

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主 编◎章世暄

副主编◎李 雄 王炜路 姜碧芬

廖培林 蔡伟群



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

大学物理实验

主 编 章世暄

副主编 李 雄 王炜路 姜碧芬

廖培林 蔡伟群

西南交通大学出版社

· 成都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

大学物理实验 / 章世暄主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2009.1

ISBN 978-7-5643-0121-7

I. 大… II. 章… 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 (2008) 第 174290 号

大学物理实验

主编 章世暄

责任编辑	黄淑文
特邀编辑	李 鹏
封面设计	翼虎书装
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮 编	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	12.25
字 数	306 千字
印 数	1—3 000 册
版 次	2009 年 1 月第 1 版
印 次	2009 年 1 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-0121-7
定 价	22.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

物理学一词早先源于希腊文 (φύσις), 意为自然。其现代内涵是指研究物质运动最一般规律及物质基本结构的科学。物理学是实验科学, 凡物理学的概念、规律及公式等都是以客观实验为基础的。科学家提出某些假设和预见, 为对其进行证明, 筹划适当的手段和方法, 根据由此产生的现象来判断假设和预见的真伪。因此, 科学实验的重要性是不言而喻的。

当代最为人们瞩目的诺贝尔奖, 其宗旨是奖给有最重要发现或发明的人。因此, 诺贝尔物理学奖标志着物理学中里程碑级的重大发现和发明。从 1901 年第一次授奖至今已有近百年的历史, 有得主近 150 名, 其中以实验物理学方面的发现或发明而获奖者约占 73%。

整个物理学的发展史是人类不断了解自然、认识自然的过程。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、相互激励、探索前进, 而不断向前发展的。在物理学的发展过程中, 这种相互促进、相互激励、相互完善的过程的实例是数不胜数的。

无论是物理学还是整个自然科学的发展, 实验和理论的相互作用都是一种内在的根本动力。这种作用引起量的渐进积累和质的突变飞跃的交替潜进, 推动着科学进程一浪一浪地不断高涨。

正如著名物理学家密立根 (R. A. 密立根) 所说: “我仅仅在理论和实验这两个领域里作了微小的贡献, 就得到 1923 年的诺贝尔物理学奖, 我感到非常荣幸。”这件事很好地说明科学是在用理论和实验这两只脚前进的, 有时是这只脚先迈出一大步, 有时是另一只脚先迈出一大步, 但是前进要靠两只脚, 先建立理论然后做实验, 或者是先在实验中得出新的关系, 然后再迈出理论这只脚, 并推动实验前进, 如此不断交替进行。

对于物理学学习者来说, 物理实验不仅是物理学科的重要组成部分, 也是深入理解和掌握物理定律和原理必不可少的环节, 同时, 它还是增强学生分析和解决实际问题的能力、提高综合素质的有效途径。

物理实验技术是工程技术的基础, 是学生系统地学习实验方法、仪器使用、数据处理等技能的良好训练平台, 因此它是理工科学生不可或缺的一门重要基础课程。

本书系根据教育部《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求》, 针对学生的专业特点, 结合多年来物理实验课程的教学实践编写而成的。主要特点如下:

(1) 通俗易懂, 便于自学和预习。每个实验都给出了简明扼要的操作要点和注意事项, 对初学者易出现的问题, 有较为详细的解释。此外, 还给出了实验报告范例, 便于自学和按照实验要求进行预习。

(2) 重点突出，便于理解和掌握。每个实验都提出了完成实验项目的具体任务及数据测量要求，便于操作和数据处理。

(3) 注重归纳总结，便于综合运用。对一些物理量的测量，提供了多种方法，给学生更多的选择余地。扩展相关的实验内容，引导学生自主思考，培养良好的实验素养。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏，敬请读者批评指正。

