

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

主编 王宏波 张利巍 罗 伟

高等教育出版社

014057827

04-33
650

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主编 王宏波 张利巍 罗 伟



高等教育出版社·北京



北航

C1742500

014027855

内容简介

本书是根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)和《基础课实验教学示范中心建设标准》,结合当前物理实验教学改革的实际和最新要求编写而成的。全书主要内容分为3章,即测量误差与数据处理、基本仪器的使用与常见物理量的测量、实验项目。书中列出了26个实验项目,内容覆盖力学、热学、声学、光学、电磁学和近代物理等分支学科领域,实验性质包含基础性实验、综合性实验、设计性实验、研究性实验四个部分。

本书可以作为高等学校理工科各专业不同层次的物理实验教材或教学参考书,也可供其他相关教学、研究和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/王宏波,张利巍,罗伟主编. -- 北京:高等教育出版社,2014.8

ISBN 978-7-04-040013-7

I. ①大… II. ①王… ②张… ③罗… III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第136141号

策划编辑 缪可可
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 缪可可
责任校对 刘娟娟

封面设计 于文燕
责任印制 尤 静

版式设计 杜微言

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 化学工业出版社印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 15
字 数 310千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2014年8月第1版
印 次 2014年8月第1次印刷
定 价 26.80元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 40013-00

○ 前 言

物理学是自然科学的基础,每次重大物理学发现都会促进其他学科的发展,带动技术水平的提高,改变人类对自然的规律的理解和认识。物理实验是物理学的基础,是理论与现实相互碰撞和检验的场地,所有的物理学理论都要由实验来验证,没有实验支持的物理学理论都是“空中楼阁”。

大学物理实验课是学生进入大学后接触到的第一门系统性的实验课程,通过大学物理实验能够加深学生对于理论的理解,能够培养其分析问题和解决问题的能力、科学的态度、创新和探索的精神,是创新型人才培养中不可缺少的重要环节。

本书是在我校使用多年的《大学物理实验》的基础上,根据国内大学物理实验教学改革的最新发展趋势和成果,以及国家基础实验教学示范中心的要求,结合我校物理实验室的具体情况,总结几十年的教学和科研经验而重新编写的。本书由理论和基本实验方法、基础性实验、综合性实验、设计性实验和研究性实验五个部分组成的。在前两章中详细地阐述了误差理论、数据处理方法及基本的物理实验方法,对基本仪器的使用也进行了较详细的阐述,使学生能了解基本的科学研究方法,为学习后续实验内容打下坚实的理论基础。在基础性实验部分主要选择了一些力学、热学、光学和电学等方面的基本实验,内容上以基本物理知识、基本操作技能和基本实验方法的训练为主,加深学生对基本物理规律的认识。综合性实验部分则针对学生综合运用基本知识的能力进行训练,同时着重培养学生综合分析问题和解决问题的能力。设计性实验部分则简化了实验内容的讲解部分,给学生充分的空间去设计完成实验,从而能够很好地培养学生的独立思考能力。研究性实验部分选择了一些科学和工程技术应用中的实际问题,充分激发学生主动学习的兴趣,培养学生的自主创新能力。教材在编写过程中充分地考虑了开放式教学的要求,各个教学单元之间相互联系但又具有独立性,学生能够以兴趣为基础进行选择性的阅读与学习。

物理实验教学是一项综合性、集体性很强的工作,从实验仪器的准备、实验方法的确定和实验内容的撰写都需要所有任课教师和实验技术人员的共同努力和互相配合,本教材的编写出版,是集体智慧和劳动的结晶。在本书的编写过程中,曹文和王明吉老师对内容进行了全面、细致地指导,霍雷老师提出了许多宝贵的意见和建议,在此我们一并表示感谢。

