



世纪普通高等教育基础课规划教材

医学物理学实验

岳小萍 刘东华 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



教育部高等學校教學質量工程

醫學物理學實驗

第三版 賈利軍 主編

中國人民大學出版社

21 世纪普通高等教育基础课规划教材

医学物理学实验

主 编 岳小萍 刘东华

副主编 董兵超 赵合运



机械工业出版社

本教材是依据全国医药类专业医学物理实验课程教学基本要求,充分考虑医药类各专业特点,在多年教学实践及教学改革基础上编写而成的。其编写特点是在保证物理实验学科系统不变的同时,强化有关用物理学的方法、技术去解决医学实践问题的实验项目,同时,也适当增加了综合提高实验内容。本书共编入 20 个实验项目,分为四章:测量误差及实验数据处理、基础物理实验、医学物理实验、综合设计实验。

本书适用于高等医药院校五年制临床医学、预防医学、法医学、影像医学、药学、医学检验、生物医学工程等医药类各专业,也可供与生命科学有关的其他专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

医学物理学实验/岳小萍、刘东华生编. —北京:机械工业出版社, 2009. 8

21 世纪普通高等教育基础课规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 27849 - 8

I. 医… II. ①岳…②刘… III. 医学物理学 - 实验 - 高等学校 - 教材 IV. R312 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 127193 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 张金奎 版式设计: 霍永明 责任校对: 姚培新

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 乔 宇

北京京丰印刷厂印刷

2009 年 9 月第 1 版 · 第 1 次印刷

169mm × 239mm · 9.25 印张 · 178 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 27849 - 8

定价: 14.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379722

封面无防伪标均为盗版

前 言

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学科。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，是自然科学和工程技术的基础。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。因此，物理实验课是高等院校对学生进行科学实验基本训练的基础课程，是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端，在学生的科学素质培养中占有重要地位。

本教材是依据全国医药类专业医学物理实验课程教学基本要求，充分考虑医药类各专业特点，在多年教学实践及教学改革基础上编写而成的。其编写特点是在保证物理实验学科系统不变的同时，强化有关用物理学的方法、技术去解决医学实践问题的实验项目，同时，也适当增加了综合提高实验内容。本书共编入 20 个实验项目，分为四章：测量误差及实验数据处理、基础物理实验、医学物理实验、综合设计实验。

本书适用于高等医药院校五年制临床医学、预防医学、法医学、影像医学、药学、医学检验、护理等医药类各专业，也可供与生命科学有关的其他专业师生参考使用。

由于编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，恳请使用者批评指正。

编 者
2009 年 6 月

目 录

前言

绪论	1
第一章 测量误差及数据处理	3
第一节 误差的基本概念	3
第二节 常用仪器误差	7
第三节 不确定度的基本概念	8
第四节 直接测量结果与不确定度的估算	10
第五节 间接测量结果与不确定度的估算	11
第六节 有效数字	14
第七节 实验数据的记录与处理	17
第八节 用 Excel 软件进行实验数据处理	22
第二章 基础物理实验	31
实验 2-1 基本测量	31
实验 2-2 用力敏传感器测量物体的密度	40
实验 2-3 身高体重的回归分析	45
实验 2-4 液体粘度的测定	49
实验 2-5 液体表面张力系数的测定	56
实验 2-6 空气比热容比的测定	60
实验 2-7 电偶极子电场的描绘	64
实验 2-8 万用表的使用	67
实验 2-9 示波器的使用	72
实验 2-10 用分光计、衍射光栅测定光波波长	83
第三章 医学物理实验	90
实验 3-1 用超声波探测物体的厚度	90
实验 3-2 心电图机技术指标的测定	96
实验 3-3 显微摄影	106
实验 3-4 人耳听阈曲线的测定	111
实验 3-5 亥姆霍兹线圈磁场及梯度 磁场的调节与测量	115
第四章 综合设计实验	119

实验 4-1	声速的测量	119
实验 4-2	密立根油滴实验	124
实验 4-3	用霍尔元件测磁场	128
实验 4-4	干涉法测微小量	131
实验 4-5	迈克尔逊干涉仪	136
参考文献		142

