

普通高等院校“十一五”规划教材

大学物理实验

主 编 张赣源
副主编 张凤林
参 编 许卫兵
主 审 叶民恩

项少辉



北京航空航天大学出版社

普通高等院校“十一五”规划教材

大学物理实验

主 编	张赣源	
副主编	张凤林	
参 编	许卫兵	项少辉
主 审	叶民恩	

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书根据教育部对非物理类理工科物理实验课程教学基本要求,吸取国内同类教材的优点,在编者长期教学经验的基础上,结合本校的实际情况编写而成。

内容包括力学、电学、光学等基础性、综合性、设计性实验,共 19 个。各个实验内容之间没有严格的先后次序,利于安排循环式实验教学,推荐 50~60 学时。

本书可作为普通高等院校特别是三本类院校工科专业的大学物理实验教材,也可作为相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 张赣源主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2009.9

ISBN 978-7-81124-868-5

I. 大… II. 张… 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 145344 号

大学物理实验

主 编 张赣源

副主编 张凤林

参 编 许卫兵 项少辉

主 审 叶民恩

责任编辑 李 青 李冠咏 李徐心

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100191) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpresse@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本: 787×1 092 1/16 印张: 13.75 字数: 352 千字

2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷 印数: 4 000 册

ISBN 978-7-81124-868-5 定价: 25.00 元

前 言

本书根据“高等工业学校物理实验课程教学基本要求”，结合我院具体情况与专业特点，实验室仪器设备情况和教学实践，在不断探索教育改革与不断总结经验基础上编写的。

为了加强学生素质培养与基本技能训练，本课程的实验项目本着精选内容的原则，除确保基础实验外，还适当增加了一些智能型、微机型或接近工程技术的综合实验内容，这样既可使学生得到实验能力的培养，又可开阔眼界，拓宽思路，增强科学技术意识。本教材力求实验原理叙述清晰，使学生在实验过程中有理论依据；仪器描述详细，使学生在充分了解仪器结构原理的基础上，有目的地进行操作与调节；实验步骤明确、层次分明，使绝大部分学生能在教学时间内完成实验任务；每个实验均列有思考题，供学生对实验内容进一步分析讨论和巩固提高之用，也可用做作业题。

全书内容基本上仍按传统惯例排序：第1章绪论；第2章测量误差与实验数据处理；第3章力学实验；第4章电磁学实验；第5章光学和综合实验；附录。

在测量误差及实验数据处理的内容中，本书由过去的平均误差（即一般误差）全面过渡到用标准误差处理。为此，在全书中增加了许多有关标准误差的内容，并采用表格方式列出误差计算公式的表达式，便于学生使用查阅。在各个实验中凡适宜用标准误差进行误差处理的均采用这种方法。必要时可写出误差处理的表达式，逐步引导学生熟悉与掌握用标准误差进行误差处理的方法。

