大学物理实验

（第2版）

College Physics Experiment

(2nd Edition)

苗明川　陈　彦　严琪琪　熊　畅　王　菁　编著

Miao Mingchuan　Chen Yan　Yan Qiqi　Xiong Chang　Wang Jing

北京航空航天大学出版社

BEIHANG UNIVERSITY PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

大学物理实验

（第2版）

College Physics Experiment

（2nd Edition）

苗明川　陈　彦　严琪琪　熊　畅　王　菁　编著

Miao Mingchuan　Chen Yan　Yan Qiqi　Xiong Chang　Wang Jing

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是针对外国留学生在华学习大学物理实验课程的基础教材，为适应留学生中文班和英文班的不同要求，分别用中文和英文两种语言编写。全书分为物理实验基本知识、基础实验、综合实验和设计性实验四部分。在总体设计上，力求贯彻以学生为本的理念，注重基础性、实践性、探索性、开放性的有机统一，并根据留学生的学习特点对实验内容进行了调整。在突出基本技能训练的同时，增加了综合实验、设计性实验等内容，并且注意兼顾理工科各专业的教学应用。

本书可作为60学时左右外国留学生普通高等院校理工科各专业大学物理实验教材，也可作为教师备课或学生学习的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 = College Physics Experiment : 汉、英 / 苗明川等编著. -- 2版. -- 北京 : 北京航空航天大学出版社，2018.11

ISBN 978-7-5124-2706-8

Ⅰ. ①大… Ⅱ. ①苗… Ⅲ. ①物理学—实验—高等学校—教材—汉、英 Ⅳ. ①O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第092906号

版权所有，侵权必究。

大学物理实验(第2版)

College Physics Experiment(2nd Edition)

苗明川　陈　彦　严琪琪　熊　畅　王　菁　编著

Miao Mingchuan　Chen Yan　Yan Qiqi　Xiong Chang　Wang Jing

责任编辑　冯　颖

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191)　http://www.buaapress.com.cn

发行部电话：(010)82317024　传真：(010)82328026

读者信箱：goodtextbook@126.com　邮购电话：(010)82316936

北京九州迅驰传媒文化有限公司印装　各地书店经销

*

开本：787×1 092　1/16　印张：18　字数：461千字

2018年11月第2版　2018年11月第1次印刷

ISBN 978-7-5124-2706-8　定价：68.00元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题，请与本社发行部联系调换。联系电话：(010)82317024

前 言

本书是根据高等学校物理实验课程的新教学基本要求，结合国内各高校物理实验教学的新发展，并针对北京航空航天大学物理实验教学改革新变化，为外国留学生学习物理实验课程而编写的。本教材自 2005 年开始进行编写，经过十多年的努力日臻完善，本书是北京航空航天大学物理实验教学的教师们、助教研究生对广大留学生长期进行教学实践的产物。

随着来华留学生规模的不断扩大，在积极保证教学质量、严格规范管理的背景下，开展双语实验教学已成为趋势，这也是国内各大学留学生教育面临的重大课题之一。北航每年接收来自几十个国家和地区的数百名本科留学生。他们的文化背景不同，中文水平也有很大差异，为做好留学生实验教学工作，迫切地需要为他们提供具有针对性的教学方案，包括专门开设针对留学生的物理实验课程、编写实验教材等。

实验类课程是理工科的基础，实践类物理课程也是留学生们所遇到的首门实验类课程。以前的留学生实验课是与国内学生同堂上课，由于语言和知识结构的不同，留学生很难在短时间内适应实验课教学方式。近年来我校的教学实践也表明，留学生对实践类课程教学模式十分不适应，对实验类课程的学习兴趣下降，实验课程成绩很不理想，迫切需要一本针对性强的物理实验教材，同时国内学生也有物理实验课程英语教学的需求。

本书编写的指导思想是以学生为本，有利于学生打好基础和进行综合性、设计性实验的学习与实践，有利于强化实验课的基础知识、基本技能和基本方法的训练，有利于调动学生的学习积极性。本书分为以下四部分：

1. 物理实验基本知识：包括测量与不确定度、有效数字及其运算法则、实验数据处理的基本方法三部分。我们根据新的教学基本要求进行了认真精选与改造，使之在内容安排、各部分衔接和数据处理讲解等方面，具有自己的特色。

