

普通高等教育基础课规划教材

大学物理实验教程

主 编 李 平
副主编 钱仰德 唐曙光
参 编 石金贵
主 审 沙振舜



机械工业出版社

本书是根据《高等工科院校物理实验课程教学基本要求》编写的。全书系统地介绍了与大学物理实验有关的实验数据处理知识,一些常用的仪器设备的原理和使用方法,以及一些常用的基本测量方法;并按不同层次编排了18个基础实验、12个综合实验、5个设计实验和3个计算机模拟实验;还介绍了国内外部分著名的物理实验室及相应的www网址。

本书各章节的内容和实验既相对独立,又相互配合,且循序渐进,可作为高等工科院校、高等职业学校和高等专科学校工科各专业的大学物理实验课程的基本教材。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/李平主编. —北京:机械工业出版社, 2002.1
普通高等教育基础课规划教材
ISBN 7-111-09600-2

I. 大… II. 李… III. 物理-实验-高等学校-教材 IV.
04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第085656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:郑丹 版式设计:霍永明 责任校对:孙志筠

封面设计:陈沛 责任印制:郭景龙

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001年12月第1版·第1次印刷

1000mm×1400mm B5·7.75印张·300千字

0 001—5 000册

定价:20.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

前 言

工科大学物理实验课程是高等工科院校一门独立设置的必修课程。实验教学的根本目的是培养学生的科学实验能力，提高学生的科学实验素质，使学生树立实事求是、严肃认真的科学态度。

本书是根据“高等工科院校物理实验课程教学基本要求”，并结合工科大学物理实验课程的多年教学改革经验编写而成的。《大学物理实验教程》是长期从事工科大学物理实验教学的教师辛勤劳动的成果，凝聚着集体的智慧。同时，在编写过程中，参考了兄弟院校的实验教材和有关著作，在此一并表示感谢。

全书内容共分九章，其中第一章、第二章的内容讲解约需6学时，第三章、第五章和第九章的内容为阅读内容，不专门安排课时讲解，以自学为主。但在做实验前所有实验者都必须认真地把第三章的内容看懂、弄通。第四章、第六章、第七章的实验内容要求根据课时的多少，分两学期选做，其中每个实验的计划学时为3学时。第八章的内容可根据条件进行选修或阅读。

本书由南京大学沙振舜教授主审，江苏大学（原江苏理工大学）刘映栋教授、扬州大学李寿松教授、东南大学潘人培教授对本书的编写提出了宝贵的意见，编者谨向他们表示深深的谢意。

限于编者的经验和水平，书中可能有不少缺点和错误，恳请读者批评指正。

编 者
2001.12.

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
第一节 物理实验的作用与地位	1
第二节 物理实验课程的任务与基本要求	2
第三节 实验教学三个基本环节	3
第二章 测量误差与实验数据处理	6
第一节 测量与误差及不确定度	6
第二节 有效数字及其运算法则	13
第三节 数据处理的基本方法	16
第四节 测量结果的表示	27
第五节 用 Excel 软件进行数据处理	29
习题	32
第三章 物理实验中常用仪器及相关知识介绍	35
第一节 天平的调整与使用	35
第二节 游标卡尺、螺旋测微器的使用	36
第三节 移测显微镜使用基础	38
第四节 电压表、电流表、滑线变阻器及电阻箱的使用	39
第五节 电桥的测量原理	44
第六节 热量与温度的测量原理及方法介绍	48
第七节 光杠杆与尺读望远镜的测量原理及使用方法	51
第八节 示波器使用基础	53
第九节 常用电源及光源使用基础	60
第十节 常用计时仪器介绍	61
第四章 基础实验	63
实验一 密度的测量	63
实验二 用火花计时法测自由落体加速度	70
实验三 正态分布的实验研究	75
实验四 用焦利氏秤测量液体的表面张力系数	79
实验五 用落球法测液体的动力粘度	82
实验六 金属丝弹性（杨氏）模量的测定	84
实验七 固体线膨胀系数的测定	88

