

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验

彭建皮伟 主编
邓加军 师青梅 黄霞 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验

主 编 彭 建 皮 伟
副主编 邓加军 师青梅 黄 霞
主 审 李 华



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。本书是以《理工科类大学物理实验课程教学基本要求（2008年版）》为指导，结合物理实验室建设以及实验教学实际，在华北电力大学北京校部使用多年的校内教材的基础上编写而成的。全书共分为7章，主要内容为绪论、测量误差与不确定度评定、物理实验方法和技术、基本物理量的测量及常用仪器的使用、基本实验、综合性实验与近代物理实验、设计性与研究性实验。

本书可作为高等院校工科专业和理科非物理专业的物理实验课程的教学用书，也可作为科研及工程技术、实验人员的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理实验/彭建，皮伟主编. —北京：中国电力出版社，2010.2

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5123-0003-3

I. ①大… II. ①彭…②皮… 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（2010）第 007750 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010年2月第一版 2011年1月北京第二次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 21印张 508千字

定价 30.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

本书是以《理工科类大学物理实验课程教学基本要求（2008年版）》为指导，结合物理实验室建设以及实验教学实际，在华北电力大学北京校部使用多年的校内教材基础上编写而成。全书共分7章。第1章在介绍大学物理实验课程的目的和任务的基础上，重点阐述了对于实验各个环节的要求以及实验报告的撰写，这些是做好物理实验的基础。第2章是在最新版的《测量不确定度评定与表示》（JJF1059—1999）、《测量仪器特性评定》（JJF1094—2002）以及《有关量、单位和符号的一般原则》（GB3101—1993）等计量文献规定的一般原则的基础上，考虑到物理实验的教学实际，力求条理清晰，通俗易懂而又不失严谨规范地阐述测量误差及不确定度的有关内容，这些是实验数据处理及实验方案设计的基础。第3章一般性地介绍了物理实验中常用的实验方法、测量方法及基本实验操作技术。第4章介绍了长度、质量、时间及温度等几个基本物理量的测量及常用基本仪器的使用，同时也介绍了电流、电压及电阻等几个电学量的测量方法以及相关的测量仪器，这些内容以及第5章前两节的电学与光学实验的基本知识是学生实验的基础，原则上要求学生在实验前仔细阅读有关的内容。第5章安排的主要是力学、电学及光学部分的十二个基础性实验，这些实验通常是必做的。综合性与近代物理实验置于第6章，这些实验涉及物理学多个方面的内容，并注意结合当今科技发展实际。第7章属于设计性与研究性实验，可根据实验教学的具体情况予以适当选取。

实验教材的编写是与实验室的建设密切相关的。随着实验室的建设与发展，教材也必会吐故纳新，努力体现实验室建设的成果。不同高校实验室的历史渊源以及学科侧重点均有所不同，因此实验项目、实验内容以及一些实验的具体要求必然存在着不同程度的差别，这些都会在教材上有所反映。本教材的编写在结合自身实际的基础上也参考与借鉴了兄弟院校的教材，在此谨表谢意。

李国强、李社强、胡冰、马续波等老师直接参与了此版教材中的一些实验项目的编写。陈雷老师以及其他很多老师在教材的编写过程中提出了许多宝贵的具体意见，对于他们的贡献，表示诚挚的感谢。实验室的发展、教材的不断更新与完善，离不开过去工作在实验室的所有教师的工作传承，在此对他们表示敬意。同时感谢数理系及学校相关部门对于此次教材的出版所给予的帮助和支持。

由于时间仓促，编者水平有限，考虑问题的角度各有不同，因此教材中在所难免地会存在着一些问题。恳请老师和同学们在使用中不吝指正，以期有一版更好的教材奉献给大家。

编者

2009年12月于华北电力大学

目 录

前言

第1章 绪论	1
§ 1.1 大学物理实验课的目的和任务	1
§ 1.2 怎样做好物理实验	2
§ 1.3 实验报告的撰写	4
第2章 测量误差与不确定度评定	5
§ 2.1 误差与不确定度	5
§ 2.2 随机误差的统计处理与不确定度的 A 类分量	9
§ 2.3 仪器误差限与不确定度的 B 类分量	13
§ 2.4 不确定度的计算与测量结果的表述	16
§ 2.5 有效数字及其运算规则	22
§ 2.6 系统误差的发现和消除	28
§ 2.7 实验数据处理的基本方法	31
§ 2.8 小结	40
习题	41
第3章 物理实验方法和技术	44
§ 3.1 物理实验中的基本实验方法	44
§ 3.2 物理实验中的基本测量方法	46
§ 3.3 物理实验中基本操作技术	52
第4章 基本物理量的测量及常用仪器的使用	54
§ 4.1 长度的测量	54
§ 4.2 质量的测量	62
§ 4.3 时间的测量	64
§ 4.4 温度的测量	67
§ 4.5 电流的测量	71
§ 4.6 电压的测量	73
§ 4.7 电阻的测量	75
习题	76
第5章 基本实验	77
§ 5.1 电学实验的基本知识	77
§ 5.2 光学实验的基本知识	84
实验一 长度密度测量	90
实验二 液体表面张力系数的测定	95
实验三 测量金属丝的杨氏弹性模量	99