编 者

2008 年 10 月

目 录

绪 论	1
第 1 章 实验误差及测量数据的处理	3
第 1 节 测 量	3
第 2 节 误差及误差分类	3
第 3 节 测量的准确度和精密度	4
第 4 节 直接测量结果的表示	4
第 5 节 有效数字	7
第 6 节 间接测量结果的表示	9
第 7 节 处理实验数据的方法	10
第 8 节 误差与有效数字练习题	14
第 2 章 力学、热学实验	15
实验 1 长度测量	15
实验 2 固体密度的测量	21
实验 3 牛顿第二定律	26
实验 4 动量守恒和机械能守恒	31
实验 5 简谐振动	33
实验 6 用三线摆测物体的转动惯量	37
实验 7 拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量	41
实验 8 液体表面张力系数的测定	48
实验 9 液体黏滞系数的测定	52
实验 10 固体线膨胀系数的测定	55
实验 11 液固体比热容的测定	58
第 3 章 电学、磁学实验	63
电磁学实验操作规程	63
实验 1 欧姆定律的应用	64
实验 2 线性电阻和非线性电阻的伏安特性曲线	69
实验 3 用单臂电桥测电阻	74
实验 4 用双臂电桥测低电阻	79
实验 5 示波器的使用	83
实验 6 静电场的描绘	89

实验 7 用电位差计测量电动势	94
实验 8 用电位差计测量电流和电阻	100
实验 9 磁场描绘	103
实验 10 用霍耳元件测量磁场	108
实验 11 铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线	112
第 4 章 光学、近代物理实验	118
光学实验预备知识	118
实验 1 薄透镜焦距的测定	121
实验 2 分光计的调整和测量三棱镜玻璃的折射率	126
实验 3 用透射光栅测定光波波长	133
实验 4 光的等厚干涉现象及其应用	136
实验 5 迈克尔逊干涉仪	140
实验 6 光电效应与普朗克常量的测定	144
实验 7 夫兰克-赫兹实验	151
实验 8 密立根油滴实验	159
第 5 章 设计性实验	167
概 述	167
实验 1 重力加速度的研究	175
实验 2 焦利秤测定不规则物体的密度	175
实验 3 简易万用电表的制作	176
实验 4 电阻温度系数的测定	177
实验 5 基尔霍夫定律和电位的研究	179
实验 6 电源特性研究	180
实验 7 补偿法测量电源电动势	180
实验 8 测量细丝直径	182
附 录	183
附录 1 希腊字母表	183
附录 2 常用数字符号	183
附录 3 一些常用数字	184
附录 4 几种单位的换算	184
附录 5 基本物理常数	186
附录 6 一些固体的密度	187
附录 7 一些物质的熔点、熔解热、沸点、汽化热	188
参 考 文 献	189

绪 论

一、物理实验课的基本程序

1. 实验前的准备

教材是学生进行实验的主要依据，它给出了这门课程的总体安排和要求，每个实验的具体任务，以及依据的物理原理和选用的实验方法等。因此，学生在课前一定要认真预习好教材，做到实验之前明确任务和要求，了解所要观察和研究的物理现象，并正确理解原理，熟悉实验和测量方法，了解仪器的性能和使用方法，注意对实验中系统误差的分析和消除方法。同时在实验记录本上扼要写出本次实验的实施计划，它包括任务和要求、计算测量结果将要使用的计算公式及必须保证的实验条件、主要仪器及规格，同时还要画出记录数据用的表格，对电学实验还应画出电路图。解决预习思考题，可更好地理解实验的主要内容和安排。

2. 认真和细心地进行实验

做实验不是简单地测量几个数据，计算出结果，更不能把这个重要实践过程看成是只动手而不动脑筋的机械操作。要在实践过程中，有意识地培养自己熟练使用和调节仪器的本领、精密而正确的测量技能、认真观察和分析实验现象的科学素养、整洁清楚地做实验记录（问题、现象、原始数据）的良好习惯，同时还要有分工协作精神和团队意识。总之，实验过程中要做到手脑并用，积极地动脑思考。而测量结果正确与否，主要取决于实验条件和实验者的操作技能及精细程度等多种因素。因此，对任何一个量的测量，一般都要重复进行多次，以确保其正确、可靠；同时还应经常检查和复核实验过程中每一步的正确性，并采用各种可能的办法来检验自己的测量数据，如粗算最终结果，查看数据变化情况是否符合预期规律，数据是否违背经验常识等，此外，在实验过程中还要自觉培养良好的实验习惯、实事求是的科学态度。要爱护实验仪器设备，遵守操作规程，注意安全。

