



世纪普通高等教育基础课规划教材

大学物理实验

Experiment of College Physics

主 编 王小平

副主编 周庚宽 王丽军



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪普通高等教育基础课规划教材

大学物理实验

主 编	王小平				
副主编	周庚宽	王丽军			
参 编	顾铮先	郭 莉	周 群	汤 猛	
	姚兰芳	耿 滔	卜胜利	马珊珊	
	许春燕	杜梅芳	蔡雄祥	严非男	
	沈建琪	刘廷禹	马海虹	皇甫泉生	
	郭文军	倪卫新	李玉琼	刘 源	
	梁丽萍				

机 械 工 业 出 版 社

本书是在使用多年的物理实验讲义基础上,总结教学实践经验,对原讲义内容进行筛选增补和修订编写而成的,同时增加了实验室近年来引进的一些与工程技术联系较多的新实验。

本书在结构上分为实验基本知识、基础性实验、综合性实验、设计性实验、开放性实验及应用物理实验几个部分。内容上由浅入深地分为不同层次,内容充实并可兼顾不同专业的选择需要,同时又纳入了一些与生产实践或科研有密切联系的具有时代气息的实验项目。本书除了加入真空技术的实验外,还融入了一些直接与生产实践及科研相关的内容,如材料制备及功能材料特性模拟计算和材料特性检测的实验,这将更贴近社会对人才培养的要求,也会使此书的适用面更广。

本书可作为理工院校各专业本科生的物理实验教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/王小平主编. —北京:机械工业出版社,
2009.4

21 世纪普通高等教育基础课规划教材

ISBN 978-7-111-26240-4

I. 大… II. 王… III. 物理学—实验—高等学校—教材
IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 017479 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:张金奎 责任校对:张晓蓉

封面设计:王伟光 责任印制:李妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2009 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·23.5 印张·456 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-26240-4

定价:31.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379722

封面无防伪标均为盗版

前 言

大学物理实验是理工科学生必修的一门重要基础课程，也是理工科学生在大学阶段接触到的第一个较系统的实践类课程，它是诸多后续实验课的基础。通过该课程的学习不仅可使学生较系统地掌握实验的基本理论和基本技能以及科学研究的方式和方法，同时在培养学生严谨的科学态度、理论联系实际的能力和适应科技发展的综合应用能力方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

本书重视培养学生的物理思维能力和科学研究能力，注重发挥学生的学习自主性。在实验内容的安排与选择上，结合了理工科的专业特点，由浅入深，从基本实验技能到物理前沿应用，从基础实验到综合性实验、设计性实验及应用物理实验，内容丰富，层次清楚，适用于不同专业学生的需求，较突出地展示物理在工程技术中的应用，加强了大学物理实验的综合性 and 实用性，有助于提高学生学习兴趣和专业知识。同时，本书将传感器技术、现代电子技术、真空技术等高新技术引入到物理实验中，体现了现代科学技术的多学科交叉和相互渗透的特点，可以拓宽学生的知识面和视野，增强基础理论知识和专业技术之间的联系。

本书第1章、第2章、实验7.8由王小平编写；实验3.8、4.1、5.8和第6章由周庚宽编写；实验4.23、7.7、7.9由王丽军编写；实验4.6、4.7、4.13、5.9、7.1、7.2由顾铮先编写；实验3.3、3.4、3.5、3.11、5.2、5.4由郭莉编写；实验3.7、3.13、5.5、5.6由周群编写；实验3.1、4.3、4.4、5.1由汤猛编写；实验7.3、7.4、7.10由姚兰芳编写；实验4.9、4.10、7.11由耿滔编写；实验4.8、4.21、4.22由卜胜利编写；实验3.2、3.14、4.5由马珊珊编写；实验4.16、4.17、4.20由许春燕编写；实验3.10、5.7由杜梅芳编写；实验3.6、3.12由蔡雄祥编写；实验4.18、4.19由严非男编写；实验7.5、7.6由沈建琪编写；实验7.12、7.13由刘廷禹编写；实验4.2、5.3由马海虹编写；实验4.12由皇甫泉生编写；实验4.14由郭文军编写；实验4.15由倪卫新编写；实验3.9由李玉琼编写；实验4.11由姚兰芳、刘源、梁丽萍编写。王小平、王丽军负责书稿的整理和全书的审稿和统稿工作。王丽军、王小平负责图稿的修改和绘制工作。

