

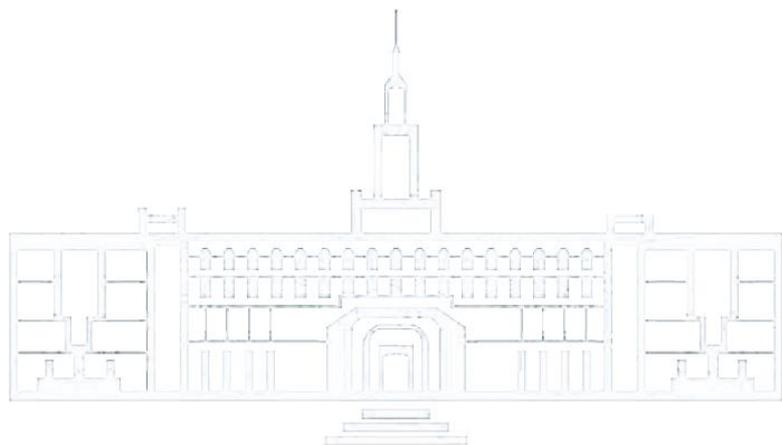


# 物理学国家级实验教学示范中心

National Demonstration Center for Experimental Physics Education



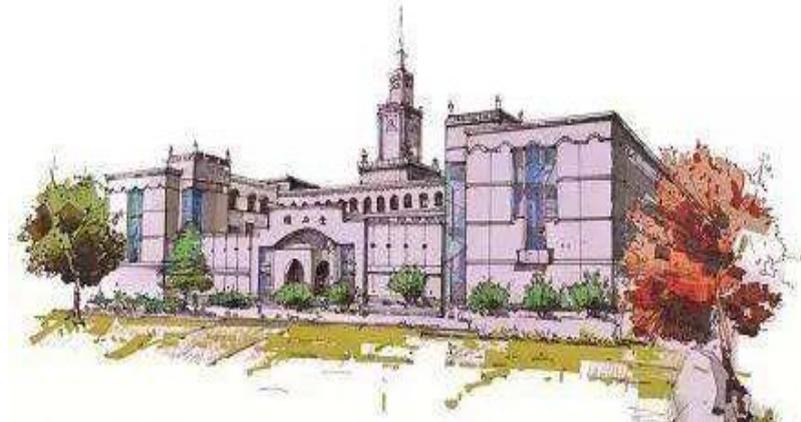
# 液体粘滞系数的测定



堅守·奮斗



# ◀ 目 录 ▶



01

背景知识

04

实验仪器

02

实验目的

05

实验内容

03

实验原理

06

注意事项

07

实验问题

堅守 · 奮斗



01

# 背景知识





## 流体的粘性

在作相对运动的两层流体之间的接触面上，存在一对阻碍两流体层相对运动的大小相等而方向相反的摩擦力，这种摩擦力称为流体的粘滞力或内摩擦力。流体的这种性质称为粘性。

实验表明，流体内部相邻两流体层间粘滞力的大小 $f$ ，正比于这两层流体间的接触面积 $\Delta S$ ，正比于该处速率梯度的大小 $(dv/dz)$ ，即

$$f = \eta \frac{dv}{dz} \Delta S$$

比例系数 $\eta$ 称为流体的粘滞系数，是用来表示流体粘滞性的物理量。它的SI单位制（国际制）为帕秒（Pa·s）。CGS单位制是泊（P）， $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}=10\text{P}$ 。粘滞系数与流体性质以及温度密切相关。液体粘滞系数随温度升高而减小，气体相反。



# 流体的粘性

---

液体粘滞系数 $\eta$ 是表征液体反抗形变能力的重要参数，对液体粘滞性的研究在医疗、航空、水利以及液压传动等方面有着广泛和重要的应用。

比如现代医学发现，很多心血管疾病都与血液粘度的变化有密切关系。再比如石油在封闭管道中长距离运输时，其运输特点与石油的粘滞性密切相关，故而在设计输送管道前必须先测量被运输石油的粘度。