3. 写好实验报告

写出实验报告是实验工作的最后环节，是整个实验工作的重要组成部分，它可以训练写科学技术报告的能力及对整个实验进行总结。

实验报告的重要内容之一是处理测量数据。因此，需要按照实验情况采用正确的数据处理方法，以计算概括出实验结果的规律，并得出应有的结论。处理数据最常用的基本方法有列表法和作图法，原始数据都应该填入相应的专门设计的表格中，这样在最后计算中就很方便。而对于测量数据很多，计算繁杂的实验，设计合理的数据表格还能为你减少不必要的重复劳动。不少实验还要求对测量数据进行作图处理，以寻求实验规律和经验公式，或用作图法计算出间接测量值及作出校准曲线等。

实验报告是完成每个实验工作的总结，也是交给老师的一份完整的作业，它应当写得简

明扼要，概念清楚，叙述准确。

以下给出普通物理实验要求的实验报告形式：

××实验报告

实验名称：_____

班级：_____ 组号：_____ 完成日期：_____ 年 _____ 月 _____ 日 室温 _____

姓名：_____ 同组人员：_____ 指导老师：_____

实验目的：

实验仪器：写出主要仪器的名称、规格和编号

实验原理：用自己的语言，概括出本实验的原理（依据）和测量方法要点，实验条件，主要公式，（不需指导）公式中各物理量意义，电路图或实验原理示意图（不必画装置图）。

实验内容：写出实验的具体步骤。

数据记录及处理：首先列出全部原始测量数据，画出表格，其次按测量真值（或平均值）计算，误差计算和被测量结果表示这一顺序，正确计算和表示测量结果，如果是要求作图的，还要应用坐标纸细心描出图线。

分析和讨论：对实验中观察到的现象和结果的好坏进行具体分析或讨论，并回答老师提出的问题。

二、实验室守则

(1) 学生进入实验室须带上实验数据表格及实验指导书，不得迟到和早退。

(2) 遵守课堂纪律，保持安静的实验环境。

(3) 实验准备就绪后，需经指导老师检查同意，方可进行实验。实验中应严格遵守仪器设备操作规程，认真观察和分析现象，如实记录实验数据，独立分析实验结果，认真完成实验报告。

(4) 爱护仪器，严格按照仪器说明书操作。进入实验室不得擅自搬弄仪器。公用工具用完后应立即归还原处。

(5) 实验中若发生仪器故障或其他事故，应立即切断电源、水源等，停止操作，保持现场，报告指导老师，待查明原因或排除故障后，方可继续进行实验。

(6) 实验完毕后，学生应将仪器整理还原、切断电源，桌面、凳子收拾整齐，经教师检查测量数据和仪器还原情况并签字后，方可离开实验室。

(7) 实验报告应在实验后一周内交实验室。

第 1 章 实验误差及测量数据的处理

第 1 节 测 量

物理实验的大部分工作是进行物理量的测量，而测量是指将被测量与规定的标准量（标准单位）相比较，得出被测量是标准量的多少倍，附上标准单位，即为测量结果。

测量分直接测量和间接测量两种。

直接测量：将被测量与量具、仪表直接进行比较，如分别用米尺、秒表、安培计测长度、时间、电流强度。

间接测量：被测量不能直接与量具、仪表进行比较，而需通过测出与被测量有关的若干物理量，然后利用公式或原理等进行计算得到测量值，如测量面积、密度、热量等。

第 2 节 误差及误差分类

测量的目的就是为了获得真值，即反映物质自身特性的物理量所具有的客观真实数值。但在测量过程中，由于观测对象、仪器、方法、环境和观测者存在各种原因，因此被测量的真值不可能测得，测量所得的只能是近似值，一般呈正态高斯分布（见图 1.1）。通常可取多次测量值的算术平均值来代表真值。测量值与真值间的差值称为误差，显然，有测量就有误差。

