



普通高等学校基础课程类应用型规划教材

大学物理实验

北京邮电大学世纪学院数理教研室 编

徐润君 汪 成 主编



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

普通高等学校基础课程类应用型规划教材

大学物理实验

北京邮电大学世纪学院数理教研室 编
徐润君 汪 威 主 编

北京邮电大学出版社
· 北京 ·

内 容 简 介

本书是按照教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导委员会制定的《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》，结合北京邮电大学世纪学院物理实验教学实践编写而成。

全书共分6章，包括物理实验基础知识和以层次划分的基础性实验、综合与提高性实验、研究与设计性实验等内容。

本书可作为高等院校工科类各专业的物理实验教学用书或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/徐润君,汪成主编.--北京:北京邮电大学出版社,2010.1

ISBN 978-7-5635-2173-9

I. ①大… II. ①徐…②汪… 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(2010)第 006298 号

书 名: 大学物理实验

主 编: 徐润君 汪 成

责任编辑: 王丹丹

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(邮编:100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市梦宇印务有限公司印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 13

字 数: 317 千字

版 次: 2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-2173-9

定 价: 25.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

大学物理实验是高等工科院校学生进行科学实验基本训练的一门必修课程,是学生学习实验知识、实验方法、实验技能和进行实验数据处理与分析的开端。

本书是按照教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导委员会制定的《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》,结合北京邮电大学世纪学院物理实验教学实践编写而成。

本书共分6章,第1章介绍大学物理实验教学的作用、地位和要求;第2章介绍实验数据的主要处理方法,并以由国际权威组织制定的《不确定度表示指南》为依据,适当引入不确定度的概念;第3章介绍物理实验的基本仪器和操作规则;第4章通过力学、电磁学和光学的基础性实验让学生初步了解长度、电流、电压等物理量的测量方法和电表、示波器、分光计等基本仪器的操作方法;第5章为综合与提高性实验;第6章为研究与设计性实验。

为了使学生在实验知识、实验方法、实验技能各方面能够得到由浅入深、由易到难、由简到繁、循序渐进的系统训练,达到培养学生进行科学实验的能力、提高科学实验素养的目的,基础性实验力求做到实验原理解释完整、仪器介绍明了扼要、实验步骤叙述清晰、技术指导尽量具体;而在综合与提高性实验中,让学生在复习和熟练掌握已使用过的基本测量仪器和方法的基础上,重点突出原理和思路,并将一些细节问题留给学生去思考和观察;对于研究性实验,只给出研究对象和方法,留下让学生发挥的空间,并尽量与学生今后的信息专业课知识联系;对于设计性实验,主要着眼于培养学生的独立思考能力、应用物理知识的能力和创新能力。

大学物理实验课程是一项集体的事业,是所有物理实验工作者长期不懈努力、日积月累、与时俱进、不断改革的成果。每台仪器的设计、每个实验的安排,都凝聚着众多物理实验工作者的智慧。在本教材编写过程中,参考了兄弟院校的有关教材,汲取了他们大学物理实验教学改革的经验。更重要的是,大学物理实验教材的编写离不开本单位实验室的建设与发展,北京邮电大学物理实验室的老师们为世纪学院物理实验室的建设和实验讲义的编写作了大量工作,本书就是在世纪学院原《大学物理实验讲义》的基础上,进一步结合世纪学院学生的特点进行调整、更新、充实编写而成的。

