大学物理实验

---基础理论知识

Physics

欧忠敏
周一3-4节， F109
理学院 物理系 物理实验中心
http://www.phylab.shu.edu.cn/

&1.大学物理实验课程介绍

&2.大学物理实验课的安排

&3.测量、误差和不确定度估算

&4.实验数据处理

&5.物理实验基本仪器

&1 大学物理实验课程的介绍

1.1 物理实验的作用

物理是一门**实验科学**：物理规律的发现；

物理理论的验证

1.2 教学实验和科学实验的关系

1）确定课题，构思模型，给出实验方案；

2）制作或选择实验装置，准备实验所需仪器；

3）观察现象和测量数据；

4）整理、分析数据，得出结论并写出报告。

科学实验：探索型，各种可能性；

教学实验：理想化，排除次要干扰。

诺贝尔物理学奖

2015年 梶田隆章、阿瑟·麦克唐纳：通过实验发现了中微子振荡，表明中微子具有质量。

2016年 戴维·索利斯、邓肯·霍尔丹和迈克尔·科斯特利茨：在拓扑相变以及拓扑材料方面的理论发现。

2017年 雷纳·韦斯、巴里·巴里什和基普·索恩：构思设计“激光干涉引力波天文台”（LIGO）项目，从而发现引力波。

2018年 阿瑟·阿什金、热拉尔·穆鲁和唐娜·斯特里克兰：光学镊子及其在生物系统中的应用以及生成高强度，超短光脉冲的方法。

2019年 詹姆斯·皮布尔斯、米歇尔·麦耶和迪迪埃·奎洛兹：理解宇宙的演化及地球在宇宙中的地位。

1.3 物理实验课程的地位、作用与任务

1）理工大类 必修基础课，与理论课同等重要

2）具体任务

a) 培养**基本实验技能**，提高科学**实验基本素质**，初步掌握实验科学的思想和方法，培养科学思维和创新意识，掌握实验研究的基本方法，提高分析和创新能力；

b) 提高科学素养，培养理论联系实际和实事求是的科学作风，认真严谨的科学态度，积极主动的探索精神，遵守纪律，团结协作，爱护公共财产的优良品德。

&2 大学物理实验课的安排

1. 基础知识（第1~3周） EJ103
   实验操作（第4周~第9周） F楼
   操作考试（第10周） F楼
2. 实验方案选择 www.phylab.shu.edu.cn
   6组实验中任选2组（4个实验）
   时间节点：第一周~第二周

http://www.phylab.shu.edu.cn

选课系统初始用户名和密码：学号。

注册通过后请尽快“修改密码” ！！！

注册时在“修改资料”中留手机号码以便联系！！

未在截止日期前预约实验方案的同学由系统自动分配。

密码输错3次将被锁定，若账户被锁定，1小时后解锁，

忘记密码，可到F楼底楼大厅自助恢复，但无法解锁。

联系方式：QQ1730182775， Tel:18939723052 陆老师

组别	实验 名称	课本目录顺序	地点
1	气垫	七	F602b
	电桥	二	F602b
2	电位差计	三	F106
	粘滞系数	十	F106
3	焦距	九	F304
	分光计	五	F304
4	转动惯量	十三	F408
	空气比热容比	八	F406
5	示波器	四	F206
	牛顿环	十四	F204
6	静电场	十二	F102
	霍尔磁场	十一	F101

评分标准：

✧ 总评成绩 ＝ 平时成绩×70%＋考试×30%

- 平时成绩 ＝ [基础课成绩(100分)+ 4个实验成绩(4×100分)]/5
- 基础课成绩 ＝ [第一项(100分)＋第二项(100分)]/2
- 实验成绩（100分）分配如下：

1. 预习 一节课 20%
2. 实验操作 二节课 40%
3. 实验报告 课后完成 40%

基础课成绩评定：

1. 第一项100分：三次上课出勤、表现及纸质作业
   a)三次上课出勤、表现：每次25分，共计75分。
   b)纸质作业（第四周交给实验课教师）：25分。作图纸正面做网上作业第10题(1)作图及(2)小题，图纸反面做第(3)小题）。
2. 第二项100分：第四周上课前提交，共计10题，每人题目数据不同。

题号	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十
分值										

（说明：在提交期限内各题可提交2次，正常打分，超过2次或超过期限后进入订正状态，减半打分。订正于提交期限的2周后截止；网上提交作业如果有错误，系统会有提示，可以再提交1次。如果仍然提示有错误，则进入订正状态，订正次数不限制。）

3. 两项成绩的平均成绩作为基础课成绩。

网上作业注意：

- 进入大学物理实验预约系统，通过身份认证后立即修改密码，其后才被允许进入“基础知识习题”。

- 分步运算，切忌用计算器连算，数值修约采用四舍五入。

实验课的要求：

实验用纸：（第四周老师发放）

- 预习报告纸
- 实验报告纸

第四周发放

- 制图纸（网上作业第10题需要）----需要时F114购买

1. 实验预习课

- 签到
- 预习明确三个问题：做什么?怎么做?为什么?预习课，教师简要讲解，学生熟悉实验仪器；课后学生完成预习报告。
- 预习报告-----预习报告纸

①实验名称；

②原始数据记录表格；

③回答预习思考题。

实验预习报告

姓名：学号：座位号：

上课时间：星期 第 节

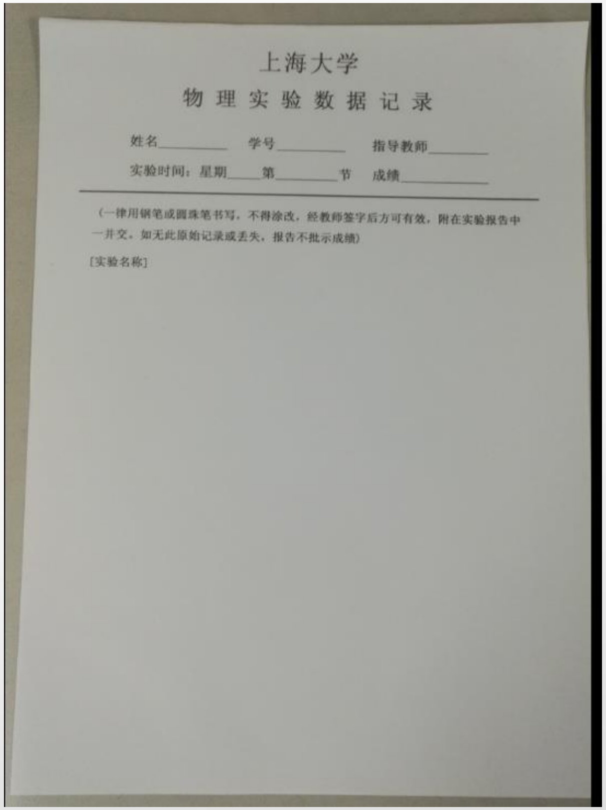
1.实验名称：[redacted]

2.原始数据记录表格：

…	…					
						…

实验数据用圆珠笔或水笔记录，不得随意涂改

3.预习思考题：


上海大学

物 理 实 验 数 据 记 录

姓名________ 学号________ 指导教师________

实验时间：星期____第____节 成绩________

（一律用钢笔或圆珠笔书写，不得涂改，经教师签字后方可有效，附在实验报告中一并交。如无此原始记录或丢失，报告不批示成绩）

[实验名称]

操作课先检查预习报告！

2. 实验操作课

① 将**完成的预习报告**放在桌上待教师检查；

② 自带教材、计算器、笔、尺等；

③ 遵守实验室规章制度，了解实验注意事项，在教师指导下正确使用实验仪器；

④ 实验中认真记录数据（圆珠笔或水笔），**教师检查数据并签字**，无误后**整理好仪器，桌椅**后可离开。

3. 实验报告----专用的实验报告纸

实验报告要求：

- **完整报告**

① 实验名称

② 实验目的

③ 实验仪器设备（名称、型号）

④ 实验原理简述（简明扼要、图文并茂、公式）

⑤ 数据记录表格

⑥ 数据处理及结果（公式-代入数据-计算结果，图示图解）

分析讨论：（不作要求）

- **简单报告**

实验名称 实验仪器 数据记录表格 数据处理及结果

注：一般默认第1、3实验为完整报告，第2、4实验为简单报告。

实验报告 F602b

实验名称：[redacted]

实验目的：[redacted]

实验仪器：[redacted]

实验原理：[redacted]

实验数据：[redacted]

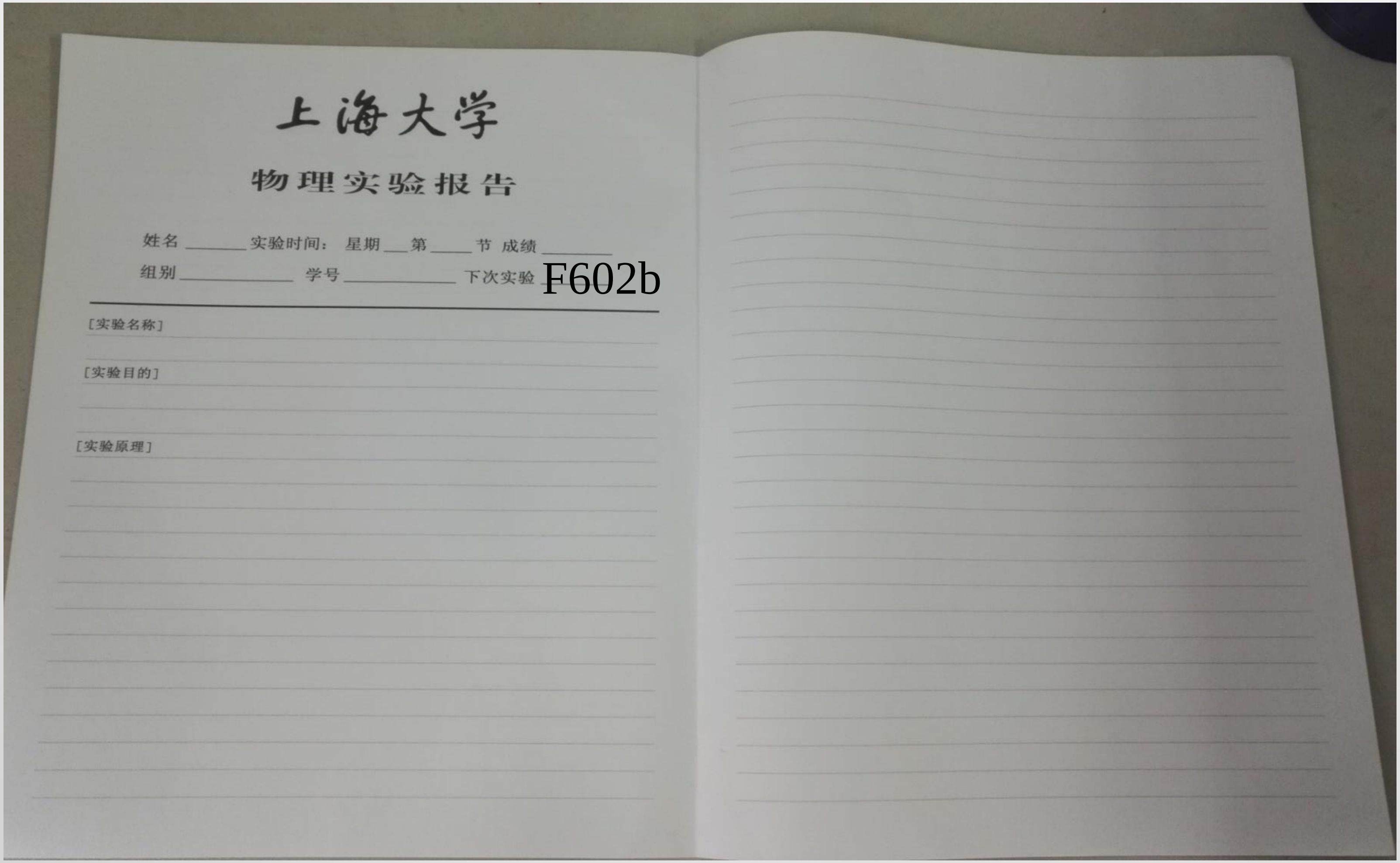
（圆珠笔或水笔，不得涂改）

[redacted]

数据处理和结果表示：

[redacted]

讨论：（不硬性要求）



F602b

注意事项：

- 做完实验的下一周交**实验报告和签字的预习报告**。
- 实验报告应在一周内完成，下周上课时交给上课老师，**报告迟交一周者扣10分**。
- 迟交2周或教学第10周结束后拒收报告，报告成绩记0分。
- **无教师签字的预习报告**，报告成绩为0分。
- 实验报告和预习报告上写清**上课时间，姓名，学号，组号**；如：**周二9~10节，姓名，学号，组号**等；
- **切忌抄袭！！！！一旦发现，均为0分！**

- 没有预习报告者不能上实验操作课。
- 不迟到，不无故缺课。迟到根据具体情况扣除相应实验操作分数。
- 放假：所有实验顺延，最后一个实验免做
- 请假：**病假凭病例，就诊记录及医院证明，事假凭教务处同意请假证明，特殊情况需书面申请，说明请假事由并由辅导员签字留其联系电话**，同时及时向任课教师请假并协商补做实验时间，不请假视作缺席。任何其他证明一律不可补做。
- 严格遵守操作规程，爱护仪器设备，发现故障立即向指导教师报告。**实验室里不能吃东西，不要乱丢垃圾，上课时间不得使用手机，禁止闲聊与实验无关的内容。**
- 实验完毕，**指导教师签字，整理好实验仪器**，一切恢复原状后方可离开（包括凳子放回桌子下面），操作分里包括整理仪器。

大学物理实验（一）实验课流程安排：

周次	内容	地点	要求
1~3	基础课	EJ 104教室	**基础课笔头作业第4周交各实验室教师**
4	**预习课**	**实验1、2实验室**	**学生在各自实验室先看书预习，教师讲解操作和 注意事项，学生熟悉实验操作或提问**
5	**实验1**	**实验1实验室**	**课前准备好预习报告，实验结束后教师检查签名，整理仪器，回家撰写完整实验报告**
6	**实验2**	**实验2实验室**	**交实验1报告，其他同上，回家撰写简单报告**
7	**预习课**	**实验3、4实验室**	**同4**
8	**实验3**	**实验3实验室**	**同5**
9	**实验4**	**实验4实验室**	**同6**
10	操作考试	抽选实验的实验室	**随机抽选一个实验**，名单滚动显示在F楼1楼电子大屏幕

每次上交作业或报告，在右上角写清下次实验房间号。

&3 测量、误差和不确定度估算

3.1 测量和误差

3.2 不确定度估算

3.3 实验数据有效数字的确定

3.1 测量和误差

3.1.1 测量：将待测的物理量与一个选作标准的同类量进行比较，得出它们的倍数关系。

单位：选作标准的同类量。

测量数值：倍数值

测量数据：数值＋单位

不确定度：各种误差的综合影响

测量值：**数值，不确定度，单位**三要素

任何测量都可能存在误差（测量不可能无限准确）。

◆完整的测量结果应表示为：$Y=(y\pm\Delta)$单位

以电阻测量为例

$$R = (910 \pm 1)\Omega$$

包括：测量对象　测量对象的量值　测量的不确定度　测量值的单位

$Y=y\pm\Delta$ 表示被测对象的真值落在（$y-\Delta$，$y+\Delta$）范围内的概率很大，Δ的取值与一定的概率相联系。

◆测量分类：

♪ **直接测量**：指直接得到被测量值的测量；

如：秒表测时间，米尺测长度等。

♪ **间接测量**：指利用直接测量的量代入一定的函数关系式计算出结果的测量。

如：测圆柱的体积，粘滞系数等。

- 测量条件：测量人员、方法、仪器、环境条件等
- 多次测量：

♪ **等精度测量：**在同样的测量条件下对某一物理量进行的多次重复测量

♪ **不等精度测量：**在多次测量中，只要有一个条件发生变化，就成为不等精度测量

本课程只研究**等精度测量**的数据处理

3.1.2 误差

误差ε＝测量值 x －真值 A

- 由于真值的不可知，误差实际上很难计算
- 误差的表示方法：

  绝对误差： ε

  相对误差： $E=\varepsilon/A\times100\%$

一般常采用公认值，或用较高准确度仪器的测量值，或用多次测量结果的算术平均值（测量最佳值）等，近似的代替真值，称为近似真值或约定真值。

偏差（残差）: $\Delta x = x - x_0$ (x_0为约定真值)

