

高等学校教材

基础物理实验

(第一册)

封丽 符时民 陈维石 编著



東北大學出版社
Northeastern University Press

高等学校教材

5005 环游湖 1977

5005 环游湖 1977

5005 环游湖 1977

5005 环游湖 1977

5005 环游湖 1977

基础物理实验

(第一册)

封 丽 符时民

陈维石 编著
江苏工业学院图书馆
藏书章

东北大学出版社

• 沈阳 •

© 封 丽 符时民 陈维石 2007

● 图书在版编目 (CIP) 数据

基础物理实验 (第一册) / 封丽, 符时民, 陈维石编著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2007.6

ISBN 978-7-81102-421-0

I. 基… II. ①封… ②符… ③陈… III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 087512 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳中科印刷有限责任公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

幅面尺寸: 170mm×228mm

字 数: 276 千字

印 张: 14.5

出版时间: 2007 年 6 月第 1 版

印刷时间: 2007 年 6 月第 1 次印刷

责任编辑: 牛连功

责任校对: 无 石

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

ISBN 978-7-81102-421-0

定 价 (全三册): 78.00 元

前 言

《基础物理实验》是物理专业学生的一门必修的专业主干基础课,也是化学、数学、计算机、教育技术等理科系及工科系非物理专业学生必修的一门重要的基础课。本书是按照教育部高等学校物理类专业及非物理类专业大学物理实验课程教学基本要求,借鉴国内物理实验教学内容和课程体系改革与研究的成果,结合多年的物理实验及教学经验编写而成的。全书共分三册,内容涵盖了物理实验基本知识、基础实验、综合性设计性实验及计算机辅助实验。它所安排的实验题目在内容上由浅入深、循序渐进,使学生逐步学会如何选题、选配实验器材,直到能独立进行实验设计和开展具有研究性内容的实验工作,从而锻炼和培养学生,使之具有初步的实验能力、实验设计能力和创新能力。本书为高等学校物理专业以及理、工、农、医等非物理专业的基础物理实验教学用书,也可作为夜大、函授等成人高等教育的物理实验教材。

本课程可以配合有关课程(主要是力学、热学、电磁学、光学等)的学习,帮助学生理解和掌握物理各领域中的一些重要现象、概念和规律,掌握20世纪以来物理学发展各主要领域中的基本实验方法和技能,从而培养学生的综合思维能力与创新精神,学习如何用实验方法研究物理现象与规律。

本书在选择实验内容时注重时代性和先进性。物理实验必须与现代科学技术接轨,才能激发学生的学习积极性与热情,才能使现代科技进步的成果渗透到传统的经典课程内容中。在教学内容体系上与传统课程体系相比作了较大的调整。传统的物理实验课程体系是按力、热、电、光分别安排的封闭体系,学生每学期各完成其中的一门实验,限制了对学生跨学科思维能力和创造能力的培养。而我们按照新的实验课程独立发展体系把基础物理实验内容重新作了整合。其主要特点为:

1. 按照学生的学习规律,全面调整了实验内容体系,分为以基本量测量、基本实验仪器使用为主的基本实验以及综合性、设计性实验三大部分。

2. 各实验内容的选取与设计重视面与点的结合,实验内容体系强调实验过程与实验方法设计,强调基础性、综合性、设计性和研究性,强调分层次教学,同时增加了排除故障等技能的教学内容。

3. 对测量的评定,采用了“标准不确定度”,并且浅涉了测量统计标准及

其在认可论证中的应用,引导学生能尽快适应现代技巧规范。

4. 把新的仪器、测量技术和测量手段纳入了实验内容体系。比如,将计算机技术、光纤技术、传感器技术等现代技术和手段寓于实验中(其中不少是各领域的科研成果)。

本册基础物理实验的基础知识、实验三、实验四、实验九、实验十、实验十五、实验十六、实验二十一、实验二十二等内容是由符时民老师撰写;实验一、实验二、实验七、实验八、实验十三、实验十四、实验十九、实验二十及附录等内容是由陈维石老师撰写;实验五、实验六、实验十一、实验十二、实验十七、实验十八、实验二十三、实验二十四及计算机辅助实验等内容是由封丽老师撰写。本册书是由封丽老师统稿。

