湖州师范学院
HUZHOU UNIVERSITY

大学物理实验教程

《大学物理》精品课程建设组
沈建民　丁斌刚　编著

二〇一五年九月

前　言

大学物理实验是整个基础物理教学的重要组成部分，它对培养大学生的科学素养、动手能力有着不可替代的作用。当前，尽管已有多种大学物理实验的参考教材，但由于各个学校的教学课时安排和仪器设备的差异，很难有一本适合本校公共专业的大学物理实验教材，故此，本课程组根据国家教育部关于公共本科物理实验课程教学基本要求的精神，根据我校的实际情况，编写了本教程。

本教程共分六章，第一、二章是误差理论和有效数字处理，偏重于实用性，可用 2 个学时介绍。第三章是基础实验，其中力学 4 个，热学 2 个，电学 4 个，光学 2 个，着眼于基本仪器的使用和测量方法的训练。第四章是选做实验，共有十个，其中力学 2 个、热学 1 个，电学 4 个，光学 2 个，近代物理 1 个，教师可根据实际情况任选几个。第五章是设计性实验的理论介绍，设计性实验是在学生完成必做和选做实验的基础上的继续提高，是实验教学的较高层次，也是培养学生独立工作能力和创新精神的教学过程，故教师应该重视这部分的教学工作。至于设计性实验的内容，本教程并不具体罗列，主要应由学生根据自已的兴趣和现有的仪器进行设计，教师可给予一定的指导。最后第六章的附录，为了方便学生，给出了实验中基本仪器的使用方法、常用的物理学常数以及主要的参考教材，它是整本教材的一个组成部分。

《大学物理精品课程》建设组

2015 年 9 月

目 录

绪　　论

一、大学物理实验课的目的

物理学从本质上说是一门实验科学。因为物理学的理论是通过观察、实验，抽象、假设、再实验等研究方法建立起来的，实验既是理论的基础又是检验理论是否正确的唯一标准。因而在现代物理学的研究中物理实验具有重大意义。

大学物理实验课作为对学生进行系统的实验教育的一门课程，它的目的不在于使学生发现新的规律和研究测定物理常数的更精确的测定方法，而是要学生了解大学物理实验的基本内容；掌握实验操作的基本技能；初步训练进行实验设计的基本能力，从而提升学生的实验素养。具体地讲是：

1．学习大学物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。其中包括：

（1）基本物理量的测量原理和方法，基本仪器的合理选择和正确使用。

（2）误差的估计和有效数字的运算。

（3）数据的处理以及实验结果的分析、判断和写出完整的实验报告等。

2．通过对实验现象的观察和分析，从理论和实践的结合上加深对大学物理学中一些基本概念和规律的认识。

3．培养严肃、认真和实事求是的科学态度和作风及良好的实验习惯。

4．通过基本实验的设计，培养学生的创新精神、创新意识和创新能力。

二、大学物理实验的基本程序

（一）实验预习

为了在规定的时间内高质量地完成实验的内容，学生一定要作好实验前的预习。这必须在进入实验室之前完成。

预习时应以理解原理为主，搞清实验内容是什么，要用的是什么方法，所依据的道理又是什么。为了使测量数据眉目清楚，防止遗漏，应根据实验的要求预先设计好数据记录表格。

（二）实验操作

进入实验室后，首先要了解实验规则及注意事项，其次就是熟悉仪器和安装调整仪器（例如，千分尺调零，天平调水平和平衡，光路调同轴等高等）。

准备就绪后开始测量。测量的原始数据（一定不要加工或修改）应整齐地记录在预先设计好的表格内，数据的有效位数应由仪器的精度或分度值加以确定。实验原始数据的优劣，决定着实验的成败，读数时务必要认真仔细。另外，不要忘记记录有关的实验环境条件、仪器的精度、规格及测量的单位等。

