



# 大学物理实验 绪论

理学院物理实验中心

2018年3月

廖飞

E-mail : [liaoifei321@126.com](mailto:liaoifei321@126.com)

廖老师课程群 : 549290325





- 一、课程意义、目标及环节**
- 二、测量、误差和结果表示**
- 三、有效数字**
- 四、实验数据处理方法**

# 一、课程意义、目标及环节



**1.课程意义**

**2.物理实验 VS 其他科学**

**3.培养目标**

**4.实验三环节**

# 课程意义



大学物理实验是——

科学实验的先驱，体现了大多数科学实验的**共性**，  
在**实验思想、方法及手段**等方面是各学科**科学实  
验的基础**。

具有**广泛的应用性**

**第一门**被教育部批准在高校独立开课的**实验课程**，  
是大学生进行科学实验基础训练的**必修课程**，是理  
工科学生进行基础实验训练的重要实践环节，是从  
事**科学实验的起步**。

# 物理实验 VS 其他科学



1. **材料**：物性测试、新材料的发现、制备
2. **化学**：光谱分析、放射性测量、激光分离同位素
3. **生物**：各类显微镜（光学显微镜、**电子显微镜**、X光显微镜、原子力显微镜），DNA操纵、切割、重组以及双螺旋结构的分析
4. **医学**：诊断—X光、CT、核磁共振、超声波  
治疗—放射性、激光、微波、 $\gamma$ 刀
5. **电子**：物理电子学，半导体，量子器件
6. 工程/机械/汽车/建筑/力学

**结论**：**物理实验**是物理学在其他学科中应用的**桥梁**

# 培养目标



- 科学思维能力的培养
- 动手能力的训练
- 创新能力
- 自学能力
- 世界观/方法论
- 探索精神
- 严谨的科学态度/实事求是的科学精神

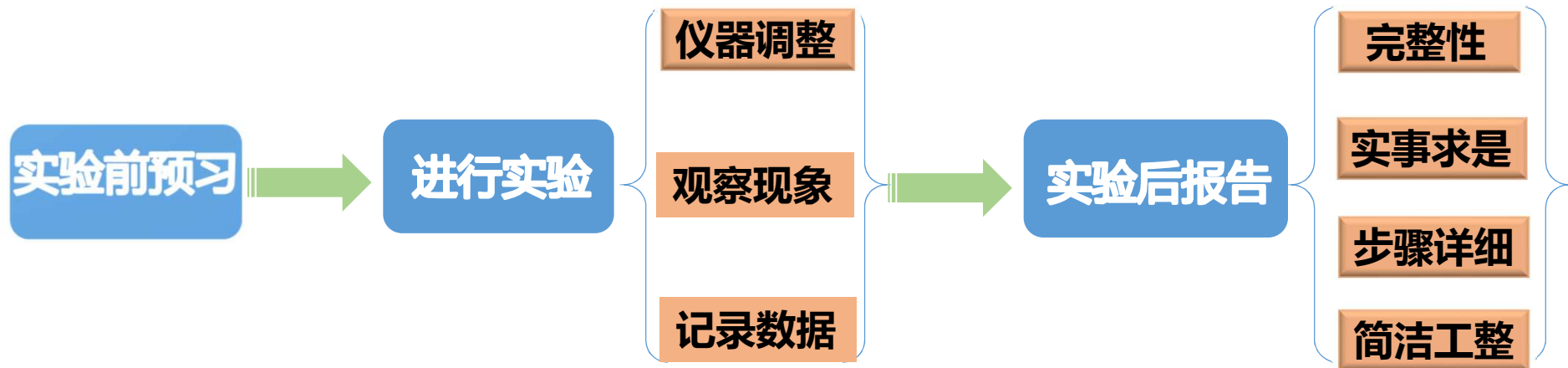
## 三层次目标：

**层次1**：学习物理学知识，加深对物理原理的理解；

**层次2**：基本实验技能，基本实验方法；

**层次3**：基本科学思维，科学实验能力。

# 实验三环节



**Interest** is the best teacher.  
**Imagination** is more  
important than knowledge.  
-- A. Einstein



一、课程意义、目标及环节

**二、测量、误差和结果表示**

三、有效数字

四、实验数据处理方法



## 二、测量、误差和结果表示



### 1.测量与误差

### 2.系统误差&随机误差

### 3.结果表示&不确定度估计

# 测量与误差



## 物理实验以测量为基础

- 有测量就会产生误差
- 测量结果不可能无限准确

### 测量的定义：

是将待测物体的某物理量，与相应标准做**定量比较**。

测量**结果组成**：测量值+单位+结果可信赖程度  
(即不确定度)

### 分类：

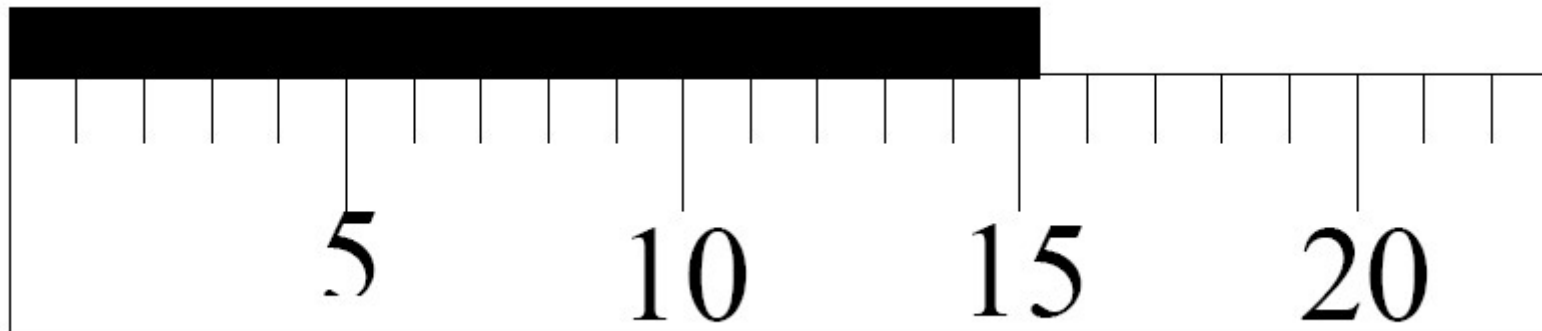


直接测量

间接测量——需按函数关系**计算**出被测量

所有实验均需符合**等精度测量**(各次测量在相同条件下完成，人员/方法/仪器)

# 测量与误差



测量结果：

$$L = 15.3 \text{ mm}$$

被测物理量

测量值

单位

## 二、测量、误差和结果表示



1.测量与误差

**2.系统误差&随机误差**

3.结果表示&不确定度估计



**测量值** :  $1005\text{K } \Omega = 1.005\text{M } \Omega$   
**标称值** :  $1\text{M}\Omega/1\%$

<b>绝对误差</b> :	$\Delta x = x_i - x_0$	$\Delta R = 0.005\text{M } \Omega$
<b>相对误差</b> :	$E =  \Delta x / x_0 $	$R_E = 0.5\%$