编写一套新型的教材,是一项艰苦而又复杂的任务,有赖于不断地改革实践和长期的研究探索,才能日臻完善。书中的缺点和错误在所难免,敬请使用和阅读本书的教师、同学不吝指正。

在本书的编写期间得到了许多同行的鼓励和支持,谨致深切的谢意。

编 者

2007年3月

目 录

前 言

基础物理实验的基础知识	1
§ 1 基础物理实验的目的	1
§ 2 测量与仪器	1
§ 3 测量与误差	2
§ 4 系统误差	4
§ 5 偶然误差	4
§ 6 实验中的错误与错误数据	7
§ 7 测量不确定度	8
§ 8 有效数字	14
§ 9 实验图线的描绘	18
§ 10 组合测量与最佳直线参数	21
§ 11 实验报告	27
基本实验	29
实验一 长度测量	29
实验二 单 摆	35
实验三 电学实验基本知识	38
实验四 示波器的使用	57
实验五 薄透镜焦距的测定	75
实验六 用牛顿环测透镜的曲率半径	80
实验七 密度的测量	86
实验八 倾斜气垫导轨上滑块运动的研究	93
实验九 用惠斯通电桥测电阻	97
实验十 静电场的描绘	104
实验十一 显微镜的使用	108
实验十二 棱镜单色仪实验	114

实验十三	牛顿第二定律的验证	121
实验十四	刚体转动的研究	124
实验十五	用板式电势差计测量电池的电动势和内阻	127
实验十六	低电阻的测量	134
实验十七	分光计调节及棱镜玻璃折射率的测定	138
实验十八	测定单缝衍射的光强分布	148
实验十九	液体表面张力系数的测定	153
实验二十	金属线膨胀系数的测定	157
实验二十一	磁场的描绘	159
实验二十二	霍耳效应	164
实验二十三	迈克耳孙干涉仪的调节和使用	171
实验二十四	用透射光栅测量光波波长	179
计算机辅助实验		185
辅助实验一	瞬时速度	186
辅助实验二	自由落体测重力加速度	189
辅助实验三	加速度与力的关系	192
辅助实验四	用恒稳电流场模拟静电场	196
辅助实验五	电磁感应现象 (一)	198
辅助实验六	电磁感应现象 (二)	199
辅助实验七	电磁感应现象 (三)	201
辅助实验八	电磁感应定律	203
辅助实验九	单缝衍射	205
附录一	中华人民共和国法定计量单位	210
附录二	物理学基本常数	213
附录三	物理常量表	214
参考文献		225

基础物理实验的基础知识

§ 1 基础物理实验的目的

物理学是实验的学科。物理学新概念的确立和新规律的发现要依赖于反复实验。物理学上的新的突破常常是通过新的实验技术得以实现的。物理实验的方法、思想、仪器和技术经常被普遍地应用在自然科学各个领域和技术部门。

普通物理实验课是对学生进行实验教育的入门课程,其教学的目的在于使学生在学物理实验基础知识的同时,受到严格的训练,掌握初步的实验能力,养成良好的实验习惯和严谨的科学作风。

实验能力包括动手能力和动脑能力。既要训练学生安装、调试和操作实验装置的技能,又要培养学生在设计实验步骤、选取实验条件、分析现象、判断故障和审查数据等方面的能力。

实验课虽然是在教师指导下的学习环节,但在实验课上学生的活动有较大的独立性,我们期望学生以研究的态度去组装实验装置,进行观测与分析,探讨最佳实验方案,从中积累经验、锻炼技巧和机智,为以后独立设计实验装置和解决新的实验课题创造条件。