测量误差与实验数据处理是实验课程的重要内容之一，书中用大量篇幅进行讲解，除课程的第一次课集中讲授有关内容外，其余内容可分散到以后各个实验中结合具体内容去学习。

为加强培养学生应用计算机的能力,跟踪现代科技的发展,要逐步引入计算机在物理实验中的应用。为此,本书大量引入用计算机处理实验数据与图像处理等。

有关物理实验的基本仪器及元器件的符号、国家法定计量单位、常用的物理参数及标准偏差表达式等,采用附录形式汇编,供学生参考取用。

本书的编写凝聚着教研室及实验室全体教师与技术人员长期辛勤劳动的成果,并参考了许多兄弟院校的同类教材。

由于编者水平有限,时间较仓促,对于书中存在的缺点和错误,希望读者批评指正。

编 者

2009 年 7 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 科学实验的地位和作用	1
1.2 物理实验的地位和作用	1
1.3 物理实验课的目的与任务	2
1.4 物理实验课的基本程序	3
第 2 章 测量误差与实验数据处理	5
2.1 测量及其误差	5
2.2 随机误差的数学处理方法	12
2.3 有效数字及运算法则	21
2.4 数据处理方法	25
第 3 章 力学实验	37
3.1 杨氏弹性模量的测定	37
3.2 气轨上守恒定律的研究	41
3.3 刚体转动惯量的测定	49
第 4 章 电磁学实验	56
4.1 电表的改装与校正	56
4.2 单双臂两用直流电桥测电阻	62
4.3 用直流电位差计测热电偶温差电动势	68
4.4 电子束的电偏转和磁偏转	75
4.5 电子做螺旋运动——电子荷质比测定	82
4.6 示波器的调节及应用	88
4.7 铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线	101
第 5 章 光学和综合实验	113
5.1 等厚干涉——牛顿环	113
5.2 分光计的调节和三棱镜折射率的测定	120
5.3 用透射光栅测定光波波长	128
5.4 声速的测定	130
5.5 光纤传感器	140
5.6 应变式传感器	150
5.7 电容式传感器	159
5.8 密立根油滴实验——电子电荷测定	167



5.9 光电效应——普朗克常数测定	177
附录 A 力学基本仪器简介	185
A.1 游标原理	185
A.2 螺旋测微原理	187
A.3 螺旋测微计(千分卡尺、分厘卡)	188
A.4 计时仪器	189
A.5 物理天平	190
A.6 电子天平(电子秤)	191
附录 B 电学基本仪器简介	193
B.1 电 源	193
B.2 直流电表	193
B.3 电阻箱	195
B.4 滑线变阻器	197
B.5 常用电气仪表及元件符号	198
附录 C 光学仪器及元器件的维护保养知识	200
C.1 光学系统的维护保养	200
C.2 机械系统的维护和保养	204
C.3 使用光学仪器的注意事项	205
附录 D 中华人民共和国法定计量单位	206
附录 E 一些常用的物理数据表	209
参考文献	214

第1章 绪论

1.1 科学实验的地位和作用

认识来源于实践。科学实验是独立的实践活动之一。它是人们根据一定的研究目的,通过积极的构思,利用科学仪器、设备等物质手段,人为地控制或模拟自然现象,使自然过程或生产过程以比较纯粹的或典型的形式表现出来,从而在有利条件下探索自然规律的一种研究方法。

科学实验的任务主要是:研究人类尚未认识或尚未充分认识的自然过程,发现未知的自然规律,创立新学说、新理论,研制、发明新材料、新方法、新工艺,为生产实践提供科学理论依据,促进生产技术的进步和革命,提高人们改造自然的能力。近代自然科学的重大突破,一般不是直接来自生产实践,往往是通过科学实验这个环节研究的结果。

科学实验既是一切理论研究活动的基础,但又离不开理论的指导,科学理论来源于科学实验,并受科学实验的检验。然而,实验方法的确定,实验数据的处理,以及由实验结果中提出的科学假设,作出的科学结论等,都始终受理论所支配。理论对实验的指导作用,还突出地表现在怎样对待科学探索中的“机遇”。有的科学工作者,由于具有很高的理论修养与较强的洞察力及实事求是的作风,因而对“机遇”所提供的信息十分敏感,能及时作出正确的判断,选择那些看来有希望的现象进行深入的研究。这也是他们富有创造力的表现。相反,有的科学工作者对“机遇”视而不见,或者轻易放过,这是缺乏创造力的表现。

综上所述,科学实验是科学理论的源泉,是自然科学的根本,是工程技术的基础,同时科学理论对实验也起着指导作用。因此,我们要处理好实验和理论的关系,重视科学实验,重视进行科学实验训练的实验课的学习。

1.2 物理实验的地位和作用

物理实验是科学实验的重要组成部分之一。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。热力学、分子物理学的发展,使人类进入热机、蒸汽机时代;电磁学的发展使人类跨入电气化时代;原子物理学、量子力学的发展,促进了半导体、原子核、激光和电子计算机技术的迅速发展。然而,物理学本质上是一门实验科学。300多年前,伽利略和牛顿等学者,以科学实验方法研究自然规律,逐步形成了一门物理科学。从此,一切物理概念的确立,物理规律的发现,物理理论的建立都有赖于实验,并受实验的检验。