实验四	液体粘滞系数的测定	103
实验五	惠斯通电桥测电阻	106
实验六	用电位差计测量电动势和内阻	115
实验七	示波器的使用	120
实验八	用模拟法测绘静电场	128
实验九	分光计的调整与光的衍射	133
实验十	分光计的应用与棱镜折射率的测量	140
实验十一	光的等厚干涉	145
实验十二	光的偏振	151
第6章	综合性实验与近代物理实验	155
实验十三	转动惯量的测量	155
实验十四	超声干涉法和相位比较法测空气声速与绝热系数	162
实验十五	示波器测铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线	168
实验十六	准稳态法测导热系数和比热容	172
实验十七	霍尔元件测量磁场	179
实验十八	普朗克常数的测定	186
实验十九	夫兰克—赫兹实验	193
实验二十	电子荷质比的测定	198
实验二十一	小型棱镜摄谱仪测定光波的波长	200
实验二十二	迈克耳逊干涉实验	208
实验二十三	全息照相	216
实验二十四	基本光敏元件特性的测量及应用	225
实验二十五	密立根油滴实验	233
实验二十六	太阳能电池基本特性测量	238
实验二十七	液晶电光效应实验	242
实验二十八	光栅传感器特性测定实验	251
实验二十九	光纤特性及传输实验	258
实验三十	波尔共振实验	269
实验三十一	燃料电池综合实验	278
实验三十二	巨磁电阻效应及应用实验	284
第7章	设计性与研究性实验	296
§ 7.1	设计性实验的设置与实施	296
实验三十三	重力加速度的测定	303
实验三十四	声波在物质中的衰减系数的测量	303
实验三十五	空气物理参数的测量	303
实验三十六	电表的改装与校准	304
实验三十七	用电位差计校准电压表	305
实验三十八	简易万用电表的设计与制作	305
实验三十九	光栅常数与半导体激光波长的测定	306

实验四十	薄透镜焦距的测定	306
实验四十一	望远镜与显微镜的组装	306
实验四十二	激光定位实验	307
实验四十三	光纤位移传感器实验	308
实验四十四	锁相放大器的使用	309
实验四十五	反常霍尔效应实验	310
实验四十六	低温的获得与测量	311
实验四十七	真空镀膜	312
实验四十八	氧化锌纳米材料的制备	312
实验四十九	真空的获得与测量	313
附录	物理常数表	315
参考文献		325



第1章 绪 论

§ 1.1 大学物理实验课的目的和任务

物理学的研究有实验的方法和理论的方法。实验的方法是以实验为基本手段,依据所得的实验结果,归纳出一定的规律,再接受实验的检验。理论研究虽不直接进行实验,但研究课题的提出,很多是直接来自于物理实验,且结论的正确与否还得通过实验的检验。物理实验对于物理科学的创立和发展,一直起着十分重要的作用,对其他学科也有着深刻影响。

随着科学理论与实验装备技术的飞速发展,物理实验的结果越来越精确,实验内容也越来越广泛。因而,它可以启发新的科学思想,提供新的科学方法;可以辨识研究对象的细微差异,进而拓展研究的范围,挖掘研究的深度;可以更好地检验理论成果,推动理论的发展;同时它也不断推动实验技术本身的发展。由此可知,物理实验对现代科学技术发展的影响愈益深远。

大学物理实验是高等理工院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程。它是学生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。大学物理实验课程的具体任务是:

(1) 培养学生的基本科学实验技能,提高学生的科学实验素质,使学生初步掌握实验科学的思想和方法。它具体包含以下方面:

- 1) 能够自行阅读实验教材和相关资料,做好实验前的准备。
- 2) 能够借助教材或仪器使用说明书,掌握好常用仪器的使用。
- 3) 能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断。

4) 能够正确记录和处理实验数据,绘制实验曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告。

(2) 培养学生的科学思维和创新意识,使学生掌握实验研究的基本方法,提高学生的分析能力和创新能力。通过该课程的学习,要使学生明确如何依据物理原理进行实验具体方案的设计,分析影响实验结果的因素,并做出实验测量值的可靠程度的评价,自行完成设计性实验。要引导学生积极思考,对于实际问题,如何转化为具体的物理模型,并采用实验的手段来加以解决。要鼓励学生探索使用新的方法和手段,培养学生的创新意识,提高其创新能力。

