

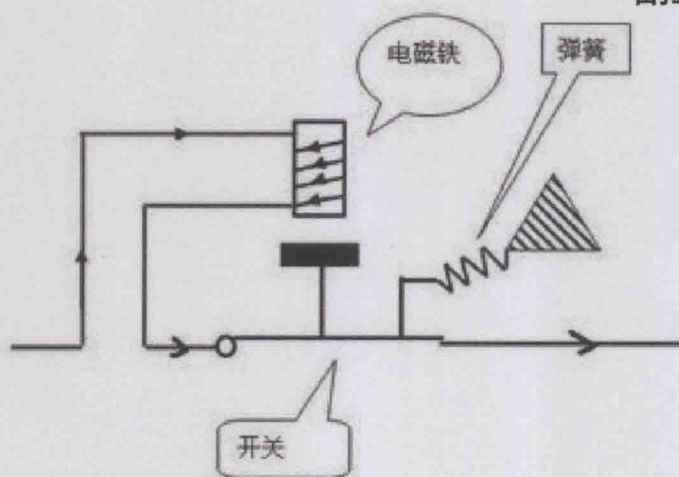


普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理实验

(第三版) 上册

主 编 朱泉水
副主编 黄 彦 陈凤英



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理实验

(第三版)(上册)

主 编 朱泉水

副主编 黄彦 陈凤英

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在《大学物理实验(第二版)》基础上,根据《理工科类大学物理课程教学基本要求》,按照21世纪人才培养模式的需要和课程体系、教学内容改革的要求编写而成的.全书分为上、下两册,上册包括力、热、电磁等基础实验和部分综合设计性实验;下册包括力、热等综合性实验以及电、磁和近代物理等设计性和研究性实验.与本书配套的还有《大学物理实验(第三版)》电子教案.

本书可作为高等工科大学各专业和其他类院校非物理类专业本、专科学生的大学物理教材,也可用作成人教育的大学物理教材和教学参考书.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验.上册/朱泉水主编.—3版.—北京:科学出版社,2016.8
普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-03-049602-7

I. ①大… II. ①朱… 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(2016)第195879号

责任编辑:昌盛 王刚/责任校对:钟洋

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:迷底书装

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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011年8月第 二 版 印张:12 3/4

2016年8月第 三 版 字数:302 000

2016年9月第十一次印刷

定价:29.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第三版前言

本教材自出版以来，编者的初衷基本得到了体现：注重学生动手能力和独立思考问题能力的培养，同时加强了基本实验技能的培养。

根据广大教师和同学的反映以及实验技术的发展，这次再版对原书部分内容进行了修订。

这次修订进一步调整了实验章节，将仿真实验调整成一个大型实验。随着实验技术发展，将综合性、设计性实验合二为一。同时新增了研究性实验，如荧光温度传感与玻尔兹曼常量测量等，进一步加强学生物理实验思想的训练和独立解决问题的能力训练。最后对部分实验内容进行了修订，使其更加符合实验要求。

本次教材修订得到了很多教师和出版社的大力支持，南昌航空大学的龚勇清教授、陈学岗教授认真审阅了修订后的书稿，并提出了许多中肯的修改建议。新增部分实验内容曾作为校内讲义在南昌航空大学试用，许多同学提出了很好的感想。编者对此表示衷心的感谢。此外，还要感谢广大教师和读者指出本书第二版中出现的一些不足。由于编者水平有限，修订后仍不免有错误和疏漏，恳请读者批评指正。

编 者

2016年6月

绪 论

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的自然科学。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是其他自然科学和工程技术的基础。

整个物理学的发展史是人类不断深刻了解自然、认识自然的历史进程。实验物理和理论物理是物理学的两大分支,实验事实是检验物理模型、确立物理规律的终审裁判。理论物理与实验物理相辅相成,互相促进,恰如鸟之双翼,人之双足,缺一不可。物理学正是靠着实验物理和理论物理的相互配合激励、探索前进,而不断向前发展的。在物理学的发展过程中,这种关于相互促进、相互激励、相互完善的过程的实例是数不胜数的。

