大学实验物理
指导书

东 华 大 学

二〇〇一年一月

学 生 必 阅

一、物理实验上课教室在“中心大楼南翼三楼”。各班进行实验的具体内容及教室请来三楼走廊观看布告栏所指。

二、绪论是实验的第一课。各班根据课程表安排的实验时间来实验室上课，在此之前必须阅读本教材的有关内容。

三、大学实验物理考查成绩为：优秀、良好、中等、及格、不及格五级记分。

四、上课必须准时到实验室：

1. 预习课迟到二十分钟不准进入教室。没有上预习课不准进行实验操作。

2. 实验操作迟到一刻钟后，不得进教室进行实验，该实验作零分计。

3. 补上预习、操作课必须有有效的请假证明。

五、作业必须准时交：

1. 作业必须按规定时间交任课老师。（一般为该次实验结束后一周）

2. 批改过的作业保存至学期结束备查。迟交超过二周作不及格计分。

3. 未经任课老师同意迟交作业者最高给予及格分。未交作业该实验以零分计算。抄袭别人与给别人抄袭数据者该实验作业以零分计。迟交作业必须面交任课老师。

六、实验成绩为考查成绩：

1. 实验成绩以平时成绩为主，平时实验成绩占 70%，考试成绩占 30%。（免考除外）

2. 凡有二只实验成绩为零分，平时成绩不及格者，实验成绩总评为不及格。

3. 实验考查成绩不及格必须办理重读。

一九九九年一月

目　　录

实验一　物理实验的基础知识 ……………………………… 1
实验二　长度测量 ……………………………… 7
实验三　固体密度的测量 ……………………………… 10
实验四　用拉伸法测量金属丝的杨氏弹性模量 ……………………………… 14
实验五　薄透镜焦距测量 ……………………………… 20
实验六　三线摆测转动惯量 ……………………………… 24
实验七　利用驻波测定弦线中的波速 ……………………………… 29
实验八　照相印相放大技术 ……………………………… 31
实验九　电路的连接和万用表的使用 ……………………………… 35
实验十　惠斯顿电桥实验 ……………………………… 39
实验十一　电位差计 ……………………………… 45
实验十二　光的干涉的应用(牛顿环) ……………………………… 50
实验十三　汞原子光谱波长的测定 ……………………………… 54
实验十四　灵敏电流计特性研究 ……………………………… 58
实验十五　纺织品介电常数测定 ……………………………… 61
实验十六　电表改装(设计性实验) ……………………………… 64
实验十七　伏安法测量电阻的研究 ……………………………… 69
实验十八　测量电流表的内阻 ……………………………… 71
实验十九　激光全息照相 ……………………………… 74
实验二十　组装整流器(黑箱方法) ……………………………… 76

实验一　物理实验的基础知识

§1　误差的基本概念及估算法

1.1　一些基本概念的解释的说明

误差是测量值与真值之差，亦称绝对误差。它反映了测量值偏离真值的方向和大小。由于当测量不同数量级的被测量时，用绝对误差不能确切地表示出所进行的测量的精确程度，因此在对测量的精度或对测量仪器所具有的精度进行比较时，必须用相对误差作为相互比较的技术指标。相对误差就是用绝对误差与真值之比而得到的无名数（无单位）。

偏差（残差）是测量值与算术平均值之差，通常真值是不可知的，实验中往往用偏差作为误差的估算值。

真值是被测量的客观实验值，它是个理想的概念，下列几种值可视作为真值：理论值，公认值，计量学约定真值，相对真值。

误差按其性质与来源可分为系统误差和偶然误差（随机误差）。

偶然误差是数字期望值为零的随机误差。因而抵偿性是其最本质的特性，大多数偶然误差呈正态（高斯）分布，故还具有单峰性，对称性和有界性（指误差超过某一界限的概率很小）。

系统误差的重要特点是：它的方向和大小总保持不变或有规律（有时呈复杂规律）变化。我们把大小和符号已定的系统误差称为已定系统误差，大小和符号未定的系统误差称为未定系统误差。

需要特别指出的是：系统误差的消除，减少或修正是属于技能问题，可以在实验前，实验中，实验后进行，例如：实验前对测量仪器进行校准，使方法完善，对人员进行专门训练等等；在实验中采取一定方法对系统误差加以补偿；实验后的结果处理中进行修正等等。然而，要找出系统误差的原因，寻求其规律决非轻而易举之事，这是因为：

（1）实验条件一经确定，系统误差就获得了一个客观上的恒定值，在此条件下进行多次测量并不能发现该系统误差；

（2）在一个具体的测量过程中，系统误差往往会和随机误差同时存在，这给分析是否存在系统误差带来了很大的困难。

能否识别和消除系统误差与实验者的经验和实际知识有着密切关系，因此，对于初学实验者来说，应该从一开始就逐步地积累这方面的感性知识，在实验时要分析：采用这种实验方法（理论），使用这套仪器，运用这种操作技术会不会对测量结果引入系统误差？

