



物理实验的基本知识





实验

定义:就是在理论思想指导下, 由实验者选用一定的仪器设备, 在一定的条件下, 人为地控制或模拟自然现象, 使它以比较纯粹和典型的形式表现出来, 再通过对某些物理量的观察和测量去探索客观规律的过程。

由于实验方法的不完善、仪器的准确度、测量条件等原因影响测量结果, 因此如何正确处理实验中得到的数据, 如何正确表达测量结果, 并给出对测量结果的可靠性评价, 也是实验工作者必须掌握的基本知识。

本章针对上述问题, 通过实例, 对物理实验的基本知识作简单介绍。





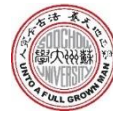
一、物理实验课的地位、作用 and 任务

物理学是一门实验科学，无论物理概念的建立还是物理规律的发现都必须以严格的科学实验为基础，并通过今后的科学实验来证实。

地位：

- 我们的物理实验课程不同于一般的探索性的科学实验研究，每个实验题目都经过精心设计、安排，实验结果也比较有定论，但它是对学生进行基础训练的一门重要课程。
- 物理实验是一门独立的学科，尽管它的主要任务是验证物理规律，但它是独立于物理课的一门学科。是必修课，要考试，不及格不能毕业。没有补考只能重修。





作用和任务：

- 验证发现物理规律
- 培养能力

教育的根本任务是培养能力，哪些能力？

- (1)自学能力；(2)动手能力；(3)判断能力；
(4)书面表达能力；(5)设计能力；

- 培养素质

科学素质；科学精神；严肃认真；诚实守信；不抄袭、不篡改数据；严格遵守操作规程，不盲目动手，否则会造成不可挽回的损失，要赔偿



二、物理实验的基本程序



1. 看懂课表

2021 级医学部《普通物理实验》教学日历（2021—2022 学年第二学期，2022.2—2022.7）												
时 间	学院	班 级	人 数	按 学 号 分 组								注意事项 1.第 1-2 周上实验绪论课，学生按实验分组到实验室上课，时间:上午 8:00-12:00，下午 1:30-5:30;地点：物理实验室（公教 3 号楼西楼 2-3 层,4 号楼）。 2. 第 3-16 周做实验,每组每次做 2 个实验,时间：上午 8:00-12:00，下
				a	b	c	d	e	f	g	h	
单周 1 下午	医学部	医 21 放医	39	3-91(20)	96-121(19)							
		医 20 口腔	1		1041							
		医 19 临床五年	1			4136						
		医 21 生物技术	4			31-86(4)						
		医 20 预防	1			1056						
		医 21 预防	72			2-22(14)	24-58(20)	59-84(19)	86-117(19)			
双周 1 下午	医学部	医 21 法医	3	1-11(3)								
		医 21 放医	76	1-23(16)	24-45(19)	46-76(19)	77-109 (19)	111-122(3)				
		医 21 生物技术	5					25-90(5)				
		医 21 预防	30					1-32 (11)	33-116(19)			

项 目	*粘度系数 4704	*杨氏模量 3306	*金属比热容 4706	*示波器(1) 3215	油 滴 仪 3217	*分光计 3319	太阳能电池 3212	迈氏干涉仪 3317
周 次	*弦 振 动 4705	*表面张力 3306	*转动惯量切变模量 4706	*示波器(2) 3215	介电常数测量 3217	*光 栅 3319	*液晶电光效应 3312	牛 顿 环 3317
1—2	实验绪论课，讲授“物理实验的基础知识”。							
3—4	a	b	c	d	e	f	g	h
5—6	b	c	d	e	f	g	h	a
7—8	c	d	e	f	g	h	a	b
9—10	d	e	f	g	h	a	b	c
11—12	e	f	g	h	a	b	c	d
13—14	f	g	h	a	b	c	d	e
15—16	g	h	a	b	c	d	e	f
17	实验操作考试，具体安排将另行通知。							



2. 预习实验

实验预习及要求

- 1、每周三下午 13:30-15:30 实验室开放，提供每位学生 60 分钟的实验预习；学生也可以通过物理实验中心网站(<http://phylab.suda.edu.cn>)的实验课程资料、教务部在线课程自主完成预习。
- 2、预习要求：了解实验目的、原理，掌握实验方法、步骤、仪器使用方法、实验数据处理方法。
- 3、通过预习，要求完成实验报告一(目的与原理)。
- 4、未完成实验预习的同学，不得进入实验室上实验课。

实验报告及要求

1. 实验报告包含报告一(目的与原理)、报告二(实验记录)、报告三(方法与结果讨论)三部分。
2. 在实验中心网站(<http://phylab.suda.edu.cn>)的教学资源中下载实验报告模板，用 A4 纸打印，撰写实验报告。
3. 每次实验课前须提交所做实验的实验报告一；实验结束由老师批阅实验报告二；课后完成实验报告三，在下次实验前至原实验室提交实验报告二、三。

模拟仿真实验及要求

为了便于学生更好地理解部分实验的基本原理与过程，实验中心在网站(<http://42.244.34.39:8000>)提供模拟仿真实验，请各位学生在课前根据网站的操作说明和要求，自主完成模拟仿真实验学习，登录名和密码为各人学号。

实验视频课程

实验中心录制了 11 个实验的视频课（实验名称上标注*），在教务部的苏州大学视频课程学习平台发布（教务部→课堂实录→学院课程→大学物理部→普通物理实验），提供学生实验课程的在线学习资源，请各位同学浏览学习。



