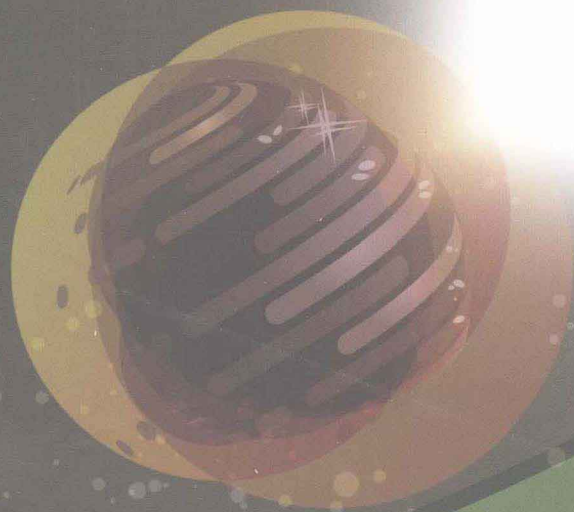


普通高等教育“十二五”规划教材

普通高等教育“十二五”规划教材



大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主 编 张景川



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

主 编 张景川

副主编 楚合营 孔德国 黄新成

参 编 罗华平 柴学平 杨 璞

刘朝霞 墨蕊娜 张红美

郑文轩 徐爱英 胡芸莎

主 审 李晓勤

北京邮电大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十二五”规划教材,本教材介绍了误差和实验数据处理的方法和基本知识,精选了力、热、电、光、近代物理等 40 个实验,其中基础性实验 20 个,综合性实验 10 个,设计性实验 10 个。每个实验都把现有的实验仪器实物图进行了介绍,实验内容突出学校自身实验条件,凸显本教材的特色。教材章节结构紧凑,实验内容丰富,按照基础性实验、综合性实验和设计性实验组织分层次编排,为模块化、层次化的教学手段提供了便利,突出物理实验的综合应用。书中有不少内容反映新的实验技术和实验仪器的内容,具有较好的可读性和实用性。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/张景川主编.--北京:北京邮电大学出版社,2012.12

ISBN 978-7-5635-3347-3

I. ①大… II. ①张… 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(2012)第 299298 号

书 名	大学物理实验
主 编	张景川
策 划 人	马 飞
责任编辑	唐咸荣
出版发行	北京邮电大学出版社
社 址	北京市海淀区西土城路 10 号(100876)
电话传真	010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
网 址	www.buptpress3.com
电子信箱	ctrd@buptpress.com
经 销	各地新华书店
印 刷	北京泽宇印刷有限公司
开 本	787 mm×1 092 mm 1/16
印 张	14
字 数	340 千字
版 次	2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-3347-3

定价: 29.00 元

如有质量问题请与发行部联系
版权所有 侵权必究

前 言

物理学是一切自然科学的基础,是培养学生科学素养和科学思维方法、提高学生科研能力的重要基础课程,而大学物理实验是大学物理课程中的重要组成部分。它对培养学生的科学态度,理论联系实际,实事求是的科学态度,严谨踏实的工作作风,用于探索、坚韧不拔的钻研精神,以及遵守纪律、团结协作、创新精神、爱护国家财产的优良品德,都起着其他课程无法替代的重要作用。

本教材是为学校本科教学工程——大学物理重点课程建设的需要进行的修订,从实验仪器的更新到实验项目、内容的变化,到模块化、层次化的教学手段改革等方面进行了大幅度的修订编写。本着以学生为中心的理念,更好地发挥大学物理实验在大学物理教学中的基础作用,参编人员总结了多年讲授大学物理实验的教学经验并结合了学校实验仪器的实际,编写了突出学校自身教学资源的特色实验教材。

本教材介绍了误差和实验数据处理的方法和基本知识,精选了力、热、电、光、近代物理等40个实验,其中基础性实验20个,综合性实验10个,设计性实验10个。每个实验都把现有的实验仪器实物图进行了介绍,实验内容突出学校自身实验条件,凸显本教材的特色。教材章节结构紧凑,实验内容丰富,按照基础性实验、综合性实验和设计性实验组织分层次编排,为模块化、层次化的教学手段提供了便利,突出物理实验的综合应用。书中有不少反映新的实验技术和实验仪器的内容,具有较好的可读性和实用性。

