

河南大学出版社

河南大学出版社

This image shows a full page of graph paper. It features a uniform grid of small, light blue squares across the entire surface. The grid is composed of approximately 20 columns and 20 rows of squares. There are no margins, text, or other markings present on the page.

河南大学跨世纪教学改革工程资助项目

大学物理实验教程

主 编 毛海涛 张忠锁

副主编 郭彦杰 王庆国 马孝贤

河南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/毛海涛,张忠锁主编. —开封:
河南大学出版社,2003.8
ISBN 7-81091-074-4

I. 大… II. ①毛…②张… 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(2003)第 060034 号

书 名 大学物理实验教程
作 者 毛海涛 张忠锁

责任编辑 陈国剑
责任校对 陈国剑
责任印制 苗 卉
封面设计 生生书房

出 版 河南大学出版社
地址:河南省开封市明伦街 85 号 邮编:475001
电话:0378—2864669(行管部) 0378—2825001(营销部)
网址:www.hupress.com E-mail:bangong@hupress.com
经 销 河南省新华书店
排 版 河南大学出版社印务公司
印 刷 开封日报印刷厂
版 次 2003 年 8 月第 1 版 印 次 2003 年 8 月第 1 次印刷
开 本 787mm×1092mm 1/16 印 张 16
字 数 367 千字 印 数 1—3160 册

ISBN 7—81091—074—4/O·133 定 价:17.80 元

(本书如有印装质量问题请与河南大学出版社营销部联系调换)

内 容 提 要

本书是依照高等学校理科教材编审委员会审订的物理实验教学基本要求,在河南大学物理与信息光子学院所用普通物理实验、近代物理实验教材的基础上修订而成,其内容包括误差与数据处理、基础实验、综合实验和开放实验等4个方面内容,共68个实验项目.其中,配合实验教学大纲、结合实际应用的实验比重较大,吸收较新的科研成果、结合素质教育,新增的提高性、设计性实验也占了一定的分量.考虑到教学环节需要,书中强调详述实验原理、实验方法和要求,以便于学生自学和自己拟出实验步骤进行独立实验.

本书适合作为高等学校理工科本科生的物理实验教材或教学参考书,也可作为有关学科中实验工作者的参考书.

序

物理学是一门以实验为基础的学科,实验既为物理学提供了丰富的资料来源,同时又是检验物理理论正确与否的唯一根据。

实验与理论相辅相成,两者缺一不可。实验物理学家必须谙熟理论,理论物理学家也必须对实验工作有较深的了解,否则其工作就是无源之水、无本之木。因此,物理实验是从事物理学学习和研究的根基。

本书着重于理论与实践的结合,着重于方法和能力的培养,其目的是通过这些实验的系统训练,培养学生对物理现象的观察能力和在实验过程中发现问题、分析问题和解决问题的能力;了解物理实验在物理概念的产生、形成和发展过程中的作用,加深对物理基本现象和规律的理解;学习基本实验方法和技术,掌握有关仪器的性能和使用,培养学生阅读参考资料、选择测量方法和仪器、观察现象、独立操作、正确测量、实验数据处理与误差分析以及总结实验结果等方面的能力;培养实事求是、踏实细致、严肃认真的科学态度和克服困难、坚忍不拔的工作作风以及科学的、严谨的实验素质和习惯,获得用实验方法和技术研究物理现象和进行科学研究的能力。

本书根据先简后繁、先易后难和循序渐进的教学顺序,将物理实验分为基础实验、综合实验和开放实验三部分。第一部分包括各种测量的基本训练,有力学、热学、电磁学、光学和综合性的各种实验,它们虽都比较基本、直观,但却是不可或缺的;第二、三部分涉及物理学中各项综合性知识,有一些则是 20 世纪著名的、开拓物理学新发展方向和方法的实验,有些开拓者因此获得了诺贝尔物理奖。选择开放实验的目的,是让学生自己设计、配置、安装和调整仪器,以培养他们的创新能力,由基础较好、有兴趣、有创新精神的学生选做。在这些实验里,皆由学生进行方案设计、仪器选择、实验安排,经指导教师检查、指导后进行。这样的实验自然要求相当多的时间,但对于学生则是更全面和深入的训练,为他们将来作进一步的科学研究打基础。