**分类** {   
    系统误差  
    随机误差

# 系统误差



**定义：**

相同条件下多次测量同一物理量时，误差的大小恒定，符号总偏向一方或误差按一定规律变化。

**产生原因：**由于测量仪器、测量方法、环境影响



分类 {

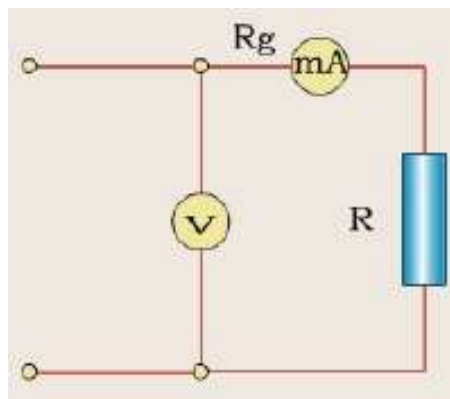
已定系统误差——须修正，如零点误差/伏安法中电压表/电流表内阻

未定系统误差——估计出分布范围，如螺纹公差  
(与B类不确定度相当)

# 消除已定系统误差

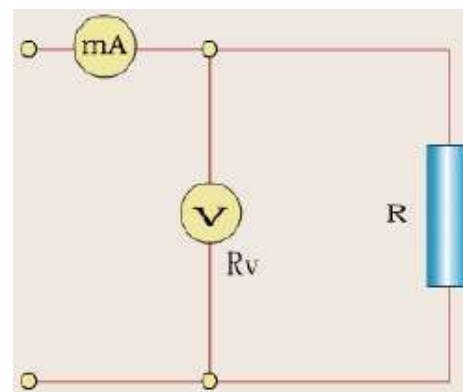


**具体问题具体分析**，使用修正法、抵消法、交换法、对称测量法等消除



内接法：

$$R = U/I - R_g$$



外接法：

$$R = UR_v/(R_v I - U)$$

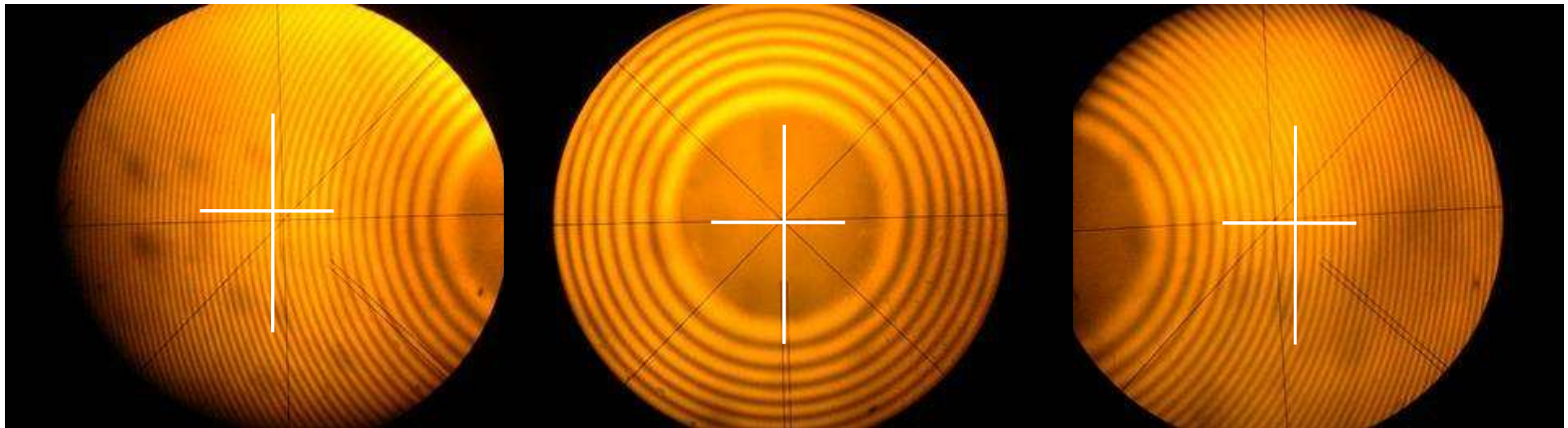
# 随机误差



**定义：**对同一量的多次测量中，绝对值或符号变化方式不可预知的测量误差分量。

**产生原因：**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。

如：电表轴承的摩擦力变动  
螺旋测微计测力在一定范围内随机变化  
操作读数时的视差影响



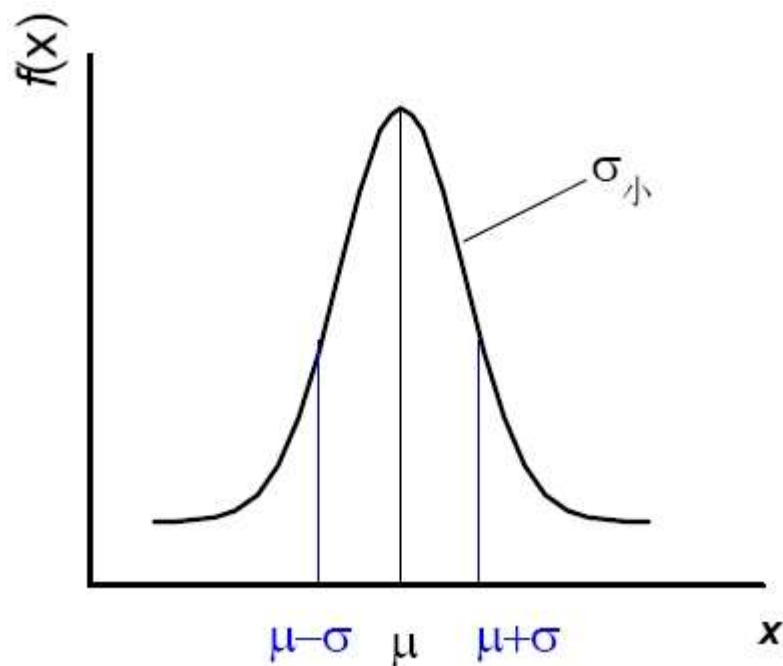


# 随机误差的特点



- (1) 小误差出现的概率比大误差出现的概率大
- (2) 无穷多次测量时服从正态分布/次数少时服从t分布
- (3) 具有抵偿性

**多次测量求平均值**有利消减随机误差。



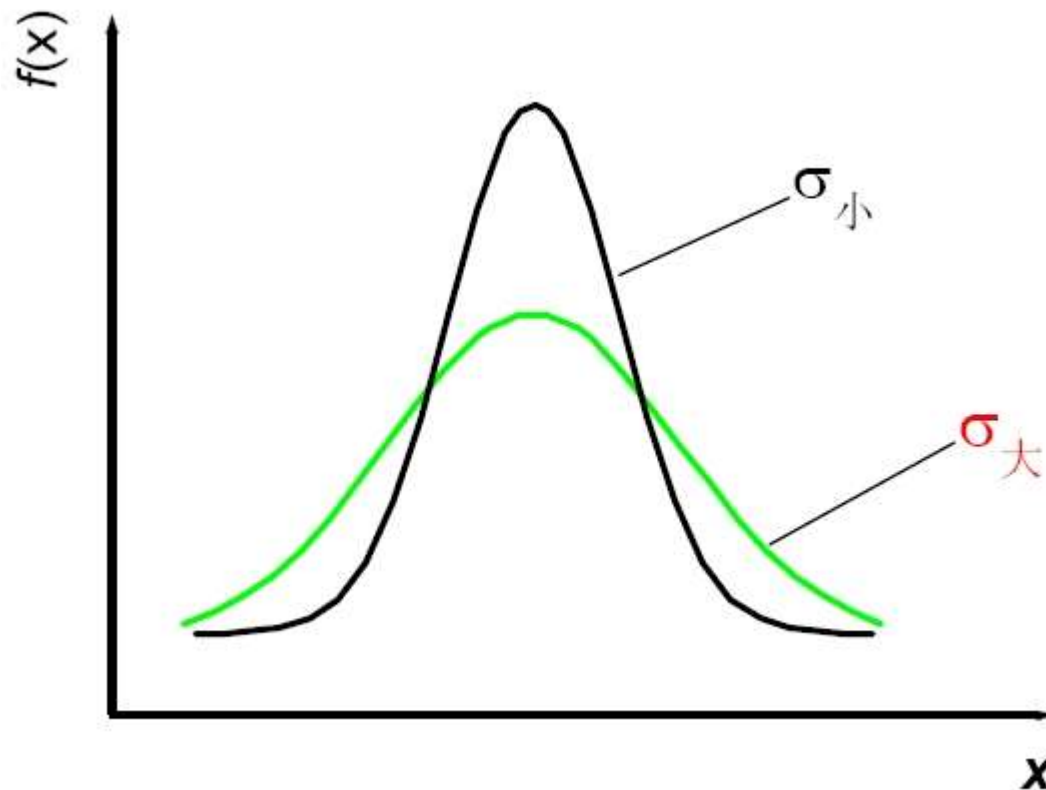