科学史上曾有过这样一个事例：

1909～1914 年间美国著名物理学家密立根以他巧妙设计的油滴实验，证实了电荷的不连续性，并精确地测得基本电荷的大小：

$$e=(1.591\pm0.002)\times10^{-19}C$$

后来，由 x 射线衍射实验测得 e 值却与油滴实验值差了千分之几，通过查找原因，发现密立

根实验中所用的空气粘滞系数值偏小，以致引入了系统误差，在重新测量了空气的粘滞系数之后，使油滴实验测得的 e 值为：

$$e=(1.601\pm0.002)\times10^{-19}C$$

它与 x 射线衍射法测得的结果 $(1.6020\pm0.0002)\times10^{-19}C$，十分吻合。

此例说明了实验条件一经确定，多次测量（密立根曾观测了几千个带电油滴）发现不了系统误差，必须要用其它的方法（本例中改变了产生系统误差根源的条件），才可能发现它；同时也说明了实验中应从各方面去考虑是否会引入系统误差，当忽略某一方面时，系统误差就可能从这一方面渗透到测量的结果中来。

由于系统误差与偶然（随机）误差的性质不同，按两类误差进行处理所依据的理论和方法也不同，所以在对测量误差进行处理之前，一定要根据误差的性质区分是系统误差还是偶然（随机）误差。

若按定义来区分测量误差是系统误差还是随机误差是非常明确的，但在实验测量工作中有时这两类误差却不易区别，因为在一定条件下两种误差的性质可以互相转化，例如，原来被看成是随机误差的测量误差，随着科学技术水平的提高，可以发现引起这种误差的原因，从而能够掌握这种误差的变化规律，这样就有可能把这种误差当作系统误差来对待。也会有相反的情况：原来被看成是系统误差的测量误差，造成这种误差的原因及变化规律也能掌握，由于造成误差的已知因素变化比较频繁或很复杂，同时对测得值的影响又很微弱，若掌握其变化规律所付的代价较大，在能满足实际需要的情况下，可以把这种误差当作随机误差来处理（即用统计方法来处理）

还有另外一种情况，同是一种误差，在一定条件下可当成随机误差，而在另外条件下则可看作是系统误差。如在批量生产热电偶时，由于材料的不均匀性和制造工艺的微小差别，使做成的热电偶对某一温度所产生的热电势与标准值相比，总会出现一定的误差。在评价这批热电偶的测温精度时，每支热电偶所产生的热电势与标准值之差，就可看成是随机的。若任意取定一支热电偶，经与标准校对后，则这热电偶产生热电势的误差大小、方向就为已知，这样此误差又可作为系统误差，用修正值将此误差排除。

总之，在系统误差和偶然（随机）误差对测量结果所起的不同作用，我们用精密度、准确度、精确度作为对测量结果质量的评价。精密度指多次重复测量各测量值的密集程度，它反映的是偶然误差；准确度反映的是测量值的系统误差；精确度是反映测量值中系统误差与偶然误差的综合，它表示测量结果与真值的一致程度，精度是泛指以上“三度”的一个笼统概念。

（附）国际计量委员会对不确定度的建议

测量误差就是测得值与被测量真值之差，但是，用来表示误差大小的指标时却出现了两种情况。一种是明确取“+”号或“-”号的数值，这种明确方向的表示方法是与误差这个词表示的含义一致的。另一种就是采用“±”号所表示的数值。它的方向是不明确的，实际上，它所给出的是一个数值区间，即给出了一个误差大小的变化范围，或者说，是给出了以±号前面的数值为中心，以±号后面数值为区间的范围，而实际值（或被测量的真值）应（以一定的概率）落在此范围内。过去也把表示区间范围的数值叫误差，实际上它并不是误差的具体值，为了避免造成概念上的混乱，近几年人们提出了不确定度的概念，凡是用区间（±号）给出的误差指标称不确定度。这个概念已为国际上所采用。

1978 年国际计量局(BIPM)发出“不确定度”征求意见书,经征求各国及专业组织意识后,于1980 年国际计量局召开的会议上提出“送国际计量委员会的表示不确定度工作组的建议书,实验不确定度的说明,建议书 INC-1(1980)”,1981 年国际计量委员会(IPM)第 70 届会议同意了这一建议。

INC-1 按不确定度数值评定方法的不同,把测量结果的不确定度归纳为两类:

A 类:用统计方法计算的那些分量;

B 类:用非统计方法计算的那些分量。

我国于 1984 年 11 月召开了“测量误差讨论会”,会议代表一致认为 INC-1(1980)是测量误差理论和数据处理表述方法的一个提高,为不确定度表述方法的统一提供了基础,因此,提出应对 INC-1 进行宣传和试用,以便通过实验工作,完善对不确定度表示测量精度所涉及的有关问题。

由于不确定度概念的提出时间不长,在进一步使用中还缺泛严格的统一标准。因此,目前在许多地方仍存在“误差”与“不确定度”混用的局面,特别是一些习惯上的原因,还不能立即改正过来。因此,把 INC-1(1980)收入本书。作为介绍,以便对此有所了解。

