



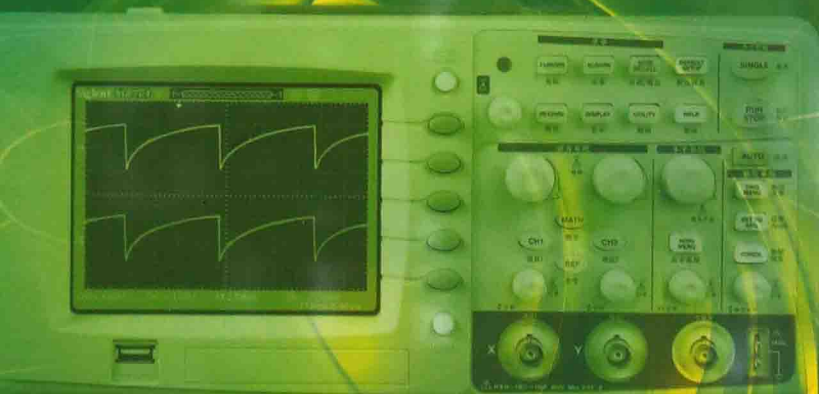
普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

栾照辉 主 编

张 颖 陆世杰 黄建伟 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主 编 栾照辉

副主编 张 颖 陆世杰 黄建伟

编 写 刘 威 赵 磊 魏 佳

罗双超 李敬然

主 审 王 暄



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材，主要内容包括测量误差及数据处理的基础知识，实验预备知识，必做实验 26 个，选做实验 15 个，涉及力学、热学、电磁学、光学及近代物理内容。

本书可作为理工科非物理专业大学物理实验课程的教材，也可供其他专业学生和社会读者阅读、参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验 / 栾照辉主编. —北京: 中国电力出版社, 2015

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-7053-1

I. ①大… II. ①栾… 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 (2015) 第 016354 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 2 月第一版 2015 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.25 印张 293 千字

定价 28.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

物理实验是理工院校的必修实验基础课,它对于培养学生实验技能和分析问题、解决问题的能力有着非常重要的作用。本书是为高校理工科学生“大学物理实验”课程编写的,是根据教育部颁发的《高等学校物理实验课程教学基本要求》,并结合哈尔滨理工大学多年物理实验课的教学实践,在历年来所用物理实验教材的基础上编写的大学物理实验教材。

本书精选了41个实验,涉及力学、热学、电磁学、光学及近代物理内容。在编排上,本书打破了原普通物理实验中力学、热学、电学、光学的界限,根据哈尔滨理工大学的教学规划,将这些实验项目分成学生必做实验和选做实验两部分,以供不同专业和层次的学生挑选,其中带*的内容为了解性内容。

参加本书编写工作的有:栾照辉(第一章、实验1~12、实验27~31)、张颖(第三章第1节、实验13~19、实验32~35)、陆世杰(实验36~39)、黄建伟(第二章、实验21、附录)、刘威(第三章第2节、实验40)、赵磊(实验20、41)、魏佳(实验22、24)、罗双超(实验23、26)、李敬然(实验25)。

本书的编写也凝聚了哈尔滨理工大学其他物理实验课任课教师和实验技术人员的劳动心血,这些同志为教材的充实和实验教学设备的完善与改进付出了大量的劳动,我们对此表示衷心的感谢;另外,在本书的编写过程中我们也参考了一些兄弟院校成熟实验教材的部分内容和实验设备厂家有关仪器设备方面的内容,在此表示衷心的感谢!

限于我们水平,加之经验不足,书中疏漏在所难免,诚请读者批评指正。

编者

2014年9月10日

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 普通物理实验课的目的和任务	1
第二节 实验课的教学程序及要求	1
第二章 测量误差及数据处理的基础知识	4
第一节 测量与测量误差	4
第二节 测量不确定度	7
第三节 直接测量的数据处理	8
第四节 间接测量的数据处理	12
第五节 有效数字及其运算	17
第六节 实验数据的其他表示和处理方法	19
第三章 实验预备知识	25
第一节 电磁学实验预备知识	25
第二节 光学实验预备知识	30
第四章 必做实验	33
实验 1 固体密度的测定	33
实验 2 用“气轨”验证牛顿第二定律及动量守恒定律	37
实验 3 用拉伸法测固体的杨氏模量	42
实验 4 用弹簧振子研究谐振动	45
实验 5 单摆	48
实验 6 用拉脱法测量液体表面张力系数	50
实验 7 用落球法测定液体黏滞系数	52
实验 8 用扭摆法测定物体的转动惯量	55
实验 9 空气比热容比的测定	57
实验 10 电学基本仪器使用及欧姆定律的应用	60
实验 11 用惠斯通电桥测电阻	63
实验 12 电表的改装及校准	68
实验 13 用模拟法测绘静电场	71
实验 14 电学综合设计实验	74
实验 15 示波器的调节和使用	75
实验 16 半导体光电二极管伏安特性的测定	85

