大学物理

实验指导

主编：丁道滢　　陈知前

福建教育出版社
Fujian Education Publishing House

大学物理实验指导

丁道滢　陈知前　主编

福建教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验指导/丁道滢、陈知前主编. －福州：福建教育出版社，2002.2
ISBN 7-5334-3164-2

Ⅰ.大… Ⅱ.丁… Ⅲ.物理－实验－高等学校－教材 Ⅳ.04－33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 039140

大学物理实验指导

丁道滢 陈知前 主编

*

福建教育出版社出版发行

(福州梦山路 27 号 邮编：350001

电话：0591－3725592 7811283

传真：3726980 网址：www.fep.com.cn)

福建省蓝盾印刷厂印刷

(福州鼓楼区湖前江厝路 5 号 邮编：350013)

*

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 20.25 印张 479 千字

2002 年 2 月第 1 版 2002 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 7－5334－3164－2/G·2530 定价：29.00 元

说　　明

物理学是一门实验科学，物理实验是物理学必不可少的重要组成部分。设立“大学物理实验”课程的目的，是为了培养学生具有运用实验方法解决科技问题，进行科学研究工作的初步能力。它大体包括三个方面的内容：首先，学习并掌握进行物理实验的基本知识，基本方法和基本技能（包括实验仪器的选择和使用、测量技术和方法、实验数据的处理方法、实验结果的分析研究等）。其次，通过实验观察，测量和分析，加深或获得对物理学的某些概念，规律和理论的理解。最后，通过实验培养严肃认真的工作作风，实事求是的科学态度，和遵守纪律，爱护国家财产的优良品德。

为了做好每次实验，达到规定的目的要求，我们把实验过程分为三个阶段进行：预习，实验，实验报告。

1. 预习

通过阅读实验讲义和有关参考书籍，明确实验的目的要求，了解实验原理和方法以及实验所用仪器装置的性能和使用方法，并在此基础上写好预习报告。预习报告内容包括：实验名称、实验目的、原理摘要（计算公式，说明式中各物理量的意义和单位、线路图和光路图等）、实验步骤、数据表格。

课前不预习，没有写预习报告，不准参加本次实验课。

2. 实验阶段

到实验室时先熟悉仪器，了解仪器使用方法，经教师允许后进行仪器仪表安装与调整。实验中要按实验步骤进行，注意观察记录。出现异常情况，应及时报告教师处理。

3. 实验报告

实验报告是实验工作的书面总结，它简明扼要地将实验的内容和结果完整、真实地写出来。实验报告必须文字通顺，字迹端正，图表规范，计算正确，并对实验结果进行分析。一个完整的实验报告，一般应包括下列几个部分：①实验名称、②实验目的、③实验原理、④仪器装置（名称、规格）、⑤数据记录及处理、结果分析、⑥问题讨论

写实验报告的目的是为了培养和训练学生以书面形式总结工作或报告实验成果的能力。所以在实验报告中应该有清晰的思路，齐全的数据，图表，而且要有科学结论。

实验报告要求写在专用的实验报告纸上，对各部分写法的要求是：

“实验名称”和“实验目的”一般与教材中提法一致。

“实验原理”应该是在理解原理的基础上用自己的语言来阐述，要求简明扼要，画出必要的图(原理图、电路图、光路图)，列出测量和计算所依据的公式，说明式中各物理量的意义。

“实验步骤”要求写得简单明了，并把关键性的调整方法和测量技巧叙述清楚，不能照抄讲义。(只写在预习报告上)

“数据记录及处理，结果分析”要求以列表的形式完整反映原始测量数据，写出数据处理的主要过程，图线、结果以及误差分析。

“问题讨论”讨论内容不受限制。可以是对结论和误差原因进行分析、对观察到的实验现象进行分析，也可以对实验方案及其改进意见进行讨论与评述。

前　　言

本书是以福州大学电子科学与应用物理系多年使用的“大学物理实验讲义”为基础，参考全国各重点院校大学物理实验书编撰而成的。

全书分成上、下两部分，上半部分是物理实验，包括绪论、力学、电磁学、光学、近代物理实验五个部分。由于教学时数的限制，我们只选编了具有代表性和普遍意义的实验32个。与以往教材不同的是，这部分各个实验后都增加了附加小设计实验内容，让学有余力的同学在完成实验后选做。进一步培养同学分析问题和解决问题的实际能力。