1.2 偶然(随机)误差的估算

1.2.1 标准误差的定义

标准误差(标准偏差)的定义是:对一固定量进行无穷次测量,各次测量误差平方的算术平均值再开方所得的数值,又称为方均根误差。记作

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

式中 n 为测量次数,x_i 为第 i 次测量的数值,x_o 为真值。

S 是衡量偶然误差大小的一个数字特征,表示了测量数列的离散程度,S 越小,说明测量的精密度越高,S 越大,则说明测量的精密度越低。

现举一个实际例子来说明,用二个真空管电压表测量稳定的压电,第一个真空管电压表测量所得的电压的偶然误差的绝对值为

3,2,2,2,1,0,2,3,2,3;

第二个真空管电压表测量所得的电压的偶然误差的绝对值为 0,1,7,0,1,1,10,0,1,1。

直观地分析这二组数列,可以看出第一组数列离散程度小,测量精密度高,由(1-1)式可算得(n 有限时亦可有(1-1)式作为 S 的近似估算),两组数列的标准差:

$$S_1=\sqrt{\frac{3^2+2^2+2^2+2^2+1^2+0^2+2^2+3^2+2^2+3^2}{10}}=2.2$$

$$S_2=\sqrt{\frac{0^2+1^2+7^2+0^2+1^2+1^2+10^2+0^2+0^2+1^2}{10}}=3.9$$

可见 S 灵敏地反映出了测量数列的离散程度。

若偶然误差服从正态分布,则 S 越小,其误差的概率分布曲线(即高斯分布曲线)越“瘦”;S 越大则曲线越“胖”。

1.2.2 标准误差的估算公式

由于真值 x_o 通常是不知道的,当用算术平均值 $\overline{X}$ 代替 X 时,*Bessel* 公式:

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

注意，S_x 表示的是 X_i（而不是 $\overline{X}$）的离散程度，而算述平均值 $\overline{X}$ 比 X_i 更接近真值（所以亦称为近真值），可以证明其标准误差的估算公式为

$$S_{\overline{X}}=\frac{S_x}{\sqrt{n}} \tag{1-3}$$

对于间接测量量

$$N=f(x,y,z\cdots\cdots u) \tag{1-4}$$

则有最佳值 $\overline{N}=f(\overline{x},\overline{y},\overline{z}\cdots\cdots\overline{u})$ (1-5)

当各直接测量量 $x,y,x\cdots\cdots u$ 均是独立变量，且误差为小量时，有误差（标准差）传递公式

$$S_N=\sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x})^2S_x^2+(\frac{\partial f}{\partial y})^2S_y^2+\cdots\cdots(\frac{\partial f}{\partial u})^2S_u^2} \tag{1-6}$$

对于 $\overline{N}$ 则相应有

$$S_{\overline{N}}=\sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x})^2S_{\overline{x}}^2+(\frac{\partial f}{\partial y})^2S_{\overline{y}}^2+\cdots\cdots(\frac{\partial f}{\partial u})^2S_{\overline{u}}^2} \tag{1-6'}$$

(1-6)式及(1-6′)式之动用，须注意各个自变量的独立性，请看下面的推演（题目见教材“物理实验基础”“绪论”习题(6)）：

设正方形边长为 a，标准差为 S_a，则面积 $S=a^2$，因为当 $N=x\cdot y$ 时有 $S_N=\sqrt{Y^2S_x^2+X^2S_y^2}$

$$\because S=a^2=a\cdot a$$

对前一个 a 求偏导：$(\frac{\partial s}{\partial a})_{前}=a$，对后一个 a 求导 $(\frac{\partial s}{\partial a})_{后}=a$

$$\therefore S_s=\sqrt{(\frac{\partial s}{\partial a})_{前}\ S_a^2+(\frac{\partial s}{\partial a})_{后}\ S_a^2}=\sqrt{2a^2\cdot S_a^2}=\sqrt{2}aSa$$

以上推演错在何处？（比较：由 $S=a^2$ 直接对 a 求导得 $2a$。故得 $S_s=\sqrt{(2a)^2\cdot S_a^2}=2a\cdot S_a$）

1.3 仪器误差

单次测得值标准偏差 S 是表征测量仪器的精密度的量值，一个确定的仪器对应着一个确定的 S 值，但是测量仪器的创新，改革和测量条件的改善都能达到减少 S，相应的 $S_{\overline{x}}$ 也得以减小，这种减小方法涉及到新的仪器的设计和制造与环境控制（恒温、恒湿、电、磁、光的屏蔽等等）的改善问题，这是减小 S 的最本质的方法。

仪器的误差既有系统误差的成份，又含有偶然误差的成分，对于准确度较低的仪器，它主要反映了系统误差的大小，而准确度高的仪器则是两类误差综合的结果，很难区分哪类误差起主要作用。

