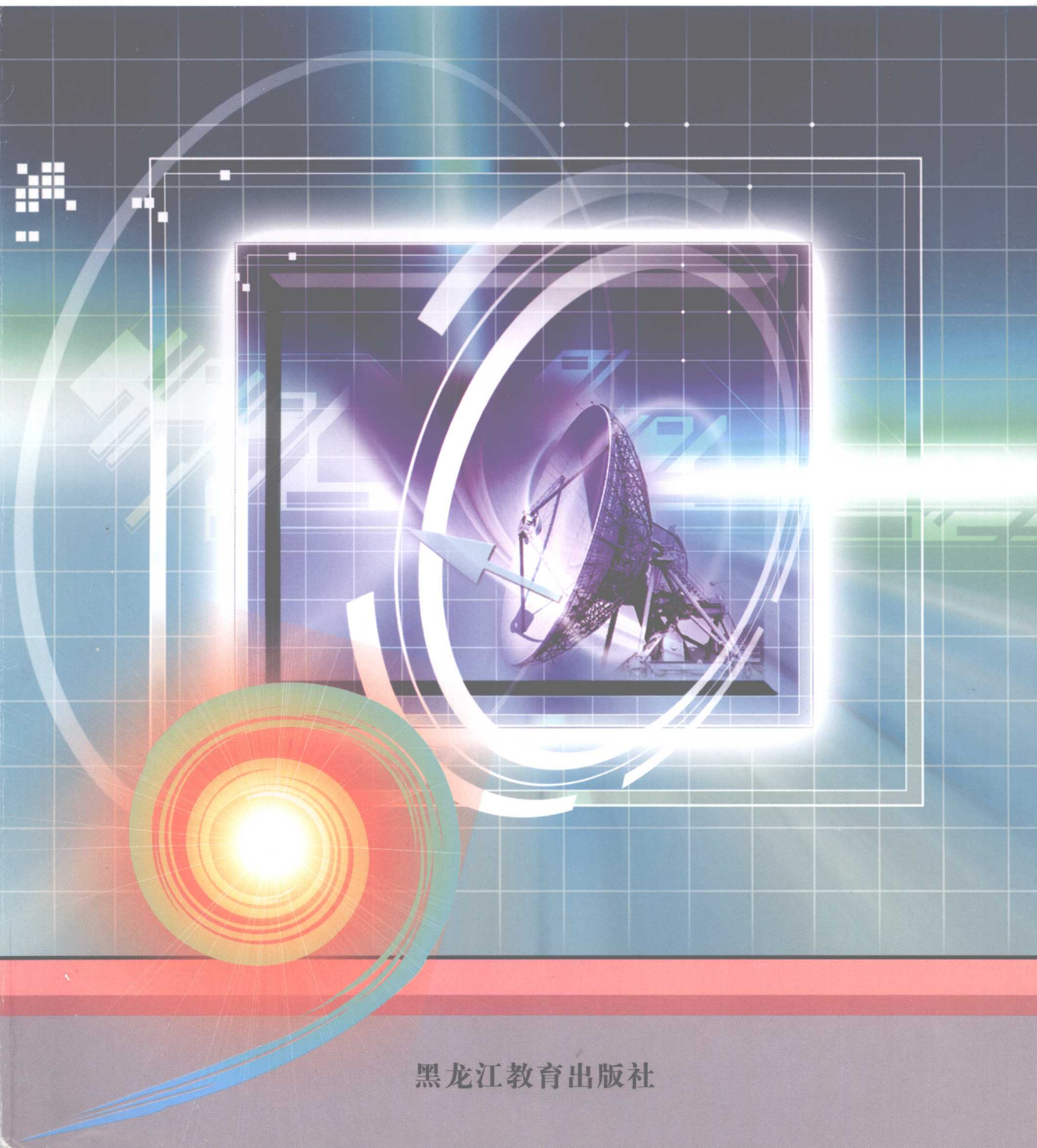


普通物理实验

主编 黄建伟

(第二版)



黑龙江教育出版社

普通物理实验

(第 二 版)

主 编 黄建伟

副主编 何丽玲 张秋佳 刘明珠 栾照辉

主 审 叶红安

黑 龙 江 教 育 出 版 社

普通物理实验
PUTONG WULI SHIYAN
(第二版)

黄建伟 主编

责任编辑: 华 汉 宋怡霏
封面设计: 陈冬妮

黑龙江教育出版社出版(哈尔滨市南岗区花园街 158 号)
哈尔滨市工大节能印刷厂印刷·黑龙江教育出版社发行
开本 787×1092 毫米 1/16·印张 13.5·字数 320 千
2005 年 2 月第 2 版·2009 年 2 月第 4 次印刷

