



高等院校理工类规划教材

大学物理实验教程

◎ 主 编 邹红玉
副主编 麻则运 郑红平 吴 雷



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

高等院校理工类规划教材

大学物理实验教程

主 编 邹红玉

副主编 麻则运 郑红平 吴 雷



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

浙江出版集团
浙江出版联合集团
浙江出版集团
浙江出版联合集团

内容简介

本书由实验误差及数据处理、常用仪器使用方法简介、电学及光学实验基础知识以及基础设计实验、综合设计实验等章节组成。基础设计实验,以基础实验为主,每一实验结束时都有一个关于设计实验的要求;综合设计实验,在基础综合实验的基础上,每一实验结束时,也都附加了设计的要求。安排力求贴近应用型人才的培养的要求,以基本的动手能力为主,并在此基础上加强设计构思、创新思想的培养,力图开拓学生的思维和视野。在打好基础的前提下,以突出应用性本科教育的培养目标。

本书可以作为本科教学的参考教材,也可以作为以物理实验竞赛为目的的学习、复习、训练等方面的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程 / 邹红玉主编. —杭州:浙江大学出版社, 2009.10

(高等院校理工类规划教材)

ISBN 978-7-308-07112-3

I. 大… II. 邹… 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 180299 号

大学物理实验教程

邹红玉 主编

责任编辑 朱 玲

文字编辑 王元新

封面设计 俞亚彤

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州中大图文设计有限公司

印 刷 德清县第二印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 14.75

字 数 378 千

印 数 0001—3000

版 印 次 2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-07112-3

定 价 28.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

前 言

本书是在总结了三届教学实践的基础上出版的理工科物理实验教材。

本书基础实验内容丰富,建立了以基本实验仪器的使用、常用物理量及物性参数的测量、主要物理测量方法的训练为主线,以创新设计能力培养为目标的实验课程体系;而且有重点、难点的分析,适合年轻教师备课和学生的学习,也适合作为竞赛复习等的参考之用。

每一实验项目,都有设计性问题列出,有利于培养学生的创新意识;有利于培养学生的科学实验技能,掌握基本实验操作规程,提高学生的科学素质;有利于培养和提高学生的观察能力和逻辑思维能力;有利于培养学生的实验动手能力和创造思维能力,帮助学生掌握科学的学习方法,从而使学生养成勤思考、多动手等实验好习惯。

每个实验开头都简要介绍了此实验的内容、相关知识、实验技术在理论上和工程上的应用、重大意义、应用范围以及实验方法上的特点,以开阔学生的眼界,拓展必要的知识范围。

每个实验结尾都有思考题和习题,以便学生做好实验后,根据本实验进行有的放矢的思考,或回答与本实验有关的原理、实验方法、实验技能、数据处理等问题。其中也有一些比较难的习题,供学有余力的同学深入学习。

本书用较大的篇幅集中编写了误差理论与数据处理、常用仪器性能与使用、测量方法与实验技能等方面的知识,力求体现知识的科学性、系统性、规范性、创新性、先进性等特点。在实验题目的选取上,也考虑了实验教材的通用性、实用性和灵活性。

教材内容有弹性。实验分为基础设计实验和综合设计实验,共47个,以适应不同专业、不同层次学生的需求,充分调动学生学习的主动性和积极性,做到因材施教。

本书难易适当,选题规范,从应用型本科教学实际情况出发,按照“基础知识、基础实验、基础设计”的原则设计编写。可以作为各种专业应用型本科教学的公共基础教材。限于我们的水平和教学经验,书中定有不少不足之处,敬请读者提出宝贵意见与建议。

编 者

2009年8月

目 录

第 1 章 实验误差及数据处理	5
第 1 节 测量与误差	5
第 2 节 直接测量结果及其偶然误差的估计	10
第 3 节 间接测量结果误差的估计	16
第 4 节 直接测量结果的不确定度评定	23
第 5 节 有效数字及其运算	25
第 6 节 实验数据处理方法	30
第 2 章 常用仪器使用方法简介	38
第 1 节 游标卡尺	38
第 2 节 螺旋测微器	44
第 3 节 JCD 型读数显微镜简介	45
第 4 节 物理天平简介	46
第 5 节 气垫导轨简介	47
第 6 节 MUJ-6B 型电脑通用计数器的使用	48
第 3 章 电学及光学实验基础知识	50
第 1 节 电学实验基本常识	50
第 2 节 光学实验基本常识	56
第 4 章 实 验	58
第一部分 基础设计实验	58
实验 1 用天平测量质量	58
实验 2 直线运动中速度的测量	61
实验 3 单摆的设计与研究	64
实验 4 钢丝杨氏模量的测量	65
实验 5 切变模量的测量	68
实验 6 实验转动惯量的测定	71
实验 7 碰撞过程中守恒定律的研究	77
实验 8 落球法测定液体的粘度	80
实验 9 转筒法测定液体的粘度	84
实验 10 毛细管升高法测定液体表面张力系数	88
实验 11 拉伸法测液体的表面张力系数	94

