



普通高校“十二五”规划教材

- 涉及力学、热学、电磁学、光学、原子物理
- 重基础实验，辅提高实验，培养研究能力
- 设综合实验，增演示实验，启发创新思维

大学基础物理实验

主编 赵 杰

DAXUE JICHU WULI SHIYAN



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高校“十二五”规划教材

大学基础物理实验

主编 赵 杰

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了高校物理学专业的基础物理实验和理工科各专业的大学物理实验内容,涵盖了力学、热学、电磁学、光学、原子物理实验的基本内容,还包括了演示物理实验、部分近代物理和应用物理的实验内容,共76个实验项目。本书内容新颖、文字精练、综合设计性实验项目或内容比例高,注重学生基本功和创新能力的培养。

本书的通用性强,可作为各类高校物理学专业的“普通物理实验”和理工科各专业的“大学物理实验”、“演示物理实验”课程教材或参考书,也可供实验技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学基础物理实验 / 赵杰主编. -- 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.9

ISBN 978-7-5124-0474-8

I. ①大… II. ①赵… 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 107996 号

版权所有,侵权必究。

大学基础物理实验

主 编 赵 杰

责任编辑 蔡 喆

*

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

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:14.75 字数:378千字

2011年9月第1版 2011年9月第1次印刷 印数:4000册

ISBN 978-7-5124-0474-8 定价:27.00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

《大学基础物理实验》编委会

主 编 赵 杰

副主编 杨学锋 罗秀萍 陈书来 刘辉兰
王红梅

编 委 李海彦 刘志华 魏 勇 崔廷军
赵东来 王吉华 刘安平 邹 艳
于家峰 张秀梅 陶建强

前 言

本书是依据教育部和山东省教育厅关于物理实验教学示范中心建设的精 神，结合编者长期的实验教学改革经验和成果编写的。在编写过程中，力争做到突破传统的物理实验教学模式，增加了许多综合设计型和提高创新型的实验内容，将许多传统的实验项目(或其部分内容)改进为设计型(或局部设计型)实验项目，使学生由被动地执行实验过程变为主动地参与实验过程。本书将各实验课程的实验教学项目与内容进行大胆改革，打破了传统实验教材的结构体系，建立了演示物理实验、基础型实验、提高型实验、综合设计研究创新性实验的层次清晰的结构体系。从注重培养学生动手能力、创新思维能力出发，减少单纯验证性实验的比例。对不符合现代科学发展实际的传统实验项目进行删除或内容更新。为了实现教学内容的现代化，使之与科学技术的发展相适应，与生产和工程技术实际相衔接，本书增加了一些综合型、应用型的实验项目(如光纤、太阳能电池、混沌、半导体、压缩制冷及高温超导等)。

本书力争做到内容全面、实验项目丰富多样，但文字尽量精练，篇幅合理。演示物理实验(这里是指由学生亲自操作演示的)属于定性及半定量实验，不仅能让学生直观地看到物理学的各种生动实验现象，而且能带来启迪创意、追求科学的热情和兴趣。演示物理实验具有趣味性强、实验用时短但学生印象深刻等其他类型实验不具备的优点，因此，我们在国内率先把演示物理实验引入大学物理实验教材，作为激发学生兴趣、建立物理模型、促进课堂教学的重要手段。

由于各个高校的实验仪器不尽相同，使得实验教材很难同理论教材那样具有很好的通用性。为此，我们在该书的编写中注重提高教材的通用性，有的实验还提供了可供选择的仪器和实验方法。本书在提高学生的分析问题和解决问题能力、动手能力和创新能力等综合素质方面将会有所突破。本教材选择的实验项目和实验内容，突出了时代性、先进性、适用性。

本书的实验内容涉及大学物理中的力学、热学、电磁学、光学、原子物理、部分近代和应用物理的知识和技能。本书既可作为高校物理学专业的普通物理实验教材，又可作为非物理学专业的大学物理实验教材，还可作为演示物理实验教材，专业通用性强。

