

●普通高等学校“十一五”规划教材配套实验教材●
●高等医学院校教材●

Medical Physics Experiment

医用物理学实验

(第2版)

魏 杰 主编

中国科学技术大学出版社

● 普通高等学校“十一五”规划教材配套实验教材 ●
● 高等医学院校教材 ●

Medical Physics Experiment

医用物理学实验

(第2版)

魏 杰 主编

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书是在使用三十多年的实验教材基础上,为适应新的教学要求和条件,体现近年来教学改革成果而编写的.本书集多年的教学特点、教学方法、实验技术为一体,是对实验教材质量的一次提高.

本书内容层次按教学需要编排,主要介绍了基本的实验仪器和基本测量、综合性和验证性实验、研究与设计性实验等等.本书可作为高等医学院校的物理实验教材,也可作为高等院校物理实验课程的参考书.

图书在版编目(CIP)数据

医用物理学实验/魏杰主编.—2版.—合肥:中国科学技术大学出版社,2013.6
ISBN 978-7-312-03245-5

I. 医… II. 魏… III. 医用物理学—实验—高等学校—教材 IV. R312-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 128304 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026
网址: <http://press.ustc.edu.cn>
印刷 合肥市宏基印刷有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 710 mm×960 mm 1/16
印张 10.75
字数 210 千
版次 2010 年 3 月第 1 版 2013 年 5 月第 2 版
印次 2013 年 5 月第 3 次印刷
定价 19.00 元

前 言

本书是在蚌埠医学院使用三十多年的实验教材基础上,为适应新的教学要求和条件,体现近年来教学改革成果而编写的.本书集多年的教学经验、教学方法、实验技术为一体,是对实验教材质量的一次提高.

本书内容层次按教学需要编排,共分5个部分.第1部分为绪论,内容包括实验目的、要求及实验数据处理的基础知识.第2部分介绍了医用物理实验中常用的一些仪器设备以及同类仪器的不同型号,扩大学生的视野.第3部分是医学生应该掌握的物理实验内容,为基础训练实验,包括力、热、光、电等不同学科分支的内容.通过这些实验可以让医学生学习基本的医学物理实验方法和测量技术,熟悉基本医学物理实验仪器的工作原理和使用方法,并学会基本的实验数据处理方法和分析误差的能力等.第4部分是设计、提高性实验,是综合应用性实验,通过该层次实验的学习和思考,培养学生对物理知识的综合运用能力和创新能力.这部分实验是本书编写者们多年来在教学实践中曾经研究过的题目,在这些实验中没有给出具体的实验方法和步骤,只是提出了实验目的、实验要解决的问题.由于实验方案不同,所用仪器也会不同,所以没有给出相应的仪器.通过这种设计性实验的训练,可以使学生进一步体验查阅资料、设计实验方案、搭建实验平台、解决实验中出现的問題以及分析实验结果的全过程,在实验过程中提高学生综合分析问题和解决实际问题的能力,提高科学素养.第5部分附录是阅读部分,是实验内容的扩展、相关知识的纵深提高.它是本书编写者们已经发表或待发表的文章节选.

第2版编写时改写了第3-1节实验物体杨氏模量的测量,增加了附录5.

本书由魏杰教授主编,编写情况如下:李斌编写第1-1、1-2、3-5、3-6、3-14、3-15节,吕道文编写第2-3、3-4、3-7、3-8、3-12节,魏杰编写前言以及第2-1、2-2、3-1、3-18、3-19、4-1、4-2、4-3、4-4节以及附录,张拥军编写第2-4、3-2、3-3、3-10、3-11、3-16节,赵挺编写第3-9、3-13、3-17节.

由于编者水平有限,虽经再版,书中疏漏之处仍然在所难免,恳请读者批评指正.