误差可分为三大类：

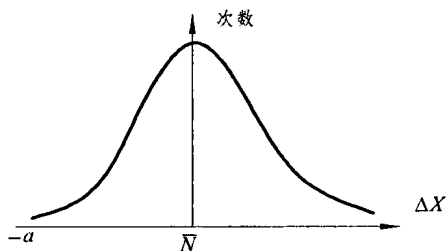


图 1.1

1. 系统误差

在相同条件下多次测量同一物理量时，误差的大小和符号恒定不变，或在条件改变时，误差的大小和符号按一定规律变化，这类误差称为系统误差。导致系统误差产生的原因有：

- ① 仪表（量具）误差，如零点不准、刻度不准、砝码不准等；
- ② 环境改变引起的误差；
- ③ 习惯误差；
- ④ 测量方法和计算方法不完善所引起的误差。

这类误差可以根据引起的原因进行修正来减少或消除。在表示测量结果时，均应消除掉系统误差。

2. 偶然误差

在相同的条件下多次测量同一物理量时，由于一些随机因素的影响而使误差的数值或符号无确定的规律，也不能预料，这类误差称为偶然误差（或随机误差）。导致偶然误差产生的原因有：

- ① 仪器精度；
- ② 人体感官灵敏度；
- ③ 环境的偶然因素，如温度、振动、气流、噪声等的干扰。这种误差无法控制，但符合统计规律：

- 误差小的出现机会多；
- 绝对值相等的正负误差出现机会相等；
- 测量次数“无限”增多时，每次偶然误差的算术平均值趋近于零。

3. 过失误差

由于测量、读数、记录以及操作等方面的差错而造成的误差，称为过失误差（或粗大误差）。含有过失误差的测量数据为坏数据，应将其剔除不用。

在对测量结果做总体评定时，一般均应将系统误差、过失误差和偶然误差三者综合起来考虑。

第 3 节 测量的准确度和精密度

精度用来反映测量结果与真值的差异，误差小则精度高，误差大则精度低。而精度又分为准确度、精密度和精确度。

准确度是指测量值与真值符合的程度，它反映了系统误差大小的程度，准确度高表示系统误差小；精密度是指测量中所测数值重复性的程度，它反映偶然误差的大小，精密度高表示偶然误差小，即测量的重复性好；精确度则表示准确度和精密度的综合情况。只有精确度高的测量结果，才是质量最好的。为形象说明其区别，可用打靶的例子来说明，图 1.2 (a) 表示精密度和准确度都很好，精密度高；图 (b) 精密度高，准确度差；图 (c) 精密、准确度都不好。

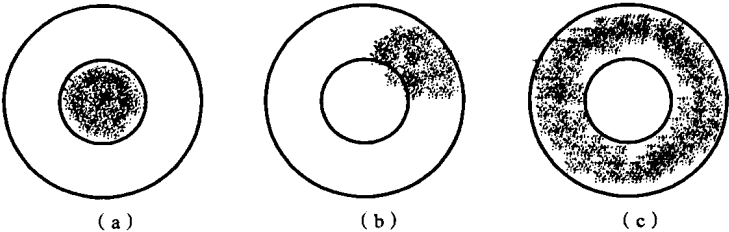


图 1.2

第 4 节 直接测量结果的表示

直接测量结果表示成 $N = N' \pm \Delta N$ (单位) 的形式。 N' 是对系统误差修正以后的数值，它

可以是多次测量的算术平均值，也可以是一次测量值； ΔN 是绝对误差，可以是仪器误差、平均误差或估计误差。

一、简单刻度仪器的读数和记录

在使用各种量具和仪器进行测量时，如何读取它所指示的数值，使该数值中的每位数都能有效地反映被测量的实际大小，这是获得正确实验结果的前提。对于米尺、温度计、电表等指示数可连续变化的仪器，读数时，都要求先读整数位，然后再进行仪器最小分度值内的估读，通常只估读一位。如用米尺测物体长度，最小分度是 1 mm，所以估读到 1/10 mm；用伏特计测电压，若最小分度是 0.1 V，那么应记录到 1/100 V。

二、最佳值——算术平均值

因为增加测量次数对减小偶然误差有利，所以我们常常对同一被测量重复测量多次。若已消除系统误差，那么，当测量次数趋于无穷大时，多次测量的算术平均值就等于该待测量的真值。设 N' 表示某一待测量物理量的真值，如果对该量进行了 k 次测量，各次测量值为 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_k$ ，各测量值的偶然误差为 $\Delta N = N_1 - N'$ ， $\Delta N = N_2 - N'$ ， $\dots$ ， $\Delta N = N_k - N'$ ，则 k 次测量的算术平均值 $\bar{N}$ 为