2. 基础实验：包括弹性模量、热功当量、示波器的使用、电位差计、牛顿环、迈克尔逊干涉仪和电阻测量等基础实验，这些选题既反映了题目的新颖性、有明确的应用背景，又突出了基础训练的价值。

3. 综合实验：包括晶体的电光效应、声源定位、微波和布拉格衍射、全息照相、分光仪、密立根油滴、磁阻传感器、双棱镜干涉、平板玻璃折射率测定实验等，融入了一批体现实验内容现代化的新实验，其中也包括了北航物理实验室自行研制或开发的创新实验，例如声源定位等实验。

4. 设计性实验：在对学生进行比较严格、规范的设计性实验训练和考核以前，

在各基本实验里增加了一批内容上有联系、设计相对简单或以定性半定量估算为主的选做实验。例如在迈克尔逊干涉仪实验中安排的波长差测量、三用表设计实验中对常用电表的设计与校准等。这种设计性实验,不仅便于对初学者进行独立工作能力的初步训练,培养常规学习难以获得的实验素质(物理规律的灵活运用,物理现象的发现、观察和分析,物理量的量级估计等),而且有利于优秀实验人才的涌现和培养。

对一些物理思想好但训练环节少、操作"简单"的综合性实验,我们在内容上作了充实,如全息实验等;对推导比较复杂、学生普遍感到困难的内容或原理,从大学物理的层面作了新的阐述或推演,例如晶体的电光效应等。

本书分别用中文和英文两种语言编写。

物理实验教学是一项体现集体智慧和劳动结晶的事业,是一个日积月累、逐步完善和发展的过程,离不开一代又一代教师的努力,离不开实验室多年来的建设和发展。经过十多年的教学实践和探索,教材在内容和文字方面进行了多次改进,一些基本内容和素材也继承了以往教材的成果。感谢北航物理实验室的司徒活、王垠府、许萁英、张士欣、邬铭新、梁家惠等前辈们的工作,这本教材凝结了他们辛勤的付出。参加实验和教材编写的有苗明川、陈彦、严琪琪、熊畅、王菁、李英姿、郑明、王慕冰、李华、李朝荣、唐芳、梁厚蕴、黄江、董国波、高红等老师。本书还参考了许多兄弟院校和国外的相关教材。在实验改造,特别是新实验的开发中,许多实验管理人员和学生也付出了创造性的劳动。本书出版前,由苗明川、陈彦、严琪琪、熊畅、王菁等分别对全部内容作了补充、修改和完善,对一些章节进行了重写;在此基础上最后由苗明川、陈彦完成统稿。

感谢北航国际学院的赵海云、郭媛媛、王小凤、张欣、张艳、王佳怡等老师在本书编写过程中给予的大力支持。感谢 River Liao 先生、UCSD(University of California,San Diego)的 Zigea Lu 女士、北航国际学院的 S. Attiq Ur Rehman 先生在英文翻译和校对方面给予的大力帮助。感谢张蕾、谢军、王秭程等博士研究生和单冠乔、马欣瑶、周兰青、于佳玉、赵富伟、谭畅、温班宁、田然、黄新宇等硕士研究生为本书所做的工作。

