

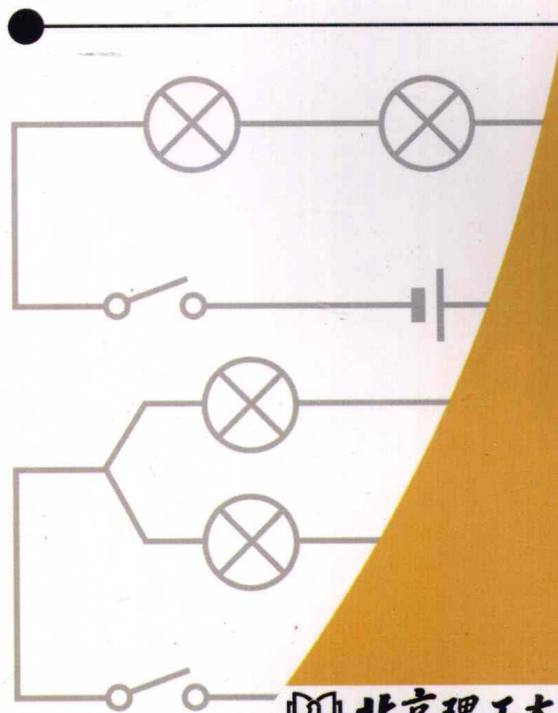


21世纪高等教育规划教材

大学物理实验

PHYSICAL EXPERIMENT OF COLLEGE

主 编 呼文来 孙光颖
副主编 李亚林 牛延强
王燕涛 徐雪楠
王建国
主 审 房晓勇



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

大学物理实验

PHYSICAL EXPERIMENT OF COLLEGE

主 编 李 强 副主编 王 强
参 编 王 强 王 强 王 强
参 编 王 强 王 强 王 强
参 编 王 强 王 强 王 强
参 编 王 强 王 强 王 强



清华大学出版社
Tsinghua University Press

21 世纪高等教育规划教材

大学物理实验

主 编	呼文来	孙光颖	
副主编	李亚林	牛延强	王燕涛
	徐雪楠	王建国	
主 审	房晓勇		

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

全书共分7章:第一章阐述了处理实验数据的有关知识,包括不确定度及其简便估算;第二章系统地阐述了物理实验中的测量方法和基本技术;第三章是力学和热学实验;第四章是电磁学实验;第五章是光学实验;第六章是近代物理实验;第七章是设计性实验。全书共7章51个实验。

本书可作为高等院校工科各专业物理实验课程的教材,也可作为实验技术人员或相关课程教师的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/呼文来,孙光颖主编. —北京:北京理工大学出版社,
2008.6

ISBN 978-7-5640-1636-4

I. 大… II. ①呼…②孙… III. 物理学-实验-高等学校-
教材 IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 104890 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 河北省昌黎县第一印刷厂

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 18.75

字 数 / 452 千字

版 次 / 2008 年 6 月第 1 版 2008 年 6 月第 1 次印刷

印 数 / 1~5500 册

定 价 / 29.00 元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 母长新

图书出现印装质量问题,本社负责调换

【前言】

根据教育部全国工科物理课程指导组制定的“高等工业学校物理实验课程教学基本要求”，为适应 21 世纪高科技发展需求，培养高素质应用型的多层次人才，根据我校近几年来使用的实验讲义和开设的实验，也考虑到我校专业设置和实验设备的具体情况，尤其是近几年来，在进行物理实验教学改革中，学校更新和增加了许多智能化的新设备、新仪器，为了适应教学的需要，特编写本教材。

物理实验课程是教育部确定的 6 门主要基础课程之一，是高等工业学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修课程。作为教材，我们在编写时既注意到它的系统性、科学性，也注意到了它的现代性、应用性。为此，我们对一些实验进行了取舍和调整，同时也加入了一些新实验。

全书共分 7 章。第一章是误差理论及有效数字，系统地介绍了与大学物理实验有关的数据处理知识，同时更加详细地介绍了不确定度方面的知识；第二章是物理实验的基本测量方法和基本要求，主要了解几种物理实验的测量方法。

在实验的顺序编排上基本还是按力、热、电、磁、光和近代物理的顺序，共计 51 个实验。第三章是力学和热学部分 11 个实验；第四章是电磁学部分 11 个实验；第五章是光学部分 8 个实验；第六章是近代物理与综合部分 11 个实验；第七章是设计性实验，是按实验教学应“开发学生智能培养与提高学生科学实验能力和素养”的根本目的编排的。本章只给出了实验任务、要求、可提供的仪器和必要的提示，而实验原理、方法、如何选择合适的实验仪器和得出实验结果都由学生经过分析自己完成。设计性实验部分共 10 个实验，可以根据进度和条件，选择一些进行安排，达到教学目的即可。

