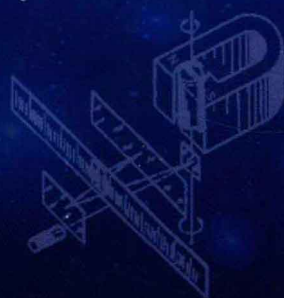
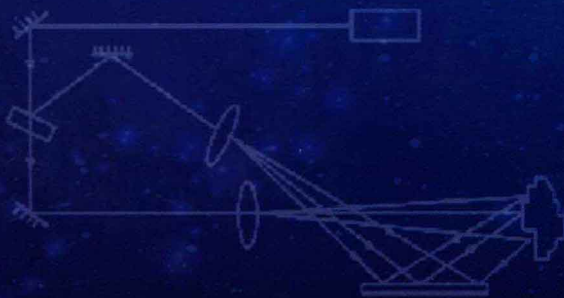
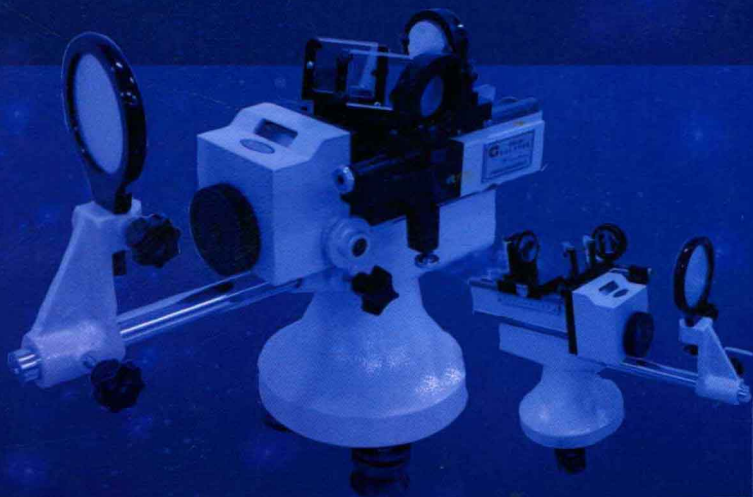




普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

郑立 谢国秋 主编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

主 编 郑 立 谢国秋

副主编 张燕飞

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书遵照《理工科大学物理实验课程教学基本要求》，以培养应用型人才为目的，结合专业设置特点和实验室设备情况编写而成。

全书共 8 章。第 1 章为测量误差和数据处理的基础知识，系统地介绍了与大学物理实验有关的数据处理知识；第 2 章为基本物理量的测量，全面地阐述了物理实验中经常采用的几种实验方法、基本调整技术和基本操作原则；第 3 章~第 6 章编排了 9 个基本测量方法的应用实验，5 个基本技能训练实验，8 个基本实验知识的综合应用实验，6 个提高性实验；第 7 章是实践性实验训练，介绍焊接相关技术并且使学生学会组装收音机；第 8 章结合网络介绍一些网络上的物理实验，使学生能利用互联网学习相关物理实验知识，通过实验培养学生的实践能力、创新意识和综合素质。

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 / 郑立, 谢国秋主编. —北京: 科学出版社, 2013

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-03-036070-0

I. ①大… II. ①郑… ②谢… 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(2012)第 277109 号

责任编辑: 石 悦 / 责任校对: 朱光兰

责任印制: 阎 磊 / 封面设计: 华路天然设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2013 年 3 月第一次印刷 印张: 15 1/2

字数: 394 000

定价: 32.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《大学物理实验》编委会

主 编 郑 立 谢国秋

副主编 张燕飞

参 编 (按姓氏拼音排序)

胡新广 黄志永

江昌龙 李福安

张燕飞

前 言

“大学物理实验”是学生进入大学后上的第一门科学实验课程，它对培养大学生严谨的科学态度、实验技能、动手能力和创新能力起着重要的作用，为学生的后续学习和工作打下良好的基础。

本书是在总结以往物理实验教学过程中的经验，遵照教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会制订的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，汲取其他理工科院校的物理实验资料，以培养应用型人才为目的，在结合专业设置特点和实验室设备情况的基础之上整理编写而成的。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。

