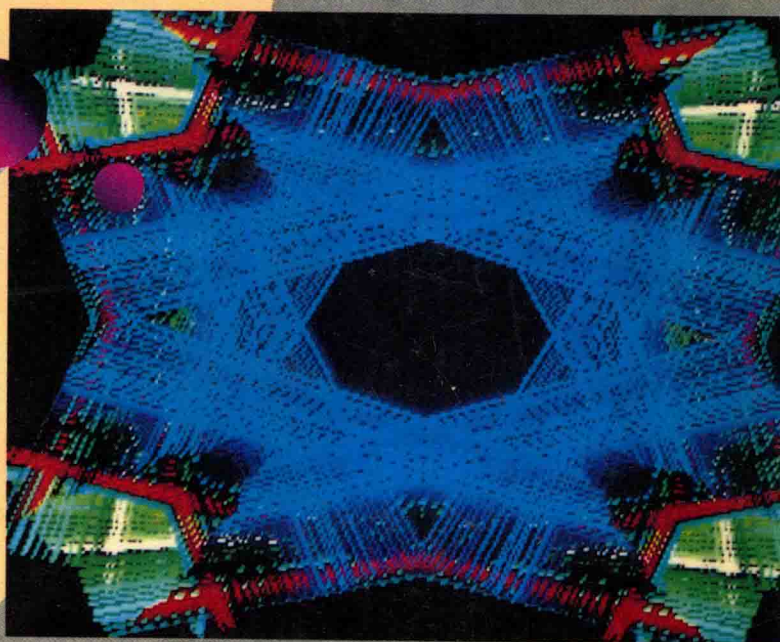


大学物理

丁慎训 主编

(实验部分)



中央广播电视大学出版社

04-33
183

098/102

大学物理

(实验部分)

丁慎训 主编

中央广播电视大学出版社

(京)新登字 163 号

图书在版编目(CIP)数据

大学物理:实验部分/丁慎训主编. -北京:中央广播电视大学出版社,1995.10

ISBN 7-304-01241-2

I. 大… II. 丁… III. 物理学-实验-电视大学-教材
IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 19396 号

大学物理

(实验部分)

丁慎训 主编

中央广播电视大学出版社出版

社址:北京市复兴门内大街 160 号 邮编:100031

北京首师大印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

开本 787×1092 1/16 印张 7.25 千字 179

1995 年 9 月第 1 版 2001 年 3 月第 14 次印刷

印数 134601 ~ 149600

定价:9.10 元

ISBN 7-304-01241-2/O·83

编者的话

根据广播电视大学工科培养应用型高级工程技术人才的培养目标,并参照近年来国际上基础物理课程教学改革趋势,中央广播电视大学物理教研室在从事物理教学与研究的一批国内外著名专家学者的支持和指导下,制定了新的“大学物理”课程教学大纲并编制了多媒体教材《大学物理》。这套教材的文字教材分为四册,即《大学物理(理论核心部分)》、《大学物理(当代物理前沿专题部分)》、《大学物理(实验部分)》和《大学物理学习指导书》。本书即是这套教材中的《大学物理(实验部分)》。

大学物理实验是广播电视大学工科的学生进校后学习的一门较重要的和具有较系统全面的实验理论、能力训练的课程。首先,本书保留了大学物理实验的基本内容,删去了与中学重复且过于简单的实验。其次,本书根据广播电视大学工科培养各专业高级应用型人才的目标,一方面适当增添了一些近代物理实验,另一方面增设了若干在工程技术中有用的物理实验内容和方法,设置了设计性实验和替代实验,以适应电视大学各个专业及各地电大实验室建立发展不平衡的特点,部分实验教学内容与大学物理的理论核心部分有互补性。

本书是根据先简后繁、先易后难和循序渐进的原则编写的。书中既有对各种测量的基本训练、主要仪器的使用、又有基本实验方法、常用实验数据处理方法的学习。本书力求在有限的学时内,使学生的综合实验能力得到全面、初步的训练,为以后的学习和工作打下一个较好的基础。

本书由清华大学丁慎训教授任主编,并编写了Ⅰ绪论、Ⅱ测量误差与数据处理的基本知识及实验十一、实验十二。河北省广播电视大学王祥麟编写了实验一、实验三、实验四和实验十四。中央广播电视大学金天允编写了Ⅲ常用仪器介绍、实验二、实验九和实验十,李平编写了实验五至实验八、实验十三,和附录表。中央广播电视大学物理教研室董锐组织了本书的编写工作。