仪器和量具精确度的高低一般是用极限误差 $\triangle_{max}$（即通常所称的仪器误差 $\triangle_{仪}$ 来表示的），极限误差又称最大误差，通常以示值误差或仪器级别的形式给出，有时也可把仪器的最小分度或最小分度的一半作为 $\triangle_{max}$。（如果小刻度为毫米的米尺）

在理解极限误差这一概念时，不能把极限误差绝对化，错误地理解极限误差是表示决不能出现绝对值比它更大的一个误差，这样理解是不正确的，因为极限误差是以一定的概率来定义的，也就是说出现比极限误差还大的误差的可能性虽然是非常小，但毕意不是绝对不可

能出现，如偶然误差为正态分布的，其误差值从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 都有可能出现，只是绝对值大的误差出现的概率小一些，但在重复测量中最少出现一次的概率随着测量次数的增加而增加。所以极限误差的“极限”（或“最大”）的概念是相对的，它是说绝对值比它大的误差出现的概率小于某个规定数字而已。极限误差是相对于一定的概率而言的，假若定义极限误差的概率值改变为另一个数值，则相应的极限误差值也就改变。

仪器说明书中规定的精确度是以极限误差表示的，如0.5%精确度的电压表，0.05%的频率计，这“0.5%”、“0.05%”就是该仪器规定的极限误差。我们检定这些仪器时，当误差超过说明书上规定的数值时就认为仪器不合格。但我们不能理解为合格的仪器在使用时，比极限误差还大的误差绝对不可能出现，而在理解为出现绝对值比极限误差还大的误差出现的概率等于小于规定值，极限误差用符号 $\triangle_{max}$ 表示，其概率目前一般取0.3%，对正态分布的偶然误差而言，绝对值比 $3S$ 还大误差出现的概率为0.3%，所以

$$\triangle_{max}=3S \tag{1-7}$$

对均匀分布的偶然误差而言，假定分布范围为 $\pm e$，$S=e/\sqrt{3}$ 则误差出现的概率小于0.3%的界限可近似认为是 $\triangle_{max}\approx e$，则

$$\triangle_{max}=\sqrt{3}S \tag{1-8}$$

注意，对仪器的使用者来说，关心的是 $\triangle_{max}$（为已知）对最后测量结果的影响，所以的单次测量的情况下，由于一般不能确定仪器误差的确切分布，可以假定是正态或均匀分布，由(1－7)或(1－8)算出相应的 S，在需进行误差合成时，则须以此 S 与其它测量值的标准差合成总的标准差。

有关各种仪表的仪器误差可参阅实验教材或有关书籍。

§2 有效数字及测量结果的表示

2.1 有效数字的概念

准确数字后再保留1或2位可疑数，统称为有效数字。

有效数字的位数越多，说明测量的精度越高；第一位非零数字前的“0”在确定有效位数时无意义，而第一位非零数字后的“0”在确定有效位数时应计入有效位数；换算单位时，有效数字的位数保护不变。

有效数字的简单运算法则：

和差运算结果，其有效数字的最后一位，应位于参与运算量中最高存疑位。

积商运算结果，其有效位数等于参与运算中有效数最少者。

2.2 测量结果的表示

表示测量结果的三要素是：测量结果的最佳值、误差、单位。

1. 直接测量

单次测量：$X=X_1\pm\triangle_{仪}$（单位）

或 $X=X_1\pm S_{仪}$（单位）

多次重复测量

当 $S_x>S_{仪}$，$X=\overline{X}\pm S_x$（单位），$E_x=\dfrac{S_x}{\overline{X}}\times 100\%$

当 $S_x < S_{仪}$，$X=\overline{X}\pm S_{仪}$(单位)，$E_x=\frac{S_{仪}}{\overline{X}}\times 100\%$

2．间接测量　$N=\overline{N}\pm S_N$(单位)

S_N 由标准误差传递公式求，常用函数的标准误差传递公式见教材表 1－3－2，若函数关系为乘除法，则先计算相对误差，再计算标准差较方便。

测量误差的有效位数应按以下准则判定：

1．在测量结果的表示式中，本书约定绝对误差一般取一位有效数字，第二位可疑数一律进位。

2．对重要的或是比较精密的测量，或处于中间运算过程的误差，取二位有效数字。

3．相对误差取 1～2 位。

测量结果的最佳值的有效位数的末位应与误差所在位对齐。

注意，前述有效数的运算法则仅是在数据量较少的情况下，为满足有效数字的基本定义，只保留最后一位数字为可疑而建议采用的。但是随着计算工具的发展，特别是电子计算器得到普遍使用的情况下，原来为简化计算先对数据做有效数字的处理，反而造成了麻烦。还不如把原始数据直接输入计算器，得出最后计算结果，然后就可根据误差所达到的数量级的原则，直接确定最后计算结果的有效位数。