本书共 8 章，主要内容包括测量误差和数据处理的基础知识、基本物理量的测量、基本测量方法的应用、基本技能训练、基本实验知识的综合应用、提高性实验、实践性实验训练、网络上的物理实验介绍。

本书具有以下特点：

(1) 践行了先进的教育教学理念——分层次教学，该教学方式是目前实验物理先进的教学模式。

全书共有 35 个实验，其中基本实验 17 个，综合性实验 8 个，设计性实验 6 个，实践训练实验 4 个。本书的第一层次内容主要包括一些基本物理量的测量和物理规律的验证，使学生得到基本测量方法及基本实验技能的训练。这一层次的实验都简明扼要地阐述实验原理，适当地介绍实验仪器，比较详细地说明了实验方法，还给出完整的数据记录表格及具体的误差分析方法，以作示范，提高学生严谨、规范的实验技能和方法。

第二层次实验主要培养学生的研究能力和创新能力，加深学生对物理理论知识的理解，提高其对物理知识的综合运用能力，实验的难度和要求也相对高些。这类实验只给出实验的目的、要求和实验原理提示，由学生自己提出和设计实验方案，选择实验仪器，安排实验步骤等，经指导教师审查批准后方可进行。同时，本书还编入了少量难度较大的实验内容供学有余力的学生进一步学习，以利于因材施教。

(2) 尽最大努力使本书做到传授知识和培养能力相结合，不仅有分层次的实验内容，同时还编写了“阅读材料”，进一步扩展学生的知识面，使其了解与实验内容相关的物理背景知识，以激发学生的学习热情和兴趣。

本书的编写分工如下：谢国秋编写绪论，4.4 节，6.2 节；郑立编写 1.1~1.5 节，2.3 节，4.3 节，5.5 节，附录 5；张燕飞编写第 8 章，2.2 节，3.1、3.2、3.9 节，5.4 节，6.1、6.5 节，附录 1，附录 2；李福安编写 1.6 节，3.4~3.6 节，5.3、5.7 节，6.4 节；黄志永编写 3.7、3.8 节，4.2、4.5 节，5.8 节，6.3 节；江昌龙编写 2.1 节，3.3 节，4.1 节，5.1、5.2、5.6 节；胡新广编写 6.6 节，第 7 章，附录 3、附录 4。全书由郑立统稿。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

2012 年秋

目 录

前言

绪论	1
一、物理实验课的地位、作用和任务	1
二、教学内容基本要求	1
三、物理实验教学的基本环节	2
四、物理实验室规则	3
第 1 章 测量误差和数据处理的基础知识	5
1.1 测量误差与结果表达	5
1.2 测量结果误差的计算	10
1.3 不确定度	14
1.4 有效数字	17
1.5 实验数据处理的基本方法	21
1.6 基本测量方法的介绍	27
第 2 章 基本物理量的测量	32
2.1 长度、质量、密度的测量	32
2.2 数字万用表的使用	42
2.3 牛顿第二运动定律的验证	45
第 3 章 基本测量方法的应用	51
3.1 用模拟法测绘静电场	51
3.2 电势差计的原理和使用	56
3.3 电表的改装与校准	60
3.4 伸长法测金属丝杨氏弹性模量	65
3.5 金属线胀系数的测量	69
3.6 液体表面张力系数的测量	73
3.7 等厚干涉的应用(牛顿环)	77
3.8 迈克耳孙干涉仪的调整及其应用	81
3.9 电桥法测电阻	85
第 4 章 基本技能训练	96
4.1 示波器的使用	96
4.2 分光计的调节及棱镜折射率测定	105
4.3 正态分布的实验研究	111
4.4 RLC 串联电路暂态过程的研究	114
4.5 薄透镜参数的测定	120