实验 17	RLC 串联电路的暂态过程	90
实验 18	用圆线圈和亥姆霍兹线圈测磁场	94
实验 19	薄透镜焦距的测量	97
实验 20	模拟眼睛的屈光不正及物理矫正	102
实验 21	分光计的调节和使用	106
实验 22	偏振现象的实验研究	110
实验 23	单缝衍射	116
实验 24	用迈克尔逊干涉仪测波长	120
实验 25	声速的测量	123
实验 26	密立根油滴实验	125
第五章	选做实验	131
实验 27	用转动实验仪测量转动惯量	131
实验 28	用力敏传感器测量不规则物体和液体密度	133
实验 29	固体线胀系数的测量	135
实验 30	液体比热容的测定	137
实验 31	数字温度计设计实验	141
实验 32	用电位差计测电动势	142
实验 33	串联谐振	146
实验 34	用伏安法测量二极管的伏安特性	148
实验 35	用霍尔效应法测量磁场	150
实验 36	组装望远镜和显微镜	153
实验 37	用分光计测定三棱镜的折射率	157
实验 38	用牛顿环测透镜的曲率半径	158
实验 39	衍射光栅	161
实验 40	光电效应	163
实验 41	全息照相	166
附录		171
附录 A	法定计量单位	171
附表 1	国际单位制的基本单位	171
附表 2	国际单位制的辅助单位	171
附表 3	国际单位制中具有专门名称的导出单位	171
附表 4	国家选定的非国际单位制单位	172
附表 5	国际单位制中的其他导出单位	173
附表 6	用于构成十进倍数和分数单位的词头	173
附录 B	常用物理数据	174
附表 7	基本和重要的物理常数表	174
附表 8	在海平面上不同纬度处的重力加速度	175
附表 9	我国部分城市重力加速度	175
附表 10	在 20℃ 时常用地体和液体的密度	175

附表 11	在标准大气压下不同温度的水的密度	176
附表 12	在 20℃ 时一些材料的杨氏模量	176
附表 13	在 20℃ 时与空气接触的液体的表面张力系数	177
附表 14	不同温度下与空气接触的水的表面张力系数	177
附表 15	液体的黏滞系数	178
附表 16	不同温度下水的黏滞系数	178
附表 17	电阻和合金的电阻率及其温度系数	178
附表 18	固体的线膨胀系数	179
附表 19	几种常用的温差电偶的温差电动势	179
附表 20	常见物质的比热容	179
附表 21	水和冰在不同温度下的比热容	180
附表 22	某些物质中的声速	180
附表 23	某些物质的介电系数	180
附表 24	在常温下某些物质相对于空气的折射率	181
附表 25	常用光源的谱线波长表	182
附表 26	某些金属的逸出功和极限频率	182
附录 C	重要物理实验年表	183

第一章 概 述

第一节 普通物理实验课的目的和任务

物理学的工作有实验的方法和理论的方法。实验的方法是以实验结果为依据,归纳出一定的规律。理论研究工作虽然不进行实验,但研究课题的提出和结论的检验,也必须通过物理实验。物理实验在物理科学的创立和发展中占有十分重要的地位。因此学习物理学时,物理实验就是一门重要的必修科目。

普通物理实验课的主要目的是:

(1) 通过观察、测量和分析,加强对物理概念和理论的理解。

(2) 学习物理实验的基本知识、基本方法,培养基本的实验技能。做好一个实验除了要了解有关的理论外,还必须能运用恰当的方法,合理地选取符合实验要求的仪器,懂得怎样装配、调整及正确使用这些装置。在取得必要的数据后,能从中得出合乎实际的结论,并能分析、判断实验结果的可靠程度和存在的问题。

(3) 培养一个科学工作者的基本素质,即严肃认真、实事求是的科学态度和工作作风,以及爱护国家财产、遵守纪律的优良品德。

物理实验课是实践性很强的教学环节,在实验过程中,虽然有教师指导,但是学生的活动有较大的独立性,实验者应当自觉地以一个研究者的态度去组装仪器、调试仪器、进行观察、测量和分析,同时探讨最佳的实验方案,从中积累经验、锻炼技巧和机智,这将为以后独立地设计实验方案,选择并使用新的仪器设备和解决新的实验课题打下一定的基础。

