

实验中的基本规范

CPHO-S 物理竞赛联考组委会 2022.4.8
主编：李忆唐 胡宸源 审稿及修改：李瀚奕

引言

物理是一门以实验为基础的科学。在学习实验的过程中，我们首先应了解各基础仪器及其测量方法，所有实验方法的选择及数据分析都是建立在对这些仪器测量精度及测量特性充分了解的基础上。规范的数据处理及报告书写也同样重要，这帮助我们明晰方法和原理，规范化实验操作，从而得出正确的测量结果。毫不夸张地讲，对精度的描述是实验数据的灵魂，正确的有效位数和误差估计体现了实验者对于实验条件的合理判断。误差分析同时也对实验有着指导作用，判断误差的主要来源并选用合适的实验仪器及测量方法减小不确定度¹，是实验中最根本的问题。

以下我们简单介绍一些有关基础仪器，数据处理方法，误差分析，规范书写报告的知识，希望对大家有所帮助。

1. 基础测量仪器

1.1 刻度尺：包括钢尺、米尺、光具座等，一般分度值为1 mm，估读至0.1 mm。

1.2 螺旋测微器：一般分度值为0.01 mm，估读至0.001 mm。实际上，由于螺旋测微器测量精度较高而其机械本身可能存在损耗，当螺旋测微器所测真实长度为零时，实际读数可能不等于零，故进行数据处理时需减去零差。

1.3 游标卡尺：有内测量爪、外测量爪和深度尺，可根据实验要求选择，一般分度值为0.01 mm或0.02 mm，同样需减去零差，游标卡尺不予估读。

1.4 读数显微镜：具有水平、竖直两个测量尺，水平尺与螺旋测微器类似，竖直尺与游标卡尺类似，可以二维读数。由于读数显微镜鼓轮齿轮间存在空程，故只能单向转动读数。

1.5 分光计：游标盘读数，与游标卡尺类似，分度值为1'，需要双侧读数以消除偏心差。

1.6 测微目镜：与螺旋测微计类似，一般分度值为0.01 mm，估读至0.001 mm。

1.7 指针式电表：一般要求测量值应当大于满偏读数的 $\frac{1}{3}$ ，需要估读至十分之一或五分之一最小分度值。注意多用电表的量程和档位，以及电表的表盘上各标注的含义以避免错误使用电表。

1.8 数字式仪器：如数字电表、模拟示波器、温度传感器等，直接记录完整数据，不必估读或取舍，特别地，对于信号发生器而言，需要选择合适的位数进行记录。

1.9 示波器：需要估读，保留合适位数，注意每格对应的电压或时间。

1.10 非线性表盘：指针式欧姆表等，不需要估读。

在进行数据记录及处理时，推荐绘制表格。列表时，需要给出物理量并交代清楚其物理意义，同时写明单位，表中数据要正确反映测量结果的有效位数。

2. 数据处理

值得提前说明的是，现阶段对于误差理论的要求并不高，除了不确定度传递外很少有严格的不确定度计算，不同的教材也对误差理论有不同的说明。学习误差理论的目的是对实验条件，仪器精度，测量结果做一个大致的评估，对于不确定度计算，只要有合理的估计理由和正确的计算方式即可，无需过度纠结于不同估计方式所得不确定度的差异。

¹ 在实验中，不确定度用以定量描述测量值的不确定程度。

2.1 有效位数及其计算

有效位数这一概念在物理实验中非常重要，意味着数据的精度：数据最后一（或两）位为可疑位，该位以外的值均可以认为是准确的。特别地，物理常数等绝对精确的数具有无穷位有效位数。当然，在计算过程中有效位数可以适当多保留一位，但是盲目保留结果的有效位数意味着对实验精度没有概念。