2.3　数据处理的方法

数据处理最基本的有如四种方法：列表法、作图(图解法)、逐差法、回归法(最小二乘法和线性拟合)。

列表时应注意以下四个方面：(1)简明地列出被测量之间的对应关系；(2)写明表中各符号所代表的物理量及单位；(3)测量数据应以有效数字表示；(4)写明所用仪器的准确度等级及仪器误差。

作图时应注意以下几点：(1)等精度原则：即图中的估计数，应为测量中的存疑数，图中的最小分度应等于测量数据中的最小准确值；(2)要标明图名、轴名、单位；坐标上每一定间隔应按有效数字位数标明数值；(3)图上实验数据点要有明确的符号如×，·，△；(4)凡定标或标准校正曲线，点与点间应折线相连；而一般物理量间的关系曲线，则应圆滑；(5)若欲求斜率，应取较远的两点，而不应取相邻点。

逐差法的优点：(1)充分利用测量数据，而且得到平均的效果，减少了偶然误差；(2)可以绕过一些具有定值的未知量求出实验的结果。

使用逐差法应满足的条件：(1)必须是一元函数，而且可以写成多项式；(2)自变量的变化应等间距或可换成等差级数的数据序列；(3)自变量的误差应远小于因变量的误差。

实验二　长度测量

§1　游标卡尺

游标卡尺是测量长度用的一种较精密的测量仪器，用它可以测量工件的长度、外径、内径、槽深等物理量。

1.1　原理简述

游标卡尺由主尺与副尺（又称游标）两部分组成，主尺上按米尺刻度（分度为 $1mm$）副尺上一般有分格（20 或 50），它紧贴着主尺可以自由移动，用它来读出主尺上分度以下的数据（即不足 $1mm$ 的数值）。

游标卡尺往往是游标尺上 n 分格的总长与主尺上 $(n-1)$ 或 $(2n-1)$ 分格的总长相等，设 a 表示主尺上一个分度长度；b 表示副尺上一个分度的长度，则有：

$nb=(n-1)a$；或 $nb=(2n-1)a$。

故 $a-b=\frac{a}{n}$，或 $2a-b=\frac{a}{n}$，定义 $\delta=a-b$ 或 $\delta=2a-b$ 为游标的精度，它是游标的分度值，数值上等于 $\frac{a}{n}$。

可见，游标尺的精度 $\frac{a}{n}$ 仅与主尺的分度值 a 和游标尺的分度数 n 有关，与游标尺的长度无关。

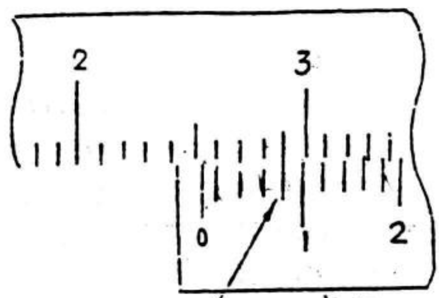
2.2　读数方法

游标卡尺测量长度的表达式为：

$$L=K_o+K\cdot\delta$$

式中 L 为被测物理量的长度，a 为主尺的最小分度值，δ 为游标卡尺的精度，K_o 是游标零线所示主尺上的读数，K 是数标尺与主尺对齐的那一条游标刻度线。

（注）$K\cdot\delta$ 值在一般游标上都直接刻出来，不必由测量者计算，因此直接读出即可。例如，我们使用的游标卡尺的游标上的数"1"，"2"……各代表"$5\times0.02=0.1mm$"、"$10\times0.02=0.2mm$"……，而游标上每一小格代表 $0.02mm$，因此，使用时可以很快读出数值，见图 2－1。



第四根线对齐，K＝4 → 注从0刻格为0

所以读数为 $25+0.08=25.08mm$

图 2－1

2.3　使用注意事项

（1）使用前要检查其主尺和游标零刻线位置，若不对齐，应记下初读数（即零点误差，可正可负），以便对测量值进行修正。

（2）测量时，待测物要卡正，用力松紧要适当（夹得太紧要损坏卡尺和待测物，夹得太松

则测量不准)，不允许用来测量精糙物体，并切忌把被测物体在卡口内挪动。读数时要使游标在主尺上暂时固定，不作移动，可拧紧尺上的紧固螺丝。

(3)游标卡尺的精度反映的就是仪器误差，在一定测量范围内亦等于它的示值误差，由于在对寻找游标尺与主尺重合线时完全是凭视力感觉的，它带有估计的成份，所以游标卡尺上读数的最后一位已是误差位，带有估读的成份，故不能也无法在游标卡尺读数后再加一位估读数。

