

高等院校规划教材

大学物理实验教程



孙秀平 主编

33
1

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

高等院校规划教材

大学物理实验教程

主 编 孙秀平

副主编 王 野 陈新邑 李海军

主 审 桑兰芬

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验教程/孙秀平主编. —北京:北京理工大学出版社, 2010. 1
ISBN 978-7-5640-2919-7

I. 大… II. 孙… 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 (2009) 第 208378 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 960 毫米 1/16

印 张 / 15.5

字 数 / 316 千字

版 次 / 2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 4000 册

定 价 / 25.00 元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 边心超

前 言

大学物理实验是学生进入大学后第一门科学实验的课程，该课程在培养学生基本实验技能、实践能力和创新能力方面，是其他课程所无法取代的。

本书是根据高等理工科学校物理实验教学大纲，并参照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会，物理基础课程教学指导分委会制定的 2008 年版《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合长春理工大学大学物理实验教学中心开设的大学物理实验课程，并在使用多年的物理实验教材基础上加以整理、充实编写而成。

本书内容包括大学物理实验概论、基础性实验、综合性实验、设计性实验四个部分，总学时约 100 学时。其中，基础性实验 16 个，通过这些实验，使学生掌握物理实验的基本方法、基本仪器的使用和实验数据的处理方法；综合性实验 13 个，着重培养学生对理论知识的运用能力、分析和解决实际问题的能力；设计性实验 7 个，学生可以根据自己的兴趣和爱好选择相应的题目进行研究，独立地完成实验设计、实验操作并撰写课程论文。这种研究性的学习可以充分发挥学生的主动性和创造性。在有些实验后面附有人物简介和包含扩展实验的附录等，以便学生了解有些实验的发现过程、了解科学家的研究思路及贡献，对激发学生的学习积极性和开阔思路具有一定的启发作用。

物理实验教学是一项集体的工作，本书的编写是长春理工大学大学物理实验教学中心全体实验教师及技术人员辛勤劳动的结晶。参加本书编写的有孙秀平、王野、陈新邑、李海军、冯秀琴、王素文、刘春宇、张志颖、杨树笙、关希彬。桑兰芬教授审阅了全部内容，并提出了宝贵的意见，在此表示衷心感谢。同时，一些兄弟院校的教材为本书的编写提供了很好的借鉴，借此机会一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，谨请读者批评指正。

编 者

目 录

第1部分 大学物理实验概论

第1章 绪论	3
§1 大学物理实验的作用和任务	3
§2 大学物理实验课的基本程序	4
第2章 误差与不确定度	7
§1 测量与误差	7
§2 不确定度, 测量结果的表示方法	11
第3章 有效数字及数据处理方法	14
§1 有效数字	14
§2 数据处理方法	17
复习题	22
第4章 物理实验的基本知识	25
§1 力学常用仪器介绍	25
§2 电学实验基本知识	31
§3 光学实验基本知识	37
§4 设计性实验基本知识	42

第2部分 基础性实验

实验1 物体密度的测量	49
实验2 扭摆	53
实验3 杨氏模量的测量	57
实验4 液体表面张力系数的测定	63
实验5 直流单臂电桥	66
实验6 示波器的调整与使用	70
实验7 螺线管磁场的测量	79
实验8 分光计的调整与使用	85

实验 9	利用双棱镜测定光波波长	90
实验 10	光栅的衍射	94
实验 11	光的偏振	98
实验 12	用牛顿环测球面的曲率半径与用劈尖测量微小厚度	102
实验 13	用阿贝折射仪测固体、液体的折射率	110
实验 14	线性及非线性元件伏安特性的测量	115
实验 15	稳态法测量不良导体的导热系数	118
实验 16	用模拟法测绘静电场	121