对于有效数字的修约规则，简单来说可以大致总结如下：

加减法结果以小数点后位数最少的数据为基准，如：

$$1.234 + 5.67 = 6.90,$$

乘除法的结果以乘（除）数与被乘（除）数中有效数字较小的为准，如最终结果首位较小，可选择性多保留一位：

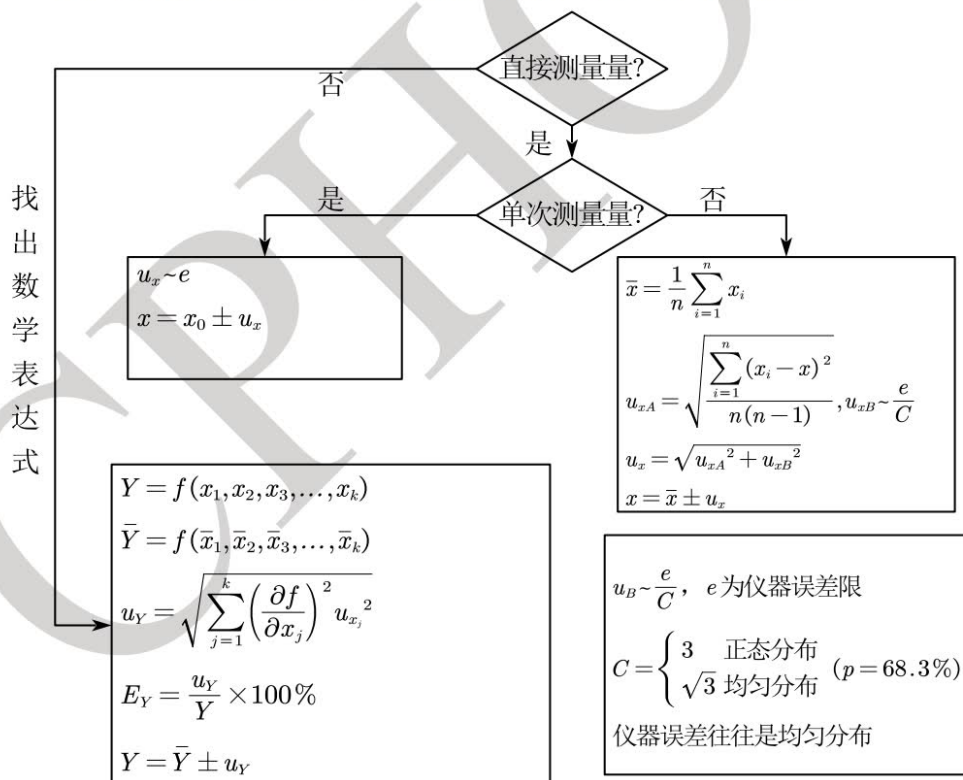
$$1.234 \times 5.67 = 7.00,$$

对于较复杂的函数，当然，可以用严格的误差理论计算，更简单一点可以把对应函数输入卡西欧，改变变量参数的最后一位有效数字，观察函数值的范围来确定有效位数。

2.2 误差估计与传递

首先明确，误差估计是一种对实际实验的估计，完全脱离实际实验的误差估计是没有意义的。大部分物理量均不能被直接测量，我们通过理论推导将这些物理量和直接测量量进行关联。直接测量量的误差来源有两部分，仪器误差和测量误差，其所造成的不确定度分别称为A类和B类不确定度。

误差理论众说纷纭，下面给出一种较为普遍的误差估计与计算的方法：



应当说明的是，一般不确定度 u 只保留一位有效数字，当 u 首位较小为1或2时可选择性多保留一位。

单变量多次测量不确定度的计算可以借助Casio fx-991CNX计算器中统计模式（模式6）中的单变量统计，其中

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, s_x = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}.$$

特别地，当间接测量量可以表示成各直接测量量之和（差）的形式时，即

$$Y = \sum x_i,$$

不确定度传递公式可以写作

$$u_Y = \sqrt{\sum u_{x_i}^2}.$$

间接测量量表示直接测量量幂的乘积的形式时，即

$$Y = \prod x_i^{a_i},$$

不确定度的传递公式可以写成

$$\frac{u_Y}{Y} = \sqrt{\sum \left(a_i \frac{u_i}{x_i}\right)^2}.$$

2.3 最终结果的表示

希望大家习惯用结果表达式来表示我们数据处理的结果，格式为：

$$\text{物理量} = (\text{最佳估值} \pm \text{不确定度}) + \text{单位}.$$

注意不确定度和最佳估值应保证有效数字对齐，即最佳估值的可疑位正好对应不确定度。

最后要强调的是，有效位数和不确定度都是对实验结果的评估，无论何时不能单纯根据仪器精度，或者单纯通过数学计算去判断有效位数。例如利用示波器测量电容充放电时间常数时，单看测量数据和计算过程，不同的测量工具会得到不同精度的结果，利用电脑测量像素点间距显然比利用刻度尺测量有更多的有效位数，但实际上，此时示波器本身精度受限成为了主要的误差来源，测量结果有效位数已经不可能通过改变测量方式继续增加了。

