



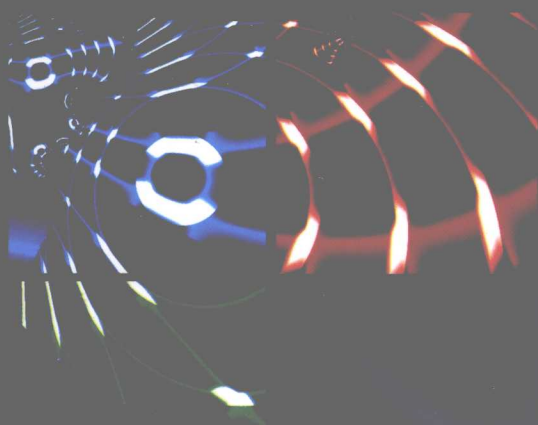
普通高等教育“十一五”规划教材

国家级物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验教程

李长真◇主编

杨明明 欧阳俊◇副主编



科学出版社
www.sciencep.com

代 通 容 内

普通高等教育“十一五”规划教材
国家级物理实验教学示范中心系列教材

大学物理实验教程

主 编 李长真

副主编 杨明明 欧阳俊

科学出版社

第 00.00 版

北 京

04-32

L419

1817225

内 容 简 介

本书是武汉大学物理科学与技术学院为大学物理实验课程编写的物理实验教材. 全书共分4章, 第1章讲述测量误差、不确定度和数据处理的基础知识; 第2章共有20个基础性物理实验, 以巩固和加强学生的物理实验基础训练; 第3章、第4章分别编排了16个综合性实验和18个设计性实验. 这些实验中, 既有经过长期教学实践、内容比较成熟的实验, 又有自行研发的新实验, 这有利于学生在实验方法、实验技术方面的训练, 以及学生的个性发展和创新能力的培养.

本书可作为高等学校工科各专业和理科非物理专业大学物理实验课程的教材或参考书, 也可以供其他专业和社会读者阅读.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/李长真主编. —北京: 科学出版社, 2009
普通高等教育“十一五”规划教材·国家级物理实验教学示范中心系列教材

ISBN 978-7-03-023263-2

I. 大… II. 李… 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 167060 号

责任编辑: 昌盛 贾 杨 / 责任校对: 陈玉凤
责任印制: 张克忠 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2009 年 1 月第一次印刷 印张: 18 3/4

印数: 1—4 000 字数: 405 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<长虹>)

《大学物理实验教程》编委会

主 编 李长真

副主编 杨明明 欧阳俊

参 编 程 放 胡 燕

罗文慧 肖怡安 祁 宁

前 言

众所周知,物理学的发展是技术创新的重要源泉.每一次工程技术的新突破都离不开物理学的新发现.而物理学是一门实验科学,物理学的各种实验方法、测试手段广泛地应用于科学技术的各个领域,因此,大学物理实验课程是高等学校各专业必修的基础课程,是为培养学生的创新能力和实践能力、提高学生的科学素质打下坚实基础的极其重要的教学环节.实践证明,物理实验课程在培养学生独立从事科学技术工作的能力、理论联系实际的分析综合能力与思维和表达能力等方面均具有独特的优势.所以说,“物理实验”这门课程不仅仅是向学生传授知识和技能,而且更重要的是培养学生开拓性研究的能力.所以在物理实验课教学过程中,同学们要在学习物理实验的基本知识、基本方法、基本技能的基础上,注意培养创造性地从事科学实验的物理思维能力.要养成良好的实验素养,如良好的观察习惯和正确的记录数据方法,以及对实验结果的分析与思考等.

武汉大学物理科学与技术学院近年来积极改革实验内容,根据新技术、新研究成果设计或引进新实验,使物理实验紧跟时代发展而不断更新,并取得了一定的效果.本教程就是在长期教学实践的基础上总结教学经验并吸收兄弟院校的宝贵经验而编写的.