本书由赵杰、杨学锋、罗秀萍、陈书来、刘辉兰、王红梅、李海彦、刘志华、王吉华、崔廷军、魏勇、赵东来等老师编写。全书由赵杰负责策划、组织和统稿。邹艳教授审阅了部分书稿，并提出了修改建议。德州学院物理系主任王吉华教授和刘安平书记非常关心本书的出版工作，在此表示感谢。

本书由山东省特色专业(物理学特色专业)、“十一五”国家课题——中国高校应用型人才培模式研究子课题资助(课题名称:一般本科院校应用型物理专业人才培养模式的研究与实践,资助号:FIB070335-A3-08)。

在本书的编写过程中,参考和引用了国内部分高校所编写或使用的实验教材,也参考和引用了部分国内知名仪器生产厂家的仪器说明书中的部分内容,在此一并表示感谢。

由于时间仓促,且编者水平有限,本实验教材中如有不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

2011年7月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 物理实验的地位和作用	1
1.2 课前预习	2
1.3 实验过程	2
1.4 实验报告	3
1.5 物理实验的基本规则	3
第 2 章 测量的不确定度和实验数据处理	4
2.1 测量与误差	4
2.2 测量的不确定度	6
2.3 有效数字	13
2.4 数据处理	15

第 1 部分 基础型实验

实验 1-1 固体和液体密度的测定	19
实验 1-2 惯性秤	23
实验 1-3 杨氏模量的测定	24
实验 1-4 复摆的研究	29
实验 1-5 声速的测定	31
实验 1-6 弦振动的研究	33
实验 1-7 金属比热容的测定	35
实验 1-8 水的比汽化热的测定	38
实验 1-9 液体表面张力系数的测定	41
实验 1-10 空气比热容比的测定	43
实验 1-11 RLC 电路的谐振特性研究	46
实验 1-12 示波器原理和使用	48
实验 1-13 惠斯登电桥	52
实验 1-14 用电流场模拟静电场	54
实验 1-15 开尔文双臂电桥	57
实验 1-16 用菲涅耳双棱镜测钠光波长	60
实验 1-17 用牛顿环干涉测透镜曲率半径	62
实验 1-18 迈克耳逊干涉仪的调整和使用	64
实验 1-19 单缝衍射相对光强分布的测定	68
实验 1-20 分光计的调整和使用	70

实验 1-21	用透射光栅测定光波波长	74
实验 1-22	薄透镜焦距的测定	77
实验 1-23	棱镜玻璃折射率的测定	79

第 2 部分 提高型实验

实验 2-1	液体粘滞系数的测定与研究	81
实验 2-2	用凯特摆测量重力加速度	84
实验 2-3	用波尔共振仪研究受迫振动	86
实验 2-4	良导体热导率的测定	90
实验 2-5	圆线圈及亥姆霍兹线圈磁场的测量	96
实验 2-6	用霍尔位移传感器测杨氏模量	98
实验 2-7	电子束的偏转和聚焦	100
实验 2-8	单色仪的定标	106
实验 2-9	光具组基点的测定	109
实验 2-10	偏振现象的观察与分析	111
实验 2-11	利用光电效应测定普朗克常量	113
实验 2-12	声波的多普勒效应	117
实验 2-13	高温超导的研究	119
实验 2-14	密里根油滴实验测定基本电荷	123
实验 2-15	夫兰克-赫兹实验	127
实验 2-16	塞曼效应	130

第 3 部分 综合设计研究创新型实验

实验 3-1	单摆的设计与研究	135
实验 3-2	牛顿第二定律的研究	140
实验 3-3	碰撞过程中守恒定律的研究	142
实验 3-4	磁单摆混沌现象的观察与研究	144
实验 3-5	金属线膨胀系数的测定	146
实验 3-6	用非线性电路研究混沌现象	149
实验 3-7	测电源的电动势和内阻	153
实验 3-8	霍尔效应的研究	153
实验 3-9	非平衡电桥	157
实验 3-10	PN 结的物理特性	160
实验 3-11	电信号的傅里叶分解与合成	163
实验 3-12	用掠入射法测定透明介质的折射率	167
实验 3-13	望远镜的设计与组装	168
实验 3-14	利用电位差计改装电表	169
实验 3-15	交流电桥的设计和测量	173
实验 3-16	制冷系数的测量和研究	176