本教材是我们多年实验教学、实验研究和实验室建设的总结,因此包含了已退休的、对本书的编写做出贡献的王德建教授、李方正教授、郭加平副教授多年的心血,也包括所有先后在我们实验室工作过的教师和实验技术人员的智慧和汗水。这次编写,我们重点考虑了现在的实验教学要求和新的仪器设备。参加本教材编写的基本情况是:张忠锁(第一单元,实验 3.13~3.21),郭彦杰(实验 2.1~2.11),王庆国(实验 3.22~3.23,实验 4.14~4.18,附录),李平生(实验 2.12~2.14,实验 4.1~4.3),赵伟(实验 2.25~2.27),邢前(实验 3.3~3.9,实验 4.6),吴寿煜(实验 2.13~2.23),刘越峰(实验 2.24~3.2,实验 4.4~4.5),程秀英(实验 3.10~3.12),朱继春(实验 4.7~4.13)。郭彦杰、王庆国、马孝贤分别进行了第二单元、第三单元、第四单元的审稿,全书由毛海涛、张忠锁通审。王庆国参加了稿件的制图工作。在成稿过程中,我们参考了丁慎训、王德建、林木欣、杨述武、赵家凤、戴乐山等老师编著的有

关物理实验著作、教材,也吸收了许多老师的宝贵建议.特别要提出的是,本教材受到河南大学跨世纪教改工程资助项目资助后,才得以正式出版,我们对这种支持表示感谢,并向以上其他单位和个人致以诚挚的谢忱!

由于本教材是一种新的体系,虽经教学实践,仍难免有错误和不足之处,诚恳欢迎读者在使用过程中提出意见,以便修正.

编 者
2003. 5. 1

目 录

第一单元 误差分析与数据处理	(1)
第一节 测量与误差的基本概念	(1)
第二节 测量结果的评定和不确定度	(4)
第三节 随机误差的统计分布	(7)
第四节 误差的估计和计算	(9)
第五节 有效数字及其运算法则	(10)
第六节 常用实验数据处理方法	(12)
第二单元 基础实验	(15)
实验 2.1 几何量的测量	(15)
实验 2.2 重力加速度的测量	(18)
实验 2.3 固体和液体密度的测定	(22)
实验 2.4 杨氏弹性模量的测定	(25)
实验 2.5 动量守恒定律的验证	(28)
实验 2.6 牛顿第二定律的验证	(31)
实验 2.7 金属线膨胀系数的测定	(34)
实验 2.8 毛细管法测定液体的粘滞系数	(37)
实验 2.9 良导体传热系数的测定	(40)
实验 2.10 混合法测定固体的比热容	(42)
实验 2.11 万用表的使用	(45)
实验 2.12 电子衍射	(47)
实验 2.13 电荷量的测定	(50)
实验 2.14 电桥法测电阻	(54)
实验 2.15 霍尔效应及磁场的测定	(59)
实验 2.16 用阿贝折射计测定液体折射率	(65)
实验 2.17 薄透镜焦距的测定	(67)
实验 2.18 静电场的描绘	(70)
实验 2.19 示波器的使用	(73)
实验 2.20 普朗克常数的测定	(77)
实验 2.21 分光计的调整和使用	(81)
实验 2.22 用牛顿环测定平凸透镜的曲率半径	(87)