第 5 章 基本实验知识的综合应用	125
5.1 用三线摆测量刚体的转动惯量	125
5.2 驻波的研究	130
5.3 落球法测液体黏滞系数	133
5.4 霍尔法测螺线管的磁场	138
5.5 声速的测定	143
5.6 简谐振动的研究	150
5.7 金属比热容的测定	155
5.8 全息照相	158
第 6 章 提高性实验	163
6.1 灵敏电流计特性的研究	163
6.2 RLC 串联电路稳态特性的研究	168
6.3 衍射光强的测定	173
6.4 热敏电阻温度特性的研究及半导体温度计的设计	178
6.5 闪光灯的设计与制作	181
6.6 电饭锅温度控制电路的设计与组装	182
第 7 章 实践性实验训练	187
7.1 焊接技能训练	187
7.2 电子元器件识别	191
7.3 焊接安装收音机的注意事项及常见故障分析	203
7.4 收音机调试及整机合成	212
第 8 章 网络上的物理实验介绍	217
8.1 中南大学物理实验教学中心介绍	217
8.2 中国科学技术大学“大学物理实验”精品课程网	220
8.3 国内其他网络资源	222
8.4 国外网络资源	222
参考文献	228
附录 1 物理学常用数表	229
附录 2 测量单位的名称、符号	232
附录 3 物理实验操作考试样题	234
附录 4 物理实验理论考试样题	235
附录 5 物理实验课程论文的写作要求	237

绪 论

人类改造自然的实践活动主要有两种：一是生产实践；二是科学实验。科学实验是指人们按照一定的研究目的，借助必要的仪器设备，人为地控制或模拟自然现象，突出主要因素，对自然事物和现象进行反复的观察和精密的测试，探索其内部规律性的活动。这种对自然有用的、有控制的探索活动是现代科学技术发展的源泉。

一、物理实验课的地位、作用和任务

物理实验不仅是物理学理论的依据和基础，也是其他科学实验的先驱，它体现了大多数科学实验的共性，在实验思想、实验方法和实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

物理实验覆盖面广，具有丰富的实验思想、方法和手段，是培养学生科学实验能力、提高学生科学素质的重要的基础性实验技能训练，它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

物理实验是高等理工院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程，是大学生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。物理实验课的具体作用和任务如下：

(1) 通过对实验的观察分析和对物理量的测量，使学生掌握实验的基本知识、基本方法和基本技能，并能运用物理学原理、物理实验方法研究物理现象和规律，同时加深对物理学原理的理解。

(2) 培养与提高学生的科学实验能力。

自学能力：能够自行阅读实验教材或参考资料，正确理解实验内容，在实验前做好实验准备。

动手实践能力：能够借助教材和仪器说明书，正确调整和使用常用仪器。

思维判断能力：能够运用物理学理论，对实验现象进行初步的分析和判断。

书面表达能力：能够正确记录和处理实验数据，绘制图线图表，分析实验结果，撰写合格的实验报告。

简单的设计能力：能够根据课题要求，确定实验方法和条件，合理选择仪器，拟定具体的实验程序。

(3) 培养与提高学生从事科学实验的素质，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，主动进取的探索精神，遵守操作规程和爱护公共财物的优良品德，同学间相互协作、共同探索的作风。

二、教学内容基本要求

大学物理实验包括普通物理实验(力学、热学、电学、光学实验)和近代物理实验，具体的教学内容基本要求如下：

(1) 掌握测量误差的基本知识, 具有正确处理实验数据的基本能力.

① 掌握测量误差与不确定度的基本概念, 逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估.

② 掌握处理实验数据的一些常用方法, 包括列表法、作图法和最小二乘法等. 随着计算机及其应用技术的普及, 还应掌握用计算机通用软件处理实验数据的基本方法.

(2) 掌握基本物理量的测量方法.

例如: 长度、质量、时间、温度、压强、电流、电压、电阻、电场强度、磁感应强度、光强度、折射率、电子电量、普朗克常量等常用物理量及物理参数的测量, 注意加强数字化测量技术和计算技术在物理实验教学中的应用.

(3) 了解常用的物理实验方法, 并逐步学会使用.

例如: 比较法、转换法、放大法、模拟法、外延法、补偿法、平衡法和干涉、衍射法, 以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法.

(4) 掌握实验室常用仪器的性能, 并能够正确使用.

例如: 长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、示波器、低频信号发生器、分光计、读数显微镜、电源和光源等常用仪器.