(4)读数时毫米的整数部分由主尺读出，不足 $1mm$ 部分由游标读出，还应注意游标“0”线的位置，切不可将边框作为“0”线来读数。

§2 螺旋测微计

螺旋测微计(又称千分尺)是比游标卡尺更为精确的测量仪器，在物理实验中常用来测量薄板的厚度、金属丝及小球的直径等。

2.1 读数原理简述

螺旋测微计主要由一根精密的测微螺杆和螺母套管组成，测微螺杆的后端带一个具有 n 分度的微分筒，螺母套管的螺距为 $0.5mm$，它是根据螺纹旋进原理设计而成的，当微分筒相对于螺母套管转动一周时，测微螺杆将沿轴线方向前进或后退 $0.5mm$，因而微分筒转过一个分格时，螺杆将移动 $\frac{0.5}{n}(mm)$。这使沿轴线方向的微小长度可用圆周上较大的长度精确地表示出来，实现了机械放大，从而提高了测量精度。设 a 为螺距，n 为微分筒一周的分度数，则微分筒上最小分度值为 $\frac{a}{n}=\frac{0.5}{50}=0.01/mm$，再估读一位，则螺旋测微计可量度到千分之一毫米，故又称千分尺。

读数时，应从固定标尺上读了出整数部分(每格 $0.5mm$，且上下错开)，再从微分筒上读出小数部分，并估计一位，就得到测量值。

2.2 使用注意事项

(1)使用前应旋开锁紧的锁紧螺丝(锁紧时，微分套筒无法旋动)。

(2)记录零点读数(即零点误差)应注意它是正或负，以便对测量数据作零点修正。

(3)夹持待测物体进行测量时，应轻轻旋转棘轮(不要用转动微分筒来夹持被测物体)，只要听到在转动棘轮时发出喀、喀的声音时即可读数。

(4)读数时先读标尺，再读微分筒并要估计一位。

(5)测量完毕应在测砧与测杆间留出间隙，以免因热膨胀而损坏螺纹，并把它放在盒内，防止受潮。

§3 本实验用游标卡尺测量空心圆柱体(见教材 P58)；用螺旋测微计测量铁皮厚度(见教材 P58)；将表 2-1-3 标题测量小钢球直径改为测量铁皮厚度。

§4 复习思考题

1. 什么是游标卡尺的精度值,给你一把游标卡尺如何迅速确定其精度值?

2. 游标卡尺测量长度时如何读数? 游标本身有无估读数?

3. 螺旋测微计以毫米为单位可估读到哪一位,初读数的正或负如何判断,待测长度如何确定?

实验三　固体密度的测定

§1　予习要求

1. 仔细阅读“物理实验基础”P58 倒数第 7 行→P59 倒数 13 行，P90 附表 2－1 分析天平简介。

2. 仔细阅读本讲义

3. 复习间接量的数据处理方法

§2　实验目的

1. 学习使用分析天症

2. 用直接法和液体静力称衡法测定固本密度。

§3　仪器

电光分析天平、砝码、游标卡尺、螺旋测微计、托架、塑料杯、温度计、细线、铜园柱体。

§4　原理见“大学物理实验教材”P28

§5　实验内容

一、用游标卡尺测铜园柱体的高度 h，测 6 次。

二、用螺旋测微计测铜园柱体的直径 d，测 6 次，（测 d 前必须记下螺旋测微计的初值，并对 d 进行修正）。

三、正确使用分析天平

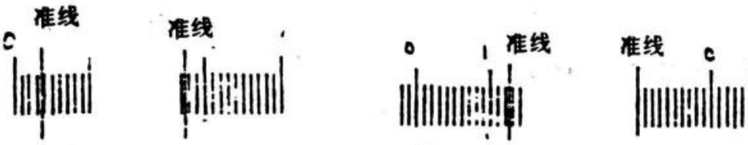
本实验的电光分析天平是一种精密称衡质量的仪器，可称准到 0.1mg，最大称量 200g，使用中必须严格遵守操作规则，取放待测物，砝码、调整平衡螺丝一定要止动天平，起动、止动均应绘慢而均匀地转动止动把手，转动机械加码器时动作也要轻巧，以保护天平刀口。

1. 调水平，即调天平水准仪中气泡居中，用天平前面两底脚螺丝进行调整，两底脚螺丝相反方向旋转调气泡左右，两螺丝相同方向旋转调气泡前后。

2. 调平衡

起动天平，观察投影标尺 0 线与观察屏上准线（黑线）间的距离，如投影标尺 0 线离准线较近，如图（一）（甲）（乙）所示，可用天平底板下拔杆进行调整，使 0 线与准线重合。如 0 线离准线较远，如图（二）（甲）（乙）所示，则调天平横梁上的平衡螺丝，0 线在准线左边图二

(甲),横梁左边的平衡螺丝向右拧,0 线在准线右侧图二(乙),横梁上左边平衡螺丝向左拧,当调整到 0 线离准线较近时,再用天平底板下拔杆调节,使 0 线与准线重合。



