

近代物理实验

林林欣 主编

(上册)

近代物理实验

林木欣 主编

方 兴 吴祥兴 肖新民 等 编
方良栋 朱小松 王 强

内 容 简 介

本书是参照国家教委1988年制定的“近代物理实验”大纲，以及1991年提出的“加强基础、重视应用和分流培养”的要求编写的。实验内容包括原子物理、核物理、激光、真空、X射线和电子衍射、低温和固体物理、声学、微波、磁共振、微弱信号检测等10个单元，共45个实验选题。

本书强调实验的物理思想和方法，力求做到通俗易懂，以及满足不同学校的兼容性。适用于高等师范院校和理工大学的本科生、函授生作教材，也可供有关研究生、科技人员和中学物理教师参考。

序

“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,为大学高年级学生开设的一门重要的实验课程。“近代物理实验”所涉及的物理知识面很广,具有很强的综合性和技术性。它对丰富和活跃学生的物理思想,锻炼学生对物理现象的洞察能力,引导学生了解实验在物理学这一门学科发展过程中的作用,正确认识新的物理概念的产生、形成和发展过程,学会近代物理中一些基本的实验方法和技术,以及培养学生严谨的科学作风等方面,都是非常重要的。可以说,“近代物理实验”是在物理专业和其他密切相关的专业中,培养学生的独立工作能力,学习如何用实验方法研究物理现象和规律的关键一环。这就要求教师在“近代物理实验”的教学中,引导学生明确这门实验课程的目的要求,注意实验中的物理思想和实验方法,并加强实验技能的锻炼。

“近代物理实验”包含物理学各分支学科的实验内容,其数量远超过学生实际要做的实验,教材的内容在实验原理、仪器设备、实验方法和实验步骤等方面,最好不要过分详细和繁琐,力求简明扼要,让学生有足够时间去多思考、多观察、多探索、多提问、多讨论,使他们在做有限的实验中获得更多的知识和技能。特别是,学生间的经验交流和探讨,对培养他们的协作精神是很重要的。这是从事现代实验科学的研究者不可缺少的素质。

对于“近代物理实验”教学的实施,跟各校的培养目标、教学计划以及前后实验课程的衔接等有密切的关系,这将取决于各校的具体情况和条件。这就是说,在实验内容的选择和安排上,不

可能规定全国统一的教材。但也不能过于分散，最好能建设不同层次、不同风格的“近代物理实验”教材，以适应各类学校的需要，保证教学的质量。当前的情况是，有些“近代物理实验”教材对重点大学的学生是好的，而对普通大学来说，用起来有不少困难，教学效果难以令人满意。1991年国家教委提出了“加强基础、重视应用、分流培养”的要求，从这个原则出发，编写一本有一定特色的“近代物理实验”教材，适用于普通大学的学生使用，以取得较好的教学效果，这是很需要的。

这本由华南师范大学物理系林木欣教授主编的《近代物理实验》，是在调研了一些省市属大学，特别是高等师范院校“近代物理实验”教学的具体情况后，组织东南沿海几所高校中一些长期在教学第一线工作，具有丰富学识和经验的中、老年教师编写的。这本教材力图编得容易入门，容易学习，同时增加一些应用性题材，把实验内容适当拓宽，加入一些反映新物理成就和有实用价值的实验，如高温超导、微弱信号检测和声学实验等。我很赞同这本教材的编写原则：内容要写得比较简明扼要；突出实验的物理思想和测量方法；注意不同学校使用的普适性和兼容性，在选题和取材上便于“各取所需”和“分流培养”；在介绍实验仪器设备时只围绕装置的原理图来分析，尽可能不受异种型号仪器设备的限制等。

我希望这本具有一定特色的《近代物理实验》教材，能够满足普通大学，特别是高师院校的教学需要，产生良好的教学效果，受到师生的欢迎。

虞福春

1993年6月于北京大学

前 言

1991年夏，我们对部分省市属大学（特别是高等师范大学）的“近代物理实验”教学作了调查研究。在这过程中，不少教师对建设更为适用于普通高校的“近代物理实验”教材问题提出了许多宝贵的意见和建议。随后，我们便着手组织本书的编写工作。