实验 3-17	硅太阳能电池的研究	180
实验 3-18	光通信	182
实验 3-19	光纤传感器及应用研究	188

第 4 部分 演示物理实验

实验 4-1	运动的独立性	193
实验 4-2	转盘科里奥利力	194
实验 4-3	纵波和驻波	195
实验 4-4	弹簧片的受迫振动与共振演示	196
实验 4-5	角动量矢量合成、角动量守恒的演示	197
实验 4-6	帕尔贴效应的演示	199
实验 4-7	超导磁悬浮现象	201
实验 4-8	压电效应	203
实验 4-9	巴克豪森效应	204
实验 4-10	投影式洛仑兹力	205
实验 4-11	电磁感应现象的演示	207
实验 4-12	互感现象的演示	208
实验 4-13	热力学第二定律	210
实验 4-14	空气热机	211
实验 4-15	激光多普勒效应	214
实验 4-16	海市蜃楼的演示实验	216
实验 4-17	薄膜干涉	218
实验 4-18	夫琅禾费衍射	221
附表	223
参考文献	225

第 1 章 绪 论

1.1 物理实验的地位和作用

物理学的研究对象具有相当的普遍性,其基本理论渗透在自然科学的许多领域,应用于生产技术的各个部门,是自然科学的许多领域和工程技术的基础。

物理学是建立在实验基础上的一门自然科学学科。任何物理规律的发现和理论的建立都以严格的实验为基础,并受到实验的检验。在物理学的整个发展过程中,物理实验起着非常重要的作用。

在经典力学发展之初,首先把科学的实验方法引入到物理学研究中的物理学家是伽利略。在此之后,物理学的研究才真正走上科学的道路。经典物理学的奠基人牛顿则在大量实验的基础上总结出牛顿三大定律和万有引力定律。

物理学中的麦克斯韦电磁学理论是一个较完善的理论。然而其理论的建立则离不开奥斯特在一次课堂实验中发现的电流的磁效应和法拉第数十年的实验研究结论——磁也可以产生电。正因为有了这两位科学家的实验研究,才使得电磁学的理论大厦得以完满建成。奥斯特和法拉第的结论推动了电磁学的发展,同样杨氏双缝实验和光电效应实验也相应推动了光学的发展;前者揭示了光的波动性,后者告诉人们光也同时具有量子性。

现代科学技术的高速发展更离不开物理学理论和实验的构思和方法。物理实验的一些实验理论、方法已经广泛渗透到了自然科学的各个学科和工程技术领域。例如,声波测井、物质的化学成分与光谱的结构分析、原油或油品流动性质的研究等,实际上都是一些专业的物理实验。正是把物理实验方法运用于各领域专业,才使其他专业得到迅速发展。

“大学物理基础实验”是大学理工科学生进行科学实验训练的一门独立的必修基础课程,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。大学物理实验课程对学生能力和素质的培养不仅包含通常意义上的实验技能和操作技能,也包含实验过程中发现问题和解决问题的能力、综合分析能力、创新能力、科学发现能力的启蒙,还包含实验者的科学态度、求是精神、坚韧不拔的意志、追求真理的勇气及爱护实验仪器的良好品德和科学学习习惯。它在培养学生运用实验手段去分析、观察、发现以至研究、解决问题的能力方面,以及培养学生的创新能力和创新精神方面都起着重要的作用,并且是理论课程不能替代的。

物理实验的作用不仅在于它实验的内容,更重要的是实验进行的过程。在这个过程中,学生们不仅掌握了知识,而且了解到知识创造的过程,从而学会学习,为终身教育打下一个坚实的基础。另外,在实验过程中同学间的相互协作、共同探索的品质和团队精神得到培养。下面 3 小节是物理实验课的基本环节。

1.2 课前预习

课前预习对做好实验起十分重要的作用。

一次实验课的时间有限,从熟悉仪器到测出数据,任务繁重。若课前不明确实验的目的、要求、原理和方法,不知道要测量哪些物理量、用什么仪器和怎样测量,不明确实验的思路和基本过程,不了解哪些地方是本次实验的重点应当特别注意,到上课时就不可能做好实验。可以肯定地说,实验能否顺利进行,能否获得预期的结果,在很大程度上取决于预习是否充分。因此,每次做实验之前必须预习,而且必须认真预习!

