近代物理实验

郑裕芳　李仲荣　主编

JDWL

SY

中山大学出版社

近代物理实验

郑裕芳　李仲荣　主编

*

中山大学出版社出版发行

广东省 新 华 书 店 经 销

韶关新 华 印 刷 厂 印 刷

*

850×1168毫米 32开本 18.625印张 5插页 47.8万字

1989年3月第1版　1989年3月第1次印刷

印数：1—4000册

ISBN 7-306-00126-4

O·12　定价：5.15元

前　言

物理学是一门实验科学，它的所有理论都是人们在生产实践和科学实验中体验归纳的结果。物理概念的确立、物理规律的发现，都以严格的科学实验为基础，并为以后的科学实验所验证。

在物理学发展史上，出现了许多具有创造性的实验工作，例如X射线衍射、塞曼效应、油滴实验、电子衍射、核磁共振、穆斯堡尔效应、等等，它们有的开拓了物理学的新领域，有的使原来的领域大大地扩展。这些出色的实验，许多至今仍有着广泛的应用，在人类认识自然、改造自然的过程中继续发挥着作用。近代物理实验除了包括物理学史堪称为里程碑的著名实验之外，也包括了若干代表近代实验方法和技术的实验。因此近代物理实验是继普通物理实验之后的一门综合性较强的重要实验课程。实验中使用的仪器种类较多、结构也远较普通物理实验复杂。它在开拓高年级学生的知识面、培养学生的独立工作能力、掌握近代物理实验主要领域中的一些具有代表性的实验方法和技能，学习应用实验方法研究物理现象与规律等方面有着重要的作用。在当前形势下，国家需要高等学校培养具有"开拓型"、"创造型"、"能力型"人才，我们希望通过本课程的教学，使学生增加获取知识和运用知识的能力，提高他们运用科学方法进行探索的水平，以适合时代的要求。

本书是在中山大学物理系《近代物理实验》讲义基础上，吸收了部分兄弟院校的经验，参照原教育部1980年制定的综合性大学物理专业近代物理实验教学大纲、以及高等师范院校物理专业近

代物理实验教学大纲编写的。全书分为十二个单元，包括误差理论及数据处理、原子物理、原子核物理、光学、固体物理、X射线和电子衍射、真空技术、磁共振、微波、声学、计算机与电子学技术、低温等内容，共有42个实验，书末还附有“1986年基本物理常数推荐值的汇总表”，“1986年基本物理常数推荐值”，“保存单位和标准值”和 “中华人民共和国法定计量单位”，供读者参考。参加编写的同志都是从事近代物理实验教学工作多年的教师，其中许多人在科学研究方面也取得一定的成果，故本书也是集体经验的总结。

本书可作为综合性大学、高等师范院校、工科院校物理专业近代物理实验教材或参考书，对于从事与物理分析技术有关的科技工作者，中专、中学物理教师都具有一定的参考价值。

本书涉及面较广，由于我们的平水有限，书中一定有错误和不当之处，恳请读者批评指正。

郑裕芳

李仲荣

1988年5月

内容简介

本书共分十二个单元，包括：误差理论及数据处理，原子物理，原子核物理，光学，固体物理，X射线衍射和电子衍射，真空技术，磁共振、微波、声学、计算机与电子学技术，低温等。全书共有四十二个实验，各个实验附有思考题。本书可作为综合性大学，高等师范院校，理工科院校物理专业或相近专业的近代物理实验教材或参考书，也可供电大，职大，中专，中学物理教师使用。

目　　录

前言

（一） 误差理论与数据处理

在实验科学中，由于种种因素的影响，测量和实验所得的数值和真实数值之间存在着一定的差异．测量值与真值之差称为误差．随着科学技术的发展和人们认识水平的提高，误差可以被控制得越来越小，但不能完全消除它．误差存在的必然性和普遍性，已为实践所证实．对于一个物理量的测量，不仅在实验之后对数据进行分析处理时需要有关误差理论和数据处理的知识，而且在实验的准备和设计阶段（选用仪器和选定测量方法等）以及实验过程中的监测和控制等方面也需要这些知识，以使实验所得之结果更接近真值并且对结果的可靠程度作出科学的估计．

