



上海交通大学

Shanghai Jiao Tong University

大学物理实验课程绪论

上海交通大学物理实验中心

2015年3月11日





本课内容

1. 为什么要上物理实验课
2. 测量、误差和不确定度估计
3. 作图法和最小二乘法
4. 怎样上好物理实验课
5. 网上选课须知





1. 为什么要上物理实验课

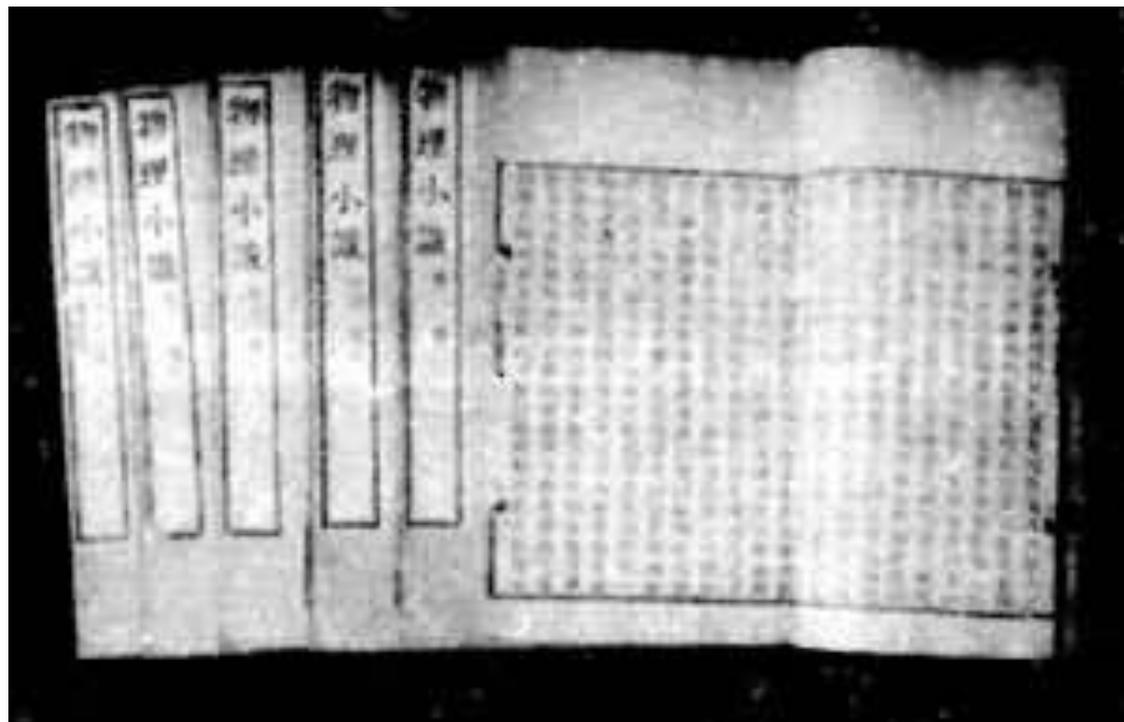
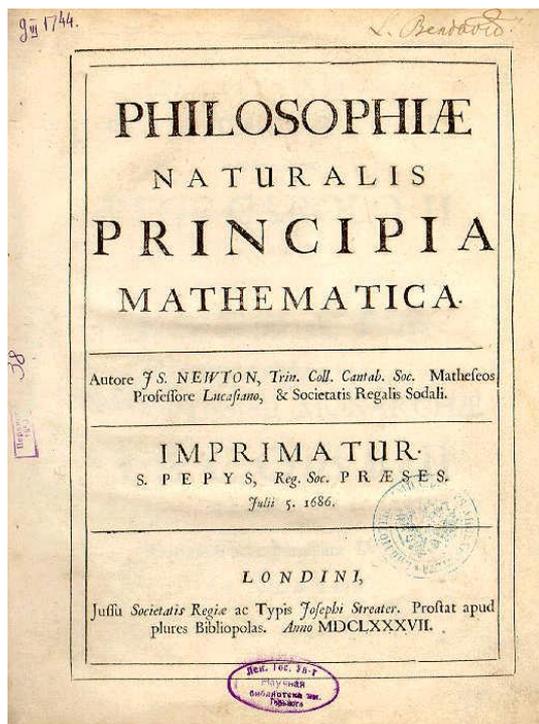
1.1 物理实验的作用

1.2 物理实验课的目的





“物理”起源



“物理”源于古希腊文
 $\varphi\upsilon\sigma\iota\kappa$ ，原意：自然。
上图为牛顿所著“自然哲学之数学原理”

汉、日语中“物理”一词源自**方以智**
(明末清初)百科全书式著作
《物理小识》



物理学是研究物质运动一般规律及物质基本结构的科学，是**自然科学的基础学科**。



物理实验的作用

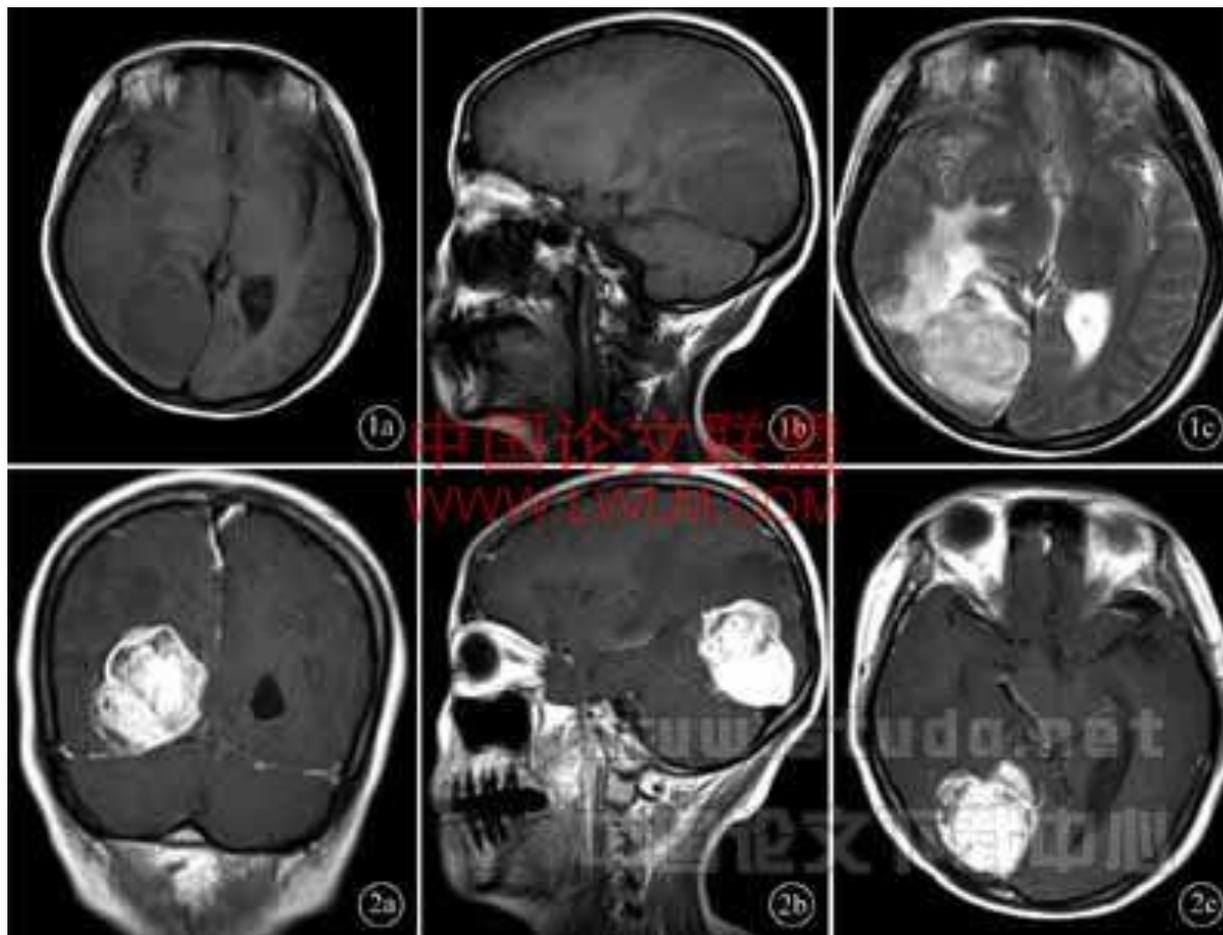


物理学是一门**实验科学**，物理实验在物理学的产生、发展和应用过程中起着重要作用。



马德堡半球实验（奥托·冯·居里克）

物理实验的作用



超导核磁共振成像 (MRI) 物理实验的作用



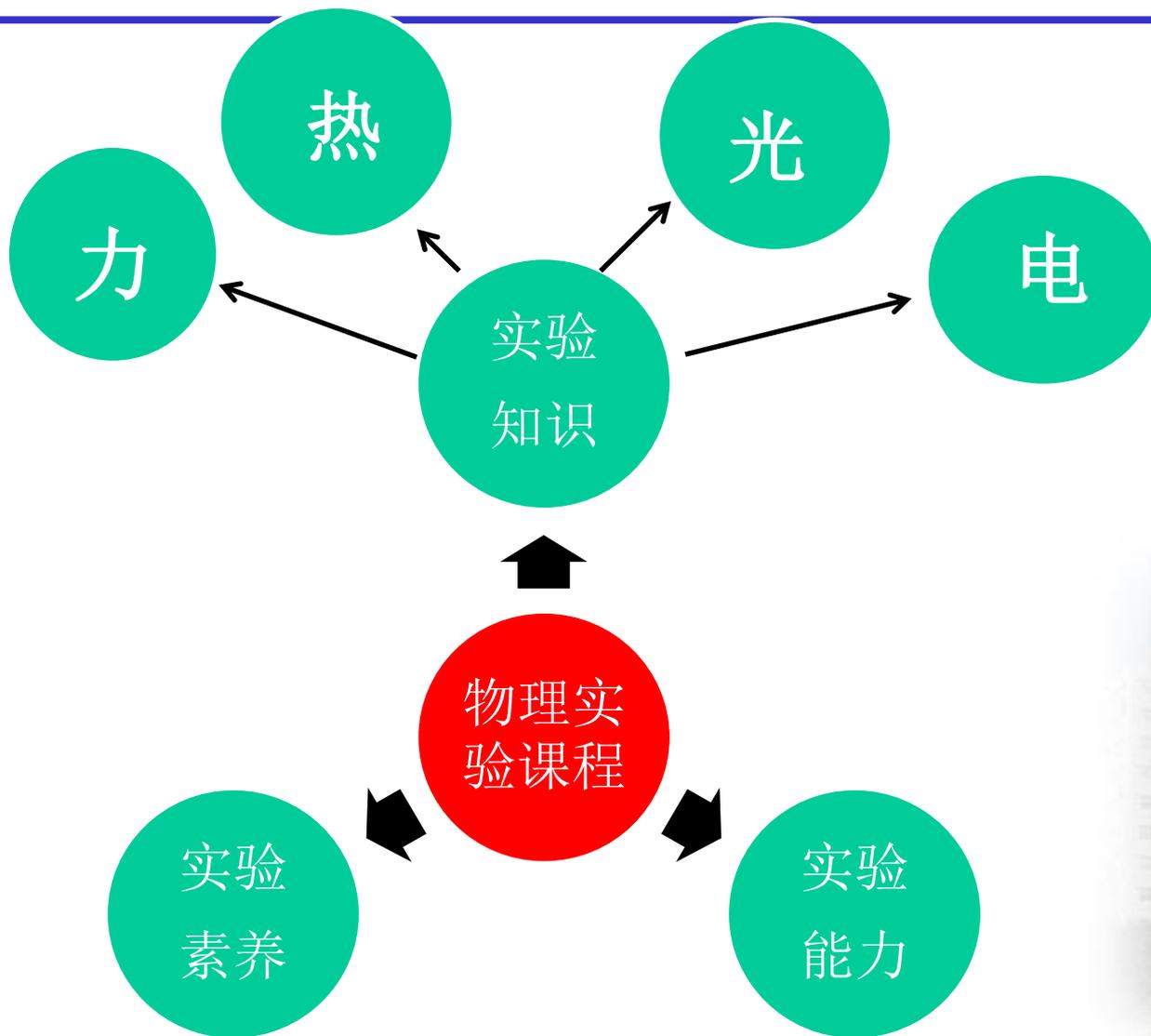
以诺贝尔物理学奖为例：

- **80%**以上的诺贝尔物理学奖给了实验物理学家。
- 其余**20%**的奖中很多是实验和理论物理学家分享的。





物理实验课的目的是什么？



学习实验知识



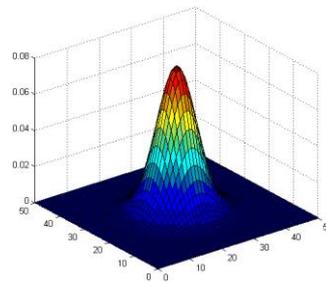
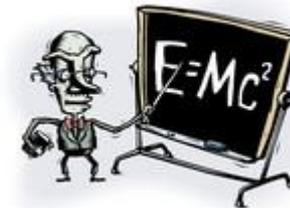
通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量

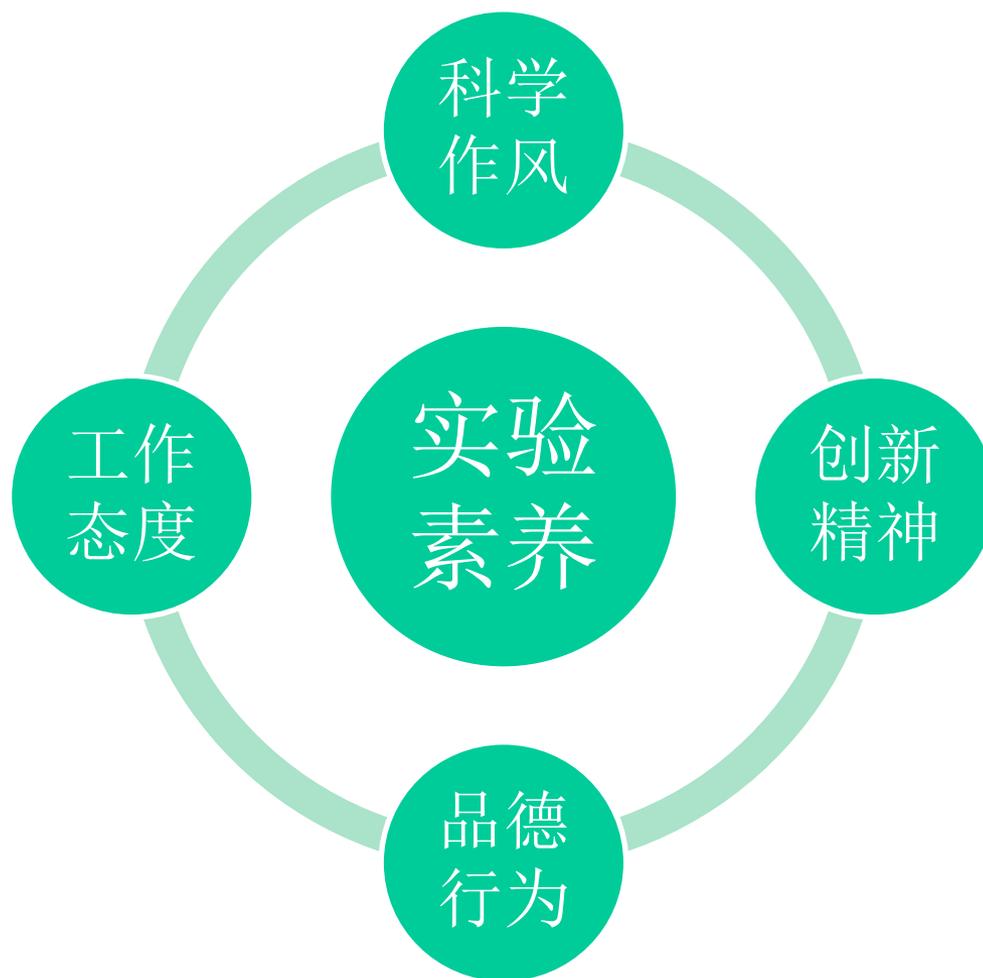


掌握和理解物理理论；学习物理实验知识和设计思想



培养实验能力





务必了解和遵守实验室安全规则！



注意用电安全！



注意使用激光的安全防护！



使用加热装置小心烫伤！



使用低温液体小心冻伤！



X射线核粒子实验注意防护！



注意安全



2. 测量、误差和不确定度估计

2.1 测量与有效数字

2.2 测量误差和不确定度估算的基础知识





- 测量
- 有效数字的读取
- 有效数字的运算
- 有效数字尾数的舍取规则



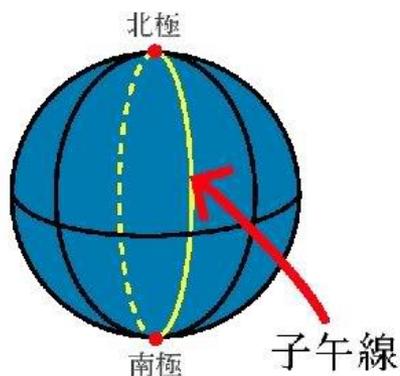
测量用合适的工具或仪器，通过科学的方法，将反映被测对象某些特征的物理量（被测物理量）与选作标准单位的同类物理量进行比较的过程，其比值即为被测物理量的测量值。





