

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

唐海燕 主编

杨文艳 王全武 秦先明 副主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验

Daxue Wuli Shiyan

唐海燕 主编

杨文艳 王全武 秦先明 副主编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书是根据教育部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员会制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)的精神,并结合应用型工科本科院校的特色编写而成的。全书分为7章,共51个实验项目,其中纳入了一些与生产实践或科研有密切联系的、具有时代气息的实验项目(如单缝衍射在现代检测中的应用等实验项目),目的在于扩大学生的眼界和知识面,也利于提高学生的综合实验能力。

本书可作为理工科院校各专业的大学物理实验教材,部分较新的内容对于从事大学物理实验教学的高校教师具有很好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 唐海燕主编. —北京:高等教育出版社,2011.12

ISBN 978-7-04-033788-4

I. ①大… II. ①唐… III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 251081 号

策划编辑 郭亚嫒
责任校对 陈旭颖

责任编辑 郭亚嫒
责任印制 韩 刚

封面设计 于文燕

版式设计 余 杨

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 高等教育出版社印刷厂
开 本 787 × 1092 1/16
印 张 20.5
字 数 500 000
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2011年12月第1版
印 次 2011年12月第1次印刷
定 价 29.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 33788-00

前 言

大学物理实验课程是理工科高等院校对学生进行系列科学实验基本训练的公共必修课程,也是学生接受系统实验方法与实验技能训练的开端。大学物理实验课程覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法和手段,是培养学生科学实验能力,提高科学素质的摇篮。它在激发学生创新意识以及适应科技发展的综合能力等方面具有其他课程不可替代的作用。因此,抓好本课程的建设对于培养国家所需的科技人才能起到事半功倍的作用。

进入 21 世纪以来,大学物理实验课程发生了很大的变化。概括起来就是,本课程必须承担起学生创新精神、创新意识和创新能力培养的任务。这就要求大学物理实验课程与时俱进,对教学体系、教学内容、教学方法和教学手段进行深入的改革。

在重新审视以往教学模式的基础上,自 2007 年以来重庆科技学院物理实验中心对大学物理实验课程教学体系进行了重大改革,对原有实验项目进行整合,并对相应的实验仪器进行了更新换代。本教材是在总结近几年的工作基础上编写而成的。

本教材将一些具有时代气息的实验项目纳入了其中,比如“光敏电阻基础特性研究”、“巨磁电阻效应”、“数字存储示波器的使用”、“光学信号的抽样与还原”等;其次,本教材打破了近代物理实验与大学物理实验的界限,把一批近代物理实验融入大学物理实验中,如“密立根油滴实验”、“光电效应”、“弗兰克-赫兹实验”、“声光衍射”等;另外,本教材还增加了一些与生产实践和科研有密切联系的实验,如“单缝衍射及在现代检测中的应用”等。

本教材共分 7 章,绪论主要介绍物理实验课程的目的和任务,以及告诉学生本课程应注意的教学环节;第 1 章介绍测量误差、不确定度、有效数字以及主要的数据处理方法,其内容为课程的重点和难点,要求学生必须掌握;第 2 章介绍常用的物理实验仪器,由学生自己阅读;第 3 章介绍物理实验基本方法;第 4 章是开放式预备物理实验,共 6 个,是专门为那些在中学未做过物理实验的学生准备的,实验中心专门开放一间实验室并设置相应的仪器,只要学生进行了预习,随时可以自己独立地在这里完成本章的所有实验;第 5 章是基础物理实验,共 17 个,涵盖了力学、热学、电磁学、光学以及近代物理实验,学生应完成本章实验项目的 40%~60%;第 6 章为综合性实验,共 17 个,每个实验均涉及两个领域以上的技术,实验目的是巩固学生在基本实验阶段的学习成果,开阔眼界及思路,提高学生对实验方法和技术的综合运用能力;第 7 章是设计与研究性实验,共 11 个,要求学生自己设计实验方案并基本独立地完成实验的全过程,目的在于进一步提高学生的综合实验能力与科学研究素质。本教材中,每个实验均对学生提出相应的要求,并且留有思考题,以提高学生对该实验的认识。为了方便读者,主要实验仪器还附有相应的生产单位,以便查找。