02

# 实验目的





# 实验目的

---

## 目的

1

观察球形物体在流体中受内摩擦力的运动情况。

2

掌握用斯托克斯公式测定液体粘滞系数的方法。

3

学会测量显微镜的使用。



03

# 实验原理





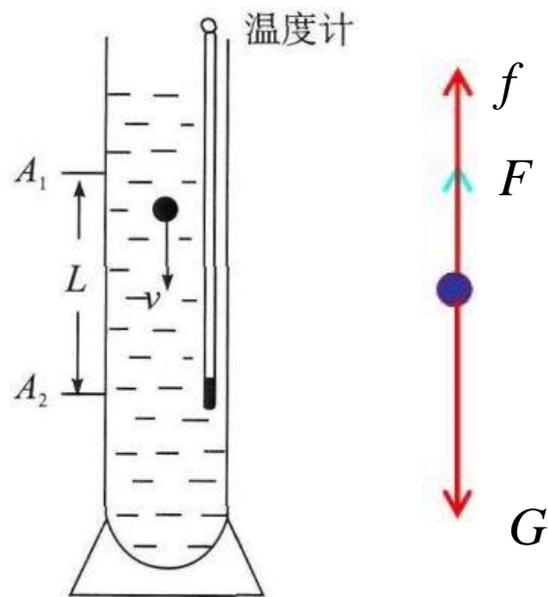
## 实验原理

落球法测量液体粘滞系数的实验原理如下：

一个在静止粘性液体中自由下落的小球（初速度为零）在液体中自由下落时，将在竖直方向受到三个力的作用

- (1) 重力 $G$ ，方向向下
- (2) 浮力 $F$ ，方向向上
- (3) 粘滞阻力 $f$ ，方向向上。

（粘滞阻力的来源：小球进入液体后，粘附在小球表面的液体层与邻近液体层间的内摩擦力所致）



小球在液体中下落及其竖直方向受力情况示意图



## 实验原理

---

若小球直径为 $d$ ，密度为 $\rho$ ，在液体中下落速度为 $v$ ；液体密度为 $\rho_0$ ， $g$ 为重力加速度，则

$$G = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho g \quad F = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho_0 g$$

如果液体是无限广延的且无漩涡产生，液体粘性比较大，同时小球的直径较小速度也较小时，根据斯托克斯公式，小球所受粘滞阻力 $f$ 大小为

$$f = 3\pi \eta d v$$

粘滞力 $f$ 的大小与小球下落速度 $v$ 成正比



## 实验原理

对 $G$ ， $F$ 和 $f$ 变化的分析：

$$\left. \begin{aligned} G &= \frac{1}{6} \pi d^3 \rho g \\ F &= \frac{1}{6} \pi d^3 \rho_0 g \end{aligned} \right\} \text{恒定!!} \quad f = 3\pi \eta d v \quad \text{随}v\text{变化!!!}$$

开始阶段：自由落体， $v$ 较小， $f$ 较小；小球在 $G$ 作用下作加速下落运动（ $G$ 大于 $F+f$ ）； $v$ 逐渐增大， $f$ 逐渐增大，加速度逐渐减小（加速度逐渐减小的加速下落运动）。

临界时刻： $v$ 增大至 $v_0$ ， $G=F+f$

匀速下落运动阶段： $v=v_0$ ， $G=F+f$ （小球受力平衡）



## 实验原理

匀速下落运动阶段，小球受力始终满足力的平衡  $G = F + f$

$$\text{即 } \frac{1}{6}\pi d^3 \rho g = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho_0 g + 3\pi\eta d v_0$$

依据此等式，建立了液体粘滞系数 $\eta$ 与相关物理量（ $d, \rho, \rho_0, v_0$ ）之间的关系

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{\rho - \rho_0}{v_0} d^2 g$$

假如测得小球匀速下落运动阶段所通过一段距离为 $L$ 时所用时间为 $t$ ，则 $v_0 = L/t$

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{(\rho - \rho_0) d^2 g t}{L}$$