（三）实验报告

实验报告是实验工作的总结。实验报告要求文字通顺、字迹端正、图表规矩、结果正确、讨论认真。应养成实验操作结束，离开实验室后尽早写出实验报告的习惯，因为这样做可以收到事半功倍的效果。

完整的实验报告应包括下述几部分内容：

1．实验名称

2．实验目的

3．仪器用具（实验仪器）

4．实验原理：应简要地说明，并列出实验所要用的主要公式、电路或光路图。

5．实验步骤：应写出实验操作过程中的每一步骤。

6．实验记录：实验中有用的原始数据要尽量以表格的形式列出，并正确地表示出有效数字和单位。

7．数据处理：根据实验要求计算出最后的测量结果，可采用列表法或作图法。对所得的数据应进行误差分析。

8．实验结果：最后的结果应包括测量值、误差和单位。如果实验是为了观察某一物理现象或者观察某一物理规律，可只扼要地写出实验结论。

9．讨论与分析：描述实验中观察到的异常现象及可能的解释；分析实验误差的主要来源；对实验仪器和方法的建议等。还可以谈谈实验的心得体会。

以上是对实验报告的一般性要求。不同的实验，可以根据具体情况有所侧重和取舍，不必千篇一律。

湖州师范学院学生实验守则

一、凡进入实验室从事实验活动的学生必须遵守实验室的各项规章制度。

二、学生必须按时上实验课，迟到15分钟以上者不能进实验室，该次实验由本人申请，经实验室主任同意后方可补做。一学期三次未做实验者不能参加该课的考试。

三、实验前必须认真预习实验内容，明确实验目的、步骤，掌握实验用仪器设备的性能及基本操作规程。

四、进实验室后必须保持安静，不大声喧哗、谈话，不准吸烟，不准乱扔杂物，也不准动用与本实验无关的其它仪器设备、物品等。

五、实验时要服从教师指导，符合规范操作，如实记录各种实验数据，认真分析思考，努力培养独立进行实验的能力。

六、实验过程中要注意节约水、电、材料等，并要注意安全，遇到事故或异常现象时应及时采取措施，并立即向指导老师和实验室工作人员报告。

七、爱护实验仪器、设备和实验设施。损坏实验仪器设备、设施者，一律照价赔偿。

八、实验结束后，应做好清点、整理和复位工作，经老师和实验人员验收，合格后方可离开实验室。

九、实验完成后，按实验要求写出实验报告。

第一章 误差及其估计

§1-1 基本概念

一、测量的分类

所谓测量就是量的比较，具体地讲就是测定待测量和作为单位的标准量之间的倍数关系。例如，我们要测量一物体的长度，就得将它与米尺相比较，从而读出物体的长度是多少米。

根据所获得测量结果的方法不同，可以把测量分为直接测量和间接测量。

1. 直接测量和间接测量

由仪器或量具可以直接进行读数的测量称为直接测量。例如：用米尺量长度；用天平称质量；用温度计测温度；用安培表测电流强度；等等。

在大多数情况下，需要借助一些原理和公式由直接测量的结果计算出所要求的物理量，这样的测量称为间接测量。例如测量圆柱体的体积，总是先测量它的高 h 和直径 d，然后由公式 $V=\frac{1}{4}\pi d^2 h$ 求得它的体积，V 为间接测量量。又如利用单摆测当地的重力加速度 g，可以直接测量单摆的摆长 L 和振动的周期 T，然后由公式 $g=4\pi^2 L/T^2$ 求得该地点的 g 值，g 为间接测量量。

根据获得测量结果的条件不同，可以把测量分为等精度测量和不等精度测量。

2. 等精度测量和不等精度测量

如果对某一量重复地测量了许多次，而且每次测量的条件都相同（同一观察者，同一仪器，同一方法，同一环境等），在这种情况下，我们没有理由指出某一次测量比另一次更准确些，即每次测量的精度是相同的，我们称它为等精度测量。