绪 论

物理学是一门以实验为基础的科学。物理定律有许多是用观察和实验的方法建立起来的。观察就是在自然条件下研究现象，因而在很大程度上受到自然条件的限制。物理实验是人们按照自己的意志，将自然界中物质的各种基本运动形态（如力、热、声、光、电等）在一定条件下再现，从而对其进行观察和分析研究的过程。由此可见，实验是物理理论的主要来源。例如，在 1831 年，法拉第在实验室中发现电磁感应现象，之后通过大量的实验确立了电磁感应定律。不但如此，物理理论的正确性也要通过实验来加以验证。例如，爱因斯坦在他的狭义相对论中，预言了物质运动的质能关系 $E = mc^2$ ，而这一关系的正确性，还是通过几十年后的原子物理实验确定的。这样的例子不胜枚举。物理学发展的历史充分证明，物理实验在整个物理学的发展过程中起着决定性的作用。

一、医学物理学实验课的目的

(1) 使学生掌握一些基本物理量的测量方法，学会正确使用物理仪器，熟悉一些物理实验方法。

(2) 培养学生独立自主的科学工作作风、实事求是的科学工作态度及较强科研工作能力。

(3) 巩固和加深学生对物理现象及规律的认识。

二、医学物理学实验课的具体要求

(1) 熟悉常用仪器设备的一般原理及使用方法，其中包括游标卡尺、外径千分尺（旧称螺旋测微计）、秒表、温度计、万用电表、示波器、心电图机、常用电源等。

(2) 能按照简单线路图正确连接电路。

(3) 了解实验误差的基本概念，能分析误差发生的原因，能正确按照处理有效数字的规则进行数据记录和运算。

(4) 能正确按数据画出图线，并能利用图线分析实验结果。

(5) 能写出正规的实验报告。

(6) 培养学生科学工作的作风：

1) 实验必须在理论指导下有目的地进行，实验前要预习，并要求写出预习报告；预习报告的内容应包括：实验题目、目的、器材、基本原理、简单步骤，并绘出有关表格等；不允许在没有充分准备的情况下盲目操作。

2) 一切操作必须按正规方法进行，对待实验数据要严肃认真，原始记录要

清楚真实。

3) 在实验过程中, 应保持室内安静, 养成整齐清洁, 有条不紊的习惯, 爱护仪器, 注意节约。

4) 平时教学中要进行严格考查, 未完成全部实验或操作未达到要求的学生必须补做或重做。

第一章 测量误差及数据处理

第一节 误差的基本概念

一、测量

物理实验以测量为基础。根据测量方法可将测量分为直接测量与间接测量。可用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量，称为直接测量。例如，用米尺测得物体的长度是 91.12cm，用毫安表量得电流是 3.02mA 等。但是，有些物理量无法进行直接测量，需要根据待测量与若干个直接测量值的函数关系求出，这样的测量称为间接测量。例如，测量铜柱体的密度时，需要先测量铜柱的高度 h 、直径 d 和质量 m ，然后计算出密度 $\rho = 4m/\pi d^2 h$ 。

按测量条件测量可分为等精度测量和不等精度测量。

等精度测量：在对某一物理量进行多次重复测量过程中，每次测量条件都相同的一系列测量称为等精度测量。例如，由同一个人在同一仪器上采用同样测量方法对同一待测物理量进行多次测量，每次测量的可靠程度都相同，这些测量是等精度测量。

不等精度测量：在对某一物理量进行多次重复测量过程中，测量条件完全不同或部分不同，各结果的可靠程度自然也不同的一系列测量称为不等精度测量。例如，对某一物理量进行测量时，选用的仪器不同，或测量方法不同，或测量人员不同等都属于不等精度测量。

绝大多数实验都采用等精度测量。

二、测量误差

反映物质固有属性的物理量所具有的客观的真实数值称为真值。由于测量所使用的仪器不可能是尽善尽美，测量所依据的理论公式所要求的条件也是无法绝对地保证，再加上测量技术、环境条件等各种因素的局限，真值一般无法得到。但是，从统计理论可以证明，在条件不变的情况下进行多次测量时，可以用算术平均值作为相对真值。