二、物理实验的基本程序

1. 实验预习

看懂教材、明确目的、写出预习报告。

预习报告要求：

①写实验目的、实验原理。

主要实验原理、公式（包括式中各量意义）、
电路图或光路图及关键步骤。

②画好原始数据表格。

课上教师要检查预习情况，记录预习分。

苏州大学物理实验报告

普通物理实验报告

第一部分（实验目的与原理）

学部（院）_____ 姓名_____ 学号_____ 专业_____

实验日期_____ 成绩_____

【实验名称】

【实验目的】

【实验原理】

Sample

1

苏州大学物理实验教学示范中心制





2. 实验操作

阅读资料、调整仪器、观察现象、获取数据、仪器还原。

- ①重视实验能力、作风培养。珍惜独立操作的机会，完成实验内容。教师予以评分。
- ②强调记录数据时不得用铅笔，只有数据正确、仪器还原、教师签字后该次实验才有效。
- ③提倡研究问题，注意安全操作。

实验完毕后，要对记录的数据或观测到的现象进行分析，在能肯定基本合理后，交教师审查。不合理或错误的实验结果，要补做或重做。整理仪器，做好清洁工作，经指导教师检查签名后，才可离开。



3. 实验报告

①实验报告要用实验报告。

②报告内容：具体见后页。

数据处理时必须先重新整理原始记录，然后进行计算（应包含主要过程）、作图等。

③交报告的时间、地点：下次实验时交给原来带实验的老师。迟交报告，酌减报告分，无教师签字原始记录的报告无效。

- ①实验题目;
- ②实验目的;
- ③实验原理;
- ④实验仪器及用具;
- ⑤实验步骤;
- ⑥数据记录与处理;
要重抄原始数据, 有计算过程(或作图) ;
- ⑦结论 (一定要写清楚) ;
- ⑧讨论、分析和心得体会

实验报告样式及要求:

报告整体形象 (整体布局、字迹工整、有无附原始数据记) [10 分]

苏州大学物理实验报告

学院	班级	姓名	学号	同组实验者
实验名称:		指导教师		实验日期
实验条件: 温度	湿度	气压		

一、目的: [5 分]

1、.....;

2、.....

要求: 见教材, 每个实验都1

二、实验仪器与用具: [10 分]

.....、.....、.....、.....

要求: 见教材, 有的与实验仪器卡不同, 以仪器卡上名称为准, 教材中有而实验中没有的不写入。

三、原理: [35 分]

.....

.....

要求: 文字400字以上, 将教材中的原理进行归纳一下, 主要写清楚实验原理理论公式, 有光路图或电路图等要画上, 可根据光路图来简单叙述实验原理, 然后列出计算公式, 公式推导过程可不写, 但实验中数据处理用到的公式一定要写上, 并说明没个符号的含义。

四、实验内容: [15 分]

1.

2.

.....

要求: 参照教材, 以提纲式写明主要的实验内容和实验步骤, 有一些实验方法书上没讲的, 而在实验讲到的要写上。

五、数据记录与处理: [25 分]

.....

要求: 以表格形式体现数据记录和结, 有曲线图的在坐标6 格纸上画。

六、思考题: [附加分10 分] (可选)

要求: 根据老师的布置要求回答, 没布置i可将你有把握的回答写。

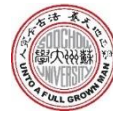
实验课成绩=预习报告+操作+实验报告+笔试





测量误差和数据处理的基础知识

1. 测量与误差
2. 不确定度估算
3. 测量结果的表示
4. 实验数据有效位数的确定



1.1 测量

- 物理实验以测量为基础
- 测量，就是将待测的物理量与一个选来作为标准的同类量进行比较，得出它们的倍数关系的过程。
- 选来作为标准的同类量称之为单位，倍数称为测量数值
- 一个物理量的测量值(结果)包含：数值和单位

完整的测量结果应表示为：

$$N = N_{\text{测}} \pm \delta(\text{单位})$$

• 以电阻测量为例

$$R = 910.3 \pm 0.4 \Omega$$

测量结果 测量的量值 测量的不确定度 单位

- 被测对象的真值落在 $(N_{\text{测}} - \delta, N_{\text{测}} + \delta)$ 范围内的概率很大，
 δ 的取值与一定的概率相联系。

测量的分类

直接测量和间接测量（测量方法）

- 直接测量:指用测量仪器能直接得到结果的测量;
直接测量量。（米尺测长度、天平称质量）
- 间接测量:指利用若干直接测量的物理量经过一定的函数关系运算后得到结果的测量;

间接测量量。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \Rightarrow g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$$

同一物理量可能是直接测量量，也可能是间接测量量。如V。



等精度测量与不等精度测量（测量条件）

- 对一物理量进行多次重复测量，每次测量条件相同（同一个人、同一组仪器、同一实验方法、同一实验环境等）的一系列测量称之为**等精度测量**
- 对一物理量进行多次重复测量，测量条件发生变化，各测量结果的可靠程度不同的一系列测量为**不等精度测量**
- 严格地说，在实验过程中保持测量条件不变是很困难的。但当某一条件的变化对测量结果的影响不大时，仍可视为等精度测量。在本书中，除了特别说明外，都认为等精度测量。



1.2 误差

误差自始至终贯穿于一切科学实验之中——**误差公理**

真值：被测物理量具有的客观的真实数值，用 X 表示。

- 测量的最终目的都是要获得物理量的真值。

➤ 测量结果与客观真值有一定的差异，这种差异称之为误差：

$$\Delta x_i = x_i - X$$

◆ 在误差必然存在的条件下，物理量的真值是无可知的。



通常所说的真值有如下几种类型：

- (1)理论真值 （圆周角、三角形内角和）
- (2)计量约定真值 （国际大会约定的基本单位值）
- (3)标准器相对真值
(用精度高一级的标准器校正过的测量值)

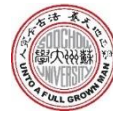


测量误差及分类

误差

$$\Delta x_i = x_i - X$$

- 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 Δx_i
 - 相对误差 $\frac{\Delta x_i}{X}$
- 误差分类：
 - 系统误差
 - 随机误差
 - 粗大误差



系统误差

- 定义：在对同一被测量的多次测量过程中，绝对值和符号保持恒定或按某一确定规律变化的测量误差的分量。
- 产生原因：由于测量仪器、测量方法、环境带入
- 分类及处理方法：

