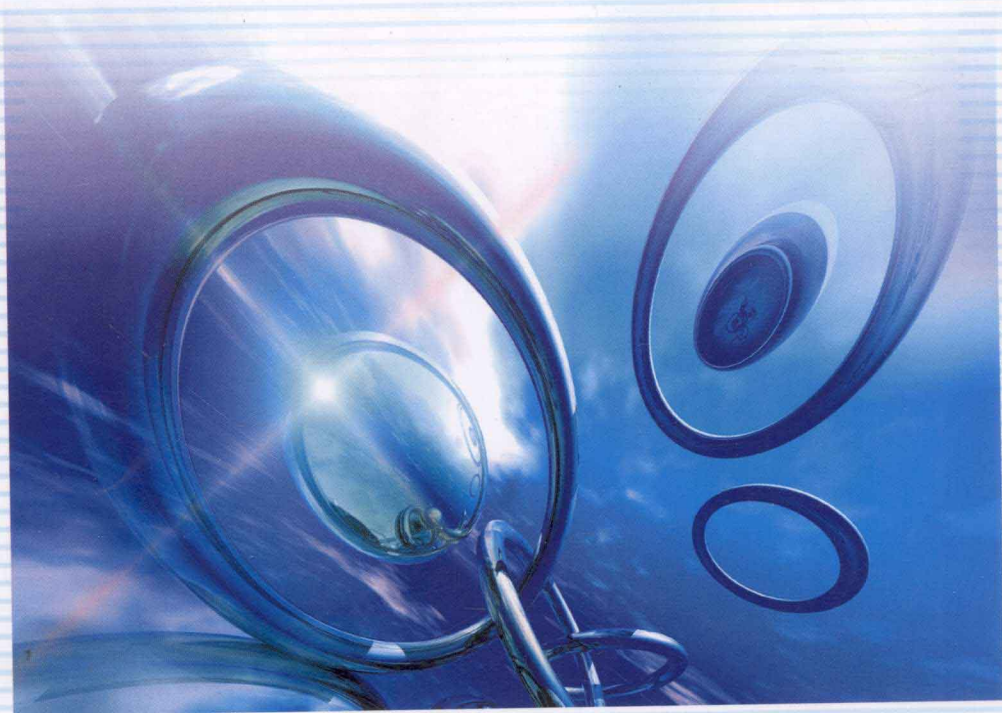




高等教育“十一五”规划教材

大学实验物理教程

胡建人 © 主 编



 科学出版社
www.sciencep.com

高等教育“十一五”规划教材

大学实验物理教程

胡建人 主 编

黄曙江 副主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书根据高等工业学校物理实验课程教学的基本要求,结合近年来实验理念的发展和风格演变编写成。全书系统地介绍了实验物理的基本知识,包括测量、误差、不确定度、有效数字及数据处理方法,常用的力学、热学、电磁学、光学等仪器的工作原理和使用方法,以及实验物理常用的测量技术与方法。全书包含了23个基础实验、12个近代物理与综合性实验和10个设计性实验,介绍了实验物理教学CAI的各种应用和虚拟实验的操作方法。书末的附录提供了常用物理数据简表。本书各章节内容既相对独立,又有其内在联系,形成一个较完整的体系。

本书可作为高等工业学校各专业物理实验课程的教材或参考书,也可供相关实验技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学实验物理教程/胡建人主编. —北京:科学出版社,2010

(高等教育“十一五”规划教材)

ISBN 978-7-03-026550-0

I. 大… II. 胡… III. 物理学-实验-高等学校-教材 IV. 04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第016267号

责任编辑:王彦/责任校对:赵燕

责任印制:吕春珉/封面设计:东方人华平面设计部

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2010年2月第一版 开本:787×1092 1/16

2010年2月第一次印刷 印张:22 1/4

印数:1—3 000 字数:520 000

定价:35.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(海生))

销售部门电话 010-62134988 编辑部电话 010-62138978-8208

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

大学实验物理课程是工科院校独立设置的一门必修基础课,是理论联系实际桥梁。课程的目标是培养大学生科学实验的能力,提高其科学实验的综合素质,而教材是实验物理学的根本。

作者根据全国高等工业学校物理实验课程教学的基本要求,在杭州电子科技大学建校 30 年来大学实验物理课程教学改革和实验室建设以及参加浙江省大学生物理实验技能与创新竞赛的实践基础上,揉合学校专业特色、近年来国内实验风格的演变和新增的实验仪器、项目,并继承了 2002 年出版的《大学物理实验》的优点编写了本教材。

为了拓展大学实验物理内容的深度与广度,培养与发展学生的创新意识,本书有意识地增强了综合性与设计性实验,增加了与工科类专业有关的新技术、新知识的介绍和相关的实验内容,如新光源介绍、激光技术、半导体及传感器等相关的实验及知识。编入的大学实验物理教学 CAI 章节,着重介绍计算机数据采集与常用表格软件在数据处理中的应用,提供计算机模拟实验操作,拓展了实验时间与空间,加深学生对一些复杂实验的感性认识和兴趣。