一、误差的基本概念

1．误差的定义及其表示法

（1）绝对误差和真值

测量值和真实值之差称为绝对误差，通常称为误差．

$$误差=测量值-真值 \tag{1—1}$$

所谓真值是指在一定条件下，表征事物性质或状态的物理量的客观值或实际值．量的真值是一个理想的概念，一般是不知道的，但在某些特定情况下，它又是可知的，例如三角形三个内角之和恒等于180°；同一量值自身之差为零，自身之比为1，等等．为了使用上的需要，在有些情况下，当高一级标准器的误差与低一级标准器或普通仪器的误差相比为$\frac{1}{5}$（或$\frac{1}{3}\sim\frac{1}{10}$）时，则

可以认为前者是后者之相对真值。

在实际工作中，常使用修正值，即将测量值加修正值后可得近似的真值。

（2）相对误差和相对额定误差

绝对误差与被测量之真值之比称为相对误差。当误差较小时，测量值与真值接近，可近似地用绝对误差与测量值之比作为相对误差，即

$$相对误差=\frac{绝对误差}{真值}\approx\frac{绝对误差}{测量值} \qquad (1—2)$$

相对误差没有量纲，通常以百分数（%）来表示。例如用一频率计测得某信号源之频率为50.6KHz，而用高一级精度的频率计测得频率为50.5KH_z，由于后者精度高，故可认为50.5 KHz接近真实频率，而前一频率计测量的绝对误差为0.1KHz，其相对误差为

$$\frac{0.1}{50.5}\approx0.2\%$$

相对额定误差是一种实用方便的简化的相对误差，常在多档和连续测量的仪器仪表中应用。这类仪器仪表各刻度点的示值和它所对应的真值都不一样，此时若按（1-2）式计算相对误差时，所用的分母不一样，因此计算很麻烦。为了计算和划分准确度等级方便，一律选取该仪表量值中的最大刻度值（满刻度值）作分母，由此引出相对额定误差的定义：

$$相对额定误差=\frac{示值误差}{满刻度值} \qquad (1—3)$$

例：检定2.5级、上限为100伏的电压表，发现20伏刻度点的示值误差为2伏，并且较其它各刻度点的误差为大，则此电压表的最大相对额定误差为2%。而“2.5级”的含义是指合格仪表允许的最大相对额定误差为2.5%，所以此电压表合格。

电工仪表的准确度等级分为0.1，0.2，0.5，1.0，1.5，2.5和5.0七级，表示仪表允许的相对额定误差不能超过的界限。一般说来，若仪表为s级，仅说明合格仪表最大相对额定误差不超过$s\%$，而不能认为它在各刻度点上的示值都具有$s\%$相对误差的准确度。若仪表的满刻度值为$x_{满}$，测量点的值为x，则该仪表在x点的示值误差为

$$绝对误差 \leqslant x_{满} \cdot s\%。$$

$$相对误差 \leqslant \frac{x_{满}}{x} \cdot s\% \qquad (1—4)$$

所以当x越接近于$x_{满}$时，其测量准确度高（相对误差越小）；x越远离$x_{满}$时，其测量准确度越低，这就是人们在使用这类仪表测量时，尽可能在仪表满刻度值$\frac{2}{3}$以上量程内测量的原因。

例：某待测的电压约为80伏，现有0.5级、0～300伏和1.0级、0～100伏的两个电压表，问使用那一个电压表测量较好？

〔解〕 用0.5级、0～300伏电压表测量80伏的最大相对误差为

$$\frac{x_{满}}{x} \cdot s\% = \frac{300}{80} \cdot 0.5\% \approx 1.9\%$$

而用1.0级、0～100伏的电压表测量80伏时的最大相对误差为

$$\frac{100}{80} \cdot 1.0\% \approx 1.3\%$$

这一例子说明，若量程选择恰当，用1.0级表进行测量时，在一定情况下也会比用0.5级表进行测量更准确.

2.误差来源

（1）设备误差

①标准器误差：标准器是提供标准量值的器具，如标准砝码、标准电池、标准电阻等，而它们本身体现出来的量值，皆不可避

免地有含误差。

②仪器误差：凡是用来直接或间接将被测量的量和测量单位比较的设备，称为仪器或仪表，如天平、阿贝比较仪等比较仪器，温度计、检流计、压力表等指示仪表。仪器和仪表皆具有误差。

③附件误差：为测量创造一些必要条件，或者使测量方便地进行的各种辅助物均属测量附件，如电测中转换开关、电源连接导线等。来自附件的误差称为附件误差。

设备误差按其表现形式分为：机构误差，调整误差，量值误差等。

（2）环境误差

由于各种环境因素与实验要求的标准状态不一致而引起的测量装置与被测量本身所造成的误差，如温度、湿度、气压（引起空气的扰动）、振动（外界条件及测量人员引起的振动）、照明（引起视差）等所引起的误差。