本教材由塔里木大学的张景川、楚合营、孔德国、黄新成、罗华平、杨瑛、刘朝霞、墨蕊娜、张红美、柴学平、郑文轩、徐爱英、胡芸莎编写。张景川担任主编,楚合营、孔德国、黄新成担任副主编。李晓勤仔细审阅了书稿。本教材的编写得到学校物理学科全体教师的积极支持和配合,是集体智慧的结晶。同时在本书编写过程中得到学校教务处和学院相关领导的大力支持,我们在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,错误和疏漏之处在所难免,敬请读者指正。

编 者
2012年10月

目 录

绪论	1
第一章 误差理论及数据处理	5
§ 1.1 测量与误差	5
§ 1.2 随机误差的处理	7
§ 1.3 测量不确定度及其估算	11
§ 1.4 有效数字及运算规则	14
§ 1.5 实验数据处理	18
第二章 基础性实验	24
§ 2.1 重力加速度的测量	24
§ 2.2 动量守恒定律的验证	30
§ 2.3 刚体转动实验	37
§ 2.4 金属线胀系数的测定	40
§ 2.5 拉伸法测量杨氏弹性模量	42
§ 2.6 拉脱法测量液体的表面张力系数	45
§ 2.7 落针法测量液体的黏滞系数	48
§ 2.8 静电场的描绘	53
§ 2.9 霍耳效应及磁场的测量	58
§ 2.10 电子荷质比的测量	61
§ 2.11 示波器的调整和使用	64
§ 2.12 超声波声速的测量	70
§ 2.13 惠斯通电桥测电阻	74
§ 2.14 数字电位差计测电源电动势和内阻	79
§ 2.15 PN 结正向压降温度特性研究	82
§ 2.16 分光计的调整与使用	86
§ 2.17 分光计测定光栅常数及黄光波长	92
§ 2.18 迈克耳孙干涉仪测量 He—Ne 激光波长	94
§ 2.19 杨氏双缝干涉实验	98
§ 2.20 用牛顿环测量平凸透镜的曲率半径	101
第三章 综合性实验	105
§ 3.1 组装迈克耳孙干涉仪测量空气折射率	105

§ 3.2	激光全息照相的基本技术	109
§ 3.3	单色仪的定标	113
§ 3.4	摄影技术	118
§ 3.5	光偏振现象的观察与研究	124
§ 3.6	单缝衍射光强分布及缝宽的测量	128
§ 3.7	简谐振动的研究	131
§ 3.8	介电常数的测量	139
§ 3.9	数字万用表的原理与使用	141
§ 3.10	大学物理仿真实验 V2.0 for Windows 简介	145
第四章	设计性实验	157
§ 4.1	自组显微镜与望远镜	157
§ 4.2	电表的改装与校准	163
§ 4.3	地磁场水平分量测量	167
§ 4.4	普朗克常量的测定	172
§ 4.5	温差电偶定标实验	177
§ 4.6	物质旋光性的研究与测量	181
§ 4.7	劈尖干涉法测微小直径	187
§ 4.8	磁滞回线和磁化曲线的测量	190
§ 4.9	阻尼运动与受迫振动特性研究——玻尔共振仪的应用	198
§ 4.10	音频信号光纤传输技术实验	202
附录		207
参考文献		218

绪 论

一、物理实验课的地位和作用

物理学研究的是自然物质的最基本最普遍的形式。物理学研究的运动,普遍地存在于其他高级的、复杂的物质运动形式之中。因此,物理学所研究的物质运动规律,具有最大的普遍性。物理学从本质上说是一门实验科学,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验。用人为的方法让自然现象再现,从而加以观察和研究,这就是实验。实验是人们认识自然和改造客观世界的基本手段。科学技术越进步,科学实验就显得越重要,任何一种新技术、新材料、新工艺、新产品都必须通过实验才能获得。由实验观察到的现象和测出的数据,加以总结和抽象,找出内在的联系和规律就得到理论,实验是理论的源泉。理论一旦提出,又必须借助实验来检验其是否具有普遍意义,实验是检验理论的手段,是检验理论的裁判。麦克斯韦提出的电磁理论(他预言电磁波存在)只有当赫兹做出电磁学实验后才被人们公认;杨振宁、李政道在1956年提出基本粒子在“弱相互作用下的宇称不守恒”的理论,只有当实验物理学家吴健雄用实验验证后,才被同行学者承认,从而才有可能获得诺贝尔奖。然而,人们掌握理论的目的是在于应用它来指导生产实际,促进科学进步,推动社会前进。当理论在实际中应用时,仍必须通过实验,实验是理论和应用的桥梁。任何一门科学的发展都离不开实验,这就使实验物理课有了充实的教学内容。物理实验是主要基础课程之一。