测量条件中只要其中一个发生了变化，就变成不等精度测量。例如，不同环境温

度下测密度就是不等精度测量。一般在进行多次测量时要尽量保持为等精度测量。

二、误差的定义

某物理量客观存在的值称为真值。由于测量仪器精度有限，加以测量方法、周围环境，人的主观因素等等都不可能臻于完美，因此测量值和真值之间总是存在一定的差异。这一差异称为误差。

如果用 x_0 表示真值，用 x 表示测量值，则误差的数学表达式为：

$$\Delta x = |x - x_0|$$

由于真值无法精确得到，因此误差不仅不能完全避免而且也不能完全确定。误差只能通过各种方法加以估计。

三、测量结果的表示

在测量中误差是不可避免的，也就是说真值是无法测出的。因此物理实验的任务之一就是：尽可能地减少影响测量的各种因素，以测出在该条件下待测量的最佳值（最可信赖值）x，同时对这一测量值 x 与真值 x_0 的偏离程度作出估计，即给出测量的误差 Δx 。

在大多数情况下，这种偏离可能是正的，也可能是负的。因此测量的结果可记为：

$$x \pm \Delta x$$

它表示：可以有相当把握地说，真值 x_0 是在 $x - \Delta x$ 至 $x + \Delta x$ 之间。Δx 越小，测量值与真值越接近，测量的准确度也越高。

§1-2 误差的分类

误差存在于一切测量之中，并贯穿于测量过程的始终。在分析和估计误差时，不可能也没有必要对所有的误差逐一进行讨论，而应当抓住影响测量误差的主要原因。

根据误差的性质和产生的原因，可以把误差分为系统误差与偶然误差。

一、系统误差与偶然误差

1. 系统误差

系统误差表现为测量结果总是向一个方向偏离。它的大小几乎不变或者呈现

某种变化规律。例如某尺子刻度偏大，那么用它测量物体长度时，测量总是偏小，而且偏小的百分比每次都几乎一样。

产生系统误差的主要原因大致有：

（1）仪器缺陷所引起的误差。例如秒表偏快、表盘刻度不均匀、砝码本身不准等。

（2）个人习惯引起的误差。例如有人读刻度总偏高，有人却总偏低；有人按秒表总失之过早，有人却总失之过迟等。

（3）实验理论或方法不够完善所引起的误差。例如由单摆测重力加速度，应用公式$T = 2\pi\sqrt{\dfrac{L}{g}}$时，由于该公式本身具有近似性，因而必然会引进一定的误差；又如做准确称衡时，未考虑空气浮力，也会引起误差；等等。

由于系统误差总是偏向一侧，因此不能通过多次测量取平均来消除它。但系统误差的起因通常是可以被发现的，因此可以通过修正、改进加以排除或减小。

2. 偶然误差

偶然误差是指由于某些偶然的或不确定因素所引起的误差。它表现为每次测量值相对于真值呈现无规则涨落。即在相同条件下，对同一物理量作多次测量，其测量值有时偏大，有时偏小。经验证明，在作等精度测量，当测量次数很多时，偶然误差完全服从统计规律，并具有以下性质：

（1）绝对值相等的正负误差出现的机会相等。

（2）绝对值较小的误差比绝对值较大的误差出现的机会更多。

（3）当测量次数无限增多时，各次偶然误差的算术平均值趋近于零。换言之，无限多次测量结果的算术平均值无限趋近于真值（绝对的真值是测不出来的）。当然，实际测量的次数总是有限的，然后可以确信，有限次测量的算术平均值虽然并非真值，它却是各次测量所能取得的最可靠值。