全书共分为4章,第1章讲述了测量误差、不确定度和数据处理的基础知识,涉及的内容以本课程必须掌握的基本要求为主,个别地方略有扩充.第2章为基础性实验,共选编了20个力学、热学、电磁学和光学实验,其中,有些实验包括多个使用不同测量方法和装置的学习内容,以供选择.第3章为综合性与应用性实验(共选编了16个实验),这类实验其内容涉及相关的综合知识、综合性实验方法、实验手段,实现对学生传授知识、培养能力、提高素质的目的.第4章为设计性与创新性实验(共选编了18个实验),这是在学生做了一定数量的基本实验,能对实验方法、仪器使用等方面作出恰当评价后,为了培养学生自主地进行科学实验的初步能力而设置的.设计性与创新性实验只提出研究对象、要求,给予适当的提示,主要让学生自行确定实验方法、选择合适的仪器设备和设计一定的实验程序,自己加以实现并对结果进行分析处理.这样,既保证了基本训练,以提高了物理实验的综合性 and 实用程度,促使学生更积极地完成实验,又有利于学生的个性发展和创新能力的培养.

考虑到物理实验课的独立性和面向低年级学生的特点,对于基础实验,编写时力求将实验原理叙述清楚,计算公式推导完整,使学生在实验预习时掌握理论依据;实验内容与步骤亦尽可能具体,以加强对基本实验技能和基本实验方法的训练和指导.一般来说,一个基础性实验的课堂学习任务可在3~4学时内完成,部分实验有多个学习内容,教师安排时可进行取舍,也可供学有余力的优秀学生选做.对于综合性实验与设计性实验,编写时不局限在统一的格式上.有的重点放在新概念、新思路或原理的阐述上(如超声测厚、非线性电路混沌、超声光栅等);有的则不过分强调理论上的完整,而将主要内容放在实验方法和技巧的指导上(如计算机应用类实验以及传感器特性与应用等);有的设计实验,只提

出实验任务和基本要求,让学生查阅相关资料,自行设计实验方案,选择仪器用具,完成实验测试,以更多地发挥学生的主观能动性和创造性.这部分实验,根据各题目内容的不同一般可安排课内 4~12 学时完成.当然也允许有兴趣的学生利用课外开放时间进一步深入探索.多数实验后附有思考题,以引导学生在实验后进一步分析讨论,巩固和开阔所学知识.

实验教材离不开实验室的建设和发展,武汉大学物理科学与技术学院经过几十年的教学实践,作过多次调整、更新和扩充,才达到目前的规模和水平.本实验教材凝聚了武汉大学实验教学中心全体教师和实验技术人员的智慧和劳动.本书实际上是一集体创作的结晶.几乎每一个实验都包含了许多老师和实验技术人员的贡献.本教程是在武汉大学马清茂教授主编的《物理实验教程》、潘守清教授主编的《大学物理实验》和周殿清主编的《大学物理实验教程》的基础上,吸收我校近七年来物理实验教学改革的成果和兄弟院校实验教学的经验而编写的.参加本次改编工作除主编外,有杨明明(实验 16、17、19、25、26、50、51、52、53、54)、欧阳俊(实验 5、7、10、15、22、40)、程放(实验 6、21、23、24、30、43、47)、胡燕(实验 4、11、12、13、14、48)、罗文慧(实验 3、8、18、20、31、32)、肖怡安(实验 1、2、9、33、36)、祁宁(实验 27、28、29、34、35).全书由李长真统稿.

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免有疏漏谬误之处,恳请读者和同行专家们批评指正.