实验八 用三线摆法测刚体的转动惯量	91
实验九 在气垫导轨上测速度和加速度	97
实验十 在气垫导轨上验证动量守恒定律	104
实验十一 模拟法描绘静电场	106
实验十二 用电桥法测电阻	110
实验十三 用电势差计测电动势	115
实验十四 示波器的使用	118
实验十五 用驻波法测定声速	122
实验十六 自准法、共轭法测透镜的主焦距	125
实验十七 用杨氏双缝干涉仪测光的波长	129
实验十八 光的干涉——牛顿环	132
第五章 物理实验中常用的测量方法	136
第一节 比较法	136
第二节 放大法	137
第三节 平衡法	139
第四节 补偿法	139
第五节 转换法	140
第六节 模拟法	142
第七节 干涉法	143
第八节 示踪法	143
第九节 量纲分析法	144
第六章 综合实验	146
实验十九 良导体热导率的测定	146
实验二十 热电偶的定标	149
实验二十一 电子束的电偏转与磁偏转研究	153
实验二十二 电子束在径向电场和轴向磁场中的运动(磁控条件)	161
实验二十三 分光计的调整和使用	165
实验二十四 用霍耳元件测螺线管磁场	172
实验二十五 迈克耳孙干涉仪的使用	177
实验二十六 弗兰克—赫兹实验	182
实验二十七 密立根油滴实验	191
实验二十八 金属电子逸出功的测定	195
实验二十九 全息摄影实验	200
实验三十 光电效应实验	203
第七章 设计实验	207
设计实验一 自组望远镜	208
设计实验二 驻波法测振动频率	209
设计实验三 线性电阻与非线性电阻的伏安特性研究	210

设计实验四 研究电源的输出功率与负载的关系	212
设计实验五 磁路定律的研究	213
第八章 计算机模拟实验	216
第一节 计算机模拟实验概述	216
第二节 分形的计算机模拟实验	217
第三节 混沌的计算机模拟实验	220
第四节 逾渗的计算机模拟实验	222
第九章 国内外部分著名物理实验室及 www 网址介绍	225
附表	233
附表 1 基本物理常量	233
附表 2 国际单位制 (SI)	234
附表 3 国际单位制所用的词头	235
附表 4 20℃时常用固体和液体的密度	235
附表 5 常用金属的弹性 (杨氏) 模量	236
附表 6 在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数	236
附表 7 液体的动力粘度	236
附表 8 部分材料的密度与热导率	237
附表 9 某些金属或合金的电阻率及其温度系数	237
附表 10 几种常用热电偶的温差电动势系数	238
附表 11 在标准大气压下不同温度的水的密度	239
附表 12 常用光源的谱线波长	239
习题答案	240
参考文献	241

第一章 绪 论

第一节 物理实验的作用与地位

科学实验是研究自然规律与改造客观的“基本手段”。所谓实验就是根据现有的科学理论和一定的目的，通过相应的仪器和设备，在人为的条件下，控制、模拟或再现自然现象，检验某种科学思想并寻求相应的规律的过程。科学实验可凭借实验室的优越条件，超越生产实践和自然条件的某些局限性，走在生产实践的前面，为生产技术的发展开辟出新的道路。实验与科学理论有着密切的联系，是基础科学赖以生存和发展的基础。科学理论上的诸多争论，最终靠实验作出判断；错误理论的修正，也是靠实验完成；诸多重要理论都是在总结实验结果的基础上得出的；实验是检验科学理论的唯一手段，实验与科学理论相结合，便产生了种种不同类型的科学技术。

在物理学史上，首先把科学的实验方法引入到物理学研究中来、从而使物理学走上真正科学道路的是16世纪的意大利物理学家伽利略。他设计的斜面实验就蕴藏着极为丰富的科学实验的思想。

1) 在斜面实验中，有意识地忽略了空气阻力等一系列的次要因素，形成了理想化的物理条件，抓住了问题的本质，从而获得了超越这一实验本身的对特殊条件的认识，这恰恰是科学实验不同于自然观察之处。

2) 斜面可使人们方便地改变实验的测量条件，并观察相应的实验结果。这是科学实验区别于自然观察的又一特点。他选择斜面做实验，是为了延长物体在它上面下滑的时间，以适应当时的测量条件。这一实验构思极为巧妙，使原来在自由落体运动中难以测量的时间变得容易测量了。

3) 伽利略在实验研究的基础上还用推理、概括的方法，得到了超越实验本身的更为普遍的规律，即物体在光滑水平平面上的运动是等速直线运动。而过渡到铅垂情况，他推论出各种物体的自由下落是作等加速直线运动。