本书在基础物理教学方面所作的改革还是一种尝试,不足之处祈望读者指正。

编者

1995年7月

目 录

I	绪论	(1)
	一、物理实验课的作用和任务	(1)
	二、物理实验课的基本程序	(1)
	三、物理实验室规则	(2)
	四、物理实验课的安排和要求	(3)
II	测量误差与数据处理的基本知识	(4)
	§1 测量与误差	(4)
	§2 直接测量结果的表示及误差估计	(7)
	§3 间接测量结果的表示	(8)
	§4 有效数字	(9)
	§5 实验数据的处理	(10)
	习题	(14)
III	常用仪器介绍	(16)
IV	基本实验	(33)
	实验一 长度和固体密度测量	(33)
	实验二 单摆实验	(40)
	实验三 刚体的转动惯量实验	(44)
	实验四 冷却法测固体比热	(49)
	实验五 灵敏电流计的研究	(56)
	实验六 用惠斯登电桥测电阻	(62)
	实验七 学生式电位差计	(67)
	实验八 用霍尔元件测量磁场	(72)
	实验九 用分光计测量折射率	(77)
	实验十 用牛顿环测量曲率半径	(84)
	实验十一 全息照相实验	(88)
	实验十二 夫兰克-赫兹实验	(92)
V	设计性实验	(97)
	实验十三 简谐振动的研究	(97)
	实验十四 伏安法测电阻	(99)
VI	附表	(102)
	附表1 基本物理常数	(102)
	附表2 在 20℃时常用固体和液体的密度	(103)
	附表3 在标准大气压下不同温度的水的密度	(104)
	附表4 在海平面上不同纬度处的重力加速度	(105)

附表 5	液体的比热	(105)
附表 6	在常温下某些物质相对于空气的光的折射率	(106)
附表 7	常用光源的谱线波长表	(106)
附表 8	国际单位制简介	(108)

I 绪 论

一、物理实验课的作用和任务

物理学从本质上说是一门实验科学。物理规律的发现和物理理论的建立,都必须以严格的物理实验为基础,并受到实验的检验。

对于从事科学技术工作的人来说,物理实验的知识和技能也是必不可少的。物理学原理、物理实验方法和物理测量仪器已被广泛地运用到各个科学研究和生产技术领域。

物理实验的一项重要任务是培养学生以确凿的事实为依据,理论与实践相结合的科学态度;认真仔细,一丝不苟的工作作风;严密观察,勤于思考,寻求规律的探求精神。具有这样的素质对于从事任何一项工作都是十分有益的。

物理实验是对高等工业学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程,是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端。物理实验课教学的任务是:

1. 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验知识,加深对物理原理的理解。

2. 培养与提高学生的科学实验能力。其中包括:

(1)能够通过阅读实验教材或资料,做好实验前的准备;

(2)能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器;

(3)能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断;

(4)能够正确记录和处理实验数据,绘制曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告;

(5)能够完成简单的具有设计性内容的实验。

3. 培养与提高学生的科学实验素养。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风,严肃认真的科学态度,主动研究的探索精神,遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德。

二、物理实验课的基本程序

(一)实验前的预习

为了在规定时间内,顺利地完成任务,学生一定要做好实验前的预习。

预习时应理解实验原理,搞清实验内容和要用的实验方法。为了使测量数据一目了然,防止遗漏,应根据实验的要求预先画好或设计好数据表格。

不了解实验的原理就动手操作,只能机械地按照教材所规定的步骤进行,尽管照猫画虎地取得了一些数据,但不能深入地理解物理现象的实质,也不会注意实验方法中的技巧,当然更谈不上主动地分析实验中的各种现象了。

(二)实验操作

实验操作是物理实验课程中的最重要的环节,学生要充分利用这个过程认真调节仪器,仔细观察实验现象,一丝不苟地记录数据,以求得到最大的收获。

进入实验室,首先要了解实验规则及注意事项。其次就是熟悉和安装调整仪器,经教师检查电路后开始测量。测量的原始数据(一定不要加工或修改)应整齐地记录在实验数据表中,数据的有效位数应由仪器的精度或分度值加以确定。数据之间要留有间隙,以便补充。若发现记录的数据有误应用笔划掉,并将正确数据写在旁边,不要在原数据上涂改,因为有时在仔细核对以后常发现它并没有错。不要忘记记录有关的实验环境条件,仪器的精度、规格及测量量的单位。实验原始数据的优劣,决定着实验的成败,读数时务必认真仔细。运算的错误可以修改,原始数据则不能擅自改动。两人同做一个实验时,要既分工又协作,共同配合完成实验。

(三)实验报告

实验报告是实验工作的总结。要用简明的形式将实验情况及结果完整而又准确地表达出来。实验报告要求文字通顺,字迹端正,图表规矩,结果正确,讨论认真。应养成实验结束后尽早写出实验报告的习惯,因为这样做可以收到事半功倍的效果。

完整的实验报告应包括以下几部分内容:

(1)实验名称;

(2)实验目的;

(3)实验原理:应简要地说明并列出实验中使用的主要公式、电路或光路图。若实际所用与教材中列出的不符,应以实际采用的为准。

(4)仪器用具:列出主要仪器的型号、规格,并记录其编号。

(5)实验记录:全部实验中有用的数据要尽量以表格的形式列出,并正确地表示出有效数字和单位。

(6)数据处理:根据要求计算出最后的测量结果,可采用列表和作图法。对所得的数据应进行误差分析。

(7)实验结果:最后的结果应包括测量值、误差和单位。如果实验是为了观察某一物理现象或者观察某一物理规律,可只扼要地写出实验结论。

(8)讨论与分析:回答实验思考题;描述实验中观察到的异常现象及可能的解释;分析实验误差的主要来源;对实验仪器和方法的改进建议等。还可以谈谈实验的心得体会。

以上是对报告的一般性要求。不同的实验,可以根据具体情况有所侧重和取舍,不必千篇一律。

三、实验室规则

1. 做实验前认真预习,做到心中有数,并画出记录数据的表格。
2. 实验时严格遵守操作规程,注意安全,爱护仪器。在弄清注意事项和操作方法之前不要乱动仪器。
3. 细心操作,认真观察,及时记录实验原始数据,绝不允许事后追记。
4. 实验室要保持肃静和整洁,不得大声喧哗、抽烟和吃东西。

5. 无故迟到超过十分钟或没有预习者不得进入实验室做实验。

6. 如遇到自己不能处理的问题应及时报告教师。电学实验电路连好后要经过教师同意，方可接通电源。

7. 实验结束后应将仪器、用具整理好。原始数据须经教师过目并签字后才能离开实验室。原始数据一律要附在实验报告后面一齐交给教师。

四、物理实验课的安排和要求

1. 基本要求

在实验课前，学生要认真阅读绪论部分的内容，明确物理实验的作用和任务，弄清实验课的基本程序，记住实验室规则。对教师讲授的物理实验数据处理及误差分析的基础知识应反复思考并及时完成课后的作业。有些内容例如误差、有效数字的概念和运算方法，学生可能会感到不好理解，这是正常的。还需在以后的一个个具体的实验实践中进一步学习和认识。

实验原理和常用仪器的原理及使用以同学自学为主。

2. 实验

本课程共安排了十四个实验，要求必做十个基本实验和两个设计性实验。若目前开设实验十一、十二有困难，可暂时以实验二、九代替。十二个必做实验在内容上分属物理学的力、热、电、光和近代物理等各部分，有些内容与《大学物理(理论核心部分)》是互补的；从实验方法与实验仪器方面看，在物理实验中也具有一定的代表性。

在做每个实验时，还应经常翻阅实验的基本理论，以便不断加深对基本知识的理解。两个设计性实验是为了培养综合处理问题的能力而设置的，实验前应设计出自己的方案和操作程序，课堂上同教师讨论后实施。

II 测量误差与数据处理的基本知识

本篇主要介绍测量误差的计算、实验数据的处理和测量结果的表示等问题的基本知识。所介绍的内容虽然都是初步的,但是它不仅在物理实验中要用到,而且在今后其他科学实验中也要了解的。这部分内容牵涉面较广,全面深入的讨论是计量学和数理统计学等学科的任务。这里只介绍一些基本概念,引用某些结论和公式,有些地方为了教学的需要,还将严密的理论作了适当的简化。读者需要深入了解时可参阅有关专著。

本篇材料主要供自学,要求同学在首次实验前认真通读一遍,并做好习题,以后再结合每个实验逐渐掌握其基本内容和实质。

§ 1 测量与误差

§ 1.1 测量

在物理实验中既要认真观察分析物理现象,又要以一定准确度测量某些物理量。

所谓测量就是以确定被测对象的量值为目的的全部操作。测量可分为直接测量和间接测量。

所谓直接测量是指无需测量与被测量有函数关系的其他量,而能直接得到被测量量值的测量。例如用米尺测量物体的长度,用天平和砝码测量物体的质量,用电流表测量电路中的电流,用量筒测量液体的体积等都是直接测量。

所谓间接测量,是指通过测量与被测量有函数关系的其他量,才能得到被测量量值的测量。多数测量是间接测量。例如,钢球的体积 $V = \frac{1}{6}\pi D^3$, 可通过测量钢球的直径 D , 再根据公式计算得到其体积。再例如,欲测量导体的电阻率,可通过测量该导体的电阻、长度及截面积,用电阻率公式经计算而得出。