预习时主要阅读实验教材相关内容,必要时还要参考其他资料,以求基本掌握实验的整体概况,明确实验目的,看懂实验原理,了解实验内容,知道实验步骤。对实验中使用的仪器和装置,要阅读教材中有关仪器部分,了解使用方法和注意事项。总之,要通过课前的预习和思考,在脑海中形成一个大概初步的实验方案,并在此基础上写出预习报告。预习报告的内容包括实验名称、实验目的、实验原理概要、实验仪器、实验内容和步骤概要。上实验课前教师要检查预习报告,没有预习者不允许进行实验。

1.3 实验过程

实验过程是实验课的中心环节。

在动手实验之前,要先认识和清点所用仪器、装置和器具,了解其主要功能、量程、级别、操作方法和注意事项,不要急于测量。实验时,要有目的、有计划地进行操作。首先是布置、安装(或接线)和调试仪器。仪器的布局要合理,尽量按电路图的布局摆放各个仪器,这样接线不易出错,也便于教师快速检查,提高效率。还要考虑到实验者和仪器的安全。合理选择仪器量程,严格遵守使用说明和操作规程,细致、耐心地把仪器调整到最佳工作状态。在电学实验中,接线完毕后,学生应自己做一次检查,再请指导教师复查,确认正确无误后才能接通电源。

调试完毕后即可开始实验。起初可做探索性试验操作,粗略地观察一下实验过程,若无异常现象,便可正式进行实验。如出现异常现象,应立即切断电源,认真分析,仔细排查,并向指导教师反映。待找出原因,排除异常后再开始进行实验。

测量时要把原始数据整齐地记录在预习时已经准备好的数据处理表格中,注意数据的有效数字和单位。不要记在另外的纸上再誊写在原始数据记录数据表格中,这样容易出错,况且这也就不再是第一手的“原始记录”了。如果记录的数据有错误,可用一斜线轻轻划掉,把正确的原始数据写在其旁,但不得涂改数据。要记住,原始数据是实验的最珍贵资料。

实验完毕后,先不要急于拆除实验仪器和它们的连接关系,而要暂时保持测试条件,请教师审阅实验记录正确后再拆除,否则如果实验数据错误,还要再连接一遍费时费力甚至没时间重测了。必要时也可能要重新测量。最后,经教师确认并签字后,再整理仪器到实验开始前的摆放状态,清理环境卫生后再离开实验室。

1.4 实验报告

实验报告是对所做实验的系统总结,是学生表达能力和信息交流能力的集中体现,也是交流实验成果的媒介,要用简明的形式将实验结果完整而又真实地表达出来。写报告时要求文字通顺,字迹端正,图表规矩,结果正确,讨论认真且全面。应养成实验完成后尽早将实验报告完成并上交的习惯。一份完整的实验报告应包括:实验名称、姓名、学号、指导教师姓名、实验日期、实验目的、实验原理、实验仪器、实验步骤、数据处理、实验结果和结果讨论。

数据处理一项中应包括:数据表格、计算过程、图示法或图解法处理数据和误差分析(包括确定实验结果的误差范围,找出影响实验结果的主要因素等;误差过大时应分析原因,对误差做出合理的解释)。

实验结果一项中应包括测量结果,即被测量的最佳估计值。若是对同一量的多次测量,则测量结果应是测量值的算术平均值。并且必须附带测量不确定度或绝对误差和相对误差(含计算方法、概率及测量次数)。必要时,应说明测量所处的条件,或影响量的取值范围。有些实验报告,还可模仿学术论文的形式撰写,以培养和训练撰写科学论文的能力。如果实验是观察某一物理现象或验证某一物理定理,则需要根据误差判断实验是否验证了理论。