3. 单元函数关系的解析

3.1 逐差法

单次逐差法适用于等间隔、线性关系的处理，其优点在于平衡了计算复杂度和测量数据利用率。利用逐差法处理数据时，我们常常将 $N\Delta x = |x_{i+N} - x_i|, i = 1, 2, \dots, N$ 视为一直接测量量。如是，不确定度的计算是容易的。

3.2 线性拟合

当探究某因变量与数个自变量间的关系时，我们需要控制变量进行考察，所以实验中处理的函数关系常常是单元的。一般地，我们认为在现阶段接触的大多数单元函数关系都可以通过变换处理成线性函数。故在本部分中，我们仅讨论线性函数的解析方法。

对于数据集 (x_i, y_i) ，线性拟合即是寻找合适的线性函数 $f_0(x) = ax + b$ ，使得

$$S = \sum_i (f_0(x_i) - y_i)^2$$

最小。

容易推导得到，在上述定义下

$$a = \frac{\overline{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2}, b = \bar{y} - a\bar{x},$$

拟合度

$$r = \frac{\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y}}{\sqrt{(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2)}}$$

利用Casio fx-991CNX计算器中统计模式（模式6）可以直接得到拟合结果。注意：在进行拟合前，一定要给出 f_0 的范式，并说明拟合对象。

线性拟合的不确定度计算是复杂的，一般仅需保留合适的有效位数即可。拟合结果的有效位数既受到测量数据 x_i, y_i 的限制，也同时受到拟合度 r 的限制，作为一种简化，你可以认为拟合公式的相对不确定度

$$\frac{u_a}{a} \sim \sqrt{\frac{1}{r^2} - 1}, u_b \sim u_a \cdot \sqrt{x^2}.$$

3.3 作图法处理数据

作图是最直观地展现自变量与因变量关系的方式，作图的必要要素有以下几点：

图名、坐标轴、物理量、单位及标度：坐标起点取值视情况而定，应适当选取使曲线至少占据坐标纸的70%；

数据点：不建议用 \bullet 标记，建议用 \times 或 $+$ 等明显记号标出；

曲（直）线：线性图像应用直尺画合适的直线，曲线应当光滑，且曲（直）线应穿过尽可能多的数据点，并保证曲（直）线两端的数据点分布大致相同；除了校准曲线等必要的折线图外，坚决杜绝连点成线；

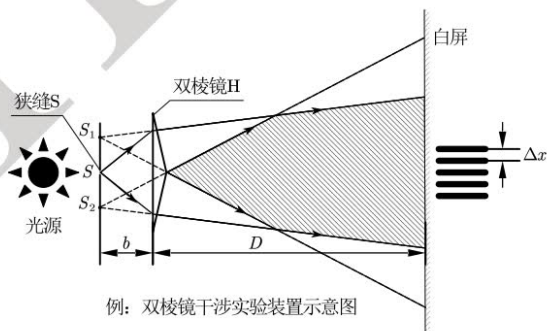
注意：计算斜率时应取直线上相距较远的点以减小误差，取点及其坐标在图像中应标出，不能取原数据点，哪怕此点肉眼看来恰好落在直线上。作图时应保持图的整洁美观。此外，应当具备识别异常数据点的能力。

4. 实验报告中的书写规范

4.1 装置示意图的绘制

实验装置示意图的意义在于展示实验实际操作时的状态，也就是说，可以从装置示意图中了解到各个仪器在实验中发挥的作用。所以说，在绘制装置示意图前，一定要明确仪器间的位置关系，以及在摆放中需要注意的问题，并在示意图中呈现。