实验 2.23	用旋光仪测定糖溶液的浓度	(90)
实验 2.24	用双棱镜测定光波的波长	(92)
实验 2.25	单色仪的定标	(95)
实验 2.26	逸出功的测定	(97)
实验 2.27	夫兰克—赫兹实验	(101)
第三单元 综合实验		(107)
实验 3.1	转动惯量的测定	(107)
实验 3.2	分析天平的使用	(112)
实验 3.3	简谐振动的研究	(118)
实验 3.4	液体介电常数的测定	(123)
实验 3.5	用超声波测定液体的比热比	(125)
实验 3.6	电子束的聚焦与偏转	(128)
实验 3.7	直流电位差计的使用	(133)
实验 3.8	用伏安法测绘二极管的特性曲线	(136)
实验 3.9	半导体热敏电阻特性的研究	(139)
实验 3.10	迈克尔逊干涉仪的调整和使用	(143)
实验 3.11	用透射光栅测定光的波长及光栅角色散率	(148)
实验 3.12	光电倍增管光谱特性的测定	(151)
实验 3.13	用椭圆偏振仪测量薄膜的厚度和折射率	(156)
实验 3.14	真空的获得与测量	(162)
实验 3.15	真空镀膜	(170)
实验 3.16	单光子计数	(176)
实验 3.17	钠原子光谱	(182)
实验 3.18	光栅摄谱仪的使用	(185)
实验 3.19	塞曼效应的观测	(189)
实验 3.20	激光拉曼谱	(196)
实验 3.21	He-Ne 激光器特性的测试	(202)
实验 3.22	全息照相	(206)
实验 3.23	扫描电子显微镜	(211)
第四单元 开放实验		(216)
实验 4.1	测定盐水的密度	(216)
实验 4.2	测定规则物体的转动惯量	(216)
实验 4.3	用圆环摆测定转动惯量	(217)
实验 4.4	筛选电阻	(217)
实验 4.5	热电偶的冷端补偿	(218)
实验 4.6	热电偶温度计的制作及定标	(219)
实验 4.7	用示波器测绘铁磁材料的磁滞回线	(220)

实验 4.8	磁铁的相互作用势能曲线的研究	(222)
实验 4.9	用分光计测定双棱镜的锐角和折射率	(223)
实验 4.10	劈尖顶角的测量	(224)
实验 4.11	光栅常数的测定	(224)
实验 4.12	用光学方法测量细丝直径	(224)
实验 4.13	现代摄影技术	(226)
实验 4.14	偏振光的研究	(226)
实验 4.15	全息光栅	(229)
实验 4.16	空间滤波	(230)
实验 4.17	光导纤维传光特性研究	(232)
实验 4.18	核磁共振的稳态吸收	(235)
附录		(240)
一、国际单位制(SI)简介		(240)
二、常用物理常数		(242)
三、常用固体、液体的密度		(244)
四、某些金属的弹性模量(20℃)		(244)
五、常用谱线波长和可见光区定标用已知波长		(245)

第一单元 误差分析与数据处理

在物理实验中,通常要进行大量的数据测量,其测量值有些比较精确,有些与真实值有较大的误差,有些具有明显的统计涨落.因此,需要运用误差理论有效地进行实验测量和数据处理,并对实验结果做出正确的评价和分析.

不确定度是测量结果的测度,没有不确定度说明,测量结果将无从比较.1993年,国际计量局等7个国际组织发表了《测量不确定度表示指南》,这是处理实验结果的权威性准则.本章着重介绍此指南中强调且常用的误差理论知识,阐述误差分析的概率统计理论.

第一节 测量与误差的基本概念

在物理实验中,研究各物理量之间的规律,需要进行测量.所谓测量,就是把待测量与选作标准的量(仪器)进行比较,确定出待测量是标准量的多少倍.例如测一物体的长度,就是将待测的物体与刻度尺比较,从而得到测量值.

测量值由数值和单位构成.单位是物理量不可缺少的部分,测量或记录数据时,都必须标明单位.在国际单位制(SI)中,质量的单位为 kg(千克),长度的单位为 m(米),时间的单位为 s(秒),电流的单位为 A(安),热力学温度的单位为 K(开),物质的量的单位为 mol(摩),发光强度的单位为 cd(坎),它们称为 SI 基本单位.用 SI 基本单位以代数形式表示的单位则称为 SI 导出单位.

在对某物理量进行测量时,由于测量仪器、实验环境、方法、技术等因素的局限,测量结果与客观存在的物理量之间总存在着一定的差异,称之为测量误差.

