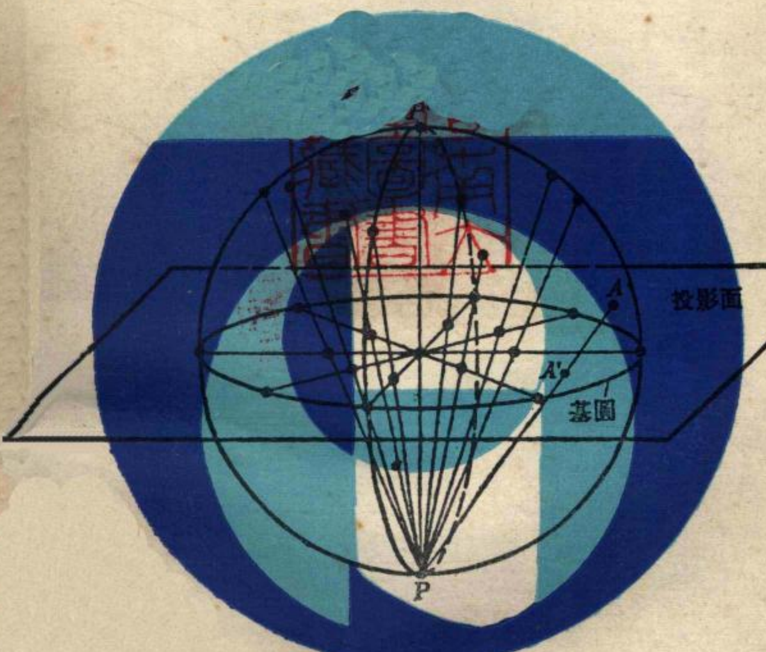
JINDAIWULISHIYAN

近代物理实验

● 冯郁芬 等编



陕西师范大学出版社

近代物理实验

冯郁芬 等编

陕西师范大学出版社

近代物理实验

冯郁芬 等编

*

陕西师范大学出版社出版

（西安市陕西师大120信箱）

陕西省新华书店经销

航空航天部〇一二基地印刷厂印刷

*

开本787×1092　1/32　印张8.125　字数170千

1989年4月第1版　1989年4月第1次印刷

印数：1—1500

ISBN7-5613-0194-4

G·181　定价：1.65元

前　　言

物理学是一门建立在实验基础上的科学，物理概念的建立、物理规律的发现、物理理论的形成，都必须以严格的科学实验为基础，并且为科学实验所验证。因而，物理实验教学是物理专业教学中必不可少的重要组成部分，近代物理实验是继普通物理实验和无线电电子学实验之后一门重要的基础实验课程。

近代物理实验所涉及的物理知识面很广，具有较强的综合性及技术性。其内容主要包括以下几个方面：

一、近代物理发展的一些重要领域：如核物理、近代光学、低温物理等。

二、在近代物理实验中经常用到的实验技术：真空技术、微波技术、X光分析、磁共振技术等。

三、与原子物理有密切关系的实验：氢和氘的原子光谱、塞曼效应，夫兰克——赫芝实验等。

我们在编写本书时力图以简洁的文字、清晰的物理思想，陈述实验的原理和方法，每一实验都附有参考资料和思考问题，以便学生更深入地掌握实验的主要内容。我们从近几年编排的26个实验中精选了19个，主要有核物理、光谱技术、激光全息、微波技术、磁共振、真空技术、X光分析、原子物理等8个方面。

近代物理实验教学按高等师范院校教学大纲要求在第7学期进行。共计84至96学时，每个实验课内安排6学时，课

外安排6学时。通过近代物理实验课的教学，除了使学生学会一些基本的实验技术和方法、熟悉常用的仪器设备之外，它在培养学生科学实验的能力、提高科学实验的素质、丰富和活跃学生的物理思想、加深对一些物理概念和规律的理解和灵活运用、以及培养严谨的科学作风等方面具有重要的作用。

