

Physics Experiment

大学物理实验 教程

肖井华 蒋达娅 陈以方 董淑香 主编



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

大学物理实验教程

肖井华 蒋达娅 陈以方 董淑香 主编

北京邮电大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本教材是在北京邮电大学物理实验课程教学改革和实践的基础上,根据教育部关于开展高等学校实验教学示范中心建设的有关精神重新编写的。全书结构紧凑,实验内容丰富,有不少新颖的实验内容。教材按照基本物理实验、综合与近代物理实验、设计性实验组织教学,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。本书可以作为高等院校普通物理实验教材或教学参考书,也可供高等函授院校选用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/肖井华等主编. —北京:北京邮电大学出版社,2005

ISBN 7-5635-1104-0

I. 大... II. 肖... 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(2005)第 083463 号

书 名: 大学物理实验教程

主 编: 肖井华 蒋达娅 陈以方 董淑香

责任编辑: 李欣一

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: 010-62282185(发行部) 010-62283578(FAX)

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京通州皇家印刷厂印刷

开 本: 787 mm × 960 mm 1/16

印 张: 20

字 数: 434 千字

印 数: 1—5 000 册

版 次: 2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-1104-0/O·99

定 价: 29.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

本教材是在北京邮电大学物理实验课程教学改革和实践的基础上,根据教育部关于开展高等学校实验教学示范中心建设的有关精神重新编写的。

与传统的工科物理实验教材相比,本教材增添了许多新的实验内容,力求反映当前的主流实验理论和新的实验技术和方法,比如超声波探伤、核磁共振、电光效应、液晶的物理特性等实验。而在一些传统的老实验中则引入了新的测试技术,比如利用 CCD 测量光的衍射条纹,利用数字示波器对数据进行采集和处理等。而音频信号的光纤传输、混沌在通信中的应用等实验内容,则适应了当前社会信息科学技术发展的需要。

实验内容和课程教学体系的改革以及新教材的使用均应与使用的教学方法和教学模式相配套。利用本教材可以进行层次化的开放教学。书中的自学实验理论上相对简单,但实验内容丰富,便于自学和提高实验兴趣。基本实验主要对学生进行实验的基本知识、基本方法、基本技能的训练。综合性、近代物理、设计性实验则可以尝试进行不同方式的开放教学。

实验课的教材和教学,离不开实验室的建设和发展,是一项集体性的工作。在此,衷心感谢我校多年来从事物理实验教学的教师和技术人员的支持、帮助与贡献。

在本教材的编写过程中朱洪波、王世红、张雨田、李海红、赵晓红、杨胡江、代琼琳、王金、程洪艳、尚玉峰、杨俊忠、杨江萍、李丽娟等老师参与了部分章节的编写和修改,在此向他们表示特别的感谢。

编 者
2005.7 于北京

目 录

绪 论

- 一、物理实验课的地位、作用和任务 1
- 二、如何上好物理实验课 1
- 三、物理实验课程的安排 3

第 1 章 测量不确定度与数据处理方法

- 1.1 测量误差 6
- 1.2 测量的不确定度和结果的表达 11
- 1.3 有效数字及其运算法则 16
- 1.4 常用数据处理方法 19
- 1.5 物理实验中的基本测量方法 23

第 2 章 自学实验

- 实验 1 物体密度的测定 30
- 实验 2 速度和加速度测定 36
- 实验 3 简单控制电路 41
- 实验 4 补偿法测量电动势和电位差计的使用 45
- 实验 5 灵敏电流计的研究 50
- 实验 6 半导体 PN 结的物理特性及玻尔兹曼常数的测定 57
- 实验 7 模拟法测绘静电场 61
- 实验 8 用读数显微镜观测劈尖的等厚干涉条纹 64
- 实验 9 折射率的测定 68
- 实验 10 氦氖激光束参数的测定 75

