

高等学校“十三五”规划教材 | 基础课 |

大学物理实验

W DAXUE
ULISHIYAN



主编 ◎ 李耀宗 张辉



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校“十三五”规划教材 | 基础课 |

大学物理实验

主 编 李耀宗 张 辉

参 编 马峰全 郭秋芬 马 晴 华雪侠

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书内容包括实验理论、基础型实验、综合型实验和设计型实验,共四章。其中:基础型实验是主要部分,有26项实验,涉及力学、热学、电磁学、光学等内容,该部分内容突出基本物理量的测量、常用物理实验方法和技术、常用实验仪器使用的训练;综合型实验有7项,这些实验项目一般涉及的知识面较宽,实验原理较复杂,且对实验数据处理的要求较高;设计型实验介绍了一些设计型实验的基本技能与要求,给出了两例设计型实验案例,同时提供了16项选题。

本书可作为师范类、综合类普通高等学校物理学专业物理实验课的教材,也可作为工科类高等学校理工类专业大学物理实验课的教材。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/李耀宗,张辉主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2017.8
高等学校“十三五”规划教材|基础课
ISBN 978-7-5606-4563-6

I. ①大… II. ①李… ②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(2017)第 157456 号

策 划 戚文艳

责任编辑 武翠琴

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 14

字 数 329千字

印 数 3000册

定 价 28.00元

ISBN 978-7-5606-4563-6/O

XDUP4855001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

物理学是一门实验科学,物理实验课在物理学教学中具有十分重要的作用。物理实验包含着丰富的实验思想、实验方法和实验手段,是培养学生科学实验能力,提高科学素养的重要途径,通过物理实验课的教学可使学生的综合实践技能得到系统全面的训练。同时物理实验课在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识及理论知识的综合应用能力等方面也有不可替代的作用。随着我国高等教育的逐步大众化,对地方普通本科院校的教育教学,尤其是课程建设提出了更高的要求。编写一本符合教育部课程体系要求、适应当代科技发展水平、适应学校实验室条件的改善,更适应学生的实际水平和能力的大学物理实验教材十分必要。

本教材是咸阳师范学院教材建设立项资助项目,教材内容符合教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导委员会的《理工科大学物理实验课程教学基本要求》,同时遵循“加强基础、重视应用、开拓思维、培养能力、提高素质”的指导思想,适应我校物理实验室的改建、扩建以及大学物理实验仪器设备逐步更新换代的现状,可使实验教学体系更加切合实际,教材内容与现有设备配合更加密切,物理实验教学更富有成效。

本教材包含实验理论、基础型实验、综合型实验和设计型实验四章内容,融入了我校多位教师长期从事物理实验教学与研究取得的成果。其中基础型实验是主要部分,设有 26 项实验,包括力学、热学、电磁学、光学等内容,该部分内容突出基本物理量的测量、常用物理实验方法和技术、常用实验仪器使用的训练,以训练学生的实验操作技能和实验数据的获得、表示、运算及实验结果的表达为主;综合型实验有 7 项,这些实验项目一般涉及的知识面较宽,实验原理较复杂,且对实验数据处理的要求较高,可训练学生的研究能力;设计型实验介绍了一些设计型实验的基本技能与要求,给出了两例设计型实验案例,同时提供了 16 项选题,目的是培养学生的实验设计能力、创新能力及运用所学知识 with 技能解决实际问题的能力。

考虑到实验数据处理与不确定度分析对学生来说有一定的难度,为培养学生的基本实验素养,在编写实验项目时我们做到了以下几点:每项实验均介绍

了一些在工程技术等方面的应用情况;对要测量的实验数据及最终测量结果均以空表格形式列出;通过案例的方式介绍了实验数据的记录与数据处理方法、最终测量结果的不确定度合成及减小不确定度的途径与方法;每项实验均以物理量测量为目的进行实验,均给出了测量结果的不确定度的估算公式,以方便学生参考。

该教材是本着有利于培养和提高学生的科学实验素养和综合能力而编写的。其中包括:自学能力,即该教材能较好地满足学生自己阅读的要求,以利于学生实验前的预习及实验后的复习;实践能力,即借助教材对仪器的说明及实验过程的表述,能正确地完成实验操作;科学的判断能力,即借助教材对实验原理的表述,能对实验现象进行分析、判断;实验数据的分析与实验结果的表达能力,即借助教材中提供的实验数据的处理方法及案例,能正确表示和处理实验数据并表达实验结果;实验设计能力,即通过教材中提供的基础型、综合型与设计型实验的训练,具有开展简单的设计型实验的能力;创新能力,即通过教材各部分内容的教学,最终使学生在创新能力方面得到系统、全面的培养。