为了使得示意图的表述更清晰，图中所有仪器都需要进行标注，容易产生误解的地方应当有文字说明。



4.2 电路图

电路图中除了体现正确的电路原理之外，同时应当标注所有的电学元件名称、部分有极性的元件的正负极，以及电路的设定参数。

4.3 光路示意图

光学实验中光路示意图能最直观的呈现基本原理，在装置示意图的基础上还有几个必备的要素：

各光束与光线：注意要画出有代表性的各类光线，如劳埃镜是否经过平面镜反射的光均应画出，全反射光路中是否达到全反射的光也应画出；

辅助要素：包括虚像点、法线、垂足等等。

4.4 公式的推导及表达

实验中公式的推导相对简单，但仍应展现重要推导步骤，最终结果应当化为最简形式。

注意：公式中只能出现直接测量量或已经测得（或处理）的物理量，表达式中各参量的含义应予以说明。

附：如何阅读实验指导书（以实验三十三“调节分光计并用掠入射法测定折射率”为例）

《全国中学生物理竞赛实验指导书》（以下简称指导书）是竞委会编写的指导物理竞赛实验的书目。指导书对一个实验的原理、背景，使用的仪器，具体的实验步骤及注意事项，甚至到数据的处理及误差分析都有较详细的说明。同时，复赛涉及的实验与考察的知识点大部分可以从指导书上的寻得痕迹，由此，指导书的重要性不必再多提。

下面以指导书中实验三十三为例简单介绍阅读实验指导书中一些需要重点关注的内容：

1. 实验原理

1.1 熟练掌握公式的推导过程及各字母的含义，能够自己推导（图中红框）。

1.2 原理图需熟记。

1.3 重视实验条件，关注公式成立所需满足的条件（图中黄框）。

【实验原理】

掠入射法也称极限法，是测定透明液体或固体折射率的基本方法之一。根据掠入射法原理已设计出专门的测量仪器，如阿贝折射计等。作为原理性实验，可在分光计上用掠入射法测定三棱镜的折射率。要求单色扩展光源（不需要平行光），以提供各方向的入射光，形成清晰的明暗分界线。

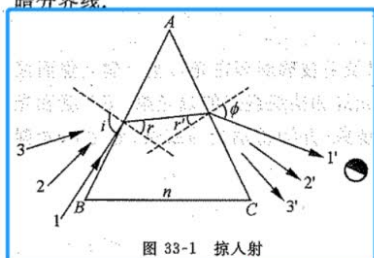


图 33-1 掠入射

如图 33-1 所示，用单色扩展光源照射到顶角为 A 的玻璃三棱镜的 AB 面上，以角 i 入射的光线经三棱镜两次折射后，从 AC 面以角 ϕ 射出。根据折射定律

$$\begin{cases} n_0 \sin i = n \sin r, \\ n \sin r' = n_0 \sin \phi, \end{cases} \quad (33.1)$$

式中 n_0 和 n 分别是空气和玻璃的折射率。考虑到 $r + r' = A$ 和 $n_0 = 1$ 可得

$$n = \frac{1}{\sin A} \sqrt{\sin^2 i \sin^2 A + (\sin i \cos A + \sin \phi)^2}. \quad (33.2)$$

由图 33-1 可以看出，对于入射角 $i < 90^\circ$ 的光线（如光线 1, 2, 3 等）均可进入三棱镜，在 AC 面出射光线 $1', 2', 3'$ 形成亮场；而入射角 $i > 90^\circ$ 的光线无法进入三棱镜（BC 面为非光学面），形成暗场。明暗分界线对应的是以 $i = 90^\circ$ 入射（称为掠入射）的光线，此时的出射角最小，称为极限角 ϕ 。式 (33.2) 在掠入射条件下可简化为

$$n = \sqrt{1 + \left(\frac{\cos A + \sin \phi}{\sin A} \right)^2}. \quad (33.3)$$

只要测出顶角 A 和极限角 ϕ ，由上式可求出棱镜的折射率 n 。

2. 实验步骤

2.1 熟记仪器调节的要求。

1. 调节分光计。

调节分光计的基本要求：平行光管产生平行光；望远镜接收平行光（即聚焦无穷远）；平行光管和望远镜的光轴与仪器转轴垂直。

2.2 了解具体操作，大意正确即可，但每步操作及其细节需心中有数，答题时不能遗漏（黄色高亮），书中已注明的注意事项需重点关注。

① 调节望远镜聚焦无穷远.