尽管我们尽了最大努力,但受学识和水平所限,书中缺陷甚至错误在所难免,敬请读者和专家批评指正。

编　者

2018年8月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目 录

中 文 篇

绪 论 …… 3

第一部分 物理实验基本知识 …… 7

第一课 测量与不确定度 …… 7

第二课 有效数字及其运算法则 …… 11

第三课 实验数据处理的基本方法 …… 14

第二部分 基础实验 …… 22

实验一 拉伸法测金属丝的弹性模量 …… 22

实验二 电热法测量焦耳热功当量 …… 26

实验三 示波器原理与应用 …… 29

实验四 电位差计测电池电动势 …… 38

实验五 伏安法测电阻 …… 41

实验六 惠斯通电桥测中值电阻 …… 47

实验七 开尔文电桥测低值电阻 …… 52

实验八 牛顿环干涉实验 …… 57

实验九 迈克尔逊干涉仪(1) …… 62

第三部分 综合实验 …… 68

实验一 晶体的电光效应 …… 68

实验二 声源定位 …… 74

实验三 微波和布拉格衍射实验 …… 79

实验四 全息照相和全息干涉法的应用 …… 86

实验五 磁阻传感器与地磁场测量 …… 95

实验六 分光仪的调整和使用 …… 101

实验七 密立根油滴实验 …… 107

实验八 平行平板玻璃折射率测定实验 …… 111

实验九 双棱镜干涉实验 …… 114

第四部分 设计性实验 …… 119

第一课 设计性实验基本要点 …… 119

第二课 单量程三用表的设计与校准 …… 120

第三课 迈克尔逊干涉仪(2) …… 123

English Version

PREFACE …… 127

PART Ⅰ BASIC KNOWLEDGE OF PHYSICS EXPERIMENT …… 131

Lesson 1 Measurement and Uncertainty …… 131

Lesson 2 Significant Figures and Laws in Operation …… 135

Lesson 3 Fundamental Methods of Data Processing …… 139

PART Ⅱ BASIC EXPERIMENT …… 148

Experiment 1 Young's Modulus …… 148

Experiment 2 Joule Mechanical Equivalent of Heat …… 153

Experiment 3 Principle and Application of Oscilloscope …… 157

Experiment 4 Potentiometer and Applications …… 167

Experiment 5 Measurement of Resistance with Voltammetry …… 172

Experiment 6 Measurement of Medium Resistance with Wheatstone Bridge …… 180

Experiment 7 Measurement of Low Resistance with Kelvin Bridge …… 185

Experiment 8 Newton's Rings …… 192

Experiment 9 Michelson Interferometer (1) …… 198

PART Ⅲ COMPREHENSIVE EXPERIMENT …… 205

Experiment 1 Electro-optic Effect of the Crystal …… 205

Experiment 2 Simulation of Sound Localization …… 213

Experiment 3 Microwave Experiments and Bragg Diffraction …… 220

Experiment 4 Holography and Application of Holographic Interferometry …… 230

Experiment 5 Magnetoresistive Sensor and Detecting of the Geomagnetic Field …… 241

Experiment 6 Adjustment and Use of Spectrometer …… 248

Experiment 7 Millikan Oil Drop Experiment …… 257

Experiment 8 Measuring the Refraction of Plate Glass …… 262

Experiment 9 Biprism Interference Experiment …… 265

PART Ⅳ EXPERIMENT DESIGN …… 272

Lesson 1 Design Experiment …… 272

Lesson 2 Design & Calibration of Single-range Multimeter …… 273

Lesson 3 Michelson Interferometer (2) …… 277

参考文献 …… 280

中文篇

绪 论

物理学是研究物质运动的普遍性质和基本规律的科学，其本质上是一门关于实验的科学。物理实验在物理学中占有极其重要的地位。

古希腊哲人亚里士多德(Aristotle，Αριστοτέλης，公元前 384—公元前 322 年)认为，研究事物的本质和原因应从思辨开始。在他看来，科学是以思辨为基础的，而不是实践和创造。关于物体下落过程，他有如下著名的论断：当物体从高空下落时，其下落的快慢同物体的质量成正比，物体越重，下落的速度越快；物体越轻，下落的速度就越慢。这一理论为人们所接受经过了 1 800 年之久。这是典型的以思辨为基础得出的结论。在此基础上有如下的推论：一个质量为 10 磅(1 磅≈453.59 克)的物体下落时要比质量为 1 磅的物体快 10 倍。

意大利物理学家、数学家伽利略(Galileo，Galilei，公元 1564—1642 年)发现这一理论在逻辑上是自相矛盾的。

伽利略进行了如下假设：如果有一大一小两块石头从高处下落，大石头以某一速度下降，则小石头会以慢一些的速度下降。问题是：如果将这两块石头捆在一起，那这块质量等于两块石头质量之和的新石头，将会以何种速度下降呢？按照亚里士多德的逻辑，势必得出截然相反的两个结论：

结论 1：因为在大石头上加了以较慢速度下降的小石头，新石头将以小于原来大石头的速度下降，也就是说新石头将比原来大石头下降得更慢。

结论 2：由于把两块石头捆在一起，其质量大于原来的大石头，新石头将以大于原来大石头的速度下降，也就是说新石头将比原来大石头下降得更快！

这两个互相矛盾的结论显然不能同时成立，可见亚里士多德的论断是不符合逻辑的。

伽利略进一步假定，物体下降速度与它的质量无关。如果两个物体受到的空气阻力相同，或者将空气阻力略去不计，则两个质量不同的物体将以同样的速度下落，同时到达地面。

为了证明这一观点，25 岁的伽利略，同他的辩论对手在比萨斜塔上进行了如下实验：将一个质量为 100 磅和一个质量为 1 磅的铁球同时抛下。在众目睽睽之下，两个铁球出人意料地差不多同时落地！

