EXPERIMENT OF GENERAL PHYSICS

职工高校试用教材

普通物理实验

河南科学技术出版社

BY HENAN

SCIENTIFIC AND TECHNICAL PUBLISHING HOU

河南省物理学会职工大学教学委员会

河南省教育委员会 审

1989

前　言

普通物理实验是普通物理课程的基本实践环节，也是培养学生科学实验能力的基础训练。为了统一教学，逐步实行对普通物理实验的单独考核，应全省职工大学广大物理教师的要求，经省教委批准，由河南省物理学会职工大学教学工作委员会组织编写了这本《普通物理实验》教材。

根据1983年职工高等工业专科学校“普通物理教学大纲”（草案）中对普通物理实验课的具体要求，本书包括：绪论、误差理论、力学、热学、电磁学、光学及近代物理等部分25个实验（必做实验10个，选做实验15个）。考虑到本书的通用性，其中有的实验项目并列了几种不同的测量方法，各校可根据自己的设备情况进行选择。每个实验由实验目的、预习问题、仪器用具、实验原理、实验内容、数据及处理、思考题等部分组成。对于每个实验，力求将理论基础和测量技术简明扼要地阐述清楚。考虑到各校仪器设备不尽相同，仪器装置一般随文简单介绍。对于使用较多的仪器和数据处理方法，则采用附录的形式统一编在书后，便于翻阅。为了方便学生使用，在“数据及处理”部分，一般都列有详尽的表格及误差计算公式。

根据职工大学的实际教学情况，本书在实验内容的安排上力求由简到繁，循序渐进、逐步加深，易于接受；在误差估算和数据处理上，逐步进行必要的、最基本的训练，以求提高学生的科学实验能力，培养学生实事求是的科学态度，掌握物理实验的基础知识，为学习后续课程打下良好的基础。

本书由郑州市职工大学陈国荣担任主编，郑州市磨料磨具职工大学方战担任副主编。参加编写的还有郑州铝厂工学院周玲、黄河职工大学于光恩、开封市职工大学康建国、郑州市职工大学刘路平、洛阳兵器工业职工大学杨占生等，河南大学王德建副教授担任本书的主审。

在本书编写过程中，自始至终得到河南省教委成人教育教材教学研究室、河南省物理学会的大力支持和帮助，同时还得到全省很多职工大学同行的热情协助，并由省教委成人教育教材教学研究室陈志勇同志对书稿作了审阅，对此，谨致以深切的谢意。