第二节 实验课的教学程序及要求

物理实验课的全过程应包括三个步骤:①实验前的准备;②实验中的操作与记录;③实验后的数据整理和实验报告。

一、实验前的准备(预习)

实验前的准备是保证实验顺利进行,并能取得满意结果的重要步骤,包括以下内容:

(1) 理论的准备。从实验教材和有关参考书中充分了解实验的理论依据和条件,了解本次实验要研究什么问题,要测量哪些物理量,清楚实验的具体过程和大致步骤。

(2) 实验数据的准备。根据测量需要,设计出数据记录表格,记录表格既要便于记录,又要便于数据的整理。

(3) 写出实验预习报告。实验预习报告分以下三部分内容:

1) 写出实验的题目及实验者的姓名、班级、学号等。

2) 实验原理要求写出实验主要的公式,画出实验所需的电路、光路等简图,并且要有简要的文字说明。

3) 清楚要测量的物理量哪些是单次测量量, 哪些是多次测量量。单次测量量要做测量准备, 多次测量量要设计出原始记录表格。

二、实验中的操作与记录

(1) 仪器的安装与调整。使用仪器进行测量时, 必须注意要满足仪器的正常工作条件(水平、铅直、工作电压、光照等), 必须按照仪器的操作规程进行。不注意耐心细致地调试仪器而忙于测量数据是初学者容易出现的毛病, 以下列举几点共同性的注意事项。

1) 安排仪器时, 应尽量做到便于观察、读数和记录。

2) 灵敏度高的仪器(例如分析天平、灵敏电流计等)都有制动器, 不进行测量时, 应使仪器处于制动状态。

3) 拧动仪器上的旋钮或转动部分时, 动作要轻, 不要用力过猛。

4) 测量前要注意仪器的零点, 必要时需进行调零。

5) 砝码、透镜、表面镀膜反射镜等器件, 为了保持测量精度和光洁不允许用手摸, 也不应随便使用布擦。

6) 使用电学仪器要注意电源的电压、极性。

(2) 实验中的观察。在明确了实验目的和测量内容、步骤, 并能正确使用仪器之后, 可以进行正式观测。观测时必须精神集中, 尽量排除干扰。不要急于记录数据, 要多试几次, 多观察几次, 直至确信无问题后再开始记录实验数据。在实验过程中遇到疑难问题, 实验者应该尽量独立思考自行解决, 如自己无法解决时应及时请教指导教师。

(3) 实验记录包括实验过程、现象和数据的记录。实验记录就是如实地记下各观察数据、简单的过程及观察到的现象, 要求简单、整洁、清楚, 使自己和别人都能看懂记录的内容, 数值必须记在表格中, 要注意写明物理量和单位。实验记录是以后计算与分析问题的依据, 在实际工作中则是宝贵的资料。实验记录应记在专用的记录纸上, 原始数据要正确记录, 不要涂改。初学者往往在一张随便的纸上先记录下来, 以后再整理抄到正式记录纸上, 这样做是不对的, 因为经过抄录后的记录实际上已经不是原始记录了。

实验记录的内容包括日期、时间、地点、合作者、室温、气压、仪器及其编号、简图、简单的过程、原始数据以及实验中有关的现象、发现的问题等。原始数据是指从仪器上直接读出来的, 未经任何运算的数值。

记录时需注意以下事项:

1) 观测时, 在仪器上读出数值后, 要立即进行记录(不要先记忆数据以后补记), 这样可减少差错。

2) 除有明确理由, 肯定某一数据有错误而不予记录外, 其他数据(包括可疑的)一律记录, 出现异常数据时, 应增加测量次数。

(4) 实验操作完成后, 要将记录的实验数据交指导教师审阅, 待教师签字后, 再将仪器整理复原到实验前的状态, 方可离开实验室。

三、实验后的数据整理和实验报告

(1) 测量结束后要尽快整理好数据, 计算出结果并绘出必要的图表。

(2) 实验操作完成后要在规定的时间内完成实验报告。实验报告要力求简单明了、用语确切、字迹清楚。实验报告的基本内容应包括以下几个方面:

1) 实验题目: 写明实验题目及实验者的姓名、学号。

2) 实验目的: 记录实验所要达到的目的。

3) 实验原理: 用简短的文字扼要地阐述实验原理, 写出实验所用的公式及公式适用的条件等。

4) 实验仪器: 记录所使用仪器的规格、型号及其编号等。

5) 实验内容: 写明实验的实际步骤、实验方法、测量条件等。

6) 数据处理: 用表格的形式整理出测量的全部数据, 写出完整的数据处理过程及完整的测量结果。

7) 分析讨论: 对实验结果进行分析和讨论, 主要包括对实验结果的评价、误差的分析、实验中发现现象的解释、实验装置和实验方法存在的问题以及对实验的改进意见等。实验的分析讨论是培养学生分析能力的重要部分, 应指导学生们努力去做。实验后可供讨论的问题是多方面的, 以下提示几点供参考:

① 实验的原理、方法、仪器给你留下什么印象? 实验目的完成得如何?

② 实验的误差表现在哪些地方? 怎样改进测量方法和装置可以减少误差? 对实验的改进有何好的设想?

③ 实验步骤怎样安排更好?

④ 观察到什么反常现象? 遇到过什么困难? 能否提出可供今后实验人员借鉴的经验?

⑤ 对测量结果是否满意? 如果未达到预期结果, 是何缘故?

⑥ 对实验的安排(目的、要求、方法和仪器的配置等)和教师的指导有何希望、要求等。

四、实验守则

(1) 实验前应做好预习, 撰写预习实验报告。

(2) 按照预约的时间, 携带教材、预习实验报告和有效证件进入实验室。

(3) 迟到 15min 不允许操作实验。

(4) 在实验过程中应保障人身安全和器材安全。

(5) 爱护实验器材, 如有损坏应立即报告实验教师。

(6) 电学实验必须经过教师检查线路确定无误后, 方可接通电源。

(7) 实验操作期间擅自离开实验室超过 15min 不允许继续操作实验。

(8) 撰写实验报告要求使用物理实验报告纸, 需要画图的要使用坐标纸。

(9) 实验报告应在实验室规定的时间内递交。

(10) 平时成绩及格方可参加实验课笔试。考核成绩由平时成绩和笔试成绩综合评定。

第二章 测量误差及数据处理的基础知识

第一节 测量与测量误差

一、测量

在物理实验中,要用实验的方法研究各种物理规律,因此要定量测出有关物理量的大小。所谓测量就是借助仪器用某一标准计量单位将待测量的大小表示出来,即待测量是该计量单位的多少倍。对待测量的测量一般可分为直接测量和间接测量两类。

1. 直接测量

直接测量是用计量仪器直接和待测量进行比较,并获得测量结果。例如,用米尺和某单摆摆线长相比较,读出摆线长为 0.9986m。

2. 间接测量

间接测量是不能直接用计量仪器将待测量大小测出来,而需依据待测量和某几个直接测量值的函数关系来求得待测量的。例如,重力加速度可以通过测量单摆的摆长和周期根据单摆周期的公式算出。

二、测量误差

(一) 测量误差的定义和测量的任务

每一个物理量都是客观存在,在一定条件下具有不依人的意志为转移的固定大小,这个客观大小称为该物理量的真值。进行测量是想要获得待测量的真值。但是由于测量是依据一定的理论或方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的人来进行的,且由于实验理论的近似性、实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性以及环境的不稳定性等因素的影响,测量的结果只能称为测量值而不是真值。根据误差公理,真值是不可能测得的。测量值和被测量真值之间总会存在或多或少的差异,这种差异就称为测量值的误差。

设被测量的真值为 x_0 , 测量值为 x , 误差为 ε , 则

$$\varepsilon = x - x_0 \quad (2-1)$$

测量所得的一切数据都毫无例外地包含一定量的误差,因而没有误差的测量结果是不存在的。在误差必然存在的情况下,测量的任务是:

(1) 设法将测量值的误差减至最小。

(2) 求出在测量条件下被测量的最佳测量值(最佳估计值)。

(3) 估计最佳测量值的可靠程度(接近真值的程度)。为此必须研究误差的性质、来源,以便采取适当的措施,以期达到最好的结果。

(二) 测量误差的分类

按照对测量值影响的性质,误差可分为系统误差、偶然误差和粗大误差三类。实验数据中,三类误差是混杂在一起的,但必须分别讨论其规律,以便采取相应的措施去减少误差。

1. 系统误差

(1) 系统误差的概念。同一条件下(方法、仪器、环境和观测人不变)多次测量同一量时,符号和绝对值保持不变的误差,或按某一确定的规律变化的误差称为系统误差。

例如用天平称衡物体的质量时,由于砝码的标称质量(或名义质量,即标刻在砝码上的质量数值)不准引入的误差;由于天平臂不等长引入的误差;由于空气浮力的影响引入的误差,所有这些误差在多次反复测量称衡同一物体的质量时是恒定不变的,这就是系统误差。又例如在一电路中电池的电压随放电时间的延长而降低时将给电路中电流强度的测量引入系统误差。