事实证明，质量不同的物体，从同一高度坠落，由于重力加速度相同，它们将同时着地，从而推翻了亚里士多德的错误论断。这就是被伽利略所证明的、现已被人们普遍接受的自由落体定律。这就是“比萨斜塔实验”——历史上著名的物理实验，此实验也成为“物理学是以实验为基础的科学”的最好例证。

一、大学物理实验课的任务

物理实验是高等学校理工科学生进行科学实验基本训练的一门基础课程，是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端。通过物理实验课程的学习，将使学生系统而熟练地掌握科学实验的理论、方法和技能。通过物理实验，还将使学生了解科学实验的主要过

程和基本方法,为今后的科学实验活动打下很好的基础。同时物理实验的思想方法、数学方法以及分析问题和解决问题的方法也将对学生的智力发展和今后的科研工作有很大帮助。

物理实验课程的具体任务是:

① 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验知识,加深对物理学原理的理解。

② 培养与提高学生的科学实验能力。其中包括:

- 自行阅读实验教材和资料,做好实验前的准备。
- 借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器。
- 正确记录和处理数据,绘制表格、曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告。

③ 培养与提高学生的科学实验素养。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风,认真严肃的工作态度,主动研究的探索精神和遵守纪律、爱护公物的优良品德。在实验中要求学生掌握所采用的实验方法和基本测量方法,培养良好的实验习惯,仔细观察和分析实验中的现象。要严格进行基础训练,培养动手能力。

二、物理实验课程的主要环节

物理实验课是学生在教师指导下独立进行实验的一种实践活动,主要有以下三个环节。

1. 课前预习

预习是做实验的准备工作。首先要认真阅读实验教材及相关资料,明确本次实验所要达到的目的,清楚实验的内容,以此为出发点,了解实验所依据的理论和采用的方法;掌握控制物理过程的关键和必须满足的实验条件;了解实验所要进行的内容和实施的步骤,仪器的选择、安排和调整;以及了解实验中可能出现的问题等。在此基础上写出实验预习报告。

预习是实验过程的开始,预习的好坏是能否主动、顺利地进行实验的关键。

2. 实验操作

在实验课上,一般先由教师对实验作重点讲解,介绍仪器和实验中的注意事项。在实验过程中,要按预习安排进行实验,了解所规定的实验步骤的道理;掌握正确的调整操作方法;注意观察现象,分析其产生的原因;正确、完整地填写表格、记录数据,特别要注意有效数字和数据单位;最后由指导教师在数据记录单上签字。

实验中要多观察、多动手、多分析、多判断,不要存有侥幸心理,不要机械地进行操作,不要盲目地进行实验。实验操作是物理实验的核心,是学生主动研究、积极探索的重要环节。

3. 实验报告

实验报告是对实验过程的全面总结,是实验交流的文字材料。主要包括实验数据的处理和误差分析;正确地表示出测量结果,并对结果作出合乎实际的分析和说明;记录并分析实验中发生的现象;回答思考题等。实验报告的要求:文字通顺,条理清楚,图表正确,数据完备,结果明确。这是对学生的基本要求,也是学生应具备的基本能力。

实验报告的内容:实验报告分为实验预习报告和课后实验报告两部分。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