由于偶然误差具有以上性质，因此在等精度测量条件下，增加测量次数对减小偶然误差是有利的。

二、仪器误差与读数误差

仪器误差是由仪器设计和制作时引入的，通常由仪器的制造和计量部门给出，并注明在仪器的铭牌上或仪器技术说明书上。

由观测者读数引入的误差称为读数误差。读数误差与仪器的刻度和观测者的分辨能力有关。

三、绝对误差与相对误差

设测量值为x，误差为Δx，则测量结果可表示为$x \pm \Delta x$。

这里的Δx又称绝对误差。它的单位与测量值的单位相同。它反映了测量值偏离真实值的大小，即反映了测量精确程度的高低。

但是Δx不能明显地反映出测量的相对精密度。例如，比较下面两个测量结果：

$$x_1 = 3.175 \pm 0.006\,(\mathrm{cm}), \quad x_2 = 0.031 \pm 0.006\,(\mathrm{cm})$$

这两个结果的绝对误差都是 0.006(cm)，但哪个结果的精密度更高呢？为了比较测量结果的相对精密度，需引入相对误差的概念。

相对误差定义为绝对误差与测量值的比值。一般用百分数表示，这样表示的相对误差又称为百分误差。若用E表示相对误差，则其表达式为：

$$E = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

在上面的例子中，其相对误差分别为：

$$E_1 = \frac{\Delta x_1}{x_1} \times 100\% = \frac{0.006}{3.175} \times 100\% = 0.2\%$$

$$E_2 = \frac{\Delta x_2}{x_2} \times 100\% = \frac{0.006}{0.031} \times 100\% = 20\%$$

显然，x_1的相对精密度要比x_2的相对精密度高。

顺便说一句，由于相对误差是没有单位的，所以可用来比较不同单位的几个物理量的相对精密度。

§1-3 直接测量量的误差估计

下面对直接测量量的误差如何估计和计算进行初步讨论。如果不作特别声明，均假定已消除或修正了系统误差。

一、多次测量的误差估计

由于测量存在着偶然误差，即使消除或修正了各种系统误差，多次测量中的每一次测量结果也会有所差异。那么如何才能更好地表达测量结果呢？误差又应如何估计呢？

规定一：在测量条件相同的情况下，用多次测量的算术平均值作为测量结果的最佳值。

因为偶然误差服从统计规律，在测量条件相同的情况下，随着测量次数的增多，测量值的算术平均值趋近于真值，所以在多次测量中算术平均值最好地代表了真值。

例 1：对某长度 L 进行了 5 次测量，得到

L_1=5.50cm　　L_2=5.53cm　　L_3=5.56cm　　L_4=5.55cm　　L_5=5.51cm

试求其算术平均值。

解：$\overline{L}=\dfrac{1}{5}\left(L_1+L_2+L_3+L_4+L_5\right)=5.53\,(\mathrm{cm})$

算术平均值的普遍表达式为：

$$\overline{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i=\frac{1}{n}\left(x_1+x_2+\ldots+x_n\right)$$

式中：$x_1,x_2,\ldots,x_n$ 代表各次等精度测量的测量值；n 代表测量次数。

规定二：在测量条件相同的情况下，多次测量结果的偶然误差取算术平均偏差。

因为实际测量的次数总是有限的，所以我们不可能得到测量量的真值，只能求出测量量的算术平均值。测量值与算术平均值之间的差异可以用算术平均偏差来估计。它反映了测量结果的可靠程度。算术平均偏差简称平均误差。

设各测量值 x_i 与算术平均值 $\overline{x}$ 的偏差为 Δx_i，即：

$$\Delta x_i=\left|x_i-\overline{x}\right|\quad\left(i=1,2,\cdots,n\right)$$

则算术平均偏差的表达式为：

$$\overline{\Delta x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta x_i=\frac{1}{n}\left(\left|x_1-\overline{x}\right|+\left|x_2-\overline{x}\right|+\cdots+\left|x_n-\overline{x}\right|\right)$$

这样，被测物理量的结果应表示为：

$$x=\overline{x}\pm\overline{\Delta x}$$

其意义为：被测物理量x的最佳值是$\bar{x}$，区间$\bar{x}-\overline{\Delta x}$—$\bar{x}+\overline{\Delta x}$最大可能地包含了真值。