16 世纪意大利物理学家伽利略首先把科学实验方法引入物理学研究中,从而使物理学走上了真正的科学道路。在他所设计的斜面实验中,有意识地忽略了空气阻力,以便抓住主要问题;改变斜面倾角(即变更实验条件),观测实验结果的变化。在此基础上,他还运用推理概括的方法,得出了超越实验本身的更为普遍的规律:物体在光滑水平面上的运动是等速直线运动(惯性定律);各种物体沿铅直方向自由下落均做等加速直线运动,且具有相同的加速度 a 。伽利略的这种丰富的实验思想和实验方法对我们当今的物理实验仍有着重要的启示。17 世纪,牛顿正是在伽利略、开普勒工作的基础上建立了完整的经典力学理论。

当代最为引人注目的诺贝尔物理学奖,主要颁发给物理学中具有划时代的里程碑级的重大发现者和发明者。从 1901 年第一次授奖至今有近百年的历史,已有得主近 150 名。其中主要以实验物理学方面的发现或发明而获奖者约占 73%。例如,1901 年首届诺贝尔物理学奖授予德国人伦琴(W. C. Röntgen),是为了奖励他于 1895 年发现了 X 射线;1902 年的诺贝尔物理学奖授予荷兰人塞曼,是为了奖励他在 1894 年发现光谱线在磁场中会分裂的现象;1903 年的诺贝尔物理学奖授予法国人贝可勒尔(H. A. Becquerel),是为了奖励他于 1896 年发现了天然放射性。

由此可见,物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。物理理论和实验的发展哺育着近代科技的成长和发展,物理实验的思想、方法、技术和装置常常是自然科学研究和工程技术发展的生长点。

物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力、提高科学素质的重要基础。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应用能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

大学阶段的物理实验课的主要任务不在于物理定律和原理的验证,而是通过物理实验的训练培养学生的基本科学实验技能,使学生初步掌握实验科学的思想和方法。在这些能

力培养中,最需要强调的是关于学生的能力、作风、素质的培养。

1. 能力

能力是多方面的,通过物理实验需要培养的是观察现象的能力、透过现象研究规律的能力,从复杂的现象中抽取相关信息的能力、运用知识解决实际问题的能力、根据仪器说明书能正确使用仪器的能力、从事现代化科学实验的能力等。具体有如下几个方面的能力需要在物理实验课程中重点加以培养。

- (1)学习物理实验知识,加深对物理学原理的理解;
- (2)培养和提高学生掌握基本测量物理原理的能力;
- (3)掌握常用仪器仪表的基本原理、性能及使用方法;
- (4)学会正确记录和处理相关实验数据;
- (5)学会对实验结果进行分析判断,正确撰写实验报告;

2. 作风

这里主要应强调科学的工作作风,如实事求是的作风,严肃认真的作风以及坚韧不拔的工作作风等。而对于培养学生的团结协作精神、爱护国家财产等观念也是不容忽视的。

3. 素质

素质的内涵是指由实验方面的基本知识、基本方法和基本技能的水平,对现象观察和分析的能力以及良好的实验习惯和科学作风等综合表现。学生能力强、工作作风好、实验素质好,有利于实验良好习惯的培养,如认真阅读仪器说明书和参考资料的习惯,认真了解仪器的操作使用方法并遵守操作规程的习惯,认真、完整、如实地记录实验原始数据的习惯,在实验过程中积极思考、深入探讨、运用知识去解决问题的习惯等。

大学物理实验作为大学生进校后第一门科学实验课程,不仅应让学生受到严格的、系统的实验技能训练,掌握科学实验的基本知识、方法和技巧,更重要的是要培养学生严谨的科学思维方式和创新精神,培养学生理论联系实际、分析和解决实际问题的能力,特别是应掌握与科学技术的发展相适应的综合能力。

目 录

第三版前言

绪论	1
第 1 章 测量误差理论及数据处理	3
1.1 测量与有效数字	4
1.1.1 测量及分类	4
1.1.2 有效数字	5
1.1.3 实验数据的有效位数确定	6
1.2 误差及测量结果表示	8
1.2.1 误差的分类	8
1.2.2 测量结果的表示	10
1.2.3 测量结果最终表达式中的有效位数	11
1.2.4 直接测量的结果表示	11
1.2.5 间接测量的结果表示	13
1.3 数据处理的基本方法	18
1.3.1 列表法	18
1.3.2 作图法	18
1.3.3 逐差法	19
1.3.4 最小二乘法	20
1.3.5 用计算机进行数据处理	24
1.4 误差理论对物理实验的指导作用	25
1.4.1 实验仪器的选择原则	25
1.4.2 直接测量列中坏值的剔除原则	25
1.4.3 微小误差原则	25
1.4.4 等精度测量原则	26
练习题	28
第 2 章 基础实验	29
实验 2.1 密度的测定	30
实验 2.2 易溶于水的颗粒物质的密度测定	33
实验 2.3 杨氏模量的测量	35
实验 2.4 转动惯量的测定	41
实验 2.5 用电量热器测液体比热容	45