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$$

$\sigma$  为标准差

$\mu$  为真值

$f(x)$  为x的分布函数

# 标准差表示测量值的离散程度

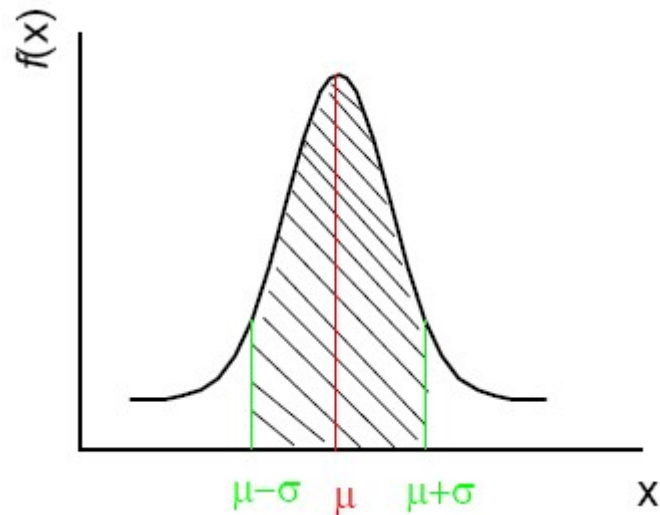


**标准差小**：表示测得值很密集，随机误差分布范围窄，测量的精密度高；

**标准差大**：表示测得值很分散，随机误差分布范围宽，测量的精密度低。

任意一次测量值落入区间  $[\mu-\sigma, \mu+\sigma]$  的概率为

$$P = \int_{\mu-\sigma}^{\mu+\sigma} f(x)dx = 0.683$$



这个概率称为**置信概率**，  
对应区间称置信区间。

$$x = \mu \pm \sigma$$

扩大置信区间：

$$[\mu-2\sigma, \mu+2\sigma] \quad P = 0.954$$

$$[\mu-3\sigma, \mu+3\sigma] \quad P = 0.997$$

**可增大置信度。**

**物理实验中，t分布置信度一般取作0.95，这时t分布相应的置信区间可写为：**

$$x = \bar{x} \pm t_{0.95} \sigma_{\bar{x}} = \bar{x} \pm \frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}} \sigma_x \quad \bar{x} = (\sum_{i=1}^n x_i) / n$$

$n$	3	4	5	6	7
$\frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}}$	2.48	1.59	1.24	1.05	0.926