第3章 基本物理实验

实验 11 测量金属的弹性模量	78
实验 11.1 用拉伸法测定钢丝的弹性模量	78
实验 11.2 动态法测弹性模量	81
实验 12 用牛顿环测量球面镜的曲率半径	86
实验 13 电阻及非线性电阻伏安特性的测量	90
实验 14 磁滞回线的测量	93
实验 15 示波器使用	97
实验 16 声速的测定	102
实验 17 直流电桥实验	107
实验 17.1 惠斯登电桥测量中值电阻	107
实验 17.2 凯尔文电桥测量低值电阻	110
实验 18 分光计的调整和使用	115
实验 19 霍尔元件测磁场	123
实验 20 集成霍尔传感器与弹簧振子的振动	129
实验 21 刚体转动惯量的测定	133
实验 22 气体比热容比的测定	137
实验 23 导热系数的测定	140

第4章 综合与近代物理实验

实验 24 用玻尔共振仪研究受迫振动	143
实验 25 衍射光栅	147
实验 26 光的偏振	150
实验 27 迈克尔逊干涉仪的调整和使用	157
实验 28 用 CCD 光强分布测量仪观测光的夫琅和费衍射	165
实验 29 法布里-珀罗干涉仪	173
实验 30 弗兰克-赫兹实验	178
实验 31 用密立根油滴仪测量电子电量	182
实验 32 微波的布拉格衍射	188
实验 33 液晶物理特性	193

实验 34	用非线性电路研究混沌现象	197
实验 35	核磁共振	202
实验 36	超声波探测实验	209
实验 37	音频信号光纤传输实验	217
实验 38	晶体的电光效应与信号传输	223

第 5 章 设计性实验

实验 39	气垫导轨上的系列实验	231
实验 39.1	碰撞实验	231
实验 39.2	振动实验	232
实验 40	半导体温度计的设计	235
实验 41	电阻应变片压力传感器特性及应用	239
实验 42	设计组装万用表	242
实验 43	RC 和 RL 电路特性	246
实验 43.1	RC 电路幅频特性与相频特性的研究	246
实验 43.2	RL 电路	247
实验 43.3	RC 电路的充(放)电特性(选做)	249
实验 44	RLC 谐振电路和选频电路	250
实验 44.1	RLC 串联谐振电路	250
实验 44.2	方波的傅里叶级数展开	251
实验 44.3	RLC 并联谐振电路(选做)	252
实验 45	交流电桥及其应用	254
实验 45.1	交流电桥测电感和电容	254
实验 45.2	交流电桥的应用——消侧音电路	256
实验 45.3	整流滤波电路(选做)	257
实验 46	硅光电池的光照特性	259
实验 47	光敏电阻的特性与光开关的设计	262
实验 48	透镜系列实验	266
实验 49	氢原子光谱	273
实验 50	利用超声光栅测液体中的声速	275
实验 51	光电效应	277

实验 52 混沌电路及其在保密通信中的应用	281
实验 52.1 离散混沌系统的电路实验	281
实验 52.2 基于混沌同步的加密通信实验	284
第 6 章 计算机在物理实验中的应用	
6.1 Matlab 在数据处理中的应用简介	288
6.1.1 Matlab 与数据处理	288
6.1.2 Matlab 作图	290
6.1.3 Matlab 应用举例	294
6.2 计算机仿真实验	302
附表	305
参考文献	310

绪 论

一、物理实验课的地位、作用和任务

物理实验课程同物理理论课程一样,是高等学校物理课程教学的重要组成部分。物理学是一门实验的科学,一切物理概念的确立、物理规律的发现、物理理论的建立都依赖于实验,并接受实验的检验。因此物理实验是一门独立的课程,具有完整、科学的实验教学课程体系。

按照新世纪经济建设和社会发展对高素质人才培养的需求,物理实验课在综合各个层次实验内容的基础上,建立了相关内容融合、贯通和渗透,形成了科学的、相互联系的实验教学课程体系,科学地设置实验项目,全面培养学生的实验技能、综合分析和解决问题的能力,使学生具有创新精神和实践能力。