在物理学上,如果没有法拉第等科学工作者进行电磁学的实验研究,发现了电磁感应定律

等一系列实验规律,麦克斯韦就不可能建立麦克斯韦方程组。在确立了经典电磁学理论后,麦克斯韦预言了电磁波的存在,经过赫兹的实验研究,证实了电磁波的存在,从而使经典的电磁学理论更为人们所信服。被称为“牛顿以来最伟大的发现之一”的能量量子化概念,就是在人们面对着大量黑体辐射实验事实,遇到了运用经典理论无法克服的困难时,普朗克紧紧抓住了1900年夏天德国物理学家康尔鲍姆和鲁穆斯对热辐射光谱所作的新的精确测量结果,大胆地提出了能量子的假设,运用合理的数学方法,从理论上导出了符合实验结果的黑体辐射公式,为量子力学的发展开辟了道路。

物理实验在物理学本身发展中有着重要的作用,同时在推动各自然科学、工程技术的发展中也起着重要的作用。特别是近代与其他学科相互渗透,发展了许多交叉学科,物理实验的构思、物理实验的方法和技术与化学、生物学、天体学等学科相互结合已经取得许多成果。

因此,作为培养高级工程技术人才的高等学校,不仅要使学生具备比较深广的理论知识,而且要使学生具有较强从事科学实验的能力。物理实验是对高校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修的基础课程,是学生在高等学校受到系统实验技能训练的开端。它在培养学生运用实验手段去发展、观察、分析和研究解决问题的能力方面;在提高学生科学实验素质方面,都起着重要作用。

1.3 物理实验课的目的与任务

物理实验是以物理理论为指导,以实践为基础,以实际操作为手段,以能力培养为主要目的的课程。高等学校是培养人才的场所,人才素质主要表现在知识与能力两个方面。所谓知识就是人们认识自然规律的程度;所谓能力就是分析问题与解决问题的能力(即改造自然的能力)。知识与能力两者为互补关系,相辅相成。知识是能力的基础,无知一定是无能,但有知识并不一定有能力,这里有一个如何将知识应用到实践中去的问题,其实质就是能力问题。我们学习知识的目的是为了应用,所以在学校学习阶段就要注意理论学习与能力培养同步发展,偏废任何一方都是不对的。对能力的培养只有通过实践经验才能提高,实践性很强(能力是不能传授的)。大学物理实验课程的教学,就是实践性教学,整个教学过程就是围绕如何提高学生能力进行的。希望同学们能重视本课程的学习。

大学物理实验作为一门独立的基础课程,它有以下几方面的目的和任务。

1. 巩固基本理论、拓宽知识面

我们所做的实验涉及知识面很广,通过实验不仅可以加深巩固已学过的理论知识,还可以学习许多新的理论知识,尤其可以学习许多实验理论与方法,误差理论,仪器原理及使用方法等有关知识。

2. 提高科学实验能力

实验能力的提高是长期实践的积累过程,不是一朝一夕就能达到的。实验能力主要表现在能根据研究或实验要求,提出合理而且切合实际的研究或实验方案(办法),合理选用仪器,拟定具体的实验程序;并能运用理论知识对研究内容进行初步的分析与判断,应具有新思维与创新能力。

3. 掌握科学实验方法

一个科研课题(或实验项目)有了好的研究方案后,还要有好的测试方案(方法),要有研究



(实验)程序(步骤)才能完成。这就要求要掌握各种研究(或实验)方法才能办到,本课程涉及许多实验方法,如放大法、比较法、补偿法、干涉法、示波法、冲击法、频率法、周期法、转换法和气垫法,掌握这些实验(测量)方法都有现实或潜在的应用前景。

4. 训练科学实验技能

实验技能主要表现在:掌握仪器设备的构造原理、操作调整方法;正确记录和处理实验数据,绘制图表,说明实验结果,撰写合格的实验报告。

5. 培养科学作风

在这里所说的科学作风是泛指思想作风、工作作风与科学作风。这些作风如何,是一个人的将来在事业上是否有成就的重要因素。

这些作风,虽属非智力因素范畴,但对一个人的成长、发展至关重要。通过实验教学,学生自己亲自动手做实验,研究实验,在实践磨练中会碰到许多问题,如何去面对这些问题,解决问题,在处理这些问题的过程中,可以培养学生从事科学实验的素质。包括: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;不怕困难、主动进取的探索精神;遵守操作规程,爱护公共财物的优良品德;以及在实验过程中同学间相互协作、共同探索的协同心理。

1.4 物理实验课的基本程序

1. 实验前的准备(预习)