根据物理实验课的特点，本教材在绪论中介绍了物理实验教学的目的和要求、实验教学的程序、书写实验报告的要求及具体格式。在每个实验的编写过程中，大体格式是按照实验目的、实验仪器、实验原理、仪器简介、实验内容、注意事项和思考题的顺序，实验步骤包含在实验内容中。

本书由呼文来、孙光颖任主编，李亚林、牛延强、王燕涛、徐雪楠、王建国任副主编，参加本教材编写的还有（以姓氏笔画为序）马文青、乔引庄、张影、姜凤贤。

本书由房晓勇教授审稿，在编写过程中参考了呼文来主编的《大学物理实验》一书，也参阅了诸多兄弟院校的教材和仪器厂家的说明书，在此谨致以深切的谢意。

由于水平有限、时间紧迫，本教材难免存在不妥之处，恳请读者和同行专家们批评指正。

编 者

2008 年 6 月

【目录】

绪论	(1)
第一章 误差理论及有效数字	(4)
1.1 测量与误差	(4)
1.2 系统误差	(5)
1.3 随机误差的数学处理	(9)
1.4 测量结果的不确定度评定	(16)
1.5 有效数字	(24)
1.6 数据处理方法	(26)
习题	(31)
第二章 物理实验的基本测量方法	(33)
2.1 比较法	(33)
2.2 放大法	(35)
2.3 补偿法	(36)
2.4 转换法	(37)
2.5 模拟法	(39)
第三章 力学和热学实验	(40)
3.0 力学和热学实验基础知识	(40)
实验 3.1 长度和密度的测量	(41)
实验 3.2 介质导热系数的测定	(50)
实验 3.3 重力加速度的测量	(54)
3.3.1 用单摆测重力加速度	(54)
3.3.2 用复摆测重力加速度	(56)
实验 3.4 转动惯量的测量	(60)
3.4.1 用转动惯量仪测量转动惯量	(60)
3.4.2 用气垫转盘测量转动惯量	(64)
实验 3.5 弹性模量的测量	(68)
3.5.1 用静态拉伸法测定金属丝的弹性模量	(68)
3.5.2 霍尔位置传感器的定标和弯曲法测弹性模量	(72)
实验 3.6 粘滞系数的测量	(77)
3.6.1 用落球法测定液体的粘滞系数	(77)
3.6.2 用落针法测定液体的粘滞系数	(79)
实验 3.7 液体表面张力系数的测量	(82)
实验 3.8 用电流量热器法测定液体的比热容	(85)

实验 3.9 固体线膨胀系数的测量	(88)
实验 3.10 热电偶定标	(92)
3.10.1 用电位差计方法进行热电偶定标	(92)
3.10.2 用热电偶测试仪进行热电偶定标	(95)
实验 3.11 声速的测量	(97)
第四章 电磁学实验	(102)
4.0 电磁学实验基础知识	(102)
实验 4.1 电学元件伏安特性的研究	(108)
实验 4.2 惠斯通电桥的应用	(110)
实验 4.3 灵敏电流计的研究	(113)
实验 4.4 双臂电桥的应用	(118)
实验 4.5 电表的改装与校准	(123)
实验 4.6 示波器的调整和使用	(129)
实验 4.7 用示波器测绘磁化曲线和磁滞回线	(137)
实验 4.8 模拟法测绘静电场	(141)
实验 4.9 霍尔效应及其应用	(145)
实验 4.10 用冲击电流计研究电容器放电规律	(152)
实验 4.11 电子束聚焦和偏转研究	(156)
第五章 光学实验	(164)
5.0 光学实验基础知识	(164)
实验 5.1 薄透镜焦距的测定	(165)
实验 5.2 等厚干涉的研究与应用	(169)
实验 5.3 用菲涅耳双棱镜测光波波长	(173)
实验 5.4 分光仪及其应用	(177)
5.4.1 分光仪的使用及三棱镜顶角的测定	(178)
5.4.2 光栅衍射	(182)
5.4.3 折射率和色散率的测量	(185)
实验 5.5 偏振光的观察及液体浓度测定	(188)
5.5.1 偏振光的研究	(188)
5.5.2 用旋光仪测量溶液的旋光率及浓度	(193)
实验 5.6 单缝衍射的相对光强的分布	(198)
实验 5.7 用阿贝折射仪测量透明材料的折射率	(201)
实验 5.8 照相技术	(205)
第六章 近代物理与综合实验	(210)
实验 6.1 光谱定性分析	(210)
实验 6.2 氢原子光谱—里德伯常量的测定	(214)
实验 6.3 光电效应法测普朗克常量	(215)
实验 6.4 迈克尔逊干涉仪的应用	(221)
实验 6.5 全息照相	(224)