实验 2.6 金属比热容的测量	48
实验 2.7 金属线膨胀系数的测量	52
实验 2.8 液体表面张力系数测定	56
实验 2.9 声速的测定	61
实验 2.10 模拟示波器的使用	67
实验 2.11 数字示波器的使用	75
实验 2.12 电子和场	80
实验 2.13 直流电桥测电阻	88
实验 2.14 霍尔效应及应用	92
实验 2.15 等厚干涉	98
实验 2.16 分光计的调试及测三棱镜的折射率	105
实验 2.17 薄凸透镜及透镜组焦距的测量	115
实验 2.18 仿真软件的使用	121
第 3 章 综合设计性实验	126
实验 3.1 非线性电路混沌实验	127
实验 3.2 磁阻传感器及其应用	131
实验 3.3 光学像差的观察	137
实验 3.4 PN 结特性实验	144
实验 3.5 微波综合特性实验	149
实验 3.6 光电器件特性测试及其光通信上的应用	155
实验 3.7 全息照相	160
第 4 章 研究性实验	165
实验 4.1 荧光温度传感与玻尔兹曼常量测量	166
实验 4.2 椭圆偏振光法测量薄膜参数	170
附录	175
附录 1 中华人民共和国法定计量单位	176
附录 2 常用计量单位换算表	178
附录 3 常用物理基本常数表	180
附录 4 常用物理量与基本量纲换算表	181
附录 5 数值修约规则与极限数值的表示和判定(GB/T 8170-2008)(部分)	183
附录 6 C 程序计算平均值、绝对误差、相对误差通用计算程序	188
附录 7 诺贝尔物理学奖与物理实验	191

绪 论

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的自然科学。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是其他自然科学和工程技术的基础。

整个物理学的发展史是人类不断深刻了解自然、认识自然的历史进程。实验物理和理论物理是物理学的两大分支,实验事实是检验物理模型、确立物理规律的终审裁判。理论物理与实验物理相辅相成,互相促进,恰如鸟之双翼,人之双足,缺一不可。物理学正是靠着实验物理和理论物理的相互配合激励、探索前进,而不断向前发展的。在物理学的发展过程中,这种关于相互促进、相互激励、相互完善的过程的实例是数不胜数的。

16 世纪意大利物理学家伽利略首先把科学实验方法引入物理学研究中,从而使物理学走上了真正的科学道路。在他所设计的斜面实验中,有意识地忽略了空气阻力,以便抓住主要问题;改变斜面倾角(即变更实验条件),观测实验结果的变化。在此基础上,他还运用推理概括的方法,得出了超越实验本身的更为普遍的规律:物体在光滑水平面上的运动是等速直线运动(惯性定律);各种物体沿铅直方向自由下落均做等加速直线运动,且具有相同的加速度 a 。伽利略的这种丰富的实验思想和实验方法对我们当今的物理实验仍有着重要的启示。17 世纪,牛顿正是在伽利略、开普勒工作的基础上建立了完整的经典力学理论。

当代最为引人注目的诺贝尔物理学奖,主要颁发给物理学中具有划时代的里程碑级的重大发现者和发明者。从 1901 年第一次授奖至今有近百年的历史,已有得主近 150 名。其中主要以实验物理学方面的发现或发明而获奖者约占 73%。例如,1901 年首届诺贝尔物理学奖授予德国人伦琴(W. C. Röntgen),是为了奖励他于 1895 年发现了 X 射线;1902 年的诺贝尔物理学奖授予荷兰人塞曼,是为了奖励他在 1894 年发现光谱线在磁场中会分裂的现象;1903 年的诺贝尔物理学奖授予法国人贝可勒尔(H. A. Becquerel),是为了奖励他于 1896 年发现了天然放射性。

由此可见,物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。物理理论和实验的发展哺育着近代科技的成长和发展,物理实验的思想、方法、技术和装置常常是自然科学研究和工程技术发展的生长点。

物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力、提高科学素质的重要基础。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应用能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

大学阶段的物理实验课的主要任务不在于物理定律和原理的验证,而是通过物理实验的训练培养学生的基本科学实验技能,使学生初步掌握实验科学的思想和方法。在这些能

力培养中,最需要强调的是关于学生的能力、作风、素质的培养.