例：长度测量

标准单位：



古代常以人体的一部分作为长度的单位。

“布指知寸，布手知尺，舒肘知寻。”

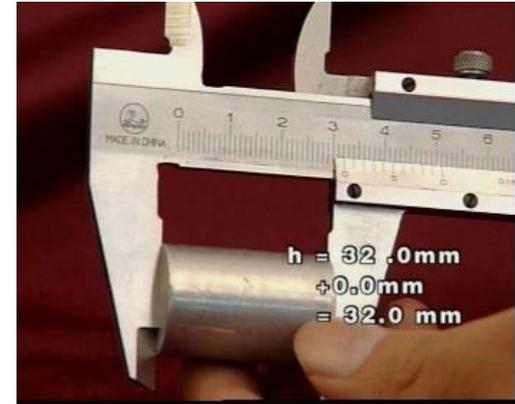
1790年法国国民议会通过决议，决定采用通过巴黎的地球子午线的四分之一的千万分之一为长度单位

1927年国际协议，以金属镉(Cd)的红色光谱线的长度1553164.13倍作为米的长度单位

1983年10月第十七届国际计量大会通过了米的新定义：“米是光在真空中1 / 299792458秒的时间间隔内所经路程的长度”。



测量工具:





数显仪表的有效位数确定

对数显仪表以及有十进步进式标度盘的仪表，如数字万用表、电阻箱、电桥等，一般可直接读取仪表的示值。（注意选取合适的量程！）

若数显末几位不断变化，则读取显示中不变部分及变化的首位。



数字表的读数方法



实验中心常用
数字万用表



四位半数字万用表

三位半数字万用表

规格	数值范围	分辨率
三位半	0-1999	1
四位半	0-19999	1



技术指标--MY 65

四. 技术指标
 准确度: $\pm(a\% \text{读数} + \text{字数})$ 保质期一年
 保证准确度温度: $23\text{℃} \pm 5\text{℃}$ 相对湿度: $< 75\%$

1、 直流电压

量程	分辨率 (三位半)	准确度	
		MY60/MY61/MY64	MY65
200mV	0.1mV	$\pm(0.5\%+1)$	$\pm(0.05\%+3)$
2V	1mV		$\pm(0.1\%+3)$
20V	10mV		
200V	100mV		
1000V	1V	$\pm(0.8\%+2)$	$\pm(0.15\%+5)$

输入阻抗: $10\text{M}\Omega$ 。 MY65 的分辨率比三位半高 10 倍。
 过载保护: 直流或交流峰值 1000V (200mV 量程为 250V)。

2、 交流电压

量程	分辨率 (三位半)	准确度		
		MY60/MY61	MY64	MY65
200mV	0.1mV	$\pm(1.2\%+3)$	-	-
2V	1mV	$\pm(0.8\%+3)$	-	$\pm(0.5\%+10)$
20V	10mV			$\pm(0.8\%+10)$
200V	100mV			$\pm(1\%+15)$
750V	1V	$\pm(1.2\%+5)$	-	$\pm(1\%+15)$

输入阻抗: $10\text{M}\Omega$ 。 MY65 的分辨率比三位半高 10 倍。
 频率范围: 40Hz~400Hz。
 过载保护: 直流或交流峰值 1000V (200mV 量程为 250V)。
 显示: 平均值 (正弦波有效值校准)。

3、 直流电流

量程	分辨率 (三位半)	准确度		
		MY60	MY61/MY64	MY65
20uA	0.01 uA	$\pm(2\%+5)$	-	-
200uA	0.1 uA	$\pm(0.8\%+1)$	-	-
2mA	1 uA	$\pm(0.8\%+1)$	-	$\pm(0.5\%+5)$
20mA	10 uA			$\pm(0.8\%+5)$
200mA	100 uA	$\pm(1.5\%+1)$	-	$\pm(0.8\%+5)$
2A	1mA	$\pm(1.5\%+1)$	-	-
20A	10mA	$\pm(2\%+5)$	-	$\pm(2\%+10)$

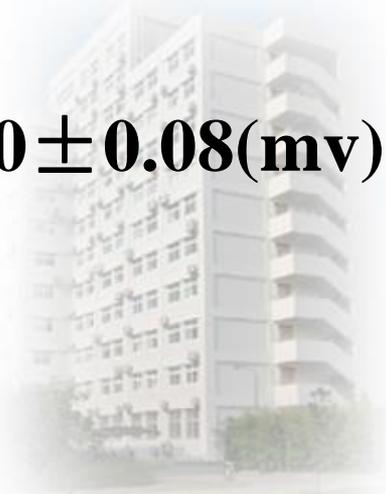
过载保护: MY60: 2A/250V 保险管, MY61/MY64: 200mA/250V 自恢复保险管, MY65: 200mA/250V 保险管, 20A 量程无保险管。
 最大输入电流: mA 档: MY60: 2A, 其它型号 200mA, 20A 档: 20A (当被测电流大于 10A 时, 连续测量时间不应超过 10 秒)。
 测量电压降: 满量程为 200mV。 MY65 的分辨率比三位半高 10 倍。

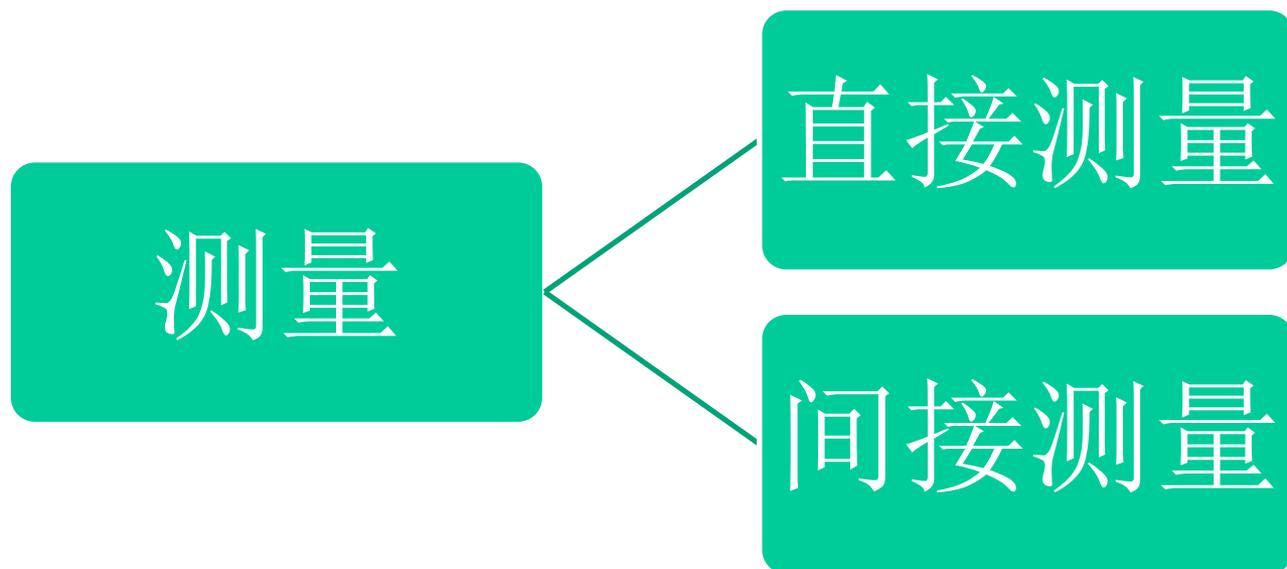
4、 交流电流

量程	分辨率 (三位半)	准确度			
		MY60	MY61	MY64	MY65
200uA	0.1 uA	$\pm(1.8\%+3)$	-	-	-
2mA	1 uA	$\pm(1\%+3)$	-	-	$\pm(0.8\%+10)$
20mA	10 uA				$\pm(1.2\%+10)$
200mA	100 uA	$\pm(1.8\%+3)$	-	-	$\pm(1.2\%+10)$
2A	1mA	$\pm(1.8\%+3)$	-	-	-
20A	10mA	$\pm(3\%+7)$	-	-	$\pm(2.5\%+10)$

过载保护: MY60: 2A/250V 保险管, MY61/MS64: 200mA/250V 自恢复保险管

读数: 100.00mv
 $100.00 * 0.05\% = 0.05\text{mv}$
 $r = 0.05 + 0.03 = 0.08$
 (mv)
 $100.00 \pm 0.08(\text{mv})$





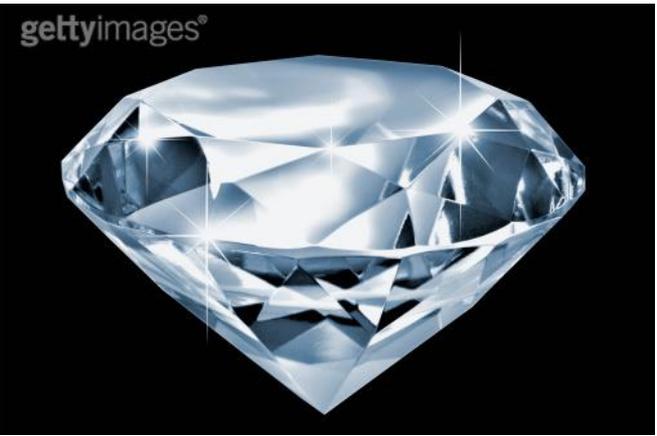


直接测量： 直接将待测物理量与选定的同类物理量的标准单位相比较直接得到测量值





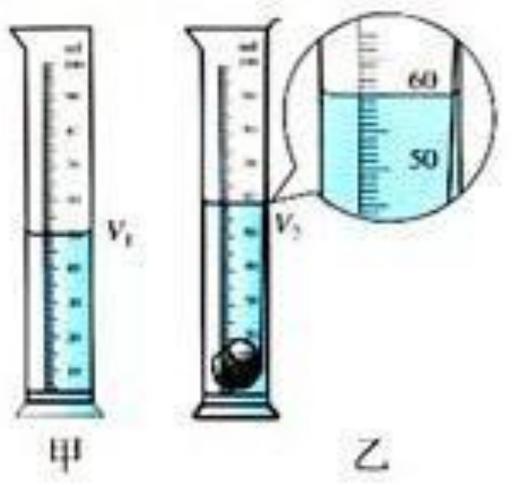
间接测量：利用直接测量的量与被测量之间的已知函数关系，求得该被测物理量



ρ



m



V



测量结果表示

测量值 = 读数值(有效数字) + 单位

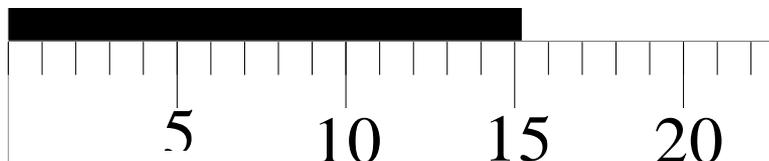
有效数字: 可靠数字 + 可疑数字 (一位)



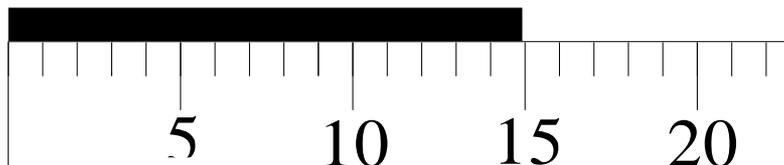


有效数字的读取

15.2mm



15.0mm



$$980\text{cm} / \text{s}^2 = 9.80\text{m}/\text{s}^2 = 0.00980\text{km}/\text{s}^2 \neq 9.8\text{m}/\text{s}^2$$



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





有效数字的运算：加、减法

诸量相加（相减）时，其和（差）数在小数点后所应保留的位数与诸数中小数点后位数最少的一个相同。

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





有效数字的运算：**乘、除法**

诸量相乘（除）后其积（商）所保留的有效数字，只须与诸因子中有效数字最少的一个相同。

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





有效数字的运算：**乘方、开方**

有效数字与其底的有效数字相同

$$2.56^3 = 16.8$$

$$2.56^{\frac{1}{3}} = 1.37$$





有效数字的运算：取对数

运算后的尾数位数与真数位数相同

$$\text{例： } \lg 1.938 = 0.2973$$

$$\lg 1938 = 3 + \lg 1.938 = 3.2973$$





有效数字的运算：**指数函数**

运算后的有效数字的位数与指数的小数点后的位数相同（包括紧接小数点后的零）

例： $10^{6.25} = 1.8 \times 10^6$

$$10^{0.0035} = 1.008$$





有效数字的运算：三角函数

取位随角度有效数字而定

$$\text{例： } \sin 30^{\circ} 00' = 0.5000$$

$$\cos 20^{\circ} 16' = 0.9381$$





有效数字的运算： **注意点**



- **正确数**不适用有效数字的运算规则。
- **取常数**与测量值的有效数字的位数相同。



有效数字尾数的舍入规则

数字修约

按照一定的规则确定一致的位数，然后舍去某些数字后面多余的尾数的过程

数字修约规则（国家标准文件：GB8170-2008）

口诀：4舍6入5看右，5后有数进上去，
尾数为0向左看，左数奇进偶舍弃。



有效数字尾数的舍入规则

例：将下列数字全部修约为四位有效数字

- 1) 尾数 < 5 , $1.11840000 \rightarrow 1.118$
- 2) 尾数 > 5 , $1.11860000 \rightarrow 1.119$
- 3) 尾数 $= 5$,
 - a) 5右面还有不为0的数
 $1.11859999 \rightarrow 1.119$ $1.11850001 \rightarrow 1.119$
 - b) 5右面尾数为0则凑偶
 $1.11750000 \rightarrow 1.118$ $1.11850000 \rightarrow 1.118$



