《大学物理实验》
绪 论

物理实验教学中心

2024.9

实验室安全

实验安全

实验室主要危害种类：

1、人为因素：不安全行为等

2、化学类：火灾、爆炸、腐蚀、中毒等

3、物理类：强光、强电、辐射等

4、生物类：细菌、微生物等

5、环境类：实验室废弃物等

6、设备类：高温、高压、强场等

7、用电、压力容器：触电、火灾、爆炸

安全最危险的因素是“人”！

高校实验室安全事故案例

- 2021年10月24日南京航天航空大学将军路校区材料科学与技术学院材料实验室发生爆燃，致2死9伤。

高校实验室安全事故案例

- 2018年12月26日北京交通大学市政与环境工程实验室发生爆炸燃烧，事故造成3人死亡。

该起事故原因为镁粉粉尘云爆炸，爆炸引起周边镁粉和其他可燃物燃烧，造成现场3名学生烧死。

事故调查组同时认定，北京交通大学有关人员违规开展试验、冒险作业；违规购买、违法储存危险化学品；对实验室和科研项目安全管理不到位。

高校实验室安全事故案例

- 2010年5月26日，昆明理工大学莲华校区矿业大楼6楼一实验室突发火情。事故原因是学生做完实验出门时忘记关电路引发火灾，所幸无人受伤。

高校实验室安全事故案例

- 2009年10月23日下午1时10分许，北京理工大学5号教学楼901教学实验室，化工与环境学院一名老师和两名学生，观看两名技术人员调试新购厌氧培养箱设备时，因为违规操作，误灌氢气引发爆炸，5名师生受伤。

- 2005年初，南京某高校电工电子实验室在教学实验过程中，由于师生操作不当，一名学生触电身亡；2010年5月25日，浙江工业大学实验室爆炸起火，原因为学生独自一人做实验，因操作不慎将化学药品石油醚滴落到地上，引起自燃。

大部分安全事故是人为失误、疏忽和不遵守规定造成的！

进入实验室注意事项

➢禁止饮食，禁止抽烟。

➢禁止在实验室里奔跑或大声喧哗，妨碍或分散别人注意力。

➢禁止做一些未经允许的实验。

➢实验前一定要认真阅读相关文献，对待所有的仪器一定要小心、仔细。

➢一定要熟悉实验室的安全程序。

➢不用潮湿的手接触电器。实验时，应先连接好电路后才接通电源，实验结束时先切断电源再拆线路。

➢遇到疑问一定要问实验老师，发现不安全细节一定要报告实验老师。

请务必记住：

事故的制造者不一定是事故的受害者，他人不安全行为的后果可能由你来承受！

所以，为了你自己的安全，请及时提醒、纠正或报告你发现的不安全行为！

实验安全测试(需在学在浙大上完成）：
必须通过才可以参加实验课！

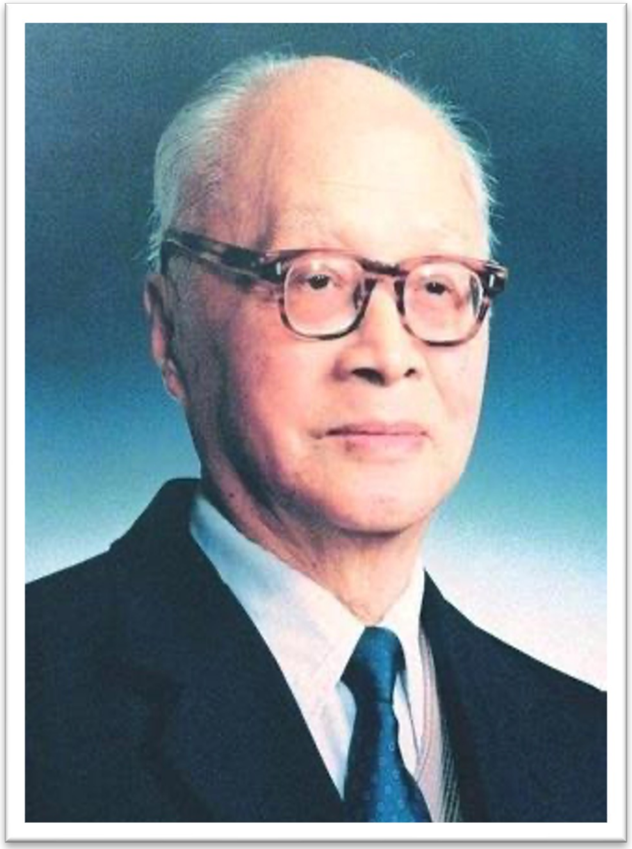
主要内容

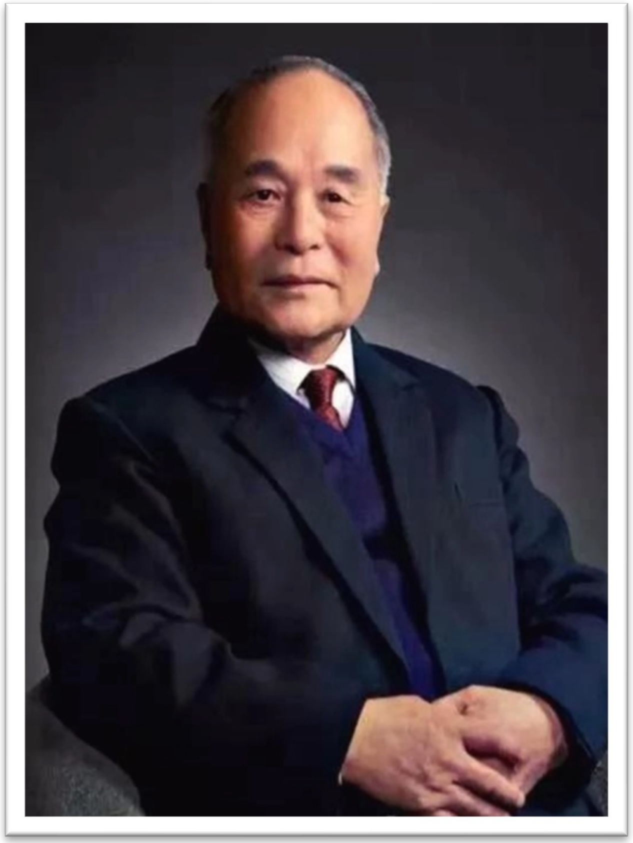
一、物理实验的作用
二、实验测量与误差分布
三、误差与不确定度
四、有效数字与实验数据处理
五、课程要求

创造力来源于实验实践

争做‘王淦昌’式的好老师，
培养‘程开甲’式卓越学子。

物理学院理念





王淦昌

王淦昌，（1907年5月28日—1998年12月10日），中共党员。“两弹一星功勋奖章”获得者。 王淦昌参与了中国原子弹、氢弹原理突破及核武器研制的试验研究和组织领导，是中国核武器研制的主要奠基人之一。

把科学的星辰留在浙大人心中

- 1937年11月，日军侵略迫使浙大师生开始向西流亡。一年前，王淦昌受竺可桢校长邀请到浙江大学物理系任教，成为学校最年轻的教授。之后14年他与学校一同在危难中颠沛求存，却栽育出一朵朵惊艳世界的科学之花。
- 王淦昌是20世纪实验物理学三大女杰之一的迈特内教授唯一的中国学生。在德国柏林大学，王淦昌学习了最新的物理学理论与实验技巧，并展示出非凡的科学见解和宽阔的实验思路。但他却毅然选择回到苦难深重的祖国。
- 王淦昌随浙大途径浙江建德，江西泰和、广西宜山等地。最终在遵义湄潭这座小山城里，王淦昌获得了宝贵的科研时间。双修寺是王淦昌每天都要去的实验室，虽称实验楼，却没有实验设施，连最基本的电都没有。在如此简陋的环境里，他制成的荧光粉——磷光硫化锌，却为国家填补了空白。
- 艰苦的条件下，王淦昌单凭大脑推算写出了论文《关于探测中微子的建议》，中微子是当时最具挑战性的物理学界难题。论文1941年在美国《物理学报》发表。次年，美国学者阿伦教授按照论文中的建议成功完成了Be7的K电子实验，命名为“王淦昌•阿伦实验”，是国际物理学界1942年最重要的成就之一。后来，美国科学家奥本•海默教授根据这个实验制造出了美国第一颗原子弹。美国科学促进协会在1947年发行纪念刊《近百年来科学之进步》，王淦昌被列为贡献人之一。
- 发现中微子后，王淦昌又着手寻找宇宙线粒子。1943年写出了论文《关于宇宙线粒子的一种新实验方法》。后来英国物理学家鲍威尔用此法发现了π介子，获得了1950年度的诺贝尔奖。王淦昌的一生多次与诺贝尔奖失之交臂，但他未间断过科学研究。
- 由于师资紧缺，王淦昌除了教授热学和近代物理外，还为化学系三年级学生开设了物理化学课。1945年，日本广岛原子弹爆炸后，王淦昌给学生讲解原子弹的原理，吸引了更多学生转到物理系。诺贝尔奖获得者李政道曾是当时的浙大学子，他后来写道：“直到现在，我还能记得曾有过的讨论，以及他们激起的我对物理的热情。”

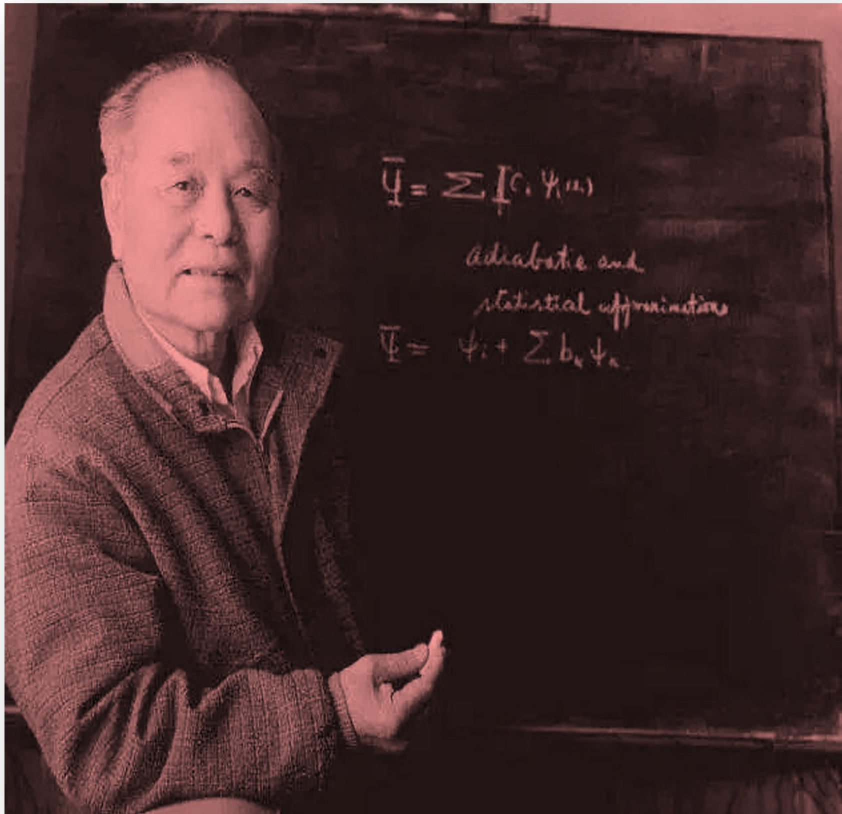
隐姓埋名17载，以身许国铸科技长剑

- 1950到1960的十年间，王淦昌先后在北京中国科学院原子能所和苏联杜布纳联合原子核研究所任任职。朝鲜战场上，他前去探测美军是否使用原子武器和投掷放射性物质；在苏联，他领导的研究小组首次成功发现了一种反物质反西格马负超子存在的证据。
- 1960年12月，王淦昌回到祖国。4个月后，二机部部长刘杰和时任副部长兼原子能研究所所长钱三强向王淦昌传达了中央要求自力更生发展核武器的指示和周恩来总理的口信。王淦昌便坚定地说：“我愿以身许国！” 从此，在世界物理学界鼎鼎大名的王淦昌仿佛消失了。他的名字变成了“王京”；他放弃了功成名就的基本粒子研究，改方向为他不熟悉但国家迫切需要的核应用研究；……1964年10月16日，中国成功爆炸第一颗原子弹。1967年6月17日，中国成功爆炸第一颗氢弹。
- 1978年，王淦昌调回北京任核工业部副部长兼原子能研究所所长。人们才知道，核武器研究基地那个沉默寡言的“王京”就是王淦昌！同年，获准公开身份的王淦昌如愿加入了中国共产党。
- 70年代末，原子能研究所及时开展电子束和激光约束核聚变基础性研究，为通过受控核聚变获取核能做出了开创性贡献。1982年，王淦昌因发现反西格马负超子荣获国家自然科学奖一等奖。1985年，他因核武器研制、试验方面的工作，同时荣获2项国家科技进步奖特等奖。1986年3月，王淦昌与王大珩、陈芳允、杨嘉墀联名向中央提出了《关于跟踪研究外国战略性高技术发展的建议》，并由此催生了举世瞩目的战略性高科技发展计划——“863”计划，为中国高技术发展开创了新局面。
- 1999年9月，党中央、国务院、中央军委召开大会，对当年为研制“两弹一星”作出贡献的23位科技专家予以表彰，追授王淦昌“两弹一星功勋奖章”。2003年，国际小行星命名委员会把一颗永久编号为14558的小行星命名“王淦昌星”。
- 2017年，浙大物理系提出“在教师中树立起成为‘王淦昌’式的好老师的职业理想，把培养‘程开甲’式的卓越学子凝练成为我们的教育教学最高目标”，并在全体党员大会上正式通过。在此理念指导下，依托学院拔尖创新人才培养的探索，以期造就更多的国际一流人才和科学家。