本书的实验选题，是参照国家教委1988年制定的“近代物理实验”大纲，以及1991年对高校理科提出的“加强基础、重视应用、分流培养”要求，再结合目前普通高校开设该课程的实际情况而确定的。全书的实验分为10个单元，包括39个实验项目，其中有些项目有两个实验题目，故可供选择的实验题目实际上有45个。它们是选自近代物理发展过程中一些起过重要作用的著名实验，以及近代物理实验技术中有广泛应用的典型实验。我们在保证基础性实验题材的同时，明显地加重了应用性实验题材的分量。另外，我们还编写了“误差分析与数据处理”、“微型计算机在实验中的应用”，供学生阅读参考。

我们在编写本书时强调了突出物理思想和实验方法，尽可能把问题写得通俗易懂，使普通高校的学生使用本书时能取得较好的效果。考虑到读者对其中一些单元的实验内容可能比较生疏，故本书在这些单元实验的前面编写了有关问题的“基础知识”，供读者学习，希望读者在做这些实验之前领会这些内容。

由于“近代物理实验”课程中各校开设的实验不尽相同，所用的仪器设备也不一样，因此我们编写本书时在普适性和兼容性方面采取了一些措施。各校使用本书时不仅实验题目可“各取所需”，

而且对某一题目中的实验内容也便于根据实际情况适当取舍。本书除了可以作为“近代物理实验”必修课教材以外，还可供大学高年级选修课或研究生有关课程的实验训练参考。

本书是在统一规划下集体创作的。各个部分的作者分别在所撰写内容后面标明。为了保证书稿质量，特聘请了王祖铨、肖新民、李成功、李绍泉、方兴、方良栋、忻贤堃、杨世琪和刘木森等专家分别审阅了有关部分的初稿。本书的插图大部分由余新科和程敏熙同志绘制。本书在组织编写和出版过程中，孙番典、程敏熙、张诚、张晓娟和吴先球等同志做了很多具体工作。此外，过去在所属学校近代物理实验室建设中曾做出贡献的同志，也都直接或间接为本书做出了贡献。

本书能够与读者见面跟各方面的支持密切相关。国家教委前理科物理教材编审组虞福春教授，以及国家教委理科物理教学指导委员会吴思诚教授，均热情关怀和支持了本书的编写工作；虞福春教授在百忙中还为本书作序，对“近代物理实验”教学和教材建设提出了极其宝贵的指导性意见，笔者谨代表本书的全体作者表示衷心的感谢。还有，本书的组织编写曾得到广东省高教局、东南沿海高师院校协作组有关学校的支持，刘颂豪教授的鼓励，以及王开发教授和熊钰庆教授的关心；在出版工作中，广东教育出版社的领导和责任编辑等作出了不可磨灭的贡献，我们在此谨向所有支持者和有关单位热诚致谢。

由于本书牵涉到物理学中众多的学科领域和实验技术，而我们的水平有限，书中的缺点错误在所难免，恳请有关专家和广大读者批评指正。

林木欣

1993年6月于华南师大

目 录

误差分析与数据处理	1
-----------	---

I. 原子物理

1-1 夫兰克—赫兹实验	58
1-2 原子光谱	68
(1) 氢与氦原子光谱	68
(2) 钠原子光谱	75
1-3 光谱分析	86
(1) 定性分析	86
(2) 定量分析	92
1-4 塞曼效应	98
1-5 密立根油滴实验	108
1-6 喇曼光谱	116

I. 原子核物理

2-0 核物理实验技术基础知识	128
2-1 盖革—弥勒计数管的特性及放射性衰变的统计规律	136
2-2 γ 能谱的测量	146
2-3 符合测量	155
2-4 穆斯堡尔效应	165
2-5 正电子在物质中湮没的寿命测量	176
2-6 用快速电子验证相对论效应	185

Ⅱ. 激光、光信息处理和光学测量

3-1	He-Ne激光器特性及其参数测量	194
3-2	全息技术	204
3-3	光学信息处理	215
3-4	光拍频法测量光速	228
3-5	椭圆偏振法测量薄膜厚度、折射率和金属复折 射率	237
3-6	光电探测器的光谱响应曲线	248
3-7	法拉第效应	259