实验 12	固体比热容的测量	97
实验 13	冰的融化热的测定	100
实验 14	热电偶的标度	103
实验 15	用示波器测量时间	107
实验 16	电表的改装	114
实验 17	电桥法测定电阻	117
实验 18	新型圆线圈和亥姆霍兹线圈磁场测定仪	119
实验 19	模拟测绘静电场	124
实验 20	直流电表和直流测量电路	127
实验 21	用热敏电阻测量温度	132
实验 22	半导体温度计的设计与制作	133
实验 23	测量螺线管的磁场	135
实验 24	交流电及整流滤波电路	136
实验 25	透镜参数的测量	141
实验 26	分光计的调整和使用	143
实验 27	干涉法测几何量	152
第二部分 综合设计实验		158
实验 28	直流电位差计精确测量电压	158
实验 29	双臂电桥测低电阻	162
实验 30	检流计的特性	165
实验 31	交流电桥	170
实验 32	交流谐振电路	173
实验 33	通过霍尔效应测量磁场	177
实验 34	迈克尔逊干涉仪	180
实验 35	偏振光的研究	183
实验 36	声速测定	185
实验 37	稳态法测量不良导体的导热系数	190
实验 38	霍尔位置传感器法测量杨氏模量	195
实验 39	变温液体粘滞系数的测定实验讲义	200
实验 40	光电效应法测量普朗克常量	204
实验 41	弗兰克—赫兹实验	208
实验 42	光敏传感器的光电特性实验	210
实验 43	棱镜摄谱仪	218
实验 44	用磁阻传感器测量地磁场实验	220
实验 45	传感器技术	224
实验 46	用凯特摆测量重力加速度	227
实验 47	物质对 β 射线的吸收	228
参考文献		230

学习物理实验课要求

一、正确认识大学物理实验课程的地位和作用

实验是科学理论的源泉,是工程技术诞生的摇篮。在物理学史上,16世纪意大利物理学家伽利略首先抛弃了形而上学的空洞的思辨,以敏于观察、勤于实验为信仰,并把物理实验作为物理系统理论的基础、依据和发展物理学必不可少的手段,从而使物理学走上了真正的科学道路。此后,不论在物理学发展的哪个阶段,也不论是物理概念的建立还是物理规律的发现,物理实验都起着重要的和直接的作用。在物理学发展史上,这方面的例子不胜枚举。如在对光的本性的认识中,牛顿倡导的微粒说和惠更斯主张的波动说进行了长期的争论,孰是孰非,莫衷一是。最后托马斯·杨在1800年发表了双缝干涉实验,才使波动学说得到了确认,微粒说被摒弃。然而到了19世纪末20世纪初,由于光电效应实验证实了光的粒子说,因而使人们认识到光具有波粒二象性。又如19世纪初,多数物理学家对光和电磁波的传播不需要媒质的观点是不能接受的,因此假设宇宙空间存在着一种称之为“以太”的媒质,它具有许多异常而又不合理的特性。正是在这种情况下,迈克尔逊和莫雷合作,用干涉仪进行了有名的“以太风”实验,从而否定了“以太”的存在。

物理实验也是推动科学技术发展的有力工具。在20世纪,科学技术是建立在实验的基础上的,如现代核技术是建立在铀、镭等元素天然放射性的发现、 α 粒子散射实验、重核裂变和核的链式反应的实现等物理实验基础上的,才有后来的原子弹、氢弹的爆炸以及核电站的建立。激光技术,如激光通信、激光熔炼、激光切割、激光钻孔、激光外科手术和激光武器等几乎都是从物理实验室中走出来的。而信息技术则是在量子力学、Fermi-Dirac统计、Bloch理论和能带理论的建立与验证的基础上,于1947年在物理实验室中研制出晶体管,才有现在的大规模集成电路、超大规模集成电路,并且集成度以每年1000倍的速度增长。可见,现代技术的突破,大多是从实验中诞生的。