本书的编写分工如下:张辉编写第一章实验理论;李耀宗编写第二章基础型实验中的第3~16、19~21、24~26项实验,第三章综合型实验中的第1~5项实验,第四章设计型实验及附表;华雪侠编写第二章基础型实验中的第1~2项实验;郭秋芬编写第二章基础型实验中的第17~18项实验;马晴编写第二章基础型实验中的第22~23项实验;马峰全编写第三章综合型实验中的第6~7项实验。全书由李耀宗统稿。物理实验室的多位老师,对本书的编写提出了宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

限于编者的水平,书中难免有缺点与不妥之处,恳请读者批评指正,以便我们进一步改进提高。

编 者

2017年4月

目 录

绪论	1
第一章 实验理论	4
1.1 测量与误差	4
1.1.1 测量及其分类	4
1.1.2 误差及其分类	5
1.1.3 测量的精密度、准确度和精确度	9
1.2 测量结果的不确定度	10
1.2.1 直接测量量的不确定度	10
1.2.2 间接测量量的不确定度	11
1.3 有效数字及其运算	13
1.3.1 有效数字及其表示	14
1.3.2 有效数字的运算规则	14
1.4 实验数据的处理方法	16
1.4.1 列表法	16
1.4.2 作图法	17
1.4.3 逐差法	19
1.4.4 最小二乘法	20
1.4.5 计算机软件法	22
1.5 物理实验中的测量方法	24
1.5.1 比较测量法	25
1.5.2 放大测量法	26
1.5.3 模拟测量法	26
1.5.4 物理光学测量法	27
1.5.5 转换测量法	28
1.6 物理实验的基本操作技能	29
练习题	31
第二章 基础型实验	33
实验一 长度的测量	33

实验二	用单摆测量重力加速度	40
实验三	在气垫导轨上验证牛顿第二运动定律	44
实验四	固体与液体密度的测量	49
实验五	金属杨氏模量的测量	55
实验六	用惯性秤测量物体的质量	61
实验七	用自由落体法测量重力加速度	65
实验八	用落体法测刚体的转动惯量	69
实验九	物质比热容的测定	73
实验十	金属线胀系数的测定	78
实验十一	用拉脱法测定液体的表面张力系数	81
实验十二	冰的熔解热的测定	85
实验十三	用落球法测定液体的黏滞系数	88
实验十四	制流电路与分压电路	92
实验十五	伏安法测电阻	98
实验十六	惠斯通电桥测电阻	102
实验十七	电表的改装与校准	107
实验十八	模拟法描绘静电场	112
实验十九	赫姆霍兹线圈的磁场	116
实验二十	直流电位差计的应用	120
实验二十一	示波器的原理与应用	124
实验二十二	薄透镜焦距的测量及成像规律的研究	129
实验二十三	牛顿环实验	135
实验二十四	单缝的夫琅禾费衍射	139
实验二十五	光的偏振现象的研究	143
实验二十六	分光计的调节与棱镜顶角的测量	148
第三章	综合型实验	153
实验一	弦上驻波的形成及其规律	153
实验二	用散热比较法测定金属的比热容	158
实验三	RLC 串联电路谐振特性研究	162
实验四	用分光计研究光栅衍射	166
实验五	用迈克耳逊干涉仪测定光的波长	170
实验六	密立根油滴实验	175
实验七	弗兰克-赫兹实验	179

