



物理

实验教程

WULI
SHIYANJIAOCHENG

白旭灿 等 编



 山西科学技术出版社

物理实验教程

白旭灿 沈文杰 郭向阳
编
张向锋 韩 英 戴建广

江苏工业学院图书馆
藏书章

山西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

物理实验教程/白旭灿等编. —太原:山西科学技术出版社, 2002. 10

ISBN 7-5377-2037-1

I. 物... II. 白... III. 物理学-实验-教程
IV. 041-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 057087 号

物理实验教程

白旭灿 等编

*

山西科学技术出版社出版 (太原建设南路 15 号)

山西省新华书店发行 临钢报社印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 11.25 字数: 252 千字

2002 年 10 月第 1 版 2002 年 10 月太原第 1 次印刷

印数: 1-3000 册

*

ISBN 7-5377-2037-1
0·74 定价: 16.00 元

如发现印、装质量问题,影响阅读,请与印刷厂联系调换。

内 容 简 介

本书的主要内容有测量误差及数据处理基础、物理实验的基本方法和物理实验的基本知识,介绍了力学、热学、电磁学、光学、近代物理实验共25个,其中安排了部分设计性实验和计算机应用实验。实验原理清晰、简明,实验内容与要求明确、扼要。

本书可作为高职高专工科各专业物理实验教材,也可作为理科非物理专业的物理实验用书。

前 言

物理实验是工程专科学子必修的一门重要基础实验课程。作为工程专科实践教学的基础和先导,该课程的主要任务是让学生学习掌握实验的基本理论和基本方法,使学生受到从事工程技术所必须的基本功训练,初步培养学生分析实际问题、解决实际问题的应用能力。为后续的实验、实习课奠定良好的基础。

本书是根据国家教育委员会组织制定的高等工程专科《物理实验课程教学基本要求》,在原讲义多次修订的基础上,参考并吸收了各兄弟院校物理实验的精华编写而成的。本书前三篇着重介绍在物理实验前应掌握的基本概念、基本方法和操作规程等,第四篇介绍了力学、热学、电磁学、光学、近代物理实验共二十五个,为提高学生的综合能力,还安排了部分设计性实验和计算机应用实验。在编写此书的过程中,我们力求做到:

1. 从选题、内容叙述到仪器设备的选用等,都立足和着眼于当前学校实验室的条件和学生的实际水平。

2. 对“测量误差及数据处理基础”这部分内容,既注意引入当前最新的概念与要求,又注意采用一些合理的简化处理,体现出先进性、科学性及通俗易懂性。

3. 在实验项目的叙述上,实验原理清晰、简明,实验内容与要求明确、扼要,贯彻了少而精的原则。

4. 在实验技能的训练上,采取循序渐进逐步提高的方式,起点低终点高,着眼于学生基本功掌握和动手能力的培养。

参加本书编写工作的有:白旭灿(绪论,第一章,实验十二、十五、十六)、沈文杰(第二、三章,实验一、二、三、十七、十八)、郭向阳(实验六、十三、十四、十九、二十、)、张向锋(实验十一、二十一、二十二、二十三、二十四)、韩英(实验七、八、九、十、二十五、附录)、戴建广(实验四、五),全书由白旭灿统稿,本书由赵春华主审。

本书可作为高职高专工科各专业物理实验教材,也可作为理科非物理专业的物理实验用书。

由于编写时间仓促,编者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者不吝赐教。

编 者

目 录

绪论	1
第一章 测量误差及数据处理基础	4
第一节 测量误差的基本概念	4
第二节 直接测量结果与随机误差的估计	7
第三节 直接测量结果的表示和总不确定度的估计	8
第四节 间接测量结果的表示和不确定度的合成	9
第五节 有效数字及表示	11
第六节 数据处理的基本方法	13
第二章 物理实验方法和基本操作初步	20
第一节 物理实验的基本方法	20
第二节 物理实验的基本调整与操作技术	23
第三章 物理实验的基本知识	25
第一节 电磁学实验常识	25
第二节 光学实验常识	30
第四章 实验部分	33
实验一 固体和液体密度的测定	33
实验二 测量金属丝的杨氏弹性模量	41
实验三 气垫导轨的使用	46
3—A 速度、加速度的测量	46
3—B 动量守恒定律的验证	52
实验四 用三线摆测物体的转动惯量	57
实验五 液体表面张力系数的测定	59
实验六 弦线上波的传播规律	63
实验七 示波器的使用	68