此即为通过落球法计算和测量液体粘滞系数的依据



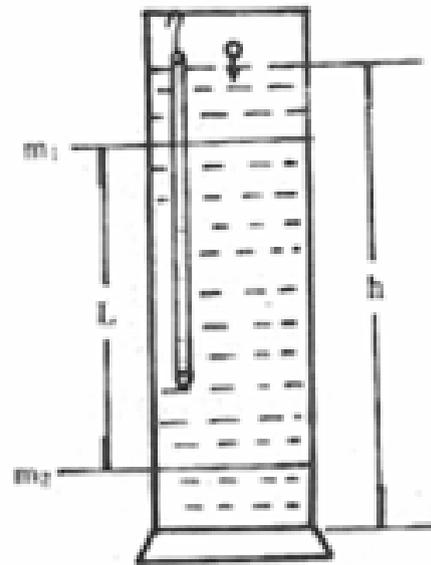
# 实验误差分析

## 实验误差一

在实验中要求小球在无限广延的液体中下落，这实际上是不可能满足的。

实际实验中，待测液体盛在右图左图所示的量筒中，量筒内径为  $D$ ，待测液体深度为  $h$ ，考虑到器壁的影响，粘滞系数的测量公式修正为

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{(\rho - \rho_0)d^2gt}{L(1 + 2.4\frac{d}{D})(1 + 3.3\frac{d}{2h})}$$





# 实验误差分析

## 实验误差二

物体所受来自流体的阻力，有粘滞阻力和压差阻力（惯性阻力）。粘滞阻力就是我们前面讲的 $f$ ，它与 $\eta dv$ 成正比；压差阻力与 $\rho_0 d^2 v^2$ 成正比。

流动缓慢时，粘滞阻力起主要作用，这时流体成为层流（各层只作相对滑动而彼此不相混合）；流动一加快，流动的情形就会改变，成为紊流（流体中沿垂直于管轴方向的速度分量的不规则流动），此时压差阻力占优势。

压差阻力与粘滞阻力之比称为雷诺数 $Re$

$$Re = \frac{\rho_0 d^2 v^2}{\eta dv} = \frac{\rho_0 dv}{\eta}$$

$Re$ 是无量纲的数，是标志流体流动情况特点的重要的数。斯托克斯公式是在 $Re$ 很小的条件下（ $Re \ll 1$ ）成立的。如果 $Re$ 不很小，应对它进行修正。



# 实验误差分析

## 实验误差二

根据  $f = 3\pi\eta d\nu(1 + \frac{3}{16}Re)$

得 
$$\eta = \frac{1}{18} \frac{(\rho - \rho_0)d^2gt}{L(1 + 2.4\frac{d}{D})(1 + 3.3\frac{d}{2h})} - \frac{3}{16}\rho_0d\frac{L}{t}$$



# 实验误差分析

---

## 实验误差三

### 读数显微镜测量小球直径误差分析

使用读数显微镜测量小球直径时，首先要避免回程差，移动测微器使其从相反方向对准同一目标的两次读数，由于螺丝和螺套不可能完全密接，螺旋转动的方向改变时，它们的接触状态也将改变，由此产生的测量误差称为回程误差（或空程差）。