第四章 设计型实验	183
4.1 设计型实验的基本要求	183
4.2 物理模型的建立	183
4.3 实验装置的设计与测量器具的选择	185
4.4 设计型实验案例	187
案例 1 透明介质的折射率的测量	187
案例 2 测定地面附近空气的密度	190
4.5 设计型实验选题	192
选题一 用三线摆测量刚体的转动惯量	192
选题二 用焦利氏秤测量低 k 弹簧的有效质量	194
选题三 毛发等细丝物品密度的测量	196
选题四 用毛细管法测量水的表面张力系数	196
选题五 大气压的测量	197
选题六 水的汽化热的测定	198
选题七 金属电阻的热敏特性研究	198
选题八 干电池电动势与内阻的测量	199
选题九 电池的内阻与输出功率特性研究	199
选题十 电珠伏安特性的研究	200
选题十一 用等厚干涉法测金属细丝的直径	201
选题十二 用衍射法测细丝的直径	201
选题十三 远视眼镜片度数(焦距)的测量	202
选题十四 用非平衡电桥测温度	202
选题十五 用等厚干涉法测金属的线胀系数	203
选题十六 通过液体在毛细管中的层流现象测定液体的黏度系数	204
附表	205
附表 1 SI 单位制物理常数	205
附表 2 物质的密度	205
附表 2.1 一些固体在 20°C 时的密度(10^3 kg/m^3)	205
附表 2.2 一些液体在 20°C 时的密度(10^3 kg/m^3)	206
附表 2.3 一些气体在标准状态($T_0=273\text{ K}$, $p_0=1.0132\times 10^5\text{ Pa}$)下的 密度(kg/m^3)	206
附表 3 一些固体材料的弹性模量	207
附表 4 固体材料在标准大气压下的线胀系数	207
附表 5 材料间的摩擦因数	208

附表 5.1	滑动摩擦因数	208
附表 5.2	静摩擦因数	208
附表 6	流体的黏度系数	209
附表 6.1	液体的黏度系数 $\eta(\text{mPa} \cdot \text{s})$	209
附表 6.2	标准大气压下一些气体的黏度系数	209
附表 7	液体与空气接触时的表面张力系数 $\sigma(10^{-3} \text{N/m})$	209
附表 7.1	不同温度下水的表面张力系数 $\sigma(10^{-3} \text{N/m})$	209
附表 7.2	在 20°C 时一些液体的表面张力系数	210
附表 8	一些材料在 27°C 时的导热系数	210
附表 9	一些物质的比热容	210
附表 10	一些材料在室温下的电阻率与温度系数	211
附表 11	热电偶电动势	211
附表 11.1	温差为 100 K , 以铂、铜作为第二金属的热电偶电动势	211
附表 11.2	铜-康铜热电偶冷端为 0°C 时热端温度与电动势的关系 ($0 \sim 102^\circ\text{C}$) ...	212
附表 12	室温下一些电介质的相对介电常数与击穿电压	212
附表 13	一些介质中的声速	213
附表 14	一些介质 20°C 时对 $\lambda = 589.3 \text{ nm}$ 光的折射率	214
附表 15	光的相对亮度	214
附表 16	电磁波的种类	214
附表 17	可见光谱色波段	215
参考文献		216

绪 论

物理学是一门实验科学,物理学新概念的建立、新规律的发现及物理理论的验证,都离不开实验。物理学理论新的突破大多是建立在新的实验技术的基础之上的。工程设计和生产实践中许多问题也与物理实验密切相关。本教材以物理基础知识、实验方法和实验技能为重点,希望通过实验课程的学习,使学生的实验操作能力、用物理规律解决实际问题的能力以及实验设计与创新能力得到有效提升。

1. 物理实验课的任务和特点

物理实验课是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的必修通识课程,其实验的方法、手段和理论是所有实验中最基本、最普遍的。物理实验涉及的实验方法、仪器选择、数据记录及分析运算、实验结果不确定度的评价等是以后各类实验与科学研究的基础。学好大学物理实验课不仅对学好大学物理课程有很大的促进作用,同时,物理实验的思想、方法、手段可迁移到其他课程的学习中,对全面提升学生科学实验素养具有重要的意义。

按《理工科大学物理实验课程教学基本要求》,本课程的任务是:使学生在中学物理实验的基础上,按照循序渐进的原则,学习物理实验知识和方法,得到实验技能的训练,从而初步了解科学实验的主要过程和基本方法,为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。要求学生:掌握测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的基本能力;掌握基本物理量的测量方法;了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用;掌握实验室常用仪器性能,常用实验操作技术;知道物理学史料和物理实验在现代科学技术中的应用。在能力方面使学生逐步具有:独立实验能力、分析与研究能力、理论联系实际能力、创新能力。

课程的任务决定了物理实验课程有以下几个特点:

(1) 有很强的目的性。几乎所有类型的实验,无论是基础型、综合型还是设计型实验都是在已经确立的理论指导下,在有限的时间内完成实验课题的学习任务。

(2) 结果可实现。实验采取恰当的方法,使要观测的物理现象和过程能够实现,并能进行一定准确度的定量测量。

(3) 包含广泛的技能训练内容。实验涉及物理理论知识的应用,仪器的选择、调节、操作、保养、校验,物理现象的观察,物理规律的判断和测量等,有利于物理知识、见解和经验的积累。

(4) 用数据说明问题。表述测量结果,验证物理理论,探索物理规律和分析实际问题,无一不用到数据。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。物理实验集理论、方法、技能和数据于一体,通过数据结果得出实验结论。

2. 物理实验课的教学目标

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,使学生掌握实验基本知识、实

验设计思想,理解物理规律。

(2) 培养、提高学生的科学实验能力,包括:阅读理解能力,即通过阅读教材、资料,能概括出实验原理和方法的要点;动手操作能力,即能正确使用基本实验仪器,掌握基本物理量的测量方法和各种测量技术;分析判断能力,即能正确记录处理数据,判断和分析实验结果;书写表达能力,即能写出合格的实验报告;简单的实验设计能力,即能根据实验目的与要求,进行简单的实验设计。

(3) 培养与提高学生的科学实验素养,理论联系实际和实事求是的科学作风,严肃认真的科学态度,主动学习和刻苦钻研的学习精神,遵守纪律、团结协作的团队精神,爱护公物的优良品德,从而使具备从事科学实验的基本素质。

3. 学习物理实验课的基本环节

1) 实验前的预习

实验前的预习是实验课的重要环节,包括以下几方面的要求:

(1) 理论的准备。在实验前,学生应围绕实验目的,反复阅读实验教材及有关的参考书,弄清实验原理。

(2) 实验仪器的准备。了解实验仪器的工作原理、工作条件及操作规程,了解实验室为何选用这样的装置和仪器,是否还有其他的实验装置可用。

(3) 观察、测量的准备。熟悉实验步骤、注意事项,设计记录实验现象和数据的表格。

2) 认真完成实验项目

学生进入实验室,要求做到以下几点:

(1) 了解实验室规章制度以及注意事项。

(2) 认真听取教师对实验的要求,对重点、难点和注意事项的讲解。对照仪器,通过实验教材及仪器使用说明等进一步明确实验的具体要求。

(3) 检查实验仪器设备是否正常,并记录规格型号。按操作规程和实验步骤认真调节实验仪器。

(4) 实验过程中养成良好的习惯,及时、正确记录实验数据,原始数据不能随意修改。

(5) 除了记录实验数据外,有些实验要同时记录伴随的实验现象或发现的问题。

(6) 做好实验信息登记。其内容包括:日期、时间、地点、合作者,仪器编号、名称、规格及仪器状态。

3) 撰写实验报告

实验报告是对实验工作的总结,是实验过程、条件及结果的准确、完整表达,是交流实验经验,检验实验完成情况的主要载体。学会编写实验报告是培养学生实验能力的重要方面,实验者应养成及时书写实验报告的好习惯。通常实验报告的内容包括以下几个方面:

(1) 实验名称,实验者姓名,实验日期。

(2) 实验目的。

(3) 实验仪器及用具,标明规格、型号。

(4) 实验原理。用自己的语言,简要描述实验依据的理论,能用公式、电路、光路等图表说明的要图表说明。

(5) 实验内容及数据记录。概括地、有条理地按实验完成的实际顺序描写实验步骤,

记录观测到的实验现象及实验的原始数据。

(6) 正确处理和分析实验数据, 计算实验结果, 并按照正确格式表达实验结果。

(7) 分析与讨论。该部分有许多内容可写, 如实验中遇到的困难及解决的方法; 实验装置的特点与优缺点; 对实验中异常问题的分析与讨论; 对实验设计改进的设想等。

第一章 实验理论

1.1 测量与误差

1.1.1 测量及其分类

1. 测量

物理实验一方面要观察物理现象,另一方面要同时进行物理量的测量,而且物理实验的主要目标往往就是物理量的测量。测量就是运用一定的仪器或量具,通过一定的方法与原理,直接或间接地把待测量与选定为标准的量进行比较,从而确定待测量与标准量倍数关系的过程。物理量一般可分为基本物理量和导出物理量两类。基本物理量的单位是科学地、人为地规定好的,国际单位制(SI)中选定了七个物理量作为基本物理量,即长度、时间、质量、热力学温度、物质的量、电流、发光强度。其单位为基本单位,分别是米(m)、秒(s)、千克(kg)、开尔文(K)、摩尔(mol)、安培(A)及坎德拉(cd)。其他物理量为导出量,其单位为导出单位,可由基本单位导出。测定一个物理量,既要定出这个量的数值,同时也要确定它的单位。