第 3 部分 综合性实验

实验 17	单摆的非线性振动	129
实验 18	音叉声场的研究和振动频率的测量	132
实验 19	RCL 电路暂态过程	134
实验 20	电光调制实验	142
实验 21	光导纤维	148
实验 22	迈克尔逊干涉仪的调整及使用	154
实验 23	密立根油滴实验	161
实验 24	全息照相	168
实验 25	白光全息摄影	175
实验 26	夫兰克—赫兹实验	178
实验 27	光电效应及普朗克常数测定	183
实验 28	光强分布	188
实验 29	硅光电池的线性响应	191

第 4 部分 设计性实验

实验 30	热敏电阻的特性测试和温度的实时测量与控制	197
实验 31	声波与超声波	201
实验 32	液体密度的实时测量	207
实验 33	万用表的组装与使用	210
实验 34	电位差计的应用	216
实验 35	电表的改装与校准	222
实验 36	光学平台上的实验	226
附录	物理常数表	229

第 1 部分

大学物理实验概论

1892

1893

绪 论

§1 大学物理实验的作用和任务

一、大学物理实验课程的地位和作用

物理学是实验科学，物理学新概念的确立和新规律的发现要依赖于反复实践。物理学上新的突破常常是通过新的实验技术的发展，从而促进科学技术的革命，形成新的生产力。物理实验的方法、思想、仪器和技术已经被普遍地应用在各种科学领域和技术部门。

大学物理实验是理工科大学生进入大学后首先接触到的实践课，因此物理实验的教学在培养大学生科学素质方面具有一种“先入为主”的重要效果。对一个高等理工科院校的学生来讲，不论专业如何，大学物理实验都是一门重要的基础课程。学生了解和掌握这些进行实验研究的方法和技巧，不仅对物理学理论的学习是重要的，而且对后续课程的学习，尤其是对将来所从事的实际工作所需要具备的独立工作能力和创新能力等素质来讲，也是十分必要的，这是大学物理理论课不能做到，也不能取代的。因此，大学物理实验应该是理工科大学生的一门独立的、重要的必修基础课程。

大学物理实验课是理论与实践相结合、动脑与动手相结合、发现问题与解决问题相结合的课程。我们期望学生以研究者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，锻炼技巧和动手能力，为以后独立设计实验方案 and 解决新的实验课题创造条件。大学物理实验课是学生在教师指导下独立进行的教学环节，在大学物理实验课上，需要独立思考的习惯，需要一丝不苟的态度，需要持之以恒的精神，需要勇于创新的勇气。在实验过程中学生不仅可以通过实验去感受每一个物理定律建立过程中所体现的科学研究方法和科学思维方式，而且还能通过物理实验去领悟其中所蕴涵着的巧妙设计构思，因此大学物理实验已成为培养学生科学素质的载体。

二、大学物理实验课的任务

大学物理实验课与大学物理理论课一起构成了高等理工科学生必修的基础物理学知识统一的整体。理论课主要注重对物理概念、物理规律的讨论和学习，训练学生的理论思维方法；

实验课则主要以实际动手实验为教学手段, 对学生进行全面而系统的实验方法和实验技能训练。它们具有同等重要的地位, 具有深刻的内在联系。大学物理实验课的主要任务在于:

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量, 使学生在运用所学的理论知识、实验方法和实验技能解决具体问题方面得到必要的基本训练。

(2) 注重培养学生的基本技能, 其中包括:

自学能力: 能够自行阅读教材和有关资料, 做好实验前的预习。

动手能力: 能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器, 按线路图正确连接线路, 实验完毕按顺序整理好仪器。

分析解决问题的能力: 能够运用所学的理论对实验中出现的现象进行初步的分析判断, 对于正确的加以肯定并继续进行, 对于错误的找出原因并考虑解决问题的方法。

表达能力: 能够正确记录和处理实验数据、绘制曲线、说明实验结果以及写出合格的实验报告。

设计能力: 能够独立完成与本课程相关的设计性实验。

§2 大学物理实验课的基本程序

实验与听课不同, 它的特点是同学们在教师的指导下自己动手, 独立地完成实验任务。

一、实验的准备: 预习

实验前必须认真阅读教材, 做好必要的预习, 才能按质、按量、按时完成实验。同时, 预习也是培养阅读能力的学习环节。阅读时要以实验目的为中心, 搞清楚实验原理(包括测量公式)、操作要点、数据处理及其分析方法等; 要反复思考实验原理、仪器装置及操作、数据处理等方面如何达到实验目的。做物理实验应始终在明确的理论指导下进行。预习时要尽量精心构思, 写好预习报告。