限于编者的水平,书中难免还存在着许多错误和不当之处,殷切期望广大读者批评指正。

编 者

2014年2月



北航

C1742500

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

短信防伪说明

本图书采用出版物短信防伪系统，用户购书后刮开封底防伪密码涂层，将16位防伪密码发送短信至106695881280，免费查询所购图书真伪。

反盗版短信举报

编辑短信“JB,图书名称,出版社,购买地点”发送至10669588128

短信防伪客服电话

(010)58582300

目 录

0 绪论	001
0.1 大学物理实验课的目的	002
0.2 物理实验课的主要环节	002
0.3 实验守则	003
0.4 实验安全	004
1 测量误差与数据处理	005
1.1 测量误差的基本知识	006
1.2 测量不确定度及其评定	012
1.3 有效数字及数据处理 实例	017
1.4 实验数据处理的基本 方法	025
1.5 思考题	031
2 基本仪器的使用与常见物理量 的测量	033
2.1 长度的测量	034
2.2 天平与质量的测量	042
2.3 时间的测量	047
2.4 温度的测量	049
2.5 电磁学实验仪器的使用及 常见电学量的测量	051
2.6 光学仪器的使用和维护 规则	063
2.7 基本实验方法	067
2.8 基本物理量测量实验	071
2.9 思考题	073
3 实验项目	075
基础性实验	076
实验 1 随机误差的统计规律	076
实验 2 用三线摆测物体 的转动惯量	080
实验 3 金属丝弹性模量的 测量	085

实验 4 液体黏度的测定	089
实验 5 示波器的原理和使用	093
实验 6 线性及非线性元件伏安 特性的测定	109
实验 7 用惠斯通电桥 测电阻	114
实验 8 电池电动势及内阻的 测量	119
实验 9 低电阻及导体电阻率 的测量	124
实验 10 薄透镜焦距的测定	129
实验 11 光的干涉——牛顿环、 劈尖	134
实验 12 光栅衍射	141
综合性实验	149
实验 13 电热法测热功当量	149
实验 14 超声波声速的 测量	154
实验 15 铁磁材料动态磁滞 回线和基本磁化 曲线的测量	162
实验 16 光电效应和光伏 效应	170
实验 17 激光全息照相	178
实验 18 迈克耳孙干涉仪	183
设计性实验	190
实验 19 多量程电表的设计 与校准	190
实验 20 显微镜的设计组装 及放大倍率测量	194
实验 21 望远镜的设计组装 及放大倍率测量	199
实验 22 数字温度计的设计 组装与标定	205

研究性实验	215
实验 23 摆的摆动规律研究及重力加速度的测量	216
实验 24 超声波应用测量技术研究	218

实验 25 透镜成像特性的观测与研究	222
实验 26 光电器件的光谱响应特性研究	225
4 常用物理量及其参数	229
5 参考文献	231

0

绪论

0.1 大学物理实验课的目的

0.2 物理实验课的主要环节

0.3 实验守则

0.4 实验安全

大学物理实验课程目标 1.0

大学物理实验课程主要任务 2.0

科学实验是科学理论的源泉,是工程技术的基础.作为培养德、智、体、美全面发展的高级工程技术人才的工科高等学校,不仅需要学生具备比较深厚的理论知识,还需要学生具有较强的从事科学实验的能力,这样才能适应科学技术不断进步和国家现代化建设的需要.

物理实验是科学实验的重要组成部分,物理实验在科学技术的发展中有着独特的作用.历史上每次重大的技术革命都起源于物理学的发展,而物理学本质上是一门实验科学.许多物理规律的发现及其理论体系的建立,必须以严格的物理实验为基础,并接受实验的检验.物理实验除了在物理学自身发展中起着重要作用以外,在推动自然科学的其他学科和工程技术的发展中也起着很重要的作用.特别在近代,各学科相互渗透,交叉学科飞速发展,物理实验的原理及构思、物理实验的方法已经更广泛地为其他学科所采用.