测量结果与客观存在的真值之间总有一定的差异。我们把测量结果与真值之间的差值叫做测量误差，简称误差。误差存在于一切测量之中，而且贯穿于整个测量过程。在确定实验方案、选择测量方法或选用测量仪器时，要考虑测量误差。在数据处理时，要估算和分析误差。总之，必须以误差分析的理论指导实验

的全过程。

测量误差可以用绝对误差表示，也可以用相对误差表示，还可以用百分误差表示。

$$\text{绝对误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

$$\text{相对误差} = |\text{绝对误差} / \text{真值}| \times 100\%$$

$$\text{百分误差} = |(\text{测量最佳值} - \text{公认值}) / \text{公认值}| \times 100\%$$

三、误差的分类

测量误差按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

系统误差指在相同条件下，多次测量同一物理量时，测量值对真值的偏离（大小和方向）总是相同的。

系统误差的主要来源有：①仪器误差（如刻度不准、米尺弯曲、零点没调好、砝码未校正等）；②环境误差（如温度、压强等的影响）；③个人误差（如读数总是偏大或者偏小等）；④理论和公式的近似性（如用单摆测量重力加速度时所用公式的近似性）等。

增加测量次数并不能减小系统误差，为了减小和消除系统误差，必须针对其来源逐步具体考虑，或者采用一定的测量方法，或者经过理论分析、数据分析和反复对比的方法找出适当的关系对结果进行修正。

2. 随机误差

随机误差（又称偶然误差）是指在同一条件下多次测量同一物理量，测量结果总是有稍许差异且变化不定。

随机误差来源于各种偶然的或不确定的因素：①人们的感官（如听觉、视觉、触觉等）的灵敏度的差异和不稳定；②外界环境的干扰（温度的不均匀、振动、气流、噪声等）；③被测对象本身的统计涨落等。

虽然偶然误差的存在使每一次测量偏大或偏小是不确定的，但是，当测量次数增加时，它服从一定的统计规律。在一定的条件下，经过多次测量，测量值落在真值附近的某个范围内的几率是一定的，而且偏离真值较小的数据比偏离真值较大的数据出现的几率大，偏离真值很大的数据出现的几率趋于0。因此，增加测量次数可以减少偶然误差。

系统误差与偶然误差的来源、性质不同，处理方法也不同。但是，它们之间也是有联系的，如对某问题从一个角度来看是系统误差，而从另一个角度来看又是偶然误差。因此，在误差分析时，往往把两者联系起来对测量结果作总体评定。

3. 过失误差

过失误差是由于观测者在不正确地使用仪器、操作错误、读数错误、观察错

误、记录错误、估算错误等不正常情况下引起的误差。错误已不属于正常的测量工作范围，应将其剔除。所以，在作误差分析时，要估计的误差通常只有系统误差和随机误差。

四、测量的精密度、准确度和精确度

对于测量结果作总体评定时，一般把系统误差和随机误差联系起来看。精密度、准确度和精确度都是评价测量结果好坏的，但这些概念的涵义不同，使用时应加以区别。

1. 精密度

精密度表示测量结果中的随机误差大小的程度。它是指在一定的条件下进行重复测量时，所得结果的相互接近程度，是描述测量重复性高低的。精密度高，即测量数据的重复性好，随机误差较小。

2. 准确度

准确度表示测量结果中的系统误差大小的程度。它是指测量值或实验所得结果与真值符合的程度，即描述测量值接近真值的程度。准确度高，即测量结果接近真值的程度好，系统误差小。

3. 精确度

精确度是测量结果中系统误差和随机误差的综合。它是指测量结果的重复性及接近真值的程度。对于实验和测量来说，精密度高准确度不一定高，而准确度高精密密度也不一定高；只有精密度和准确度都高时，精确度才高。

现在以打靶结果为例来形象地说明三个“度”之间的区别，如图 1-1 所示：图 a 表示弹着点相互之间比较近，但偏离靶心较远，即精密度高准确度较差；图 b 表示弹着点相互之间比较分散，但没有明显的固定偏向，故准确度高而精密密度较差；图 c 表示弹着点相互之间比较集中，且都接近靶心，精密度和准确度都很好，亦即精确度高。