物理实验课对同学们的具体要求有以下几点:

1. 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验知识,加深对物理学原理的理解。

2. 培养与提高科学实验能力,其中包括:

(1) 自学能力:能够自行阅读实验教材或资料,做好实验前的准备;

(2) 动手能力:能够借助教材或仪器说明书正确调整和使用常用仪器;

(3) 分析判断能力:能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析和判断;

(4) 书写表达能力:能够正确记录和处理实验数据,绘制图线,说明实验结果,撰写合格的实验报告;

(5) 简单的设计能力:能够完成简单的具有设计性内容的实验。

3. 培养与提高自己的科学实验素养。在实验中要树立理论联系实际和实事求是的科学作风;严肃认真的工作态度;不怕困难主动研究的探索精神;遵守纪律,遵守操作规程,注意安全和团结协作;爱护公共财物的优良品德。

二、如何上好物理实验课

为了达到上述目的,首先应明确物理实验课程的地位、作用和任务,正确处理实验和理论的关系,重视进行科学实验训练与实验过程;其次,要明确物理实验课是在教师指导下由自己独立完成实验的课程。学生必须充分发挥自己的主观能动性,既动脑又动手,积

积极主动地以一个研究者、探索者的姿态进行学习。

1. 学习要点

(1) 注意掌握实验中所采用的基本实验方法和数据处理方法。比如掌握一些基本仪器的结构原理、规格性能、维护知识、使用方法;掌握一些常用物理量的测量方法;了解一些常用的物理实验方法;学会列表法、逐差法、作图法、回归法作直线拟合等数据处理方法;了解测量误差的基本知识,学会简单的误差计算;正确地运用有效数字等。

(2) 培养良好的实验习惯和作风。要习惯于遵守实验室的规章制度和仪器的操作规程,比如做实验前预先考虑好实验要进行的内容和步骤,估计可能出现的问题,做好预习报告;有条不紊、认真仔细地做实验;如实地、清楚地记录下全部实验数据和必要的环境条件;正确地摆放各种仪器和实验装置,维护实验室、仪器装置和实验环境的完好和整洁等等。

(3) 培养自己的分析能力。在整个实验过程中要始终保持处于积极的思维状态,努力做到:清楚地理解实验的原理、方法;掌握实验所依据的理论公式和所要求的条件;有目的、有步骤地调节仪器。实验中随时判断每一个数据是否合理;数据之间是否合乎规律;正确记录实验中发生的现象并进行分析。对实验中出现的仪器的小故障,学生应力求自己动手解决。

2. 学习的注意事项

掌握好以上要点,需要特别注意以下几个方面:

(1) 做好预习

在规定的时间内熟悉仪器的使用并完成测量任务,对大多数同学来说不是一件轻松的事。实验预习的好坏是能否做好物理实验的关键。做好预习一方面可以避免毁坏仪器和出现安全问题,另一方面能够在课上高质量地完成实验,以提高学习的效率和兴趣。

(2) 独立完成实验操作

同学们一定要克服依赖心理,尽可能独立地完成实验。发现问题首先要独立地进行思考,实在解决不了再求助教师。教师的指导只是启发式的,我们不提倡“手把手”地“包教包会”。同学们通过实验培养出独立工作的能力是本课程的任务之一。

(3) 认真处理数据,高质量地完成实验报告

数据处理的过程是发现物理规律和验证物理定律的过程。同学们应本着科学的精神,如实地记录数据,认真地处理数据。对“不理想”的数据,应分析其产生的原因并在报告上特殊注明,不能简单地删除了事。一些奇异的实验结果,其背后很可能隐藏着重要的物理规律。