4) 把数学与实验密切地结合起来，把各个物理量之间的关系用数学表达式表示出来，揭示了各个物理量之间的内在联系，从而把实验结果上升到普遍的理论高度。

伽利略的这些卓越的实验思想和实验方法，对我们今天的实验教学仍有重要的启示。在科学技术的发展史上，科学实验的出现是一个重要的分水岭，在这以

前, 科技进步缓慢; 在这以后, 科技进步迅速。

科学实验与生产实践和自然现象是有着本质的不同的: 实验能在一定条件下再现某一自然现象, 让人们有时间、有机会去研究现象发生的原因和规律; 实验能把复杂的自然现象分解为若干简单的现象, 以进行个别和综合的研究; 实验还可以实现对研究对象的人为控制, 并对现象进行比较和分析。

实验教学具有很强的理论联系实际的特性; 实验教学既具有继承性, 更具有创造性; 实验教学是整个教学计划中的重要组成部分。它从实验课程的特有规律出发, 强调了实验方法的训练和实验素质的培养, 为科学研究和工程实践准备了必要的技术基础和相关素养。良好的实验素养主要体现在: ①良好的观察习惯; ②正确、规范地操作实验设备仪器; ③正确地记录和处理实验数据; ④对实验结果的分析与思考; ⑤学会用实验的手段去解决实际问题。

在物理实验课程教学过程中, 要充分认识到从事实验工作动手能力不可或缺, 而动手能力的培养是以熟练掌握实验的基本知识、基本方法和基本技能为基础的, 因此要主动地寻找和接受这方面的训练与培养。

第二节 物理实验课程的任务与基本要求

科学实验本身有自己的理论、方法和技能, 要掌握好这套实验知识, 需要由浅入深、由简到繁地逐步学习、训练和提高, 大学物理实验课程正是进行科学实验基本训练的一门独立的、必修的实验基础课程, 是系统地接受实验方法和实验技能训练的第一门实验课程, 为学习后续课程的实验和进行工程实验打下必要的基础。同时, 它对提高科学实验素养, 建立辩证唯物主义世界观和方法论也起着积极的作用。

本课程的任务是: 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量, 学习并掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。同时, 通过物理实验的各个教学环节, 培养科学系统的思维方式、一丝不苟的严谨态度、实事求是的工作作风和团结协作的精神。

本课程的基本要求侧重于如下两个方面:

1. 基本素质要求

- 1) 在整个实验教学过程中, 应自觉遵守各项实验规则。
- 2) 必须完成规定的实验, 以经历实验教学中各环节的基本训练。
- 3) 能撰写合格的实验报告。
- 4) 借助一定的计算工具, 进行科学实验数据的处理。
- 5) 具有独立操作能力的同时, 也应强调团结协作精神。

2. 基本实验技能及实验方法要求

- 1) 借助相关资料(实验指导书, 仪器说明书等)能够调整常用仪器和实验装置, 并掌握一系列操作的基本技术。
- 2) 了解一系列常用仪器和装置的性能, 并学会使用。
- 3) 能够对常用物理量进行一般测量。
- 4) 了解比较法、放大法、模拟法、干涉法、补偿法等常用测量方法。
- 5) 理解测量误差的基本知识, 并具有处理实验数据的初步能力。

第三节 实验教学的三个基本环节

一般实验教学可分为实验预习、实验操作和撰写实验报告三个环节。

一、实验预习

实验预习是为实验操作做准备的, 通过实验预习应明确三个问题: 做什么? 怎么做? 为什么? 为此需要做到:

- 1) 认真阅读实验指导书、参考资料等, 事先对实验内容作全面的了解。对于验证性实验应充分理解与要验证的规律有关的概念、理论以及物理过程; 对于探索性实验更应充分熟悉与实验有关的知识以及要研究的物理过程和期望得到的带有规律性的物理现象, 明确实验目的与要求。
- 2) 弄清实验中使用的基本仪器的构造原理、操作规程、读数原理和方法以及注意事项。特别是注意事项, 不仅要仔细看, 还要牢记, 否则会造成仪器损坏, 甚至人员事故。对真正不懂的部分, 应作记录, 在进入实验操作环节时, 再向实验指导教师请教。只有这样, 才能在实验中克服盲目性, 才能充分相信自己的测量结果和由这些测量结果得出的结论, 从而达到实验目的。
- 3) 预测实验中可能出现的问题。通过对问题的预测, 一方面可使实验者进一步熟悉实验步骤与过程, 另一方面可以减少实验中的失误, 提高实验效率, 做到集中注意力解决实验中的主要矛盾。
- 4) 拟定实验步骤、数据表格等, 并在实验操作前交实验指导教师审阅, 经认可后再做实验。
- 5) 若学校在校园网上提供了《大学物理实验》计算机辅助教学软件, 可通过软件进行相关的模拟实验操作, 由此建立起一定的感性认识。

二、实验操作

实验操作是整个实验教学中最重要的一环, 动手能力、分析问题和解决问题等能力的培养, 主要在具体的实验操作时完成。在该环节中, 学生要在教师指导下进行仪器的正确安装和调整, 各种物理现象的仔细观察, 实验原始数据的完整记录。为此要注意下述几方面的问题。

- 1) 掌握“三先三后”的原则, 即先观察后测量, 先练习后测量, 先粗测后

细测。

2) 注意“三基”，即实验的基本知识、基本方法和基本技能，抓住重点。

3) 不要单纯追求实验数据，应学会分析实验问题。

4) 实验中要贯彻“三严”，即严肃的态度、严格的要求、严密的观测。遵守各项规章制度，注意安全。

5) 实验原始数据在实验指导教师审核、签字后，方才有效，应认真对待实验原始数据，它将为以后的计算和问题分析提供宝贵的第一手资料。

6) 离开实验室前，应自觉整理好仪器，并做好卫生清洁工作。

三、撰写实验报告

写出合格的实验报告是培养科学实验能力的组成部分，是物理实验课程所应担负的具体的培养训练任务之一。实验报告是对实验工作的全面总结，既要全面又要简单明了，应做到用词确切、字迹整洁、数据完整、图表规范、结果明确。撰写实验报告的过程主要是对综合思维能力和文字表达能力训练的过程，也为日后在科学研究、工程实践等实际工作中撰写实验报告、研究成果报告、科技论文等打下基础，这种能力将直接影响以后从事科学与工程实践活动的工作能力和工作业绩。

一份完整的实验报告应包括以下几个方面内容：

1) 实验名称。

2) 实验目的。

3) 简要的实验原理，包括基本关系式，必要的电路、光路等简图以及数据表格。书写原理时，不要照抄实验指导书，应用自己理解了的语言来概述。

4) 仪器设备，包括型号、规格、参数等。

5) 实验步骤，概括地写出实验进行的主要过程。

6) 实验数据图表。

7) 数据处理与误差分析。

8) 实验结果，要给出完整的量化表达式，在观察现象或验证定律时，要写出实验结论。

9) 问题讨论，包括对实验中现象的解释、对实验方法的改进与建议、作业题、实验后的体会等。

撰写实验报告中必须注意的二个问题。

1) 不可把实验报告与实验指导书混为一谈。实验报告与实验指导书从语体到具体内容都有原则的区别。实验指导书向学生提出实验的任务、目的、要求，阐明实验原理，提供进行实验的思路和方法，告诉学生应该怎么做。而实验报告是在完成实验过程之后写出的总结，具体回答如何做、获得了什么结果、实验的意义价值何在。这些必须由实验者在实验后用自己的语言来归纳、总结。

2) 实验报告的核心特征就是实事求是。因此在实验报告中,对实验过程中所应记录的实验条件、实验现象、实验数据应严格如实地予以记录,对测量数据的有效位数不得随意增删。

第二章 测量误差与实验数据处理

第一节 测量与误差及不确定度

一、测量与误差

1. 测量

物理实验离不开测量。无论是研究物理现象、验证物理原理，还是研究物质特性等，都要进行测量。测量就是将被测量与一个选作单位的同类量进行比较，其倍数即为该被测量的测量值。

测量可分为直接测量和间接测量。直接从仪器或量具上读出待测量的大小，为直接测量。如用米尺测量物体的长度，用天平测量物体的质量，用秒表计时等都是直接测量。如果待测量是由若干个直接测量经过一定的函数关系运算后获得的，则为间接测量。例如测量物体的密度时先测出物体的体积和质量，再用公式计算出物体的密度。

