

高等学校教材

大学物理实验

主 编 秦先明

副主编 杨达晓 程文德 王全武 孙宝光

高等教育出版社

高等学校教材

大学物理实验

D a x u e W u l i S h i y a n

主 编 秦先明
副主编 杨达晓 程文德 王全武 孙宝光
主 审 张启义

高等教育出版社·北京

内容简介

本书是根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)的精神,并结合重庆科技学院教学改革的实际编写而成的。

全书共有六部分,绪论主要阐明物理实验课程的目的是培养学生的创新意识、创新精神和创新能力;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;第2章介绍常用的物理实验仪器;第3章介绍物理实验基本方法;第4章是基础性实验,涵盖了力学、热学、电磁学、光学以及近代物理实验;第5章为综合性实验,目的在于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章是设计性实验,目的在于进一步提高学生的综合实验能力。全书共35个实验项目。

本书可作为理工科院校各专业的大学物理实验课程教材,也可作为实验技术人员或有关课程教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 秦先明主编. -- 北京: 高等教育出版社, 2016.2
ISBN 978-7-04-044484-1

I. ①大… II. ①秦… 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(2015)第309059号

策划编辑 王 硕
插图绘制 邓 超

责任编辑 程福平
责任校对 刘春萍

封面设计 赵 阳
责任印制 耿 轩

版式设计 张 杰

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 大厂益利印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 16.75
字 数 350千字
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.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>

版 次 2016年2月第1版
印 次 2016年2月第1次印刷
定 价 29.8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 44484-00

○ 前 言

大学物理实验课程是理工科学生必修的一门重要基础课。物理规律的发现和物理理论的产生及发展有赖于实验,并受实验的检验,而现代工程技术更离不开实验。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。

进入 21 世纪以来,大学物理实验课程发生了很大变化,概括起来就是本课程必须负担起学生创新精神、创新意识和创新能力的任务。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。自 2007 年以来,在重新审视以往教学模式的基础上,重庆科技学院大学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了整合,并对相应实验仪器进行了更新换代。

本书是依照《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010 年版),结合重庆科技学院建立应用型本科院校的实际情况,以我校 2007 年和 2011 年出版的《大学物理实验》为基础,吸取目前高校物理实验的一些新实验、新思想,结合我校实验教学改革的具体情况而修订编写的。

本书共六个部分,绪论主要介绍物理实验课程的目的和任务,以及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,这些内容是本课程的重点和难点,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,学生应做完本章实验项目的 40%~60%;第 5 章为综合性实验,共 13 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 6 章是设计性实验,共 5 个,要求学生自己设计实验方案并基本独立完成实验的全过程,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。

本书是重庆科技学院大学物理实验中心教职工近几年教学改革成果的结晶。参加编写的有秦先明、杨达晓、程文德、王全武、孙宝光、唐海燕、方旺、杨文艳、刘春兰、阳廷义、陈学文、刘丰奎、樊玉琴、姚雪、陈恒杰、胡凯燕、杨耀辉、向洵、邓起宏、陈震亚、张家伟、谭仁兵、杨晓卫,最后由秦先明教授统稿,张启义教授审稿。在这里,我们还要感谢刘业厚、赵同燕、江鸣、郑安节、兰云飞、董晓龙等同志的辛勤劳动,他们为本书提供了不少素材并提出了很多有益的建议。