下半部分内容是物理实验指导，对各实验的重点和难点作进一步阐述，并增加一些相关知识，以期对提高同学实验能力和拓宽知识面有所帮助。

本书虽然由丁道滢、陈知前两位同志负责编写，但实验题目的选择、教学内容及要求的提出等，都是全组同志多年辛勤工作的结晶。

由于编者水平有限，书中定有不少不当之处，诚恳欢迎使用本书的师生提出批评和指正。

编　者

2001.12

目　录

第一部分
大学物理实验

第二部分

大学物理实验指导

第一部分

大学物理实验

第一章　误差估算与数据处理方法

§1　误差基础知识

一、测量与误差

1. 直接测量与间接测量

物理实验不仅要定性观察各种物理现象，更重要的是找出有关物理量之间的定量关系。为此，就需要对物理量进行测量。通常测量一个物理量，是将待测的物理量与规定作为标准单位的同类物理量（标准量）进行比较，其倍数即为待测量的测量值。

测量按获得结果的方法分为直接测量与间接测量二类。

直接测量是将待测量与标准量直接比较，或者用预先标定好了的仪器进行比较。从而直接读出待测量的测量值。如用米尺测长度、伏特表测电压等都是直接测量。

间接测量是利用待测量与一些能直接测定的物理量间存在着确定的函数关系，把这些量直接测定后代入函数中计算出待测的物理量。例如，测量一个小圆柱体的密度，我们可以用游标卡尺和螺旋测微计测出它的高 H 和直径 D，再用天平称出它的质量 M，则待测圆柱体的密度 ρ 为：

$$\rho = M/V = 4M/\pi D^2 H$$

实际上多数物理量是采用间接测量。这是因为：待测量不能直接测量；或者直接测量相当复杂；或者直接测量准确度不高。

2. 测量误差

任何物质都有自身的各种特性，反映这些特性的物理量所具有的客观真实数值称为真值。测量的目的就是力图得到真值。然而由于测量仪器的限制，测量方法的不完善，周围环境的变化，人的感官的缺陷等因素的影响，测量结果总是与真值之间有一定的差异。这种差异就是误差。

某量值的误差 Δx 定义为该量的测量值 $\bar{x}$（包括直接测量值与间接测量值）与该量的客观真值 x 之差。即

$$\Delta x = \bar{x} - x$$

误差可以设法减少，但是不能完全消除。它自始至终存在于一切科学实验的过程之中。

3. 误差的种类

测量的误差按其产生的原因与性质可分为系统误差与偶然误差两大类：

(1)系统误差

在一定的实验条件下，误差数值的大小和正负号或固定不变、或按一定的规律变化，这种误差称为系统误差。其来源主要有：

A. 仪器误差：这是由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的。如仪器零点不准，天平不等臂，在20℃下标定的标准电阻在30℃下使用等。

B. 理论或方法误差：这是由于测量所依据的理论公式本身的近似性或测量方法不完善而产生的。如力学实验中无法消除摩擦力的影响，电学测量中没有把接触电阻和接线电阻考虑在内等。

C. 条件误差：这是由于实验条件不能达到理论公式所规定的条件而引起的，如单摆的周期公式 $T=2\pi\sqrt{L/g}$ 的成立条件是摆角趋于零，这在实际的实验中是达不到的。

D. 习惯误差：这是由于观测者本人生理或心理特点造成的。如肉眼在刻度上估读时习惯地偏向一个方向。

系统误差可根据其产生的原因采取一定的方法来减少或者消除它的影响。如将仪器进行校正、改变实验方法。对测量结果引入修正量等。

因为任何理论模型只是实验情况的近似，任何“标准”的仪器也总是有缺陷的，所以，对系统误差作修正也只能做到比较接近实际，不能绝对地“消除”。实验中说消除系统误差影响是指把它的影响减少到偶然误差之下，就算完全消除了它的影响了。

