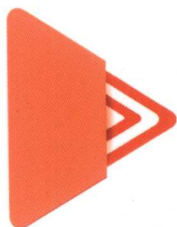




普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

◎ 侯宪春 王东方 薛冠非 编
王志林 审



Experiments of
University Physics



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



. 014013100

04-33
626

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

侯宪春 王东方 薛冠非 编
王志林 审



04-33
626



机械工业出版社



北航

C1699868

001810310

本书是根据高等学校本科《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》，结合实验室的实际情况，在物理实验教师的长期教学实践基础上编写的。

全书包括力学、热学、电磁学、光学和近代物理等 41 个基础实验、13 个设计性实验和计算机仿真物理实验。实验原理叙述清楚，公式推导完整，实验步骤简明扼要。本书开头介绍了实验规则、有效数字、数据处理、基本实验方法和基本量的测量等内容。实验开头有提要，介绍了本实验的重要意义；末尾有思考题，供学生预习或小结使用。实验内容顾及了目前大多数学校的现有设备情况。

本书可作为非物理专业学生物理实验课教材，也可供教师参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验/侯宪春, 王东方, 薛冠非编. —北京:
机械工业出版社, 2014. 2

普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 111 - 45303 - 1

I. ①大… II. ①侯…②王…③薛… III. ①物理学
- 实验 - 高等学校 - 教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 315566 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张金奎 责任编辑: 张金奎 熊海丽

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈秀丽

封面设计: 张 静 责任印制: 张 楠

北京京丰印刷厂印刷

2014 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14.75 印张 · 360 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 45303 - 1

定价: 29.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书系在使用多年的《物理实验》讲义的基础之上，结合物理实验教师多年实践教学的经验，根据高等学校本科《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》而编写的，结合了物理实验课程的建设，同时听取了很多兄弟院校教师提出的宝贵意见。

在编写的过程中，我们力求做到以下几点：

1. 在完成具体的实验项目过程中，使学生获得有关的实验技能训练，强调了对学生物理实验基础理论和方法的系统教学，使学生获得的知识更为系统灵活。
2. 本书就不确定度的估算和数据处理在有关的实验项目的数据处理中提出了相应的不同要求，以进一步加强学生的数据处理能力训练。
3. 所选的实验项目既顾及了基础物理实验室的基本条件，也注意了学生知识面的开拓和对应用所学知识解决问题的能力培养。
4. 努力开发学生的智力，培养学生分析和解决问题的能力、综合应用理论知识和实验技术的能力，训练学生设计实验的能力，把学生从理论学习的轨道逐渐引向工程实践方面来，使学生的定性分析和定量计算逐步和工程估算及实践手段结合起来，从而逐步掌握工程设计的常规步骤和方法，了解科学实验的程序和实施方法，培养创新意识和综合能力，为今后参加工程实践、进行科学研究奠定基础。在几年来实践的基础上，增加了设计性实验内容和计算机仿真实验。

本书是由佳木斯大学理学院大学物理教研室的侯宪春、王东方、薛冠非编写的。佳木斯大学理学院大学物理教研室的王志林老师对全书进行了审阅，提出了很多修改意见。几年来，很多教师对本书的书稿内容提出了不少的建议，编者在此敬致谢忱。由于编者水平有限，衷心欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

前言

绪论	1
0.1 物理实验课的地位及任务	1
0.2 物理实验课的基本程序	2
0.3 怎样书写实验报告	3

第1章 测量误差与数据处理

1.1 测量与测量误差	4
1.2 测量结果不确定度估算及表示	11
1.3 有效数字及其运算	19
1.4 实验数据的表示和处理方法	21
练习题	30

第2章 物理实验方法和基本量的

测量

2.1 物理实验方法	32
2.2 基本物理量的测量	35

第3章 力学实验

实验1 物体密度的测定	41
实验2 用光电控制计时法测重力加 速度	45
实验3 用单摆测定重力加速度	49
实验4 利用复摆测定重力加速度	52
实验5 用三线扭摆测量转动惯量	54
实验6 用转动惯量仪测物体的转动 惯量	57
实验7 用拉伸法测金属丝的弹性 模量	60
实验8 驻波实验(弦振动测音叉 频率)	63
实验9 测定声波在空气中的传播 速度	65
实验10 声速的测量(超声)	67
实验11 超声波的应用——探伤和测厚	68
实验12 简谐振动特性研究与弹簧劲 度系数测量	73