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^k N_i}{k} = \frac{\sum_{i=1}^k (N' + \Delta N_i)}{k} = N' + \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta N_i$$

当测量次数 $k \rightarrow \infty$ 时，有 $\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta N_i = 0$ ，因而 $\lim_{k \rightarrow \infty} \bar{N} = N'$

由于 k 总是有限的，因此算术平均值并不等于真值，但根据误差的统计理论可以证明，多次测量的算术平均值可以最好地代表真值，也就是这一系列测量值中的最佳值。所以通常用算术平均值来表示测量结果。

三、直接测量的误差表示

用平均值作为测量结果，其可信程度在已定的测量次数条件下就要由误差来决定。如果各次测量值相互差异大，那么测量就不精密，测量误差大，结果可信度就低；反之，各次测量值差异小，测量就精密，测量误差小，结果可信度就高。所以，误差的大小反映出了测量结果的可信程度。

在普通物理实验中，常用平均误差或均方根误差、仪器误差或估计误差来表示测量误差的大小。

1. 多次测量的平均误差或均方根误差

设对某量作 k 次测量，得到一系列测量值： $N_1, N_2, N_3, \dots, N_k$ ，把测量值与算术平均值

之差取绝值,用来表示每次测量的误差,即 $\Delta N_1 = |N_1 - \bar{N}|$, $\Delta N_2 = |N_2 - \bar{N}|$, $\dots$, $\Delta N_k = |N_k - \bar{N}|$, 则算术平均值

$$\overline{\Delta N} = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta N_i}{k} = \frac{\sum_{i=1}^k |N_i - \bar{N}|}{k}$$

被称为平均误差。

但是, $\overline{\Delta N}$ 会随着次数 k 的变化而变化,而且对于不等精度测量的两列数据可能算出相同的 $\overline{\Delta N}$ 以及还存在其他缺点,所以,在工程技术和科学研究中,为了更准确地表示出测量误差,普遍采用的是均方根误差。均方根误差的定义式是

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^k (N_i - \bar{N})^2 / k}$$

对 k 次测量中某一次测量值的均方根误差表示为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^k (N_i - \bar{N})^2 / (k-1)}$$

由统计理论可证得, k 次测量结果的算术平均值的均方根误差为

$$\sigma_k = \frac{\sigma}{\sqrt{k}} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (N_i - \bar{N})^2 / k(k-1)}$$

统计理论还可以证明,当测量次数 k 很多时, σ 与 $\overline{\Delta N}$ 之间存在如下关系:

$$\sigma = 1.25 \overline{\Delta N}$$

由于均方根误差具有很多优点,人们又称它为标准误差。但它的计算比较复杂,通常在精度要求高的实验中使用,而且对测量仪器的精确度也有较高要求。

2. 仪器误差

仪器误差指在正确使用仪器的情况下,可能产生的最大误差,其数值通常由厂家或计量机关经过检定而给出。仪器误差在测量中是无法避免的,通常作为偶然来考虑。

仪器误差决定于仪器的精确度。某种仪器的精确度是指仪器标尺上最小一个分格的大小。仪器误差通常用仪器精确度的一半或仪器上标出的精度等级来表示。例如,钢板尺的仪器误差 $\Delta L_{\text{仪}} = A_M k\%$, 其中, A_M 是 M 挡的量限, k 是该表的精度等级,通常在仪器上标出。

考虑到仪器的等级误差和测量误差,测量结果最大误差 ΔN 通常表达为

$$\Delta N = N_{\text{仪}} \quad (\text{仪器精度较低或测量次数很少})$$

$$\Delta N = \begin{cases} \overline{\Delta N} \\ \sigma \end{cases} \quad (\text{仪器精度较高或测量次数很多})$$

3. 估计误差

在有些情况下,仪器误差不能正确反映出测量结果的最大误差,这时可根据实际情况估计出一个误差。如用 0.1 s 分度的秒表计时,由于人体感官灵敏度限制和技术水平的不熟练,