由于编者水平有限，时间仓促，书中难免有不足和错漏之处，恳请批评指正。

编　者

1989.2.15

目　录

绪　论

§1. 物理实验的目的，任务和要求……………………（1）

§2. 测量与误差……………………………………（3）

§3. 有效数字与数据处理……………………………（13）

实验一　基本测量……………………………………（20）

实验二　重力加速度的测定…………………………（30）

Ⅰ　用单摆法测重力加速度…………………………（30）

Ⅱ　用自由落体法测重力加速度……………………（34）

实验三　速度和加速度的测定………………………（40）

实验四　气轨上守恒定律的研究……………………（48）

实验五　用拉伸法测金属丝的杨氏模量……………（55）

实验六　刚体转动惯量的测定………………………（62）

Ⅰ　用扭摆测物体的转动惯量………………………（62）

Ⅱ　用刚体转动仪测物体的转动惯量………………（66）

Ⅲ　用三线扭摆测物体的转动惯量…………………（74）

实验七　驻波的研究…………………………………（79）

实验八　金属线膨胀系数的测定……………………（83）

实验九　测定液体的表面张力系数…………………（87）

实验十　测定金属的导热系数………………………（93）

实验十一　用模拟法测绘静电场……………………（99）

实验十二　线性电阻和非线性电阻的伏安特性曲线……（106）

实验十三　电表的改装和校正………………………（112）

实验十四　惠斯登电桥………………………………（118）

Ⅰ　用滑线电桥测电阻……………………………（120）
Ⅱ　用自组电桥测电阻……………………………（122）
实验十五　用电位差计测电动势……………………（128）
实验十六　用霍耳元件测螺线管磁场………………（134）
实验十七　示波器的使用……………………………（140）
Ⅰ　SB-14型示波器的使用………………………（144）
Ⅱ　ST16型示波器的使用…………………………（147）
实验十八　电子束的研究……………………………（152）
实验十九　牛顿环……………………………………（162）
实验二十　用双棱镜测定光波波长…………………（168）
实验二十一　用分光计测量三棱镜的折射率………（176）
实验二十二　利用光栅测光波波长…………………（181）
实验二十三　照相技术………………………………（185）
实验二十四　设计性实验——伏安法测电阻………（190）
实验二十五、全息照相………………………………（193）
附录一　实验报告范例………………………………（200）
附录二　停表…………………………………………（204）
附录三　数字毫秒计…………………………………（206）
附录四　气垫导轨简介………………………………（208）
附录五　逐差法处理数据……………………………（211）
附录六　分光计的结构与调整………………………（213）

绪　论

§1　物理实验的目的、任务和要求

物理学是一门以实验为基础的学科。物理规律的发现及物理理论的建立，都离不开坚实的实验基础，并且只有经过实验的验证，才能得到公认。物理实验在物理学科的创立和发展中占有十分重要的地位。因此，在学习物理学时，物理实验是必不可少的教学环节。

普通物理实验课的目的是：

（1）通过实验的观察、测量和分析，加深对物理概念、规律和理论的理解。

（2）学习物理实验的基本知识、基本方法，培养基本的实验技能。

（3）培养严肃认真的工作作风，实事求是的科学态度和爱护国家财产、遵守纪律的良好品德。

上述三项任务是物理理论课所不能代替的。应当指出，对于工程技术人员来说，只有同时具备较深的理论知识和足够的科学实验能力，才能适应科学技术飞速发展的需要，肩负起祖国社会主义现代化建设的重任。

物理实验课的基本程序一般为三个阶段：

一、实验前的预习

由于实验课的课内时数有限，而熟悉仪器和测量数据的任务

一般都比较重，因此，不允许在实验课内才开始研究实验的原理。在缺乏必备知识的情况下仓促而机械地依照教材所规定的步骤进行操作，不可能高质量地完成实验课的任务。做实验前一定要先预习、阅读和研究实验教材，预先绘制必要的记录数据的表格，力求在实验中处于主动地位。

在进行实验前的预习时，应以理解教材中所述的原理为主，对于实验的具体过程只要求有粗略的了解，以便能够抓住实验的关键，做到较好地控制实验的物理过程或物理现象，及时、迅速、准确地获得待测物理量的数据。

二、进行实验

进行实验操作以前要先熟悉仪器，了解仪器的工作原理、性能和使用方法，然后将仪器调整好。例如调整自由落体测定仪与地面垂直，调节气垫导轨达到水平，调节光具座上各光学元件处于同轴等高等。

每次测量后，应立即把数据记录下来，要根据仪器的最小刻度和准确度等级决定实验数据的有效数字位数。未经重复测量时，不允许修改实验数据。

在两人或多人合作做一个实验时，应当既有分工又有协作，不要使某个人处于被动，也不要一个人包办代替，以便共同达到实验课的预期目的。

三、写实验报告

提出实事求是的、科学的、完整的实验报告，是使科学实验成果得以发挥作用的必不可少的重要环节，因而加强这方面的学习和训练是很重要的。每次实验以后，每个学员都必须独立地写出一份完整的实验报告，作为本次实验的小结。实验报告一般应