**一般我们取测量次数为六次**

# 单次标准偏差S



有限次测量时，单次测量值的标准差S

★贝塞耳公式：

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

$$\bar{x} = (\sum_{i=1}^n x_i) / n$$

S是从有限次测量中计算出来的对总体标准偏差 $\sigma$ 的最佳估计值，称为**实验标准差**。其相应的置信概率接近于68.3%。

# 随机误差处理



**步骤1**：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)

$$\bar{x} = (\sum_{i=1}^n x_i) / n$$

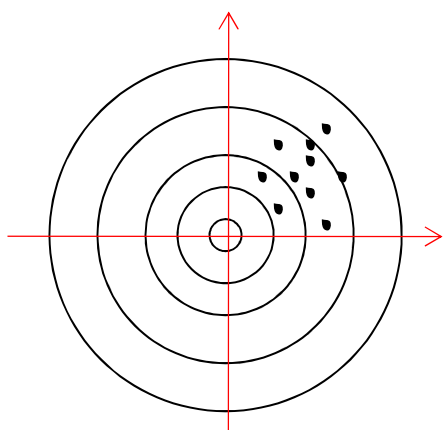
**步骤2**：用标准偏差s 表示测得值的分散性

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

**s大**，测得值分散，随机误差分布范围宽，测量的精密度低；

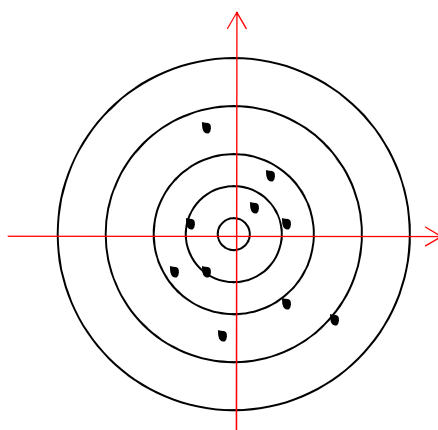
**s小**，测得值密集，随机误差分布范围窄，测量的精密度高；

# 精密度/正确度/准确度



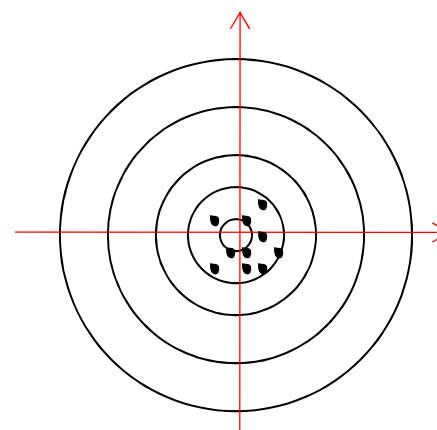
**A**

各测量值分散程度



**B**

总体平均值  
与真值的偏离程度



**C**

各测量值的分散程度及  
总体平均值对真值的偏离程度

## 二、测量、误差和结果表示



1.测量与误差

2.系统误差&随机误差

3.结果表示&不确定度估计



# 不确定度



**A类分量**  $\Delta_A$  — 多次重复测量时用统计方法计算的分量

**B类分量**  $\Delta_B$  — 用非统计方法评定的分量

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$$

↑  
A类不确定度  
统计方法求出

↑  
B类不确定度  
=  $\Delta_{\text{ins}}$

当n取6-10次时

$$\Delta_A = \underline{S}$$

$\Delta_{\text{ins}}$  :  
实验仪器误差限

# 测量结果表示



## 1.测量结果表示为：

$$X = \bar{x} \pm \Delta(\text{单位})$$

表示被测量的**真值有较大概率**位于  $(\bar{x} - \Delta, \bar{x} + \Delta)$  之间

分 类 {  
直接测量结果  
间接测量结果

不确定度权威文件：Guide to the expression of Uncertainty in measurement(ISO-BIPM-1993) 国内法规：JJF1059-1999测量不确定度评定与表示

# 直接测量结果表示



$$X = \bar{X} \pm \Delta(\text{单位})$$

1. 不考虑已定系统误差一般取等精度多次测量的平均值

$$\bar{x} = (\sum_{i=1}^n x_i) / n$$

2. 考虑已定系统误差则需要修正：

$$\bar{X} = \text{平均值} - \text{已定系统误差}$$

$$3. \Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$$

# 直接测量结果表示



**例：**用螺旋测微计测量小钢球的直径，共测6次，得6.995mm, 6.998mm, 6.997mm, 6.994mm, 6.993mm, 6.994mm, 测量前螺旋测微计零点读数值(即已定系统误差)为-0.004mm, 螺旋测微计的示值误差限 $\Delta_{\text{ins}}=0.004\text{mm}$ 。

**解：**步骤(1) 求测量值平均值  $\bar{d} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 d_i = 6.995\text{mm}$

(2) 对已定系统误差进行修正： $d = \bar{d} - (-0.004) = 6.999\text{mm}$

(3) 用贝塞尔公式求标准偏差：

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (d_i - \bar{d})^2}{6-1}} = 0.0019\text{mm}$$

(4) 由于测量次数为6次，所以 $\Delta A = S = 0.0019\text{mm}$ 。取 $\Delta B = \Delta_{\text{ins}} = 0.004\text{mm}$

总不确定度为：

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = 0.0045\text{mm}$$

$$D = (6.999 \pm 0.005)\text{mm}$$

?

(5) **测量结果表示为：**

$$E = \frac{0.0045}{6.999} \times 100\% = 0.006\%$$

# 间接测量结果表示



间接被测量的函数关系：

$$\varphi = f(x, y, z, q \cdots)$$

间接被测量的最佳估计值：

$$\bar{\varphi} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{q} \cdots)$$

间接测量的不确定度：

$$\Delta_{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^2 \Delta_x^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^2 \Delta_y^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)^2 \Delta_z^2 + \cdots}$$

$$\frac{\Delta_{\varphi}}{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln \varphi}{\partial x}\right)^2 \Delta_x^2 + \left(\frac{\partial \ln \varphi}{\partial y}\right)^2 \Delta_y^2 + \left(\frac{\partial \ln \varphi}{\partial z}\right)^2 \Delta_z^2 + \cdots}$$

**例：**用流体静力法测固体密度的公式为  $\rho = \frac{m}{m - m_1} \rho_0$  测得

$$m = (27.06 \pm 0.02)g \quad m_1 = (17.03 \pm 0.02)g \quad \rho_0 = (0.9997 \pm 0.0003)g/cm^3$$

求相对不确定度  $U_r = \frac{\Delta_\rho}{\rho}$  及最后结果表达式  $\rho \pm \Delta_\rho$

**解：**(1) 求该间接测量的不确定度 由  $\rho = \frac{m}{m - m_1} \rho_0$

可得：

$$\Delta_\rho = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial m}\right)^2 \Delta_m^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial m_1}\right)^2 \Delta_{m_1}^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \rho_0}\right)^2 \Delta_{\rho_0}^2 + \dots}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial m} \Delta_m = \frac{-m}{(m - m_1)^2} \rho_0 \Delta_m = -3.4 \times 10^{-3} g/cm^3$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial m_1} \Delta_{m_1} = \frac{m}{(m - m_1)^2} \rho_0 \Delta_{m_1} = 5.4 \times 10^{-3} g/cm^3$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \rho_0} \Delta_{\rho_0} = \frac{m}{m - m_1} \Delta_{\rho_0} = 8.1 \times 10^{-4} g/cm^3$$

所以：

$$\Delta_\rho = 6.4 \times 10^{-3} g/cm^3 \approx 7 \times 10^{-3} g/cm^3$$

?

(2) 求最佳估计值

$$\bar{\rho} = \frac{27.06}{27.06 - 17.03} \times 0.9997 = 2.697 g/cm^3$$

**解续：**

**(3) 测量结果表示为：**

$$\rho = \bar{\rho} \pm \Delta_{\rho} = (2.697 \pm 0.007) g / cm^2$$

**(4) 相对不确定度：**

$$U_r = \frac{\Delta_{\rho}}{\bar{\rho}} = \frac{6.4 \times 10^{-3}}{2.697} = 0.24\%$$