要善于对实验结果进行总结和分析,看看自己能否提出一些改进的意见。创新能力往往是在平时一点一滴积极的思考中逐渐形成的。

实验报告是对整个实验的记录和总结。一份好的实验报告应简明、完整、准确地记录实验条件(仪器及环境)、原理、过程、现象、实验数据及数据处理等。练习写好实验报告的

目的就是为今后写好科研报告打下基础。

(4) 理解和遵守实验室的各项规定

实验课和理论课的重要区别之一是它不能在宿舍或自习室通过自学完成。学生要在实验室里和各种实验仪器打交道。为了保护公共财产,防止出现安全事故,实验室做出了相应的规定和要求,希望同学们能理解并自觉遵守。

三、物理实验课程的安排

本课程共有 51 学时,分为基础物理实验、综合与近代物理实验两大部分。基础物理实验共 27 学时,包括 3 学时的绪论以及 24 学时的实验。第二部分实验则由综合与近代物理实验组成,共 24 学时。它在前一部分实验的基础上引入了具有一定综合性、应用性、时代性、先进性,能够体现现代科技发展的实验项目。为了帮助同学们更好地理解实验的安排,我们在这里做一些基本介绍。

1. 基础实验的安排

物理实验是同学们进入大学后的第一门实践课程,对于初次或是接触实验不多的同学,会碰到很多的困难,为了帮助同学们尽快地进入角色,我们安排了 3 学时的绪论课以及 24 学时的基础实验内容。基础实验是在中学物理实验的基础上按照循序渐进的原则安排的,实验的内容由浅入深,主要为基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能的训练和基本测量方法与误差分析等,涉及到力、电、光等物理各个学科,是大学物理实验的入门实验。在教学安排上精选了一些优秀的物理实验,采取组合实验的教学方式,每个组合包括 2~3 个实验,并在每个组合中的实验内容都采用了由浅入深、循序渐进、分阶段的实验教学模式。例如将弹性模量和牛顿环实验作为一个组合,突出了对微量测量的不同方法这一主题,通过实验,既可以熟悉光杠杆法和读数显微镜法测量的原理,又能够对所学知识融会贯通。通过基础实验,主要学习物理实验的基本知识、基本实验方法和实验技能。基本物理实验以小班为单位,在教师的指导下,由学生独立进行实验。

考虑到同学们实验基础的差异,我们还开设了自学实验,这些实验的理论相对比较简单,但实验内容丰富,便于同学们自学。

2. 综合与近代物理实验

这部分实验同学们可以自选实验题目,实验内容包括了综合性、应用性、设计性以及近代物理的实验。在这部分实验项目的选择上,我们既注重实验项目的物理思想和物理方法的典型性,又注重实验内容、测试手段的时代性,贴近现代科学技术的发展,贴近科技研究前沿,例如核磁共振等获诺贝尔物理学奖的实验,超声波探伤,音频信号的光纤传输,集成霍尔传感器和温度传感器技术等一些应用技术性实验。如此安排实验的目的是让同学们既接触物理学发展中的一些具有里程碑意义的进程,同时又了解物理学在实际工程技术中的应用。而设计性实验的设置,则重在培养同学综合思维、综合应用知识和实验技术的能力。同学们在教师的指导下,自己设计方案,并完成实验,从中培养自己的综合思

维和创造能力。第二部分实验主要注重培养同学们提出问题、分析问题和解决问题的能力。这部分实验同学可以按照实验室的有关实验说明,根据自己的兴趣,在网上进行选择,并在课表排定的时间进行实验。

3. 课程问题解惑

在课程进行的过程中,同学们经常会提出各种各样的问题,包括对学习方法的不应,对课程安排的不理解等,为了帮助同学们更好地解决学习中的问题,我们在此解答同学中一些常见问题。

(1) 部分实验安排超前理论课的问题

少部分实验的安排超前于大学物理理论课,这是部分同学经常提出的问题。实际上物理实验课的安排具有其自身的特点和规律,它完全是按照人们对自然的认知规律来进行的。物理学本身就是一门实验科学,我们对物理学许多规律的认识首先来源于实验,通过对实验现象的总结、归纳,从而得出具有普遍规律性的定律。因此物理实验的过程本身就是一个发现、归纳、总结、得出结论的学习过程,不存在于理论超前的问题。如果能够正确地理解实验课程的目的和意义,相信同学们能够通过该课程,学到很多有益的知识,并得到很好的锻炼。