本书的出版得到了各级领导及友好人士的热情鼓励和帮助，在编写过程中还参考了许多院校出版的有关教材，在此一并表示衷心的感谢。

编者

2008. 10

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 物理实验课程的地位、作用和任务	1
1.2 物理实验课的教学环节	1
第2章 实验基本知识	4
2.1 测量与误差	4
2.2 随机误差的估算	8
2.3 测量的不确定度	11
2.4 实验数据处理方法	18
2.5 习题	24
参考文献	26
第3章 基础性实验	27
实验3.1 长度的测量	27
实验3.2 光杠杆测金属线胀系数	37
实验3.3 用模拟法测静电场	40
实验3.4 迈克耳逊干涉仪的调整和使用	46
实验3.5 示波器的原理和使用	50
实验3.6 分光计的调节与使用	60
实验3.7 扭摆法测转动惯量	64
实验3.8 双臂电桥测量低电阻	68
实验3.9 单缝衍射的光强分布及缝宽测量	74
实验3.10 用DQ·3数字式冲击电流(量)计测电容	78
实验3.11 声速的测量	80
实验3.12 用分光计测三棱镜折射率	87
实验3.13 金属电子逸出功的测定	92
实验3.14 用光栅分光计测H原子的 R_H	94
参考文献	97
第4章 综合性实验	98
实验4.1 密立根油滴实验——电子电荷的测定	98
实验4.2 光电效应法测定普朗克常量	104

实验 4.3 夫兰克-赫兹实验	110
实验 4.4 光纤通信实验	115
实验 4.5 霍尔效应	123
实验 4.6 多普勒效应的研究	128
实验 4.7 微波光学综合实验	132
实验 4.8 磁致双折射 (Cotton-Mouton) 效应实验	137
实验 4.9 超声光栅实验	141
实验 4.10 磁电阻效应实验	144
实验 4.11 传感器系列实验	148
实验 4.12 光拍法测量光速	163
实验 4.13 塞曼效应实验	167
实验 4.14 气体放电中等离子体的研究	173
实验 4.15 用 WGD-8 型/8A 型多功能光栅光谱仪测量样品的吸收光谱	180
实验 4.16 荧光分光光度计的使用	185
实验 4.17 阿贝成像原理和空间滤波	189
实验 4.18 光学多道分析器 (OMA) 的应用	194
实验 4.19 电子自旋共振实验	198
实验 4.20 脉冲核磁共振实验	205
实验 4.21 电光调制实验	214
实验 4.22 磁光调制实验	221
实验 4.23 验证快速电子的相对论效应	225
参考文献	236
第 5 章 设计性实验	238
实验 5.1 改装欧姆表	238
实验 5.2 用示波器测电感	239
实验 5.3 测热敏电阻的温度特性	240
实验 5.4 用迈克耳逊干涉仪测空气折射率	241
实验 5.5 用双缝测光波波长	242
实验 5.6 热电偶测温方法	243
实验 5.7 冲击电流计测螺线管内部和外部的磁感应强度	245
实验 5.8 非平衡电桥的应用	248
实验 5.9 光无源器件设计性系列实验	250
第 6 章 开放性实验	258
实验 6.1 用三线摆测定物体的转动惯量	258
实验 6.2 落球法测液体粘度	262

实验 6.3	不良导体导热系数的测定	265
实验 6.4	电表的改装和校准	271
实验 6.5	用纵向磁聚焦法测定电子荷质比	276
实验 6.6	用示波器和微机测动态磁滞回线	280
实验 6.7	太阳能电池特性的研究	288
第 7 章	应用物理实验	291
实验 7.1	光波导薄膜厚度和折射率的测量	291
实验 7.2	光波导传输损耗的测量	295
实验 7.3	溶胶-凝胶的配制(以 SiO_2 纳米颗粒增透膜为例)	299
实验 7.4	溶胶-凝胶技术制备薄膜(以 SiO_2 纳米颗粒增透膜为例)	304
实验 7.5	用锁相放大器实现微弱信号检测	308
实验 7.6	用积分放大器实现微弱信号检测	311
实验 7.7	真空实验	316
实验 7.8	真空镀膜——微波等离子化学气相沉积(CVD)设备的使用	324
实验 7.9	电子衍射实验	332
实验 7.10	接触角测试实验	341
实验 7.11	扫描隧道显微镜实验	347
实验 7.12	固体晶格动力学模拟实验	352
实验 7.13	功能晶体材料物理性质模拟计算	358
参考文献		362
附录		364
附录 A	光电倍增管	364
附录 B	空气对 β 粒子的能量吸收系数(取空气密度 $\rho = 1.290\text{mg}/\text{cm}^3$)	366
附录 C	常用物理数据	367
附录 D	在 20°C 时固体和液体的密度	367
附录 E	部分固体的线胀系数(α)	368
附录 F	20°C 时部分金属的弹性模量	368
附录 G	在标准大气压下不同温度时水的密度	368