程开甲

六份荣誉

- 中国科学院院士
- “两弹一星”功勋奖章
- 国家最高科学技术奖获得者
- “八一”勋章获得者
- “改革先锋”称号
- “人民科学家”国家荣誉称号



- **半生埋名，以身许国铸核盾**
- 程开甲，中共党员，中国科学院院士。他隐姓埋名40年，一生为国铸核盾，先后参与和主持首次原子弹、氢弹试验，他是以身许党许国的时代楷模。荣获“八一勋章”、“两弹一星”功勋奖章和国家最高科学技术奖。
- 1960年，一纸命令将程开甲调入北京，加入到我国核武器研究的队伍。原子弹研制初期，程开甲被任命为核武器研究所副所长，分管材料状态方程的理论研究和爆轰物理研究，为原子弹的研制做出了贡献。他第一个采用合理的TFD模型估算出原子弹爆炸时弹心的压力和温度，为原子弹的总体力学计算提供了依据。

- **生命不息 创新不已**
- 1984年程开甲离开核武器试验基地，他的科研工作转入国防科技发展战略研究，开启了他学术研究的新时期。
- 20世纪80年代，程开甲提出必须提高我国战略武器抗辐射能力的思想，并亲自担任该研究方向的专业组组长，开创了抗辐射加固技术研究新领域。另一方面，他重新开始基础研究课题，他进一步发展、完善了“程—玻恩”超导电性双带理论。他提出并建立了系统的“TFDC（托马斯—费米—狄拉克—程开甲）”电子理论。为材料科学的发展提出了新的研究思想与方法。

- **努力不懈 不老常青**
- 程开甲是中国科学院资深院士。他的研究成果，荣获国家科技进步奖特等奖、一等奖，国家发明奖二等奖和全国科学大会奖、何梁何利基金技术进步奖等多项奖励。1999年，被党中央、国务院、中央军委授予“两弹一星”功勋奖章。2013年，党中央、国务院为他颁发了国家最高科学技术奖。
- 对于这些崇高的荣誉，程开甲有他自己的诠释。他说：“我只是代表，功劳是大家的。功勋奖章是对‘两弹一星’精神的肯定，最高科学技术奖是对整个核武器事业和从事核武器事业团队的肯定。我们的核试验是研究所、基地所有参加者，有名的、无名的英雄们在弯弯曲曲的道路上一步一个脚印去完成的。”

二、实验测量与误差分布

二、实验测量与误差分布

1. 关于测量

测量的四要素： 被测对象、测量程序、测量准确度和计量单位

直接测量： 所要测量的量不必将实测的量经过任何函数关系的计算而直接得到。

间接测量： 通过欲测量的量与直接实测的量之间的已知函数关系，经过计算间接得到欲测量的量。

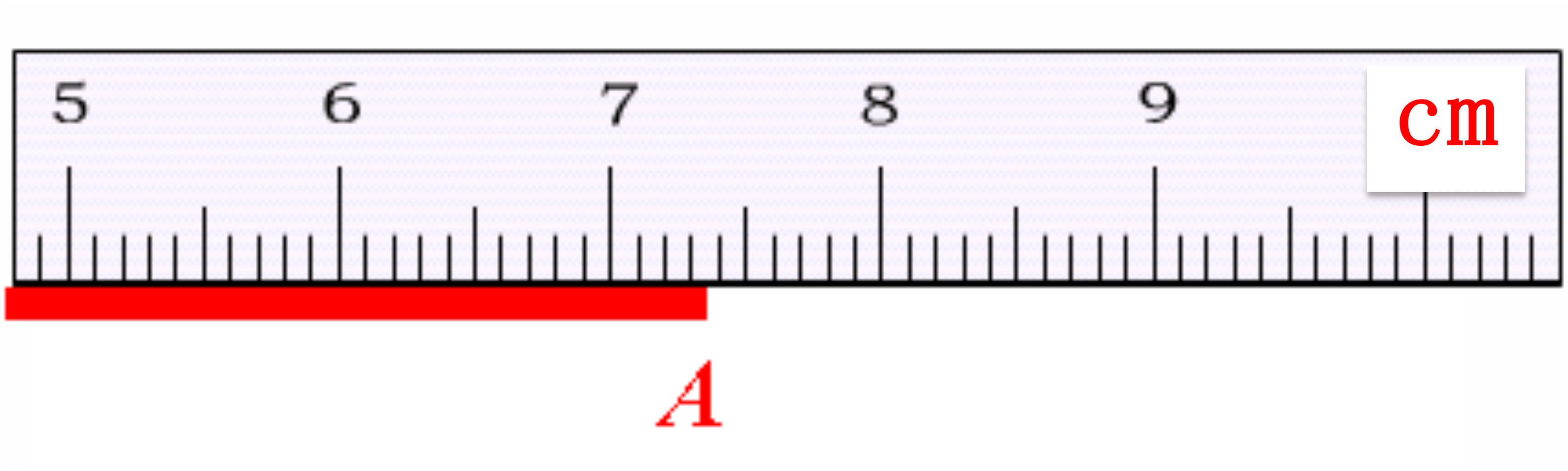
2.有效位数

可靠数字：通过直读获得的准确数字

存疑数字：通过估读得到的数字

有效数字和有效位数：测量值的可靠数加上一位存疑数的全部数字称为有效数字。其总位数称为该测量的有效位数。

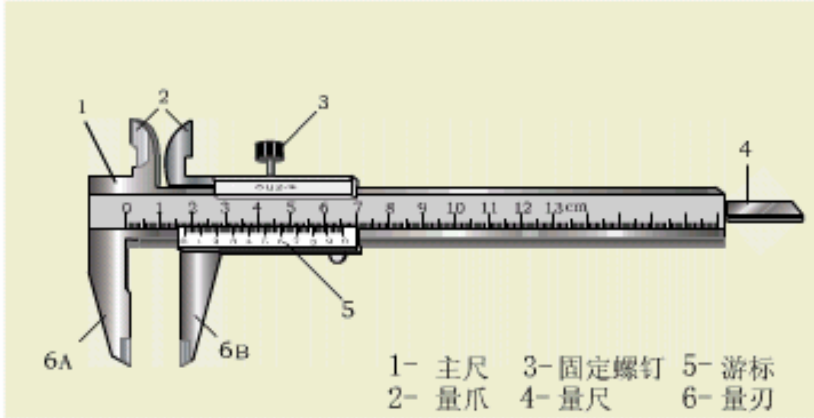
钢板尺测量A点位置



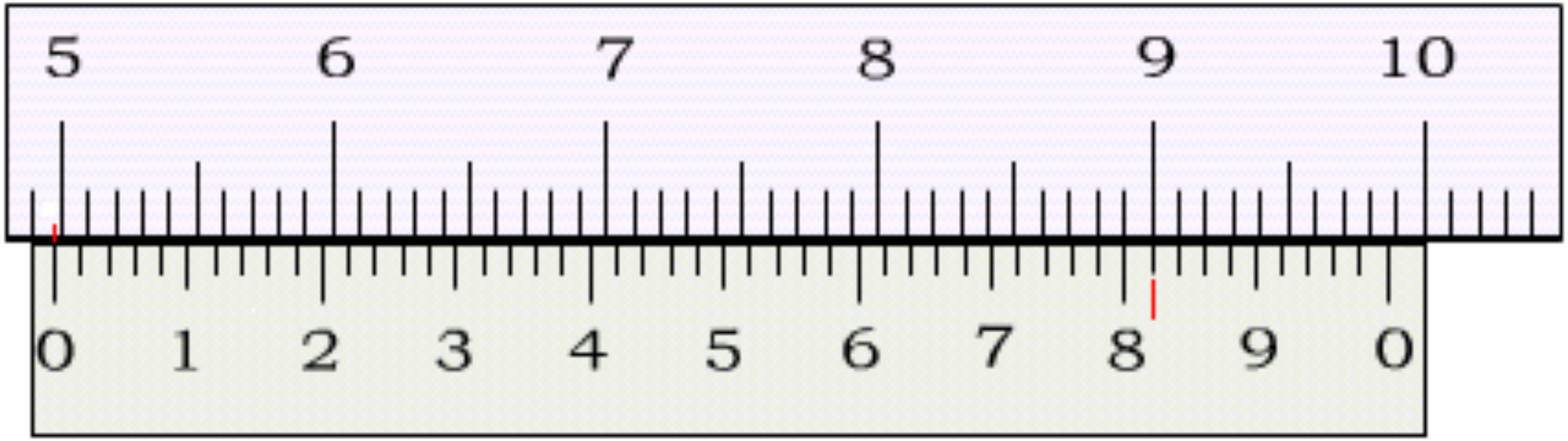
可靠数字：7.3
存疑数字：0.05
有效数字：7.35 cm
有效位数：3 位