6.5.1 透射全息照相	(224)
6.5.2 反射全息照相	(229)
实验 6.6 密立根油滴实验	(232)
实验 6.7 夫兰克—赫兹实验	(238)
实验 6.8 塞曼效应	(241)
实验 6.9 用超声光栅测定液体中的声速	(244)
实验 6.10 钨的逸出功的测定	(249)
实验 6.11 光纤传感器测温度	(256)
第七章 设计性实验	(259)
7.0 设计性实验的基本知识、任务与要求	(259)
7.0.1 设计性实验的性质和特点	(259)
7.0.2 实验方案的选择和仪器配套	(259)
实验 7.1 物体密度值的测定	(262)
实验 7.2 重力加速度的研究	(262)
实验 7.3 谐振动的研究	(263)
实验 7.4 用电位差计校准电表	(264)
实验 7.5 电阻测温	(264)
实验 7.6 感应法测螺线管磁场	(266)
实验 7.7 硅光电池特性的研究	(267)
实验 7.8 测透明固体的折射率	(269)
实验 7.9 等厚干涉法测液体的折射率	(269)
实验 7.10 用迈克尔逊干涉仪测玻璃片的厚度	(269)
附录一 国际单位制	(271)
附录二 常用物理数据	(274)
附录三 1901—2004 年诺贝尔物理学奖获得者一览表	(283)
参考文献	(291)

绪 论

物理实验是独立于大学物理课程之外的一门必修课，是重要的实践环节。作为基础学科，它所用到的仪器、实验方法、测量技术、误差分析与计算等都是学习各种专业及科研中必不可少的。

1. 物理实验的重要性

(1) 物理学是在实验的基础上发展起来的。物理学定律无一不是实验规律的总结。当代物理学中，无论是哈肯的《协同学》还是普利高津的《耗散结构论》，都以著名的“贝纳德对流”实验为依据；即使是理论物理大师史蒂芬·霍金的《量子引力论》也必须用天文观测的数据来验证，所以我们说未经实验检验的理论不是真正的理论。爱因斯坦的相对论理论在创建半个世纪之后才经受实践的检验，在此之前并不能得到认可，他获得诺贝尔奖是因为成功地解释了光电效应实验。李政道和杨振宁吸取了这个教训，在他们宣布推翻弱相互作用下宇称守恒定律时，事先请“当代实验物理执政女王”吴健雄作了实验验证。

(2) 物理实验促进了其他自然科学、技术的发展。众所周知，法拉第历时 10 年，终于用实验的方法实现了磁生电，使得能源起了革命性的变化。列宁说，社会主义就是“苏维埃政权加上全国电气化”。实质上，历史上的工业革命都是能源的革命，每次革命的原始功绩都属于物理实验。近年来，物理实验越来越精确地测定了一系列物理常数，如各种基本粒子的荷质比、普朗克常量、光在真空中的传播速度等，使得计量基本单位的基准越来越精确和稳定。《量子宇宙学》指出，电子的质量稍许变化，宇宙便不是现在这个样子了。又如即将出现的高温超导材料会给技术带来的进步、经济效益和社会效益是很难正确估量的。还有许多实例不胜枚举。

(3) 物理实验证实了许多哲学命题。19 世纪发现的能量转化与守恒定律，得到了恩格斯的极高评价，称之为“伟大的运动基本定律”，因为这个定律使人们对世外造物主的最后记忆也消除了，而这个定律正是焦耳、迈尔等人用实验方法得到的；19 世纪末的迈克尔逊—莫雷实验导致了狭义相对论的诞生，给人们建立了辩证唯物论的时空观；自组织现象的发现，用物理学的观点解释了热力学第二定律的错误推论（当年恩格斯曾用归谬法以“宇宙大钟”的比喻批判过克劳修斯的“宇宙热寂”）。爱因斯坦与玻尔的争论实质上是哲学思想的争论，双方都在努力追寻实验验证，可惜虽然已经做了许多实验，但结果都不能令人满意。

2. 物理实验课的目的和要求

(1) 培养学生的自学能力和动手能力。物理实验课采用自学为主、教师指导为辅的教学方法。课前必须充分预习，要求写出预习报告。上课时，一定要自己操作，取得实验数据。教师在仪器的使用、实验技术上给予指导并检查数据的完整性和准确性。