有效数字尾数的舍入规则

注意： 一次性修约到指定的位数

例：将数字10.2749945001修约为四位有效数字。

一步到位：**10.2749945001**——**10.27**（正确）。

错误结果：

10.2749945001——**10.274995**—— **10.275**——**10.28**



2. 测量误差和不确定度估算的基础知识



- 误差
- 随机误差的处理
- 测量结果的不确定度表示
- 间接测量不确定度的合成



误差

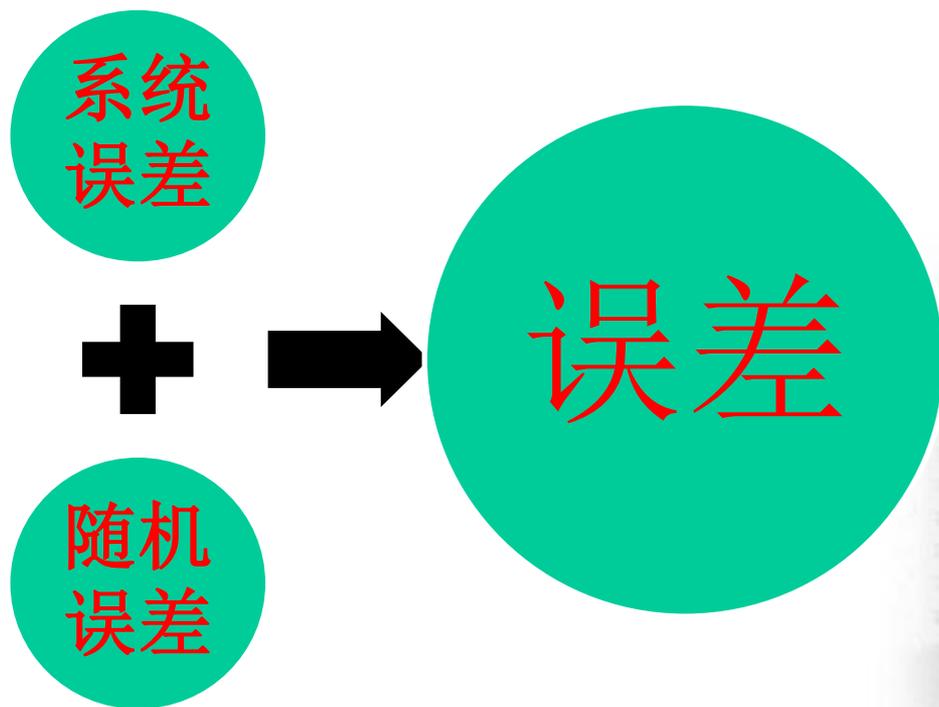
对一待测物理量 x

误差 $dx =$ 测量结果 x - 真值 μ

真值：物理量在一定实验条件下的客观存在值



测量误差存在于一切测量过程中，可以控制得越来越小，不可能为零。





系统误差

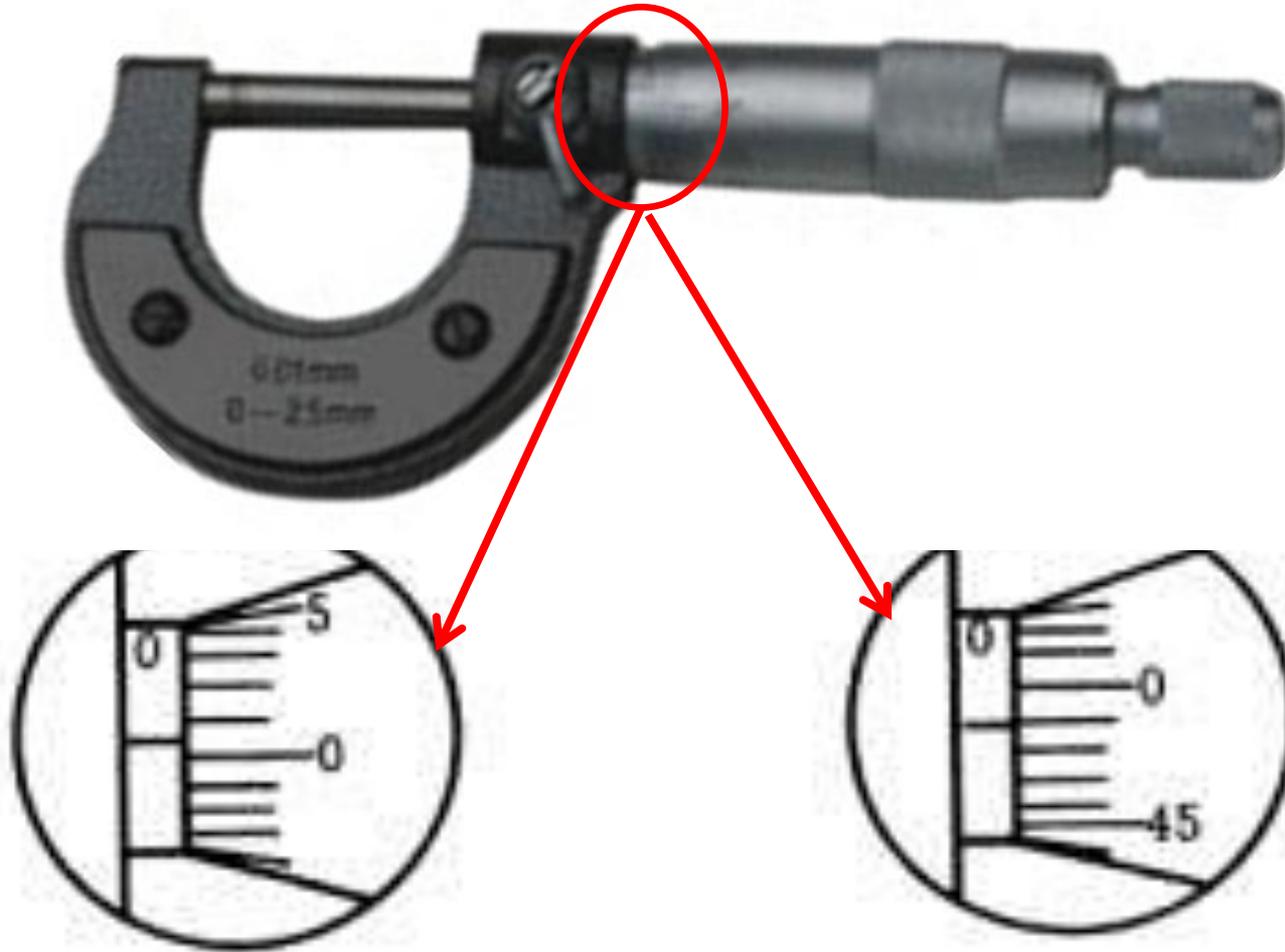
定义：在对同一被测量的多次测量过程中，绝对值和符号保持恒定或随测量条件的改变而按确定的规律变化。

- **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 **已定系统误差：必须修正**
电表、螺旋测微计的零位误差；
测电压、电流时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**
如：螺旋测微计制造时的螺纹公差等。





系统误差



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。

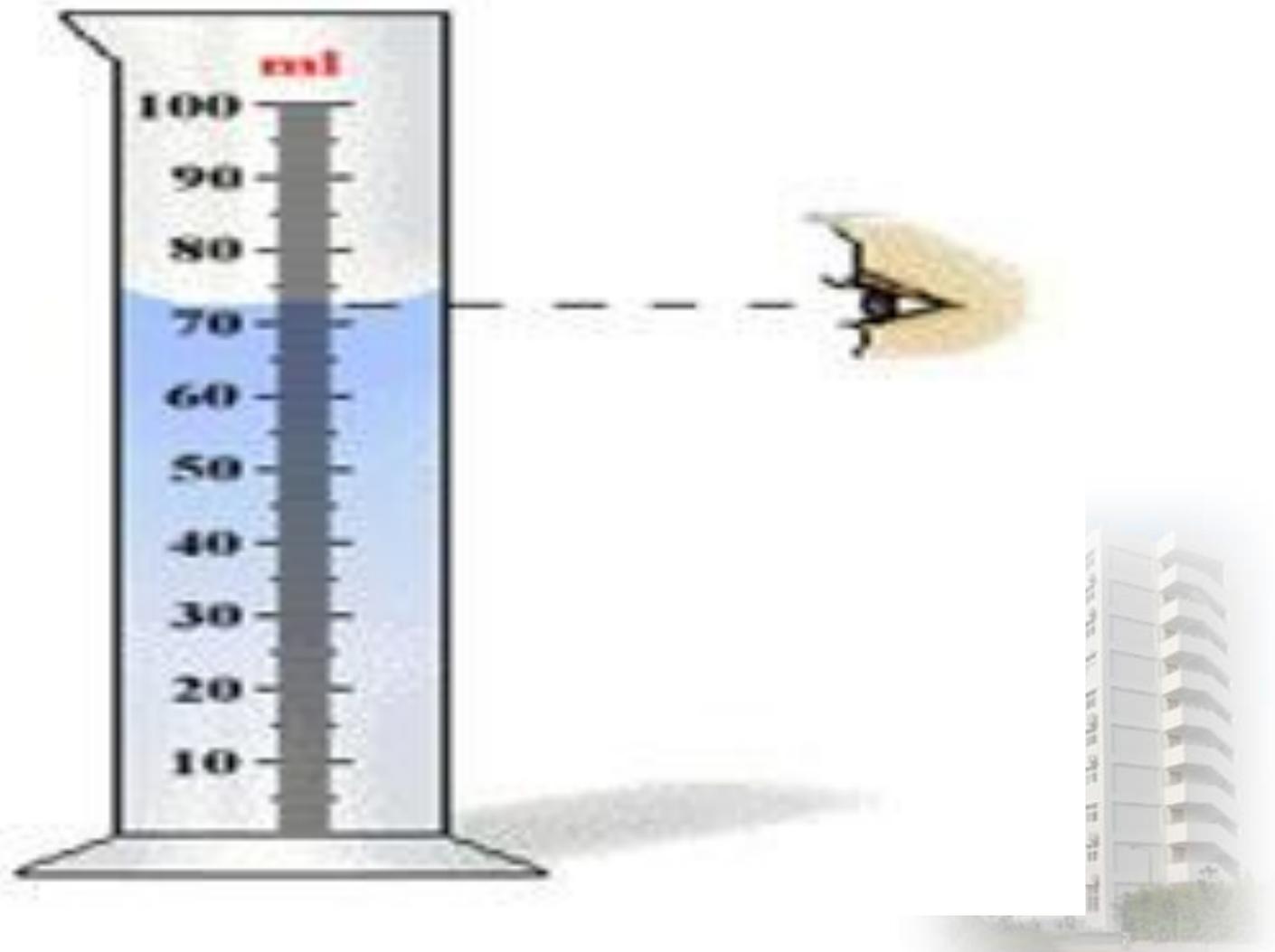
- **产生原因：**实验条件和环境因素无规则的起伏变化，引起测量值围绕真值发生涨落的变化。

例如：

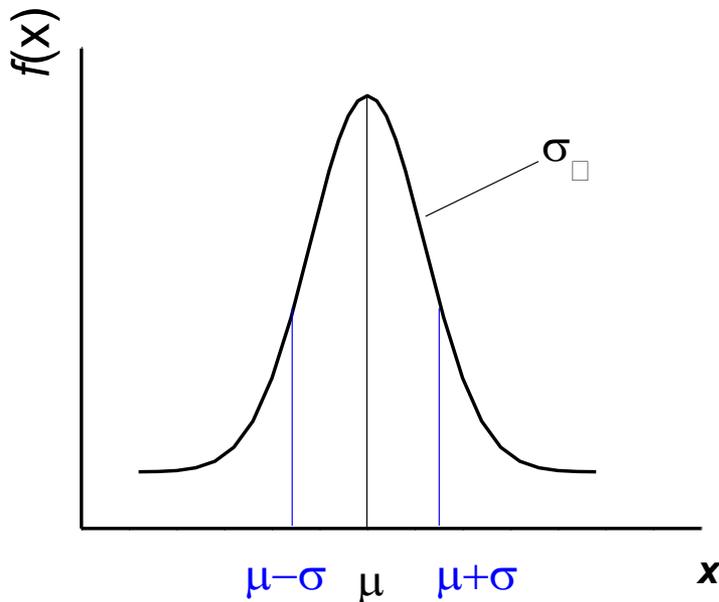
- 电表轴承的摩擦力变动
- 螺旋测微计测力在一定范围内随机变化
- 操作读数时的视差影响



随机误差



- (1) 小误差出现的概率比大误差出现的概率大；
- (2) 无穷多次测量时测量数据服从正态分布；
- (3) 具有抵偿性。取多次测量的平均值有利于消减随机误差。



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

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n-1}}$$

μ 为真值

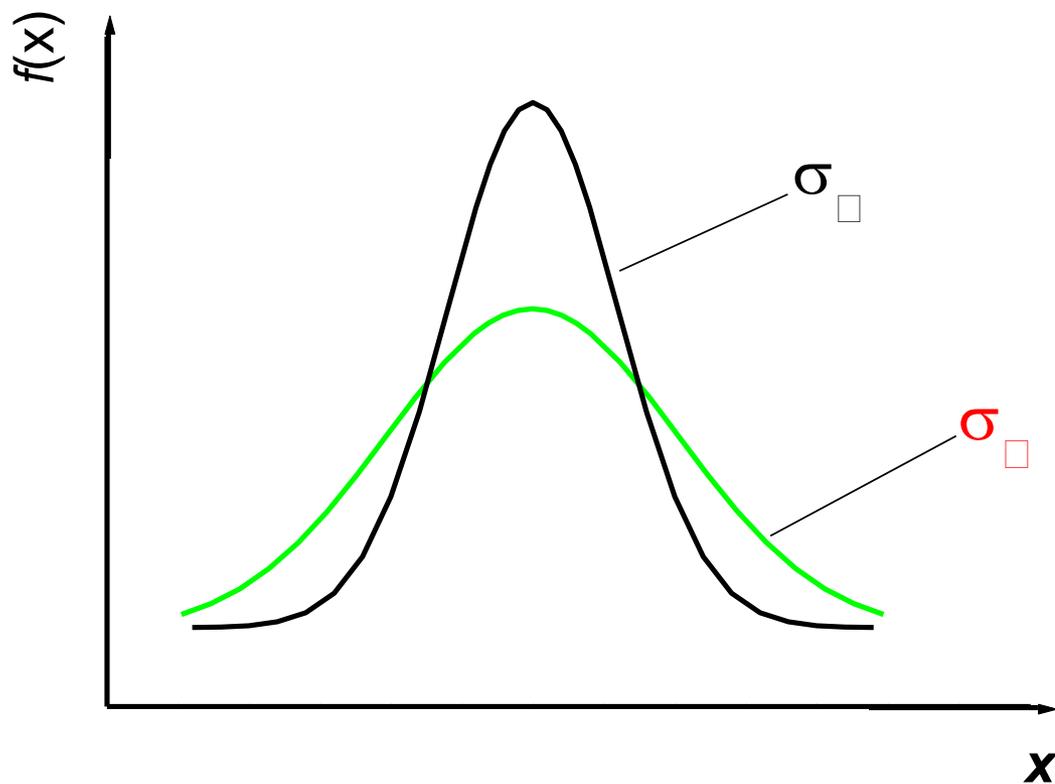
σ 为标准差

$f(x)$ 为 x 的分布函数





标准差表示测量值的离散程度



标准差小：

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：

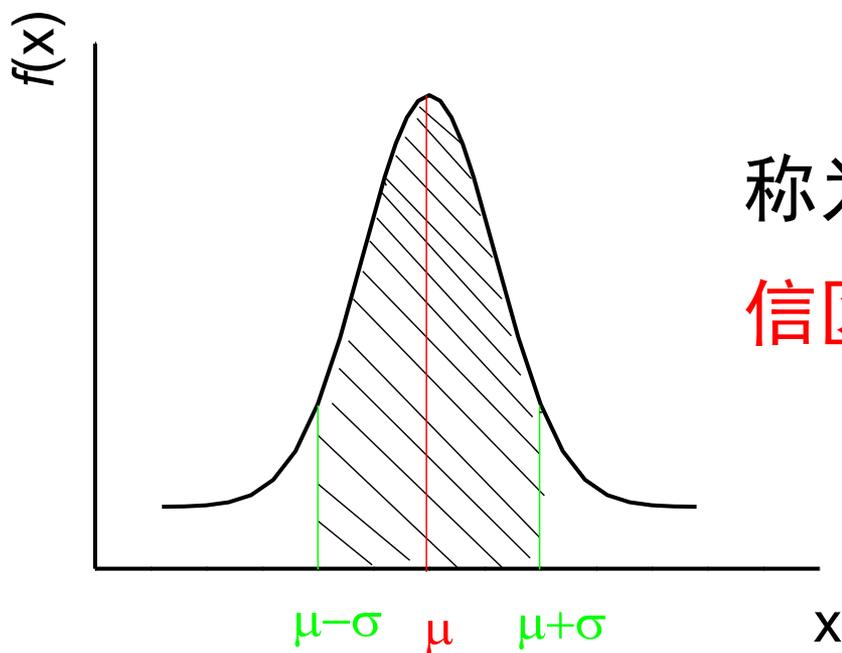
表示测得值很分散，随机误差分布范围宽，测量的精密度低。





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

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



这个概率叫**置信概率**，也
称为**置信度**。对应的区间叫**置
信区间**，表示为：

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





扩大置信区间，可增加置信概率

$$[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$$

$$P = \int_{\mu - 2\sigma}^{\mu + 2\sigma} f(x) dx = 0.954$$

$$[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$$

$$P = \int_{\mu - 3\sigma}^{\mu + 3\sigma} f(x) dx = 0.997$$



在测量次数 n 较小的情况下，测量将呈 t 分布

n 较小时，偏离正态分布较多，
 n 较大时，趋于正态分布。

t 分布时，置信区间和置信度的计算需要对特殊函数积分，且不同的测量次数对应不同的值，计算很繁。

平均值

假定对一个物理量进行了 n 次测量，测得的值为 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$

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

可以用多次测量的算术平均值作为被测量的最佳估计值，测量次数 n 为无穷大时，算术平均值等于真值。





根据统计理论，有限测量时，算术平均值不等于真值，它的标准偏差为：

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$$

而 $\sigma_{\bar{x}}$ 的意义可以理解为：

待测物理量处于区 $[\bar{x} - \sigma_{\bar{x}}, \bar{x} + \sigma_{\bar{x}}]$ 内的概率为0.683。





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

$$x = \bar{x} \pm t_{0.95} \sigma_{\bar{x}} = \bar{x} \pm \frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}} \sigma_x$$

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6次。



概念： 不确定度 u 是由于测量误差存在而对被测量值不能确定的程度。

意义： 不确定度是一定**置信概率**下的**误差限值**，反映了可能存在的误差分布范围。

置信概率一般取0.95



A 类分量 Δ_A : 可以用统计学方法估算的分量, 一般指随机误差。

测量次数很大时, $\Delta_A = 2\sigma_{\bar{x}} = \frac{2}{\sqrt{n}}\sigma_x$

测量次数不大时, $\Delta_A = \frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}}\sigma_x$



B 类分量 Δ_B : 不能用统计学方法估算的分量, 一般指系统误差。

若不特别说明

$$\Delta_B = \frac{\text{仪器允差}}{c}$$

c 叫置信因子, 置信度取0.95时, **$c = 1.05$**

实际计算时 c 取1





合成方法:

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

相对不确定度:

$$u_{rx} = \frac{u_x}{x} \times 100\%$$

结果表示:

$$\begin{cases} x = \bar{x} \pm u_x \\ u_{rx} = \frac{u_x}{x} \times 100\% \end{cases}$$