结果讨论一项包括:实验过程中观察到的正常或异常现象、数据、结果等可能的解释,对实验仪器装置和实验方法改进的建议、推广到社会实际领域的设想等;还可以记录下实验者印象特别深刻的体会感受等内容。

1.5 物理实验的基本规则

① 实验前必须认真预习,并写出预习报告,不预习和达不到要求者不准进行实验。

② 准时到实验室上课。每次实验学生都要签到。迟到者,指导教师应对其进行批评教育。迟到超过15分钟者不准进行当日的物理实验。

③ 做实验时态度要严肃认真,积极思考,严谨实践。注意保持实验室安静、整洁。不得自行调换仪器,如遇仪器发生故障或异常情况应及时报告指导教师。

④ 操作仪器、连接线路必须按照有关规程和注意事项进行。因违反规程或违反纪律而损坏仪器时,应填写仪器损坏报告并按学校规定赔偿。数据测量完毕,应交给指导教师检查,教师在原始记录上签字认可后,整理仪器到实验开始前的状态,才能离开实验室。每个实验大组应安排值日生课后及时清扫实验室。

⑤ 不能无故缺课。如果因故不能上课要事先请假,并和同班其他组的同学互换实验时间,让同学把纸质的情况说明交给本次任课老师。无故缺席或无情况说明者按规定扣除一定的实验分数;缺课太多或有其他严重违规行为的按学校规定处理。

⑥ 教师签字的原始记录不得丢失,如丢失则需补做该实验或扣除一定的实验成绩。

第 2 章 测量的不确定度和实验数据处理

2.1 测量与误差

1. 测量

(1) 测量的含义

物理实验包括两方面的内容:定性观察物理现象和定量测量物理量的大小,进而研究建立物理规律。

所谓**测量**,就是将待测量与同类的单位量进行比较,以确定待测量是单位量的多少倍的过程。所得的这个倍数就是测量的**读数**,读数加上单位就是**数据**。

(2) 测量的分类

按获得数据方法的不同,测量可以分为直接测量和间接测量;按测量条件的不同,测量可分为等精度测量和不等精度测量。

① 直接测量和间接测量

直接测量就是从计量仪器上直接读出测量数据的测量。如用米尺测长度,用天平称衡质量,用伏特表测电压,用欧姆表测电阻等。

间接测量是根据直接测量结果和某种函数关系式,通过计算而获得测量数据的测量。例如,用长度测量仪器直接测出圆柱体的直径 d 和高度 h ,再根据关系式 $V = \pi d^2 h / 4$ 计算而获得圆柱体体积的测量。

② 等精度测量和不等精度测量

等精度测量是指在相同实验条件下进行的多次重复测量,各次测量的可靠程度是相同的。**不等精度测量**是指在某一实验条件发生变化的条件下进行的多次测量。

2. 测量误差

实验中所测量的物理量在一定条件下,均有其客观真实的大小,称为该物理量的**真值**。测量的理想结果是真值,但它又是不能确知的。因为测量仪器只能准确到一定程度,测量原理和方法的不完善,环境条件的影响及测量者感官能力的限制,使得测量值和真值总存在一定的差异,这种测量值与真值之差称为**测量误差**,简称**误差**。

$$\text{误差}(\epsilon) = \text{测量值}(x) - \text{真值}(x_0)$$

由于真值是不能确知的,所以测量值的误差也不能确切知道。测量中的误差是不可避免的,它存在于实验的整个过程中。因此,测量的任务是在尽可能减小误差的前提下,求得在该条件下被测量最接近于真值的最佳估计值,并同时给出最佳估计值可信程度的估计。