编 者

2013年3月

目 录

前言	(i)
----------	-------

第 1 部分 绪 论

1-1 医用物理学实验的目的和要求	(3)
1-2 误差分析及数据处理	(5)

第 2 部分 基本实验仪器和基本测量

2-1 游标卡尺和螺旋测微器	(19)
2-2 万用电表	(23)
2-3 常用光源和共轴等高调节	(27)
2-4 读数显微镜	(30)

第 3 部分 综合性和验证性实验

3-1 物体杨氏模量的测量	(35)
3-2 测定液体的黏度	(40)
3-3 声速的测量	(46)
3-4 人耳听阈曲线的测定	(54)
3-5 测定水的表面张力系数	(59)
3-6 用稳恒电流场模拟静电场	(65)
3-7 示波器的使用	(70)
3-8 分光计的调节	(80)
3-9 测定透明物体的折射率	(86)
3-10 用衍射光栅测定光波波长	(90)
3-11 用牛顿环测量球面的曲率半径	(93)
3-12 偏振光的观察与研究	(97)
3-13 用糖量计测定糖的百分含量	(102)
3-14 薄透镜焦距的测定	(105)

3-15	用模拟的方法研究眼睛的屈光不正及其矫正	(109)
3-16	测定组合透镜的节点和等效焦距	(114)
3-17	光电效应的研究	(118)
3-18	核磁共振	(123)

第 4 部分 研究与设计性实验

4-1	测 α 较小溶液的表面张力系数	(133)
4-2	测量血液、血清的黏度	(135)
4-3	测量透镜焦距的各种方法比较	(137)
4-4	显微镜的放大率和分辨率	(139)
思考题解答与提示		(145)
附录 1	测表面张力系数的两种方法比较	(151)
附录 2	用拉脱法测液体表面张力系数产生误差的因素	(155)
附录 3	对低于 C_0 的洗衣粉溶液的研究分析	(158)
附录 4	透镜焦距测量方法的比较	(161)
附录 5	测定凹凸薄透镜折射率和曲率半径的方法	(164)

1-1 医用物理学实验的目的和要求

物理学是研究物质运动的普遍性质和基本规律的科学,它也是一门实验学科.物理学实验的内容十分广泛,其方法和测量技术广泛应用于其他学科和生产实践中.在临床诊断、治疗、保健、检验和药物分析鉴定及对生命机制研究中起着重要作用.物理实验技术在这些领域中的应用情况已成为其先进程度的一种标志.因此要掌握现代医学技术,具备足够的物理实验知识和操作技能是必要的.

1. 医用物理学实验的目的和要求

(1) 目的

物理实验是物理教学中的重要环节.通过实验教学,可以培养学生的自学能力、动手能力、观察能力、分析能力、表达能力以及设计能力,使学生学会正确使用物理仪器,熟悉一些物理实验方法.通过实验操作,培养学生具备严谨的科学工作作风和较强的科研工作能力.通过实验操作,巩固和加深对所学物理现象及规律的认识.

(2) 要求

根据高等医学院校学生基本技能训练项目的基本内容,结合医学发展的需要,要求学生通过物理实验,能掌握常用物理量的测量原理和方法;熟悉黏度计、示波器、万用电表、光学显微镜和分光仪等仪器的使用;在误差理论的研究,有效数字的记录和运算,实验结果的可靠性估计,用表格、曲线、坐标图表示实验结果等方面,能得到一定程度的训练,能正确写出物理实验报告.

为了达到以上目的和要求,学生应该在实验前认真预习实验内容;在实验过程中,认真仔细地观察现象,正确记录数据,分析实验结果;在实验后写出科学完整的实验报告.

在物理实验课的学习和训练中,还要培养学生实事求是、理论联系实际的科学作风,严肃认真、一丝不苟的科学态度,大胆质疑、勇于创新的科学精神以及遵守纪律、团结协作、节约资源、爱护公物的优良品德.

2. 实验报告

实验报告是对所做实验的系统总结,是学生表达能力和信息交流能力的集中体现,也是交流实验成果的媒介.书写实验报告是培养学生分析、总结问题的能力,提高文化素养和综合素质的一个重要方面.

实验报告的内容一般为以下几个方面:

① 实验者姓名.

② 实验名称.

③ 实验目的.

④ 实验器材.

⑤ 实验原理. 在对实验原理充分理解的基础上,用实验者自己的语言简要叙述有关的物理内容(包括电路图、光路图和实验装置示意图),测量和计算所依据的主要公式及公式成立必须满足的实验条件等.