大学物理实验是对理工科大学的学生进行科学实验基本训练的一门独立的必要的基础课程,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.各类科学实验所涉及的误差理论、不确定度以及有效数字等基本概念,基本实验方法和基本实验仪器都要在大学物理实验中加以讨论.因此,大学物理实验也是理工科学生从事其他科学实验的基础.

0.1 大学物理实验课的目的

(1) 通过对物理实验现象的观测和分析,学习运用理论指导实验、分析和解决实验中问题的方法,加深对理论的理解.

(2) 培养学生具有初步从事科学实验的能力,包括阅读教材,查阅资料,概括实验原理和实验方法的能力;正确操作基本仪器,测量基本物理量,运用基本方法的能力;正确记录数据,处理数据和绘制曲线的能力;正确分析实验结果和撰写实验报告的能力;设计完成简单实验的能力;系统地完成研究性实验的创新能力.简言之,要培养学生思维、动手、分析、判断等从事科学工作的初步能力.

(3) 通过实验,培养学生理论联系实践的能力,使其善于运用理论指导实验,同时善于从大量的实验现象和数据中总结规律,上升到理论.这正是人们在科学研究中所遵循的道路.

(4) 培养学生实事求是、严谨踏实的工作作风;培养学生勇于探索与思考的科学精神;培养学生团结协作和爱护公物的优良品德.

0.2 物理实验课的主要环节

为达到以上四个目的,学生必须重视以下三个环节.

(1) 做好实验预习

课前必须认真阅读相关教材和资料.对实验原理和实验基本方法,特别是对实验的关键环节,能用简练的话语概括.写出包括记录表格的预习报告.预习报告中

最重要的是拟定主要实验步骤和指出实验关键,不可照抄教材.在预习中对本次实验的关键步骤做到心中有数,不可应付了事.

(2) 实验操作

学生进入实验室,首先观察实验仪器,有条不紊地布置好自己要用的仪器,先粗后细地调节好自己所用的仪器.不清楚的地方,可以请教老师.做科学实验,不管在什么地方,什么时间,都禁止“野蛮”(不科学)操作,科学和“野蛮”是水火不容的.实验失败或出现问题,要把它看成是学习的最好机会,此时不必马上问老师或同学,应该独立思考和判断,独立解决问题,这样会得到提高.在科学实验中,谁“碰的钉子”越多,谁“拔的钉子”越多,谁的收获就越多.

我们强调观察是基础,测量是其次.如果观察现象不正确,测量便失去了意义.作为学生,不要认为测了几个数据,就算大功告成,心满意足.如果是这样,那就是科学上的无知.“几个数据”给你带来了许多信息,你要去思考、分析、判断,才能真正地有所提高.自古以来,人们都看过苹果熟了会落到地上,而自动向天上飞却从来没见过,牛顿却对这一人们司空见惯的现象进行了认真地研究和思考,发现了万有引力定律.

刚开始学习,就要使自己的思维和行为科学化.科学的思维和行为,并不是一两天可以形成的,要经历较长时间才能培养出来.

实验结束后,将原始记录交给任课教师签字生效.所用的仪器、电源、桌凳等都要整理好,方可离开实验室.

(3) 撰写一份简洁、清楚、工整和富有见解的实验报告

① 班级、组号、姓名、所用仪器编号与实验名称写清楚(有时还应将实验时温度和大气压强等写在报告上).

② 实验原理要写得简单明了(不得超过300字),不要照抄教材.

③ 认真计算和处理数据记录这是报告的核心.

④ 回答思考题.

⑤ 小结.对实验中感到最深刻、最有收获的地方,可以作一小结(小结不要超过200字).

0.3 实验守则

(1) 学生必须按照自己所在组的序号对照仪器的编号入座;将预习报告放在桌上,等待教师检查.

(2) 严格遵守实验室相关规定,未经许可,禁止擅自动用其他仪器.

(3) 不得大声喧哗、吵闹.