本书可以做为高等师范院校物理专业本科生和函授生近代物理实验教材及实验参考书。

实验教材的编写是建立在实验室建设的基础之上，是任课教师及教研室的实验技术人员多年辛勤劳动的成果。除了书中每一个实验列出的参与编写的人员外，吴苓云等同志在课程建设中也做了不少工作。

由于我们水平所限，错误和不足之处敬请读者指正。

编　　者

1988年5月

目　录

第一部分　误差理论与实验的数学处理

史志强

物理学是一门实验学科，物理学的每一个重大进展都是和实验研究工作的推进分不开的。任何一个学习物理学的人，都必须学习实验，了解实验，动手去作实验，掌握实验，从实验中获得营养并受到启迪，在实验中发现新现象，总结新规律、验证新思想。

随着科学技术水平的提高，实验工作的难度和精度愈来愈高。为了在高难度的条件下尽可能地提高实验的精度，以便最有效地获得实验所可能获得的科学结果，在实验中显得愈来愈多地需要群体的努力和运用现代数学工具。例如，现在国际上重大的高能物理实验课题组的研究组一般由30至40人组成，其中有实验物理学家、工程师，还有专门做数学处理工作的理论物理学家，他们从实验的设计到实验全部结束一直都在不停地紧张工作。实验的数学处理中任何一个环节上的失误都会影响实验结果的可靠性和科学意义。数学处理表现在实验前的设计和论证、实验进行过程中的控制和监视、实验后的数据处理和结果分析，即它包括在实验的全过程中。

§1　误差的定义及分类

一、误差的定义

1. 误差：测量值与真实值之差，即

$$误差(\Delta)=测量值(\chi)-真实值(\mu).$$

更广义的定义是：误差是某量值的得到值（如测量值、标称值、近似计算值）与其客观真值（如公认值、校准值、理论值等）之差。误差反映了测量值偏离真实值的大小和方向，因此又叫绝对误差。

2．相对误差：误差与真实值之比。考虑到一般情况下测量值与真实值相差不会太大，故也可用误差与测量值之比作为相对误差，即

$$\frac{\Delta}{\mu} \quad 或 \quad \frac{\Delta}{\chi}.$$

3．偏差：是各测量值与其算术平均值之差。即偏差为

$$\delta=\chi-\bar{\chi}.$$

4．精密度：测量中偶然误差大小的量度。实际可看作是对δ的量度。

5．准确度：测量中系统误差大小的量度，实际可看作是对Δ的量度。

6．精确度：测量中系统误差和偶然误差的综合量度。

7．精度：测量中相对误差的量度。如实验结果的相对误差为0.1%，则可笼统地说其精度为10^{-3}，如果误差纯由偶然误差引起，精度就是指精密度，如果误差是由偶然误差和系统误差共同引起的，则精度泛指二者。

8．不确定度：测量中相对标准误差的量度。在计量工作中常用来评定实验结果的误差。例如，目前公认的光速最佳值是$c=299792458\pm1m/s$，则不确定度为$\pm3.3\times10^{-9}$。

以上所述的精密度、准确度、精确度、精度和不确定度是一种常用的表示方法，在科技文献中有时会有与此不同的

表示方法，应予以注意。

二、误差的分类

1. 系统误差：在一定条件下多次测量同一量时，误差的绝对值和符号保持不变；或测量条件改变时，误差按确定规律变化（如分光仪偏心差引起的角度测量误差是按正弦规律变化的），这种误差叫系统误差。或者说，在实验中由于不可控制的因素造成测量结果以确定的方式偏离正确值，这样形成的误差叫系统误差。还有一类方向和绝对值未知（或尚未确定）的系统误差，叫未定系统误差，在数据处理中这类误差常用估计方法得出，并与处理偶然误差的方法相似，用统计方法来处理。系统误差需要改变实验条件和测量方法才能够发现。系统误差的减小和消除是个比较复杂的问题，因而其难度也是很高的。只有在很好地分析了整个实验所依据的原理和测量方法的每一步以及所使用的仪器之后，才能找出产生系统误差的各种原因，从而有可能设法在测量中消除或减小它。