⑥ 实验步骤. 除概括地写出实验进行的主要程序外,还应包括实验中观察了哪些物理量,测量了哪些物理量,调节的要领和技巧,以便必要时重复或检验已经完成的实验.

⑦ 数据处理. 在数据处理中要完成计算、作图、误差估算及结果表达等工作. 要把原始数据按有效数字列成表格,使阅读者能纵观全局,一目了然. 数据处理应有主要过程,做到言之有据,结果可信. 实验结果的表达,要按误差理论的要求写出被测量的标准表达式,以便按要求用误差范围的估算或不确定度来评定测量结果.

⑧ 分析讨论. 分析讨论的内容相当广泛,可以深入探讨实验现象或进一步进行误差分析,也可以对实验本身的设计思想、实验仪器、试验方法的改进写出自己的心得体会或建设性意见,甚至完全不同的意见. 通过对分析讨论题的回答,还可以进一步深入理解物理实验的理论基础. 分析讨论将为学生在更高层次上发挥自己的聪明才智提供一个自由思考的广阔空间.

⑨ 思考题.

以上只是提供了实验报告的一般格式. 一份成功的实验报告,就是一篇科学论文的雏形,应力求用严谨的结构、流畅的文笔、清晰的思路和个性化的色彩,简洁地描述实验的内容、方法和步骤,表达实验所阐明的物理思想和概念,给出可信的明确结论. 实验报告的撰写可以培养和提高学生的分析、表达和信息交流的能力.

1-2 误差分析及数据处理

1-2-1 有效数字及其运算

1. 有效数字的概念

物理实验的过程就是观察和测量的过程. 测量所用仪器的最小分度称为它的精密度. 若能正确使用仪器, 那么测量结果的精确度就取决于所用仪器的精密度. 例如, 用精密度为 1 cm 的尺子进行测量, 可精确到 1 cm, 并能估计到 0.1 cm. 若用精密度为 1 mm 的尺子进行测量, 则可精确到 1 mm, 估计到 0.1 mm. 如用这两种尺子测量同一金属棒的长度, 其结果分别为 $L_1 = 1.6$ cm, $L_2 = 1.65$ cm, 如图 1-2-1 所示.

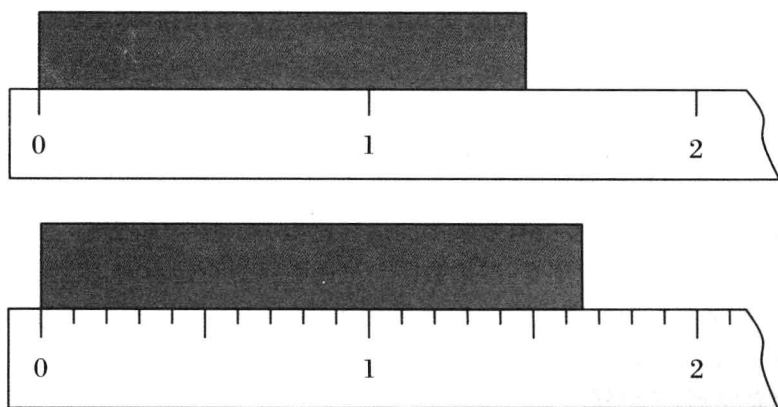


图 1-2-1 精密度与有效数字

对于第一个测量结果 $L_1 = 1.6$ cm, 数字“1”是准确的, “6”是估计出来的, 尺子虽然没有刻到毫米, 但我们可以估计到毫米. 至于想再多读一位, 用此尺子是达不到的. 因为估计第二位数是没有意义的. 对于第二个测量结果 $L_2 = 1.65$ cm, 数字“1.6”是准确的, “5”是估计出来的.

测量值中, 包含仪器最小分度的整数部分的数字是可靠的, 叫做可靠数字, 如 L_1 中的“1”和 L_2 中的“1”、“6”, 最小分度以外的小数部分的数字是估计的, 称为可疑数字, 如 L_1 中的“6”和 L_2 中的“5”. 可疑数字虽是估计, 带有误差, 但它并非臆造, 它在一定程度上反映了客观实际, 因此它是有意义的.