包括以下几方面的内容：

（1）实验的名称，日期，实验目的，实验仪器及规格，实验原理及公式，实验的简要步骤。

（2）实验记录。这是实验中最重要的部分，数据要详细、准确，应列表记录原始数据。

（3）数据处理。数据处理包括三部分。第一部分是将所得数据代入公式，计算出所需要的结果；第二部分是依据数据绘制有关曲线和图表；第三部分是对所得数据进行误差分析。

（4）结论和讨论。说明对实验目的完成的情况，分析产生误差的原因。

（5）完成实验所要求的作业。

以上是实验报告中大体上应包括的项目，不同的实验可以有所取舍，不必千篇一律。

为了保障物理实验的顺利进行，要求全体学员必须严格遵守实验室守则；服从教师和实验室工作人员的指导；爱护仪器设备，并且注意安全。

§2 测量与误差

一、物理量的测量

对于物理学科的研究，一般是从两个方面入手，一个是定性分析；另一个是定量分析，找出各物理量之间的数量关系，从而揭露物理现象的本质，发现物理规律。在物理实验中，要用实验方法去研究各个物理量之间的关系，或直接、或间接地确定某个物理量的数值大小，这都离不开对一些物理量进行测量。

1. 测量的定义

测量一个物理量的大小，通常是把这个量与规定作为标准单位的同类物理量（称为标准量）进行比较，其倍数即为待测量的测量值。

在国际上规定了七个物理量的单位作为基本单位，即长度、质量、时间、电流强度、热力学温度、发光强度和物质的量。它们的单位分别是米（m）、千克（kg）、秒（s）、安培（A）、开尔文（K）、坎德拉（cd）和摩尔（mol）。这些量称为基本物理量，其它物理量是根据定义由基本物理量组合而成的，称为导出物理量，它们的单位称为导出单位。

2. 测量的步骤

（1）选择仪器：正确选择仪器，使其种类、量程、准确度适合实验的要求。

（2）检查和调节仪器，如仪器的零点是否正确，安装是否恰当等。

（3）观察示数并读取数值。

3. 测量的分类

测量分直接测量和间接测量。凡使用量具、量仪经过比较就能直接得到测量结果的叫做直接测量；凡经过直接测量后，还必须经过一定的数学运算才能得到测量结果的叫做间接测量。在物理实验中，绝大部分是间接测量。

二、测量的误差

1. 误差的概念

任何一个具体的待测物理量客观上都有一个确定的数值，称为真值。真值是指一定条件下某待测量的实际值。真值是一个理想的概念，一般情况下用测量方法是得不到的。所以，用科学工作者反复测量而被人们认为比较准确的值来代替真值，称为公

认值。在一般的实际测量中，由于仪器结构不可能绝对完善，测试人在操作、调整和读数时不可能完全准确，环境条件的变化，例如温度的变化、扰动等不可避免地会造成各种干扰，因此任何测量结果都不可能是待测物理量的真值。也就是说，测量结果与真值间总有差别。测量的误差就是测量值与真值间的差值。由于真值的不可得性，实际工作中的测量误差通常是指测量值与公认值间的差值。

2. 误差的种类

（1）系统误差：系统误差总是使测量结果向一个方向偏离，其数值是固定的或按确定的规律变化的。系统误差包括：

A. 仪器误差：由于仪器本身的缺陷造成的误差。例如天平的不等臂、千分尺的零点读数不是零、表头零点不准等。

B. 理论误差或方法误差：由理论公式或测量方法的近似性所造成。例如在气垫轨上研究物体运动时没有考虑气体粘滞阻力的影响，测量热量时没有计算某些热损失等。

C. 个人误差：测量者个人的习惯或缺陷带来的误差。例如计时的时候有人反应过快或过慢、色盲、耳重听等。

D. 环境误差：由于外界环境（如光照、温度、湿度、电磁场等）的影响而产生的误差。

系统误差靠增加测量次数是不能消除的。消除或纠正误差只能是对仪器进行校正、改进实验方法或在计算公式中引入合理的修正等。

（2）偶然误差（随机误差）：偶然误差的产生没有确定的规律，即偶然误差出现的大小或方向是随机的。这种误差是由于实验者或感觉器官的分辨能力不尽完善，仪器的精确度有一定的的限制，以及外界环境的扰动所引起的。由于这些因素的影响事先不尽全部知道，影响的程度又不好估量，因此无法消除，由此造成的测量误差称为偶然误差。偶然误差存在于一切测量之中。