2. 统计误差：在同一条件下对同一物理量进行多次测量，其结果似乎杂乱地分散在一定范围内，而具有一定的随机性的误差。它的特点是有时大、有时小、有时正、有时负、方向不定、无法控制，但从大量的测量实践中发现，当测量次数很大时，它服从统计规律。它的来源是：

（1）测量的偶然误差：在确定的实验条件下，总有不能完全控制的偶然因素，造成仪器性能的不稳定性和辨别率上的统计涨落以及观察者辨别能力的涨落。

（2）物理量本身的统计性：在量子力学中，微观客体的

运动服从统计规律性，因此相应的一些微观物理量，例如放射性强度，能级寿命等也具有某种统计涨落的性质。这种性质使得我们在测量条件完全相同的理想条件下，使用足够精密的仪器和测量方法，也不能使每次测得的结果完全相同，有时甚至偏差很大，它们分布在某个平均值的附近。

(3) 物理过程本身的统计性：有的物理量是为了描述物理过程的某种随机性质而引入的，例如分子的平均速度等。对这些物理量的测量，必须根据多次测量的结果进行统计处理来实现。

后面这两种统计误差是不能靠提高仪器的精确度而改变的。

3. 理论误差：如果实验所用的理论公式有一定近似性，而由取近似所带来的偏差虽然能估计出它的数量级的大小，但并不是确定的，因而也就难以消除，这就给实验结果带来不确定性，这种不确定性称为理论误差。

理论误差同样也用随机的概率分布形式表述出来，但它和统计误差和系统误差有很大的不同。设法改进实验设备，提高实验测量精度和增加测量次数等都可以改善统计误差和系统误差，然而这些措施对于理论误差没有任何影响。

过去在实验工作中很少考虑理论误差，是因为实验精度没有提高到必须考虑理论误差的地步，实际上理论误差往往远小于统计误差，从而可以在实验结果的报道中忽略掉。随着实验技术水平的提高，大大减少了统计误差，使理论误差的影响不能完全被忽略掉了。这就是为什么近年来这个概念逐渐明朗并为人们所重视的原因。

理论误差一般发生在对物理量进行间接测量的结果中，

这是因为需要运用一定的理论方法从直接测量的结果出发推算出所需的结果，直接测量的结果则不会有理论误差。例如，对反映基本粒子弱相互作用和电磁相互作用联系的参数θ_W（叫做$Weinberg$角）进行测量是很重要的，1981年实验测量的结果为

$$\sin^2\theta_W = 0.229 \pm 0.009\ (\pm 0.005),$$

其中0.009是统计误差，0.005是理论误差。这表明，提高实验精度可以再减少统计误差，但在分析实验过程中所用的理论工具的近似性决定了至少有0.005的理论误差存在。

以上三种误差，估算实验的统计误差往往是最单纯的一个，亦即有确定的方法和程序可以遵循。如果说误差理论的任务是根据测量误差所遵从的统计规律，研究统计误差对实验结果的影响，那么研究系统误差对实验结果的影响，则是实验科学的任务。一个实验工作者水平的高低，很重要的一个方面就反映在对系统误差处理的能力上。

§ 2 统计分布

如上所述，由于统计误差的存在使测得量成为随机变量。在实验的数学处理中经常使用各种统计分布（又叫概率分布）来反映随机变量的规律性。常用的统计分布有描述离散型随机变量的二项式分布和泊松分布，描述连续型随机变量的正态分布、均匀分布、指数分布、χ分布和t分布等。下面主要介绍用得最多的正态分布。