根据误差的性质和特点,可将误差分为两类,系统误差和偶然误差。

(1) 系统误差

在同一条件下,对同一物理量进行多次测量,误差的符号和绝对值保持不变或按某种规律变化,该误差称为系统误差。

① 系统误差的来源

理论(方法误差) 这是由于实验方法或理论不完善而导致的误差。例如伏安法测电阻时电流表“内接”或“外接”对电表内阻的影响等。

仪器误差 这是由于仪器本身缺陷或装置调整不当而造成的误差。例如天平两臂不等长或未调节水平,砝码质量不准等。

环境误差 这是外界环境(如光照、湿度、温度、电磁场)等的影响而引起的误差。如温度逐渐升高对热量散失的影响等。

个人误差 这是由于测量者的不良习惯与主观偏向引入的误差。

② 系统误差的消除

从系统误差产生的原因可知,测量者不能依靠在相同条件下进行多次测量消除它,但在实验中应尽可能进行系统误差的修正和处理。按对系统误差掌握的程度常将其分为已定系统误差和未定系统误差两类。已定系统误差是指采用一定的方法,可以对误差的数值和符号都确定的误差。未定系统误差是指不能知道误差的大小和符号,仅仅知道误差的可能范围(即界限)。对于已定系统误差,可对测量值进行修正。设已知测量某量的已定系统误差为 Δx ,则修正值为 $C_x = -\Delta x$,修正后的测量值为

$$\text{实际}(x') = \text{示值}(x) + \text{修正值}(C_x)$$

对不能消除的未定系统误差,应设法估计其误差的大小,但寻找系统误差并估计其大小并没有普遍规律可循,在很大程度上依赖于实验者的经验和素养。

(2) 偶然误差

在相同条件下,对某一物理量进行多次测量,各测量值之间总存在差异,且变化不定,在消除系统误差后仍然如此,这种绝对值和符号随机变化的误差称为偶然误差。偶然误差的来源主要有两个方面:一是实验者本人感觉器官分辨能力的限制;二是测量过程中,实验条件和环境因素微小的无规则起伏变化。偶然误差的特点是具有随机性。

(3) 精度

① 精密度

精密度表示重复测量所得结果相互接近的程度,是反映偶然误差的。精密度高则偶然误差小;反之,偶然误差大。它对系统误差没有反映。

② 准确度

准确度表示测量结果中系统误差大小的程度。准确度高,系统误差小;反之,系统误差大。它不能反映偶然误差的大小。

③ 精确度

精确度是测量结果中系统误差和偶然误差的综合,表示测量结果与真值一致的程度。精确度高则系统误差和偶然误差都小;反之,两种误差中至少有一个大。

3. 随机误差的统计分布规律

偶然误差与具有随机性的系统误差综合在一起称为随机误差。在普通物理实验的大多数

测量中,随机误差的统计规律基本上都服从正态分布。

(1) 正态分布特性

假设对某物理量(其真值为 N)进行多次等精度测量,得到的测量结果分别是 N_1, N_2, \dots, N_k ,其相应的偶然误差分别为 $\Delta'N_1, \Delta'N_2, \dots, \Delta'N_k$,它们的分布曲线可分别用正态分布函数描述,写成概率密度函数为

$$F(N_1, N, S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{N_i - N}{S}\right)^2\right] \quad (2-1)$$

式中, $S(S \neq 0)$ 为描述分布曲线宽窄的参量。正态分布的概率密度函数曲线如图 2-1 所示。由图可见, S 越小, 曲线越陡, 峰值越高; 曲线越窄, 测量数据的离散程度越小, 越集中在真值附近。在物理实验中, N 是由物理量本身决定的, 而 S 则是由实验系统中所有随机因素共同决定的。