§ 2 测量与仪器

测量是指为确定被测量对象的量值而进行的被测物与仪器相比较的实验过程。

例如,一桌子的长度与米尺相比,得出桌子长度为 1.248m;一铁块的质量与砝码相比(通过天平),得出铁块质量为 31.85g。

测量分为直接测量与间接测量。

直接测量是指被测量对象和仪器直接比较,得出被测量的量值。前面的二例均为直接测量。

间接测量是指由一个或几个直接测量的量经已知函数关系计算出被测量的量值的测量。例如,测量单摆的摆长 l 和振动周期 T ,由已知的公式 $g = 4\pi^2 l / T^2$ 算出重力加速度 g 值的过程就是间接测量。

测量仪器是指用以直接或间接测出被测对象量值的所有器具。如游标卡

尺、天平、停表、惠斯通电桥、照度计等。

测量结果给出被测量的量值, 它包括两部分: 数值和单位(不标出单位的数值不能是量值)。

一个国家的最准确的计量器具是一些主基准, 在全国各地则有由主基准校准过的工作基准, 实验室使用的仪器已经直接或间接用工作基准进行校准过。

仪器的准确度等级 测量时是以仪器为标准进行比较, 当然要求仪器准确。不过由于测量的目的不同, 对仪器准确程度的要求也不同, 比如称量金戒指的天平必须准确到 0.001g , 而粮店卖粮的台秤差几克是允许的。为了适应各种测量对仪器的准确程度的不同要求, 国家规定工厂生产的仪器分为若干准确度等级。各类各等级的仪器, 又有对准确度的具体规定。例如 1 级螺旋测微计, 测量范围小于 50mm , 最大误差不超过 $\pm 0.004\text{mm}$, 又如 1.0 级电流表, 测量范围为 $0 \sim 500\text{mA}$, 其最大误差不超过 $\pm 5\text{mA}$ 。

实验时要恰当地选取仪器。仪器使用不当对仪器和实验均不利。表示仪器的性能有许多指标, 其中最基本的是测量范围和准确度等级。当被测量超过仪器的测量范围时, 首先对仪器会造成损伤, 其次可能测不出量值(如电流表), 或勉强测出(如天平), 但误差将增大。对仪器的准确度等级的选择也要适当, 一般是在满足测量要求的条件下, 尽量选用准确度低的仪器。减少准确度高的仪器的使用次数, 可以减少在反复使用时的损耗, 延长其使用寿命。

习 题 一

1. 测量就是比较, 试说明如下的测量是如何体现比较的:

- (1) 用秤称量一个西瓜的质量;
- (2) 用弹簧秤称一砖块的质量;
- (3) 用秒表测一摆动时间;
- (4) 用万能表测一电阻器的阻值。

2. 你知道如何去做下面的测量吗?

- (1) 跑百米的时间;
- (2) 子弹的速度;
- (3) 声音的速度。

§ 3 测量与误差

物理实验时要对一些物理量进行测量。各被测量在实验当时条件下均有不依人的意志为转移的真实大小, 称此值为被测量的真值。测量的理想是真值,

但是它是不能确知的。因为，首先测量仪器只能准确到一定程度，其次有环境条件的影响，并且观测者操作和读数不能十分准确，理论也有近似性，所以测定值和真值总是不一致的。定义测量值减去真值的差为测量值的误差，即

$$\text{测量值}(x) - \text{真值}(a) = \text{误差}(\epsilon)$$

误差 ϵ 是一代数值，当 $x \geq a$ 时， $\epsilon \geq 0$ ；当 $x < a$ 时， $\epsilon < 0$ 。由于真值是不能确知的，所以测量值的误差也不能确切知道，在此情况下，测量的任务是：

- (1) 给出被测量真值的最佳估计值；
- (2) 给出真值最佳估计值的可靠程度的估计。

关于什么是最佳估计值，留到后面去讨论，但是可以想到最佳估计值必定误差比较小。为了减小误差，就要分析误差的来源，实际上任何测量的误差都是多种因素引入的综合效应。现在以用单摆测重力加速度为例作些分析。