本书由徐润君、汪成编写。由于作者水平有限,不足之处或错误在所难免,恳请读者和同仁指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 大学物理实验教学的地位、作用和要求	1
1.1.1 大学物理实验教学的地位	1
1.1.2 大学物理实验教学的作用	1
1.1.3 大学物理实验教学的目的是任务	1
1.1.4 大学物理实验教学内容的基本要求	2
1.2 大学物理实验课程教学环节及实验规则	2
1.2.1 课程进行的 3 个教学环节	2
1.2.2 实验室规则与学生实验守则	4
第 2 章 测量误差与实验数据处理基础知识	5
2.1 测量与误差	5
2.1.1 测量	5
2.1.2 误差的基本概念	6
2.1.3 误差分类	6
2.1.4 准确度、精密度和精确度	7
2.2 误差处理	7
2.2.1 系统误差	7
2.2.2 随机误差	9
2.3 测量不确定度与测量结果表示	12
2.3.1 不确定度概念及分类	12
2.3.2 直接测量的不确定度	14
2.3.3 间接测量的不确定度	15
2.3.4 误差的等分配原则和仪器精度的选择	18
2.4 有效数字及其运算法则	18
2.4.1 有效数字	18
2.4.2 有效数字的近似运算法则	19
2.4.3 数据的修约和测量结果的表达	20
2.5 数据处理的基本方法	21

2.5.1	列表法	21
2.5.2	作图法	21
2.5.3	图解法	23
2.5.4	逐差法	24
2.5.5	最小二乘法	24
练习题		26
第3章 物理实验基本仪器和基本操作规则		28
3.1	力学测量基本仪器	28
3.1.1	长度的测量仪器	28
3.1.2	质量和时间的测量	31
3.2	电学实验基本仪器	31
3.2.1	常用电源简介	31
3.2.2	变阻器	33
3.2.3	电表	34
3.2.4	标准电池	36
3.2.5	示波器	37
3.2.6	常用电器元件符号	37
3.2.7	电学实验基本规则	38
3.3	光学实验基本仪器	38
3.3.1	光学元件和仪器的维护	39
3.3.2	光学实验中的消视差	39
3.3.3	光具座与共轴调整	40
3.3.4	常用光源	41
3.3.5	分光计	42
3.3.6	滤光片	42
3.4	常用实验方法	42
3.4.1	物理量的基本测量方法	43
3.4.2	物理实验中的基本调整与操作技术	45
第4章 基础性实验		46
实验1	用拉伸法测定钢丝的杨氏模量	46
实验2	用玻尔共振仪研究受迫振动	51
实验3	伏安法测电阻	59
实验4	直流电桥测电阻	63
实验5	灵敏电流计特性的研究	66
实验6	电位差计的使用和电表的校准	74
实验7	示波器的使用	80
实验8	空气中声速的测定	88

实验 9 霍尔元件测磁场	96
实验 10 铁磁材料的磁滞回线研究	101
实验 11 硅光电池光照特性的研究	107
实验 12 分光计的调整和三棱镜折射率的测定	111
第 5 章 综合与提高性实验	121
实验 13 超声波探测实验	121
实验 14 音频信号的光纤传输	129
实验 15 光栅的衍射	138
实验 16 光的偏振	141
实验 17 迈克尔逊干涉仪的调整与使用	149
实验 18 液晶的电光效应	156
实验 19 用非线性电路研究混沌现象	159
实验 20 弗兰克—赫兹实验	164
第 6 章 研究与设计性实验	172
实验 21 多量程电表的设计	172
实验 22 RLC 电路稳态特性的研究	176
实验 23 RLC 电路暂态特性的研究	180
实验 24 用交流电桥测电容和电感	185
实验 25 薄透镜焦距的测定	188
实验 26 望远镜的设计	191
实验 27 光栅对斜入射光线衍射的研究	193
实验 28 用迈克尔逊干涉仪测固体折射率	194
附录	196

第1章 绪 论

1.1 大学物理实验教学的地位、作用和要求

1.1.1 大学物理实验教学的地位

大学物理实验课是高等理工科院校对学生进行基本训练的必修课程,与大学物理理论课一起构成基础物理学知识统一的整体。由于大学物理实验具有完整的、科学的实验教学课程体系,因此也是一门独立的课程,是学生进入大学后接受系统实验技能训练的开端,也是后续实验课的基础。

