普通物理实验讲义

浙江师范学院物理系

前　言

本讲义是以我系两年来所用普通物理实验讲义为基础，参照1978年12月在上海召开的“全国高等师范院校实验大纲及教材编写会议”上通过的“高师院校物理系普通物理实验大纲”整理而成的。

《大纲》说明中指出：普物实验的个数以50～60个为宜。其中力、热、电、光部分比例大致如下：力、热学实验为18～22个（其中力学应占较大的比重），电学实验为18～22个，光学实验为12～16个。本讲义编写了57个实验项目，其中力学14个、热学9个、电学20个、光学14个，符合《大纲》要求。

各部分实验在选题上注意到如下两个方面：

①保证了最基本的实验（指现今大学中作为普物预备阶段的一些实验，今后随着学生在中学阶段物理实验训练的提高将适当的删减）。

②充实了一些需用仪器设备简单或是容易办到的实验。

在实验内容的叙述上又重点考虑了如下几个方面：

①实验原理和步骤写得比较详细，便于学生课外自学、课前预习。

②主要仪器一般都写明型号规格，仪器描述详尽。

③为使学生在写实验报告方面得到循序渐进的训练，在各部分开头几个实验中绘出记录表格和数据处理格式；在力学部分开头几个实验中还有“实验报告示例”。

这次，陈国柱、钟宵参、陆金生三同志负责整理。过去，下列同志曾参加过本讲义的部分编写工作：傅玲琳同志编写力学部分，夏亿谦同志编写热学部分，郑欣欣同志编写电学部分，沈廷华同志编写光学部分。田涛同志提供电磁学实验的不少资料。盛锡远、陈丰贵两同志负责绘图。此外，在整理过程中，参考了北京大学、山东大学、北京师院、江苏师院、上海师院等兄弟院校的交流讲义。

本讲义原系自用教材，应部分兄弟院校之需修订并代印，很不成熟，恳请指正。

浙江师范学院物理系

一九八〇年六月于金华

目 录

力 学 实 验

绪 论

一、物理实验的目的和任务

物理学的理论是通过观察、实验、抽象、假说等研究方法建立起来的。观察和实验既是理论的基础又是检验理论的唯一标准。观察是对自然界中所发生的物理现象，在不改变自然条件的情况下，按照它原来的样子加以观测研究。实验则是在人工控制的条件下，使现象反复重演，进行观测研究。在实验中，常把复杂的条件加以简化，以突出主要因素，排除或减少次要因素的作用，因而在现代物理学的研究中物理实验具有重大的意义。

师范学院物理系的主要任务是培养合格的中学物理教师。中学物理教师在学校中应充分运用各种实验手段帮助学生掌握物理学的基础理论，同时还必须指导学生进行物理实验。普通物理实验课程在完成上述任务中起着十分重要的作用，因而是物理系的基础课程之一，它与理论课程具有同等的重要性。

开设普通物理实验的目的，不在于发现新的规律和研究物理常数的更精确的测定方法，而是为此后从事物理学的研究和物理教学准备必要的条件，具体的讲是：

1．学习物理实验的基本知识、基本方法和培养实验技能，其中主要是学习基本测量技术和实验方法，仪器选择和

使用；实验数据的处理和简单的误差计算；实验结果的分析和判断，以及写出完整的实验报告等。

2．通过实验的观察和分析，加深对物理概念和规律的认识。

3．培养学生认真严肃和实事求是的科学态度和作风。

二、测量和误差

测量是人类认识物质世界和改造物质世界的重要手段之一。通过测量，人们对客观事物获得了数学上的概念，从而总结出一般的规律，建立起各种定理和定律。物理实验就是测出物理现象中各种物理量在变化过程中的数量关系。所谓测量就是量的比较，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。