写预习报告时要用统一规格的实验报告纸, 其主要内容如下:

① 实验名称; ② 实验目的; ③ 实验仪器; ④ 实验原理: (要做到图文并茂); ⑤ 实验关键步骤及注意事项; ⑥ 画好数据记录表格(可以来到实验室后画)。

二、实验的进行

(1) 实验室不同于一般课堂, 进入实验室, 要遵守实验室规则, 并保持安静, 可以观察但不要手动仪器。

(2) 在了解仪器的工作原理、使用方法、注意事项的基础上且经教师允许, 方可动手进行仪器安装调试(电学实验未经教师检查线路切忌不要接通电源)。

(3) 选择测试条件, 观察实验现象与实验现象记录, 读数与数据记录, 计算与分析实验

结果,以及不确定度估算。实验过程中对观察到的现象和测得数据要及时进行判断,判断它们是否正常与合理。实验过程中可能会出现故障,在教师的指导下,分析故障原因,学会排除故障的本领。

(4) 实验完毕经指导教师检查及签字后将使用的仪器整理好,归还原处。

三、写实验报告

这是完成一个实验题目的最后程序,也是对实验进行全面总结分析的一个过程,必须予以充分重视。不能把取得的实验数据作为实验的唯一目的和终结,实验后要结合教材重新回顾、认真分析,尽可能将感性知识理性化,并在预习实验报告的基础上完成下列几项工作:

(1) 数据整理应做到整洁、清晰而有条理,便于计算与复核,达到省工省时的目的。在标题栏内要注明单位。数据不得任意涂改。确定测错而无用的数据,可在旁边注明“作废”字样,不要任意删去。

(2) 根据实验要求完成实验数据的处理(在计算间接测量量和物理量的不确定度时,必须写出计算公式、代数过程、数据处理过程,最后得结果并注明单位)。

(3) 对某一物理量的最后测量结果需写成下列表达式形式

$$x = \bar{x} \pm u_{c(\bar{x})}$$
$$E = \frac{u_{c(\bar{x})}}{\bar{x}} \times 100\%$$

(4) 完成误差分析和不确定度的评定。

(5) 回答问题和思考题。

(6) 写出实验心得或建议等。

实验报告是实验工作的总结,是经过对实验操作和观察测量、数据分析以后的永久性的科学记录。编写实验报告有助于锻炼逻辑思维能力,把自己在实验中的思维活动变成有形的文字记录,表达自己对本次实验结果的评价和收获。实验报告可供他人借鉴,促进学术交流。因此,实验报告要求做到书写清晰、字迹端正、数据记录整洁、图表合适、文理通顺、内容简明扼要。

四、实验规则

为了保证实验正常进行,以及培养严肃认真的工作作风和良好的实验工作习惯,同学们应遵守以下实验规则。

(1) 学生应在课程表规定时间内进行实验,不得无故缺席或迟到。实验时间若要更动,须经实验室同意。

(2) 学生在每次实验前对安排要做的实验应进行预习,并在预习的基础上,写出预习

报告。

(3) 进入实验室后, 应将预习报告放在桌上由教师检查, 并回答教师的提问, 经过教师检查认为合格后, 才可以进行实验。

(4) 实验时应携带必要的物品, 如文具、计算器和草稿纸等。对于需要作图的实验应事先准备毫米方格纸(即坐标纸)和铅笔。

(5) 进入实验室后, 根据实验卡片或仪器清单核对自己使用的仪器是否缺少或损坏。若发现有问題, 应向教师提出。未列入清单的仪器, 另向老师借用, 实验完毕后归还。