为防止回程误差，在测量时，应同一方向转动测微器进行读数和测量；其次应注意载物台移动方向要与一条叉丝严格平行。



04

# 实验仪器





# 实验仪器用具

玻璃量筒、小球、测量显微镜、游标卡尺、米尺、秒表、镊子、温度计、蓖麻油



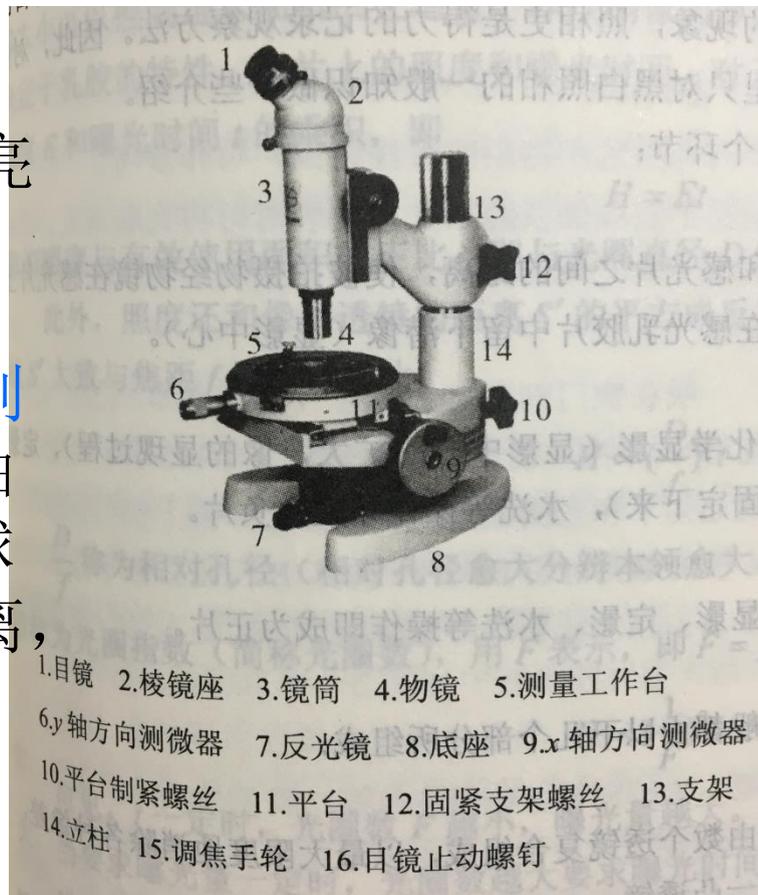


# 实验仪器用具

## 测量显微镜的调节和使用步骤详解

1. 调整反光镜的角度，使观察者从目镜中能看到明亮的视场。

2. 调整目镜，能清楚地看到叉丝并且使横竖叉丝分别与工作台的x轴和y轴平行(即与x轴方向测微器9和y轴方向测微器6所在直线分别平行)。叉丝是用于测量小球直径时的准线，必须通过调节目镜和叉丝之间的距离，使得叉丝清晰（可通过旋转目镜筒的端盖实现）。





## 实验仪器用具

3. 调节待测物（此处即小球）的像清晰。把待测物放在测量工作台上物镜的下方，可进一步通过旋转x轴方向测微器9和y轴向测微器6使待测小球对准物镜。之后眼睛从侧面观察，通过调焦手轮使物镜靠近小球但不能接触！之后眼睛放在目镜上再通过调焦手轮把物镜逐渐上移（此为调焦过程），直至看到小球的清晰的像为止。

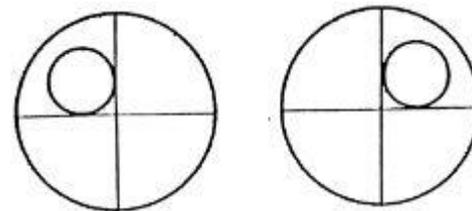
注意：a)从目镜中观察时，切记不要调错手轮方向，以免物镜与小球接触损坏仪器！b)要确保像与叉丝之间无视差，可左右移动眼睛，看到叉丝与小球的像之间无相对移动为止。



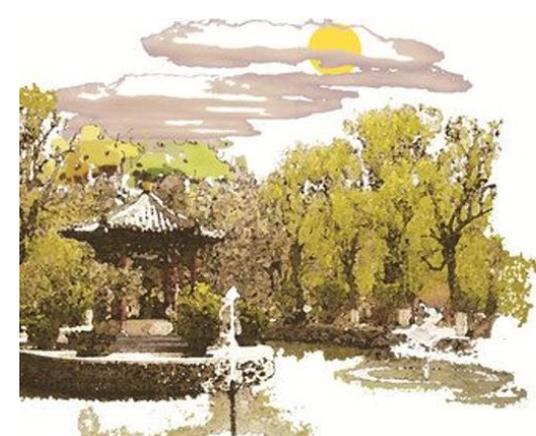


## 实验仪器用具

4. 测量小球直径。移动x轴方向测微器（或y轴方向测微器），使目镜中相应垂直的叉丝与小球像的一侧相切（如右图中左侧图所示），记下此时x轴方向测微器的读数 $x_1$ 。沿同一方向转动x轴方向测微器，使小球像越过叉丝线在另一侧与叉丝相切（如右图所示），记下此时x轴方向测微器的读数 $x_2$ 。则两次读数之差即为小球直径，即 $d=|x_1-x_2|$ 。