1.1.2 大学物理实验教学的作用

物理学是一门以实验为基础的科学。物理规律的发现、物理理论的建立均来自于严格的科学实验,并得到实验的检验。例如,光的干涉实验使光的波动学说得以确立;赫兹的电磁波实验使麦克斯韦提出的电磁理论获得普遍承认;在 α 粒子散射实验的基础上,卢瑟福提出原子核型结构;杨振宁、李政道于1956年提出了基本粒子在“弱相互作用下的宇称不守恒”理论,经过实验物理学家吴健雄用实验验证后才被同行学者承认并因此获得了诺贝尔奖。实践证明,物理实验是物理学发展的动力。在物理学的发展进程中,物理实验和物理理论始终是相互促进、相互制约、共同发展的。

大学物理实验不是简单地重复前人已经做过的实验,更重要的是汲取其中的物理思想,卓越的实验设计、巧妙的物理构思、高超的测量技术、精心的数据处理、精辟的分析判断为人们展示了极其丰富的物理思想和科学方法,这已成为人类伟大思想宝库中的重要组成部分。实践也证明,实验是人们认识自然和改造客观世界的基本手段。科学技术越进步,科学实验就显得越重要,任何一种新技术、新材料、新工艺、新产品都必须通过实验才能获得。因此,对于理工科的学生来说,物理实验的知识技能是必不可少的。

1.1.3 大学物理实验教学的目的和任务

按照国家教育部颁布的《高等学校工科本科物理实验课程教学基本要求》,本课程的教学任务是:使学生在中学物理实验的基础上,按照循序渐进的原则,学习物理实验知识和方法,得到实验技能的训练,从而初步了解科学实验的主要过程和基本方法,为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。具体来说,表现在以下几方面。

(1) 通过对实验现象的观察、测量和分析,学习物理实验知识,加深对物理学原理的理

解和记忆。

(2) 培养学生独立进行科学实验的能力,如通过课前阅读教材或资料准备实验可以培养学生的自学能力,通过实验操作可以培养学生理论联系实际的动手能力,通过观察、分析现象可以培养学生的思维判断能力,通过正确处理实验数据、撰写合格实验报告可以培养学生的科研总结能力,通过灵活运用已有知识进行实验设计可以培养学生的创新能力等。

(3) 培养学生严肃认真的工作作风、实事求是的科学态度、良好的实验习惯和遵纪守法、爱护公共财物的优良品德。

1.1.4 大学物理实验教学内容的基本要求

(1) 了解常用的实验仪器(如千分尺、游标卡尺、温度计、电表、示波器、常用电源与光源、分光计等)的构造原理,掌握操作方法。

(2) 学会测量基本物理量(如长度、时间、角度、温度、电流、电压、电阻、电磁场等)。

(3) 掌握基本的实验方法(如比较法、放大法、模拟法、补偿法、转换法等)和操作技术(如按照电路图正确接线、仪器的零位调整、光路的共轴调整等)。

(4) 掌握测量误差的基本知识与数据处理的基本方法(如列表法、作图法、逐差法、最小二乘法等)。

1.2 大学物理实验课程教学环节及实验规则

1.2.1 课程进行的3个教学环节

对每一个实验,从准备工作开始,经过在实验室进行实验,直到提交实验报告,才算最后完成。要取得良好的效果,就必须遵循一定的程序,按照一定的要求,认真做好每一个步骤的工作。

1. 实验课前预习,写出本次实验的预习报告

实验能否顺利进行并取得预期的结果,很大程度上取决于预习是否充分。在预习时,要仔细阅读实验教材,复习相关的物理学理论,明确实验目的和要求,了解实验步骤、实验过程中应观察的现象和须记录的数据,在“实验报告纸”上写出合格的预习报告。