(4) 不得伪造数据,一旦发现,以零分计算.

(5) 如仪器、元件等出现故障,应及时报告任课教师.凡误操作,使器物损坏者,要照章赔偿.

(6) 实验完成后,将数据交教师签字.整理好所用物品,清擦自己所用过的桌

凳和仪器。值日生需清扫室内地面。

0.4 实验安全

(1) 实验中所有用电设备均使用 220 V 交流电,所以实验过程中应注意防止触电事故,例如不要用手指触摸电源插座孔,电源插头拔出前不要拆卸保险丝等。

(2) 激光束在扩束前,不可用眼睛直接观看,以免损伤视网膜。连接激光管的导线上有数千伏高压,应注意安全,不可触摸;由于此电压不易泄放,所以即使在关闭电源后,若不做放电处理切不可触摸导体部分以免被残余高压电击。

(3) 实验中如果需要搬动较重物体,如大砝码、光具座上的夹具底座等,要双手托稳,防止落地伤脚。

(4) 在光线较暗的实验室内操作时,例如暗室、双棱镜实验室等,要注意防止被锐器碰伤或触电,特别是双棱镜实验中要注意防止辅助棒刺伤眼睛。

(5) 玻璃制品在使用中要防止自己被破片划伤。

1

测量误差与数据处理

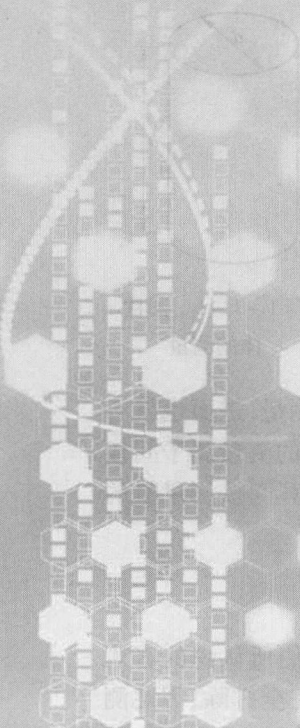
1.1 测量误差的基本知识

1.2 测量不确定度及其评定

1.3 有效数字及数据处理实例

1.4 实验数据处理的基本方法

1.5 思考题



本章主要介绍测量、测量误差、测量不确定度、有效数字的基本概念,在此基础上,介绍实验数据的修约、测量不确定度的评定及表示和实验数据处理方法. 教学内容遵循最新的国家标准和相关技术规范,具有较强的可操作性.

1.1 测量误差的基本知识

1.1.1 测量

测量是人们定量认识客观量值的唯一手段,是人类从事科学研究活动的基础,没有测量就没有科学.

所谓测量就是通过实验获得并可合理赋予某量一个或多个量值的过程(JJF 1001—2011《通用计量术语及定义技术规范》). 测量是在一定的控制条件下所实施的过程,其目的是获得被测量的量值(也可称为测量结果),对同一个物理量使用不同的测量仪器、通过不同的观测者或同一个观测者在不同的测量过程中所获得的量值可能会有一些差异.

被测量也可称为“测量量”、“待测物理量”,由测量所确定的被测量的量值不仅可以称为测量结果,还可称为测量值,被测量的实际(客观)量值被称为被测量的真值.

我们要测量一个如图 1-1-1 所示的圆柱的体积 V ,在数学上,已知 $V = \frac{1}{4}\pi d^2 h$,其中 d 为圆柱体的直径, h 为高. 利用长度测量工具例如游标卡尺、千分尺(也称螺旋测微器)测得 h 和 d 后,我们便可以算出 V . 在上述的体积测量过程中, d 和 h 是利用测量工具直接测得的,而体积 V 则是利用 d 、 h 和计算公式通过计算得到的,具体的操作方式虽然不同,但目的和性质却是相同的,都是测量.