一、概率（密度）函数及其数字特征量

随机变量X的数值x构成实数轴上的一个子集合。随机

变量X的概率分布可以用分布函数$P(x)$来表示，它等于随机变量X取值小于或等于x时随机事件的概率$Pr(X\leqslant x)$，即$P(x)=Pr(X\leqslant x)$。对于离散型随机变量X，可引入概率函数$p(x)=P_r(X=x)$，因而有

$$P(x)=\sum_{x_i\leqslant x}p(x_i)$$

和归一化条件

$$\sum p(x)=P(x=\infty)=1. \tag{1}$$

对于连续型随机变量X，可引入概率密度函数$p(x)$，它的意义是

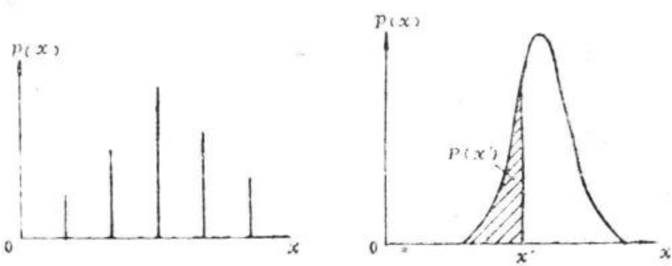
$$P_r(x<X\leqslant x+dx)=d\,p(x)=p(x)\,dx,$$

因此有

$$P(x)=\int_{-\infty}^{x}p(x)\,dx$$

和归一化条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty}p(x)\,dx=P(x=\infty)=1. \tag{2}$$



a. 离散型　　　　b. 连续型

图 1　随机变量的概率（密度）函数

如果 $p(x)$ 的函数形式已知，那么只要给出函数式中的各个参数值，就可以完全确定随机变量的分布。对于不同形式的分布，有一些共同的数字特征量来表征这些参数，它们是：

1. 随机变量的期待值$\langle x\rangle$

$$\langle x\rangle=\int_{-\infty}^{\infty}x\,p(x)\,dx,\qquad (连续型)\tag{3}$$

$$\langle x\rangle=\sum_{x}x\,p(x).\qquad (离散型)\tag{4}$$

对离散型随机变量，$\langle x\rangle$ 为算术平均值，当测量次数为无穷多次时，$\langle x\rangle$即为真值。对连续型随机变量，$\langle x\rangle$ 就是真值。$\langle x\rangle$是 $p(x)$曲线重心的位置，随机变量围绕着$\langle x\rangle$ 取值，对单峰对称曲线，$\langle x\rangle$就是峰的位置。

2. 随机变量的方差$Var(x)$

$$\begin{aligned}\mathrm{Var}(x)&\equiv\langle(x-\langle x\rangle)^2\rangle\\&=\int_{-\infty}^{+\infty}(x-\langle x\rangle)^2p(x)\,dx,\qquad (连续型)\end{aligned}\tag{5}$$

$$\mathrm{Var}(x)=\sum_{x}(x-\langle x\rangle)^2p(x).\qquad (离散型)\tag{6}$$

方差的平方根（取正值）叫随机变量的标准误差

$$\sigma(x)=[\mathrm{Var}(x)]^{\frac{1}{2}}.\tag{7}$$

方差（或标准误差）表征了随机变量分布的离散程度，方差愈大，随机变量的值在期待值左右分布得愈宽，愈不集中。

3. 随机变量的协方差$\mathrm{Cov}(x_i, x_j)$

N维随机变量（x_1，x_2，…，x_N）中任意两个随机变量x_i和x_j的协方差定义为

$$\mathrm{Cov}(x_i, x_j) \equiv \langle (x_i - \langle x_i \rangle)(x_j - \langle x_j \rangle) \rangle$$
$$= \int \cdots \int (x_i - \langle x_i \rangle)(x_j - \langle x_j \rangle) \cdot$$
$$p(x_1, x_2 \cdots, x_N) dx_1 dx_2 \cdots dx_N. \quad (8)$$

协方差表征实验结果中两个随机变量取值的相关程度。

二、数字特征量的运算

1. 若a是一个常数，则有

$$\langle a \rangle = a, \quad (9)$$
$$\sigma(a) = 0, \quad (10)$$
$$\langle ax \rangle = a\langle x \rangle, \quad (11)$$
$$\sigma^2(ax) = a^2\sigma^2(x). \quad (12)$$