实验八 电桥测电阻	75
实验九 热敏电阻温度系数的测定	82
实验十 电位差计的使用	84
10—A 电位差计测温差电动势	84
10—B 电位差计校验毫安表	90
实验十一 静电场的描绘	92
实验十二 简易万用表的组装	96
实验十三 磁感应强度的测量	99
实验十四 照相技术	104
实验十五 薄透镜焦距的测定	109
实验十六 等厚干涉	114
实验十七 分光计的调整与使用	120
实验十八 光栅的衍射	127
实验十九 迈克尔逊干涉仪的调整与使用	131
实验二十 光电效应与普朗克常数的测定	135
实验二十一 密立根油滴实验	140
实验二十二 光学全息照相	144
实验二十三 声速的测定	147
实验二十四 太阳能电池特性的研究	152
实验二十五 混合法测定比热容(计算机应用实验)	156
附表1 基本物理常数	161
附表2 国际单位制	162
附表3 在标准大气压下不同温度的水的密度	163
附表4 在20℃时常用品体和液体材料的密度	164
附表5 在20℃时某些金属的弹性模量(杨氏模量)	164
附表6 在20℃时与空气接触的液体的表面张力系数	165
附表7 在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数	165
附表8 某些金属和合金的电阻率及其温度系数	166
附表9 铜—康铜热电偶的温差电动势	166
附表10 在常温下某些物质相对于空气的光的折射率	167
附表11 常用光源的谱线波长表	167
附表12 不同温度时干燥空气中的声速	168
附表13 几种物质的比热容	169

绪 论

一、物理实验课的地位和任务

科学实验是科学理论的源泉，是工程技术的基础。科学研究的一切成果都是理论与实验紧密结合的结晶。同时要把科研成果应用到实际生产和生活中去造福人类，还要克服种种技术上的困难，做大量的科学实验工作。所以，我们说科学实验是人们认识自然的基本手段，是检验理论正确与否的标准及改造客观世界的有力武器。随着科学技术的发展，科学实验的内容越来越丰富，实验的范围越来越广泛，实验手段不断更新，对实验精度的要求也越来越高。为此，作为一名德、智、体全面发展的学生未来的工程技术人员不仅要学好本专业的理论知识，同时还要具备一定的科学实验素质及能力，才能够适应科学技术飞速发展的需要，成为国家建设的栋梁之才。

大学物理实验课是对学生进行科学实验基本训练的一门独立的实验课程，是工科学子进入大学后在实验方面受到系统训练的开端，同时也是后继实验课程的基础。在大学里学习或从事科学实验的起步。同时，在培养科学工作者的良好素质及科学世界观方面，物理实验也起着潜移默化的作用，因此，学好物理实验对于高等工科学校的学生是十分重要的。

本课程的主要任务是：

在实验思想、实验方法、实验技能和数据处理方面对学生进行训练，培养学生独立研究问题和解决问题的能力。

1. 掌握实验的物理思想及其理论依据。

2. 掌握物理实验中的基本实验方法、操作技术及基本测量仪器的原理，调整和使用方法。

3. 学会正确记录和处理数据，分析实验结果，并能按照要求撰写实验报告。

4. 初步掌握、自行设计和完成不太复杂的实验任务的基本步骤及方法。

通过对实验现象的观察、物理量的测量和分析，加深对物理学基本概念，规律和理论的理解。

培养和提高学生的科学实验素质，要求学生具有理论联系实际的学习方法、实事求是的科学态度、严谨踏实的工作作风，遵守纪律和团结协作，爱护公物的优良品德。

二、物理实验课的程序和要求

物理实验是在教师指导下学生独立进行的课程。整个实验程序可分为三个阶段：实验准备、实验过程和实验报告。

1. 实验前的准备

课前必须做好预习，写出预习报告。预习时重点解决三个问题：

(1) 要明确实验目的，即明确该实验最终是要获得什么结果。并依此通过课前阅读实验教材及有关资料，了解及达到此目的过程中，应注意和掌握的关键问题。

(2) 要了解实验原理, 即了解该实验理论和实验方法的依据, 各物理量的含义及其之间的关系。

(3) 要清楚实验步骤: 即在熟悉实验原理和方法的基础上, 必须清楚如何去做。这里包括用什么仪器和方法进行测量, 各仪器、仪表的规格, 安装、调整和使用的关键步骤及注意事项; 测量的先后次序, 记录数据的表格等。