相对偏差: $E = \Delta x / x_0 \times 100\%$

百分误差: $A = \frac{|\text{测量最佳值-公认值（或理论值）}|}{\text{公认值（或理论值）}} \times 100\%$

注意：

- ✓ 真值是不可知的
- ✓ 约定真值
- ✓ 约定真值与仪器方法有关
- ✓ 误差与偏差

测量的目的和任务：

- ✓ 使偏差最小
- ✓ 求出最近真值
- ✓ 估算出最近真值的可靠性
- ✓ 实验结果的表示

误差分类：系统误差、随机误差

- **系统误差**

➢ **定义：** 相同测量条件下多次测量同一物理量时误差的绝对值和符号保持恒定，或在测量条件改变时，按某一确定规律变化的误差

➢ **原因：** 由于测量仪器固有缺陷、测量方法、环境带入

【例1.2.1】螺旋测微计测量圆柱体直径d，测量值为15.007mm，测量前螺旋测微计初读数为0.005mm，则将产生0.005mm的系统误差。

修正：d=15.007-0.005=15.002mm

- 分类及处理方法:

① 已定系统误差：必须修正

如：电表、螺旋测微计的零位误差；伏安法测电阻电流表内接、外接由于忽略表内阻引起的误差。

② 未定系统误差： 要估计出分布范围（一般为仪器误差$\Delta_{仪}$ ）

如：螺旋测微计制造时的螺纹公差等。

随机误差（偶然误差）

- **定义：**排除系统误差后，在同样条件下，对某一物理量的多次重复测量值分散在一定范围内，其误差值时正时负，绝对值时大时小，无规则涨落，具有随机性。
- **原因：**测量过程中一些随机的或不确定的因素。无规则，不可避免。如：人的感官灵敏度，实验环境的起伏，温度、湿度、电源电压等相同条件下，对某一物理量进行无限次测量，测量值符合正态分布（高斯）。

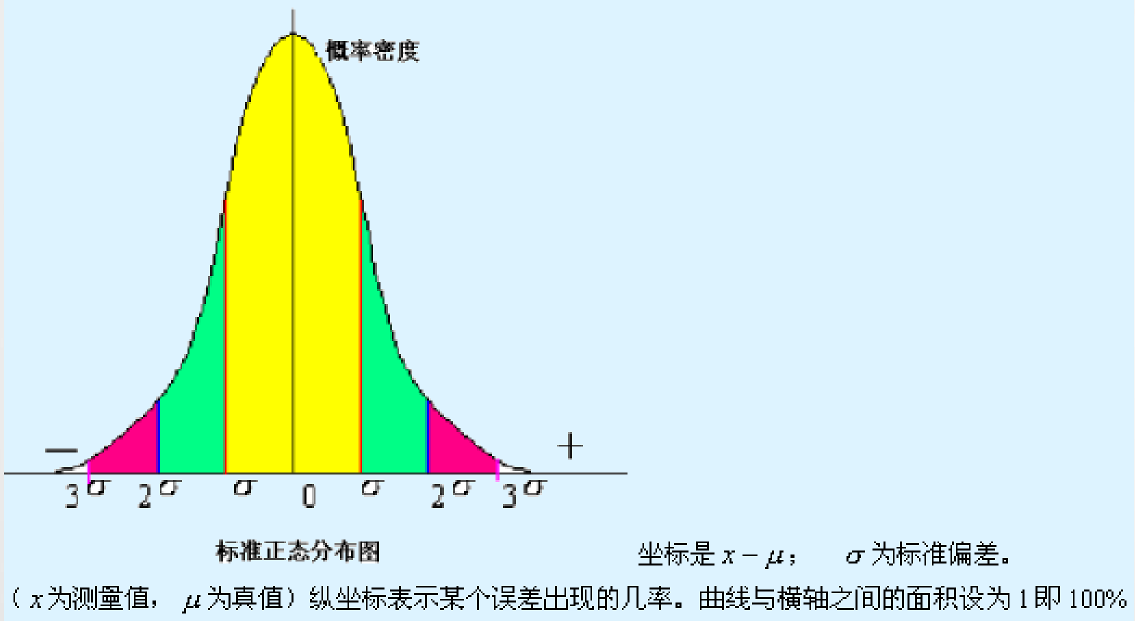
概率密度函数：

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

μ 总体平均值，表示测量值的集中趋势；

σ 总体标准偏差，反映测量值的分散程度，σ越小数据精密度越高。

随机误差的标准正态分布：



单峰性： 绝对值小的误差出现概率大，绝对值大的误差出现概率小

对称性： 绝对值相等的正负误差出现的概率相等

有界性： 绝对值很大的误差出现的概率趋于零，误差不超过一定限度

抵偿性： 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加越来越趋于零

特点：增加测量次数可减少测量结果的随机误差

随机误差的处理方法

测得一系列数据为：x_1，x_2，…，x_i，…，x_n，

① 测量值的最佳估计值——算术平均值

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

② 标准偏差S_x: 由于真值x_0未知，用标准偏差S_x估算分布的标准误差σ_x

标准误差 $$\sigma_x=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-x_0)^2}{n}}$$

统计意义：任意一个测量值落在（$x_0-\sigma_x, x_0+\sigma_x$）内的概率为68.3%

标准偏差(贝塞尔公式)

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}{n-1}}$$ ★

统计意义：真值落在区间($x_i - S_x, x_i + S_x$)之间的概率为68.3%。

平均值的标准偏差$S_{\overline{x}}$

$$S_{\overline{x}} = \frac{1}{\sqrt{n}} S_x$$

统计意义：真值落在($\overline{x} - S_{\overline{x}}, \overline{x} + S_{\overline{x}}$) 内的概率为68.3%

系统误差和随机误差的关系：

在任何一次测量中，测量误差既不会是单纯的系统误差，也不会是单一的随机误差，两者都有。

严格划分系统误差和随机误差是不可能的，也没有必要。

系统误差和随机误差的合成——不确定度

3.2 不确定度的估算★★★

3.2.1 不确定度：uncertainty of measurement

不确定度是对测量误差的一种综合评价，表征被测物理量的真值所处的量值范围，评估由于误差的存在而导致测量值不能确定的程度。

不确定度的大小，反映了测量结果的可信赖程度。

不确定度：不为零的正值

误　　差：正负皆可能

3.2.2 不确定度的简化评定办法:

$$\mathbf{U}=\sqrt{\Delta_A^2+\Delta_B^2}$$

Δ_A：用统计方法得到的A类分量。例：随机误差中的标准偏差

Δ_B：非统计方法得到的B类分量。例：以估算方法评定的仪器误差

3.2.3 测量结果的表示形式:

测量值-不确定度-相对不确定度-置信概率

$$x = \bar{x} \pm U_x \ (p = 0.95) \qquad E_x = \frac{U_x}{\bar{x}} \times 100\%$$

(不确定度U：一定置信概率下的误差极限，反映了可能存在的误差分布范围

相对不确定度E：不确定度相对测量最佳值的比值)

P=0.95是广泛采用的约定概率，可以不必注明。

本课程使用约定概率表示**测量结果**:

$$\begin{cases} x = (\bar{x} \pm U_x) \ \text{单位} \\ E_x = \dfrac{U_x}{\bar{x}} \times 100\% \end{cases}$$

★★★

统计意义：表示被测量的真值落在 $(\bar{x} - U_x, \bar{x} + U_x)$ 范围之内的可能性为95%

$\bar{x}$：**多次测量的平均值/单次测量值**

测量结果不是一个数，而是**一个区域**。

3.2.4 直接测量结果的表示

3.2.4.1 多次直接测量

等精度测量列：$x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$　　仪器误差：$\Delta_{仪}$

① 测量值的最佳值——算术平均值 $\overline{\mathbf{x}}$

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

② 不确定度 $\mathrm{U} = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$

➢ 不确定度的A类分量Δ_A：对应于测量值的分散性

$$\Delta_A = t(p,n-1)s_{\bar{x}} = \frac{t(p,n-1)}{\sqrt{n}}s_x \qquad S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}$$

t(p,n-1)表示置信概率为p、测量次数为n的置信系数

P=0.95

测量次数n	2	3	4	5	5<n≤10
$\frac{t(0.95,n-1)}{\sqrt{n}}$	9.0	2.5	1.6	1.2	1

当$5<n\leq 10$（实验中常用的测量次数）

可简化为：$\Delta_A = S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}$

（置信概率p≈95%）

- 不确定度的B类分量Δ_B：对应于仪器误差限 $(P \geq 0.95)$

$$\Delta_B = \Delta_{仪}$$

③ 不确定度U_x的估算： $U_x = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$

④ 直接测量的结果表示：$\begin{cases} x = (\bar{x} \pm U_x) \text{ 单位} \\ E_x = \dfrac{U_x}{\bar{x}} \times 100\% \end{cases}$

仪器误差$\Delta_{仪}$：在正确使用仪器的条件下，测量所得结果的最大误差限

常用实验仪器的$\Delta_{仪}$值

仪器	量程	分度值	$D_{仪}$
钢直尺	0~300mm	1mm	0.5mm
钢卷尺	$0\sim2\times10^3$mm	1mm	1mm
50分度游标卡尺	0~150mm	0.02mm	0.02mm
20分度游标卡尺	0~150mm	0.05mm	0.05mm
10分度游标卡尺	0~150mm	0.1mm	0.1mm
螺旋测微器	0~25mm	0.01mm	**0.004mm**
指针式电表			**量程×级别%**
天平			分度值的一半
普通温度计	0-100℃	1℃	1℃

◆指针式电表：量程×级别%

仪器	准确度等级 a	Δ仪	估读
指针式电表	0.1/0.2/0.5/1.0/1.5/2.5/5.0	量程×级别%	0.1格

量程：7.5mA

等级：0.5级

$$\Delta_{仪} = 量程x级别\% = 7.5x0.5\% = 0.038mA = 0.04mA$$

在此处键入公式。

➢ 多次直接测量的数据处理过程：

a. 求测量数据的平均值作为测量值的最佳值：$\overline{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$ ☆

b. 修正已定系统误差

c. 计算Δ_A：$\Delta_A=S_x=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2}{n-1}}$ (5＜n≤10) ☆

$\Delta_A=\frac{t(p,n-1)}{\sqrt{n}}s_x$ (n≤5) 课本p16 表1.4.2 ☆

d. 取 $\Delta_B=\Delta_{仪}$ ☆

e. 计算不确定度：$U_x=\sqrt{\Delta_A^2+\Delta_B^2}$ ☆

f. 计算相对不确定度：$E_x=\frac{U_x}{\overline{x}}\times 100\%$ ☆

d. 写出测量结果：$x=(\overline{x}\pm U_x)$ 单位 ☆

统计意义：表示被测量的真值落在$(\bar{x}-U_x$，$\bar{x}+U_x)$范围之内的可能性为95%。

【例1 P19】：用螺旋测微器测量小钢球直径d，测量前螺旋测微器初读数为0.005mm，共测6次，得到数据如下表，试表示其数据处理过程。

n	1	2	3	4	5	6
d/mm	5.007	5.009	5.006	5.010	5.004	5.005

解：数据处理过程如下:

（1）求 d 平均值：$\bar{d}=\frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6}d_i=\frac{1}{6}(5.007+5.009+\cdots+5.005)=5.007$mm(5.0068mm)

（可多保留1位）

（2）对已定系统误差进行修正：$\bar{d}_{修}=5.007-0.005\approx 5.002mm$

（3）计算A类分量：

$$\Delta_A=S_d=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6}(d_i-\bar{d})^2}{6-1}}=\text{代入原始数据}=0.0023mm$$

（中间运算过程保留2位）

（4）计算B类分量：$\Delta_B=\Delta_{d仪}=0.004mm$

（5）求不确定度U

$$U=\sqrt{\Delta_A^2+\Delta_B^2}=\sqrt{S_d^2+\Delta_{仪}^2}=\sqrt{0.0023^2+0.004^2}=0.0046mm$$

（中间运算过程保留2位）

（6）相对不确定度

$$E=\frac{U}{\bar{d}_{修}}\times 100\%=\frac{0.0046}{5.002}\times 100\%=0.09\%$$

（7）最后结果

$$d=\bar{d}_{修}\pm U=(5.002\pm 0.005)mm$$

规定（网上作业注意）：

1、 Δ_A或S，Δ_B或$\Delta_{仪}$，U的中间运算过程保留二位。

2、结果表示式中，U只取一位，测量值的末位与不确定度末位对齐。

3.2.4.2 单次直接测量：

被测量的不确定度对实验结果影响很小，只需测量一次

动态测量或条件限制，不允许进行多次测量

不确定度Ux的估算：$U_x = \Delta_{仪}$

直接测量的结果表示：$\begin{cases} x = (x_{测} \pm \Delta_{仪}) \text{ 单位} \\ E_x = \dfrac{\Delta_{仪}}{x_{测}} \times 100\% \end{cases}$

➢ 单次测量的数据处理过程

a. 单次测量值作为测量值的最佳值

b. 修正已定系统误差

c. 取 $U_x = \Delta_{仪}$

d. 写出测量结果

【例2 P19】量程为75mV的0.5级的电压表一次测量电压值为70.3mV，用不确定度表示电压测量结果。

解：一次直接测量结果表示:

(1) $U = 70.3\text{mV}$

(2) $U_V = \Delta_B = \Delta_{\text{仪}} = \text{量程} \times \text{级别}\% = 75 \times 0.5\%\text{mV} = 0.38\text{mV}$

（中间运算过程保留2位）

(3) $U = (70.3 \pm 0.4)\text{mV}$

$$E = \frac{0.4}{70.3} \times 100\% = 0.6\%$$

规定（网上作业注意事项）：

1. 平均值可以多取1位，也可取与实验数据相同位数
2. 计算过程中的Δ_A或S，U的中间运算过程保留两位
3. 最后测量结果表示式中，U_N只取一位
4. 相对不确定度E_N<10%时取1位有效数字

   $E_N \geqslant 10\%$时取2位有效数字
5. $\overline{N}$最后一位应与不确定度所在位数对齐

   例：h=10.32mm,

   U_1=0.05mm, h_1=(10.32±0.05)mm

   U_2=0.5mm，h_2=(10.3±0.5)mm

作业

网上作业第1、2、3题，1周内完成并提交结果。

要求：

（1）学会用计算器计算 $\overline{x}$ ，S_x

（2）给出公式和详细计算过程，正确表示结果：

数值+不确定度+单位

多次直接测量的数据处理方法：

1. 测量值的最佳值：$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$ 多保留1位有效数字

2. 不确定度的A类分量：$\Delta_A=t\times S_x=t\times\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}$

测量次数n	2	3	4	5	5<n≤10
置信系数t	9.0	2.5	1.6	1.2	1

保留2位有效数字

3. 不确定度的B类分量：$\Delta_B=\Delta_{仪}$ 取决于仪器误差的有效数字，1位

4. 不确定度Ux的估算：$U_x=\sqrt{\Delta_A^2+\Delta_B^2}$ 保留2位有效数字

5. 测量结果表示：$\begin{cases} x=(\bar{x}\pm U_x)\ \text{单位} \\ E_x=\frac{U_x}{\bar{x}}\times 100\% \end{cases}$