图一、图二

注意:调平衡螺丝时天平必须止动。

3. 称衡

(1)称铜园柱体在空气中质量 m_1。

①分析天平是精密称衡,称衡前必须用物理天平称衡以知待测物近似质量(本实验由实验室给出)。

②左盘放待测物(铜园柱体,右盘放砝码,与近似质量相同),砝码需用镊子夹取,待测物与砝码都要放在盘中间,放置完毕,将柜门关好。

③比较待测物与砝码质量,此时只需稍稍起动天平(即不必把止动架全放下来),判断谁重,谁轻(可看投影标尺移动方向,标尺迅速向左移动物重,迅速向右移则砝码重,也可看中间指针偏向,指针向轻的一边偏),判断后立即止动天平,按判断增减砝码,1g 以下的砝码用机械加码器(加码范围 10*mg*~990*mg*),投影标尺为 0~10*mg*,一般要多次比较,逐步副近平衡,当观察屏中出现静止到 10*mg* 内的读数,比较结束,此时将天平止动架全部放下(即止动把手向右旋转到底)进行读数。

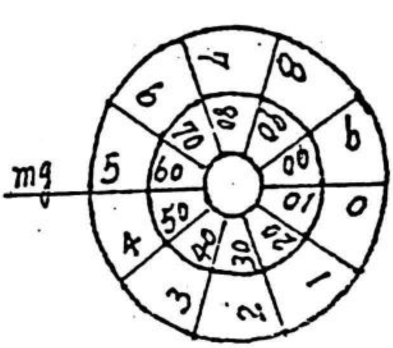
④天平读数方法:克以上看盘内砝码,克以下看加码器转盘读数与投影标尺读数。

例天平右盘 24 克砝码

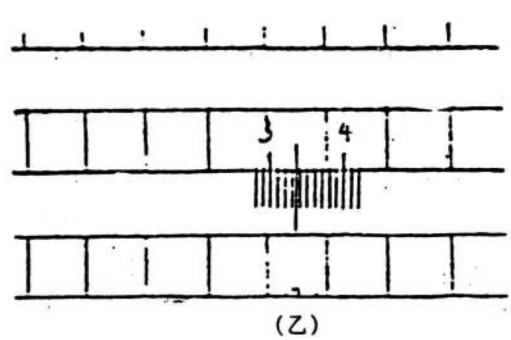
机械加码转盘如图三(甲)所示

观察屏上投影标尺如图(三)(乙)所示。

这时待测物质量 $m_1 = 24$ 克 $+ 0.560 + 0.00334 = 24.56334$ 克



(甲)



(乙)

图三

(2)称园柱体在水中质量 m_2

①调天平平衡

②把托架跨在天平盘上，注意托架不能与天平盘相碰，起动天平，观察天平平衡，如天平平衡破坏，说明托架与天平相碰，应止动天平，调整托架，直至起动天平仍平衡为止。

③把盛有大半杯水的塑料杯放在托架上。

④取约 $40cm$ 长的细线分成两等分，将其中一段用来系牢铜园柱体，并将其挂在天平小钩上，并使铜园柱体全部浸没在水中(注意样品不能与杯子相碰)，另一段线放在右盘上，用来抵消左盘悬线的重量，按已测的 d, h, m_1，估算出 m_2，的近似值。按正确的称衡法称出铜园柱体在水中的质量 m_2。

四、实验数据

天平最小分度值　　mg,　　仪器误差$\Delta_{仪}=$　　$S_{仪}=$

游标卡尺分度值　　mm,　　仪器误差$\Delta_{仪}=$　　$S_{仪}=$

千分尺分度值　　mm,　　仪器误差$\Delta_{仪}=$　　$S_{仪}=$

千分尺初值　　mm,　　水的温度 $t_{水}=$

内容 / 次数	待测样品在空气中质量 $m_1(g)$	待测样品在水中质量 $m_2(g)$	样品高度 $h(mm)$	样器直径 $d(mm)$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
平均值				
S_x				
测量结果	$\overline{m}_1 \pm S_{m1}$	$\overline{m}_2 \pm S_{m2}$	$\overline{h} \pm S_h$	$\overline{h} \pm S_d$

五、计算公式

$$1.\ \overline{\rho}_1=\frac{4\overline{m}_1}{\pi\overline{d}^2\overline{h}}$$

$$E_{\rho1}=\sqrt{(\frac{S_{m1}}{\overline{m}_1})^2+(\frac{S_h}{\overline{h}}^2)+(\frac{2S_d}{\overline{d}})^2}$$

$$S_{\rho1}=E_{\rho1}\cdot\overline{\rho}_1$$

$$\therefore \rho_1=\overline{\rho}_1\pm S_{\rho1}(单位)$$

$$\overline{\rho}_2=\frac{\overline{m}_1}{\overline{m}_1-\overline{m}_2}\cdot\rho_o$$

$$E_{\rho2}=\sqrt{[\frac{\overline{m}_2S_{m1}}{\overline{m}_1(\overline{m}_1-\overline{m}_2)}]^2+(\frac{S_{m2}}{\overline{m}_1-\overline{m}_2})^2}$$

$$S_{\rho 2}=E_{\rho 2}\cdot\overline{\rho_2}$$

$$\therefore \rho_2=\overline{\rho_2}\pm S_{\rho 1}(单位)$$

ρ_o 的计算，由 $t_水$ 查教材 $P329$ 表 7。

例：$t_水=16.5℃$，查表 $t_{16}\rightarrow\rho_{16}=998.943kg/m^3$

$t_{17}\rightarrow\rho_{17}=998.774kg/m^3$

$$\begin{aligned}\therefore \rho_o&=\rho_{16.5}=\rho_{16}+\frac{\rho_{17}-\rho_{16}}{17-16}\times(16.5-16.0)\\&=998.89+\frac{998.80-998.89}{17-16}\times 0.5\\&=998.84kg/m^3\end{aligned}$$