2. 实验过程

实验时首先要清点仪器, 然后按照确定的实验步骤, 严肃认真地进行实验。一般来说实验过程是按以下三个步骤进行的。

仪器的调整和熟悉: 使用仪器进行测量时, 必须满足仪器的正常工作条件, 同时要熟悉仪器的使用方法。不耐心、细致地去调整仪器和熟悉仪器, 而忙于进行测量, 这是初学者最易出现的毛病。实际上仪器的调整和熟悉也是学习实验的一个重要方面。

使用仪器测量时, 必须按操作规程进行, 在不明确操作规程及注意事项时, 千万不要动用仪器。以下列举几点共同性的注意事项, 实验时应参照执行:

(1) 安排仪器时, 应尽量做到便于操作观察和读数。

(2) 灵敏度较高的仪器(如物理天平、灵敏检流计等)不进行测量时应使仪器处于制动状态。

(3) 拧动仪器的旋钮或转动部分时动作要平稳, 不要用力过猛。

(4) 注意仪器的零点, 使用前要进行调零或记下修正量。

(5) 砝码、透镜、光学镜头、表面镀膜反射镜等器件, 为了保持其测量精确度和光洁, 不许用手去摸, 更不允许随使用布去擦。

(6) 停表、温度计、放大镜等小件仪器, 在用完之后要放到规定的盒中。

(7) 使用电学仪器时要注意电源及仪器的极性, 额定电压、额定电流、量限等, 在连接好电路后, 需经教师检查, 允许后方能接通电路。

(8) 不要随便动用别组的仪器或互换仪器, 仪器有问题时要及时向教师报告。

(9) 实验后要将仪器整理, 恢复到实验前的状态。

观测: 在明确了实验内容、步骤, 并能正确使用仪器之后, 可以进行正式观测。对实验中只要求观察的内容, 要进行认真反复的观察, 注意实验的条件和现象, 对要求测量的实验也应先进行定性的观察, 然后再开始测量。

记录: 实验记录是以后计算与分析问题的依据, 在实际工作中则是宝贵的资料, 记录应记在专用的记录本或纸上。对于记录应注意以下几个方面:

(1) 记录的内容包括日期、时间、合作者、所用仪器、必要的环境条件、简图、原始数据、有关的现象、随时发现的问题。

(2) 原始数据: 它是指从仪器上直接读出的未经任何运算的数值。

(3) 观测时, 对随时观察到的有关现象、发现的问题及读取的数据要立即进行记录, 这样可减少差错。

(4) 除有明确理由, 肯定某一数据有错误而不予记录外, 其它数据(包括有疑问的)一律记录。对有疑问的数据可作上标记, 但对任何已记录的数据无论有否“错误”一律不得涂改, (因为当时认为可能为“错误”的数据有时经过比较后竟是对的)。出

现异常数据时，应增加测量次数。

(5) 在作完全部记录后，应先自己认真检查一遍记录结果，如发现问题，应重做有关内容。（这对培养自己严肃、认真、负责的工作作风是很有益处的）然后，经教师检查合格，签字后方可整理仪器结束实验。

3. 实验报告

实验课后应及时处理实验数据，根据要求写出实验报告。实验报告是学生实验成果的文字总结，要用简明了的形式将实验结果完整而又真实地表达出来。写报告时要求内容简单扼要，字迹清楚，文理通顺，图表规范，数据完备和结论明确。