2. 误差

每一个实验者都希望测量的结果能很好地符合客观实际。但在实际测量中，由于测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员等种种因素不可避免地存在着差异，不可能使测量值与客观存在的真值完全相同，使得测量结果的量值与真值之间总存在一定的差值。此差值称为该测量值的测量误差。

真值 (X) ——被测量在其所处的确定条件下，客观具有的量值。

误差 (Δx) ——测量值 (x) 与真值 (X) 之差，又称绝对误差。即

$$\Delta x = x - X$$

相对误差 (E_r) ——绝对误差 (Δx) 与真值 X 的比值。

$$E_r = \frac{\Delta x}{X} \times 100\%$$

误差按其特征和表现形式可以分为三类：系统误差、随机误差和粗大误差。

3. 系统误差

在同一条件下多次测量同一量时，误差的大小和方向保持恒定，或在条件改变时，误差的大小和方向按一定规律变化，这种误差称为系统误差，其特点是它的确定规律性。系统误差来源于以下几方面：①由于实验原理和实验方法不完善

带来的误差，例如计算公式的近似性所引起的误差；②由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的误差；③由于环境条件变化所引起的误差；④由于观测者生理或心理特点造成的误差等。

系统误差的确定性反映在：测量条件一经确定误差也随之确定，重复测量时误差的绝对值和符号均保持不变。因此，在相同实验条件下，多次重复测量不可能发现系统误差。对观测者来说，可能知道系统误差的规律及其产生的原因，也可能不知道。已被确切掌握了大小、规律和符号的系统误差，称为可定系统误差；对大小、规律和符号不能确切掌握的系统误差称为未定系统误差。前者一般可以在测量过程中采取相应措施予以消除或在测量结果中进行修正，而后者一般难以作出修正，只能估计出它的取值范围。

4. 随机误差

在同一条件下多次测量同一个量时，每次出现的误差时大时小、时正时负，没有确定的规律，但就总体来说服从一定的统计规律，这种误差称为随机误差。它的特点是单个具有随机性，而总体服从统计规律。随机误差的这种特点使我们能够在确定条件下，通过多次重复测量来发现，而且可以从相应的统计分布规律来讨论它对测量结果的影响。

5. 粗大误差

测量时，由于观测者不正确地使用仪器、粗心大意观察错误或记错数据而引起的不正确的结果，这种情况出现的误差称为粗大误差。它实际上是一种测量错误，这种数据应当剔除。

二、误差的处理

1. 随机误差的处理

(1) 随机误差的统计规律 理论和实践都证明，当测量次数足够多时，一组等精度测量数据其随机误差服从一定的统计规律，最常见的一种统计规律呈正态分布（高斯分布）。若横坐标为误差 Δx ，纵坐标为误差出现的概率密度函数 $f(\Delta x)$ ，则正态分布曲线如图 2-1 所示。其数学表达式为

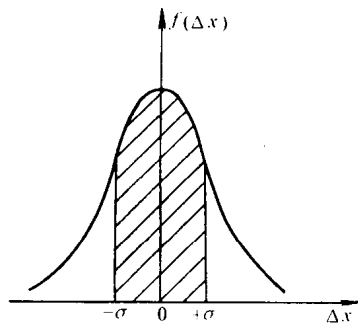


图 2-1 正态分布曲线

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n}} \quad (n \rightarrow \infty)$$

式中 σ —— 总体标准误差。

图 2-1 中阴影部分的面积就是随机误差在 $\pm\sigma$ 范围内的概率, 即测量值落在 $(X - \sigma, X + \sigma)$ 区间中的概率 $P = 68.3\%$ 。

(2) 随机误差的估算 在实际测量中, 测量的次数总是有限的, 而且被测量的真值是未知的。

设在一组测量值中, n 次测量的测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 由统计原理可知, 其真值的最佳估计值 x_0 是能使各次测量值与该值之差的平方和为最小的那个值。