第1章 绪 论

1.1 物理实验课程的地位、作用和任务

科学实验是人们根据研究的目的,利用科学仪器、设备,人为地控制或模拟自然现象,在有意识的变革自然中去主动认识自然的过程。科学实验不仅是自然科学发展的源泉,也是现代科学技术得以迅猛发展的原始动力,实验可以使科技工作者获得最可靠的第一手资料,还可培养人们基本的科学素养和严谨的治学精神。那种重理论、轻实践的思想倾向是与我们科技现代化的发展需要背道而驰的。

物理学是一门实验科学,物理实验在物理学的创立和发展过程中占有十分重要的地位。物理实验课程是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,它重在培养学生掌握基本的科学实验技能和分析解决实际问题的能力,为学生毕业后从事各项科学实践和工程实践打下坚实的基础。物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法和手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力、提高学生科学素养的重要基础课程。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际的能力及综合能力提高等方面具有其他实践类课程无法替代的作用。

物理实验课程的任务有:

- 1) 培养学生掌握基本的实验知识和实验技能,初步掌握实验科学的基本思想和方法。
- 2) 培养学生的科学思维和创新意识,掌握实验研究的基本方法。
- 3) 培养与提高学生的科学实验素养,使学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风,严谨认真的工作态度,主动研究的探索精神及遵守纪律、爱护公共财产的优良品德。

1.2 物理实验课的教学环节

实验在很大程度上要求学生独立工作,因此在实验前需很好地预习实验内容。在物理实验中,内容的排列顺序不完全按照讲课的顺序进行,因此,在开始预习时会感到困难。为避免浪费时间,在预习时只要把实验所遇到的

问题大致弄懂就行。每次物理实验课包括实验课前预习并书写预习报告、进实验室完成实验并科学地记录实验数据、课后数据处理并书写实验报告等三个环节。

1.2.1 实验前预习

实验前按指定的实验项目仔细阅读实验教材及有关参考资料,明确每次实验的目的、依据的基本原理、所需仪器及其测量方法,了解实验的主要步骤及其注意事项,了解实验操作过程及主要环节,在此基础上写出预习报告。其内容包括:实验名称、实验任务、实验仪器、实验原理(包括测量公式及公式中各物理量的含义和单位、原理图、线路图或光路图等——要简写)、实验步骤(简写)、自行设计记录的表格。

写预习报告可以帮助学生对实验进行充分思考,在实验进行时不用看讲义也可以顺利地完成任务,这种学习习惯应培养起来。不要把预习报告写得太长,或者写一些对实验无关的东西,应坚决杜绝不经任何思考加工完全抄讲义来应付预习的做法,切记预习报告应成为自己进行工作的有利助手而不是累赘。

预习报告在做实验前由教师进行检查,不预习者不准进行实验。

1.2.2 课堂实验

在实验过程中,一是要按操作规程调整和使用仪器;二是测量时要正确读数,实事求是地记录数据,测量完毕后检查自己的数据是否齐全、有否问题;三是多注意观察,多开动脑筋,积极探索,并在教师指导下尽可能通过自己的实践去解决所遇到的问题。在实验过程中对仪器应小心爱护,实验完毕后应将仪器按原来的位置整齐地放好,并填好实验记录卡,并在实验完毕时将数据填入表格,交指导教师审查,由教师签字后方可离开实验室。

1.2.3 书写实验报告

实验报告写在专用的实验报告纸上,内容和格式如下:

实验名称

【实验目的】

【实验仪器】

对测量仪器要注明型号、规格。规格主要包括测量范围及仪器精度。

【原理简述】

要有文字说明、原理图(例如电学实验的电路图、光学实验的光路图)和计算公式。

【数据记录、处理和结果】

包括原始测量数据、数据处理及不确定度计算的主要过程、实验结果。

【讨论】

包括回答思考题、分析对实验结果有影响的主要因素、误差分析、对实验方法和装置改进的建议等。内容要具体，不要泛泛而谈。

第2章 实验基本知识

2.1 测量与误差

2.1.1 测量与有效数字

1. 测量的分类

科学实验是通过比较的方法来测量各个物理量的。将待测物理量与被确定为标准单位的另一个同类物理量进行比较，待测物理量是标准单位的倍数，就是该待测物理量的数值，其单位与标准单位一致。

一个测量数据不同于一个数值，它是由数值和单位两部分组成的，一个数值有了单位才具有特定的物理意义。测量数据应包括数值大小和单位，两者缺一不可。

(1) 直接测量与间接测量

按获取测量结果的方式，测量可分为直接测量和间接测量两类。

直接测量：指可以用仪器、量具直接获得数据的测量。如用天平称物体的质量、用尺量物体的长度，用计时器测一段时间等；

间接测量：指不能用仪器、量具直接获得数据，而需利用直接测量获得的数据经过一定的函数关系计算而得出数据的测量。例如均匀球体的密度，需用直接测量得到的质量 m 和直径 D ，经用公式 $\rho = \frac{6m}{\pi D^3}$ 计算得到。

(2) 等精度测量和非等精度测量

按测量的条件来分，测量又可分为等精度测量和非等精度测量两类。

等精度测量：同一测量者，用相同的方法，使用同样的仪器并在相同的条件下对同一物理量进行的多次测量。

非等精度测量：在以上等精度测量所述各项中，如有一项发生变化，都将明显影响实验结果的测量。本书中以后说到的多次测量，都是等精度测量。

2. 有效数字

测量结果是由一系列数字表示出来的，物理实验要求表示测量结果的数字既能反映所使用的测量仪器的精度，又必须能反映待测物理量的大小。

在具体测量中，当被测量不能恰为标准量的整数倍时，则应给出一位不足标

准量一倍的估计数。而被测量正是由表示标准量整数倍的所有数字和最后估计的一位估计数来表示的,其中估计的这一位数字称为可疑数字。表示标准量整数倍的所有数字为准确数字,它反映待测量的大小,而可疑数字则反映所用仪器的精度。因此,表示实验测量结果中所包含的各位准确数字和末位可疑数字的数字称为有效数字,其单位与标准量的单位相同。选用不同的标准量(即用不同精度的仪器、量具进行测量),所得到的有效数字也不相同。

例如:学生用的直尺或三角板,其刻度最小分格的长度为1mm,即给出的标准量为1mm,用这样的尺子去测量一支铅笔的长度,测出其长度是标准量的177.0倍,其中177倍是确定无疑的,而0.0倍则是目测估计的,于是就可以认为铅笔的长度是177.0mm;如果用来测量的尺子的最小刻度为1cm,这时标准量变成1cm,比较结果,铅笔长度为标准量的17.7倍,其中17倍是确定无疑的,而0.7倍则是目测估计的,测得铅笔的长度应记为17.7cm或177mm。

测量结果的有效数字的个数称为有效数字的位数。由上例,以mm为标准量时,测量结果的有效数字为4位,以cm为标准量时,测量结果的有效数字为3位。此外,一列有效数字的末位即使是“0”,也不能随意舍去,因为它属于有效数字。如上,用最小分格为1mm的尺子测量的铅笔长度为 $X = 177.0\text{mm}$,其中的“0”是不能舍去的。而以cm为最小刻度的尺子测量时 $X = 17.7\text{cm} = 177\text{mm}$,却又不可在末尾加上个“0”。因为有效数字的位数是由被测量的大小和测量仪器、量具来客观决定的,它实际上反映了测量的精确程度,是不允许随意添加或删减的,即使在物理单位变换中有效数字的位数也不能改变。此外,一列有效数字的第一位非零数字前边的“0”不算有效数字。如想用m作为单位表示以上两种测量结果时,应分别记为0.1770m和0.177m;而用km作为单位表示以上结果时分别记为0.0001770km和0.000177km,其有效数字仍为4位和3位。通常情况下常采用“科学计数法”表示,可分别记为 $1.770 \times 10^{-4}\text{km}$ 和 $1.77 \times 10^{-4}\text{km}$ 。

有效数字的一些运算规则有:

1) 加减运算:在同一单位条件下,以各组有效数字中可疑数字最高位为取舍界限,对于应予以舍去的数字,按“小于5舍,大于5进,等于5将保留的末位数字凑成偶数”的约定执行。如: $25.8\text{cm} + 12.34\text{cm} = 38.1\text{cm}$

$$35.32\text{cm} - 2.745\text{cm} = 32.58\text{cm}$$

$$25.8\text{cm} + 134.85\text{cm} = 160.6\text{cm}$$

2) 乘除运算:积(商)的有效数字位数与有效数字位数最小者相同。

$$\text{如: } 834.5 \times 23.9 = 19944.55 = 1.99 \times 10^4$$

$$2569.4 \div 19.5 = 131.7641\cdots = 132$$

3) 乘方、开方及对数运算:乘方、开方及对数运算的有效数字位数与其底

数的有效数字位数相同

如: $(7.325)^2 = 53.66$

$\sqrt{32.8} = 5.73$

4) 纯数或常数: 一些无理常数, 如 π , e , $\sqrt{2}$, $\dots$, 不是测量而得, 因此不存在不准确数字, 可以视为无穷多位有效数字的位数, 在参与运算时其取值位数要求比测量值多取一位。例如: 圆面积 $S = \pi R^2$, 测量值 $R = 3.034\text{cm}$ 时, π 的取值为 3.1416。如将面积公式改为 $S = \pi D^2/4$, $D = 6.068\text{cm}$, 式中的 1/4 是公式推导过程出现的纯数字, 并非测量值, 不存在有效数字的问题, 可视它的位数是任意的, 对有效数字的运算不起作用。

进行三角运算时, 角度值的精度可以取到 $1'$ 时, 可以用四位函数表; 角度值可以取到 $10''$ 精度时, 则应该使用五位函数表; 角度值的精度达到 $1''$ 时, 则必须用六位函数表, 其余类推。使用计算器时, 其取位也要参照此约定。

2.1.2 误差及其分类

1. 测量值的误差

在一定条件下, 任何物理量的大小都有一个客观存在的真实值, 称为真值。测量的目的就是力图得到该真值。但是由于仪器制造技术、分辨率、环境的不稳定性及人的测量技巧等多种因素的限制, 任何测量得到的数值都无法与真值完全相同, 它们之间或多或少地总是存在一定的偏差, 这种包含偏差的测量结果被称为测量值, 而测量值与真值之差称为测量值的误差。测量误差反映了测量结果的准确程度。测量误差可以用绝对误差表示, 也可用相对误差表示。

绝对误差 $(\Delta) = \text{测量值}(x) - \text{真值}(X)$

Δ 表示了测量值 x 与真值 X 的数值差别大小, 但它不能反映出测量的精确程度。如: 体育比赛中用秒表分别记录 and 测量两个运动员跑 100m 和 1500m 的成绩, 假设绝对误差都是 0.1s, 其真值分别是 13.0s 和 300.0s, 显然其精确程度是不相同的。对测量真值是 13.0s 的物理量来讲, 在 13.0s 内有 0.1s 的误差; 而对真值为 300.0s 的物理量来说, 在 300.0s 内有 0.1s 的误差, 显然后者的精确度较高。这说明, 测量的精确程度与物理量的真值数值大小有关。为了表示测量的精度, 通常引入相对误差 E , 并用百分比表示, E 数值越大, 测量的精度越低; 数值越小, 测量精度越高。由于 E 与测量的精度有关, 因此有时也称其为精度。

相对误差 $(E) = \frac{|\text{绝对误差}|}{\text{真值}} \times 100\%$

实践证明, 任何测量结果都有误差, 误差始终存在于一切科学实验和测量过程中。因此在表示测量结果时必须同时反映误差。

2. 误差的种类

分析误差产生的性质,可将误差分为系统误差和随机误差。

(1) 系统误差

在等精度条件下,对同一量进行多次测量时,误差的大小和正负总保持不变或以可预知的方式变化的测量误差分量,称为系统误差,其特点是它具有确定性。

产生系统误差的原因有:

1) 仪器本身有缺陷。例如刻度不准、天平臂不等长、砝码磨损或零点未校正等。

2) 没有按规定使用仪器。例如外径千分尺(旧称螺旋测微计)不读初读数。

3) 测量方法或理论公式的近似性。例如用伏安法测电阻时没有考虑电表的内阻。

4) 个人习惯和偏向。例如用秒表计时,掐表的反应能力(总是提前或滞后的倾向)。

5) 测量过程中,环境条件(温度、气压等)的变化。如在某一温度下标定的标准电阻在另一温度下使用等。

系统误差必须针对产生的原因采用适当的方法予以消除或修正。由于系统误差的确定性,不能用增加实验次数的方法来减小。学生应该在实验中不断地提高对系统误差的识别、分析和处理能力。