任何物理概念的确立,物理规律的发现,都必须以严格的科学实验为基础。物理实验的重要性,不仅表现在通过实验发现物理定律,而且物理学中的每一项重要突破都与实验密切相关。物理学史表明,经典物理学的形成,是伽利略、牛顿、麦克斯韦等人通过观察自然现象,反复实验,运用抽象思维的方法总结出来的。近代物理的发展,是在某些实验的基础上提出假设,例如普朗克根据黑体辐射提出“能量子假设”,再经过大量的实验证实,假设才成为科学理论,实践证明物理实验是物理学发展的动力。在物理学发展的进程中,物理实验和物理理论始终是相互促进、相互制约、相得益彰的。没有理论指导的实验是盲目的,实验必须经过总结抽象上升为理论,才有其存在的价值,而理论靠实验来检验,同时理论上的需要又促进实验的发展。1752年富兰克林利用风筝把天空的电引入室内,进行室内雷鸣闪电实验,证实了雷电与电火花放电有同样的本质,进而找出了雷电的成因,并且在此基础上发明了避雷针。这个简单的实验事实,足以说明物理实验在物理学发展中所起的重要作用。

物理学发展到当今的时代,与实验的关系就更为密切,而且在许多边缘科学的建立过程中,物理实验也起了重要的桥梁作用。物理实验在探索和研究新科技领域,在推动其他自然科学和工程技术的发展中,起到的重要作用是不可低估的。自然科学迅速发展,新的科学分支层

出不穷,但基础学科就是数学和物理两门,物理实验是研究物理测量方法与实验方法的科学,物理实验的特点是在于它具有普遍性:力、热、光、电都有;具有基本性——它是其他一切实验的基础;同时它还有通用性——适用于一切领域,把高、精、尖的复杂实验分解成为“零件”,绝大部分是常见的物理实验。在工程技术领域中,研制、生产、加工、运输等都普遍涉及物理量的测量及物理运动状态的控制,这正是成熟的物理实验的推广和应用。现代高科技发展,设计思想,方法和技术也来源于物理实验。因此,物理实验是自然科学、工程技术和高科技发展的基础,科学技术的发展离不开物理实验。

二、物理实验的特点

学生在物理实验课中主要是通过自己独立的实验实践来学习物理实验知识、培养实验能力和提高实验素养,这个学习任务决定了作为实验课程的物理实验有以下几个特点:

(1) 实验带有很强的目的性。无论是应用性实验、验证性实验还是探索性实验,几乎都是在已经确立的理论指导下的实践活动,在有限的时间内,不仅要完成实验课题(实验目的),而且还要完成学习任务(学习要求)。那种把实验课程看成是摆弄摆弄仪器、测测数据就达到目的的单纯实验观点是十分有害的。

(2) 实验要采取恰当的方法和手段,以使所要观测的物理现象和过程能够实现,并达到符合一定准确度的定量测量要求。虽然方法和手段会随着科学技术和工业生产的进步而不断改进,但历史积累的方法仍是人类知识宝库精华的一部分。有了积累才有创新,因此,从一开始就应十分重视实验方法知识的积累。

(3) 实验中所包括的技能,其内容十分广泛。仪器的选择、使用和保养,设备的装校、调整和操作,现象的观察、判断和测量,故障的检查、分析和排除等,它有众多的原则和规律,可以说它是知识、见解和经验的积累。唯有实践,既动手又动脑,才有可能获得这种技能,单凭看书是不可能学到的。

(4) 实验需要用数据来说明问题。数据是实验的语言,物理实验中数据处理有各种不同的方法和特定的表达方式。测量结果、验证理论、探索规律和分析问题,无一不用数据,数据是学术交流和报告技术成果最有力的工具和最准确的语言。

实验集理论、方法、技能和数据于一个整体,它不但要实验者弄懂实验内容与实验方法的道理,而且还要实验者根据这些道理付诸实践,最后还要从获得的数据结果中得出应有的结论,这就是物理实验的特点。

三、大学物理实验课的目的和任务

1. 大学物理实验课的目的

通过对物理实验现象的观测和分析,学习运用理论指导实验、分析和解决实验中的问题和方法。从理论和实际的结合上加深对理论的理解,养成良好的实验素养和严谨的科学作风。

首先,培养学生从事科学实验的初步能力。通过实验阅读教材和资料,能概括出实验原理和方法的要点;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;正确记录和处理数据,分析实验结果和撰写实验报告;以及自行设计和完成不太复杂的实验任务等。

其次,培养学生实事求是的科学态度、严谨的工作作风,勇于探索、坚韧不拔的钻研精神以及遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品德。