注意：为避免回程误差，测量过程中不允许改变x轴方向测微器（或y轴方向测微器）的转动方向。在相同条件下，计量器具正反行程在同一点示值上被测量值之差的绝对值，叫回程误差。对于测微器而言，测微螺栓与螺母之间不是紧密配合的，转动方向改变时会导致回程误差。



蘭州大學  
蘭大

05

# 实验内容





## 实验内容

---

测量公式决定实验内容  $\eta = \frac{1}{18} \frac{(\rho - \rho_0)d^2 gt}{L(1 + 2.4 \frac{d}{D})(1 + 3.3 \frac{d}{2h})}$

1. 用读数测量显微镜测量小球的直径，要求最少要测5个小球，每个小球在不同直径方向测量5次。
2. 把量筒上下部的环形标志m1和m2调水平，用米尺测量两个环形标志之间的距离L和液体深度h,在不同地方测量5次。
3. 用游标卡尺测量量筒的内径D，在不同直径方向测量5次。
4. 测出液体的温度T1。



## 实验内容

---

5. 用镊子夹住小球，在量筒口中央液面上方释放让其自由降落。此时观测者的眼睛要正对着量筒的上侧环线，使眼睛与环线在一直线上（即只看到一直线，没有看到椭圆），当小球经过时按下秒表开始计时，之后用同样的方法使眼睛对准量筒下侧环线，当小球到达的瞬间，按下秒表停止计时，测出小球经过两个m距离L的时间t。
6. 实验完成后把挂在量筒旁的温度计提到圆筒中央，来进行读数，读出液体的温度T<sub>2</sub>，读完后放下挂好，勿使油中产生气泡和使油流出筒外。
7. 计算出η值和误差。
8. 算出的η值与根据 $T = \frac{T_1 + T_2}{2}$ 值从图表中查出的η公值进行比较，算出百分差。



# 实验内容

数据记录表格

项目	次数 测量值	1	2	3	4	5	平均值
		量筒内径 $D/\text{mm}$					
环线间距 $L/\text{cm}$							
液体深度 $h/\text{cm}$							
小球直径 $d1/\text{mm}$							
小球直径 $d2/\text{mm}$							
小球直径 $d3/\text{mm}$							
小球直径 $d4/\text{mm}$							
小球直径 $d5/\text{mm}$							
小球 $d1$ 下落时间 $t1/\text{s}$							
小球 $d2$ 下落时间 $t2/\text{s}$							
小球 $d3$ 下落时间 $t3/\text{s}$							
小球 $d4$ 下落时间 $t4/\text{s}$							
小球 $d5$ 下落时间 $t5/\text{s}$							
本地重力加速度 $g/(\text{m}/\text{s}^2)$				9.793			
小球密度 $\rho /(\text{g}/\text{cm}^3)$				11.305			
蓖麻油密度 $\rho_0/(\text{g}/\text{cm}^3)$				0.965			
蓖麻油温度 $T/^\circ\text{C}$							



06

# 注意事项





## 注意事项

---

1. 在正式测量之前，可用一个没有测过直径的小球来做试验，以观察小球运动情况和练习时间的测量。
2. 实验时，量筒内的油中应无气泡。小球不要弄脏，在将小球放入量筒前可用待测液体在小玻片上将其浸湿。
3. 液体粘滞系数随温度变化而变化，因此测量过程中手和身体都不要接触到量筒，以保持实验过程中油温恒定。
4. 游标卡尺和千分尺在使用前，应先读出其零点修正值。
5. 读数显微镜的透镜禁止用手或杂布去擦拭，如有灰尘，只能用专用擦纸去擦干净。
6. 连续测量时，放入小球的时间间隔稍长一些，但不能过长。