(2) 培养学生解决问题的能力 and 实事求是的作风。实验中发生故障一般要自行排除。发现数据与理论值差异太大时，要实事求是，不得修改原始数据，更不得伪造和抄袭。

(3) 培养学生严谨的科学态度、勇于探索的精神。实验过程中要一丝不苟、严肃认真，

如实记录数据,对实验中出现的奇异现象要及时重复实验,捕捉这个信息,有可能导致新的发现,通过对现象的分析追究其产生原因。

(4) 培养学生热爱劳动、爱护国家财产、遵守纪律的品德。在实验室内必须遵守实验室守则,不得大声喧哗,不得做与实验无关的事情,要注意节约能源、爱护设备,发现仪器损坏要立即报告指导教师,实验结束后要搞好卫生,整理好仪器,以备下节课的同学做实验。

3. 实验课的基本程序

(1) 实验前准备:了解实验目的、实验原理、实验仪器的性能、基本工作原理和使用时的注意事项。清楚每个实验中所列的问题,在此基础上写出预习报告。预习报告应主要包括实验中要观察的物理现象和需要测量的物理量,并列出实验记录表格。

(2) 实验操作:实验时应对所要使用的仪器及工具是否完好和可用进行检查,通过练习能正确操作。在此基础上通过正确地组装和调整仪器进行实验(包括电路的正确连接、光路的调节等)。实验时一定要先观察现象,通过观察对被验证的定律或被测的物理量进行定性了解,然后再进行精确的测量。测量时一定要如实地记录数据,如有条件可进行重复测量。实验完成后对获得的数据或观察到的现象进行分析,在肯定结果合理后再整理仪器和工具。

(3) 写出实验报告,整理和分析所获得的实验数据,从而得出合理的实验结果,并对所得结果进行分析。

4. 写实验报告的具体要求

(1) 预习报告。在看懂实验原理和操作方法的基础上,按照“物理实验报告”规定的格式填写,内容包括实验题目、目的、仪器、原理和实验步骤,自己设计好数据表。进入实验室教师要检查预习报告,并提问一些问题,经教师认可后方可做实验。预习报告的内容一般包括以下部分:

1) 实验名称。

2) 实验目的。

3) 实验原理。主要包括:简要的实验理论、实验方法、主要计算公式及公式中各量的物理意义、公式成立所应满足的实验条件、实验的电路图、光路图和实验装置示意图。有些实验还要求写出自拟的实验方案、设计的实验线路、选择的实验仪器等。

4) 实验步骤。根据实际的实验过程写明实验的关键步骤和主要注意事项。

5) 数据表格。

6) 预习思考题。

(2) 实验报告。取得的数据要填在备好的数据表中,待教师签字后方可离开。实验后应按照本书第一章的要求处理数据,作出正确的结果表示、误差分析并回答问题。最后可以写对本实验的意见、要求、心得体会等。总成绩由预习报告、操作、实验报告三部分综合评定。

实验报告是实验的书面总结,报告应用自己的语言表达出所做内容、依据的物理思想及反应的物理规律、实验结果及结果分析和自己对实验的见解及收获。怎样写好一份合格的实验报告,也是实验课的一项重要基本训练。实验报告要在统一的实验报告纸上书写,除填写实验名称、日期、姓名、班级和组别等项外,实验报告的内容一般包括以下部分:

- 1) 实验目的及任务。
- 2) 实验仪器：注明仪器名称、编号和主要技术参数，必要时画出仪器简图。
- 3) 实验原理：一般只需写出原理概要（包括原理图或测量公式，注明公式中各量的物理意义及适用条件）。
- 4) 操作要点：根据要求及实际操作过程，写出仪器调节及测量中的关键过程和注意事项。
- 5) 实验记录：实验数据一般应采用表格形式记录。在预习时，就应设计好记录表格。记录数据时，应特别注意有效数字，并注明测得量的单位。
- 6) 实验数据处理：包括计算实验结果及其不确定度，给出实验结果的图示等。
- 7) 实验讨论及作业：对实验结果进行分析讨论，也可对实验中出现的一些现象进行分析总结，并完成课后作业题。