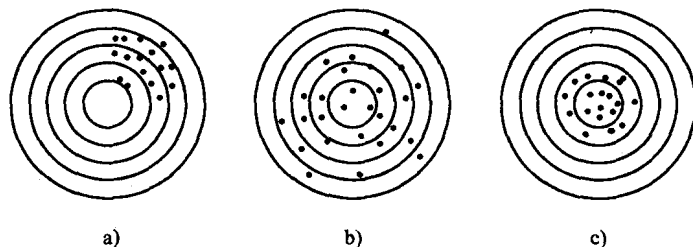


图 1-1 精密度、准确度和精确度示意图

五、随机误差的估算

1. 算术平均值的普遍表达式为

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

式中, x_i 是第 i 次测量值; n 是测量次数。

2. 残差

每一次测量值与算术平均值的差值称为残差, 用 Δx_i 表示:

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$$

3. 标准偏差

因为用残差去估算误差, 所得结果为测量值的实验标准偏差, 用 σ 表示。任意一次测量值的实验标准偏差近似为

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

式 (1-1) 又称贝塞尔公式, 它表示如果在相同条件下进行多次测量, 其随机误差遵从高斯分布, 那么, 任意一次测量值误差出现在 $(-\sigma_x, \sigma_x)$ 区间内的概率为 68.3%。

算术平均值的实验标准偏差为

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

它表示如果多次测量的随机误差遵从高斯分布, 那么, 其值出现在 $(\bar{x} - \sigma_{\bar{x}}, \bar{x} + \sigma_{\bar{x}})$ 区域的概率为 68.3%。

4. 误差取位规则

约定: 绝对误差一般取一位有效数字, 其尾数只进不舍, 以免产生估计不足。相对误差一般取两位有效数字。

测量值的有效数字尾数应与绝对误差的尾数取齐, 其尾数采用四舍六入五凑偶法则, 这种舍入法则的出发点是使尾数舍与入的概率相等。

5. 误差的传递公式

间接测量是由各直接测量值通过函数关系计算得到的, 既然直接测量有误差存在, 那么间接测量也必有误差, 这就是误差的传递。由直接测量值及其误差来计算间接测量值的误差之间的关系式称为误差的传递公式。

设间接测量值为 N , 它是由各互不相关的直接测量值 A 、 B 、 C 、... 通过函数关系 f 求得的, 即

$$N = f(A, B, C, \cdots)$$

若各个独立的直接测量值的误差分别为 σ_A 、 σ_B 、 σ_C 、..., 则间接测量值 N

的误差估算需要用误差的方和根合成。其标准误差

$$\sigma_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial A}\sigma_A\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial B}\sigma_B\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial C}\sigma_C\right)^2 + \dots} \quad (1-3)$$

相对误差

$$\frac{\sigma_N}{N} = \frac{1}{f(A, B, C, \dots)} \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial A}\sigma_A\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial B}\sigma_B\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial C}\sigma_C\right)^2 + \dots} \quad (1-4)$$

式中, A 、 B 、 C 、 $\dots$ 是直接测量值; σ_A 、 σ_B 、 σ_C 、 $\dots$ 是各直接测量值的误差。

对于以加减运算为主的函数关系, 一般用式 (1-3) 先计算标准误差, 再求出相对误差; 而对于以乘除运算为主的函数关系, 一般先计算相对误差, 再计算标准误差, 步骤如下。

①对函数取对数

$$\ln N = \ln f(A, B, C, \dots)$$

②求相对误差

$$E = \frac{\sigma_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial A}\sigma_A\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial B}\sigma_B\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial C}\sigma_C\right)^2 + \dots} \quad (1-5)$$

③求标准误差

$$\sigma_N = N \cdot E$$

第二节 常用仪器误差

仪器误差是指在仪器规定的使用条件下, 正确使用仪器时, 仪器的指示数和被测量的真值之间可能产生的最大误差。它的数值通常由制造厂家和计量单位使用更精密的仪器, 经过检定比较后给出的, 其符号可正可负, 用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示。通常仪器误差既包含系统误差, 又包含随机误差, 它在很大程度上取决于仪器的精度。一般级别高的仪器和仪表 (如 0.2 级精密电表), 仪器误差主要是随机误差; 级别低的 (如 1.0 级以下电表) 则主要是系统误差。一般所用的 0.5 级或 1.0 级仪表, 这两种误差都可能存在。根据仪器的级别计算仪器误差的公式为

$$\Delta_{\text{仪}} = \text{量程} \times \text{级别}\%$$

如果没有注明仪器级别, 在物理实验教学中, 对于一些连续刻度 (可估读) 的仪器, 一般用仪器的最小刻度的一半作为 $\Delta_{\text{仪}}$; 而对于非连续刻度 (不可估读) 的仪器, 一般用仪器的最小刻度作为 $\Delta_{\text{仪}}$ 。