U_x保留1位有效数字，$\bar{x}$末位U_x对齐

Ex：<10%，取1位；≥10%，取2位

单次直接测量的数据处理方法：

1. $x=x_{测}$

2. $U_x=\Delta_{仪}$

3. $x=(x_{测}\pm\Delta_{仪})$ 单位　　$E_x=\frac{\Delta_{仪}}{x_{测}}\times 100\%$

Ux保留1位有效数字，$x_{测}$末位Ux对齐；Ex：<10% 取1位，≥10%，取2位

习题互动：

例：对于一个多次测量的长度，其最终的测量结果为

$L=(154.23\pm0.02)cm$，求：1. U_L，

2. E_L，

3.测量结果的含义。

1. $U_L=0.02cm$

2. $E_L=\frac{U_L}{\bar{L}}=\frac{0.02}{154.23}\times100\%=0.01\%$

3. L真值落在(154.21, 154.25) 的范围内的可能性约为95%。

§3.2.5：间接测量结果的表示

对于一元函数：$f = f(x)$

导数：$\dfrac{df}{dx}$

对于函数：$f = 3x^2 + 4x + 6$ $\quad \dfrac{df}{dx} = 6x + 4$

对于多元函数：$f = f(x, y, z)$

偏导数：$\dfrac{\partial f}{\partial x}$ $\quad \dfrac{\partial f}{\partial x} = 3$ （$f = 3x + 4a^2$）

对于函数：$f = 3x + 4y^2$ $\quad \dfrac{\partial f}{\partial y} = 8y$ （$f = 3b + 4y^2$）

已知：间接测量量 $N = f(x, y, \cdots, z)$

$$x = \bar{x} \pm U_x \qquad E_x = \frac{U_x}{\bar{x}}$$

$$y = \bar{y} \pm U_y \qquad E_y = \frac{U_y}{\bar{y}}$$

$$z = \bar{z} \pm U_z \qquad E_z = \frac{U_z}{\bar{z}}$$

求: $\overline{N}, U_N, E_N$

$$N = \overline{N} \pm U_N$$

3.2.5.1 间接测量的最佳估计值:

设间接测量量N与直接测量量x, y, …, z 之间的函数关系为:

N=f(x, y, … , z)

若对x, y, … , z 等分别做多次测量，则:

间接测量量N的最佳值 $\overline{N} = f\left(\overline{x}, \overline{y}, \cdots, \overline{z}\right)$

3.2.5.2 间接测量的不确定度估算:

若x, y, … , z 为独立变量，则间接测量量N的**不确定度U_N的传递公式**为:

$$U_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 U_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 U_y^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 U_z^2}$$

相对不确定度的传递公式:

$$E_N = \frac{U_N}{\overline{N}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 U_x^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 U_y^2 + \cdots + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\right)^2 U_z^2}$$

例3：和差关系N=kx+my-nz，k，m，n是常数

解：

$$\frac{\partial N}{\partial x}=k$$

$$\frac{\partial N}{\partial y}=m$$

$$\frac{\partial N}{\partial z}=-n$$

$$U_N=\sqrt{k^2U_x^2+m^2U_y^2+n^2U_z^2}$$

$$E_N=\frac{U_N}{N}\times 100\%=\cdots$$

例4：乘除关系 $N = A\dfrac{x^k y^m}{z^n}$，A,k,m,n是常数

$$U_N = \sqrt{\left(A\frac{y^m k x^{k-1}}{z^n}\right)^2 U_x^2 + \left(A\frac{x^k m y^{m-1}}{z^n}\right)^2 U_y^2 + \left(A\frac{x^k y^m(-n)}{z^{n+1}}\right)^2 U_z^2}$$

相对不确定度：

$$E_N = \frac{U_N}{N} = \sqrt{k^2\left(\frac{U_x}{x}\right)^2 + m^2\left(\frac{U_y}{y}\right)^2 + n^2\left(\frac{U_z}{z}\right)^2}$$

$$= \sqrt{k^2 E_x^2 + m^2 E_y^2 + n^2 E_z^2}$$

$$U_N = \overline{N} \cdot E_N = \overline{N} \times 0.xx\%$$

所以，对于乘除关系的多元函数，先求相对不确定度可能更加方便。

方法一：$E_N=\frac{U_N}{\overline{N}}=\frac{1}{\overline{N}}\sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x})^2U_X^2+(\frac{\partial f}{\partial y})^2U_y^2+\ldots+(\frac{\partial f}{\partial z})^2U_z^2}$

$$=\sqrt{k^2E_X^2+m^2E_y^2+\ldots+n^2E_z^2}$$

方法二：$E_N=\frac{U_N}{\overline{N}}=\frac{1}{\overline{N}}\sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x})^2U_X^2+(\frac{\partial f}{\partial y})^2U_y^2+\ldots+(\frac{\partial f}{\partial z})^2U_z^2}$

$$=\sqrt{(\frac{\partial \ln f}{\partial x})^2U_X^2+(\frac{\partial \ln f}{\partial y})^2U_y^2+\ldots+(\frac{\partial \ln f}{\partial z})^2U_z^2}$$

3.2.5.3 间接测量结果的表示：

$$\begin{cases} N=\left(\overline{N}\pm U_N\right)\text{单位} \\ E_N=\frac{U_N}{\overline{N}}\times 100\% \end{cases}$$

常用函数的不确定度传递公式（p21）☆☆☆

测量关系式	不确定度传递公式	相对不确定度传递公式
$N = kx + my - nz$	$U_N = \sqrt{k^2U_x^2 + m^2U_y^2 + n^2U_z^2}$	
$N = A\dfrac{x^k y^m}{z^n}$		$E_N = \sqrt{k^2E_x^2 + m^2E_y^2 + n^2E_z^2}$
$N = \sin x$	$U_N = \lvert\cos x\rvert U_x$	
$N = \ln x$	$U_N = \dfrac{U_x}{x}$	
$N = \lg x$	$U_N = \dfrac{U_x}{x \cdot \ln 10}$	

加减：直接计算U_N，U_N=各个不确定度的平方和再开方（带系数）

乘除：先计算E_N，E_N=各个相对不确定度的平方和再开方（带幂指数），再求$U_N=N\times E_N$

【例5 P21】$N=\dfrac{x+y}{x-y}$，求U_N

设：$x'=x-y$，$y'=x+y$，则$N=\dfrac{x'}{y'}$

$$E_N=\sqrt{E_{x'}^2+E_{y'}^2}=\frac{1}{x^2-y^2}\sqrt{2\left(x^2+y^2\right)U_x^2+2\left(x^2+y^2\right)U_y^2}$$

方法一：

$$\frac{\partial N}{\partial x}=\frac{\partial\left(\dfrac{x+y}{x-y}\right)}{\partial x}=\frac{\partial\left(1+\dfrac{2y}{x-y}\right)}{\partial x}=\frac{-2y}{(x-y)^2}$$

$$\frac{\partial N}{\partial y}=\frac{\partial\left(\dfrac{x+y}{x-y}\right)}{\partial y}=\frac{\partial\left(\dfrac{2x}{x-y}-1\right)}{\partial y}=\frac{2x}{(x-y)^2}$$

$$U_N=\sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)^2U_x^2+\left(\frac{\partial N}{\partial y}\right)^2U_y^2}=\frac{2}{(x-y)^2}\sqrt{y^2U_x^2+x^2U_y^2}$$

$$E_N=\frac{U_N}{N}=\frac{2}{x^2-y^2}\sqrt{y^2U_x^2+x^2U_y^2}$$

已知$N=\frac{x+y}{x-y}$，求U_N

方法二：

$$\ln N=\ln\frac{x+y}{x-y}=\ln(x+y)-\ln(x-y)$$

$$\frac{\partial \ln N}{\partial x}=\frac{1}{x+y}-\frac{1}{x-y}=\frac{-2y}{x^2-y^2}$$

$$\frac{\partial \ln N}{\partial y}=\frac{1}{x+y}-\frac{-1}{x-y}=\frac{2x}{x^2-y^2}$$

$$E_N=\frac{1}{N}\sqrt{(\frac{\partial N}{\partial x})^2U_x^2+(\frac{\partial N}{\partial y})^2U_y^2}=\sqrt{(\frac{\partial \ln N}{\partial x})^2U_x^2+(\frac{\partial \ln N}{\partial y})^2U_y^2}$$

$$=\frac{2}{x^2-y^2}\sqrt{y^2U_x^2+x^2U_y^2}$$

$$U_N=N\times E_N=\frac{2}{(x-y)^2}\sqrt{y^2U_x^2+x^2U_y^2}$$

例6：用千分尺测量圆柱体的直径D，数据如下：Di（mm）：12.836，12.838，12.834，12.837，12.835， 12.836。试分别用不确定度表示直径D，底面积S的测量结果。

解：（1）直径D

$$\overline{D}=\frac{\sum D_i}{6}=\cdots=12.8360\,mm$$

$$\Delta_{DA}=S_D=\sqrt{\frac{\sum\limits_i\left(D_i-\overline{D}\right)^2}{n-1}}=\cdots=0.0014\,\text{mm}$$

$$\Delta_{DB}=\Delta_{D仪}=0.004\,\text{mm}$$

$$U_D=\sqrt{\Delta_{DA}^2+\Delta_{DB}^2}=\sqrt{0.0014^2+0.004^2}=0.0042\,\text{mm}$$

$$E_D=\frac{U_D}{\overline{D}}\times100\%=\frac{0.0042}{12.8360}\times100\%=0.033\%$$

$$D=\overline{D}\pm U_D=\left(12.836\pm0.004\right)\text{mm}\qquad E_D=0.03\%$$

（2）底面积S

$$\overline{S}=\frac{1}{4}\pi\left(\overline{D}\right)^{2}=\frac{1}{4}\times 3.14159\times\left(12.8360\right)^{2}=129.404\,\mathrm{mm}^{2}$$

$$U_{S}=\frac{1}{2}\pi\overline{D}U_{D}=\frac{1}{2}\times 3.14\times 12.8360\times 0.0042=0.085\,\mathrm{mm}^{2}$$

$$E_{S}=\frac{U_{S}}{\overline{S}}\times 100\%=\frac{0.085}{129.404}\times 100\%=0.066\%$$

$$S=\overline{S}\pm U_{S}=\left(129.40\pm 0.09\right)\mathrm{mm}^{2}$$

$$E_{S}=0.07\%$$

或者直接代入公式

$$\overline{S}=\frac{1}{4}\pi\left(\overline{D}\right)^2=\frac{1}{4}\times 3.14159\times\left(12.8360\right)^2=129.404\,\mathrm{mm}^2$$

$$\mathrm{E_S}=2\mathrm{E_D}=2\times 0.033\%=0.066\%$$

$$\mathrm{U_S}=\overline{\mathrm{S}}\times\mathrm{E_S}=129.404\times 0.066\%=0.085\,\mathrm{mm}^2$$

$$S=\overline{S}\pm U_S=\left(129.40\pm 0.09\right)\mathrm{mm}^2$$

$$E_S=0.07\%$$

例7：圆柱体体积，$V=\frac{1}{4}\pi D^2 H$

已知D,H,U_D,U_H,求V的最后表示形式.

已知D,H,U_D,U_H,求V的最后表示形式.

解：$V=\frac{1}{4}\pi D^2 H$

传递公式

$$\frac{\partial \ln V}{\partial D}=\frac{2}{D},\frac{\partial \ln V}{\partial H}=\frac{1}{H}$$

$$E_V=\sqrt{(\frac{\partial \ln V}{\partial D})^2 U_D^2+(\frac{\partial \ln V}{\partial H})^2 U_H^2}$$

$$=\sqrt{\left(\frac{2}{D}\right)^2 U_D^2+\left(\frac{1}{H}\right)^2 U_H^2}$$

$$=\sqrt{4E_D^2+E_H^2}$$

$$U_V=V\cdot E_V$$

$$V\pm U_V=$$

$$V=\frac{1}{4}\pi D^2 H$$

$$E_D=\frac{U_D}{D}$$

$$E_H=\frac{U_H}{H}$$

$$E_V=\sqrt{4E_D^2+E_H^2}$$

$$U_V=V\cdot E_V$$

$$V\pm U_V=$$

例8：对正方形边长测量6次，得到$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$，求正方形面积的表示式。

解法1：$\bar{a} = \dfrac{a_1 + a_2 + \cdots + a_6}{6}$

$$\bar{s} = \bar{a}^2$$

$$\Delta_A = S_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6}(a_i - \bar{a})^2}{6-1}} \qquad \Delta_B = \Delta_{仪}$$

$$U_a = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \qquad E_a = \frac{U_a}{\bar{a}}$$

$$U_s = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial \bar{a}}\right)^2 \cdot U_a^2} = 2\bar{a}U_a$$

或 $E_s = \sqrt{4E_{\bar{a}}^2} = 2E_{\bar{a}}$

$$s = \bar{s} \pm U_s \text{单位}$$

$$E_s = \frac{U_s}{\bar{s}} \times 100\%$$

解法2：由$s=a^2$和$a_1 \sim a_6$，求出$s_1 \sim s_6$，

$$\bar{s} = \frac{s_1 + s_2 + \cdots + s_6}{6}$$

$$\Delta_A = S_{\bar{s}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6}(s_i - \bar{s})^2}{6-1}}$$

$$\Delta_B = \ldots$$

$$U_{\bar{s}} = \sqrt{\Delta_A^2 + \ldots}$$

$$s = \bar{s} \pm U_{\bar{s}} \text{单位}$$

$$E_s = \frac{U_s}{\bar{s}} \times 100\%$$

3.2.5.4 间接测量的数据处理程序 ☆☆☆

设函数表示为： $N = f(x, y, z, \cdots)$

1. 先求直接测量量结果（平均值和不确定度）

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \cdots$

$$\Delta_{Ax} = S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \Delta_{Bx} = \Delta_{x仪}$$

$$U_x = \sqrt{\Delta_{Ax}^2 + \Delta_{Bx}^2}$$

U_y, U_z ……类推

2.计算间接测量的平均值 $\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \cdots)$

3.推导不确定度（或相对不确定度）传递的近似公式

$$U_N = \sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x})^2 U_x^2 + (\frac{\partial f}{\partial y})^2 U_y^2 + (\frac{\partial f}{\partial z})^2 U_z^2 + \cdots}$$

$$E_N = \frac{U_N}{\bar{N}} = \sqrt{(\frac{\partial \ln f}{\partial x})^2 U_x^2 + (\frac{\partial \ln f}{\partial y})^2 U_y^2 + \cdots + (\frac{\partial \ln f}{\partial z})^2 U_z^2}$$

$$U_N = N \cdot E_N$$

4.写出测量结果

$$N = \bar{N} \pm U_N 单位$$

$$E_N = \frac{U_N}{\bar{N}} \times 100\%$$

【例9 P22】：用三线摆测量物体的转动惯量，转动惯量可用如下公式计算。公式中圆盘质量m和长度a，b和H测量1次，圆盘摆动周期测量6次，每次测量15个周期的时间。测量数据如下两表，用不确定度表示转动惯量。

$$J_{测}=\frac{mgRr}{4\pi^2H}\cdot T^2=\frac{mgab}{12\pi^2H}\left(\frac{t}{15}\right)^2=\frac{mgabt^2}{2700\pi^2H}$$

表1 圆盘摆动周期测量值

n(次数)	1	2	3	4	5	6
t=15T(s)	20.984	21.024	20.923	20.928	20.969	21.017

表2 质量及长度测量值

	H/cm	a/cm	b/cm	m/g	t/s
测量值	48.55	12.50	6.70	483.0	
$\Delta_{仪}$	0.05	0.05	0.05	0.2	0.005