每一个测量值都可由若干位可靠数字和一位可疑数字组成, 这些数字统称为有效数字. 如 L_1 的测量值为两位有效数字, L_2 为三位有效数字.

根据有效数字的上述性质,在读取有效数字时应注意以下几点:

① 有效数字位数的多少,是由被测量的大小以及测量仪器的精密度所决定的,因此不能随意增减.如上述的 L_1, L_2 .

② 如测量值恰好落在仪器的最小分度线上,则估计的一位可疑数字应为“0”,这个“0”是有效数字,不能舍去.比如 64 mm 和 64.0 mm 的含义是不同的.前者“4”是估计出来的,说明所用仪器的最小分度是厘米,而后者“0”是估计出来的,4 mm 是准确读出的,说明所用仪器的最小分度是毫米.

③ 有效数字的位数与小数点的位置无关.当一个量的单位转换时,通常小数点的位置会随之变化.例如:6.40 cm 可以记作 64.0 mm 或 0.064 0 m,均为三位有效数字.因此,用以表示小数点位置的“0”不是有效数字.通常记录或处理数据时,用科学记数法,即用含一位整数的带小数乘以 10 的几次幂的形式.例如:6.40 $\times 10^{-2}$ m, 6.022×10^{23} mol $^{-1}$.

④ 有效数字的读取.一般而言,应读到仪器最小分度值的 1/10;游标类量具,只读到游标分度值,一般不估读;数字式仪表或步进读数仪器(如电阻箱)不需要估读,其显示的末位就是可疑的.

2. 有效数字的运算

实验数据的处理过程实际上就是有效数字的运算过程.大量的间接测量量均是由若干直接测量量通过运算得到的.间接测量量有效数字的位数应能正确反映测量结果的准确度,这需要给有效数字的运算定出一个科学的规则.

有效数字运算的总原则是:准确数字与准确数字进行运算时,其结果仍是准确数字;可疑数字与准确数字或可疑数字进行运算时,其结果均是可疑数字.间接测量的最后结果,只保留一位可疑数字.

由此总原则,可得到以下具体的运算规则:

① 加、减运算中,和或差的可疑位与参与运算的各数据中可疑数字的最高位相同.例如(算式中加下划线者为可疑数字):

$$653.\underline{2} + 8.46\underline{2} = 661.66\underline{2} = 661.7$$

② 乘、除运算中,积或商的有效数字位数与参与运算的各数据中有效数字位数最少者相同.例如:

$$226.\underline{36} \times 16 = 3\,621.\underline{776} = 3.6 \times 10^3$$

③ 乘方、开方、三角函数运算时,其结果的有效数字位数一般与其测量值的有效数字位数相同.例如:

$$36.4^2 = 1.33 \times 10^3, \quad \sqrt{36.9} = 6.07, \quad \sin 35^\circ = 0.57$$

④ 对数、指数、运算结果的有效数字位数,一般可按以下规则进行处理:

a. 对数运算.自然对数运算结果的有效数字的位数,其小数点后面部分的位

数与其真数的有效数字位数相同,例如: $\ln 56.7 = 4.038$;常用对数运算结果的有效数字位数,其小数点后面部分的位数与其真数的有效数字位数相同或多一位,一般真数大于“5”时可以多一位,例如: $\lg 2.356 = 0.372\ 2$, $\lg 5.56 = 0.745\ 0$.

b. 指数运算. 对于 e^x , 其有效数字位数的取法是把 e^x 的结果用科学记数法写出, 小数点前保留一位有效数, 小数点后保留的有效数字的位数与指数在小数点后面的有效数字位数相同. 例如: $e^{9.24} = 1.03 \times 10^4$.

应当注意的是, 像物体的个数、实验的次数、公式中的系数等这样一些准确数, 没有可疑位, 对运算结果的有效数字位数没有影响.