游标卡尺

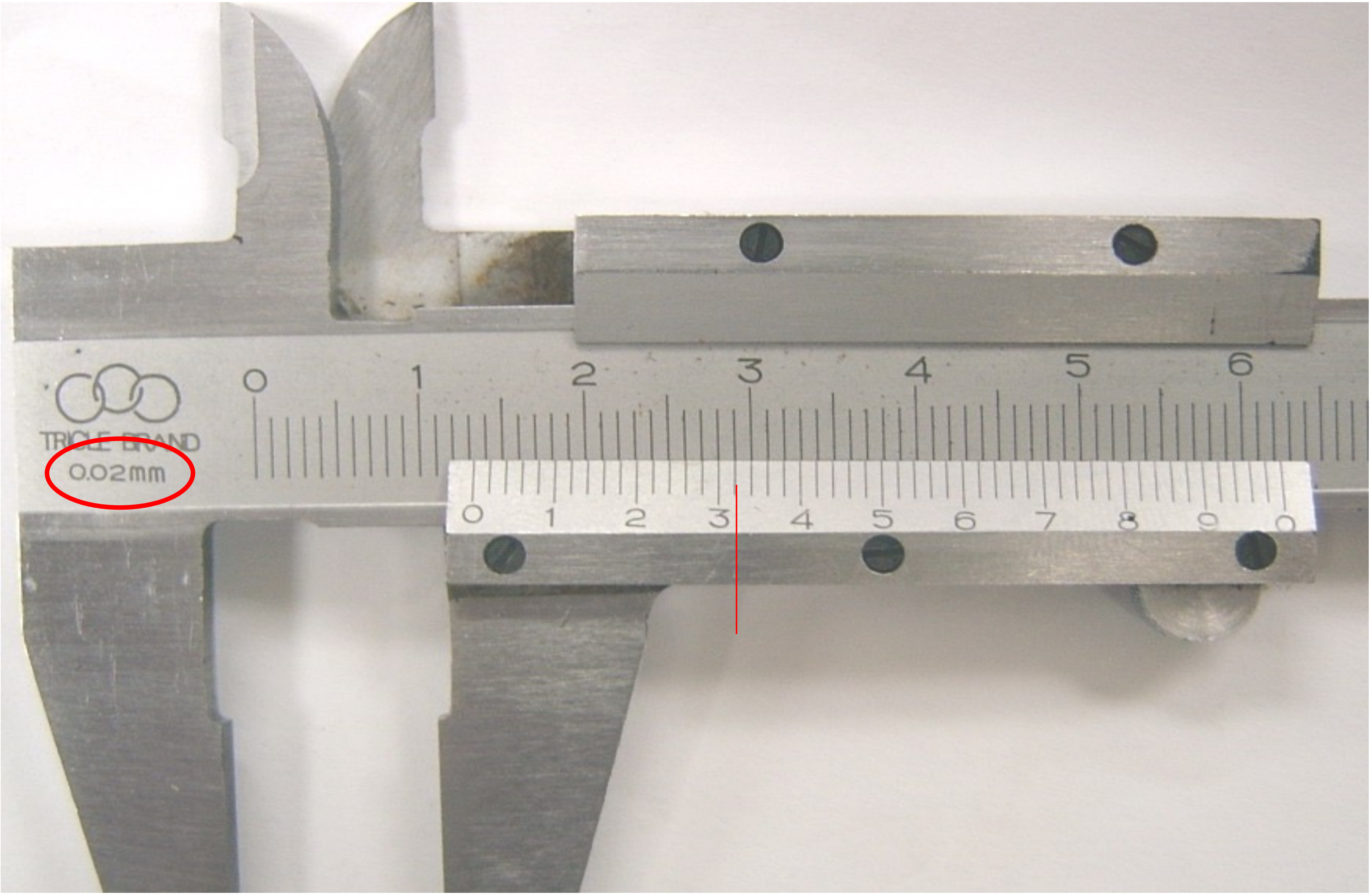
（三种规格0.02 mm,0.05 mm,0.1 mm）



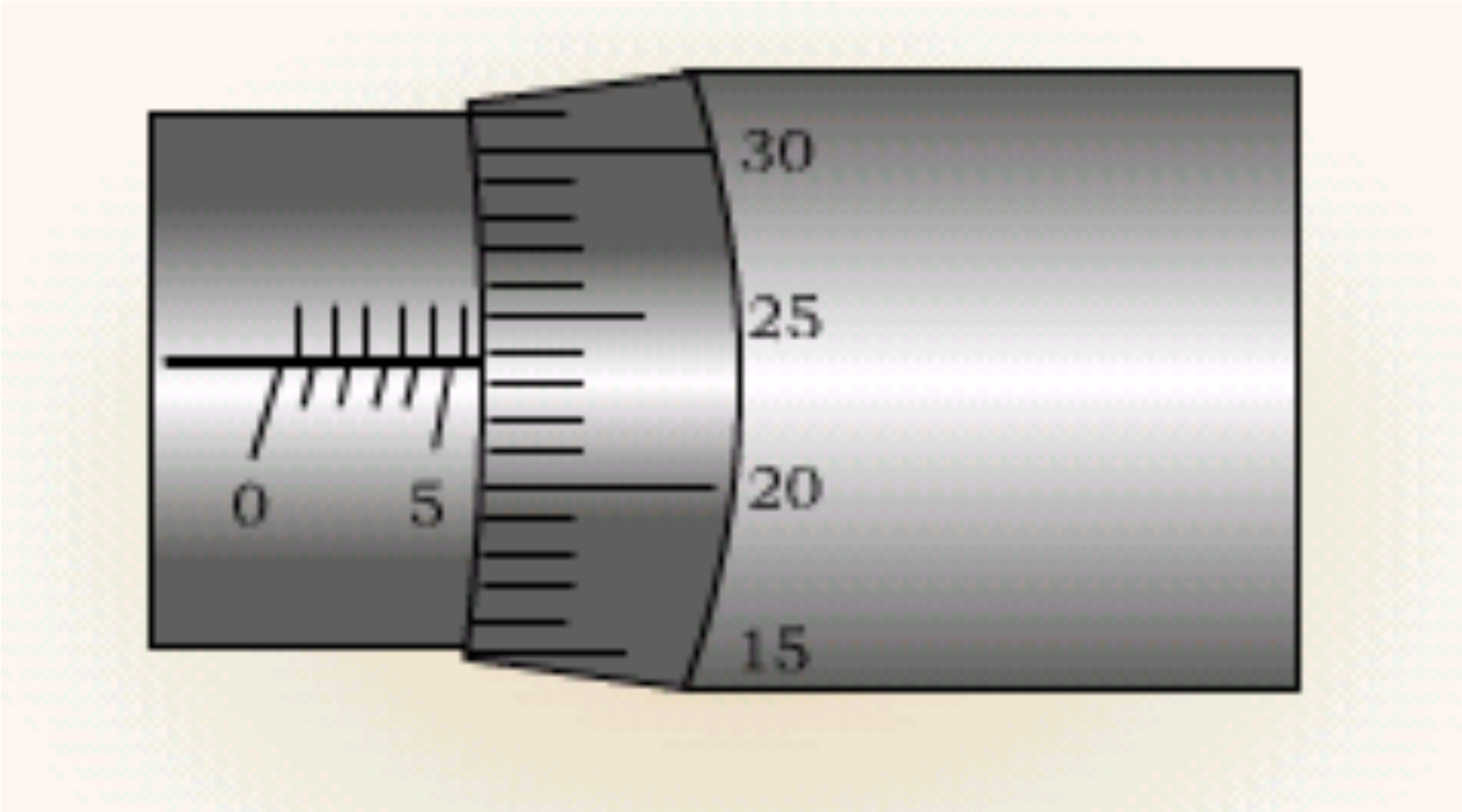
如：0.02 mm:主尺49 mm等于副尺寸50格



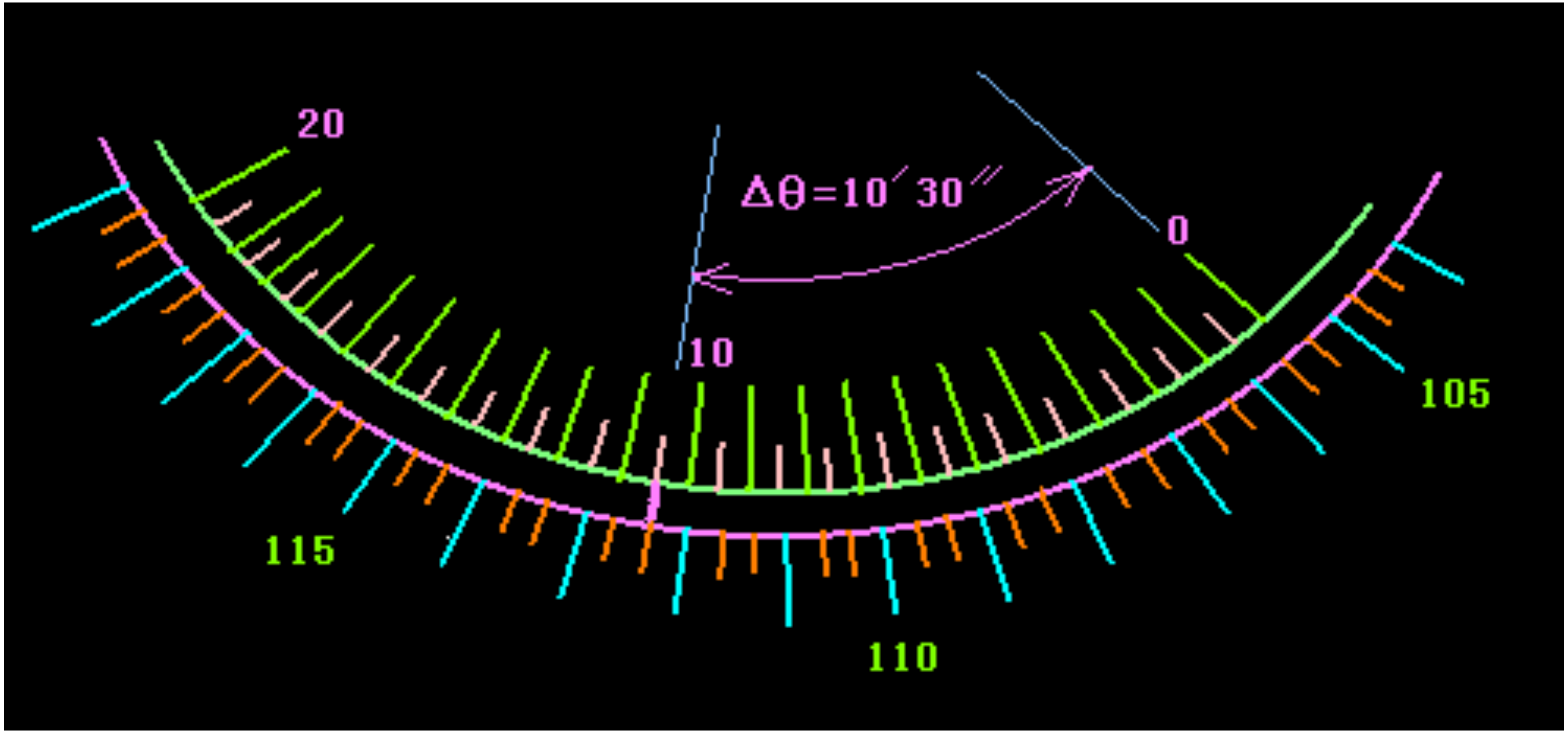
49.82 mm



$$L = 13\ \text{mm} + 0.32\ \text{mm} = 13.32\ \text{mm}$$



5.5 mm+0.237 mm=5.737 mm



39个20′角标---- 40个游标刻度

105° 20′+ 10′30′′ =105° 30′30′′

3. 关于误差

任何测量都存在误差（注意误差是指与真值比较）

误差的定义：误差 ＝ 测量值－真值

误差特点：普遍存在； 是小量。

由于真值常常未知，无法得到误差值。

误差表示

（1）绝对误差= |测量结果-被测量的真值|

（2）相对误差（百分误差）：

$$E = \frac{|测量值 - 真值|}{真值} \times 100\%$$

（3）标准误差（标准差）：

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} |绝对误差|^2}$$

4. 误差分类

名称	主要来源	特点	处理	举例
系统误差 (装置误差)	装置本身	可预知，不可避免	见下表	见下表
随机误差 (偶然误差)	环境偶然性	是无规则涨落，不可避免。存在一定的统计规律（一般服从正态分布）	可通过多次测量来减小	测一本书的厚度（涨落）。
粗大误差 (过失误差)	粗心大意	可避免	尽量避免	电表没调零就用。 读错写错数据。

4. 误差分类

名称	主要来源	特点	处理	举例
系统误差(装置误差)	装置本身	可预知，不可避免	见下表	见下表
随机误差(偶然误差)	环境偶然性	是无规则涨落，不可避免。存在一定的统计规律（一般服从正态分布）	可通过多次测量来减小	测一本书的厚度（涨落）。
粗大误差(过失误差)	粗心大意	可避免	尽量避免	电表没调零就用。读错写错数据。

系统误差	定义	处理	举例
已定系统误差	在同等条件下，对同一个待测量进行多次测量，测量值和真值的偏离总是相同的那部分误差分量	必须修正。	电表、读数显微镜的零位误差（仪器本身因素）
未定系统误差	已知存在于某个范围，而不知具体数值的系统误差	后面B类不确定度计算会提到。	仪器的允差(示值误差)

部分实验仪器的允差(示值误差)举例

仪器名称	量程	分度值	允差(示值误差)
钢板尺	1000 mm	1 mm	±0.20 mm
钢板尺	500 mm	1 mm	±0.15 mm
钢板尺	150 mm	1 mm	±0.10 mm
游标卡尺	125 mm	0.02 mm	±0.02 mm
螺旋测微器(1级)	25 mm	0.01 mm	±0.004 mm
电表（0.5级）			0.5%×量程
机械式停表		0.1 s	0.1 s
数字毫秒表		0.1 s	0.1 s
物理天平	500 g	0.05 g	0.08 g(接近满量程)
普通温度计	0—100 ℃		1 ℃
工业温度计	0—150 ℃		0.5 ℃

例题

$$\Delta_{仪} = 量程 \times 级别\%$$

1. 求电压表仪器误差。电压表量程100 mV，等级0.5。

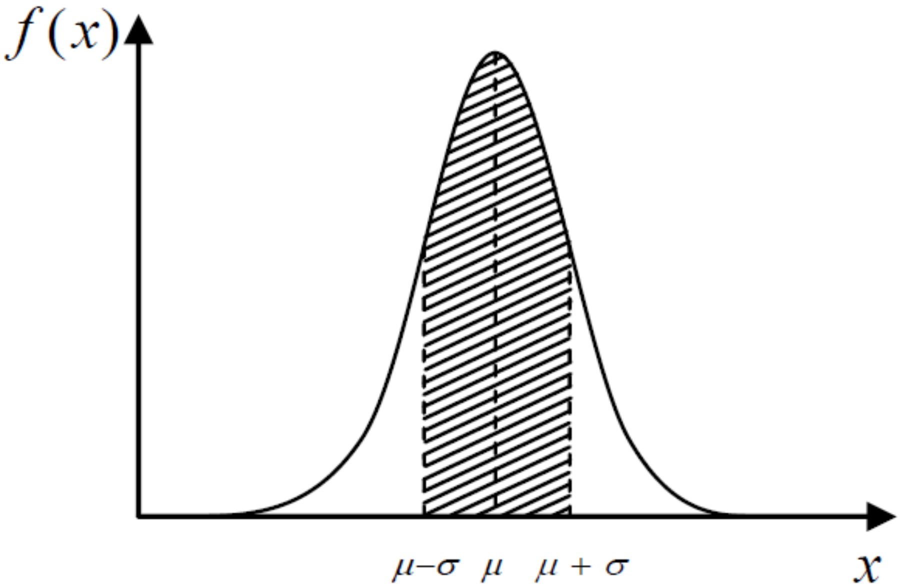
$$\Delta V = 100\ \text{mV} \times 0.5\% = 0.5\ \text{mV}$$