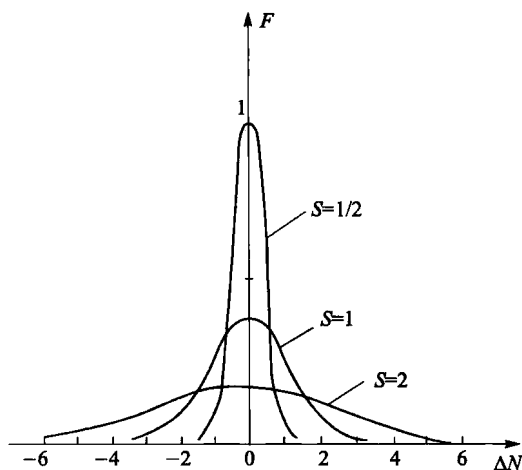


图 2-1 正态分布的概率密度函数曲线

(2) 正态分布的三个特点

① 分布的对称性

绝对值相同的随机误差出现的概率相同。

② 分布的单峰性

绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。

③ 分布的有界性

绝对值很大的误差出现的概率趋于零。

(3) 算术平均值与最近真值

根据分布的第一个特点, 有

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^k \Delta'N_i = 0 \quad (2-2)$$

$$\text{即} \quad \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^k (N_i - N) = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^k N_i - kN = 0 \quad (2-3)$$

$$\text{所以} \quad N = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k N_i = \text{lin } \bar{N} \quad (2-4)$$

而 $\bar{N} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k N_i$ 是 k 次测量结果的算术平均值。由式(2-4)可知, 当测量次数为无限大时, 算术平均值就可以认为是被测量的真值。实际上, 测量次数都是有限的, 这时的算术平均值就不是真值, 但它是一个最接近真值的测量值, 称为测量的最近真值。

2.2 测量的不确定度

误差是绝对的, 它贯穿于整个测量过程中, 因此不可能通过实验测量获得真值。所以要准

确地计算出误差也是不可能的,只能对其数值指标进行评定。误差的数值指标用不确定度表示。

不确定度是表征被测量的真值落在某一个量值范围内的一个评定。按此含义可知,不确定度的大小就是真值以某一概率出现的那个量值范围的大小。不确定度小,该量值范围就小,测量结果的可信度就高,反之则低。不确定度的所有分量可以分成两类,A类不确定度和B类不确定度。

1. A类不确定度

能用统计方法计算的那些分量称为**A类不确定度**。

设有一组等精度测量数据 N_1, N_2, \dots, N_k , 其算术平均值为

$$\bar{N} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k N_i \quad (2-5)$$

定义该测量列的任一次测量值的A类不确定度为

$$S = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (N_i - \bar{N})^2} \quad (2-6)$$

这一公式称为贝塞尔公式。算术平均值的A类不确定度计算式为

$$S_N = \sqrt{\frac{1}{k(k-1)} \sum_{i=1}^k (N_i - \bar{N})^2} \quad (2-7)$$

可以证明,在没有系统误差的情况下,只要 k 足够大,那么算术平均值的误差落在 $[-S_N, S_N]$ 内的概率为 0.683,这个概率称为置信度。同样,真值落在 $[\bar{N} - S_N, \bar{N} + S_N]$ 范围内的置信度也为 0.683。而真值落在 $[\bar{N} - 2S_N, \bar{N} + 2S_N]$ 范围内的置信度为 0.954,落在 $[\bar{N} - 3S_N, \bar{N} + 3S_N]$ 内的置信度为 0.997。

2. B类不确定度

测量中凡是不符合统计规律的不确定度统称为**B类不确定度**,记为 u 。为简化起见,这里仅对由仪器或量具本身性能所产生的不确定度问题进行讨论。在相同条件下大批生产的仪器产品,仪器的误差在 $[-\Delta_{\text{仪}}, \Delta_{\text{仪}}]$ 范围内是按一定概率分布的。这里 $\Delta_{\text{仪}}$ 是仪器的最大允差。下面介绍 $\Delta_{\text{仪}}$ 的几种取值方法:

(1) 对能连续读数的仪器,取 $\Delta_{\text{仪}}$ 等于其分度值的一半。例如,对毫米分度尺,取 $\Delta_{\text{仪}} = 0.5 \text{ mm}$;对 0.01 mm 分度螺旋测微计,取 $\Delta_{\text{仪}} = 0.005 \text{ mm}$ 。