随着物理学的发展,人类积累了丰富的实验思想和实验方法,创造了各种十分精密巧妙的仪器设备;同时测量技术、用于实验的数学方法以及计算机科学在实验中的应用等,都不断得到发展,这实际上已经赋予物理实验极其丰富的、不同于物理学本身的特有的内容,并逐步形成一门单独开设的、具有重要教育价值和教育功能的实验课程。它不仅可以加深对理论的理解,更重要的是能使學生获得基本的实验知识、技能和科学创新能力,为今后从事科学研究和工程实践打下扎实的基础。

《大学物理实验》是一门必修的基础实验课程,是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端。本课程的目的和任务是:

(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,加深对物理实验原理的理解,提高对科学实验重要性的认识。

(2)培养和提高学生的科学实验能力。其中包括:能够通过阅读实验材料或资料,做好实验前的准备;能够借助教材或仪器说明书正确使用实验仪器;能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断;能够正确记录和处理实验数据,绘制实验曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告;能够完成简单的设计性实验。

(3)培养和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,严肃认真的工作态度,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、掌握物理实验课的学习特点

大学物理实验课程的教学主要由以下三个环节构成。

1. 实验前的预习——实验的基础

实验前的预习是一次“思想实验”的练习,即在实验前认真阅读实验教材(讲义)或有关资料,弄清实验原理、方法和目的,然后在脑子里“操作”这一实验,拟出实验步骤,思考实验时可能出现的问题和会得出怎样的结论,最后写出实验预习报告。

未完成预习和预习实验报告者,教师有权停止其实验或将其实验成绩降等。

2. 实验中的操作

遵守实验室规则;了解实验仪器的使用方法和注意事项;正式测量之前可做试验性探索操作;仔细观察和认真分析实验现象;如实记录实验数据和现象。

在操作中要逐步学会分析实验,排除实验过程中的各种故障,而不能过分地依赖教师。对所得实验结果要做出粗略判断,与理论预期一致后,再交教师签字认可。

离开实验室前,要整理好实验仪器,做好清洁工作,数据记录须经教师审阅签名。

3. 实验后的报告——实验的简明总结

实验报告是实验工作的总结,要求文字通顺、字迹端正、图表规范、数据完备和结论明确。一份好的实验报告还应给人以清晰的思路、见解和新的启迪。要养成在实验操作后在预习报告的基础上尽早写出实验报告的习惯,即对原始数据进行处理和分析,得出实验结果并进行不确定度评估和讨论。

预习报告、数据记录和实验报告均用实验室编制的实验报告册!

三、怎样写好实验报告

实验报告通常分为三部分。

第一部分:预习报告

预习报告是正式报告的前面部分,要求在实验前写好。内容包括:

(1)实验名称。

(2)实验目的。

(3)实验原理摘要:在理解的基础上,用简短的文字扼要阐述实验原理,切勿照抄。画出原理图、电路图或光路图。写出实验所用的主要公式,说明各物理量的意义和单位以及公式的适用条件等。

(4)主要仪器设备(型号、规格等)。

(5)实验内容及注意事项,重点写出“做什么,怎么做”。

(6)记录数据表格。

第二部分:实验记录

实验记录是在实验课上完成的。内容包括:

(1)仪器:记录实验所用主要仪器的标号和规格。记录仪器编号是一个好的工作习惯,这样便于以后在必要时对实验进行复查。

(2)内容和实验现象记录。

(3)数据:数据记录应做到整洁清晰而有条理,尽量采用列表法。要根据数据特点设计表格,力求简单明了,达到省工少时的目的。在表格栏内要注明单位,要实事求是地记录客观现象和实验数据,切勿将数据记录在草稿纸上,而应记录在已准备的实验记录本上,不能只记录结果而略去原始数据,更不可为了拼凑数据而将实验数据做随心所欲的修改。

实验记录是进行实验的一项基本功,必须养成良好的习惯。

第三部分:数据处理与计算

数据处理与计算是在实验后进行的,内容包括:

(1)作图:结果计算和不确定度估算。

(2)结果:按标准形式写出实验结果(测量值、不确定度和单位),在必要时注明实验条件。

(3)作业题:完成教师指定的思考题。

(4)对实验中出现的说明和讨论,归纳出实验心得或提出建议等。

四、遵守实验室规则

(1)实验前应认真预习,按时上课。

(2)进入实验室,必须衣着整洁,保持安静,严禁闲谈喧哗、吸烟、随地吐痰。不得随意动用与本次实验无关的仪器设备。

(3)遵守实验室规则,服从教师指导,按规定和步骤进行实验。认真观察和分析实验现象,如实记录实验数据,不得抄袭他人的实验结果。

(4)注意安全,严格遵守操作规程。爱护仪器设备,节约用水、电、药品、试剂、元器件等。凡违反操作规程或不听教师指导而造成仪器设备损坏等事故者,必须写书面检查,并按学校有关规定赔偿损失。