其内容应包括：

(1) 实验名称

(2) 实验目的

(3) 使用仪器

(4) 实验原理。简叙有关物理内容（包括电路图、光路图）及测量中依据的主要公式，式中各量的物理含义及单位，公式成立所应满足的实验条件等。

(5) 实验步骤。根据实际的实验过程写明实验步骤和有关注意事项。

(6) 数据表格与数据处理。记录中应有仪器编号、规格及完整的实验数据。写出数据处理的主要过程、图线及最后结果与误差分析。

(7) 讨论和思考（包括回答复习思考题）。内容不限。可以是实验中现象的分析，对实验关键问题的研究体会，实验的收获和建议，对实验结论及误差原因的分析等等。

此外在撰写实验报告时还应注意如下原则：

(1) 实验报告是通过实验所取得成果的正规文字报告，应体现出实验者的工作、收获和体会。

(2) 实验报告的内容自始至终要统一完整，特别是目的、原理和结论要前呼后应、和谐一致，即原理是为实现实验目的提供理论根据，而结论则是说明目的达到的程度。

第一章 测量误差及数据处理基础

本章主要介绍测量误差估计，实验数据处理和实验结果表示等方面的初步知识，作为进入实验前的基础准备。这些知识不仅是在每一个物理实验中都要用到，而且是今后从事科学实验必须了解和掌握的。但是由于这部分内容涉及面很广，深入地讨论它已超出了本课程的范围。所以本章只对一些所必须用到的概念、公式、结论做初步的介绍，以满足后面教学的需要。

第一节 测量与误差的基本概念

一、测量

进行物理实验时，不仅要定性地观察物理变化的过程，而且要用物理的方法定量地研究各种物理规律，因此就要定量地测量出有关物理量的大小。为了进行测量，必须规定一些标准的测量单位：如规定质量的单位为“千克”；长度的单位为“米”；时间的单位为“秒”；电流强度的单位为“安培”等。一般地讲测量是人们通过特定的工具和方法从客观事物中获取数量观念的认识过程。具体地说：测量就是借助于量具和仪器将被测量与选作为标准测量单位的物理量进行比较的过程。

实验中测量分为两类：一类是用计量仪器和待测量直接进行比较就可获得测量结果的测量，称为直接测量，相应的物理量称为直接测得量。另一类是需依据待测量和几个直接测得量的函数关系求出待测量的测量，称为间接测量，相应的物理量称为间接测得量。

需要注意的是：一个物理量到底是直接测得量还是间接测得量，要由具体的实验过程来确定的，而不是一成不变的。

二、真值与误差

任何物质自身具有各种各样的特性，反映这些特性的物理量是客观存在的。在一定条件下，具有不依人的意志为转移的客观真实数值。我们把一个待测物理量客观上所具有的真实数值称为真值。

测量的目的是要获得待测量的真值。但是通过有限的实验手段能否获得真值呢？实践证明：测量结果都有误差，误差自始至终存在于一切科学实验和测量过程中。因为任何测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察力等，都不能做到绝对严密，所以待测量的测量值和待测量的真值也不能完全相同，它们之间总会存在或多或少的差异，测

量值与真值之差值就称为测量误差。测量误差的大小反映了测量结果的准确度，并与测量所依据的方法、理论、经历的时间均有关系。一般来说，测量所依据的理论、方法越多，所用的仪器装置越复杂，经历的时间越长，引入测量误差的机会和可能就越多。

测量误差可以用绝对误差表示，也可以用相对误差表示。

绝对误差 = | 测量结果 - 被测量的真值 |

相对误差 = $\frac{\text{测量的绝对误差}}{\text{被测量的真值}}$ (用百分数表示)

绝对误差与测量值具有相同的单位，相对误差是无单位的纯数。

在测量误差必然存在的情况下，测量的任务是：

1. 设法将测量值中的误差减至所要求的范围之内。
2. 求出同一测量条件下，多次测量得到的待测量的最近真值（最佳值）
3. 估计最近真值的不确定程度。

因此，为了得到较满意的实验结果，我们必须研究误差的性质和来源，并有针对性地采取适当的措施。

三、测量误差的种类

根据误差的性质、来源及对测量结果的影响，误差可分为：系统误差和随机误差，在测量结果中这两类误差是混杂在一起出现的，但必须分别讨论其规律，从而设法减小误差。

四、系统误差

系统误差是在对同一被测量的多次过程中，保持恒定或以可预知方式变化的测量误差的分量；是由于偏离测量条件或测量方法不完善等因素引入的按某种确定规律出现的测量误差。

产生系统误差有以下几个方面的原因：

1. 仪器误差：由于所用仪器量具本身构造上的不完善或仪器未经很好校准而产生的误差。例如：天平两臂不等长、仪器的刻度不准确、仪器的零点没有校准等。

2. 环境误差：由于外界环境条件变化所引入的误差。如温度、压力、电磁场等没有达到预计的情况或发生变化等。环境性质的变化不仅会影响仪器的工作条件和各测量量之间的关系，甚至会影响被测量本身。