ISBN 7-5316-3997-1/G·3054 定价:22.80 元

前 言

物理实验是理工科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。本教材是为高校理工科学生“大学物理实验”课编写的,是依据教育部《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》,在总结多年教学实践的基础上完成的。

本教材由哈尔滨理工大学黄建伟主编,何丽玲、张秋佳、刘明珠、栾照辉副主编,由黑龙江大学叶红安教授主审。哈尔滨理工大学经过教育部本科教学水平评估,获得了优秀等级,实验室建设水平也有了很大的提高。为适应评估后的实际情况,我们对教材进行了重新修订。具体参加本次修订编写工作的同志及分担的章节为:黄建伟(第一章、第二章、实验二十五、附录),张秋佳(实验一至实验四、实验三十至实验三十二、实验三十四至实验三十七),朱敏(实验五至实验六、实验八、实验二十至实验二十三),栾照辉(实验七、实验九),何丽玲(电磁学实验预备知识、实验十、实验十二、实验十五至实验十七、光学实验预备知识、实验二十四、实验二十六至实验二十八),刘明珠(实验十一、实验十三至实验十四),余萍(实验十八至实验十九),赵波(实验二十九、实验三十三)。

黑龙江大学叶红安教授在百忙之中抽出时间为本教材主审,并提出了许多宝贵的意见和建议,我们对此表示衷心的感谢。本教材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,这些同志对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。另外在编写过程中,我们也参考了一些兄弟院校成熟实验教材的部分内容,我们对此也表示衷心的感谢。

我们诚恳欢迎本教材的各位读者对教材批评指正。

编 者

2005年1月10日

内 容 提 要

本书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编写的大学物理实验教材。书中对误差理论有详细的阐述，采用了初学者易理解、操作的不确定度评定方法。对三十七个普通物理实验作了全面的介绍，并提供了部分设计性实验内容。此外本书还提供了处理实验数据的常用 BASIC 程序，给用计算机处理数据带来了方便。本书可作为高等学校及职大、夜大等物理实验课的教材或教学参考书。

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1—1 普通物理实验课的目的和任务	(1)
§ 1—2 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)
§ 2—1 测量与测量误差	(4)
§ 2—2 测量不确定度	(7)
§ 2—3 直接测量的数据处理	(8)
§ 2—4 间接测量的数据处理	(13)
§ 2—5 有效数字及其运算	(17)
§ 2—6 实验数据的其他表示和处理方法	(19)
习题	(23)
第三章 力学与热学实验	(25)
实验一 固体密度的测定	(25)
实验二 用“气轨”验证牛顿第二定律及动量守恒定律	(32)
实验三 用拉伸法测固体的杨氏模量	(38)
实验四 用转动实验仪测量转动惯量	(41)
实验五 单摆	(44)
实验六 用拉脱法测量液体表面张力系数	(46)
实验七 用落球法测定液体粘滞系数	(49)
实验八 空气比热容比的测定	(52)
实验九 用扭摆法测定物体的转动惯量	(54)
第四章 电磁学实验	(58)
电磁学实验预备知识	(58)
实验十 电学基本仪器使用及欧姆定律的应用	(63)
实验十一 用惠斯登电桥测电阻	(67)
实验十二 电表的改装及校准	(71)
实验十三 用模拟法测绘静电场	(75)

实验十四	用电位差计测电动势	(79)
实验十五	示波器的调节和使用	(83)
实验十六	测量热电偶的温差电动势	(93)
实验十七	电桥测电阻温度系数	(96)
实验十八	用圆线圈和亥姆霍兹线圈测磁场	(98)
实验十九	用冲击电流计测定螺线管内轴向磁场	(101)
实验二十	串联谐振	(104)
实验二十一	RLC 串联电路的暂态过程	(106)
实验二十二	用伏安法测量二极管的伏安特性	(111)
实验二十三	用霍耳效应法测量磁场	(114)
第五章	光学实验	(118)
	光学实验预备知识	(118)
实验二十四	薄透镜焦距的测量	(120)
实验二十五	分光计的调节和使用	(125)
实验二十六	衍射光栅	(131)
实验二十七	用牛顿环测透镜的曲率半径	(133)
实验二十八	偏振现象的实验研究	(136)
实验二十九	单缝衍射	(143)
实验三十	黑白摄影	(148)
实验三十一	彩色摄影	(156)
第六章	近代物理及综合性实验	(165)
实验三十二	用迈克尔逊干涉仪测波长	(165)
实验三十三	光电效应	(168)
实验三十四	全息照相	(172)
实验三十五	小型棱镜摄谱仪的使用	(176)
实验三十六	声速的测量	(180)
实验三十七	密立根油滴实验	(182)
附 录		(188)
一	国际单位制	(188)
附表 1	国际单位制的基本单位	(188)
附表 2	国际单位制的辅助单位	(188)
附表 3	国际单位制中具有专门名称的导出单位	(188)
附表 4	国际单位制中的其他导出单位	(189)