本教材按实验层次编排,力求做到系统性和完整性,同时兼顾各专业的适用性。主要内容包括:实验物理基础知识、测量误差、不确定度、有效数字及数据处理;验物理基础训练及常用实验技术;基础实验,包括经典的力学、热学实验、电磁学实验、光学实验共 23 项;近代物理与综合性实验 12 项;设计性实验 10 项;实验物理计算机辅助教学(CAI)。

本教材适应目前分层次教学的趋势,既能满足基本教学需求,也能用于拓宽知识面的教学和研究性实验教学。

参加本教材编写的有胡建人(前言,第一章第四节,第二章,第五章设计性实验引言部分,实验三十六、四十二、四十三、四十四,第六章,附录),黄曙江(绪论,第一章第一~三节及习题,实验五、二十四、三十二、三十三、三十九、四十五);徐姪梅(实验一、二、三、十七、十九、二十五、二十六、二十七);郑飞跃(实验四、十五、十六、十八、二十、二十二、三十五);杨菁菁(实验六、十四、二十一、三十四、四十、四十一);黄华(实验七、八、十一、十二、二十九、三十、三十一);尤素萍(实验九、十、十三、二十三、二十八、三十七、三十八)。胡建人负责统稿并做文字润色。黄曙江担任仪器选择工作。徐江荣在本书编写和出版中做了很大贡献。

本教材在编写中参考了国内一些兄弟院校的教材,在此谨对相关作者表示衷心的感谢。

大学实验物理教学是一项集体工作,教学内容和教材的形成凝聚了杭州电子科技大学全体同仁长年的努力和积累。

限于我们的学识和教学经验,书中还会存在不足和差错之处,敬请读者提出宝贵意见与建议,以便修正。

目 录

前言

绪论	1
第一章 实验物理中的误差和数据处理基础知识	4
第一节 测量与误差	4
第二节 随机误差和测量结果的表示	7
第三节 有效数字的概念和运算	19
第四节 实验数据的处理方法	22
习题	30
第二章 实验物理学中的常用方法与相关技术	32
第一节 实验物理学的常用测量方法	32
第二节 实验物理学的常用仪器	36
第三节 实验物理中的调整与操作技术	59
第四节 实验物理学的相关技术	63
第三章 基础性实验	74
实验一 密度的测量	75
实验二 用拉伸法测定金属丝的杨氏弹性模量	78
实验三 空气比热容比的测量	83
实验四 导热系数的测定	90
实验五 转动惯量的测量	94
实验六 液体表面张力系数的测量	100
实验七 液体黏滞系数的测定	105
实验八 固定均匀弦振动的研究	109
实验九 气垫导轨实验	114
实验十 电位差计的原理和使用	122
实验十一 示波器的使用	126
实验十二 霍尔效应及其应用	137
实验十三 硅光电池的特性及其应用	141
实验十四 铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线	147
实验十五 静电场测绘	152
实验十六 电桥法测量中低值电阻	157
实验十七 RLC 电路谐振特性的研究	165
实验十八 单缝和双缝衍射的光强分布	168
实验十九 薄透镜焦距的测定	174

实验二十 光的等厚干涉——牛顿环、劈尖·····	180
实验二十一 分光计·····	186
实验二十二 望远镜与显微镜放大率的测量·····	197
实验二十三 光的偏振·····	202
第四章 近代物理与综合性实验 ·····	207
实验二十四 迈克尔逊干涉仪的调整和使用·····	208
实验二十五 电子束的偏转与聚焦及电子荷质比的测定·····	216
实验二十六 激光器结构调整技术·····	225
实验二十七 激光器特性测定·····	229
实验二十八 光电效应法测定普朗克常数·····	233
实验二十九 空气中声速的测定·····	239
实验三十 用波尔共振仪研究受迫振动·····	244
实验三十一 用动态悬挂法测定工程材料的杨氏模量·····	251
实验三十二 全息照相·····	257
实验三十三 密立根油滴实验·····	263
实验三十四 PN 结温度特性及半导体禁带宽度的测量·····	269
实验三十五 夫兰克-赫兹实验·····	274
第五章 设计性实验 ·····	279
实验三十六 误差分配和实验仪器的选择·····	283
实验三十七 电表的改装与校准·····	285
实验三十八 用 UJ31 型电位差计校准毫安表·····	287
实验三十九 重力加速度的研究·····	289
实验四十 伏-安法测非线性电阻·····	290
实验四十一 光栅特性的研究·····	292
实验四十二 简易欧姆表的设计·····	294
实验四十三 简谐振动的研究·····	298
实验四十四 RC 串联电路·····	300
实验四十五 碰撞打靶研究抛体运动·····	304
第六章 实验物理计算机辅助教学 (CAI) ·····	306
第一节 概述·····	306
第二节 CAI 在实验数据处理中的应用·····	307
第三节 大学物理仿真实验·····	313
附录 常用物理数据简表 ·····	339
I 中华人民共和国法定计量单位·····	339
II 一些常用的物理数据·····	342
主要参考文献 ·····	348

