



普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理实验

Daxue Wuli Shiyan

董汇泽 李会山 张卫华 郑曙东 编



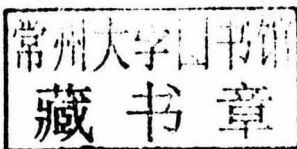
北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理实验

董汇泽 李会山 张卫华 郑曙东 编



北京邮电大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，并参照该基本要求的修订征求意见稿，结合青海大学多年来开设物理实验课的教学实践，特别是近年来的实验教学改革的课程建设的实践经验，以青海大学曾使用的《大学物理实验讲义》为基础编写而成的。主要内容包括：测量误差与数据处理、预备实验、基础实验、近代物理与综合性实验、设计性实验和附表，全书共选编了61个实验内容。

本书可作为高等学校各专业物理实验课的教材，也可作为涉及物理学的实验人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/董汇泽等编. -- 北京:北京邮电大学出版社,2019.1

ISBN 978-7-5635-5678-6

I. ①大… II. ①董… 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(2019)第 018074 号

书 名	大学物理实验
编 者	董汇泽 李会山 张卫华 郑曙东
责任编辑	马 飞
出版发行	北京邮电大学出版社
社 址	北京市海淀区西土城路 10 号(100876)
电话传真	010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
网 址	www.buptpress3.com
电子信箱	ctrd@buptpress.com
经 销	各地新华书店
印 刷	北京时捷印刷有限公司
开 本	787 mm×1 092 mm 1/16
印 张	20.5
字 数	520 千字
版 次	2019 年 1 月第 1 版 2019 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-5678-6

定价：48.00 元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

前 言

本书是根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，并参照该基本要求的修订征求意见稿，结合青海大学多年来开设物理实验课的教学实践，特别是近年来的实验教学改革和课程建设的实践经验，以青海大学曾使用的《大学物理实验讲义》为基础编写而成的。

物理实验是对大学生进行科学实验基本训练的一门必修基础课程，它在培养学生良好的科学态度，严谨的科学作风，严格的科学实验方法和实验技能等方面都起着重要的作用。西部开发是我国跨世纪发展的大思路、大战略，西部开发的实施主要依靠的是科技进步和高素质的创新人才。如何培养具有创新意识、创新精神和创新能力的应用型人才，大学物理实验教学担负着重要的任务。青海大学历来非常重视实践性教学环节，2001年“大学物理实验”课程被确定为校级首批重点建设课程，2003年又被确定为省级重点建设课程。为了提高物理实验课的教学水平和质量，学校重点投资，全面支持物理教学实验中心的建设。本教材就是在各种条件完备的基础上编写完成的。其主要内容包括：测量误差与数据处理、预备实验、基础实验、近代物理与综合性实验、设计性实验和附表，全书共选编了61个实验内容。

本教材的编写本着从易到难、由浅入深、循序渐进的认识规律和因材施教的原则，以实验内容的三个阶段为主线进行编排，尤其注重对学生的基本训练，并力求培养学生的实验能力。所选实验内容尽量做到相对独立和完整，既保留了传统的、经典的实验，又增设了展示现代科技水平的实验内容。编写时加强了教材的系统性和适用性，既考虑到本科和专科学生的需求，也兼顾了职业教育和成人教育的教学需要。部分实验内容反映了物理教研室教师近年来在实验教学课程改革与建设方面的研究成果，具有一定的特色。

本书的编写凝聚了青海大学物理教研室全体教师多年来在实验课教学和实验室建设方面的辛勤劳动和集体智慧。本书由董汇泽、李会山、张卫华、郑曙东编写完成。其中，李会山编写实验1、13(13.1、13.2、13.3)、17、25、28、30、36、38、44、48、49、50、51、52、53；张卫华编写实验2、4(4.1、4.2)、14、21、22、24、26、33、45、46、47；郑曙东编写实验6、11、15、20、23、27、34、39、40、59、60、61；董汇泽提出编写大纲，编写绪论、测量误差与数据处理、预备实验基础知识，实验3、5、7、8(8.1、8.2)、9(9.1、9.2、9.3)、10、12(12.1、12.2、12.3)、16、18、19、29、31、32、35、37、41、42、43、54、55、56、57、58和附表内容，并审定相应部分；全书由董汇泽统稿。