一、课程意义、目标及环节

二、测量、误差和结果表示

**三、有效数字**

四、实验数据处理方法



# 三、有效数字

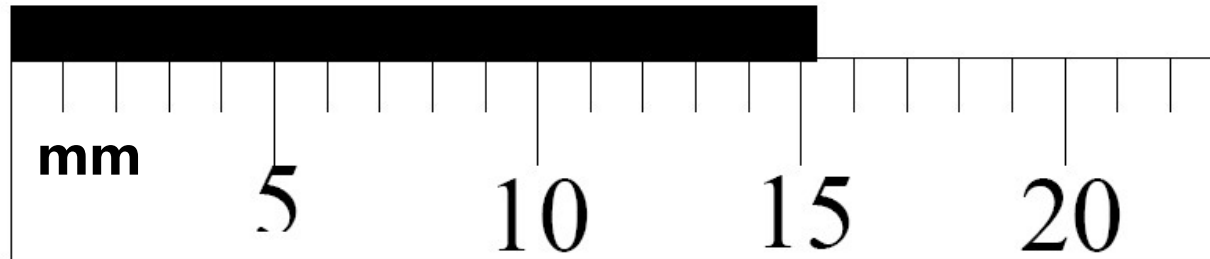


**1.有效数字的确定**

**2.有效数字的运算**

**3.有效数字的取舍法则**

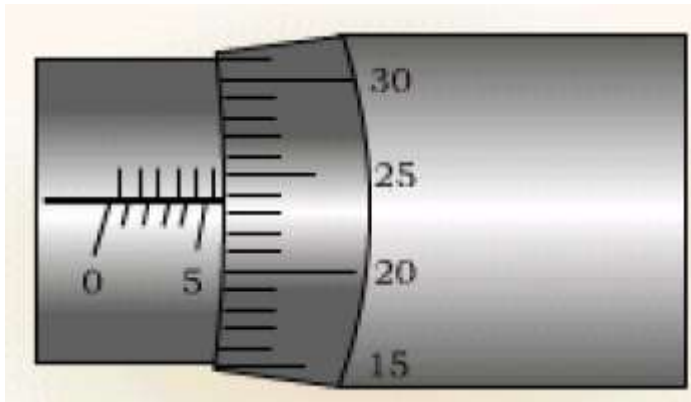
# 有效数字的确定



$$L = 15.3 \text{ mm}$$



组成：可靠数字 + 可疑数字 → 估读得到 —— 存在误差



$$D = 5.737$$

科学计数法：

$$632.8 \text{ nm} = 0.6328 \text{ } \mu\text{m} = 6.328 \times 10^{-7} \text{ m}$$

# 有效数字的确定



数显表/标度盘的仪表**直接读取示数**

基本概念Page13



199. **9**



1032. **0**Ω

# 有效数字的运算



加减：

$$\begin{array}{r} 4.178 \\ + 21.3 \\ \hline 25.478 = 25.5 \end{array}$$

与诸数中小数点后位数最少的一个相同

乘除：

$$\begin{array}{r} 4.178 \\ \times 10.1 \\ \hline 4178 \\ 4178 \\ \hline 421978 = 42.2 \end{array}$$

与诸因子中有效数字最少的一个相同

■准确数不适用有效数字的运算规则

# 有效数字的取舍法则(难点易错点)



- 4舍6入5凑偶——测量值
- 只进不舍 ——不确定度

凑偶：

2.435 -> 2.44

2.465 -> 2.46

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = 0.0045mm$$

$$D = (6.999 \pm 0.005)mm$$

?

$$\Delta_\rho = 6.4 \times 10^{-3} g/cm^3 \approx 7 \times 10^{-3} g/cm^3$$

?