系统误差又可按其产生的原因分为以下四种:

- 1) 仪器误差:这是所用量具或装置不完善而产生的误差。
- 2) 方法误差(理论误差):这是由于实验方法本身或理论不完善导致的误差。
- 3) 装置误差:这是由于对测量装置和电路布置、安装、调整不当而产生的误差。
- 4) 环境误差:这是因外界环境(如光照、温度、湿度、电磁场等)的影响而产生的误差。

系统误差的出现一般都有较明确的原因,因此可以采取适当措施使之降低到可忽略的程度,但是怎样找到产生系统误差的原因,从而采取恰当的对策,又没有一定的规律可循,因此分析系统误差应当是实验讨论的问题之一。为了发现系统误差必须仔细研究测量理论和方法的每一步推导,检验和校准每一件仪器,分析每一个实验条件,考虑每一步调整和测量,注意每一个因素对实验的影响等。

(2) *几种常用的发现系统误差的方法

1) 对比的方法。

① 实验对比。用不同方法测同一个量,观察结果是否一致。如用单摆测得 $g=(982\pm1)\text{cm/s}^2$, 用一复摆测得 $g=(981.1\pm0.3)\text{cm/s}^2$, 用自由落体测得 $g=(978.68\pm0.05)\text{cm/s}^2$, 三者结果不一致,即它们在误差允许范围内不重合,说明其中至少有两个存在系统误差。

② 仪器对比。如用两个电流表接入同一电路,读数不一致,则说明至少有一个存在系统误差。

③ 改变测量方法,观察结果是否一致。如将电流反向进行读数;增加砝码过程与减小砝码过程读数;度盘转 180° 读数等。

④ 改变实验条件。如将电路中将某元件的位置变一下;将一个热源移开观察对结果是否有影响等。

⑤ 两人对比观测,可发现个人误差。

2) 理论分析的方法

① 分析测量所依据的理论公式所要求的条件与实际情况有无差异。如单摆实验中,使用了公式

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (2-2)$$

这是作了摆角 $\theta \approx 0$ 的近似,实际上 $\theta \neq 0$;公式将摆球看作质点,忽略摆线质量,实际上摆球体积 $V \neq 0$,是一个复摆;公式忽略了浮力和阻力,实际上浮力和阻力都是存在的,等等。

② 分析仪器所要求的条件是否满足。例如用测高仪测高,要求支架铅直,望远镜平移,

否则测出的结果不反映实际。又如标准电池给出的电动势数值是工作温度为 20°C 条件下的, 检查室温是否与要求一致等。

(3) 分析数据的方法。这种发现系统误差方法的理论依据是: 偶然误差服从一定的统计分布规律, 如测量结果不服从这一规律, 则说明存在系统误差。在相同的条件下得到大量数据时, 可以用这种方法。如测量数据呈单向或周期性变化, 则说明存在固定的或变化的系统误差, 因按照偶然误差的统计分布理论, 测量值的散布在时间上和空间上均应是随机的。

2. 偶然误差

在同一条件下多次测量同一物理量时, 测得值总是有稍许差异并且是变化不定的, 在消除系统误差之后依然如此, 这部分绝对值和符号经常变化的误差称为偶然误差, 也称为随机误差。

产生偶然误差的原因很多, 比如观测时目的物对得不准、平衡点确定得不准、读数不准

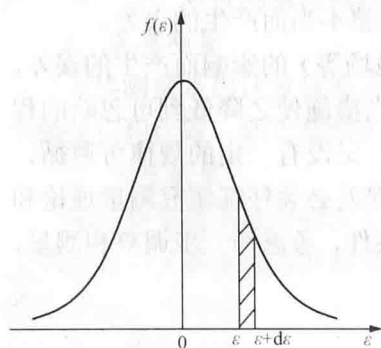


图 2-1 偶然误差的正态分布曲线

确以及实验仪器由于环境温度、湿度、电源电压的起伏而引起的微小变化和振动的影响等。这些因素的影响一般是微小的, 并且是混杂出现的, 因此难以确定某个因素产生的具体影响的大小, 所以对待偶然误差不同于系统误差, 找出原因并加以排除, 只能尽量设法减小。但是偶然误差并非完全无规律, 它的规律性是在大量观测数据中才显现出来。在大多数物理实验中, 当测量次数足够多时, 偶然误差表现为正态分布 (也称为高斯分布), 如图 2-1 曲线所示。图中横坐标为误差 ε , 纵坐标为误差的概率密度分布函数 $f(\varepsilon)$, 曲线下阴影部分就是误差出现在 ε 至 $\varepsilon+d\varepsilon$ 区间内的概率。根据统计