第4章 热学实验

实验13 用传感器测空气的比热	
-----------------	--

容比	77
----------	----

实验14 金属线膨胀系数的测定	80
实验15 液体表面张力系数的测定	83
实验16 用落球法测液体的黏度	85
实验17 不良导体导热系数的测量	88
实验18 冷却法测量金属的比热容	92

第5章 电磁学实验

电磁学实验常用基本仪器简述	95
实验19 线性电阻和非线性电阻的伏 安特性曲线	101
实验20 电表的改装和校正	104
实验21 用惠斯登电桥测电阻	107
实验22 用双臂电桥测低电阻	109
实验23 用模拟法研究静电场的分布	114
实验24 用电位差计测量电动势	118
实验25 示波器的使用	123
实验26 用霍尔元件测量磁场	133
实验27 热敏电阻的特性和应用	137
实验28 固体液体电介质相对介电常数 的测定	138

第6章 光学实验

光学实验仪器的使用和注意事项	142
实验29 薄透镜焦距的测定	143
实验30 用牛顿环测透镜的曲率半径	147
实验31 调整分光计和测量三棱镜的 折射率	150
实验32 偏振现象的实验研究	157
实验33 用旋光仪测旋光性溶液的旋 光率和浓度	161
实验34 单缝衍射实验	165
实验35 望远镜、显微镜及其应用	168
实验36 用衍射光栅测光波波长	173
实验37 音频信号光纤传输技术实验	176

第7章 近代物理实验

实验38 迈克耳逊干涉仪	180
实验39 夫兰克-赫兹实验	185
实验40 全息照相	191

实验 41 密立根油滴实验	195	第 9 章 计算机仿真物理实验	211
第 8 章 设计性物理实验	204	计算机仿真物理实验基础知识	211
设计性物理实验概述	204	实验 50 偏振光实验的计算机仿真	214
实验 42 简谐振动的研究	205	实验 51 光电效应测定普朗克常量	
实验 43 光的衍射法测弹性模量	206	实验的计算机仿真	215
实验 44 用凸透镜测狭缝宽度	206	实验 52 夫兰克-赫兹实验的计算机	
实验 45 非线性电阻特性的研究	207	仿真	219
实验 46 用非平衡电桥法测热敏电阻		实验 53 氢氘光谱拍摄实验的计算机	
的温度特性	207	仿真	222
实验 47 用电谐振法测膜层厚度	208	实验 54 氢氘光谱测量及阿贝比长仪	
实验 48 用霍尔元件测量地磁水平		实验的计算机仿真	224
分量	209	参考文献	228
实验 49 光栅特性的研究	209		

绪 论

0.1 物理实验课的地位及任务

0.1.1 实验在物理学中的地位

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的学科。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是自然科学和工程技术的基础。物理学的发展不仅在自身的学科体系内生长和发展出新的学科分支,而且它还是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科产生、成长、发展的基础和前导。物理理论和实验的发展,哺育着近代高新技术的成长和发展,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。可以说,现代高新技术的发明和突破,无不源于物理学上的重大发现,而高新技术的发展,又不断推动着实验物理研究的手段、方法和装备的发展,大大改变着人类对物质世界认识的深度和广度。

物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。物理规律的研究,物理学理论的产生、验证和发展,都必须以实验事实为基础,并不断受到实验的检验。物理实验是在人为条件下再现物理现象,并对现象进行观测,对测量结果进行分析的过程,是人们探索自然现象、发现物理规律、检验物理理论的有效工具,是工程技术的基础。

0.1.2 物理实验的目的与任务

物理实验课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,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。

物理实验课涵盖面广,具有丰富的实验思想、方法、手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力、提高学生科学素质的重要基础。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

大学物理实验课的具体任务如下:

(1) 通过大学物理实验使学生学会对一些物理量的测量方法,掌握基本仪器的性能和使用方法;了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用;掌握常用的实验操作技术;能够正确记录实验数据及其处理;并能分析实验结果,写出比较规范的实验报告。