误差理论及有效数字

1.1 测量与误差

1. 误差的基本概念

人类在生产、生活和科学实验中经常要对各种物理量进行测量,以获得客观事物的定量信息。为了进行测量,必须选定一些标准单位,如选定质量的单位为 kg、长度的单位为 m、时间的单位为 s、电流强度的单位为 A 等。测量就是将被测物理量与这些作为标准单位的量进行比较的过程,其倍数即为被测物理量的测得值。测量可分为直接测量和间接测量两种。凡使用测量仪器能直接测得结果的测量,如用米尺测量物体的长度、用秒表测量一段时间等,称为直接测量,相应的物理量称为直接测得量。另外,还有很多物理量,它们不是用测量仪器直接测得的,而是先直接测量另一些相关的物理量,然后通过这些量之间的数学关系运算才能得到结果,这样的测量称为间接测量,相应的物理量称为间接测得量。例如,测量某物体的平均运动速率,我们是直接测量路程和通过这段路程所用的时间,然后经过计算得到的。显然,直接测量是间接测量的基础。

一般来说,测量过程都是在一定的环境条件下,使用一定的测量仪器进行的。由于测量仪器的结构不可能完美无缺;观察者的操作、调整和读数不可能完全准确;环境条件的变化,如温度的波动、振动、电磁辐射的随机变化;理论的近似性等,都不可避免地对实验结果造成各种干扰。因此,任何测量都不可能做到绝对的准确。我们把被测物理量在一定客观条件下的真实大小,称为该物理量的真值,记为 a 。把每次对应的测量值记为 x 。那么 x 与 a 之差 ε ,就称为测得值的误差,即

$$\varepsilon = x - a$$

误差 ε 为一代数值,当 $x \geq a$ 时, $\varepsilon \geq 0$; 当 $x < a$ 时, $\varepsilon < 0$ 。

误差存在于一切测量之中,而且贯穿测量过程的始终。每使用一种测量仪器,进行一次测量,都会引进误差。

在同一条件下多次测量同一物理量时,误差的大小和符号始终保持不变,或者按照某种确定的规律变化,这种误差称为系统误差。例如:用停表测量一段时间,假设停表走的快,则用它测出的时间总比真值大(假设其他误差可以忽略不计),此时的误差就是系统误差。

在同一条件下多次测量同一物理量时,测得值总有差异,并在消除系统误差以后,差异依然存在,即误差的绝对值和符号是变化不定、不可预知的,这种误差称为随机误差(或称偶然误差)。

由于观测者的粗心大意或操作不当造成的人为差错称为过失误差（或称粗大误差），例如看错刻度、读错数字、计算错误等。含有过失误差的测量结果是完全无效的，它往往表现为巨大的误差。当确认测量结果中含有过失误差时，该结果应舍弃不用。显然，过失误差是可以避免的。

测量结果中一般同时含有系统误差和随机误差。我们研究误差的目的就是要在测量过程中尽量减小误差，并对残存的误差给出适当的估计值。

2. 精度

精度是个笼统的概念，通常用它来反映测得值与真值的差异。它与误差的大小相对应，因此可用误差的大小来表示精度的高低。误差小则测量的精度高，误差大则测量的精度低。按误差的性质，精度又可分为下面几种。

(1) 准确度。准确度反映的是测量结果中系统误差的影响程度。如果系统误差小，则称测量的准确度高；如果系统误差大，则称测量的准确度低。

(2) 精密度。精密度反映的是测量结果中随机误差的影响程度。随机误差小，即重复测量所得的结果相互接近，则称测量的精密度高；反之，则称测量的精密度低。

(3) 精确度。精确度反映的是测量结果中系统误差和随机误差综合的影响程度。对于具体的测量，准确度高则测量的精密度不一定高，精密度高的测量其准确度也不一定高。但精确度高则表示测量的准确度和精密度都高。

1.2 系统误差

1. 系统误差的来源

系统误差总是使测量结果向一个方向偏离，其数值一定或按一定规律变化。它的来源有以下三个方面：

(1) 由于仪器本身的缺陷或未按规定的条件使用仪器而造成的误差。例如，仪器的零点不准造成的误差，等臂天平两臂不等长造成的误差，在 20℃ 下标定的标准电阻在 30℃ 的条件下使用造成的误差等。

(2) 由于测量所依据的理论公式本身的近似性，或者实验条件不能达到理论公式所规定的要求，或者由于测量方法所带来的误差。例如，利用单摆测量重力加速度 g ，所依据的公式为： $g = 4\pi^2 l / T^2$ （式中 l 为单摆的摆长， T 为单摆的周期），此公式成立的条件是摆角趋于零，而在测量周期时又必然要求有一定的摆角，这就决定了测量结果中必含有系统误差。

(3) 由于观测者本人的生理或心理特点所造成的误差。例如，测量一段时间时，观测者计时超前或落后习惯所带来的误差；对准标志时，观测者偏左或偏右所造成的误差等。

系统误差经常是一些实验主要的误差来源。依靠多次重复测量一般不能发现系统误差是否存在。系统误差处理不当往往会给实验结果带来重大影响，因此，我们要经常总结经验，掌握各种因素引起的系统误差的规律，以提高自己的实验技术素养。