(3) 提高学生的科学素养,培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风,认真严谨的科学态度,积极主动的探索精神,遵守纪律,团结协作,爱护公共财物的优良品德。

在学习这门课程时,希望同学们首先明确它的重要性,在实验过程中自觉要求,有意识地培养自己的实验技能,提高自己的实验素养,锻炼自己的实验能力,努力使自己成为一名既有深广的理论基础,又有现代科学实验能力的富有开拓与创新意识的新型工程技术或科学研究人才。

§ 1.2 怎样做好物理实验

任何实验过程都包括以下三个阶段：实验前的准备（预习）、实验操作、数据的处理与分析。

1. 实验前的准备（预习）

实验前的精心准备是保证实验顺利进行，取得相应结果的重要环节。首先要明确本次实验所要达到的目的，以此为出发点，阅读实验指导书和有关参考书籍，充分理解实验的理论依据。其次由于任何实验都是有误差存在的，因此要分析影响误差大小的主要因素，理解现有的实验方案或自行设计出设计性实验的实验方案。再次要了解仪器的工作原理、工作条件和操作规程，掌握仪器的正确使用方法；对于设计性实验，还必须合理选择测量仪器。最后明确实验内容，熟悉实验步骤，设计好规范的原始数据记录表格。实验前必须按要求写出规范的预习报告。

2. 实验操作

实验操作是实验过程的核心环节，包括仪器使用、实验观测与记录等几个方面。为了获得满意的实验数据，实验者必须遵守实验规范，主动研究、积极探索，充分发挥自己的主观能动性。

（1）仪器使用。在满足正常工作条件和掌握正确的使用方法的前提下，耐心细致地调整好实验仪器。只有把实验仪器调整到合适的工作状态以后才能进行测量。使用仪器测量时，必须按操作规程进行，不是测量的需要，或者不明操作规程的情况下，不要乱动仪器。仪器使用时有以下几个应注意的地方：

1) 安排仪器布局时，应综合考虑到仪器的操作、实验现象的观察、读数及记录的方便，以及实验桌面的整齐等方面。

2) 对于易受损的小件仪器，如秒表、游标卡尺、螺旋测微计、天平的砝码、牛顿环等，用完后随手放回仪器盒。

3) 拧动仪器上的旋钮和转动部分时，不要用力过猛，实验之前，应调整好实验仪器，使它们处于中间状态。

4) 保持仪器的光学表面的光洁，不要用手去摸，也不要随便擦拭。

5) 使用电学仪器时，注意量程及极性，同时注意防止触电。

6) 仪器有异常情况时及时报告指导教师，不要随意动用别组的仪器。

7) 实验后将仪器整理好，恢复到实验前的状态。

（2）实验观测。在明确了实验目的和测量内容及步骤，并能正确使用测量仪器之后，方可进行实验操作及观测。注意实验操作与观测的协调。注意哪些现象说明仪器调节已达到规定要求，观察到的现象是否与预期的一致，异常情况的出现及分析出现的原因等。

（3）实验记录。实验记录应如实地记下所观察到的实验现象、测量的数据（包括单位）及简单的实验过程、所用测量仪器的技术规格及工作条件等。实验记录是实验分析与数据处理的依据，在实际工作中则是宝贵的第一手资料。实验的原始数据应记录在实验预习报告中专门的地方。实验记录应完整、简洁、清楚，以便于自己处理实验数据和教师检查实验结果。除有明确理由，肯定某一数据有错误而不予记录外，其他数据（包括可疑的）一律记

录, 出现异常情况时, 可增加测量次数。

下面是测量长方形钢板体积 ($V=LWD$) 的数据记录示例, 以供设计原始数据记录表格和记录实验数据时参考。其中长度 (L) 用米尺测量, 宽 (W) 用精度为 0.02mm 的游标卡尺测量, 厚度 (D) 用精度为 0.01mm 的千分尺测量。

米尺的始端读数为 0.0mm , 仪器误差限取 0.5mm^{I} 。

游标卡尺零点读数为 0.00mm , 仪器误差限为 0.02mm^{I} 。

千分尺零点读数为 0.000mm , 仪器误差限为 $0.005\text{mm}^{\text{I}}$ 。

参数	1	2	3	4	5	6 ^{IV}	平均值
$L(\text{mm})^{\text{II}}$	95.0 ^{III}	95.2	95.1	95.1	95.2		
$W(\text{mm})^{\text{II}}$	44.28	44.26	44.28 ^V	44.32	44.30 ^{III}	44.26 ^V	
$D(\text{mm})^{\text{II}}$	12.458	12.460 ^{III}	12.461	12.459	12.459		

数据记录中注意以下几点: I、记录使用的测量仪器及相应的技术规格; II、单位可统一写在前头; III、测量数据最后的“0”必须记上; IV、数据记录表格适当保留富余的地方以便补充实验数据; V、发现错误数据后做出标记, 补充测量数据。