它的出现尽管难以控制，但它具有抵偿性，服从统计分布规律，多次重复测量可以减少偶然误差的影响。

（3）过失误差（粗大误差）：由于实验者粗心大意造成的误差。如看错、读错、计算错或操作方法不当等。这种误差数值较大，明显歪曲了应得的测量结果，在测量中一旦发现这种误差，应在测量数据中剔除。这种由于实验者个人过失造成的误差是应该避免的。

在作误差分析时，通常是假定系统误差已消除或修正，过失误差已经避免而只存在偶然误差的前提下进行的。

3． 测量结果的一般表示法

（1）绝对误差和相对误差：没有指明误差的测量结果，在科学上是没有价值的。在职工大学物理实验中，常用的误差表示方法有两种，即绝对误差和相对误差。

设A为公认值或真值，a为测量值，则测量的绝对误差和相对误差可分别表示为：

$$\Delta A=|a-A|, \qquad E_r=\frac{\Delta A}{A}\times 100\%.$$

绝对误差和相对误差的物理意义是很清楚的，它们表示测量的精度，其数值越小，表示测量结果越接近真值。绝对误差ΔA与测量值a具有相同的单位，它表示测量值偏离公认值或真值的大小。相对误差也叫百分比误差，它是一个无量纲的量。

（2）测量结果的一般表示方法：对于一个完整的测量结果，不仅应表明其数值和单位，还需要表明相应的误差，一般表示形式为：

$$a=A\pm\Delta A, \qquad E=\frac{\Delta A}{A}\times 100\%.$$

应当注意，式$a=A\pm\Delta A$表示测量结果的绝对误差不大于ΔA，不小于$-\Delta A$，测量值a的真值在$A+\Delta A$与$A-\Delta A$之

间，而不应理解为a的值是$A+\Delta A$和$A-\Delta A$两个数值。

还需注意，绝对误差大者，其相对误差不一定大，因此，在比较不同的测量结果时，常用相对误差表示。例如，今测得两个物体的质量分别为$m_1=(12.17\pm0.02)$克，$m_2=(1.22\pm0.02)$克，则其相对误差分别为：

$$Er_1=\frac{0.02}{12.17}\times100\%=0.16\%;$$

$$Er_2=\frac{0.02}{1.22}\times100\%=1.6\%.$$

从绝对误差来看，两者相同，但从相对误差来看，后者是前者的10倍，自然我们认为第一个测量结果更准确些。

三、测量误差的计算

1. 直接测量结果误差的计算

（1）单次直接测量结果误差的估计：由于条件不许可，在同一个实验中测量只能进行一次（例如混合法测比热实验中，热平衡温度一瞬即逝，无法进行多次测量），或者准确程度要求不高，没有必要测量多次。单次测量的测量误差主要取决于仪器的精度、观察时的外部环境、实验者的感官分辨能力和技术水平等。仪器的精度是指仪器上的最小分度。显然，仪器最小分度所表示的量越小，该仪器就越精密。例如测量运动场跑道用的卷尺最小分度为2厘米，其精度为2厘米；实验室常用的毫米分度卷尺，其精度为1毫米。为初学者方便，我们以后所进行的实验中，一次测量误差的大小，一般情况下可取仪器精度的一半。例如，用千分尺测某物体的长度为4.566毫米，其千分尺的精度为0.01毫米，那么我们可以取0.005毫米作为一次测量结果的误差范围。故此物体的长度表示为（4.566±0.005）毫米。在某些情况下，

可以根据测量的具体条件，取仪器精度的$\frac{1}{4}$、$\frac{1}{5}$、$\frac{1}{10}$或取仪器的精度（例如数字式仪表按示数的最末位取±1）作为单次测量结果的误差范围。

（2）多次测量的平均值及误差：为了减小偶然误差，在可能的情况下对同一物理量总是要进行多次等精度的测量，并将多次测量的算术平均值作为测量的结果，以增加测得量的可靠程度。这是根据偶然误差分布规律，测量值偏离真值的方向（即正、负误差）和偏大或偏小的几率是相等的，因此，可以认为多次测量的算术平均值中，正的和负的偶然误差基本上互相抵消。设对某物理量A进行n次重复测量，各测量值依次为a_1, a_2, a_3，……，a_n，用$\overline{A}$表示全部测量的算术平均值，并作为测量结果，则

$$\overline{A}=\frac{1}{n}(a_1+a_2+\cdots\cdots+a_n)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}a_i$$