**7. 实验结束后，认真处理数据，按要求完成实验报告！！**



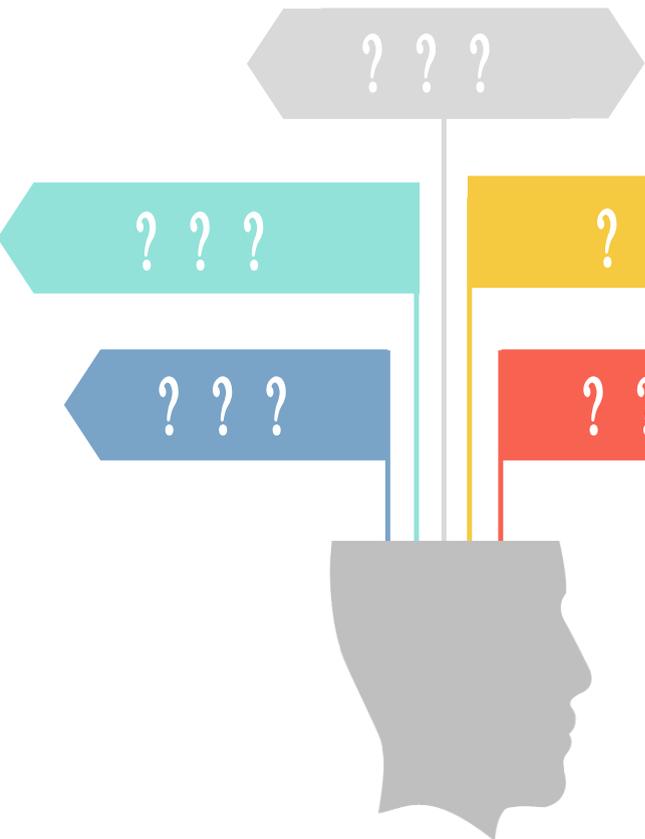
07

# 实验问题





# 实验问题



1、如何判断小球在作匀速运动？

2、测量小球直径时，为何测量显微镜要单方向测量？

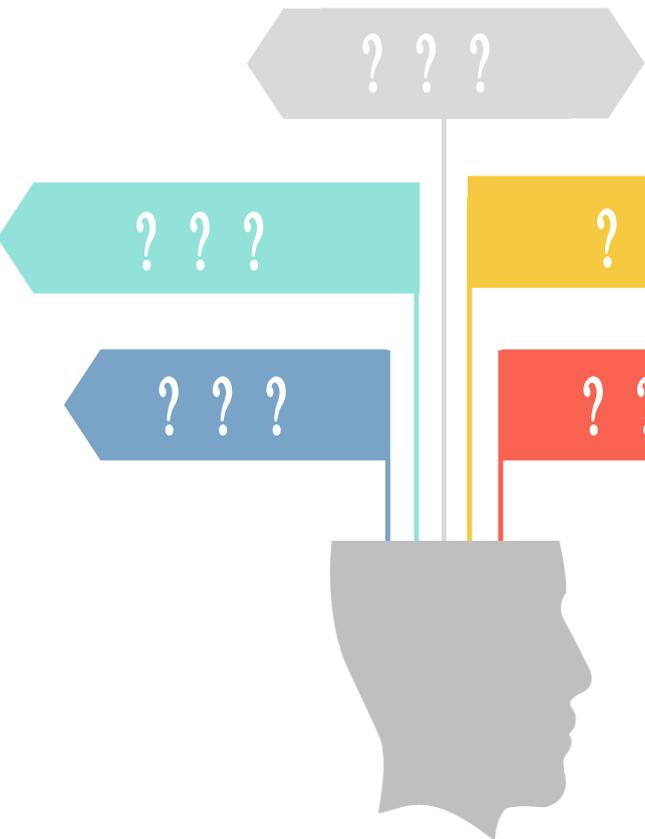
3、实验中要求钢珠沿圆筒中心线下落，为什么？  
如果让小球沿量筒内壁下落，会对测量结果有何影响？