物理理论中的单摆，是用一无质量、无弹性的线，挂起一质点，在摆角接近零时，摆长 l 和周期 T 之间存在 $T = 2\pi \sqrt{l/g}$ 的关系，其中 g 为当地的重力加速度。

在用单摆测重力加速度的测量中，误差的来源大致有如下方面：①米尺和停表本身不准确；②对仪器的操作不准确；③仪器读数不准确；④摆线质量不为零；⑤摆锥体积不为零；⑥摆角大小不为零；⑦存在空气浮力和阻力；⑧支点状态不理想；⑨支架震动或空气流动。

对误差的来源可以概括为五个方面：①理论，②仪器，③实验装置，④实验条件，⑤观测者和监视器。

在相同条件下的重复测量中，所得测量值一般不尽相同，这表示每次测量的误差不同，并且在测量之前不可预知测量值是偏大些或偏小些，例如用手按秒表测摆的振动周期每次不尽相同的情形，这是偶然因素造成的，这一类误差称为偶然误差。

还有如下的不同的例子：

实例 1 用一块 2.5 级 0~1A 的安培计测一回路的电流 I 为 0.73A，而另一块 0.5 级 0~1A 的安培计测同一回路电流为 0.716A；

实例 2 用一天平称一物体质量，物体在左盘，砝码在右盘，平衡时，砝码值为 74.2519g，物体与砝码交换后则为 74.2501g；

实例 3 测一单摆的振动周期 T ，当摆的最大摆角在 5° 附近时测得 $T_1 = 1.983\text{s}$ ，摆角达 10° 附近时为 $T_2 = 1.987\text{s}$ 。

上述各项测量值的差异在重复测量时依然不变，这表示其误差的符号和大小是恒定的，此类误差称为系统误差。

测量值的误差均同时包含偶然误差和系统误差。研究误差的目的是：

- (1) 尽量减少测量值中的误差;
- (2) 对残存的误差的大小给出某种估计值。

绝对误差与相对误差 设被测量 X 的测量值为 x , 其真值为 a , 误差 $\epsilon = x - a$, ϵ 与 a 的比值 $\epsilon_r = \epsilon/a$ 称为相对误差, 对应 ϵ_r 也称 ϵ 为绝对误差, 但应注意绝对误差和误差绝对值 $|\epsilon|$ 不同。实际上绝对误差 ϵ 与真值 a 不可确知, 在以后将讨论对它作某种估计。

§ 4 系统误差

对实验进行理论分析或对比实验之后, 可以得知其系统误差的来源, 并可采取一定的措施去削减系统误差。以上提到的实例 2 误差是由于天平左右臂长不完全相等引入的, 对此可将物体放在天平左盘、右盘上各称一次取平均去消除系统误差。实例 3 是由于摆的周期与振幅有关, 缩小振幅可以减小此项系统误差, 但是振幅不宜过小, 当测量要求更高时, 可根据理论分析得出的修正公式去补正。实例 1 是仪器自身的误差问题。

工厂生产仪器要经过设计、选材、加工、组装和校验一系列过程, 在此生产过程中产品将或多或少偏离设计值, 这是仪器的基本误差。国家规定工厂生产某一准确度等级的某种仪器, 仪器的基本误差必须小于相应等级的容许误差。例如, 生产 2.5 级 $0 \sim 100\text{mA}$ 电流表, 在测量范围内指示值的误差要小于 $2.5\% \times 100\text{mA}$ 即 2.5mA , 生产 0.5 级 $0 \sim 100\text{mA}$ 电流表, 指示值的误差要小于 $0.5\% \times 100\text{mA}$, 即 0.5mA 。因而 0.5 级电流表测量值比 2.5 级电流表测量值更可靠。但是任何精密的仪器都是有误差的。

对系统误差的研究目的主要是:

- (1) 探索系统误差的来源, 设计实验方案消除或削减该项误差;
- (2) 估计残存系统误差的可能的范围。

§ 5 偶然误差

在同一条件下, 对同一物理量进行重复测量, 各次测量值一般不完全相同, 这是由于测量时存在偶然误差。一个测量值的偶然误差是多项偶然因素综合作用的结果, 在测量前不能得知测量值将偏大或偏小。

用手控制数字毫秒计, 测量一摆的周期共 100 次, 测量值的大小变化不定, 似乎没有规律, 其实这种偶然现象服从统计规律。现将测量值分布的区域等分为 9 个区间, 统计各区间内测量值的个数 N_i , 以测量值为横坐标, N_i/N

为纵坐标(N 为总数)作统计直方图, 图 0-1 是一次实验的结果。

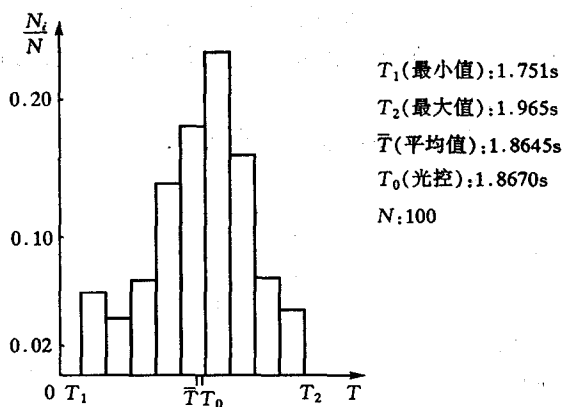


图 0-1 实验结果的统计规律

从图中可以看出, 比较多的测量值集中在分布区域的中部, 而区域的左右两边的测量值个数都接近一半, 由此可以设想被测量的真值就在数据比较集中的部分。

在上述测量之后, 用光电门控制一台数字毫秒计去测同一个摆的周期, 测 10 次, 测量值分布在 1.886s 到 1.868s 的小区域中, 由于此时的偶然误差显著小于前者, 可将光电控制测量值的平均值 T_0 作为手控测量的近似真值, 对于测量值的偶然误差作如下统计, 取 $T_0 = 1.8670s$, 则

$$T_i - T_0 < 0 (\epsilon_i \leq 0) \quad \text{占 48\%}$$

$$T_i - T_0 \geq 0 (\epsilon_i > 0) \quad \text{占 52\%}$$

多次测量均有同上相似的结果, 因而得出如下几点认识:

- (1) 每次测量的偶然误差是不确定的;
- (2) 出现正号或负号偶然误差的机会相近;
- (3) 出现绝对值小的偶然误差的机会多一些。

算术平均值 设 n 次测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的误差为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$, 真值为 a , 则

$$(x_1 - a) + (x_2 - a) + \dots + (x_n - a) = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_n$$

将上式展开整理后, 两侧除以 n , 得

$$\frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) - a = \frac{1}{n}(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_n)$$

它表示算术平均值的误差, 等于各测量值误差的平均。假如各测量值的误差只是偶然误差, 而偶然误差有正有负, 相加时可抵消一些, 所以 n 越大, 算术

平均值越接近真值。因此可以用算术平均值作为被测真值的最佳估计值。

当测量值的误差中包含有已知的系统误差, 则相加时它们不能抵消, 这时应当用算术平均值加上修正值为被测量真值的最佳估计值(修正值与系统误差绝对值相等, 符号相反)。

标准偏差具有偶然误差的测量值将是分散的, 对分散情况的定量表示用标准偏差 s , 它的定义式为

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (0-1)$$

式中, n 为测量值个数。

比如有如下两组数值:

A	2.1	2.6	2.8	2.9	3.0	3.2	3.7
B	2.1	2.4	2.7	2.9	3.1	3.4	3.7

两组数都在 2.1 到 3.7 之间, 平均值都是 2.9, 但 A 组数比较向中间集中, B 组则稍差, 计算标准偏差为 $s_A = 0.50$, $s_B = 0.56$, 表现出它们分散上的差异。