(5) 掌握常用的实验操作技术.

例如: 零位调整、水平/铅直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查与排除, 以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节.

(6) 适当了解物理实验史料和物理实验在现代科学技术中的应用知识.

三、物理实验教学的基本环节

不同的实验项目, 其内容各不相同, 但每个实验都包含了实验预习、实验操作和实验总结三个基本环节.

1. 实验预习

实验前的预习至关重要, 它决定着实验能否取得主动和收获的大小. 预习包括阅读资料、熟悉仪器和写出预习报告. 仔细阅读实验教材和有关的资料, 重点解决三个问题:

(1) 做什么: 这个实验最终要得到什么结果.

(2) 根据什么去做: 实验课题的理论依据和实验方法的原理.

(3) 怎么做: 实验的方案、条件、步骤及实验关键.

2. 实验操作

实验操作环节主要包含实验仪器的安装调试、实验现象的观察、实验数据的测量和记录等内容, 具体要求如下:

学生按时进入实验室后, 按指定的座位就座, 在认真听完实验教师的讲解指导之后, 再按照编组使用相应的指定仪器. 应该像科学工作者那样要求自己, 井井有条地布置仪器, 根据事先设想好的步骤演练一下, 然后再按确定的步骤开始实验. 要注意细心观察实验现象, 认真钻研和探索实验中的问题. 不要期望实验工作会一帆风顺, 要把遇到的问题看做是学习的良机, 冷静地分析和处理它. 仪器发生故障时, 要在教师的指导下学习排除

故障的方法。总之，要把着重点放在实验能力的培养上，而不是测出几个数据就认为完成了任务。

要做好完备而整洁的记录。例如，研究对象的编号，主要仪器的名称、规格和编号。原始数据要用钢笔或圆珠笔记入事先准备好的表格中，如确系记错，也不要涂改，应轻轻画上一道，在旁边写上正确值，使正误数据都清晰可辨，以供在分析测量结果和误差时参考。不要用铅笔记录，给自己留有涂抹的余地。也不要先草记在另外的纸上再誊写在数据表格里，这样容易出错，况且，这也不是“原始记录”了。希望同学们注意纠正自己的不良习惯，从一开始就培养良好的科学的习惯。

实验结束后，先将实验数据交教师审阅，经教师验收签字后，再整理还原仪器，方可离开实验室。

3. 实验总结

实验总结环节包含了对实验目的、实验原理、实验内容、操作过程及技巧、注意事项、实验收获等方面的整体回顾，并将相关内容以一份简洁、明了、工整、有见解的实验报告的形式反映出来。一份完整的实验报告应该包含如下基本内容：

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验仪器。

(4) 实验原理。简要叙述有关物理内容(包括电路图、光路图或实验装置示意图)及测量中依据的主要公式、式中各量的物理含义及单位、公式成立所应满足的实验条件等。

(5) 实验步骤。根据实际的实验过程写明关键步骤。

(6) 注意事项。

(7) 数据报告与数据处理。基本要求包括列表报告数据、完成计算(计算要有计算式，代入的数据都要有根据)、曲线图(图线要规矩、美观)、实验结果报告、误差分析或不确定度计算。