解：

$$\bar{t} = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6} t_i = 20.974s$$

$$\Delta_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(t_i - \bar{t})^2}{n-1}} = 0.043s$$

$$U_t = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{0.043^2 + 0.005^2} = 0.043s$$

$$E_t = \frac{U_t}{\bar{t}} = \frac{0.043}{20.974} \times 100\% = 0.21\%$$

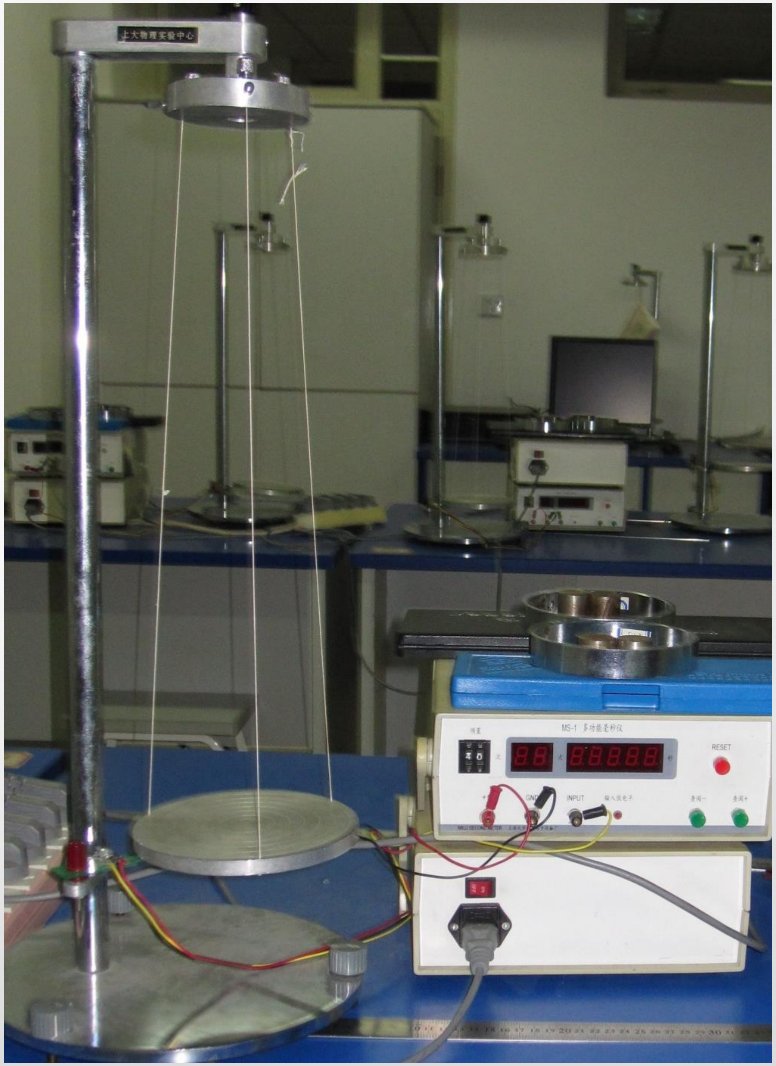
H,a,b,m均为单次测量，不确定度等于各自$\Delta_{仪}$

$$E_m = \frac{U_m}{m} = \frac{0.2}{483.0} \times 100\% = 0.041\%$$

$$E_a = \frac{U_a}{a} = \frac{0.05}{12.50} \times 100\% = 0.40\%$$

$$E_b = \frac{U_b}{b} = \frac{0.05}{6.70} \times 100\% = 0.75\%$$

$$E_H = \frac{U_H}{H} = \frac{0.05}{48.55} \times 100\% = 0.10\%$$



$$J_{测} = \frac{mgabt^2}{2700\pi^2 H} = \frac{0.4830 \times 9.794 \times 0.1250 \times 0.0670}{2700 \times 3.142^2 \times 0.4855} \times 20.974^2$$

$$= 0.00135 kg \cdot m^2 = 1.35 \times 10^{-3} kg \cdot m^2$$

$$E_J = \sqrt{E_m^2 + E_a^2 + E_b^2 + 4E_t^2 + E_H^2}$$

$$= \sqrt{0.041\%^2 + 0.40\%^2 + 0.75\%^2 + 4 \times 0.21\%^2 + 0.10\%^2}$$

$$= 0.95\%$$

$$U_J = J \cdot E_J = 1.347 \times 10^{-3} \times 0.95\% = 0.013 \times 10^{-3} kg \cdot m^2$$

$$J \pm U_J = (1.35 \pm 0.01) \times 10^{-3} kg \cdot m^2$$

E_J=1%

【例10 P23】已知 $y=\sin\theta, \theta=\bar{\theta}\pm U_\theta=60°00'\pm0°03'$，求：$y=\bar{y}\pm U_y$

解：

$$U_y=\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial\theta}\right)^2 {U_\theta}^2}=|cos\theta|\cdot U_\theta=cos60°00'\times\boxed{\frac{3}{60}\times\frac{\pi}{180}}$$

$$=0.5\times\frac{3\times3.1}{60\times180}=0.00043$$

$$\bar{y}=\sin\bar{\theta}=\sin 60°00'=0.8660$$

$$y=\sin\bar{\theta}\pm U_y=0.8660\pm0.0004$$

三角函数运算中，注意U_θ必须用弧度表示。

（360° 角=2π弧度）

（3’ / 60’ ）

例11：物理天平测量铜圆柱体的质量为：$m=\overline{m}\pm U_m=(213.04\pm 0.05)g$ 用0～125mm量程、分度为0.02mm的游标卡尺测得其高度h_i(cm)为：8.038，8.036，8.036，8.040，8.036，8.038；用0～25mm的一级千分尺测得其直径D_i(cm)为：1.9465，1.9466，1.9465，1.9464，1.9467，1.9466，用不确定度表示铜圆柱体的密度r测量结果。

1. $\overline{m},\overline{D},\overline{h}$ 以及 $U_{\overline{m}},U_{\overline{D}},U_{\overline{h}}$

   $E_{\overline{m}},E_{\overline{D}},E_{\overline{h}}$

2. $\overline{\rho}=\dfrac{\overline{m}}{\overline{V}}=\dfrac{\overline{m}}{\frac{1}{4}\pi\overline{D}^2\overline{h}}$

3. $E_\rho=\sqrt{E_{\overline{m}}^2+4E_{\overline{D}}^2+E_{\overline{h}}^2}=\dfrac{U_\rho}{\overline{\rho}}$

4. $\rho=\overline{\rho}\pm U_\rho$

   $E_\rho=\dfrac{U_\rho}{\rho}\times 100\%$

$$\rho=\frac{m}{V}=\frac{m}{\frac{1}{4}\pi D^2 h}$$

解：（1）用不确定度表示高度h的测量结果 h_i(cm)为：8.038，8.036，8.036，8.040，8.036，8.038

$$\bar{h} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} h_i = 8.0373cm(\text{可多取1位})$$

$$\Delta_{hA} = S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(h_i - \bar{h})^2}{n-1}} = 0.0017cm(\text{中间运算保留2位})$$

$$\Delta_{hB} = \Delta_{h仪} = 0.002\text{cm}$$ 50分度游标卡尺仪器误差

$$U_h = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{0.0017^2 + 0.002^2} = 0.0027cm(\text{中间运算保留2位})$$

$$h = (8.037 \pm 0.003)cm$$

$$E_h = \frac{0.003}{8.037} \times 100\% = 0.038\%$$

（2）用不确定度表示直径D的测量结果,直径D_i(cm)为：1.9465，1.9466，1.9465，1.9464，1.9467，1.9466

$$\overline{D}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}D_i=1.94655cm$$ (可多取1位但不可多取2位以上)

$$\Delta_{DA}=S_D=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(D_i-\overline{D})^2}{n-1}}=0.00011cm$$ (中间运算过程保留2位)

$$\Delta_{DB}=\Delta_{D仪}=0.0004cm$$ 千分尺仪器误差

$$U_D=\sqrt{\Delta_A^2+\Delta_B^2}=\sqrt{0.0001^2+0.0004^2}=0.00042cm$$ (中间运算保留2位)

$$D=(1.9466\pm0.0004)cm$$

$$E_D=\frac{0.0004}{1.9466}\times100\%=0.02\%$$

（3） $m=(213.04\pm0.05)g$

$$E_m=\frac{0.05}{213.04}\times100\%=0.024\%(\text{中间运算保留2位})$$

（4） 求密度$\overline{\rho}$和 U_ρ

$$\overline{\rho}=\frac{\overline{m}}{\frac{1}{4}\pi\overline{D}^2\overline{h}}=\frac{213.04}{\frac{1}{4}\times3.1416\times1.9466^2\times8.037}=8.907g/cm^3$$

$$E_\rho=\frac{U_\rho}{\overline{\rho}}=\sqrt{E_m^2+4E_D^2+E_h^2}=\sqrt{(0.024\%)^2+4\times(0.020\%)^2+(0.038\%)^2}$$

$$=0.06\%$$

$$U_\rho=\overline{\rho}\times E_\rho=8.907\times0.06\%=0.0053g/cm^3$$

$$\rho=\overline{\rho}\pm U_\rho=(8.907\pm0.005)g/cm^3$$

& 3.3 实验数据的有效位数与修约

3.3.1 有效位数的概念

物理实验中，对十进位数，从最左一位非零数字向右数而得到的位数，即为有效数字。

- 第一位非“0”数字前的“0”不属有效数字
- 第一位非“0”数字后的“0”都属有效数字

例： 0.50cm 0.0501cm 0.0500cm

2位 3位 3位

- 末位的0不能随意增减
- 十进制单位换算中，有效位数保持不变

例：m=30.20g= 30200 mg ×

= 3.020×10^{4} mg √

例：5.1m≠510cm；5.1m=51×10cm=5.1×10^{2}cm

10200mg ≠10.2g； 10200mg =10.200g

- 科学计数法： $N\times10^{n}$ N中小数点位于第1、2位有效数字之间

例：光速30万千米每秒，c=3.0×10^{5}km/s=3.0×10^{8}m/s

例：m=10200mg =1.0200×10^{4}mg

例：$l=3.8\times10^{-3}$m=3.8×10^{-2}dm=3.8×10^{-1}cm=3.8mm

3.3.2 数值的修约规则

- **“四舍五入”**原则（本课程约定）

  “4舍6入5成双”原则（了解）

  修约过程应一次完成，不可多次连续修约。

例：5.3146 保留3位，

5.31； √

5.315 5.32 ×

- 负数修约：先将其绝对值按上述规则修约，然后修约值前加负号。

例：l= -1.345mm= -1.35mm

l=1.355mm=1.36mm

3.3.3 原始数据的有效位数确定

最小分度为1mm的直尺测量长度:

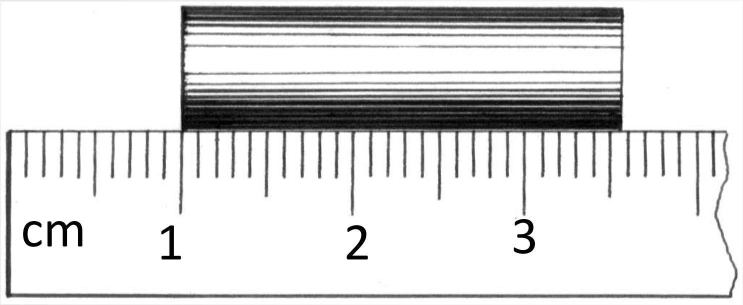


图1-6-1　米尺测量

L_1=25mm　×

L_2=25.6mm　√

L_3=25.67mm　×

有效数字定义：可靠数字与1位可疑（或欠准）数字的全体。

有效数字＝可靠数字＋1位可疑（或欠准）数字

可靠数字：与测量仪器有关

可疑数字：只能估读一位

准确读数：

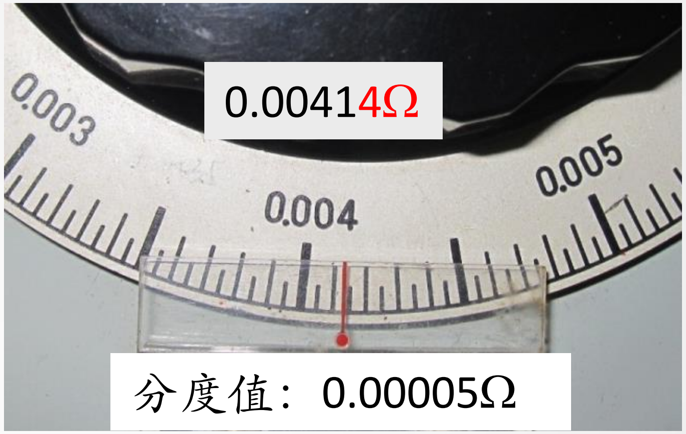
① 准确读到最小刻度；

② 最小刻度之间估读一位。

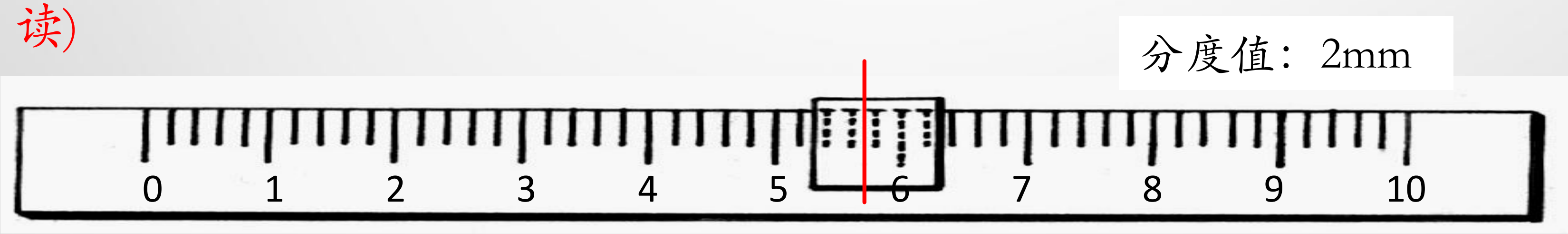
如米尺测长：12.54cm　　　　12.50cm

- **仪器读数规则**

1.刻度式仪表，最小分度值后估读一位。最小分度1的倍数，估读1/10格；最小分度2的倍数，估读1/2格；最小分度5的倍数，估读1/5格。

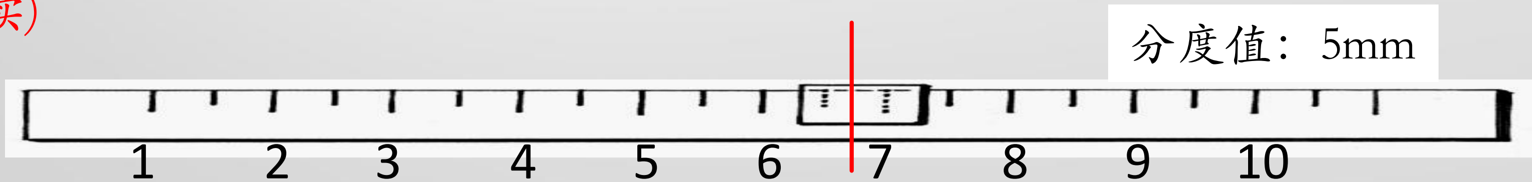


最小分度值为2的倍数时(如0.2，0.02等)：1/2估读法(最小格分成2份估读)



57mm或5.7cm

最小分度值为5的倍数时(如0.5，0.05等)： 1/5估读法(最小格分成5份估读)