⑤ “四舍六入五前凑偶”法则. 在上述数据处理过程中, 经常会遇到尾数取舍的问题. “四舍五入”法则将使入的概率大于舍的概率, 从而使整体结果偏大. 为消除此不合理性, 引入“四舍六入五前凑偶”法则. 即小于五时舍, 大于五时入, 刚好等于五时, 前一位是偶数的则舍, 前一位是奇数的则入, 即是将前一位凑成偶数. 例如对下列数据均取四位有效数字: 1.362 53 取为 1.362; 1.361 5 取为 1.362; 1.361 49 取为 1.361. 确定该截尾的这个数是“5”还是“4”或“6”只看该截尾的这三位, 至于后面的数字不再考虑.

从“四舍六入五前凑偶”法则运用的实例可看出, 可疑位之后的一位对可疑位是有贡献的. 故在运算的中间过程中不能只取一位可疑数, 而要多保留一位, 到最后结果时再按舍入法则截取正确的有效数字即可.

1-2-2 测量和误差

1. 测量及其分类

物理实验离不开测量. 所谓测量, 就是将被测量与同类标准量进行比较的过程, 由此确定被测量是标准量的多少倍, 此倍数就是读数, 读数加上单位记录下来即为测量数据, 测量数据即有效数字.

测量一般分为直接测量和间接测量两种. 凡是直接由仪器读数获得测量值的过程称为直接测量. 如用米尺测出物体长度, 用秒表测出时间, 用电流表测出回路中的电流等都属于直接测量. 有些物理量不能用直接测量的方法获得, 而是通过将直接测量某些物理量的数据, 依照一定的函数关系计算得到, 这种方法称为间接测量. 如测圆柱体的体积即属于间接测量. 因为它可先测出圆柱体的直径和高, 再由相应的函数关系式计算出体积. 绝大部分物理实验中的测量都是间接测量.

2. 误差及其分类

宏观上, 系统的某个物理量在某一时刻所具有的量值是客观的, 称为真值. 在任何一种测量中, 无论所用仪器多么精密, 测量方法多么完善, 操作多么细心, 都不可能测得绝对准确. 因此测量值与真值之间总会有一定的差异, 这个差异叫做测量

误差. 根据误差产生的原因, 可将误差分为系统误差和偶然误差两类.

(1) 系统误差

此种误差是由仪器本身的缺陷以及测量原理或测量方法的不完善等因素所引起的. 这种误差的表现: 在同一条件下多次测量某一物理量总是偏大或者总是偏小, 改变条件时按一定规律变化. 系统误差的减小可针对仪器的缺陷、环境的影响、实验原理及实验方法的不完善等因素加以纠正.

(2) 随机误差

随机误差是由测量过程中的一些随机的、不确定的因素引起的. 这种误差的表现是测量结果时而偏大, 时而偏小, 当测量次数足够多时, 服从统计规律. 因此, 减小随机误差的最有效的方法是增加重复测量的次数, 取平均值.

另外, 由于实验者使用仪器方法不当、粗心大意或测量条件突变等原因而产生的超出了规定条件下所预期的结果, 这种结果的数据属于异常数据, 在进行数据处理时应当剔除.

3. 绝对误差与相对误差的概念

(1) 绝对误差

对某物理量 N 测 n 次, 各次测量值分别为 $N_1, N_2, \dots, N_n$, 各次测量值 N_i 与真值 N 之差叫做各次测量值的绝对误差 ΔN_i . 由于真值实际上不能测得, 所以常用算术平均值 $\bar{N}$ 来代替, 即各次测量的绝对误差为

$$\begin{cases} \Delta N_1 = N_1 - \bar{N} \\ \Delta N_2 = N_2 - \bar{N} \\ \dots \\ \Delta N_i = N_i - \bar{N}, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1-2-1)$$

其中

$$\bar{N} = \frac{N_1 + N_2 + \dots + N_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad (1-2-2)$$

对各次测量的绝对误差, 取它们绝对值的算术平均值, 叫做平均绝对误差 $\overline{\Delta N}$, 即

$$\overline{\Delta N} = \frac{|\Delta N_1| + |\Delta N_2| + \dots + |\Delta N_n|}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta N_i| \quad (1-2-3)$$

于是测量结果的表达式为

$$N = \bar{N} \pm \overline{\Delta N} \quad (1-2-4)$$

式(1-2-4)表示测得的最可靠值是 $\bar{N}$, 测得值可能存在的误差范围为 $\pm \overline{\Delta N}$, 而真值 N 就在 $\bar{N} + \overline{\Delta N}$ 和 $\bar{N} - \overline{\Delta N}$ 的范围内.