本教材是重庆科技学院物理实验中心集体近几年教学改革成果的结晶。参加编著的有唐海燕、杨文艳、王全武、秦先明、杨达晓、方旺、陈恒杰、孙宝光、张家伟、兰云飞、陈震亚、向洵、陈学文、刘丰奎、董晓龙、樊玉勤、邓起宏、姚雪、刘春兰和汪雨寒(他们的署名已标注在相应的实验后),由唐海燕、杨文艳、王全武统稿,最后由唐海燕、陶纯匡审定。在这里,我们还要感谢已退休

的刘业厚教授,他为本教材提供了不少素材和有益的建议。

由于我们的水平有限,加之时间紧,编写工作量大,本教材中定有疏漏和不妥之处,望读者和各位同仁不吝赐教!

编 者

2011年4月30日

目 录

绪论	1
----	---

第 I 篇 实验理论

第 1 章 测量误差与数据处理	5
1.1 测量误差的基本知识	5
1.2 测量不确定度及其评定	10
1.3 有效数字	14
1.4 实验数据处理的基本方法	19
思考题	24
第 2 章 常用物理实验仪器	27
2.1 长度测量仪器	27
2.2 质量测量仪器	35
2.3 时间测量仪器	37
2.4 电磁测量仪器	40
2.5 常用光学仪器	48
2.6 温度测量仪器	51
第 3 章 物理实验基本方法	52
3.1 基本实验方法和测量方法	52
3.2 仪器调整与操作技术	56
3.3 物理实验基本操作规程	58
3.4 误差均分原则、测量仪器和测量条件的选择	59
3.5 测量次数的确定	61

第 II 篇 基础篇

第 4 章 开放式预备物理实验	65
实验 1 基本测量实验	65
实验 2 物体密度测量	68
实验 3 电流表、电压表的使用及测量电路	73
实验 4 电阻伏安特性的测量	78
实验 5 薄透镜焦距的测定	81
实验 6 气轨上测滑块的速度和加速度并验证牛顿第二定律	87
第 5 章 基本物理实验	95
实验 7 拉伸法测钢丝的杨氏模量	95

实验 8 转动惯量的测定	100
实验 9 液体表面张力系数的测量	103
实验 10 变温液体黏度的测定	107
实验 11 气体比热容比测定	110
实验 12 静电场的模拟	113
实验 13 用直流电桥测量电阻	118
实验 14 电位差计实验	120
实验 15 示波器的使用	128
实验 16 压力传感器特性实验	146
实验 17 用霍耳效应法测磁感应强度	148
实验 18 用霍耳传感器测量螺线管磁场	152
实验 19 亥姆霍兹线圈磁场的测定	154
实验 20 霍耳传感器测量铁磁材料的磁滞回线和磁化曲线	159
实验 21 分光计的调整与玻璃三棱镜折射率的测量	163
实验 22 等厚干涉——牛顿环和劈尖	170
实验 23 迈克耳孙干涉仪的调整与使用	176

第Ⅲ篇 综 合 篇

第 6 章 综合性实验	183
实验 24 固体导热系数的测量	183
实验 25 固体比热容的测量	186
实验 26 线膨胀系数测试实验	189
实验 27 非线性元件的伏安特性研究	192
实验 28 非平衡直流电桥的使用	195
实验 29 用双棱镜测钠黄光波长	202
实验 30 声光衍射与液体中声速的测定	206
实验 31 普朗克常量测定	209
实验 32 光电池伏安特性研究	212
实验 33 密立根油滴法测定电子电荷	215
实验 34 数字存储示波器的原理及使用	222
实验 35 空气、液体及固体介质的声速测量	231
实验 36 弗兰克-赫兹实验	237
实验 37 温差电动势及热机效率研究	241
实验 38 半导体热电特性研究	244
实验 39 光敏电阻基本特性研究	247
实验 40 霍耳位置传感器法测杨氏模量	250