(5)在实验过程中若仪器发生故障,应立即报告指导教师及时处理。

(6)实验完毕,应主动协助指导教师整理好实验用品,切断水、电、气源,清扫好实验场地。

(7)按指导教师要求,及时认真完成实验报告。凡实验报告不合格者,均须重做。有 1/3 实验报告未交或两个实验未做者,不得参加本门课程的考试。

实验误差及数据处理

第 1 节 测量与误差

一、测量物理学是建立在实验基础上的科学

物理实验包括：定性观察物理现象和定量测量物理量的大小，进而研究建立物理规律。

所谓测量，就是将待测量与定作单位的同类物理量进行比较，以确定待测量是单位量的多少倍。大多数的测量结果不但有数值，而且还有单位。比如一支铜棒的长度是被选长度单位“米”的 0.6054，则记棒长为 0.6054 米。

1. 直接测量和间接测量(按测量方法分)

凡是用计量仪器直接对待测量进行测量，便可获得结果，则该测量方法称为直接测量。如用米尺测量长度，用天平称衡质量，用伏特表测电压，用欧姆表测电阻，用勒克斯计测照度等。

凡是不能直接用计量仪器将待测量的大小测出来，而需要依据某几个直接测量值的函数关系求出待测量，则该测量方法称为间接测量。如从测量物体的长度计算面积或体积，从测量电流、电压计算电阻或电功率等。

一个物理量能否直接测量不是绝对的。随着科学技术的发展和测量仪器的改进，很多原来只能间接测量的量，现在已可以直接测量了。比如电能的测量，本来只能通过间接测量，现在已可以用电度表直接测量了。

物理量的测量大部分是间接测量，但直接测量是一切测量的基础。

2. 等精度测量与不等精度测量(按测量条件分)

任何物理量的测量都必须由某一观察者使用一定的仪器,通过一定的方法,在一定的环境下完成。某一物理量 A ,由同一观察者、用同一实验仪器、在同样环境下、以同一种方法重复测量 n 次,它们的测量值分别为: $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ 。我们没有理由认为,所得的某一值比其他值更准确或更不准确。因此,测量条件完全相同(同一观察者、同一仪器、同一方法、同一环境)的重复测量,称为等精度测量。

对同一物理量进行测量条件不同(如观察者不同、或仪器不同、或方法不同、或环境不同)的测量,则各次测量所得值的准确度是不同的,因而称测量条件不同的多次测量为不等精度测量。比如,用游标卡尺和螺旋测微计测量同一玻璃的厚度,因为两仪器的精度不同,故所测结果为不等精度测量。

注意,重复测量必须是重复进行测量的整个过程,而不是仅为重复读数,比如用米尺重复测量铜棒长度 5 次,每次测量都必须包括重新对准铜棒的一端点在某条刻度线上,然后读另一端点位置的读数,而不是米尺与铜棒相对不动,重复读后一个端点位置读数 5 次。

3. 测量仪器

仪器是进行测量的必要工具。熟悉仪器性能、掌握仪器的使用方法以及能够正确进行读数,是每个测量者必备的能力。

(1)仪器精密性:是指仪器的最小分度相当的物理量。仪器最小分度越小,所测物理量的位数越多,仪器的精密性越高。如具有毫米分度的米尺,其精密性为 1 毫米;最小步进为 0.1 欧姆的旋转式电阻箱,其精密性为 0.1 欧姆。

(2)仪器准确度:是指仪器测量读数的可靠程度。它一般标在仪器上或写在说明书上。如电表所表示的级别就是该仪器的准确度。对于没有标明准确度的仪器,可粗略地取最小刻度的一半,因为在制造仪器时,最小刻度是受仪器准确度约束的。

(3)量程:是指仪器所能测量的物理量最大值和最小值之差,即仪器的测量范围(有时也将所能测量的最大值称为量程)。测量过程中,超过仪器量程使用是不允许的,轻则仪器准确度降低,使用寿命缩短;重则损坏仪器。