常造成启动和停止秒表的测量误差大于秒表的仪器误差，这时可估计出一个误差（如 0.2 s）；又如用钢卷尺测某一较长距离，测量误差较大，估计误差可根据测量的实际情况，设为 5~10 mm，甚至还可大一些。估计误差大小的选取，要根据测量技术、条件及仪器误差的大小来综合考虑，使之符合实际情况。

四、直接测量结果的表示

如果我们用某一仪器在相同条件下对某一物理量进行了多次测量，则测量结果可表示为

$$N = \bar{N} \pm \overline{\Delta N} \quad (\text{或 } \sigma) \quad (\text{当 } \overline{\Delta N} \geq \Delta N_{\text{仪}} \text{ 时})$$

$$N = \bar{N} \pm \Delta N_{\text{仪}} \quad (\text{当 } \overline{\Delta N} \text{ (或 } \sigma) \leq \Delta N_{\text{仪}} \text{ 时})$$

它表示被测量的真值一般在 $\bar{N} + \overline{\Delta N}$ （或 σ ）与 $\bar{N} - \overline{\Delta N}$ （或 σ ）之间，而取最佳值 $\bar{N}$ 的可能性最大。

有些情况，若无法对某量进行多次测量，或无必要作多次测量，这时，可用一次测量值 $N_{\text{测}}$ 作为测量结果的最佳值，即

$$N = N_{\text{测}} \pm \Delta N_{\text{仪}} \quad (\text{或 } \Delta N_{\text{值}})$$

以上讲的误差也称为绝对误差，它的单位和测量值的单位相同。绝对误差并不能反映出测量的准确度。例如，测棒长 $L = (10.00 \pm 0.07) \text{ cm}$ ，直径 $d = (1.00 \pm 0.07) \text{ cm}$ ，到底哪个结果精确度高呢？为此，我们引入相对误差的概念。

绝对误差与真值的比值称为相对误差。它没有单位，一般用百分数表示

$$\text{相对误差}(E) = (\text{绝对误差} / \text{算术平均值}) \times 100\%$$

上例相对误差分别为

$$E = \Delta L / L = (0.07 / 10.00) \times 100\% = 0.7\%$$

$$E = \Delta d / d = (0.07 / 1.00) \times 100\% = 7\%$$

显然，棒长的测量比棒直径的测量要精确得多。

第 5 节 有效数字

任何直接测量测得的数据都只能是近似的数，由这些近似的数通过计算而求得的间接测量值也是近似数。因此，近似数的计算和表示都有一些规则，以便准确表示出数据记录和运算结果的近似性，为此我们引入有效数字。

当用仪器来测量某一个物理量时，仪器上的示数往往不会刚好在最小分度的刻度上，比如测长度时，若读数落在 10 mm 和 11 mm，则该数值可写为整数 10 mm 和估读出 1 位如 0.4 mm，此值即为 10.4 mm，这个 4 也是有意义的，称为“可疑数字”。在进行测量记录时，一般在最小分度后估读一位，而且只估读一位数字。我们把所有准确数字再加上一位有意义的可疑数字总称为“有效数字”。

一、记录有效数字应注意的几点

① 待测物理量有效数字的位数决定于测量仪器的精密度，不能任意增减。

② 有效数字位数与单位变换无关。如 0.053 m 和 5.3 cm 都是两位有效数字，通常用科学计数法表示为 $5.3 \times 10^{-2}\text{ m}$ 。

③ 数字中的“0”可以是有效数字，也可以不是有效数字。如物长 $0.010\ 20\text{ m}$ ，前两个“0”是用来表示小数所占位置的，不是有效数字，而后面的两个“0”都是有效数字，该数是4位有效数字。

④ 对于测量公式中经常碰到的某些常数，如 π ， g 等，一般有效数字位数较多，可看做精确常数，在计算结果时，当需对它们取值时，可使它们的取值位数比测量公式中其他测量值的有效位数适当多1~2位。

⑤ 实验结果取值的最后一位，应当和绝对误差对齐，绝对误差一般只写一位。在对数进行舍入时，一般采用“小于5则舍，大于5则入，等于5则末位数凑成偶数”的法则。这个法则克服了见“5”就入的系统误差，使偶数误差随机化。