由此可见，一个物理量都必须由数值（即倍数）与单位构成。

测量的分类：

1．直接测量与间接测量

在测量中，某些物理量可以直接从仪器刻度测得它的大小，这类测量叫做直接测量。如用米尺量长度，用天平秤质量，用温度计测温度，用电压表测电压等等。

用直接测量的物理量是很少的，大部分物理量需用一些原理和公式由直接测量得到的若干物理量推算出来，这类测量叫间接测量。如测量圆柱体的体积，总是先测量它的高 h 和直径 d，然后用公式 $V=\frac{1}{4}\pi h d^2$ 求得它的体积。又如利用单摆测量当地的重力加速度 g，可以直接测量单摆的摆

长L和周期T，然后用公式 $g=4\pi^2L/T^2$ 求得该地点的 g 值。

必须指出，一个物理量需用直接法或间接法来测量，并不是绝对的，通常与仪器的选择有关，例如测液体的比重，选用量筒和天平，则为间接测量，如果选用比重计则可直接测得。随着科学技术的发展，社会将为直接测量提供更多更精密的各种仪器设备。

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，我们没有根据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,我们叫它为等精度测量。

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。如在不同环境温度下测密度就是不等精度测量。

进行测量时，由于仪器设备、测量方法、实验环境的变化，以及实验者的技术水平和感官的灵敏度的限制等多种原因，所有的测量结果不可能绝对准确，总是近似的。测得值X与被测物理量的真值 A_0 之差，称为误差△，即

$$\Delta=X-A_0$$

测量误差的大小，直接反映了测量工作的价值，即测量结果的可靠性和测量的技术水平。

根据误差产生的原因和性质，常将它分为三类：

1．系统误差

在测量过程中，测得值总是有规律地朝着某一方向偏离真值，这种误差叫系统误差，也称恒定误差。系统误差的产生原因有：

①由于测量仪器本身的缺陷而产生的误差，如零点不

准，刻度不准，砝码未校准等。

②由于测量原理和方法的不完善而产生的误差，如精密测体积时未考虑膨胀的影响，单摆实验时未考虑空气阻力等。

③由于测量者的习惯与偏向引起的误差。如有的人读刻度总偏高，有的人偏低，有的人揿停表总前提，有的人总滞后等。

④由于外界环境的影响而产生的误差，如电压偏低，温度变化等。

在测量中，一旦发现系统误差，就可以采取措施尽量予以减小，但发现、估计和处理系统误差并不容易，完全有赖于实验者的经验和理论水平。

2．随机误差

实验中即使消除了产生一切系统误差的因素，所测数据仍会有一定的差别，我们称这种误差为随机误差。这种误差的产生是许多偶然因素造成的，故亦称偶然误差。随机误差的特点是或大或小，或正或负，看来毫无规律。然而在多次等精度测量时，可以发现随机误差就其总体来说，具有某些内在的规律，如正、负误差出现的几率相等，因此，多次测量值的算术平均值将趋近于真值。

3．过失误差

这种误差是由于实验者对仪器的使用不正确，实验方法不合理，忽视实验条件的影响，或由于粗心大意，过度疲劳，违反操作规程等原因引起的。如读错刻度，记错数据等等。

误差的表示方法：

1．绝对误差

$$\Delta i = |X_i - A_0|$$

则平均绝对误差定义为：

$$\eta = \frac{\Sigma|\Delta i|}{n}$$

2．相对误差

为了表示测量中出现的误差在整个物理量中占有的比重，引入相对误差的概念。相对误差常用百分率表示，因此它的定义为

$$\delta = \frac{\Delta \times 100}{A_0}\%$$

所以也称百分误差。

三、随 机 误 差

误差表示测量结果的精确程度。若系统误差大，则反映准确性（或准确度）差；若随机误差大，则反映实验的重复性（或精密度）差。由此可见，一个实验结果，只有测得值而无误差表示，则不能对该测量值作出有意义的估价。在普通物理实验的力、热部分实验中，我们只学习其中有关偶然误差的一些基本知识，其余部分将在以后实验中逐步解决。