绝对误差是有单位的, 它反映了测量结果的精密程度.

(2) 相对误差

虽然绝对误差可反映测量结果的精密程度, 但只用绝对误差有时并不能明显

地表示测量结果的准确程度,特别是不便于明确比较不同测得量中哪一个准确度更高.例如:测量两个不同长度的物体,测得结果分别为

$$L_1 = (8.34 \pm 0.01) \text{ cm}, \quad L_2 = (88.34 \pm 0.01) \text{ cm},$$

虽然它们的绝对误差相同,但显然是较长的物体其测量结果的准确程度更高些,因此,为了表示测量结果的准确度,引入相对误差的概念,用 E 表示.即

$$E = \frac{\overline{\Delta N}}{\bar{N}} \times 100\% \quad (1-2-5)$$

相对误差没有单位,它反映了测量结果的准确度,通常用百分数来表示.

3. 绝对偏差和相对偏差

当要测量的物理量已经有了公认值或标准值时,则称

$$\Delta N = |\bar{N} - N_{\text{公认}}| \quad (1-2-6)$$

为绝对偏差.

而称

$$B = \frac{|\bar{N} - N_{\text{公认}}|}{N_{\text{公认}}} \times 100\% \quad (1-2-7)$$

为相对偏差.

4. 间接测量误差的计算

在物理实验中的测量,几乎都是将某些直接测量值代入已知的测量公式(函数关系式)中,将待求量计算出来,这就叫做间接测量.因为测量公式中的直接测量值都含有误差,所以间接测量也必然有误差,这叫误差传递.其误差的大小取决于各直接测量误差的大小及函数的形式.下面给出基本的间接测量误差的计算公式:

(1) 和、差的误差

如果间接测量值是两个直接测量值的和或差,即 $N = A \pm B$,将 $A = \bar{A} \pm \overline{\Delta A}$, $B = \bar{B} \pm \overline{\Delta B}$ 代入式可得

$$N = \bar{N} \pm \overline{\Delta N} = (\bar{A} \pm \overline{\Delta A}) \pm (\bar{B} \pm \overline{\Delta B})$$

于是有

$$\bar{N} = \bar{A} \pm \bar{B} \quad (1-2-8)$$

$$\overline{\Delta N} = \overline{\Delta A} + \overline{\Delta B} \quad (1-2-9)$$

$$E = \frac{\overline{\Delta N}}{\bar{N}} \times 100\% = \frac{\overline{\Delta A} + \overline{\Delta B}}{\bar{A} \pm \bar{B}} \times 100\% \quad (1-2-10)$$

和、差的平均绝对误差等于各量平均绝对误差之和.

(2) 积的误差

如果间接测量值是两个直接测量值的乘积,即 $N = A \cdot B$,其运算结果为

$$\bar{N} \pm \overline{\Delta N} = (\bar{A} \pm \overline{\Delta A}) \cdot (\bar{B} \pm \overline{\Delta B})$$

$$= \overline{A} \cdot \overline{B} \pm \overline{A} \cdot \overline{\Delta B} \pm \overline{B} \cdot \overline{\Delta A} \pm \overline{\Delta A} \cdot \overline{\Delta B}$$

因为 $\overline{\Delta A}$ 和 $\overline{\Delta B}$ 与 $\overline{A}$ 和 $\overline{B}$ 相比可视为很小, 所以 $\overline{\Delta A} \cdot \overline{\Delta B}$ 可忽略, 因此积的平均绝对误差为

$$\overline{\Delta N} = \overline{A} \cdot \overline{\Delta B} + \overline{B} \cdot \overline{\Delta A} \quad (1-2-11)$$