二、四则运算中有效数字的取法

1. 加减法

$$\begin{array}{r} 23.\bar{1} \\ + 5.26\bar{5} \\ \hline 28.\bar{3}\bar{6} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 23.\bar{1} \\ - 5.26\bar{5} \\ \hline 17.83\bar{5} \end{array}$$

在上述相加减的结果中，由于第3位“ $\bar{3}$ ”和“ $\bar{8}$ ”已为可疑数字，其后的数已无意义，按舍入法则，结果应分别记为 $28.\bar{4}$ 和 $17.\bar{8}$ 。可以看出，在加减运算中，运算结果的最后一位有效数字由各数值中最大的绝对误差来决定。

2. 乘除法

$$\begin{array}{r} 4.34\bar{7} \\ \times 21.\bar{3} \\ \hline 1304\bar{1} \\ 434\bar{7} \\ 869\bar{4} \\ \hline 92.59\bar{1}\bar{1} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 17.\bar{3}\bar{4} \\ 21\bar{7} \overline{) 3764.\bar{3}} \\ \underline{217} \\ 1594 \\ \underline{1519} \\ 753 \\ \underline{651} \\ 1020 \\ \underline{868} \\ 152 \end{array}$$

最后结果只保留一位可疑数字，则上述结果应为 $92.\bar{6}$ 和 $17.\bar{3}$ 。在作除法运算时，应注意判断商数中从哪一位开始出现可疑数。 $21\bar{7}$ 中的7是可疑的，用它去除3 764并不影响用17作为它的两位商位的可靠性。但是到余数 $75\bar{3}$ 以后，再用 $21\bar{7}$ 去除得到的商必定是可疑的了。

一般来说,当几个数相乘(或相除)时,乘积(或商)的有效数字位数与各因子有效数字位数最少的相同。不难证明,乘方、开方的有效数字位数与其底的有效数字位数相同。

第6节 间接测量结果的表示

由于间接测量结果是由直接测量结果经过数字运算得到的,而直接测量结果有误差,所以间接测量结果也有误差,也应表示成 $N = N_{\text{佳}} \pm \Delta N$ 的形式。下面介绍基本误差公式及其推导。

直接测量结果是 $A \pm \Delta A$, $B \pm \Delta B$, 间接测量结果是 $N = N \pm \Delta N$, N 是 A 和 B 的函数, $N = N(A, B)$, 求 ΔN 。

(1) 当 $N = A + B$ 时, $N \pm \Delta N = (A \pm \Delta A) + (B \pm \Delta B) = (A + B) \pm \Delta A \pm \Delta B$ 。

考虑最不利情况,即可能产生最大误差的情况,间接测量误差应取作 $\Delta N = \Delta A + \Delta B$, 此即两个量相加的绝对误差公式,其相对误差 $E_N = \Delta N / N = (\Delta A + \Delta B) / (A + B)$ 。

(2) 当 $N = A - B$ 时,同样可得 $\Delta N = \Delta A + \Delta B$, $E_N = \Delta N / N = (\Delta A + \Delta B) / (A - B)$ 。

(3) 当 $N = A \times B$ 时, $N \pm \Delta N = (A \pm \Delta A)(B \pm \Delta B) = AB \pm \Delta A \times B \pm \Delta B \times A \pm \Delta A \times \Delta B$ 。略去二阶数 $\Delta A \times \Delta B$, 并考虑最不利情况,最大误差 $\Delta N = \Delta A \times B + \Delta B \times A$, 其相对误差 $E_N = \Delta N / N = (\Delta A \times B + \Delta B \times A) / (A \times B) = E_A + E_B$ 。

(4) 当 $N = A / B$ 时, $N \pm \Delta N = (A \pm \Delta A) / (B \pm \Delta B) = (A \pm \Delta A)(B \mp \Delta B) / [(B \pm \Delta B)(B \mp \Delta B)] = (A \times B \pm \Delta A \times B \pm \Delta B \times A \pm \Delta A \times \Delta B) / (B^2 - \Delta B^2)$ 。略去二阶数 $\Delta A \times \Delta B$ 和 $(\Delta B)^2$, 并考虑最不利情况,则最大误差 $\Delta N = (B \times \Delta A + A \times \Delta B) / B^2$, $E_N = \Delta N / N = E_A + E_B$ 。