理论可以证明

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}} \quad (2-3)$$

式中, σ 是一个取决于具体测量条件的常数, 称为标准误差。由正态分布曲线可知, 偶然误差具有以下规律性:

(1) 有界性: 测量误差不会超出一定的范围, 即过大的正误差或负误差出现的机会趋近于零。

(2) 单峰性: 误差的概率密度分布只有一个峰值, 并出现在零附近, 即绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会多。

(3) 对称性: 误差绝对值相等的正和负的误差出现的机会相同。

根据偶然误差的性质, 我们可以在确定的测量条件下, 利用增加测量次数的方法, 取其算术平均值作为直接测量真值的最佳测量值 (最佳估计值), 以减小测量结果的偶然误差。

实际测量中, 当系统误差为恒定时, 一般不是从一个一个数据中消除它, 而是在求出算术平均值后再将系统误差取反号作为修正值加入其中。

测量次数的增加对于提高算术平均值的可靠性是有利的, 但不是测量次数越多越好。因为增加测量次数必定要延长测量时间, 这将给保持稳定的测量条件增加困难, 同时延长时间也会给观察者带来疲劳, 这又可能引起较大的测量误差。增加测量次数对系统误差的减小无

关, 所以实际测量次数不必过多, 一般在科学研究中取 10~20 次, 而在物理实验课的教学中则只取 5~10 次。

3. 粗大误差 (过失误差)

凡是用测量时的客观条件不能解释为合理的突出误差, 可称为粗大误差。这是观测者在观测、记录和整理数据过程中, 由于缺乏经验、粗心大意、疲劳等原因引起的。初学者在实验过程中常常会产生粗大误差, 应在教师的指导下, 不断总结经验, 提高实验的素养, 努力防止出现粗大误差。

粗大误差的出现将会明显地歪曲测量结果, 应当努力将其剔除。但是什么样的数据可以认为是粗大误差的坏数据而必须剔除, 则必须慎重处理。在测量当时若肯定是测错或测量条件有明显变化的数据, 可以在注明原因后废弃; 若不是测量当时, 则必须经过物理规律的分析, 认为不合理的或经过偶然误差的分析认为不可能是由偶然误差产生的异常数据才可以舍弃。

第二节 测量不确定度

一、测量不确定度的基本概念

测量误差是测量值与真值之差, 但由式 (2-1) 可知, 真值 x_0 是无法确定的, 所以误差 ε 也是不可能确定的, 我们不能准确地用数值来表示误差的大小, 只能按某种方法估算出 ε 可能处于某一范围之内。不确定度就是对误差可能处于某一范围的一种评定, 能对测量的不确定程度作出定量的描述, 用符号 U 表示。它的大小决定于偶然误差和系统误差的综合。

二、测量不确定度的分类

1. A 类不确定度

A 类不确定度是由观测到的信息通过统计分析评定的不确定度。它主要涉及随机误差, 用统计学的方法来计算, 它的分量用符号 s_i 来表示。在普通物理实验中, 一般采用标准差作为 A 类标准不确定度分量, 其置信概率为 68.3%。

2. B 类不确定度

B 类不确定度是不同于统计分析评定的不确定度。它主要涉及系统误差, 用非统计学的方法来评定, 它的分量用符号 u_j 来表示。在普通物理实验中, 一般采用估计的方法来确定其近似标准差作为 B 类不确定度分量, 置信概率也近似地认为是 68.3%。