2. 大学物理实验课的具体实验任务

通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验的基本知识、基本方法和基本技能,加深对物理概念和规律的认识、对物理学原理的理解,为后继课打下基础。

1) 培养和提高学生的科学实验素养

通过大学物理实验课的学习,使学生具有:

- (1) 理论联系实际和解决实际问题的能力。
- (2) 勤奋学习,认真实验的良好学风。
- (3) 主动研究和积极探索的创新精神。
- (4) 遵守实验室守则,注意仪器操作要领,爱护仪器的优良品德。

2) 培养学生做好实验的能力

(1) 实验前要做好预习。预习时,主要阅读实验教材,了解实验目的,搞清楚实验内容,要测量什么量,使用什么方法,实验的理论依据(原理)是什么,使用什么仪器,其仪器性能是什么,如何使用,操作要点及注意事项等,在此基础上,回答好思考题,草拟出操作步骤,设计好数据记录表格,准备好自备的物品。

只有在充分了解实验内容的基础上,才能在实验操作中有目的地观察实验现象,思考问题,减少操作中的忙乱现象,提高学习的主动性。因此,每次实验前,学生必须完成规定的预习内容,一般情况下,教师要检查学生预习情况,并评定预习成绩,没有预习的学生不许做实验。

(2) 课堂认真进行实验,实验课一般先由指导教师重点讲解,交代有关注意事项,扼要、简单地讲授内容,具有指导性和启发性,学生要结合自己的预习逐一领会,特别要注意那些在操作中容易引起失误的地方。

在实验进程中,首先是布置、安装和调试仪器。桌面上若干个仪器是否布置合理,读数是否方便,做到操作有序,需要动脑子,使仪器设备尽量能为我所用。为了使仪器装置达到最佳工作状态,必须细致、耐心地进行调试。这样很可能要花较多时间,切忌急躁。要合理选择仪器的量程,如果在调试中遇到了困难而自己不能解决时,可以请教老师指导。

调试准备就绪后,开始进行测量。实验时一定要先观察实验现象,通过观察对被验证的定律或被测的物理量有个定性的了解,而后再进行精确的测量。测量的原始数据要整齐的记录在自己设计的表格中,读数一定要认真仔细,实验原始数据的优劣,决定着实验的成败。记录的数据一定要标明单位。不要忘记记录有关的环境条件,如温度、压强等。如果两个学生同时做一个实验,既要分工又要协作,各自记录实验数据,共同完成实验任务。

在测量过程中要尽量保持实验条件不变,要注意操作姿势,身体不要靠着桌子,不要使仪器发生移动,或受到振动。如果遇到仪器装置出现故障,学生应力求自己动手解决,或留意观看教师是怎样分析判断仪器的毛病、怎样修复仪器的(可能当场修复的仪器)。测量完数据后,记录的数据要经指导教师审阅签字,然后再进行数据处理。如果发现错误数据时,要重新进行测量。

(3) 写实验报告。实验报告是对实验工作的总结,是交流实验经验、推广实验成果的媒介。学会编写实验报告是培养实验能力的一个方面。写实验报告要用简明的形式将实验结果完整、准确地表达出来,要求文字通顺,字迹端正,图表规范,结果正确,讨论认真。实验报告要求在课

后独立完成。用学校统一印制的“实验报告纸”来书写。

实验报告通常包括以下内容：

实验名称 表示做什么实验。

实验目的 说明为什么做这个实验，做该实验要达到什么目的。

实验仪器 列出主要仪器的名称、型号、规格、精度等。

实验原理 阐明实验的理论依据，写出待测量计算公式的简要推导过程，画出有关的图（原理图或装置图），如电路图、光路图等。

数据记录 实验中所测得的原始数据要尽可能用表格的形式列出，正确表示有效数字和单位。

数据处理 根据实验目的对实验结果进行计算或作图表示，并对测量结果进行评定，计算不确定度，计算要写出主要的计算内容。

实验结果 扼要写出实验结论，要体现出测量数据、误差和单位。

问题讨论 讨论实验中观察到的异常现象及其可能的解释，分析实验误差的主要来源，对实验仪器的选择和实验方法的改进提出建议，简述自己做实验的心得体会，回答实验思考问题。