用Δa_1，Δa_2，……，Δa 表示各次测量值与算术平均值$\overline{A}$的偏差，即

$$\Delta a_1=a_1-\overline{A},\ \Delta a_2=a_2-\overline{A},\ \cdots\cdots,\ \Delta a_n=a_n-\overline{A}.$$

则算术平均偏差的定义是

$$\Delta A=\frac{|\Delta a_1|+|\Delta a_2|+\cdots\cdots+|\Delta a_n|}{n}=\frac{\sum_{i=1}^{n}|\Delta a_i|}{n}$$

一般地讲，误差是指测量值a与真值A之差，与上式所表示的偏差，即测量值a与测量平均值$\overline{A}$之差二者是有区别的。当测量次数越多时，多次测量的平均值$\overline{A}$就越接近于真值A，因而测量的平均偏差也就越接近于它们与真值的误差。在这种情况下，

我们可以不再区分偏差与误差，把算术平均偏差ΔA称为算术平均误差，或称为平均绝对误差。这样一来，多次测量的结果可以表示为

$$A=\overline{A}\pm\Delta A,$$

多次测量的平均相对误差表示为

$$E_r=\frac{\Delta A}{\overline{A}}\times 100\%.$$

2. 间接测量的误差计算

间接测量是利用直接测量的结果通过公式计算得到的。所以直接测量的误差必然影响间接测量的结果。设间接测得量N是几个直接测量A、B、C，……的函数，即$N=f(A,B,C,\cdots\cdots)$，如果各直接测得量可以表示为$A=\overline{A}\pm\Delta A$，$B=\overline{B}\pm\Delta B$，$C=\overline{C}\pm\Delta C$，……，将这些测量结果应用微分法则即可以得出间接测得量N的表达式：

$$N=\overline{N}\pm\Delta N, \qquad E_r=\frac{\Delta N}{\overline{N}}\times 100\%,$$

其中$\overline{N}=f(\overline{A},\overline{B},\overline{C},\cdots\cdots)$为间接测得量的算术平均值，$\Delta N$是间接测得量的算术平均误差。

（1）绝对误差表达式的推导：设$N=f(A,B,C,\cdots\cdots)$，对该式求全微分，有

$$dN=\frac{\partial f}{\partial A}dA+\frac{\partial f}{\partial B}dB+\frac{\partial f}{\partial C}dC+\cdots\cdots.$$

考虑到误差可能出现的最大值，N的绝对误差可以表示为

$$\Delta N=\left|\frac{\partial f}{\partial A}\right|\Delta A+\left|\frac{\partial f}{\partial B}\right|\Delta B+\left|\frac{\partial f}{\partial C}\right|\Delta C+\cdots\cdots.$$

例1　求$N=A+B$的绝对误差。

解：由$N=A+B$，

$$有\ dN=\frac{\partial N}{\partial A}dA+\frac{\partial N}{\partial B}dB.$$

$$所以\ \Delta N=\left|\frac{\partial N}{\partial A}\right|\Delta A+\left|\frac{\partial N}{\partial B}\right|\Delta B=1\cdot\Delta A+1\cdot\Delta B.$$

即　$\Delta N=\Delta A+\Delta B$

例2　求$N=A\cdot B$的绝对误差。

解：由$N=A\cdot B$，

$$有\ dN=\frac{\partial N}{\partial A}dA+\left|\frac{\partial N}{\partial B}\right|dB.$$

$$所以\quad \Delta N=\left|\frac{\partial N}{\partial A}\right|\Delta A+\left|\frac{\partial N}{\partial B}\right|\Delta B=B\cdot\Delta A+A\cdot\Delta B,$$