(2) 培养学生的基本科学实验技能,提高学生的科学实验基本素质,使学生初步掌握实验科学的思想和方法。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。

(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。

0.1.3 科学实验能力培养的基本要求

(1) 独立学习的能力：能够自行阅读与钻研实验教材和资料，必要时自行查阅相关文献资料，掌握实验原理及方法，做好实验前的准备。

(2) 独立进行实验操作的能力：能够借助教材或仪器说明书，正确使用常用仪器及辅助设备，独立完成实验内容，逐步形成自主实验的基本能力。

(3) 分析和研究的能力：能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行分析、判断、归纳和综合，通过实验掌握对物理现象和物理规律进行观察和研究的基本方法，具有初步的分析和研究的能力。

(4) 书写表达的能力：掌握科学与工程实践中普遍使用的数据处理与分析方法，建立误差与不确定度的概念，正确记录和处理实验数据，绘制曲线，分析说明实验结果，撰写合格的实验报告，逐步培养科学技术报告和科学论文的写作能力。

(5) 理论联系实际的能力：能够在实验中学会发现问题、分析问题并学习解决问题的科学方法，逐步提高综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

(6) 创新与实验设计的能力：能够完成符合规范要求的设计性、综合性实验，能进行初步的具有研究性或创意性内容的实验，逐步培养创新能力。

0.2 物理实验课的基本程序

物理实验教学过程一般包括预习、课堂操作和完成实验报告三个重要环节。

1. 预习

学生在进行实验之前要在全面阅读实验教材的基础上，重点搞清实验目的、原理（主要原理公式），以及所用仪器的性能和操作规程方法，明确实验方法和步骤及注意事项，并写出预习报告。预习一般在课外进行，也可以到实验室结合仪器装置进行预习。预习报告的内容应简单明了，主要有实验名称、原理公式和实验装置图（如电路图或光路图等），并要画出数据记录表格。预习完成不好者不得进行实验。课前预习的好坏，是能否独立、顺利地进行实验的关键，应认真完成。

2. 课堂操作

学生到实验室后首先应把环境条件和仪器设备情况做好记录，如实验日期、天气、室温、湿度、气压等，以及同组人员姓名、所用仪器型号和规格等，然后在实验预习和教师讲解的基础上，熟悉仪器的使用方法，进行仪器安装和调试，在教师的许可下方可开始测试。在按实验步骤操作的同时，仔细地观察实验现象，认真记录实验数据。对错误的数据进行删改时，应注明删改的理由，避免养成随意涂改数据的坏习惯，更不能捏造数据。对实验中观察到的现象、出现的故障以及故障的排除情况都要记录下来。在实验过程中遇到疑难问题及时请教指导教师，实验完毕后将实验数据交教师阅审、签字，并将仪器整理好，方可离开实验室。学生在实验室的全部活动都要遵守实验室的规则和要求。

3. 实验报告

实验报告是对实验的分析、总结，即在原始记录的基础上，对测量数据进行处理和分

析,从而得出实验结果及对实验结果进行评价。实验报告不仅是实验者对实验的总结,更重要的是它要供教师审阅,因而实验报告的书写有一定的格式要求,整篇实验报告应做到字迹清楚、内容有条理、简明、工整、重点突出、作图规范、表格清晰。

0.3 怎样书写实验报告

实验报告的基本内容包括如下几个方面:

(1) 实验名称。

(2) 实验目的:记录实验所要达到的目的。

(3) 实验原理:扼要阐述实验原理,力争图文并茂,写出原理公式及其适用的条件。

(4) 实验仪器:写明仪器名称、型号、规格。

(5) 实验内容:主要实验步骤、方法、测量条件的选择。

(6) 数据记录及其处理:用表格形式记录出全部测量数据,标明物理量的单位。按实验要求计算待测量的量值和不确定度。报告上的计算过程应包括公式→代入数据→结果三个步骤,其他中间计算过程不写在报告上。最后写出实验结果表达式。作图法处理数据时要符合作图规则,图线要规矩、美观。

(7) 分析讨论:对实验结果进行分析和讨论包括对实验结果可靠性的分析,实验中出现的现象的解释,实验装置和实验方法存在的问题及改进的意见等。可以解答讨论思考题,对实验关键问题的研究体会,实验的收获和建议等。