Ⅳ. 真空技术

4-1	高真空的获得与测量	268
4-2	真空镀膜	277

误差分析与数据处理

实验测量总会有误差。如何运用误差分析使实验做得更精确，如何进行数据处理以求得实验的正确结果，这些问题在普通物理实验课程中已经掌握了一定的知识，但在近代物理实验课程中还应该进一步的要求。近代物理实验训练，通常要用到较为综合的实验技术和较为复杂的实验设备。其中有些实验的测量值比较精确，有些则具有明显的统计涨落。有些实验要严格控制条件进行直接观测，有些要综合宏观量的观测来求得微观量的数值。因此，我们要提高误差理论的知识水平，才能理解好实验设计，正确地进行实验测量和数据处理，并对实验结果作出可靠性的评价。下面着重介绍部分常用的误差理论知识，希望读者能从概率统计的基础上来理解误差，提高误差分析和数据处理的能力。

一、误差的基本概念

1. 误差的定义和表示法

当我们对某物理量进行测量时，总希望精确地测得物理量的真值。但测量的环境、方法、仪器以及操作者等诸多因素，均会影响测量结果，使测量值存在着不确定性，即相对于真值有误差。

差。

测量误差是指测量值与真值之差。即

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}。 \quad (0-1-1)$$

何谓真值？真值是物理量在特定条件下的客观实际值。当被测量和测量过程完全确定，且所有测量不完善性完全排除时，则测量值就等于真值。但这样的条件是未能严格做到的，从而真值也就未能测得。在仪器校验中，也只能把高一标准器的测量值看作低一级标准器或普通仪器的相对真值而已（通常前者的误差与后者的误差相比为 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{20}$ ）。在一般的实验中真值是不知道的，否则也就不需要测量了。既然真值不知道，我们就无法计算出误差的确定值。但误差理论会告诉我们如何估计误差，如何对实验结果的不确定性作出评定。

上面定义的误差是绝对误差。在没有特别指明时，所谓误差就是指绝对误差。设某物理量的真值为 μ ，则测量值 x 的绝对误差

$$\delta = x - \mu。 \quad (0-1-2)$$

但有些问题用相对误差表示则更有意义。例如测量10m长相差1mm与测量100m长相差1mm，其绝对误差是一样的，但相对误差则不同。

相对误差是指绝对误差与真值之比。当误差较小时，相对误差也可近似表示为绝对误差与测量值之比。由于相对误差是反映测量的准确程度，故常用百分数来表示。即

$$\begin{aligned} \text{相对误差} &= \frac{\delta}{\mu} \times 100\% \\ &\approx \frac{\delta}{x} \times 100\%。 \end{aligned} \quad (0-1-3)$$

在多档和连续示值的仪表中，各刻度点的示值和它所对应的真值都不一样，用(0-1-3)式计算相对误差时因所有的分母都不同而很不方便，同时也难以表征仪表的准确度等级。为此把上式的分母一律用该仪表的量程值表示，分子为示值的绝对误差，这种简化而实用的相对误差称为引用误差。即

$$\text{引用误差} = \frac{\text{示值误差}}{\text{满刻度值}}. \quad (0-1-4)$$

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等七级，就是以所属仪表的最大引用误差为标志的。对于S级仪表(S指七级中的任一级)，表明其合格仪表的最大引用误差不超过S%，但不能认为各刻度点上的示值误差都是S%。设某仪表的满刻度值为 x_n ，测量点的值为 x ，则该仪表在 x 点附近的示值误差为：

$$\begin{aligned} \text{绝对误差} &\leq x_n \cdot S\% ; \\ \text{相对误差} &\leq \frac{x_n}{x} \cdot S\% . \end{aligned} \quad (0-1-5)$$

由此可见，若测量点 x 越接近满量程 x_n 处，其准确度越高； x 越远离满量程 x_n 时，其准确度越低。故用这类仪表进行测量时，应选择合适的量程档次，尽可能使测量点处在2/3量程以上。