第IV篇 自主学习篇

第7章 设计与研究性实验	259
实验 41 全息照相	259
实验 42 电表的改装与校准	264
实验 43 望远镜和显微镜的设计与组装	269
实验 44 单缝衍射及在现代检测中的应用	276
实验 45 光学信号的抽样与还原	280
实验 46 巨磁电阻效应实验	286
实验 47 核磁共振实验	291
实验 48 液晶电光效应实验	296
实验 49 微波实验	302
实验 50 光学信号的空间频谱与空间滤波	306
实验 51 光学相位滤波与透明材料相位缺陷的检测	310
附表	315

绪 论

物理学是自然科学中最重要、最活跃的学科之一。它是一门实验学科。物理实验和物理理论的发展,哺育着高新技术的成长和发展。物理实验是推动科学技术发展的有力工具,如计量、激光、半导体、大规模集成电路、电子学、真空等技术,无一不与物理实验有着直接或间接的联系。

物理实验常常是新兴科学技术的生长点,在推进科学技术的进步和国民经济的发展中起着重要的作用。由于实验是科学前沿最活跃的领域,当新的自然现象被发现和新的实验技术形成后,人们往往利用这些新成果,跟踪追击,扩大战果,发展出崭新的科学技术。

科学实验,首先是物理实验,和生产技术紧密相关。它有可能凭借实验室的优越条件,超越生产实践的某些局限性,走在生产实践的前面,为生产技术的发展开辟出新的道路。

科学史表明,近代以来自然科学的重大突破,一般不是直接来自生产实践,而是源于科学实验。例如,电磁感应定律的确立、狭义相对论的发现、量子理论的兴起、基因学说的形成等,都不是直接来源于生产实践,而是实验研究的结果。

爱因斯坦有句名言:“发展独立思考和独立判断的能力应该始终放在首位,而不应该把获得专业知识放在首位”。诺贝尔物理学奖获得者李政道也说过,动手多了会让人聪明。物理实验就是通过学生的动手动脑,让学生掌握基本的实验技能,学会基本的物理思想和基本的实验方法。

1. 物理实验课的目的

大学物理实验既是对学生进行科学实验基本训练的一门独立、必修的公共基础课程,又是学生进入大学学习后受到系统实验方法和实验技能训练的第一门实验课程,它为学生学习后续课程的实验和进行工程实验打下必要的基础。

2. 物理实验课的任务

(1) 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。

(2) 使学生学会阅读常用物理实验仪器说明书,学会仪器的调整及正确的使用方法。

(3) 使学生初步具备处理数据、分析结果和撰写实验报告的能力。

(4) 培养学生对待科学实验一丝不苟的严谨态度和实事求是的工作作风。

3. 物理实验的主要环节

(1) 实验预习

实验前应认真阅读教材和有关资料。对实验原理和所用的实验基本方法,特别是做好实验的关键环节,应做到心中有数,并简练地写在预习报告上,预习报告中要自行设计数据记录表格。预习报告合格者方可开始实验。

(2) 实验操作

学生进入实验室后,首先要仔细阅读本实验室的有关规则和本实验的有关注意事项,做到有的放矢。实验时先粗调后细调实验仪器,其中粗调是极其重要的一步。必须在粗调好后才能进行细调。

实验时观察是基础,测量是第二位。必须在观察到的现象正确时才能测量,否则测量就毫无意义。

不要用铅笔作记录和画图,也不要养成先随便作记录,准备再誊写的不良习惯。记录数据时不得拼凑、涂改或事后追记数据,记错数据应该用钢笔或圆珠笔在错的数据上规整地轻轻划上一道,在旁边写上正确数据,以使正、误数据都能看清楚,记录时应注意有效数字,不能伪造数据,伪造数据是不道德的。

实验时要爱护仪器,严守实验室规则和仪器操作规程,损坏仪器者应照章赔偿。

实验结束后,将原始数据交指导教师签字后才可整理仪器,放好桌凳,再作清洁,经同意后方可离开实验室。

(3) 撰写一份简洁、清楚、工整而富有见解的实验报告

撰写实验报告应注意以下事项:

① 班级、学号、姓名、指导教师、日期等应完整、清楚。

② 实验原理应简单明了,不要照抄教材,以实验实际情况为准。

③ 数据记录和处理是报告的核心,要认真计算和处理。

④ 回答思考题。

⑤ 小结。对实验中感到最深刻、最有收获的地方,可以作一小结,也可对误差进行分析。原始记录随同实验报告一起在指定时间内上交。

4. 物理实验守则

(1) 学生应在指定时间上交预习报告,预习不合格者不能进入实验环节。

(2) 学生应按指定实验桌对号入座,认真实验。

(3) 严格遵守实验室有关规定,无特殊原因不要擅自动用其他实验桌上的仪器。

(4) 不要随意离开自己的实验桌,不要大声喧哗影响他人。

(5) 以科学态度记录数据,不要伪造数据。

(6) 爱护实验设备,如有损坏仪器,应及时报告老师,凡因不遵守操作规程致使仪器损坏者,需照章赔偿。

(7) 实验后,数据交老师签字,所用物品要整理好,值日生做好值日。

(8) 认真完成实验报告,按时上交。

I

第 I 篇 实验理论

第1章 测量误差与数据处理

第2章 常用物理实验仪器

第3章 物理实验基本方法

第1章 测量误差与数据处理

一切物理量的测量都不可能是完全准确的,这是因为在科学技术发展和水平提高过程中,人们的认识能力和测量仪器的制造精度都受到相应限制,测量误差的存在是一种不以人们意志为转移的客观事实。当今误差理论及其应用已发展成为一门专门的学科。作为对学生进行科学实验基本训练的物理实验课程,必须赋予学生最基本的误差理论知识。本章主要介绍测量误差和不确定度等基本概念,在此基础上,介绍有效数字及数据处理方法。考虑到本课程的特点,对于不确定度,在一定程度上进行了简化处理,使其具有较强的操作性。

1.1 测量误差的基本知识

1.1.1 测量

测量是人们定量认识客观物理量量值的唯一手段,是人类从事科学研究活动的基础,没有测量就没有科学。在进行物理实验时,不仅要對实验现象进行定性的观察,还要对物理量进行定量的研究,这就需要进行针对不同物理量的测量活动。测量就是把作为标准的仪器或量具同“被测量对象”加以比较的过程,加以比较后,就会得到一些数据,即测量值。大多数情况下,得到的不仅是一些测量值,还有很多其他信息,如测量使用的方法、仪器本身的等级等。测量具有四要素,即测量对象、测量单位、测量方法和测量准确度。

“被测量对象”被称为被测量(或测量量、待测物理量);由测量确定的被测量量值的估计值称为测量结果(或测量值);被测量的客观实际量值被称为被测量的真值。测量的过程可以用下面这个例子来说明。

要测量一个圆柱的体积 V ,在数学上,已知 $V = \frac{1}{4}\pi d^2 h$,其中 d 为圆柱体的直径, h 则为高。利用长度测量工具(例如游标卡尺和千分尺)测得 d 和 h 后,可以算出 V 。在上述的体积测量过程中, d 和 h 是利用测量工具得到的,而体积 V 则是利用 d 、 h 和计算公式通过计算得到的,具体的操作方式虽然不同,而目的和性质却是相同的,都是测量。

通过上面这个例子还可以看到,虽然都是测量,但物理量 d 、 h 和 V 的获取方法和过程是不相同的,通常根据待测物理量最终测量结果的获取过程把测量分为两大类,即直接测量和间接测量。

直接测量就是把待测量直接与标准量(量具)进行比较,直接读数得到数据。例如,用米尺测量长度,用钟表测量时间,用安培计测量电流,用温度计测量温度等。在一切实验中,直接测量是基础。

有些物理量无法直接与标准量进行比较,无法直接读数,不能直接把结果测出来。但能找到这些量与某些可以直接测量的量的函数关系,测出可直接测量的量以后,通过函数关系可以获得