(6) 实验前应细心观察仪器构造, 操作应谨慎细心, 严格遵守各种仪器仪表的操作规则及注意事项。尤其是电学实验, 线路接好后先经教师或实验室工作人员检查, 经许可后才可接通电路, 以免发生意外。

(7) 实验完毕前应将实验数据交给教师检查, 实验合格者教师予以签字通过。余下时间在实验室内进行实验计算与做作业题, 待下课后方可离开。实验不合格或请假缺课的学生, 由指导教师登记, 通知在规定时间内补做。

(8) 实验时应注意保持实验室整洁、安静。实验完毕应将仪器、桌椅恢复原状, 放置整齐。

(9) 如有仪器损坏应及时报告教师或实验室工作人员, 并填写损坏单, 注明损坏原因。赔偿办法根据学校规定处理。

误差与不确定度

§ 1 测量与误差

一、测量

1. 测量的定义

所谓测量就是将待测的物理量与相应的计量单位进行比较，其倍数即为测量值，连同计量单位构成测量结果。例如：用米尺测得单摆的摆长，经比较得到摆长是 1 米的 0.865 倍，0.865 是测得值，米是单位，合起来构成测量结果，即摆长为 0.865 米。

2. 测量的分类

测量可分为直接测量和间接测量。

直接测量是指被测量与计量单位直接比较，就可获得结果。如用米尺测物体的长度，用停表测时间，用电流表测电流等均属于直接测量。通过直接测量就可得到结果的量叫直接测量量，如长度、质量、时间等。

间接测量是指由一个或几个直接测得量经已知函数关系计算出被测量量值的测量。例如，测量物体的质量和体积由已知公式 $\rho = m/V$ 算出物体密度的过程就是间接测量。通过间接测量测得的量叫间接测量量。

有时根据测量条件变化与否可把测量分成等精度测量和不等精度测量。

等精度测量是指在测量条件相同的情况下进行的一系列测量，即同一个人在同样的环境条件下在同一仪器上采用同样的测量方法对同一量进行的多次测量。

不等精度测量是指同一量进行多次测量时改变测量条件，如更换仪器型号、改变测量方法、更换测量人员等，在测量条件变更前后，测量结果的可靠程度不等，这样的测量叫不等精度测量。

二、真值与误差

(1) 真值：每一个物理量都是客观地存在着，在一定条件下有其不依人的意志而变化的固定大小，这个客观存在的固定大小的值叫真值。

(2) 误差: 由于测量总是依据一定的理论或方法, 使用一定的仪器, 由一定的人进行, 由于理论的近似性, 仪器的灵敏度及环境因素的影响, 使得测量值与真值间总存在着差异, 定义测量值和真值的差为误差

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

误差 ε 是一个代数值, 当 $x \geq a$ 时, $\varepsilon \geq 0$; 当 $x < a$ 时, $\varepsilon < 0$, 由于真值是不确知的, 所以测量值的误差也是不确知的。在此情况下, 测量的任务是: ① 给出被测量的最佳估计值; ② 给出真值最佳估计值的可靠程度的估计。

三、误差的分类

为了减少或消除某些误差, 就要充分地认识各种误差可能的一些来源以及表现出来的性质, 因此有必要对误差进行分类, 通常把误差分成为系统误差、偶然误差和粗大误差。

1. 系统误差

系统误差的主要特征是具有确定性。在一定条件下进行多次测量时, 误差的大小或正负保持不变或按一定规律变化。

系统误差的来源可概括为以下四个方面。

(1) 仪器误差: 由于测量仪器或工具本身的缺陷产生的误差, 如天平不等臂带来的误差。

(2) 方法误差: 由于理论、方法的近似而导致的误差, 如单摆的周期公式为 $T = 2\pi\sqrt{L/g}$, 要求摆角足够小, 忽略了摆角的影响而产生的误差。自由落体下落距离公式为 $h = \frac{1}{2}gt^2$, 忽略了空气阻力产生的误差。