§ 1.2 测量误差

测量结果中总是存在着误差的。因为任何测量仪器、测量方法、测量环境及测量者的观察能力都不可能做到绝对严密,所以测量不可避免地伴随有误差产生。分析测量中可能产生的各种误差,尽可能消除或减少其影响,并对测量结果的误差作出估计,是物理实验和其他科学实验中不可少的工作。

被测量客观存在的值称为真值。真值是一理想概念,一般说来它是不可能得到的。我们只能通过测量得到被测量的实际值或经过修正的算术平均值,把它当作真值。这也称为测量结果。

测量结果与被测量真值之差称为测量误差。因为真值一般是不知道的,所以测量误差一般也不知道,但是我们可以通过各种方法估计它的限值。

测量误差可以用绝对误差表示,也可以用相对误差表示。

绝对误差就是测量结果与被测量的真值之差,其值大小反映测量结果的准确程度。即

$$\text{绝对误差} = \text{测量结果} - \text{被测量的真值} \quad (\text{I}-1)$$

相对误差是测量的绝对误差与被测量的真值之比,一般用百分数表示.即

$$\text{相对误差 } E = \frac{\text{测量的绝对误差}}{\text{被测量的真值}} \quad (\text{用百分数表示}) \quad (\text{I}-2)$$

相对误差有时更能反映测量的准确程度.

测量误差按其出现的特点可分为系统误差、随机误差和粗大误差.由于其来源和特点的不同,对它们的处理方法也不相同.下面着重讨论前两种.

§ 1.3 系统误差

系统误差是在对同一被测量的多次测量过程中,保持恒定或以可预知的方式变化的测量误差分量.

产生系统误差的原因很多,最常见的有:一、测量仪器没有达到应有的准确程度.例如,用秒表测量一匀速运动的物体通过某段路程所需的时间,若秒表走时较快,那么即使进行多次测量,测得的时间也总是偏大,而且总是偏大一个固定的量.这种因仪器不准确造成的误差,可通过修理仪器或标准读数来解决;二、实验装置或实验方法没有(或不可能)完全满足理论上的要求.例如,用伏安法测电阻时,因电压表内阻不可能无穷大,电流表内阻不可能为零,故若用理想的计算公式 $R=U/I$ 去计算测量结果,则会因电表的接法不同,或者使测量的结果偏大,或者使测量的结果偏小.这种情况下,就要通过改进实验装置,如选用内阻更大的电压表、内阻更小的电流表来测量,或者是对测量结果进行修正,在计算公式中加上与电表内阻有关的修正项.三、温度、湿度等环境因素没有控制在预定的范围内.例如,欲测量导线 20°C 时的电阻值,若环境温度控制不好,偏离 20°C 太多,则会由于导线的热膨胀,使长度随温度改变,从而导致电阻值的测量产生系统性误差分量;四、测量者个人的生理特点或固有习惯带来的系统性误差分量.例如,在估读数据时总是偏大或者偏小,等等.

发现和减小实验中的系统误差是一项困难而又非常重要的工作.实验者需要对整个实验依据的原理、方法,所用的测量仪器、测量步骤,实验中观察到的实验现象进行仔细分析,动手实验前就尽可能找出引起系统误差的主要因素,采取减少系统误差的措施,并在实验后尽可能对系统误差进行修正,以求得到正确的测量结果.

§ 1.4 随机误差

§ 1.4.1 随机误差的分布规律

随机误差是在对同一被测量的多次测量过程中,绝对值与符号以不可预知的方式变化着的测量误差分量.这种误差是由于实验中各种影响测量的因素的微小变化引起的.例如实验装置和测量机构在各次调整操作上的微小差异;测量仪器指示数值的微小变化,或者测量者本人在估读和判断时的微小差别等.这些因素的共同影响就使测量值在各次测量中皆不一样,略有差异,它们围绕某一平均值上下波动,这些变动量就是各次测量的随机误差.随机误差表现为就某一次测量来说是没有规律的,是随机的,其大小和方向都不能预知.但对同一个量进行足够多次的测量,就会发现随机误差按一定的统计规律分布.常见的一种分布规律叫正态分布,如图 I-1 所示.横坐标为测量误差,纵坐标为某一误差附近单位误差内出现的相对次数或叫概率密度.从曲线可以看出:(1)数值较小的误差出现的机会较多(概率大);(2)正方向

误差和负方向误差出现的机会大体相等;(3)很大的误差通常不出现,即概率趋于零.测量次数越多,这一分布规律越明显、越典型.

对于随机误差如何处理呢?从上面的介绍可以看出,在多次测量时,正方向误差和负方向误差常可大致抵消,所以用多次测量的算术平均值来表示测量结果,可以减小随机误差的影响.测量值的分散程度直接体现随机误差的大小,测量值越分散,测量的随机误差就越大.定量地对随机误差作出估计有多种方法,科学实验中常用标准差来估计测量误差.