绪 论

物理学从本质上说是一门实验的科学，物理规律的研究都以严格的实验事实为基础，并且不断受到实验的检查。例如，光的波动学说，就是由杨氏的光干涉实验得到证实的；麦克斯韦的电磁场理论，则是建立在法拉第等科学家长期实验的基础上，赫兹的电磁波实验，又使该理论得到普遍的承认和广泛的应用。又如，物理学家杨振宁、李政道早在 1956 年就提出了基本粒子在“弱相互作用下宇称不守恒”的理论，但直到实验物理学家吴健雄用实验证实之后，才得到国际上的公认。当实验结果与理论发生矛盾时，就需要进行进一步的实验，以便修正理论，所以实验是理论的源泉。

另一方面，正确的理论也能预言一些新的物理实验现象，例如爱因斯坦于 1920 年提出受激辐射的概念，首先从理论上预言有可能得到激光，基于这一新的理论概念，40 年之后，1960 年，人们研制成功了世界上第一台红宝石固体激光器。

在物理学的发展中，人类积累了丰富的实验方法，创造出各种精密、巧妙的仪器设备，涉及广泛的物理现象，这些使得实验物理课程有了充实的教学内容。实验物理课程是教育部确定的六门主要基础课程之一，是独立设置的必修课，是学生进入大学后系统学习科学实验知识和技术的开端，是后继实验课程的基础，它在培养学生用实验手段去发现、观察、分析和研究问题、最终解决问题的能力方面起着至关重要的作用。因此，必须处理好实验和理论的关系，重视科学的实验，重视科学实验训练的实验课教学。

一、实验物理课的目的

1) 通过对物理实验现象的观测和分析，学习如何运用理论指导实验、分析和解决实验中的问题，从理论和实际的结合上加深对理论的理解。

2) 培养学生从事科学实验的初步能力。这些能力是指：通过阅读教材或资料，能概括出实验原理和方法的要点；能正确使用基本实验仪器，掌握基本物理量的测量方法和实验操作技能；能正确记录和处理数据，分析实验结果和撰写实验报告；能完成简单的自行设计性实验等。

3) 培养学习者“严格、严密、严谨”的三严精神和实事求是的科学态度，培养勇于探索、坚韧不拔、遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品德。

二、实验物理教学的主要环节

一般实验教学可分为实验预习、实验操作和撰写实验报告三个环节。

1. 实验预习

实验预习是为实验操作做准备的，通过实验预习应明确三个问题：做什么？怎么做？为什么？为此需要做到：

1) 认真阅读实验指导书、参考资料等, 事先对实验内容作全面的了解。对于验证性实验, 应充分理解与被验证的规律有关的概念、理论以及物理过程; 对于探索性实验, 应充分熟悉与实验有关的知识, 以及要研究的物理过程和期望得到的带有规律性的物理现象, 明确实验目的与要求。每个实验项目后的“预习思考题”, 是帮助学者带着问题预习而设。

2) 弄清实验中使用的常用仪器的构造原理、操作规程、读数原理、方法及注意事项。特别对注意事项不仅要仔细看, 还要时刻注意, 否则会造成仪器损坏, 甚至人员事故。对真正弄不懂的部分, 应做记录, 在进入实验操作环节时, 再向实验指导教师请教。只有这样, 才能在实验中克服盲目性, 充分相信自己的测量结果和由这些测量结果得出的结论, 从而达到实验目的。

3) 拟定实验步骤、数据表格等, 并在实验操作前交实验指导教师审阅, 经认可后再做实验。学校网站有关于大学物理实验教学相关内容可以查看。

2. 实验操作

实验操作是整个实验教学中最重要的一环, 通过具体实验的操作, 完成动手能力、分析问题和解决问题等能力的培养。在该环节中, 学生在教师指导下独立地进行仪器的正确安装和调整, 对各种实验现象仔细观察, 对实验原始数据完整记录。为此要注意下述几方面的问题。

1) 先观察后测量; 先练习后测量; 先粗测后细测。

2) 不要单纯追求实验数据, 应学会分析实验问题。在实验过程中, 会出现在教材等资料中没有提到的或是与原先的估计不吻合的现象, 对这类现象应及时发现, 并提出问题, 做出分析和判断。