由于编者水平有限，加之时间紧迫，编写工作量大，本书中定有疏漏和不妥之处，望读者和各位同仁不吝赐教！

编 者

2015 年 10 月

目 录

绪论	1	实验 8 空气摩尔热容比的 测量	95
第 1 章 测量误差与数据处理	3	实验 9 用电流场模拟静电场	99
§ 1.1 测量误差的基本知识	3	实验 10 示波器的使用	107
§ 1.2 测量不确定度及其评定	8	实验 11 用霍耳传感器测量 螺线管磁场	115
§ 1.3 有效数字	13	实验 12 霍耳效应实验及螺线 管磁场的测量	119
§ 1.4 实验数据处理的基本 方法	19	实验 13 静态法测量磁滞回线和 磁化曲线	128
第 2 章 常用物理实验仪器	27	实验 14 动态法测量磁滞回线和 磁化曲线	132
§ 2.1 长度测量仪器	27	实验 15 霍耳效应法测量亥姆 霍兹线圈磁场	141
§ 2.2 质量测量仪器	36	实验 16 电磁感应法测量亥姆 霍兹线圈磁场	146
§ 2.3 时间测量仪器	38	实验 17 双棱镜干涉法测钠黄 光波长	153
§ 2.4 电磁学实验仪器	42	第 5 章 综合性实验	157
§ 2.5 光学仪器的使用和维护 规则	50	实验 18 弯曲法测弹性模量	157
§ 2.6 温度的测量	53	实验 19 声速测量	163
第 3 章 基本实验技术和实验 方法	55	实验 20 非平衡直流电桥的 使用	170
§ 3.1 基本实验方法和测量 方法	55	实验 21 分光计的调整与 使用	176
§ 3.2 仪器调整与操作技术	59	实验 22 迈克耳孙干涉仪的调整 与使用	184
§ 3.3 物理实验基本操作规程	62	实验 23 等厚干涉	189
§ 3.4 误差均分原则、测量仪器 和测量条件及测量次数的 选择	63	实验 24 全息照相	197
第 4 章 基础性实验	66	实验 25 声光衍射法测声速	202
实验 1 力学基本测量实验	66	实验 26 密立根油滴实验	207
实验 2 电学基本测量实验	71	实验 27 普朗克常量测定	216
实验 3 扭摆法测转动惯量	74	实验 28 光电效应	220
实验 4 恒力矩转动法测转动 惯量	78	实验 29 弗兰克-赫兹实验	227
实验 5 导热系数的测量	83		
实验 6 线膨胀系数的测量	88		
实验 7 黏度的测量	91		

实验 30 光伏电池伏安特性		
研究	231	
第 6 章 设计性实验	236	
实验 31 数字式电表的改装与		
校准	236	
实验 32 望远镜和显微镜的设计		
与组装	242	
实验 33 光栅特性的研究	250	
实验 34 马吕斯定律的验证	252	
实验 35 电阻丝的电阻率		
测定	253	
附表	254	

绪论

物理学是研究物质存在的基本形式和物质运动基本规律的科学。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,在科学和人类思想发展过程中起着非常重要的作用。物理学研究方法通常是在观察和实验的基础上,对物理现象进行分析、抽象和概括,建立物理模型,探索物理规律,进而形成物理理论。因此,物理规律是实验事实的总结,物理理论正确与否需要实验来验证。

物理学从本质上说是一门以实验为基础的科学。历史表明,在物理学的形成和发展过程中,物理实验一直起着不可替代的作用,并且在今后的探索和开拓新的科技领域时,物理实验仍是强有力的工具,如激光、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。在高等学校,物理实验是理工科学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端,是理工科类专业学生后续实验课的重要基础,是学生进行科学实验的起步。因此,教育部把物理实验列为高等学校理工科学生进行科学实验基本训练的一门独立的、重要的必修课程。所以,学好物理实验对于高等学校理工科学生来说是十分必要的。

1. 物理实验课的目的

物理实验既是对学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修实验基础课程,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) 使学生学会常用物理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，再准备誊写的不良习惯。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，伪造数据者实验记零分。

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拆卸仪器，整理好桌凳，做好清洁，经同意后方可离开实验室。

(3) 撰写一份简洁、清楚、工整和富有见解的实验报告

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按时上交。

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) 不要伪造数据，一经发现，以零分计，并写检查。

(6) 爱护实验设备，如有坏仪器，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。

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。我们在进行物理实验时，不仅要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被称为**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。