第1章 测量误差与数据处理

1.1 测量与测量误差

1.1.1 测量

1. 测量的定义

物理实验离不开对物理量的测量。测量就是将待测物理量与选作计量标准的同类物理量进行比较，并得出其倍数的过程。倍数称为待测物理量的数值，选作的计量标准称为单位。因此，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。

2. 单位

按照中华人民共和国法定计量单位的规定，物理量单位均以国际单位制为基础，其中长度（米）、质量（千克）、时间（秒）、电流（安培）、热力学温标（开尔文）、物质的量（摩尔）、发光强度（坎德拉）是基本单位，其他物理量的单位可以由这些基本单位导出，故称为导出单位。

3. 测量的分类

在物理实验中，测量可分为直接测量与间接测量两种。

直接测量——用计量仪表直接读出测量值的测量，相应的物理量称直接测量量。例如，用米尺测量物体的长度，用电流表测量电流的大小等。

直接测量按测量的次数分为：单次测量和多次测量。

单次测量——只进行一次的测量。单次测量主要在以下情况时采用，①由于测量条件所限制，测量所带来的误差远大于仪器的不确定度；②由于该测量量的不确定度远小于其他测量量的不确定度。

多次测量——测量次数超过一次的测量。

间接测量——需直接测量一些相关的量，然后通过一定的函数关系式进行计算，从而得出所求的物理量。例如，测量固体圆柱的密度，首先用游标卡尺测出圆柱的高 h ，用螺旋测微计测出圆柱的直径 d ，最后再用天平测出圆柱的质量 M ，通过公式 $\rho = \frac{4M}{\pi d^2 h}$ 即可算出圆柱的密度 ρ 。

从测量条件上，测量可分为等精度测量和不等精度测量。

等精度测量——在对某一物理量进行多次重复测量过程中，每次测量条件都相同的一系列测量称为等精度测量。例如：同一个人同一仪器上采用同样的测量方法对同一待测物理量进行多次重复测量，每次测量的可靠程度都相同，这些测量是等精度测量。

不等精度测量——在对某一物理量进行多次重复测量时，测量条件完全不同或部分不同，各测量结果的可靠程度自然也不同的一系列测量称为不等精度测量。例如：在对某一物

测量进行多次测量时,选用的仪器不同,或测量方法不同,或测量人员不同等都属于不等精度测量。

一般来讲,在实验中,保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的。但当某一条件的变化对测量结果影响不大时,仍可视这种测量为等精度测量。等精度测量的数据处理比较容易,所以绝大多数实验都采用等精度测量。

4. 测量的读数和记录

在进行测量时,正确的读数和记录是关键。对于不同仪器有多种读数方法,将在以后的实验中具体介绍,在此仅谈一般规则。

(1) 如实记录仪器上显示的数值,作为原始数据。对指针式仪表和有刻度盘或标尺的仪器,通常在直接测量时,要求估读一位(该位是有效数字的可疑位)。

(2) 若仪表的示值不是连续变化而是以最小步长跳跃变化的,如数字式显示仪表,则谈不上估读,只要记录全部数据即可。

(3) 需要指出的是,有一些仪表,虽然也有指针和刻度盘,但指针跳动是以最小分格为单位的,例如最常用的钟表,有以秒为最小分度的时钟,也有以秒为最小分度的秒表。因此,对此类仪表不需要估读。

(4) 对于各类带有游标(或角游标)的仪器装置,是依靠判断两个刻度中哪条线对齐来进行读数的,这时一般记下对齐线的数值,不必进行更细的估读。

5. 测量仪器的量程、精密度和准确度

测量是通过一定的仪器或量具来完成的,每一种类的仪器都有一定的使用条件、范围和方法。因此,熟悉仪器的性能,掌握仪器的使用方法和准确的读数是完成实验的必要条件。为此,在测量前必须对仪器有足够的了解。

(1) 量程:仪器的测量范围称为仪器的量程,如:天平的最大称量为1000g,则其量程为1000g;电位差计的测量范围是0~170mV,则其量程为170mV等。不允许在超量程下使用仪器,以免损坏仪器。