(1) 预习报告内容

① 实验名称。

② 实验目的。

③ 实验原理。阐明实验的理论要点,写出待测量的主要计算公式,画出有关装置图(如电路图、光路图等)。

④ 实验仪器。列出主要仪器的名称、型号、规格、精度等级等。

⑤ 实验内容及步骤。写出主要实验内容、关键步骤和注意事项。

⑥ 数据表格。按照实验内容画出有关表格,以便实验时记录数据。

⑦ 阅读思考题。

(2) 预习报告的要求

① 在认真阅读实验教材的基础上写预习报告,不得抄袭别人的预习报告。

② 写预习报告要用专用的“实验报告纸”，不得用不合要求的纸。

③ 字迹要工整，画图要用直尺、圆规和曲线板。

注：每次上课前将预习报告交给任课教师检查，不合格者不能做实验。

2. 实验课操作

(1) 实验的准备工作

对照实验教材，检查并熟悉仪器的种类、数量、规格、操作规则和注意事项。对预习时不理解或理解不深的内容，重新阅读实验教材的有关部分，并对预习报告作必要的修改。

在实验正式开始前，应按照操作方便、安全可靠的原则，将仪器摆放在实验桌上，连接线路，并把仪器置于初始状态。例如，把仪器调水平、电表指针调零、选择适当的量程、仪器的输出调到最小等。一切准备就绪后方可实验。

(2) 观察和测量

完成仪器装置的检查后，可以试运行一下，检查各种仪器能否正常工作，定性地观察实验结果是否合理。如发现意外，应及时排除。若电学仪器冒烟，发出焦糊气味，仪表超出量程，温度上升过快等，应立即切断电源，检查原因或报告教师加以排除。确认所有仪器工作均正常后，再进行观察和测量，记下观察到的现象和测量所得的原始数据。

记录原始数据的有效数字应正确反映仪器的精密度。除测量数据外，还应记录与实验结果有关的环境条件，如温度、湿度、大气压强等。在实验中出现的现象是分析实验结果的重要依据之一，应该如实、认真地记录。要对现象和原始数据及时进行分析和思考。如果发现出乎意料或不合理的现象和数据，要重复观察和测量，并请教指导教师。

(3) 课上实验的要求

① 学生要在上课前到达实验室，不得迟到。因病、因事不能上课的学生，要有医务室或所在院系出具的假条，才予准假，并及时在实验室开放时补做。

② 课上认真听教师讲解，按照实验步骤操作仪器，未经教师同意不得随意拿取别组仪器，认真记录数据，完成实验后，由教师检查签字。

③ 教师签完字后，学生要拆线路、整理仪器，将仪器恢复课前原样，捡拾桌面和地面的废弃物，经教师同意后，方可离开实验室。

注：无任课教师签字的数据无效。

3. 撰写实验报告

如何写好一份合格的实验报告，是实验课的一项重要基本功训练。学习实验报告的写作将为今后科学论文的撰写打下基础。

(1) 实验报告的内容

① 本次实验的预习报告。

② 有教师签字的数据表。

③ 数据处理过程和结果(包含计算公式、简单计算过程、作图、不确定度计算、结果表示等)。实验数据一般采用表格记录，发生的现象用文字记录，所作图表应符合规范。实验结果应按标准格式书写，实验结果中有效数字的位数应正确反映实验结果的精密度或不确定度。