(2) 对不能连续读数的仪器,取 $\Delta_{\text{仪}}$ 等于其分度值。例如,对 0.02 mm 分度的游标卡尺,取 $\Delta_{\text{仪}} = 0.02 \text{ mm}$;对 0.1 s 分度机械停表,取 $\Delta_{\text{仪}} = 0.1 \text{ s}$ 。

(3) 对指针式电表, $\Delta_{\text{仪}}$ 按其准确度级别定为

$$\Delta_{\text{仪}} = \text{量程} \times \text{准确度级别} / 100$$

例如,某电压表的量程为 30 V ,准确度级别为 0.5 级,则

$$\Delta_{\text{仪}} = 30 \times 0.5 / 100 = 0.15 \text{ V}$$

(4) 数字式电表的 $\Delta_{\text{仪}}$ 可用下式计算

$$\Delta_{\text{仪}} = a\% u_x + b\% u_m$$

式中, u_x 为电表示值; u_m 为所用量程的满刻度值; a 为与示值有关的系数; b 为与满刻度值有关的系数。 a 与 b 的值可从电表说明书中查到。

(5) 直流电阻电桥的 $\Delta_{\text{仪}}$ 可用式(2-8)确定

$$\Delta_{\text{仪}} = \frac{a}{100}(R_n/k + X) \quad (2-8)$$

(6) 直流电位差计的 $\Delta_{\text{仪}}$ 可用式(2-9)确定

$$\Delta_{\text{仪}} = \frac{a}{100}(U_n/10 + X) \quad (2-9)$$

在方法(5)和(6)中, a 为准确度级别; R_n 和 U_n 为基准值, 等于有效量程内最大的 10 的整数幂, k 一般取值为 10; X 为刻度盘示值。例如, 某电桥的量程是 11 111.1 Ω , 那么该量程的基准值为 10 000 Ω ; 如果把方法(6)中的不确定度改写为相对不确定度 $\delta_{\text{仪}} = \left(1 + \frac{U_n}{10U_x}\right)a\%$, 则可以看出, 当 $U_x = U_n$ 时 $\delta_{\text{仪}} = 1.1a\%$, 当 $U_x = U_n/10$ 时 $\delta_{\text{仪}} = 2a\%$ 。这说明测量值只有大于或等于基准值时, 示值才能达到仪器所标出的准确度, 否则不确定度会增大。

(7) 停表的 $\Delta_{\text{仪}}$ 一般取人体反应不确定度, 即

$$\Delta_{\text{仪}} = 0.2 \text{ s}$$

对于其他各类仪器的 $\Delta_{\text{仪}}$ 可按照说明书(符合国家标准)中的规定确定。一般而言, u_B 与 $\Delta_{\text{仪}}$ 的关系为

$$u_B = \Delta_{\text{仪}} / C \quad (2-10)$$

C 称为置信系数。几种常见仪器的最大允差 $\Delta_{\text{仪}}$ 内的分布与置信系数 C 的关系见表 2-1。如果无法确定仪器误差的分布规律, 则一般按正态分布进行处理。

表 2-1

仪器名称	米尺	游标卡尺	千分尺	物理天平	秒表
误差分布	正态分布	均匀分布	正态分布	正态分布	正态分布
C	3	$\sqrt{3}$	3	3	3

3. 合成不确定度

如果测量结果中同时含有 A 类不确定度分量 S 和 B 类不确定度分量 u , 其合成不确定度为

$$\sigma = \sqrt{S^2 + u^2} \quad (2-11)$$

相对不确定度定义为不确定度与算术平均值的比, 即

$$\delta_o = \sigma / \bar{N} \quad (2-12)$$

例 2-1 用 50 分度的游标卡尺测一圆环的宽度 h , 其数据分别为: 15.272 cm, 15.276 cm, 15.268 cm, 15.274 cm, 15.270 cm, 15.274 cm, 15.266 cm, 15.270 cm, 15.272 cm, 15.272 cm, 求合成不确定度为 σ 。

解: A 类不确定度

$$S_h = \sqrt{\frac{1}{10 \times 9} \sum (h_i - \bar{h})^2} = 0.003$$