算术平均值的标准误差 测量值有偶然误差, 它们的算术平均值也必然有偶然误差, 由于求和时偶然误差的抵偿效应, 算术平均值的误差绝对值较小, 它的标准偏差 $s(\bar{x})$ 也应小于由式(0-1)求出的 s 值, 以后将证明^② (第 13 页), $s(\bar{x})$ 的定义式为

$$s(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (0-2)$$

式中, n 为测量值个数。与 $s(\bar{x})$ 相比又称 s 为测量列标准偏差。

标准偏差的统计意义 标准偏差小的测量值, 表示分散范围较窄或比较向中间集中, 而这种表现又显示测量值偏离真值的可能性较小, 即测量值的可靠性较高。

按误差理论的高斯分布可知:

$[\bar{x} - s(\bar{x})] \sim [\bar{x} + s(\bar{x})]$ 范围包含真值的概率为 68%;

$[\bar{x} - 1.96s(\bar{x})] \sim [\bar{x} + 1.96s(\bar{x})]$ 范围包含真值的概率为 95%;

$[\bar{x} - 2.58s(\bar{x})] \sim [\bar{x} + 2.58s(\bar{x})]$ 范围包含真值的概率为 99%。

上述结果是指系统误差已消除时的情况。很明显 $s(\bar{x})$ 越小, 上述各范围越窄, 因而用平均值 $\bar{x}$ 作为真值的估计值就越可靠。

关于测量次数 n 增加测量次数 n , 计算平均值时的抵偿效果会好些。从式(0-2)可知 n 大 $s(\bar{x})$ 将变小, 所以增加测量次数对提高平均值的价值是有利的。但是测量次数也不是越多越好, 因为增加 n , 测量时间就要延长, 实验

环境可能出现不稳定, 实验者也要疲劳, 这将引入新的误差。对此一般的原则是: 在偶然误差较大的测量中要多测几次, 否则可少些, 一般实验取 4~10 次为宜。

习 题 二

1. 工厂生产的仪器经鉴定为合格品, 用它测量会有误差吗?
2. 一组测量值, 相互差异很小, 此测量值的误差很小吗?
3. 将算术平均值作为真值的最佳估计值是否有条件?
4. 测量不可能没有误差, 作为实验者应当使组织的实验尽量减小误差。你能就用单摆测重力加速度的实验, 设想如何减小误差吗?

§ 6 实验中的错误与错误数据

实验中有时出现错误, 可能是公式错了、装置安错了、电路错了、对象观察错了、仪器操作错了、数读错了、计算错了, 等等。我们首先要防止出现错误, 其次要尽早地发现错误。

防止错误的关键是熟悉实验理论和条件, 明确要观察的对象, 懂得正确使用仪器。

尽早发现实验中的错误是实验者的良好修养。初学者往往只顾观测而忽略分析, 由于未及时发现错误, 造成很多数据作废或重做实验。应当养成一边观测一边分析思考的习惯。

数据分析是发现错误的重要方法。

例 1 测量单摆摆动 50 个周期的时间, 得出 98.4s, 96.7s, 97.7s。从数据可知摆的周期接近 2s, 但是前两个数据相差 1.7s, 后两个相差 1.0s, 它们都在半个周期以上, 显然这样大的差异不能用手按秒表稍许提前或错后的操作误差去解释, 即测量有错误。

例 2 用静力称衡法测一块玻璃的密度 ρ , 所用公式 $\rho = \rho(\text{水})m/(m - m')$, m 为玻璃质量, 测量值是 5.78g, m' 是玻璃块悬在水中时的视重, 测量值是 4.77g。这个测量显然有错误, 因为在此 m 与 m' 之差近似为 1g, ρ 值接近 $6\text{g}/\text{cm}^3$, 没有这样大密度的玻璃。