(2)偶然误差

在相同条件下测量同一量时，由于偶然的或不确定的因素所造成的每一次测量值的无规则涨落称为偶然误差。它主要来源有：

A. 多次测量的条件有无法控制的微小差异。如电磁波干扰，地壳震动，气流流动等的影响。

B. 人的感官的灵敏程度的限制。如用米尺测某物体长度时，由于人眼判断能力的限制，在读取米尺两端读数时发生的误差。

C. 测量对象本身的不均匀性。如圆柱的直径并不是处处一致，有大有小。

偶然误差在测量次数很多时呈现出如下明显的规律性：

单峰性：绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大；

对称性：绝对值相等的正负误差出现的概率相同；

有界性：在一定测量条件下，误差的绝对值不超过一定限度；

抵偿性：偶然误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋向于零。即

$$\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta x_i=0$$

因此，通过多次测量求平均值的方法可以减少偶然误差。

4. 偶然误差的估计

由于系统误差能够设法消除，所以，在讨论偶然误差估计的问题时，我们假定已消除了系

统误差的影响。

根据误差理论有多种方法估算偶然误差，这里仅介绍两种：算术平均误差和均方误差（又称标准误差）。

(1)算术平均误差 Δx

A. 算术平均值 $\bar{x}$

对于 n 个在相同条件下测得量 x_1、x_2、x_3、$\cdots x_n$。其算术平均值为

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

当 $n\to\infty$ 时，$\bar{x}=x$(真值)。在一般情况下，n 总是有限的，所以 $\bar{x}$ 只是 x 的近似值称为近真值。

B. 算术平均误差 Δx

对于一组在相同条件下的测量量 x_1、$x_2\cdots\cdots x_n$，其近真值 $\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$，各次测量值的误差 Δx_i 为

$$\Delta x_1=x_1-\bar{x}$$

$$\Delta x_2=x_2-\bar{x}$$

$$\cdots$$

$$\Delta x_n=x_n-\bar{x}$$

则定义算术平均误差 Δx 为

$$\Delta x=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|\Delta x_i| \tag{1-2}$$

Δx 表示在$(\bar{x}-\Delta x)$与$(\bar{x}+\Delta x)$范围内包含真值 x 的可能性较大。

(2)均方误差(标准误差)σ

对某物理量在相同条件下测得量 x_1、x_2、$\cdots\cdots x_n$，其算术平均值为 $\bar{x}$，各次测量值的误差 Δx_i 为：

$$\Delta x_1=x_1-\bar{x}$$

$$\Delta x_2=x_2-\bar{x}$$

$$\cdots$$

$$\Delta x_n=x_n-\bar{x}$$

则对于 n 次测量中某一次测定值的标准误差定义为

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\Delta x_i^2} \tag{1-3}$$

由误差理论可以证明算术平均值 $\bar{x}$ 的标准误差 $\sigma_{\bar{x}}$ 为

$$\sigma_{\bar{x}}=\sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}\Delta x_i^2}=\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{1-4}$$

σ 所表示的物理意义是：如果多次测量的偶然误差遵从正态分布，那么，n 次测量中任何一个测量值 x_i 的误差落在 $\pm\sigma$ 范围内的可能性为 68.3%。或者说，对某一次测量结果 x_i，真值在 $x_i\pm\sigma$ 区间内的概率为 68.3%。

$\sigma_{\bar{x}}$ 的物理意义是：在多次测量的偶然误差遵从正态分布的条件下，对多次测量结果 $\bar{x}$，真值在 $\bar{x}\pm\sigma_{\bar{x}}$ 区间内的概率为68.3%。

采用标准误差估算误差，测量次数 n 至少要等于10。（根据误差理论，$n>10$ 以后 $\sigma_{\bar{x}}$ 变化极慢，所以实际测量次数一般也不要很多。）

在学术论文中发表的数据，习惯上都是用标准误差表示其可靠程度。用其他表示形式，则需加以注明。算术平均误差和标准误差两者除了在数值上略有差别外，其基本的物理意义没有大的差异，且当测量次数很多时，它们之间有固定的比例关系（$\Delta x=\sigma\sqrt{\frac{2}{\pi}}\approx\frac{4}{5}\sigma$）。由于算术平均误差的计算比标准误差简单的多(间接测量更是如此)。并且对于初学者来说，首先需要的是建立误差概念以及学会对实验结果进行评价的简单方法，因而，在大学物理实验中仍然采用算术平均误差。当需要采用标准误差来进行误差估算时，由教师指定。

二、测量结果表示法

对测量结果的误差表示方式，常用绝对误差和相对误差两种形式。

1. 绝对误差表示方式

把测量结果及其偶然误差写成

$$\bar{x}\pm\Delta x \tag{1-5}$$

式中 $\bar{x}$ 为测量值，它可以是一次测量值，也可以是多次测量的算术平均值。Δx 为绝对误差(可以是算术平均误差 Δx，也可以是标准误差 $\sigma_{\bar{x}}$ 等)。后面讲的间接测量结果也要表示成这种形式。