1. 能力

能力是多方面的,通过物理实验需要培养的是观察现象的能力、透过现象研究规律的能力,从复杂的现象中抽取相关信息的能力、运用知识解决实际问题的能力、根据仪器说明书能正确使用仪器的能力、从事现代化科学实验的能力等.具体有如下几个方面的能力需要在物理实验课程中重点加以培养.

- (1)学习物理实验知识,加深对物理学原理的理解;
- (2)培养学生掌握基本测量物理原理的能力;
- (3)掌握常用仪器仪表的基本原理、性能及使用方法;
- (4)学会正确记录和处理相关实验数据;
- (5)学会对实验结果进行分析判断,正确撰写实验报告;

2. 作风

这里主要应强调科学的工作作风,如实事求是的作风,严肃认真的作风以及坚韧不拔的工作作风等.而对于培养学生的团结协作精神、爱护国家财产等观念也是不容忽视的.

3. 素质

素质的内涵是指由实验方面的基本知识、基本方法和基本技能的水平,对现象观察和分析的能力以及良好的实验习惯和科学作风等综合表现.学生能力强、工作作风好、实验素质好,有利于实验良好习惯的培养,如认真阅读仪器说明书和参考资料的习惯,认真了解仪器的操作使用方法并遵守操作规程的习惯,认真、完整、如实地记录实验原始数据的习惯,在实验过程中积极思考、深入探讨、运用知识去解决问题的习惯等.

大学物理实验作为大学生进校后第一门科学实验课程,不仅应让学生受到严格的、系统的实验技能训练,掌握科学实验的基本知识、方法和技巧,更重要的是要培养学生严谨的科学思维方式和创新精神,培养学生理论联系实际、分析和解决实际问题的能力,特别是应掌握与科学技术的发展相适应的综合能力.

第 1 章 测量误差理论及数据处理

1.1 测量与有效数字

物理实验是以测量为基础的. 物理量的测量是物理实验的基本操作过程, 所谓测量就是借助一定的实验仪器, 通过一定的实验方法, 把待测量与选作计量标准单位的同类物理量进行比较的全部操作. 测量的目的在于确定待测量的量值. 测量的结果应包括数值(即度量的倍数)、单位(即所选定的物理量)以及结果可信赖的程度(用不确定度表示).

物理量的计量单位采用国际单位制(SI), 也是我国法定计量单位. 国际单位制(SI)是1971年第十四届国际计量大会确定的. 它规定了7个基本单位: 长度——米(m)、质量——千克(kg)、时间——秒(s)、电流——安培(A)、热力学温度——开尔文(K)、物质的量——摩尔(mol)和发光强度——坎德拉(cd); 还规定了两个辅助单位: 平面角——弧度(rad)和立体角——球面度(sr). 有了这几个基本单位, 其他一切物理量的单位就都可以导出, 如体积单位(m^3)、密度单位(kg/m^3)等, 称为国际单位制的导出单位.

根据测量方法的不同, 测量可以分为直接测量和间接测量, 由于测量仪器、测量方法、测量环境、测量人员等因素的局限, 测量不可能绝对精确, 测量结果与真实值之间总存在一定的差异, 即存在测量误差. 为此, 实验者必须学会分析并计算误差, 对测量结果的可靠性做出评价.

1.1.1 测量及分类

1. 真值与误差

在任何测量中, 测量值与真值之间存在的差异称为“误差”. 物理量的客观存在值称为真值, 是指在一定时间、一定状态下被测量客观存在的真实大小. 例如, 三角形内角之和为 180° ; 真空中光在 $1/299792458$ s时间内所传播的路程长度为1 m等. 但在多数情况下真值都是未知的, 是要在实验中进行测量的. 然而, 由于实验仪器、实验环境等的影响, 真值是不可能测得的, 只能得到真值某种程度的近似值. 因此, 在实验中测得真值近似值的同时, 还必须以适当的方式对测量的质量予以评价.

若把某测量量的“真值”记为 x , 把某次对它测量所得的“测量值”记为 x_0 , 那么 x 与 x_0 之差就称为“测量误差”, 记作 Δx , 即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.1)$$

并称其为测量的“绝对误差”.