④ 对实验结果进行必要的讨论，分析误差来源，回答思考题，总结实验体会。

(2) 实验报告的要求

① 实验报告要求独立完成，认真进行数据处理，不得抄袭别人的结果。

② 纸面要整洁,字迹工整,用作图法处理数据时,要用坐标纸。

③ 按时交实验报告。每次实验课时交上次实验报告,未经教师同意,过期再交者实验报告无效。

1.2.2 实验室规则与学生实验守则

(1) 做好课前预习,按时、按组上实验课,要独立完成实验和实验报告。

(2) 遵守实验室制度,注意用电安全。

(3) 保持实验室安静、清洁,不得将饮料、食物带入实验室。实验完毕后整理好仪器,做好值日。

(4) 爱护学校财产,因个人原因损坏仪器设备,要按学校规定予以赔偿。

(5) 严禁弄虚作假,如发现私自涂改数据或抄袭他人报告者,本次实验按零分计。

(6) 未写预习报告或迟到 20 分钟以上者,不准进入实验室。

(7) 无故旷课者按零分处理。

第2章 测量误差与实验数据处理基础知识



物理实验包括在实验室人为再现自然界的物理现象、寻找物理规律、对物理量进行测量及数据处理3个方面。本章主要介绍测量与误差的概念、随机误差的估算、不确定度的概念与计算、有效数字的概念与计算、常用的数据处理方法等内容。通过本章的学习可以使學生掌握对测量所得数据进行处理的方法,包括实验数据的记录、运算和整理归纳,以及找出各数值之间的相互联系;对测量所得结果能够进行分析和解释,评估结果的可靠程度,并用正确的方式表达实验结果。这是进行大学物理实验前必备的知识,也是今后从事科学实验所必须学习和掌握的。

应当说明的是,有关误差处理的深入讨论涉及计量学和数理统计等理论,本章只引用其中的某些结论和计算公式,更详细的探讨有待于后续课程进行。

2.1 测量与误差

2.1.1 测量

测量是进行科学实验必不可少的环节。所谓测量是指借助仪器将待测量与选作计量单位的同类量进行比较,从而估计待测量是该计量单位的多少倍的过程。完整的测量结果应给出被测量的最佳估计值、单位以及测量的不确定度。

1. 直接测量和间接测量

(1) 直接测量 是将待测量与标准量具进行比较,直接得到待测量大小的过程。比如用米尺测量长度,用天平称质量,用伏特表测量电压等都是直接测量。

(2) 间接测量 是指由若干直接测量的物理量经过一定函数运算后获得待测量大小的过程。例如通过测量物体的质量 m 和体积 V ,由公式 $\rho = \frac{m}{V}$ 计算得到的密度 ρ 就属于间接测量。物理实验中大多数测量是间接测量。

一个物理量的测量是直接测量还是间接测量并不是绝对的,而是与测量方法有关。如

果通过测量电流和电压算出某元件的电功率,这时电功率的测量就是间接测量;如果用功率表来测量电功率就变成了直接测量。无可置疑的是,随着科学技术的发展,越来越多的物理量将有可能进行直接测量。

2. 等精度测量与不等精度测量

(1) 等精度测量 在完全相同的条件下,对同一个待测量进行多次重复的测量。物理实验中进行的多次测量一般都采用等精度测量。

(2) 不等精度测量 是在不完全相同的条件下,对同一个待测量进行多次重复的测量。例如:测量条件不同、测量仪器改变、测量方法改变等。

2.1.2 误差的基本概念

1. 真值

被测物理量所具有的客观真实数值(简称真值)。

由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的限制,我们只能获得该物理量的近似值。因而真值是一个理想的概念,一般是无法得到的,但在某些特定的情况下,真值又是可知的。例如,三角形的三个内角和为 180° ;一个圆周角为 360° 等。所以在计算误差时,一般用约定真值来代替。

约定真值是一个接近真值的值,它与真值之差可忽略不计。实际测量中可以在没有系统误差的情况下,足够多次的测量值之平均值,或理论值、国际计量大会通过的公认值,或高一级的“标准”仪器的测量值来作为约定真值。

2. 绝对误差和相对误差

测量结果与被观测量的客观真实值(真值)之间存在着一定的偏离,测量值与客观真实值(真值)之差称为测量误差。误差自始至终存在于一切科学实验过程之中,这是测量中普遍存在的规律,所以测量结果都带有误差。

(1) 绝对误差

$$\text{绝对误差} = \text{测量误差} - \text{真值} \tag{2-1-1}$$

注意:绝对误差不同于误差的绝对值,它可正、可负。当它为正时,称为正误差;反之则为负误差。因此,由式(2-1-1)定义的误差,不仅反映了测量值偏离真值的大小,也反映了偏离的方向。

(2) 相对误差

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \times 100\% \tag{2-1-2}$$

实验中还经常需要计算测量结果的百分误差

$$\text{百分误差} = \frac{\text{测量值} - \text{近真值(平均值)}}{\text{近真值(平均值)}} \times 100\% \tag{2-1-3}$$