将实验数据标在坐标纸上, 往往有助于分析数据。

在一组数据中, 有时有一二个稍许偏大或偏小的数值, 如果简单的数据分析不能判定它是错误数据, 就要借助于误差理论。

在误差理论中提出了一些关于处理可疑数据的判据, 在此介绍格罗布判

据。按此判据给出一个和数据个数 n 相联系的系数 G_n 。当已知数据个数 n , 算术平均值 $\bar{x}$ 和测量列标准差 s , 则可以保留的测量值 x_i 的范围为

$$(\bar{x} - G_n \cdot s) \leq x_i \leq (\bar{x} + G_n \cdot s) \quad (0-3)$$

G_n 系数表

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
G_n	1.15	1.46	1.67	1.82	1.94	2.03	2.11	2.18	2.23	2.28	2.33
n	14	15	16	17	18	19	20	22	25	30	
G_n	2.37	2.41	2.44	2.48	2.50	2.53	2.56	2.60	2.66	2.74	

也可以拟合计算 G_n 值:

$$n < 30 \text{ 时} \quad G_n = \frac{\ln(n - 2.65)}{2.31} + 1.305$$

$$n > 30 \text{ 时} \quad G_n = \frac{\ln(n - 2.65)}{2.30} + 1.36 - \frac{n}{550}$$

例: 测得一组长度值(单位: cm):

98.28	98.26	98.24	98.29	98.21
98.30	98.97	98.25	98.23	98.25

计算出 $\bar{x} = 98.328\text{cm}$, $s = 0.227\text{cm}$, $n = 10$, $G_n = 2.18$

$$\bar{x} - G_n \cdot s = 97.833\text{cm}, \quad \bar{x} + G_n \cdot s = 98.823\text{cm}$$

数据 98.97 在此范围之外, 应舍去。除去后再计算

$$\bar{x} = 98.257\text{cm}, \quad s = 0.029\text{cm}, \quad s(\bar{x}) = 0.010\text{cm}$$

§ 7 测量不确定度

测量的理想是获得被测量在测量条件下的真值, 但是实际上在测量时, 由于实验方法和计算器具的不完善, 测量环境不理想、不稳定, 实验者在操作上和读取数值时不十分准确等原因, 都将使测量值偏离真值, 因而测得值不能准确表达真值, 在报道被测量的测量结果时, 因为报道的是被测量的近似值, 所以应同时报道对它的可靠性的评价, 即给出对此测量质量的指标。测量不确定度就是测量质量的指标, 也即是对测量结果残存误差的评估。

测量值不等于真值, 可以设想真值就在测量值附近的一个量值范围内, 测量不确定度就是评定作为测量质量指标的此量值范围。设测量值为 x , 其测量不确定度为 u , 则真值可能在量值范围 $(x - u, x + u)$ 之中, 显然此量值范围越窄, 即测量不确定度越小, 用测量值表示真值的可靠性就越高。

对测量不确定度的评定, 常以估计标准偏差来表示大小, 这时称其为标准

不确定度。

由于测量有误差,因而才要评定不确定度,误差来源不同,它对测量的影响也不同。从测量值来看,其影响表现可分为两类:一类是偶然效应引起的,使测量值分散开,例如用手控停表测摆的周期,由于手的控制存在偶然性,每次测量值不会相同;另一类则使测量值恒定的向某一方向偏移,重复测量时,此偏移的方向和大小不变,当用更精密的电势差计去测量时,可以得知电压计的示值有恒定的偏差,这是电压计的基本误差所致,这两类影响都会给测量引入不确定度,都要评定其标准不确定度,但是评定的方法不同。

1. 标准不确定度的 A 类评定

由于偶然效应,被测量 X 的多次重复测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 将是分散的,从分散的测量值出发,用统计的方法评定标准不确定度,就是标准不确定度的 A 类评定。设 A 类标准不确定度为 $u_A(x)$, 用统计方法求出平均值的标准偏差

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

A 类评定标准不确定度(又称标准不确定度的 A 类分量)就取平均值的标准偏差,即

$$u_A(x) = s(\bar{x}) \quad (0-4)$$

按误差理论的高斯分布规律,如果不存在其他误差影响,测量值范围 $[\bar{x} - u_A(x), \bar{x} + u_A(x)]$ 中包括真值的概率为 68.3%, 如扩大量值范围为 $[\bar{x} - 1.96u_A(x), \bar{x} + 1.96u_A(x)]$, 则其中包括真值的概率为 95%。