3. 数据的处理与分析

测量结束后应尽快处理实验数据, 按照数据处理规则计算出实验结果, 绘制出必要的图像, 并对实验中的有关问题进行分析讨论。

对实验问题的分析讨论是实验的重要组成部分。通过它可以总结自己在实验过程中的成败得失, 有助于理论与实验更紧密地结合, 有助于提高自己分析问题与解决问题的能力, 也有助于培养自己的科学思维与创新意识。实验后可供讨论分析的问题是多方面的, 不要只局限于实验结果本身。以下几方面可供参考:

- (1) 实验原理、实验方案设计、仪器等给自己留下什么印象, 实验目的完成得如何?
- (2) 实验的系统误差表现在哪些方面? 实验方案是如何设计以减小实验中的误差? 还有哪些因素没有考虑到? 条件许可下, 怎样改进测量方案和仪器装置可以进一步减小误差?
- (3) 实验步骤的安排怎样更合理?
- (4) 观察到什么异常现象? 出现的原因是什么? 是如何排除的?
- (5) 实验操作中遇到过什么困难? 是怎样克服的? 测量结果是否满意?
- (6) 对实验安排(目的、要求、内容项目和仪器配置等)和教师的指导有何希望?

物理实验是大学理工专业的基础实验, 一定要以端正的态度、严谨的作风、良好的行为习惯、一丝不苟的求实精神来要求自己做好每一个实验的每一个环节, 不要满足于得出几个实验数据, 这样才能使自己的实验能力有比较快的提高, 以适应后续实践课程学习的需要。在实验过程中一定要严格要求自己, 从点滴做起, 充分利用好这门课程提供的实践机会。在实验过程中, 可以通过重复实验, 改变实验条件或参量数值来比较分析, 判断实验结果的正确性。实验操作中注意各种感觉器官协调并用、手脑并用, 遇到困难或数据异常, 不要一味埋怨仪器不好或简单重做一遍, 而要认真分析, 找出原因, 力争自己排除故障。实验后结合实验目的和要求以及实验后面的思考题, 进行必要的归纳总结, 并根据教师对实验报告的批阅结果进一步总结自己在实验过程中的优点与不足。

§ 1.3 实验报告的撰写

实验报告是实验成果的文字报道,是实验过程的总结。撰写出一份良好的实验报告是完成一个实验必不可少的环节。一份好的实验报告要求内容体系完整,数据处理正确规范,文字简单明了,版面整洁,字迹清楚。按照完成阶段的不同,可以将实验报告分为预习报告、原始数据记录、数据处理分析三部分。

(1) 预习报告应在实验课前完成,经教师检查合格后,才允许进入实验室做实验。预习报告包括的内容有:

1) 实验名称。

2) 实验目的。

3) 实验仪器。

4) 实验原理。具体包括:简要的实验理论依据,具体的实验方案及在实验中主要考虑影响因素,主要的计算公式及公式中各物理量的意义,光路图或电路图,重要实验装置的原理图及操作要领,实验操作中的注意事项,评价及减小实验误差的方法和手段。有些实验还要求实验者自拟实验方案及合理选择实验仪器等。要求不照抄书本,但又要求内容体系相对完整,不可为了应付任务东拼西凑。

5) 实验步骤。要求扼要说明实验的关键步骤和主要注意事项。

6) 原始数据记录表格。要求在理解实验原理及实验内容和步骤的基础上,明确实验过程中要观察哪些实验现象,记录哪些实验数据,科学合理地设计出实验原始数据记录表格于规定的地方。

以认真的态度去完成预习报告,可以加深对实验原理及实验方案的理解,有助于更好的完成实验,避免损坏实验仪器。注意的是预习报告中先不要写数据处理中的有关内容,避免由于事先考虑不周而使整个实验报告条理不清、版面混乱。

(2) 原始数据记录是在实验操作中完成的。应依据实验观测与数据记录的要求,规范、完整地将有关现象和实验数据记录于规定位置。实验总是在一定条件下,通过一定的测量仪器完成的,因此必须同时记录影响实验结果的重要环境条件,所使用的仪器设备的名称、型号及重要的性能参数。实验原始数据须经指导教师检查签字后才有效。

(3) 数据处理分析是实验的重要环节,必须依据数据处理规则和其他有关要求及时进行。具体内容有:

1) 数据处理。包括计算公式、简单计算过程、规范地采用坐标纸手工绘图或计算机绘图、不确定度的计算、测量结果的表示等。特别要注意下述四个方面的要求:要有计算过程;注意单位的一致,最好统一采用国际单位制中的单位;运算过程遵循有效数字的运算规则;最后结果的表示遵循数据修约规则。