3. 合成不确定度

在一般情况下, A、B 两类不确定度都有若干分量, 当这些分量互相独立时, 它们的合成不确定度用符号 U 表示, 则

$$U = \sqrt{\sum s_i^2 + \sum u_j^2} \quad (2-4)$$

当用式 (2-4) 合成不确定度时, 各分量必须具有相同的置信概率。

三、测量结果的最终正确表达形式

假设对某一物理量 x 进行了测量, 其测量值为 $\bar{x}$, 测量不确定度为 U , 则测量结果的最终正确表达形式为

$$x = \bar{x} \pm U \quad (2-5)$$

这是利用绝对不确定度的表达方法, U 与 $\bar{x}$ 有相同的单位, 它反映出测量值偏离真值的大小, 主要用于评价同一物理量测量结果的好坏。在普通物理实验中, 如不做说明的话一般认为其置信概率为 68.3%, 绝对不确定度一般只取一位有效数字, 而测量值的末位要与不确定度所在的那一位对齐。

式 (2-5) 的物理意义是: 被测量真值 x_0 的最佳估计置信区间为 $(\bar{x}-U, \bar{x}+U)$, 置信概率为 68.3%, 即表明真值落在 $(\bar{x}-U, \bar{x}+U)$ 区间之内的可能性是 68.3%。

此外, 还可以用相对不确定度的方法把测量结果表达为

$$x = \bar{x}(1 \pm E_x)$$

$$E_x = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2-6)$$

这里的 E_x 就叫做相对不确定度, 是一个没有单位的百分数, 反映的是不确定度与测量值之比, 主要用于评价不同物理量测量结果的好坏。相对不确定度一般最多只取两位有效数字, 要用百分数来表示。

应当指出的是, 误差与不确定度是两个不同的概念, 有着根本的区别, 不能混淆, 但它们之间又有一定的联系。误差只是一个理论概念, 但不能准确获得, 因此只能用于定性地描述理论和概念的场合。而不确定度是有一定置信概率的误差限绝对值, 因此可用于给出测量结果或进行定量运算、分析的场合。不确定度评定是否合理、全面, 与实验者本身的素质有很大的关系。对于初学者来说, 可简化不确定度评定的内容, 只考虑一些主要的因素。

第三节 直接测量的数据处理

一、测量列的最佳值

测量列是指一组在同一条件下进行测量 (称为等精度测量) 后所得的测量值。假设对某一物理量进行了 n 次测量, 得到一测量列

$$x_1, x_2, \dots, x_n$$

由于测量的随机离散性, 使得测量列中的每一个测量值 x_i 偏离真值 x_0 , 产生测量误差

$$\varepsilon_i = x_i - x_0$$

两端求和, 可得

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i = \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) = \sum_{i=1}^n x_i - nx_0$$

由误差分布的对称性, 当 $n \rightarrow \infty$ 时

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i = 0$$

所以

$$x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

此式说明, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 测量列的算术平均值就是真值。但是在实际测量中 n 不能为无限大, 所以实际上真值是无法得到的。当 n 为有限时, 测量列的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-7)$$

这样算术平均值就可以作为真值的最佳估计值。因此在多次测量时，总是取测量列的算术平均值作为测量的最终测量值。

二、测量列的标准差

任何实验中的测量值都包含一定的误差，它们都不是完全可靠的。如果在两种不同的条件下，对同一物理量测得两组数据，它们的可靠性将是不同的。要评价一组数据（一个测量列）的好坏，一般采用测量列的标准差来定量的描述，它的几何意义可以从图 2-2 清楚看出，公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_0)^2}{n}} \quad (2-8)$$

由图 2-2 可以看到， $+\sigma$ 刚好位于该曲线右侧拐点的横坐标上，而 $-\sigma$ 刚好位于该曲线左侧拐点的横坐标上。在区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 内，曲线向下弯，在这区间之外，曲线向上弯。假设整个曲线与横轴所包围的面积为 1，则积分运算表明，在曲线下 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间的面积占 68.3%。这表明，若测量列共有 n 个测量数据，则有 68.3% 的测量值的误差处于 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间内，即测量列中的任一测量值的误差小于 σ 的可能性为 68.3%，所以 σ 不仅是对一个测量列的测量精度的定量描述，还是对该测量列中任一测量值的测量精度的定量描述。