2. 系统误差的发现

系统误差产生的原因往往是已知的，它的出现一般也是有规律的。人们通过长期实践和理论研究总结出一些发现系统误差的方法。下面简述两种常用的方法。

(1) 理论分析法。理论分析法是观测者凭借所掌握的有关某项实验的物理理论、实验

方法和实验经验等对实验所依据的理论公式的近似性、所采用的实验方法的完善性等进行研究与分析,从中找出产生系统误差的某些主要根源,从而发现系统误差的方法。例如,气垫导轨实验中,经理论分析知道由于滑块与导轨之间存在一定的摩擦阻力,如果实验中作为无摩擦的理想情况来处理,就会产生与摩擦阻力有关的系统误差。理论分析法是发现、确定系统误差的最基本的方法。

(2) 对比法。对比法是改变实验的部分条件甚至全部安排,去测量被测量,分析改变前后测得值是否有显著的不同,从中分析有无系统误差和探索系统误差来源的方法。对比的方法有多种,其中包括不同实验方法和不同测量方法的对比、使用不同测量仪器的对比、改变测量条件的对比以及采用不同人员测量的对比等。例如,将物体放在天平的左盘和右盘上分别称衡,可以发现天平不等臂引入的误差;精确地测量同一单摆在不同摆角时的周期值,可以发现周期与摆角有关。

以上介绍了两种发现系统误差的方法。除此之外,还有一些发现系统误差的方法,在具体工作中我们应注意学习。

3. 系统误差的减少和消除

处理系统误差没有通用的一般方法,下面介绍几个具有一定意义的原则。

(1) 消除产生系统误差的因素。这要求测量者要对整个测量过程及测量装置进行必要的分析与研究,找出可能产生系统误差的原因。例如,测量方法方面是否有近似公式或近似计算;测量仪器结构是否合理;测量环境方面是否有由于温度、湿度、气压、振动、电磁场等所引起的影响;观测者是否有估读刻度的偏高或偏低习惯等。经过分析与研究,如果确认实验中有系统误差,则针对具体原因,采取相应措施使系统误差得以减弱或消除。

(2) 对测量结果加以修正。计算出要处理的系统误差值,取其反号为修正值,加到测量结果上,使测量结果得到修正;或者在计算公式中加入修正项消除某项系统误差;或者用更高一级的标准仪器核准一般仪器,得到修正值或修正曲线,从而使测量结果得以修正。

(3) 采用适当的测量方法。在测量过程中,根据系统误差的性质,选择适当的测量方法,使测得值中的系统误差得到抵消,从而消除系统误差对测量结果的影响。例如,天平只有在两臂严格等长时,砝码的质量才等于被测物体的质量。事实上,天平两臂不总是严格等长的,即砝码的质量与物体的质量并不严格相等。为了消除这种系统误差,可以采用复称法称衡:设天平的左臂和右臂的长度分别为 l_1 和 l_2 , 物体的质量为 m 。先将物体放在天平的左盘上、砝码放在天平的右盘上进行称衡,天平平衡时,砝码的质量为 m' ,于是可得到 $ml_1 = m'l_2$ 。然后将物体放在天平的右盘上、砝码放在天平的左盘上进行称衡,天平平衡时,砝码的质量为 m'' ,于是 $m''l_1 = ml_2$ 。根据以上两式可得: $m = \sqrt{m'm''}$ 。

总的来说,消除系统误差影响的原则是首先设法使它不产生,如果做不到就修正或减小它,或者在测量过程中设法抵消它的影响。

我们在处理系统误差时,常把它分为两类来考虑,即已定系统误差和未定系统误差。已定系统误差是指误差的绝对值和符号已经确定的系统误差;未定系统误差是指误差的绝对值和符号未能确定的系统误差,对于未定系统误差通常可估计出误差范围。

4. 未定系统误差的处理

实验中使用的各种仪器、仪表和量具在制造时都有一个反映准确度的极限误差指标,习惯上称之为仪器误差,用 $\Delta_{\text{仪}}$ 来表示。这个指标在产品说明书中都有明确的说明。一般来

说, 仪器误差是构成测量过程中未定系统误差的重要成分 (仪器误差的处理方法见后面介绍)。未定系统误差的含义很广, 远不止仪器误差一种。至于其他的未定系统误差, 以后遇到时再加以介绍, 这里不再一一赘述。

5. 仪器误差 (限)