2) 实验结果的分析与讨论,可参照 § 1.2 节有关的内容进行。



第2章 测量误差与不确定度评定

物理实验离不开测量。一个测量值总是会存在着误差，而误差又不能准确得知。国际上普遍采用不确定度来评价一个测量值的可靠程度。本章将遵循国家有关计量规范，结合工科物理实验教学的实际，介绍误差和不确定度的基本概念、测量值的不确定度计算、实验数据处理与实验结果的表示等方面的基本知识。这些知识是物理实验的基础，在今后的每个实验中都将要用到，也是今后从事科学研究与工程实践所必须掌握的。

误差分析、不确定度计算及数据处理贯穿于实验过程的始终，具体表现在实验前的实验方案设计与论证、实验操作中的要素控制、实验数据处理与结果分析等实验的整个阶段。要对这些方面进行深入的讨论和分析，需要有丰富的实践经验、概率统计和高等数学等方面的知识。在物理实验中，不可能一开始就完全掌握，但须首先对它们有一个基本了解，然后结合每一个具体实验仔细阅读有关内容，通过实际运用逐步加以掌握。具体来说，通过本章内容的学习及后续的实验，应该达到以下要求：

- (1) 明确误差与不确定度的概念，能正确估算不确定度，能规范地表示出测量结果。
- (2) 掌握有效数字的概念及运算规则，了解有效数字与不确定度的关系。
- (3) 了解系统误差对测量结果的影响，学习发现、控制与减小系统误差的方法。
- (4) 能初步运用误差理论及不确定度分析，科学设计实验方案，合理选择测量仪器。
- (5) 掌握列表法、作图法、逐差法和回归法等常用的数据处理方法。

§ 2.1 误差与不确定度

§ 2.1.1 测量与误差

物理实验中，经常要定量测量各有关量的大小，以确定它们的联系，找出相应的物理规律。测量是指为确定被测对象的量值而进行的一组操作，而该量值的得出须借助于仪器并用某一计量单位表示出来，即为该计量单位的多少倍。因此，一个被测对象量值的表示包括数值和单位两个要素。

测量可分为直接测量和间接测量两种。凡使用仪器或仪表直接读出测量值的测量就叫做直接测量。一般基本量都可通过相应的仪器或仪表直接测量，如用米尺测物体长度、用天平测物体质量、用电流表测电路中的电流等。凡直接测量出相关物理量后，须通过一定的函数关系，才能计算得出测量值的测量就称为间接测量。物理实验中所进行的测量，大多属于间接测量。

每个物理量都是客观存在的，在一定条件下具有不依人的意志为转移的固定大小，这个客观大小，就称为该物理量的真值。无论是直接测量还是间接测量，最终目的是要获得待测量的真值。任何物理量的测量都必须依据一定的理论，使用一定的仪器，通过一定的方法，在一定的环境条件下，由某一观测者去完成，而理论、仪器、方法、环境和观测者都必然存在某种不理想情况，所以从原则上说，任何测量值都不可能绝对精确，我们也就不能得到真

值。因此,作为一个测量结果,不仅应当提供被测对象的量值大小和单位,还应该对量值本身的可靠程度做出判断。不知道可靠程度的测量值是没有多大意义的。误差理论就是适应这一需要发展起来的。正确运用它,可以帮助我们合理控制实验误差的大小,得到接近真值的测量值,而且可对测量值的可靠程度做出科学的评价。

一个物理量的测量值 x 与其真值 A 之差就称为该测量值的绝对误差,通常简称为误差,表示为

$$\Delta x = x - A \quad (2-1)$$

误差 Δx 反映了测量值偏离真值的大小和方向。由于真值的不可知,通常我们把理论值、公认值、高一级精度仪表的测量值、等精度条件下多次测量值的算术平均值等作为约定真值(有时也称为测量的最佳值)代替。由此可知,误差也是不可准确知道的,只能进行近似估计。

绝对误差只能反映测量值相对于真值的偏离,并不能反映一个测量结果整体上的优劣,也不便于比较不同测量结果的好坏,因此引入了相对误差的概念,定义为

$$E_r = \frac{|\Delta x|}{A} \times 100\% \quad (2-2)$$

§ 2.1.2 误差的种类

误差存在于一切实验和测量过程的始终。误差按其性质和产生的原因可分为三类:系统误差、随机误差(也称偶然误差)和粗大误差。

1. 系统误差

在一定条件下,对同一被测量进行多次重复测量,有一类误差,其大小和符号均保持不变,而当条件改变时,它又按照某种确定的规律变化,则称这一类误差为系统误差。

系统误差的特点是它的确定规律性。这种规律性可表现为定值,如天平不等臂造成的误差;可以表现为累积的,如用受热膨胀的钢尺进行测量,其读数将可能小于真实长度,误差随待测长度成比例增加;也可以表现为周期性的,如分光计刻度盘中心和转动中心的不重合造成的偏心差;还可以表现为其他更为复杂的规律性。系统误差的确定规律性反映在:只要测量条件一经确定,系统误差也随之确定;同样条件下的多次重复测量,系统误差的大小和符号均保持不变。因此,相同实验条件下的多次重复测量是不可能发现系统误差的。