4、连续测量时，投放小球的时间间隔长短对实验  
是否有影响？

5、在特定的液体中，当小球的半径减小时，  
它的收尾速度 $v_0$  如何变化？当小球密度增大时， $v_0$   
如何变化？



# 实验问题



1、如何判断小球在作匀速运动？

2、测量小球直径时，为何测量显微镜要单方向测量？

3、实验中要求钢珠沿圆筒中心线下落，为什么？  
如果让小球沿量筒内壁下落，会对测量结果有何影响？

4、连续测量时，投放小球的时间间隔长短对实验  
是否有影响？

5、在特定的液体中，当小球的半径减小时，  
它的收尾速度 $v_0$  如何变化？当小球密度增大时， $v_0$   
如何变化？



# 数据处理

计算公式 
$$\eta = \frac{1}{18} \frac{(\rho - \rho_0)d^2gt}{L(1 + 2.4\frac{d}{D})(1 + 3.3\frac{d}{2h})}$$

项目	次数 测量值	1	2	3	4	5	平均值
		量筒内径 D/mm					
环线间距 L/cm							
液体深度 h/cm							
小球直径 d1/mm							
小球直径 d2/mm							
小球直径 d3/mm							
小球直径 d4/mm							
小球直径 d5/mm							
小球d1下落时间 t1/s							
小球d2下落时间 t2/s							
小球d3下落时间 t3/s							
小球d4下落时间 t4/s							
小球d5下落时间 t5/s							
本地重力加速度 g/ (m/s <sup>2</sup> )				9.793			
小球密度 ρ / (g/cm <sup>3</sup> )				11.305			
蓖麻油密度 ρ <sub>0</sub> / (g/cm <sup>3</sup> )				0.965			
蓖麻油温度 T/° C							



## 第二节 测量结果的表示及不确定度 (绪论课已讲内容)

### 1 测量结果的表示:

$$x = \bar{x} \pm U(x)$$

其中  $\bar{x}$  是测量最佳值，就是平均值，  
 $u(x)$  是不确定度。



## 2 $\bar{x}$ 的计算

①直接测量量:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

②间接测量量:

$$\bar{x} = f(\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots)$$



### 3. $u(x)$ 的计算

#### ①直接测量量:

$$u(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)}$$

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

对单次测量, 不可用该式计算, 取  $u_A$  为0。

$$u_B(x) = \frac{\Delta_I}{\sqrt{3}}$$

仪器误差引起



## ②间接测量量： $u(x)$ 由传递公式计算

$$u(x) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)^2 u^2(a) + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)^2 u^2(b) + \left(\frac{\partial f}{\partial c}\right)^2 u^2(c) + \dots \dots}$$

或  $\ln x = \ln f(a, b, c\dots) = \ln f$

$$\frac{u(x)}{x} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial a}\right)^2 u^2(a) + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial b}\right)^2 u^2(b) + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial c}\right)^2 u^2(c) + \dots \dots}$$



## 说明:

①在传递公式中某一项是另一项的 $1/10$ 以下时，该项可忽略不计。即当某一分量（平方号下的）是另一分量的以下 $1/4$ 时，该项可忽略不计。

②对出现在公式中的修正项，在推导传递公式时先忽略掉。



# 数据处理

---

## 一、直接测量量

1. 关于小球直径 $d$ （以其中一个小球为例）

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$$

$$u_A(d) = t(P, n) \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} \quad t(P, n) \text{ 的值见教材20页表格, } P \text{ 取} 0.683 \text{ 即可}$$