从上面四个简单公式中可总结出:

① 和与差的绝对误差,等于各量绝对误差之和。

② 积与商的相对误差,等于各量相对误差之和。

以上结果可推广到任意各个量的情况。

例如,当 $N = A + B - C + D$ 时,则 $\Delta N = \Delta A + \Delta B + \Delta C + \Delta D$; 当 $N = (A \times B \times C) / D$ 时,则 $E_N = E_A + E_B + E_C + E_D$ 。即 $\Delta N / N = \Delta A / A + \Delta B / B + \Delta C / C + \Delta D / D$ 。

还可以利用它们推导出复杂计算的间接测量的误差公式。

例如,测得圆盘的厚 $h = (0.48 \pm 0.1)$ cm, 直径 $d = (12.56 \pm 0.01)$ cm, 求体积。

体积 $V = \pi d^2 h / 4$, 因 $h = 0.48$ 只有两位有效数字,故 π 和 d 只应取三位,得 $d = 12.6$ cm, 又 $\pi = 3.14$, 故

$$V_{\text{佳}} = \frac{3.14}{4} \times (12.6)^2 \times 0.48 = 59.8 \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$E_V = \Delta V / V = 2 \times E_d + E_h = 2 \Delta d / d + \Delta h / h = 2 \times 0.01 / 13 + 0.01 / 0.48 = 2.3\%$$

$$\Delta N = 60 \times 0.023 = 1.4 \text{ (cm}^3\text{)}$$

最后结果 $V = (59.8 \pm 1.4) \text{ cm}^3$ 或写为 $V = (61 \pm 2) \text{ cm}^3$ (误差只取一位)。

推导误差更一般的方法是微分法,因为“误差”是测量结果的微小偏差,其特性与函数增量和自变量的增量关系类似,因此可以用微分法推导误差公式。

间接测得量 N 是直接测得量 A 、 B 、 C 、 D …的函数 $N=N(A, B, C\cdots)$ 。由微分计算

$$dN = \frac{\partial N}{\partial A} dA + \frac{\partial N}{\partial B} dB + \cdots + \cdots$$

考虑最不利情况，各个量 A 、 B 、 C …的误差对于 ΔN 是互相加强的，因此需要将计算式中 dA 、 dB …的系数取绝对值，由此可得

$$\Delta N = \left| \frac{\partial N}{\partial A} \right| \Delta A + \left| \frac{\partial N}{\partial B} \right| \Delta B + \cdots$$

第 7 节 处理实验数据的方法

处理实验数据是实验报告的基本内容，它是分析和讨论实验结果的主要依据。因此，需要按照实际工作情况，采取正确的处理数据的方法，才能科学地从实验的实际情况中计算出结果和概括出实验规律。

下面简略介绍几种常用的处理实验数据的方法，具体的应用结合有关数据再详细叙述。

一、列表法

列表法就是将一组数据中的自变量、因变量的各个值依一定的形式和顺序一一对应列出来。有时为了清楚起见，也常将任何一组测量结果的多次测量值，列成一适当表格。

列表法形式紧凑，数据易于参考比较，在同一表内可以同时表示几个变数间的变化而不混乱，因此，在数据处理中被广泛应用。一般列表应注意以下几点：

- ① 根据实验的具体要求，列出适当的表格。在表格上简明扼要地写上名称。
- ② 表内标题栏中，注明物理量的名称和测量的单位，不要把单位记在数据末尾。
- ③ 数字要正确地反映测量的有效数字。
- ④ 表格力求简单清楚，分类明显。

二、作图法

作图法是研究物理量的变化规律，找出物理量间的函数关系，求出经验公式的最常用方法，它可把一系列实验数据之间的关系或其变化情况用图线直观地表示出来。利用作图法得出的曲线，可迅速读出在某一范围内一个量所对应的另一个量，从图中可以很简便地求出实验所需要的某些数据。在一定条件下，还可以从曲线的延伸部分获得实验测量以外的点所对应的一些数据。

作图必须遵从下列规则：

- ① 要用坐标纸。坐标纸的大小及坐标轴的比例应根据测得数据的有效数字和结果的