积的相对误差为

$$E = \frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}} = \frac{\overline{A} \cdot \overline{\Delta B} + \overline{B} \cdot \overline{\Delta A}}{\overline{A} \cdot \overline{B}} = \frac{\overline{\Delta A}}{\overline{A}} + \frac{\overline{\Delta B}}{\overline{B}} = E_A + E_B \quad (1-2-12)$$

即积的相对误差等于各量相对误差之和。

(3) 商的误差

如果间接测量值是两个直接测量值的商, 即 $N = A/B$, 与上面相同的计算方法可得平均绝对误差为

$$\overline{\Delta N} = \frac{\overline{A} \cdot \overline{\Delta B} + \overline{B} \cdot \overline{\Delta A}}{\overline{B}^2} \quad (1-2-13)$$

相对误差为

$$E = \frac{\overline{\Delta A}}{\overline{A}} + \frac{\overline{\Delta B}}{\overline{B}} = E_A + E_B \quad (1-2-14)$$

可见, 商的相对误差也等于各量的相对误差之和。

(4) 幂的误差

设 $N = A^n$, 则

$$\overline{\Delta N} = n \cdot \overline{A}^{n-1} \cdot \overline{\Delta A} \quad (1-2-15)$$

$$E = n \cdot \frac{\overline{\Delta A}}{\overline{A}} = n \cdot E_A \quad (1-2-16)$$

(5) 三角函数的误差

设 $N = \sin A$, 则

$$\overline{\Delta N} = (\cos \overline{A}) \cdot \overline{\Delta A} \quad (1-2-17)$$

$$E = (\cot \overline{A}) \cdot \overline{\Delta A} \quad (1-2-18)$$

设 $N = \cos A$, 则

$$\overline{\Delta N} = (\sin \overline{A}) \cdot \overline{\Delta A} \quad (1-2-19)$$

$$E = (\tan \overline{A}) \cdot \overline{\Delta A} \quad (1-2-20)$$

由以上公式可以看出, 为了运算的方便, 计算和或差的误差时, 应先求绝对误差, 再求相对误差; 而计算积或商的误差时, 则应先求相对误差, 再求绝对误差。

5. 测量结果的表达

无论是直接测量还是间接测量, 对测量结果的表达通常都写为

$$N = \overline{N} \pm \overline{\Delta N} \quad (1-2-21)$$

$$E = \frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}} \times 100\% \quad (1-2-22)$$

其中算术平均值 $\overline{N}$ 为被测量 N 真值的最佳估计值. 平均绝对误差 $\overline{\Delta N}$ 为(总)不确定度, 相对误差 E 为相对不确定度.

这里应特别注意以下两点:

① 不确定度 $\overline{\Delta N}$ 有效数字的位数问题. 由于 $\overline{\Delta N}$ 本身表明的是测量结果的不确定性, 故太多的有效数字是没有意义的, 一般只取一位或两位. 在本书中, 为教学规范起见, 我们约定不确定度 $\overline{\Delta N}$ 只取一位有效数字, 相对不确定度 E 取两位有效数字. 此外为保证测量结果的置信程度不降低, 我们还约定, 在不确定度 $\overline{\Delta N}$ 最后剩余尾数的截取时, 按进位法则处理, 即剩余尾数只要不为零, 一律进位. 而对其他数据处理的中间过程, 各有效数字至少要多取一位, 截取尾数时按“四舍六入五前凑偶”法则.

② 真值的最佳估计值 $\overline{N}$ 的有效数字的位数问题. $\overline{N}$ 的有效数字应按正确的有效数字的运算获得, 但在最后测量结果的表达中, 其末位一定要与 $\overline{\Delta N}$ 的所在位对齐. 在截取剩余尾数时, 按“四舍六入五前凑偶”法则进行处理. 例如, 在通过正确的数据处理后得到某物体的厚度为 $d = (6.2351 \pm 0.03) \text{ cm}$, 作为最后测量结果的表达式是不对的, 应修改为 $d = (6.24 \pm 0.03) \text{ cm}$. 又如 $l = (6.275 \pm 0.034) \text{ cm}$ 作为最后的测量结果也是不对的, 应该为 $l = (6.28 \pm 0.04) \text{ cm}$.