误差的绝对值越小, 测量值就越准确. 但对不同的测量对象, 即使误差相同, 测量结果的优劣也不一定相同. 例如, 分别测量一张课桌和一间教室的长, 若以米尺测量, 误差都是0.5 mm, 则后者的测量结果比前者的要好. 用相对误差可以表示这种区别. 用 E 表示相对误差, 其定义为

$$E = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1.2)$$

称为测量的“相对误差”。显然，绝对误差与相对误差的大小反映了测量结果的精确程度。

2. 直接测量与间接测量

直接测量是指直接将待测物理量与选定的同类物理量的标准单位相比较直接得到测量值的一种测量。例如用米尺测量物体的长度，用秒表测量一段时间等都是直接测量。

间接测量是指被测量与直接测量的量之间需要通过一定的函数关系的辅助运算，才能得到被测量物理量的量值的测量。例如，如果要测量圆柱体的体积，可以先直接测得圆柱体的高 H 和直径 D ，再根据 $V = \pi D^2 H / 4$ 计算出体积，圆柱体体积就是间接测量量。

在物理实验中，对长度、质量、时间、电压、电流、温度的测量，一般为直接测量。它们大多为 SI 制中的基本物理量。非基本物理量一般为间接测量。

值得注意的是：有的物理量既可以直接测量，也可以间接测量，这主要取决于使用的仪器和测量方法。例如，测量圆柱体体积时通过测量圆柱体的高和直径来计算体积是间接测量，也可以用排水法直接用量筒测量其排开水的体积即为圆柱体体积，这样就是直接测量。随着测量技术的发展，用于直接测量的仪器越来越多。但在物理实验中，有许多物理量仍需要间接测量。

1.1.2 有效数字

任何物理量的测量都有一个测量值，该值都会有与所用量具或仪器相联系的精确度，不同的测量仪器对同一物理量的测量，其结果如何区分？我们应怎样记录和看待测量值所具有的各位数值呢？在运算中又应怎样处理呢？

1. 有效数字的定义

国家标准中有效位数的定义为：对没有小数位且以若干个零结尾的数值，从非零数字最左一位向右数，所得位数减去无效零（即仅为定位用的零）的个数，就是有效位数；对其他十进位数，从非零数字最左一位向右数，所得位数就是有效位数。

一个具体的测量结果与测量量具有关，因此测量结果的表示不应该随意取位，而应正确反映测量所能提供的有效信息。实验的数据记录、数据运算以及实验结果的表达，都应遵从有效数字的规则。

从仪器上读取测量数据，不仅要读出整分度值刻度数，而且要尽量估读出最小分度的下一位数。以图 1.1 所示的用米尺测量被测物体的长度为例，长度为 4.16 cm。被测物体长度在 4.1~4.2 cm，所以 4.1 cm 是精确读出，6 是估计出来的，其值会因人而异或因次（测量 n 次）而异，称为可疑数字。因此，我们可以规定：有效数字为所有确切数字和一位有误差的数字（也称可疑数字）。根据这个规定，实验记录的原始数据最后一位都应该是估读的。若上述被测物体长度的右端刚好与 4 cm 刻线对齐，测量结果必须写成 4.00 cm，以最后一个“0”表示出估读位是在 1/100 cm 处。写成 4 cm、40 mm 都不对，原因在于有效数字的位数与仪器分度不符。

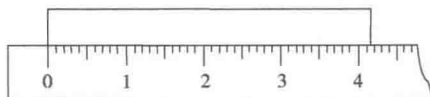


图 1.1 估读

2. 有效数字的修约

有效数字参与运算时,为使计算简化,在不影响最后结果应保留有效数字的位数(或欠准确数字的位置)的前提下,可以在运算前、后对数据进行修约,其修约原则是“四舍六入五看右左”,五看右左即为五时则看五后面,若为非零的数则入,若为零则往左看拟留数的末位数,为奇数则入,为偶数则舍,这一说法可以简述为五看右左.中间运算过程较结果要多保留一位有效数字.具体的数值修约规则见附录“中国国家标准数值修约规则(GB 8170-87)”.

从有效数字的运算规则可见,有效数字进行运算时,其结果的位数应取得恰当.若取少了,会带来附加的计算误差,降低了结果的精确程度;若取多了,从表面看似乎精度很高,实际上毫无意义,使测量结果失去可信度.

修约过程应该一次完成,不能多次连续修约.例如,要使 0.546 保留到一位有效位数,不能先修约成 0.55,接着再修约成 0.6,而应当一次修约成 0.5.