被测量的大小,这种测量称为间接测量。例如,矩形的面积,就不能用单位面积与之比较,必须测出长和宽,然后算出面积。还有一种情况,不是待测量不可直接测量,而是不便直接测量或直接测量效果不好,此种情况也应该用间接测量。例如,圆的半径,由于直接测量非常麻烦,有时甚至不可能,但直径很容易测量,由直径算出半径很简单,所以实验中不去直接测量半径。在实际实验中,需要间接测量的量,远远多于可直接测量的量。所谓实验技术,实验技巧,主要是间接测量的内容。

不言而喻,体积 V 的测量属间接测量,则 V 这个量就是间接测量量,而 d 与 h 则是直接测量量。

1.1.2 误差的概念

任何一个待测物理量的真值都是客观存在的,测量的本意就是要尽可能地得到这个真值。但由于客观世界和测量过程本身的不完善性,从理论上讲这种不完善性永远不可能完全排除,因此测量值和真值之间必然存在差异,这种差异就是误差,即误差 = 测量值 - 真值。

如果用 Δx 表示被测量 X 的测量误差,用 X_0 表示被测量物理量的真值,用 x 表示测量结果,则有 $\Delta x = x - X_0$ 。

由于每次测量都存在误差,因而通过测量永远得不到真值。那么,什么样的测量值是最理想的或者是最接近真值的呢? 如何来评价测量结果的可信程度呢? 这就有必要对测量误差进行研究和讨论,用误差分析的思想方法来指导实验的全过程。

误差分析的指导作用主要包含两个方面

(1) 为了从测量中正确认识客观规律,就必须分析误差的原因和性质,正确地处理所测得的实验数据,尽量减小误差,确定误差范围,以便能在一定条件下得到接近真值的最佳结果,并做出精度评价。

(2) 在设计一项实验时,根据对测量结果的精度要求,用误差分析指导我们合理地选择测量方法、测量仪器和实验条件,以便在最有利的条件下,获得恰到好处的预期结果。

1.1.3 误差的分类

误差的产生有多方面的原因。从误差的性质和来源上可分为系统误差和随机误差两大类。

1. 系统误差

系统误差是由于仪器不完善,或测量方法不恰当,或环境变化等引起,具有确定的规律性,或多次测量时误差始终不变,或随测量条件的变化而有规律的变化,总之是有规律可循的,是恒定误差。比如某一块表,每天都比标准时间慢 1 s ,这就是系统误差。又如金属米尺受热膨胀,天平不等臂,分光计偏心等,这些都是系统误差。

系统误差的来源主要包括仪器误差、方法误差、环境误差和人员误差。

(1) 仪器误差,是由仪器的结构和标准不完善引起的。表现形式有以下3种:

① 机构误差,如螺旋测微计有空行程、量块的不平行性等,由制造工艺所引起。

② 调整误差,仪表量具没调到所要求的程度,如不垂直、不水平、偏心与定向不准等因素引起的误差。

③ 量值误差,刻度不准、示值与实际值不符,或刻度值所代表的实际值随时间变化等引起的

误差。

(2) 方法误差,也叫理论误差。它是由于测量依据的理论公式本身带有近似性,或实验方法、实验条件不符合要求等引起的。如单摆周期公式 $T = 2\pi \sqrt{l/g}$,它成立的条件是 $\theta \rightarrow 0$,摆球体积 $V \rightarrow 0$ 。当条件得不到满足时引起的误差是方法误差。用伏安法测量电阻时,采用不同的联接方法,表头内阻的影响也将引起方法误差。

(3) 环境误差,由于环境因素(如温度、压强等)的变化而引起的误差。

(4) 人员误差,是由于观测人员心理或生理特点所造成的误差,如感觉器官不完善(色盲、色弱)带来的误差;记时间总是超前或滞后;反应速度或固有习惯引起的误差;瞄准目标始终偏左或偏右;估计读数始终偏大或偏小等。