(2) 实验的目的性

从哪些方面来做好或学好一个实验是很多同学经常遇到的问题。对于一个初学者,首先应该从实验的设计、实验的操作以及结果的分析处理等几个方面去把握一个实验。具体说来,在实验前要力求明白这个实验所依据的理论、实验方法的特点和选择仪器的根据;在实验中了解实验安排、参量选择以及操作步骤为什么这样规定的道理,找出需要测准的关键量,考虑实验条件如何保证及需要满足的程度;实验后要学习数据处理的方法,对实验结果做出合乎实际的说明,有根据地、具体地进行误差分析。

实验的目的不是只为了测得几个数据和验证物理规律,要充分利用实践的机会来培养自己的动手能力和创新精神;遇到困难或在实验中出现不理想的情况不要一概归咎于仪器,而要认真分析观察到的现象,找出原因,自己动手排除障碍,使实验顺利进行。其实,在实验中遇到困难是正常的,也是一件好事,使我们有更多思考和处理问题的机会。

(3) 如何提高自己的能力

能力的提高是以一定的知识和技能作为基础。知识面越广,分析问题、解决问题、提出问题的能力也会相应地增强。对一些著名物理实验中好的实验方法及物理思想知道了,才会有启发,有联想,才可能在自己的实验中想出好的主意或借用其他实验的好方法。在学习中要特别注意从物理思想和方法上去理解和学习实验,例如每一个实验所要解决的问题是什么?它的物理依据和解决问题的途径和方法又是什么?有什么特点?其设计、仪器装置或安排有什么精妙之处,又可以做什么样的推广?再比如物理实验中的数据处理问题,物理实验中的数据处理不单纯是数学的问题,它实际上是实验中处理和解决问题不可分割的一部分。在进行数据处理时,要充分选择现有数据,使之尽量符合实际情况

和充分反映实验信息,数据处理本身不能提高已经完成了的实验的精度,但应尽量避免在数据处理过程中人为地引入误差。数据处理包括了计算工具的选取、有效位数的取舍,以及正确地进行误差分析等。

同学们通过实验不断地学习和完善自己的知识,只有在知识被消化以后,才可以成为驾驭工作的能力,能力的提高,又可以更有效地获取知识,因此实验能力的提高与知识面的扩展是学习的两个相辅相成的方面,缺一不可。

第 1 章 测量不确定度与数据处理方法

本章将具体介绍大学物理实验所必需的基础知识,包括:测量误差与不确定度的基本概念,实验数据的基本处理方法,以及物理实验的基本测量方法。

1.1 测量误差

误差理论是物理实验的重要数学工具。在物理实验中经常要遇到许多综合的实验技术,为了获得准确的测量结果,需要理解实验设计的原理,掌握好误差理论,才能有效地进行实验测量和数据处理,并最终对实验结果做出正确的评价和分析。本节将介绍测量误差和不确定度的一些基本概念。

1. 测量

物理实验离不开各种测量。物理测量的内容很多,大到日、月、星辰,小到分子、原子、粒子。可以说,测量是进行科学实验必不可少,且极其重要的一环。

测量分为直接测量和间接测量。直接测量是将待测物理量直接与认定为计量标准的同类量进行比较,比如用米尺测量长度、用天平称质量、用万用表测量电压等。而间接测量则是指按照一定的函数关系由一个或多个直接测量结果计算出另一个物理量。例如测量气垫导轨上滑块滑行的速度时,要先测出滑块滑行的时间和距离,再用公式计算出滑块滑行的速度就属于间接测量。物理实验中的大多数测量是间接测量。