(2) 精密度:仪器的精密度是指仪器所能分辨物理量的最小值。如测量长度时米尺(最小分度值为1mm)、游标卡尺(分度值为0.02mm)和螺旋测微计(分度值为0.02mm)的精密度不尽相同。仪器的精密度与仪器的最小分度值一致,此值愈小,仪器的精密度愈高。

(3) 准确度:用仪器的准确度级别来标志。例如:某电压表的表面上标有0.5字样的就表明该电压表的准确度级别是0.5级。一般仪器(测量用具)分度值取为准确度数值的1/2到2倍,有的仪器则完全相等,如游标卡尺的分度值为0.02mm时,其准确度数值也为0.02mm。

1.1.2 测量值、真值和测量误差

真值——物理量所具有的客观的真实数值。一切测量的目的就是力图要得到真值。

测量值——用直接测量方法所得到的量值。

测量误差——在测量过程中,我们总希望准确地测得待测量的真值。但是,任何测量总是依据一定的理论和方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的人员进行的。由于实验理论的近似性,实验仪器的灵敏度和分辨能力的局限性,实验环境的不稳定性和人的实

验技能以及判断能力的影响等,使测量值与待测量的真值之间总存在着差异,我们把这种差异称为测量误差,假设待测物理量的真值为 x_0 , 测量值为 x , 则误差 $\Delta x = x - x_0$ 。

一切测量值都毫无例外地存在着测量误差。为了得到最好的测量结果,也就是说为了尽量减小测量误差,我们必须研究测量误差的性质及来源,并采取适当措施减小测量误差。

在实际测量中计算误差时,通常所说的真值有如下几种类型:

(1) 理论真值或定义真值。如用平均值代替真值,三角形内角和等于 180° 等。

(2) 计量约定真值。如前面所介绍的基本物理量的单位标准,以及国际大会约定的基本物理量。

(3) 标准器相对真值(或实际值)。用比被标准过的仪器高一级的标准器的量值作为标准器相对真值。例如:用 0.5 级的电流表测得某电路的电流为 1.200A,用 0.2 级电流表测得的电流为 1.202A,则后者可示为前者的真值。

1.1.3 误差的表示形式

测量误差的大小反映了测量结果的准确度,测量误差可以用绝对误差表示,也可以用相对误差表示。其公式如下:

绝对误差 = 测量结果 - 被测量的真值

$$\text{相对误差} = \frac{\text{测量的绝对误差}}{\text{被测量的真值}} \times 100\%$$

相对误差又称为百分误差。为了说明相对误差的意义,下面举一个例子。例如测得两个物体的长度为 $l_1 = (23.50 \pm 0.03) \text{ cm}$, $l_2 = (2.35 \pm 0.03) \text{ cm}$, 则其相对误差分别为

$$E_{r1} = \frac{0.03}{23.50} \times 100\% = 0.13\% \approx 0.2\%$$

$$E_{r2} = \frac{0.03}{2.35} \times 100\% = 1.3\% \approx 2\%$$

从绝对误差来看,两者相等;但从相对误差来看,后者是前者的 10 倍。我们自然认为第一个测量更准确些。

1.1.4 误差分类

根据误差性质及产生原因,可将误差分为系统误差、随机误差及粗大误差三类。

1. 系统误差

在一定条件下,对同一物理量进行多次重复测量(等精度测量)时,误差的大小和符号均保持不变;而当条件改变时,误差按某种确定的规律变化(如递增、递减、周期性变化等),这类误差称为系统误差,其特点是:确定性、有规律性、可修正性。

(1) 系统误差的来源有以下几方面:

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都属于仪器的缺陷,在使用时,可采用适当方法加以减小或消除。仪器设备安装调整不妥,不满足规定的使用状态,如不水平、不垂直、偏心、零点不准等使用不当的情况应尽量避免。

②理论或方法误差。它是由测量所依据的理论公式的近似或实验条件达不到理论公式所

规定的要求而引起的。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。

③环境误差。它是由外部环境,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。

④实验人员的生理或心理特点所造成的误差。如停表计时时,总是超前或滞后;对仪表读数时总是偏向一方等。

(2)系统误差按其掌握程度可分为已定系统误差、未定系统误差以及变值系统误差。

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及其大小和符号都能确切掌握的系统误差。一经发现,在测量结果中就可以修正。