为了在规定的时间内,高质量地完成实验任务,充分发挥每位学生的主观能动性,一定要做好实验前的预习。

认真阅读实验教材,搞清实验内容、目的和要求,实验原理(包括主要计算公式)和注意事项,实验步骤和操作方法。

根据报告册内容写好预习报告,也就是正式报告的前面部分,一般包括:实验名称、实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容和步骤,注意事项及原始数据记录表格,以便上课前教师检查。

为了使测量数据条理清楚,明确测哪些量,要求预先设计好原始数据的记录表格。

2. 实验操作(进行)

进入实验室,首先要了解实验规则及注意事项,其次就是熟悉仪器和安装调整仪器。

准备就绪后,按实验内容及步骤开始测量,测量的原始数据(一定不要加工或修改)应用钢笔或圆珠笔如实地记录在原始数据记录表上。有效位数表示要正确,数据之间留有适当的间隙,以便补充,如果确是记录错误,应用单划线划掉,在旁边写上正确值,不允许涂改数据,更不允许抄袭他人数据,不要忘记记录有关的实验环境条件,仪器的精度、规格及测量量的单位。原始数据的优劣决定着实验的成败,读数时务必认真仔细。实验每人一组仪器,如需两人同做一组实验,要互相配合,分工协作,既不要其中一人处于被动,更不要一人包办代替。

不要用铅笔记录,让自己留有涂抹的余地。切忌将数据记录在草稿纸上或书上,然后再抄写在记录表格内,这样容易出错,况且,这已不是原始记录了。要注意纠正自己的不良习惯,不断培养良好的科学作风。实验结束时,暂不要破坏测试条件,将记录的数据请教师审阅签字,如发现错误数据时,要重新进行测量。最后整理好仪器,经教师同意后才能离开实验室。

3. 书写实验报告

实验报告是实验工作的总结,要用简明的形式将实验工作完整而又准确地表达出来,实验报告要求文字通顺,字迹端正,图表规矩,结果正确,讨论认真。应养成实验完后尽早写出实验报告的习惯,因为这样做可以收到事半功倍的效果。

完整的实验报告应包括下述几部分内容。

① 实验名称。

② 实验目的。

③ 实验原理:简明扼要地说明实验原理,并列出现实验所要用的主要公式、电路图或光路图,若教材内容与实际有所不符,应以实际为准。

④ 实验仪器:列出主要仪器名称及其型号、规格、精度(或分度值)。

⑤ 实验步骤:按实际实验过程,扼要地说明实验的关键步骤和安全注意事项。

⑥ 实验数据记录:实验中全部有用的原始数据要尽量以表格的形式列出,并正确地表示出有效数字和单位。

⑦ 数据处理:数据要求计算出最后的测量结果,可采用列表法和作图法;在计算过程中,应写出相应的计算公式,然后代入相应数据进行运算。

⑧ 实验结果:最后的结果应包括测量值、误差和单位。如果实验是为了观察某一物理现象或者观察某一物理规律,则可以扼要地写出实验结论。

⑨ 讨论与分析:回答实验思考题;描述实验中观察到的异常现象及可能的解释;分析实验误差的主要来源;对实验仪器和方法的建议等,还可以谈谈实验的心得体会。

以上是对报告的一般要求,不同实验可根据具体情况有所侧重和取舍,不必千篇一律。

第2章 测量误差与实验数据处理

2.1 测量及其误差

2.1.1 测量的概念

在科学实验中要进行各种物理量的测量,测量是人类对自然界中现象和实体取得数据概念的一种认识过程。所谓测量就是被测的物理量与规定作为标准单位的同类物理量(或称为标准量)通过一定方法进行比较,其倍数即为被测物理量的测量值。

1. 对测量概念要明确以下几点

同类量——就是被测的量与标准量一定要是同类量才能进行比较(测量)。

例如:米尺 $\leftrightarrow$ 长度,砝码 $\leftrightarrow$ 质量,停表 $\leftrightarrow$ 时间。

用米尺绝不能测量出时间来,因为它们不是同类量。

标准量——测量中所选用的标准量(标准单位),其标准的内涵只有相对意义,而没有绝对意义。在一定条件下认作的标准量,不能认为是绝对标准的(没有误差),只是在测量的过程中将所选用的量具认为是标准量。很显然所选定标准单位越小,所测数值的位数就越多。