①可定系统误差：必须修正

电表、螺旋测微计的零位误差；伏安法测电阻忽略电流表内阻引起的误差。

②未定系统误差：要估计出分布范围。

如：螺旋测微计制造时的螺纹公差等。

特点：确定性、有规律性、可修正性





过失误差（粗大误差）

明显地歪曲了测量结果的误差称为过失误差。

- 由突发性因素造成的；实验者使用仪器的方法不正确，粗心大意，读错、记错、算错测量数据等。
- 处理：剔除



随机误差（偶然误差）

- 定义：在对同一量的多次重复测量中绝对值和符号以不可预知方式变化的测量误差分量。
- 产生原因：a 人的感官分辨能力不尽相同；b 实验条件和环境因素无规则的起伏变化，引起测量值围绕真值发生涨落的变化。例如：电表轴承的摩擦力变动、外界干扰（温度不均、振动、气流、噪声等）既不能消除又无法精确估量。
- 特点：随机性、服从统计规律

- 随机误差的随机性特点:

也就是说在相同条件下, 对同一物理量进行多次重复测量, 每次测量的误差的大小和正负无法预知, 纯属偶然。但是如果测量次数足够多的话, 大部分测量的随机误差都服从一定的统计规律。

- 遵从正态分布的随机误差有以下几点特征:

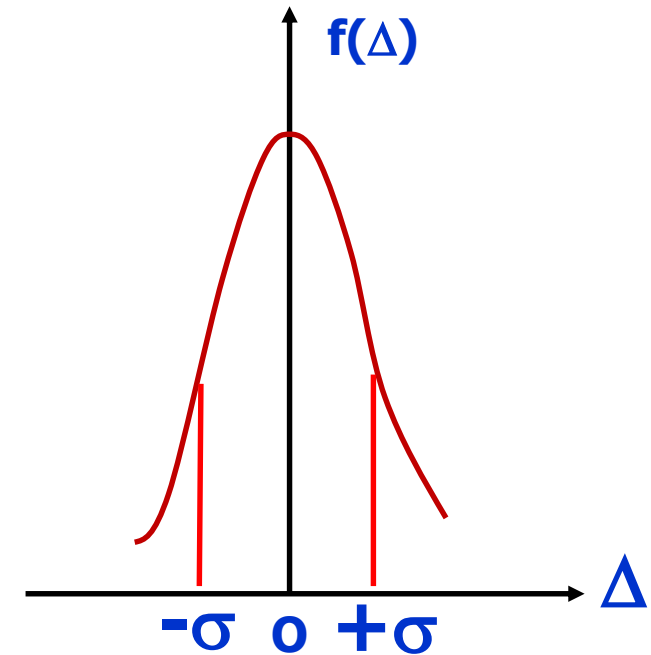
- 1) 单峰性;
- 2) 对称性;
- 3) 有界性;
- 4) 抵偿性:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = 0$$

正态分布

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

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - X)^2}{n}}$$



σ 称为标准误差,物理意义为任意一次测量
其误差落在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区域的概率为**68.3%**



标准误差 σ 的物理意义:

置信概率:

$$P_{(-\sigma, +\sigma)} = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\Delta) \cdot d\Delta = \int_{-\sigma}^{+\sigma} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \cdot d\Delta = 0.683$$

表示: 测量值的误差落在置信区间 $[-\sigma, +\sigma]$ 区间内的概率为68.3%。

$$P_{(-2\sigma, +2\sigma)} = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \cdot d\Delta = 0.954$$

表示: 测量值的误差落在 $[-2\sigma, +2\sigma]$ 区间内的概率为95.4%。

$$P_{(-3\sigma, +3\sigma)} = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(\Delta) \cdot d\Delta = 0.997$$

表示: 测量值的误差落在 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 区间内的概率为99.7%。

测量**1000**次, 只有**3**只有可能在置信区间之外。因此, 测量值误差超出范围的概率极小。故称**3 σ** 为极限误差。





1.3 随机误差的统计处理

1. 近真值:

假定对一个量进行了 n 次测量，测得的值为 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ ，可以用多次测量的算术平均值作为被测量的最佳估计值(假定无系统误差)

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

2. 误差估算:

1) 算术平均绝对误差:

n 次测量，每次的偏差

$$\delta_i = x_i - \bar{x}$$

算术平均绝对误差:

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\delta_i|$$

任一次测量的误差落在
($-\delta$, $+\delta$) 区间内的可能性为**57.5%**



2) 标准误差（方均根误差）

- 用标准误差 σ 表示测得值的分散性

- 按贝塞耳公式求出：
(n 有限时)

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

S_x 为测量的标准偏差，它是测量次数有限多时，标准误差的一个估计值。

- S_x 大，表示测得值很分散，随机误差分布范围宽，测量的精密度低；
- S_x 小，表示测得值很密集，随机误差分布范围窄，测量的精密度高；
- n 不很小时，测量列中任一测量值的误差落在 $(-S_x, +S_x)$ 内的概率在68%左右

随机误差的处理举例

例：用50分度的游标卡尺测某一圆棒长度 L ，6次测量，结果如下（单位mm）：

250.08, 250.14, 250.06, 250.10, 250.06, 250.10

则：测得值的最佳估计值为

$$L = \bar{L} = 250.09\text{mm}$$

测量列的标准偏差

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}{n-1}} = 0.03\text{mm}$$

3) 算术平均值的标准误差

- 算术平均值 \bar{x} 的标准误差为:

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

上式说明算术平均值的标准误差小于标准误差，因为算术平均值是测量结果的最佳值，它比任意一次测量值 x_i 更接近真值，误差要小。

在多次测量的随机误差遵从正态分布的条件下，算术平均值的标准误差处于该区间内的概率为68.3%。

1.4 仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$

• 在正确使用仪器的条件下，测量所得结果和真值之间可能产生的最大误差。

❖ 长度测量类： 1) 说明书； 2) 查有关标准和规定；
3) 不可估读：最小分度值；可估读：最小分度值的一半。

❖ 质量测量类：天平

❖ 时间测量类：秒表（不可估读），最小分度值

❖ 温度测量类：温度计最小分度值的一半

❖ 电表类： $\Delta_{\text{仪}} = \text{量程} \times \text{准确度等级} / 100$

❖ -----

$\Delta_{\text{仪}}$ 为误差绝对值的极限值
并不是测量的真实误差

等价标准误差：

$$\sigma_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}$$



2.1 测量误差与不确定度

- ❖ 不确定度的权威文件是国际标准化组织(ISO)、国际测量局(BIPM)等七个国际组织联合推出的不确定度：**Uncertainty**

不确定度表示由于测量误差存在而对被测量值不能确定的程度。

不确定度是一定概率下的误差限值。

- ❖ 不确定度反映了可能存在的误差分布范围，即随机误差分量和未定系统误差的联合分布范围。
- ❖ 由于真值的不可知，误差一般是不能计算的，它可正、可负也可能十分接近零；而不确定度总是不为零的正值，是可以具体评定的。





2.2 不确定度与测量结果的表示

- 测量不确定度

指由于测量误差的存在，而对被测量值不能肯定的程度。它是定量评价测量结果可信程度的一个极其重要的指标。

测量不确定度包含A类标准不确定度和B类标准不确定度。

- 1) 不确定度的A类评定 (A类分量)

由于偶然因素，在同一条件下对同一物理量 X 进行多次重复测量的值，将是分散的，从分散的测量值出发用统计的方法评定标准不确定度，就是标准不确定度的A类评定





- 不确定度的A类分量就取为算术平均值的标准偏差，即：

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

按误差理论的正态分布，如不存在其他影响，则测量值范围 $[\bar{x} - S_{\bar{x}}, \bar{x} + S_{\bar{x}}]$ 中包含真值的概率为**68.3%**。

❖ 2) 不确定度的B类评定（B类分量）

测量中凡是不符合统计规律的不确定度统称为**B类**不确定度。

B类不确定度为

$$\mu_j = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}$$

合成不确定度

A 类分量 —— 多次重复测量时与随机误差有关的分量 S_1, S_2, \dots ;

B 类分量 —— 与未定系统误差有关的分量。 u_1, u_2, \dots .

❖ 这两类分量在相同置信概率下用方和根方法得到合成不确定度：

$$u_c = \sqrt{\sum S_i^2 + \sum u_j^2}$$



- 例：已知游标卡尺 ($\Delta_{\text{仪}}=0.05\text{mm}$) 的初始读为 0.003cm ，测量圆环内径数据如下表所示，试求其测量的不确定度。

测量次数	1	2	3	4	5	6
d(cm)	3.255	3.250	3.260	3.255	3.250	3.255

解： $\bar{d} = 3.254\text{cm}$ 零点修正后 $\bar{d} = 3.251\text{cm}$

$$S_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = 0.002\text{cm}$$

$$\mu_j = \sigma_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.05\text{mm}}{\sqrt{3}} = 0.003\text{cm}$$

$$\therefore \mu_c = \sqrt{S_{\bar{d}}^2 + \sigma_{\text{仪}}^2} = 0.004\text{cm}$$

$$d = \bar{d} \pm u_c = 3.251 \pm 0.004(\text{cm})$$



测量结果的相对不确定度表示

$$E_r = \frac{u_c}{\text{最佳值}} \times 100 \%$$

$$E_r = \frac{u_{c,N}}{N} \times 100 \%$$

□ 如果待测量有理论值或公认值，可用百分误差来表示测量的好坏。即：

百分误差

$$E = \frac{|\text{测量值} - \text{公认值}|}{\text{公认值}} \times 100 \%$$

2.3 直接测量结果的表示:

$$N = N_{\text{最佳值}} \pm u_c (\text{单位})$$

u_c : 一位有效数字 (只进不舍)
 $N_{\text{最佳值}}$: 与 u_c 对齐

• 1) 单次测量的结果表示:

$$N_{\text{最佳值}} = N_{\text{测}},$$

$$u_c = u_j = \sigma_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}$$

$$\therefore N = N_{\text{测}} \pm u_j (\text{单位})$$

• 2) 多次重复测量结果的表示

$$N_{\text{最佳值}} = \bar{N},$$

$$\mu_c = \sqrt{S_{\bar{N}}^2 + \sigma_{\text{仪}}^2}$$

$$\therefore N = \bar{N} \pm u_c (\text{单位})$$

多次测量结果的表示

$$x = \bar{x} \pm u_c$$

$$E_{r,\bar{x}} = \frac{u_{c,\bar{x}}}{\bar{x}} \times 100\%$$

例如：米尺测长度**5**次（**n=5**）其值分别为：2.32cm, 2.34cm, 2.36cm, 2.30cm, 2.37cm。求： $U_{c,l}$; E_{rl} ; L

解：

$$\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i = 2.34cm$$

A类：

$$S_i = S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2}{n(n-1)}} = 0.02cm$$

B类：

$$u_j = \sigma_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03cm$$



$$u_c = \sqrt{\sum S_i^2 + \sum u_j^2} = \sqrt{0.02^2 + 0.03^2} = 0.04$$

$$l = \bar{l} \pm u_c = (2.34 \pm 0.04)cm$$

$$E_{r,\bar{l}} = \frac{u_{c,\bar{l}}}{\bar{l}} \times 100\% = 1.7\%$$

2.4 间接测量结果的表示:

$$\text{设 } N = f(x, y, z \cdots)$$

$$N_{\text{最佳}} = \bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z} \cdots),$$

$$u_c = \sqrt{\sum S_i^2 + \sum u_j^2}$$

$$N = N_{\text{最佳值}} \pm u_c (\text{单位})$$

- 不确定度的传递:

直接测量结果有误差，间接测量结果也有误差

估算间接测量值不确定度的公式，称为**不确定度的传递公式**。

间接测量量N的合成不确定度的传递公式

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 u_{c,\bar{x}}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 u_{c,\bar{y}}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 u_{c,\bar{z}}^2 + \dots}$$

$$\frac{u_c}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 u_{c,\bar{x}}^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 u_{c,\bar{y}}^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\right)^2 u_{c,\bar{z}}^2 + \dots}$$

具体见教材**P28**页表的解读



例题：圆柱体密度问题 已测：直径 $d=(2.040 \pm 0.001)\text{cm}$ ；高度 $h=(4.120 \pm 0.001)\text{cm}$ ；
质量 $m=(149.10 \pm 0.05)\text{g}$ ，求：(1)圆柱体密度 ρ ； (2) $u_{c,\rho}, E_{r,\rho}$ ；(3) ρ

解：

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{m}}{V} = \frac{4\bar{m}}{\pi \bar{d}^2 \bar{h}} = \frac{4 \times 149.10}{3.1416 \times 2.040^2 \times 4.120} = 11.07 \text{ g / cm}^3$$

$$E_{r,\bar{\rho}} = \sqrt{E_{r,\bar{m}}^2 + 2^2 E_{r,\bar{d}}^2 + E_{r,\bar{h}}^2} = \sqrt{\left(\frac{0.05}{149.10}\right)^2 + 4 \times \left(\frac{0.01}{2.040}\right)^2 + \left(\frac{0.001}{4.120}\right)^2} = 0.1\%$$

不确定度为：

$$u_{c,\bar{\rho}} = E_{r,\bar{\rho}} \cdot \bar{\rho} = 11.07 \times 0.1\% = 0.02 \text{ g / cm}^3$$

$$\rho = \bar{\rho} \pm u_{c,\bar{\rho}} = (11.07 \pm 0.02) \text{ g / cm}^3$$





3 有效数字及其运算规则

1. 有效数字

1. 定义：测量结果中所有可靠数字加上末位的可疑数字统称为测量结果的有效数字。

用米尺测长度： $l=1.201\text{ }\underline{4}\text{m}$

可疑数字

可靠数字

2. 有效数字与不确定度的关系

由于有效数字的最后一位是不确定度所在位，因此有效数字在一定程度上反映了测量值的不确定度(或误差限值)。测量值的有效数字位数越多，测量的相对不确定度越小；有效数字位数越少，相对不确定度就越大。

在表达测量结果时，平均值的小数点后位数应随不确定度的小数点后位数取舍，如测长度

有必要保留吗？

可疑数字

$$\bar{l} = 45.671 \text{ cm}$$

$$u_{c,\bar{l}} = 0.06 \text{ cm}$$

3. 要注意的问题

(1)直接读出有效数字可反应仪器的最小分度值，而运算得到的有效数字不能反应仪器最小刻度。

例： 用米尺测长度： $l = \mathbf{1.2014m}$

用秒表测单摆周期，若只测一个周期误差太大，测**100**次：

$100T = 189.2\text{S}, T = 1.892\text{s}$ ，此结果不反应仪器最小刻度。



3. 要注意的问题（续）

(2)不能随意增减有效数字的位数，在10进制中有效数字位数与小数点位置无关. 例如： $L=15.03\text{cm}=150.3\text{mm}=0.1503\text{m}$

而在非10进制单位换算中测量结果的有效数字应由不确定度决定.

例如： $t=(1.8 \pm 0.1)\text{min}=(108 \pm 6)\text{s}$

(3)出现在中间或末尾的0均是有效数字，

例如： $a=32.00\text{cm}$ $b=12.04\text{cm}$ 均为4位有效数字



3. 要注意的问题（续）

(4)因单位变换而产生的0不是有效数字。例如：

$$32.4\text{mm}=3.24\text{cm}=0.0324\text{m}=0.0000324\text{km}=32400\mu\text{m}=32400000\text{nm}$$

上述的0均不是有效数字。但在测量中，32.4mm,与32400000nm的含义不同，前者的分度位1mm，而后者是1nm。

故单位换算时采用科学计数法

$$32.4\text{mm}=3.24\text{cm}=3.24\times 10^{-2}\text{m}=3.24\times 10^{-5}\text{km}$$



3. 要注意的问题（续）

(5) 运算公式中的常数。如： π ， e ， $1/2$ 等，在运算中需要几位就取几位。

(6) 合成不确定度只保留一位有效数字。而相对不确定度，小于1%，只留一位，大于1%，最多留两位。





二、有效数字的运算规则

总的原则是：测量结果的有效数字的位数由合成不确定度来决定；运算过程的中间数据可以保留一位或两位可疑数字，最后结果只能保留一位欠准位。





1. 有效数字运算法则

(1) 加减运算：统一单位后，一小数点后位数最少者。

$$1.3891 + 17.2 + 2.641 - 5.32 = 21.9101 = 21.9$$

(2) 乘除运算：结果取其中有效数字位最少者

$$\frac{603.21 \times 0.32}{4.001} = 48.2447 = 48$$

$$\frac{603.21 \times 3.2}{4.001} = 482.447 = 4.8 \times 10^2$$

(3) 乘方开方运算：不改变有效数字位数

$$\sqrt{19.38} = 4.402;$$

$$25.25^2 = 637.6$$





2. 数值的舍入修约规则

在考虑取舍（修约）时，采用“4舍6入5凑偶”原则。不得连续修约。

下列数据修约到千分位：

2.14159—2.142;

2.71727—2.717

3.51050—3.510;

4.21550—4.216

5.378511—5.379;

8.691489—8.691



➤ 四舍六入五入奇：

对于保留数字末位以后的部分，小于 5 则舍；大于 5 则入；
等于 5 时，若保留数字末位为奇数则进，末位为偶数且 5 的下一位
为零则舍，末位为偶数且 5 的下一位不是零仍进位（相当于大于 5）。