当人们使用仪器进行各种测量时, 最关心的问题无疑是仪器提供的测量结果与真值的一致程度, 即测量结果中各仪器的系统误差与随机误差的综合估计指标——不确定度的大小。由于仪器误差在不确定度估算中扮演了重要角色, 这里简单介绍仪器误差的相关概念。

在物理实验中, 常常把国家技术标准或检定规程规定的计量器具最大允许误差或允许基本误差经过适当地简化称为仪器误差 (限)。仪器误差 (限) 用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示, 代表在正确使用仪器的条件下, 仪器的示值与被测量真值之间可能产生的最大误差的绝对值。

导致仪器产生误差的因素是多方面的, 以最普通的指针式电表为例, 它们包括: 轴承摩擦, 转轴倾斜, 游丝的弹性不均、老化和残余变形, 磁场分布不均匀, 分度刻线不均匀, 外界条件的变化对仪表读数的影响, 检验用的标准所引起的误差等。

仪器误差 (限) 通常是由制造工厂或计量部门使用更精确的仪器、量具, 经过检定比较给出的, 一般在仪器的标牌上或说明书中注明, 但注明方式各不相同。

下面对注明方式分别作简要的介绍。

(1) 仪器上直接写出准确度来表明该仪器的仪器误差。例如, 精确度为 0.05 mm 的游标卡尺, 其仪器误差就是 0.05 mm。

(2) 根据仪器的准确度等级算出仪器误差。仪器的准确度等级是指在规定的使用条件下, 仪器性能达到规定的允许误差范围内所划分的准确度等级或级别, 其实质反映了测量仪器的示值接近真值的具体程度。用仪器的准确度等级计算出仪器误差, 反映的是仪器在量程内可能产生的最大测量误差 (极限值), 因此, 量程内任何分度的测量误差皆应小于该量值。通常定义

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

例如, 1.5 级, 量程为 100 mA 的电流表, 其测量示值的误差为

$$\Delta_{\text{仪}} = \pm (1.5\% \times 100) = \pm 1.5 (\text{mA})$$

又如, 0.1 级, ZX21 型电阻箱调整其示值为 560.0 Ω 时, 不考虑电阻箱的残余电阻, 该电阻的误差为

$$\Delta_{\text{电阻箱}} = \pm (0.1\% \times 560.0) = \pm 0.56 (\Omega)$$

还有一些仪器 (如电桥、电位差计、各类数字仪表等) 的仪器误差需用专用公式计算 (见表 1.2.1)。

附: 电表的准确度级别定义为

$$\frac{\text{电表的最大误差 } \Delta_m}{\text{电表的量程}} = \text{级别}\%$$

如果电表的量程是 100 mA, 经检定电表的最大误差 $\Delta_m = 1 \text{ mA}$, 得

$$\frac{1}{100} = \text{级别}\% = 1\%$$

我们把这支电表规定为 1 级表, 常见电表准确度级别分为 5.0、2.5、1.5、1.0、0.5、0.2、0.1 等级别。电表准确度级别出厂时已定好, 并标在电表的表盘上。

(3) 仪器的最小分度的一半或最小分度作为仪器误差。在不知道量具或仪器的误差或准确度等级时,我们作这样的规定:对于能连续读数(能对最小分度下一位进行估计)的仪器,取最小分度的一半作为仪器误差,如米尺、螺旋测微计、读数显微镜等;对于不能连续读数的量具或仪器,可取量具或仪器最小分度作为仪器误差,如秒表、数字式仪表等。以上规则在运用中有时也有例外,如最小分度值为 1°C 的温度计,它能连续读数,仪器误差为 0.5°C ,但由于其准确度不高,也可以用最小分度值 1°C 作为仪器误差。