为了保证实验课程的正常进行，现在对实验报告提出以下三点要求：

① 课前要求预习实验内容，明确实验目的，了解实验原理，弄清实验步骤，初步了解仪器的使用方法，画好实验数据记录表格。未做好预习者不得动手做实验。

② 在测量时，应如实、即时做好实验数据记录（数据记录要整洁，字迹清楚，避免错记），不可事后凭回忆“追记”数据，更不可为拼凑数据而将实验数据记录做随心所欲的涂改。

③ 实验报告要认真按时完成。

在做物理实验时，我们不是要一个塞满东西的脑袋，而是要一个善于分析问题的头脑，实验的目的和任务不仅要有知识，更重要的是将知识转化为能力！

第一章 误差理论及数据处理

物理实验的任务不仅是定性地观察各种自然现象,更重要的是定量地测量相关物理量。而对事物定量地描述又离不开数学方法和进行实验数据的处理。因此,误差分析和数据处理是物理实验课的基础。本章将从测量及误差的定义开始,逐步介绍有关误差和实验数据处理的方法和基本知识。误差理论及数据处理是一切实验结果中不可缺少的内容,是不可分割的两部分。误差理论是一门独立的学科。随着科学技术事业的发展,近年来误差理论基本的概念和处理方法也有很大发展。误差理论以数理统计和概率论为其数学基础,研究误差性质、规律及如何消除误差。实验中的误差分析,其目的是对实验结果做出评定,最大限度地减小实验误差,或指出减小实验误差的方向,提高测量质量,提高测量结果的可信赖程度。对低年级大学生,这部分内容难度较大,本课程仅限于介绍误差分析的初步知识,着重点放在几个重要概念及最简单情况下的误差处理方法,不进行严密的数学论证,减小学生学习的难度,有利于学好物理实验这门基础课程。

§ 1.1 测量与误差

1. 测量

物理实验是以测量为基础的。研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理都要进行测量。测量可分直接测量和间接测量两大类。“直接测量”指无需对被测的量与其他实测的量进行函数关系的辅助计算而直接测出被测量的量。例如用天平和砝码测物体的质量、用电流计测电路中的电流等都是直接测量。“间接测量”指利用直接测量的量与被测的量之间已知的函数关系,从而得到该被测量的量。例如通过测量物体的体积和质量,再用公式计算出物体的密度。有些物理量既可以直接测量,也可以间接测量,这主要取决于使用的仪器和测量方法。

如果对某一待测量进行多次测量,假定每次测量的条件相同,即测量仪器、方法、环境和操作人员都不变,测得一组数据 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 。尽管各次测量结果并不完全相同,但没有任何理由判断某一次测量更为精确,只能认为测量的精确程度是相同的。于是将这种具有同样精确程度的测量称为等精度测量,这样的一组数据称为测量列。由于在实验中一般无法保持测量条件完全不变,所以严格的等精度测量是不存在的。当某些条件的变化对测量结果影响不大或可以忽略时,可视这种测量为等精度测量。在物理实验中,凡是要求对待测量进行多次测量的均指等精度测量,本课程中有关测量误差与数据处理的讨论,都是以等精度测量为前提的。

2. 误差

任何测量结果都有误差,这是因为测量仪器、方法、环境及实验者等都不可能完美无缺。分析测量中可能产生的各种误差并尽可能消除其影响,对测量结果中未能消除的误差作出合理估计,是实验的重要内容。

待测量的大小在一定条件下都有一个客观存在的值,称为真值。真值是一个理想的概念,一般是不可知的。我们通常所说的真值主要有以下三类:

(1) 理论真值或定义真值。如三角形的三个内角之和等于 180° 等;

(2) 计量学约定真值。由国际计量大会决议约定的真值。如基本物理常数中的冰点绝对温度 $T_0 = 273.15 \text{ K}$,真空中的光速 $c = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 等;

(3) 标准器相对真值。用比被校仪器高级的标准器的量值作为相对真值。例如,用 1.0 级、量程为 2 A 的电流表测得某电路电流为 1.80 A,改用 0.1 级、量程为 2 A 的电流表测同样电流时为 1.802 A,则可将后者视为前者的相对真值。

误差就是测量值 x 与真值 x_0 之差,用 Δx 表示

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-1-1)$$

误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差常用相对误差 E 表示

$$E = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-1-2)$$

用误差分析的方法来指导实验的全过程,包括以下两个方面:

(1) 为了从测量中正确认识客观规律,必须分析误差的原因和性质,正确地处理测量数据,尽量消除、减少误差,确定误差范围,以便能在一定条件下得到接近真值的结果。

(2) 在设计一项实验时,先对测量结果确定一个误差范围,然后用误差分析方法指导我们合理选择测量方法、仪器和条件,以便能在最有利的条件下,获得恰到好处的预期结果。

3. 系统误差

测量误差根据其性质和来源可分为系统误差和随机误差两大类。

系统误差是指在多次测量同一物理量的过程中,保持不变或以可预知方式变化的测量误差的分量。系统误差主要来源有以下几方面:

(1) 仪器的固有缺陷。如仪器刻度不准、零点位置不正确、仪器的水平或铅直未调整、天平不等臂等;

(2) 实验理论近似性或实验方法不完善。如用伏安法测电阻没有考虑电表内阻的影响,用单摆测重力加速度时取 $\sin \theta \approx \theta$ 带来的误差等;

(3) 环境的影响或没有按规定的条件使用仪器。例如标准电池是以 20°C 时的电动势数值作为标称值的,若在 30°C 条件下使用时,如不加以修正就引入了系统误差;

(4) 实验者心理或生理特点造成的误差。如计时的滞后,习惯于斜视读数等。

系统误差一般应通过校准测量仪器、改进实验装置和实验方案、对测量结果进行修正等方法加以消除或尽可能减小。发现并减小系统误差通常是一件困难的任务,需要对整个实验所依据的原理、方法、仪器和步骤等可能引起误差的各种因素进行分析。实验结果是否正确,往往在于系统误差是否已被发现和尽可能消除,因此对系统误差不能轻易放过。

4. 随机误差

随机误差是指在多次测量同一被测量的过程中,绝对值和符号以不可预知的方式变化着

的测量误差的分量。随机误差是实验中各种因素的微小变动引起的,主要有:

(1) 实验装置的变动性。如仪器精度不高,稳定性差,测量示值变动等;

(2) 观察者本人在判断和估计读数上的变动性。主要指观察者的生理分辨本领、感官灵敏程度、手的灵活程度及操作熟练程度等带来的误差;

(3) 实验条件和环境因素的变动性。如气流、温度、湿度等微小的、无规则的起伏变化,电压的波动以及杂散电磁场的不规则脉动等引起的误差。

这些因素的共同影响使测量结果围绕测量的平均值发生涨落变化,这一变化量就是各次测量的随机误差。随机误差的出现,就某一测量而言是没有规律的,当测量次数足够多时,随机误差服从统计分布规律,可以用统计学方法估算随机误差。

除系统误差和随机误差外,还可能发生人为读数、记录上的错误或仪器故障、操作不正确等造成的错误。错误不是误差,要及时发现并在数据处理时予以剔除。

5. 仪器量程 精密度 准确度

测量要通过仪器或量具来完成,所以必须对仪器的量程、精密度、准确度等有一定的了解和认识。

量程是指仪器所能测量的范围。如 TW-1 物理天平的最大称量(量程)是 1 000 g, UJ36a 电位差计的量程为 230 mV。对仪器量程的选择要适当,当被测量超过仪器的量程时会损坏仪器,这是不允许的。同时也不应一味选择大量程,因为如果仪器的量程比测量值大很多时,测量误差往往会比较大。

精密度是指仪器所能分辨物理量的最小值,一般与仪器的最小分度值一致,最小分度值越小,仪器的精密度越高。如螺旋测微计(千分尺)的最小分度值为 0.01 mm,即其分辨率为 0.01 mm/刻度,或仪器的精密度为 100 刻度/mm。

准确度是指仪器本身的准确程度。测量是以仪器为标准进行比较,要求仪器本身要准确。由于测量目的不同,对仪器准确程度的要求也不同。按国家规定,电气测量指示仪表的准确度等级 a 分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 共七级,在规定条件下使用时,其示值 x 的最大绝对误差为

$$\Delta = \pm \text{量程} \times \text{准确度等级} \% \quad (1-1-3)$$

例如,0.5 级电压表量程为 3 V 时

$$\Delta V = \pm 3 \times 0.5 \% = \pm 0.015 \text{ V}$$

对仪器准确度的选择要适当,在满足测量要求的前提下尽量选择准确度等级较低的仪器。当待测物理量为间接测量时,各直接测量仪器准确度等级的选择,应根据误差合成和误差均分原理,视直接测量的误差对实验最终结果影响程度的大小而定,影响小的可选择准确度等级较低的仪器,否则应选择准确度等级较高的仪器。

§ 1.2 随机误差的处理

随机误差与系统误差的来源和性质不同,所以处理的方法也不同。

1. 随机误差的正态分布规律

实践和理论证明,大量的随机误差服从正态分布规律。正态分布的曲线如图 1-2-1 所示。图中的横坐标表示误差 $\Delta x = x_i - x_0$,纵坐标为误差的概率密度 $f(\Delta x)$ 。应用概率论方法可导出