设对某一物理量,在无明显系统误差的情况下,在相同的测量条件下进行 n 次独立测量,得到 n 个测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$,它们的算术平均值是

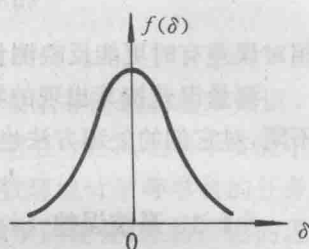


图 I-1

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (\text{I-3})$$

为了简洁,在后文中我们常略去总和号上的求和范围.例如上式中的分子只写成 $\sum x_i$ 的形式.可以证明,当系统误差已被消除时,多次测量得到的测量值的平均值最接近被测量的真值,测量次数越多,接近程度越好(当 $n \rightarrow \infty$ 时,平均值趋近真值).因此,我们可以用平均值来表示测量结果.

根据数理统计理论,常用标准差来表示测量的随机误差.我们先引进残差的概念,每一次测量值 x_i 与平均值 $\bar{x}$ 之差称为残差,即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad i=1, 2, \dots, n$$

显然,由于随机误差的存在,这些残差有正有负,有大有小,用“方均根”法对这些残差进行统计,得到的结果,就是多次测量的标准偏差 s_x ,数学表达式为

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{I-4})$$

用式(I-4)算出的标准偏差大,就表示测量值比较分散,随机误差大;标准偏差小,表示测量值比较密集,随机误差小.式(I-4)也称为贝塞尔公式.

现在很多计算器都具有计算标准偏差的统计功能,式(I-4)的计算结果在计算器上常用 S 或 σ_{n-1} 键表示.在以后的实验数据处理中,要计算 s_x 时,只需将 n 个测量值按规定的操作步骤输入计算器,计算器即可很方便地给出平均值 $\bar{x}$ 及 s_x .不要求同学按式(I-4)一步步去进行繁琐的计算.

§ 1.5 仪器的误差

任何测量都需要用测量仪表或器具,而这些仪表和器具都不可能绝对准确,用它来进行测量都不可避免地使测量产生误差.仔细地研究仪器误差是很专门的工作,在基础物理实验教学中可将仪器的误差简化地表示为 $\Delta_{\text{仪}}$,通常取 $\Delta_{\text{仪}}$ 等于仪表器具的示值误差限或基本误差限.一般情况下,测量仪表器具出厂时,工厂都要按照国家标准或其他有关标准规定出准确度等级,或给出基本误差限的计算公式,或者明确给出示值误差限(有些地方称允差极限).例如,0~300mm,0.05mm分度的游标卡尺,其示值误差为0.05mm;0~25mm的外径千分尺(螺旋

测微计),其示值误差为 0.004mm;量程为 3V 的 0.5 级电压表,其基本误差限为 $3V \times 0.5\% = 0.015V$,使用时可能产生的附加误差,在本实验中可不用考虑.

在具体到某一实验中,除了仪器本身的原因外,有时因实验者本人的原因,环境条件的原因,实验室可约定将 $\Delta_{\text{仪}}$ 给定为一个更合适的数值,例如将示值误差放大后给出.

§ 2 直接测量结果的表示及误差估计

§ 2.1 直接测量结果的表示

一个被测量的测量结果一般应包括测量所得的被测量值、测量误差和单位三部分.例如用卡尺测一长度 L ,得

$$L = 213.82 \pm 0.02 \text{mm} \tag{II-5}$$

它表示被测量值为 213.82,测量误差为 0.02,单位为 mm.其含义是被测量的真(实)值一般不会落在区间 $(213.82 - 0.02\text{mm}, 213.82 + 0.02\text{mm})$ 之外.用专门术语表达,被测量真值以一定的概率落在区间 $(213.82 - 0.02\text{mm}, 213.82 + 0.02\text{mm})$ 之内.所谓“概率”还可理解成被测量在给定区间内的可信赖程度,因此专门术语称为置信概率.

测量结果的一般表达式:

$$X = \bar{x} \pm \Delta x (\text{单位}) \tag{II-6}$$

§ 2.2 多次测量结果的误差估计

前面已经提到,不考虑已定系统误差时,取多次测量的平均值 $\bar{x}$ 表示测量结果

$$X = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{II-7}$$

因为真值一般是不知道的,严格地讲误差也求不出来,但是我们可以对它进行估计.既然是估计,又是基础物理实验,所以估计不能做得很严格,只能根据误差理论和国家计量技术规范的精神作适当的简化和近似.