附表 5	国家选定的非国际单位制单位	(190)
附表 6	用于构成十进倍数和分数单位的词头	(190)
二	常用物理数据	(191)
附表 7	基本和重要的物理常数表	(191)
附表 8	在海平面上不同纬度处的重力加速度	(191)
附表 9	我国部分城市的重力加速度	(192)
附表 10	在 20℃时常用固体和液体的密度	(193)
附表 11	在标准大气压下不同温度的水的密度	(193)
附表 12	在 20℃时一些材料的杨氏模量	(194)
附表 13	在 20℃时与空气接触的液体的表面张力系数	(194)
附表 14	不同温度下与空气接触的水的表面张力系数	(194)
附表 15	液体的粘滞系数	(195)
附表 16	不同温度下水的粘滞系数	(195)
附表 17	电阻和合金的电阻率及其温度系数	(195)
附表 18	固体的线膨胀系数	(196)
附表 19	几种常用的温差电偶的温差电动势	(196)
附表 20	常见物质的比热容	(197)
附表 21	水和冰在不同温度下的比热容	(197)
附表 22	某些物质中的声速	(197)
附表 23	某些物质的介电系数	(198)
附表 24	在常温下某些物质相对于空气的折射率	(198)
附表 25	常用光源的谱线波长表	(199)
附表 26	某些金属的逸出功和极限频率	(199)
三	重要物理实验年表	(200)
四	处理实验数据的几个 BASIC 程序	(203)
程序 1	单变量算术平均值计算	(203)
程序 2	单变量的统计计算	(205)
程序 3	逐差法计算	(207)

第一章 绪 论

§ 1—1 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。要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,虽有教师指导,但学生的活动有较大的独立性,我们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。

§ 1—2 实验课的教学程序及要求

物理实验课的全过程应包括:1. 实验前的准备;2. 实验中的观察与记录;3. 实验后的数据的整理与分析这三个步骤。

一、实验课前的准备(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。

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,搞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。

二、课堂中的操作

1. 仪器的安装与调整。使用仪器进行测量时,必须满足仪器的正常工作条件(水平、铅直、工作电压、光照等等)。不注意耐心细致地去调试仪器而忙于测量,是初学者容易出现的毛病。使用仪器测量时,必须按操作规程进行。以下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、读数和便于记录。

(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) 对于砝码、透镜、表面镀膜反射镜等器件,为了保持其测量精度和光洁不许用手去摸,也不要随使用布去擦。

(6) 使用电学仪器要注意电源的电压、极性,电路需经教师检查,经允许后方能接通电源。

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。观测时一定要精神集中,尽量排除干扰。不要急于记录数据,要多试几次,多观察几次,直到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,实验者自己无法解决时应及时请教指导教师。

3. 实验过程及现象、数据的记录。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。记录应记在专用的记录本或记录纸上,原始数据要正确记录,不要涂改。初学者往往觉得自己的实验经验少,记得乱,总想要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,这样做是不好的,因为如果经过抄录后实际上已经不是原始记录了。另外原始记录零乱,在整理数据时也就容易出错误。

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。要记得简单、整洁、清楚,使自己 and 别人都能看懂记录的内容,数值一定要记在表格中,要注意写明物理量和单位。

(1) 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、实验中有关的现象、随时发现的问题等。

(2) 原始数据: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。

(3) 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。

(4) 除有明确理由,肯定某一数据有错误而不予记录外,其它数据(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,再把仪器复原整理到实验前的状态,方可离开实验室。

三、数据的整理和实验报告

1. 实验过程中要随时整理数据,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。实验报告一律要求用实验报告纸书写,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如下几个方面:

- (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说明文字;
- (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。实验的讨论是培养我们分析能力的非常重要的部分,应当努力去做。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? 实验的目的完成得如何?
- 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 实验步骤怎样安排得更好?
- 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东西?
- ⑤ 对测量结果是否满意? 如果未达到可能达到的结果是何缘故?
- ⑥ 对实验的安排(目的、要求、方法和仪器的配置等等)和教师的指导有何希望、要求?