编者

2008 年 9 月于武汉大学

目 录

前言

绪论

第 1 章 物理实验数据处理基础知识

1.1 物理实验测量误差分析

1.2 物理实验不确定度的估计

1.3 物理实验有效数字处理及其运算规则

1.4 物理实验数据处理的常用方法

习题

第 2 章 基础性实验

实验 1 重力加速度的测量

1.1 用自由落体法测量重力加速度

1.2 用单摆法测量重力加速度

实验 2 物体转动惯量的测定

2.1 用三线摆测物体的转动惯量

2.2 用台式扭摆测物体的转动惯量

实验 3 光杠杆装置测定钢丝的杨氏模量

实验 4 超声声速测定

实验 5 液体黏滞系数的测定

5.1 用毛细管法测液体黏滞系数

5.2 用落球法测液体黏滞系数

实验 6 液体表面张力系数的测定

实验 7 不良导体导热系数的测定

实验 8 电学元件伏安特性的测量

实验 9 静电场的模拟与描绘

实验 10 用电磁感应法测交变磁场

实验 11 直流电桥测电阻

实验 12 示波器的原理及应用

实验 13 交流电桥

1

4

4

10

18

22

29

31

31

31

35

38

38

42

46

52

58

58

62

65

73

75

79

83

87

91

97

实验 14	交流电路的谐振	101
实验 15	霍尔效应	107
实验 16	薄透镜焦距测量	111
实验 17	分光计的调节和使用	115
实验 18	等厚干涉及其应用	122
实验 19	光栅衍射	125
实验 20	光的偏振	129
第 3 章	综合性与应用性实验	135
实验 1	杨氏模量的动态法测定	135
实验 2	超声测厚	139
实验 3	多普勒效应综合实验	143
实验 4	热管原理实验	147
实验 5	RC 和 RL 电路的稳态过程	151
实验 6	RLC 电路的暂态特性	155
实验 7	方波电信号的傅里叶分析	159
实验 8	用非线性电路研究混沌现象	163
实验 9	非平衡直流电桥及应用	168
实验 10	超声光栅及应用	183
实验 11	光电效应	187
实验 12	迈克耳孙干涉仪	192
实验 13	弗兰克-赫兹实验	197
13.1	汞原子第一激发电势的测定	198
13.2	氩原子第一激发电势的测定	204
实验 14	密立根油滴实验	208
实验 15	氢原子光谱	214
实验 16	光学全息照相的基本技术	218
16.1	全息照相	218
16.2	全息光栅的制作	222
第 4 章	设计性与创新性实验	226
实验 1	易溶于水的颗粒状物质的密度测定	226
实验 2	电阻丝电阻的测量	227
2.1	测量给定电阻丝的电阻	227
2.2	用电势差计测电阻	227

实验 3 测量金属电阻的温度系数	228
实验 4 电表的改装与校正	229
实验 5 电势差计测干电池的电动势和内阻	235
实验 6 小功率直流稳压电源的设计与制作	237
实验 7 PN 结正向电压温度特性研究	238
实验 8 数字温度计的设计与制作	241
实验 9 用示波器测量铁磁材料的磁滞回线	246
实验 10 光学材料折射率的综合测量	248
实验 11 液晶光学双稳态特性研究	251
实验 12 利用霍尔器件测量地磁场水平分量	254
实验 13 内调焦望远镜的组装及放大倍率的测定	256
实验 14 阿贝成像原理和空间滤波	259
实验 15 利用莫尔条纹测量微小长度	265
实验 16 计算机在物理实验中的应用——激光多普勒频移测量	266
实验 17 应变片传感器灵敏度测量	269
实验 18 虚拟仪器在物理实验中的应用	279
附录	283
附录 1 常用仪器的仪器误差	283
附录 2 常用物理常量表	287

绪 论

1. 物理实验课的目的

物理学从本质上来说是一门实验科学,物理规律的研究都是以严密的物理实验为基础,并且不断地受到实验的检验.物理实验的思想、方法、技术和装置常常是自然科学研究和工程技术发展的生长点.

物理实验是对高等学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程,也是工科学生进入大学后接受系统的实验思想和实验技能训练的开端。实验教学在育人方面有其独特的作用。近代许多重大的自然科学发现和高新技术的突破,大多来自实验。学生在实验室中通过亲自使用仪器进行观测和思考,并经历实验的失败和成功,就能更深刻而持久地了解科学知识。对于大多数学生来说,亲自做实验并讨论实验是理解实验和理论的相互作用的最好方法。由于实验具有自身特有的规律,具有不同于课堂理论教学的许多特征,因此决定了它在培养科学工作者的良好素质及科学世界观的过程中具有不可取代的地位和作用。

本课程重点是对学生进行物理实验理论、物理实验方法和实验技能方面进行系统的基本训练。这种训练,既为学生学习后续课程打下坚实和广泛的基础,更为今后参加科学研究、技术开发应用建立长期受用的潜在能力和创新能力。