直接测量结果的误差 Δ_x 中一般应包括两部分,一部分是多次重复测量用统计方法计算出的分量 Δ_A ,另一部分是用其他方法估计出的分量 Δ_B ,这两分量再用方和根法合成,即误差

$$\Delta_x = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \tag{II-8}$$

按国家标准规定,非特别指明时,测量结果的置信概率应是 0.95.这时可按下面方法估算 Δ_A :对同一物理量作多次重复测量时,若测量次数 n 大于 5,不大于 10(在基础物理实验中一般可做到),则用统计方法计算的分量 Δ_A 在数值上和某次测量值的标准偏差 s_x 差不多,因此可简化地直接取 $\Delta_A = s_x$ ①.注意 Δ_A 和标准偏差 s_x 是两类不同的概念,在 $5 < n \leq 10$ 时,取 s_x 的

① 当测量次数不在 $5 < n \leq 10$ 的范围,或需对 Δ_A 作更精确计算时,可用下式计算: $\Delta_A = (t/\sqrt{n})s$, s 是贝塞尔公式 II-4 算出的标准偏差,测量次数 n 确定后,因子 $t/\sqrt{n}$ 可由下表查出.

表 II-1

测量次数 n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	∞
因子 $(t/\sqrt{n})$ 的值	8.98	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72	0.55	0.47	$1.96/\sqrt{n}$
$(t/\sqrt{n})$ 的近似值	9.0	2.5	1.6	1.2	5 < n ≤ 10 时, 概率 > 0.94, 可简化地取 $(t/\sqrt{n}) \approx 1$					概率约 0.95 取 $(t/\sqrt{n}) \approx 2/\sqrt{n}$		

值当作 Δ_A 是基础物理实验中的一种简化处理方法,在需要更严格计算时可参阅有关专著.

Δ_B 可由实验室给出,在多数直接测量中 Δ_B 可近似地取计量仪表或器具的示值误差限 $\Delta_{\text{仪}}$. 这样在我们的实验中,多次测量的误差可用下式进行估算:

$$\Delta_x = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{s_x^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (\text{I}-9)$$

§ 2.3 单次测量结果的误差

在基础物理实验中往往有以下几种情况进行单次测量:(1)测量结果的准确程度要求不高,可以粗略地估计误差,不必考虑随机误差的影响;(2)实验室在安排实验时早已作过分析, $s_x \ll \Delta_{\text{仪}}$; (3)受条件限制只能进行单次测量,而无条件分析随机误差的影响. 此时,我们可以取单次测量的误差 Δ_x 为 $\Delta_{\text{仪}}$. 这样做并不说明单次测量时 $s_x = 0$,只是单次测量的误差估计得比较粗略.

§ 3 间接测量结果的误差估计

很多实验中都要进行间接测量. 间接测量结果是根据一定的函数关系从直接测量结果计算而得. 这时直接测量结果的误差必然会影响到间接测量结果. 这种影响的大小可由相应的数学式计算出来.

设间接测量量 φ 与直接测量量 $x, y, z, \dots$ 有如下函数关系:

$$\varphi = F(x, y, z, \dots)$$

$x, y, z, \dots$ 是互相独立的量. 它们的误差分别是 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots$. 由于误差值都是一些微小的量,相当于数学中的“增量”,因此它们与数学中的微分有相类似的性质,可以用类似于求全微分的办法来求间接测量结果的误差. 但是误差又具有统计性质,各分量要用方和根法进行合成. 这样我们可以近似地用下面两个公式来计算 $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 (\Delta y)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2 (\Delta z)^2 + \dots} \quad (\text{II}-10)$$

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln F}{\partial x}\right)^2 (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial y}\right)^2 (\Delta y)^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial z}\right)^2 (\Delta z)^2 + \dots} \quad (\text{II}-11)$$

式(II-10)适合于 F 为和差形式的函数,式(II-11)式适合于 F 为积商形式的函数.

几种函数的间接测量误差公式:

1. $\varphi = x + y$

用公式(II-10)计算

$$\Delta\varphi = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}(\Delta x)\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}(\Delta y)\right)^2} = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (\text{II}-12)$$

2. $\varphi = x - y$

$$\Delta\varphi = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$

3. $\varphi = xy$

用公式(II-11)计算

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln \varphi}{\partial x}(\Delta x)\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \varphi}{\partial y}(\Delta y)\right)^2}$$

$$\ln \varphi = \ln x + \ln y, \quad \frac{\partial \ln \varphi}{\partial x} = \frac{1}{x}, \quad \frac{\partial \ln \varphi}{\partial y} = \frac{1}{y}$$

$$\frac{\Delta \varphi}{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2} \quad (\text{I-14})$$

$$4. \varphi = \frac{x}{y} \quad \frac{\Delta \varphi}{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2} \quad (\text{I-15})$$

$$5. \varphi = \frac{6x^2}{y^3 \sqrt{z}} \quad \frac{\Delta \varphi}{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{2\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{3\Delta y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta z}{2z}\right)^2}$$