$$u_B(d) = \frac{\Delta_I}{\sqrt{3}}$$



## 数据处理

---

$$u(d) = \sqrt{u_A^2(d) + u_B^2(d)}$$

$$d = \bar{d} \pm u(d)$$

第2至第4个小球直径，量筒内径 $D$ ，环线间距 $L$ ，液体深度 $h$ 的数据处理过程与第一个小球直径的处理过程和要求相同



## 数据处理

---

对于小球下落时间 $t$ ,每一个小球只有一个下落时间,所以计算不确定度时A类不确定度为0,只有B类不确定度

$$u_B(t) = \frac{\Delta_I}{\sqrt{3}}$$

秒表的 $\Delta_I$ 为0.01秒,但是操作者是人,人的反应时间大体是0.2秒,应用人的反应时间代替 $\Delta_I$ 。



## 数据处理

---

关于粘滞系数 $\eta$

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{(\rho - \rho_0)d^2gt}{L(1 + 2.4\frac{d}{D})(1 + 3.3\frac{d}{2h})}$$

平均值

$$\bar{\eta} = \frac{1}{18} \frac{(\rho - \rho_0) \bar{d}^2 g \bar{t}}{\bar{L}(1 + 2.4\frac{\bar{d}}{\bar{D}})(1 + 3.3\frac{\bar{d}}{2\bar{h}})}$$



## 数据处理

---

不确定度的计算  $\ln\eta = \ln\left(\frac{1}{18} \frac{(\rho - \rho_0)d^2gt}{L}\right)$

$$\ln\eta = \ln\frac{(\rho - \rho_0)g}{18} + 2\ln d + \ln t - \ln L$$

$$\frac{\partial \ln\eta}{\partial d} = \frac{2}{d} \quad \frac{\partial \ln\eta}{\partial t} = \frac{1}{t} \quad \frac{\partial \ln\eta}{\partial L} = -\frac{1}{L}$$

$$\frac{u(\eta)}{\bar{\eta}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln\eta}{\partial d}\right)^2 u(d)^2 + \left(\frac{\partial \ln\eta}{\partial t}\right)^2 u(t)^2 + \left(\frac{\partial \ln\eta}{\partial L}\right)^2 u(L)^2}$$



## 数据处理

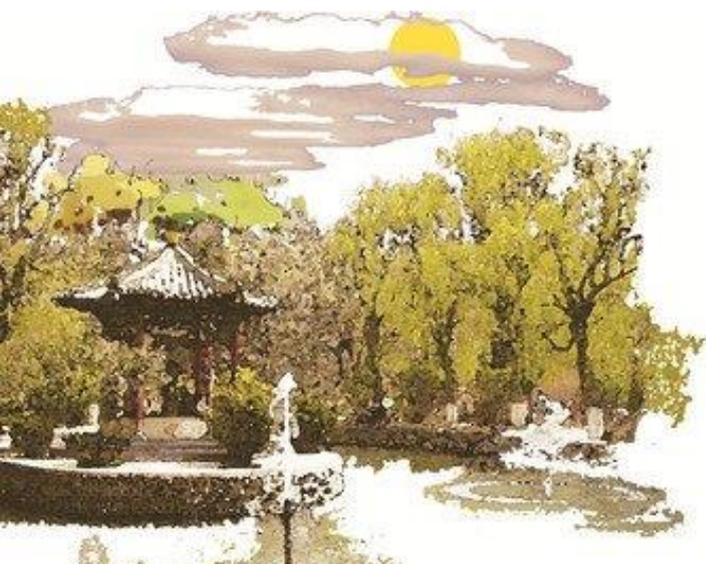
---

$$\frac{u(\eta)}{\bar{\eta}} = \sqrt{\left(\frac{2}{d}\right)^2 u(d)^2 + \left(\frac{1}{t}\right)^2 u(t)^2 + \left(\frac{1}{L}\right)^2 u(L)^2}$$

$$u(\eta) = \bar{\eta} * \sqrt{\left(\frac{2}{d}\right)^2 u(d)^2 + \left(\frac{1}{t}\right)^2 u(t)^2 + \left(\frac{1}{L}\right)^2 u(L)^2}$$



本次课程结束，祝同学们  
学有所获！



蘭州大學  
蘭州大學  
蘭州大學