②未定系统误差。它是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(或极值误差)的系统误差。

③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,有的可能随位置而变。又可分为线性系统误差:误差按线性规律变化,误差公式是线性函数;周期系统误差:误差按周期规律变化,误差公式是周期函数;复杂规律变化:误差按非线性、非周期的复杂规律变化,误差公式是非线性函数。

系统误差产生的原因往往可知或能掌握,一经查明就应设法消除其影响。对未能消除的系统误差,如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

在测量过程中,即使系统误差消除以后,在相同条件下,多次重复测量(等精度测量)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,所得误差时正时负,绝对值时大时小,既不能预测,也无法控制,呈现无规则的起伏。即由于不确定的因素所造成的测量值的无规则的涨落被称为随机误差。

例如,观察时目的物对得不准;平衡点确定不准;读数的估计;由于环境温度、电源电压的起伏以及振动、气流、噪声等影响使测量结果产生微小变化等。

(1)随机误差的来源。

随机误差是由大量微小的涨落性的个别扰动累积而成的。

①判断的起伏。如用仪器时对最小分度值以下作估读,仪器调整和操作上的不一致,而观测者由于感官分辨能力的局限性时时改变等。

②测量工作状态的偶然变化,如空气流动,温度起伏,湿度、压强的变化,电源电压的波动等。

③实验和测量过程中各种外界因素的干扰,如振动、电磁场、热、光、声等。

④被测物体本身的不确定性,如钢丝的直径,由于加工方面的技术困难,一般不可能很均匀,而在不同位置、不同方向测量的值是不完全相同的,因而钢丝的直径是不确定的,只能去测它的平均直径。

(2)随机误差的特点。

①有界性。误差的绝对值不会超过某一最大值 $\Delta x_{\max}$ 。

②单峰性。绝对值小的误差出现的概率大,而绝对值大的误差出现的概率小。

③对称性。绝对值相同的正、负误差出现的概率相等。

④抵偿性。误差的算术平均值随着测量次数的无限增加而趋于零。

3. 粗大误差

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,粗心大意地读错、记错、标错测量数据,或实验条件的突变,以及外部的突发性干扰等原因造成的。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。

1.1.5 系统误差的处理

在许多情况下,系统误差是影响测量结果的主要原因。找出系统误差,设法修正或消除它对测量结果的影响,是误差分析的一个重要内容。

1. 如何发现系统误差

下面简单介绍几种发现系统误差的方法。

(1) 数据分析法。当随机误差比较小时,待测量的绝对误差不是随机变化的,而呈规律性变化,如线性增大或减小、周期性变化等,则测量中一定存在系统误差。

(2) 理论分析法。分析实验依据的理论公式所要求的条件在实验测量过程中是否得到满足,分析实验仪器要求的条件是否得到满足。实验不满足仪器的使用条件时也会产生系统误差。

(3) 对比法。这种方法适合于固定的系统误差。

①实验方法对比。用不同方法测量同一物理量,在随机误差允许的范围内观察结果是否一致。

②仪器对比法。例如用两个电表接入同一电路,对比两个表的读数,如果其中一个为标准表,就可得出另一个表的修正值。

③改变测量条件进行对比。例如分别在电流正向与电流反向时读数;在增加砝码过程中与减少砝码过程中读数,观察结果是否一致。

2. 系统误差的消除与修正

任何实验仪器、理论模型、实验条件,都不可能理想到不产生系统误差的程度。对于系统误差,一是进行修正,二是消除其影响。

(1) 消除产生系统误差的根源。如果能够找到产生系统误差的根源,无论是理论模型、实验仪器还是实验条件,我们都可以使其更完善,从而减小系统误差的影响。

(2) 用修正值对测量结果进行修正。用标准仪器对测量仪器进行校准,找出修正值或校准曲线,对结果进行修正。对由理论公式的近似造成的误差,找出修正值进行修正。

(3) 选择适当的测量方法,减小和消除系统误差。

①交换法。在测量过程中对某些条件进行交换,使产生系统误差的原因对测量结果起相反的作用。例如,为了消除天平不等臂而产生的系统误差,可将被测物作交换测量。

②替换法。保持测量条件不变,选择一个大小适当的已知量替代被测量而不引起测量仪器示值的改变,则被测未知量就等于这个已知量。由于在替代的两次测量中,测量仪器的状态和示值都相同,从而消除了测量过程带来的系统误差。