(3) 环境误差: 周围环境的变化如温度、压强、湿度、电磁场等因素的变化而产生的误差。

(4) 个人误差: 观测人员的心理或生理特点所造成的误差, 如计时的超前或落后, 读表的偏左或偏右等。

大量的一般测量的实践表明, 系统误差分量对测量结果的影响常常显著地大于随机误差分量的影响。因此大学物理实验要重视对系统误差的分析, 尽量减小它对测量结果的影响。

一般发现系统误差的方法主要有以下三种:

(1) 仪器分析: 主要分析仪器的示值误差、零值误差、调整误差、回程误差等, 其中回程误差是指在相同条件下, 仪器正反行程在同一点上测量值之差的绝对值。

(2) 理论分析: 从实验装置、实验条件与理论设定条件是否一致去发现系统误差, 如用伏安法测电阻时, 不论是内接法还是外接法均与理论约定不相符, 但可以通过理论分析进行修正。

(3) 对比实验: 改变实验的部分条件甚至全部重新去测被测量, 分析改变前后的测量值是否有显著不同, 从中去分析有无系统误差。

系统误差处理方法:

(1) 对换法: 将测量中的某些因素相互交换, 造成某项系统误差的正负号发生变化。例如用电桥测电阻时, 交换待测电阻与标准电阻的位置可以消除接触电阻造成的误差。

(2) 补偿法: 如在热学实验中, 在升温 and 降温条件下对温度测量各进行一次, 两次测量的平均值可以抵消由于测量值比实际温度滞后带来的系统误差。

(3) 替代法: 在一定条件下, 用一已知量替代被测量以消除系统误差。

(4) 异号法: 使系统误差在测量中出现两次, 两次的符号恰好相反, 取两次测量的平均值作为测量结果即可将系统误差消除。

2. 粗大误差 (又称过失误差)

粗大误差指明显超出规定条件下预期的误差。粗大误差是在测量过程中某些突然发生的不正常因素, 如较强的外界干扰、测量条件的意外变化、测量者的疏忽大意等造成, 它是统计的异常值, 属于失控或人为的错误, 应尽量避免, 如果在测量结果中出现粗大误差则应按一定规则剔除。

3. 偶然误差 (又称随机误差)

偶然误差是由偶然的、不确定的因素造成的每一次测量值的无规则涨落, 在相同条件下, 多次测量同一物理量, 其测量误差的绝对值和符号以不可预知的方式变化, 其特征是它的随机性、偶然性。偶然误差的出现, 就某一测量值来说是没有规律的, 其大小和方向都是不能预知的。

偶然误差的分布规律: 由于偶然误差产生的原因很多, 又无法估计, 因此无法消除, 但并非没有规律可循。当对物理量进行多次测量时, 偶然误差呈现一定的规律性, 即偶然误差服从正态分布规律 (即统计规律), 具有如下特点:

(1) 单峰性: 测量值与真值相差越小, 其可能性越大; 与真值相差很大, 其可能性较小。

(2) 对称性: 测量值与真值相比, 大于或小于某量的可能性是相等的。

(3) 有界性: 在一定的测量条件下, 误差的绝对值不会超过一定的限度。

(4) 抵偿性: 随机误差的算术平均值随测量次数的增加越来越小。

根据上述特性, 通过多次测量求平均值的方法, 可以使随机误差相互抵消。算术平均值与真值较为接近, 一般作为测量的结果。

4. 偶然误差的评价

当测量进行了 n 次, 每次的测量值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 为 n 次测量结果的算术平均值。假如各次测量只存在偶然误差, 偶然误差有正有负, 相加时抵消一些, 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量真值的最佳估计值, 每一次测量的误差是多少用标准偏差来描述

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.1)$$

此式即为贝塞尔公式，对于测量结果的平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差则为

$$\sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2.2)$$

在同一条件下对某一物理量进行多次独立测量时，测量值的分布可用正态分布函数来描述，其函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (2.3)$$

式中 x 为某次测量值， $\bar{x}$ 为算术平均值，其表达式为

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx \quad (2.4)$$

σ 为标准偏差，其表达式为

$$\sigma = \left[\int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 f(x)dx \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