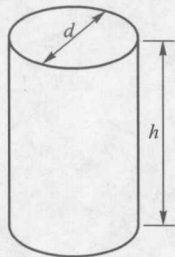


图 1-1-1 圆柱体的测量

通过上面这个例子我们还可以看到,虽然都是测量,但物理量 d 、 h 和 V 的获取方法和过程不同,所以通常根据待测物理量最终测量结果的获取过程把测量分为两大类,即直接测量和间接测量,进而也就有了直接测量量和间接测量量的概念. 不言而喻,在上例中,体积 V 的测量属于间接测量,则 V 这个量就是间接测量量,而 d 与 h 则是直接测量量. 计算间接测量量的公式可称为测量函数(或测量模型).

1.1.2 误差的概念

任何一个待测物理量的真值虽然都是客观存在的,但由于我们所认识的客观世界和测量过程存在不完善性,而且这种不完善性永远也不可能完全排除,因此测量值和真值之间必然存在差异,这种差异就是误差.

由于通过测量无法得到被测量真值,所以在误差计算中使用参考量值(参考量

值可以是量的真值,更多情况下是量的约定值,即约定量值,俗称公认值)来替代真值.如果用 Δy 表示被测量 Y 的测量误差,用 Y_0 表示被测量的参考量值,用 y 表示测量结果(测量值),则

$$\Delta y = y - Y_0$$

由于每次测量都存在误差,因而通过测量永远得不到真值.那么,什么样的测量值是最理想的或者是最接近真值的呢?如何来评价测量结果的可信程度呢?这就有必要对测量误差进行研究和讨论,用误差分析的思想方法来指导实验的全过程.

误差分析的指导作用主要包含两个方面:

① 为了从测量中正确认识客观规律,就必须分析误差产生的原因和性质,正确地处理所测得的实验数据,尽量减小误差,确定误差范围,以便能在一定条件下得到接近真值的最佳结果,并给出精度评价.

② 在设计一项实验时,根据对测量结果的精度要求,用误差分析指导我们合理地选择测量方法、测量仪器和实验条件,以便在最有利的条件下,获得恰到好处的预期结果.

1.1.3 误差的分类

误差的产生有多方面的原因,从误差的性质和来源上可分为系统误差和随机误差两大类.

1.1.3.1 系统误差

系统误差是系统测量误差的简称,基本定义为:在重复测量中保持不变或以可预见方式变化的误差分量,其参考量值是真值.

系统误差的特点是在同一条件下多次测量时,误差的绝对值与符号保持恒定,或在条件改变时,按某一确定的规律变化.比如某一块表,每天都比标准时间慢1 s,这就是系统误差.根据国家标准,一个标称值为50 g的 M_1 等级砝码的最大允许误差(最大允许误差的英文缩写是MPE: maximum permissible error)是0.003 g,当其实际值为49.998 g时,显然是符合 M_1 等级砝码标准的,用它进行称量时,将引入一个0.002 g的误差,这也是系统误差.

按系统误差的性质,不难推断系统误差产生的原因主要有三种:① 所用仪器、仪表、量具的不完善性,这是产生系统误差的主要原因;② 实验方法的不完善性或这种方法所依据的理论本身具有近似性;③ 实验者个人的不良习惯或偏向(如有的人习惯于侧坐、斜坐读数,使读得的数据偏大或偏小),以及动态测量的滞后或起落等.

由于系统误差在测量条件不变时有确定的大小和正负,因此在同一测量条件下多次测量求平均值并不能减小或消除系统误差.

一般情况下,系统误差在测量中都占较大比重.尽管完全消除系统误差是不可能的,但尽量减小系统误差却是应该的,也是可能的.为此在测量前和测量过程中,

都要时刻注意检查可能造成较大系统误差的原因,尽量加以消除或修正.比如,在条件许可的情况下,尽可能采用精确度比较高的测量工具或仪器;其次,实验方法及实验所依据的理论要更合理、更科学;养成良好的测试和操作习惯,从而使系统误差减小到最低程度.当不可忽略的系统误差无法避免时,应尽可能地找出其大小、正负或规律,并进行必要的修正.例如前述砝码所引入的误差,可通过更高级别的仪器对该砝码进行校验,引入一个校正量来减小这一系统误差.