3. 方法误差：由于实验方法不完善或这种方法所依据的理论本身具有近似性等原因所引入的误差例如：称重时忽略了空气浮力的影响，测长时未考虑热胀冷缩的因素、测电阻时未考虑电表内阻的影响等。

4. 装置误差：由于实验装置没有规定的条件下或不满足实验条件的情况下使用导致的误差。例如：在做某些几何光学实验时，各透镜未调整到同轴等高；在单摆测重力加速度时，公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{g}{l}}$ 的成立条件是摆角 $\theta < 50^\circ$ ，但在实验时，单摆的摆角没有满足该实验条件，将引入误差。

5. 人为误差：是由于观测者本身生理和心理特点造成的误差。例如：由于个人分

辨能力的高低，固有习惯使读数始终偏大或偏小，由于个人反应速度的不同使测量某一物理量时的操作总是有超前或滞后的趋势。

由于系统误差的出现一般都有较明确的原因和确定的规律，因此，可以通过校准仪器、改进实验装置和实验方法，或对测量结果进行理论上的修正，使系统误差加以消除或减小。发现和减小实验中的系统误差是一个困难的任务，需要对整个实验所依据的原理、方法、测量步骤、所用仪器等可能引入误差的因素一一进行分析。一个实验结果是否正确，往往就在于系统误差是否已被发现并是否予以消除。因此，对系统误差不能轻易放过。

五、随机误差

随机误差是在对同一被测量量的多次测量过程中绝对值与符号以不可预知的方式变化着的测量误差的分量。

这种误差是实验中各种因素的微小变动性所引起的。如实验装置和测量机构在各次调整操作上的变动性、测量仪器的指示数值的变动性及观测者本人在判断和估读上的变动性……，这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量的平均值发生有涨落的变化，这些变化就是各次测量的随机误差。随机误差的出现，就某一观测值来说是没有规律的，其大小和方向都是不能预知的，但对一个物理量进行 n 次测量时，只要 n 是足够大的，随机误差将服从一定的统计规律，即：

1. 比真值大或比真值小的测量值出现的机会相等。
2. 误差较小的测量值比误差较大的测量值出现的机会多。
3. 绝对值很大的误差出现的几率近于零。

这一规律在测量次数越多时表现得越明显，它就是称之为正态分布的一种最典型的分布规律。

由上述可知：通过增加测量次数，以各次测量的算术平均值作为测量结果时可以减小随机误差。但也应注意的是：测量次数的增加虽然对提高算术平均值的可靠性是有利的，但不是测量次数越多越好。因为测量次数太多必定要延长测量时间，给保持稳定的测量条件增加困难，反而会引起较大的误差。另外，增加测量次数只能对降低随机误差有利，而与系统误差的减小无关，所以实际测量次数不必过多。一般科学研究中取10~20次，而在物理实验中取5~10次。

六、仪器误差

测量是用仪器和量具进行的，而仪器或量具本身也不是理想的，使用时也会带来测量误差。仪器误差是指在正确使用仪器的条件下，测量所得结果的最大误差限。任何仪器都存在误差，通常说仪器的精确度高，是指使用该仪器时测量值的误差较小，而仪器的灵敏度高是指由于测量量的微小变化将引起示值的较大变化。二者之间存在内在的联系。

仪器误差也包含系统误差和随机误差两个部分，究竟哪个因素为主，要具体分析。一般级别较高的仪器主要是随机误差，级别较低的仪器或工业仪表则主要是系统误差。

物理实验中所遇到的多数仪器都是由厂家或计量机构参照国家标准给出了精确等级或允许误差范围。一般可直接查出或根据仪表级别、量程等算出。为简化处理，我们约

定：在本课程中，仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 一般取仪表、器具的示值误差限或基本误差限。

第二节 直接测量结果与随机误差的估计

在测量过程中，一般系统误差和随机误差是共同存在的，但由上面的介绍可知：系统误差可以通过采取措施加以减小或消除。因此，在以下讨论中，我们假定没有系统误差存在，只存在随机误差。

一、以多次测量值的平均值代表测量结果

由于测量中误差总是存在的，因而真值只是一个理想化的概念，而且对于某一待测量进行多次测量的测量数值也不会完全一样。那么怎样最好地表示测量结果，使它最合理地代表真值呢？常用的是：在测量条件不变的情况下，以多次测量结果的算术平均值作为测量的结果。计算公式为：