(1－5)式不能理解为 x 只有 $\bar{x}-\Delta x$ 和 $\bar{x}+\Delta x$ 两个值，而是表示真值 x 落在 $\bar{x}$ 附近正负 Δx 这个范围内的可能性最大。因此，不排除多次测量中有部分测量值在 $\bar{x}\pm\Delta x$ 以外。

2. 相对误差表示方式

一个测量结果的好坏，除与绝对误差有关之外，还与测量量本身的大小有关。因此，引入相对误差的概念。

相对误差定义为：

相对误差＝绝对误差/算术平均值　　(1－6)

用公式表示为：

$$E_r=\Delta x/\bar{x}$$

E_r 为相对误差，它常用百分数表示，即 $E_r=\frac{\Delta x}{\bar{x}}\cdot 100\%$，因此又称相对误差为百分误差。现举例说明相对误差的意义。设测得两个物体的长度分别为：

$L_1=(23.50\pm0.04)\ \text{cm}$

$L_2=(2.35\pm0.02)\ \text{cm}$

它们相对误差分别为：

$$E_{r1}=\frac{0.04}{23.50}\times100\%=0.17\%$$

$$E_{r2}=\frac{0.02}{2.35}\times100\%=0.85\%$$

从绝对误差看，L_1的误差比L_2大一倍。但L_1的原长比L_2大10倍，因而L_1的相对误差比L_2小5倍。所以应该说L_1的测量比L_2更准确。

3. 百分偏差

在重复前人的实验时，为了迅速简单地对实验做出评价，常把测得值$\bar{x}$与公认值$x_{公}$相比较。也用百分数表示，即

$$B=\frac{\bar{x}-x_{公}}{x_{公}}\times 100\% \tag{1-7}$$

B叫做百分偏差。B大于零表示测得值偏大，B小于零表示测得值偏小。

三、直接测量结果及其误差的计算

1. 单次测量的误差估计

实验工作中，有时由于测量条件不许可，无法重复，有时不需精确测量等原因，待测量只进行了一次测量。这时可根据实验情况对测得值的误差进行合理的具体的估计。

在一般情况下，可按仪器出厂说明书或仪器标牌上注明的仪器误差作为单次测量的误差。如果查不到仪器误差，也可取用仪器最小分度值的一半作为单次测量误差。

2. 多次测量结果误差的估计

(1)测量条件较稳定、多次测量同一物理量结果相近，算术平均误差小于仪器误差$\Delta x_{仪}$，则测量结果的最大误差就用仪器误差$\Delta x_{仪}$表示。即

$$x=\bar{x}\pm\Delta x_{仪}$$

如果查不到仪器误差，应采用仪器最小分度值的一半作为误差。

例：用钢板尺测量棒长度　　　　单位：厘米

次数	钢尺一端读数 x_{1i}	钢尺另一端读数 x_{2i}	$L_i=x_{2i}-x_{1i}$	平均值$\overline{L}$	$\lvert\Delta L_i\rvert$	ΔL
1	3.00	5.31	2.31	2.34	0.03	0.02
2	5.00	7.35	2.35		0.01	
3	8.00	10.36	2.36		0.02	
4	10.00	12.33	2.33		0.01	
5	12.00	14.36	2.36		0.02	

这里$\Delta L=0.02$厘米，而钢板尺的最小分度值为0.1厘米，所以测量结果为

$$L=\bar{L}\pm\Delta L_{仪}=(2.34\pm0.05)(\text{厘米})$$

$$E=\frac{\Delta L_{仪}}{\bar{L}}=0.05/2.34\times100\%=2.1\%。$$

(2)如果多次测量的算术平均误差Δx大于或等于仪器误差，这时应用算术平均误差作为结果的误差，即

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

四、间接测量结果误差的计算

大多数物理量不是直接测得的，而是由直接测量值通过公式计算得到的。直接测量值有误差，因此间接测量值也会有误差，这就是误差的传递。

设间接测量量 N 是 x、y、$z\cdots$ 的函数，即 $N=f(x、y、z\cdots)$。式中 x、y、$z\cdots$ 为独立的物理量

对 N 求全微分，有

$$dN=\frac{\partial f}{\partial x}dx+\frac{\partial f}{\partial y}dy+\frac{\partial f}{\partial z}dz+\cdots\cdots$$