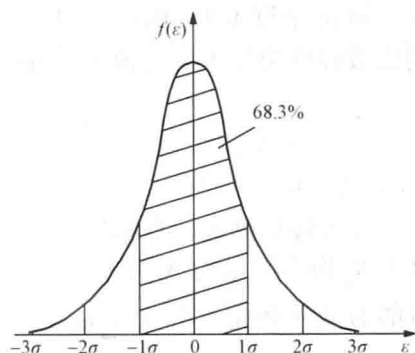


图 2-2 σ 的几何意义

积分运算还表明，曲线下 $(-2\sigma, +2\sigma)$ 区间内的面积占总面积的 95%，曲线下 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 区间内的面积占总面积的 99.7%。这表明若测量列共有 n 个测量数据，则有 95% 的测量值的误差处于 $(-2\sigma, +2\sigma)$ 区间之内，有 99.7% 的测量值的误差处于 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 区间之内，只有 0.3% 的测量值的误差处于 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 区间之外。在有限次的测量中，大于 3σ 的测量误差实际上可以认为是不可能出现的，所以 3σ 也叫极限误差，公式为

$$\Delta = 3\sigma \quad (2-9)$$

由于式 (2-8) 中的真值 x_0 是未知数，各测量值的误差也无从知晓，因此不能按此定义式求得其标准差。测量时可能得出的是真值的最佳估计值即算术平均值 $\bar{x}$ ，以及测量值与算术平均值之差，叫做残余误差，简称残差 v_i ，公式为

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (2-10)$$

正态分布的统计学理论可以证明，统计学量标准估计差 S 可以作为 σ 的最佳估计值

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} \quad (2-11)$$

在实际实验中，一般将 S 和 σ 不加区别，统称为测量列的标准差。

由式 (2-11) 可知，当测量次数 n 增加时，分母增大，但同时残余误差的个数也增加，因而分子也相应增大。统计理论可以证明，增加测量次数不能减小测量列的标准差，但当 n 小时， S 的起伏较大；当 n 增大时， S 将趋于一个稳定的值。

三、测量列中异常数据的取舍

在一组数据中有时会出现个别与其余各测量值差异特别大,但又找不出确切的理由说明它是测错的数据。这时,应该将此数据照常记录下来,保留在原始记录中,而在数据处理时可以根据偶然误差分布的规律来决定它的取舍。由于误差大于 3σ 的测量值实际上是不可能出现的,为此可采用 3σ 作为粗大误差的极限,将残差大于 3σ 的测量数据剔除。这种剔除异常数据的方法叫做拉依达准则。

应当说明的是,剔除异常数据的方法不只是拉依达准则一种,其他还有多种方法。在普通物理实验中只要求采用拉依达准则作为异常数据取舍的准则。

四、算术平均值的标准差

假设对某量进行了 n 次测量,得到一个有 n 个测量值的测量列和一个算术平均值,接着在同样的条件下对同一量又进行了第 2 个,第 3 个, ..., 直至第 m 个 n 次测量,得到 m 个测量列和 m 个算术平均值,由于 n 和 m 都是有限的,所以这 m 个算术平均值也是离散的,它的离散程度用算术平均值 $\bar{x}$ 的标准差 $S_{\bar{x}}$ 来描述,公式为

$$S_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{n}} S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2-12)$$

在实际处理实验数据时,总是用平均值 $\bar{x}$ 作为测量的最终测量值,而用算术平均值的标准差 $S_{\bar{x}}$ 作为测量的 A 类不确定度分量。当进行多次测量时,如果系统误差已被消除,一般测量的 B 类不确定度分量 $\sum u_j^2 = 0$, 由式 (2-4) 则有

$$U = \sqrt{\sum S_i^2}$$

当 S_i 中只含有一个分量,且满足式 (2-12) 时,有

$$U = S_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{n}} S \quad (2-13)$$

此时,测量不确定度决定于测量列的离散性,它的大小就等于算术平均值的标准差。

五、单次直接测量的数据处理

在实际测量过程中,有些量是随时间而变化的,无法进行重复测量;有些量因为对它的测量精度要求不高,没有必要进行重复测量;还有些量由于所用仪表的精密度较差,不能反映测量值的随机离散性, n 次测量值都相同。这些都可按单次测量来处理。

单次测量的不确定度分量为 B 类不确定度分量,要估计其大小,首先应估算出所用仪器的极限误差 Δ ,它是仪器示值与真值间可能的最大误差,置信概率为 99.7% (也可看成是 100%)。在正确使用仪器的条件下,任一测量值的误差均不大于 Δ 。为使 u 的置信概率与 S 一致 (68.3%),则相应的不确定度为

$$u = \frac{1}{c} \Delta \quad (2-14)$$

这里 c 为置信系数,它的取值与测量误差的分布状态有关。在普通物理实验中,最常用的分布为正态分布, c 值取 3,则不确定度为

$$u = \frac{1}{3} \Delta \quad (2-15)$$

而在有些情况下误差服从均匀分布,如数字式仪表的读数误差、普通仪表计数的截尾误