

赣南师范院校本教材
赣南师范学院教材建设基金资助项目



大学物理实验

University Physics Experiment

主 编 王凤鹏



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

赣南师范院校本教材
赣南师范学院教材建设基金资助项目

大学物理实验

主 编 王凤鹏



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

内 容 简 介

本书是根据教育部《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，针对目前大部分非物理专业大学物理实验课时较少的情况，充为考虑理论课与实验课相结合的原则，精心选择与大学物理课程中知识点密切相关的实验项目编写而成的。

全书包括绪论、实验基础知识、基础实验、综合性实验、设计研究性实验等部分。每个基础实验和综合性实验均提供了较为详尽的实验目的、基本原理、实验装置、实验过程与操作步骤、注意事项、数据记录与处理等方面的信息。同时，每个设计性、研究性实验课题均与前面的实验项目紧密相关，是基础实验和综合性实验项目的拓展研究。设计性实验的选题对仪器设备的要求不高，具有较强的启发性、研究性，适合普通院校实验室条件有限的情况下的学生实验。

本书可作为高等学校理工科非物理类专业的教材，也可作为自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/王凤鹏主编. —杭州:浙江大学出版社, 2014.4

ISBN 978-7-308-13035-6

I. ①大… II. ①王… 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(2014)第057425号

大学物理实验

主编 王凤鹏

责任编辑 邹小宁

文字编辑 叶梦箫

封面设计 王聪聪

出 版 浙江大学出版社

(杭州市天目山路148号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州教联文化发展有限公司

印 刷 浙江万盛达实业有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 10.5

字 数 242千

版 次 2014年4月第1版 2014年4月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-13035-6

定 价 23.00元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

前 言

物理学是一门与实验紧密相关的科学,“没有实验,理论是空洞的;没有理论,实验是盲目的”。物理学新概念的确立和新规律的发现全部源于实验或依赖于实验的检验。物理实验的方法、思想、仪器和技术已经被普遍地应用于自然科学各个领域和技术部门。

大学物理实验是理工科学生进入大学后最先接触的实践课程之一,是一门独立的必修基础课程,是学生接受系统的实验方法和实验技能训练的开端。课程中所涉及的实验知识、实验技能和实验方法是后继实践训练的基础,也是学生以后从事各项科学探索和工程实践的基础,对学生实践能力培养和创新意识的形成起着至关重要的作用。

本书根据教育部《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),结合作者多年来的教学实践经验,以及地方高等师范院校(以赣南师范学院为例)非物理专业大学物理实验课时较少的特点,参考兄弟院校成熟的物理实验教材编写而成的。全书包括绪论、物理实验的误差理论与数据处理方法、物理实验的基本测量方法、物理实验的基本仪器等实验基础知识及基础实验、综合性实验、设计研究性实验等部分。在内容安排上充分考虑到理工科有关专业特点及基础课教学的需要,其内容涉及面广,实用性强;注重自主实验和研究性思想。

本书的特点是:根据分层次教学的要求,实验项目分为基础实验项目、综合性实验项目及设计性、研究性实验课题。每个基础实验和综合性实验均提供了较为详尽的实验目的、基本原理、实验装置、实验过程与操作步骤、注意事项、数据记录与处理等方面的信息。同时,每个设计性、研究性实验课题均与前面的实验项目紧密相关,是基础实验和综合性实验项目的拓展研究。设计性实验的选题对仪器设备的要求不高,适合普通院校实验室条件有限的情况下的学生实验。在设计性实验中给出了实验课题的任务及设计要求、基本原理及参考文献提示、仪器选择提示,要求学生自行设计实验过程,自行完成数据记录及处理,并对实验结果进行分析。

实验教学是一个团队成员相互协作的工作,从实验仪器的制作、购置,到实验的编排和实验内容的编写,都需要许多教师和实验员长期努力,不断改进和完善。本书是在物理实验中心众多老师多年实验教学的基础上,结合科学研究和地方院校的具体情况,并充分考虑普遍适用性的情况下进行编写,是一项集体创新的劳动成果。