为什么测量结果是有误差的?这可以从以下几个方面看:第一,测量是用各种仪器与设备来进行的,而仪器设备的准确度与科学技术和生产的发展水平有关.例如,我们还不能以 0.0001°C 以上的准确度来测量物体的温度;在长度测量中,基本单位“米”的复现精度的理论极限为 $1 \times 10^{-9} \sim 3 \times 10^{-9}$.因此,测量结果总是有误差.第二,在实用中,允许测量结果有一定的误差.如我们日常生活中用的钟、表,有快有慢,即使每天差十分之几秒,我们还是认为它是可靠的,对日常生活没有影响.然而,在航天实验中,用这种钟来控制 and 发射导弹,显然精度是远远不够的.如果把它装在卫星中,研究相对论效应,那么至少要达到 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ 的精度.当然,要求测量误差小或高的测量精度,是要付出代价的,所以在实际工作中如何对测量工作提出合理的要求是很重要的.可以这样说,不给出测量结果的误差,那么这样的实验结果是没有意义的.

一、误差的表示

设实验中用仪器测量出的某物理量的测量值为 N_i , 该物理量的客观存在值称为真值, 用 N 表示. N_i 与 N 之差, 就称为测量误差. 表示为

$$\Delta N = N - N_i.$$

真值是在特定条件下被测量的客观实际值. 当被测量和测量过程完全确定, 且所有测量的不完善性完全排除时, 测量值就等于真值. 这就是说, 真值是一个理想的概念, 通过完善的测量才能获得, 但是严格的完善测量难以做到, 故真值就不能确定. 实践中采用约定真值, 即对明确的量赋予的值, 有时叫最佳估计值、约定值或参考值. 例如, 在仪器校验中, 把高一级的标准器具的测量值作为低一级标准器具或普通仪器的约定真值.

测量的最终目的是获得物理量的客观真值. 然而, 实际的测量都必须使用一定的仪器, 通过一定的方法, 在一定的环境下由某一观测者去完成. 由于在这几方面必然存在某种不理想情况, 客观环境必然会对测量产生某种影响, 故使测量结果偏离真值形成误差.

从上面的定义可看出, 误差有正负大小之分, 因为它是指测量值与真值的差值, 常称为绝对误差, 在没有特别指明时, 误差就用绝对误差来表示. 但应注意, 绝对误差不是误差的绝对值.

为了估计误差, 定义测量值与近真值的差值为偏差 (又叫残差). 实验中真值得不到, 因此误差也无法知道, 而测量的偏差可以准确知道, 实验误差分析中要经常计算这种偏差, 用偏差来描述测量结果的精确程度.

绝对误差与近真值 N_0 之比的百分数叫相对误差, 表示为

$$E = \frac{\Delta N}{N_0} \times 100\%.$$

二、误差的种类

根据误差产生的原因, 可把测量误差分为三类.

1. 系统误差

在一定条件下对同一量进行多次测量时, 测量结果总是向一个方向偏离, 要么总大一点, 要么总小一点, 即测量误差值和符号恒定不变, 或按一定的规律变化, 这类误差称为系统误差. 系统误差是带有系统性和方向性的误差, 如用落球法测量重力加速度, 由于空气阻力的影响, 多次测量的结果总是偏小, 是测量方法不完善造成的. 系统误差的产生主要有以下方面:

(1) 仪器误差. 由于仪器本身的缺陷或构造的不完善, 或由于仪器未经很好校正, 或没有按规定条件使用而造成的误差;

(2) 理论误差. 由于测量所依据的理论、公式本身的近似性, 或实验条件不能达到理论公式所要求的条件, 或测量方法所带来的误差;

(3) 观测误差. 由于观测者个人生理或心理习惯因素等所造成的误差.

系统误差主要用来描述测量值与真值之间的偏移程度, 因此系统误差反映了测量的准

确度. 系统误差的出现一般是有规律的, 它是定值的, 多次测量中每次都会使结果固定偏向某一边. 因此, 系统误差不能通过多次测量来消除, 必须找出产生的原因, 针对性地采取措施才能消除它的影响, 或者对测量结果进行修正.