上面是对多次测量的情况而言的. 而在一些实验中, 有的物理量是在动态中测量, 不容许重复测量; 在实验中需要进行多个量的测量, 若其中某个量的测量误差相对于总误差可以忽略. 在这些情况下, 可对被测量只进行一次测量, 称为单次测量. 对于单次测量, 如何计算它的绝对误差呢? 对于一般测量仪器(如米尺、游标卡尺、螺旋测微器、天平、秒表、温度计、电表等)单次测量的误差近似服从均匀分布规律. 因此单次测量的绝对误差记为测量仪器最小分度值的 $1/10$ 或 $1/5$. 例如, 单次测量用最小分度为 1 mm 的米尺时, 绝对误差记为 0.1 mm ; 用精密度为 0.01 mm 的螺旋测微器时, 绝对误差记为 0.001 mm .

例 1-1 有一装有空气的瓶, 其总质量 $M = (20.1425 \pm 0.0002) \text{ g}$, 今将其中空气抽去, 称得空瓶的质量 $m = (20.0105 \pm 0.0002) \text{ g}$, 问瓶内空气的质量为多少克?

解 设瓶内空气质量为 N , 则有

$$\overline{N} = \overline{M} - \overline{m} = 20.1425 - 20.0105 = 0.1320 \text{ (g)}$$

$$\overline{\Delta N} = \overline{\Delta M} + \overline{\Delta m} = 0.0002 + 0.0002 = 0.0004 \text{ (g)}$$

$$N = \overline{N} \pm \overline{\Delta N} = (0.1320 \pm 0.0004) \text{ g}$$

$$E = \frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}} \times 100\% = \frac{0.0004}{0.1320} \times 100\% = 0.30\%$$

例 1-2 有一圆柱体,测得其高 $h = (10.0 \pm 0.1) \text{ cm}$, 直径 $d = (5.00 \pm 0.01) \text{ cm}$, 试计算其体积,并写出测量结果.

解 已知圆柱体体积公式 $V = \frac{\pi}{4} h d^2$, 则测量体积的相对误差为

$$E = \frac{\overline{\Delta V}}{\overline{V}} = \frac{\overline{\Delta h}}{\overline{h}} + 2 \frac{\overline{\Delta d}}{\overline{d}} = \frac{0.1}{10.0} + \frac{2 \times 0.01}{5.00} = 1.4\%$$

圆柱体体积的平均值为

$$\overline{V} = \frac{\pi}{4} h d^2 = \frac{1}{4} \times 3.141 \times 10.0 \times 5.00^2 = 196 (\text{cm}^3)$$

平均绝对误差为

$$\overline{\Delta V} = E \cdot \overline{V} = 0.014 \times 196 = 3 (\text{cm}^3)$$

测量结果为

$$V = \overline{V} \pm \overline{\Delta V} = (196 \pm 3) \text{ cm}^3$$

1-2-3 数据处理

实验中测得的大量数据,需要进行正确的数据处理,才能从这些原始数据中得到可靠的实验结果.所谓数据处理就是对实验数据进行全方位的信息加工,包括记录、整理、计算、作图、分析等方面,使之得到正确的实验结果,从而发现或验证系统各个物理量之间的内在联系及其所服从的规律.

数据处理的方法较多,这里介绍最常用的两种,即列表法和作图法.

1. 列表法

(1) 列表的作用

数据列表不仅能简明地表示出有关物理量之间的对应关系,便于随时检查测量结果是否合理,及时发现问题和分析问题,而且有助于找出有关物理量之间的规律性联系,求出经验公式.

(2) 列表的基本要求

- ① 表的上方要有表头,写明所列表的名称.
- ② 标题栏目要简单明了,便于看出物理量之间的关系.
- ③ 各标题栏目必须表明物理量的名称和单位,单位和数量级写在标题栏中,一般不要重复地记录在各个数据后面.
- ④ 处理过程中一些重要的中间结果和最后结果也可列入表中,以方便数据处理和查阅核对.