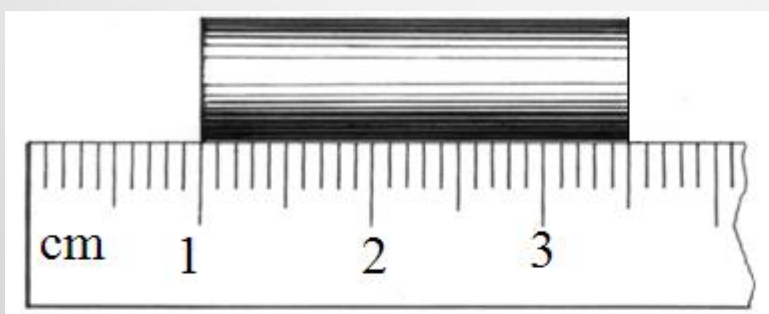


67mm或6.7cm

2.数显仪表及有步进式标度盘的仪表，如电阻箱，电桥，电位差等，一般应直接读取仪表的示值。

3. 游标类量具，如游标卡尺，分光计等，不估读。

注意：当读数位置对准刻度线时，记录数据时不可随意增减0，要客观记录全部有效数字。



2.5cm ×
25mm ×
25.0mm √

3.3.4 不确定度的有效位数：

Δ_A或S；Δ_B或$\Delta_{仪}$；U 中间运算过程可以取2位，但在测量结果的表示式中：$x = \bar{x} \pm U_x$单位

U只能取1位。

相对不确定度E以百分数形式表示，取1～2位。

E<10%时取1位，E ≥10%时取2位。

3.3.5 被测量值的有效位数：

被测量值的末位应与不确定度所在位对齐，舍入多余位数。

例：L=（1.48±0.05）cm

L=（6.7823±0.021）cm 错　L=（6.78±0.02）cm 正确

例：g=980.13cm/s^2，　U_g=0.32cm/s^2，

(980.13±0.32) cm/s^2　错　(980.13±0.3) cm/s^2　错

则 g=(980.1±0.3) cm/s^2　正确

3.3.6 运算过程和中间运算结果的有效位数

总原则：测量结果由不确定度确定，被测量值的末位应与不确定度所在位对齐。

- 可以估算不确定度的测量：中间过程不作修约，测量结果有效位数由不确定度确定。

$$x = \bar{x} \pm U_x \text{单位}$$

写成如上形式后，<u>**正确表示**</u>的2个要素：

1. U_x只能取<u>**1位**</u>有效数字；
2. $\bar{x}$的最后一位要和U_x所在位数**对齐**

● 不能估算不确定度的测量：测量结果有效位数按有效位数的运算规则确定。

（1）加减运算规则

计算结果应保留的位数与参与运算的各数中最后一位位数高者相同。

例：$\boxed{41.8}+15.41-8.372=48.8$

例：$10.11\times10^2+0.21\times10^4$

$=10.1\times10^2+\boxed{21}\times10^2=31\times10^2$

或 $=1.011\times10^3+\boxed{2.1}\times10^3=3.1\times10^3$ （幂次统一）

（2）乘除运算规则

计算结果的有效数字位数应与参与运算的各数中总有效位数最少的一个相同。

例：$3.12657\times\boxed{0.0157}\times12.567\div186.245$

$=0.00331=3.31\times10^{-3}$ （计算器显示0.0033121866……）

$\boxed{1.23}\times5.561=6.84$（计算器显示6.84003）

（3）幂次的运算

计算结果的有效数字位数与**底数**的有效位数相同。

例：$123^2 = 1.51 \times 10^4$　　　　计算器显示15129

例：$\sqrt{123} = 123^{0.5} = 1.11 \times 10$　　计算器显示11.09054

（4）其他函数运算

原则1：先取**直接测量值的最后一位的1个单位**作为测量值的不确定度，再求间接测量值不确定度，并最终确定最后结果的有效数字位数。

原则2：(三角函数和对数):由x的函数值与x的末位增加一个单位后的函数值相比较后确定。

例：x=30.0, y=lnx, 求y=ln30.0=?

解：原则1：

$$U_x = 0.1,\ U_y = \frac{U_x}{x} = \frac{0.1}{30.0} = \underline{0.003}$$

$$y = \ln 30.0 = \underline{3.401}$$

y最后一位与U_y不确定度所在位一致。

原则2：

ln30.0=3.401 197 382……
ln30.1=3.404 525 172……
因此： ln30.0=3.401

例：$\theta = 45°00'$, 求：$y = \sin\theta = ?$

解：

$$\sin 45°00' = 0.707\boxed{1}0678\ldots\ldots$$

$$\sin 45°01' = 0.707\boxed{3}1244\ldots\ldots$$

$$\therefore \sin 45°00' = 0.7071$$

（5）正确数

实验次数n，公式中的系数等即为正确数，不影响最终结果有效数字。

（6）常数或常量

常数（如π,电子电量e,光速c，普朗克常数等)—不影响原有效位数。如π参与运算，其**位数取至比结果多保留1位**参与运算。

例：$S=\pi R^2=\pi\times(12.13)^2cm^2=3.1416\times(12.13)^2=462.2cm^2$

π比R的有效数字多保留一位。

混合运算：可以使用计算器，但必须分步运算。

$$\frac{100.0\times(5.6+4.412)}{(78.00-77.0)\times10.000}+110.0$$

$$=\frac{100.0\times10.0}{1.0\times10.000}+110.0$$

$$=1.0\times10^2+1.100\times10^2$$

$$=2.1\times10^2$$

在运算过程中，测量值由有效数字运算规则暂定，最终由不确定度定位

不确定度的有效位数：

Δ_A、S、Δ_B、$\Delta_{仪}$、U：运算过程中取二位，在测量结果的表示式中只能取1位，E: <10%时取1位，>=10%时取2位。

测量值的末位应与不确定度所在位对齐，舍入多余位数:

修约规则：四舍五入

习题互动:

1) 0.28m=28cm=280mm.

0.28m=28cm=2.8×10^2mm

2) m=0.2870g，几位有效数字?

4位

3) $0.0221 \times 0.0221 = 0.00048841$

$0.0221 \times 0.0221 = 4.88 \times 10^{-4}$

4) $$\frac{400 \times 1500}{12.60 - 11.6} = 600000$$

$$\frac{400 \times 1500}{12.60 - 11.6} = \frac{600 \times 10^3}{1.0} = 6.0 \times 10^5$$

5) L=(128000 ± 8000)m

L=$(128 \pm 8) \times 10^3$m

6) L=12.0km$\pm$100m

L=(12.0 ± 0.1)km$=(1.20 \pm 0.01) \times 10^4$m $=(120 \pm 1) \times 10^2$m

课后习题（p50）：

2. 用千分尺测量钢丝直径d，共测6次，结果如下表。千分尺初读数为d_0=0.002mm，千分尺仪器误差为0.004mm。写出测量结果的完整表达式。

n	1	2	3	4	5	6
D(mm)	5.624	5.630	5.625	5.631	5.626	5.629

解：$\bar{d} = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6} d_i = 5.6275mm$

$$\bar{d}_{修} = 5.6275 - 0.002 = 5.626mm$$

$$\Delta_A = S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6}(d_i - \bar{d})^2}{6-1}} = 0.0029mm \quad \Delta_B = \Delta_{d仪} = 0.004mm$$

$$U = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{S_d^2 + \Delta_{仪}^2} = \sqrt{0.0029^2 + 0.004^2} = 0.0049mm$$

$$E = \frac{U}{\bar{d}_{修}} \times 100\% = \frac{0.005}{5.626} \times 100\% = 0.09\%$$

$$d = \bar{d}_{修} \pm U = (5.626 \pm 0.005)mm$$

3.在光具座上调节透镜位置x使在像屏上成一清晰的像，透镜位置x的测量结果如下表。估计测量的B类不确定度为 Δ_B=0.1cm，测量次数为4时，$\Delta_A=1.6S_x$，写出透镜位置x测量结果的完整表达式。

n	1	2	3	4
x(cm)	56.69	56.50	56.30	56.60

解：

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i=56.522\text{cm}$$

$$S_x=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}=0.17cm$$

$\Delta_A=1.6S_x=1.6\times0.17=0.27cm$ (4次测量)

$$\Delta_B=0.1cm$$

$$U_x=\sqrt{\Delta_A^2+\Delta_B^2}=\sqrt{0.27^2+0.1^2}=0.29cm$$

$$E=\frac{U_x}{\bar{x}}\times100\%=\frac{0.3}{56.522}\times100\%=0.5\%$$

$$d=\bar{x}\pm U_x=(56.5\pm0.3)cm$$

作业

网上作业第1-6题，第四周周五16：00前。

要求：给出详细计算过程

&4. 实验数据处理

4.1 列表法： 最简单，最常用，便于观察分析。

列表要求：

1.序号和表格名称，说明表格主要内容；

2.标明各栏所表示的物理量和单位

3.自变量应由小到大或由大到小按序排列，数据记录正确反映有效位数；

表1 伏安法测电阻

U/V	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00
I/mA	9.88	~~11.84~~ 11.82	13.65	15.71	17.62	19.47	21.40	23.48	25.30	27.35	29.20

实验过程中错误数据的处理：不要全部涂黑或用涂改液涂掉，在错误的数据上划线，正确的数据写在旁边，但应看得出原来的数据。

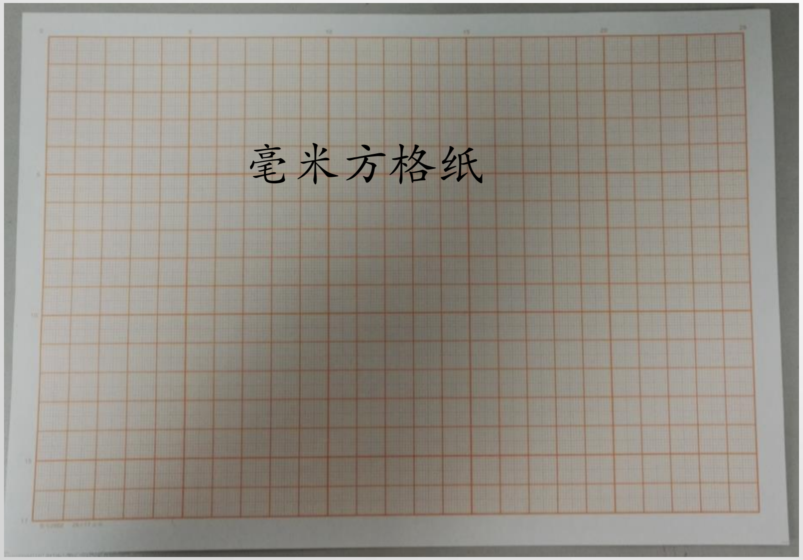
4.2 作图法：

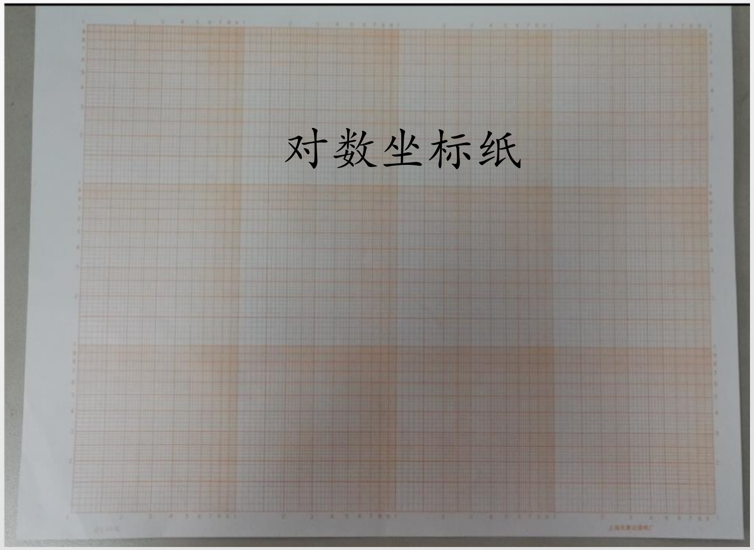
作图一律用**铅笔**，不得用水笔、圆珠笔！

●图示法—作出物理量间的关系曲线

1.图纸种类： 直角坐标纸（毫米方格纸）、对数坐标纸、半对数坐标纸、极坐标纸等。

原则上使曲线居中，并占到图纸2/3面积。





2.坐标轴：

所表示的物理量及单位。坐标轴要以**粗实线**画出，标清**箭头**方向，坐标轴名及单位分别写在纵轴左侧和横轴下端。

3.原点：

不一定取(0,0)，一般取比数据最小值略小的**整齐数**。

4.定比例：

常用比例 1.00cm：1.00×10^n；

1.00cm：2.0×10^n

1.00cm：5.0×10^n

不宜用1:3；1:7；1:9之类的比例。

5.标度：坐标轴上隔等间距标上整齐数

标度值一般取**整齐数**且**等间隔**。

标度值的**有效位数**应与**测量数据**的有效位数**相同**。

6.标出实验点

实验点：数据中的一对自变量值和应变量值。(x,y)实验点可用＋、×、⊙等符号标记，不用**实心圆点**。

一条曲线上的实验数据用一种标记。

一张图中有**几条曲线**，用**不同符号标记**以示区别。

7.连线

直线：用**直尺作细线**，尽量使实验数据点均匀分布在直线两侧。延伸线用虚线画出。

曲线：用曲线板或曲线尺。

折线：经过每个数据点。

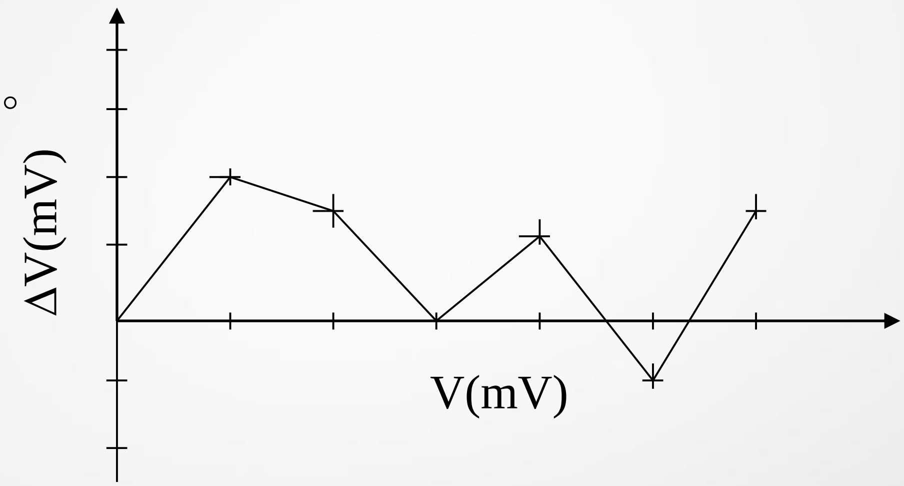


图2 电压表校正曲线

8.图名和说明

图名、比例、作图者、日期、必要的简短说明。

图名中，一般纵轴在前，横轴在后（伏安特性曲线例外）。

● 图解法

直线情况下由图求**斜率**，再由斜率求其他待测量。

求斜率取点注意:

1.在直线两端另外取A、B两点，**不要取实验点**;

2. **A、B两点尽量远**些，以免减少斜率的有效数字的位数，但也**不能超出实验数据范围**;