2. 测1.5V电压，要求测量结果相对误差不大于1.5%，应该选下面哪种仪器？
0.5级量程5伏；1.0级量程2伏；2.5级量程1.5伏。

$$2\ \text{V} \times 1.0\% \div 1.5\ \text{V} = 1.4\%$$

5. 误差的分布----常见的两种测量误差分布

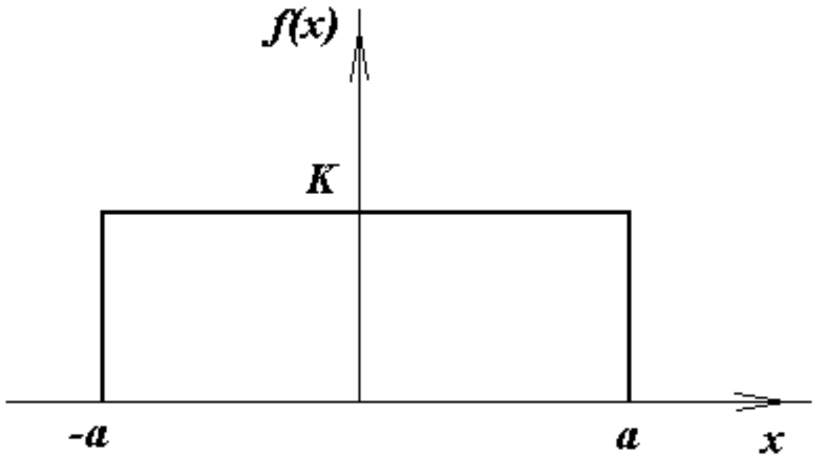
（1）正态分布



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

测量值的均值μ看作真值（无穷次测量）

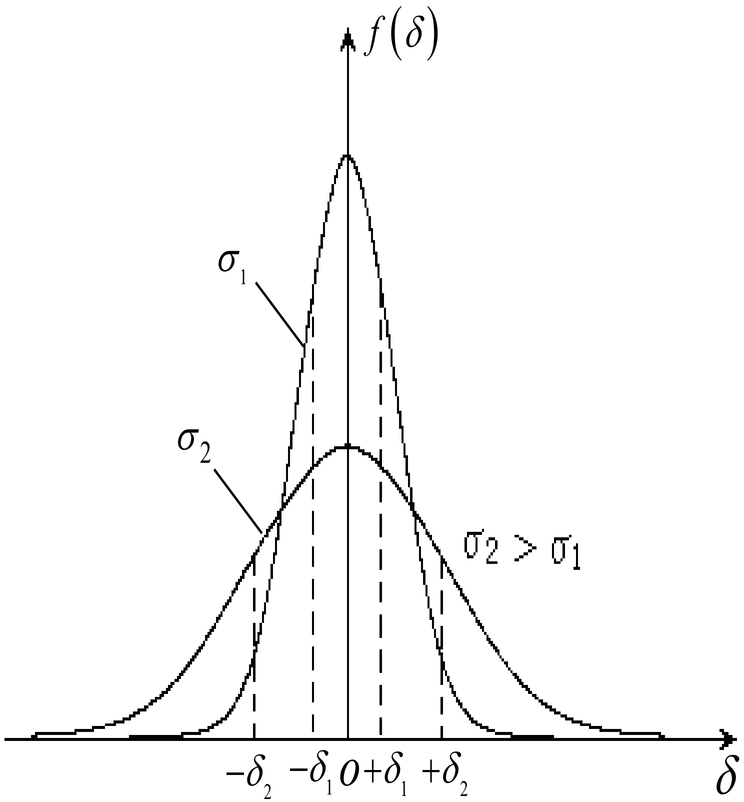
（2）均匀分布



$$f(x) = K \quad (-a < x < +a)$$

测量值一定会落在$(-a, +a)$区间内

随机误差正态分布



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

① **单峰性：**绝对值小的误差出现的可能性（概率）大，绝对值大的误差出现的可能性小。

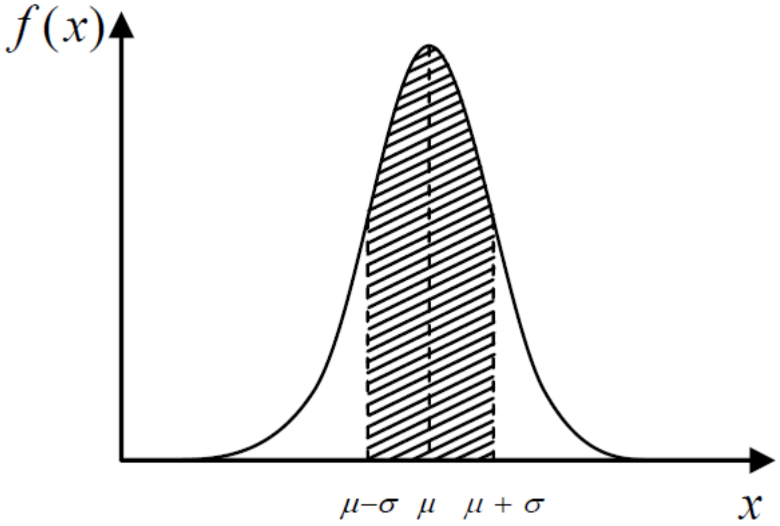
② **对称性：**大小相等的正误差和负误差出现的机会均等，对称分布于真值的两侧。

③ **有界性：**非常大的正误差或负误差出现的可能性几乎为零。

④ **抵偿性：**当测量次数非常多时，正误差和负误差相互抵消，于是，误差的代数和趋向于零。

正态分布(又称Gauss分布)

物理实验中多次独立测量得到的数据一般可以近似看作服从正态分布。



消除系统误差后， $\mu = \lim_{n\to\infty} \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$

称为数学期望值。 μ表示 x 出现概率最大的值，通常就可以得到 x 的近似真值。

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

$\sigma = \lim_{n\to\infty}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^2}$ ，称为标准差，决定了线型的宽窄。表征测量值的分散程度。

σ越大，正态曲线就越平坦。σ越小，正态曲线就越尖锐。

曲线与x轴之间所包围的面积等于1。随机误差落在区域[-σ， σ]之内的概率为*P*

$$P=\int_{\mu-\sigma}^{\mu+\sigma} f(x)dx = 68.3\%$$

测量值范围	概率
[μ-σ， μ+σ]	68.3%
[μ-2σ， μ+2σ]	95.4%
[μ-3σ， μ+3σ]	99.7%

假定对一个量进行了有限的n次测量，

测得的值为x_k (k=1, 2，…，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)

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} x_k$$

用标准偏差 s 表示测得值在$\bar{x}$ 的分散性

s按贝塞耳公式求出：

$$s(x_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1}[\sum_{k=1}^{n}(x_k - \bar{x})^2]}$$

注意这是单次测量值的实验标准偏差。

对算术平均值作为结果时，平均值的标准偏差应为：

$$\boxed{u_A(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}[\sum_{k=1}^{n}(x_k - \bar{x})^2]}}$$

6. 小结

真值：$\mu = \lim\limits_{n\to\infty} \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$　　$\sigma = \lim\limits_{n\to\infty} \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^2}$

平均值：$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} x_k$　　一般 6 ≤n≤ 10

单次测量值的标准偏差：

$$\boxed{s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1}[\sum_{k=1}^{n}(x_k-\mu)^2]} = \sqrt{\frac{1}{n-1}[\sum_{k=1}^{n}(x_k-\bar{x})^2]}}$$

平均值的标准偏差:

$$\boxed{u_A(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \left|\bar{x}-\mu\right| = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}[\sum_{k=1}^{n}(x_k-\bar{x})^2]}}$$

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）：

250.08，250.14，250.24，250.06，250.10，250.02

则：测得值的最佳估计值为

$$L = \overline{L} = 250.11 \ \text{mm}$$

测量列单次测量的标准偏差：

$$S_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(L_i - \overline{L})^2}{n-1}} = 0.08 \ \text{mm}$$

平均值的标准偏差：

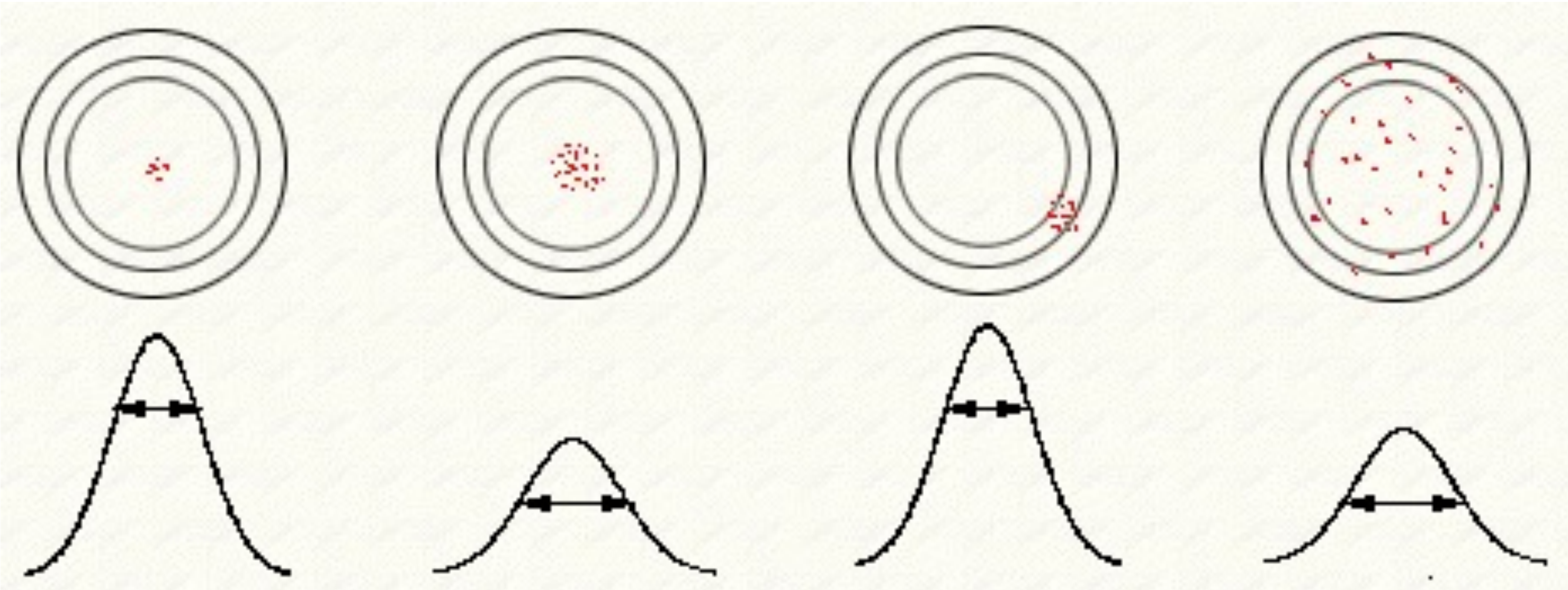
$$S_{\overline{L}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(L_i - \overline{L})^2}{n(n-1)}} = 0.0327 \ \text{mm} \approx 0.04 \ \text{mm}$$

$$L = 250.11 \pm 0.04 \ \text{mm}$$

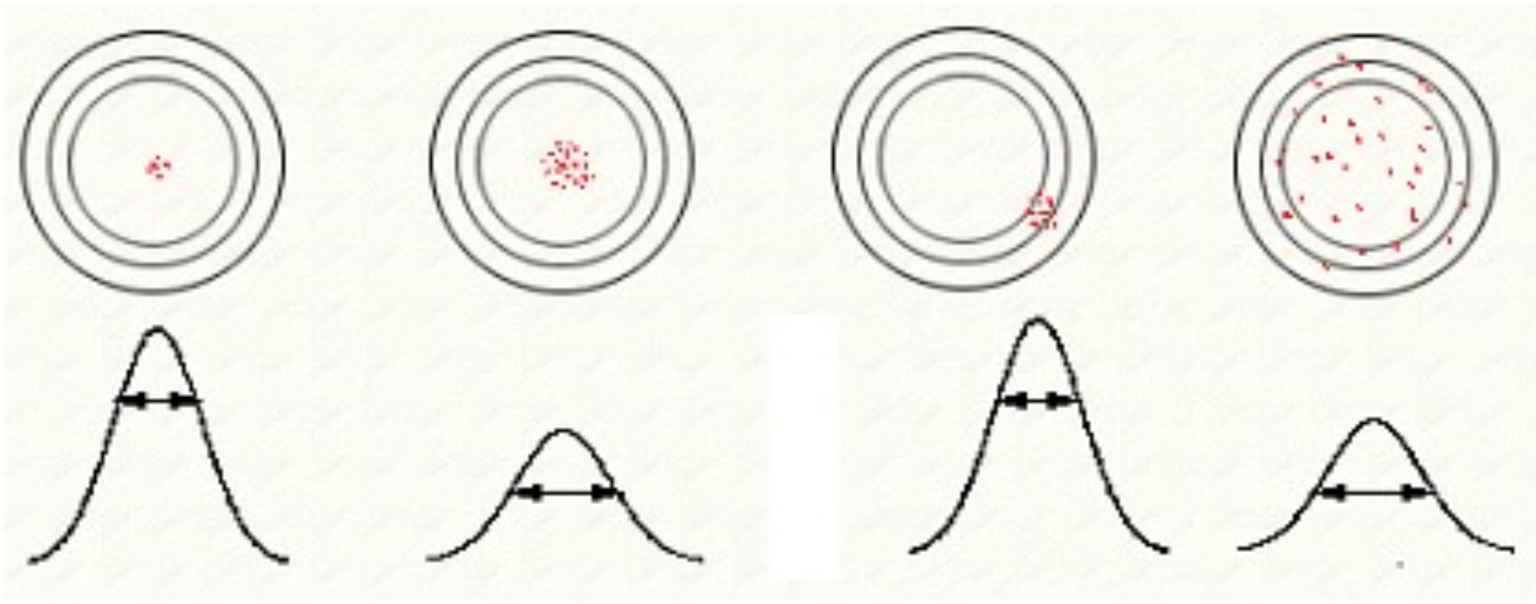
7. 精密度与准确度

精密度：多次重复测量值相互接近的程度

正确度：测量平均值接近真值的程度



精密度高	精密度低	精密度高	精密度低
正确度高	正确度高	正确度低	正确度高



(A) (B) (C) (D)