即 $f(x) = \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2$ 有最小值。

$$\frac{df(x)}{dx_0} = - \sum_{i=1}^n 2(x_i - x_0) = 0$$

$$\text{则} \quad x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x}$$

即算术平均值 $\bar{x}$ 最接近于真值。

我们将各次测量值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 之差称为该次测量的残差

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

因为我们只知道 v_i 而不知道 Δx_i , 所以我们只能用残差代替误差计算, 此时总体标准误差的估计值为

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

其中 S 为总体标准误差 σ 的估计值, 称为实验标准偏差。式 (2-1) 称为贝塞尔公式, 它表示一测量列中各测量值所对应的标准偏差。

从统计意义上讲, $\bar{x}$ 应比每一个测量值 x_i 都更接近于真值。经理论推导得到平均值的实验标准偏差 $S(\bar{x})$ 为

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

2. 系统误差的处理

(1) 系统误差的发现 发现系统误差是消除和修正系统误差的前提, 应从系统误差的来源着手分析。

1) 理论分析法。测量过程中因理论公式的近似性等原因造成的系统误差常常可以从理论上作出判断并估计其量值, 如伏安法测电阻。

2) 实验对比法。对被测量的测量量采用实验方法对比、测量方法对比、仪器对比及测量条件对比来研究其结果的变化规律, 从而发现可能存在的系统误差。

3) 数据分析法。分析多次测量的数据分布规律来发现系统误差。

(2) 系统误差的减小和修正。

1) 通过理论公式引入修正值。

2) 消除系统误差产生的因素。

3) 改进测量原理和测量方法。

三、测量结果的不确定度

测量不但要得到被测量的最佳估计值, 而且对其可靠性也应作出评定。不确定度是与测量结果相联系的一种参数, 用于表征测量值的可能的分散情况, 也就是因测量误差的存在而对被测量结果不能肯定的程度。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。

测量不确定度一般由若干分量组成。原则上可以分为两类。

1. 不确定度 A 类分量

不确定度 A 类分量是指可以采用统计方法计算的不确定度。在物理实验教学中我们约定 A 类不确定度取实验标准偏差, 因此可以像计算标准偏差那样, 用贝塞尔公式计算被测量的 A 类不确定度 u_A 即

$$u_A = S(\bar{x}) \quad (2-3)$$

2. 不确定度 B 类分量

不确定度 B 类分量是指用非统计方法求出或评定出的不确定度。评定 B 类不确定度常用估计方法, 估计要适当, 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, 因而不同的估计者可能有不同的结论。

在物理实验教学中我们约定 B 类不确定度是将测量仪器的误差限折合成近似的标准偏差。仪器的误差限一般在仪器的说明书中注明, 即给出了一个保证不致被超出的范围, 指在正确使用仪器的条件下, 测量值和被测物理量的真值之间可能产生的最大误差。如给出的误差限 Δ_{ix} 的范围在 $[-a, +a]$ 之内, 估计误差概率分布是均匀分布, 根据均匀分布理论, 其不确定度 B 类分量 u_B 为

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2-4)$$

如果认为误差更可能接近这个范围中心, 则可估计误差概率分布是三角分布, 其不确定度 B 类分量为

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

如果认为误差概率分布在这个范围内更接近正态分布, 则不确定度 B 类分量为

$$u_B = \frac{a}{3}$$

在教学中为简化起见, 我们约定, 误差概率分布按均匀分布考虑, B 类不确定度用式 (2-4) 来计算。

在教学中我们约定, 正确使用仪器时的仪器误差限 Δ_{ix} 可按如下原则来确定:

- (1) 对可估读测量数据的仪器 $\Delta_{ix} = \text{最小刻度的 } 1/2$

比如, 米尺的最小刻度为 1mm, 则米尺的 $\Delta_{ix} = 0.5\text{mm}$ 。

- (2) 对不可估读测量数据的仪器 $\Delta_{ix} = \text{仪器最小分辨读数}$

比如, 分辨率为 0.05mm 的游标卡尺, 则其 $\Delta_{ix} = 0.05\text{mm}$; 分辨率为 0.02mm 的游标卡尺, 则其 $\Delta_{ix} = 0.02\text{mm}$; 分辨率为 $30''$ 和 $1'$ 的分光计, 其 Δ_{ix} 分别为 $30''$ 或 $1'$; 各类数字式仪表, $\Delta_{ix} = \text{仪器最小读数}$ 。