例 2：试写出上例中的测量结果。

解：$\bar{L}=5.53\,(\text{cm})$

$$\overline{\Delta L}=\frac{1}{5}(0.03+0+0.03+0.02+0.02)=0.02\,(\text{cm})$$

所以测量结果为：

$$L=\bar{L}\pm\overline{\Delta L}=5.53\pm0.02\,(\text{cm})$$

二、单次测量的误差估计

有时被测物理量不可能在同样条件下进行重复测量（如一瞬即逝的现象），有时多次测量也无必要（若对该物理量的测量精密度要求不高）。这时可用一次测量值作为测量结果的最佳值，取仪器误差作为测量误差。

规定三：单次测量的误差取仪器误差。

这样，单次测量的结果可表示为：

$$x=x_{测}\pm\Delta x_{仪}$$

说明 1：这一规定的前提是要对仪器进行正确读数。

说明 2：仪器误差通常标在仪器的铭牌上，有时用仪器的准确度级别表示。

说明 3：若没有给出仪器误差，可用下述方法进行估计：

对有游标的量具和非连续读数的仪表（电子秒表、数字仪表），取分度值。对连续读数仪表，取分度值的一半。

例 3：如图 1 所示，若说明书给出仪器误差为 0.2ºC，则该液体温度计测得的温度为 17.1±0.2（ºC）。

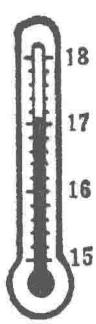

图 1

例 4：如图 2 所示的电子秒表表示的时间为 23.06±0.01（秒）。

图 2

例 5：如图 3 所示，用米尺测得的物体的长度可表示为 3.00±0.05（cm）。

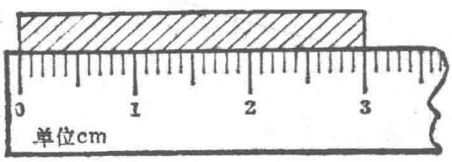

图 3

§1-4 间接测量量的误差估计

间接测量量的量值是由诸直接测量量的量值经一定的关系式计算得到的。由于各直接测量量有误差，必然会导致间接测量量也有相应的误差（这叫做误差的传递），其大小可由误差传递公式由直接测量量的误差经计算得出。

设 $y = f(x_1, x_2)$，则

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

取绝对值是按照误差宁大勿小的原则。相对误差可表示为

$$\eta = \frac{\Delta y}{y} \times 100\%$$

习题一

1. 比较下列三个量的绝对误差和相对误差哪个大？哪个小？

（1） $x_1 = 34.98 \pm 0.02\,(\mathrm{s})$

（2） $x_2 = 0.498 \pm 0.002\,(\mathrm{s})$

（3） $x_3 = 0.0098 \pm 0.0002\,(\mathrm{s})$

2．计算下列数据的平均值和误差，把结果写成$\bar{x} \pm \overline{\Delta x}$的形式，并说明其相对误差。

（1） x_i(cm)=4.298，4.256，4.278，4.190，4.262

（2） x_i(kg)=0.0135，0.0126，0.0128，0.0133，0.0130

（3） x_i(s)=100.1，100.0，100.1，100.2，100.0

3．用单摆测重力加速度的公式为$g = 4\pi^2 \dfrac{L}{T^2}$，其中$L$为摆长，$T$为周期。若测得结果如下：

L=（50.02±0.01）cm ， $\dfrac{T}{2} = (0.7098 \pm 0.0001)\,\mathrm{s}$

试计算g的绝对误差Δg和相对误差E_g。

第二章　有效数字及其运算

§2-1　基本概念

一、什么叫有效数字

在测量时，被测物理量往往不是恰好等于所用仪器最小刻度的整数倍，而常常是介于二刻度线之间。为了使测量尽可能准确，还应当在二刻度线之间进行合理的估计。例如用以 mm 为刻度的米尺测某线段的长度时，假定线段的一端已和尺的零点对齐，另一端落在尺的 2.4cm 和 2.5cm 之间。我们还可以把最小刻度凭眼睛来等分，估计出线段的端点大约落在该毫米内十分之几处，于是就可以多读出一位数来。这样估读出的该线段的长度假设为 2.47cm。重读一次或者换一个人读数可能得到不同的结果，例如 2.46cm 或者 2.48cm。这种差异只可能出现在最后一位上，因为这一位的“7”、“6”或“8”是估计出来的，称为估计位。前面两位一般是不会读错的，因此前面两位称为可靠位。