（3）方法误差

由于采用近似的测量方法而造成的误差。

（4）人员误差

由于测量者生理上的最小分辨力限制、感觉器官的生理变化、反应速度和固有习惯等引起的读数误差。

3.误差分类

按照误差的来源和基本性质，误差可分为系统误差、偶然误差（或称随机误差）和过失误差三类。

（1）系统误差

在同一条件下，多次测量同一量值时，误差的绝对值和符号保持不变，或在条件改变时，误差按一定规律变化的称为系统误差。

（2）偶然误差

在同样的条件下，多次测量同一量值时，绝对值和符号以不可预定方式变化着的误差称为偶然误差。

（3）过失误差

明显歪曲测量结果的误差称为过失误差。如测量时读错了数、记错了数，以及在测量时因操作不小心而引起的过失性误差。

4.精度

反映测量结果与真值接近程度的量称为精度。精度高的实验其误差小。

精度可分为

（1）精密度：反映偶然误差大小和分布情况。

（2）准确度：反映系统误差大小的程度。

（3）精确度：反映系统误差与偶然误差的综合结果。

精度在数量上可用相对误差表示，如相对误差为0.01%，可笼统地说其精度为10^{-4}；若纯属偶然误差引起，则说其精密度为10^{-4}；若是由系统误差与偶然误差共同引起，则说其精确度为10^{-4}。

对于具体的测量，精密度高的其准确度不一定高，准确高的其精密度也不一定高，但精确度高，则精密度与准确度都高。

二、偶然误差

1.偶然误差的基本特性

在等精度测量条件下，对一真值为L_0的物理量进行多次重复性的测量，可得到一系列测量值为x_1，$x_2\cdots$，x_n及相对应的误差δ_1，$\delta_2\cdots$，δ_n。实验证明测得值和相应的误差都服从正态分布（或称高斯分布）规律。当测量次数n无限增加时，每个测量值出现的几率都是确定的，其分布密度$P(x)$由正态分布函数表示，即

$$P(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\,e^{-\frac{(x-L_0)^2}{2\sigma^2}} \tag{1-5}$$

式中$L_0=\lim\limits_{n\to\infty}\sum\limits_1^n\frac{x_i}{n}$，是被测物理的真值；$\sigma$是各误差的平方之算术平均值的平方根，称为标准误差，又称为均方根误差或中误差，即

$$\sigma=\lim_{n\to\infty}\sqrt{\frac{\sum\limits_1^n(x_i-L_0)^2}{n}} \tag{1-6}$$

标准误差的平方σ^2称为方差。L_0和σ是正态分布的两个重要参量，分别表示随机变数取值的平均位置和对平均值的离散程度。

若用(1—5)式进行坐标变换，用误差$\delta=x-L_0$表示，则可得到误差的分布密度

$$P(\delta)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\,e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \tag{1-7}$$

可见，误差δ也服从正态分布。根据(1—7)式可画出正态分布曲线，如图1-1所示(当$\sigma=1$时)。由于$P(\delta)$是δ的连续函数，所以在δ的整个数轴上应包含δ所有可能出现的值，即

$$\int_{-\infty}^{\infty}P(\delta)\mathrm{d}\delta=1 \tag{1-8}$$

利用(1-7)式可以求出误差在某一区间〔a，b〕内出现的总几率：

$$P(a\leqslant\delta\leqslant b)=\int_a^b P(\delta)\mathrm{d}\delta=\alpha \tag{1-9}$$

〔a，b〕称为置信限，α称为置信几率。可以证明，在正态分布中，误差出现在区间〔$-\sigma$，σ〕内的置信几率为

$$P(|\delta|\leqslant\sigma)=\int_{-\sigma}^{\sigma}P(\delta)\mathrm{d}\delta=0.683 \tag{1-10}$$

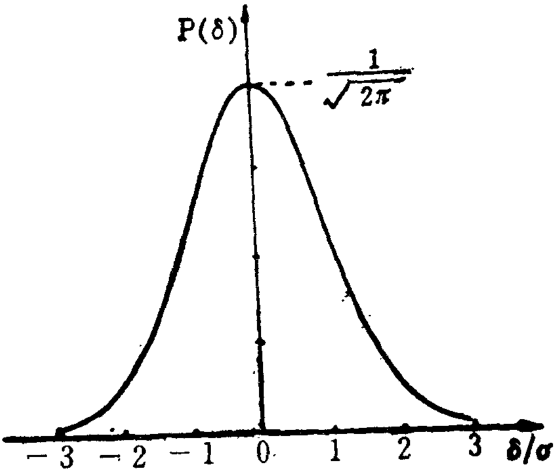

图1-1　正态分布曲线($\sigma=1$)