发现、估计和消除系统误差, 需要改变实验条件和测量方法. 系统误差对于一切实验测量都是非常重要的, 系统误差的减小或消除是比较复杂的.

2. 随机误差

在同一条件下多次重复测量同一物理量, 其误差的大小和正负都不确定, 而在大量的重复测量中又遵守一定统计规律的误差称为随机误差. 在有些书籍中也将随机误差称为偶然误差或几率误差.

随机误差的产生取决于测量过程中一系列随机因素的影响, 由周围环境的干扰以及随着测量而来的其他不可预测的随机因素而造成. 由于影响测量的因素很多, 它们又各自以不同的方式变动, 这就使得每一个测量值的误差大小与正负都带有随机性, 但是在大量的重复测量时, 这些误差又遵守一定的统计规律. 它的特点是在相同的条件下, 对同一量作多次测量, 其值有时偏大, 有时偏小, 每次的偏大或偏小是偶然的, 但大量次数的测量表明, 随机误差服从一定的统计规律(正态分布), 表现在三个方面:

- (1) 对称性. 大小相等, 符号相反的正负误差出现的次数相接近;
- (2) 单峰性. 小的误差出现比大的误差出现次数多;
- (3) 有界性. 超过一定范围的很大误差极少出现或不出现.

随机误差主要用来描述测量值与测量值的期待值之间的离散程度, 因此随机误差反映了测量的精密度. 增加测量次数, 可以减小随机误差, 但不能完全消除.

3. 过失误差

过失误差又称粗差, 它是由不正确使用仪器, 实验方法不合理, 用错仪器、观察错误或记错数据等不正常情况下引起的误差. 过失误差的出现明显地歪曲了测量结果, 在数据处理中怎样发现并剔除过失误差, 对获得正确的测量结果是很重要的.

在剔除过失误差并算出系统误差与随机误差之后, 这两种误差的综合误差用精确度描述.

在物理实验中, 数据处理极为重要. 我们不仅要对实验中所获得的数据进行分析, 还要设计模型及对预期的结果或新的规律做出判断. 困难之处在于实验中的测量数据本身是有误差的, 对数据进行分析 and 做出结论时都要考虑这一点. 因此, 有不少专著专门讨论实验数据的处理方法, 在这里我们只讨论实验数据中的随机误差或 A 类误差; 而对系统误差或 B 类误差则不作讨论. 一般来说, 应该尽可能减小 B 类误差, 即采取一些措施, 例如用等时测量法、对称测量法、……来减小 B 类误差. 然后, 再对实验中的 B 类误差做出估计. 由于如何处理及估计它的大小, 在很大程度上与实验工作者的经验与素质有关, 在这里不作进一步的讨论.

对于测量误差, 采取适当的方法可以减小. 例如射击中, 弹着点十分密集, 但总是偏在靶心的某一方, 这不是偶然因素, 需要找出是标尺不准、准星有偏、风速影响等原因, 加以修正.

过失误差是由于实验者使用仪器的方法不当或实验方案不合理、粗心大意造成的. 这种误差是人为的, 应由实验者自行改正.