仪器误差的概率密度函数遵从的是均匀分

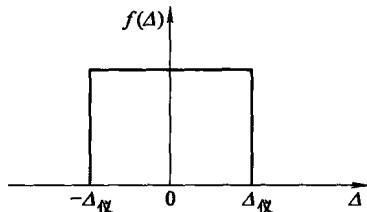


图 1-2 均匀分布曲线

布,如图 1-2 所示。均匀分布是指其误差在 $[-\Delta_{\text{仪}}, \Delta_{\text{仪}}]$ 区间范围内,误差(不同大小和符号)出现的概率都相同,而区间外的概率为 0,即 $\int_{-\Delta_{\text{仪}}}^{+\Delta_{\text{仪}}} f(\Delta) d\Delta = 1$ 。所以误差服从以下规律分布: $f(\Delta) = 1/2\Delta_{\text{仪}}$ 。

可以证明,服从均匀分布的仪器的最大误差所对应的标准误差为

$$\sigma_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}$$

在物理实验教学中,正确使用仪器时,我们约定仪器的基本误差(或最大误差)如下:

米尺: 仪器误差 $\Delta_{\text{仪}} = 0.5 \text{ mm}$

五十分游标卡尺: 仪器误差 $\Delta_{\text{仪}} = 0.02 \text{ mm}$

外径千分尺(旧称螺旋测微计): 仪器误差 $\Delta_{\text{仪}} = 0.005 \text{ mm}$

分光计: 仪器误差 $\Delta_{\text{仪}} = 1'$

读数显微镜: 仪器误差 $\Delta_{\text{仪}} = 0.005 \text{ mm}$

机械秒表: 仪器误差 $\Delta_{\text{仪}} = 0.2 \text{ s}$

电表: 仪器误差 $\Delta_{\text{仪}} = (\text{量程 } M \times \varepsilon\%) [\text{单位}]$, ε 为仪器精度等级值

电阻箱: 仪器误差 $\Delta_{\text{仪}} = (\varepsilon\% R + 0.002m) \Omega$, m 是总转盘数。

第三节 不确定度的基本概念

不确定度和误差是两个不同的概念,它们之间既有联系,又有本质区别。误差是指测量值与真值之差,由于真值一般不可能准确地知道,因此测量误差也不可能确切获知。而不确定度是指误差可能存在的范围,这一范围的大小能够用数值表达。因此,不确定度实质上是误差的估计值。

一、不确定度的概念

由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度称为不确定度。它是表征对被测量的真值所处的量值范围的评定。例如,测得一单摆的周期为

$$T = (8.163 \pm 0.002) \text{ s} \quad (P = 68.3\%)$$

其中,0.002 为不确定度, $P = 68.3\%$ 表示置信概率。这样表示的意义为:被测单摆周期的真值,落在 $(8.163 - 0.002, 8.163 + 0.002)$ 范围内的可能性有 68.3%。因此,不确定度是测量结果表述中的一个重要参数,它能合理地说明测量值的分散程度和真值所在范围的可靠程度。不确定度亦可理解为一定置信概率下误差限的绝对值,记为 Δ 。

不确定度的定量表述就是给出所需置信概率,用标准误差倍数表示置信区间。例如,用“不确定度(σ)”时,则置信概率为 68.3%,置信区间为 $(-\sigma,$

σ)；用“不确定度 (3σ)”时，则置信概率为 99.7%，置信区间为 $(-3\sigma, 3\sigma)$ 。因此，只要对测量结果给出不确定度，即给出置信区间和置信概率，就表达了测量结果的精确度。