1.1.3 实验数据的有效位数确定

物理实验中通常仪器上显示的数字均为有效数字(包括最后一位估计读数)都应读出,并记录下来.仪器上显示的最后一位数字是 0 时,此 0 也要读出并记录.对于有分度式的仪表,读数要根据人眼的分辨能力读到最小分度的十分之几.

1. 原始数据有效位数的确定

(1) 游标类量具,如游标卡尺、分光计方位角的游标度盘、水银大气压力计的读数游标尺等,一般应读到游标分度值的整数倍.

(2) 对数显仪表以及有十进位式标度盘的仪表,如数字电压表、电阻箱、电桥等,一般应直接读取仪表的示值.

(3) 对指针式仪表,读数时一般需要估读到最小分度值的 $1/4 \sim 1/10$,或使估读间隔不大于基本误差限的 $1/5 \sim 1/3$,同时要符合修约间隔的规定.由于人眼分辨能力的限制,一般不可能估读到最小分度的 $1/10$ 以下.

(4) 对于可估读到最小分度值以下的计量器具,当最小分度不小于 1 mm 时,通常需要估读到 0.1 分度,如螺旋测微器和测量显微镜鼓轮的读数,都要估计到 $1/10$ 分度.少数情况下也可以估读到 0.2 分度或 0.5 分度,例如光具座上的标尺的坐标读数可以估计到 mm 分度的 $1/2$ 或者 $1/5$.对于实验中的原始数据,少数情况下读数的间隔要用到 0.2×10^N 或者 0.5×10^N .

2. 运算过程中的数和中间结果的有效位数

对参与运算的数和中间运算结果都不修约,只在最后结果表示前再修约,这样做既是需要,也更有利于实验效率的提高.

3. 计算时有效数字的确定

(1) 根据有效数字的规定, 测量值的最末一位一定是可疑数字, 这一位应与仪器误差的位数对齐, 仪器误差在哪一位发生, 测量数据的估计位就记录到哪一位, 不能多记, 也不能少记, 即使估计数字是 0, 也必须写上, 否则与有效数字的规定不相符. 例如, 用米尺测量物体长为 52.4 mm, 与 52.40 mm 是不同的两个测量值, 也是属于不同仪器测量的两个值, 误差也不相同, 不能将它们等同看待, 从这两个值可以看出测量前者的仪器精度低, 测量后者的仪器精度高出一个数量级.

(2) 根据有效数字的规定, 在十进制单位换算中, 其测量数据的有效位数不变, 如 23 cm, 若以米或毫米为单位, 可以表示成 0.23 m, 这个数仍然是两位有效数字; 但若写成 230 mm 则不对, 因为 230 mm 为 3 位有效数字. 为了避免单位换算中位数很多时写一长串 0, 或计数时出现错位, 常采用科学表达式, 通常是在小数点前保留一位整数, 用 10^n 表示, 如 2.31×10^{-2} m, 2.31×10^4 cm 等, 这样既简单明了, 又便于计算和确定有效数字的位数.

(3) 根据有效数字的规定对有效数字进行记录时, 直接测量结果的有效位数的多少取决于被测物本身的大小和所使用的仪器精度, 对同一个被测物, 高精度的仪器测量的有效位数多, 低精度的仪器测量的有效位数少. 因此, 有效数字的记录位数与测量仪器有关.

1.2 误差及测量结果表示

1.2.1 误差的分类

误差按其产生的原因和性质可以分为过失误差、系统误差和随机误差三类，它们对测量结果的影响不同，处理方法也不同。

1. 过失误差(粗大误差)

此类误差是一种显然与事实不符的误差，它往往是由于实验人员粗心大意、技术不熟练、过度疲劳、操作不正确或受外界的瞬间干扰等原因引起的。此类误差无规则可寻，只要加强责任感、多方警惕、细心操作，过失误差是可以避免的。

2. 系统误差

系统误差是指在测量和实验中未发觉或未确认的因素所引起的误差，而这些因素影响结果永远朝一个方向偏移，其大小及符号在同一组实验测定中完全相同，实验条件一经确定，系统误差就获得一个客观上的恒定值。当改变实验条件时，就能发现系统误差的变化规律。根据系统误差产生的原因，可以分为以下几类：