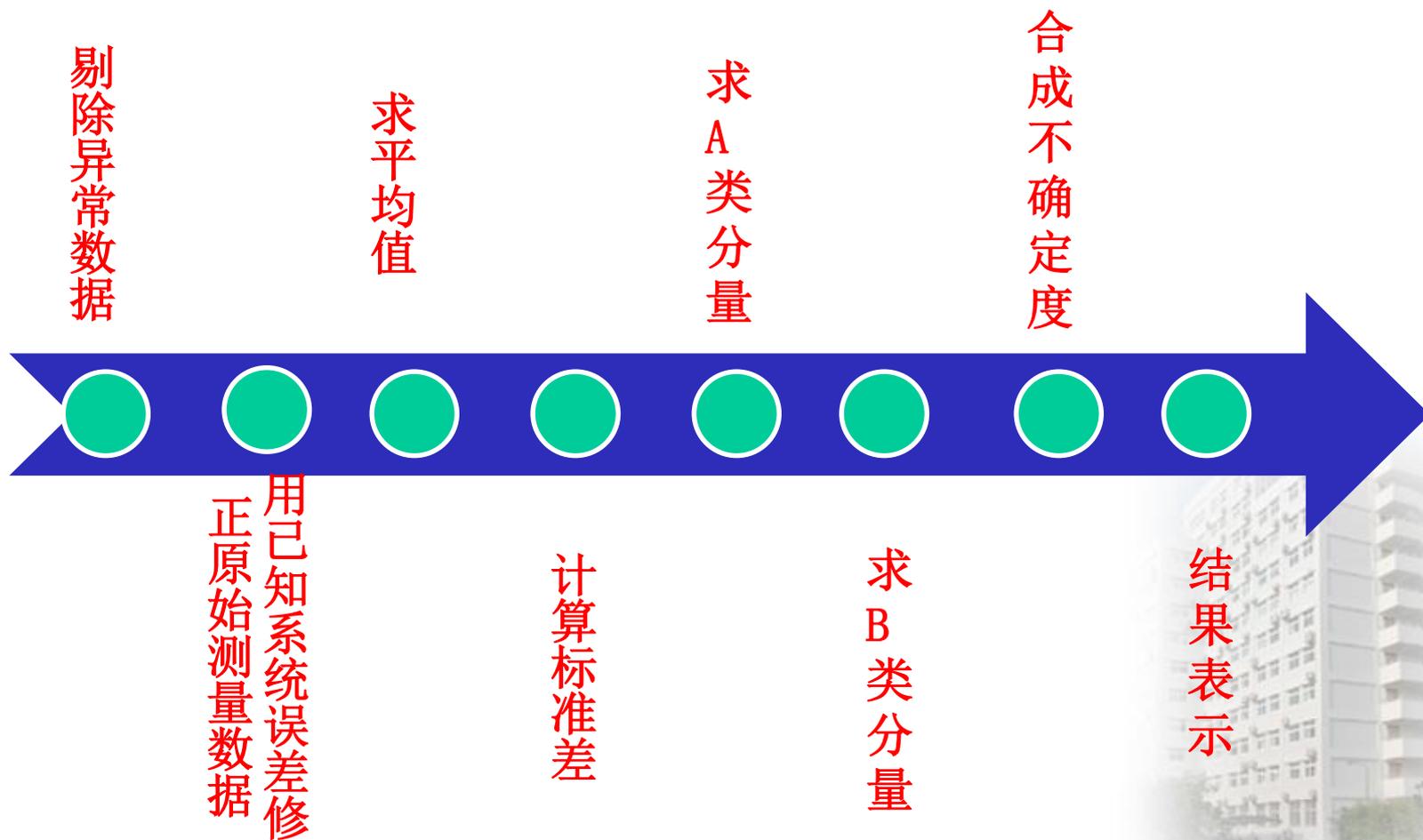


注意：

1. 平均值有效数字位数**不要超过**测量值的有效数字；
2. 不确定度和相对不确定度**保留1-2位有效数字**；
3. 不确定度的**最后一位数字要和平均值的对齐**。



直接测量量不确定度估算过程与表示



直接测量不确定度计算举例

例1：用螺旋测微计测某一钢丝的直径，原始数据见下表，请给出完整的测量结果。

原始数据表格

$d_0 = +0.004 \text{ mm}$, 螺旋测微计的仪器允差为 $\Delta_{\text{仪}} = 0.004 \text{ mm}$						
	1	2	3	4	5	6
d'_i (mm)	0.249	0.250	0.247	0.251	0.253	0.250



例 1 解:

$d_0 = +0.004 \text{ mm}$, 螺旋测微计的仪器允差为 $\Delta_{\text{仪}} = 0.004 \text{ mm}$

	1	2	3	4	5	6
d'_i (mm)	0.249	0.250	0.247	0.251	0.253	0.250
$d_i = d'_i - d_0$ (mm)	0.245	0.246	0.243	0.247	0.249	0.246
\bar{d}_i (mm)	0.246					
$\bar{d} - d_i$ (mm)	0.001	0.000	0.003	-0.001	-0.003	0.000

没有异常数据, 不用剔除



例 1 解:

$$\sigma_d = \sqrt{\sum (\bar{d} - d_i)^2 / (n-1)} = 0.002(mm)$$

$$\Delta_A = \frac{t_{0.95}}{\sqrt{n}} \sigma_x = 1.05\sigma_x \approx 0.002mm \quad \Delta_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{1.05} \approx 0.004(mm)$$

$$u_d = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \approx 0.004(mm)$$

$$u_{rd} = \frac{u_d}{d} \times 100\% = 2\%$$





测量结果表示为

$$\begin{cases} d = 0.246 \pm 0.004(\text{mm}) \\ u_{rd} = 2\% \end{cases}$$



设待测量与各直接测量之间有函数关系：

$$x = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

待测量的**平均值**可直接用各量平均值计算，则：

$$\bar{x} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_n)$$

不可分别计算再取平均——非线性



间接测量不确定度的计算

待测量量的不确定度与各直接测量量的不确定度的关系为：

(1)
$$u_x = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} u_{x_i} \right)^2}$$
 计算和差形式方便

(2)
$$\frac{u_x}{x} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i} u_{x_i} \right)^2}$$
 计算乘除指数形式方便





常用公式

$$x = x_1 \pm x_2 \quad u_x = \sqrt{u_{x_1}^2 + u_{x_2}^2}$$

$$x = x_1 x_2 \text{ 或 } x_1 / x_2 \quad u_{rx} = \sqrt{u_{rx_1}^2 + u_{rx_2}^2}$$

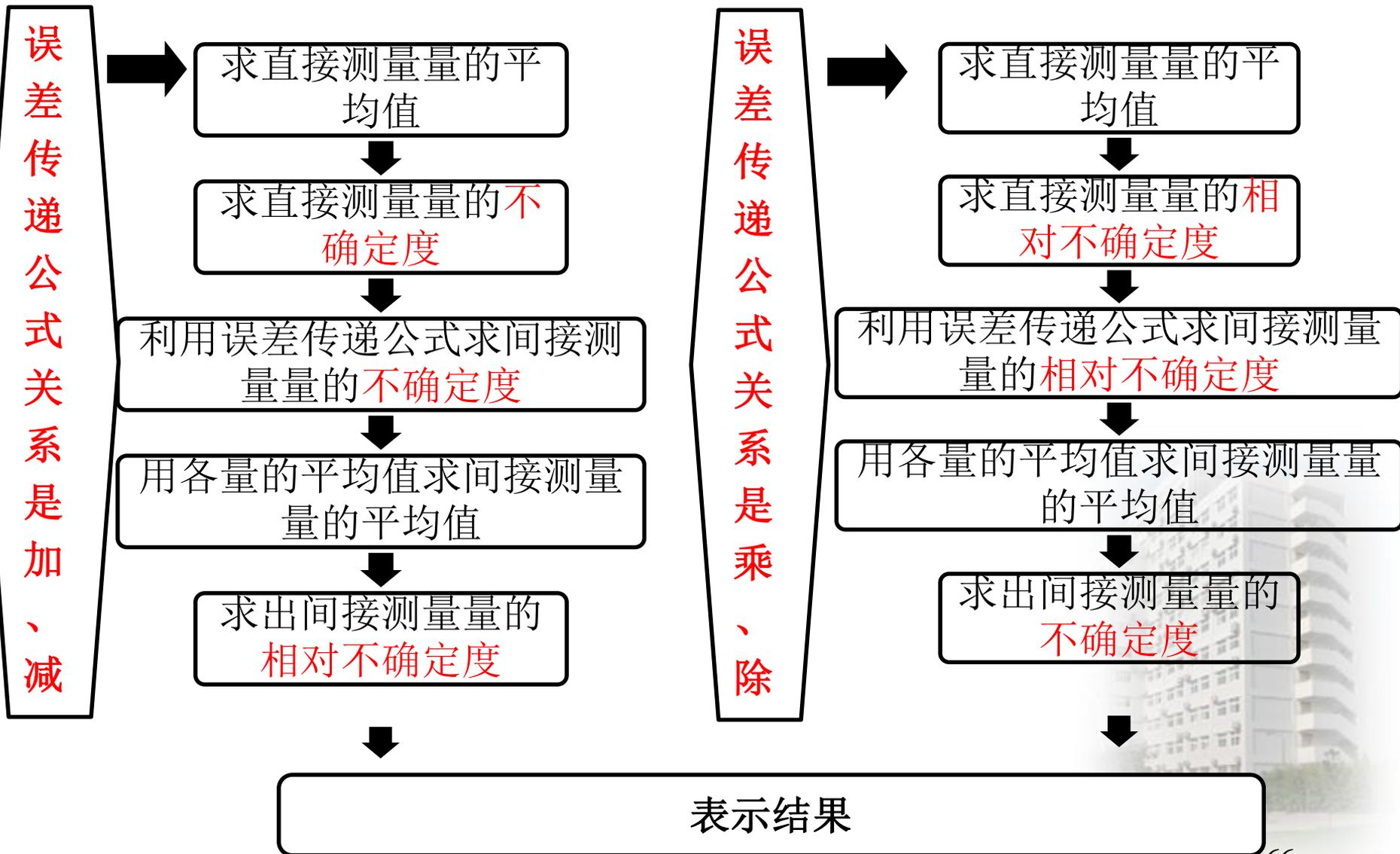
$$x = x_1^k x_2^m \quad u_{rx} = \sqrt{(k u_{rx_1})^2 + (m u_{rx_2})^2}$$

同学们可以用偏微分知识自己推导这些公式





间接测量的不确定度合成过程



间接测量量的不确定度合成举例

例2: 已测得金属环的外形尺寸如下，要求给出其体积的测量结果

$$D_{\text{内径}} = 2.880 \pm 0.004 \text{ cm}, \quad D_{\text{外径}} = 3.600 \pm 0.004 \text{ cm}, \quad h = 2.575 \pm 0.004 \text{ cm}$$

解:

$$1. \quad \bar{V} = \frac{\pi}{4} (\bar{D}_{\text{外径}}^2 - \bar{D}_{\text{内径}}^2) \bar{h} = 9.436 (\text{cm}^3)$$

2. 由于间接测量与直接测量量之间没有简单关系，故先推导出间接测量的合成不确定度

$$\begin{aligned} u_V &= \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} u_{x_i} \right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial D_{\text{内径}}} u_{D_{\text{内径}}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D_{\text{外径}}} u_{D_{\text{外径}}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial h} u_h \right)^2} \\ &= \frac{\pi}{4} \sqrt{(2D_{\text{内径}} h u_{D_{\text{内径}}})^2 + (2D_{\text{外径}} h u_{D_{\text{外径}}})^2 + [(D_{\text{外径}}^2 - D_{\text{内径}}^2) u_h]^2} = 0.08 (\text{cm}^3) \end{aligned}$$



间接测量量的不确定度合成举例

3. 求相对不确定度

$$u_{rV} = \frac{u_V}{V} = 0.8\%$$

4. 实验结果表示

$$\begin{cases} V = 9.44 \pm 0.08(\text{cm}^3) \\ u_{rV} = 0.8\% \end{cases}$$





3. 数据处理的作图法最小二乘法

3.1 作图法处理实验数据

3.2 最小二乘法直线拟合

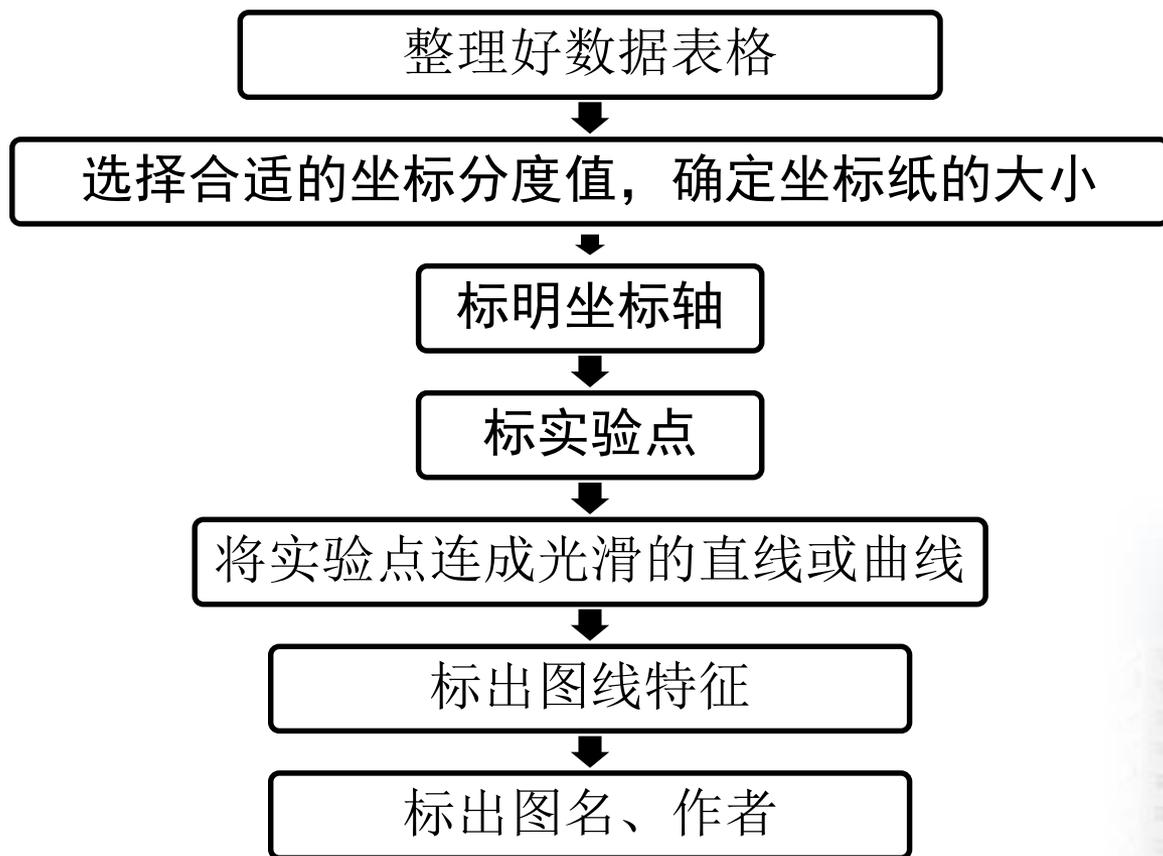




作图法可形象、直观地显示出物理量之间的函数关系，也可用来求某些物理参数，因此它是一种重要的数据处理方法。



作图法处理实验数据步骤



作图法处理实验数据步骤

例3： 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

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



2. 标明坐标轴：

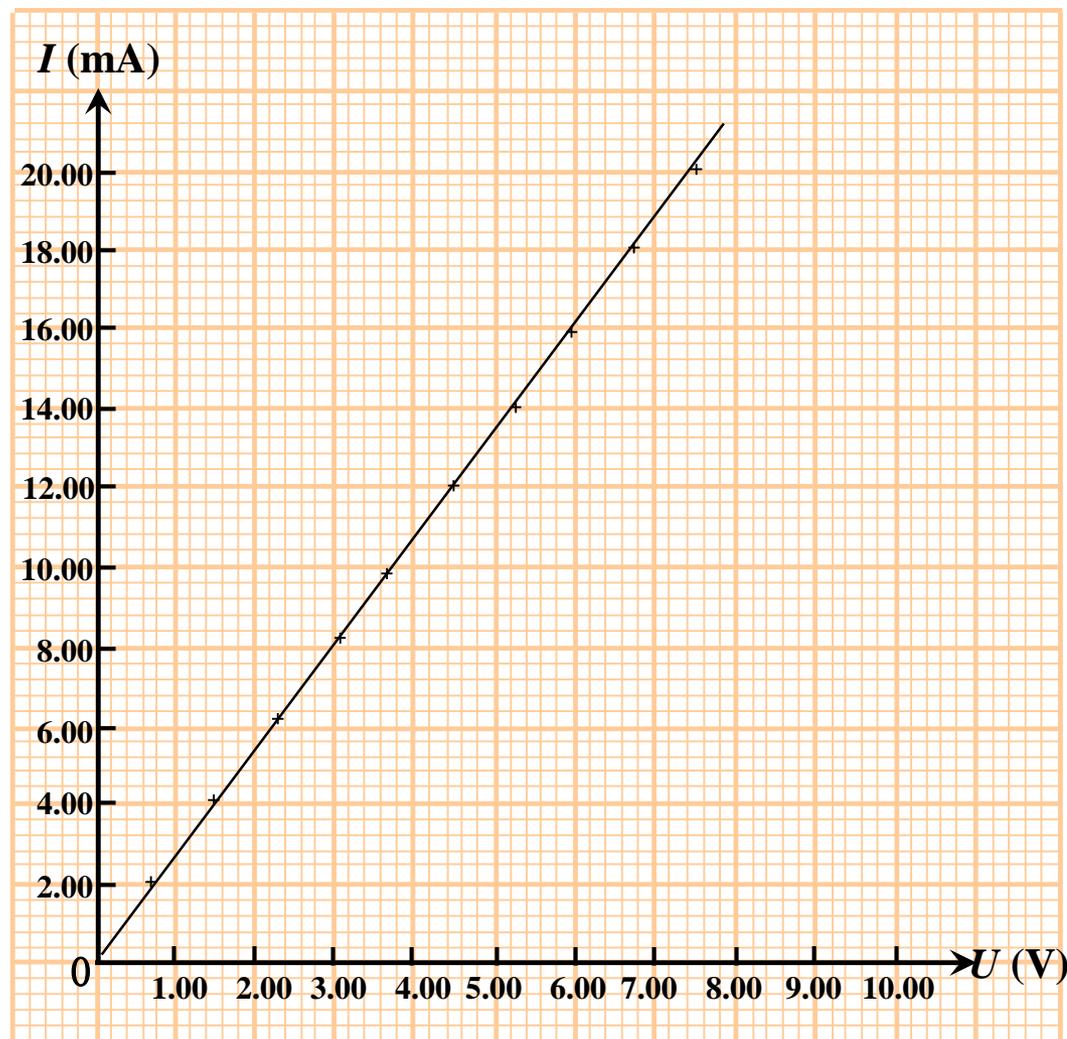
用粗实线画坐标轴，用箭头标轴方向，标坐标轴的名称或符号、单位，再按顺序标出坐标轴整分格上的量值。