§ 4 有效数字

§ 4.1 有效数字的一般概念

我们把测量数据中几位可靠的数和最后一位有误差的数或可疑的数统称为有效数字。

在读取数据时，一般要估读到最小分格的 $1/10$ ，估读的那位数为可疑的数，前面几位数为可靠的数。例如用最小分格为 1mm 的钢尺测量长度，测出长度是 132.4mm ，那么 132mm 是准确的， 0.4mm 是可疑的， 132.4 四位数字均是有效数字，称为四位有效数字。若测出长度正好是 155.0mm ，末位“0”也是有效数字，该数据仍是四位有效数字。

在表示测量结果时，如 $x = 3.26 \pm 0.02\text{m}$ ，误差为 0.02m ，那么测量结果中 3.2 是准确数， 0.06 那一位是有误差的数，这三位均为有效数字，我们称 3.26 为三位有效数字。 0.0587s 是三位有效数字， $6.320 \times 10^{-5}\text{kg}$ 是四位有效数字。

§ 4.2 有效数字位数的多少反映测量结果的准确程度

有效数字位数越多，测量的准确度就越高。例如用不同的量具测量同一物体的厚度 d 时：

用钢尺测得 $d = 6.2\text{mm}$ ，仪器误差 0.3mm ， $E = \frac{0.3}{6.2} = 5\%$ ；

用 50 分度游标卡尺测量 $d = 6.36\text{mm}$ ，仪器误差 0.02mm ， $E = \frac{0.02}{6.36} = 0.3\%$ ；

用螺旋测微计测量 $d = 6.347\text{mm}$ ，仪器误差 0.004mm ， $E = \frac{0.004}{6.347} = 0.06\%$ 。

由此可见，有效数字多一位，相对误差 E 差不多要小一个数量级。因此取几位有效数字是件严肃的事情，数字不能任意取舍。

§ 4.3 有效数字的书写和运算要注意的问题

1. 有效数字的位数与小数点的位置无关，单位的国际制词头改变时，有效数字的位数不应发生变化。例如，重力加速度 980cm/s^{-2} ，以“ m/s^{-2} ”为单位表示时记为 9.80m/s^{-2} 与记为 9.8m/s^{-2} 是不同的，前者为三位有效数字，而后者只有两位。若写为 0.00980km/s^{-2} ，则数值前面小数点定位所用的“0”不是有效数字，应从非“0”的第一个数字算起，仍为三位有效数字。

2. 为表示方便，特别是对较大或较小的数值，常用 $\times 10^{\pm n}$ 的形式 (n 为一正整数) 书写。这样可避免有效数字写错，也便于识别与记忆。这种表示方法叫科学记数法。用这种方法记数时，通常在小数点前只写一位数字，例如地球的半径 6371km 可写作 $6.371 \times 10^6\text{m}$ ，表明有四位有效数字。

3. 在计算过程中,对中间运算结果适当多保留几位,以免因过多截取或修约带来附加误差.数据的截取或修约采用四舍五入法.

4. 绝对误差取一位,相对误差取1~2位.表示测量值最后结果的有效数字尾数应与误差的那一位数对齐.如电阻测量结果为 $R=368.3 \pm 0.2 \Omega$,误差为 0.2Ω ,测量结果应取到小数点后第一位,与 0.2Ω 位对齐.

5. 如果在实验中没有进行误差的估算,最后结果的有效数字位数的取法如下:在连乘除的情况下,它跟参与运算的各量中有效数字位数最少的大致相同;在代数和的情况下,则以参与加减的各量的末位数中数量级最大的那一位为结果的末位.

§ 5 实验数据的处理

对实验中测得的大量数据,需要很好地进行整理和分析,并从中得到实验的最后结果和找出实验的规律.处理实验数据是实验报告的基本内容,也是实验课的基础训练内容之一.

为了能够正确处理数据,写好实验报告,在实验中要求记录原始数据(从仪器上直接读出,未经过处理的数据)要全面,尽可能用表格列出,还要注明测量的单位,实验的条件,如环境温度,仪器的型号规格及编号等.记录数据要有实事求是的科学态度,是多少就记录多少,不能主观地加大或减少,离开实验室后不得擅自涂改原始数据.

数据的处理要做到简洁、直观、一目了然.

下面介绍几种常用的实验数据处理方法.

§ 5.1 列表法

列表法就是将一组有关的实验数据和计算过程中的数值依一定的形式和顺序列成表格.

数据列成表格,结构紧凑,简单明了,便于比较、分析和查找,同时,易于及时发现问题,也有助于找出各物理量之间的相互关系和变化规律.