本书在编写过程中，参阅了清华大学、西安交通大学、西安建筑科技大学等院校的实验教材，借鉴了不少宝贵的教学实践经验，同时也得到了兄弟院校同行的大力支持，特别是清华大学物理系朱鹤年教授审阅初稿过程中提出了许多宝贵意见，在此谨致以衷心的感谢！

由于我们水平有限，错误和疏漏之处在所难免，只有在教学实践中不断研究探索，才能日臻完善，真诚欢迎各位读者提出宝贵意见。

编 者
2018年12月

目 录

绪论	1
第一章 测量误差与数据处理	4
第一节 测量与误差	4
第二节 不确定度	7
第三节 测量结果和不确定度的表示	9
第四节 有效数字及其运算	11
第五节 实验数据处理的基本方法	13
第二章 预备实验	19
预备实验基础知识	19
实验 1 物体密度的测定	32
实验 2 用毛细管法测定液体的表面张力系数	37
实验 3 用焦利氏秤测弹簧的劲度系数	39
实验 4 气轨上的实验	41
4.1 验证牛顿第二定律	45
4.2 验证动量守恒定律	49
实验 5 伏安法测电阻	53
第三章 基础实验	56
实验 6 线性电阻和非线性电阻的伏安特性	56
实验 7 用扭摆法测物体的转动惯量	58
实验 8 金属弹性模量的测定	64
8.1 用光杠杆法测金属丝的杨氏弹性模量	64
8.2 用百分表法测金属丝的杨氏弹性模量	66
实验 9 直流电桥测电阻	68
9.1 用惠斯通电桥测电阻的温度系数	68
9.2 用恒流源测电阻的温度系数	71
9.3 用双臂电桥测低电阻	72
实验 10 热温变化测量实验	75
实验 11 电表的改装与校正	78

实验 12	磁场测量	84
12.1	磁场分布测量	84
12.2	用冲击电流计测螺线管的磁场	89
12.3	用霍尔元件测螺线管磁场	93
实验 13	电位差计的应用	98
13.1	用十一线电位差计测量电源的电动势	99
13.2	用箱式电位差计测电源的电动势	100
13.3	用 UJ31 型电位差计校验毫安表	102
实验 14	温度传感器特性研究	104
实验 15	示波器的使用	110
实验 16	等厚干涉——牛顿环	119
实验 17	光栅的衍射	121
实验 18	弦振动的研究	127
实验 19	数字万用表的设计	129
实验 20	模拟法测绘静电场	134
实验 21	用数字积分式冲击电流计测量电容与高阻	137
实验 22	用旋光仪测旋光性溶液的浓度	141
实验 23	压力传感器特性研究	145
实验 24	固体线膨胀系数的测定	148
实验 25	空气密度与气体普适常量的测定	151
第四章	近代物理与综合性实验	157
实验 26	迈克耳孙干涉实验	157
实验 27	用油滴仪测电子电荷	162
实验 28	全息照相	166
实验 29	声速测量	170
实验 30	光纤传输实验研究	175
实验 31	弗兰克-赫兹实验	179
实验 32	动力学法测弹性模量	184
实验 33	塞曼效应	188
实验 34	电子束实验	193
实验 35	非线性电路混沌实验	200
实验 36	硅光电池特性实验研究	203
实验 37	磁阻效应实验研究	210
实验 38	太阳能电池基本特性的测定	214
实验 39	光速测量	219
39.1	相位法测光速	219
39.2	光拍法测量光速	228

实验 40	核磁共振	235
实验 41	光电传感器物理设计性实验	246
实验 42	基本型传感器物理设计性实验	254
42.1	金属箔式应变片性能——单臂电桥	259
42.2	金属箔式应变片单臂、半桥、全桥比较	261
42.3	移相器	262
42.4	相敏检波器	263
42.5	金属箔式应变片——交流全桥	265
42.6	交流全桥的应用——振幅测量	266
42.7	交流全桥的应用——电子秤	267
42.8	差动变压器(互感式)的性能	268
42.9	差动变压器(互感式)零点残余电压的补偿	269
42.10	差动变压器(互感式)的标定	270
42.11	差动变压器(互感式)的应用——振动测量	271
42.12	差动变压器(互感式)的应用——电子秤	272
42.13	差动螺管式(自感式)传感器的静态位移性能	273
42.14	差动螺管式(自感式)传感器的动态位移性能	274
42.15	霍尔式传感器的特性——直流激励	275
42.16	霍尔式传感器的应用——电子秤	276
42.17	霍尔式传感器的特性——交流激励	277
42.18	霍尔式传感器的应用——振幅测量	278
42.19	磁电式传感器的性能	279
42.20	压电传感器的动态响应实验	280
42.21	压电传感器的引线电容对电压放大器与电荷放大器的影响	281
42.22	差动变面积式电容传感的静态及动态特性	282
42.23	扩散硅压阻式压力传感器实验	283
42.24	气敏电阻(MQ ₃)实验	285
42.25	湿敏电阻(R _H)实验	286
42.26	热释电人体接近实验	287
实验 43	PN 结正向压降与温度关系实验研究	288
实验 44	光电管特性研究	293
第五章	设计性实验	297
实验 45	薄凸透镜焦距的测定	297
实验 46	组装显微镜	297
实验 47	组装望远镜	298
实验 48	组装透射式幻灯机	298
实验 49	杨氏双缝干涉	299