2. 测量的分类

1) 直接测量

直接测量(又称简单测量)是指用事先分度(标定)的测量仪器、仪表与被测量直接进行比较,得到该被测量数值的测量方法。例如,用米尺、游标卡尺、千分尺测量长度,用天平测量质量,用电流表测量电流等均为直接测量。相应的被测量——长度、质量、电流等称为直接测量量,其特点是待测量的数值与单位可直接得到。直接测量简单、直观,是最基本的测量方式,也是间接测量的基础。

2) 间接测量

依据待测量与直接测量量的函数关系,通过测出直接测量量,然后计算出待测量,这种测量称为间接测量(又称为复合测量)。通过间接测量方式获得测量结果的物理量称为间接测量量。如通过测量球体的直径而计算出的球体体积就是间接测量量。

一个物理量是直接测量量还是间接测量量并不是绝对的,要由具体测量的方法和仪器来确定。例如,用伏安法测量电阻时,电流、电压是直接测量量,电阻是间接测量量,而用欧姆表测量电阻时,电阻又是直接测量量。

3) 等精度测量

等精度测量是指在相同测量条件下对同一物理量所做的重复测量。例如,在相同的环境下,由同一个人用同样的仪器和方法对同一个待测量进行的重复测量。由于各次测量的

条件相同,测量结果的可靠性是相同的,因此每次测量的值是等精度的。应该指出,一般测量实践中(包括物理实验),一些条件变化很小,或某些次要条件变化后对测量结果影响甚微,可按等精度测量处理。

4) 非等精度测量

由于测量条件全部或部分发生了明显变化,每次测量的可靠性、精确度明显不同,这种测量即为非等精度测量。

在科学研究和其他高精度测量中,为了得到更精确、更可靠的结果,特意要在不同的条件下,用不同的仪器、不同的测量方法,由不同的测量人员对同一个待测量进行测量和研究。测量结果是通过待测量的各种非等精度测量结果的加权平均而给出的。

1.1.2 误差及其分类

1. 真值

在一定的实验条件下,被测量存在一个不依赖人的意志为转移的客观真实数值,称此值为被测量的真值。测量的目的是为了获得尽量接近真值的测量值,而真值是一个理想的概念,一般不可能准确知道。有关真值可以从以下几种情况得出:

(1) 理论值:如三角形三个内角和为 180° 。

(2) 公认值:公认的一些常数值,如普朗克常数等。

(3) 相对真值:用精度等级高的仪器校准的测定值。规定:校准仪器的精度等级至少应比测量仪器的精度等级高两个以上的等级。

(4) 测量的算术平均值:在一定条件下,对某恒定的物理量进行多次测量,可将测量结果的算术平均值作为真值。

2. 误差

1) 绝对误差

测量值和真值之间存在的偏差称为测量值的绝对误差,若以 a 表示某测量量的真值,以 x_i 表示单次测量的结果,则该次测量的绝对误差为 $\Delta x_i = x_i - a$ 。

实际测量中用多次测量结果的算术平均值代替真值,则单次测量的绝对误差为

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (1.1.1)$$

其中

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1.2)$$

绝对误差可正、可负,与测量量有相同的单位,它反映了测量值偏离真值的程度。绝对误差越小,两者越接近。所以,绝对误差的大小标志着测量结果的可靠程度或可信程度的大小。但评价一个测量结果的优劣不仅要看绝对误差的大小,还要看被测量本身的大小。

2) 相对误差

测量值的绝对误差与测量值真值的比值称为相对误差,真值可用公认值或多次测量的算术平均值代替,相对误差是一个纯数,常用百分比表示:

$$\varepsilon_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1.1.3)$$

假定一个物体的真实长度为 100 cm, 而某次的测量值为 100.5 cm, 则该次测量值的绝对误差为 0.5 cm。若物体的真实长度为 10 cm, 而某次的测量值为 10.5 cm, 则该次测量值的绝对误差也为 0.5 cm。但两次测量的相对误差分别为 0.5% 和 5%, 有较大差别。