关于测量读数最小一位的取值,一般来说,应在仪器最小分度内估读一位数字,到底要估读到十分之一、五分之一或二分之一最小分度,则应根据仪器最小分度的间距、刻度线以及指针的粗细、照明条件和个人的分辨能力而定,没有硬性规定。

(4)个人误差:这是由观察者的主观原因引起的,如缺乏实验经验或生理缺陷造成的误差。比如按停表,有人常使之过早或过晚;估计电表读数末尾时,习惯性偏大或偏小等。

二、测量误差

每个物理量都是客观存在的,在一定条件下它们都具有固定的大小,这个客观存在的确定数值便称为该物理量的真值。人们进行测量时均希望能得出被测量在测量条件下的真值,然而这是不可能的。因为测量是根据一定的理论、使用一定的仪器、在一定的环境中通过观察者完成的,而测量条件总和理论有差距,仪器总和国际规定标准有偏差,环境总不能完全稳定,人的观察能力总是有限的,所以一切测量值总是偏离真值的。测量值(A)与真值(A_0)之差称为

误差(ϵ),即

$$\epsilon = A - A_0$$

从上述分析可知,误差存在于一切测量之中,而且贯穿测量的全过程。换句话说,误差是不可避免的,没有误差的测量是不存在的。因此,测量的任务是:

- (1)设法使误差减小到最小;
 - (2)求出在测量条件下被测量的最近真值(最佳值);
 - (3)估计最近真值接近真值的程度。
- 为此,应当研究误差的来源、性质,以便采取适当措施,尽可能使之减少。

1. 系统误差

等精度条件下,对同一物理量进行多次测量,其测量误差的符号与数值均保持不变,或按一定的规律变化,这样的误差称为系统误差。

(1) 系统误差的来源

1)理论(方法)误差:这是由于理论或方法不完善而引入的误差。如高灵敏度的分析天平称衡低密度物的质量时没有考虑空气浮力的影响;单摆实验中摆球不是质点;伏安法测电阻时电流表“内接”和“外接”,电表内阻的影响。

2)仪器误差;这是由于仪器本身缺陷或装置调节不善而产生的误差。如等臂天平实际上两臂不等;天平未调整水平;砝码质量不准,螺旋测微计螺距不均匀;分光计转轴偏心等。

3)环境误差:这是外界环境(如光照、温度、湿度、电磁场等)的影响而引起的误差。如温度的逐渐升高。

(2) 限制系统误差的主要方法

系统误差的限制和消除一般没有固定不变的方法,要具体问题具体分析。产生系统误差的原因一般不止一个,应找出主要的影响因素,有针对性地消除或减少。以下介绍几种常用的方法。

1)检定修正法:将仪器、量具送计量部门检验取得修正值,修正值=正确值-测量值,即正确值=测量值+修正值。

2)替代法:测量装置测定待测量后,在测量情况不变的条件下,用一已知标准量替换被测量。如为了消除天平不等臂($l_1 \neq l_2$)对待测量的影响,可先用一平衡物 T 与被测物 X 平衡,则有 $m_x = \frac{l_2 \cdot m_T}{l_1}$,然后取下待测物体 X,以砝码 P 使其重新平衡,又有 $m_P = \frac{l_2 m_T}{l_1}$,则 m_P 为待测物体质量,它不再受天平不等臂的影响。

3)交换法:将测量中某些测量条件交换,使产生系统误差的原因对测量结果起相反的影响。仍以不等臂天平为例。第一次待测物体 X 放在左盘中,右盘放砝码 P_1 ,使之平衡,则有: $m_x = \frac{l_2 m_{P_1}}{l_1}$ 。然后取下待测物体进行第二次测量。物体和砝码左右盘交换,这时砝码 P_2 使天平重新平衡,则 $m_x = \frac{l_2 m_{P_2}}{l_1}$ 。将两次称衡结果相乘后开方,则有 $m_x = \sqrt{m_{P_1} m_{P_2}}$,由此得到的质量便消除了天平不等臂的系统误差。