2.1.3 误差分类

为了便于对误差作出估算并研究减小误差的方法,有必要对误差进行适当分类。根据误差的性质和来源不同,一般将测量误差分为 3 类。

1. 系统误差

在相同条件下对同一物理量进行多次测量,误差的符号始终保持恒定或按一定规律发

生变化,这种误差称为系统误差。系统误差具有确定性。

2. 随机误差

若系统误差已经消除或减小到可忽略时,在等精度条件下对同一物理量进行多次重复测量,其误差的数值和符号以不可预知、无法控制的方式变化着,这种误差称为随机误差。随机误差的特点是单个测量值具有随机性,数值大小杂乱无章,而当测量次数足够多时,总体服从统计分布规律。常见的统计分布有正态分布、 t 分布和均匀分布。

3. 粗大误差

根据测量的客观条件无法给出合理解释的个别过大的误差称为粗大误差。粗大误差的出现与实验者的技术水平、精神状态等有关,如看错刻度、读错数字、计算错误等已不属于正常误差范畴。粗大误差也可能与客观条件的一次性突然变化有关。粗大误差会明显地歪曲实验结果,一旦发现并确认,必须予以剔除,但要慎重处理,舍弃的数据在实验报告中必须注明原因。

2.1.4 准确度、精密度和精确度

评价测量结果的好坏,常用到准确度、精密度和精确度 3 个概念。

准确度反映系统误差大小的程度。准确度高是指测量数据的算术平均值偏离真值较小,测量的系统误差小。但是准确度不能反映随机误差的大小。

精密度反映随机误差大小的程度。它是对测量结果的重复性的评价。精密度高是指测量的重复性好,各次测量值的分布密集,随机误差小。但是精密度不能反映系统误差的大小。

精确度反映系统误差与随机误差综合大小的程度。精确度高是指测量结果既精密又正确,即随机误差与系统误差均小。

现以射击打靶的结果为例说明以上 3 个术语的意义,如图 2-1-1 所示。图 2-1-1 (a) 准确度高而精密度低,即系统误差小而随机误差大。图 2-1-1 (b) 精密度高而准确度低,即系统误差大而随机误差小。图 2-1-1 (c) 精确度高,系统误差和随机误差都小。

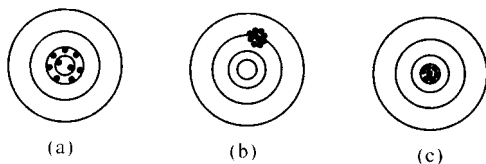


图 2-1-1

2.2 误差处理

2.2.1 系统误差

在许多情况下,系统误差是影响测量结果准确度的主要因素,然而它又常常不明显地表现出来。当它被忽略时,有时会给实验结果带来严重影响。因此,应分析系统误差的来源,并设法修正、减小或消除系统误差。

1. 系统误差的来源

系统误差一般来源于以下几个方面:

(1) 仪器误差 由于仪器本身的固有缺陷或没有按照条件使用而引起的误差。如仪器的刻度不准,仪器零点没有校准,仪器该水平放置而没有放水平等。

(2) 理论或方法误差 由于理论公式本身的近似性,或测量方法、实验条件与理论的要求不完全符合而引起的误差。如用伏安法测量电阻时忽略电表内阻会引起测量误差。

(3) 环境误差 由于外界环境因素(主要指温度、压力、湿度、电磁场等)引起的误差。如在 20℃ 下标定的标准电阻、标准电池在温度较高或较低的场合使用会引起误差。

(4) 个人误差 由于实验者个人有不良习惯而引起的误差。如有的人在读取指针式仪表的读数时习惯性地头偏向左侧或偏向右侧,致使读数偏大或偏小;按秒表时,习惯早按或迟按等。