A. 实验预习报告

① **实验名称** 表示做什么实验，是实验的选题，也是实验的题目。

② **实验目的** 说明为什么做这个实验，简述实验预期目标。

③ **实验原理** 阐明实验的理论依据，写出待测量计算公式的简要推导过程，画出有关的示图(原理图或装置图)。

④ **实验仪器** 列出主要仪器的名称、型号、规格、精度等。

⑤ **实验步骤** 对整个实验过程进行简述，总结主要的实验步骤，写明注意事项。

⑥ **数据表格** 设计出实验表格和列表。

预习报告在上课前提交给教师审阅，经教师认可后方可进行实验。

B. 课后实验报告

① **测量数据记录** 把实验中记录的数据填入预习报告的表格中，包括正确的有效数字和测量量的单位(在报告中要附上教师签字的原始记录)。

② **数据处理和不确定度表示** 对实验结果进行计算或作图表示，并对测量结果进行评定，计算不确定度，写出主要的计算步骤、结果以及正确的单位。

③ **实验分析与讨论** 按要求完成思考题。对实验进行分析与讨论，对实验提出建议，简述实验的心得体会。

课后实验报告是在预习报告的基础上完成的，两者为一份报告。将数据、作图、计算结果、不确定度、思考题、分析和讨论等写在预习报告之后，就构成了一份完整的实验报告。

三、物理实验课的成绩评定

为了更好地促进大学物理实验教学，提高实验课教学质量，根据物理实验课的实际教学情况，制定本课程成绩评定标准。第一学期：误差理论和数据处理方法随堂测试(10 分)，基本实验(60 分)，期末考试(笔试 30 分)。第二学期：综合实验(60 分)，实验操作考试(40 分)。

四、物理实验学生守则

为保证物理实验教学的顺利进行，培养同学们实事求是的科学态度，树立善于思考、勤于动手的良好学风，进行物理实验需要遵循以下规则：

① 按时上课，迟到超过 20 分钟，将不能进行本次实验。

② 实验前要写预习报告，无预习报告者不能进行实验。

③ 上次实验报告应在下次实验前交给老师。

④ 爱护实验仪器，注意安全。

⑤ 实验完成后，任课教师审核数据签字，并将实验仪器整理好，关闭电源、整理桌面、座椅归位后，安静地离开实验室。

⑥ 因故不能准时到课的学生，须在课前向老师请假。不交报告者，不能参加考试。

五、大学物理实验课的重要性

任何自然科学都是以实验为基础的,物理学科更是如此。物理学的许多理论是在一定的实验事实基础上总结概括出来的。也有一些理论是先提出一些假说,经过实验的验证而成为公认的理论,如果被证明是错误的,就需要对假设进行修正或推翻。

诺贝尔物理学奖获得者密立根(Robert Millikan,1868—1953年)对物理学中理论和实验的关系有过如下精辟的阐述:"科学是用理论和实验这两只脚前进的,有时候这只脚先迈出一步,有时候是另一只脚先迈出一步,但是前进要靠两只脚来完成;先建立理论然后做实验,或者是先在实验中得出了新的现象、关系,然后再迈出理论这一步,并推进实验前进,如此不断交替进行"。

著名实验物理学家丁肇中博士(Samuel Chao Chung Ting ,1936—)关于实验有如下精彩论述:"自然科学理论离不开实验的基础,特别是物理学是从实验中产生出来的"。

中国古代著名思想家荀子(公元前313—公元前238年)主张:"不闻不若闻之,闻之不若见之,见之不若知之,知之不若行之,学至于行之而止矣。行之,明也"。

希望同学们记住大师们的名言,以锲而不舍、金石可镂的精神,做好物理实验并深入理解其理论内涵,为今后专业课程的学习打下良好的基础。

第一部分　物理实验基本知识

第一课　测量与不确定度

测量是物理实验中重要的基础部分。

测量的定义：就是用计量仪器对被测物理量进行量度，量度所得的数值就是测量值。

按照获得测量结果方法的不同，测量可分为直接测量和间接测量。

直接测量：直接从计量仪器上得到待测量大小。例如用米尺测量长度、用天平测量质量、用秒表测量时间和用电流表测量电流等都是直接测量。

间接测量：待测量是由若干个直接测量量经过一定的函数关系运算后获得的。例如测量长方形的面积时，先测量其边长 a 和 b，再由公式计算出面积 $S=a\cdot b$，这里的 a、b 是直接测量量，S 就是间接测量量。

1.1　真值与误差

真值：任何一个物理量都有其客观大小，这个客观量称之为真值(A)。真值是某一物理量在一定条件下具有的客观的、不随测量方法的变化而变化的真实数值。最理想的测量就是能够测得真值。但是，对任何物体进行测量时，由于所使用的仪器系统本身的原因、测量方法的不同，以及测量过程中人为的随机性，都会造成测量结果与真值之间的不一致，即存在误差。作为测量结果，不仅要提供被测物体的量值大小和单位，还应该对量值本身的可靠程度作出表述，这种表述称为误差。