单位——一个测量数据不同于一个数值,它是由数值和单位两部分组成的,一个数值有了单位才有一定的物理意义,才称得上是一个物理量。

2. 根据获得测量结果的方法不同,测量分为直接测量和间接测量

直接测量——由仪器或量具可以直接进行读数的(一次得出测量结果),称为直接测量。

例如:用米尺测量物体的长度,用停表测出物体运动的时间,用电流表测出电路中的电流等,这都是直接测量,该量为直接测量量。

按直接测量方式来分,又可分成单次测量与多次测量。这两种测量结果的误差处理方法有所不同。多次测量一般均为等精度测量(即测量原理、方法、仪器、条件与人员均相同的测量),测量所得的各数据称为测量列(用 x_i 表示)。

间接测量——不能用仪器或量具直接测量得出结果,必须通过某些直接测量量,再通过函数关系式进行计算才能得出结果的测量。

例如:用单摆法测量重力加速度 g 。

函数式为 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ 。在此,必须测量摆长 l 与周期 T ,才能算出重力加速度 g 。

2.1.2 误差概念及表示方法

任何物质都有自身的各种各样的特性,反映这些特性的物理量所具有的客观的真实数值称为这些物理量的真值(用 x_0 表示)。测量的目的就是要力求得到真值,能否找到真值呢?答案是否定的。因为测量总是依据一定的理论和方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的人进行的。在实验测量过程中,由于受到测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员的水平以及各种因素的限制,使测量结果与客观存在的真值不可能完全相同,实验中所测得的只能是某些物理量的近似值,也就是说任何一种测量结果的测量值与客观存在的真值之间总会或多或少地存在一定的差值。这种差值称为该测量值的测量误差,或称测量值的绝对误差,简称误差。由于任何任何测量均存在误差,测量值都是近似值,只是近似程度不同而已,就误差本身而言具有绝对性,但我们的研究与讨论只涉及误差的相对性,就是研究在某种条件下其误差范围有多大,测量结果的可靠程度如何,如何估算、表示及处理这些误差,这些都是要研究与讨论的问题。

1. 误差表示

(绝对)误差 = |测量值 - 真值|

$$\Delta = |x_{\text{测}} - x_0|$$

偏差 = |测量值 - 算术平均值|

$$\Delta x = |x_{\text{测}} - \bar{x}|$$

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i$$

式中, x_0 ——待测量客观存在的真值;

$\bar{x}$ ——待测量的算术平均值(最佳值),即对待测量 x 进行等精度的 n 次测量,得出测量值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 则算术平均值 $\bar{x}$ 为

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

$\overline{\Delta x}$ ——算术平均偏差;

Δx ——偏差(测量值与平均值之差);

Δ ——误差(测量值与真值之差);

$x_{\text{测}}$ ——在一定条件下的测量值。

2. 结果表示

$$x = (x_{\text{测}} \pm \Delta x) \text{单位}$$

式中, x ——表示待测量的量值。 $x_{\text{测}}$ 、 Δx 与单位是测量结果表示的三要素。

其中, Δ 、 Δx 、 $\overline{\Delta x}$ 都是在一定的条件下对待测量进行测量时的误差(范围),叫误差界,属于绝对误差范畴,对它的计算(估算)有很多方法,其中较常用的有平均误差法与标准误差法两种。采用方法不同则误差符号也不同,以示区别。本课程重点讨论与应用标准误差法。

$\pm \overline{\Delta x}$ 表示误差有时正,有时负,即待测量的测量值 $x_{\text{测}}$, 可能比客观真值 x_0 大,也可能更小。

那么到底真值 x_0 落入 $(x_{\text{测}} \pm \Delta x)$ 范围内的概率有多大呢? 这就要看计算 Δx 采用哪一种方法,若采用平均误差,则概率为 57.5%;若采用标准误差,则概率为 68.3%。