2. 标准不确定度的 B 类评定

当误差的影响,仅使测量值向某一方向有恒定的偏离时,这时不能用统计的方法评定不确定度,这一类的评定就是 B 类评定。

B 类评定,有的依据计量仪器说明书或鉴定书,有的依据仪器的准确度等级,有的则粗略地依据仪器分度值或经验。从这些信息中可以获得极限误差 Δ (或容许误差或示值误差), 此类误差一般可视为均匀分布,而 $\frac{\Delta}{\sqrt{3}}$ 为均匀分布的标准差,则 B 类评定标准不确定度(又称标准不确定度的 B 类分量) $u_B(x)$ 为

$$u_B(x) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (0-5)$$

严格地讲,从 Δ 求 $u_B(x)$ 的变换系数与实际分布有关,在此均近似按均匀分布处理。

例 1 使用量程为 0~300mm, 分度值为 0.05mm 的游标卡尺测量长度时,

按国家计量技术规范 JJG30—84, 其示值误差在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内, 即极限误差 $\Delta = 0.05\text{mm}$, 则由游标卡尺引入的标准不确定度 $u_B(x)$ 为

$$u_B(x) = \frac{0.05\text{mm}}{\sqrt{3}} = 0.029\text{mm}$$

例 2 使用数字毫秒计测一时间间隔 t , 按 JJG602—89, 其示值误差在 $\pm(\text{晶体频率准确度} \times \text{时间间隔 } t + 1 \text{ 个时标})$ 范围内, 频率准确度为 1×10^{-5} 。

当 $t = 2.157$ 时, 则 $\Delta = (1 \times 10^{-5} \times 2.157 + 0.001) \approx 0.001\text{s}$, 则由数字毫秒计引入的标准不确定度 $u_B(x)$ 为

$$u_B(x) = \frac{0.001\text{s}}{\sqrt{3}} = 0.00058\text{s}$$

3. 合成标准不确定度 $u_C(x)$ 或 $u_C(y)$

对一物理量测定之后, 要计算测量值的不确定度, 由于其测量值的不确定度来源不止一个, 所以要合成其标准不确定度。

例如, 用螺旋测微计测量钢球的直径, 不确定度的来源有:

- (1) 重复测量读数(A类评定)。
- (2) 螺旋测微计的固有误差(B类评定)。

又如, 用天平称量一物体的质量, 不确定度的来源有:

- (1) 重复测量读数(A类评定)。
- (2) 天平不等臂(B类评定)。
- (3) 砝码的标称值的误差(B类评定)。标称值指仪器上表明的量值。
- (4) 空气浮力引入的误差(B类评定)。

由不同来源分别评定的标准不确定度要合成为测量值的标准不确定度。首先应明确一点, 作为标准不确定度不论是 A 类评定还是 B 类评定, 在合成时是等价的; 其次是合成的方法, 由于实际上各项误差的符号不一定相同, 采用算术求和将可能增大合成值, 因而采用方和根法, 即几何求和, 如图 0-2 所示。

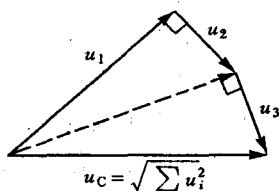


图 0-2 不确定度的合成

对于直接测量, 设被测量 X 的标准不确定度的来源有 k 项, 则合成标准不确定度 $u_C(x)$ 取

$$u_C(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^k u^2(x_i)} \quad (0-6)$$

式中的 $u(x)$ 是 A 类评定或 B 类评定。

对于间接测量, 设被测量 Y 由 m 个直接被测量 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 算出, 它们的关系为 $y = y(x_1, x_2, \dots, x_m)$, 各 x_i 的标准不确定度为 $u(x_i)$, 则 y