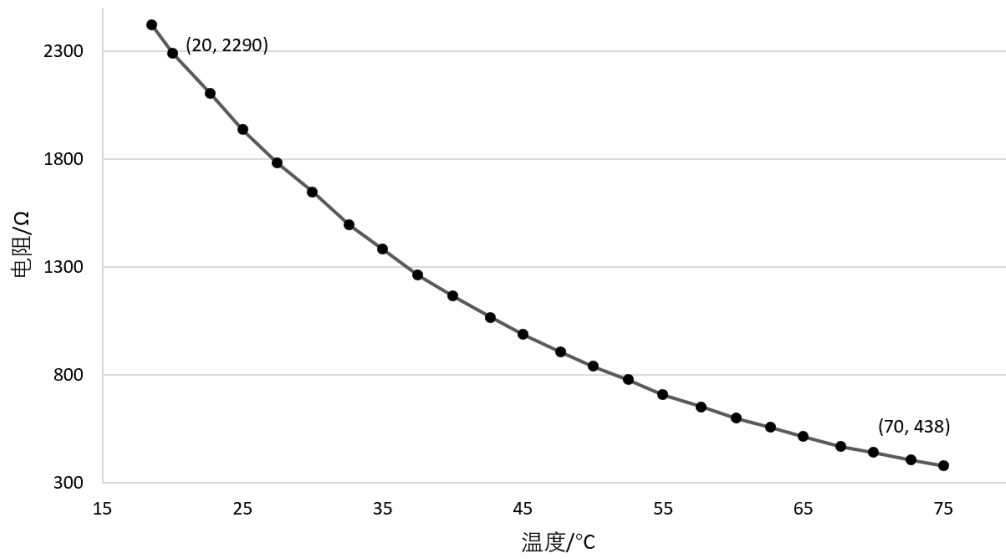
〔思考题:

- 1、 此时实际分压会稍小, 更方便控制流过热敏电阻的电流在小电流范围内, 并保护元件。
- 2、 否则万用表测量 $R_1$ 时实际测量为 $R_1$ 与 $R_3 + R_G$  (或 $R_3 + R_4 + R_2$ ) 的并联电阻, 测量 $R_2$ 时亦然, 无法正确调整。
- 3、 之前的计算已经保证, 当分压合适时电流表为满刻度, 根据实验设计可估算出 $R$ 的调节范围足够分压。
- 4、 当使用时间稍长, 需重新调整 $R$ 时, 只需接入 2 档调整即可, 不用拆开电路重新调整, 方便操作。〕

## 预习报告-半导体温度计的设计和制作

姓名：郑滕飞 学号：PB20000296 台号：5

热敏电阻温度-阻值关系图



由此， $R_{T_1} = 2290\Omega$ ,  $R_{T_2} = 438\Omega$ ，查表可知 $V_{CD} = 1V$ ,  $R_G = 3407\Omega$ ,  $I_G = 50\mu A$

代入公式可计算出 $R_1 = R_2 = 6028\Omega$ 。



## 实验报告-液体表面张力系数测定

姓名：郑腾飞 学号：PB20000296 组号：204 序号：05

\* [思考题与个人的其他思考将在这种括号内记录]

**实验目的：**利用焦利氏秤测量水与洗洁精溶液的表面张力。

### 实验原理：

表面张力来源于液体表面层分子受力不均，而表面张力系数是液体的一种属性，数值上等于液面上单位长度的线段所受的拉力。

实验中，利用焦利氏秤将金属丝/圈缓缓拉出水面，通过直接测量液膜将要拉破时所受的拉力，从而计算出液体的表面张力。

[思考：焦利氏秤的相关注意

实验中最重要的是每次读数都要在三线合一时（三线合一目的：通过玻璃管上细线与其像的合一取消视差，并进一步通过与镜子刻度对齐确认读数），因此在调整时，需同时调整烧杯高度（用于拉液膜）与刻度（用于读数），时刻保持对齐，从而方便确定断裂时的读数。]