对实验者来说,系统误差的规律和产生的原因可能知道,也可能不知道。已被确切掌握了大小和符号的系统误差,称为已定系统误差。已定系统误差可以在测量过程中采取对应的措施予以消除或是在测量结果中进行修正。不能确切掌握误差的大小和符号,甚至其取值的变化规律也不可知,则称这类系统误差为未定系统误差。未定系统误差难以做出修正,只能合理控制并估计出它的取值范围,如测量仪表所规定的基本允许误差,就属于未定系统误差。

系统误差产生的主要来源有:

(1) 仪器误差。它是由于仪器本身的不完善或仪器使用不当而引起的。天平两臂的不严格相等、分光计读数装置的偏心差、仪表示值与实际值的差异(如千分尺的零点读数)等就属于仪器本身的不完善,实际测量中可采取适当措施消除或减小其产生的误差。仪器设备使用前的安装调整未达到规定的要求,如不水平、不垂直、偏心、未校准等,或是未在操作规程下使用,就属于仪器使用不当,由此而引起的误差是完全可以避免并且是必须避免的。

(2) 理论或方法误差。它是由于测量所依据的理论公式本身的近似性,或是实验条件达不到理论公式所限定的要求而引起的。如单摆的周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 的成立条件是忽略摆绳的质量和摆角趋于零,也没有其他摩擦力矩存在,但在实际测量中是不可能达到的。

(3) 个人误差。它是由于测量者的生理或心理特点所引起的误差。如一些同学读取电学仪表的示值时,总是习惯于眼睛偏左或偏右,结果使得测量值偏大或偏小。

(4) 环境误差。它是由于实验环境如温度、气压、湿度、光照等因素与实验规定要求不一致而引起的误差。其引起误差的机理在不同的实验中可能表现不同,比如它可作用于实验理论,使实验理论表现为近似性;也可作用于实验仪器,使仪器的性能和精度产生变化;还可作用于实验者,使实验者受到生理或心理性的影响。

系统误差是测量误差的重要组成部分。发现系统误差的存在,弄清产生的原因,进而科学设计实验方案,合理选择数据处理方法以消除或减小系统误差是实验者始终必须考虑的重要问题。

2. 随机误差

在相同条件下多次测量同一物理量时,即使消除了系统误差,测量值也总是有稍许差异而且变化不定,这类绝对值和符号不断变化的误差就称为随机误差。

随机误差产生的原因,是由于测量过程中存在一些随机的、未能控制的可变因素或不确定因素。一方面,人的感官灵敏度及仪器精密程度总是受到一定限制,因而使一些仪表的平衡点不能精密确定(如检流计)、目标物对得不清(如读数显微镜)等导致测量值的估读位产生变化;另一方面,环境因素的随机性干扰,比如待测样品受周围气流影响所产生的温度、湿度、气压等的微小起伏致使其物理性能表现出不确定性的变化;还有就是对于大批量样品的测量,被测量本身也会表现为随机性的分布。

随机误差的影响一般是微小的,并且是混杂出现的,因此难以确定某个因素产生的具体影响。对待随机误差不能像对待系统误差那样,找出原因而加以消除,只能根据它出现的特点,采用统计方法估算其大小。

随机误差出现的特点是单个具有随机性,而总体上服从统计规律。当随机误差服从正态分布时,它有以下四个特性:

- (1) 有界性。在一定的测量条件下,误差的绝对值不超过一定的限度。
- (2) 单峰性。绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会大。
- (3) 对称性。绝对值相等的正负误差出现的机会相等。
- (4) 抵偿性。当测量次数趋于无穷大时,随机误差的算术平均值趋于零。

依据随机误差出现的统计特性,在实验测量中,可以通过增加测量次数来减小随机误差。在相同的实验条件下,当测量次数趋于无穷大时,各次测量值的算术平均值的随机误差将趋于零,因此可取算术平均值作为直接测量的最佳值。具体实验中,测量次数总是有限的,因而必须依据统计理论,科学评定一个测量值因为随机误差表现出的不可靠程度。

系统误差和随机误差是两种不同性质的误差,但它们又有着内在的联系。在一定实验条件下,它们有自己的内涵和界限,但当条件改变时,彼此又可能相互转化。例如考虑环境温度对测量值的影响时,由于短时间内温度保持恒定或极缓慢变化,其作用产生的误差可视为是系统误差;但在长时间内,温度若在某个平均值附近作无规律变化,其作用产生的误差宜