在大学物理基础实验中, 我们着重讨论偶然误差问题, 即认为系统误差已经消除或基本

消除了。

三、随机误差的估算

随机误差,服从正态分布(或高斯分布)规律。常用高斯分布的两个参数($\bar{x}$ 算术平均值和 σ 标准偏差)来描述。

(1) 多次测量的算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

其中, $\bar{x}$ 是待测量真值 x_0 的最佳估计值。我们称之为近真值,用来表示多次测量的近真实值。

(2) 标准偏差

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

上式是贝塞尔公式,其意义表示某次测量值的随机误差在 $-\sigma_x \sim +\sigma_x$ 之间的概率为68.3%。

第二节 测量结果的评定和不确定度

测量的目的不但要得到待测量的近真值,而且要对近真值的可靠性做出评定,即指出误差范围。

由于测量误差不可避免,使得真值无法确定,也就无法确定误差的大小。因此,实验数据处理只能求出实验的最佳估计值及其不确定度。

一、不确定度的含义

不确定度是由于误差的存在使得被测量值不能确定的程度,即为“误差可能数值的测度”,也就是因测量误差存在而对被测量不能肯定的程度,因而是测量质量的表征。

具体说来,不确定度是指测量值(近真值)附近的一个范围,测量值与真值之差(误差)可能落于其中。不确定度小,测量结果可信赖程度高;不确定度大,测量结果可信赖程度低。在实验和测量工作中,不确定度一词近似于不确定、不明确、不可靠、有质疑,是作为估计而言的,误差是未知的。因此,不可能用指出误差的方法去说明可信赖程度,而只能用误差的某种可能值去说明可信赖程度,所以不确定度更能表示测量结果的性质和测量的质量。

不确定度与误差有区别:误差是一个理想的概念,一般不能准确知道;不确定度反映误差存在分布范围,即随机误差分量和未定系统误差分量综合的分布范围,可由误差理论求得。

二、测量结果的表示和合成不确定度

科学实验中要求表示出的测量结果,既要包含待测量的近真值,又要包含测量结果的不确定度 σ ,并写成物理含意深刻的标准表达形式:

$$x = \bar{x} \pm \sigma.$$

式中, x 为待测量; $\bar{x}$ 是测量的近真值,也即算术平均值; σ 是合成不确定度,一般保留一位有效数字.如某次长度测量的计算结果表示为

$$L = 55.24\text{cm} \pm 0.03\text{cm}.$$

其中,55.24cm表示近真值,0.03cm表示合成不确定度.

近真值的确定分为如下三种情况:

(1) 直接测量时,若不需要对被测量进行系统误差的修正,一般就取多次测量的算术平均值作为近真值;

(2) 实验中,有时只需测一次或只能测一次,该次测量值就为被测量的近真值;

(3) 系统存在误差时,若要求对被测量进行已定系统误差的修正,通常是将已定系统误差(即绝对值和符号都确定的可估计出的误差分量)从算术平均值或一次测量值中减去,从而求得被修正后的直接测量结果的近真值.例如,用螺旋测微计测量长度时,从被测量结果中减去螺旋测微计的零差;在间接测量中, $\bar{x}$ 即为被测量的计算值.

测量结果的标准表达式,给出了一个范围 $\bar{x}-\sigma \sim \bar{x}+\sigma$,表示待测量的真值在 $\bar{x}-\sigma \sim \bar{x}+\sigma$ 之间的概率为68.3%.应注意的是,不要误认为真值一定在 $\bar{x}-\sigma \sim \bar{x}+\sigma$ 之间,认为误差在 $-\sigma \sim +\sigma$ 之间是错误的.标准式中,近真值、不确定度、单位三要素缺一不可,否则就不能全面表达测量结果.同时,近真值 $\bar{x}$ 的末尾数应与不确定度的所在位数对齐,近真值 $\bar{x}$ 与不确定度 σ 的数量级、单位要相同.

三、合成不确定度的两类分量

实验不确定度,一般来源于测量方法、测量人员、环境波动、测量对象变化等.计算不确定度是将可修正的系统误差修正后,将各种来源的误差按计算方法分为两类,即用统计方法计算的不确定度(A类)和非统计方法计算的不确定度(B类).

合成不确定度 σ ,是由不确定度的两类分量A类和B类求“方和根”计算而得.为使问题简化,本书只讨论简单情况下(即A类、B类分量各自独立变化,互不相关)的合成不确定度.A类不确定度(统计不确定度)用 S_i 表示,B类不确定度(非统计不确定度)用 σ_B 表示,合成不确定度为

$$\sigma = \sqrt{S_i^2 + \sigma_B^2}.$$

1. A类不确定度

A类不确定度,是指可以采用统计方法(即具有随机误差性质)计算的不确定度,如测量读数具有分散性、测量时温度波动影响等.这类不确定度被认为是服从正态分布规律,因此可以象计算标准偏差那样用贝塞尔公式计算.

A类不确定度 S_i 定义为

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

式中, $i=1, 2, 3, \dots, n$, 表示测量次数.