3) 实验中要贯彻严肃的态度、严格的要求、严密的观测。

4) 遵守各项规章制度, 注意安全。

5) 实验原始数据须经实验指导教师审核、签字后方才有效, 应认真对待实验原始数据, 它将为以后的计算和问题分析提供宝贵的第一手资料。

6) 离开实验室前, 应自觉整理好仪器, 并做好卫生清洁工作。

3. 撰写实验报告

作为科学实验能力的组成部分“写出合格的实验报告”, 是实验物理课程的培养训练任务之一。实验报告是对实验工作的全面总结, 既要全面又要简单明了, 应做到用词确切、字迹整洁、数据完整、图表规范、结果明确。撰写实验报告的过程主要是对实验者的综合思维能力和文字表达能力的训练过程, 也为他们日后在科学研究、工程实践等实际工作中撰写实验报告、研究成果报告、科技论文等打下基础; 这种能力的大小将直接影响到在科学与工程实践中的工作能力和工作业绩。

1) 一份完整的实验报告应包括以下几个方面内容:

① 实验名称。

② 实验目的。

③ 简要的实验原理，包括基本关系式、必要的电路、光路等简图以及数据表格。书写原理时，不应照抄实验指导书，应该用自己理解后的文字来概述，列出简要步骤。

④ 仪器设备，包括型号、规格、参数与仪器编号等。

⑤ 实验数据图表、数据处理及实验结果，要给出完整的量化表达式。

⑥ 误差分析，分析实验中可能产生各项误差的原因。

⑦ 问题讨论，包括对实验中的现象解释，对实验方法的改进与建议，分析、讨论题，实验后的体会等。

2) 撰写实验报告时必须注意：

① 不可把实验报告与实验指导书混为一谈。实验报告与实验指导书从语言到具体内容都是有原则区别的。实验指导书向学生提出实验的任务、目的、要求，阐明实验原理，提供进行实验的思路和方法，告诉学生应该怎么做；而实验报告是在完成实验过程之后写出的总结，以书面形式汇报实验的成果，具体回答如何做、获得了什么结果、意义价值何在，这些必须由实验者根据其实实践再用自己的语言来归纳、总结。

② 实验报告的核心特征就是实事求是。因此在撰写的实验报告中，对实验过程中应记录的实验条件、实验现象、实验数据应严格如实地予以记录，对测量数据的有效位数不得随意增删。

③ “实验原理”和“数据处理”为写作重点。没弄懂原理就做实验，难以产生好的实验效果，因此要求在报告中写清楚实验原理，这还可促使自己重视实验预习，也符合科研与工程的实际过程；数据处理是指对原始数据进行处理后代入测量公式，算出测量结果。计算各直接测得量的 A 类不确定度分量，估算 B 类不确定度分量，利用不确定度传递公式计算测量结果（间接测得量）的不确定度。最后应正确地表述测量结果，并评估测量结果（测量是否达到预期目的，效果怎样）。如果测量值误差较大，要分析原因，查明主要误差因素，提出减少或消除误差的措施。

④ 实验报告应该写在实验报告纸上，图表则必须用坐标纸。

⑤ 本次的实验报告必须在下次实验时交指导教师，不得拖延。

第一章 实验物理中的误差 和数据处理基础知识

实验物理通过一定的手段和仪器使一些物理现象再现，并从中发掘出这些现象的规律，找出构成实验各主要因素的数学关系。要实现这一目的，大致包括以下三个步骤：第一步是设计或选用实验仪器，为实验及测量准备条件；第二步是测量；第三步是数据处理，找出物理量之间的数学关系，得出物理现象的规律。因此，测量是物理实验的中心，数据处理是物理实验的结果。

测量是用一定的工具或仪器，通过一定的方法和程序直接或间接地对被测量对象进行比较。因为任何测量都是两个同类量之间的比较，因此必须使用统一的标准单位。将待测量与选作标准单位的物理量进行比较，其倍数即为该待测量的测量值。一个物理量的测量值应由数值和单位两部分组成，缺一不可。

目前，国内物理学刊物中各物理量的单位，是根据《中华人民共和国计量法》，由国家技术监督局于1994年发布的国家法定计量单位和符号，它是以国际单位制（SI）为基础的国家法定计量单位。国际单位制是在1971年第十四届国际计量大会上确定的，它是以米（长度）、千克（质量）、秒（时间）、安培（电流强度）、开尔文（热力学温度）、摩尔（物质的量）和坎德拉（发光强度）作为基本单位的，这些单位称为国际单位制的基本单位；其他量（如力、能量、电压、磁感应强度等）的单位均可由这些基本单位导出，称为国际单位制的导出单位。

第一节 测量与误差

一、测量

测量按性质，可分为直接测量和间接测量。

直接测量：指可以用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量。如用米尺测长度、用温度计测温度、用电压表测电压等都是直接测量，所得的物理量如长度、温度、电压等称为直接测量值。

间接测量：指无法进行直接测量，而需依据待测量与若干个直接测量值的函数关系求出的物理量的测量。大多数的物理量都是间接测量值。如单摆法测量重力加速度 g 时， $g=4\pi^2 l/T^2$ ， T （周期）， l （摆长）是直接测量值，而 g 就是间接测量值。