精密度： A>C>B>D

正确度： A≈B≈D>C

准确度： A>B>D>C 对测量结果的综合评价！

三、误差与不确定度

1. 测量不确定度与误差

◆ 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. 测量不确定度的组成部分划分

•总不确定度分为两类不确定度：

A 类分量 u_A —— 多次重复测量时 与随机误差有关的分量；

B 类分量 u_B ——与未定系统误差有关的分量。这两类分量在相同置信概率下用方和根方法合成总不确定度：

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

在具体使用中，测量不确定度又有三种不同的表述：

1)直接测量的标准不确定度u (*standard uncertainty*)

2)间接测量的合成标准不确定度u_c(*combined standard uncertainty*)

3)扩展不确定度U (expanded uncertainty)

3. 标准不确定度u—

直接测量量的不确定度估算

标准不确定度的计算是分成**A类**评定和**B类**评定两部分

A类评定是： 可用统计方法评定的不确定度部分

B类评定是： 要用其他方法（非统计方法）评定的不确定度部分

直接测量量不确定度估算过程

- 求测量数据列的平均值 $\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$

- 平均值的标准偏差：$\boxed{s(\bar{x})=\frac{s(x)}{\sqrt{n}}=\sqrt{\frac{1}{n(n-1)}[\sum_{k=1}^{n}(x_k-\bar{x})^2]}}$

当 $6\le n\le 10$，置信概率为68.3%时，可简化认为:

$$u_A\approx S(\bar{x})$$

直接测量量不确定度估算过程

根据使用仪器得出u_{B}

$$u_B=\frac{\Delta_{仪}}{3}$$

（高斯分布）

$$\boxed{u_B=\frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}}$$

（均匀分布）

总合成不确定度： $u=\sqrt{u_A^2+u_B^2}$

给出直接测量的最后结果：

$$\boxed{y=\bar{y}\pm u(单位)}$$

正确度

精密度

准确度

直接测量量不确定度估算举例

例：用螺旋测微计测某一钢丝的直径，6次测量值y_i分别为：**0.249,0.250, 0.244, 0.256, 0.253, 0.242**; 同时读得螺旋测微计的零位x_0为：**0.005**, 单位**mm**， 已知螺旋测微计的仪器误差为$\Delta_{仪}$**=0.004 mm**，请给出完整的测量结果。

解：测得值的最佳估计值为

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} = \overline{x} - x_0$$

$$= 0.250 \text{ mm} - 0.005 \text{ mm} = 0.245 \text{ mm}$$

测量列单次测量的标准偏差:

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{6-1}[\sum_{i=1}^{6}(x_i - \overline{x})^2]} = 0.006 \text{ mm}$$

平均值的标准偏差

$$\boxed{s(\overline{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = 0.003\ \ \text{mm}}$$

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \approx \sqrt{s(\bar{x})^2 + \Delta_{仪}^2/3} = \sqrt{0.003^2 + 0.004^2/3} \approx 0.004\text{mm}$$

$$x = 0.245 \pm 0.004\ \ \text{mm}$$

4. 合成标准不确定度 u_c

间接测量是指利用某种已知的函数关系从直接测量量来得到待测量量的测量 。设间接被测量量y与诸直接测量量 x_i (i =1,2,···,n)由函数f来确定：

$$y = f(x_1, x_2, \ldots x_i, \ldots x_n)$$

用诸不确定度$u(x_i)$代替微分dx_i，有：

$$u_c = \sqrt{\sum\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}u(x_i)\right)^2}$$

(公式1)　常用于和差形式的函数

$$\frac{u_c}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\partial \ln f}{\partial x_i}\right]^2 [u(x_i)]^2}$$

(公式2)　常用于积商形式的函数

和差形式的函数

$$y = f(x_1, x_2)$$

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1}\Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2}\Delta x_2$$

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}u(x_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}u(x_2)\right)^2}$$

$$\boldsymbol{u_c = \sqrt{\sum (\frac{\partial f}{\partial x_i}u(x_i))^2}}$$

积商形式的函数

$$y = f(x_1, x_2) \qquad \ln y = \ln f(x_1, x_2)$$

$$\Delta(\ln y) = \frac{\Delta y}{y} = \frac{\partial \ln f}{\partial x_1}\Delta x_1 + \frac{\partial \ln f}{\partial x_2}\Delta x_2$$

$$\frac{u_c}{y} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_1}u(x_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_2}u(x_2)\right)^2}$$

$$\boldsymbol{\frac{u_c}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\partial \ln f}{\partial x_i}\right]^2 [u(x_i)]^2}}$$

例：

$$N = x \pm y \qquad u_N = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$$

$$N = xy \ , \ N = \frac{x}{y} \qquad \frac{u_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{u_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{u_y}{y}\right)^2}$$

$$N = kx \qquad u_N = |k| u_x$$

$$N = x^k \qquad \frac{u_N}{N} = |k| \frac{u_x}{|x|}$$

合成标准不确定度举例

例： 设有一圆环，其外径为$\phi_{外}$=9.800±0.005 mm，内径为$\phi_{内}$=4.500±0.005 mm，高度h=5.000±0.005 mm，求环的体积V和不确定度。

解：环的体积为

$$V = \frac{\pi}{4}(\phi_{外}^{2} - \phi_{内}^{2})h$$

$$= \frac{\pi}{4}\left(9.800^{2} - 4.500^{2}\right)\times 5.000$$

$$= 2.976\times 10^{2}\,\mathrm{mm}^{3}$$

根据积商形式函数的不确定度公式，有：

$$\frac{\partial \ln f}{\partial \phi_{外}} = \frac{2\phi_{外}}{\phi_{外}^2 - \phi_{内}^2} = \frac{2 \times 9.800}{9.800^2 - 4.500^2}$$

$$\frac{\partial \ln f}{\partial \phi_{内}} = -\frac{2\phi_{内}}{\phi_{外}^2 - \phi_{内}^2} = -\frac{2 \times 4.500}{9.800^2 - 4.500^2}$$

$$\frac{\partial \ln f}{\partial h} = \frac{1}{h} = \frac{1}{5.000}$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \sqrt{\left(\frac{2\phi_{外}\Delta\phi_{外}}{\phi_{外}^2 - \phi_{内}^2}\right)^2 + \left(\frac{2\phi_{内}\Delta\phi_{内}}{\phi_{外}^2 - \phi_{内}^2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{2 \times 9.800 \times 0.005}{9.800^2 - 4.500^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 4.500 \times 0.005}{9.800^2 - 4.500^2}\right)^2 + \left(\frac{0.005}{5.000}\right)^2}$$

$$= 0.0017 = 0.17\%$$

$\Delta V = V \times \Delta V / V = 2.976 \times 10^2 \times 0.17\% \approx 0.5\ \text{mm}^3$

因此，环的体积为

$$V = (2.976 \pm 0.005) \times 10^2\ \text{mm}^3$$

不确定度的另一计算方法：

$$\boldsymbol{f} = \boldsymbol{V} = \frac{\boldsymbol{\pi}}{\mathbf{4}}(\boldsymbol{\phi}^{\mathbf{2}}_{外} - \boldsymbol{\phi}^{\mathbf{2}}_{内})\mathrm{h}$$

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}u(x_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}u(x_2)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_3}u(x_3)\right)^2}$$

$$\frac{\boldsymbol{\partial f}}{\boldsymbol{\partial x_1}}\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x_1}) = \frac{\boldsymbol{\pi}}{\mathbf{4}}\boldsymbol{h}(\mathbf{2}\boldsymbol{\phi}_{外} \cdot \Delta\boldsymbol{\phi}_{外})$$

$$\frac{\boldsymbol{\partial f}}{\boldsymbol{\partial x_2}}\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x_2}) = \frac{\boldsymbol{\pi}}{\mathbf{4}}\boldsymbol{h}(-\mathbf{2}\boldsymbol{\phi}_{内} \cdot \Delta\boldsymbol{\phi}_{内})$$

$$\frac{\boldsymbol{\partial f}}{\boldsymbol{\partial x_3}}\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x_3}) = \frac{\boldsymbol{\pi}}{\mathbf{4}}(\boldsymbol{\phi}^{\mathbf{2}}_{外} - \boldsymbol{\phi}^{\mathbf{2}}_{内})\Delta\mathrm{h}$$

四、有效数字与实验数据处理

四、有效数字与实验数据处理

- 在实验中被测量都是含有不确定度的数值
- 数值不能任意取舍，正确反映出测量值的准确度。
- 记录数据、计算以及书写测量结果时，应根据测量误差或实验结果的不确定度来确定应取几位有效位数。

1. 有效数字的表示法

(1)修约：以修约数代替已知数；

修约区间：约定的最小变化间隔。

修约规则：“四舍六入五单双”法则（四及以下就舍掉，是六及以上就进一，遇五若前面是奇数就进一，最后一位就变成是偶数，若前面已是偶数，则舍掉）取舍。

(2)有效数字的位数多少直接反映测量的准确度。有效位数越多，表明测量的准确度越高。

(3)有效数值书写时应注意：有效数值的位数与小数点位置无关。不因使用的单位不同而改变。

例如重力加速度某人测量值为980 cm/s², 改写单位为m/s²,仍为三位有效数字，即9.80 m/s²(≠9.8 m/s²　注意0不可随意添减)。

在运算过程中的有效数字取舍，一般遵循：
加减运算的结果以参与运算的末位最高的数为准：乘除则以有效数字最少的数为准。

例如：

$$12.4+0.571=12.971=13.0;$$

$$3600\times 8.0=28800=2.9\times 10^4$$

例题：将下列数值取四位有效数字。

2.717<u>499</u>→2.717（舍）

5.165<u>509</u>→5.166（入）

4.510<u>500</u>→4.510。（凑偶）

4.511<u>500</u>→4.512。（凑偶）

4.510<u>501</u>→ 4.511 **（仅1个修约区间最接近已知数）**

2. 数值书写的要求

1) 有效数字的位数是由合成不确定度来确定。测量值的最后一位应与不确定度的最后一位对齐。

一般总不确定度只取一位（首位大等于3时），或二位（首位小于3时）取二位，不可多取。例如：

$S=(2.3450\pm0.0320)\ cm^2$， $\rightarrow S=(2.34\pm0.04)\ cm^2$

$S=(2.3530\pm0.0212)\ cm^2$， $\rightarrow S=(2.353\pm0.022)\ cm^2$

2) 为方便起见，对较大或较小的数值，常采用科学记数法，即使用$\times10^n$的形式，例如重力加速度可写成$9.80\times10^{-3}\ km/s^2$；阿伏加德罗常数$6.02214199\times10^{23}\ /mol$等等。