测量的数据不同于普通的数值,它是由数值和单位两部分组成的。数值有了单位,才具有特定的物理意义,因此测量所得的值应包括数值和单位,缺一不可。

2. 误差

对某一物理量进行测量时,由于受到测量环境、方法、仪器以及不同观测者等诸多因素的影响,测量结果与被观测量的客观真实值(真值)存在一定的偏离,也就是说存在误差(error)。测量误差可以用绝对误差,也可以用相对误差来表示。

$$\text{绝对误差} = \text{测量结果} - \text{真值} \quad (1)$$

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \quad (2)$$

真值(true value)是指被观测的量所具有的真实值的大小。一个量的真值是一个理想的概念,一般情况下是不知道的,但在某些特定的情况下,真值又是可知的。比如:三角形

的三个内角和为 180° ，一个圆周角为 360° 等。为了使用上的需要，在实际测量中，常用被测量的实际值来代替真值。

由于测量总存在一定的误差，为此必须分析测量中可能产生的各种误差因素，尽可能消除其影响，并对测量结果中未能消除的误差给予正确的评价。一个优秀的实验者，应该根据实验的具体要求和误差限度来确定合理的测量方案以及合适的测量仪器，能够在实验的要求下，以最低的代价来取得最佳的实验结果。

3. 误差的分类

按照误差的基本性质和特点，可以把它分为 3 大类：系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 系统误差(systematic error)

系统误差指的是在重复条件下，多次测量同一物理量时，测量结果对真值的偏离总是相同的，即误差的大小和符号始终保持恒定或按照一定的规律变化。系统误差的特征是它的确定性。

(2) 随机误差(random error)

随机误差是指在重复条件下，对同一被测量进行足够多次测量时，误差的大小、符号的正负是随机的。随机误差的特点是单个具有随机性，而总体服从统计分布规律，常见的统计分布有正态分布、 t 分布、均匀分布等。

(3) 粗大误差

粗大误差实际上是一种测量过程中的人为过失，并不属于误差的范畴。对于这种由于测量过程中人为过失而产生的错误数据应当予以剔除。

4. 测量结果的评价

评价测量结果，反映测量误差大小，常用到精密度、正确度和准确度 3 个概念。

精密度反映随机误差大小的程度，它是对测量结果的重复性的评价。精密度高是指测量的重复性好，各次测量值的分布密集，随机误差小。但是，精密度不能反映系统误差的大小。

正确度反映系统误差大小的程度。正确度高是指测量数据的算术平均值偏离真值较小，测量的系统误差小。但是正确度不能确定数据分散的情况，即不能反映随机误差的大小。

准确度反映系统误差与随机误差综合大小的程度。准确度高是指测量结果既精密又正确，即随机误差与系统误差均小。

现以射击打靶的结果为例说明以上 3 个术语的意义，如图 1 所示。

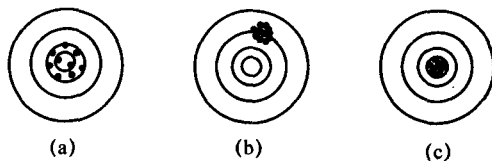


图 1 正确度、精密度和准确度

(a)正确度好而精密度低,即系统误差小,而随机误差大。(b)精密度高而正确度低,即系统误差大而随机误差小。(c)准确度高,系统误差和随机误差都小。

5. 发现和消除系统误差

(1) 如何发现系统误差

物理实验中的系统误差通常是很难发现的,但通过长期科学实验的实践和经验的总结,我们总结出一些发现系统误差的办法,它们可以归纳为:

① 理论分析法

分析实验所依据的理论和实验方法是否有不完善的地方,检查理论公式所要求的条件是否满足,所用仪器是否存在缺陷,以及实验人员的素质和技术水平是否存在造成误差的因素,从而得到有关系统误差是否存在的信息。

② 实践对比法

采用不同的方法测量同一物理量,让不同的人员测量同样的物理量或使用不同的仪器测量同一物理量,通过对比测量结果的数值,来发现系统误差的存在。

③ 数据分析法

分析测量结果,若结果不服从统计分布,则说明测量存在系统误差。

(2) 消除系统误差的方法

在实验条件稳定,同时系统误差可以掌握时,常用3种方法消除已知系统误差,即加修正值、消去误差源或采用适当的测量方法。下面分别介绍这3种方法。

① 测量结果加修正值

- 由仪器、仪表不准确产生的误差,可以通过与更高级别的仪器、仪表做比较,而得到相应的修正值;