由于系统误差在测量条件不变时有确定的大小和正负号,因此在同一测量条件下多次测量求平均并不能减小它或消除它。

一般情况下,系统误差在测量中都占较大比重。由于系统误差是可定的,因此可以用公式改正或用适当的测量组合加以减小或消除。一般讲,实验结果是不允许有系统误差存在的,因而在实验中从原理设计、仪器选择、测法组合到每一测量步骤,甚至每一小节,都必须仔细地考虑系统误差的存在,以及校正它的措施。为此在测量前和测量过程中,都要时刻注意检查可造成较大系统误差的原因,尽量加以消除或修正。比如,在条件许可的情况下,首先尽可能采用精确度比较高的测量工具或仪器;其次,实验方法和实验所依据的理论要更合理、更科学;养成良好的测试和操作习惯,从而可使系统误差减小到最低程度。当不可忽略的系统误差无法避免时,应尽可能地找出其大小、正负或规律,并进行必要的修正。

每个实验中的“误差分析”几乎全是讨论系统误差及其校正方法。但因为它是可定的误差,经过努力可以减小或完全校正。

2. 随机误差

系统误差被消除之后(这是个理想条件),在相同条件下多次测量同一量时,误差的符号和大小没有确定的规律,时大时小,时正时负,这类误差就是随机误差(又称偶然误差)。它的最大特点是具有随机性。

产生随机误差的原因大体有两种:

(1) 随机的和不确定的因素的影响,或环境条件微小的波动;

(2) 实验操作者的感官分辨本领有限。

通常,任一次测量产生的随机误差或大或小,或正或负,毫无规律。但对同一量测量次数 n 足够多时,将会发现它们的分布服从某种规律。实践和理论都证明,大部分测量的随机误差服从统计规律,其误差分布(或测量值的分布)呈正态分布(又称高斯分布),如图 1-1-1 所示。

横坐标表示测量误差 $\Delta_i = x_i - X_0$ (x_i 表示只含有随机误差的第 i 次测量值, X_0 为被测量的真值),纵坐标为一个与误差出现的概率有关的概率密度分布函数 $f(\Delta_i)$,应用概率论的数学方法可以得到

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

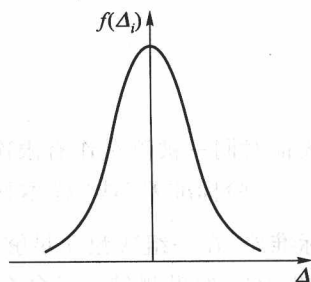


图 1-1-1 正态分布

式中,特征量 $\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}} (n \rightarrow \infty)$, 称为测量值的标准误差。测量值的标准误差具有一个十分明确的意义: 在一组次数 n 足够大的测量中, 任何一次的测量值落在 $(X_0 \pm \sigma)$ 区间内的概率(可能性)为 68.3%。

随机误差具有以下特征:

- (1) 对称性: 绝对值相等的正、负误差出现的概率大体相同。
- (2) 单峰性: 绝对值较小的误差出现的概率大, 绝对值较大的误差出现的概率小。
- (3) 有界性: 在一定测量条件下, 误差的绝对值超过一定限度的概率近似为零。
- (4) 抵偿性: 当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 随机误差的代数和趋于零。

根据随机误差的特征, 不难看出, 增加测量次数可以减小随机误差。应该指出, 由观察者的粗心或抄写中的马虎所出现的错误数据称为坏值, 不能参与运算, 应予剔除。

1.1.4 测量的最佳值——算术平均值

根据随机误差的统计特征判断, 可以得到实验结果的最佳估计值(简称为最佳值或近真值)。设在相同条件下, 对某一物理量 X 进行了 n 次测量, 所得到的一系列测量值分别为 $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$ (又称为测量列), 则其算术平均值为