由上述可知,误差范围越小,测量精度就越高,即该范围缩小了,但真值 x_0 落入该范围的概率却是一样的,如图 2-1 所示。

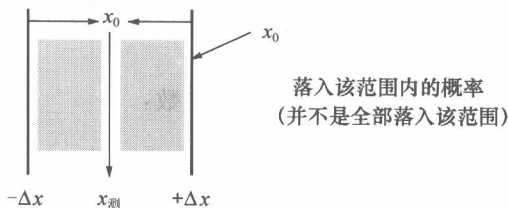


图 2-1 真值 x_0 落入 $(x_{\text{测}} \pm \Delta x)$ 范围的概率

3. 结果表示三要素的处理要求

① 对于误差界 Δx ,只取一位,采用宁大勿小原则,对最大位后面的数采取“十进位法”,即“逢数进 1”,以便确保安全。

② 对于测量值 $x_{\text{测}}$,首先应按正确的测量方法得到测量值,或经过计算得出实验值。这个测量值保留到哪一位呢?这就要看该误差界(Δx)是在哪一位。要求测量值末位要与误差界对齐,对齐末位后面的数(主要指后面的第一位数)采取“四舍六入,五凑偶”的规则。所谓“五凑偶”就是当被处理的数为“五”时,就要看保留数的末位是奇数还是偶数,若是奇数就进一位(凑偶),是偶数就弃掉。

③ 单位,只有写出被测量的单位,才有确切的物理内涵。

例如: $l_m = 53.465 \text{ cm}$; $\Delta l = 0.0213 \text{ cm}$,取 $\Delta l = 0.03 \text{ cm}$ (一位),则

$$l = (53.46 \pm 0.03) \text{ cm}$$

例如: $l_m = 53.455 \text{ cm}$; $\Delta l = 0.0502 \text{ cm}$,则

$$l = (53.46 \pm 0.05) \text{ cm}$$

4. 相对误差

绝对误差 Δ 反映的是整个测量量的误差范围,直观性强,反映测量精度的通用性差,只有引出相对误差才能真正反映测量精度的高低。

相对误差:

$$E = \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量值}} = \frac{\Delta x}{x_{\text{测}}} = \frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}}$$

它反映的是一个单位被测量的误差,与被测量的大小无关,其大小是衡量测量优劣的重要标志。

如果待测量有理论值或公认值,则用百分误差来表示测量的优劣。公式如下

$$\text{百分误差} = \frac{|\text{测量最佳值} - \text{公认值}|}{\text{公认值}} \times 100\%$$

$$\text{即} \quad A = \frac{|\bar{x} - x_0|}{x_0} \times 100\%$$

例如:① $l_1 = 35.1 \text{ cm}$, $\Delta l_1 = 0.1 \text{ cm}$;

② $l_2 = 43.20 \text{ m}$, $\Delta l_2 = 0.01 \text{ m}$ 。

$$\text{相对误差: } E_1 = \frac{\Delta l_1}{l_1} = \frac{0.1}{35.1} = 0.28\%$$

$$E_2 = \frac{\Delta l_2}{l_2} = \frac{0.01}{43.20} = 0.023\%$$

结果:虽然 $\Delta l_2 > \Delta l_1$ (10 倍), 但 $E_1 > E_2$, 所以 l_2 的测量精度比 l_1 要高。

5. 实验数据

要完整表述一个实验数据的结果应有如下 4 个参数:

- ① 实验结果的测量值 $x_{\text{测}}$ (或 x_0)。
- ② (绝对)误差 Δx 。平均误差法用 $\eta_{\text{仪}}、\eta、\eta_x、\eta_{\bar{x}}$ 表示;标准误差法用 $\sigma_{\text{仪}}、\sigma、\sigma_x、\sigma_{\bar{x}}$ 表示。
- ③ 相对误差 $E = \frac{\Delta x}{\bar{x}}$, 百分误差 $A = \left| \frac{\bar{x} - x_0}{x_0} \right|$ 。
- ④ 结果表示: $x = (x_{\text{测}} \pm \Delta x)$ 单位; $\bar{x} = (\bar{x} \pm \Delta x)$ 单位。

若已知 $x_{\text{测}}$ 与相对误差 E , 则 $\Delta x = x_{\text{测}} \times E$ 。

2.1.3 误差及产生的原因

误差产生有多方面的原因, 根据误差的性质和产生的原因, 可将误差分为系统误差与随机误差两大类。

1. 系统误差

(1) 系统误差的特征及产生原因

系统误差的特点是: 在相同的条件下 (包括方法、仪器、环境和人员), 对同一量进行多次测量时, 误差的绝对值和符号 (正、负) 保持不变。测量条件改变时, 误差亦按一定的规律变化。