本课程的具体任务:

- (1) 通过对物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量,使学生掌握误差分析、数据处理的基本理论和方法;学会常用仪器的调整和使用;学会掌握基本物理量的测量方法和各种测量技术;学会通过阅读实验教材和查阅参考资料,能概括出实验原理和方法的要点;学会正确记录和处理数据,判断和分析实验结果,撰写合格的实验报告;具有初步的实验设计能力。

- (2) 学习运用理论指导实践、分析和解决试验中问题的方法,从理论和实际中加深对基本物理要领和基本物理定律的认识和理解。

- (3) 培养与提高学生的科学实验能力和科学创新能力以及提出问题、分析问题、解决问题的能力。

- (4) 培养与提高学生的科学实验素养,包括理论联系实际、实事求是的科学作风,严谨踏实、一丝不苟的工作态度,勤奋钻研、积极创新的探索精神及遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品德。

2. 物理实验课的基本程序

物理实验是学生在教师指导下独立进行实验的一种实践活动,无论实验内容的要求或研究的对象如何不同,无论采用什么方法,其基本程序大致相同,一般都有三个环节:

1) 课前预习

课前认真阅读教材中有关内容(必要时还需查阅有关参考资料),在理解本次实验的目的、要求、实验所依据的物理原理、所采用的实验方法的基础上,要弄清楚要观察什么现象,用什么方法和仪器来测定哪些物理量,要知道实验要进行的内容和步骤,写出预习报告.预习报告的内容和格式如下:

(1) 实验目的.可参考教材并加上自己的理解,多少不限.

(2) 实验原理.这部分要求比较全面和详细,在充分理解了教材内容之后,用自己的语言概括性地叙述该实验的基本原理和测量方法,包括理论依据、所用的公式的推导、结果、图示,如电路图和光路图等.

(3) 实验仪器.根据实验原理的需要列出本实验所需仪器,在可能条件下注明仪器型号,必要时应列出仪器的使用方法.例如,示波器就应适当介绍示波管的结构,以及观察波形的原理.

(4) 数据记录和处理.首先要列表格,为了课上记录数据可在课前根据教材要求列出数据表格,最好另外用一张纸简略画表,待课上填好数据,经任课教师批改无误并签字后再抄在报告上的本栏目内.

因此,课前预习的好坏是实验中能否取得主动的关键.

2) 课堂实验

课堂实验是实验课的重要环节,学生进入实验室后应按下列要求进行实验.

(1) 听讲.认真听取教师对本实验的要求、重点、难点和注意事项的讲解;对照仪器,仔细阅读有关仪器的使用说明和操作注意事项;进一步明确本实验的具体要求.

(2) 仪器(或实验装置)的调节.在力学、热学实验中,一些仪器使用前往往需要调至水平或垂直状态.要注意测量仪器设备的零点,若某些仪器不能调零,则要记录仪器的零点值.电磁学实验中,在连接电路前,应考虑仪器设备的合理摆放,电路连接好后,还要注意把仪器调节到“安全待测状态”,然后请教师检查,确定电路连接正确无误后方可接通电源进行实验.光学实验的仪器调节尤显重要,它决定了实验能否顺利进行和测量结果是否精确可靠,一定要细心调节仪器至要求的工作状态(如分光计的调节等).

(3) 观测.实验中必须仔细观察、积极思维、认真操作、防止急躁.要在实验所具备的客观条件(如温度压力、仪器精度等)下,认真地、实事求是地进行观察测量.要初步学会分析实验,遇到问题时应冷静地分析和处理;仪器发生故障时,也要在教师指导下学习排除故障的方法;在实验中要有意识地培养自己的独立工作能力.

(4) 记录.实验记录是计算结果和分析问题的依据,在实际工作中则是宝贵的资料.要把实验数据细心地记录在预习报告的数据表格内.记录时要用钢笔或圆珠笔,不要用铅笔.如果确实记错了,也不要涂改,应轻轻画上一道,在旁边写上正确值,使正误数据都能清晰可辨,以供在分析测量结果和误差时参考.切勿先将数据记在草稿纸上,然后再誊写在表格内,这是一种不科学的习惯.此外,还应记录环境温度、湿度、气压等实验条件,仪器型号规格与编号及实验现象等.