- 在测量结果表示里的有效数字，不确定度->最佳估计值

- 不确定度一般取1-2位，当不确定度第一位非“0”数字较小时通常取2位



一、课程意义、目标及环节

二、测量、误差和结果表示

三、有效数字

**四、实验数据处理方法**

# 常用数据处理方法



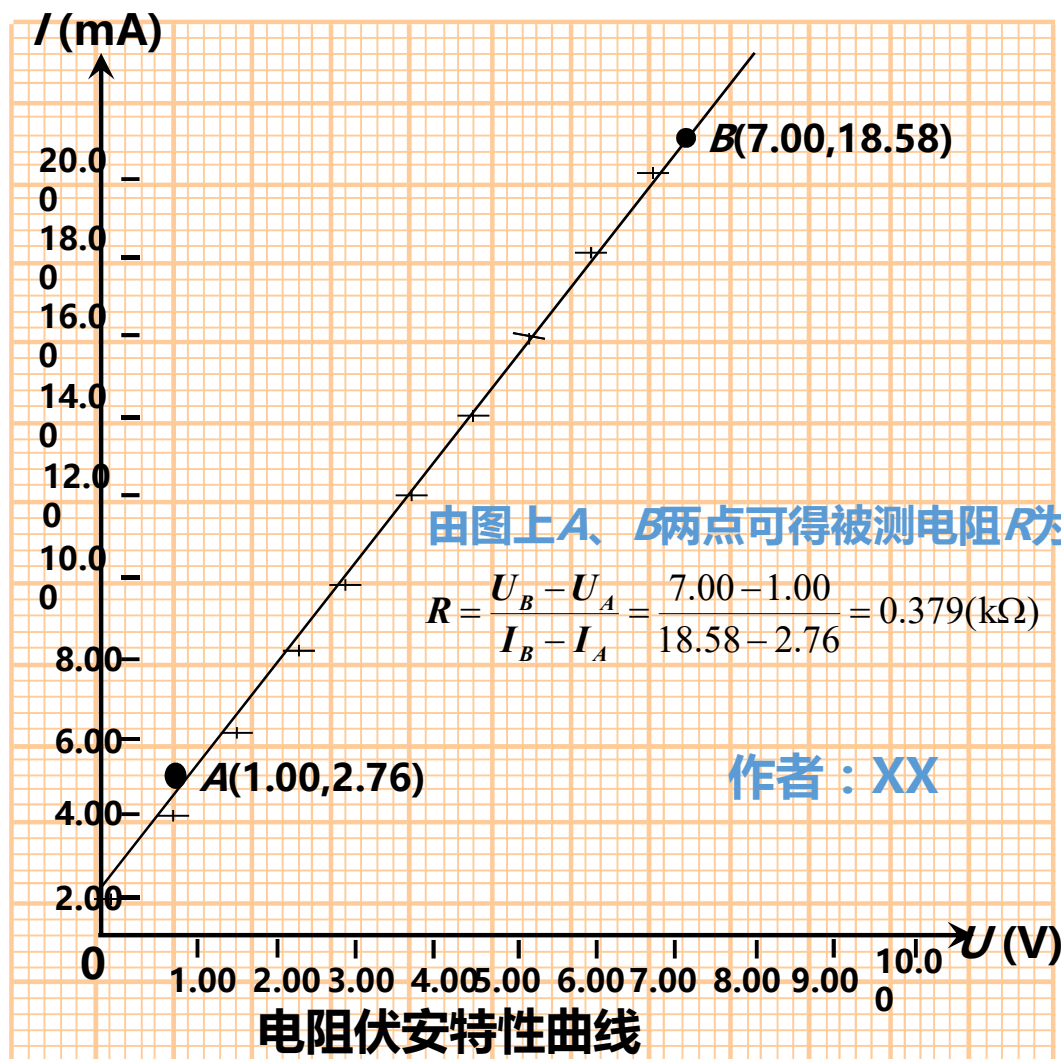
1.列表法

2.作图法

3.逐差法

**每种方法的要点和注意事项见书p15-17**

# 作图法处理实验数据



- 1.选择合适的坐标值
- 2.标明坐标轴

取坐标

- 3.标明实验数据点
- 4.用圆滑线连接数据点

描点

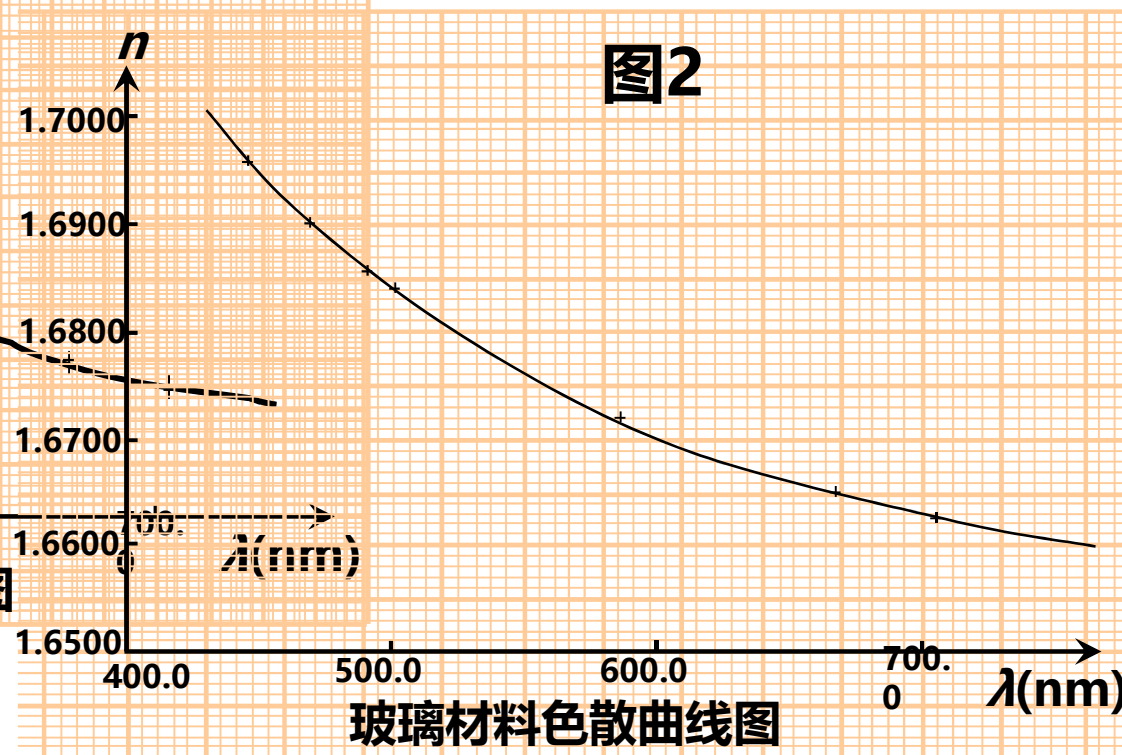
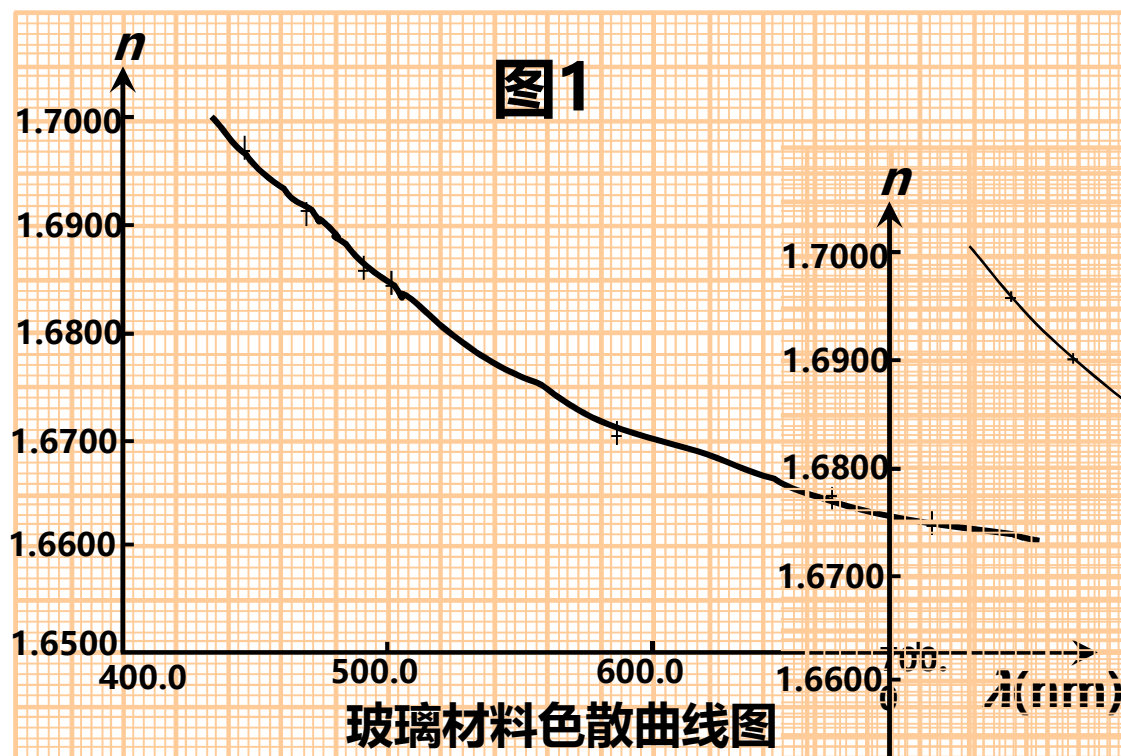
- 5.标出图线特征
- 6.标注图名
- 7.分析数据