要测量一个如图 1.1 所示的圆柱的体积 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 为高。利用长度测量工具例如游标卡尺、螺旋测微器测得 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。

通过上面这个例子我们还可以看到，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

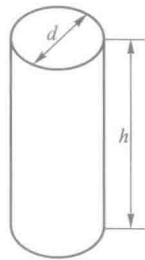


图 1.1 圆柱体的测量

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,直接得到数据。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,此种情况也应用间接测量。例如,测量圆的半径,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,在上例中,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 Δy 表示被测量 Y 的测量误差,用 Y_0 表示被测物理量的真值,用 y 表示测量结果,则有 $\Delta y = y - Y_0$ 。

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,并作出精度评价。

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随机误差和系统误差两大类。

一、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地变化,总之是有规律可循的,是可定误差.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:

(1) 仪器误差,由仪器的结构和标准不完善引起的,表现形式有三种:

① 机构误差,如螺旋测微器有空行程、量块的不平行,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 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$,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,采用不同的连接方法,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,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消除.一般来讲,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,甚至每一细节,都必须仔细地考虑系统误差的存在,以及采取校正它的措施.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,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,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.

二、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 1.2 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

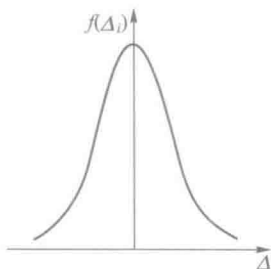


图 1.2 正态分布

$$f(\Delta_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta_i^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1.1)$$

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 绝对值相等的正、负误差出现的概率大体相同(对称性);
- ② 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(单峰性);
- ③ 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(有界性);
- ④ 当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,随机误差的代数和趋于零(抵偿性)。

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,应予删除。

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 $\bar{X}$ 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 δ (有时也被称为残差), 即

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

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 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[“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] 的关系。

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%。

表 1.1 t 分布 [$t_p(n)$]

$t \backslash \begin{matrix} n \\ p \end{matrix}$	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

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，能对测量结果作出更为合理的评价。

§ 1.2 测量不确定度及其评定

1981 年，国际计量委员会(CIPM)批准发表了关于测量不确定度的正式文件——《测量不确定度工作组织建议书 INC-1(1980)》，我国国家技术监督局也于 1991 年 8 月 5 日批准颁布了《JJG 1027-1991 测量误差及数据处理(试行)》计量技术规范。该规范规定，在报告最后测量结果的表示形式中使用总不确定度。《INC-1(1980)》只是一份十分简单的纲要性文件，不便实施，所以国际标准化组织(ISO)在国际计量局(BIPM)等七个国际组织的支持下，于 1993 年制定了《测量不确定度表示指南 ISO 1993 (E)》(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement ISO 1993 (E)，简称 GUM93)，并于 1995 年作了不大的修改(修改后的简称 GUM95)，为了保持与国际标准同步，我国又颁布了新的国家计量技术规范《JJF 1059-1999 测量不确定度评定与表示》用以取代 JJG 1027-1991 中的测量

误差部分。在新的国际标准和我国新的计量技术规范中，将“总不确定度”改称为“扩展不确定度”。

1.2.1 测量不确定度的含义与分类

一、测量不确定度的含义

测量不确定度是与测量结果相关、表示被测量的量值分散性的参量。通俗地讲，测量不确定度表示由于测量误差的存在，而使被测量值不能确定的程度。从这个意义上讲，测量不确定度是评定被测量的真值所处范围的一个参量。用不确定度来评定实验结果，可以反映各种来源不同的误差对结果的影响，而它们的计算又反映了这些误差所服从的分布规律。