视为随机误差。随着技术的发展和设备的改进,某些造成随机误差的因素能够得到控制,这些随机误差就可确定为系统误差并得到改善和修正。通过改变测量状态,某些规律复杂的微小未定系统误差则可使之随机化而能当作随机误差处理。例如测量一根钢丝的直径,由于制造和使用的原因,其截面不可能是严格的圆,因此只在某一位置测量时,会表现为系统误差,但在不同位置多次测量时,这种系统误差会以某种随机性表现出来。被测对象的这种内在统一性,使我们有可能在消除或修正了各种已定系统误差后,用统一的方法对其余部分做出估计和评定。

3. 粗大误差

由于实验系统忽然偏离实验所规定的要求,或是在读数、记录及计算时出现失误而产生的误差,就称为粗大误差。含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值,这种测量数据是应当被剔除的。在实验过程中一定要遵守实验规程,细致严谨,尽力避免各种过失和错误,确保测量数据的正确性。需要指出的是,不应当把所有异常的测量值都作为粗大误差处理,因为它可能是数据中固有的随机性的极端情况。判定一个测量值是否为异常值时,应依据仪器的工作状态、操作过程和数据处理的有关理论来进行。

§ 2.1.3 测量结果的精密性、准确度和精确度

实验中常用精密性、准确度和精确度来定性评价一个测量结果的好坏,但这三个词的含义是不同的,使用时应加以区别。

(1) 精密性通常表示测量结果中随机误差大小的程度。它是指在规定条件下对被测量进行多次测量时,所得结果之间的符合程度(或弥散程度)。

(2) 准确度通常表示测量结果中系统误差大小的程度。它反映了在规定条件下测量结果中所有系统误差的综合。

(3) 精确度通常表示测量结果与被测量的(约定)真值之间的一致程度。它反映了测量结果中系统误差与随机误差的综合。

精度一词通常可以理解为精密度的简称,有时也用来定性评价测量仪器的性能。测量仪器的最小分度越小,我们通常说测量仪器的精度越高,或者说该仪器的分辨力越好。

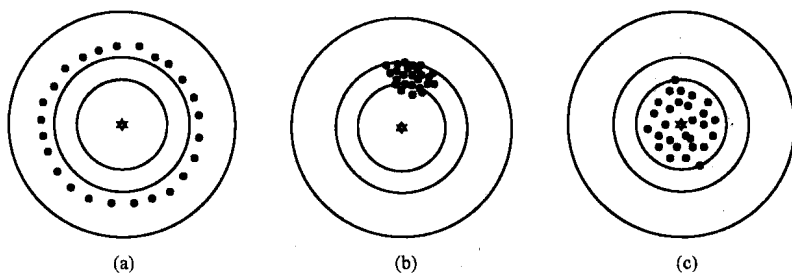


图 2-1 精密性、准确度和精确度的形象表示

(a) 准确度好而精密性差; (b) 精密性好而准确度差; (c) 精确度好

精密性、准确度和精确度可通过图 2-1 来形象地表示,其中小黑点表示一个测量值,中心的星形点表示真值。由此可见,精密性好并不意味着准确度好,因为测量结果的精密性主要取决于随机误差的作用;准确度好并不能说明精密性一定好,因为测量结果的准确度是由系统误差决定的。

§ 2.1.4 不确定度

测量误差是普遍存在的。随着实验技术和条件设备的改进,测量值可以更加接近真值,但误差不可能(往往也没必要)完全消除。通常人们关心的只是误差是否被控制在允许的范围内。

测量结果的表述,应当包含测量值的精确度即误差情况的报道,可误差通常又是无法知道的。依据国际上的标准文献和国家相关计量规范,误差情况的定量估计是通过一个新的参量—不确定度来完成的。

不确定度是测量结果带有的一个参数,用以表示被测量的真值以多大的概率处于某一量值范围内,也表示测量值在真值附近的概率分布。例如测量某一物质的密度,其结果的完整表述应为 $\rho \pm U(\rho) = (8.89 \pm 0.07) \text{g/cm}^3$, 其中的 $U(\rho) = 0.07 \text{g/cm}^3$ 表示测量值 $\rho = 8.89 \text{g/cm}^3$ 的不确定度。它的完整含义是该物质密度的真值以一个较大的可能(通常以 95% 的置信概率来进行评定)处于 $\rho - U(\rho) \sim \rho + U(\rho)$ 的范围内。特别要强调的是测量值与不确定度是两个含义完全不同的量,不能进行加减归并运算。

一个完整的测量结果应该包含被测量的测量值及该测量值的不确定度。测量值的不确定度源自于测量过程的误差。由于误差的种类及来源不同,测量值的不确定度一般包含多个分量。依据处理方法的不同,可以划分为用统计方法处理的 A 类分量(统计分量)和用其他方法处理的 B 类分量(非统计分量)。不确定度的合成公式为