3. 标实验点：

实验点可用“+”、“●”、“○”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、光滑曲线。一般不强求直线或曲线通过每个实验点，应使图线两边的实验点与图线最为接近且分布大体均匀。图线正穿过实验点时可以在点处断开。

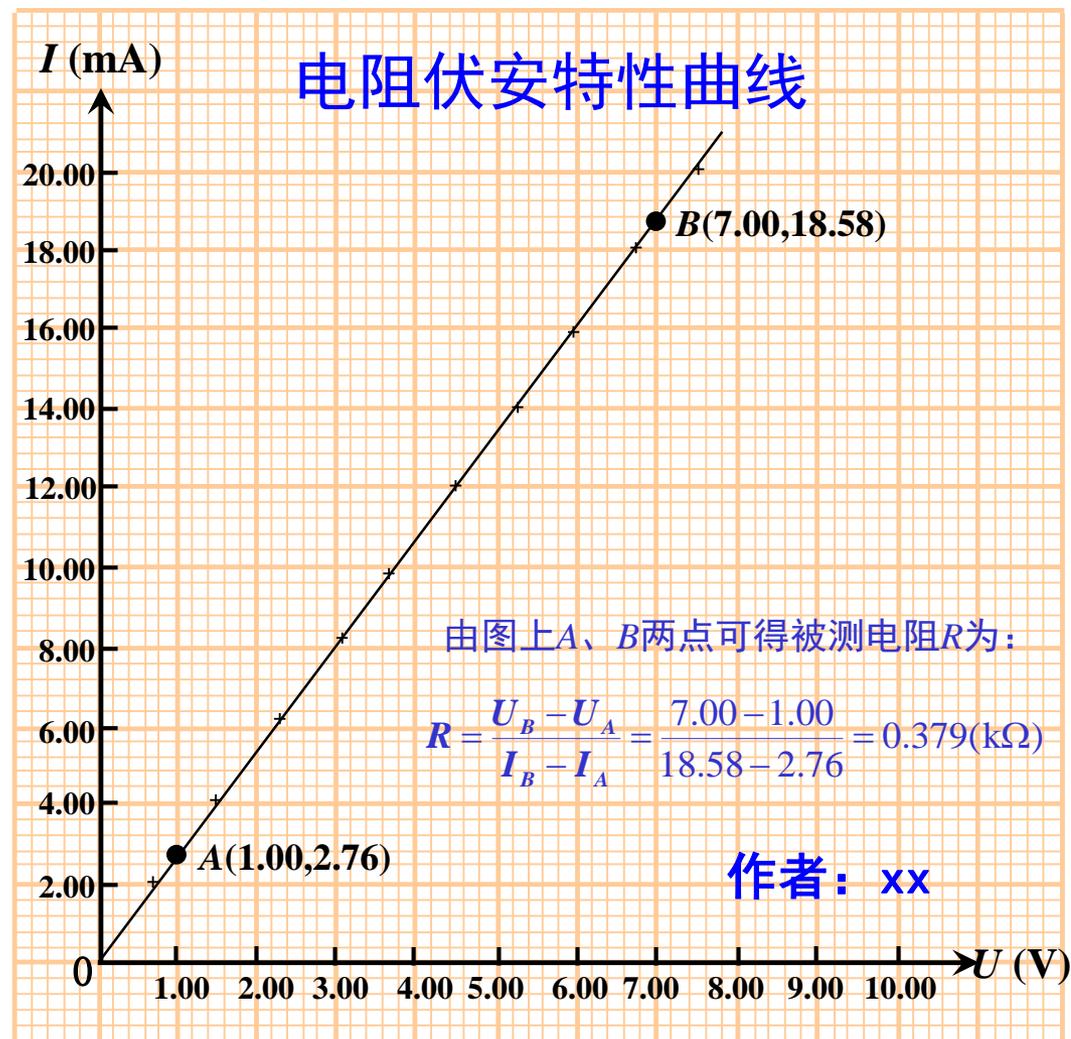


5. 标出图线特征：

在图上空白位置标明实验条件或从图上得出的某些参数。如利用所绘直线可给出被测电阻 R 大小：
从所绘直线上读取两点 A 、 B 的坐标就可求出 R 值。

6. 标出图名：

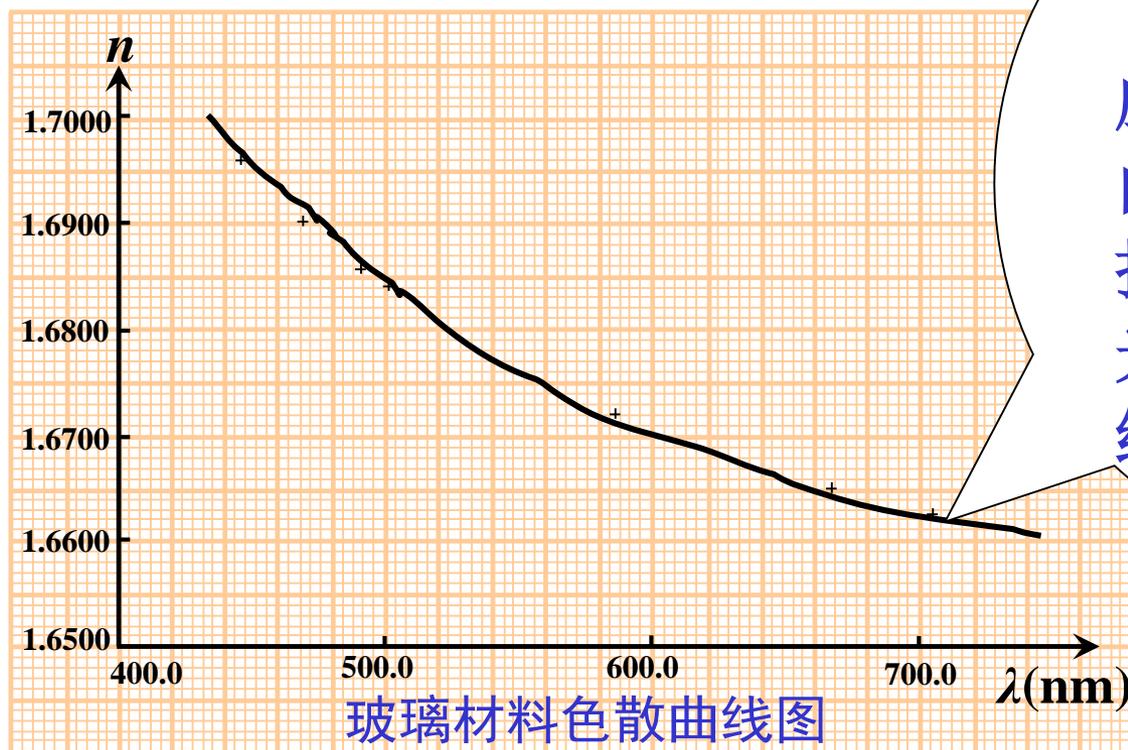
在图线下方或空白位置写出图线的名称及某些必要的说明。





● 不当图例展示:

图 1



不当：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。





改正为:

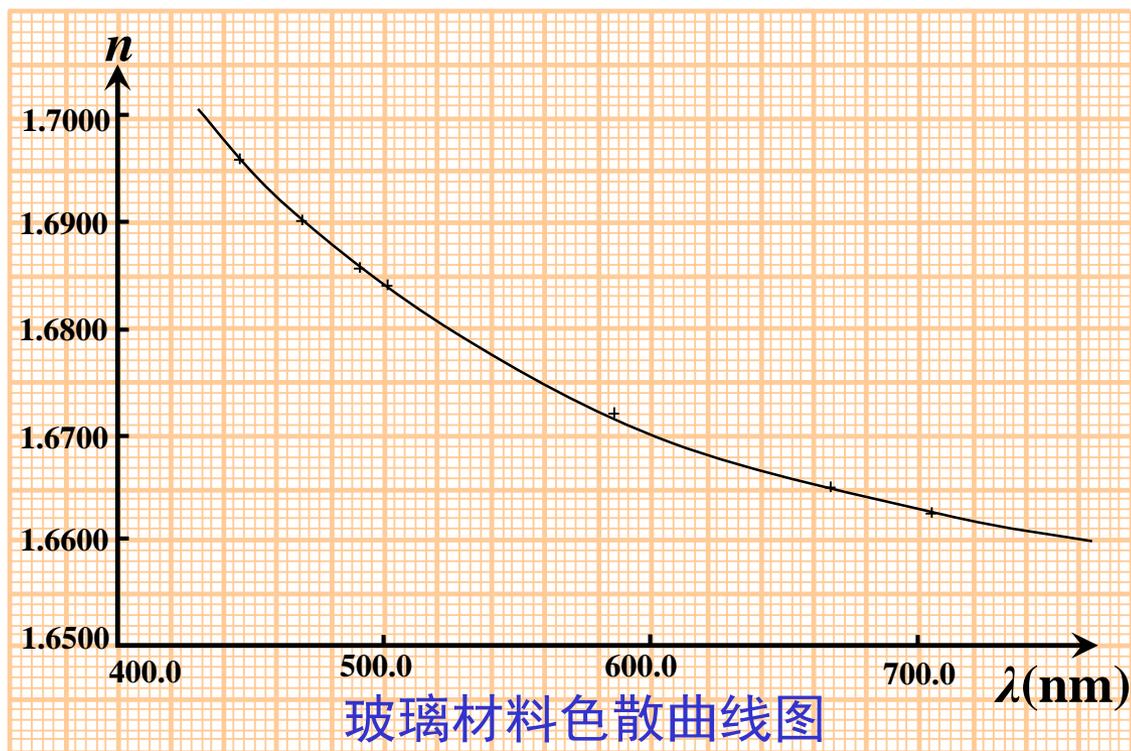
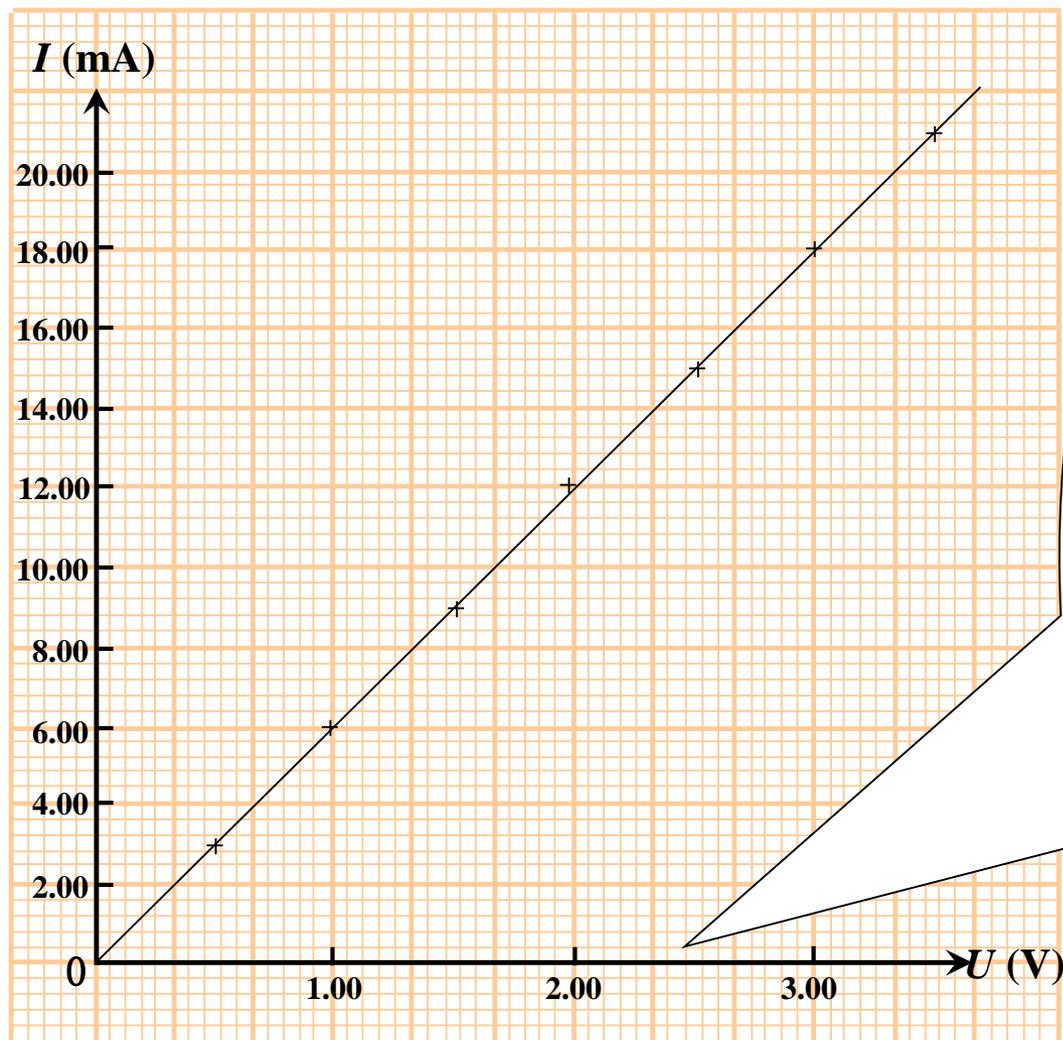




图 2



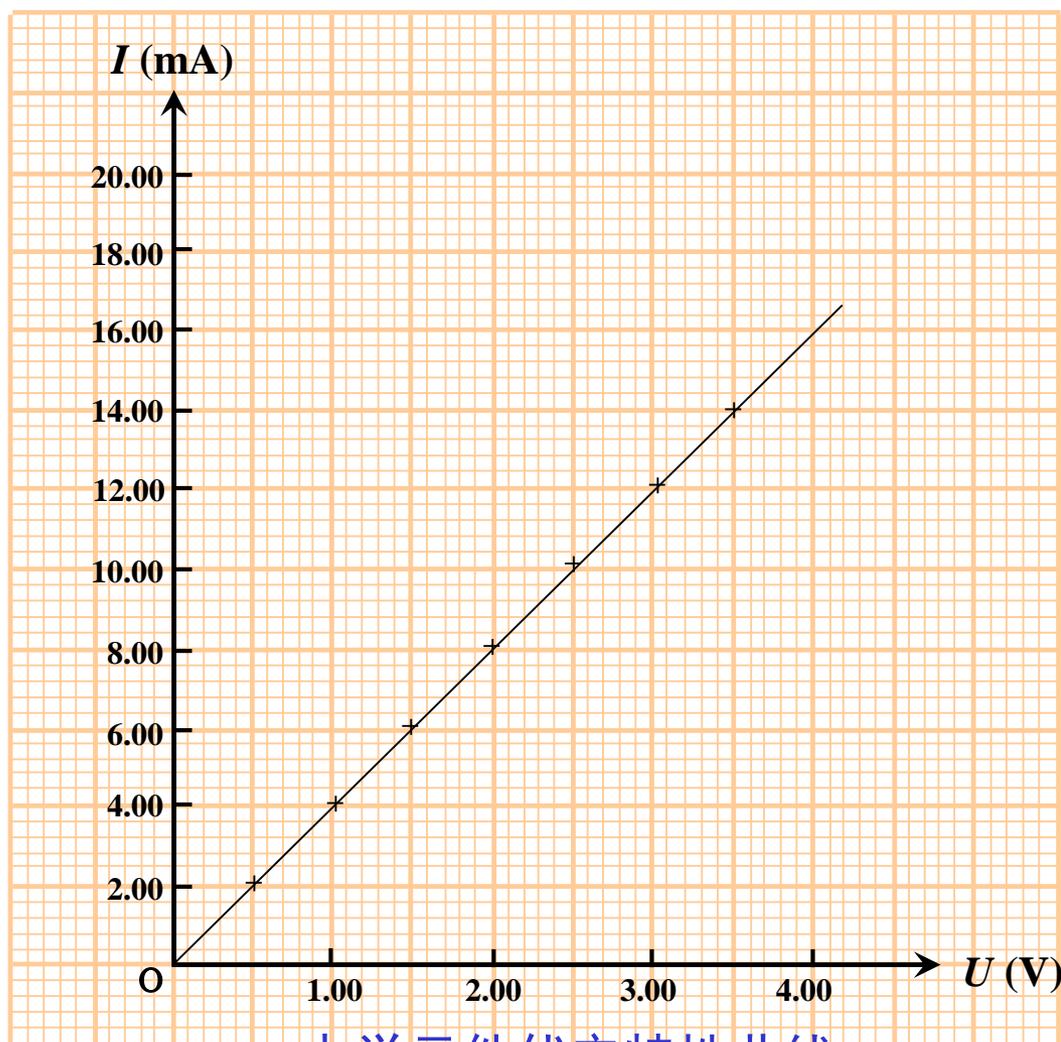
电学元件伏安特性曲线

不当：横轴坐标分度选取不当。

横轴以3 cm 代表1 V，使作图和读图都很困难。实际在选择坐标分度值时，应既满足有效数字的要求又便于作图和读图，一般以1 mm 代表的量值是10的整数次幂或是其2倍或5倍。