误差：测量值与真值之差。记为

$$\Delta N=N-A \tag{1.1-1}$$

式中，N 是测量结果，A 是被测量的真值，ΔN 为测量误差，又称绝对误差。

误差是测量结果与客观真值之差，误差既有大小又有方向(正负)。

相对误差：绝对误差(ΔN)与真值(A)之比称为相对误差。相对误差记为

$$E=\Delta N/A\times 100\% \tag{1.1-2}$$

误差按其特征和表现形式分为三类：系统误差、随机误差及粗大误差。

(1) 系统误差

例：用天平称量物体的质量。由于制造、调整以及其他原因，天平横梁臂长不会绝对相等，因此测量结果与真值会产生偏离。如果天平左臂比右臂短，当待测物体放在左盘时，称量的结果将偏小，反之则偏大。我们称上述误差为系统误差，其定义如下：

在一定实验条件下，误差具有固定的大小和符号，或按一定规律变化的那一部分误差，称为系统误差。

产生系统误差的原因是多方面的,主要是仪器误差、理论误差、条件误差、个人误差等。

仪器误差:由仪器本身的原因造成的误差。如天平的左右臂不等长。

理论误差:由于测量所依据的理论公式本身的近似性,或实验条件未满足理论公式所要求的条件,或测量方法本身的因素造成的误差。如伏安法测电阻时,电表内阻的影响。

由于系统误差本身的特点,仅靠多次测量不能消除它。测量条件确定后,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。

(2) 随机误差

例:用停表测单摆的周期。由于多种原因,测量结果呈现出某种随机起伏的特点,如表1.1-1所列。

表1.1-1 单摆周期测量记录

测量次数 i	1	2	3	4	5	6
$50T_i$/s	109.70	110.022	109.83	110.12	109.93	109.78
T_i/s	2.194 0	2.200 4	2.196 6	2.202 4	2.198 6	2.195 6

上述误差称之为随机误差,其定义如下:

在实际测量条件下,多次测量同一量时,以不可预知的方式变化的那一部分误差称为随机误差。

随机误差的特点是其出现的随机性。在相同条件下,每次测量结果的误差其绝对值和符号以不可预定的方式变化,显示出没有确定的规律性;但就总体而言,服从统计规律。随机误差的这种特点使我们能够在确定的条件下,通过多次重复测量来发现它。

随机误差大都服从所谓的正态分布,这类误差又叫作偶然误差,是由众多的、不可能由测量条件控制的微小因素共同影响所造成的。

(3) 粗大误差

除系统误差和随机误差之外还有一种误差,是由于测量系统偶然偏离所规定的测量条件、方法或在记录、计算数据时出现失误而产生的误差,称为粗大误差(简称粗差)。

实际上粗大误差是一种测量错误,对这种数据应当予以剔除。

1.2 精密度、正确度和准确度

人们常用"精度"来笼统地描述测量结果的误差大小。但作为科学术语,应采用精密度、正确度、准确度来表述。具体定义分别如下:

精密度——表示测量结果中随机误差的大小程度。

正确度——表示测量结果中系统误差的大小程度。

准确度——表示测量结果与被测量真值之间的一致程度,其反映了测量结果中系统误差与随机误差的综合。

对以上三者更形象的说明请参见图1.1-1。


(a) 正确度好，精密度差


(b) 精密度好，正确度差


(c) 准确度好

图 1.1-1　精密度、正确度和准确度

1.3　不确定度

前面已经指出，误差是测量值与真值之差。真值是客观存在的，但在一般情况下不可能准确知道，因而误差通常也无法知道。为了对它进行定量的估计，我们引入一个新的概念——不确定度。测量不确定度用标准差 u 表示。一个完整的测量结果表达应包括该测量值 x 的最佳估计值 $\bar{x}$ 及其不确定度 u，即结果表示为

$$x=\bar{x}\pm u \tag{1.1-3}$$

式(1.1-3)表示真值可能出现在$(\bar{x}-u,\bar{x}+u)$的范围内，u 值越小，测量值越接近真值。不确定度是表示被测量真值在某个量值范围内的一个估计值，表示了由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度。测量结果的不确定度包含几个分量，按其数值评定方法，这些分量可归为两类：A 类不确定度和 B 类不确定度。