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_b^2} \quad (2-3)$$

还要指出的是早期的课本书籍中常用误差来表示一个测量值的不可靠程度,但它是不科学的,现在都统一采用不确定度来表示。误差只是一个理想概念,一般情况下是不能准确知道的,甚至有时连其数量级也难以给出,但一定条件下的统计意义上的不确定度是可以准确计算出来的。误差是可正可负的,而不确定度恒为正值。

§ 2.2 随机误差的统计处理与不确定度的 A 类分量

§ 2.2.1 随机误差的统计分布

就单个测量值来说,随机误差的出现是没有规律的,其大小和方向都是不能预知的,但对同一物理量在相同条件下进行多次测量时,随机误差的出现又是服从统计规律的。

在一定的实验条件下,对某一物理量 x 进行测量,其取某个具体值 x_i 的可能性就称为 $x = x_i$ 的概率,以概率函数 $p(x_i)$ 表示,有

$$p(x_i) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_i}{n} \quad (2-4)$$

其中 n 是总的测量次数, n_i 是 n 次测量中出现 x_i 的次数。如果测量值是离散的,则有

$$\sum_i p(x_i) = 1 \quad (2-5)$$

如果测量值是连续的,则应以概率密度分布函数 $p(x)$ 来描述测量值的分布,这时测量值 x 处于 $x \sim x + dx$ 范围内的概率为 $p(x)dx$, 且有

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)dx = 1 \quad (2-6)$$

式(2-5)与式(2-6)表示测量值取各种可能值的总概率为 1。

对于不同的测量对象, 随机误差可能服从不同的概率分布, 即概率密度分布函数 $p(x)$ 的数学形式是不相同的。物理实验中, 很多被测量的随机误差服从一类典型的分布——正态分布 (高斯分布), 其概率密度分布函数 $p(x)$ 可表示为以下高斯函数的形式

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2-7)$$

其中 μ 与 σ 是表示一个正态分布的两个特征量, μ 为无限次测量的总体平均值 (或称期望值), 如消除了系统误差, 则 μ 即为真值, σ 为总体标准偏差, 而 σ^2 则称为总体方差, 有

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2-8)$$

$$\sigma^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n} \quad (2-9)$$

或

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 p(x) dx \quad (2-10)$$

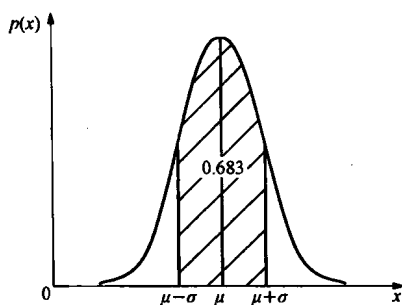


图 2-2 不考虑系统误差时
测量值的正态分布曲线图

如不考虑系统误差, 正态分布的概率密度分布函数 $p(x)$ 可用图 2-2 来形象地表示, 其中横坐标表示测量值, μ 为曲线峰值处 (概率密度最大处) 的横坐标, $x - \mu$ 为测量值 x 对应的误差, σ 则为曲线上的拐点处的横坐标值与 μ 值之差的绝对值。

可以证明

$$\int_{\mu-\sigma}^{\mu+\sigma} p(x) dx = 0.683 \quad (2-11)$$

即对满足正态分布的物理量作任何一次正确测量, 测量值处于 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 内的概率为 68.27% (本书简记为 68.3%); 或是作无限多次测量, 测量值以 68.3% 的概率处于 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 内; 也可以从测量值接近期望值的角度来理解, 则某次测量值为 x_i , 其期望值处于 $[x_i - \sigma, x_i + \sigma]$ 内的概率为 68.3%。同时可以证明测量值处于 $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$ 内的概率为 95.45%; 处于 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 内的概率为 99.73%, 这也就为我们判定异常测量值提供了理论依据。

以上结论是基于正态分布而得出的, 但实际上并不是对所有物理量的测量都服从正态分布。除正态分布之外, 还存在着矩形 (均匀) 分布、三角分布、反正弦分布、两点分布、投影分布及规律尚不知道的其他分布。有专门的论著对这些分布的数学形式及其对应的物理量进行阐述。对于学生实验, 一般只是要求实验者掌握正态分布的特点与规律。因此在以后的实验中, 除非特别指明外, 通常是被测对象视为服从正态分布来处理的。

§ 2.2.2 有限次测量的随机误差处理

实际的测量一般是存在着系统误差的, 测量的次数也总是有限的。在进行系统误差修正的基础上, 考虑测量次数 n 有限, 随机误差的分布将偏离式 (2-7) 所表示的规律。我们通常称实验中有限的 n 次测量为无限次测量中的一个样本, 则 n 次测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 就称