3) 结果是由间接测量得到，其有效数字由算出结果的不确定度来确定。若没有给出各数值的不确定度，由有效数字运算法则确定。

4) 一个完整的测量结果表达式应有几部分组成：

结果的代表符=（数值±不确定度）单位

例如： **N=(3.456±0.006) cm**

3. 有效数字运算法则应用举例：

1) $6.600 \div 6.0 = 1.1$

2) $(6788 + 67.88) \times 2.0 = 1.4 \times 10^4$

3) $(4400000 \pm 2000)m$的正确表达式

（$4.4000 \pm 0.0020) \times 10^6$ m

或：（$44000 \pm 20) \times 10^2$ m

4) $12^3 \times 3 = 5184 = 5 \times 10^3$

不确定度的取舍例题

$u_c = 0.12134$ ，可保留2位有效数， $u_c = 0.13$

$u_c = 0.1201$ ，可保留2位有效数， $u_c = 0.12$

$u_c = 0.3421$ ，只保留1位有效数， $u_c = 0.4$

$u_c = 0.3021$ ，只保留1位有效数， $u_c = 0.3$

- 不确定度保留位数

当不确定度第1位有效数字是1或2时，可取两位，3以上只可有1位有效数字。

- 不确定度修约法则

欲保留的最低位后的这1位数不为零则进位，为零则舍去。（因为要知最大误差限）

$$\sin 85^{\circ} = 0.9961946...$$

$$\sin 84^{\circ} = 0.994521...$$

$$\sin 86^{\circ} = 0.997564...$$

$$\boxed{\sin 85^{\circ} = 0.996}$$

或者按传递公式来决定有效位数：

$$\Delta \sin\theta = \cos\theta \cdot \Delta\theta$$

$$\sin\theta = \sin\theta \pm \cos\theta \cdot \Delta\theta$$

4. 数据处理方法：

（1）列表法（原始数据和计算结果均可以列入其中）

（2）逐差法

（3）作图法

（4）最小二乘法

列表法——例：金属杨氏弹性模量实验的数据处理

序号	荷重砝码质量mg (N)	标尺读数 S (cm)			荷重砝码质量差4牛顿时的读数差ΔS (cm)	ΔS的绝对误差Δ (ΔS) (cm)
		增砝码时	减砝码时	平均值		
1	0	S_0=0.00	S_0’=0.10	$\bar{S}_0 = 0.05$		
2	1×9.80	S_1=0.99	S_1’=1.00	$\bar{S}_1 = 1.00$		
3	2×9.80	S_2=1.80	S_2’=1.90	$\bar{S}_2 = 1.85$		
4	3×9.80	S_3=2.70	S_3’=2.80	$\bar{S}_3 = 2.75$		
5	4×9.80	S_4=3.62	S_4’=3.70	$\bar{S}_4 = 3.66$		
6	5 ×9.80	S_5=4.51	S_5’=4.59	$\bar{S}_5 = 4.55$		
7	6 ×9.80	S_6=5.40	S_6’=5.49	$\bar{S}_6 = 5.45$		
8	7 ×9.80	S_7=6.32	S_7’=6.32	$\bar{S}_7 = 6.32$		

逐差法：

在有些实验中，我们连续取得一些数据。如果依次相减，就会发现中间许多数据并未发挥作用，而影响到实验的可靠性。例如：金属杨氏弹性模量实验和等厚干涉的牛顿环实验等。

在金属杨氏弹性模量实验中，连续测量钢丝的伸长位置为：A_1、 A_2、 A_3、 A_4、 A_5、 A_6、 A_7、 A_8、 A_9、 A_{10}等10个数据。若为求钢丝的伸长，依次相减，则伸长量ΔA有：

$$\Delta A=\frac{(A_2-A_1)+(A_3-A_2)+\cdots+(A_{10}-A_9)}{9}=\frac{A_{10}-A_1}{9}$$

中间各次测量均未起到作用。

为发挥多次测量的优越性，将数据分成前后两组：

A_1、A_2、A_3、A_4、A_5为一组，

A_6、A_7、A_8、A_9、A_{10}为另一组；

将这两组对应相减，得出5组，且每一组相减间距是原来临近间距的5倍，这样有：

$$\Delta A = \frac{(A_6 - A_1) + (A_7 - A_2) + (A_8 - A_3) + (A_9 - A_4) + (A_{10} - A_5)}{5 \times 5}$$

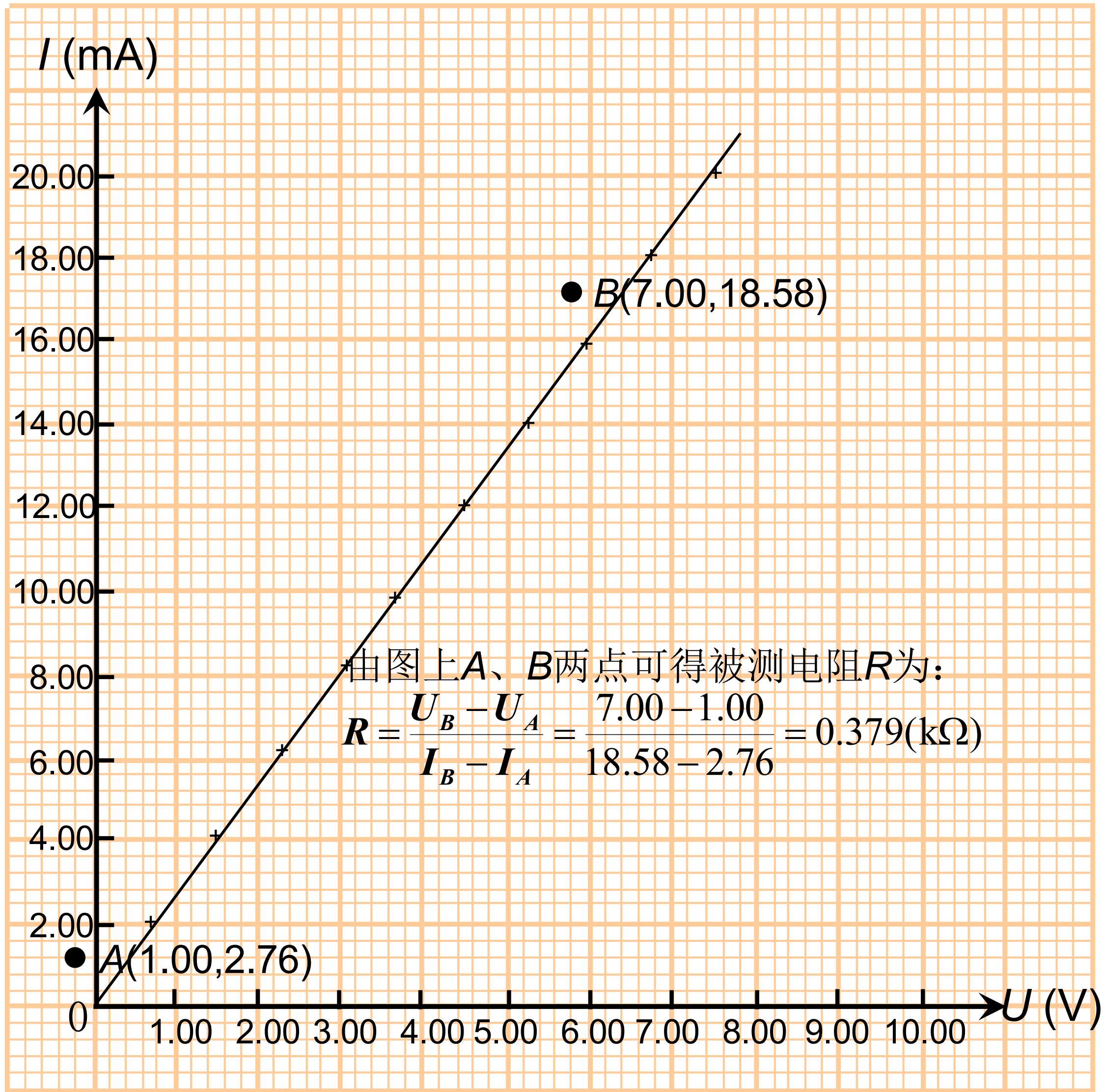
这种处理数据的方法称为**逐差法**。此法的优点是充分利用所测的数据，有利于减少测量的随机误差和仪器带来的误差。

条件：线性，等间距

作图法

作图的六点要求：

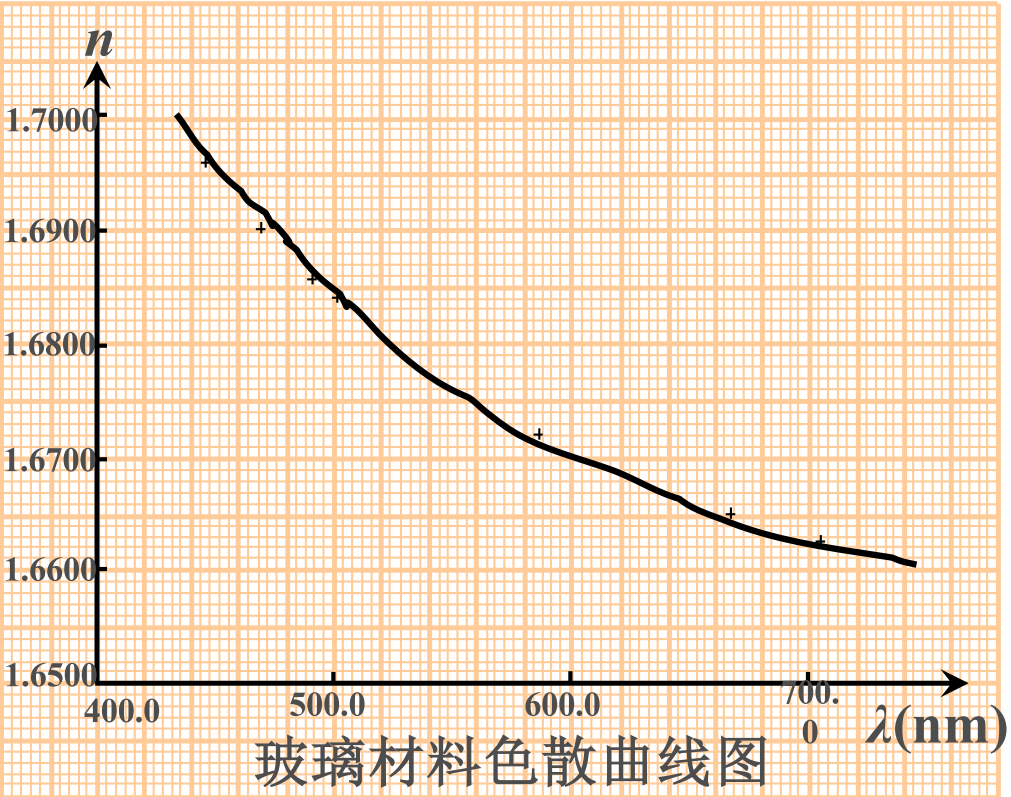
1、选择合适的坐标分度值
2、标明坐标轴
3、标实验点：
4、连成图线：
5、标出图线特征
6、标出图名



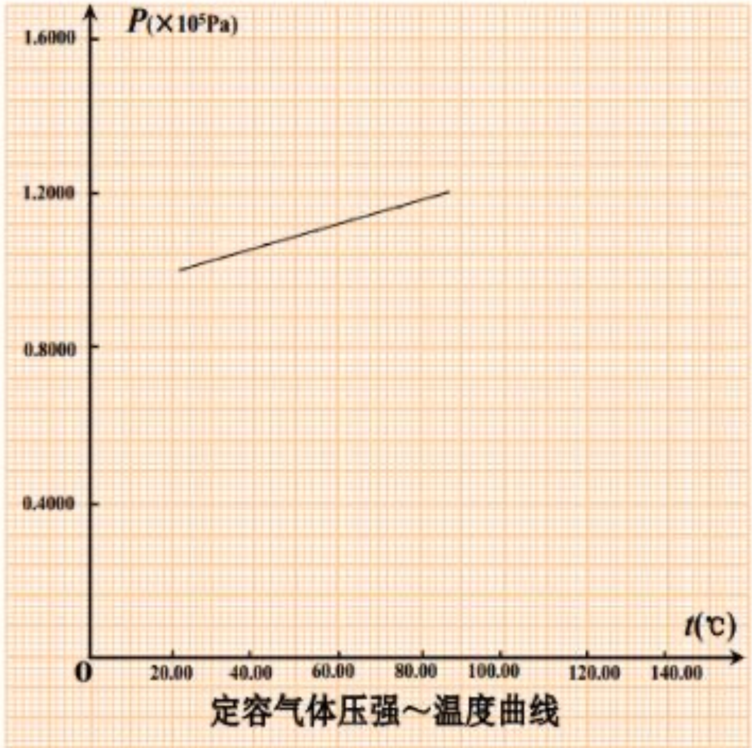
电阻伏安特性曲线

*整理数据表格
*坐标纸作图或计算机作图

数据处理—作图法——*不当图例展示*



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



图纸使用不当。坐标原点的读数可以不从**0**开始。

最小二乘法：

n组实验数据：(x_i, y_i) 若理论上满足直线方程 y=bx+a

各测量量沿垂直于x轴的方向到直线的距离的平方和为

$$\varepsilon=\sum_{i=1}^{n}[y_i-(\mathrm{b}x_i+\mathrm{a})\ ]$$

要使ε最小，b和a的取值为：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\varepsilon}{\partial a}=0\\ \dfrac{\partial\varepsilon}{\partial b}=0\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}b=\dfrac{\overline{x\cdot y}-\bar{x}\cdot\bar{y}}{\overline{x^2}-(\bar{x})^2}\\ a=\bar{y}-b\cdot\bar{x}\end{cases}$$