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

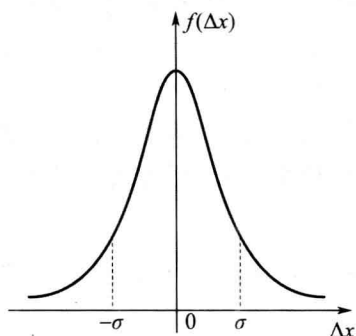


图 1-2-1 随机误差的正态分布

式中的特征量 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta x_i^2}{n}} \quad (n \rightarrow \infty) \quad (1-2-2)$$

称为标准误差,其中 n 为测量次数。

服从正态分布的随机误差具有以下特征:

- ① 单峰性 —— 绝对值小的误差出现的概率大于绝对值大的误差出现的概率;
- ② 对称性 —— 绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等;
- ③ 有界性 —— 在一定的测量条件下,绝对值很大的误差出现的概率趋于零;
- ④ 抵偿性 —— 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0 \quad (1-2-3)$$

2. 测量结果最佳值 —— 算术平均值

设对某一物理量进行直接多次测量,测量值分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 各次测量值的随机误差为 $\Delta x_i = x_i - x_0$ 。将随机误差相加

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) = \sum_{i=1}^n x_i - nx_0$$

$$\text{或} \quad \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - x_0 \quad (1-2-4)$$

用 $\bar{x}$ 代表测量列的算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-2-5)$$

式(1-2-4)改写为

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \bar{x} - x_0 \quad (1-2-6)$$

根据随机误差的抵偿特征, 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0$, 于是

$$\bar{x} \rightarrow x_0$$

可见, 当测量次数相当多时, 算术平均值是真值的最佳值, 即近真值。

当测量次数 n 有限时, 测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 仍然是真值 x_0 的最佳估计值。证明如下: 假设最佳值为 X 并用其代替真值 x_0 , 各测量值与最佳值间的偏差为 $\Delta x'_i = x_i - X$, 按照最小二乘法原理, 若 X 是真值的最佳估计值, 则要求偏差的平方和 S 应最小, 即

$$S = \sum_{i=1}^n (x_i - X)^2 \rightarrow \min$$

由求极值的法则可知, S 对 X 的微商应等于零

$$\frac{dS}{dX} = 2 \sum_{i=1}^n (x_i - X) = 0$$

于是

$$nX - \sum_{i=1}^n x_i = 0$$

即

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x}$$

所以测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 是真值 x_0 的最佳估计值。

3. 标准误差、置信区间、置信概率

随机误差的大小常用标准误差表示。由概率论可知, 服从正态分布的随机误差落在 $[\Delta x, \Delta x + d(\Delta x)]$ 区间内的概率为

$$f(\Delta x) d(\Delta x)$$

由此可见, 某次测量的随机误差为一确定值的概率为零, 即随机误差只能以确定的概率落在某一区间内。概率密度函数 $f(\Delta x)$ 满足下列归一化条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta x) d(\Delta x) = 1 \quad (1-2-7)$$

所以误差出现在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间内的概率 P 就是图(1-2-1)中该区间内 $f(\Delta x)$ 曲线下的面积

$$P(-\sigma < \Delta x < +\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\Delta x) d(\Delta x) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta x^2}{2\sigma^2}} d(\Delta x) = 68.3\% \quad (1-2-8)$$

该积分值可由拉普拉斯积分表查得。

标准误差 σ 与各测量值的误差 Δx 有着完全不同的含义。 Δx 是实在的误差值, 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, 随机误差出现的概率分布情况, 只具有统计意义, 是一个统计特征量。(1-2-8) 式表明, 作任一次测量, 随机误差落在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间的概率为 68.3%。区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 称为置信区间, 相应的概率称为置信概率。显然, 置信区间扩大, 则置信概率提高。置信区间取 $(-2\sigma, +2\sigma)$ 、 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 时, 相应的置信概率 $P(2\sigma) = 95.4\%$ 、 $P(3\sigma) = 99.7\%$ 。定义 $\delta = 3\sigma$ 为极限误差, 其概率含义是在 1 000 次测量中只有 3 次测量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 $\pm 3\sigma$ 范围的概率是很小的, 故称为极限误差, 一般可作为可疑值取舍的判定标准。图 1-2-2 是不同 σ 值时的 $f(\Delta x)$ 曲线。 σ 值小, 曲线陡且峰值高, 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,各测量值的分散性大,重复性差。