（一）随机误差的统计规律

对某一物理量进行n次等精度测量，得n个数据，它们为：

$$X_1，X_2，X_3，\cdots\cdots X_n$$

令该物理量的真值为A_0，则相对应的一列误差为：

$$\Delta_1，\Delta_2，\Delta_3，\cdots\cdots\Delta_n。$$

当n很大时，测得值X的概率即由正态分布函数表达：

$$P(X)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}exp\left[\frac{-(X-A_0)^2}{2\sigma^2}\right]$$

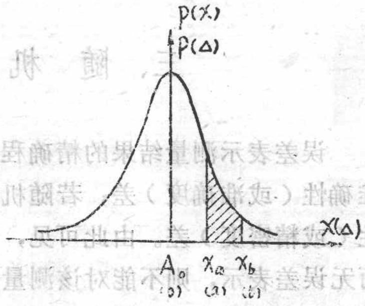
正态分布也称高斯分布。用误差表示上式，则为：

$$P(\Delta)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}exp\left[\frac{-\Delta^2}{2\sigma^2}\right]$$

这里 $exp(Z)=e^Z$ 表示自然数e的z次幂。σ称为标准误差，其定义式为

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta_i^2}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i-A_0)^2}$$

函数 $P(X)$ 或 $P(\Delta)$ 所对应的曲线称为正态分布曲线，或高斯曲线（如图1所示）。图中阴影部分的面积，表示测得值X出现在区间(X_a, X_b)内的概率，即在所有的n次测得值中，X值出现在区间(X_a, X_b)中的次数 Δn 占总数n的比率 $\frac{\Delta n}{n}$。



（图 1）

由正态分布曲线不难看出随机误差的性质：

①绝对值相等的正误差和负误差，其出现的概率相等。

②绝对值小的误差出现的概率大，而绝对值大的误差出现的概率小。

③绝对值很大的误差出现的概率近于零，亦即误差值有一定的实际极限。

④从性质①可以推论出：当 $n\to\infty$ 时，$\Delta_i\to 0$，亦

即，由于正负误差的互相抵消，一列等精度测量中各个误差的代数和有趋于零的趋势。

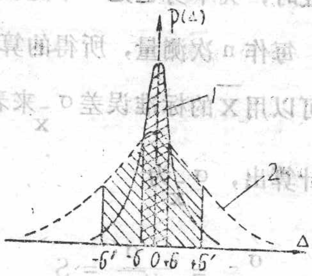
（二）标准误差的物理意义

设有两列不同条件下的等精度测量值，其值为

$$X_1，X_2，X_3 \cdots\cdots X_n；$$

$$X_1'、X_2'、X_3'，\cdots\cdots X_n'。$$

它们的正态分布曲线如图2所示。从误差理论可以算出，在区间（$-\sigma$，$+\sigma$）内的面积占分布曲线下的总面积68.3%。这样，对曲线1，误差出现在区间（$-\sigma$，$+\sigma$）内的概率为68.3%，对曲线2，误差出现在区间〔$-\sigma'$，$+\sigma'$〕内的概率也是68.3%。显然，第一列测量值的精密度比第二列测量值的精密度高。而第一列测量值的标准误差σ小于第二列测量值的标准误差σ'。因此，我们常用标准误差衡量测量的精密度高低，也就是表示测量列的弥散程度。



（图2）

同样，用平均绝对误差也可以表征测量列的弥散程度；误差理论证明：

$$\eta = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|\Delta i| = 0.7979\sigma 。$$

（三）算术平均值与它的标准误差。

实际测量中的主要任务，是求得被测之量的真值A_0。

由于测量中的误差是不可避免的，故每次测得之值都不是真值，真值是不可知的。不过，我们还是可以根据n次等精度测量列X_1，X_2，X_3……X_n来对真值A_0作出估计。真值的最佳估值就是X_i的算术平均值：

$$\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i-1}^{n} X_i = \frac{1}{n}(X_1 + X_2 + \cdots\cdots + X_n)$$