- (3) 对有仪器说明书或注明仪器精度等级的仪器 Δ_{ix} 按仪器说明书计算

比如, 螺旋测微器 ($0 \sim 50\text{mm}$), $\Delta_{ix} = 0.004\text{mm}$; 电磁仪表 (指针式电流表、电压表), $\Delta_{ix} = AK\%$ (A 为量程, K 为仪表精度等级)。

3. 合成不确定度

当两类不确定度各分量 $u_1, u_2, \dots, u_m$ 彼此独立时, 则合成不确定度 u_c 为

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2} \quad (2-5)$$

相对不确定度 = $\frac{\text{合成不确定度}}{\text{测量平均值}}$

$$E_r = \frac{u_c}{\bar{x}} \quad (2-6)$$

四、直接测量的不确定度

1. 单次测量的不确定度计算

因单次测量不存在不确定度 A 类分量, 故单次测量的合成不确定度就等于不确定度 B 类分量, 此时的不确定度可能小于多次测量的不确定度。这并非指单次测量比多次测量准确, 只是其置信概率要小于多次测量。

2. 多次测量的不确定度

对 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 A 类不确定度。对 B 类不确定度, 主要讨论仪器不准所对应的不确定度, 然后求两类不确定度的“方和根”, 得到合成不确定度。

例 2-1 用螺旋测微器测量小钢球的直径, 五次测量值分别为 5.499mm、

5.500mm、5.499mm、5.498mm、5.498mm。试求其合成不确定度。

解 $u_A = S(\bar{d}) = 0.00037\text{mm}$

螺旋测微器的误差限为 0.004mm

$$u_B = \frac{0.004}{\sqrt{3}}\text{mm} = 0.0023\text{mm}$$

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.00037^2 + 0.0023^2}\text{mm} = 0.003\text{mm}$$

五、间接测量结果的合成不确定度

间接测量的最佳估计值和合成不确定度是由直接测量结果通过函数式计算出来的。设间接测量的函数式为

$$N = F(x, y, z, \dots)$$

其中, $x = \bar{x} \pm u_C(\bar{x})$, $y = \bar{y} \pm u_C(\bar{y})$, $z = \bar{z} \pm u_C(\bar{z})$, ...

则间接测量量 N 的最佳估计值为

$$\bar{N} = F(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots)$$

间接测量量 N 的不确定度为

$$u_C(\bar{N}) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 u_C^2(\bar{x}) + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 u_C^2(\bar{y}) + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2 u_C^2(\bar{z}) + \dots} \quad (2-7)$$

特别地, 当间接测量的函数式为积商形式 (或含和差的积商形式), 为使运算简便, 可以先将函数式两边同时取自然对数, 然后再求全微分, 即

$$\frac{dN}{N} = \frac{\partial \ln F}{\partial x} dx + \frac{\partial \ln F}{\partial y} dy + \frac{\partial \ln F}{\partial z} dz$$

同样改微分号为不确定度符号, 求其“方和根”, 便可得间接测量量 N 的相对不确定度

$$E_r = \frac{u_C(\bar{N})}{\bar{N}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln F}{\partial x}\right)^2 u_C^2(\bar{x}) + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial y}\right)^2 u_C^2(\bar{y}) + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial z}\right)^2 u_C^2(\bar{z}) + \dots} \quad (2-8)$$

而合成不确定度

$$u_C(\bar{N}) = \bar{N} E_r \quad (2-9)$$

例 2-2 用螺旋测微器测量某圆柱体的体积, 其直径最佳估计值 $\bar{d} = 1.0080\text{cm}$, $\bar{d}$ 的合成不确定度 $u_C(\bar{d}) = 5.88\mu\text{m}$, 高度的最佳估计值 $\bar{h} = 1.0110\text{cm}$, $\bar{h}$ 的合成不确定度 $u_C(\bar{h}) = 3.47\mu\text{m}$ 。求体积的合成不确定度。

解 由 $V = \frac{1}{4}\pi d^2 h$, 得

$$\bar{V} = \frac{1}{4}\pi \bar{d}^2 \bar{h}, \quad \frac{\partial \ln V}{\partial d} = \frac{2}{d}, \quad \frac{\partial \ln V}{\partial h} = \frac{1}{h},$$