1.1.3.2 随机误差

随机误差是随机测量误差的简称,基本定义为:在重复测量中按不可预见方式变化的误差分量,其参考量值是由无穷多次重复测量得到的平均值.

随机误差的基本特征是消除系统误差之后,在相同条件下多次测量同一量时,误差的大小及正负没有确定的规律,时大时小、时正时负,这类误差就是随机误差(又称偶然误差),其最大特点是具有随机性.

产生随机误差的原因大体有两种:①随机的和不确定因素的影响或环境条件的微小波动;②实验操作者的感官分辨本领有限.通常,任一次测量产生的随机误差或大或小,或正或负,毫无规律.但对同一量测量次数 n 足够多时,将会发现它们的分布服从某种规律.实践和理论都证明,大部分测量的随机误差服从统计规律,其误差分布(或测量值的分布)呈正态分布(又称高斯分布),如图 1-1-2 所示.横坐标表示测量误差 $\Delta_k = x_k - X_0$ (x_k 表示只含有随机误差的第 k 次测量值, X_0 为被测量的真值),纵坐标为与误差出现概率有关的概率密度分布函数 $f(\Delta_k)$,应用概率论的数学方法可以得到

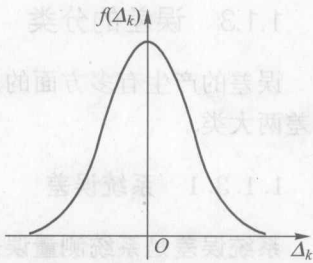


图 1-1-2 正态分布示意图

$$f(\Delta_k) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta_k^2}{2\sigma^2}} \tag{1-1-1}$$

式中,特征量 $\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta_k^2}{n}} (n \rightarrow \infty)$,称为测量值的标准误差.测量值的标准误差具有一个十分明确的意义:在一组测量次数 n 足够大的测量中,任何一次的测量值 x_k 落在 $(X_0 \pm \sigma)$ 区间内的概率(可能性)为 68.27%.

随机误差具有以下特征:

- ① 绝对值相等的正、负误差出现的概率大体相同(对称性);
- ② 绝对值较小的误差出现的概率大,绝对值较大的误差出现的概率小(单峰性);
- ③ 在一定测量条件下,误差的绝对值不会超过一定限度(有界性);
- ④ 当测量次数 n 趋于无穷大时,随机误差的代数和趋于零(抵偿性).

根据随机误差的特征,不难看出,增加测量次数可以减小随机误差.应该指出,由于观察者的粗心或抄写中的马虎所出现的错误数据称为坏值,不能参与运算,应

予以删除。

1.1.4 测量的最佳值——算术平均值

根据随机误差的统计特征,可以得到实验结果的**最佳估计值**(简称为**最佳值**或**近真值**). 由于测量可分为直接测量和间接测量,相应测量量的最佳估计值的计算方法亦不相同。

1.1.4.1 直接测量量的最佳值

设在相同条件下,对某一物理量 X 进行了 n 次测量,所得到的一系列测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n$ (称为观测列或测量列),其算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad (1-1-2)$$

由随机误差的统计特征可以证明,当测量次数 n 足够多时,其算术平均值 $\bar{x}$ 就是最接近真值的最佳值。

算术平均值与某一次测量值之差叫偏差 v_k (有时也被称为残差),即 $v_k = x_k - \bar{x}$. 显然,误差和偏差是两个不同的概念,但在实际应用中往往将偏差称为误差。