旋转望远镜目镜,使分划板上的“十”准线看清楚.把平面镜放在载物平台中心处,且与 b_1b_2 连线平行.如果粗调合适,应在望远镜目镜视野内找到亮“十”字反射像,旋转载物台将平面镜绕轴转 180° ,仍能找到亮“十”字反射像.松开螺钉(3-3),前后移动望远镜套筒,直到亮“十”字反射像最清晰,并与“十”准线无视差.这时,望远镜已聚焦无穷远.拧紧螺钉(3-3)锁定套筒.

2. 调节三棱镜的主截面与仪器转轴垂直.

如果望远镜光轴与三棱镜的两个侧面(即光学表面 AB, AC)分别垂直,则望远镜和三棱镜主截面平行,仪器转轴与三棱镜主截面垂直.把三棱镜放在小平台上,三条边分别垂直于三个螺钉 b_1, b_2, b_3 的连线,如图 33-6 所示.转动游标盘使 AB 面正对望远镜,调节 b_1 使亮“十”字反射像在 MN 线上(不可调节望远镜的倾角螺钉);然后 AC 使面正对望远镜,调节 b_2 使亮“十”字反射像在 MN 线上,反复调节直到两个面反射的亮“十”字像均在 MN 线上.

3. 测顶角 A .

见图 33-7,转动望远镜,先使望远镜与 AB 面垂直,即“十”字反射像调至 MN 与 PP' 的交点处,记下此时左右游标的读数 θ'_1, θ''_1 ;然后转动望远镜与 AC 面垂直(注意一定要止动游标盘),记下两边游标的读数 θ'_2, θ''_2 .两次读数相减便得到顶角 A 的补角 ϕ :

2.3 读图: 书中有非常多的示意图, 其中的大多数都要求熟记且可以默写.

关注图的标注: 图(a)中的各部分名称需要熟记, 有助于了解仪器结构. 值得注意的是, 画示意图时都应写上标注, 有些指导书上并未标注完全的(如图(b)), 应自行补上落下的标注. 关注图的物理意义, 如图(b), 在描述自准直光路及原理时, 左右两个图都应画上, 缺一不可.

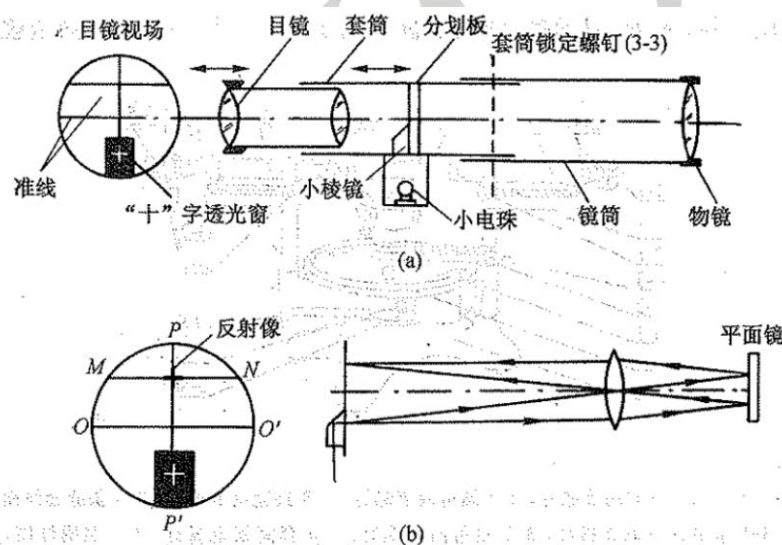


图 33-4 望远镜结构(a)及自准直光路(b)

3. 思考题

每个实验的最后都附有思考题, 很多都没有标准答案, 有空时可以和同学一起讨论, 加深对相关实验的理解.

4. 写在最后

当然, 如果想真正学好实验, 提升实验能力, 单单看指导书肯定是不行. 如果有志于冲击省队、金银牌、集训队甚至国家队, 在保证理论的前提下, 有条件的同学一定要花时间泡实验室, 没有条件的话可以看一看《奥赛经典》和历年国际奥赛的实验题.

完.