**实验器材：**焦利氏秤、带刻度烧杯、水、洗洁精、针筒、砝码

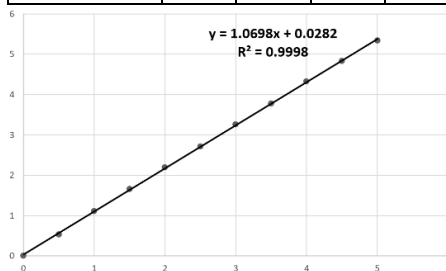
### 实验步骤：

- 1、在焦利氏秤的秤盘上挂上0.5g~5g的砝码，每次增量0.5g，利用线性回归估计出劲度系数 $k$ 的值。
- 2、用直尺测量三次金属圈的直径。
- 3、在秤盘下挂上金属圈，并在平台上放置装有水的烧杯，刚好侵入水中时记录初始读数。
- 4、缓缓旋转平台微调螺丝和升降旋钮，刚要破裂时记录读数，反复五次。
- 5、用直尺测量三次金属丝的长度。
- 6、在秤盘下挂上金属丝，并在平台上放置装有洗洁精溶液的烧杯，刚好侵入水中时记录初始读数。
- 7、缓缓旋转平台微调螺丝和升降旋钮，刚要破裂时记录读数，反复五次。
- 8、在平台上放置装有不同浓度洗洁精溶液的烧杯，记录不同浓度下破裂对应的读数。

### 数据处理：

#### 1、劲度系数 $k$

质量/g	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
读数/cm	3.87	4.40	4.98	5.54	6.06	6.58	7.13	7.65	8.19	8.70	9.21
伸长量/cm	0	0.53	1.11	1.66	2.19	2.71	3.26	3.78	4.32	4.83	5.34



由最小二乘法拟合， $R^2 = 0.9998$ ，可以认为有较强的线性关系，数据合理。估测的劲度系数值为斜率的倒数乘以 $g$ 值，计算知为 $9.16N/m$ 。

## 2、自来水表面张力（含不确定度）

金属圈直径 $d/cm$ ：直尺三次测量为 3.50/3.72/3.65

平均值 $3.623cm$ ，标准差 $0.092cm$ ，取置信概率 $0.95$ ， $k_p = 1.96$ ， $t_p = 4.30$ ， $C = 3$ ，计算得不确定度为 $0.26cm$ ，因此最终结果为 $3.62 \pm 0.26cm$ 。

初始读数 $l_0$ 为 $4.13cm$ ，破裂 $l$ 的五次读数/ $cm$ ：5.85/5.77/5.84/5.80/5.81

平均值 $5.814cm$ ，标准差 $0.029cm$ ，取置信概率 $0.95$ ， $k_p = 1.96$ ， $t_p = 2.78$ ， $C = \sqrt{3}$ ，计算得不确定度为 $0.03cm$ ，因此最终结果为 $5.81 \pm 0.03cm$ ，差值为 $1.68 \pm 0.03cm$ 。

合成公式为 $\sigma = \frac{k\Delta l}{\pi d}$ ，因此由不确定度合成可知估算值为 $1.35 \pm 0.10N/m$ 。

〔思考：数据异常

实验时，由于和身旁同学的情况差别较大，提升距离显著较高，我进行了反复的确认，但结果并没有改变。对比资料中的数据，这个结果确实过大了。通过查询资料，我推测可能原因是水中混入的无机盐等物质影响了表面张力。〕

## 3、洗洁精溶液表面张力

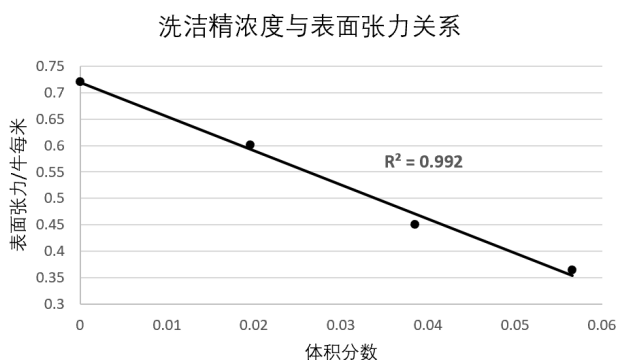
金属丝长度 $d/cm$ ：直尺三次测量为 4.25/4.28/4.29，平均值 $4.273cm$

初始读数 $l_0$ 为 $4.07cm$ ，破裂 $l$ 的五次读数/ $cm$ ：4.35/4.38/4.36/4.34/4.32，平均值 $4.350cm$

合成公式为 $\sigma = \frac{k\Delta l}{d}$ ，计算得结果为 $0.60N/m$ 。

## 4、不同浓度洗洁精溶液表面张力

初始 $l_0/cm$	4.12	4.13	4.12
破裂 $l/cm$	4.40	4.34	4.29
洗洁精与水体积比	1:50	2:50	3:50
表面张力/ $N \cdot m^{-1}$	0.60	0.45	0.36