(8) 小结和讨论。以分析产生误差的原因为主，其他内容不限，可以是对实验中现象的分析，对实验关键问题的研究体会，实验的收获和建议，也可以是解答实验思考题。

四、物理实验室规则

1. 凭卡实验

学生凭实验操作卡(或学校一卡通)进入实验室，并按指定编号入座，待教师讲解完毕之后开始操作。实验中应耐心操作，细致观察，及时将原始数据记入表中，不允许事后追记。

2. 注意安全

实验过程必须注意安全，对自己不能处理的问题应及时报告教师。使用电源时，要经过教师检查线路后，才能接通电源。

3. 遵章守纪

遵守实验纪律，不得迟到、早退、下位、串组，保持实验室的肃静和整洁。

4. 爱护公物

进入实验室不能擅自搬弄仪器。实验中严格按仪器说明书操作，在弄清注意事项和操作方法之前不要乱动仪器。如有不当损坏，照章赔偿。

5. 收拾整理

公用工具用完后应立即归还原处。做完实验，学生应将仪器整理还原，将桌面和凳子收拾整齐，经教师审查测量数据和仪器还原情况并签字后，方能离开实验室。

6. 总结报告

实验报告是实验总结的重要方式，是物理实验的基本环节，应在实验后一周内交实验室。

第 1 章 测量误差和数据处理的基础知识

1.1 测量误差与结果表达

1.1.1 测量

1. 测量

物理实验不仅要定性地观察各种物理现象,更重要的是测定某些待测物理量的具体数值,并确定相关物理量之间的数量关系.一般地说,测量是指一定的人,依据一定的理论和方法,使用一定的仪器、量具,在一定的环境中对某些物理量进行测定的过程.测量的一般方法是将待测的物理量与一个选来作为标准的同类量进行比较,得出它们之间的倍数关系.选作标准的同类量称为单位,其倍数便是测量的数值.由此可见,一个物理量的测量值等于测量数值与单位的乘积.

计量单位的标准必须是国际公认的、唯一的、稳定不变的.国家计量局于 1987 年 2 月 1 日发布了《中华人民共和国计量法》,规定国家法定计量单位名称、符号和非国家法定计量单位的废除办法,规定以国际单位《Le Systeme International d'Unite's 制》为国家法定计量单位,即以米、千克、秒、安培、开尔文、摩尔、坎德拉作为基本单位,其他量都由以上七个基本单位导出,称为国际单位制的导出单位,并规定自 1991 年起实行国家法定计量单位.

一个物理量的大小是客观存在的,选择不同的单位,相应的测量数值就会有所不同.单位越大,测量数值越小,反之亦然.

2. 测量的分类

测量分为直接测量和间接测量两种.

(1)直接测量是指可以和标准量具、量仪直接进行比较而得到测量数值的测量,例如长度、时间、质量、温度等量可分别用米尺、秒表、天平、温度计等直接测量.

(2)间接测量是指不能直接测出结果,但可以先通过直接测量与它有关的一些物理量,然后利用公式求得结果的测量.如测量一个立方体物质的密度 ρ ,可以先直接测量出它的边长 a 和质量 m ,然后利用公式 $\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{a^3}$ 计算出密度 ρ ;测量重力加速度 g ,可先直接测出单摆的

长度 L 和单摆的周期 T ,再应用公式 $g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$ 求得,等等.

物理实验中的测量多数是间接测量.

1.1.2 误差

1. 真值、约定真值(公认值)、最佳值(近真值)

在一定的条件下,任何一个物理量都有一个实实在在的、不以人的意志为转移的客观数值,该数值即为该物理量的真值.

通过大量实验测定或计算得到、并经国际计量会议约定的某些基本物理常数、基本单位标准或经高一等级仪器校验过的计量标准器具的量值等，一般称为约定真值或公认值。

实验和计算表明，在对某一物理量 x 的 n 次测量中，其算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) \quad (1-1-1)$$

最接近该物理量的客观真值，称为最佳值或近真值 ($n \rightarrow \infty$ 时， $\bar{x} \rightarrow$ 真值)。

2. 误差

在实验过程中，人们的主观愿望总是希望准确地测出待测物理量的真值。但是，任何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。由于实验理论的近似性，实验仪器的分辨能力和灵敏度的局限性，实验环境的不稳定性以及人的实验技能和判断能力的影响等，测量值与待测量的真值不可能完全相同。也就是说，测量值 x 与真值 x_0 之间始终存在着差异，这个差异称为测量误差，简称误差，用 Δx 表示。测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差可以用绝对误差表示，也可以用相对误差表示，即

$$\text{绝对误差} = |\text{测量值} - \text{真值}| (\Delta x = |x - x_0|) \quad (1-1-2)$$

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \times 100\% \quad (1-1-3)$$

在实际使用中，由于真值始终是未知的，所以常用公认值或最佳值代替真值进行计算。

1.1.3 误差的分类及处理

实践证明，测量结果总存在误差，或者说误差不可避免地存在于一切科学实验和测量之中。因此，分析测量过程中可能产生误差的各种因素，尽可能消除其影响，并对最后结果中未能消除的误差作出估计，分析测量结果的准确程度，这是物理实验和其他科学实验中不可缺少的重要工作。