σ是测量列的均方根误差．可见，$[-\sigma,\sigma]$是置信几率为0.683的置信限。

由图1-1可看出，正态分布曲线反映了偶然误差的基本特性：

（1）在等精度测量条件下，绝对值相等的正、负误差出现几率相等；

（2）当$n\to\infty$时，误差的代数和等于零；

（3）绝对值小的误差出现的几率大，而绝对值大的误差出现的几率小，并且随着误差绝对值的增加，其相应的几率将接近于零．

应该注意，标准误差σ是为了表示某个测量结果的精度而引进的一种表示法，它不是具体的误差．具体的误差是δ_i，它可大可小，可正可负．但是，一个等精度测量列的标准误差σ只能是一个确定的数值．在无限多次的测量中，σ实际上是误差的置信几率为0.683的置信限．在实验结果的表示中，如果所取的误

差$\hat{\sigma}=\sigma$，则置信几率为0.683。

除了标准误差之外，有时还用平均误差θ和或然误差ρ来表示测量结果之精度.

平均误差是各误差之绝对值的算术平均值，

即

$$\theta=\frac{\sum_{i=1}^{n}|\delta_i|}{n} \tag{1-11}$$

若将各误差取绝对值后，按其大小排列起来，取位于中间的误差为测量列的误差，这种误差称为或然误差，通常用ρ表示。

在正态分布中，可以证明，当测量次数$n\to\infty$时，$\theta\approx\frac{4}{5}\sigma$，而$\rho=\frac{2}{3}\sigma$。$\theta$和$\rho$实际上是误差的置信几率分别为0.572和0.500的置信限。

各误差实际上不应超过某个界限Δ，人们将Δ称作极限误差。对于服从正态分布的测量误差，一般取$\Delta=3\sigma$。

2.测量结果的表示

从(1-6)式可见，标准误差是在测量次数为无限多的情况下定义的。实际上测量次数都是有限的，真值一般是不知道的。为了从有限次测量结果中，求出被测物理量的最佳估值和该值在某一区间的置信几率，我们引进算术平均值和偏差的概念。

若对一物理量进行n次等精度测量，得到测量值x_1，x_2，…，x_n，则该测量列的算术平均值为

$$\bar{x}=\frac{\sum_{1}^{n}x_i}{n} \tag{1-12}$$

通常将$\bar{x}$作为真值L_0的最佳估值.

偏差(或称残差)是测量值与平均值$\bar{x}$之间的差异，用v_i表

示，即

$$v_i = x_i - \bar{x} \tag{1-13}$$

偏差可大可小，可正可负，但是在等精度测量中，所有偏差的代数和总等于零，即

$$\sum_1^n v_i = 0$$

计算表明，在用v_i替代δ_i后，标准误差可用下式来估算：

$$\sigma \approx s = \sqrt{\frac{\sum_1^n v_i^2}{n-1}} \tag{1-14}$$

此式称为贝塞尔公式.

在一定的测量条件下，σ是完全确定的。在等精度测量中，每个测量值x_i都有相同的σ(或s)．所以，对任何一个测量值都可以写成$x_i \pm \sigma$(或$x_i \pm s$)。显然，对于每个测量值x_i都有一个对应的置信区间$[-s, s]$，测量值x_i落在区间$(L_0 \pm s)$内的几率为0.683。在正态分布中，真值落在区间$(x_i \pm 2s)$和区间$(x_i \pm 3s)$内的几率分别为0.954和0.997。

应该注意，在实际测量中，虽然可把平均值$\bar{x}$作为被测物理量的最佳估算值，但$\bar{x}$并不是真值．平均值$\bar{x}$也是一个随机变量，即在同样条件下，每做n次测量所得到的平均值各不相同．由于σ值要经过无限多次测量才能求出，故对有限次测量，σ是未知的，因而被测物理量的分布也是未知的．虽然可用s代替σ，可是对于$\bar{x}$相等，而测量次数n不同的测量中，s值是不相同的，所以要想在σ未知的情况下估算真值L_0，必须引入一个随机变量t_a，真值L_0落在置信区间$\left(\bar{x} - t_a\frac{s}{\sqrt{n}}, \bar{x} + t_a\frac{s}{\sqrt{n}}\right)$的几率为$(1-a)$。为了表示$\bar{x}$的精度，引用平均值的标准误差$\sigma_{\bar{x}}$。对于多次测