绘制关系图后（浓度为 0 时采取当时室温 $23^{\circ}C$ 下资料中数值 $0.72N/m$ ），由于结果近似线性，我对其进行了线性拟合，发现 $R^2 = 0.992$ ，确实有着较为良好的线性关系。

〔思考题：

1、优点：直观，直接测量，公式较为简单，方便数据处理。由于焦利氏秤精度较高，结果相对精确。

2、为消除拉伸时弹簧自身重力对测量结果的影响。

3、核心误差在于刚要破裂时的读数较难确定产生的误差，其他如金属丝形状不均匀、金属丝是否完全水平亦可能造成误差。〕

## 实验报告-生活中的物理实验

姓名：郑滕飞 学号：PB20000296 组号：204 序号：05

### 一、有关磁悬浮陀螺

实验器材：磁性陀螺、塑料片、磁性平台、三角垫片、带孔的宽尺子

实验步骤：

- 1、在磁性陀螺上增加适当重量的塑料片。
- 2、在磁性平台下放置垫片，调整至水平
- 3、旋转陀螺，使陀螺被宽尺的孔限制在平台中心附近。
- 4、缓慢提起宽尺，找到陀螺能平衡悬浮的位置。
- 5、观察磁悬浮下的旋转陀螺。

实验分析：

磁悬浮陀螺实验，我最多成功过 1 秒左右，而有的同组同学能做到 3 秒甚至更长时间。

经分析可知，这个实验有两个难点：

第一是调整配重与高度。调整配重的结果是陀螺的重力比与受到的磁力基本平衡，并压低陀螺重心。这样可以在离开平面一定高度处悬浮。我的前几次尝试中，由于配重不足，陀螺在用尺子抬起前就已经飞离了平台，导致失败。

第二是控制平台与旋转角度的水平。二者的水平保证了没有侧向力矩的产生，否则，在磁力与进动的影响下，不平衡会很快被放大，导致几乎无法在空中稳定。事实上，这也是实验失败的最大原因。在实际操作中，哪怕已经尽力保持了平台的水平，掷出陀螺时也很难保持水平，因此难以长久旋转。

从本质来说，陀螺在水平旋转时处于势能极高点位置，因此构成不稳定平衡。稍偏离平衡位置后，即有偏离更多的趋势。因此，只有在保证几乎完全水平时，才可能见到稳定的悬浮下旋转。

若要改进实验，最关键的是从掷出陀螺的水平性入手，可以考虑制作一定的轨道或发射器，避免手动操作的误差，或者改变陀螺形状，降低重心，使其获得一定回复能力。这样，提升塑料尺时便可以稳定很多。

### 二、有关同步节拍器

实验器材：节拍器若干、平板、支撑用圆柱体

实验步骤：

- 1、将两节拍器调整至频率相同。
- 2、将两节拍器放在平板上，观察是否耦合。
- 3、添加圆柱体，使平板可在节拍器摆动的方向自由运动，观察是否耦合。
- 4、调整节拍器个数、位置等，观察情况，

实验分析：

在实验室中，由于讲义上的表述较为模糊，我第一次课时反复做实验，均未发现耦合现象，后来发现是由于漏掉了频率相近这一步。所谓“耦合”在振动中可能有三重含义：频率相同、振幅相同、相位相同。节拍器的频率完全由滑块的调整而定，由此，所谓的“耦合”指的应是在频率相同时，振幅和相位渐趋相同的过程。

对于单个节拍器的摆动，可以近似看为阻尼下的简谐振动的过程。由于阻尼很小，在一段时间内，基本观察不到振幅的变化，当可移动平板被加入，在平板的影响下，两个节拍器都进入了受迫振动过程（考虑到频率被调整至相同，事实上发生了共振），在共振中，暂态

情况很快衰减，最终两节拍器一起进入了稳态情况。此时，平板亦在做简谐振动，且相位、周期亦与两节拍器一致。

若平板的自由方向与节拍器摆动方向垂直，则由于受力方向原因不存在耦合。若与摆动方向成角度，一般最终仍会耦合，但所需时间会比平行时延长。增加节拍器个数后，便可以观察到多节拍器的耦合情况，最终结果与两节拍器时基本相同。由于平板是整体运动的，两节拍器之间的相对位置并不会影响实验，但夹角会显著影响结果（实验中可观察到，改变夹角引起的情况较为复杂，一般来说很难达到耦合）。

（部分资料来源为 <https://zhuatlan.zhihu.com/p/35840336>）