和函数相对应的曲线如图 1-1 所示。

分布函数 $f(x)$ 的意义是测量值落在 x 附近单位间隔内的几率， $f(x)$ 函数曲线下的全部面积是总概率，即

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad (2.6)$$

标准偏差 σ 的意义有以下三个方面：

(1) 标志测量值的离散程度。从图 1-2 上可以看到， σ 越小，分布函数 $f(x)$ 曲线越陡，表征测量值越集中，离散度越小；反之 σ 越大，分布函数曲线越平坦，测量值越分散，离散度越大。

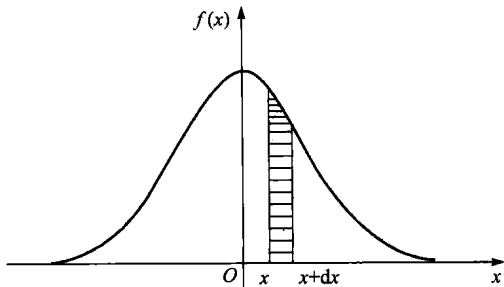


图 1-1

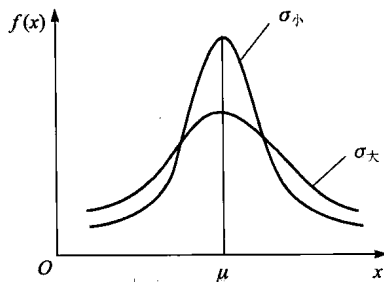


图 1-2

(2) 曲线 $f(x)$ 从 $\bar{x}-\sigma$ 到 $\bar{x}+\sigma$ 区间的面积为

$$\int_{\bar{x}-\sigma}^{\bar{x}+\sigma} f(x)dx = 68\% \quad (2.7)$$

此时表征测量值落在 $(\bar{x}-\sigma) \sim (\bar{x}+\sigma)$ 区间的概率为 68%。

(3) 人们常用 σ 和 $\sigma_{\bar{x}}$ 来评价测量结果的误差大小。对于有限次测量, 测量结果的平均值 $\bar{x}$ 落在 $(\bar{x}-\sigma_{\bar{x}}) \sim (\bar{x}+\sigma_{\bar{x}})$ 区间的概率为 68%, 同理有

$$\int_{\bar{x}-3\sigma}^{\bar{x}+3\sigma} f(x)dx = 99.7\% \quad (2.8)$$

即 $\bar{x}$ 落在 $(\bar{x}-3\sigma_{\bar{x}}) \sim (\bar{x}+3\sigma_{\bar{x}})$ 区间的概率为 99.7%, 由此可见, $\bar{x}$ 落在此区间外的可能性已经很小, 因此引入极限误差概念, 极限误差用 Δ 表示, 即

$$\Delta = 3\sigma$$

如果某次测量值的误差超过了这个值, 我们通常认为是坏数据, 应当剔除。

§2 不确定度, 测量结果的表示方法

一、不确定度

1. 不确定度的概念

不确定度是说明测量结果的一个参数, 是对被测量的真值所处量值范围的一个评定; 不确定度也是未知的误差可能大小的反映。同时也反映测量结果的可信赖程度, 不确定度的大小也反映了测量结果质量的好坏程度。按照我国国家计量技术规范 (JJG 1027—1991), 测量结果的最终表达形式为 $x = \bar{x} \pm u_c$, x 为被测值, $\bar{x}$ 为最佳估计值 (不含已修正的系统误差), u_c 为合成不确定度。

2. 不确定度的划分方法

将可修正的系统误差进行修正后, 余下的全部, 按获得的方法的不同, 划分为 A 类不确定度分量和 B 类不确定度分量。

3. A 类不确定度的定义和评定

对重复测量并使用统计方法可评价的那些不确定度分量, 用标准差 s_i 来表示, 即多次测量的某一次测量的 A 类不确定度为贝赛尔公式

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.9)$$

最佳估计值 $\bar{x}$ 的 A 类不确定度为