4)异号法:实验时,在两次测量时出现符号相反的误差,取平均值后误差消除。例如在外界磁场作用下,仪表读数会产生附加误差,两次测量结果平均,正负误差可以抵消。

5)等时距对称测量法:对于随时间做线性变化的系统误差,可应用等时间间隔对称观测法有效地消除。例如用电位差计测量电阻,通常是电位差计的工作电流校准后,用电位差计分别测量标准电阻 R_n 和 R_x 上的电压降,这时有 $U_n = IR_n$ 及 $U_x = IR_x$,可得: $R_x = \frac{U_x}{U_n} R_n$ 。然而电位差计的工作电流不稳定,基本上随时间按线性规律下降,故所得的电阻值有系统误差。可用等时距对称测量法分三步进行测量:第一步在 $t = t_1$ 时刻,测量标准电阻上的电压降 $U_{n1} = I_1 \cdot R_n$;第二步在 $t = t_1 + \Delta t$ 时刻,测得待测电阻上的电压降 $U_x = I_2 R_x$;第三步在 $t = t_1 + 2\Delta t$ 时刻,再测量标准电阻上的电压降 $U_{n2} = I_3 R_n$ 。由于 $\frac{1}{2}(U_{n1} + U_{n2}) = \frac{1}{2}(I_1 + I_3)R_n = I_2 R_n$,所以 $R_x = \frac{U_x}{I_2} = \frac{2U_x}{U_{n1} + U_{n2}} R_n$,这样求出的 R_x 便消除了因电流直线变化而产生的系统误差。

2. 偶然误差

偶然误差是指实验中已经理想地消除了系统误差,但在同样的条件下,由于同一观察者,应用同一仪器,以同样的方法(等精度!)重复多次测量同一物理量,测量值也稍有差异,某一次测量的误差已不可期待的方式变化,有大有小,有正有负,这种误差称为偶然误差,也叫做随机误差。

(1)偶然误差的来源:偶然误差是由某些偶然的或不确定的因素引起的,具体原因很多,大体可以有以下几种:

1)仪器精密度和观察者感官灵敏度有限。如仪器的视值估读位偏大或偏小;仪器调节平衡时,平衡点确定不准等。

2)测量环境扰动以及其他不能预测和控制的因素,如杂散电磁场的干扰、电源电压波动引起测量的变化。

(2)偶然误差特性:从某一次测量看,偶然误差使测量结果偏大或偏小不定,但若测量次数足够多时,其影响就呈现统计规律,服从正态分布(高斯分布)。若以横坐标表示偶然误差,纵坐标表示误差出现的几率密度函数,正态分布规律如图 1-1-1 所示。该图表明正态分布具有以下特点:

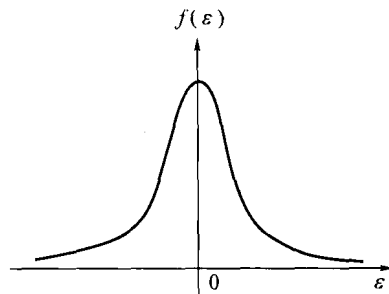


图 1-1-1 偶然误差正态分布图

1)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;

2)有界性:绝对值很大的误差出现的几率是零,即误差有一定的实际限度;

3)对称性:绝对值相等的正负误差,出现的概率相等;

4)抵偿性:误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零。

偶然误差的上述特点告诉我们:

1)增加测量次数可以减小偶然误差;

2)重复测量的算术平均值可以作为测量结果的最佳近似值(仍然不是真值)。

三、测量的精密度、准确度和精确度

测量的精密度、准确度和精确度都是评价测量结果的术语,目前使用时的含义各个学校并不完全相同,下面介绍的是现在较为普遍采用的表述。

测量的精密度表示在同样测量条件下,对同一物理量进行多次测量,所得结果彼此间相互接近的程度以及测量结果的重复性、测量数据的离散程度。测量精密度是测量偶然误差的反映,测量精密度越高,偶然误差越小;但系统误差的大小不明。

测量的准确度表示测量结果与真值接近的程度,因而它是系统误差的反映。测量准确度高,测量数据的算术平均值偏离真值越少,测量的系统误差越小;但数据的分散情况、偶然误差的大小不确定。