例：某待测电压约为90V。现有两个级别不同的电压表：其一为0.5级，量程为0—300V；其二为1.0级，量程为0—100V。问哪一个电压表测得较准确。

用0.5级，量程为0—300V的电压表，测量90V的最大相对误差

$$\tau_1 = \frac{x_n}{x} \cdot S\% = \frac{300}{90} \times 0.5\% = 1.7\% ;$$

用1.0级，量程为0—100V的电压表，测量90V的最大相对误差

$$r_2 = \frac{x_n}{x} \cdot S\% = \frac{100}{90} \times 1.0\% = 1.1\%.$$

这个例子表明，若量程选择恰当，用 1.0 级电压表测得结果比 0.5 级电压表测得的准确。

2. 系统误差与随机误差

按照误差的来源和性质，通常可把误差分为系统误差和随机误差两大类。

(1) 系统误差

在一定条件下，对同一物理量进行多次测量时，误差的绝对值和符号保持恒定，或按一定规律变化的，这种误差称系统误差。

系统误差来源于测量装置（标准器、仪器、附件和电源等误差），环境（温度、湿度、气压、振动和电磁辐射等影响），方法（理论公式近似限制，测量方法不完善），以及人身（测量者感官不完善，具有某种习惯和偏向）等方面。其产生原因往往可知或能掌握，一经查明就应设法消除其影响。对未能消除的系统误差，若它的符号和大小确定的，可对测量值加以修正；若它的符号和大小都不确定的，可设法减小其影响并估计出误差范围。

(2) 随机误差

在相同条件下对同一物理量进行多次测量时，尽管系统误差已消除或不存在，但每次测量结果也并不一致。这种不一致表明测量值与真值之间的误差，其符号时正时负，其绝对值时大时小，没有规律性。这种带有随机性或偶然性的误差称随机误差（或称偶然误差）。

随机误差来源于许多不可控因素的影响。例如周围环境的无规起伏，仪器性能的微小波动，观测者感官分辨本领的限制，以

及一些尚未发现的因素等，都会导致测量时无法控制和消除其影响而产生误差。这种误差对每次测量来说没有必然的规律性，但进行多次重复测量时会呈现出统计规律性。因此，可用统计方法来估计随机误差的大小。

(3) 随机误差与系统误差的关系

随机误差与系统误差之间并没有不可逾越的鸿沟。它们往往只是程度上的不同，并非本质上的差别。例如，人们常常把某些掌握不到的或具有复杂规律的系统误差看作随机误差。这就是说，随机误差本身正是许多微小的、独立的、难以控制和不可分解的系统误差的随机组合。另外，系统误差和随机误差还可以在一定的条件下相互转化。例如，尺子的分度误差，从制造产品的角度来说，是随机误差；但产品转到用户使用后，有分度误差的尺子带来测量值的误差则是系统误差。

在实际测量中，虽然尽可能限制和消除系统误差，但事实上两种误差是同时存在的，常按其对于测量结果的影响分别对待：

a. 若系统误差的影响远大于随机误差，则随机误差可忽略不计，基本上可按纯系统误差来处理；

b. 若系统误差可忽略，或经技术处理后已消除，则可按纯随机误差来处理；

c. 若系统误差与随机误差的影响差别不大，两者均不可忽略，此时应按不同方法处理并综合两种误差。

(4) 粗大误差

在实验过程中，由于某种差错使得测量值明显地偏离正常的测量结果，这种误差称为粗大误差，又称过失误差。例如，读错数，记错数，或者环境条件突然变化而引起测量值的错误等，便会出现这种误差。处理的方法是按肖维涅准则或 3σ 准则把它剔除。

因此，作误差分析时通常只要估计系统误差和随机误差。

3. 精度

人们对误差的表达，有时使用精度这个较为笼统的术语，而且往往用相对误差来表示。例如，某测量值的相对误差为0.01%，则说其精度为 10^{-4} 。显然，这样表述并未表明这个误差主要是由系统误差还是由随机误差引起，抑或是由两种误差合成。因此，通常又把精度分别表述为下列具有非常明确含义的术语。