实验 50	菲涅耳双棱镜干涉	300
实验 51	菲涅耳双面反射镜干涉	301
实验 52	劳埃德镜干涉测光波波长	302
实验 53	夫琅禾费单缝衍射	303
实验 54	夫琅禾费圆孔衍射	304
实验 55	菲涅耳衍射实验的组装	304
实验 56	用劈尖测定毛发直径	305
实验 57	分压与限流电流特性研究	305
实验 58	用直流双臂电桥和电位差计测低电阻	306
实验 59	电阻温度计的设计与组装	306
实验 60	用落球法测液体的黏度	307
实验 61	用单摆测定当地的重力加速度	308
附表	309

一、物理实验课程的地位、作用和任务

科学实验是一切科学理论的源泉,是工程技术的基础。一切科学理论的提出,都是通过大量的观察、反复的试验,再运用抽象思维的方法总结出来的。而理论的正确性,又依赖于科学实验的验证。

物理学是一门以实验为基础的自然科学。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。对高等理工类院校的学生来说,物理实验教学和物理理论教学有同等重要的地位,它们既有深刻的内在联系和配合,又有各自的任务和作用。因此,在物理学学习中,正确处理好理论和实验课的关系是非常重要的。

大学物理实验是对高等院校学生进行科学实验基本训练的一门独立必修基础课程,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,是后续课程的重要基础。

本课程的具体任务如下。

(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,加深对物理学原理的理解。

(2) 培养和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 能够完成简单的设计性实验。
- ⑥ 能够灵活运用,有所创新。

(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、物理实验课的基本程序

1. 实验前的预习

学生进入实验室前必须进行预习,预习是完成实验的基础。预习时应仔细阅读实验教材,着重理解实验原理,明确实验的大体步骤。实验前要求写好预习报告,预习报告是作为评定课内成绩的一项内容,无预习报告者不准做本次实验。预习报告包括以下内容。

(1) 实验名称和实验目的；

(2) 实验原理。原理应写得简明扼要，如列出所依据的主要公式。电学或光学实验应画出实验线路图或光路图等；

(3) 数据记录表格。由学生自行设计或抄录教材中的表格，作记录数据之用。

2. 课堂实验

实验操作是课堂实验的中心环节。学生进入实验室后，应在教师的指导下，对照仪器再次阅读教材和仪器说明书，熟悉仪器使用方法，并进一步理解实验原理。做实验时，应根据实验步骤和要求，认真调试仪器，仔细观察和测量有关物理量，如实记录测量数据及测试时的条件，如气压、气温等。实验完毕后应将测量数据交给指导教师审阅，待教师签字后，收拾好仪器方可离开实验室。

3. 完成实验报告

实验报告是实验工作的全面总结，要用简明的形式将实验结果完整而又真实地表达出来。写报告时，要求文字通顺，字迹端正，图表规矩，结果正确，讨论认真。

实验报告通常包括以下几个部分。

(1) 实验名称；

(2) 实验目的；

(3) 简要原理或计算公式，电学和光学实验应画出相应的电路图或光路图；

(4) 仪器设备；

(5) 实验数据；

(6) 计算或作图；

(7) 误差分析；

(8) 实验结果；

(9) 讨论。

如果实验是观察讨论某一物理现象或验证某一物理定律，则只需简单扼要地写出实验结论。在最后的讨论中，包括回答实验的思考题，实验过程中观察到的异常现象及对其做出的解释，对实验仪器装置和实验方法的建议等，还可写实验的心得体会。