第二章 测量误差及数据处理的基础知识

§ 2—1 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。对待测量的测量一般可分为两类:

1. 直接测量

直接测量是用计量仪器直接与待测量进行比较,就可获得测量结果。例如,用米尺和某单摆摆线长相比较,读出摆线长为 0.9876 米。

2. 间接测量

间接测量是不能直接用计量仪器把待测量大小测出来,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。例如重力加速度,可以由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

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,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,而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,环境的不稳定性等等因素的影响,测量的结果只能叫测量值而不是真值,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

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

测量所得的一切数据,毫无例外地都包含一定量的误差,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)。为此必需研究误差的性质、来源,以便采取适当的措施,以期达到最好的结果。

三、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:

- 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遵循,分析系统误差应当是实验讨论的问题之一。为了发现系统误差就必须仔细地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等。

(2) 几种常用的发现系统误差的方法*

① 对比的方法

(a) 实验对比的方法,用不同方法测同一个量,看结果是否一致。如用单摆测得 $g = 980 \pm 1 \text{ cm/s}^2$,用一复摆测得 $g = 983.0 \pm 0.3 \text{ cm/s}^2$,用自由落体测得 $g = 977.63 \pm 0.05 \text{ cm/s}^2$ 三者结果不一致,即它们在误差允许范围内不重合,就说明其中至少有两个存在系统误差。

(b) 仪器的对比。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。

(c) 改变测量方法,看结果是否一致。如把电流反向进行读数;增加砝码过程与减小砝码过程读数;度盘转 180° 读数等。

(d) 改变实验条件。如将电路中某元件的位置变一下;把一个热源移开看对结果是否有影响等。

(e) 两人对比观测,可发现个人误差。

② 理论分析的方法

(a) 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,用了公式

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{1}{g}} \quad (2-2)$$

这是作了 $\theta \approx 0$ 的近似,实际上 $\theta \neq 0$;公式把摆球看作质点,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。

(b) 分析仪器所要求的条件是否满足了?例如用测高仪测高,要求支架铅直,望远镜平移,不然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 20°C 条件下的,看看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,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(随机误差)

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。

产生偶然误差的原因很多,比如观测时目的物对的不准,平衡点确定的不准,读数不准确,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,振动的影响等等。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能像对待系统误差那样,找出原因并加以排除,只能尽量想法减小。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的统计规律。在大多数物理实验中,

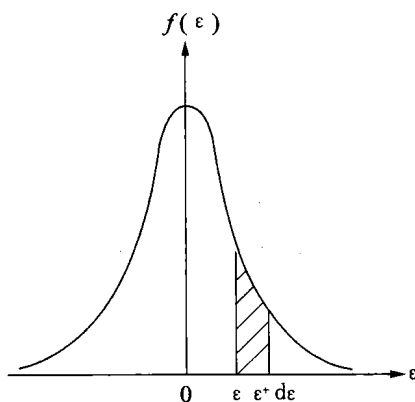


图 II - 1 偶然误差的正态分布曲线

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 II - 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 $f(\epsilon)$,曲线下阴影部分就是误差出现在 ϵ 至 $\epsilon + d\epsilon$ 区间内的概率。根据统计理论可以证明:

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

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

(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 到 20 次,而在物理实验课的教学中则只取 5 到 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那些突出误差,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。刚刚开始进入实验室学习物理实验的学生,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。我们应当努力将其剔除,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。

§ 2—2 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(2-1)式可知,由于真值是无法确定的,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,我们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 类不确定度是由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,我们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

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

当用上式合成不确定度时, 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, 我们还可以用相对不确定度的方法把测量结果表达为

$$x = \bar{x}(1 \pm E_x) \quad (2-6)$$
$$E_x = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\%$$

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, 但不能准确地获得, 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。不确定度评定得是否合理、全面, 是与实验者本身的素质有很大关系的。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。

§ 2—3 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

$$\epsilon_i = x_i - x_0$$

两端求和,可得

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

由误差分布的对称性,当 $n \rightarrow \infty$ 时

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

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

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

就可以作为真值的最佳估计值。因此在多次测量时,我们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

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

来定量地描述,它的几何意义可以从图 II - 2 看得很清楚。

由图 II - 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。也就是说,测量列中的任一测量值的误差小于 σ 的可能性为 68.3%,所以这不仅是对一个测量列的测量精度的定量描述,也是对该测量列中任一测量值的测量精度的定量描述。

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

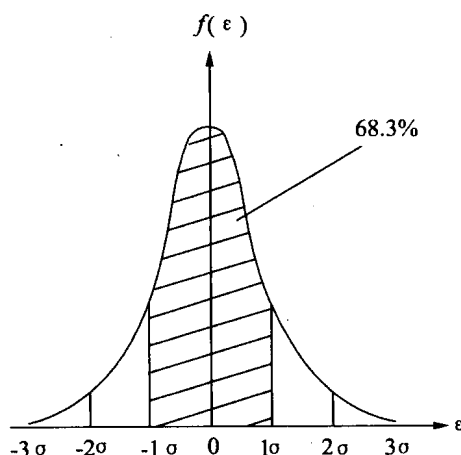


图 II - 2 σ 的几何意义