1.1.4.2 间接测量量的最佳值

间接测量量 Y 的最佳估计值 y 是通过直接测量量 $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$ 的测量值 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ 经过相应计算而得出的,其测量函数(或测量模型)通常可以表示为

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n) = f(X_i) \quad (1-1-3)$$

其最佳估计值 y 可有以下两种计算方法。

(1) 当 f 是 X_i 的非线性函数时,通常需要采用下式来计算:

$$y = \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f(x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{ik}, \dots, x_{nk}) \quad (1-1-4)$$

式中, y 是取 Y 的 n 次独立测得值 y_k 的算术平均值 $\bar{y}$, 每个 y_k 都是根据同时获得的 n 个输入量 X_i 的一组完整的测得值求得的. x_{ik} 是第 i 个被测量 X_i 的第 k 个观测值。

(2) 当 f 是 X_i 的线性函数时,既可以利用上式来计算,也可以利用下式来计算:

$$y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_i, \dots, \bar{x}_n) = f(\bar{x}_i) \quad (1-1-5)$$

式中, $\bar{x}_i$ 是决定被测量 Y (间接测量量) 大小的第 i 个输入量 (第 i 个直接测量量) X_i 的算术平均值 (最佳估计值)。

测量函数为非线性函数时,在下列两种条件下仍然可以利用式(1-1-5)来计算:① 各直接测量量 X_i (输入量) 相互独立,且为函数中的一次项;② 输出量 y 是不依赖于输入量而独立存在的量,同时输入量(直接测量量)只有 2 个(如 X_1 、

X_2), 虽然不能满足相互独立的条件, 但可以利用齐次线性方程来表达两个输入量的关系, 输出量 y 是方程中的系数. 例如, 在伏安法测电阻中 $R = V/I$, 可以写成 $V - RI = 0$.

通常情况下, 测量误差相对于量值可以看成是小量时, 式(1-1-4)和式(1-1-5)的计算结果相差很小, 所以在物理实验教学中, 为了简化计算全部采用式(1-1-5)来计算.

1.1.5 随机误差的估算

在实际测量中, 测量次数 n 总是有限的, 根据数理统计理论, 在满足“重复性测量条件”(即: 相同测量程序、相同操作者、相同测量系统、相同操作条件和相同地点, 并在短时间内对同一或相似被测对象重复测量的一组测量条件)下获取的多个测量值(俗称“等精度测量列”) $x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n$ 的实验标准差(简称标准差) $s(x_k)$ 可以由贝塞尔公式法和极差法等方法来估算.

(1) 实验标准差的估算

① 贝塞尔公式法

贝塞尔公式法适用测量次数 n 较大的场合. 贝塞尔公式法表述的标准差为

$$s(x_k) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n - 1}} \tag{1-1-6}$$

$s(x_k)$ 是任何一次的测量值 x_k 的标准差, 它表征对同一被测量做 n 个有限次测量时, 其结果的分散程度.

$s(x_k)$ 还可称为“样本标准差”, 它也具有十分明确的意义: 在一组次数 n 足够大的测量中, 任何一次的测量值 x_k 落在 $[\bar{x} - s(x_k), \bar{x} + s(x_k)]$ 区间内的概率为 68.27%; 如果测量中只含有随机误差, 当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, $s(x_k) \rightarrow \sigma$.

② 极差法

一般在测量次数较少时可采用极差法获得 $s(x_k)$. 对 X 进行 n 次独立测量的测得值 $(x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n)$ 中的最大值与最小值之差称为极差, 用符号 R 表示, 在 X 的测量值可以估计接近正态分布的前提下, 单次测得值 x_k 的实验标准差 $s(x_k)$ 可按下式近似地估算.

$$s(x_k) = \frac{R}{C} \tag{1-1-7}$$

式中的 C 是极差系数, 可由表 1-1-1 查得.

表 1-1-1 极差系数 C

n	2	3	4	5	6	7	8	9
C	1.13	1.64	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97