③抵消法。改变测量中的某些条件进行两次测量,使两次测量中误差的大小相等、符号相反,取其平均值作为测量结果以消除系统误差。此外,“等时距对称观测法”可消除按线

性规律变化的变值系统误差;“半周期偶数测量法”可消除按周期性变化的变值系统误差。

1.1.6 随机误差的处理

1. 随机误差正态分布(高斯分布)规律和标准误差

对一般物理实验和大多数测量来说,产生随机误差的原因是相对独立的、微小的多种因素影响的综合效果,而不是某一因素起主要作用。由概率统计论证明,此时随机误差将服从正态分布(高斯分布),实际的观测结果也证实了这一点。

随机误差正态分布规律如图 1-1 曲线所示,该曲线横坐标为误差 x ,纵坐标为误差的概率密度分布函数 $f(x)$,曲线下阴影部分就是误差出现在 $x \sim x + dx$ 区间内的概率。根据统计理论可以证明:

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

式中, σ 是一个取决于具体测量条件的常数,称为标准误差。

曲线下的总面积表示各种可能误差值出现的总概率,其值为

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

σ 是高斯分布曲线拐点处的横坐标,它的大小确定曲线的形状,如图 1-2 所示。 σ 大,表明随机误差离散程度大,测量的精密度低,曲线形状低而宽;反之,曲线形状高而窄。因而参量 σ 用来量度测量的精密度。 σ 的数学表达式是

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}} \quad (1-3)$$

式中,测量次数 n 趋于无限大; σ 为标准误差。

由概率密度分布函数的定义式(1-1),计算某次测量随机误差出现在 $[-\sigma, +\sigma]$ 区间的概率,得

$$P = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(x) dx = 0.683 \quad (1-4)$$

同样可以计算,某次测量随机误差出现在 $[-2\sigma, +2\sigma]$ 和 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 区间的概率分别为

$$P = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(x) dx = 0.955 \quad (1-5)$$

$$P = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(x) dx = 0.997 \quad (1-6)$$

通过以上的分析可以得出标准误差 σ 所表示的概率意义。对物理量 x 任做一次测量时,测量误差落在 $-\sigma$ 到 $+\sigma$ 之间的可能性为 68.3%,落在 -2σ 到 $+2\sigma$ 之间的可能性为 95.5%,而落在 -3σ 到 $+3\sigma$ 之间的可能性为 99.7%。

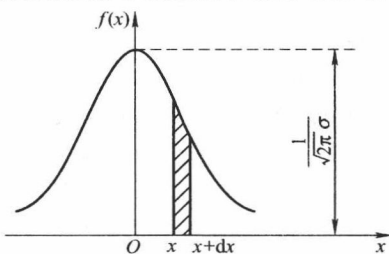


图 1-1 随机误差正态分布规律曲线

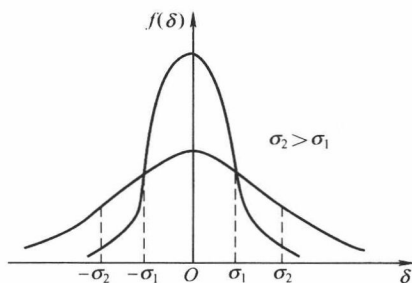


图 1-2 随机误差正态分布规律曲线的形状

2. 算术平均值

实际测量的次数 n 是不可能达到无穷大的, 而且真值 x_0 也是未知的, 因此, 计算标准误差 σ 的公式(1-3)只具有理论上的意义而没有实际应用价值。那么, 在对物理量 x 进行有限次测量而真值又未知的情况下, 确定 σ 可根据随机误差的可抵偿性, 即在相同的测量条件下对同一物理量进行多次重复测量, 每一次测量的误差时大时小, 时正时负, 但误差的代数和趋于零。