注意：1.S 只能取一位，E 取 1－2 位。

2. 平均值的末位应与 S 所在位对齐。

六、误差分析

1. 液静法测铜柱体密度时，由于园柱体需用悬线挂着称，所以在右盘中必须加以相同的纱线来补偿，线密度不均匀时会引起误差，所以使用悬线短些好。

2. 在液体中称衡时纱线要吸湿，使左右二线质量不等，而引起误差，所以操作要快，以免吸湿过多。

3. 二种方法比较，一般液体静力称衡法比较正确，因为使用精度较高的分析天平，使用仪器少，影响间接测量误差的因素少。

附：$\rho=\frac{m_1}{m_1-m_2}\cdot\rho_o$ 误差推导

$$lnp=lnm-ln(m_1-m_2)+ln\rho_o$$

$$\frac{d\rho}{\rho}=\frac{d_{m1}}{m_1}-\frac{d(m_1-m_2)}{m_1-m_2}+\frac{d\rho_o}{\rho_o}$$

合并同一变量系数

$$\frac{d\rho}{\rho}=\frac{-m_2}{m_1(m_1-m_2)}d_{m1}+\frac{d_{m2}}{m_1-m_2}+\frac{d\rho_o}{\rho_o}$$

微分号变误差号平方相加再开方　　$d_{m1}\rightarrow S_{m1}$　$d_{m2}\rightarrow S_{m2}$　$d\rho_o\rightarrow S\rho_o$

$$E_\rho=\frac{S_\rho}{\rho}=\sqrt{[\frac{m_2S_{m1}}{m_1(m_1-m_2)}]^2+(\frac{S_{m2}}{m_1-m_2})^2+\frac{S\rho_o}{\rho_o}}$$

考虑到在整个测量过程中 T 不变。$\therefore S_{\rho_o}=0$

$$\therefore E_\rho=\sqrt{[\frac{m_2S_{m1}}{m_1(m_1-m_2)}]^2+(\frac{S_{m2}}{m_1-m_2})^2}$$

实验四　用拉伸法测量金属丝的杨氏弹性模量

§1　教学要求

1. 要求学生学会用拉伸法测量金属丝的弹性模量的方法。

2. 根据虎克定律，固体线性在弹性限度内，在允许荷重的条件下，它的拉伸量是很微小的(约在十分之几毫米的数量级)。要求学生掌握用光杠杆镜尺法测定微小伸长量的原理、仪器的调节和观测以达到技能训练的目的，以及要求学生正确调节和使用望远镜。

3. 本实验是一个综合性测长度实验，要求学生从误差分析的角度考虑，不同长度量为什么要选用不同的量具有和测量方法，使学生体会到误差计算对实验的指导意义。

4. 学会使用逐差法处理数据

§2　实验方法

2.1　仪器的调整

(1)为了使待测金属丝处于铅直位置，调节杨氏模量测定仪三脚架的底脚螺丝，使其两支柱铅直。

(2)在金属丝下端钩上全部七只砝码，使金属丝拉直。并检查金属丝下端夹能否在平台方孔中自由上下运动，且不扭动。

(3)将光杠杆放在平台上，前面两个尖脚放在平台前模槽内，尾部尖脚放在方夹头的凹坑内。望远镜和标尺放在离光杠杆镜面前约 1.8 米左右，望远镜和光杠杆应处在同一高度(此高度要便于观察读数)。望远镜调到水平，光杠杆镜面和标尺大致铅直。

(4)望远镜，光杠杆和标尺的调节。

a. 用望远镜观察目标要做好两个调节。首先是目镜的调节，调到能清晰地看清望元镜中的十字叉丝(或一条水平黑丝)。然后再调节物镜，使标尺成象在十字凡丝的平面上。如果标尺与叉丝成象不同一平面，人眼上下移动时，标尺象和叉丝象就有相对移动，产生视差。

b. 怎样调节才能在望远镜中看清杠杆镜面所反射的标尺读数呢?(这是本实验教学的关键，也是难点)。

2.2　实验步骤

(1)检查试验：砝码未加时，看一个标尺读数，砝码全部加上去，看一个标尺读数，如果无读数变化，就要检查光杠杆三个脚的位置是否放得正确。读数变化要控制在标尺的中部，这要稍微调节一个光杠杆镜面的俯仰角度。

(2)正式实验：加一个砝码记录一个标尺读数，直到加上十个砝码，然后减一个砝码记录一个标尺读数，直到全部取去为止。增或减到某一相同荷重，标尺的读数应大致相同，如果