总之,在课堂实习中希望同学们不要只会按照教材的实验步骤被动地去做,而要在弄懂原理的基础上自己思考着去做;不应片面追求快速完成数据测量,而应注重分析实验现

象和所遇到的问题;应独立完成实习而不是依赖他人完成实习,否则,将收效甚微。

3) 课后小结

在充分分析实验现象及结果、理解实验原理的基础上,写出实验报告。实验报告是实验者工作成绩的总结,既要全面又要力求简单明了,应该用语确切、字迹工整,图表合乎规范并且美观,这些都可作为自己工作能力的一种训练。实验报告内容包括:

- (1) 实验名称、实验者姓名、实验日期。
- (2) 实验目的。
- (3) 实验原理。用自己的语言对实验所依据的理论做简要叙述,不要抄书本,并附有必要的公式和原理图(包括电路图或光路图)。
- (4) 实验内容。概括地、条理分明地说明实验所进行的主要程序和步骤,观察了哪些物理现象,测量了哪些物理量,并阐明这些观测中所采用的方法。
- (5) 数据记录与处理。将原始记录数据转记于报告上(原始记录也应附在报告上,以便教师检查),该列表的要列表,该作图的要作图。计算按照有效数字的运算法进行,并求出结果的不确定度,正确运用不确定度表示实验结果。
- (6) 结果及讨论。该部分要明确给出实验结果,并对结果进行讨论(如实验中观察到的现象分析、误差来源分析、实验中存在的问题讨论、回答实验思考题等)。也可对实验本身的设计思想、实验仪器的改进等提出建设性意见。

3. 学生实验制度

为了培养学生良好的实验素质和严谨的科学态度,保证实验顺利进行和进一步提高教学质量,特制定以下实验制度:

- (1) 凡参加物理实验的学生,实验前必须认真预习,写出预习报告,经教师检查同意后方可进行实验。
- (2) 上课时不准迟到,不准无故缺课。无正当理由迟到 15 分钟者实验要扣分;迟到超过半小时者,教师有权取消其本次实验资格;无故缺席者本次实验为零分。
- (3) 必须严格按照实验要求和仪器操作规程,积极认真地进行实验,并做好相关实验记录。
- (4) 爱护仪器设备。不得随意从其他组乱拉仪器,不准擅自拆卸仪器;仪器发生故障应立即报告,不得自行处理;仪器如有损坏,照章赔偿。
- (5) 遵守课堂纪律,保持安静的实验环境。
- (6) 做完实验,学生应将仪器整理还原,将桌面和凳子收拾整齐,经教师审查测量数据并签字后,方可离开实验室。
- (7) 实验报告应在实验后一周内交实验室。

第1章 物理实验数据处理基础知识

本章的主要内容是从大学物理实验教学的角度出发,介绍测量误差估计和不确定度的基本概念、实验数据处理、实验测量结果不确定度的表示等方面的基础知识.本章所介绍的这些基础知识不仅在物理实验中要用到,而且是今后从事科学实验必须了解和掌握的.由于这部分内容牵涉面较广,深入的讨论需要有较多的数学知识和丰富的实践经验,因此不可能在一两次学习中掌握.要求同学们先对这些基础知识有一个初步的了解,然后结合具体实验再仔细阅读有关内容,进一步理解这些内容,并通过实际运用逐渐掌握.应当说明的是,对这些内容的深入讨论是普通计量学及数理统计学的任务,本书只是从实验教学的角度出发,引用其中的部分结论和计算公式,更详细的探讨和证明留待数理统计课程中解决.

物理实验是以测量为基础的.实践证明,由于测量仪器、测量方法、测量条件、测量人员等因素的限制,对一物理量的测量不可能是无限精确的,测量结果都存在误差.即误差自始至终存在于一切科学实验和测量的过程之中.没有测量误差的基本知识,就不可能获得正确的测量值;不会计算测量结果的不确定度就不能正确表达和评价测量结果;不会处理数据或处理数据方法不当,就得不到正确的实验结果.因此分析测量中可能产生的各种误差,并尽可能消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差做出估计,就是物理实验和许多科学实验中必不可少的工作.为此我们必须了解误差的概念、特性、产生的原因和估计方法等有关知识.由此可见,测量误差、不确定度与数据处理的基本知识在整个物理实验中占有非常重要的地位.