三、物理实验室规则

(1) 学生在规定的时间内进行实验，不得无故旷课和迟到。无故迟到超过 10 min 者，不得进入实验室。

(2) 进入实验室，应保持室内安静和整洁，不得大声喧哗。

(3) 对安排的实验要预习并写出预习报告，将预习报告交实验指导教师审阅。对于没有预习者，不得进入实验室做实验。

(4) 认真完成本组实验，不得擅自搬动和使用其他实验组的仪器和物品。

(5) 实验中发现仪器不正常和数据不合理时，应及时与指导教师联系。

(6) 不得自行改变实验方法，确需改变需与指导教师研究后方可进行。

(7) 电学实验线路接好经教师检查同意后，方可接通电源。光学实验严禁用手触摸光学元

件的光学表面。

(8) 遵守仪器操作规程,爱护仪器设备,注意人身安全和设备安全,损坏仪器设备,酌情赔偿。

(9) 实验完成后,将原始数据交教师审阅签字,方可有效。

(10) 实验完毕,整理仪器,清点器材,当面交于指导教师。打扫卫生,关好门窗,方可离开实验室。

第一章

测量误差与数据处理

物理实验离不开对物理量的测量,人类是通过测量来认识客观世界的。由于人们认识能力和科学技术的限制,使得物理量的测量很难完全准确。也就是说,测量总存在着误差。由于误差的存在,使得测量结果带有一定的不确定性。误差就是测量中的不可靠量值,导致测量结果的不可靠量值称为不确定度。这就是测量、误差、不确定度之间的因果关系,测量误差越小,结果误差的可能分布范围就越小,测量的准确度就越高,人们对客观世界的认识也就越准确。

第一节 测量与误差

一、测量

1. 测量的定义

物理实验是以测量为基础,研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理都离不开测量。所谓测量,就是用实验手段对客观事物获取定量信息的过程,具体地说就是借助仪器用某一计量单位把待测量的大小表示出来,即待测量是该计量单位的多少倍。

2. 测量的类型

按测量方式,测量可分为直接测量和间接测量;按测量条件,测量可分为等精密度测量和非等精密度测量。

(1) 直接测量。

用测量仪器直接读出被测量的量值的测量过程称为直接测量,相应的被测量称为直接测量量。例如,用米尺测量物体的长度,用物理天平测物体的质量,用秒表测时间等。

直接测量按测量次数可分为单次测量和多次测量。

单次测量:只测量一次的测量称为单次测量。单次测量主要用于测量准确度要求不高、测量比较困难或测量过程带来的误差远远大于仪器不确定度的测量中。例如,杨氏弹性模量测量实验中,测钢丝长度就用单次测量。

多次测量:测量次数超过一次的测量称为多次测量。多次测量按测量条件主要分为等精密度测量和非等精密度测量。

(2) 间接测量。

依据待测量和某几个直接测量值的函数关系求出待测物理量,这一过程称为间接测量,相应地被测量称为间接测量量。例如要测粗细均匀铜丝的线密度 ρ ,可先测出一段铜丝的长度 L 和质量 M ,然后根据公式 $\rho = M/L$ 计算出铜丝的线密度。这个过程称为间接测量。其中, ρ 是间接测量量, L 、 M 是直接测量量。

(3) 等精密度测量。

在同等条件下进行的多次重复性测量称为等精密度测量。即环境、人员、仪器、方法等相同不变,对同一个待测量进行多次重复测量。由于各次测量的条件相同,测量结果的可靠性是相同的,测量精密度也是相同的,这种测量就是等精密度测量。

(4) 非等精密度测量。

在特定的不同测量条件下,用不同的仪器、不同的测量方法、不同的测量次数、不同的测量人员进行测量和研究,这种测量称为非等精密度测量。非等精密度测量主要用于高准确度的测量中。

在实际测量中,常用的测量主要是单次测量、等精密度测量和间接测量。当测量准确度要求不高时用单次测量,测量准确度要求比较高时用等精密度测量,在无法使用直接测量时才用间接测量。

3. 真值与测得值

物质均有各自的特性,反映这些特性的物理量所具有的客观的真实数值,称为该物理量的真值。通过各种实验所得到的量值称为测得值,多是测量仪器或装置的读数或指示值,测得值是被测量真值的近似值。

二、误差

1. 误差的定义

测量的目的就是要力图得到真值,但由于实验仪器、环境、观察者等诸多因素的影响,测量值和真值间或多或少总有差异,这种差异就称为测量值的误差。测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。