测量的精确度则是对测量的偶然误差和系统误差的综合评定。精确度高,测量数据较集中,测量值在真值附近,测量的偶然误差和系统误差都很小。

为了更好地理解以上术语,现已打靶为例进行说明,如图 1-1-2 所示。

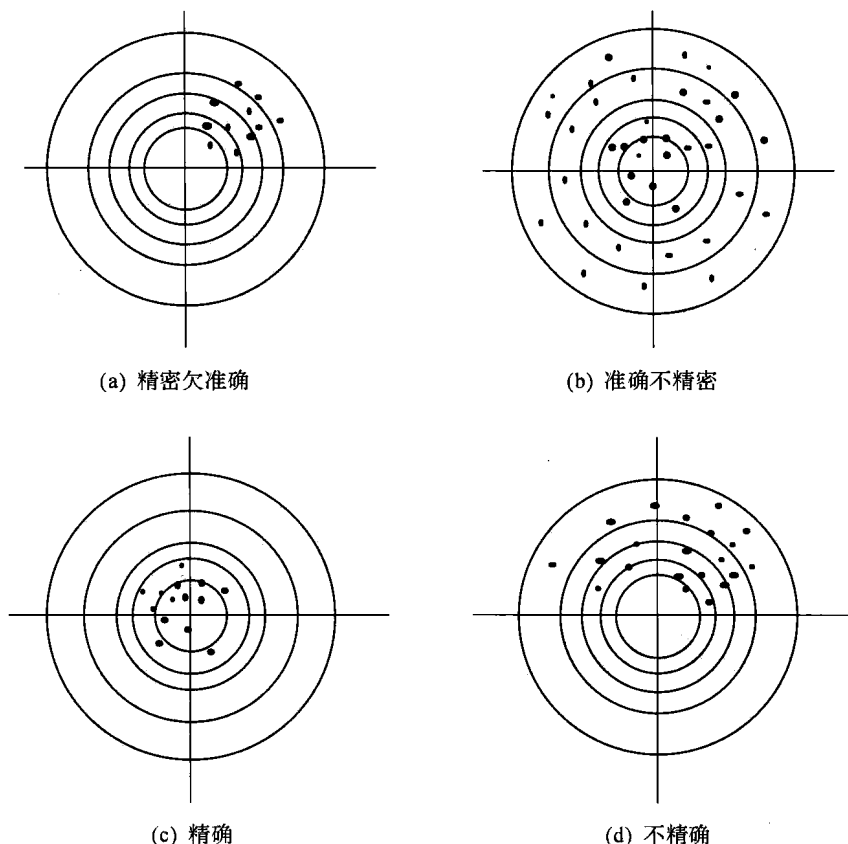


图 1-1-2 打靶结果分析

如图 1-1-2(a)所示的子弹着点比较集中,但都向一侧偏离靶心,反映了偶然误差小而系统误差大,为测量的精密度较差;如图 1-1-2(b)所示的子弹着点比较分散,但平均值较接近靶心,反映了偶然误差较大而系统误差较小,为测量的准确度不高;如图 1-1-2(c)所示的子弹着点比较集中在靶心,反映了偶然误差和系统误差都小,测量结果既准确又精密,即测量的精确度高;如图 1-1-2(d)所示的子弹着点既分散又偏离靶心,偶然误差和系统误差都大,测量结果既不精密又不准确,即测量的精确度较低。

任何测量总希望结果有较高的精确度,而测量的精确度是由仪器精密度、测量方式是否正确、测量技术好坏等许多因素决定的。应当指出,同一物理量可以用各种不同精密度的仪器来测量,不应片面强调选用精密度高的仪器。所用仪器精密度高虽然有利于提高测量结果的精

确度,但仪器的价格也较高,测量方法一般也较为复杂。正确的做法是根据测量所要求的精确度选择仪器,只要精密度合乎要求就可以了,用精密度过高或过低的仪器都不是合适的。

第2节 直接测量结果及其偶然误差的估计

一、以算术平均值代表测量结果

以下我们假定系统误差已经被消除,仅讨论偶然误差。在等精度条件下,对物理量 A 重复测量 n 次,得到一组测量列 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ 。根据偶然误差分布规律,当测量次数 n 无限多时,正负误差相抵消,其算术平均值就极其趋近待测物理量的真值。因而在无系统误差的情况下,等精度测量无限多次时,其一系列测得值的算术平均值即为待测物理量的真值,即

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad \text{当 } n \rightarrow \infty \text{ 时, } \bar{A} = A_0$$

然而,实际测量的次数不可能有无限多,在有限次的测量中,所得测量列的算术平均值不等于真值,但各测量值的误差在平均的过程中总会相互抵消一部分,所以用测量列的算术平均值表示被测量的大小仍比测量列中任何一个测量值都可靠,所以称算术平均值为被测量的“最佳近似值”或“最近真值”、“最佳估计值”。

某物理量 A 经过 n 次测量后,最佳近似值为

$$\bar{A} = \frac{1}{n} (A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad (1-2-1)$$

二、多次测量偶然误差的估计

对物理量进行 n 次测量之后,各测量值的误差是多少,算术平均值的误差是多大,我们无法知道,因为该物理量的真值大小我们不知道。但若不了解这些误差的大小,就不知道它们的可靠程度,利用这些测量值时的把握就不大,从而降低了它们的实际意义。所以,从测量的实用价值看,必须对它们的误差有所估计,下面介绍两种常用的误差评价方法。