通过本章的学习和今后各个实验中的运用,要求达到

- (1) 建立误差和不确定度的概念,正确估算不确定度,懂得如何正确完整地表示实验测量结果.
- (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,学习发现某些系统误差、减小系统误差及削弱其影响的方法.
- (4) 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.

1.1 物理实验测量误差分析

1.1.1 测量与误差

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.测量分直接测量和间接测量等.

1. 直接测量和间接测量

“直接测量”是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,用米尺测长度,用天平称质量,用电表测电流和电压等都是直接测量。在实际测量中,许多物理量没有直接测量的仪器,往往需要根据某些原理得出函数关系式,由直接测量量通过数学运算才能获得测量结果,这种测量称为间接测量。即“间接测量”是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,用单摆测某地重力加速度 g ,先直接测得摆长 l 和单摆周期 T ,然后由公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 算出重力加速度,因此, g 为间接测量量。

2. 等精度测量和不等精度测量

如对某一物理量进行多次重复测量,而且每次测量的条件都相同(同一测量者,同一组仪器,同一种实验方法,温度和湿度等环境也相同),那么我们就没有任何依据可以判断某一次测量一定比另一次测量更准确,所以每次测量的精度只能认为是具有同等级别的。我们把这样进行的重复测量称为等精度测量。在各种测量条件中,只要有一个发生了变化,这时所进行的测量,就称为不等精度测量。一般在进行多次重复测量时,要尽量保持为等精度测量。

3. 测量误差

在一定条件下,任何一个物理量的大小都是客观存在的,都有一个实实在在、不以人的意志为转移的客观量,称为真值。一般来说,真值仅是一个理想的概念,只有通过完善的测量才能获得。但是,严格的完善测量难以做到,故真值就不能确定。实际测量中常用被测量的实际值或已修正过的算术平均值来代替真值,称为约定真值。测量误差就是测量结果与被测量的真值(或约定真值)之间的差值,测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差可以用绝对误差表示,也可以用相对误差表示。

若某物理量的测量值为 x ,真值为 A ,则测量误差定义为

$$\epsilon = x - A \quad (1-1-1)$$

上式所定义的测量误差反映了测量值偏离真值的大小和方向,因此又称 ϵ 为绝对误差。

相对误差定义为

$$E = \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量最佳值}} \times 100\% \quad (1-1-2)$$

绝对误差可以表示某一测量结果的优劣,但在比较不同测量结果时则需要用相对误差表示。例如,测量 10m 长相差 1mm 与测量 1m 长相差 1mm,两者绝对误差相同,而相对误差不同。

误差存在于一切科学实验和测量过程中。在实验的设计、仪器本身的精度、环境条件及实验数据处理中都可能存在误差,因此分析测量中可能产生的各种误差,尽可能消除其影响,并对最后结果中未能消除的误差作出估计,就是物理实验和许多科学实验中不可缺少的工作。为此,必须进一步研究误差的性质和来源。

1.1.2 误差的分类

测量中的误差主要分为两种类型,即系统误差和随机误差。它们的性质不同,需要分

别处理。

1. 系统误差

系统误差是指在多次测量同一被测量的过程中,保持恒定或以可预知方式变化的测量误差的分量。其特点是确定性、有规律性、可修正性。

1) 系统误差的来源

(1) 仪器的结构和标准不完善或使用不当引起的误差,如天平不等臂、分光计读数装置的偏心差、电表的示值与实际值不符等仪器缺陷,这种属于仪器缺陷引起的系统误差在使用时可采用适当测量方法和修正加以消除。

(2) 仪器设备安装调整不妥,不满足规定的状态,如不水平、不垂直、偏心、零点不准等使用不当的情况引起的系统误差。这种系统误差应尽量避免。

(3) 理论或方法误差。它是由测量所依据的理论公式近似或实验条件达不到理论公式所规定的要求等引起的。例如,单摆测重力加速度时所用公式的近似性;伏安法测电阻时,不考虑电表内阻的影响等。