计算 A 类不确定度, 也可以用最大偏差法、极差法、最小二乘法等, 本书只采用贝塞尔公式法, 并且着重讨论读数分散对应的不确定度. 用贝塞尔公式计算 A 类不确定度, 可以用函数计算器直接读取, 十分方便.

2. B 类不确定度

B 类不确定度, 是指用非统计方法求出或评定的不确定度. 如测量仪器不准确、标准不准确、量具量质老化等. 评定 B 类不确定度常用估计方法, 要估计适当, 需要确定分布规律, 同时要参照标准, 更需要估计者的实践经验、学识水平等, 因此往往是意见纷坛, 争论颇多. 本书对 B 类不确定度的估计同样只作简化处理, 只讨论因仪器不准对应的不确定度.

仪器不准的程度主要用仪器误差来表示, 因仪器不准对应的 B 类不确定度

$$\sigma_B = \Delta_{\text{仪}}.$$

式中, $\Delta_{\text{仪}}$ 为仪器误差, 或仪器的基本误差, 或允许误差, 或示值误差. 一般的仪器说明书中都以某种方式注明仪器误差, 由制造厂或计量检定部门给定. 物理实验教学中, 仪器误差由实验室提供, 例如, 米尺的仪器误差为其最小分度值(精度)的 $1/2$, 游标长尺的仪器误差是其精度值.

为什么 σ_B 取成 $\Delta_{\text{仪}}$ 呢? 在有限次直接测量结果的不确定度评定中, 由于其理论还处于发展阶段, 不够成熟, 计算较难, 因 $\Delta_{\text{仪}}$ 不是以随机分量为主要, 非随机分量占的比重较大, 故将 $\Delta_{\text{仪}}$ 简化、纯化为非随机分量的 B 类不确定度 σ_B 是符合情理的. 用 σ_B 取代 $\Delta_{\text{仪}}$ 简单方便, 具有一定的合理性.

四、直接测量的不确定度

对于 A 类不确定度, 主要讨论多次等精度测量条件下读数分散对应的不确定度, 并且用贝塞尔公式计算. 对于 B 类不确定度, 主要讨论仪器不准对应的不确定度, 并直接采用仪器误差. 然后, 将 A, B 两类不确定度求“方和根”即得合成不确定度. 最后, 将测量结果写成标准形式.

实验结果的获得应包括待测量近真值的确定和 A, B 两类不确定度以及合成不确定度的计算. 下面通过例子来加以说明.

例 1 用毫米刻度的米尺, 测量物体长度 10 次, 其测量值 L/cm 分别为: 53.27, 53.25, 53.23, 53.29, 53.24, 53.28, 53.26, 53.20, 53.24, 53.21. 试计算合成不确定度, 并写出测量结果.

解: (1) L 的近真值(即平均值)

$$\begin{aligned}\bar{L} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{10} L_i \\ &= \frac{1}{10} (53.27 \text{ cm} + 53.25 \text{ cm} + 53.23 \text{ cm} + \dots + 53.21 \text{ cm}) = 53.24 \text{ cm}.\end{aligned}$$

(2) A类不确定度

$$S_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}{n-1}}$$
$$= \sqrt{\frac{(53.27 \text{ cm} - 53.24 \text{ cm})^2 + \cdots + (53.21 \text{ cm} - 53.24 \text{ cm})^2}{10-1}}$$
$$= 0.03 \text{ cm}.$$

(3) B类不确定度

米尺的仪器误差 $\Delta_{\text{仪}} = 0.05 \text{ cm}$, 故

$$\sigma_B = \Delta_{\text{仪}} = 0.05 \text{ cm}.$$

(4) 合成不确定度

$$\sigma = \sqrt{S_L^2 + \sigma_B^2} = \sqrt{(0.03 \text{ cm})^2 + (0.05 \text{ cm})^2} = 0.04 \text{ cm}.$$

(5) 测量结果的标准式为

$$L = (53.24 \pm 0.04) \text{ cm}.$$

在计算合成不确定度求“方和根”时,若某一平方值小于另一平方值的 $1/9$,则该项就可以略去不计,这叫微小误差准则,利用微小误差准则可减少不必要的计算. 不确定度计算结果,一般保留一位数,多余的位数按有效数字的修约原则取舍.