定义：所有可靠位加上一位估计位组成的数字称为测量值的有效数字。

若测得某电路中的电流强度为 18.6A，则它有三位有效数字。现将这一结果表示成以 mA 为单位的量。若直接写出 18600mA，按测量值有效数字的含义，应当认为最后一位“0”是估计值，前面四位都是精确得到的，这显然与事实不符，因此从有效数字的视角来看，这种写法是错误的。正确的写法应当是 18.6×10^3mA 或 1.86×10^4mA 等。乘号前的数表示测量值的有效位数，后面 10 的三次方或四次方表示测量值的数量级。由此可见，在有效数字的后面不能随便加“0”的。

现再将这一结果表示成以 kA 为单位的量。若直接写成 0.0186kA，显然最后一位“6”仍然是估计位，而前面两个 0 则不是有效数字，因此这种表示不会引起误解，不过较好的表示应当为 18.6×10^{-3}kA 或 1.86×10^{-2}kA 等。由此可见，在有效数字前面加“0”是可以的，这些零不属于有效数字，仅用来标记小数点的位置。

综上所述，有效数字位数与单位的大小无关。

例 1：下面几个测量值分别有几位有效数字？

（1）0.2870cm；（2）6.02×10^3g；（3）0.05020×10^3m

答：（1）4 位；（2）3 位；（3）4 位。

二、测量结果的表示

在误差及其估计这一部分中，我们已学过测量的结果可记为 $x=\bar{x}\pm\overline{\Delta x}$。这里着重学习误差和测量结果的有效数字之间有什么关系。

例 2：用千分尺测某金属丝的直径，在不同区段进行了 5 次测量，得到：

d_1=2.389mm　d_2=2.345mm　d_3=2.339mm　d_4=2.325mm　d_5=2.377mm

试合理地表示出测量结果。

解：$\bar{d}=\dfrac{1}{5}(d_1+d_2+d_3+d_4+d_5)=2.355\,\mathrm{mm}$

$$\overline{\Delta d}=\frac{1}{5}(0.034+0.010+0.016+0.030+0.022)=0.022\,\mathrm{mm}$$

分析：该误差($\overline{\Delta d}=0.022\,\mathrm{mm}$)表明小数点后的第二位“2”已经是不确定的了，因此没有必要取更多的位。为此，我们可把它写成 0.02mm，那么测量值的算术平均值中小数点后第一个“5”就成为不确定位。按照有效数字的含义，小数点后第一个“5”后面的数也没有必要保留。因此测量结果应当表示为

$$d=\bar{d}\pm\overline{\Delta d}=2.36\pm0.02\,(\mathrm{mm})$$

由此可得到如下结论：

结论：测量结果的误差取一位，测量值的最末一位与误差位对齐。

三、尾数的舍入法则

在多数测量取平均时，对于大量尾数分布几率相同的数据，采用四舍五入会使入的几率大于舍的几率，这时采用“尾数凑偶法”更为合理。所谓“尾数凑偶法”即**小于五则舍，大于五则入，等于五则把尾数凑成偶数**。例如 4.026 取二位有效数字则为 4.0，取三位有效数字则为 4.03；1.23525 取三位有效数字则为 1.24，取五位有效数字则为 1.2352。

§2-2　有效数字的运算法则

在实验中，大量遇到的是求间接测量量，这就不可避免地要对直接测量量加