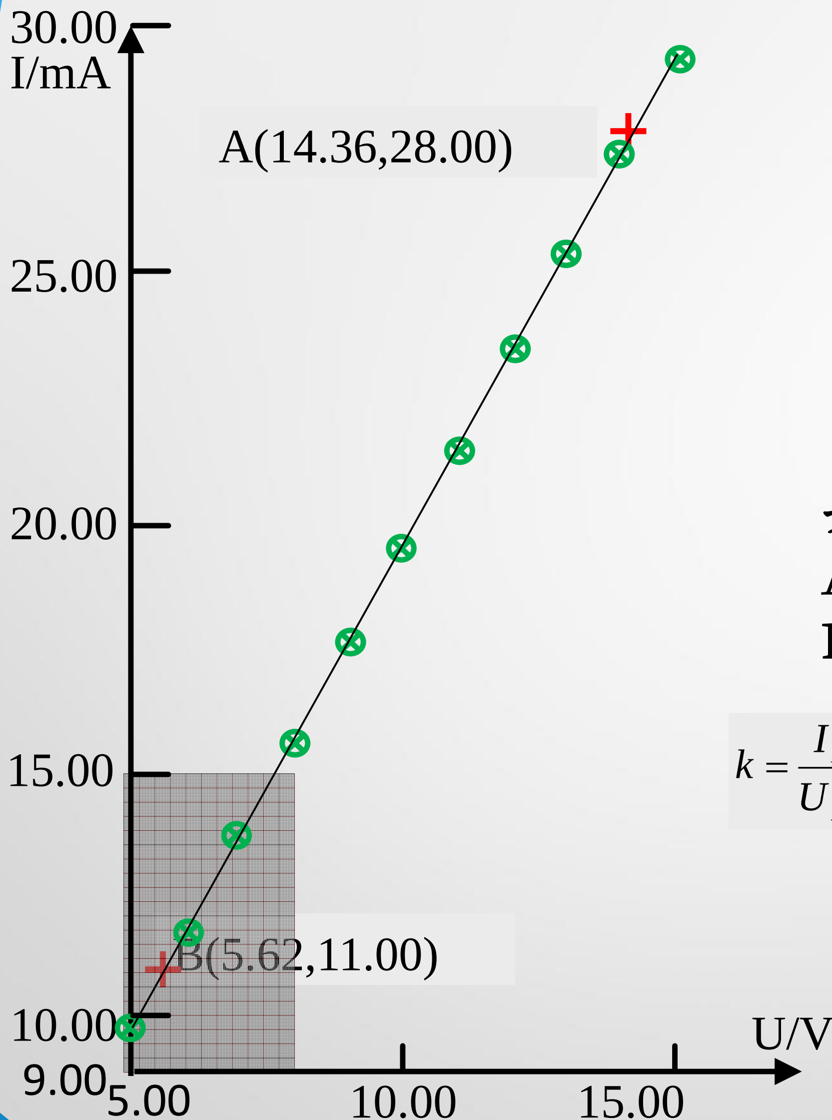
3.用**不同于实验点**的符号标出A、B两点，并注明坐标值，A(x_A,y_A), B(x_B,y_B)（有效位数应与实验数据的有效位数相同）;

4.根据公式计算直线斜率;

$$k=\frac{y_A-y_B}{x_A-x_B}$$

（注意有效位数运算规则）

5.根据 k 计算相关物理量。



图名：电阻伏安特性

比例：U：1.00cm:1.00V

I：1.00cm:1.00mA

制图者：张三

制图日期：2017.11.20

如图1.7.1，A(14.36,28.00)，B(5.62,11.00)，则斜率k为：

$$k=\frac{I_A-I_B}{U_A-U_B}=\frac{28.00-11.00}{14.36-5.62}\frac{mA}{V}=\frac{17.00}{8.74}\frac{mA}{V}=1.95\frac{mA}{V}$$

$$R=\frac{1}{k}=\frac{1}{1.95}\frac{V}{mA}=513\Omega$$

图1.7.1 电阻伏安特性曲线

曲线变换为直线：对于非线性函数关系，有时可以通过变量变换或采用对数坐标等手段，把曲线变换为直线。

例：金属比热测量，金属样品冷却速率$\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$与温差$(\theta-\theta_0)$是指数关系

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t}=\frac{1}{cM}aS(\theta-\theta_0)^{\alpha}$$

在对数坐标纸上，$\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ 随$(\theta-\theta_0)$ 的变化是斜率为α的直线。

$$\lg\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right)=\alpha\lg(\theta-\theta_0)+\lg\left(\frac{aS}{cM}\right)$$

4.3 逐差法：（未订正部分：使用老教材的表述进行订正）

1. 使用范围：自变量等间隔变化的线性函数关系；

2. 逐项逐差：测量数据的相邻两项逐项相减，验证线性函数关系；

例：拉伸法测量弹簧倔强系数，弹簧伸长量a= x_{i+1}-x_i，刻度尺

在弹性限度范围内，伸长量a和所加负荷F之间满足线性函数关系F=ka

F(kg)	0.000	0.500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500
x_i(mm)	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8

每增加一个砝码，弹簧的伸长量：

$a_1=x_2-x_1$　$a_2=x_3-x_2$　$a_3=x_4-x_3$　$a_4=x_5-x_4$　$a_5=x_6-x_5$　$a_6=x_7-x_6$　$a_7=x_8-x_7$

如果a_1、a_2、a_3、a_4、a_5、a_6、a_7 基本相等，说明a和F是线性函数关系，否则说明实验过程不正常，应查找原因。

例：求上例中每个砝码引起的弹簧伸长量

$a_1=x_2-x_1$　$a_2=x_3-x_2$　$a_3=x_4-r_3$　$a_4=x_5-x_4$　$a_5=x_6-x_5$　$a_6=x_7-x_6$　$a_7=x_8-x_7$

$$\bar{a}=\frac{1}{7}\sum_{i=1}^{7}a_i$$

$$=\frac{(x_8-x_7)+(x_7-x_6)+(x_6-x_5)+(x_5-x_4)+(x_4-x_3)+(x_3-x_2)+(x_2-x_1)}{7}$$

$$=\frac{x_8-x_1}{7}$$

中间数据全部无效，与单次测量等价。

3.多项间隔逐差（逐差法）：测量数据分成两组，每组数目相等，对应项相减；可以充分利用数据，保持多次测量的优点。

采用多项间隔逐差：测量数据分成两组，对应项相减。

F(kg)	0.000	0.500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500
x_i(mm)	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8

第一组x_i	x_1	x_2	x_3	x_4
第二组$x_{n/2+i}$	x_5	x_6	x_7	x_8
逐差$x_{n/2+i}$-x_i	x_5-x_1	x_6-x_2	x_7-x_3	x_8-x_4

$$\bar{a}=\frac{\left(x_8-x_4\right)+\left(x_7-x_3\right)+\left(x_6-x_2\right)+\left(x_5-x_1\right)}{4}$$

中间数据全部有效，保持了多次测量的优点。

a的不确定度B类分量：

x_5-x_1，x_6-x_2，x_7-x_3，x_8-x_4中任意一项的不确定度：

$$\Delta_{x_5-x_1}=\sqrt{\Delta_{x_5}^2+\Delta_{x_1}^2}=\sqrt{2\Delta_{x仪}^2}=\sqrt{2}\Delta_{x仪}$$

$\Delta_{x_6-x_2},\Delta_{x_7-x_3},\Delta_{x_8-x_4}$ 的不确定度B类分量均为 $\sqrt{2}\Delta_{x仪}$

对 $\frac{n}{2}\Delta x$ 进行不确定度估算，重复测量了 $\frac{n}{2}$ 次，$\Delta B=\sqrt{2}\Delta_{仪}$

十、弹簧劲度系数k测量，数据如下。P为所加砝码质量，y为弹簧的长度。$\Delta_{仪P}=0.05g$，$\Delta_{仪y}=0.5mm$，$g=9.80665m/S^2$。

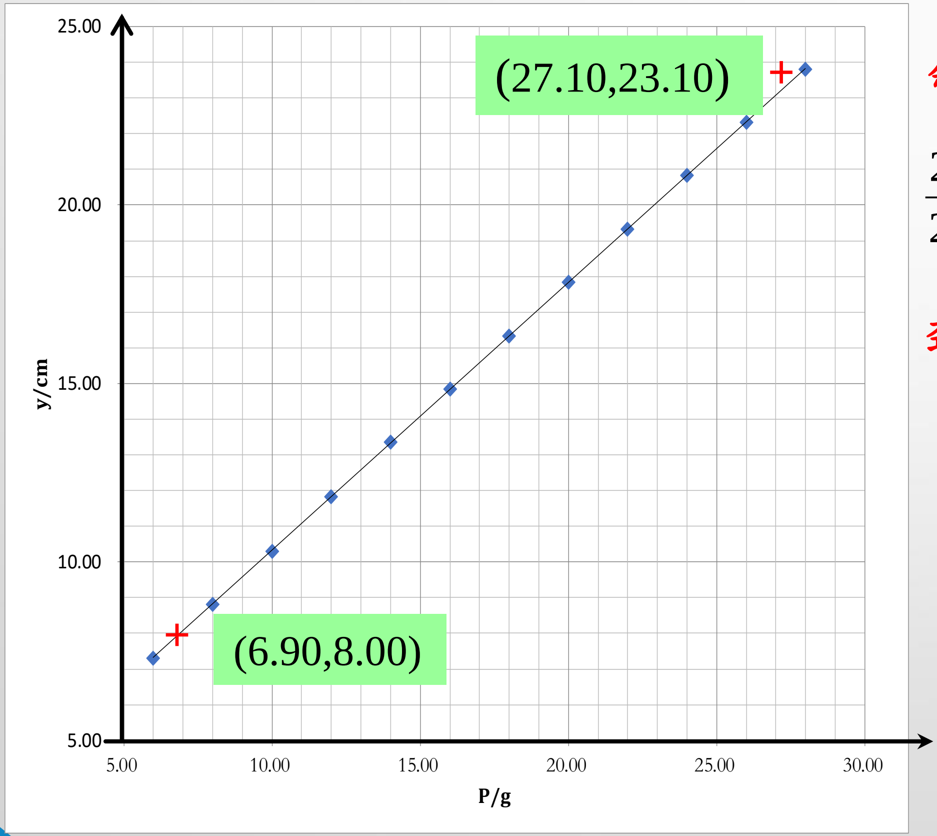
劲度系数k单位: N/m

$$1N = 1\frac{kg \cdot m}{s^2}$$

（1）作y-P图。

（2）用图解法求弹簧劲度系数k。

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P/g	6.00	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
y/cm	7.31	8.80	10.30	11.82	13.35	14.85	16.34	17.84	19.33	20.83	22.31	23.81



斜率为：

$$\frac{23.10-8.00}{27.10-6.90} = \frac{15.10}{20.20} = 0.7475cm/g$$

劲度系数k为：

N/m

$$k = \frac{1}{斜率} = \frac{1}{0.7475} g/cm$$

$$=1.338\frac{g}{cm} \times 9.8067\frac{m}{s^2}$$

$$=1.312N/m$$

（3）用逐差法（隔项逐差法）计算弹簧劲度系数k。(数据处理写在作图纸的反面，保留详细过程，第四周交给实验老师)　　$\Delta_{仪P}$=0.05g，$\Delta_{仪y}$=0.5mm，g=9.80665m/S^2。

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P/g	6.00	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
y/cm	7.31	8.80	10.30	11.82	13.35	14.85	16.34	17.84	19.33	20.83	22.31	23.81

次数	1	2	3	4	5	6
P/g	6.00	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00
y/cm	7.31	8.80	10.30	11.82	13.35	14.85
次数	7	8	9	10	11	12
P/g	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
y/cm	16.34	17.84	19.33	20.83	22.31	23.81
$\Delta y=y_{i+6}-y_i$	9.03	9.04	9.03	9.01	8.96	8.96

$$\overline{\Delta P}=12.00g$$

可得到6个Δy，计算平均值为：　$$\overline{\Delta y}=\frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6}\Delta y_i=9.01cm$$

而6个ΔP相等，均为12.00g：　$$\overline{\Delta P}=12.00g$$

$$1N=1\frac{kg\cdot m}{s^2}$$

劲度系数为：

$$k=\frac{\overline{\Delta P}}{\overline{\Delta y}}=\frac{12.00\times10^{-3}kg\times9.807m/s^2}{9.01\times10^{-2}m}=1.31N/m$$

Δy的不确定度的A类分量： $\Delta_{Ay}=s_{\Delta y}=\sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{6}\left(\Delta y_i-\overline{\Delta y}\right)^2}{6-1}}=0.036cm$

B类分量： $\Delta_{By}=\sqrt{2}\Delta_{仪y}=\sqrt{2}\times0.05=0.071cm$

不确定度： $U_{\Delta y}=\sqrt{\Delta_{Ay}^2+\Delta_{By}^2}=\sqrt{0.036^2+0.071^2}=0.080cm$

相对不确定度： $E_{\Delta y}=\dfrac{U_{\Delta y}}{\Delta y}=\dfrac{0.080}{9.01}=0.0089$

ΔP的不确定度： $U_{\Delta p}=\Delta_{Bp}=\sqrt{2}\Delta_{仪p}=\sqrt{2}\times0.05=0.071g$

相对不确定度： $E_{\Delta p}=\dfrac{U_{\Delta p}}{\Delta p}=\dfrac{0.071}{12.00}=0.0059$

劲度系数k的相对不确定度： $E_k=\sqrt{E_{\Delta p}^2+E_{\Delta y}^2}=\sqrt{0.0089^2+0.0059^2}=0.011$

$U_k=k\times E_k=1.31\times0.011=0.014N/m$

最后结果表示：

$k=(1.31\pm0.01)N/m$

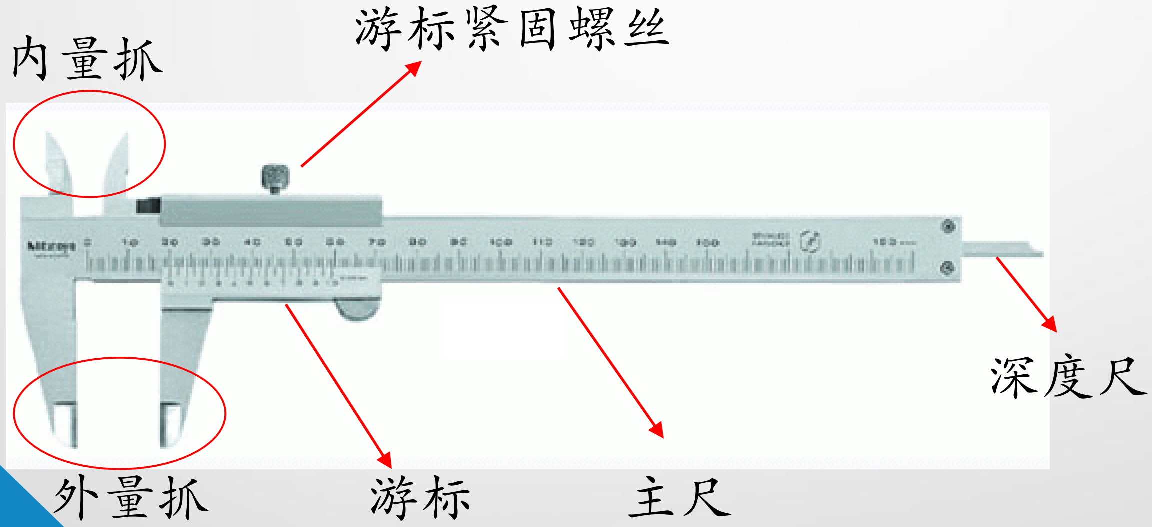
$E_k=1\%$

&5. 物理实验基本仪器

5.1 长度测量仪器

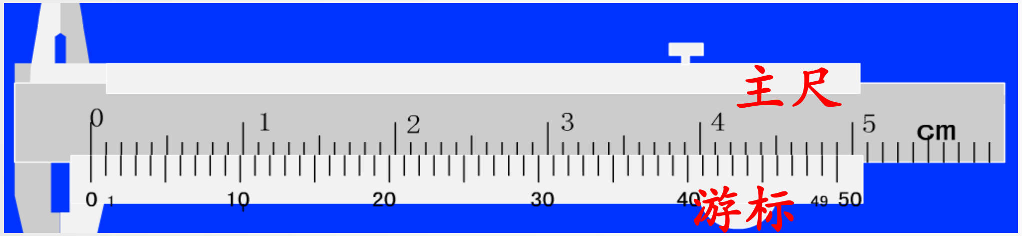
1. 游标卡尺

（1） 结构



（2）游标卡尺读数原理：

主尺的最小分度（通常y=1mm)