1. 误差的分类及成因

测量误差按其产生的原因与性质可分为系统误差、随机误差和过失误差三大类。

1) 系统误差

系统误差是指在同一条件下，多次测量同一物理量时，误差的大小、符号均保持不变，或当条件改变时，按某一确定的已知规律变化的误差。系统误差来自以下几个方面：

(1) 仪器误差。所谓仪器误差，是指测量时由于所用的测量仪器、仪表不准确所引起的基本误差。例如，刻度不准、零点不对、砝码未经校准、天平臂不等长、应该水平放置的仪器没有放水平等。

(2) 环境误差。当测量仪器偏离了规定条件使用时，如受环境的温度、电源电压、频率、外界电磁场等的影响，都会使测量产生误差。

(3) 方法误差。这种测量误差是由于测量方法不完善或所依据的理论不严密所产生的。凡

是在测量结果的表达式中没有得到反映,而在实际测量中又起作用的一些因素所引起的误差,都称为方法(或理论)误差.例如,在空气中称质量而没有考虑空气浮力的影响;测长度时没有考虑温度使尺长改变;测电压时没有考虑电压表内阻对电路的影响;标准电池的电动势没作温度修正等.

(4)个人误差.这是由实验者的生理或心理特点、缺乏经验等引起的.例如,有些人习惯于侧坐斜视读数,眼睛辨色能力较差等,估计读数始终偏大或偏小,记录信号时始终超前或滞后.

很明显,系统误差的特征是它的确定性和规律性,即实验条件一经确定,系统误差就获得了一个客观上的确定值,一旦实验条件变化,那么系统误差也按一种确定规律变化.

2) 随机误差(偶然误差)

就每一次测量而言,其随机误差的大小和符号都是不可预知的,具有“偶然性”和“随机性”.但理论和实践都证明,当测量次数足够多时,这一组等精度测量数据(称为一个测量列)的随机误差一般服从图1-1-1所示的统计规律,图中横坐标表示误差 Δx ,纵坐标表示一个与该误差出现概率相关的概率密度函数 $f(\Delta x)$,可以证明

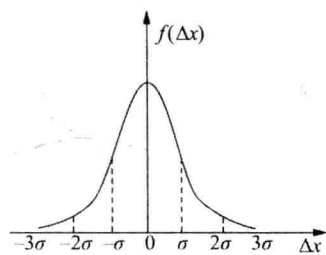


图 1-1-1

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-1-4)$$

这种分布称为正态分布(高斯分布),其中 σ 为分布函数的特征量,其值为($\Delta x = x - \bar{x}$)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n}} \quad (1-1-5)$$

服从正态分布的随机误差具有以下一些特征:

- (1)单峰性:绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的出现的概率大.
- (2)对称性:绝对值相等的正、负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限度.
- (4)抵偿性:随机误差的算术平均值随测量次数的增加而趋向于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0 \quad (1-1-6)$$

在相同条件下,对同一物理量进行多次重复测量,即使系统误差减小到最小程度之后,测量值仍然会出现一些难以预料和无法控制的起伏,而且测量值误差的绝对值和符号在随机地变化着.这种误差称为随机误差.

3) 过失误差(错误)

在测量中还可能出现测量值明显偏离了正常测量值的异常误差,称为过失误差(错误).这

种错误是由于实验者的粗心、不正确的操作和实验条件的突变等引起的,例如读数错误、记录错误、操作错误、估算错误等.

2. 误差的分析与处理

由上面的分析可知,产生测量误差的原因很多,在具体的实验中,应针对不同的原因对实验结果进行分析和修正.

1) 系统误差的分析处理

由于系统误差有确定性和规律性,因此,可以通过校准仪器、仪表、量具,改进实验装置和实验方法,或对实验结果进行理论上的分析等办法来对系统误差进行修正、减小并尽可能消除.发现和减小实验中的系统误差通常是困难的,需要对整个实验所依据的原理、方法、测量步骤及所用仪器等可能引起误差的各种因素一一进行分析.一个实验结果是否正确,往往在于系统误差是否已被发现和尽可能消除.