改正为：



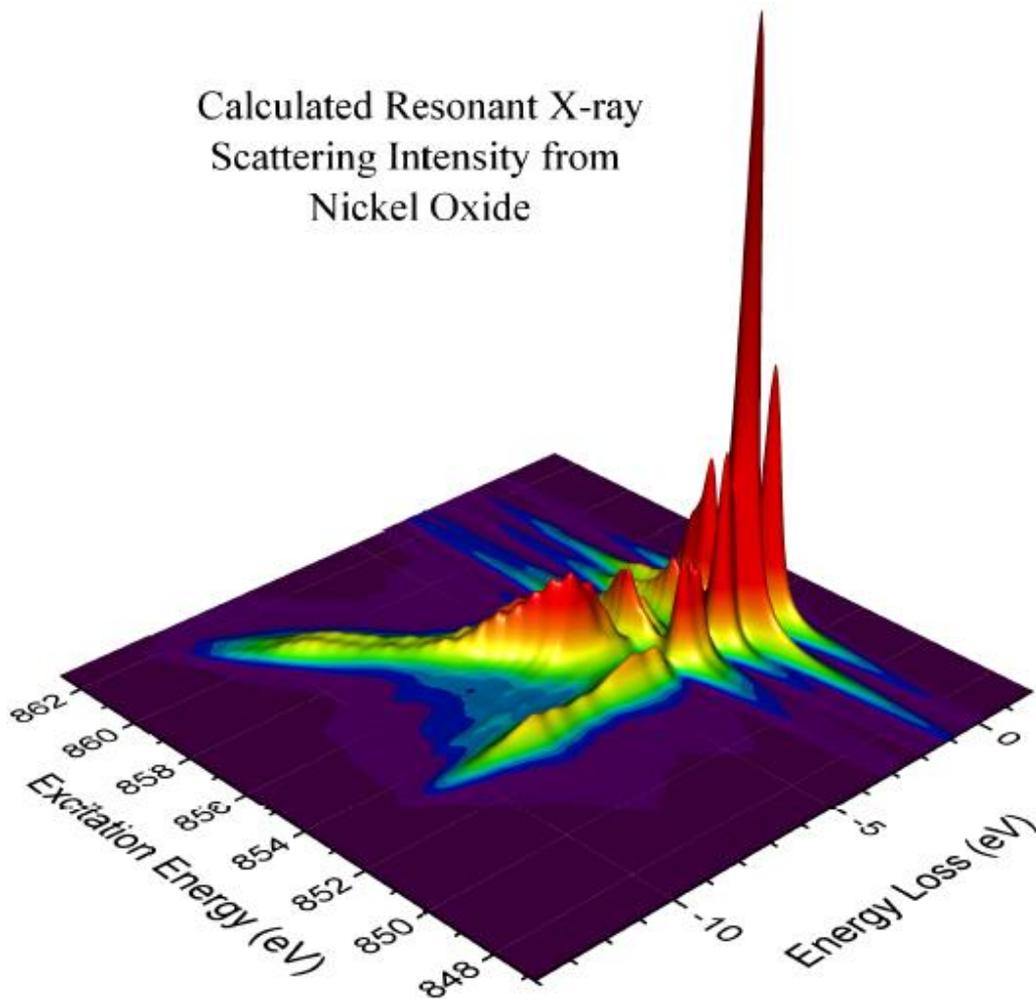
电学元件伏安特性曲线



Origin在大学物理实验中的应用



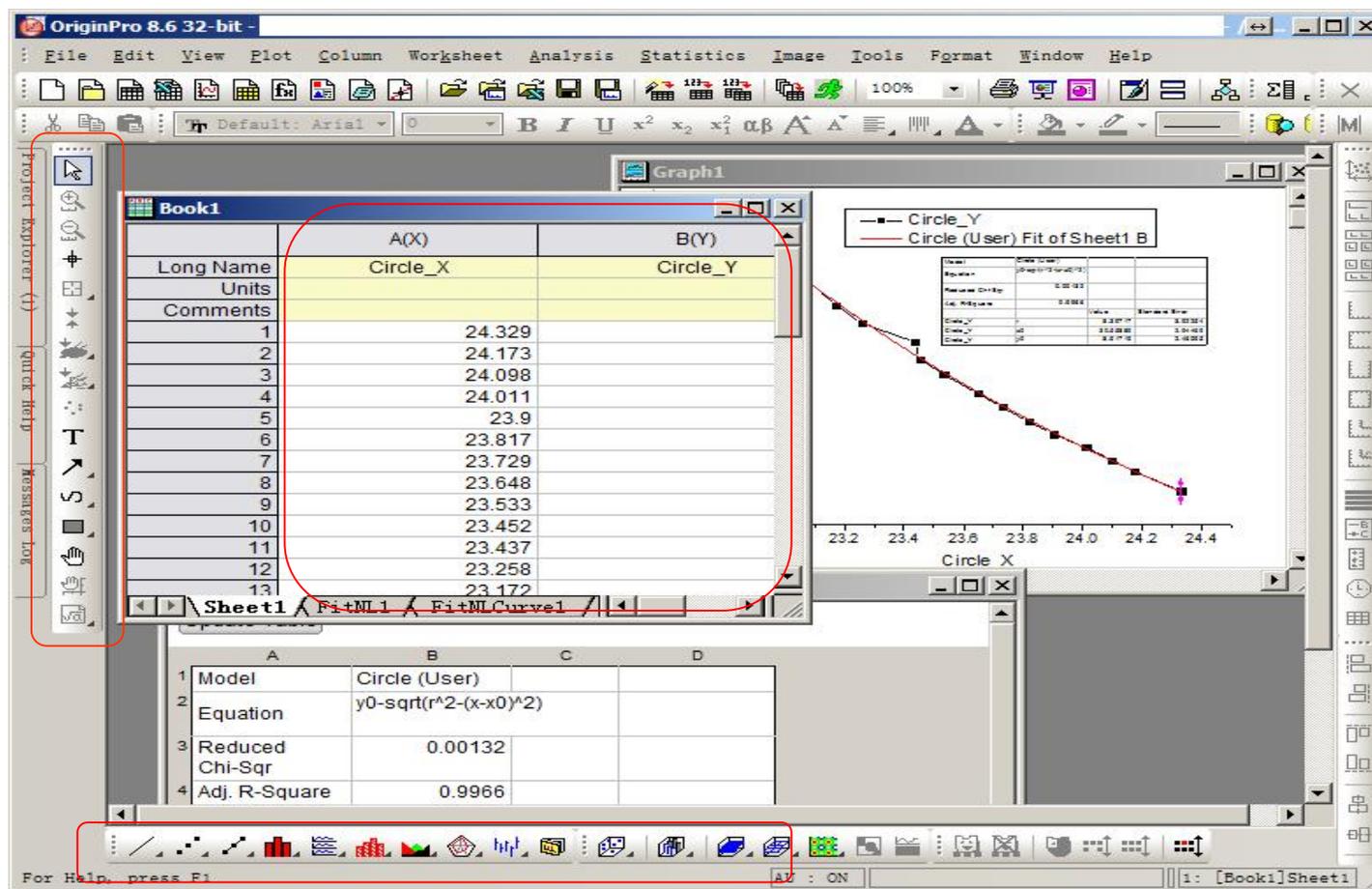
Calculated Resonant X-ray
Scattering Intensity from
Nickel Oxide



高级图表绘制和数据分析的能力是科学家和工程师所必需掌握的，而Origin是当今世界上最著名的科技绘图和数据处理软件之一，与其它科技绘图软件相比，Origin在科技绘图及数据处理方面能满足大部分科技工作者的需要，并且容易掌握，兼容性好，因此成为科技工作者的首选科技绘图及数据处理软件。



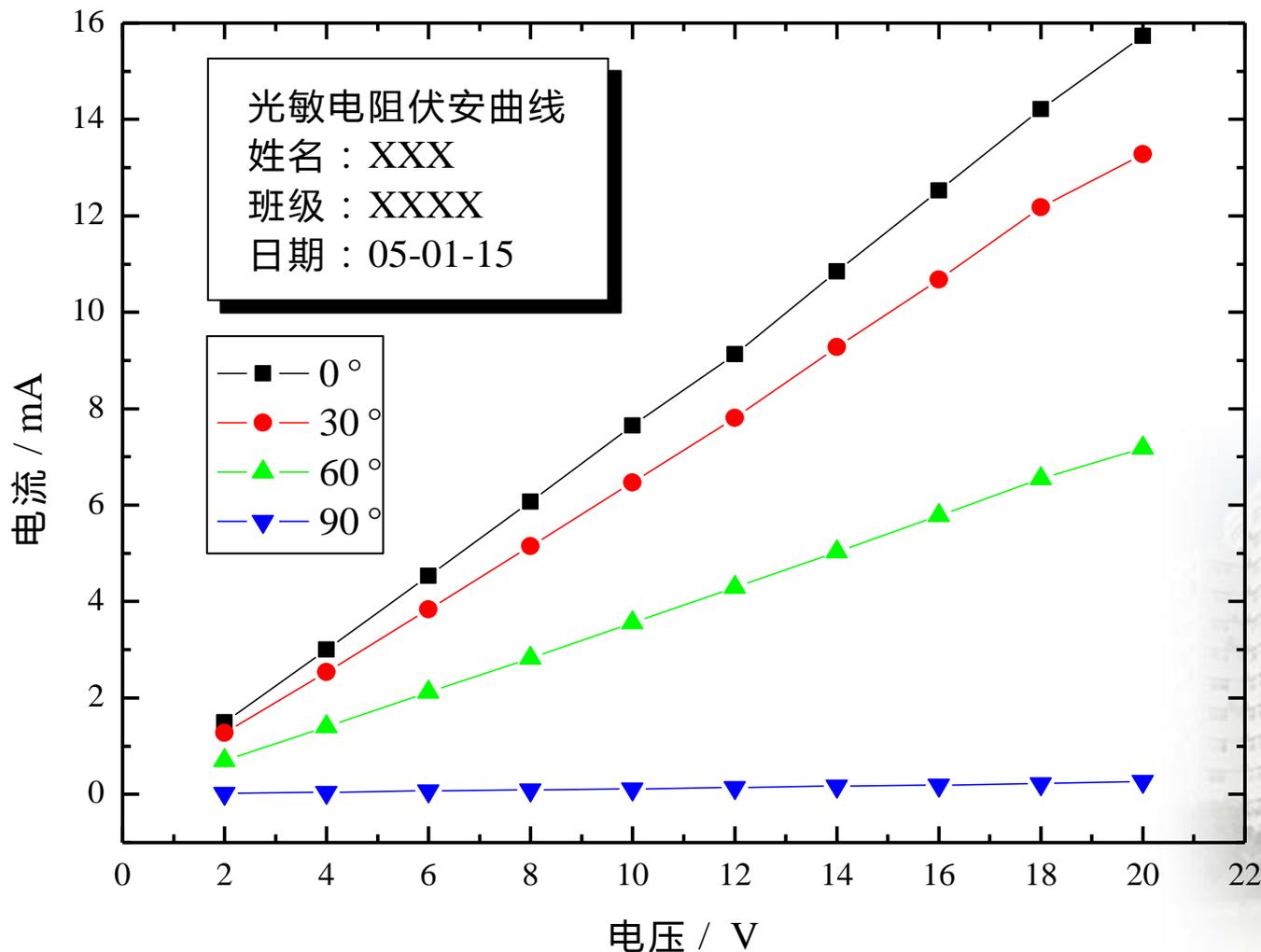
Origin软件的工具条



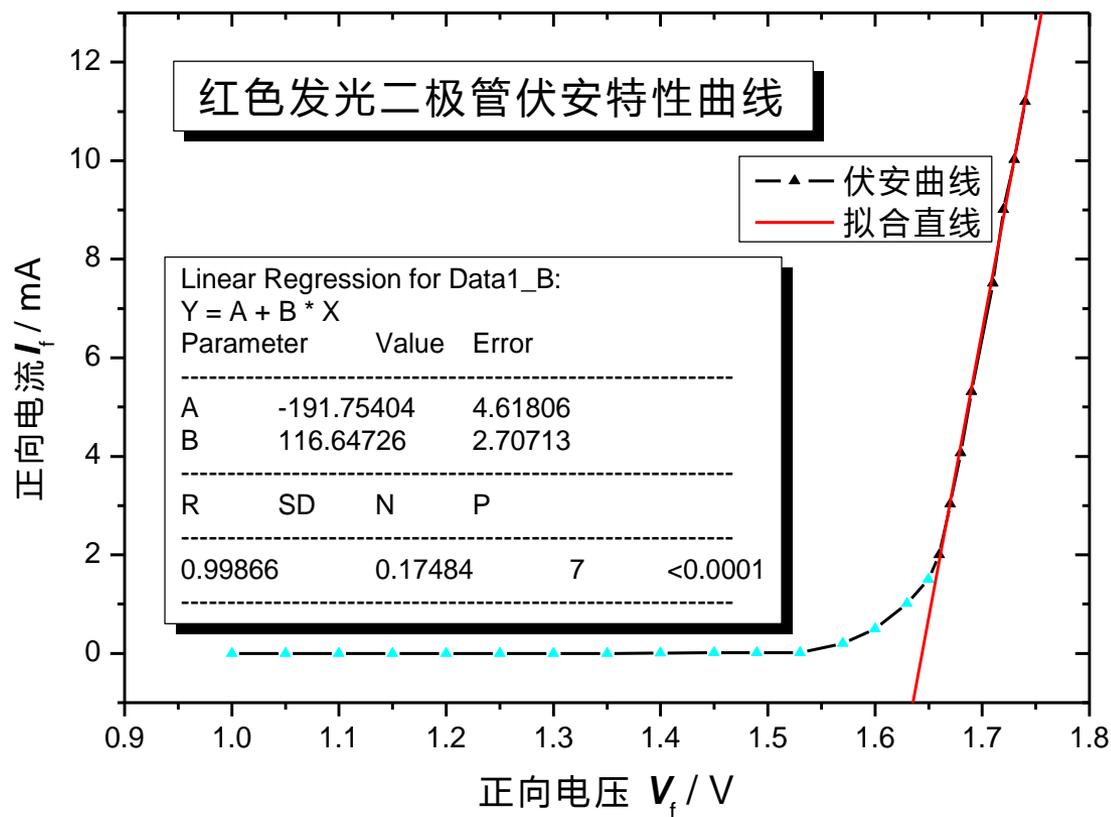
计算机作图的例子（Origin）



作图方法可参见讲义附录，**中心机房**（物理实验楼304）可提供计算机



线性拟合及拟合结果表示





最小二乘法直线拟合

设两物理量 x 、 y 满足线性关系 $y = a + bx$ ，
等精度地测得一组互相独立的实验数据

$$\{x_i, y_i\} \quad i = 1, \dots, n$$

当所测各 y_i 值与拟合直线上的 $a + bx_i$ 之间偏差的平方和最小，即

$$Q = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2 \quad \text{最小}$$

Q 叫残差

所得系数 a, b 最好, 拟合公式即为最佳经验公式。





$$\frac{\partial Q}{\partial a} = \sum_{i=1}^n 2[y_i - (a + bx_i)](-1) = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial b} = \sum_{i=1}^n 2[y_i - (a + bx_i)](-x_i) = 0$$





解方程得：

$$a = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i\right) - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)}{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 - n \sum_{i=1}^n x_i^2} = \frac{\overline{xy} \cdot \overline{x} - \overline{x^2} \cdot \overline{y}}{\overline{x^2} - \overline{x^2}}$$

$$b = \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i\right) - n \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right)}{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 - n \sum_{i=1}^n x_i^2} = \frac{\overline{x} \cdot \overline{y} - \overline{xy}}{\overline{x^2} - \overline{x^2}}$$





相关系数 r :

最小二乘法处理数据除给出 a 、 b 外，还应给出相关系数 r ， r 定义为

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{其中} \quad \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$$

$r \in [-1, 1]$ 。

$|r| \rightarrow 1$ ， x 、 y 间线性关系好，

$|r| \rightarrow 0$ ， x 、 y 间无线性关系，拟合无意义。

物理实验中一般要求 r 绝对值达到0.999以上(3个9以上)





a 、 b 、 r 的具体求解方法：

1. 用计算机Excel 程序;
2. 用计算机Origin软件或Matlab软件

Origin软件的试用版下载：

<ftp://ftp2.sjtu.edu.cn/software/Science/>

3. 自己编程。

用最小二乘法处理前一定要先用

作图法作图，以剔除异常数据!!!