消减和修正系统误差的常用方法如下:

1) 消减产生系统误差的来源。例如:采用符合实际的理论公式;保证仪器装置良好且满足规定的使用条件等。

2) 找出修正值对测量结果进行修正。例如:用标准仪器校准一般仪器,作出校正曲线进行修正;对理论公式进行修正,找出修正项的大小;修正外径千分尺的零点等。

3) 在系统误差值不易被确切找出时,可选择适当的测量方法设法抵消它的影响。如:替换法、对称观察法、半周期偶数观察法等。

(2) 随机误差

在等精度条件下对同一被测量进行多次测量时,各次测量的误差呈时大时小、时正时负、没有规则的变化,这种以不可预知、无法控制的方式变化的测量误差分量,称为随机误差。

产生随机误差的原因是人的感官灵敏度和分辨能力有限,周围环境的干扰及随测量而来的其他不可预测的偶然因素。例如用读数显微镜测小圆孔直径时,判断准线与圆相切时,各次不相同。

3. 评价测量结果的“三度”

1) 精密度:指测量结果随机误差的大小。它是描述测量重复程度的尺度,

如测量结果彼此相近,则精密度高。

2) 准确度:指测量结果系统误差的大小。它是描述测量结果接近真值程度的尺度,测量数据的平均值偏离真值较少,说明测量的准确度高。

3) 精确度:是对测量的系统误差和随机误差的综合评定。它反映各次测量重复性好坏及测量结果与真值接近程度。测量的精确度高,是指测量数据比较集中在真值附近,即测量的系统误差和随机误差都比较小。

图 2.1-1 是以打靶时弹着点的弥散情况为例,示意“三度”的含义。图 2.1-1a 表示射击的精密度较高但准确度较低;图 2.1-1b 表示射击的准确度较高但精密度较低;图 2.1-1c 表示精密度和准确度均较高,即射击的精确度高。

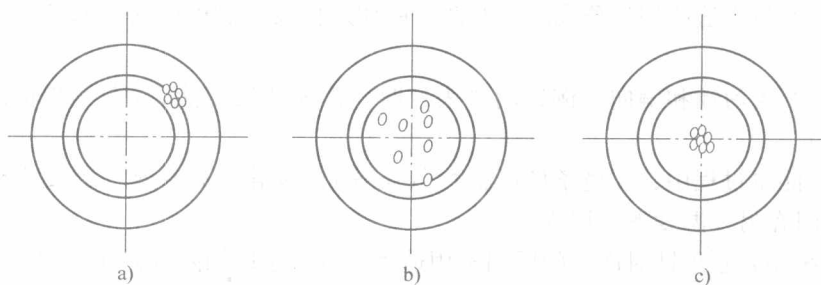


图 2.1-1 射击弥散情况

2.2 随机误差的估算

讨论随机误差问题,是假定消除了系统误差或系统误差已减小到可以忽略不计的前提下进行的。前面已经提及过随机误差的特点是在任意一次测量之前都无法预知误差的大小和正负。它的存在使每次测量值偏大或偏小,是无规则的,但如大量增加测量次数,则能发现在一定的测量条件下,它服从一定的统计规律。

2.2.1 随机误差的统计规律

常见的一种是随机误差服从正态分布(高斯分布)规律,其分布曲线如图 2.2-1 所示。

该分布曲线的横坐标为误差 Δ ,纵坐标 $f(\Delta)$ 为误差的概率密度分布函数。分布曲线的含义是:在误差附近,单位误差范围内误差出现的概率。即误差出现在 $\Delta \sim \Delta + d\Delta$ 区间内的概率为 $f(\Delta) d\Delta$ 。由图 2.2-1 可见,服从正态分布的随机误差具有以下特点。