五、课程要求

1. 实验课守则

1）没有预习不能做实验。

2）进入实验室对号入座。按要求操作。

3）不得穿拖鞋和背心进入，不得抽烟和饮食。

4）无故迟到超过十五分钟不得进实验室。

5）遇到自己不能解决的问题应及时报告老师。

6）做完实验要整理桌、凳，实验数据须经指导老师签字后才能离开实验室。

7）实验报告（原始数据附后）在下次实验前上交，迟交扣分。

8）如有补做实验，报告提交截止时间为期末考试前或**最后一次实验课结束后一周（课程钉群会通知）**，逾期不再录入报告分数。

2. 学生考勤

1）按时上课。迟到15分钟以上者，取消该次实验的上课资格，迟到15分钟以内者，任课教师将按情况对本次实验进行扣分。

2）不早退。认真完成实验内容和要求，只有当教师在数据记录本上签字后，并将实验仪器整理完毕，才可以离开实验室。

3）请假事宜：病假必须要有医院的证明；事假需持学生所在院系负责人签字的请假条。

4）病、事假过后，应尽快联系指导教师补做所缺实验，如在其他指导教师处补做，需要同时取得原指导教师和补做指导教师的许可。

3. 《大学物理实验》实验课要求

◆ 共14个实验项目。必做实验“示波器”、“分光计”。

- 实验报告左上角标明实验台号，实验结束未整理仪器当次实验扣3分。
- 报告内容（包括原始数据记录）不得用铅笔，须用水笔或圆珠笔。作图使用坐标纸+铅笔或者软件作图打印。
- 报告迟交一周当次实验扣5分，迟交两周及以上扣10分。
- 实验报告上交后不发放，如对报告有疑问联系任课老师查看。
- 不得抄袭、伪造数据，或伪造老师签名。
- 不得无故缺课，不得让他人替做实验。

4. 评分参考标准

《大学物理实验》

期末成绩=平时成绩×70%+期末考试×30%

平时实验报告成绩计算方法

1）预习报告：20分

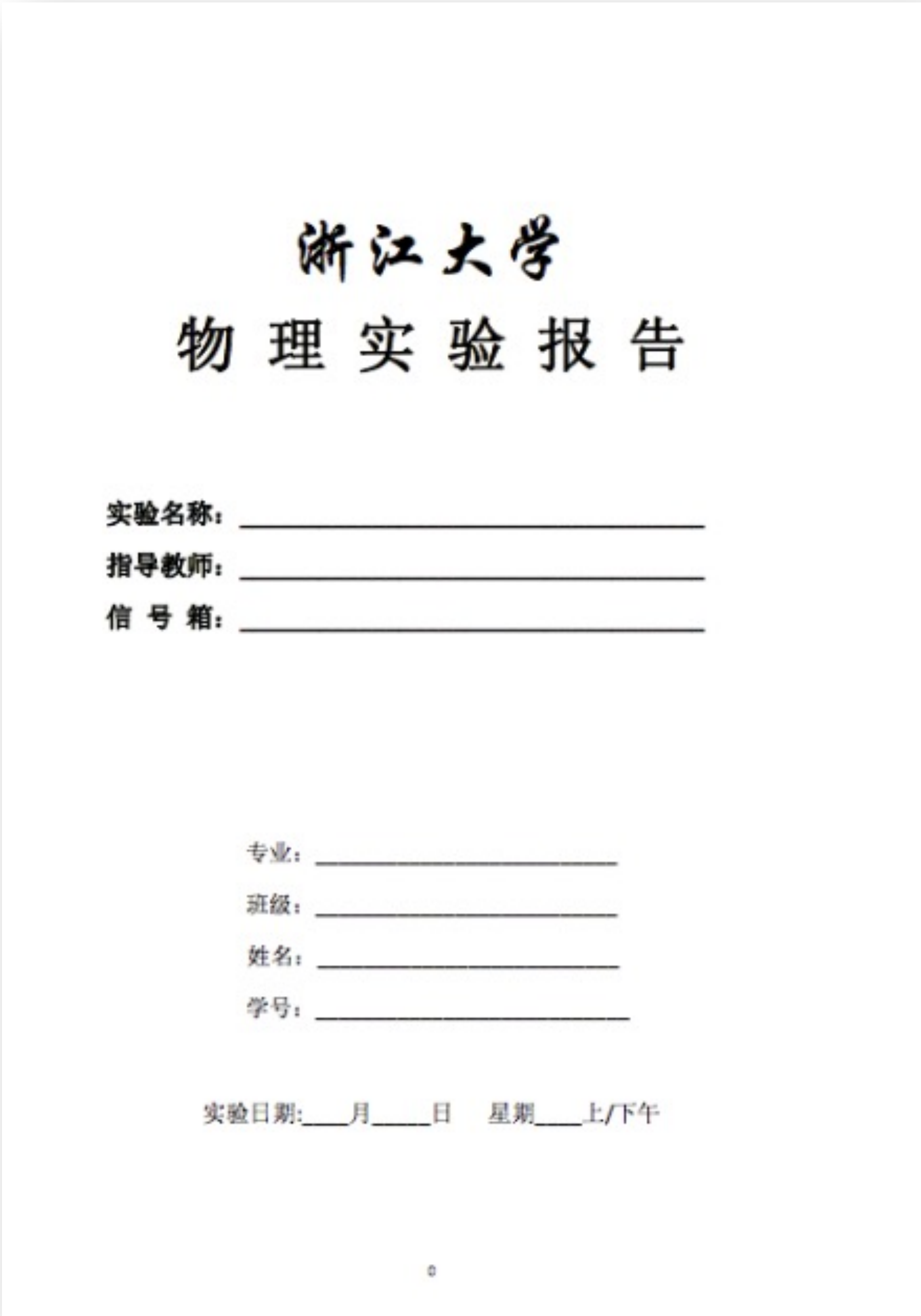
2）实验操作：30分

3）数据处理与分析：30分

4）误差分析：10分

5）实验心得和思考题：10分

期末考试范围：绪论内容、必做实验、实验设计



浙江大学

物理实验报告

实验名称：______

指导教师：______

信 号 箱：______

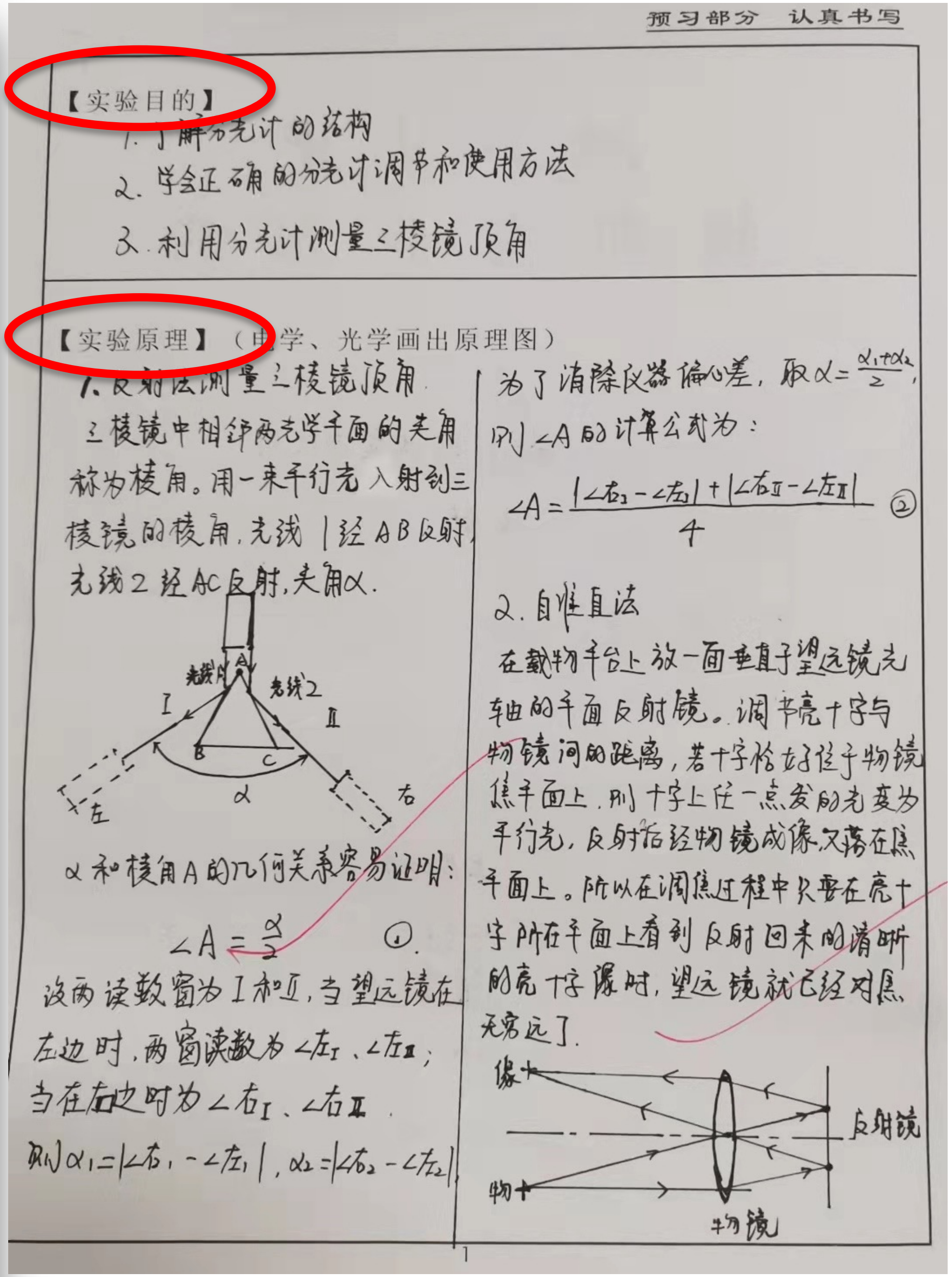
专业：______

班级：______

姓名：______

学号：______

实验日期：___月___日　星期___上/下午



预习部分　认真书写

【实验目的】

1. 了解分光计的结构
2. 学会正确的分光计调节和使用方法
3. 利用分光计测量三棱镜顶角

【实验原理】（电学、光学画出原理图）

1. 反射法测量三棱镜顶角

三棱镜中相邻两光学平面的夹角称为棱角。用一束平行光入射到三棱镜的棱角，光线1经AB反射，光线2经AC反射，夹角α.

α和棱角A的几何关系容易证明：

$$\angle A = \frac{\alpha}{2} \quad ①$$

设两读数窗为I和II，当望远镜在左边时，两窗读数为$\angle 左_I$、$\angle 左_{II}$；当在右边时为$\angle 右_I$、$\angle 右_{II}$。

则 $\alpha_1 = |\angle 右_1 - \angle 左_1|$，$\alpha_2 = |\angle 右_2 - \angle 左_2|$

为了消除仪器偏心差，取 $\alpha = \frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}$，则∠A的计算公式为：

$$\angle A = \frac{|\angle 右_1 - \angle 左_1| + |\angle 右_{II} - \angle 左_{II}|}{4} \quad ②$$

2. 自准直法

在载物平台上放一面垂直于望远镜光轴的平面反射镜。调节亮十字与物镜间的距离，若十字恰好位于物镜焦平面上，则十字上任一点发的光变为平行光，反射后经物镜成像又落在焦平面上。所以在调焦过程中只要在亮十字所在平面上看到反射回来的清晰的亮十字像时，望远镜就已经对焦无穷远了。

【实验内容】（重点说明）

1. 看分光计使用手册

2. 分光计光路调整.

①粗调. 开启分光计电源,在载物平台上放一镜面垂直于望远镜光轴的平面反射镜,通过目测法调节望远镜倾斜度调节螺钉,使望远镜光轴基本与分光计中心垂直. 通过目测法调节载物平台下面三个倾斜度调节螺钉,使载物平台平面初步垂直分光计中心轴.

②望远镜调焦无穷远:利用反射镜寻找清晰绿亮十字

③调整望远镜光轴.载物平台面分别与分光计中心垂直:调载物台三脚,利用反射镜调整载物台中心轴与望远镜中心轴垂直.

④调整平行光管光轴与分光计中心转轴垂直:调整并找寻到清晰的入射光.

3. 利用分光计测量三棱镜顶角的度数.

将三棱镜安放在载物平台上,三棱镜顶角对准平行光管的中心,使平行光分成两半,在AB.AC面上反射出去,并且三棱镜顶角在接近平台中心偏上一点点位置,否则望远镜中看不到反射光. 测量左右两反射光线的角位置,可算得棱镜顶角大小. 每次测量时稍改变三棱镜顶角接近平台中心的位置.

【实验器材及注意事项】

实验器材:

分光计:由望远镜.平行光管.载物平台和读数装置四部分组成.

注意事项:

1. 测量三棱镜顶角时,放置三棱镜顶角于载物台中心偏前一点点处.

2. 读数窗读标游标盘角度时,亮光线不止一条,应读取中间任意一条亮线所对应的读数.

3. 消除视差,使反射光像与叉丝在同一个面上.

4. 镜片易碎,应小心操作,切勿把物品从一张桌子移到另一张桌子,应配套使用.