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1-1-2)$$

由随机误差的统计特征可以证明, 当测量次数 n 足够多, 且仅含随机误差时, 则其算术平均值 $\bar{X}$ 就是最接近真值的最佳值, 可称其为约定真值或近真值。算术平均值与某一次测量值之差叫偏差 v_i (有时也被称为残差), 即

$$v_i = X_i - \bar{X}$$

显然, 误差和偏差是两个不同的概念, 但在实际应用中也没有必要将两者严格区别开来, 也可以将偏差叫做误差。

1.1.5 随机误差的估算

在实际测量中, 测量次数 n 总是有限的, 根据数理统计理论, 利用贝塞尔公式法, 可得 n 个等精度测量列 $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$ 的标准差:

$$S(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (1-1-3)$$

它表征对同一被测量作有限次(n 次)测量时, 其结果的分散程度。测量列的标准误差 $S(X)$ 一般称为“实验标准差”或“样本标准差”, 它也具有十分明确的意义: $S(X)$ 是任何一次的测量值 X_i 的标准差, 在一组次数 n 足够大的测量中, 任何一次的测量值 X_i 落在 $(\bar{X} \pm S(X))$ 区间内的概率为 68.3%; 如果测量中只含有随机误差, 当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, $S(X) \rightarrow \sigma$ 。

实验结果的最佳值是其测量列的算术平均值 $\bar{X}$, 人们往往更加关心它的标准差的大小。根

据数理统计理论,算术平均值 $\bar{X}$ 的标准差(简称为平均值标准差)为

$$S(\bar{X}) = \frac{S(X)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}} \quad (1-1-4)$$

它同样具有十分明确的意义:在一组次数 n 足够大的测量中,测量值的算术平均值 $\bar{X}$ 落在 $(\bar{X} \pm S(\bar{X}))$ 区间内(该区间可称为“置信区间”)的概率为 68.3%;如果测量中只含有随机误差,当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,真值 X_0 落在 $(\bar{X} \pm S(\bar{X}))$ 区间内的概率为 68.3%。

理论分析表明,若将置信区间变为 $(\bar{X} \pm 2S(\bar{X}))$,则置信概率为 95%,若放大到 $(\bar{X} \pm 3S(\bar{X}))$,则置信概率变为 99.7%。通俗地讲,若把 $S(\bar{X})$ 乘以一个不同的用以确定置信区间大小的“覆盖因子” k_p (也称为“包含因子”,下标 P 为置信概率)就可以得到不同的置信概率 P 。

然而,在实际测量中,测量次数 n 是有限的。因而,测量值 X_i 将偏离正态分布而服从 t 分布(又称为学生分布)。测量结果在已确定的置信概率下,“覆盖因子”的大小与测量次数 n 密切相关。根据表 1-1-1 给出的 t 分布表,可以了解到置信概率 P 、测量次数 n 及 t 分布因子即 $t_p(n)$ 因子的关系。“覆盖因子” $k_p = t_p(n)$ 在不会引起误解时, $t_p(n)$ 也可以简写成 t_p 。

表 1-1-1 t 分布($t_p(n)$)

$n \backslash P$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	∞
0.997	235.8	19.21	9.22	6.62	5.51	4.90	4.53	4.28	4.09	3.64	3.45	3.00
0.950	12.70	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.14	2.09	1.96
0.900	6.31	2.92	2.35	2.13	2.02	1.94	1.90	1.86	1.83	1.76	1.72	1.65
0.683	1.84	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.04	1.03	1.00
0.500	1.00	0.82	0.76	0.74	0.73	0.72	0.71	0.71	0.70	0.69	0.69	0.67

例如:测量次数 $n=5$,要求置信概率 $P=0.95$,则 $t_p=2.78$,测量中只含随机误差时, X 的真值落在 $(\bar{X} \pm t_p(n)S(\bar{X})) = (\bar{X} \pm 2.78S(\bar{X}))$ 之间的置信概率 P 为 95%。

应该指出, t_p 随着测量次数 n 的增加而减小, $n > 10$ 以后 t_p 下降很慢,因而一般测量中 n 很少大于 10。

长期以来,在一般测量中,使用扣除已知系统误差的最佳估计值表示测量结果的大小,采用平均值的标准差表示测量误差。这样一来,无法用统计方法处理的那些误差分量在测量结果中便无法表现了,显然这种处理方法具有相当大的局限性。随着误差理论研究的深入及科学技术的发展,人们认识到,用“测量不确定度(uncertainty of measurement)”的概念,能对测量结果做出更为合理地评价。