即　$\Delta N=A\cdot\Delta B+B\cdot\Delta A$。

（2）相对误差表达式的推导：设$N=(A,\ B,\ C,\cdots\cdots)$，对该式两边求对数，有

$$\ln N=\ln\left[f(A,\ B,\ C,\ \cdots\cdots)\right].$$

对上式两边求全微分，则得

$$\frac{dN}{N}=\frac{\frac{\partial f}{\partial A}dA+\frac{\partial f}{\partial B}dB+\frac{\partial f}{\partial C}dC+\cdots\cdots}{f(A,\ B,\ C,\ \cdots\cdots)}$$

考虑到误差可能出现的最大值，可以得到相对误差的表达式为

$$E_r=\frac{\Delta N}{N}=\frac{\left|\frac{\partial f}{\partial B}\right|\Delta A+\left|\frac{\partial f}{\partial B}\right|\Delta B+\left|\frac{\partial f}{\partial C}\right|\Delta C+\cdots\cdots}{f(A,\ B,\ C,\ \cdots\cdots)}.$$

例3　求$N=A+B$的相对误差。

解：由$N=A+B$，

有　$dN=dA+dB$，

所以$\Delta N=\Delta A+\Delta B$。

于是有$E_r=\dfrac{\Delta N}{N}=\dfrac{\Delta A+\Delta B}{A+B}$。

例4　求$N=A\cdot B$的相对误差。

解：由$N=A\cdot B$，

取对数　$\ln N=\ln(A\cdot B)=\ln A+\ln B$

两边微分，有$\dfrac{dN}{N}=\dfrac{dA}{A}+\dfrac{dB}{B}$

于是有$E=\dfrac{\Delta N}{N}=\dfrac{\Delta A}{A}+\dfrac{\Delta B}{B}$。

（3）几个常用的误差公式：表0—1为几个常用的误差公式，供误差计算时参考。

上述各项算术平均误差的计算，充分考虑了各项误差同时出现最大值的情况，即取绝对值相加得到的。但是实际上出现这种最不利情况的几率是不大的，因而实际上夸大了间接测量值的误差。如果采用标准误差系统，则可以对误差进行更为精确的表达。所谓标准误差，就是将各测量值的误差的平方和求平均后再开平方，故又称之为方均根误差，常用σ表示。对于某一物理量A的直接测量值，其标准误差为：

$$\sigma_A=\sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}(\Delta a_i)^2}{n}}=\sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{n}(a_i-A)^2}{n}}$$

对于有限次的测量，根据高斯误差理论可以证明，直接测量值的标准误差可以表示为

表0-1　　几个常用误差公式

计算关系式 $N=f(A,B)$ 或 $N=f(A)$	绝对误差 ΔN	相对误差 $E_r=\frac{\Delta N}{N}$
$N=A+B$	$\Delta A+\Delta B$	$\frac{\Delta A+\Delta B}{A+B}$
$N=A-B$	$\Delta A+\Delta B$	$\frac{\Delta A+\Delta B}{A-B}$
$N=A\cdot B$	$A\,\Delta B+B\,\Delta A$	$\frac{\Delta A}{A}+\frac{\Delta B}{B}$
$N=\frac{A}{B}$	$\frac{A\,\Delta B+B\,\Delta A}{B^2}$	$\frac{\Delta A}{A}+\frac{\Delta B}{B}$
$N=A^n$	$nA^{n-1}\,\Delta A$	$n\cdot\frac{\Delta A}{A}$
$N=\sqrt[n]{A}$	$\frac{1}{n}A^{\frac{1}{n}-1}\,\Delta A$	$\frac{1}{n}\cdot\frac{\Delta A}{A}$
$N=\sin A$	$\Delta A\cos A$	$\Delta A\,\mathrm{ctg}A$
$N=\cos A$	$\Delta A\sin A$	$\Delta A\,\mathrm{tg}A$
$N=\mathrm{tg}A$	$\frac{\Delta A}{\cos^2 A}$	$\frac{2\Delta A}{\sin 2A}$
$N=\mathrm{ctg}A$	$\frac{\Delta A}{\sin^2 A}$	$\frac{2\Delta A}{\sin 2A}$