- 由理论上、公式上的不准确而产生的误差,可以通过理论分析,导出修正公式。

② 消去误差源

包括:仪表使用前零点的校准,仪表使用温度的校准,以及保证仪器装置及测量环境满足规定的条件等。

③ 采用适当的测量方法

采用适当的测量方法,对消除实际测量中的系统误差具有重要的现实意义。常用的测量方法有:异号法、交换法、替代法、对称法。比如天平悬臂长度不一致的系统误差,就可以用交换法来消除。将具有重量 x 的被称量物体放在天平的左、右托盘各称一次,分别称重为 p_1 和 p_2 ,根据力学原理,可以算出物体的实际重量为 $\sqrt{p_1 p_2}$ 。对称法常用来消除线性系统误差。半周期偶数法则可以消除周期性的系统误差。

6. 随机误差的统计处理

随机误差的分布服从统计规律。由误差理论得知,物理实验中相当多的随机误差满

是正态分布,如图 2 所示。下面讨论正态分布的一些特性。正态分布的概率密度函数为

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

$$a = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum x_i}{n}, \sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum (x_i - a)^2}{n}} \quad (3)$$

其中, a 和 σ 是反映测量值 x 这个随机变量分布特征的重要参数, a 表示 x 出现几率最大的值, 是测量次数趋向无穷时被测量的算术平均值。在消除了系统误差后, a 为真值。 σ 称为标准差, 是反映测量值离散程度的参数, σ 小, 测量值精密度高, 随机误差小; σ 大, 测量值精密度低, 随机误差大。服从正态分布的随机误差具有下列特点:

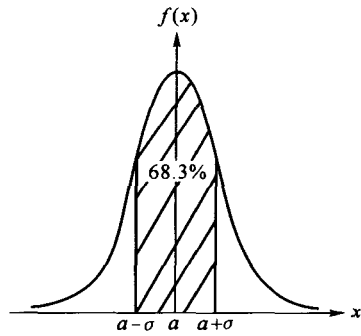


图 2 正态分布曲线

- 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——大小相等而符号相反的误差出现的概率相同;
- ③ 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;
- ④ 抵偿性——误差的算术平均值随测量次数 n 的增加而趋于零。

由概率密度的定义可知 $p = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$ 表示随机变量 x 在区间 $[x_1, x_2]$ 出现的概率, 称为置信概率, 则 x 出现在 $[a - \sigma, a + \sigma]$ 之间的概率为

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

这个结果说明, 对满足正态分布的物理量作任何一次测量, 其结果有 68.3% 的可能性落在区间 $[a - \sigma, a + \sigma]$ 内。我们把置信概率对应的区间称为置信区间。如果扩大置信区间, 置信概率也将提高。如果置信区间扩大到 $[a - 2\sigma, a + 2\sigma]$ 和 $[a - 3\sigma, a + 3\sigma]$, 可以分别得到:

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{a-2\sigma}^{a+2\sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx = 0.954, \quad p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{a-3\sigma}^{a+3\sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx = 0.997$$

物理实验中常将 3σ 作为判定数据异常的标准, 3σ 称为极限误差。如果某测量值 $|x - a| \geq 3\sigma$, 则需要考虑测量过程是否存在异常, 并将该数据从实验结果中剔除。

7. 多次测量的算术平均值

尽管一个物理量的真值是客观存在的, 但要得到真值是不现实的。由随机误差的统计分析可以证明, 当测量次数 n 趋近于无穷时, 算术平均值 \bar{x} 是接近于真值的最佳值。假设对物理量 x 进行一系列等精度测量得到的结果为 $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$, 则 x 的算术平均值可以表示为