列表时要注意:

1. 表格的设计要利于记录、运算和检查.

2. 表中涉及各物理量,其符号、单位均要交代清楚.如果整个表中单位都是一样的,可将单位注明在表的上方.

3. 表中的直接测量值和最后结果应能正确地反映测量误差,即应当将有效位数填写正确.中间过程的计算值可以多保留一两位,在不进行误差估算时,测量结果的有效位数也可以与直接测量值的有效位数大体一样.

§ 5.2 作图法

作图法是在坐标纸(计算纸)上用图形描述各物理量之间关系的一种方法.这种方法可以形象、直观地表示出物理量的变化规律,便于寻找实验规律和总结经验公式.作图连线时,可对实验数据起到一定平均作用,从曲线上求某些参量时可减小随机误差.

例如,在以 y 和 x 为纵、横轴的图上呈现出一条过原点的直线,则物理量 y 与 x 的函数关系即为 $y=kx$,其中 k 就是此直线的斜率.

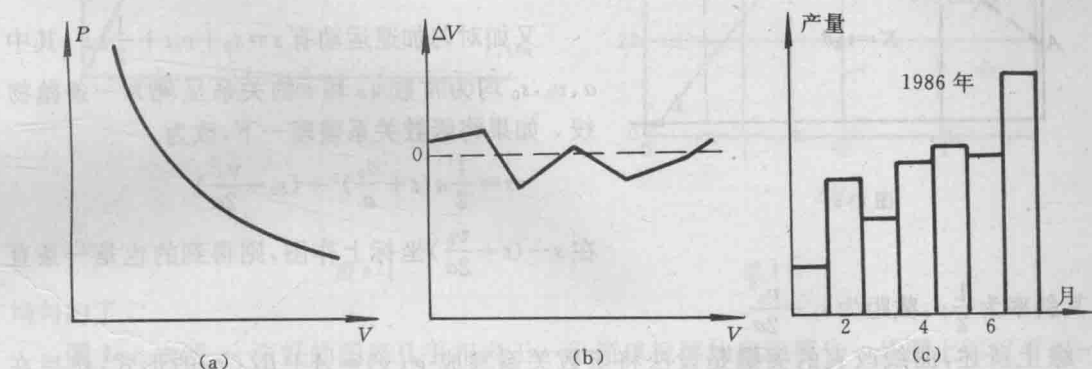
图形的另一个优点是具有延展性.测量点的总数目是有限的.通过图形的延展,可以推

知未测量点的情况,甚至可以对测量范围以外的变化趋势作出推测。

通过图形还可以方便地得到许多有用的参量,例如最大值、最小值、极值、直线的斜率和截距、弧形的曲率等。

物理实验中常遇到的图形大致有三类:

1. 曲线图:用曲线表示在一定条件下,一个物理量与另一个物理量之间的依赖关系[图Ⅱ-2(a)].
2. 折线图:两个物理量的关系如果不规则,常把相邻观测点用直线连结而得到折线图.仪器的校正曲线常画成折线图[图Ⅱ-2(b)].
3. 直方图:在统计图表中则常用直方图来表示物理量的变化情况[图Ⅱ-2(c)].



图Ⅱ-2

作图时要注意以下几点:

1. 根据函数关系选择适当的坐标纸(直角坐标纸、单对数坐标纸、双对数坐标纸、极坐标纸等),选择合适的比例,画出坐标轴的方向,标明物理量、单位和分度值.最好还在图上明显部位写上图的名称和主要测试条件。

2. 光滑曲线的测试点应当用符号“+”或“×”标出,不要用“·”表示.实验数据应当与交叉点相对应.如果在同一图上标绘几条曲线,属于不同曲线的点应采用不同的标记。

3. 把点连成直线或光滑曲线时,不要强求让曲线通过所有的点,但线两侧的点数要大体相当,点到线的距离尽可能近,个别偏离过大的点应重新核对,若确系失误可以删去.有些情况,例如画校正曲线,是将点连成折线。

4. 坐标原点不一定是变量的零点,可以根据测量点的范围加以选择.坐标轴的比例应根据所测数据的有效位数和实际需要而确定.原则上有效位数的最后一位可靠数应与图形上的最小分格(或2格)相当.坐标轴的纵轴与横轴比例要选择适当,尽量使曲线不要处在坐标纸的一隅。

5. 利用测量得到的直线求斜率时,为减小误差,用来计算的点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 不应取得太近,也不应取直接测量点,因为这将失去作图取平均值的意义.斜率可用公式

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

求得.如果要从图上求直线的截距,则横坐标的坐标原点必须是 $x=0$ 点,此时直线与纵轴的交点A到原点的距离即为(直线的)截距A(图Ⅱ-3).如果截距不能从图上直接得到,也可以