(4) 环境误差。它是由于外部环境如温度、湿度、光照等与仪器要求的环境条件不一致而引起的误差。

(5) 实验人员的生理或心理特点所造成的误差。例如,用停表计时时,总是超前或滞后;对仪表读数时总是偏向一方斜视等。

2) 系统误差可分为已定系统误差和未定系统误差

(1) 已定系统误差。在一定的条件下,采用一定的方法,对误差取值的变化规律、大小和符号都能确切掌握的系统误差。一经发现,在测量结果中可以修正,如千分尺的零点修正。

(2) 未定系统误差。指不能确切掌握误差取值的变化规律及其大小和符号,而仅知最大误差范围(或极限误差)的系统误差。例如,仪表的基本允许误差主要属于未定系统误差。

3) 系统误差按其表现的规律可分为定值系统误差和变值系统误差

(1) 定值系统误差。这种误差在测量过程中其大小和符号恒定不变。例如,千分尺没有零点修正,天平砝码的标称值不准确等。

(2) 变值系统误差。这种误差在测量过程中呈现规律性变化。这种变化,有的可能随时间而变。有的可能随位置变化。例如,分光计刻度盘中心与望远镜转轴中心不重合,存在偏心差所造成的读数误差就是一种周期性变化的系统误差。

系统误差产生的原因往往可知或可以掌握,一经查明就应设法消除其影响。可以通过校准仪器,改进实验装置和实验方法或对测量结果进行理论上的修正加以消除或尽可能减小。对未能消除的系统误差,若它的符号和大小是确定的,则可对测量值加以修正。若它的符号和大小都是不确定的,则可设法减小其影响并估计出误差范围。

2. 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。例如,在测量过程中,即使系统误差已经消除,在相同条件下重复测量同一物理量时,仍然不会得到完全相同的结果,其测量值分散在一定的范围内,所测

得的误差时正时负,绝对值时大时小,既不能预测也无法控制。随机误差的产生,一方面是由于测量过程中一些随机的未能控制的可变因素或不确定的因素引起的,如人的感官灵敏度以及仪器精密度的限制,使平衡点确定不准或估读数有起伏;由于周围环境干扰而导致读数的微小变化,以及随测量而来的其他不可预测的随机因素的影响等。另一方面是由被测对象本身的不稳定性引起的。例如,加工零件或被测样品本身存在的微小差异,这时被测量就没有明确的定义值,这也是引起随机误差的一个原因。

随机误差就个体而言是不确定的,但其总体(大量个体的总和)服从一定的统计规律,因此可以用统计方法估算其对测量结果的影响。

除了上述两种主要类型的误差外,还有一种明显地歪曲了测量结果的误差称为粗大误差。它是由于实验者使用仪器的方法不正确,粗心大意读错、记错、算错测量数据或实验条件突变等原因造成的。含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值,正确的结果中不应包含有粗大误差。在实验测量中要极力避免过失错误,在数据处理中要尽量剔除坏值。

1.1.3 随机误差的处理

随机误差的出现,就某一测量值来说是没有规律的。一般来说,其大小和方向都是不能预知的,但对同一物理量进行多次重复测量时,则会发现它们的随机误差是按一定的统计规律分布的。

随机误差的分布有多种,不同的分布有不同形式的分布函数,但无论哪一种分布形式,一般都有两个重要的参数,即平均值和标准偏差。

1. 正态分布规律

随机误差中比较常见的一种分布是:正方向误差和负方向误差出现的次数大体相等,数值较小的误差出现的次数较多,数值较大的误差出现的次数较少,数值很大的误差在没有错误的情况下通常不出现。这一规律在测量次数越多时表现得越明显,这就是一种最典型的分布规律——正态分布(高斯分布)规律。

下面简要讨论正态分布的特点和特性参量。标准化的正态分布曲线如图 1-1-1 所示。图中横坐标 x 表示某一物理量的测量值,纵坐标表示测量值的概率密度, $p(x)$ 。