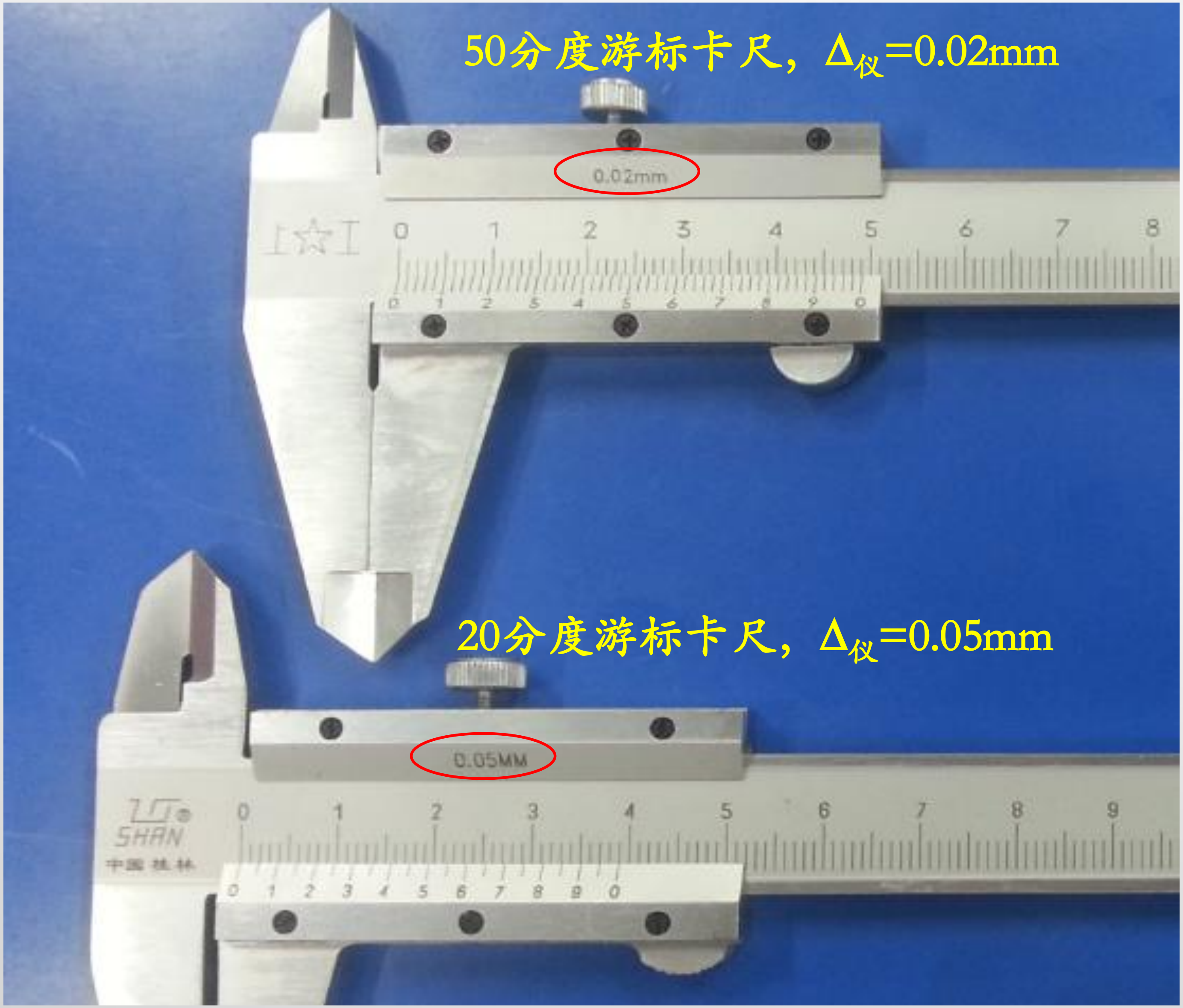


游标卡尺的游标，一般分为三种分度：

10分度： 0.1mm分度值 $\Delta_{仪}$=0.1mm

20分度： 0.05mm分度值 $\Delta_{仪}$=0.05mm

50分度： 0.02mm分度值 $\Delta_{仪}$=0.02mm


50分度游标卡尺，Δ仪=0.02mm
0.02mm
20分度游标卡尺，Δ仪=0.05mm
0.05MM
SHAN

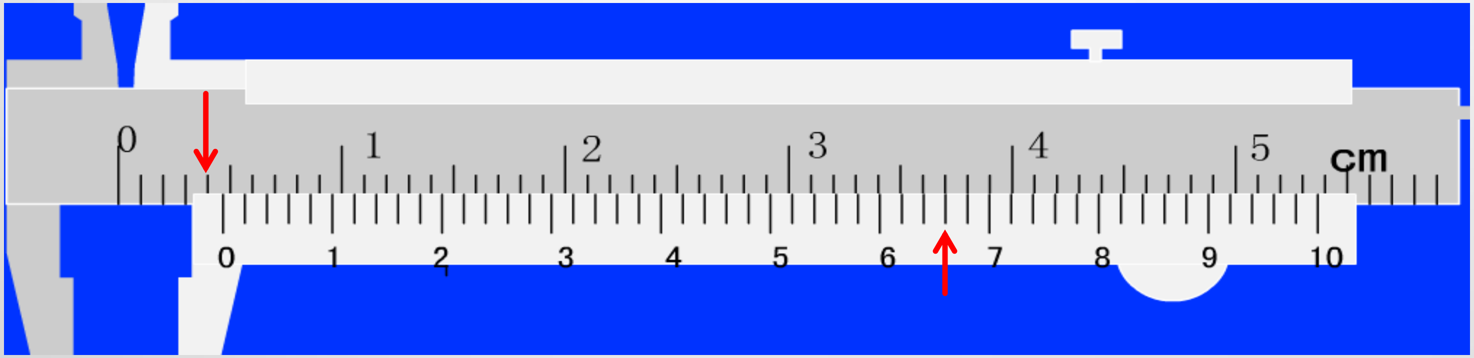
（3）读数方法：

① 根据游标零刻度以左的主尺上的最近刻度读出整毫米数；

② 根据游标零线以右与主尺上的刻度对准的刻线数乘上游标分度值读出小数；

③ 将上面整数和小数两部分加起来，即为总尺寸。

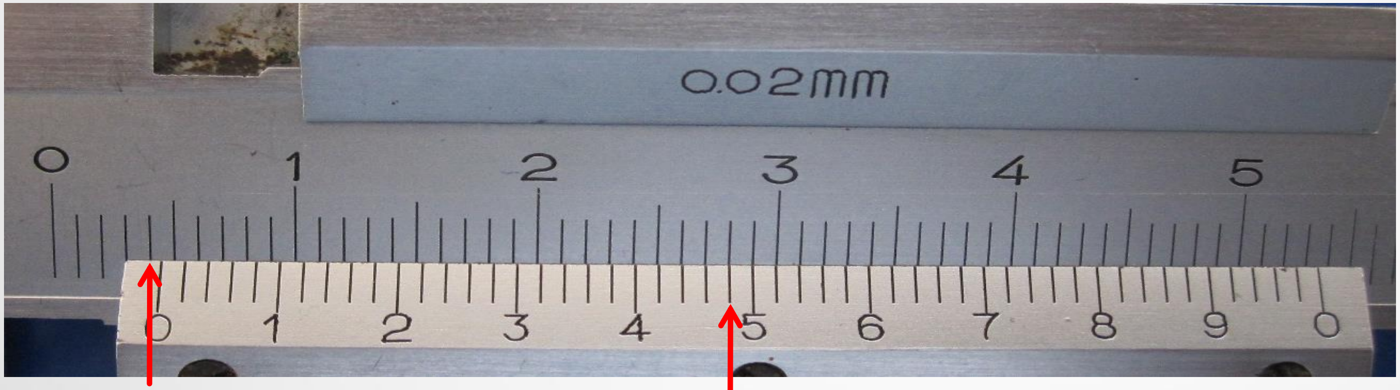
例：50分度游标卡尺



4.66mm

50分度游标卡尺：末位读数可为2，4，6，8，0

50分度游标卡尺：$\Delta_{仪}=0.02mm$



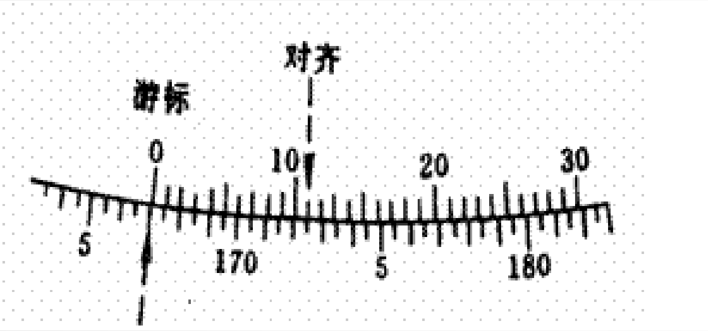
主尺：4mm

游标：0.48mm

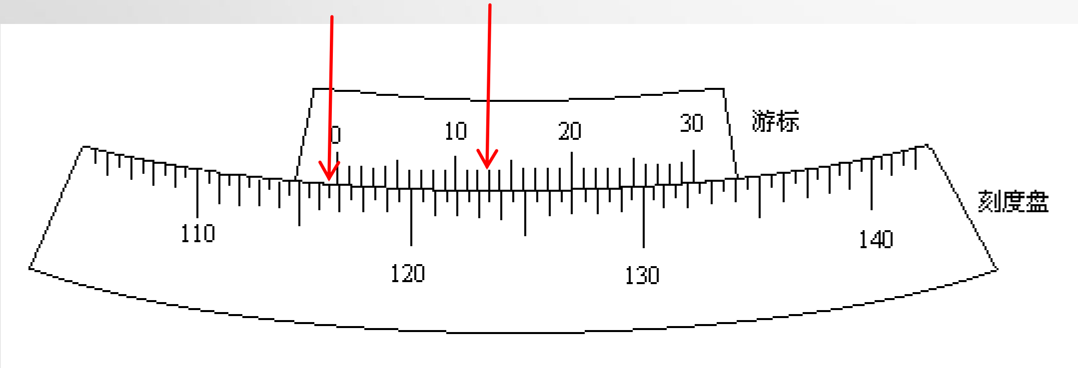
4+0.48=4.48mm

圆形游标读数

例：

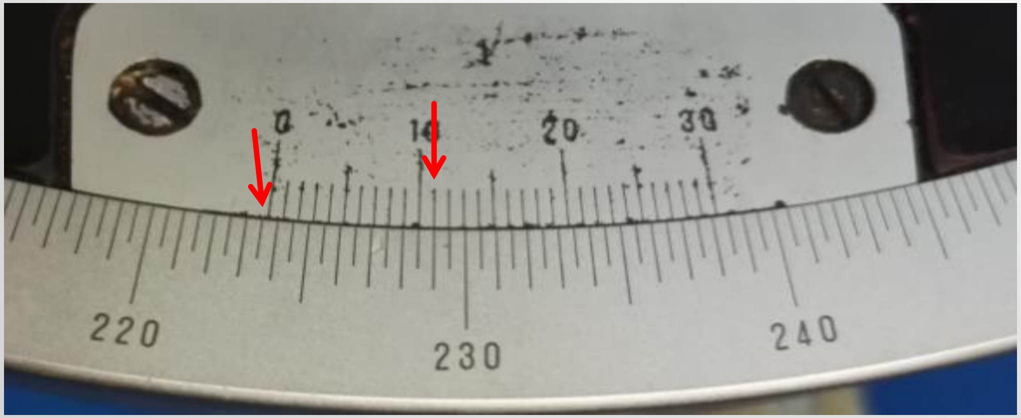


$167^{\circ}+11'=167^{\circ}11'$



$\boxed{116^{\circ}30'}+13'=116^{\circ}43'$

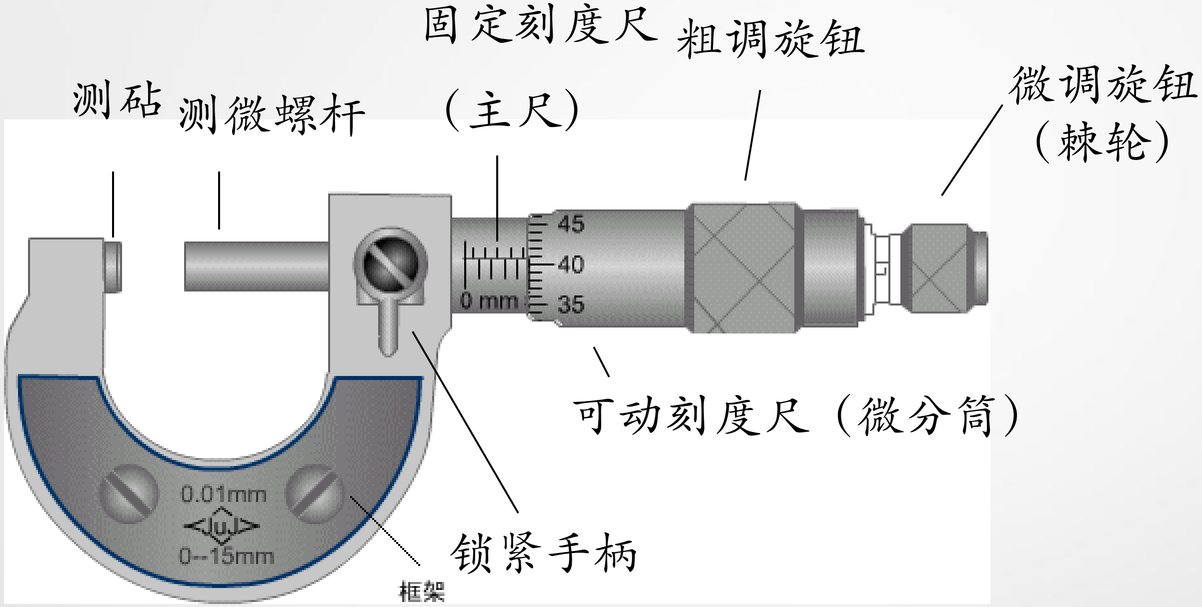
$$120^\circ + 20' = 120^\circ 20'$$



$$223^\circ 30' + 11' = 223^\circ 41'$$

2. 螺旋测微器（千分尺）

（1）螺旋测微器的结构



螺旋测微器是一种常用的高精度量具，其精度分零级和一级两类。大学物理实验中使用的是一级千分尺。按国家标准（GB1216-75）规定，量程为25mm的一级千分尺的示值误差为0.004mm。$\Delta_{仪}=0.004mm$