为了方便读者,考虑到大学物理实验的对象,根据上述原则和习惯,现将常用物理实验仪器的仪器误差列成表 1.2.1。

表 1.2.1 常用物理实验仪器的仪器误差

仪器名称	仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$	说 明
毫米尺	0.5 mm	最小分度值的 1/2
游标卡尺	0.05 mm (1/20 分度) 0.02 mm (1/50 分度)	最小分度值
千分尺	0.004 mm (一级) 0.005 mm (零级)	最小分度值的 1/2
读数显微镜	0.004 mm (或 0.005 mm)	最小分度值的 1/2
测微目镜	0.004 mm (或 0.005 mm)	最小分度值的 1/2
水银温度计 (最小分度值 1°C)	0.5°C (或 1°C)	最小分度值的 1/2 (或最小分度值)
计时仪器	1 s, 0.1 s, 0.01 s (各类机械表) ($5.8 \times 10^{-6} t + 0.01 \text{ s}$) (电子表)	最小分度值, t 为时间的测量值
物理天平	0.05 g (感量 0.1 g) 0.01 g (感量 0.02 g)	天平标尺最小分度值的 1/2
分光计	$1'$	最小分度值
电桥	$\frac{a}{100} \left(\frac{R_N}{10} + R_0 \right) k$	a 为仪器精确度级别, R_0 为测量盘示值, R_N 为基准数值, k 为比率
电位差计	$K \cdot \% (V + U_0/10)$	K 为仪器精确度级别, V 为测量值, U_0 为基准数值
电阻箱	$K \cdot \% \cdot R$	K 为仪器精确度级别, R 为测量值
指针式电表 (电流表、电压表)	$K \cdot \% \cdot N_m$	K 为仪器精确度级别, N_m 为电表的满量程值
各类数字仪表	$K \cdot \% \cdot N_x + \xi \cdot \% \cdot N_m$ 或 $K \cdot \% \cdot N_x + n$ 或仪器最小读数单位	K 为仪器精确度级别, N_x 为测量值, N_m 为满量程值, ξ 为误差绝对项系数, n 为仪器固定项误差, 为最小量化单位的 n 倍

1.3 随机误差的数学处理

在相同的条件下多次测量同一被测量时, 如果已经精心地排除了产生系统误差的因素(实际上不可能也不必要绝对排除), 发现每次测量结果一般都不一样。测量误差或大、或小、或正、或负, 初看显得毫无规律, 但当测量次数足够多时, 可以发现误差的大小以及正负误差的出现, 都是服从某种统计规律的。这种误差我们称为随机误差。随机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来的其他不可预测的随机因素造成的。这些因素一般是无法预知、难以控制的。所以, 测量过程中随机误差的出现带有某种必然性和不可避免性。例如, 在测定单摆的周期时, 观测者需按下秒表的按钮来记录单摆经过某一标志线的时刻。如果多次重复地测量, 就会发现所测得的周期值一般并不相同。这是由于观测者有时过早地按下按钮, 有时则过迟, 而动作的迟、早也有程度上的差异。又如, 在有的测量中, 温度的微小起伏会造成测量结果的无序变化, 杂散电磁场会影响精密测量等等。

1. 随机误差的正态分布规律

对某一被测量进行多次重复测量, 假设系统误差已被减弱到可以被忽略的程度, 由于随机误差的存在, 测量结果 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 一般存在着一定的差异, 若该被测量的真值为 a , 则根据误差的定义, 各次测量的误差

$$\varepsilon_i = x_i - a \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.3.1)$$

大量的实验事实和统计理论都证明, 在绝大多数物理测量中, 随机误差 ε_i 服从正态分布(或称高斯分布)规律。它具有以下的性质:

- (1) 绝对值小的误差出现的机会(概率)大, 绝对值大的误差出现的机会(概率)小。
- (2) 大小相等、符号相反的误差出现的概率相等。
- (3) 非常大的正负误差出现的概率趋于零。
- (4) 当测量次数非常多时, 由于正负误差相互抵消, 各误差的代数和趋于零。

随机误差正态分布规律的这些性质在图 1.3.1 的正态分布曲线上非常明显。该曲线横标为误差 ε , 纵坐标为 $f(\varepsilon)$, 即误差的概率密度分布函数, 它的意义是单位误差范围内出现的误差概率。曲线下阴影包含的面积元 $f(\varepsilon)d\varepsilon$, 就是误差出现在 $(\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon)$ 区间内的概率。

根据统计理论可以证明

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}} \quad (1.3.2)$$

式中, σ 是一个取决于具体测量条件的常数, 称为标准误差(或称均方误差)。由式(1.3.2)容易证明, 标准误差 σ 正好处在正态分布曲线拐点的横坐标上(拐点是函数的二阶导数为零时解出的值)。

按照概率理论, 误差 ε 出现在区间 $(-\infty, +\infty)$ 的事

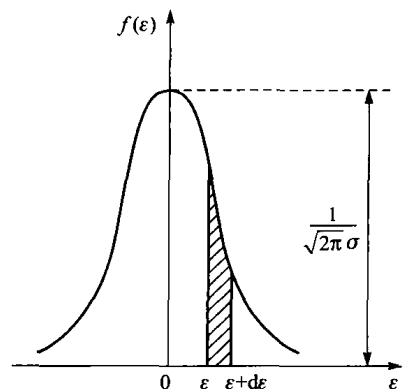


图 1.3.1 随机误差的正态分布曲线