二、不确定度的分类

测量结果的不确定度一般包含几个分量，按其数值的评定方法，这些分量可归入两大类，即 A 类分量（或称为 A 类评定）和 B 类分量（或称为 B 类评定）。

(1) A 类不确定度——多次重复测量时，可以用统计方法处理得到的那些分量。

(2) B 类不确定度——不能用统计方法处理，而需要用其他方法处理的那些分量。

1.2.2 测量不确定度的评定

评定测量不确定度的方法不是唯一的，按国际计量局的建议，测量不确定度可以用算术平均值的标准差 $S(\bar{X})$ 、标准差 σ 和自由度 ν 等来表达。为便于操作，我们作了简化处理，省略了有关自由度的计算。

一、直接测量的测量不确定度的评定

1. 多次直接测量的 A 类标准不确定度 $u_A(x)$ 的评定

“A 类标准不确定度的评定”也称为“标准不确定度的 A 类评定”，是标准不确定度中可以用平均值 $\bar{X}$ 的标准误差 $S(\bar{X})$ 表示的分量，即

$$u_A(x) = S(\bar{X}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}} \quad (1.2.1)$$

2. 直接测量量的 B 类标准不确定度 $u_B(x)$ 的评定

B 类标准不确定度可以用不能用统计方法处理的等价标准差 σ 表征，即

$$u_B(x) = \sigma \quad (1.2.2)$$

式中， σ 是用极限差 a 表征的标准差，与这些极限差所服从的分布有关，如表 1.2 所示。

在物理实验中，极限差 a 一般为仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 或通过其他方法得到的非统计误差的估计值。 $\Delta_{\text{仪}}$ 通常取仪器的示值误差、基本误差或允差。需要时可查阅国家有关标准、仪器出厂说明书、仪器铭牌等，有时也可由准确度等级计算得到，必要时还可取仪器最小分度的一半代替之。

下面列出一些常用仪器的仪器误差：

三角板、钢板尺、直尺：0.5 mm；

游标卡尺(50 分度)：0.02 mm；

螺旋测微器(千分尺)：0.004 mm；

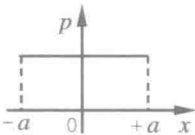
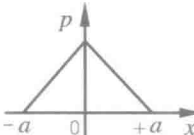
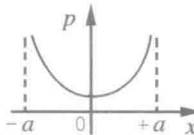
钢卷尺：在固定的仪器上时(如光具座、气垫导轨上)为 1 mm，其他一般取 3 mm；

物理天平：感量即为仪器误差，如 20 mg；

电表：量程×等级%；

其他仪器的仪器误差可参照仪器说明或简单取其最小分度的一半。

表 1.2 几种常见分布的标准差

分布类型	均匀分布	三角分布	反正弦分布
分布图像			
分布函数	$p(x) = \frac{1}{2a}, \quad x \leq a$	$p(x) = \frac{a - x }{a^2}, \quad x \leq a$	$p(x) = \frac{1}{\pi \sqrt{a^2 - x^2}}, \quad x < a$
标准差 σ	$\frac{a}{\sqrt{3}}$	$\frac{a}{\sqrt{6}}$	$\frac{a}{\sqrt{2}}$

在物理实验中 $\Delta_{\text{仪}}$ 一般服从均匀分布，因而可取 B 类标准不确定度 $u_{\text{B}}(x)$ 为

$$u_{\text{B}}(x) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \tag{1.2.3}$$

3. 多次直接测量量的合成标准不确定度 $u(x)$

利用目前广泛采用的“方和根”法，可求得合成标准不确定度 $u(x)$ 为

$$u(x) = \sqrt{[u_{\text{A}}(x)]^2 + [u_{\text{B}}(x)]^2} \tag{1.2.4}$$

4. 单次测量量不确定度的评定

在物理实验中实行单次测量的两个主要理由(原因或条件)是：

- ① 多次测量时，A 类不确定度远小于 B 类不确定度；
- ② 物理过程不能重复，无法进行多次测量。

在这种情况下简单地取：

$$u(x) = u_{\text{B}}(x) \tag{1.2.5}$$