由误差的正态分布，不难看出，$n \to \infty$时，$\overline{X} \to A_0$。当n是有限时，$\overline{X}$本身也是一个随机量，一般地说$\overline{X} \neq A_0$。换言之，每作n次测量，所得的算术平均值$\overline{X}$都略有不同。由此，可以用$\overline{X}$的标准误差$\sigma_{\overline{x}}$来表征$\overline{X}$的精密度，误差理论可以计算出，$\sigma_{\overline{x}}$为

$$\sigma_{\overline{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = S$$

S即为$\sigma_{\overline{x}}$的符号，称为算术平均值的标准误差。

在普通物理实验中，大部分是验证的实验，真值A_0常用标准常数或理论值代替，或用算术平均值代替真值。用算术平均值与每次测量值的差值（叫残差或偏差）代替真误差，残差的定义式为

$$V_i = X_i - \overline{X}$$

此时对有限次测量的标准误差表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} V_i^2}$$

算术平均值的标准误差为

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

（四）有限次重复测量结果的计算步骤

①根据重复测量的实验数据求得其平均值

$$\overline{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}Xi$$

②求出各次测量值的残差$Vi=Xi-\overline{X}$，求得算术平均值的标准误差

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

③用绝对标准误差表示的实验结果为

$$X=\overline{X}\pm S$$

④用相对标准误差表示的实验结果为

$$\delta_x=\frac{S}{\overline{X}}\times 100\%$$

在今后实验报告中要求同时用以上两种形式表示。

同学们在刚开始进行标准误差计算时，利用下面的表格形式是比较方便的。

次数	测量数据 X_i（单位）	$V_i = X_i - \overline{X}$（单位）	V_i^2（单位）
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
	$\overline{X} =$		$\sum_{i=1}^{n} V_i^2 =$

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

如果实验报告中要求用平均误差表示，则需先计算出算术平均值，然后计算平均绝对误差和相对误差。将结果用平均误差表示。

以上是关于一个物理量的 n 次等精度测量的误差计算与结果表示。

（五）单次测量的误差

在有些情况下，由于条件的限制，对某一物理量只能测量一次，或测量一次就够了，这时测量结果的误差主要决定于仪器的准确度。一般平均误差取测量仪器最小分度的½，标准误差取最小分度的$1/\sqrt{3}$。例如用米尺测量长度，如果米尺的最小分度为mm，那么$\eta=0.5\,mm$，$\sigma=0.6\,mm$。

四、间接测量的误差计算

在间接测量中，我们总是根据一定的函数关系求得最终结果，由于每项直接测量都不可避免地存在误差，因此必然引起结果也存在误差，这就是误差的传递。误差传递公式可以由误差理论和泰勒定理求得。

（一）间接测得量的最大平均绝对误差：

设间接测得量N与各项直接测得量X_1、$X_2 \cdots X_M$存在下述函数关系，

$$N=F(X_1,\ X_2 \cdots X_M)$$

则可以证明其间接测得量的最可靠值为：

$$\overline{N}=F(\overline{X}_1,\ \overline{X}_2 \cdots \overline{X}_M)$$

式中$\overline{X}_1$，$\overline{X}_2 \cdots \overline{X}_M$为直接测得量的最可靠值，且其最大平均绝对误差为：

$$\triangle N=\triangle X_1\frac{\partial F}{\partial X_1}+\triangle X_2\frac{\partial F}{\partial X_2}+\cdots+\triangle X_M\frac{\partial F}{\partial X_M}$$

证：（选读）

因$\triangle X_1$、$\triangle X_2$，$\cdots \triangle X_M$为直接测得量X_1，$X_2 \cdots X_M$的绝对误差，$\triangle N$代表由$\triangle X_1$，$\triangle X_2 \cdots \triangle X_M$所引起的间