分析

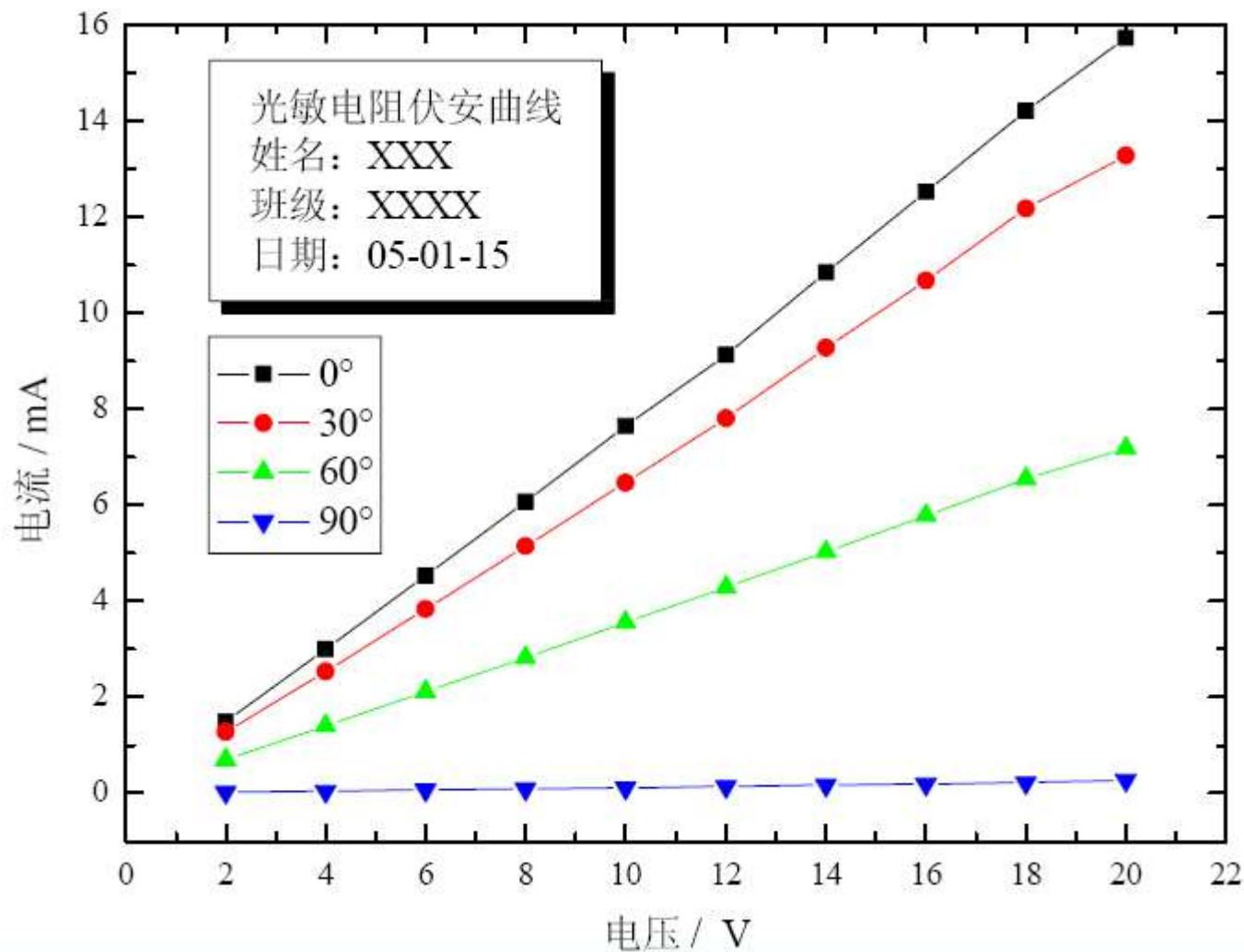


■ 错误作图实例

■ 修改后



# 计算机作图举例



使用讲义可在网  
络下载

# 逐差法



表1 钢丝伸长数据记录

m/kg	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x/mm	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>	x <sub>7</sub>	x <sub>8</sub>	x <sub>9</sub>

求每增加1kg，钢丝的伸长量  $\Delta x$

- 数据特点：自变量与因变量成**线性关系**，自变量呈**等间距变化**，自变量误差远小于因变量误差

$$\Delta x = \frac{(x_1 - x_0) + (x_2 - x_1) + (x_3 - x_2) + (x_4 - x_3) + (x_5 - x_4) + (x_6 - x_5) + (x_7 - x_6) + (x_8 - x_7) + (x_9 - x_8)}{9} = \frac{x_9 - x_0}{9}$$

- 采用算数平均值，只用到两个数据，计算偏差较大

逐差法

$$\Delta x = \frac{(x_5 - x_0) + (x_6 - x_1) + (x_7 - x_2) + (x_8 - x_3) + (x_9 - x_4)}{5 \times 5}$$