上式中 dN 表示：当 x、y、$z\cdots\cdots$ 各直接测定量有微小改变 dx、dy、$dz\cdots\cdots$ 时，间接测量量 N 将改变 dN。通常误差远小于测量值，把 dN、dx、dy、$dz\cdots$ 各当作是误差，则上式就是误差的传递公式了。〔严格说是将 $N=f(x、y、z\cdots)$ 按泰勒级数展开略去二阶无穷小量而得到误差传递公式的〕于是，将上式中 dN、dx、dy、$dz\cdots$ 分别用误差符号代替，再考虑最不利情况(取最大误差)，所有各项分误差全取绝对值，则 N 的最大绝对误差 ΔN 可写成：

$$\Delta N=\left|\frac{\partial f}{\partial x}\right|\left|\Delta x\right|+\left|\frac{\partial f}{\partial y}\right|\left|\Delta y\right|+\left|\frac{\partial f}{\partial z}\right|\left|\Delta z\right|+\cdots \tag{1-8}$$

有时为计算方便，先对函数 $N=f(x、y、z、\cdots)$ 两边取自然对数，然后再求全微分，即

$$\ln N=\ln f(x、y、z、\cdots)$$

$$\frac{dN}{N}=\frac{\partial\ln f}{\partial x}dx+\frac{\partial\ln f}{\partial y}dy+\frac{\partial\ln f}{\partial z}dz+\cdots$$

将 dN、dx、dy、$dz\cdots$ 用 ΔN、Δx、Δy、$\Delta z\cdots$ 代替，取绝对值，则上式就是求相对误差的公式。即

$$E_r=\frac{\Delta N}{N}=\left|\frac{\partial\ln f}{\partial x}\right|\left|\Delta x\right|+\left|\frac{\partial\ln f}{\partial y}\right|\left|\Delta y\right|+\left|\frac{\partial\ln f}{\partial z}\right|\left|\Delta z\right|+\cdots \tag{1-9}$$

(1-8)式和(1-9)式就是误差传递的基本公式。

(1-8)式中的 $\frac{\partial f}{\partial x}\Delta x$、$\frac{\partial f}{\partial y}\Delta y$、$\frac{\partial f}{\partial z}\Delta z$、$\cdots$ 及(1-9)式中的 $\frac{\partial\ln f}{\partial x}\Delta x$、$\frac{\partial\ln f}{\partial y}\Delta y$、$\frac{\partial\ln f}{\partial z}\Delta z\cdots$ 各项叫做分误差。$\frac{\partial f}{\partial x}$、$\frac{\partial f}{\partial y}$、$\frac{\partial f}{\partial z}\cdots$ 和 $\frac{\partial\ln f}{\partial x}$、$\frac{\partial\ln f}{\partial y}$、$\frac{\partial\ln f}{\partial z}\cdots$ 叫做误差的传递系数。由(1-8)式及(1-9)式可见，一个量的测量误差对于总误差的贡献，不仅取决于其本身的大小，还取决于误差传递系数。

为了方便同学，现将常用的一些代数，三角函数关系式的最大绝对误差与相对误差计算公式列表如下(表1-1，表1-2)，以供查找

表1-1

运算关系式 $N=f(A、B、C\cdots)$	算术平均误差 ΔN	相对误差 $E_1=\Delta N/N$
$A+B+C\cdots$	$\Delta A+\Delta B+\Delta C+\cdots$	$\frac{(\Delta A+\Delta B+\Delta C+\cdots)}{(\bar{A}+\bar{B}+\bar{C}+\cdots)}$
$A-B-C\cdots$	$\Delta A+\Delta B+\Delta C+\cdots$	$\frac{(\Delta A+\Delta B+\Delta C+\cdots)}{\bar{A}-\bar{B}-\bar{C}}$
$A\cdot B\cdot C$	$\bar{B}\cdot\bar{C}\cdot\Delta A+\bar{C}\cdot\bar{A}\cdot\Delta B+\bar{A}\cdot\bar{B}\cdot\Delta C$	$\Delta A/\bar{A}+\Delta B/\bar{B}+\Delta C/\bar{C}$
A/B	$(\bar{B}\Delta A+\bar{A}\Delta B)/(\bar{B})^2$	$\Delta A/\bar{A}+\Delta B/\bar{B}$
A^n	$n(\bar{A})^{n-1}\cdot\Delta A$	$n\Delta A/\bar{A}$