1. 平均绝对误差(绝对误差、平均误差)

(1) 测量列的平均绝对误差

某物理量 A 重复测量 n 次,得到一组测量列 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ 。其算术平均值为

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i$$

因为 \bar{A} 不是真值 A_0 ,故 $A_i - \bar{A}$ 不是误差,所以不表示成 $A_i - \bar{A} = \epsilon_i$,而是以 $A_i - \bar{A} = v_i$ 表示,称 v_i 为偏差或残差。

显然对于 A_i 测量列,可得一组偏差数列 $v_1 = A_1 - \bar{A}, v_2 = A_2 - \bar{A}, v_3 = A_3 - \bar{A}, \dots, v_n = A_n - \bar{A}$,则测量列的平均绝对误差 ΔA 可用各测量值偏差的绝对值的算术平均值表示,即

$$\Delta A = \frac{1}{n} (|v_1| + |v_2| + |v_3| + \cdots + |v_n|) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |v_i| \quad (1-2-2)$$

根据误差理论,式(1-2-2)求得的值的含义为:重复测量次数 n 足够大时,测量列 A_i 中任一测量值的偏差 v_i 落在 $-\Delta A$ 到 $+\Delta A$ 区间的可能性有 57.5%。换句话说,若在等精度条件下再测量一次,该测量值有 57.5% 的可能性处于 $\bar{A} - \Delta A$ 到 $\bar{A} + \Delta A$ 区间中。

(2) 平均值的平均绝对误差

前面已经指出,算术平均值的可靠性要高于测量列中的任何一个测量值 A_i ,因而平均值的误差也一定比测量值的误差小。根据高斯误差理论,平均值的平均绝对误差 $\Delta \bar{A}$ 与测量列的平均绝对误差 ΔA 之间的关系为

$$\Delta \bar{A} = \frac{\Delta A}{\sqrt{n}} \quad (1-2-3)$$

式(1-2-3)的含义是:待测量的真值 A_0 虽然不知道,但它有 57.5% 的可能性是在 $\bar{A} - \Delta \bar{A}$ 到 $\bar{A} + \Delta \bar{A}$ 的区间内。应当注意,概率虽然同为 57.5%,但 $\Delta \bar{A} = \frac{\Delta A}{\sqrt{n}} < \Delta A$,数值区间小了,表明平均值的可靠性增大了。

通常将测量结果写成下列形式:

$$A = \bar{A} \pm \Delta \bar{A} \quad (1-2-4)$$

对于式(1-2-4),必须以上述的物理意义来解释它。在普通物理实验教学中,也用 ΔA 值来评价测量结果(算术平均值)。应当指出的是,这里由于 $\Delta A = \sqrt{n} \Delta \bar{A} > \Delta \bar{A}$,则真值落在 $\bar{A} - \Delta A$ 到 $\bar{A} + \Delta A$ 区间的概率就大于 57.5% 了。这样理解后,将 ΔA 看做是 \bar{A} 的最大误差也是可以的。

2. 标准误差(均方根误差)

(1) 标准误差的引入

应用测量到的平均绝对误差 ΔA 来评估偶然误差,最大的优点是计算方便,且一定程度上反映了测量结果的可靠程度;不能令人满意之处在于,它不能够明显地反映各离散值的离散程度,不能很好地体现测量精密度。下面将以两组测量列平均绝对误差的数字为例加以说明。

$$\text{第一组: } \Delta A_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^5 |v_i| = \frac{1}{5} (3 + 1 + 8 + 2 + 1) = 3$$

$$\text{第二组: } \Delta A_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^5 |v_i| = \frac{1}{5} (4 + 1 + 3 + 2 + 5) = 3$$

$\Delta A_1 = \Delta A_2 = 3$,似乎这两组测量数据一样好,然而第一组的偏差最大值是“8”,第二组数据的最大偏差是“5”,显然第二组测量的重复性好,测量的精密度高。

为此,引入了一个新的评价偶然误差的量:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2} \quad (1-2-5)$$

式(1-2-5)称为均方根误差,通常称为标准误差。我们以此重新计算上面两组数据的偶然误差,则第一组 $\sigma_1 = 3.98$,第二组 $\sigma_2 = 3.32$, $\sigma_2 < \sigma_1$,较好地体现了第二组测量的精密度较高这一客观事实。