2

预习报告部分
应简洁、突出重点！
在报告纸框内完成，
不要另附纸，
不要照抄书本！

【实验数据与结果】

表 1　数据处理表

序号 i	$q_i/10^{-19}C$	$\Delta q=(q_{i+1}-q_i)$	n 计算值	n 取整值	$e_i/10^{-19}C$
1（249V）	4.90	1.58	3.10	3	1.63
2（174V）	6.48	0.06	4.10	4	1.62
3（203V）	6.54	1.56	4.14	4	1.64
4（199V）	8.10	0.08	5.13	5	1.62
5（175V）	8.18	1.56	5.18	5	1.64
6（125V）	9.74	1.65	6.16	6	1.62
7（144V）	11.39	1.78	7.21	7	1.63
8（161V）	13.07		8.27	8	1.63

由逐差相减法得出，可将基本电荷可先估计为 $e_0=1.58\times10^{-19}C$

基本电荷测量的平均值：$\bar{e}_i=1.63\times10^{-19}C$

基本电荷的表达式：$e=(1.630\pm0.013)\times10^{-19}C$

基本电荷的相对误差为：E=1.7%

e测量的相对误差：$E=\dfrac{|\bar{e_i}-e_{标}|}{e_{标}}\times100\%=1.7\%$

- 写出完整数据处理过程，包括公式、必要的中间计算过程、不确定度。
- 明确阐述实验结果与结论。

$U=199V\quad \bar{t}=13.72s\quad l=1.50mm$

在实际计算中，油滴半径修正项中 $1+\frac{b}{pr}$ 中 r 用近似值 $r_1=\sqrt{\frac{9\eta v}{2\rho g}}$ 代替

$$r_1=\sqrt{\frac{9\eta v}{2\rho g}}=\sqrt{\frac{9\eta l}{2\rho g t}}=9.69\times10^{-7}m$$

油滴半径：$r=\sqrt{\frac{9\eta v}{2\rho g}\cdot\frac{1}{1+\frac{b}{pr}}}=\sqrt{\frac{9\eta l}{2\rho g t}\cdot\frac{1}{1+\frac{b}{pr_1}}}=9.30\times10^{-7}m$

油滴电量：$q=\frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}}\left[\frac{\eta l}{t(1+\frac{b}{pr})}\right]^{\frac{3}{2}}\frac{d}{U}=8.10\times10^{-19}C$

估计基本电荷电量 $e_0=1.58\times10^{-19}C$

$\therefore n=\frac{q}{e_0}=5.13$　取整后 $n=5$

$\therefore e=\frac{q}{n}=\frac{8.10\times10^{-19}C}{5}=1.62\times10^{-19}C$

e的B类不确度定度：对 $e=\frac{18\pi}{n\sqrt{2\rho g}}\left[\frac{\eta l}{t(1+\frac{b}{pr})}\right]^{\frac{3}{2}}\frac{d}{U}$ 取对数

$$\ln e=\ln\frac{18\pi}{n\sqrt{2\rho g}}+\frac{3}{2}\ln\frac{\eta}{1+\frac{b}{pr}}+\frac{3}{2}\ln l-\frac{3}{2}\ln t+\ln d-\ln U$$

对 l, U, t 求偏导数：$u_l=0.02mm,\ u_t=0.01s\quad u_U=1V$

$$\frac{\partial\ln e}{\partial l}=\frac{3}{2l}\quad \frac{\partial\ln e}{\partial t}=-\frac{3}{2t}\quad \frac{\partial\ln e}{\partial U}=-\frac{1}{U}$$

代入不确定度公式：$\frac{u_e}{e}=\sqrt{\left(\frac{\partial\ln e}{\partial l}\right)^2(u_l)^2+\left(\frac{\partial\ln e}{\partial t}\right)^2(u_t)^2+\left(\frac{\partial\ln e}{\partial U}\right)^2(u_U)^2}$

$=0.021$

$$u_e=e\cdot\frac{u_e}{e}=4\times10^{-21}C$$

$\bar{e_i}=\frac{1}{8}(e_1+e_2+e_3+e_4+e_5+e_6+e_7+e_8)=1.63\times10^{-19}C$

$s(e_i)=\sqrt{\frac{1}{7}\sum_{i=1}^{8}(e_i-\bar{e_i})^2}=8.45\times10^{-22}C$

$u_A=\frac{S(e_i)}{\sqrt{n}}=3\times10^{-22}C$

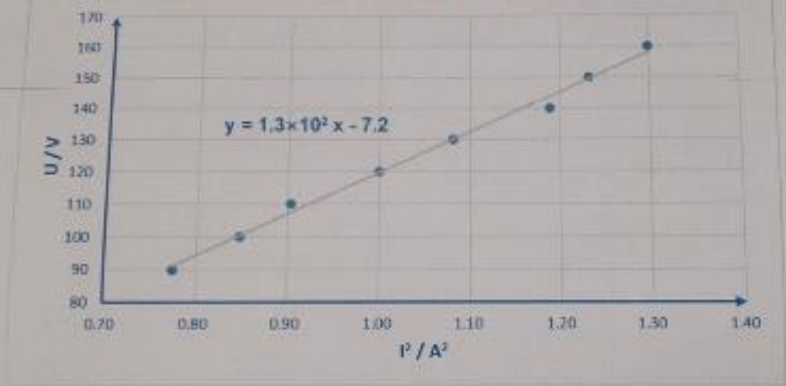
$u_{B总}=\frac{\sqrt{u_{e1}^2+u_{e2}^2+u_{e3}^2+u_{e4}^2+u_{e5}^2+u_{e6}^2+u_{e7}^2+u_{e8}^2}}{8}=1.3\times10^{-21}C$

$\therefore u_{总}=\sqrt{u_A^2+u_B^2}=1.3\times10^{-21}C$　　$\therefore$ 故 $e=(1.630\pm0.013)\times10^{-19}C$

【数据处理与结果】

	n	U/V - y	I/A	I²/A² - x
s_0=3.00(cm) s_1=12.75(cm)	1	90	0.88	0.77
	2	100	0.92	0.85
	3	110	0.95	0.90
	4	120	1.00	1.00
	5	130	1.04	1.08
	6	140	1.09	1.19
	7	150	1.11	1.23
	8	160	1.14	1.30

[s_0=3.00 cm, s_1=12.75cm] U - I² 关系曲线



$$y = ax + b;$$

$$a = \frac{\frac{1}{n}\sum x_i y_i - \left(\frac{1}{n}\sum x_i\right)\left(\frac{1}{n}\sum y_i\right)}{\frac{1}{n}\sum x_i^2 - \left(\frac{1}{n}\sum x_i\right)^2} = 1.3 \times 10^2; b = \frac{1}{n}\sum y_i - a\frac{1}{n}\sum x_i = -7.2;$$

$$\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

作图前需要整理原始数据及数据处理表格

$$k = \mu_0\left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}}\frac{N}{R} = 7.398 \times 10^{-4}(T \cdot A^{-1}); \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}(N \cdot A^{-2}), R = 0.158(m), N = 130$$

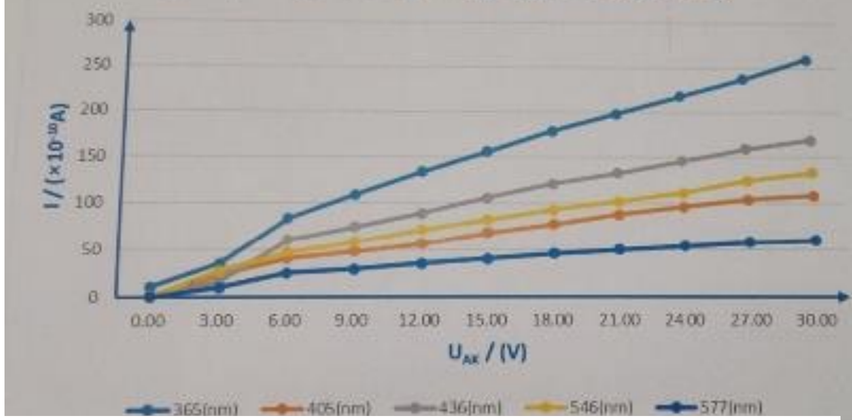
$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{r^2k^2I^2} = \frac{2a}{r^2k^2} = 2.0 \times 10^{11}(C \cdot kg^{-1}); 2r = 12.75 - 3.00(cm) = 9.75(cm)$$

$$u_A\left(\frac{e}{m}\right) = \frac{d\left(\frac{e}{m}\right)}{da}u_A(a) = \frac{2}{r^2k^2}u_A(a) = 0.13 \times 10^{11}(C \cdot kg^{-1}); \frac{e}{m} = (2.0 \pm 0.13) \times 10^{11}(C \cdot kg^{-1})$$

$$相对误差\left(\frac{e}{m}\right) = \frac{(2 \pm 0.13) \times 10^{11} - 1.758 \times 10^{11}}{1.758 \times 10^{11}} \times 100\% = (13.77 \pm 7.4)\%;$$

	U_{AK} / (V)	λ / (nm) I / (×10⁻¹⁰A) 365	405	436	546	577
φ=4(mm) L=350(mm)	0.00	11	1	1	0	0
	3.00	35	23	16	27	10
	6.00	83	40	60	47	25
	9.00	109	48	74	58	29
	12.00	134	56	89	71	35
	15.00	156	68	106	82	40
	18.00	179	77	121	93	46
	21.00	198	88	133	102	50
	24.00	218	96	146	111	54
	27.00	237	104	159	124	58
	30.00	259	108	169	133	60

[Φ=4(mm),L=350(mm)] U_{AK} - I 关系曲线



U_{AK}=15.00(V) λ=365(nm) L=350(mm)			
φ / (mm)	2	4	8
I_M / (×10⁻¹⁰A)	45	456	515

U_{AK}=15.00(V) λ=365(nm) φ=4(mm)			
L / (mm)	300	350	400
I_M / (×10⁻¹⁰A)	242	159	111

【误差分析】

仅供参考，并非标准答案。

系统误差：……准确造成的误差，包括平行光管、载物台、望远镜与主轴垂直……位置与宽窄度造成的误差等。

……系统误差。

3. 光源……

随机误差：1. 对狭缝及射光……

2. 刻度盘角游标读数判断……

具体实验具体分析。

【实验心得及思考题】

思考题. 1. 试画出自准直法测量三棱镜顶角的光路图.

仔细读数　认真记录

【数据记录及草表】

表 2　数据记录表

L=1.5mm

油滴	1	2	3	4	5	6	7	8
1（199V）								
2（203V）								
3（175V）								
4（144V）								
5（161V）								
6（125V）								
7（249V）								
8（174V）								

仅供参考，并非标准答案。

物理实验选课网址：http://10.203.16.55:86/lab-course/

http://zjuphylab.zju.edu.cn/

<u>完成实验后，请在三天内进行教学评价！</u>

选课时间安排

- 绪论课当天：

  登录学在浙大，完成实验安全测试，达到90分以上才算通过。完成绪论课作业，及时复习。（要求完成，不计入总评成绩。）

- +1天

  登录选课系统，选择实验，安排自己的课表。

- 开学三周内：

  选课系统选课截止，在此之前均可自行调整。之后如需调整请联系殷立明老师（钉钉，东四-335，88206068-3350）。

- 如 9 月 6 日后在教务系统内更换过课程时间：

  务必钉钉联系肖婷或王宙洋老师调整学在浙大以及实验选课系统内课程时段。

  务必检查保证实验选课系统内课程与教务系统课程时段一致！


交报告箱
交报告箱在大厅左侧，
注意不要交错信箱！

5. 违规处理办法

- ◆ 实验课过程中如发生违反实验课规范的行为，依照《物理实验学生守则及违规处理办法》进行相应处理。
- 因病或事假不能按时进行实验课学习，应提前向指导老师请假，并提供由相关单位盖章的病假条或事假条，及时与指导教师联系补做本次实验。请假次数不能超过三次以上，否则，需要重修本门实验课。
- 无故缺席实验课的学生，本次实验成绩计0分，累计两次及以上者，取消本学期实验课成绩。
- 实验报告上原始数据如无任课教师的签字，算作无效报告，须重做实验并按迟交处理，否则该次实验计0分。
- 如被发现有伪造指导老师签字、伪造数据、抄袭报告现象者，本学期实验课成绩不超过60分，两次及以上被发现者，取消本学期实验课成绩。
- 请他人代替进行实验者，一经发现，该学生及替做者本学期实验成绩均被取消，如果替做者不是本次实验课学生，则向所在院系通报，由学生所在院系处理。并将两学生情况通报所在院系和教务处。
- 相关情况全部归物理实验教学中心解释。
- 详见实验中心网站。

实验报告纸领取时间

日期	时段	地点（东四）
9月9日	9:00-16:30	108
9月10日	9:00-12:30	108
9月10日	12:30-16:30	229-3
9月11日	9:00-16:30	229-3
9月12日	9:00-16:30	310
9月13日	9:00-10:00 12:30-15:00	310

祝同学们物理实验课学有收获

谢谢！