2. 若x和y是两个随机变量，则有

$$\langle x+y \rangle = \langle x \rangle + \langle y \rangle, \quad (13)$$
$$\mathrm{Cov}(x, y) = \langle xy \rangle - \langle x \rangle\langle y \rangle. \quad (14)$$

3. 若x和y是两个相互独立的随机变量，则有

$$\langle xy \rangle = \langle x \rangle\langle y \rangle, \quad (15)$$
$$\sigma^2(x+y) = \sigma^2(x) + \sigma^2(y). \quad (16)$$

且由公式(14)和(15)知

$$\mathrm{Cov}(x, y) = 0. \quad (17)$$

4. 若a为一常数，则有

$$\langle (x-a)^2 \rangle = \sigma^2(x) + (a - \langle x \rangle)^2, \quad (18)$$

当$a=0$时，有

$$\sigma^2(x) = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2. \quad (19)$$

以上各式在随机变量的期待值和方差的运算中将经常使用。

三、正态分布（高斯分布）

正态分布的概率密度函数为

$$p(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]. \tag{20}$$

其中μ和σ为常数，且有

$$\langle x\rangle=\mu,\qquad \sigma^2(x)=\sigma^2.$$

由图 2 可见，正态分布的概率密度曲线是单峰对称曲线，曲线峰值在$x=\mu$处，在区间〔$x-\sigma$，$x+\sigma$〕内密度曲线下的面积为0.683。

如果事先已经知道测量的标准误差，且观察值x服从正态分布，则作一次测量，其测量结果的完整报道为

$$\mu=x\pm\sigma\qquad（置信水平68.3\%）\tag{21}$$

它的意思是对于物理量μ的估计值为x，估计值）随机变量）x分布的标准误差为$\sigma(x)$，并且，被测真值μ在区间〔$x-\sigma$，$x+\sigma$〕内的概率为68.3%。

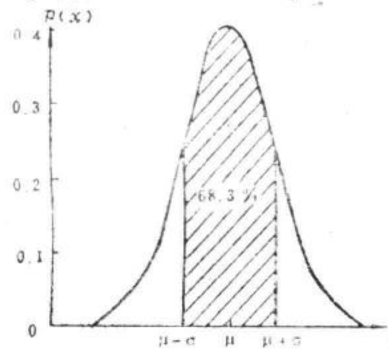


图 2 正态分布概率密度曲线

用同一个仪器重复测量N次，得样本（x_1，x_2，…，x_i，…，x_N），则样本的均平值，即观测值的算术平均值为

$$\overline{x}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i .$$

平均值$\overline{x}$的期待值为

$$\langle\overline{x}\rangle=\langle\frac{1}{N}\sum x_i\rangle=\frac{1}{N}\sum\langle x_i\rangle=\langle x\rangle,$$

即样本平均值$\overline{x}$的期待值等于随机变量x_i的期待值。其方差为

$$\sigma^2(\overline{x})=\sigma^2(\frac{1}{N}\sum x_i)=\frac{1}{N^2}\sum\sigma^2(x_i)=\frac{1}{N}\sigma^2(x)。\quad(22)$$

测量结果可报道为

$$\mu=\overline{x}\pm\sigma(\overline{x})=\overline{x}\pm\frac{1}{\sqrt{N}}\sigma(x)。(置信水平68.3\%)\quad(23)$$

若事先不知道测量的标准误差，就需要从测量得到的样本来估计测量误差。对有限次测量，根据方差的定义，可以用样本平均值的均方偏差

$$\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\overline{x})^2}{N}$$

作为方差$\sigma^2(x)$的估计值。但是，这个均方偏差的期待值并不是随机量x的方差$\sigma^2(x)$，而是

$$\left\langle\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\overline{x})^2}{N}\right\rangle=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\langle(x_i-\overline{x})^2\rangle$$

$$=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\langle[(x_i-\langle x\rangle)-(\overline{x}-\langle x\rangle)]^2\rangle$$

$$=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[\sigma^2(x_i)-\sigma^2(\overline{x})]$$