测量结果一定包含误差, 测量的任务是: 获取在一定测量条件下的测量量的最佳真值; 设法将测量值中的误差降至最小; 估计测量结果的可靠程度。在实际应用和工程技术中, 往往根据不同的需要, 将误差控制在一定限度内, 这就要求研究误差的来源、性质, 以便采取适当的措施, 使测量获得更好的结果。

3. 误差的来源

为了减小误差, 就要分析误差的来源。如用单摆测重力加速度实验中, 用一无质量、不可伸长的细线, 悬挂一个质点, 当摆角趋近于零时, 重力加速度 g 和摆长 l 、周期 T 存在关系 $g = 4\pi^2 l / T^2$ 。在该实验中, 误差的来源大致有如下几个方面: 米尺和秒表本身不准确; 对仪器的操作方法的差异; 仪器读数不准确; 摆线质量不为零; 摆球体积不为零; 摆角大小不为零; 存在空气浮力和阻力; 支点状态不理想; 支架晃动或空气流动; 理论公式的近似等。归纳起来, 产生误差的原因有:

- (1) 理论上的近似、假设;
- (2) 仪器精度的影响;
- (3) 实验装置的影响;
- (4) 实验条件的变化;
- (5) 观察者自身的原因等。

4. 误差的分类

按对测量值影响的性质和误差产生的原因, 误差可分为系统误差、偶然误差和粗大误差。

1) 系统误差

在同一条件下, 多次测量同一物理量时, 误差的数值和符号总保持不变或按照一定的规律变化, 这种误差叫系统误差。

系统误差虽有确定的规律性, 但这一规律往往不确定。按照对其掌握的程度, 可将系统误差分为已知的系统误差和未知的系统误差。对已知的系统误差可通过修正, 从测量结果中消除。系统误差来源于仪器的固有缺陷、实验方法的不完善或实验理论的近似性、环境的影响、实验者缺乏经验和生理或心理的差异等, 所以系统误差的消除、减小或修正属于技能问题, 可以在实验前、实验中、实验后进行, 可以通过对测量仪器进行校准、改善测量方法或对人员进行专门训练等措施予以处理。

系统误差的特点: 总是使测量结果向一个方向偏离, 它有固定的大小, 或是按一定规律变化。

减少系统误差的方法: 改进实验仪器, 修正理论公式, 改善实验环境和条件, 提高实验者的技能、技巧等。

2) 偶然误差

在相同实验条件下进行多次测量, 如果测量误差在大小和符号上都表现出偶然性, 即误差的大小不等, 符号不同, 则这种误差即为偶然误差。

偶然误差主要是由于测量过程、实验条件和环境因素等无规则变化,导致测量值围绕真值发生涨落引起的。例如,实验时温度的随机波动,螺旋测微器测量柱间的压力在一定范围随机变化,读数时的视差影响等。

在测量中,对于同一物理量的任何一次测量的偶然误差,其绝对值的大小和符号,都是不可能预先确定的,有时偏大,有时偏小。然而,当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,偶然误差整体服从正态分布(或称高斯分布)规律,如图 1.1.1 所示,图中横坐标 Δx 表示测量值的绝对误差,纵坐标 $f(\Delta x)$ 表示测量值在单位误差间隔内出现的概率。

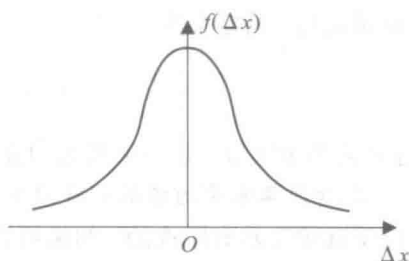


图 1.1.1 偶然误差的正态分布曲线

绝对误差的分布曲线满足如下性质:

- (1) 单峰性: 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。
- (2) 对称性: 多次测量时测量结果分布对称, 测量值在相等的正、负误差间隔内出现的概率相同。因此, 取多次测量的平均值有利于减小偶然误差。
- (3) 有界性: 在一定的测量条件下, 误差绝对值不会超出一定的范围。

3) 粗大误差

粗大误差是指明显超出规定条件下的预期的误差。其原因可能是由于仪器有缺陷, 环境干扰或实验者未正确地使用实验仪器, 粗心大意, 观察失误或记录错误等不正常情况下引起的误差。这种误差的出现也必将导致错误的测量结果。所以, 在数据处理前必须通过数据分析的办法剔除粗大误差。