本书的第1~3章由刘烈昌编写,力学、热学实验部分由罗兴垅编写,电磁学实验由刘孟连编写,光学实验由尹真、王凤鹏编写,全书统稿由王凤鹏完成。

由于编者水平有限,时间仓促,错误及欠缺之处在所难免,恳请批评指正。

赣南师范学院 物理实验中心

2014年3月

目 录

绪 论	1
一、物理实验的地位和作用	1
二、大学物理实验的任务和目的	1
三、大学物理实验课的基本程序	2
四、如何学好物理实验课	3
第1章 误差理论与数据处理方法	5
1.1 测量与误差	5
1.2 测量结果的最佳值——算术平均值	7
1.3 直接测量结果的可靠程度估计	8
1.4 间接测量结果的可靠程度估计	11
1.5 有效数字与测量结果的表述	13
1.6 数据处理的基本方法	17
练习题	24
第2章 物理实验的基本测量方法	25
2.1 比较法	25
2.2 放大法	27
2.3 转换法	27
2.4 模拟法	28
第3章 物理实验的基本仪器	30
3.1 力学实验常用基本仪器	30
3.2 电磁学实验常用的基本仪器	36
3.3 光学基本仪器	41
第4章 基础实验	44
实验4.1 长度测量	44

实验 4.2	密度测量	47
实验 4.3	复摆振动的研究	50
实验 4.4	倾斜气垫导轨上滑块运动的研究	57
实验 4.5	杨氏模量的测定(伸长法)	64
实验 4.6	金属线胀系数的测量(光杠杆法)	68
实验 4.7	示波器的使用	70
实验 4.8	伏安法测二极管的特性	78
实验 4.9	用惠斯通电桥测电阻	82
实验 4.10	用牛顿环测平凸透镜的曲率半径	86
实验 4.11	分光计的调节和使用	89
实验 4.12	用透射光栅测定光波波长	94
第 5 章	综合性实验	97
实验 5.1	碰撞实验	97
实验 5.2	气垫导轨上弹簧振子的运动	100
实验 5.3	刚体转动的研究	103
实验 5.4	多普勒效应	107
实验 5.5	用冷却比较法测量固体比热容	114
实验 5.6	液体黏度的测量(圆柱转动法)	118
实验 5.7	磁场的描绘	122
实验 5.8	霍尔效应	125
实验 5.9	低电阻的测量	130
实验 5.10	偏振现象的观察与分析	134
第 6 章	设计性、研究性实验课题	139
课题 1	远处物体长度的测量	139
课题 2	塑料薄片密度的测定	140
课题 3	研究复摆角度与周期的关系	141
课题 4	薄木板转动惯量的测量	142
课题 5	验证角动量守恒定律	143
课题 6	用拉力传感器和位移传感器研究弹簧振子	144
课题 7	利用多普勒效应验证牛顿第二定律	145
课题 8	液体中声速与液体浓度关系研究	146
课题 9	水管热胀冷缩特性的研究	147
课题 10	液体黏度与温度的关系	148
课题 11	液体电阻率的测定	149

课题 12	利用示波器研究光电二极管特性	150
课题 13	用热敏电阻组装温度计	151
课题 14	双臂电桥灵敏度的研究	152
课题 15	地球磁场水平分量的测量	153
课题 16	用光的干涉衍射测细丝直径	154
课题 17	菲涅耳双棱镜折射率和锐角的测量	155
课题 18	用迈克尔逊干涉仪测水的折射率	156
课题 19	光盘轨道密度的测定	157
课题 20	偏振光反射率与入射角的关系及折射率的测定	158
参考文献	159

绪 论

一、物理实验的地位和作用

实验是人们认识自然规律、改造客观世界的基本手段。借助于实验,人们可以突破感官的限制,扩展认识的境界,揭示事物的内在联系。近代科学历史表明,自然科学领域的所有研究成果都是理论和实验密切结合的结晶。随着科学技术的发展,实验的运用日益广泛和复杂,实验的精确程度越来越高,实验环节在科学技术的重大突破中所起的作用也越来越大。