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

其中 n 为多次测量的次数， X_1 、 X_2 、 $\dots$ 、 X_n 为各次测量值。

根据误差的统计理论，在无系统误差的前提下，一系列 n 次测量的数据中，测量值的平均值最接近真值，尤其是当 $n \rightarrow \infty$ 时， $\bar{X} \rightarrow$ 真值。我们把它称为最近真值。

二、多次测量结果的随机误差估计

由于真值不能确定，所以测量结果的误差也只能估计。对随机误差作估计的方法有很多种，科学实验中常用标准偏差来估计测量的随机误差。

1. 残差：若以多次测量的平均值表示测量结果，则每一个测量值 X_i 与平均值 $\bar{X}$ 之差称为残差。写作：

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X} \quad (2)$$

显然，这些残差有正、有负、有大、有小，常用“方均根”法对它们进行统计，得到的结果就是单次测量的标准偏差。常以 S_x 表示：

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}} \quad (3)$$

它表示在相同条件下，对同一物理量作 n 次测量时，测量值的分散程度，即精密度的高低。现在许多计算器上都有这种统计计算的功能，实验者可直接用计算器求得 $\bar{X}$ 和 S_x 的值。

第三节 接测量结果的表示和总不确定度的估计

一、直接测量结果的表示

表示完整的测量结果，应在给出被测量的量值 X_0 的同时标出测量的总不确定度 Δ ，并写成以下形式：

$$X = X_0 \pm \Delta \quad (4)$$

其中 X_0 是对已经确定系统误差分量(即绝对值和符号都确定的已可估算出来的误差分量)进行修正后的测量结果。可由单独一次测量的测量值 x_1 或多次测量的平均值 $\bar{X}$ 减去已定系统误差分量后得到， Δ 是测量的总不确定度：即由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度，是表征被测量的真值所处量值范围的评定。其实质是对误差的一种估计。式(4)表示：被测量的真值在 $(X_0 - \Delta, X_0 + \Delta)$ 的范围之外可能性(概率)很小。

二、不确定度的估计

参考国际计量委员会通过的《BIPM实验不确定度的说明建议书INC-1[1980]》的精神，普通物理实验的测量结果表示中(在已定系统误差修正后)：总不确定度 Δ 从估计方法上可分为两类： A 类，多次重复测量时用统计方法计算出的分量 Δ_A 。 B 类，用其他方法估计出的分量 Δ_B ，它们可用方和根合成：

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (5)$$

在普通物理实验中对同一量作多次直接测量时，只要测量次数 $5 < n \leq 10$ 时：就可直接取 $\Delta_A = S_x$ ，即把单次测量的标准偏差 S_x 的值当作多次测量中用统计方法计算的总不确定度 Δ_A 。必须注意的是：标准偏差 S_x 和总不确定度中 A 类分量 Δ_A 是两个不同的概念。上述约定只是一种最方便的简化处理方法。

同时还约定：在普通物理实验教学中，把 Δ 仪简化地直接当作总不确定度 Δ 中用非统计方法估算的分量 Δ_B ，即： $\Delta_B = \Delta_{\text{仪}}$ 。这也是一种方便简化的处理方法。因为 $\Delta_{\text{仪}}$ 中通常也包括了未定系统误差等部分。于是式(5)可以写为：

$$\Delta = \sqrt{S_x^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (6)$$

可以证明：在测量次数 $n > 5$ 的条件下，被测量的真值落在 $X_0 \pm \Delta$ 范围内的可能性(概率)，已大于或接近95%。

在式(6)中：如果 $s_x < \frac{1}{3}\Delta_{\text{仪}}$ ，或受条件限制而只进行了一次测量时， Δ 可以简单地用仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 来表示，这时式(5)中用统计方法计算的 A 类分量虽然存在，但不能以公式(3)算出。当实验中只要求测量一次时， Δ 取 $\Delta_{\text{仪}}$ 的值，并不说明只测一次比测多次时 Δ 的值变小，只说明 $\Delta_{\text{仪}}$ 和 $\Delta = \sqrt{s_x^2 + \Delta_{\text{仪}}^2}$ 估算出的结果相差不大，或说明整个实验时该被测量的 Δ 估算要求能够放宽或必须放宽。