(1) 算术平均值

用测量列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 表示对物理量 x 进行 n 次测量的值, 那么 n 次的算术平均值的定义为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

(2) 算术平均偏差

$$\Delta x_1 = x_1 - x_0$$

$$\Delta x_2 = x_2 - x_0$$

$$\vdots$$

$$\Delta x_n = x_n - x_0$$

将以上各式相加得

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

由于

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0$$

因此有

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{x} \rightarrow x_0$$

可见, 测量次数越多, 算术平均值 $\bar{x}$ 越接近真值 x_0 。可以用算术平均值 $\bar{x}$ 作真值 x_0 的最佳估计值。在实际测量过程中用残差来计算每次测量的偏差:

$$v_i = x_i - \bar{x}$$

3. 测量值标准偏差 S_x

可以证明, 当测量次数为有限次时, 可以用标准偏差作为标准误差 σ 的估计值。 S_x 的计算公式如下:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-7)$$

有时也简称 S_x 为标准差, 它具有与标准误差 σ 相同的概率含义。式(1-7)称为贝塞尔公式, 在实际测量中经常用到它。

4. 平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$

一般情况下, 对 x 进行不同组的有限次测量, 各组结果的算术平均值是不会相同的。可以证明, 平均值的标准偏差为 S_x 的 $1/\sqrt{n}$, 即

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-8)$$

式(1-8)说明算术平均值的标准偏差是 n 次测量中的任意一次测量值标准偏差的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$, $S_{\bar{x}}$

小于 S_x , 因为算术平均值是测量结果的最佳值, 它比任意一次测量值 x_i 更接近真值, 所以误差要小。 $S_{\bar{x}}$ 的物理意义是在多次测量的随机误差遵从正态分布的条件下, 真值处于 $\bar{x} \pm S_{\bar{x}}$ 区间内的概率为 68.3%。

1.1.7 测量结果的定性评价

在科学实验中, 采用精密度、正确度和精确度来评价测量结果, 这三个概念的含义如下:

(1) 精密度——表示测量结果随机误差的大小。精密度高, 指多次测量数据的离散性小 (即测量的重复性好), 也即随机误差小, 但系统误差大小不明确。

(2) 正确度——表示测量结果中系统误差的大小。测量正确度高, 就是指测量数据的平均值偏离真值的程度小, 测量结果的系统误差小, 但随机误差的大小不明确。

(3) 精确度——是测量结果系统误差与随机误差的综合评定, 测量精确度高, 说明测量数据比较集中, 且逼近于真值, 即测量的随机误差与系统误差都比较小。在实验中总是希望尽量提高测量的精确度。

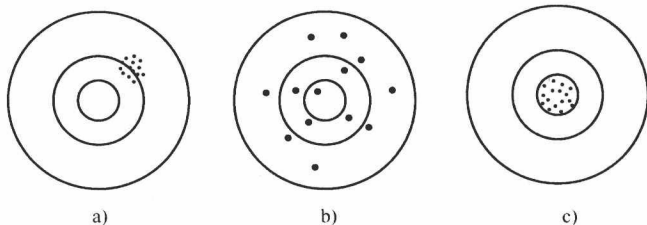


图 1-3 打靶弹着点分布

图 1-3 以打靶时弹着点的分布情况为例, 分别说明上述三个概念的意义, 图 1-3a 表示射击的精密

度高, 但正确度较差, 即随机误差小, 系统误差大; 图 1-3b 表示射击的正确度高, 但精密度较差, 即系统误差小, 随机误差大; 图 1-3c 表示精密度和正确度都较高, 即精确度高, 也就是说随机误差和系统误差都小。

1.2 测量结果不确定度估算及表示

在测量过程中, 测量误差是普遍存在的。各种误差因素必然导致测量结果偏离真值, 即具有误差, 且每次测量结果的误差又具有一定的不确定性。为了对测量结果的这种不确定程度进行定量的估计, 需要引入一个新的概念——不确定度。1993 年, 国际计量局 (BIPM) 等七个国际组织正式发布了“测量不确定度表示指南”, 简称“GUM”。指南中规范了各领域中测量不确定度计算和表达的方法。我国自 1999 年 5 月 1 日起实施 GUM, 以科学、准确、规范地表示测量结果。