(1) 仪器误差：由于仪器本身的固有缺陷或没有按规定条件使用而引起的误差，如测量仪器刻度不准，仪表零点未校正，等臂天平的臂不等，应水平放置的仪器没有放水平等。

(2) 环境误差：周围环境的改变，如温度、压力、湿度等偏离校准值时产生的误差称为环境误差。

(3) 理论误差：由于测量所依据的理论本身的近似性或实验条件的局限，不能达到理论公式所规定的要求而引起的误差称为理论误差。例如，称质量时没有考虑空气浮力的影响；伏安法测电阻时忽略了电表内阻的影响；用单摆测量重力加速度时，摆角不够小等。

(4) 个人误差：由于实验人员的习惯和偏向而引起的误差称为个人误差。例如，使用秒表计时，有人总是操之过急，计时短，而有人则反应迟缓，总是计时长；又如，有的人对准目标时，总爱偏左或偏右，致使读数偏大或偏小。

针对仪器的缺点、外界条件变化影响的大小、个人的偏向，认真选择好仪器，改进实验方法，客观上可以减小系统误差。分析和查找系统误差产生的原因，发现减少系统误差的途径，也是物理实验的一项重要任务。比较典型的减小系统误差的方法有：替换法、交换法、对称观测法等。

3. 随机误差(偶然误差)

在已消除过失误差、系统误差的一切量值的测量中，所测数据仍存在误差，误差时大时小，时正时负，无确定规律，这类误差称为随机误差或偶然误差。随机误差普遍存在于测量之中，其产生的原因不明，因而无法控制和补偿，是不可消除的。但是，倘若对某一量值作足够多次的等精度测量后，就会发现偶然误差完全服从于统计规律，误差的大小或

正负的出现完全由概率决定. 因此, 可以利用统计学原理分析计算其误差大小, 对测量结果的可信赖程度进行评判.

高斯最初研究了多种因素微小起伏而引起的随机误差的概率分布, 并于 1795 年发表了高斯分布函数, 即正态分布函数.

高斯的研究基于下列事实:

- (1) 小的误差比大的误差出现机会多, 故在零附近有最大的概率——单峰性;
- (2) 大小相等、符号相反的正负误差出现的概率相等——对称性;
- (3) 十分大的误差出现的概率非常小, 可认为其概率接近于零——有界性;
- (4) 误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零——抵偿性.

高斯证明, 误差的概率密度函数 $f(\theta)$ 应具有以下形式:

$$f(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}} \quad (1.3)$$

式中, θ 代表误差; $f(\theta)$ 就是误差的正态分布函数, 它表示误差出现在 θ 附近单位区间的概率, 根据概率归一化条件, $f(\theta)$ 曲线下的面积为 1, 即 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(\theta) d\theta = 1$. 如图 1.2 所示. $\pm\sigma$ 是曲线的两个拐点的横坐标. 根据计算得知, $\int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\theta) d\theta = \int_{-\sigma}^{+\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}} d\theta = 0.683$, 这表明误差出现在该区间的概率为 68.3%.

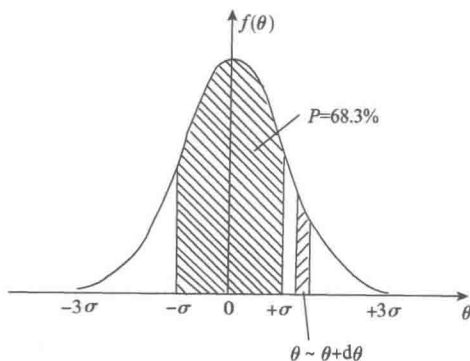


图 1.2 正态分布函数

$[-\sigma, +\sigma]$ 的区间称为置信区间, 测量误差在置信区间出现的概率称为置信概率. 通过计算可以得到 $[-\sigma, +\sigma]$ 置信区间的置信概率为 0.683, $[-2\sigma, +2\sigma]$ 置信区间的置信概率为 0.954 $\left(\int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(\theta) d\theta = 0.954\right)$, $[-3\sigma, +3\sigma]$ 置信区间的置信概率为 0.997 $\left(\int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(\theta) d\theta = 0.997\right)$. 当置信区间增大到对应的置信概率接近 1 时, 说明误差一定会出现在改置信区间内, 把这个区间称为极限误差.

σ 也是正态分布函数中唯一的参数, 它唯一确定了正态分布曲线的形状. 不同的测量, 有不同的 σ 值. σ 越小, 曲线峰值越高, 图形越尖锐, 这表明测量数据集中重复性好.