第四节 间接测量的结果表示和不确定度的合成

多数物理实验是要求获得间接测量结果，而间接测量结果是由若干个直接测量值按照一定的函数关系（测量公式）求出来的。

一、间接测量量的最佳值

设间接测量值 N 与若干个相互独立的直接测量值 X 、 Y 、 Z 、……有下述函数关系：

$$N = f(X, Y, Z, \dots) \quad (7)$$

则间接测量的最佳值 N 为：

$$\bar{N} = f(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \dots) \quad (8)$$

其中 $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 、 $\bar{Z}$ …… 为各直接测量值的最佳值。若某一直接测量值系单独一次测量，则以单独一次测量值代入计算。

由于间接测量结果是由各相互独立的直接测量结果按式(8)计算出来的，所以各直接测量的不确定度最后就必然影响到间接测量结果，使其也具有相应的不确定度 Δ_N 。

二、间接测量结果的不确定度的合成

如设式(8)中各相互独立的直接测量量 X 、 Y 、 Z ……的不确定度分别为 $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \dots$ ，则在普通物理实验中间接测量结果的总不确定度可按以下两式来简化地计算：

$$\Delta_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \Delta_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \Delta_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \Delta_z^2 + \dots} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln F}{\partial x}\right)^2 \Delta_x^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial y}\right)^2 \Delta_y^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial z}\right)^2 \Delta_z^2 + \dots} \quad (10)$$

式(9)适用于和差形式的函数，式(10)适用于积商形式的函数。

可以看出，总不确定度计算公式与数学中的全微分公式基本相同，不同之处是：(1)要用不确定度 Δ_x 代替微分 dx 等，(2)要考虑到不确定度合成的统计性质。

在一些简单的测量问题中，对于初学者也可以采用绝对值合成的方法，即：

$$\Delta_N = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \Delta_x \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \Delta_y \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \Delta_z \right| + \dots \quad (11)$$

$$\frac{\Delta_N}{N} = \left| \frac{\partial \ln F}{\partial x} \Delta_x \right| + \left| \frac{\partial \ln F}{\partial y} \Delta_y \right| + \left| \frac{\partial \ln F}{\partial z} \Delta_z \right| + \dots \quad (12)$$

这种合成方法所得的结果一般偏大，与实际的不确定度合成情况可能有较大出入，是一种较简单、粗略的处理方法；适合初学者或进行误差估算时使用。而在科学实验中一般都采用方和根合成来估算间接测量结果的标准偏差的不确定度。

例：已知一圆柱体的质量 $M = 14.06 \pm 0.01 \text{ g}$ ，高度 $H = 6.715 \pm 0.005 \text{ cm}$ ，用千分尺（仪器误差 $\Delta_{\text{仪}} = 0.004 \text{ mm}$ ）测得直径 D 的数据如下表，求圆柱体的密度 ρ 及不确定度 Δ_ρ 。

次数 <i>i</i>	1	2	3	4	5	6
$D \text{ (cm)}$	0.5642	0.5648	0.5643	0.5649	0.5649	0.5646

解：先计算直径 D 的测量结果、 D 的最佳值：

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i = 0.56447(\text{cm})$$

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum (D_i - \bar{D})^2}{n-1}} = 0.0003577 = 0.00036(\text{cm})$$

(直接按 S_x 键得到)

$$\Delta_{\text{仪}} = 0.0004(\text{cm})$$

D 的不确定度 Δ_D 为：

$$\Delta_D = \sqrt{S_D^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} = 0.0005645 \approx 0.0006(\text{cm})$$

所以：

$$D = \bar{D} \pm \Delta_D = 0.5645 \pm 0.0006(\text{cm})$$

$$\text{圆柱体的密度公式为：} \rho = \frac{4M}{\pi D^2 H}$$

$$\text{其最佳值为：} \bar{\rho} = \frac{4\bar{M}}{\pi \bar{D}^2 \bar{H}} = \frac{4 \times 14.06}{\pi \times 0.5645^2 \times 6.715} = 8.366(\text{g/cm}^2)$$

由于其函数关系为积商形式，所以先算 $\frac{\Delta_\rho}{\rho}$ 较方便。

$$\ln \rho = \ln \frac{4}{\pi} + \ln M - 2 \ln D - \ln H$$