2. 系统误差的发现

要发现系统误差,需要对整个实验原理、实验方法、测量步骤、所用仪器等可能引起系统误差的因素进行分析。

查找系统误差的几种常用方法如下。

(1) 实验对比法

① 实验方法对比:用不同方法测同一个量,看结果是否一致。

② 实验仪器对比:用型号相同的仪器替代实验中所用仪器,如结果不一致,则说明至少有一台仪器存在系统误差。

③ 测量方法对比:如用天平称衡时,分别将待测物放在天平的左盘和右盘(即复称法)。对比测量结果,可以发现天平是否存在两臂不等长而引起误差。

④ 实验条件对比:在不同的温度、压力、湿度、电磁场等环境下做对比实验,看结果是否一致。

(2) 理论分析法

分析实验依据的理论公式所要求的条件是否与实际情况相符,分析仪器所要求的条件是否得到满足。

(3) 数据分析法

当测量数据明显不服从统计分布规律时,说明存在系统误差。此时可将测量数据依次排列,如偏差(即测量值与平均值之差)的大小有规则地向一个方向变化,则测量中存在线性系统误差,如偏差的符号有规律地交替变化,则测量中存在周期性系统误差。

3. 系统误差的消除或修正

消除和修正系统误差是一件复杂而困难的事情,一般没有固定不变的方法,需要具体问题具体分析。常用的方法有以下几种。

(1) 对测量结果引入修正值

这通常包括两方面内容,一是对仪器或仪表引入修正值,这可通过与更准确(级别更高)的仪器或仪表作比较而获得;二是根据理论分析,导出修正公式。

(2) 选择适当的测量方法

选择适当测量方法使系统误差能够被抵消,从而不将其带入测量结果之中。

常用的方法有以下几种。

① 对换法:就是将测量中的某些条件(如被测物的位置)相互交换,使产生系统误差的原因对测量的结果起相反的作用,从而抵消了系统误差。如用直流电桥测量电阻时把被测电阻与标准电阻交换位置进行测量(见实验 4)。

② 补偿法(示零法):在测量过程中,使被测量的作用效果与已知量的作用效果互相抵

消,总的效应为零。如利用电位差计测电阻、测电动势时的电压补偿法(见实验6)。

③ 替代法:即在一定的条件下,用某一已知量替换被测量以达到消除系统误差目的的方法。例如,测量电表内电阻时,为了消除仪器误差对测量结果的影响,就可以采用替代法。

④ 半周期偶数测量法:按正弦曲线变化的周期性系统误差(如测角仪的偏心差)可用半周期偶数测量法予以消除。这种误差在 0° 、 180° 、 360° 处为零,而在任何差半个周期的两个对应点处误差的绝对值相等而符号相反,因此,若每次都在相差半个周期处测两个值,并以平均值作为测量结果就可以消除这种系统误差。在测角仪器(如分光计等)上广泛使用此种方法(见实验12)。

总之,要减小或消除系统误差的影响,首先是设法不让它产生,如果做不到,就应修正它,或者通过采取合适的测量方法,设法抵消它的影响。

2.2.2 随机误差

下面的讨论中,均认为系统误差已被消除或者系统误差已减小到可以忽略的程度。

随机误差是由实验中各种因素的微小变动性引起的。例如实验装置和测量机构在各次测量调整操作上的变动性,测量仪器指示数值上的变动性,以及观测者本人在判断和估计读数上的变动性等。这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量的平均值发生涨落变化,这种变化量就是各次测量的随机误差。

随机误差的出现,就某一次测量值来说是没有规律的,其大小和方向都是不可预知的,但进行足够多次的测量,就会发现随机误差是按一定的统计规律分布的。

1. 随机误差的统计分布

随机误差的分布服从统计规律。物理实验中大多数测量的随机误差满足正态分布。假设对某一物理量 x 在同样条件下进行多次重复测量,当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,测量值(包括随机误差)的出现服从正态分布,如图2-2-1所示。正态分布又称高斯(Gauss)分布。下面讨论正态分布的一些特性。

正态分布的概率密度函数为

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

其中

$$a = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum x_i}{n} \quad (2-2-2)$$