系统误差的来源有以下几个方面:

- ① 仪器的固有缺陷。例如: 刻度不准; 零点没有调准; 仪器水平或铅直未调整; 砝码未经校准等。
- ② 实验方法不完善或这种方法所依据的理论本身具有近似性。例如: 称重量时未考虑空气浮力; 采用伏安法测量电阻时没有考虑电表内阻的影响等。
- ③ 环境的影响或没有按规定的条件使用仪器。例如: 标准电池是以 20°C 时的电动势数值作为标准值的, 若在 30°C 条件下使用时, 不加以修正, 就引入了系统误差。
- ④ 实验者生理或心理特点, 或缺乏经验引入的误差。例如: 有的人习惯于侧坐斜视读数, 就会使估读的数值偏大或偏小等。

系统误差的减小或修正是属于技能问题。可以在实验前、实验中及实验后进行。例如: 实验前对测量仪器进行校准, 使方法完善, 对人员进行专门训练等; 在实验中采取一定方法对系统误差加以补偿; 实验后在结果处理中进行修正等。

虽然系统误差的发现、消除、减小或修正是一个技能问题。但是, 要找出其原因, 寻求其规律决非轻而易举之事。这是因为:

- ① 实验条件一经确定, 系统误差就获得了一个客观上的恒定值, 在此条件下进行多次测量并不能发现该系统误差;
- ② 在一个具体的测量过程中, 系统误差往往会和随机误差同时存在, 这给分析是否存在系统误差带来了很大的困难。

能否识别和消除系统误差与实验者的经验和实际知识有着密切关系。因此, 对于初学实

验者来说,应该从一开始就逐步地积累这方面的感性知识,在实验时要分析:采用这种实验方法(理论)、使用这套仪器、运用这种操作技术会不会对测量结果引入系统误差。

(2) 系统误差的处理

系统误差的处理是一个比较复杂的问题,没有一个简单的公式,需要根据具体情况来具体处理。首先要对误差进行判别,然后要使误差尽量地减小到可忽略的程度,这主要取决于实验者的经验、学识和技巧。一般可以从以下几个方面进行处理:

- ① 检验、判别系统误差的存在。
- ② 分析造成误差的原因,并在测量前尽力消除。
- ③ 测量过程中采取一定方法或技术措施,尽力消除或减小系统误差的影响。
- ④ 估计剩余系统误差的数值范围,对于可定系统误差,可用修正值(包括修正公式和修正曲线)进行修正;对于未定系统误差,则尽量估计出误差限,以掌握它对测量结果的影响。

1) 分析系统误差的方法

① 对比分析法

对比分析法运用于分析不变的可定系统误差。

实验方法对比:用不同的实验方法测量同一个量,看结果是否一致。如分别用自由落体法、单摆(或复摆)法和气垫导轨法测同一地区的重力加速度,若在随机误差范围内三者所得结果不一致,那么其中至少有两个存在系统误差。

仪器的对比:用不同的仪器测量同一个量,看其结果是否一致。如用一个电流表与另一个标准表串联入同一电路,读数不一致,就能以标准表找出该电流表的系统误差修正值。

改变测量方法:用不同的测量方法测同一个量,看其结果是否一致。如霍耳效应实验中,将纵向电流正向、反向通入,分别测量霍耳电势差,就能发现电极位置不对称引起的不等值电势差。

改变实验中某些参量的数值:有时为了判断某个因素是否会带来系统误差,就有意改变有关参量进行测量。如改变摆角测周期,可看看摆角大小对周期的影响。

改变实验条件:如电桥法测量电阻,可将 R_x 与 R_s 交换,判断有无系统误差。

两个人对比观测:可发现人员误差。

② 数据分析法——残差观察法

适用于分析有规律变化的系统误差。

在实验测量过程中,系统误差和随机误差往往是同时存在的,这给发现和分析系统误差带来很大的困难。在测量过程中产生的系统误差,一般常用残差观察法来分析判断。

图解分析。若有一组测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 其平均值为 $\bar{x}$, 各测量值的残差为 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$, 以 Δx_i 作图进行观察分析,若 Δx_i 大体上是正负相同且无显著变化规律,如图 2-2 所示,说明系统误差很小。若 Δx_i 出现了如图 2-3 中图(a)~图(d)所示的各种有规律的变化,则可判定存在系统误差。若 Δx_i 出现了如图 2-4 所示的变化情况,则说明存在周期性的系统误差。