（2）使用方法

先转动粗调旋钮使测微螺杆与测砧间距稍大于被测物，放入被测物，**与待测样品接近时，改用棘轮，**当听到“喀喀”声时即可读数。

（3）读数原理

微分筒转动一圈，前进或后退0.5mm，即螺距＝0.5mm

螺距＝0.5mm，微分筒上有50个分度格，每小格分度值

$$\frac{0.5}{50} = 0.01mm$$

小格后可再估读一位，即单位为mm时可读到小数点后第3位，因此也称为千分尺。

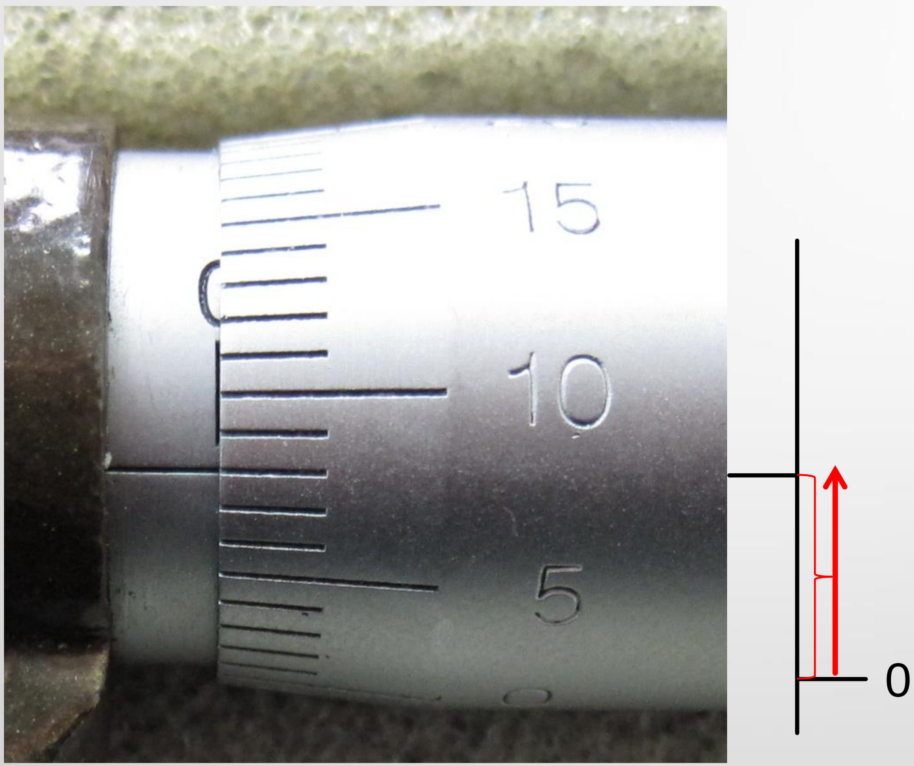
（4）读数规则

测量读数=固定刻度（注意半刻度是否露出）+可动刻度

+估读位(0.001mm)

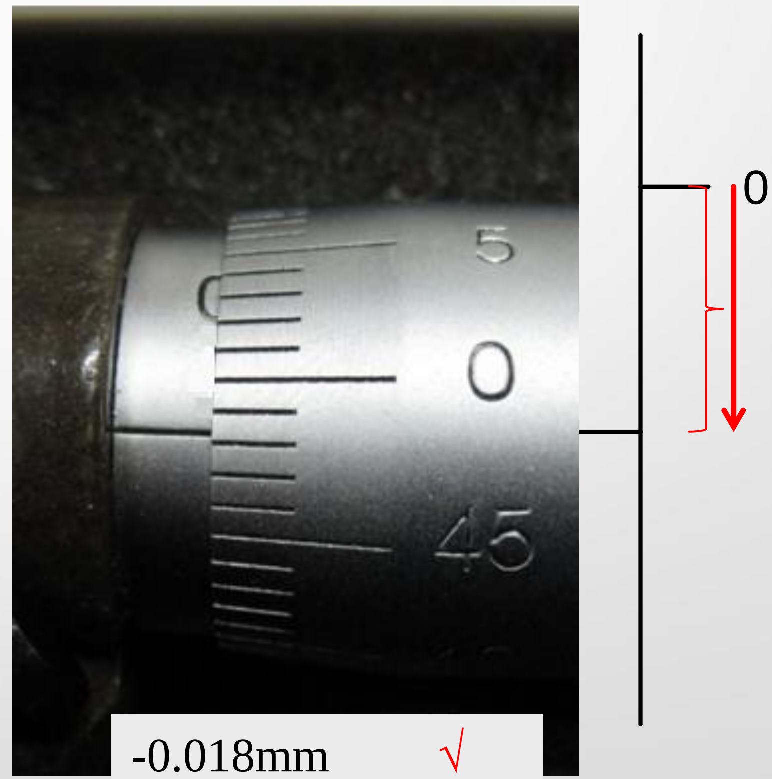
（5）初读数

测量值=测量读数－初读数



+0.080mm

正初读数

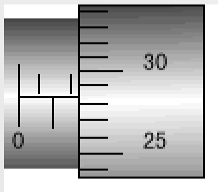


-0.018mm √
-0.482mm ×
0.482mm ×

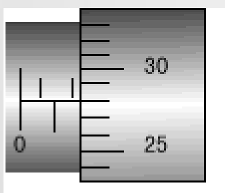
负初读数

螺旋测微器的结构和使用：

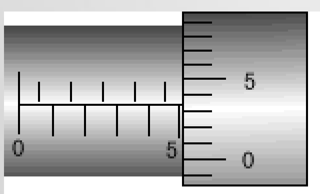
例：



$1.\underline{5}+0.283=1.783mm$



$1.5+0.28\underline{0}=1.78\underline{0}mm$



$5.0+0.033=5.033mm$

$\neq 0.33m$

（6）使用螺旋测微器注意：

① 与待测物接近接触时，使用棘轮；

② 初读数有正负，不要读错；

③ 注意固定刻度尺上表示半毫米的刻线是否已经露出；

④ 注意微分筒上的数字所在位数；

⑤ 估读数字不能随便丢掉；

⑥ $\Delta_{仪}=0.004mm$；

⑦ 不用时应置于盒中，测微螺杆和测砧之间留有空隙，以免热胀挤压。

5.2 质量的测量—天平

（1）普通天平

（2）电子天平

操作步骤：

a. 水平调节

b. 预热

c. 开启显示器

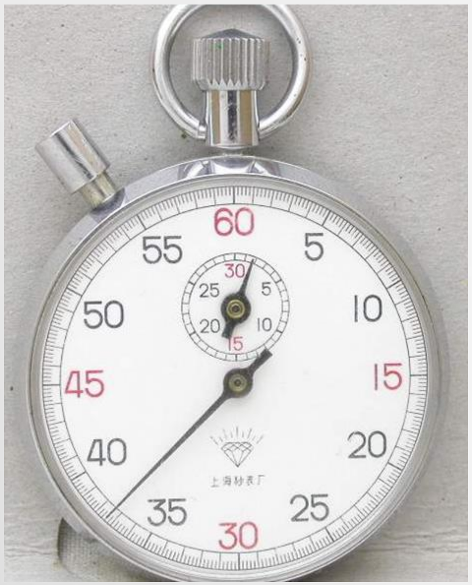
d. 校准

e. 称量

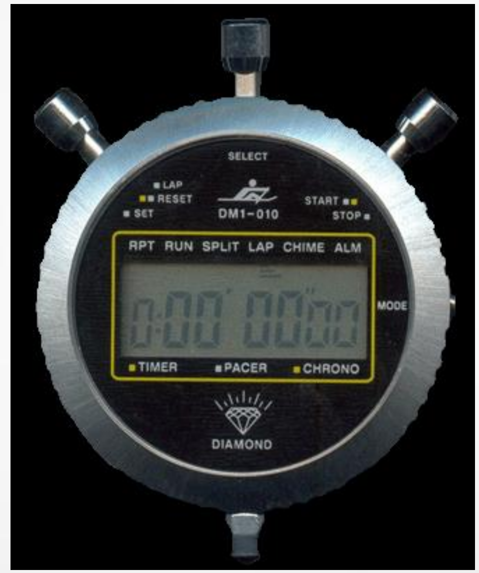
f. 去皮称量

5.3 测量时间的常用仪器—秒表

（1）机械秒表



（2）电子秒表



（3）数字毫秒计

5.4 电源

（1）交流电源(AC)：220V，其他电压值（变压器调节）

（2）直流电源(DC)

直流稳压电源、直流稳流电源、干电池

（3）电源使用注意事项

① 电压大小，<36V直接操作；

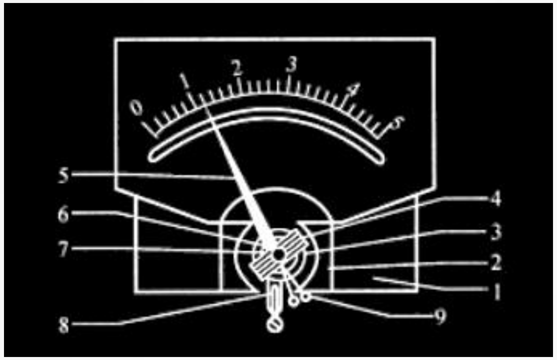
② 不得短路，最大电流不得超过允许值；

③ 注意正负极，不得接反。

5.5 电表

（1）偏转式电表

磁电式电表



1-永久磁铁；2-极掌；3-圆柱形铁心；4-线圈
5-指针；6-游丝；7-半轴；8-调零螺杆；9-平衡锤

（2）磁电式电流表和电压表

（3）电表的主要规格：量程、内阻、准确度等级

（4）电表的正确使用

常用标志：

—	直流	～	交流
≂	交流直流两用	0.5	电表等级
⊥	直立型电表	⊓	水平型电表

电表注意事项：

（1） 正确连接；
（2） 选择合适量程；
（3） 注意电表极性；
（4） 注意性能标志；
（5） 注意视差；
（6） 注意读数

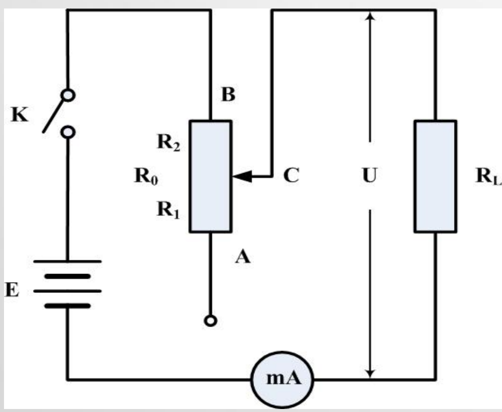
一般应选择电表量程以使测量结果落在量程的2/3处，此时数据较为精确。

数字电压表

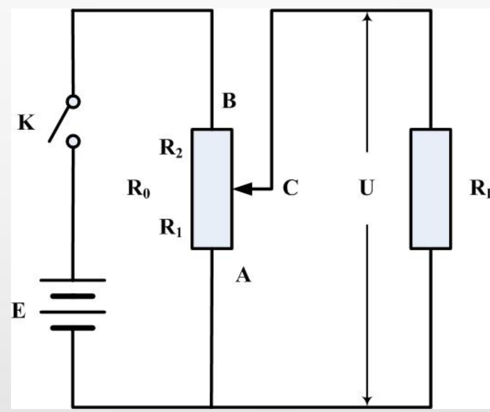
5.6 电阻

（1） 电阻箱

(2) 滑线式变阻器



限流接法



分压接法

5.7 电学实验操作规程及接线规则：

(1)合理安排仪器；

(2) 按回路接线法接线和查线；

(3) 预置安全位置；

(4) 接通电源做瞬态实验；

(5)拆线先切断电源；

5.8 常用光源

1.热辐射光源

(1)白炽灯：可见光，红外辐射，紫外辐射

(2)卤素灯：作为强光源

2.气体放电光源

(1)**钠灯**和汞灯：单色光源

工作原理：以Na或Hg蒸气在强电场中发生的游离放电现象为基础的弧光放电灯。

Na灯：589.3nm

注意：

点燃后需预热3～4分钟方可正常工作；

熄灭后需冷却3～4分钟后方可重新开启。

(2) 氢灯

656.28nm(红), 486.13nm(青), 434.05nm(蓝紫)

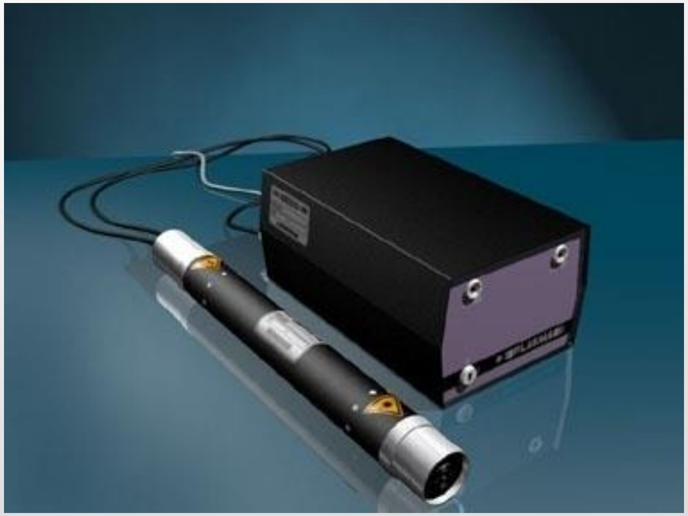
(3) 激光光源

优点：发光强度大、方向性好、单色性强、相干性好……

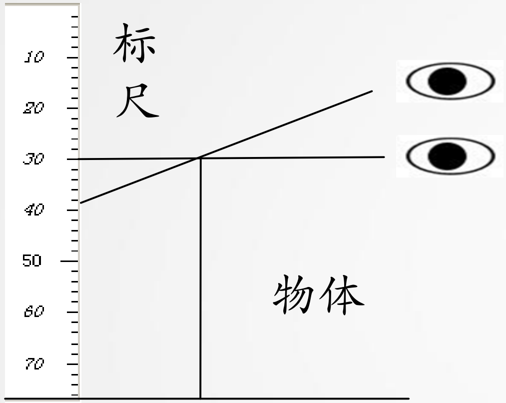
氦氖(He-Ne)激光器　　632.8nm

注意：

切勿迎着激光束直接观看！



a. **消视差**



b.“**等高同轴**”**调节**

1. 粗调

2. 细调

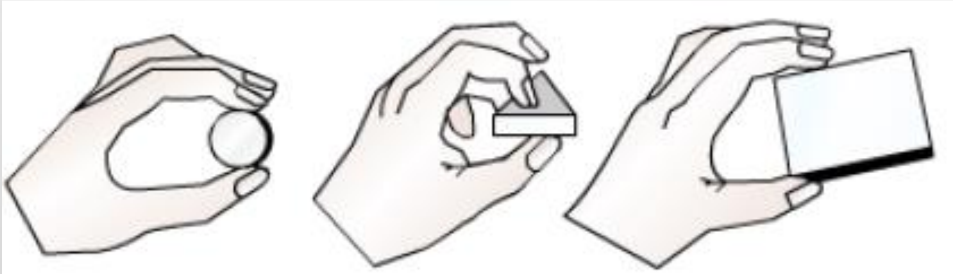
(1) 利用自准直法调整;

(2) 利用二次成像法调整;

c. **左右逼近法**

- **光学实验的操作守则：**

1. 实验前充分预习，了解仪器的结构、原理、操作和使用方法;
2. 光学元件使用时要轻拿轻放，避免撞碰、摔坏。暂时不用应收到元件盒内以防损坏。
3. 绝对不能用手触摸光学面，只能拿磨砂面。
4. 不要对着光学元件说话、打喷嚏、咳嗽。
5. 光学面有污点时，不要自己擦拭，以防损害元件上可能有的镀膜，应找教师处理。
6. 光学仪器中的机械部分很多都经过精密加工，应根据操作规程操作，而且动作要轻、慢，严禁盲目及粗鲁操作。



网上作业提交最后期限：第四周周五（2019.12.20）16:00前

题号	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十
分值	10	9	9	10	11	8	10	10	10	13

十、弹簧劲度系数k测量，数据如下。P为所加砝码质量，y为弹簧的长度。$\Delta_{仪P}=0.05g$，$\Delta_{仪y}=0.5mm$，$g=9.80665m/S^2$。

（1）作y-P图。

（2）用图解法求弹簧劲度系数k。

（3）用逐差法（隔项逐差法）计算弹簧劲度系数k。（数据处理写在作图纸的反面，保留详细过程，开始实验后交给老师

$\overline{\Delta y}=$		cm	
$\overline{\Delta P}=$		g	
k=		N/m	
$E_{\Delta y}=$			
$E_{\Delta P}=$			
$E_k=$			
$U_k=$		N/m	
k=		±	
N/m			
$E_k=$		%	

注意：

1. 第十题第(1)题使用**毫米方格纸**做图，注意图纸方向；**坐标纸上写姓名、学号、上课时间、实验房间号，座位号**等；

2. 第(2)题图上标清楚取点坐标等，计算过程写在图中；

3. 第(3)题写在方格纸反面，要有中间运算过程；第四周上课时交给实验课老师。

19120001，张三
周二3-4
F304
座号：1