评价测量结果,有时需要引入相对不确定度,相对不确定度定义为

$$E_r = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\%,$$

结果取 2 位数. 此外,有时需将测量结果的近真值 $\bar{x}$ 与公认值 $x_{\text{公}}$ 进行比较,得到测量结果的百分偏差. 百分偏差的定义为

$$B = \frac{|\bar{x} - x_{\text{公}}|}{x_{\text{公}}} \times 100\%,$$

其结果取 2 位数字.

第三节 随机误差的统计分布

物理量的实验测量值是随机变量,对于某一次测量,随机变量取该次测量的测得值. 只能取有限个或可数个数值的随机变量称作离散型随机变量,而可能值布满某个区间的随机变量称作连续型随机变量.

只用一个单独的数值显然不能代表一个随机变量,即使列举随机变量的全部可能性仍然不能算是完全地描述了一个随机变量. 要完整地掌握一个随机变量,必须了解它取各种可能值的概率,即必须了解随机变量的概率分布. 以下是随机变量的几种常用统计分布.

1. 二项式分布

在对某一随机事件进行独立观测时,若事件出现的概率是 p ,不出现的概率是 $1-p$,则进行 N 次观测时,该事件出现 n 次的概率函数 $p(n)$ 用二项式分布表示为

$$p(n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} p^n (1-p)^{N-n};$$

它的期待值(或称平均值)为

$$\bar{n} = Np;$$

标准偏差为

$$\sigma = \sqrt{Np(1-p)}.$$

2. 泊松分布

在二项式分布中,当 N 很大而 p 又很小时,作为二项式分布的渐近表达式就是泊松分布:

$$p(n) = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda}.$$

其中, n 为某事件出现的次数,它的期待值为 λ ,标准偏差为 $\lambda^{1/2}$.

实际上泊松分布是在 $N \rightarrow \infty$ 时二项式分布的极限.在实际应用中,当 $N \geq 10$, $p \leq 0.1$ 时,就可以用泊松分布来描述.泊松分布是一个不对称分布,它和二项式分布一样均为离散型随机变量的概率分布.

在物理实验中不少测量结果服从泊松分布,如一块放射性物质在一定时间间隔内的放射性衰变数就服从泊松分布.泊松分布的应用还相当广泛,如在一定生产条件下每批产品的废品数,同一批稻谷每千克中的稗子数,正常情况下某一地区的死亡人数和婴儿出生数等,都近似服从泊松分布.

3. 高斯分布

高斯分布又称正态分布,是最常见的一种连续型分布.高斯分布可以用不同的方法导出,也可以把它看作是泊松分布在 λ 有较大数值时的一种极限情况.高斯分布的概率函数是

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}.$$

式中, μ 是期待值, σ 是标准偏差. $\mu=0$ 和 $\sigma=1$ 的高斯分布叫做标准高斯分布.

高斯分布是应用最广的一种分布,它在误差理论中占有重要地位,很多随机变量都近似服从高斯分布.

4. 指数分布

指数分布是实验物理中常见的一种分布形式.如果事件数 n 服从泊松分布,则两个事件之间的时间间隔 t 就服从指数分布.指数分布的概率函数为

$$P(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}.$$

指数分布随机变量 t 的期待值和标准偏差都是 $1/\lambda$.

指数分布与时间零点的选取无关,所以可选取任意时刻作为零时刻,而事件时间 t 的分布都是同一个指数分布.

5. 均匀分布

在区间 (a, b) 上均匀分布的连续随机变量 x ,其概率函数为

$$P(x) = \frac{1}{b-a}, \quad a < x < b;$$

$$P(x) = 0, \quad x \leq a, x \geq b.$$

均匀分布是一种最简单的连续型分布.在计算机上产生在 $(0, 1)$ 区间均匀分布的随机数所需