2) 随机误差的分析处理

根据随机误差的统计分布规律性,人们知道:①多次测量时,正、负随机误差可以大致相消,因而用多次测量的算术平均值表示测量结果可以减少随机误差的影响;②测量值的分散程度直接体现随机误差的大小,测量值越分散,测量的随机误差就越大,因此,必须对测量的随机误差作出估计才能反映出测量的精密程度.对随机误差估计的方法有多种,在大学物理实验中,常用算术平均偏差、标准偏差来估计测量的随机误差.

(1) 残差和误差. 设 x_0 为被测量的真值, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 为有限次测量的平均值(最佳值), 其中 x_i 为单次测量值.

① 残差, 为单次测量值 x_i 与测量平均值(最佳值)之差, 即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (1-1-7)$$

② 误差, 为单次测量值 x_i 与被测量真值 x_0 之差, 即

$$\Delta x_0 = x_i - x_0 \quad (1-1-8)$$

由于待测物理量的真值的不可知性, 实验中常用公认值或最佳值代替真值, 而用残差代替误差. 另一方面, 由于残差或误差有正有负, 有大有小, 故常用算术平均法和“方均根”法对它们进行统计.

(2) 算术平均偏差 $\Delta \bar{x}$. 在对某一物理量进行 n 次等精度测量的数据中, 求各单次测量的残差的绝对值的平均值, 便得到算术平均偏差 $\Delta \bar{x}$, 即

$$\Delta \bar{x} = \frac{1}{n} (|\Delta x_1| + |\Delta x_2| + \cdots + |\Delta x_n|) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i| \quad (1-1-9)$$

算术平均偏差是估计随机误差最简单的一种方法, 对初步涉及科学实验及误差分析的学生, 可用算术平均偏差代替测量的绝对误差, 然后逐渐过渡到标准偏差和不确定度的理解及计算.

(3) 标准偏差.

① 同一测量列 (x_1, x_2, \dots, x_n) 的标准偏差 S_x . 在实际的实验中, 在相同条件下对同一物理量进行多次重复测量, 由此得到的一组数据称为一个测量列. 对同一测量列中各测量值的残差 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ 用“方均根”法对它们进行统计, 称为该测量列的标准偏差, 用 S_x 表示, 其计算公式为贝塞尔公式, 即

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-1-10)$$

它反映了同一测量列对其算术平均值的分散程度, 或者说它反映了这一列测量数据的精密程度, S_x 的数值越小, 测量值精密度越高. 许多电子计算器都具有直接计算 S_x 的功能, 只要将 n 个测量值 x_1, x_2, \dots, x_n 输入计算器中, 按一下相应的键, 就得到了 S_x 的值.

② 算术平均值 \bar{x} 的标准偏差 $S_{\bar{x}}$. 在相同条件下, 对同一物理量做多组重复的系列测量, 每一测量列都有一个算术平均值. 由于随机误差的存在, 两个测量列的算术平均值也不相同. 它们围绕着被测量的真值(设系统误差分量为零)有一定的分散. 此分散说明了算术平均值的不可靠性, 而算术平均值的标准差 $S_{\bar{x}}$ 则是表征同一被测量的各个测量列算术平均值分散性的参数, 可作为算术平均值不可靠性的评定标准. $S_{\bar{x}}$ 又称算术平均值的实验标准差.

若对某物理量作了 n 组测量, 就有 n 个算术平均值, 其算术平均值的标准偏差可写为

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad (1-1-11)$$

上式说明, 平均值的标准偏差是 n 组测量中任意一测量列标准偏差的 $1/\sqrt{n}$. $S_{\bar{x}}$ 小于 S_x , 这个结果的合理性是显而易见的. 因为算术平均值是测量结果的最佳值, 它比任意一次测量值 x_i 更接近真值, 误差要小.