2. 误差的分类

根据误差的性质及产生原因,可将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。

(1) 系统误差。

系统误差是重复测量中保持恒定或从可预知方式变化的测量误差分量,即误差总使测量结果偏向一方,或者偏大,或者偏小。它是由仪器的固有缺陷、环境的影响、个人的习惯、理论公式的近似性等因素所致,因素不变,系统误差就不会改变。多次测量求平均值并不能消除该误差。

例如,用秒表测时间,若秒表走得较快,那么即使测量多次,测得的时间总会偏大,而且总是偏大一个固定的量,这就是仪器不准确造成的。

如何处理实验中的系统误差呢?可以通过校准仪器、改进实验装置和实验方法,或对测量结果进行理论上的修正加以消除或尽可能减小。发现和减小实验中的系统误差通常是非常困难的,需要对整个实验所依据的原理、方法、步骤以及所用仪器可能引起误差的各种因素一一分析。一个实验结果是否正确,往往就在于系统误差是否已被发现和尽可能消除,因此对系统误差不能轻易忽视。

(2) 随机误差。

随机误差是指在多次等精密度测量过程中,绝对值和符号以不可预知的方式变化着的测量误差的分量。这种误差是由人的感官的灵敏程度不同,周围环境的干扰以及随测量而来的不可预料的偶然因素所致。随机误差的特征是其随机性,即误差的大小和正负变化不定,没有规律,不可预知。随机误差服从统计规律,对某一个量进行多次测量时就会发现,比真值大和

比真值小的测量出现的概率相等,且误差较小的数据比误差较大的数据出现的概率大。这一规律在测量次数越多时表现就越明显,随机误差的分布规律如图 1-1 所示。

分布规律满足下列方程

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

① 正态分布:方程(1)中 σ 称为标准差,是随机误差 δ_x 的分布函数 $f(\delta_x)$ 的特征量。其表达式为:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}$$

式中, x_0 表示真值, x_i 表示第 i 次的测量值, n 表示测量次数。 σ 越小,测量精密度越高。曲线越陡,峰值越高,随机误差越集中,测量重复性越好; σ 越大则反之。 σ 对 $f(\delta_x)$ 的影响示意图如图 1-2 所示。

为了统计随机误差的概率分布,将概率密度函数在以下区间积分,得到随机误差在相应区间的概率值分别为:

$$P(-\infty, +\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta_x) d(\delta_x) = 1$$

$$P(-\sigma, +\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\delta_x) d(\delta_x) = 68.3\%$$

$$P(-2\sigma, +2\sigma) = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(\delta_x) d(\delta_x) = 95.4\%$$

$$P(-3\sigma, +3\sigma) = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(\delta_x) d(\delta_x) = 99.7\%$$

② 实验标准偏差:在实际测量中,由于测量次数有限,真值 x_0 通常是未知的。因此在大学物理实验中,通常使用实验标准偏差 s ,即贝塞尔公式表征其分散性:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

s 反映了随机误差的分布特征。 s 大表示测得值分散,随机误差的分布范围宽,精密度低;反之, s 小表示测得值密集,随机误差的分布范围窄,精密度高。

(3) 粗大误差。

粗大误差又简称错误,是由于实验者粗心大意或环境突发性干扰而造成的,该测量值为坏值。在处理数据时不能将坏值计算在内,应予以剔除。具体做法是:求出 \bar{x} 和 σ ,将 $|\delta_{x_i}|$ 与 3σ 进行比较,大于 3σ 的测量值都是坏值,应予以剔除。这种方法称为 3σ 法则。

在测量中,若一组等精密度测量值中的某值与其他值相差很大,应找出原因判断其是否是由粗大误差引起的,若是则将其剔除,若找不出原因或无法肯定,就先求出所有测量值(包括可疑坏值)的标准差,然后用 3σ 法则判断并剔除。用剩余的数据重新计算 σ ,再进行检验,直到没有坏值,才能分析计算测量结果。