根据测量仪器构造或测量时的性质，有三种测量方法。

偏位测量法：是根据测量仪器本身的零件所发生的偏转或位移量得到被测的物理量的方法。伏特表或安培表测量电压和电流均利用线圈指针的偏位指示得到测量值。

零位测量法：是用已知的标准量去抵消被测物理量的作用的一种测量方法。例如，用天平测量物体的质量，是用已知质量的砝码抵消被测物体对天平产生的作用，通过零

位指示平衡与否来测定被测量的大小的。

逐次比较法：是介于偏位测量法与零位测量法之间的一种测量方法，测量值必须经过逐次比较才能决定。例如，利用杠杆原理的中国市秤，位于支点两边的物体重量之比是由支点两边臂长之比来决定的，使用时必须移动秤砣逐次地加以比较，从而得出最后的读数。

通常的实验过程是通过直接测量一些物理量，再由这些物理量之间的关系公式求得另一个物理量，或验证某一运动定律；或者反过来，当运动规律尚未知道时，通过实验数据的分析去建立它们之间的联系规律。

二、误差

（一）测量误差

测量的目的是在一定条件下，使用一定的仪器，通过一定的方法，获得被测量的真值。真值是：在某一时空状态下，被测物理量所具有的客观实际值称为真值。一般来说，用数字表示它时，它应是一个无穷多位的数。但是由于实验理论的近似性、实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性、环境的不稳定性等因素的影响，待测量的真值是不可能测得的，测量值 x 和真值 x_0 之间总有一定的差异 $\Delta = x - x_0$ ，我们称这种差异为测量值的误差。它可以是正值，也可以是负值。误差愈小近似程度愈高。误差的大小标志着测量结果的可靠程度或可信赖的范围。测量所得的一切数据，都包含着一定的误差，因此，误差存在于一切科学实验过程中，并因测试理论、测试环境、测试技术等不同而有所差异。

（二）误差的分类

为了研究误差的来源，根据误差性质和产生的原因可将误差分为以下几类。

1. 系统误差

按系统误差的特性，可将其分为定值系统误差与变值系统误差两大类。

（1）定值系统误差

在整个测量过程中，误差的大小和符号保持不变，如图 1-1-1 的 a 线所示。例如分析天平上用的三级砝码。根据国家规定，50g 砝码允许有 $\pm 2\text{mg}$ 的极限误差。如果一个砝码实际值为 49.998g，生产厂可标上 50g 的字样，作为合格品出厂，于是当我们使用这只砝码时，就引入了系统误差值 2mg。但这类系统误差，可经高级仪器校验，定出其误差值，然后在实际测量中加以修正。通常可用校正法、抵消法、交换法、替代法来消除定值系统

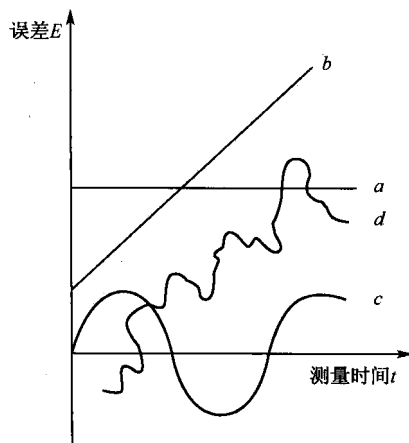


图 1-1-1 系统误差分布

误差。

(2) 变值系统误差

变值系统误差指在测量条件变化时,按一定规律变化的系统误差。按其变化规律又可分为线性变化,如图 1-1-1 中的 b 线;周期性变化,如图 1-1-1 中的 c 线;按复杂规律变化,如图 1-1-1 中的 d 线。

对线性变化的系统误差,常用对称测量法予以消除,例如在金属丝杨氏弹性模量测量实验中,由金属丝弹性滞后效应引起的系统误差呈线性变化关系,采用加砝码和减砝码的对称测量法,即可消除此类系统误差。

对周期性变化的系统误差的校正,可采用半周期偶测法,加以消除。即每次都在相关半个周期处测两个值然后取其平均,如测角仪器中由于转轴偏心而引起的周期性系统误差,就可采用这类方法消除。

对复杂规律变化的系统误差,如晶体管放大电路零点飘移造成的误差呈对数规律,此类系统误差的消除比较复杂,本书不作讨论。

产生系统误差的原因大致有如下几点:

- 1) 仪器本身的缺陷。如天平不等臂、温度计刻度不均匀、电表零点不准或长期未校准。
- 2) 测量方法或计算公式的近似性。如用单摆法测重力加速度 g 所用的公式是近似的;用伏安法测电阻的电路中因电表有内阻等而产生系统误差。
- 3) 测量条件与所用仪器的规定使用条件不符。如有些仪器要求在一定温度与湿度的条件下使用,而实际条件与此不符。
- 4) 观察者的测量方法不对,或有不良习惯。如读数时头总偏向某一边,计时时总是超前或滞后。

虽然系统误差的出现一般都有明确的原因,但是发现、减少或消除误差并没有一定的规律可循,只能在实验过程中逐渐积累经验、掌握技术、提高实验素养。因此,分析系统误差应当是实验必须讨论的问题之一。