1.8349 → 1.83

1.8352 → 1.84

1.8350 → 1.84

1.8450 → 1.84

1.8452 → 1.85



数值的舍入修约规则

对于不确定度（无论是合成不确定度，还是相对不确定度）的有效数字，本课程规定采取只入不舍的原则。但不确定度中第一位非零数字后紧跟“0”时则不进位。

总不确定度的有效位数：取1 位 （只进不舍）

相对不确定度的有效位数：取1--2位 （只进不舍）

例：估算结果 $u_c=0.526\text{mm}$ 时，取 $u_c=0.6\text{mm}$

估算结果 $u_c=0.506\text{mm}$ 时，取 $u_c=0.5\text{mm}$

$E_r=0.63\%$ 时， 取为： $E_r=0.7\%$

$E_r=1.32\%$ 时， 取为： $E_r=1.4\%$



**作图法处理实验数据

作图法可形象、直观地显示出物理量之间的函数关系，也可用来求某些物理参数，因此它是一种重要的数据处理方法。作图时要先整理出数据表格，并要用坐标纸作图。

●作图步骤： 表1：伏安法测电阻实验数据

$U(V)$	0.74	1.52	2.33	3.08	3.66	4.49	5.24	5.98	6.76	7.50
$I(mA)$	2.00	4.01	6.22	8.20	9.75	12.00	13.99	15.92	18.00	20.01

1.选择合适的坐标分度值，确定坐标纸的大小

坐标分度值的选取应能反映测量值的有效位数，一般以 $1\sim 2\text{mm}$ 对应于测量仪表的仪表误差。

根据表 1 数据 U 轴可选 1mm 对应于 0.10V ， I 轴可选 1mm 对应于 0.20mA ，并可定坐标纸的大小（略大于坐标范围、数据范围）约为 $130\text{mm}\times 130\text{mm}$ 。

2. 标明坐标轴:

用粗实线画坐标轴, 用箭头标轴方向, 标坐标轴的名称或符号、单位, 再按顺序标出坐标轴整分格上的量值。

3. 标实验点:

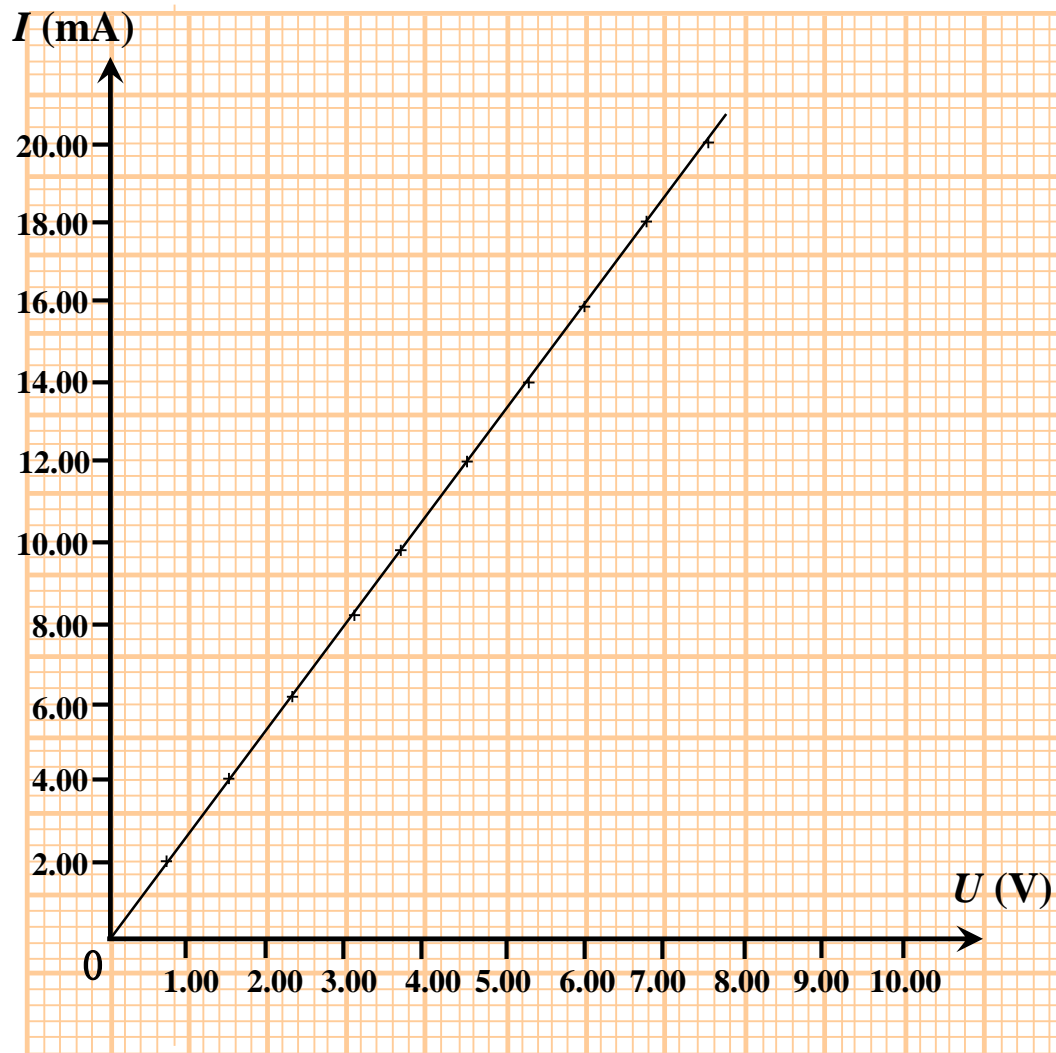
实验点可用“+”、“.”、“O”等符号标出 (同一坐标系下不同曲线用不同的符号)。

4. 连成图线:

用直尺、曲线板等把点连成直线或光滑曲线。一般不强求直线或曲线通过每个实验点, 应使图线正穿过实验点时可以在两边的实验点与图线最为接近且分布大体均匀。图点处断开。

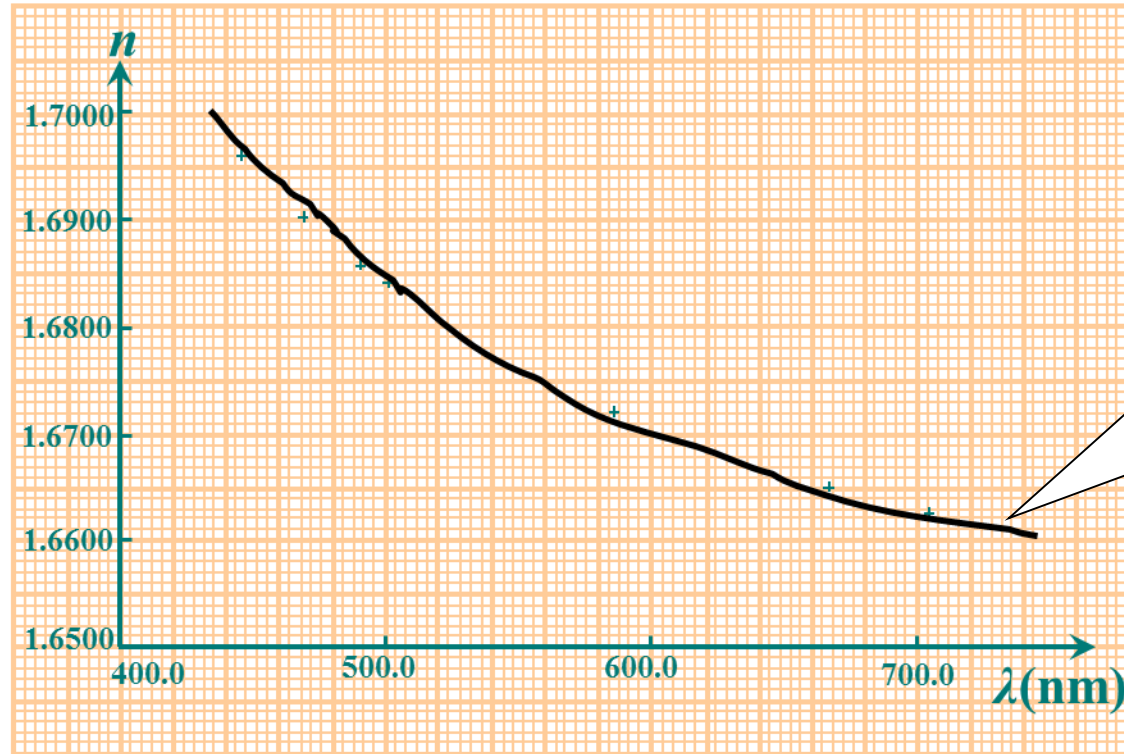
5. 标出图名:

在图线下方或空白位置写出图线的名称及某些必要的说明。



电阻伏安特性曲线

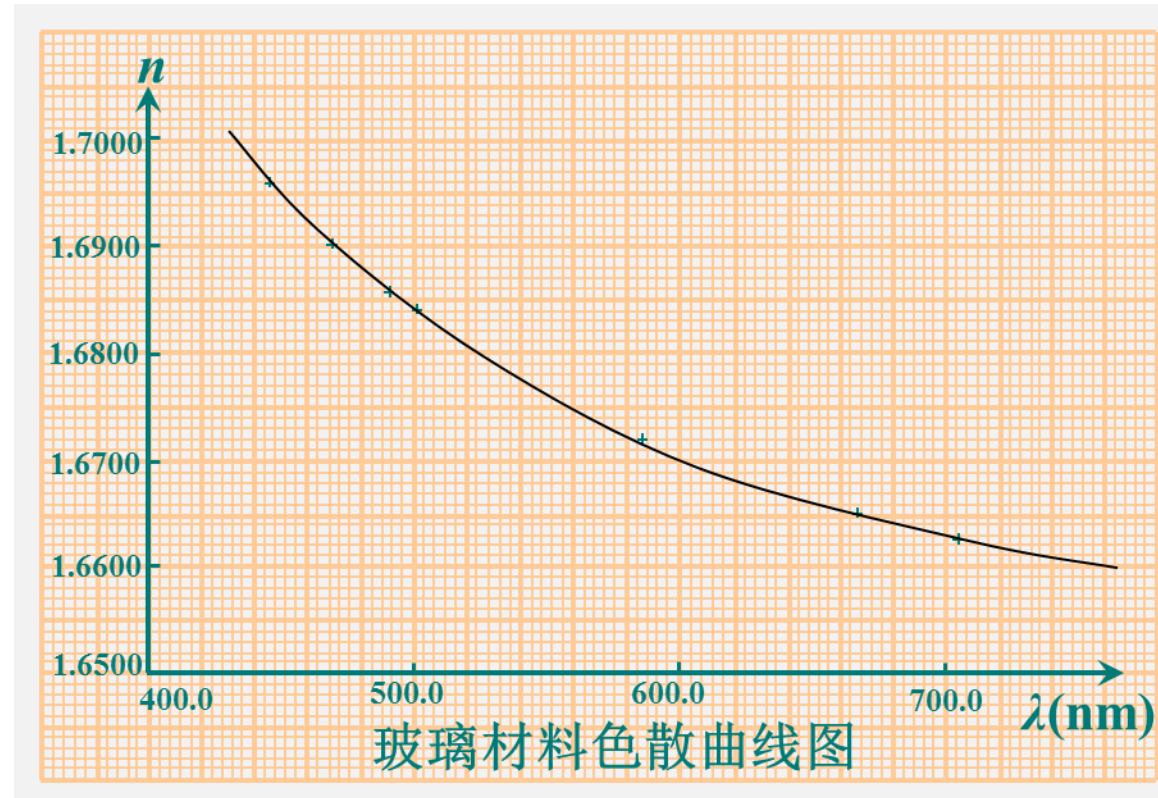
●不当图例展示一：



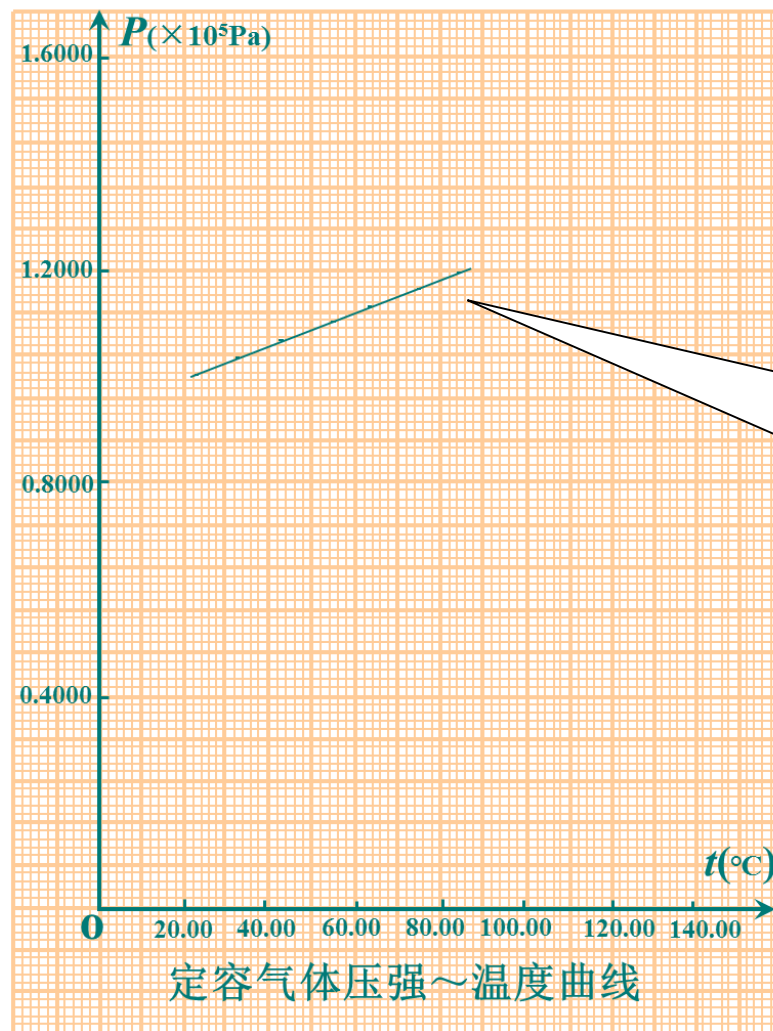
曲线太粗，不均匀，不光滑。
应该用直尺、曲线板等工具把实验点连成光滑、均匀的细实线。

玻璃材料色散曲线图

改正为:

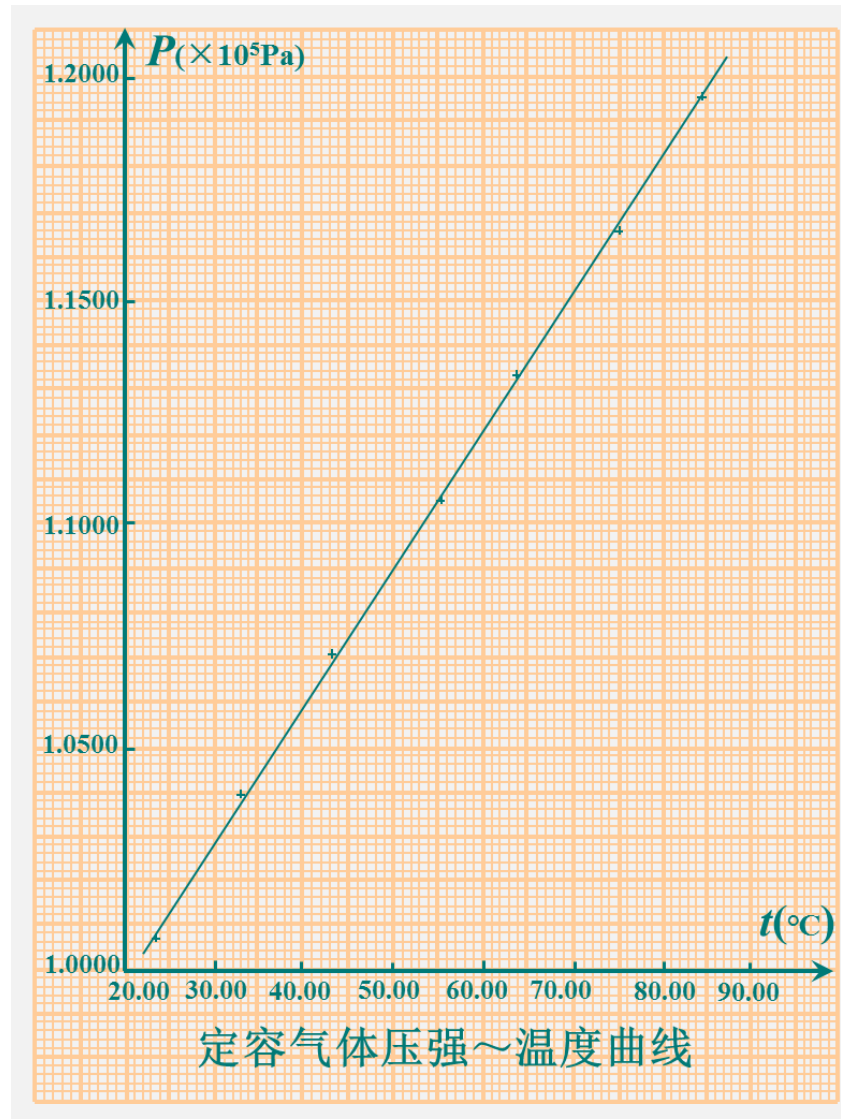


●不当图例展示二：



图纸使用不当。
实际作图时，
坐标原点的读
数可以不从零
开始。

改正为:





- 自学1.3、1.5、1.6节

- 作业：P. 75--77

第3、4、5、8、9、10、11、12题