4. 怎样上好物理实验课

- **实验预习—实验能否取得主动的关键**
- **实验操作**
- **实验报告—实验的总结**



学生网上选课须知

实验中心共提供16个实验，每个同学按要求须完成7个实验。

1. 选课时应根据自己的专业需求和兴趣，尽量选择不同类型的实验内容，学习不同的实验方法；
2. 学习用最小二乘法和逐差法处理实验数据；
3. 学习利用Origin作图并表示实验结果。如果你到实验中心机房作图，为方便你保存数据请你带好U盘；
4. 学习用不确定度表示实验结果。





实验预习和预习报告

- 明确实验目的
- 预习实验原理
- 了解注意事项

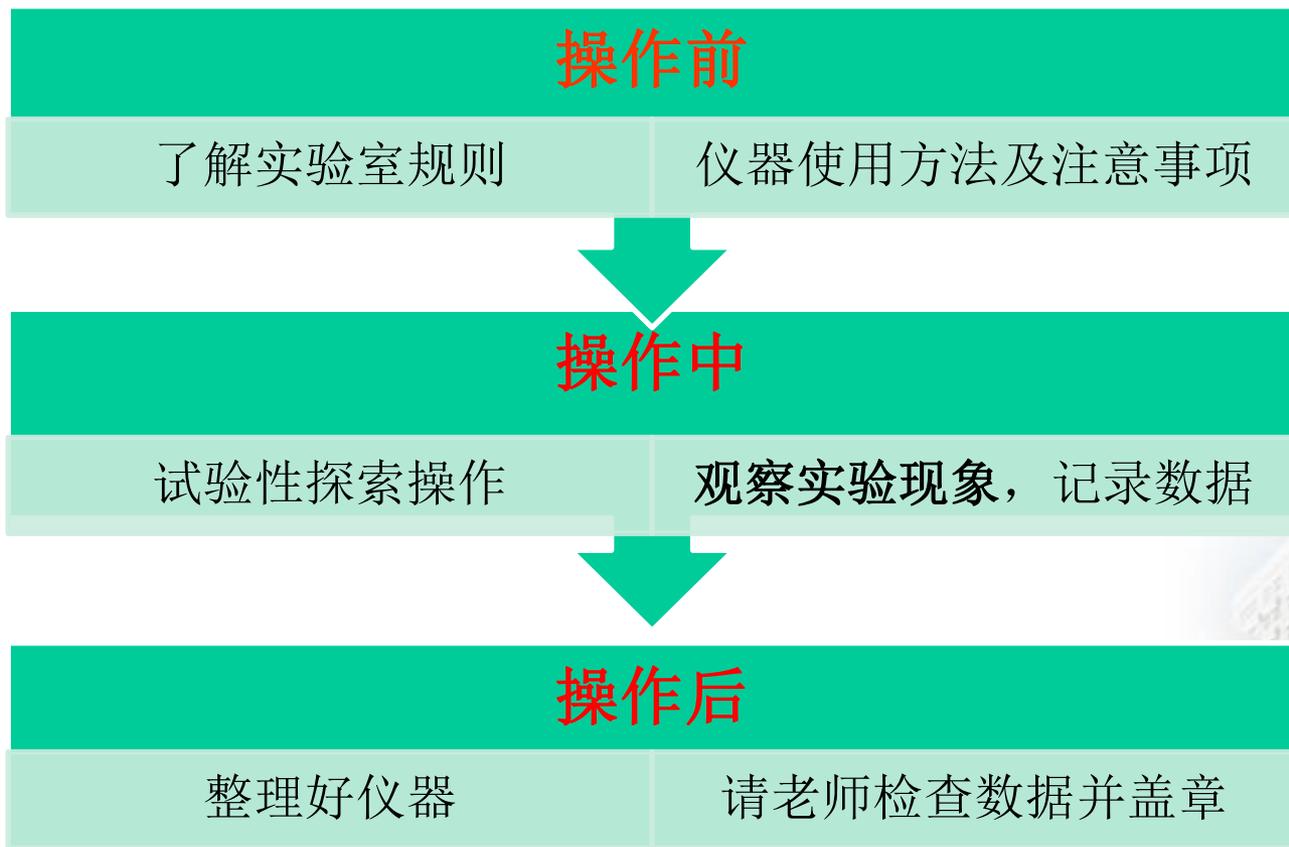
实验名称和实验目的

实验简图
(电路图或光路图)

实验主要计算公式

列出实验数据记录表格

实验操作要求



用钢笔或圆珠笔记录数据，原始数据不得改动

实验报告是呈现完整实验工作的总结，注意提炼特色！

实验目的 和原理

- 实验目的
- 实验原理
- 实验仪器设备

实验数据 和处理

- 实验数据图表
- 数据处理

实验讨论 和误差分析

- 实验结果或实验现象分析
- 实验结果误差分析
- 实验小结

中心目前暂不接受电子版实验报告！！



实验预习报告、实验报告案例

上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

实验预习报告

姓名: [redacted] 学号: [redacted]
同组姓名: [redacted] 指导教师: [redacted] 实验日期: [redacted]

用CCD成像系统观测牛顿环

原理简述 (原理图、主要公式)

牛顿环: 用平行光照射牛顿环仪时, 在球面与平玻璃接触点周围形成的同心圆干涉环。
(透射光牛顿环原理图)

如图3, $R^2 = r^2 + (R-d)^2$, $d = \frac{d^2}{2R}$ ($d \ll R$) (1)
 对于小的厚度 d , 牛顿环即牛顿环的半径可用下式表示:
 $r_n^2 = (n-1) \cdot R \cdot \lambda$, $n=1, 2, 3, \dots$ (2)
 平玻璃与平玻璃接触点的接触点受到挤压, 修正公式(2) $d = \frac{d^2}{2R} - d_0$, $r_n^2 = R \cdot d_n$ (3)
 对于各环的半径如下 $r_n^2 = (n-1) \cdot R \cdot \lambda + 2R \cdot d_0$, $n=2, 3, 4, \dots$ (4)

原始数据记录表

干涉级数(n)	r_n^2	r_{n+1}^2	r_{n+2}^2	r_{n+3}^2	r_{n+4}^2	r_{n+5}^2	r_{n+6}^2	r_{n+7}^2	r_{n+8}^2
1	2.67245	2.12011	1.66156	1.21324	0.76478	0.31924	0.17171	0.20000	0.22828
2	437.02	435.15	433.83						

表1: $\lambda = 3.913$ nm

干涉级数	半径宽度(微米)	L/λ (微米)
1	437.02	0.008953854
2	435.15	0.008992302
3	433.83	0.009026992
平均值		0.0089906

物理实验中心
http://pec.sjtu.edu.cn

上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

实验报告

姓名: [redacted] 学号: [redacted]
同组姓名: [redacted]

用CCD成像系统观测牛顿环

Apr. 2nd

实验目的

1. 进一步熟悉光路调整的基础上, 用透射光观察与干涉现象——牛顿环。
2. 学习利用干涉现象观测平凸透镜的曲率半径。

报告分析致认真, 组内意见有的数字

实验原理

牛顿环仪是由一块曲率半径较大的平凸透镜玻璃片构成, 平玻璃表面与透镜玻璃面, 间形成一楔形的空气间隙, 用平行光照射牛顿环仪时, 在玻璃与平玻璃接触点周围形成了同心圆干涉环。
(图1)

在图1中, 一束光从右面照射在距离 d 的空气层处, 部分光不存在透镜的右边界反射回去, 部分光通过透镜, 在透镜的右边界有部分光反射回来, 由于此处是从折射率大的平玻璃面反射, 所以反射光有一个相位变化, 部分光 T_1 光从空气层在边界反射回来, 然后又以光程的右边界反射回来, 每一次反射均有一次相位变化(半波损失), 此图是透射光 T_2 和 T_1 形成干涉干涉的原理, T_1 和 T_2 的光程差 $d = \lambda/2 + 2n \cdot d$ (1), 形成干涉的条件: $d = n \cdot \lambda$ ($n=1, 2, 3, \dots$), 即 $d = (n-1) \cdot \lambda/2$, 当 d 是平凸透镜相接触即 $d=0$, 中心形成亮纹。
(图2)

对于平凸透镜和平玻璃所形成的光楔, 光楔的厚度取决于平凸透镜与平玻璃接触点的曲率, 假设 r 取决于平凸透镜的曲率半径, 下面的图就表示了这样的关系。

物理实验中心

上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

实验报告

姓名: [redacted] 学号: [redacted]
同组姓名: [redacted]

用CCD成像系统观测牛顿环

实验目的

1. 进一步熟悉光路调整的基础上, 用透射光观察与干涉现象——牛顿环。
2. 学习利用干涉现象观测平凸透镜的曲率半径。

报告分析致认真, 组内意见有的数字

实验原理

牛顿环仪是由一块曲率半径较大的平凸透镜玻璃片构成, 平玻璃表面与透镜玻璃面, 间形成一楔形的空气间隙, 用平行光照射牛顿环仪时, 在玻璃与平玻璃接触点周围形成了同心圆干涉环。
(图1)

在图1中, 一束光从右面照射在距离 d 的空气层处, 部分光不存在透镜的右边界反射回去, 部分光通过透镜, 在透镜的右边界有部分光反射回来, 由于此处是从折射率大的平玻璃面反射, 所以反射光有一个相位变化, 部分光 T_1 光从空气层在边界反射回来, 然后又以光程的右边界反射回来, 每一次反射均有一次相位变化(半波损失), 此图是透射光 T_2 和 T_1 形成干涉干涉的原理, T_1 和 T_2 的光程差 $d = \lambda/2 + 2n \cdot d$ (1), 形成干涉的条件: $d = n \cdot \lambda$ ($n=1, 2, 3, \dots$), 即 $d = (n-1) \cdot \lambda/2$, 当 d 是平凸透镜相接触即 $d=0$, 中心形成亮纹。
(图2)

对于平凸透镜和平玻璃所形成的光楔, 光楔的厚度取决于平凸透镜与平玻璃接触点的曲率, 假设 r 取决于平凸透镜的曲率半径, 下面的图就表示了这样的关系。

实验数据记录、实验结果计算

表一:

干涉级数(n)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
牛顿环半径 r_n (微米)	182.47	197.37	213.24	227.73	242.14	256.07	267.14	278.66	289.85	301.01
牛顿环 r_n^2 (微米)	3.3300	3.9000	4.5500	5.1700	5.8500	6.5000	7.2000	7.9000	8.6000	9.3000
r_n^2	2.87395	3.12011	3.64546	4.15364	4.69614	5.21924	5.71871	6.22066	6.72066	7.20721

表二:

定标次数	装置宽度(微米)	L/λ (微米)
1	437.02	0.008953854
2	435.15	0.008992302
3	433.83	0.009026992
平均值		0.0089906

由表二数据可求出 λ 与 r 的关系, 即 $\lambda = 3.913$ nm, 由 $\lambda/4$, $\lambda/3$, $\lambda/2$ 的平均值得 $\lambda/2 \approx 0.00895$ nm。

由表一数据可求出牛顿环半径 r_n (微米), 由表二可得 r_n^2 与 r_n 的关系。

然后使用 Origin 作出 r_n^2 关于干涉级数 n 的图像, 若对图像点进行线性拟合, 拟合出一条直线, 可得到拟合方程: $L = 0.00714n + 0.51081$, 且 $R = 9792$, 接近于 1×10^4 微米, 误差为 2.1% , $\lambda = 0.51081$ nm。

附图: Origin 作拟合曲线 (见下页)

物理实验中心

预习报告

实验报告-1

实验报告-2



实验预习报告、实验报告案例

由公式(1)得:
 $R\lambda(m) + R\lambda d = R\lambda$ 可知
 $(m) = R\lambda n + R\lambda d - R\lambda \Rightarrow$
 $R = 270 \mu m, R\lambda = 0.1 \mu m$
 $d = 2.36 \times 10^{-4} \text{ mm}$

干涉条纹级数 (n)	条纹间距 (mm)
5	2.8
7	3.2
8	3.6
9	4.0
10	4.4
11	4.8
12	5.2
13	5.6
14	6.0
15	6.4

对实验结果中的现象或问题进行分析、讨论

【1】思考题:
 1. 对于圆、半狭缝装置, 反射式干涉环与透射式干涉环有什么异同?
 答: 相同处: 两者原理相同, 均是利用菲涅尔半圆镜在接触点附近形成的楔形空气实现干涉现象。
 不同处: 两者形成干涉条纹的分布, 从现象上看是两者暗条纹的位置正好相反, 从图中可以看出, 透射式的干涉条纹 $\Delta = 2d + 2\lambda$ 而反射式 $\Delta = 2d + \lambda$ 而干涉条纹的不同。

物理实验中心

附页

2. 公式中 $d = \frac{1}{2}d_0$ 的 d_0 表示什么意义?
 答: d_0 表示接触点在定标时产生干涉条纹的楔形部分。
 3. 用白光照射时, 干涉环的反射条纹与单色光有什么不同?
 答: 易知不同光的波长是不同的, 而形成的干涉条件为 $2d = (n + \frac{1}{2})\lambda$, 而不同, 因此实际多种入射的光 λ 自己干涉后叠加在一起, 在肉眼不易显示干涉图样。
 会有利多种颜色导致

【2】误差分析:
 ① 整个光路理论应保持每水平, 左右无偏差, 但在实际实验中不易做到完全水平一致。
 ② 单缝与半圆镜不完全平行, 但问题不影响图像清晰, 仍影响取圆半径。
 ③ 图像在黑白亮暗没有明显分界线, 干涉条纹不清晰, 不易找到最亮处。
 ④ 在找圆时, 如果三个点过于水平, 则会使得干涉条纹太淡, 反之, 如果过于弯曲, 则主值干涉条纹太淡。
 ⑤ 由于在找圆时, 图像不清晰, 导致测量误差较大。
 ⑥ 定标时, 边缘不易完全重合, 导致一定误差, 因此误差由多次测量中减小很多。
 ⑦ 由于定标时, 半圆镜都有不同厚度, 因此两者 d_0 不完全相等。

【2】注意事项:
 ① 在调半圆镜时, 高倍时时要认真调整整个光路致干涉条纹, 否则显示暗变化。
 ② 定标时, 边缘不易完全重合, 导致一定误差, 因此误差由多次测量中减小很多。
 ③ 在取圆时, 边缘不易完全重合, 导致一定误差, 因此误差由多次测量中减小很多。

【4】其它
 感谢助教老师的细心教导, 感谢同组成员是创造合作。在此次实验中学习了干涉环的原理, 熟悉了光路调整, 达到了实验要求的目的。
 【2】半圆镜, 狭缝条件。
 (附于下页)

物理实验中心

附图1: 半圆环照片

附图2: 定标狭缝像

物理实验中心

实验报告-3

实验报告-4

实验报告-5

抄袭处理：抄袭者和提供抄袭者均0分处理。

0分 0分





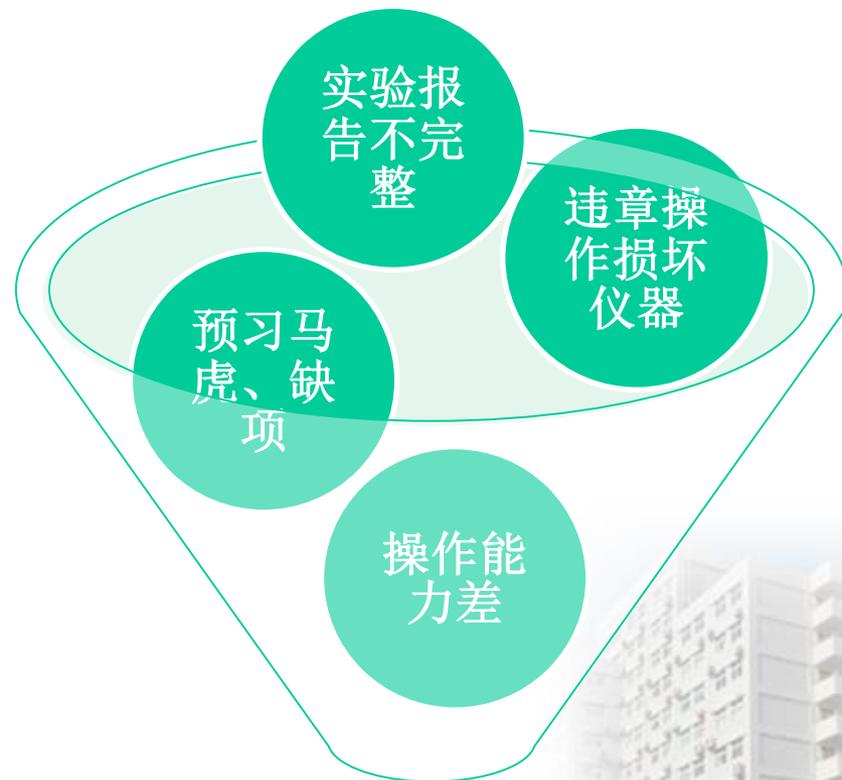
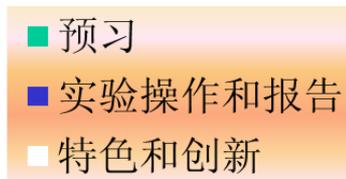
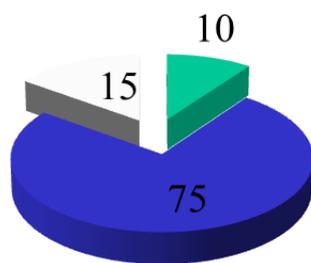
教学环节中应注意

1. 学生上课必须准时，10分钟内教师酌情扣分，迟到10分钟以上则按缺课处理。
2. 未完成预习和预习报告者，教师有权停止其实验或成绩降档！
3. 进实验室做实验，其实验者序号必须与仪器组号一一对应！离开实验室前，数据记录须经教师审阅签名。
4. 实验报告（含预习报告）必须在**一周内**交至物理实验楼三楼的**教师信箱（按图章标记）**！不然该实验按缺席处理。