5. 标准偏差

任何测量值都有误差, 如何评价一组测量数据的好坏, 最粗略的办法就是看数据的分散范围, 即数据最大值和最小值之差。除了分散范围这一重要因素外, 还应考虑在此范围内, 数据比较集中还是比较分散。标准偏差又称均方根偏差, 是考虑了这两个因素而定义的。以下讨论的问题中假定实验数据不存在系统误差和粗大误差。

测量列是指一组测量数据, 如果该测量数据是在相同实验条件下测得的, 该测量就是等精度测量。测量数据存在偶然误差, 一组测量数据的可靠性可通过标准偏差进行评价。

1) 测量列的算术平均值

设测量列 n 个测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 其绝对误差分别为 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$, 真值为 a , 则

$$\sum_{i=1}^n (x_i - a) = \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (1.1.4)$$

将式(1.1.2)代入式(1.1.4), 有

$$\bar{x} - a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (1.1.5)$$

式(1.1.5)表明, 测量列的算术平均值的绝对误差等于测量列误差的平均值。在不考虑系统误差和粗大误差的情况下, 偶然误差有正有负, 相加时可抵消一部分, 所以, n 越大, 测量列的算术平均值越接近真值。因此, 可用测量列的算术平均值作为被测量真值的最佳

估计值。

2) 测量列的标准偏差

在重复测量中, 对于一组测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 其分散情况可用测量列的标准偏差 $s(x)$ 定量描述, 其定义为

$$s(x) = \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - a)^2}{n-1}} \quad (1.1.6)$$

式中, n 为测量次数, $s(x)$ 又称为均方根偏差。

3) 测量列算术平均值的标准偏差

由于测量总是有限次的, 如果用算术平均值作为最佳真值, 可以导出测量列算术平均值的标准偏差 $s(\bar{x})$ 为

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1.1.7)$$

标准偏差小的测量值, 分散范围比较窄, 集中在平均值附近, 偏离真值的程度较小, 即测量值的可靠性较高。按照误差理论, 实验条件一定时, 单次测量的测量值出现的概率满足如下高斯分布函数(正态函数):

$$f(x) = \frac{1}{s(\bar{x}) \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2s^2(\bar{x})}\right) \quad (1.1.8)$$

该函数曲线在 $x - s(\bar{x}) \sim x + s(\bar{x})$ 范围的面积为 68.3%, 在 $x - 2s(\bar{x}) \sim x + 2s(\bar{x})$ 范围的面积为 95.4%, 在 $x - 3s(\bar{x}) \sim x + 3s(\bar{x})$ 范围的面积为 99.7%。即单次测量值处在平均值左右 1、2、3 个标准偏差 $s(\bar{x})$ 范围的概率分别为 68.3%、95.4%、99.7%。

4) 测量列中粗大误差的剔除

在测量数据中, 有时会发现异常数据。由于这些数据是符合正态分布规律的, 不能轻率舍弃, 因此, 就需要建立粗大误差剔除准则。规定合适的有效测量值的范围, 由于测量值出现在该范围外的可能性非常小, 可以认为在有限次的测量中, 测量值不会超出此范围, 如果超出, 则认为这是由于某种错误造成的, 应该剔除。下面介绍两种常用的粗大误差的判据。

(1) 拉依达准则(又称 $3s$ 准则)。

由于单次测量值处在平均值左右 $3s(\bar{x})$ 范围以外的概率只有 0.3%, 拉依达准则认为, 如果某次测量值的绝对误差的绝对值大于 $3s(\bar{x})$, 即

$$|\Delta x_i| = |x_i - \bar{x}| > 3s(\bar{x}) \quad (1.1.9)$$

则该误差可视为粗大误差, 该测量值 x_i 为异常值, 应予以剔除。此准则使用方便, 不用查表, 但它要求测量次数较大, 一般要求 n 大于 10 次, 当 n 较小时, 此准则不可靠。

(2) 肖维涅准则。

肖维涅准则规定测量值出现的概率小于 $\frac{1}{2n}$ (n 为测量次数) 时, 该测量值为异常值可舍弃。即对于 n 次测量, 当测量值 x_i 满足

$$|x_i - \bar{x}| > Ks(\bar{x}) \quad (1.1.10)$$

时, 则 x_i 为异常值。式中 $Ks(\bar{x})$ 为置信限, K 值与测量次数有关, 见表 1.1.1。