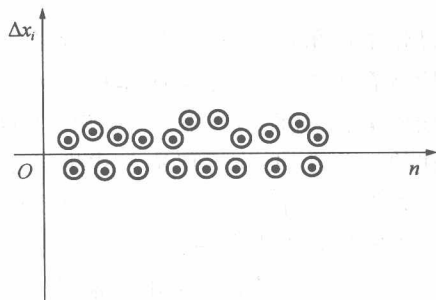
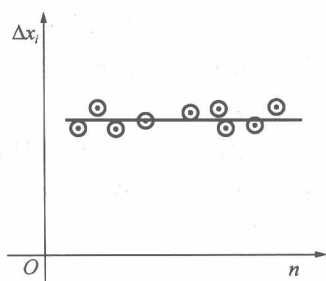
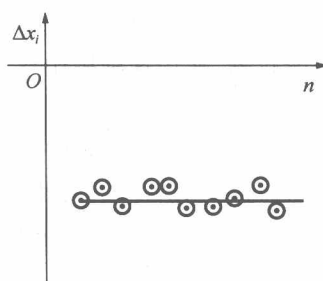


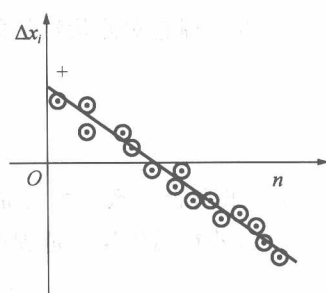
图 2-2 系统误差较小



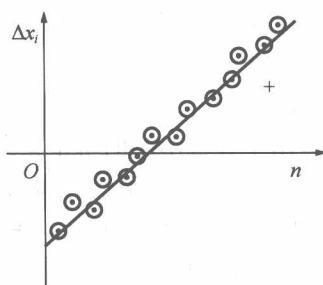
(a) 正系统误差



(b) 负系统误差



(c) 各次测量的残差呈递减线性分布



(d) 各次测量的残差呈递增线性分布

图 2-3 存在系统误差

列表分析。列表分析时,可用下列两个准则判断:

准则 1 将测量数据依次排列,若残差大小有规则地向一个方向变化,则说明测量中有线性系统误差存在;若中间有微小波动,则说明伴有随机误差影响。

准则 2 将测量数据依次排列,若残差符号作有规律交替变化,则测量中有周期性系统误差存在;若中间有微小波动,则说明伴有随机误差影响。

③ 理论分析法

分析实验条件是否能满足理论公式所要求的条件。例如,单摆实验中,使用公式 $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, 这是作了摆角 $\theta = 0$ 的近似,实际操作时 $\theta \neq 0$;公式把摆球看作质点,实际摆球体积 $V \neq 0$;公式忽略了摆线质量、空气浮力与阻力等,实际上这些都是客观存在的。总之,要分析理论公式推导中每一步所要求的条件与实际是否一致,每一个实际测得的量与公式中的量是否真正一致等因素。

2) 消除系统误差影响的途径

从原则上讲,消除系统误差影响的途径,首先要设法使它不产生。如果做不到,就应在测量中设法去抵消它的影响,或减小它,或进行修正。

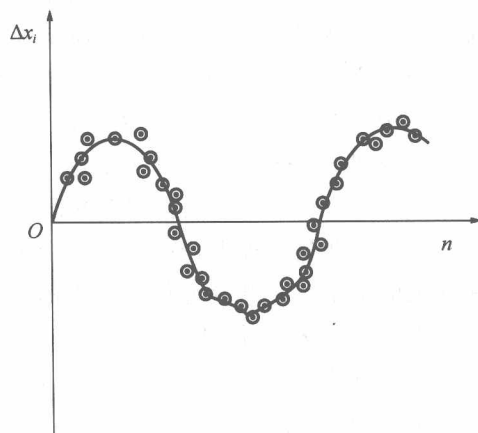


图 2-4 周期性的系统误差