(1) A 类不确定度 u_a

A 类不确定度是指可以用统计方法计算和评定的不确定度，在物理实验教学中，我们约定 A 类不确定度为平均值的标准差，即

$$u_a=s(\bar{x}) \tag{1.1-4}$$

如果多次测量值分别为 x_1，x_2，…，x_k，则把算术平均值

$$\bar{x}=\frac{x_1+x_2+\cdots+x_k}{k}=\frac{\sum x_i}{k} \tag{1.1-5}$$

作为真值的最佳估计。

把平均值的标准偏差

$$s(\bar{x})=\sqrt{\frac{\sum(x_i-\bar{x})^2}{k(k-1)}} \tag{1.1-6}$$

作为平均值 $\bar{x}$ 的标准误差的估计值。

按照误差理论的高斯分布，平均值的标准误差 $s(\bar{x})$ 是一个描述测量结果的离散程度的统计参量。多次测量为 $\bar{x}$，则在$[\bar{x}-s(\bar{x}),\bar{x}+s(\bar{x})]$区间内包含真值的可能性为 68.3%。

A 类不确定度包括所有可随机化处理的误差，这既包括上面介绍的随机误差，也包括那些可作随机化处理的系统误差。其余的误差均按 B 类不确定度处理。

(2) B 类不确定度 u_b

用其他方法计算的不确定度分量。不可以采用统计方法评定与计算的不确定度分量统称为 B 类分量。在物理实验教学中，我们约定 B 类不确定度可由误差限 Δ_b 得到，即

$$u_b=\frac{\Delta_b}{\sqrt{3}} \tag{1.1-7}$$

式中,Δ_b 可根据计量部门、制造厂或其他资料提供的检定结论或误差限、仪器说明书上给出的允许误差限或示值误差、仪器的准确度等级以及仪器的分度值等获得。此类误差可视为均匀分布,$\Delta_b/\sqrt{3}$ 为均匀分布的标准差。

(3) 不确定度的合成

测量结果的不确定度是A类不确定度与B类不确定度的合成。不确定度合成的计算公式如下:

$$u=\sqrt{\sum_i u_{ai}^2+\sum_j u_{bj}^2}=\sqrt{\sum_i s_i^2+\sum_j u_{bj}^2} \tag{1.1-8}$$

(4) 测量结果的表述

测量结果的最终表达形式为

$$y=\bar{y}\pm u(\bar{y}) \tag{1.1-9}$$

相对不确定度为

$$E_r=u(\bar{y})/\bar{y}\times 100\% \tag{1.1-10}$$

1.4 练习题

1. 说明以下误差来源产生的是系统误差、随机误差和粗差中的哪一种?

① 测出单摆周期以推算重力加速度,因计算公式的近似而造成的误差;

② 当用停表测量单摆周期时,由于对单摆平衡位置判断忽前忽后造成的误差;

③ 因楼板的突然振动,造成望远镜中标尺的读数变化了约1 cm;

④ 由公式 $V=\frac{\pi}{4}d^2h$ 测量圆柱体积,在不同位置处测得直径 d 的数据因加工缺陷而离散。

2. 圆管体积 $V=\frac{\pi}{4}L(D_1^2-D^2)$,管长 $L\approx 10$ cm,外径 $D_1\approx 3$ cm,内径 $D\approx 2$ cm,哪一个量的测量误差对结果影响最大?(提示:比较不确定度传播系数)

3. 实验测得一组扭摆50个周期的数据,如果认为人眼的位置判断和启停响应能力不会超过扭摆周期的1/4,那么表1.1-2所列数据中是否有粗差存在?如果用统计判别的方法会怎样呢?

表1.1-2 习题3表

i	1	2	3	4	5
$50T_i$	1′10.36″	1′09.93″	1′10.12″	1′10.02″	1′09.90″

4. 测量结果表述成 $x\pm u(x)$,对此有三种看法:① 真值是 x;② x 的误差是 $u(x)$;③ 真值落在 $x-u(x)$ 到 $x+u(x)$ 之间。这些看法正确吗?为什么?

5. 有人说测量次数越多,平均值的标准偏差就越小,因此只要测量次数足够多,不确定度就可以实际减小到0,这样就可以得到真值。这种看法是否正确?

6. 推导表1.1-3中函数的不确定度和相对不确定度的表达式。

需要全本请访问 www.ertongbook.com