2. 随机误差

在实际测量条件下,当多次测量同一量时,误差的绝对值和符号的变化时大时小、时正时负,以不可预定方式变化着的误差称随机误差(也称偶然误差)。

在测量中,有时排除了产生系统误差的诸因素,但在测量中仍可能存在一定的随机误差。这种误差是由于人的感官灵敏程度和仪器的精密程度有限,周围环境的干扰以及随测量而产生的偶然因素决定的。如用毫米刻度的米尺去测量某物体的长度时,往往将米尺去对准物体两端并估读到毫米下一位读数值,这个数值就存在一定的随机性,因此就带来了随机误差。

由于随机误差的变化不能预先确定,所以对随机误差不能像对系统误差那样找出原因排除,只能估计,虽然随机误差的存在使每次测量值偏大或偏小,但是在相同的实验条件下,对被测量进行多次测量后可发现,其大小分布服从一定的统计规律,因而可以利用这种规律对实验结果的随机误差作出估算。

3. 粗大误差

明显超出规律条件下的误差称为粗大误差。其原因包括错误地读取示值、测量仪器具有缺陷、使用测量器具的环境干扰或使用不正确等。

三、对测量结果的评价

对于测量结果作总体评价时，常常用精密度、准确度和精确度三个概念，这些概念在使用时要加以区别。

(一) 精密度

精密度表示测量结果中随机误差大小的程度。在一定条件下，重复测量结果接近的程度高，即随机误差小，称精密度高，相反则精密度低。

(二) 准确度

准确度表示测量结果中系统误差大小的程度。它描述测量值与真值符合的程度。准确度高，即测得的结果与真值接近程度好，系统误差小。

(三) 精确度

精确度是测量结果中系统误差和随机误差综合大小的程度。即指测量结果的重复性及接近真值的程度。只有精密度和准确度都高时，精确度才高。

上述概念可通过下面某一长度的测量结果加以说明，如图 1-1-2 所示。假设长度的真值为 A 。第①种测量结果表明随机误差小，系统误差大，称为精密度高；第②种测量结果表明系统误差小，随机误差大，称为准确度高；第③种测量结果表明系统误差和随机误差均小，精密度和准确度均高，称为精确度高。

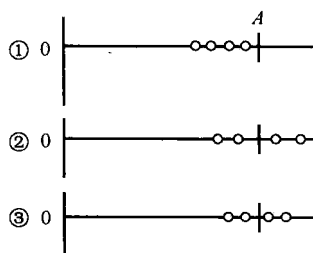


图 1-1-2 精密度、准确度和精确度示意图

第二节 随机误差和测量结果的表示

上面已讲到，随机误差是符合统计规律的。在测量次数足够多时，大部分测量中随机误差分布是正态分布。根据统计理论，可以证明随机误差分布函数 $f(\Delta)$ 的表达式为

$$f(\Delta) = \frac{h}{\sqrt{2}} e^{-h^2 \Delta^2} \quad (1-2-1)$$

其中 h 是一个常数，叫精密度指数，取 $\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}h}$ ，上式可写成

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

其中 σ 为标准误差； Δ 为误差，如图 1-2-1 所示。

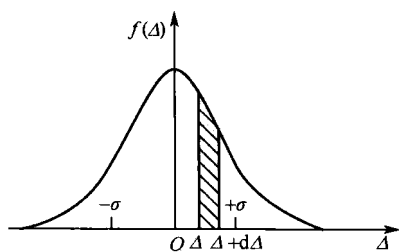


图 1-2-1 正态分布曲线

式 (1-2-2) 中用了

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\Delta) d(\Delta) = 1 \quad (1-2-3)$$

即归一化条件。这样图 1-2-1 曲线下斜线部分的面积元 $f(\Delta) d\Delta$ 是误差为 $\Delta \sim \Delta + d\Delta$ 出现的概率，式 (1-2-2) 就是误差的概率密度分布函数。这种分布函数也称为正态分布或高斯分布，它在测量次数趋于无穷时成立，测量次数很多时近似成立。

从图 1-2-1 所示的正态分布曲线可以看出以下几个特征：

个特征：

1. 对称性

正、负误差出现的概率相等，即呈正负分布的对称性。

2. 单峰性

大误差出现的概率小于小误差出现的概率。零误差出现的概率最大，称为单峰性。

3. 有界性

随机误差绝对值的有限性，即在一定观测条件下，随机误差的绝对值不会超过一定限度，换句话说具有一定的误差范围。

4. 抵偿性

多次测量中随机误差具有互相抵偿性。因为随机误差的分布是正负对称的，故全部可能误差的总和等于零，全部可能误差的算术平均值也将等于零，即一系列随机误差的算术平均值随着测量次数的增多而趋向于零，用极限可表示为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \cdots + \Delta_n}{n} = 0$$