(1) 精密度：反映随机误差的大小。精密度高说明多次测量值的重复性好。

(2) 正确度：正确度又称准确度，反映系统误差的大小。正确度高说明多次测量值接近真值程度好。

(3) 精确度：反映随机误差与系统误差的综合结果。精确度高说明多次测量值不仅重复性好，而且又接近真值。

在具体测量中，精密密度高的正确度不一定高，正确度高的精密密度也不一定高，但精确度高的则精密密度和正确度都高。

4. 测量结果的不确定度

由于测量误差不可避免，以致真值未能求得。而真值不知道，也就无从确定误差的大小。因此，实验数据处理只能求出实验的最佳估计值及其不确定度，把实验结果表示为

$$\text{测量值} = \text{最佳估计值} \pm \text{不确定度}。 \quad (0-1-6)$$

通常取算术平均值作为测量值的最佳估计值，用平均值的标准偏差来表示不确定度。真值是以一定的概率处于上式所给定的量值范围内。

不确定度的含义是表征被测量的真值所处量值范围的一个评定。或者说，不确定度是由于误差的存在而对被测量值不能肯定的程度。

按国际计量局建议，不确定度的评定是先将可修正的系统误差对测量值修正，然后把未能修正的系统误差和随机误差等不确定分量，按估计其数值的方法归并为两类：

A类：用统计方法计算的分量；

B类：用其他方法计算的分量。

在数据处理中，根据测量的误差来源，判明哪些可用统计方法计算，哪些不能用统计方法计算，分别划分为A类和B类，用不同方法估计其标准偏差（简称标准差），再用方差合成法求出合成不确定度。由于不确定度用标准偏差表示，故不确定度给定测量值的数值范围具有明确的概率含义。一般的教学实验往往只考虑了统计方法计算的分量，但在严格的计量和科研实验中还要全面地考虑两者的影响。

引入不确定度以区别于误差是必要的。测量误差表征测量值与真值之差是未知的，而不确定度表征测量误差可能数值的度量是可以在概率的含义上确定的。因此，在测量结果的表式中，我们无法给定误差，我们给出的是测量值在某种置信概率下的不确定度。

二、随机变量的概率分布

在物理实验中，除了存在着不能完全控制的因素而导致随机误差必然存在以外，被测对象本身也具有随机性，例如宏观热力学量（温度、密度、压强等）的数值都是统计平均值，原子和原子核等微观领域的统计涨落现象就更为突出。这就使得实验观测值不可避免地带有随机性，必须用概率论和数理统计的方法来处理实验数据。为此，我们要讨论随机变量的概率分布。

1. 随机变量

当我们观测某物理量时，在一定条件下某一观测值的出现是随机事件，而实验观测值则是随机变量。

现在，用更为普遍的数学语言进一步描述。在一定条件下，现象 A 可能发生，也可能不发生，而且只有这两种可能性，我们就把发生现象 A 的事件称为随机事件 A 。

如果在一定的条件下进行了 N 次试验，其中事件 A 发生了 N_A 次，则比值 N_A/N 称为事件 A 发生的频率。当 $N \rightarrow \infty$ 时，频率存在一个极限，称为事件 A 的概率，记为 $P_r(A)$ ，即

$$P_r(A) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_A}{N}. \quad (0-2-1)$$

不同的随机事件可用不同的数来表示，这个数便是随机变量。随机变量有两种类型：只能取有限个或可数个数值的随机变量称离散型随机变量；可能值布满某个区间的随机变量称为连续型随机变量。

随机变量全部可能取值的集合称为总体(或母体)。总体的任何一个部分称为样本(或子样)。在实际试验中，对某物理量作有限次观测，测量结果总是获得某随机变量的样本。

对一个随机变量的描述，不仅要了解随机变量的可能取值，而且还必须了解所取各种可能值的概率。

2. 分布函数、概率函数和概率密度函数

设有随机变量 X ，它的取值 x 可以排列在实数轴上。随机变量 X 的概率分布，用分布函数 $P(x)$ 表示。 $P(x)$ 在 x 处的取值，等于 X 取值小于或等于 x 这样一个随机事件的概率：

$$P(x) = P_r(X \leq x). \quad (0-2-2)$$

按定义，它必须满足：