# 数据处理软件举例



## ■ Excel

可计算直接测量误差，平均值等。

可计算逐差法(需要自己设计公式)。

## ■ Origin

利用其符号功能可用来计算间接误差，程序包可在网上下载，地址

<http://emuch.net/html/201203/4159247.html>

可做曲线拟合。

## ■ Matlab



## 物理实验报告

实验名称 \_\_\_\_\_

专 业 \_\_\_\_\_

姓 名 \_\_\_\_\_

学 号 \_\_\_\_\_

指导教师 \_\_\_\_\_

实验时间 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日 \_\_\_\_\_ 大节

光电信息学院 物理实验中心

**真正看懂题目**  
**1.题目要求做什么**  
**2.与哪里理论相关**

实验目的

实验原理

**2分**

**无需照抄实验原理**

**老师在此签名**

1. **预习实验**，明确目的
2. 只有虚拟实验不预习

1. **原理**：**原理说明**  
**原理图**  
**公式**  
**电路图**  
**光路图**
2. 老师会在此页**签字**

实验仪器

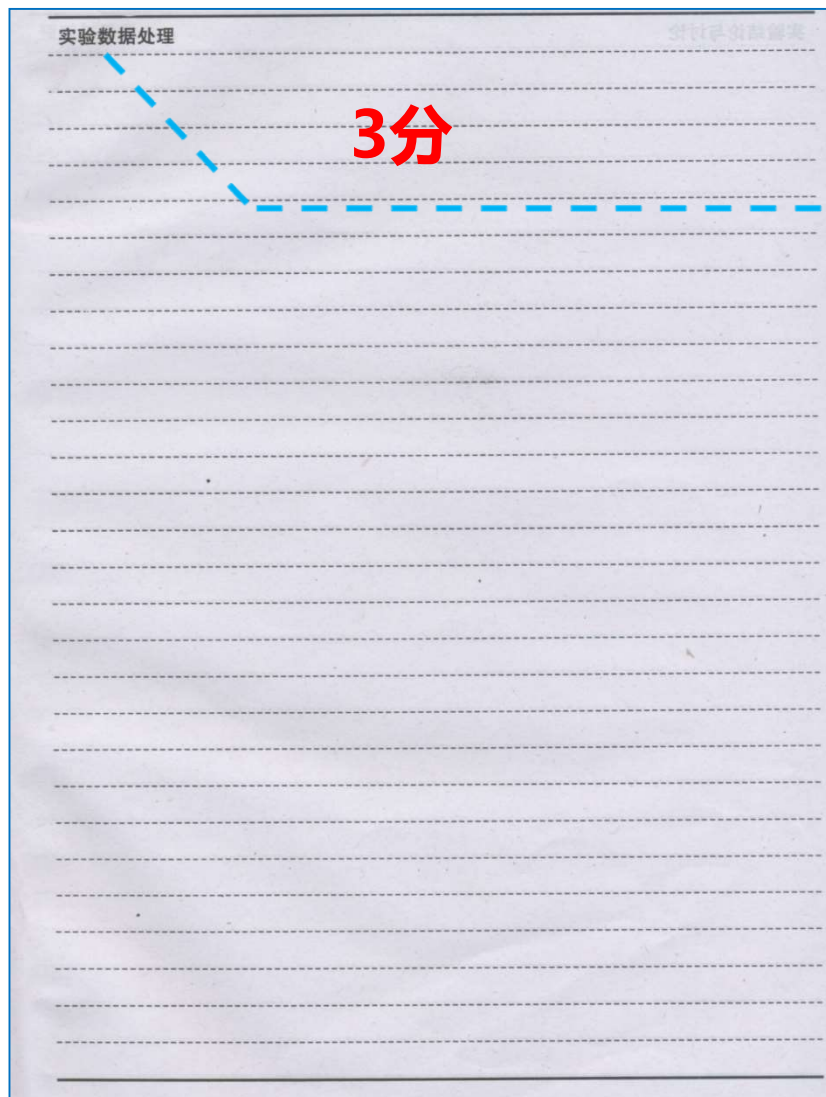
实验步骤与数据记录

**3分**

- 1.仪器名称
- 2.仪器**型号**

- 1.精炼步骤
- 2.按照实验操作写

- 3.**最后一步：整理实验仪器**
- 4.**表格方式记录实验数据**



1. 计算公式
2. 计算方法
3. 图表

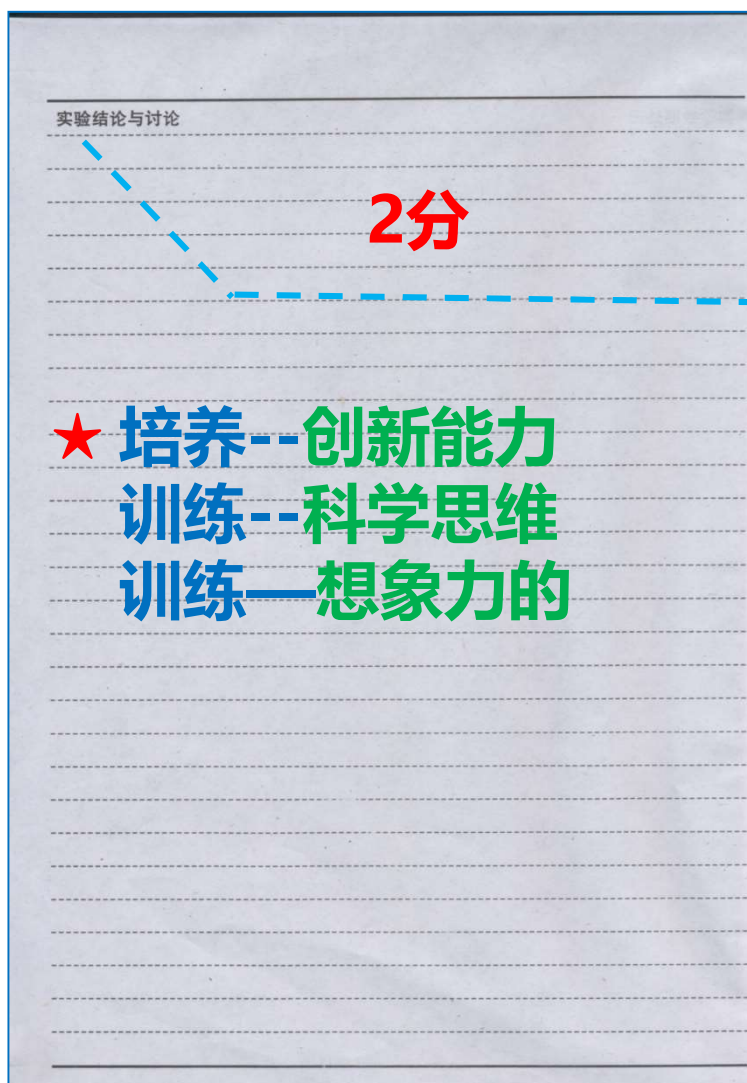
过程

4. 实验结果
5. 误差处理

结果

注意：图表绘制规范  
结果表示正确





■ **结论：**

1. **现象**结论
2. **数据**处理结果/结论

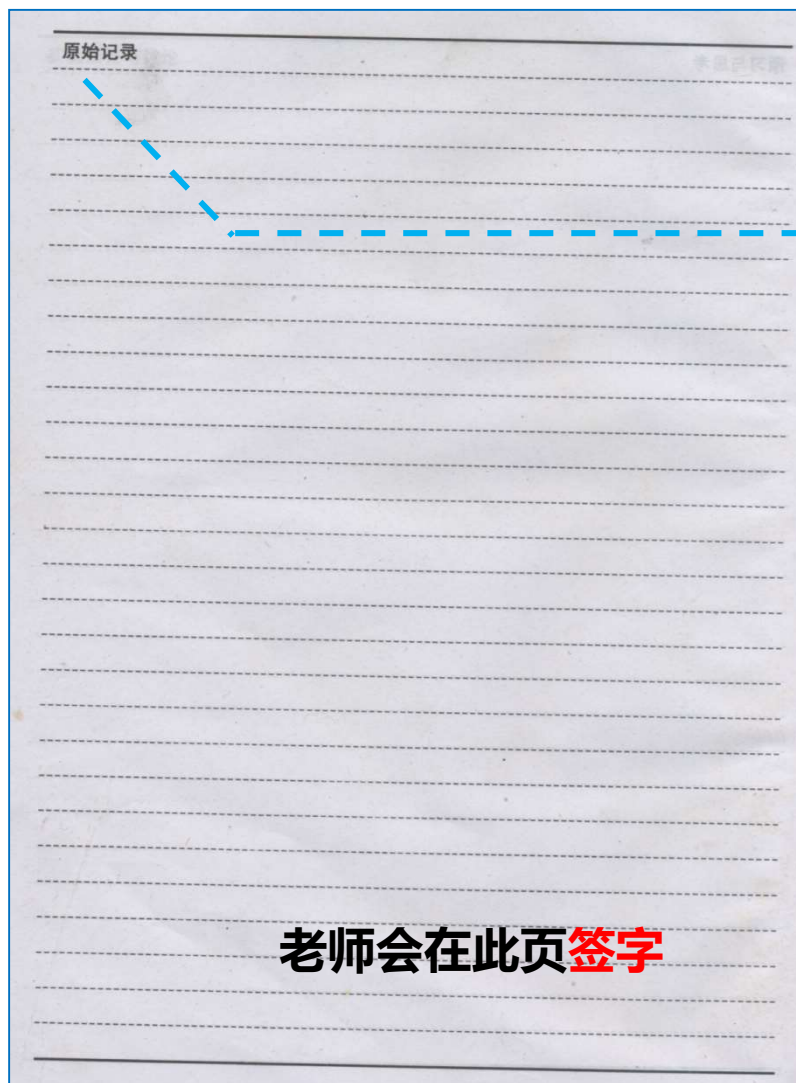
■ **讨论：**

1. 针对实验**结果**分析  
**现象**分析  
**数据**分析  
**误差**评估  
对特殊数据的分析
2. 改进措施
3. 创新想法



不做思考题会扣分

■ 思考题：  
>3个，做3个  
<=3个，全做  
不做，扣1-0.5分



■ 原始数据**不可更改**

严谨学习  
科学态度

老师会在此页**签字**



# 教学规范



1. **微信群**——通知发布，教学资源，误差习题
2. **选课** ——**10周前**仅能在**校内网**选课  
**10周后**预计可在**校外网络**使用
3. **账号密码**每学期开始会更新重置，一定要**及时修改**密码
4. **报告册**



**收获在于努力的程度！**