3. 误差的表示

(1) 绝对误差。

$$\delta_x = x - x_0$$

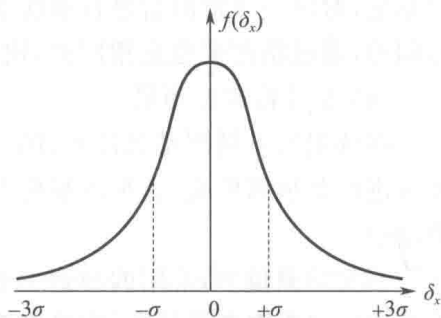


图 1-1 随即误差分布

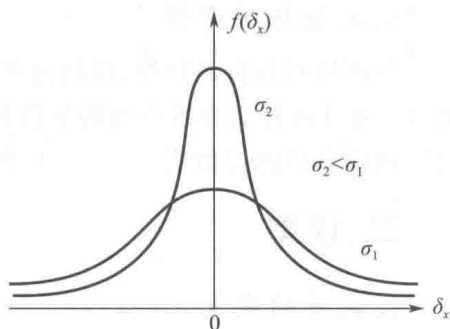


图 1-2 σ 对 $f(\delta_x)$ 影响示意图

式中, δ_x 表示绝对误差, x 表示测量值, x_0 表示真值。

绝对误差反映了测量的准确度。由于误差存在于一切测量过程中, 真值虽然是客观存在的实际值, 但无法得到。因此在等精密度测量中, 假设系统误差已消除的前提下, 常用测量值和平均值之差估算绝对误差。其表达式为

$$\delta_x = x - \bar{x}$$

在估算绝对误差时, 有时用被测量的公认值、理论值或更高精密度的测量值来代替真值 x_0 , 这些值称为“约定真值”。

(2) 相对误差。

相对误差用绝对误差和真值之比的绝对值表示, 但由于真值不能确定, 实际中常用“约定真值”表示:

$$E = \left| \frac{\delta_x}{\bar{x}} \right| \times 100\%$$

有时也将测量值与公认值进行比较, 用百分误差 E_r 来表示:

$$E_r = \frac{|\text{测量值} - \text{公认值}|}{\text{公认值}} \times 100\%$$

4. 误差与测量结果的关系

为了定性的描述各测量值的重复性及测量结果与其真值的接近程度, 常用精密度、准确度、正确度来描述。

准确度: 表示测量值偏离真值的程度, 反映系统误差对测量结果的影响。

精密度: 表示测量值的分散程度, 反映随机误差对测量结果的影响。

正确度: 表示测量值的重复性以及和真值的偏离度, 反映系统误差和随机误差对测量结果的共同影响。

如图 1-3 所示为打靶时着弹点的分布情况。由图可知: 图(a) 准确度低, 精密度高; 图(b) 准确度高, 精密度低; 图(c) 正确度高, 既准确又精密。

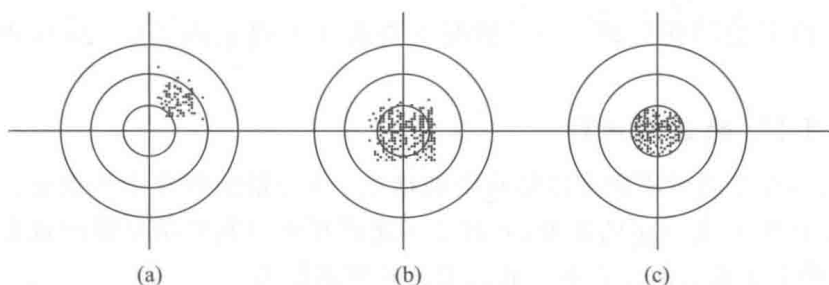


图 1-3 射击时弹着点的分布

第二节 不确定度

1. 不确定度的定义

不确定度是表征被测量的真值(或与测量任务相关联的被测量值)所处的量值散布范围的评定, 用符号 U 表示。它表示由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度。不确定度反映了可能存在的误差分布范围, 即随机误差分量和未定系差分量的联合分布范围。

在物理实验教学中,常采用不确定度的简化评定方法——扩展不确定度 U (又称报告不确定度)。测量结果最后写成式: $Y = y \pm U$, 其表示测量值(真值)位于区间 $(y - U, y + U)$ 内的概率等于或大于 95%。实验教学中扩展不确定度有时简称为不确定度。

扩展不确定度 U 从评定方法上分为两类分量: A 类分量是多次重复测量时用统计方法计算的分量,用符号 U_A 表示; B 类分量是用其他方法(非统计方法)评定的分量,用符号 U_B 表示。这两类分量用方和根合成,即得扩展不确定度:

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}$$

实验中为了评价测量结果的相对准确度,还常用相对不确定度表示。扩展不确定度 U 与量值 y 之比定义为相对不确定度,即:

$$U_r = \frac{U}{y}$$

扩展不确定度 U 与相对不确定度 U_r 只取 1 至 2 位有效数字。

2. A 类分量 U_A 的计算

A 类分量 U_A 由实验标准偏差 s 乘以因子 (t/\sqrt{n}) 求得,即:

$$U_A = (t/\sqrt{n})s$$

式中, s 是用贝塞耳公式算出的标准差。测量次数 n 确定后,因子 (t/\sqrt{n}) 可由表 1-1 查得。

表 1-1 A 类不确定度的因子表 ($P = 0.95$)

测量次数 n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	∞
(t/\sqrt{n}) 的值	8.89	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72	0.55	0.47	$1.96/\sqrt{n}$

本课程的多数实验中,测量次数 n 要求 $6 < n \leq 10$, 此时 $t/\sqrt{n} \approx 1$, 则 A 类不确定度 U_A 可近似取标准偏差 s 的值,即:

$$U_A = (t/\sqrt{n})s \approx s \quad (2)$$

式(2)是特定条件下的简化处理。一般情况下查表 1-1 得到因子 (t/\sqrt{n}) , 再由式(2)计算出 U_A 。

3. B 类分量 U_B 的近似估计

B 类分量的估算是测量不确定度估算中的难点。在分量的估算中不重复、不遗漏,详尽分析实验各个环节产生 B 类分量的来源,尤其是不遗漏那些对测量结果影响较大的或主要的不确定度来源,依赖于实验者的学识和经验以及分析判断能力。

在实验教学中, B 类分量 U_B 的大小有时由实验室近似给出,在许多直接测量中, U_B 近似取计量器具的误差限值 Δ_{INS} , 即认为 U_B 主要由测量器具的误差特性决定。物理实验中一般计算不确定度的公式为:

$$U = \sqrt{(t/\sqrt{n})^2 s^2 + \Delta_{\text{INS}}^2}$$

教学中的仪器误差限 Δ_{INS} 一般取计量器具的允许误差限或示值误差限,或基本误差限。它们可参照计量器具的有关标准,由准确度等级或允许误差范围得出,或由工厂的产品说明书给出,有时由实验室结合具体情况来给出 Δ_{INS} 近似的约定值。

仪器误差限的获得有以下途径。

① 由仪器或说明书中给出(有些仪器在铭牌上标明了仪器的误差限)。

② 由仪器的准确度等级获得

$$\Delta_{\text{INS}} = \frac{\text{准确度等级} \times \text{量程}}{100}$$

仪器的准确度等级由高到低排列为:0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0级,共7个等级。

③ 估计。

可连续读数的仪器: $\Delta_{\text{INS}} = \frac{1}{2}$ 分度值。

非连续读数的仪器: $\Delta_{\text{INS}} =$ 分度值。

数字式仪表的仪器: Δ_{INS} 取末位 ± 1 或 ± 2 。

在实验室中,可连续读数的仪器有:米尺、螺旋测微计、测量显微镜、光具座、指针式电表等;非连续读数的仪器有:游标卡尺、分光计、电阻箱、机械秒表等;数字式仪表有:数字式电压表、数字式电流表、数字式欧姆表、数字式频率计等。

第三节 测量结果和不确定度的表示

1. 单次直接测量

在实验中,由于条件不许可或测量准确度要求不高等原因,对某些物理量只需要进行一次测量。则:

$$U_A = 0, U_B = \Delta_{\text{INS}}$$

测量结果与不确定度表示为:

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = \Delta_{\text{INS}}$$

2. 多次直接测量

为减小随机误差,可在同一条件下进行重复多次测量,实验中一般选取测量次数 $6 \leq n \leq 10$,取置信概率 $P = 0.95$, $t/\sqrt{n} \approx 1$,则 $U_A = s$ 。数据处理前应消除掉可定系统误差。

测量结果与不确定度表示为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 + \Delta_{\text{INS}}^2}$$

3. 间接测量

间接测得量是通过一系列公式计算出来的。既然公式中包含的直接测得量都是有误差的,那么间接测得量也必然有误差,这便是误差的传递。间接测量结果的不确定度取决于直接测量结果的不确定度和测量公式的具体形式。

间接测得量的函数关系为

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

式中, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 为各自独立的直接测得量。

测量结果为

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_n)$$

间接测量不确定度的确定:对被测量的函数关系进行全微分,求出测量结果的不确定度。