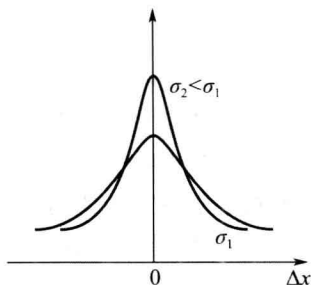


图 1-2-2 不同 σ 的概率密度曲线

4. 随机误差的估算 —— 标准偏差

在有限次测量中可用各次测量值与算术平均值之差 —— 偏差

$$\Delta x'_i = x_i - \bar{x} \quad (1-2-9)$$

代替误差 Δx_i 来估算有限次测量中的标准误差,得到的结果就是单次测量的标准偏差,用 S_x 表示,它只是 σ 的一个估算值。由误差理论可以证明标准偏差的计算式为

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-2-10)$$

这一公式称为贝塞尔公式。

同理,按 $\Delta x'_i$ 计算的极限误差为

$$\delta_x = 3S_x \quad (1-2-11)$$

S_x 和 δ_x 的物理意义与 σ 和 δ 的相同。

目前各种函数计算器都具备误差统计功能,可以直接计算测量列的算术平均值、标准偏差等。同学们应熟练使用函数计算器对实验数据进行处理。

5. 间接测量的标准偏差传递

直接测量的结果有误差,由直接测量值经过运算而得到的间接测量的结果也会有误差,这就是误差的传递。

设间接测量量 N 与各独立的直接测量量 $x, y, z, \dots$ 的函数关系为 $N = f(x, y, z, \dots)$, 在对 $x, y, z, \dots$ 进行有限次测量的情况下,间接测量的最佳值为

$$\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) \quad (1-2-12)$$

在只考虑随机误差的情况下,每次直接测量的结果为

$$\bar{x} \pm S_x, \bar{y} \pm S_y, \bar{z} \pm S_z, \dots$$

由于误差是微小量,因此由数学中全微分公式可以推导出标准偏差的传递公式为

$$S_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 S_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 S_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 S_z^2 + \dots} \quad (1-2-13)$$

式(1-2-13)不仅可以用来计算间接测量量 N 的标准偏差,而且还可以用来分析各直接测量量的误差对最后结果的误差的影响大小,从而为改进实验提出了方向。在设计一项实验时,误差传递公式能为合理地组织实验、选择测量仪器提供重要的依据。

一些常用函数标准偏差的传递公式如下表。

函数表达式	标准偏差传递公式
$N = x \pm y$	$S_N = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$
$N = xy$ 或 $N = \frac{x}{y}$	$\frac{S_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{S_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{S_y}{y}\right)^2}$
$N = kx$	$S_N = k S_x; \frac{S_N}{N} = \frac{S_x}{x}$
$N = x^n$	$\frac{S_N}{N} = n \frac{S_x}{x}$
$N = \sqrt[n]{x}$	$\frac{S_N}{N} = \frac{1}{n} \frac{S_x}{x}$
$N = \frac{x^p y^q}{z^r}$	$\frac{S_N}{N} = \sqrt{p^2 \left(\frac{S_x}{x}\right)^2 + q^2 \left(\frac{S_y}{y}\right)^2 + r^2 \left(\frac{S_z}{z}\right)^2}$
$N = \sin x$	$S_N = \cos x S_x$
$N = \ln x$	$S_N = \frac{S_x}{x}$

§ 1.3 测量不确定度及其估算

1. 不确定度的基本概念

不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度,是表征被测量的真值所处的量值范围的评定。实验结果不仅要给出测量值 X , 同时还要标出测量的总不确定度 U , 最终写成 $x = X \pm U$ 的形式, 这表示被测量的真值在 $(X - U, X + U)$ 的范围之外的可能性(或概率)很小。显然, 测量不确定度的范围越窄, 测量结果就越可靠。

引入不确定度概念后, 测量结果的完整表达式中应包含: 测量值、不确定度、单位和置信度。我国的《国家计量规范 JJG 1027-91 测量误差及数据处理》中把置信度 $P = 0.95$ 作为广泛采用的约定概率, 当取 $P = 0.95$ 时, 可不必注明。

与误差表示方法一样, 引入相对不确定度 E_r , 即不确定度的相对值

$$E_r = \frac{U_r}{X} \times 100\% \quad (1-3-1)$$

2. 不确定度的简化估算方法

由于误差的复杂性, 准确计算不确定度已经超出了本课程的范围。因此物理实验中采用具有一定近似性的不确定度估算方法。