因此，在测量次数无限增加的条件下，算术平均值就等于测量结果的最佳值。

此外，在某些情况下，随机误差也会遵循其他分布，如泊松分布、均匀分布或 t 分布。

一、随机误差的估算

要计算误差，首先必须知道真值，但真值往往是不能精确确定的。理论指出：即使是多次测量的平均值，也只能近似地代替真值，因此测量误差也只能估算。

估算方法有多种，我们只介绍常用的标准误差 σ ，它可作为测定值误差的量度，表示在一组多次测量的数据中，各个数据之间的分散程度。

(一) 算术平均值

设在相同条件下，我们对某物理量 x 进行了多次重复测量，其测量值分别为 x_1 ,

$x_2, x_3, \dots, x_n$, 则其算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-2-4)$$

根据误差理论, 多次测量值的算术平均值比各个测量值更可能接近真值。我们可以把 $\bar{x}$ 看作该物理量的近似真值 x_0 。当 $n \rightarrow \infty$ 时

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \rightarrow x_0 \quad (1-2-5)$$

(二) 标准误差

根据误差理论, 一组测量值其误差分布服从正态分布。

公式 (1-2-2) 中的特征量

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i)^2}{n}} \quad (n \rightarrow \infty) \quad (1-2-6)$$

其中 x_0 为真值, n 为测量次数, Δ_i 为各次测量值的随机误差。

可见标准误差是将各个误差的平方取平均值再开方得到的, 所以, 标准误差又称为均方根误差。

随机误差 Δ 为正态分布时, 概率密度分布函数 $f(\Delta)$ 由式 (1-2-2) 表示, 那么其特征量 σ 的物理意义又如何呢?

图 1-2-2 是不同 σ 值时的 $f(\Delta)$ 分布曲线, σ 值越小, 曲线越陡而峰值越高, 说明测量值的误差集中, 小误差占优势, 各测量值的分散性小, 重复性好。反之, σ 值大, 曲线较平坦, 每次测量值的分散性大, 重复性差。

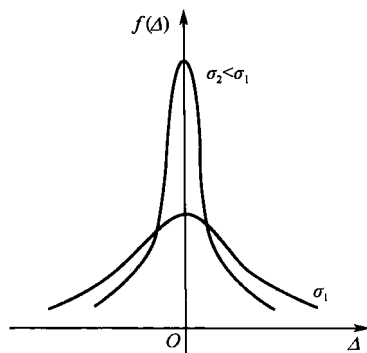


图 1-2-2 不同 σ 下的正态分布曲线

但应注意, 标准误差 σ 和各测量值的误差 Δ_i 有着完全不同的含义, Δ_i 是实在的误差值, 亦称真误差, 而 σ 并不是一个具体的测量误差值, 它反映在相同条件下进行一组测量后的随机误差概率分布的情况, 只具有统计意义, 是一个统计性的特征值。

由于 $f(\Delta)d\Delta$ 是测量值随机误差出现在小区间 $(\Delta, \Delta+d\Delta)$ 的可能性 (概率), 那么测量值误差出现在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间内的概率 P 就是

$$P(-\sigma < \Delta < +\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\Delta) d(\Delta) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} d\Delta = 68.3\% \quad (1-2-7)$$

该积分值由拉普拉斯积分表查得。

由此可见, 标准误差 σ 所表示的意义是: 任作一次测量, 测量值误差落在 $-\sigma$ 到 $+\sigma$ 之间的可能性为 68.3%。也就是说, 假如我们对某一物理量在相同条件下测 1000 次, 则可能有 683 次测量的测量误差落在 $-\sigma$ 到 $+\sigma$ 区间内, 即标准误差是一种统计意义的特征量, 用以表征测量值离散程度的特征量。

由于真值无法知道, 因而误差 Δ_i 也无法计算。但在有限次测量中的算术平均值 $\bar{x}$ 是真值 x_0 的最佳值, 且当 $x \rightarrow \infty$ 时, $\bar{x} \rightarrow x_0$ 。所以, 我们可以用各次测量值与算术平均值之差——残差 $(x_i - \bar{x})$, 来估算标准误差。

因此在有限次数测量时, 标准误差 σ 的估算值 σ_x (标准偏差), 可用下式表示:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n-1}} \quad (1-2-8)$$

式中 Δx_i 为各次测量值与算术平均值的误差, n 为测量次数。

根据概率统计, 测量列中任一测量值的误差落在 $\pm\sigma$ 区间内的可能性也为 68.3%。误差理论证明, 算术平均值 $\bar{x}$ 本身的标准偏差为

$$\sigma_x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

即 $\sigma_x < \sigma_x$ 。这是因为 $\bar{x}$ 是测量结果的最佳值, 它比任意次测量值 x_i 更接近真值, 所以误差自然要小。 σ_x 的物理意义是在多次测量的随机误差服从正态分布的条件下, 真值处于 $\bar{x} \pm \sigma_x$ 区间的概率为 68.3%。