值得注意的是, 用式(1-1-10)和式(1-1-11)来估算随机误差, 理论上都要求测量次数相当多. 但在我们目前的实验中, 往往受到教学时间的限制, 重复测量的次数不可能很多, 所以, 用这两个式子估算出来的随机误差带有相当程度的近似性. 另外, 在测量次数较少时($n < 10$), $S_{\bar{x}}$ 随着测量次数 n 的增加而明显地减小; 以后, 随着测量次数 n 的继续增加, $S_{\bar{x}}$ 的减小越来越不明显而逐渐趋近于恒定值. 由此可见, 过多地增加测量次数, 其价值并不太大. 根据我们的实际情况, 如果需要多次测量, 一般测量次数取5~10次为宜.

3) 过失误差的分析处理

过失误差所产生的错误已不属于正常的测量工作范畴, 应当尽量避免. 克服过失误差的办法, 首先是端正对待实验的态度, 树立严谨的工作作风, 掌握正确的测量方法. 对偶发性过失误差, 可用和多次测量结果相比较的办法发现并加以纠正, 或者运用异常数据剔除准则来判别因过失而引起的异常数据, 并加以剔除.

1.1.4 测量结果的表达式

前面的分析表明, 测量中误差不可避免, 或者说真值无法准确测出. 因此, 实验的任务之一, 就是尽可能地减少影响测量准确程度的各种因素, 以便测出在该条件下待测物理量的最佳值(最可信赖值) $\bar{x}_{\text{测}}$. 同时, 对这一测量值 $\bar{x}_{\text{测}}$ 与真值 x_0 的偏离程度作出估计, 即给出测量的误差 $\Delta\bar{x}$.

很明显, 通过实验的方法不能唯一地确定待测物理量的真值, 即不能将测量结果表达为某一具体数值, 只能确定真值可能出现的范围, 因此测量的结果通常表达成

$$\text{测量结果} = (\text{测量的最佳值} \pm \text{测量误差值})(\text{单位})$$

即

$$x = (\bar{x} \pm \Delta\bar{x})(\text{单位}) \quad (1-1-12)$$

它表示: 可以有相当把握地说, 待测量的真值 x_0 就在 $\bar{x} - \Delta\bar{x}$ 至 $\bar{x} + \Delta\bar{x}$ 之间. $\Delta\bar{x}$ 越小, 测量的最佳值与真值越接近, 测量的准确度也越高. 应当特别强调的是, 测量(最佳)值、误差和单位是表示测量结果的三个要素.

1.2 测量结果误差的计算

本节主要讨论测量值的误差计算. 误差的计算是在错误数据已经剔除, 系统误差已经消除或系统误差相对于随机误差小得多的情况下进行的.

1.2.1 单次直接测量误差的估计

实验时, 有时不可能进行重复地测量(如一瞬即逝的现象), 有时多次测量也无必要. 这时可用一次测量值作为测量结果的最佳值, 取仪器误差作为测量误差. 仪器误差是指在规定的使用条件下, 正确地使用仪器时可能产生的最大误差, 用 $\Delta x_{\text{仪}}$ 表示.

关于仪器误差 $\Delta x_{\text{仪}}$, 有如下几种情况:

(1) 仪器误差通常标在仪器的铭牌上, 有时用仪器准确度级别表示. 不同仪器的准确度级别的含义是不相同的, 应该用相应公式进行计算. 应当养成以下习惯: 实验前先仔细查看仪器的铭牌, 并将可能有用的数据(型号、量程和级别等)记录下来.

(2) 若没有给出仪器误差, 可用下述方法进行估计: 对有游标的量具和非连续读数的仪表(电子秒表、数字仪表), 取最小分度值作为单次直接测量的误差; 对连续读数的仪表、量具(如直尺), 取最小分度值的一半作为单次直接测量的误差.

1.2.2 多次直接测量误差计算

为了测量准确, 在条件许可的情况下, 总是采用多次重复测量, 但测量次数总是有限的(一般实验中重复次数 ≤ 10). 可求出测量值的算术平均值并将其作为测量结果的最佳值 \bar{x} , 用式(1-1-9)求出算术平均偏差 $\Delta\bar{x}$, 用式(1-1-10)求出一个测量列的标准偏差 S_x , 或用式(1-1-11)求出算术平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 来作为测量误差.