判断异常数据的方法一般采用 (3σ) 准则。当“不确定度超过 (3σ)”时，测量偏差的绝对值大于 3σ 的置信概率仅为 0.3%，这种可能性微乎其微，该测量值视为坏值而将它剔除。

二、不确定度的分类

测量不确定度由几个分量构成。通常，按不确定度值的计算方法分为 A 类不确定度和 B 类不确定度，或 A 类分量和 B 类分量。

A 类分量是在一系列重复测量中，用统计学方法计算的分量 Δ_A ：

$$\Delta_A = \sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-6)$$

B 类分量是用其他方法（非统计学方法）评定的分量 Δ_B ：

$$\Delta_B = \sigma_{\text{仪}} = \Delta_{\text{仪}}/C$$

在物理实验教学中，为简化处理，A 类分量 Δ_A 指标准误差，B 类分量 Δ_B 仅考虑仪器标准误差，并约定式中 $C = \sqrt{3}$ （假定仪器误差满足均匀分布）。将 A 类和 B 类分量采用方和根合成，得到合成不确定度表达式为

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (1-7)$$

注：式中忽略置信因子 t_p （测量次数 n 取 6 ~ 10）。

测量结果的标准式为

$$x = \bar{x} \pm \Delta \text{ (单位)}, E = \frac{\Delta}{\bar{x}} \times 100\%$$

不确定度取位规则：在物理实验中，绝对不确定度一般取一位有效数字，其尾数采用只进不舍法则。相对不确定度一般取两位有效数字。

例 1-1 用米尺 ($\Delta_{\text{仪}} = 0.5\text{mm}$) 测一钢丝长度，六次测量值分别为 $x_1 = 14.0\text{mm}$, $x_2 = 14.4\text{mm}$, $x_3 = 14.9\text{mm}$, $x_4 = 14.2\text{mm}$, $x_5 = 14.1\text{mm}$, $x_6 = 14.8\text{mm}$ 。试写出它的测量结果，并用不确定度 $\bar{x} \pm \Delta$ 表示。

解：①计算算术平均值

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 x_i \\ &= \frac{14.0 + 14.4 + 14.9 + 14.2 + 14.1 + 14.8}{6} \text{mm} \\ &= 14.4\text{mm} \end{aligned}$$

②计算 A 类不确定度

$$\begin{aligned}\Delta_A &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (x_i - \bar{x})^2}{6(6-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{1}{5 \times 6} (0.4^2 + 0.0^2 + 0.5^2 + 0.2^2 + 0.3^2 + 0.4^2)} \text{ mm} \\ &\approx 0.153 \text{ mm} \approx 0.2 \text{ mm}\end{aligned}$$

③计算 B 类不确定度

$$\Delta_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \approx 0.3 \text{ mm}$$

④合成不确定度

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = \sqrt{0.2^2 + 0.3^2} \text{ mm} \approx 0.4 \text{ mm}$$

⑤测量结果

$$x = (14.4 \pm 0.4) \text{ mm}, E = \frac{\Delta}{x} \times 100\% \approx 2.8\%$$

三、不确定度与误差

不确定度是在误差理论的基础上发展起来的, 不确定度 A 类分量的估算用到了标准误差计算的公式。

误差用于定性描述实验测量的有关理论和概念, 不确定度用于实验结果的定量分析和运算等。用测量不确定度代替误差评定测量结果, 具有方便性、合理性和实用性等优点。

误差可正可负, 而不确定度永远是正的。

误差是不确定度的基础, 不确定度是对经典误差理论的一个补充, 是现代误差理论的内容之一, 它还有待于进一步的研究、完善和发展。

第四节 直接测量结果与不确定度的估算

在物理实验中, 直接测量主要有单次测量和多次测量。由于不确定度评定方法的复杂性, 只能采用简化的, 具有一定近似性的估算方法。

一、单次测量

单次测量的结果表示式为

$$x = x_{\text{测}} \pm \Delta_{\text{仪}} \quad (\text{单位})$$

其中, $x_{\text{测}}$ 是单次测量值, 也称为单次测量最佳值。不确定度取仪器基本误差 $\Delta_{\text{仪}}$, 仪器基本误差可在仪器说明书或某些技术标准中查到, 或通过估算获得。