(三) 极限误差

定义

$$\delta = 3\sigma \quad (1-2-9)$$

它的概率含义是

$$P(-\delta < \Delta < +\delta) = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(\Delta) d(\Delta) = 99.7\%$$

它表示任作一次测量时, 测量值的误差落在 $-3\sigma \sim +3\sigma$ 之间的概率为 99.7%, 即在 1000 次测量中只有 3 次测量值的误差绝对值会超过 3σ 。由于在一般测量中次数很少超过几十次, 因此, 可以认为测量误差超出 $\pm 3\sigma$ 范围的概率是极小的, 故称其为极限误差。在测量次数相当多的情况下, 如果出现误差的绝对值大于 3σ 的数据, 可以认为是由于过失引起的异常数据而加以剔除。根据概率统计, 测量列中任一测量值的误差落在 $\pm 3\sigma$ 区间内的可能性也为 99.7%。

上述误差都是用来描述随机误差的, 由于标准误差随测量次数 n 的变化小, 具有一定的稳定性, 而函数计算器上往往带有计算标准误差的功能, 故科学论文和报告一般均采用标准误差来评价数据的可靠性。

(四) 仪器误差

仪器误差是指在仪器规定的使用条件下, 正确使用仪器时, 仪器的指示数和被测量的真值之间可能产生的最大误差。它的数量通常由制造厂家和计量单位使用更精密的仪器, 经过检验, 比较后给出, 其符号可正可负, 用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示。如果没有注明, 一般用仪器的最小刻度值作为 $\Delta_{\text{仪}}$, 或者根据仪器的级别进行计算, 即

$$\Delta_{\text{仪}} = \text{量程} \times \text{级别} \%$$

通常仪器误差即包含系统误差，又包含随机误差，其性质在很大程度上取决于仪器的精度。级别高的仪器和仪表（如 0.2 级精密电表），其误差主要是随机误差；级别低的（如 1.0 级以下）则主要是系统误差。一般所用的 0.5 级或 1.0 级表，两种误差都可能存在。

仪器误差的概率密度若按均匀分布的，如图 1-2-3 所示。均匀分布是指其误差在 $[-\Delta_{\text{仪}}, \Delta_{\text{仪}}]$ 区间范围内，误差（不同大小和符号）出现的概率都相同，而区间外的概率为 0，即

$$\int_{-\Delta}^{+\Delta} f(\Delta) d(\Delta) = 1 \quad (1-2-10)$$

误差服从下式的分布规律：

$$f(\Delta) = \frac{1}{2\Delta}$$

对于一般的精密仪器，可以算出仪器的标准误差为

$$\sigma_{\text{仪}} = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3} \quad (1-2-11)$$

上式表示仪器误差在 $[-\sigma_{\text{仪}}, \sigma_{\text{仪}}]$ 范围内的概率有 57.7%；若用 68.3% 的概率，上式应改为

$$\sigma_{\text{仪}} = 0.683\Delta_{\text{仪}}$$

仪器误差满足均匀分布的实例有许多，例如量程为 100mA 的 1.0 级电流表，其仪器误差 $\Delta_{\text{仪}} = 100\text{mA} \times 1\% = 1.0\text{mA}$ ，仪器的标准误差 $\sigma_{\text{仪}} = 0.6\text{mA}$ ；最小分度为 1mm 的普通米尺，如果仪器误差 $\Delta_{\text{仪}} = 0.5\text{mm}$ ，仪器的标准误差 $\sigma_{\text{仪}} = 0.3\text{mm}$ ，若 $\Delta_{\text{仪}} = 1\text{mm}$ ， $\Delta_{\text{仪}} = 0.6\text{mm}$ 。

二、直接测量结果的表示方法

（一）测量不确定度

1970 年以来，国际计量协会和许多国家计量部门逐渐改用不确定度来评定测量结果。1981 年，国际计量委员会通过了取名为“Recommendation INC-1 (1980)”的文件，以统一不确定度的表达方式。我国计量技术规范《测量误差及数据处理（试行）》已自 1992 年 10 月 1 日施行，规定测量结果用总不确定度，或者用其相对不确定度来评定。

测量值不等于真值，可以设想真值就在测量值附近的一个量值范围内，测量不确定度就是评定作为测量质量指标的此量值范围。设测量值为 x ，其测量不确定度为 u ，则真值可能在量值范围 $(x-u, x+u)$ 之中，显然此量值范围越窄，即测量不确定度越小，用测量值表示真值的可靠性就越高。

对测量不确定度的评定，常以估计的标准偏差去表示大小，这时称其为标准不确定度。

由于测量有误差，因而才要评定不确定度，误差的来源不同，它对测量的影响也不

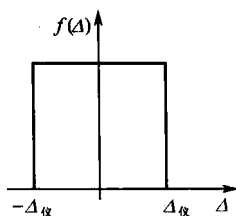


图 1-2-3 均匀分布的仪器误差