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum (x_i - a)^2}{n}} \quad (2-2-3)$$

其中, a 和 σ 是反映测量值 x 这个随机变量分布特性的重要参数。 a 表示 x 出现几率最大的值,是测量次数趋向无穷时被观测量的算术平均值,在消除了系统误差后, a 为真值。 σ 称为标准差,是测量次数趋向无穷时被观测量的误差的方均根,它是反映测量值离散程度的参数, σ 小,测量值精密度高,随机误差小; σ 大,测量值精密度低,随机误差大。

概率密度函数 $f(x)$ 的意义是:测量值在 x 附近的单位区间内出现的几率。测量值出现在

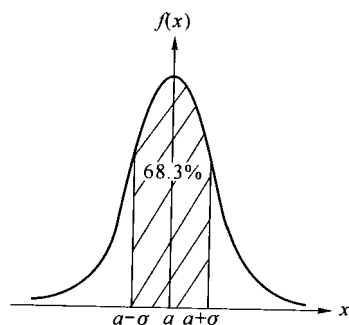


图 2-2-1

$(-\infty, +\infty)$ 范围内的几率是 100%，所以图 2-2-1 中曲线与横轴间所包围的面积恒等于 1，即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (2-2-4)$$

由概率密度函数的定义可知，测量值 x 在区间 $[x_1, x_2]$ 内出现的概率为

$$P = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (2-2-5)$$

其中， P 称为置信概率，与之对应的区间 $[x_1, x_2]$ 称为置信区间。

将概率密度函数代入式(2-2-5)可计算得出测量值 x 出现在区间 $[a-\sigma, a+\sigma]$ 内的概率

$$P_1 = \int_{a-\sigma}^{a+\sigma} f(x) dx = 0.683 \quad (2-2-6)$$

式(2-2-6)的结果说明，对满足正态分布的物理量作任何一次测量，其结果有 68.3% 的可能性落在区间 $[a-\sigma, a+\sigma]$ 内。由此可见，标准差 σ 是一个具有统计意义的参数。

如果扩大置信区间，对应的置信概率也将提高。将置信区间扩大到 $[a-2\sigma, a+2\sigma]$ 和 $[a-3\sigma, a+3\sigma]$ ，可分别得到与之对应的置信概率为

$$P_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{a-2\sigma}^{a+2\sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx = 0.954$$

$$P_3 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{a-3\sigma}^{a+3\sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx = 0.997 \quad (2-2-7)$$

物理实验中常将 3σ 作为判定数据异常的标准， 3σ 称为极限误差。可以认为在测量次数 n 有限的情况下，对物理量的任一次测量值，其误差大于 3σ 的可能性几乎不存在。如果某测量值 $|x-a| \geq 3\sigma$ ，则需要考虑测量过程是否存在异常，并将该数据从实验结果中剔除。

服从正态分布的随机误差具有下列特点。

- (1) 单峰性——绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大；
- (2) 对称性——大小相等而符号相反的误差出现的概率相同；
- (3) 有界性——在一定的测量条件下，误差的绝对值不超过一定的限度；
- (4) 抵偿性——误差的算术平均值随测量次数 n 增加而趋于零。

2. 多次测量的算术平均值

如前所述，尽管一个物理量的真值是客观存在的，但想要通过实验得到真值是不现实的。由随机误差的统计分析可以证明，当测量次数 n 趋近于无穷大时，测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 就是真值，见式(2-2-2)。但是在任何实验中，测量次数 n 总是有限的。

假设对物理量 x 进行一系列等精度测量，所得结果为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，则 x 的算术平均值为

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (2-2-8)$$

由于每次测量的误差为 $\Delta x_i = x_i - a$ ，因此误差和可以表示为

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = \sum_{i=1}^n x_i - na \quad (2-2-9)$$

若将式(2-2-9)的两边同除以 n ，则当 $n \rightarrow \infty$ 时，根据正态分布的特点(4)可知，式(2-2-9)等号的左边将趋近于零，因此有