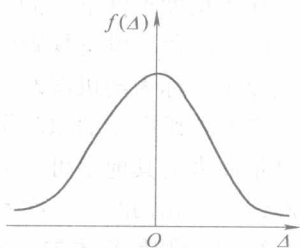


图 2.2-1

- 1) 单峰性: 绝对值小的误差出现概率比绝对值大的误差出现概率大。
- 2) 对称性: 绝对值相等, 正、负号相反的误差出现的概率相等。
- 3) 有界性: 绝对值很大的误差出现的概率趋近于零, 即误差的绝对值不超过一定的界限。
- 4) 抵偿性: 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加越来越趋近于零, 即

$$\bar{\Delta} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)}{n} = 0 \quad (2.2-1)$$

由此可见, 增加测量次数可以减小随机误差。但是, 当测量次数有限时, 随机误差是不能消除的, 因此测量后必须进行误差估算。为定量估算, 须进一步考查正态分布曲线。

实践和理论表明, 大部分物理测量中, 当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 随机误差分布符合正态分布, 而正态分布的误差概率密度分布函数 $f(\Delta)$ 可表示为

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-X)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.2-2)$$

在某次测量中, 随机误差出现在 $a \sim b$ 内的概率应为

$$P = \int_a^b f(\Delta) d\Delta \quad (2.2-3)$$

给定的区间不同, P 也不同。给定的区间越大, 误差超过此范围的可能性就越小。显然, 在 $-\infty \sim +\infty$ 内, $P=1$, 即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta) d\Delta = 1 \quad (2.2-4)$$

由理论可进一步证明, $\Delta = \pm\sigma$ 是曲线的两个拐点的横坐标值。当 $\Delta \rightarrow 0$ 时,

$$f(0) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$$

由图 2.2-2 可见, σ 越小, 必有 $f(0)$ 越大, 分布曲线中部上升越高, 两边下降越快, 表示测量的离散性越小; 与此相反, σ 越大, 必有 $f(0)$ 越小, 分布曲线中部下降较多, 误差的分布范围就较宽, 测量的离散性大。因此, σ 这个量在研究和计算随机误差时是一个很重要的特征量, σ 被称为标准误差。

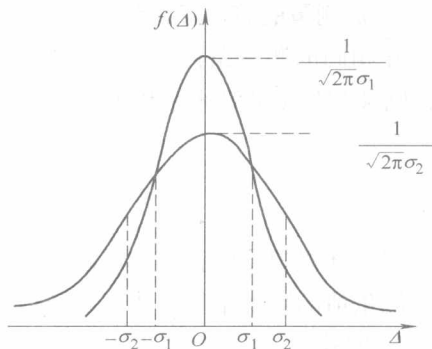


图 2.2-2

2.2.2 标准误差的统计意义

理论上标准误差由式(2.2-5)表示:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{n}} \quad (2.2-5)$$

某次测量的随机误差出现在 $-\sigma \sim \sigma$ 内的概率可以证明为

$$P = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\Delta) d\Delta = 0.683$$

同理可求得某次测量随机误差出现在 $-2\sigma \sim 2\sigma$ 和 $-3\sigma \sim 3\sigma$ 内的概率分别为

$$P = \int_{-2\sigma}^{2\sigma} f(\Delta) d\Delta = 0.955 \quad \text{及} \quad P = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\Delta) d\Delta = 0.997$$

因此标准误差的统计意义可以表述为:对被测量 x 任作一次测量时,误差落在区间 $(-\sigma, \sigma)$ 内的可能性为 68.3%, 误差落在 $(-2\sigma, 2\sigma)$ 区间内的可能性为 95.5%, 误差落在区间 $(-3\sigma, 3\sigma)$ 内的可能性为 99.7%。目前,标准误差被广泛地应用在随机误差的估算中。

2.2.3 随机误差的估算

我们知道,任何实际的测量次数不可能达到无穷大,且被测量的真值也是不可能得到的,因此标准误差的计算只具有理论上的指导意义。在实际的物理实验中随机误差只能采用近似的估算方法,具体如下:

1. 被测量的算术平均值

在相同的测量条件下,对被测量 x 进行 n 次测量,测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则被测量 x 的算术平均值定义为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.2-6)$$

根据随机误差的抵偿性,随着测量次数的增大,算术平均值越接近真值。因此,测量值的算术平均值为近真值或测量结果的最佳值。

2. 偏差

测量值与算术平均值之差,称为偏差。上述某一次测量的偏差可表示为

$$x - \bar{x}$$

3. 测量列标准偏差

在有限次测量中,可用测量列标准偏差 σ_x 作为标准误差的估计值。测量列标准偏差 σ_x 的计算公式为