物理实验成绩评分标准

满分 100



扣分

缺交实验报告，则该实验成绩计为0分。





成绩计算方法

1. 由于各个实验难易程度不同，同一实验不同上课教师的评分也略有差异。为公平起见，实验中心将以全体同学的所有成绩之平均分作为标准分，将每位教师名下所有学生成绩的平均分将调整至该标准分。
2. 为鼓励学生多进实验室学习，实验中心允许学生多选实验（一般安排在第14-16周）。中心将选取7个最好的实验成绩，加上绪论课成绩计算最终成绩，其中绪论课成绩的权重为10%。

以上内容可参阅教材“上课需知”



缺做实验处理方法

1. 凡缺席已选实验项目，该次实验按0分计算。
2. 由于生病缺做实验，可事后持正式病假单至物理实验楼308室办理消除0分手续。
3. 凡缺做实验造成实验0分的，可以在期末实验中心开放的时间段内补选实验，补选时间统一安排在下学期的最后几周（详见实验中心网站通知）。若不补选则最终成绩仍将按所得实验成绩累计分除以7计算。
4. 由于缺做实验（含多选实验）造成一个0分，补选后最终成绩将降一档（5分）；若有两个0分，最终成绩降两档；以后依次类推。

例：同学一，选了7个实验，完成了6个，没有补选，7个成绩（含一个0分）除以7即为实验平均成绩。80 → 68分

同学二，选了7个实验，同样完成了6个，但补选了一个实验，7个成绩除以7即为实验平均成绩，但最终成绩降一档。80 → 75分

退课方法

- 由于突发事件而影响实验课的出席，则学生可课前自行上选课网退课，**但退课必须在上该实验课的前一天午夜24点前网上提交！**

例：我想退3月7日的课，那就必须在3月6日24点前上网退课。

- 由于**特殊突发事件**而影响**当天**实验课的出席，则学生可持院系盖章的请假条，于**课前**教务办公时间至物理实验楼教务办公室办理退课手续。



实验成绩确认查询

请将所有实验报告保存到**学期结束**。

每个实验项目完成二周后，可查询该实验项目的成绩。在第**17周周三**前，请每位同学上网查对自己所有的实验成绩，如有误则请带好该次实验的实验报告至教务办公室登记更正。实验中心将根据你已确认过的成绩计算你的最终成绩，请务必上网确认你的各实验成绩。

成绩一旦确定并发出将不再更改！





温馨提醒:

下午上课时间的区别:

周一、四 下午: **13:00**开始

晚上: **18:00**开始

周五 下午: **14:00**开始

晚上: **18:00**开始



物理楼和物理实验楼



上海交通大学
Shanghai Jiao Tong University

主楼(高楼)
物理楼



辅楼(矮楼)
物理实验楼

实验安排和主讲教师联系方式



实验项目	实验地点	主讲教师	办公室电话	办公室	邮箱
霍耳	实验楼-204	张月衡	34203751	物理楼903B	yuehzhang@sjtu.edu.cn
连续信号和瞬态信号	实验楼-207	叶曦	54742906*816	实验楼318	xye@sjtu.edu.cn
静物全息	实验楼-211	郑君	34204629	激光楼304	jzheng@sjtu.edu.cn
声速的测量	实验楼-201	李向亭	54742906*840	实验楼308	xtli@sjtu.edu.cn
粘滞系数	实验楼-309	陈燕萍	34204629	激光楼211	yanping.chen@sjtu.edu.cn
分光计	实验楼-205	李向亭	54742906*840	实验楼308	xtli@sjtu.edu.cn
薄透镜焦距的测量	实验楼-307	窦葳	54742906*824	实验楼314	douw@sjtu.edu.cn
简谐振动	实验楼-414	周红	54742906*829	实验楼316	hzhou@sjtu.edu.cn
电桥	实验楼-404	周红	54742906*829	实验楼316	hzhou@sjtu.edu.cn
光敏电阻	实验楼-407	钟晓霞	54745394	物理楼703A	xxzhong@sjtu.edu.cn
牛顿环	实验楼-409	潘葳	54743241	物理楼115	sjtushelwill@sjtu.edu.cn
温度传感器	实验楼-301	王锦辉	54742906*831	实验楼312	jhuiwang@sjtu.edu.cn
转动惯量	实验楼-405	王锦辉	54742906*831	实验楼312	jhuiwang@sjtu.edu.cn
太阳电池	实验楼-401	叶庆好	54742906*822	实验楼320	qhye@sjtu.edu.cn
电子荷质比	实验楼-406	窦葳	54742906*824	实验楼314	douw@sjtu.edu.cn

物理实验中心主页上有主讲教师的联系方式



- ◆ 使用可连上校园网的任何一台计算机均可上网选课，服务器24小时开通（系统维护时除外）。
- ◆ 物理实验中心机房提供上网选课。
物理实验中心机房 实验楼-304室
开放时间：
第2周：周四、周五：8:00—16:00；
第3周至第16周：与实验时间相同。



选课网址



上海交通大学
Shanghai Jiao Tong University

http://pec.sjtu.edu.cn

或

物理实验选课与管理系统 V2.0 基本物理实验

学生须知 2015年3月3日 2014-2015 学年第 2 学期 第 1 周 星期二

用户登录

学号/教师代号
密码

学生 教师

登录 注册

教学通知

更多教学通知 >>

其它通知

· 未注册的学生请单击“注册”按钮进行注册。
· 无法注册、忘记密码及其它相关事宜请到物理实验楼308室找徐老师。

第一普通物理实验室 The General Physics Laboratory 1

1906-2006 交通大学物理实验室成立100周年

物理实验中心介绍 | 网上选课系统 | 网上预习系统 | 物理实验交流 | 联系我们

Search

Quick Link

- 物理实验精品课程
- 物理实验网上选课
- 物理实验网上练习
- 物理实验教室分布
- 物理实验示范中心建设
- 物理实验中心选课系统

Open Learning System

- 基础训练物理实验
- 基本物理实验
- 综合设计性物理实验
- 理科物理实验
- 近代物理实验 I
- 近代物理实验 II

物理实验中心通告

- “大学物理实验（1）”网上定于3月9日开始接受注册，请全体同学及时上网注册。第1次课为实验绪论课，上课时间统一为3月11日（周三），详见本链接。实验课从第3周开始，选课网第一次开通时间3月12日12:30，3月18日前只对3-9周同学开放，3月18日12:30对全体同学开放。
- 上海市高等教育自学考试《物理实验（I）》培训时间为考试当天8:45，地点即为考试地点。
- 物理实验等论_数据处理下载
- 致远：物理实验（3）讲义
- “物理实验（3）”讲义工程

基础训练物理实验专题

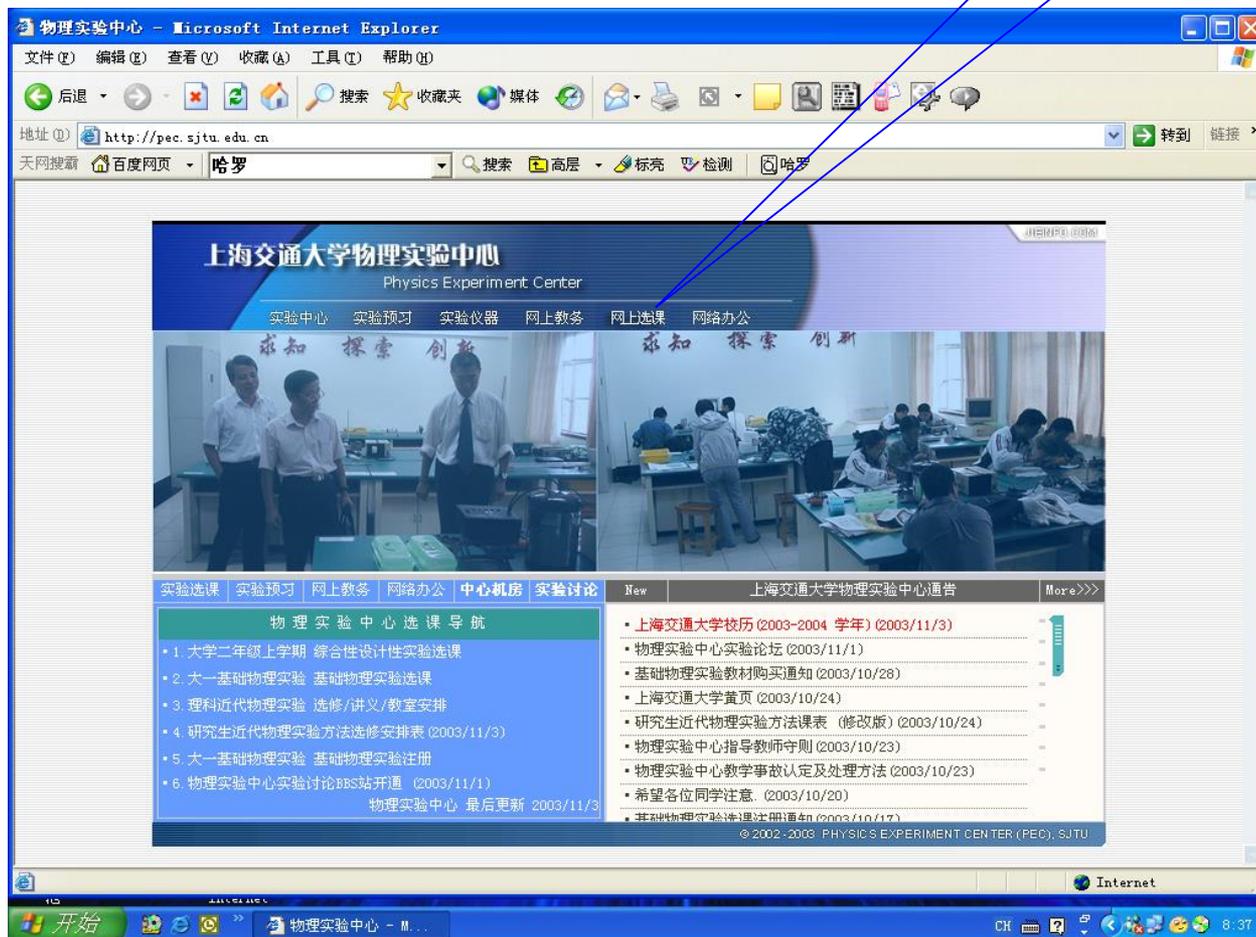
http://www.phycal.sjtu.edu.cn

选择“学生注册”，注册完后方可进入网上选课页面。

选课方式



网上选课





上海交通大学工科物理教学基地 - Microsoft Internet Explorer

地址 http://202.120.52.55/xk/base/index.asp

上海交通大学国家工科物理教学基地

www.phycal.sjtu.edu.cn

2004年2月17日 星期二

基地简介 | 教学信息中心 | 网络辅助教学 | CAI软件推广站

添加到收藏夹

首页 | 基础训练物理实验 | 物理实验—基本实验 | 物理实验—综合性设计性实验

现在是第1周

物理实验网络选课系统V3.0

基本物理实验选课须知

教师登陆

教师代号

密 码

登陆

通知

大一学生请注意：本学期的基本物理实验选课开放时间见本网站通知。

物理实验中心
2004-2-11 11:29:00

更多通知...

学生登陆

用户名

密 码

登陆 注册

登入

注册





选课系统开放时间

- 注册系统开设时间：

3月9日开始接受注册，请正确输入个人信息。
(为及时录入绪论作业成绩，10-16周上课的同学也务必在第4周前注册)，以便老师登记绪论课作业的成绩。

- 选课系统开通时间：

3月12日（周四）12:30开通选课系统。

- 选课系统第一次开通周次：第3—9周

- 前8周选课的量会对后8周同学开放，开放时间为**3月18日（周三）**，12:30。请后8周的同学关注。同样，后9周的选课开放也会优先后8周的同学。



**离做实验前一天的24点
后不可再取消选课！**



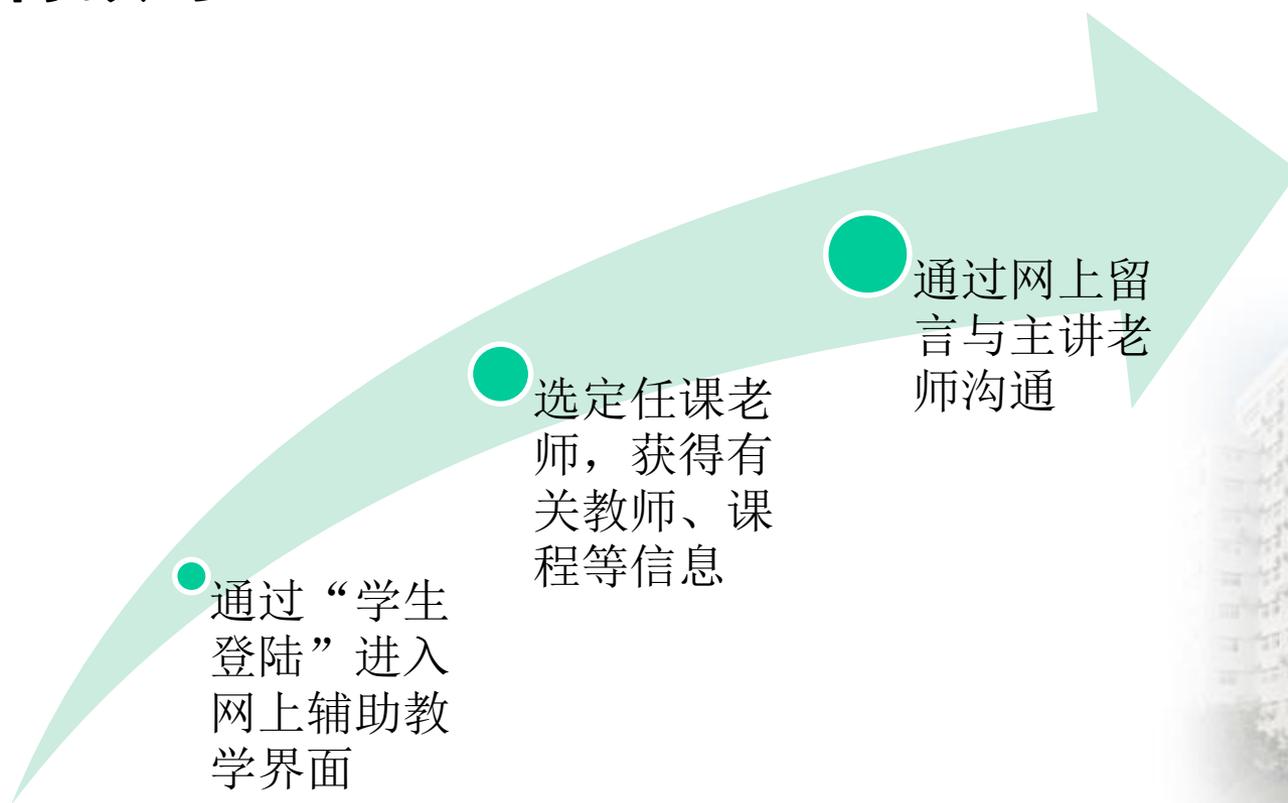


- ◆ 如发现自己的选课内容被破坏，请立即与系统管理员或教务管理员联系；
- ◆ **国定假日按学校规定调课；**
- ◆ 请随时注意网上通知。





- 通过网上预习系统，可以选择相应的实验项目进行预习。



网上预习系统和网络辅助教学



上海交通大学
Shanghai Jiao Tong University

好大学在线 CNMOOC

首页
Home

课程
Courses

院校
Universities

注册/登录

简体中文

新闻通告

课程状态

- 全部 3
- 预发布 0
- 即将开始 2
- 正在进行 1
- 已结束 0

授课语言

- 中文 3
- 英文 0

学科分类

- 哲学 0
- 经济学 0
- 法学 0
- 教育学 0

大学物理实验



大学物理实验 (II) 2015春

12天 15小时

2015/03/16开课 10周 10小时/周



叶庆好
上海交通大学



大学物理实验 I 2015春

12天 15小时

2015/03/16开课 8周 10小时/周



叶庆好
上海交通大学



大学物理实验 I 2014秋

2014-10-08 2014-12-02

8周 10小时/周



叶庆好
上海交通大学





实验报告交接方法

实验完成后**一周内**交报告

报告投至物理实验楼三楼教师信箱



教师收到报告后**一周内**批改好

报告投至物理实验楼三楼**各班班级**信箱



班长或课代表开启信箱取报告



教务老师介绍



上海交通大学

Shanghai Jiao Tong University



徐老师 **教务办公室：物理实验楼308**
办公时间：8:00—11:15； 13:30—16:00
联系电话：54742960



绪论作业

由于讲义更新，请用**2015年**讲义上的习题。具体题目也可上实验中心网站下载。选错题目按**0分**处理。

P18 2. (1) (3) (5)

3. (2)

7.

9. 也可采用毫米方格纸

由于只是一次性作业，绪论作业只需做在实验报告纸的附页上。

绪论课成绩实验将计入最终成绩，权重为10%。



1. 请各位同学注意：

请将绪论课作业于**3月18日**（下周三）前交至你班班长，否则该成绩将按0分处理；

2. 请各班班长注意：

各班班长请将你班的绪论课作业整理打包（中心提供的资料袋）后于**3月18前**交至实验楼三楼你班信箱。

3. 请各班班长注意：

3月11、12日至物理实验楼308室
领取你班信箱钥匙（押金：30元）



本教案已放在物理实验中心
网站的绪论专题上。





收获在于努力！