由数学知识可知

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

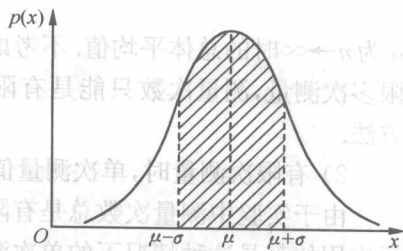


图 1-1-1 正态分布曲线

式中, $\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum x}{n}$, μ 称为总体平均值; $\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum (x - \mu)^2}{n}}$ 称为正态分布的标准偏差,是表征测量分散性的一个重要参量。

从曲线可以看出被测量值在 $x = \mu$ 处的概率密度最大,曲线峰值处的横坐标相应于测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时被测量的平均值 μ 。横坐标上任一点到 μ 值的距离 $x - \mu$ 即为与测量值 x 相应的随机误差分量。随机误差小的概率大,随机误差大的概率小。 σ 为曲线上拐点处的

横坐标与 μ 值之差的绝对值,它是表征测量值分散性的重要参数,称为正态分布的标准偏差.这条曲线是概率密度分布曲线,当曲线和 x 轴之间的总面积定为1时,其中介于横坐标上任何两点间的某一部分面积可以用来表示随机误差在相应范围内的概率,如图1-1-1中阴影部分的面积就是随机误差在 $\pm\sigma$ 范围内的概率(又称置信概率),即测量值落在 $(\mu-\sigma, \mu+\sigma)$ 的区间内的概率,由定积分计算得其值为 $P=68.3\%$.如将区间扩大到 $-2\sigma\sim+2\sigma$,则 x 落在 $(\mu-2\sigma, \mu+2\sigma)$ 中的概率就提高到95.4%; x 落在 $(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$ 中的概率为99.7%.当 $n\rightarrow\infty$ 时,测量标准差的绝对值大于 3σ 的概率仅为0.3%,对于有限次测量,这种可能性是微乎其微的,因此可以认为是测量失误,或者说该测量值是“坏值”,应予以剔除.在分析多次测量的数据时,这是很有用的 3σ 判据.

服从正态分布的随机误差有如下特征:

(1) 单峰性. 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大.

(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. 绝对值很大的误差出现的概率趋近于零.

(4) 抵偿性. 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋近于零.

2. σ , S_x 和 S_x 其, 自来题一, 随测量次数增加, 测量值分散性减小, 标准偏差也随之减小.

1) 总体标准偏差 σ

对测量中的随机误差如何处理呢? 对随机误差作估计的方法有多种, 科学实验中常用标准偏差来估计测量的随机误差. 不考虑系统误差分量时, σ 称为标准误差. σ 不是测量值中任何一个具体测量值的随机误差. σ 的大小只说明在一定条件下等精度测量列随机误差的概率分布情况. 在该条件下, 任一单次测量值的随机误差, 一般都不等于 σ , 但却认为这一系列测量中所有测量值都属于同一个标准偏差 σ 的概率分布. 在不同条件下, 对同一被测量进行两个系列的等精度测量, 其标准偏差 σ 也不相同. 已经知道

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum (x - \mu)^2}{n}} \quad (1-1-3)$$

μ 为 $n \rightarrow \infty$ 时的总体平均值. 不考虑系统误差分量时, 它就是真值. 由于实验中不可能做无限多次测量, 测量次数只能是有限的, 因此, 应研究有限次测量情况下的随机误差估计方法.

2) 有限次测量时, 单次测量值的标准偏差 S_x (或 S)

由于实验中测量次数总是有限的, 在大学物理实验中, 通常取 $5 \leq n \leq 10$, 因此我们实际应用的都是这种情况下的单次测量值的标准偏差公式

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-1-4)$$

这个公式又称为贝塞尔公式. 可以用这一标准偏差表示测量的随机误差, 它可以表示这一列测量值的精密度. 标准偏差小就表示测量值很密集, 即测量的精密度高; 标准偏差大就表示测量值很分散, 即测量的精密度低. 现在很多计算器上都有这种统计计算功能, 实验者可直接用计算器求得 S_x 等数值.