物理实验是科学实验的重要组成部分之一。物理实验在物理学的发展中一直起着重要的作用。物理概念的确立、物理规律的发现、物理理论的建立都有赖于物理实验,并受物理实验的检验。物理学是一切自然科学的基础,人类文明史上每次重大的技术革命,都是以物理学的进步为先导的,物理实验在其中起着重要的作用。例如,法拉第等人进行电磁学的实验研究促进了电磁学的产生和发展,导致了电力技术与无线电技术诞生,形成了电力与电子工业;放射性实验的研究和发展导致了原子核科学的诞生与核能的运用,使人类进入了原子能时代;固体物理实验的研究和发展导致了晶体管与集成电路的问世,进而形成了微电子工业与计算机产业,使人类步入信息时代。

当今科学技术的发展以学科互相渗透、交叉与综合为特征。物理实验作为有力的工具,其构思、方法和技术与其他学科的相互结合已经取得巨大的成果。不容置疑,今后在探索和开拓新的科技领域中,物理实验仍然是极为有用的工具。

二、大学物理实验的任务和目的

大学物理实验是理工科学生进入大学后最先接触的实践课程之一,是一门独立的必修基础课程,是学生接受系统的实验方法和实验技能训练的开端。课程中所涉及的实验知识、实验技能和实验方法是后继实践训练的基础,也是学生以后从事各项科学探索和工程实践的基础,对学生实践能力培养和创新意识的形成起着至关重要的作用。

大学物理实验的主要教学目的有以下几个方面。

(1)通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,逐步学习和掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技术,运用物理学原理和物理实验方法研究物理现象和规律,加深对物理学原理的理解。

(2)培养与提高学生的科学实验能力。其中包括:

独立学习能力——能够自行阅读与钻研实验教材和参考资料,必要时自行查阅相关文献资料,正确理解实验内容,做好实验前的准备。

动手实验能力——能够借助教材和仪器说明书,正确调整使用常用仪器。

思维判断能力——能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析和判断。

表达书写能力——掌握科学与工程实践中普遍使用的数据处理与分析方法,能够正确记录和处理实验数据,绘制曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告。

简单的设计能力——能够根据课题要求,选定实验方法,合理选择实验仪器,确定实验条目及拟定具体的实验程序。

(3)培养和提高学生从事科学实验的良好素质。培养学生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、主动进取的探索精神,团结协作和保护公共财物的优良品德。

三、大学物理实验课的基本程序

物理实验多数是测量某些物理量的数值,研究某一物理量随另一物理量变化的规律性。不同的实验内容要测量的物理量不同,对同一物理量也有不同的方法,但是,作为以训练实验技能和培养初步的实验设计能力为主的学生实验课程,其进行过程主要包括三个基本环节:课前实验预习,课堂实验操作,课后撰写实验报告。

1. 实验预习

由于课堂实验时间是很有限制的,要想在规定的时间内高质量地完成要求的实验任务,做好实验预习是十分重要的。没有做好实验预习不得进行实验。

实验预习就是在实验进行之前,学生通过认真阅读和理解实验教材,并辅之以阅读一定的参考资料,了解实验目的要求、实验原理、实验的基本步骤、数据处理方法、注意事项等,并写好预习报告的过程。对实验中涉及的仪器设备,尤其是以前未使用过的,要尽量了解其结构原理、性能特点、使用方法等,必要时可申请到实验室参观实物,做好实验预习。

预习报告主要内容有:(1)实验名称;(2)实验目的;(3)实验原理简述及主要测量计算式;(4)实验基本步骤;(5)注意事项;(6)设计实验数据记录表格。

2. 实验操作

实验操作是学生自己动手动脑实际操作仪器进行实验测量的过程,它是对学生的实验技能、预习情况的综合检查。为了顺利进行实验,下面介绍一下实验进行的基本过程:

(1)认识仪器。熟悉将要使用的仪器、设备等的型号、构造特点、使用方法、测量误差等,并作好需要的记录。

(2)熟悉操作步骤。对照实物研究实验操作程序,思考原方案是否合理。不要急于动手,以免造成错误。

(3)调试安装实验仪器。首先对单个仪器进行检查调试,然后再按实验要求安装。应使用指定仪器,未经许可不得随意调换。仪器安装好后,必要时应请指导老师检查。

(4)实验试做和观察实验现象。为了事先纠正实验过程中可能出现的问题或错误,避免数据测量时出现问题,要重视实验试做。

(5)数据测量和记录。实验开始后,要仔细观察,认真思考,及时测量,准确读取和记录数据。

(6)数据检查。要求的数据测量完成后,不要忙于撤除仪器,首先自己检查数据的合理性,然后交教师检查。如果问题较大,应重做。

(7)结束实验。经指导老师检查同意后,方可拆除仪器,放回原位摆放整齐,搞好清洁卫生,填写《实验数据记录表》、《仪器使用情况登记表》等,待指导老师验收签字后离开实验室,不得无故逗留。

3. 撰写实验报告

撰写实验报告的目的是为了培养和训练学生以书面的形式总结实验工作或报告科学成果的能力。实验报告中不仅应该有清晰的思路,齐全的数据、图表,而且要有科学的结论。一般要求实验报告中要写清如下内容:

(1)实验名称、日期、班级、实验者和合作者等。

(2)实验目的。

(3)实验仪器设备(在实验时记下型号和规格)。

(4)实验原理:扼要写出实验原理、主要公式,画出必要的原理图。

(5)数据记录和处理:写清实验数据记录表格,不能用原始数据代替,进行正确的计算,并求出误差或不确定度,给出实验结果或对实验现象进行分析说明。

(6)实验讨论:通过分析,说明通过实验得到的收获,提出改进建议,指出误差原因,对实验中观察到的异常现象的解释与讨论,回答课后思考题等。

(7)最后,将原始数据记录粘贴在实验报告内一同提交。

四、如何学好物理实验课

要学好物理实验课,除了要按照规定步骤进行实验外,还应注意:

1. 注意学习和总结实验中所采取的实验方法,尤其是基本的测量方法。这些基本的测量方法是经常用到的,也是复杂测量方法的基础。

2. 要自觉培养发现问题、分析问题和解决问题的能力。不要得到一个所谓好的结果就高兴,就认为已经学好了这个实验。实际上,任何实验结果,由于各种因素的影

响,总会与理想实验结果有差异,问题在于分析这种差异的大小与存在是否合理。在实验过程中,仪器不可避免地可能会出现故障,遇到这种情况,要力求自己去分析,自己动手去解决。即使请教师解决,也要留意观察、细心体会教师是如何解决的。可以说,能否发现和排除仪器故障是实验能力强弱的重要表现。

3. 注意培养良好的实验习惯。在实验过程中,有些事情看似简单,但对保证实验安全顺利地进行、少出差错,都起着重要的作用。如清晰、准确、如实地记录实验数据,合理地布置仪器设备,记录实验的时间、地点和实验环境(温度、湿度、气压等),注意安全,注意节约及注意环境的肃静、整洁等。

第1章 误差理论与数据处理方法

1.1 测量与误差

1.1.1 测量

物理实验是将物质的运动形态按人们的意愿在一定的实验条件下再现,以找出各物理量间的关系,确定它们的数值大小,从中获取规律性认识的过程。而要在实验中得到这种量化的认识,测量是必不可少的。

测量就是将待测量与选做标准单位的物理量进行比较,得到此物理量的测量值,从本质上讲是人们对自然界中的客体获取数量概念的一种认识过程。这一过程,总是通过一定的实验者,运用一定方法,使用一定的仪器实现的。在测量过程中,为确定被测对象的测量值,首先要选定一个单位,然后将待测量与这个单位进行比较,得到的比值(倍数)即为测量值的数值。显然,数值的大小与所选的单位有关,因此表示某一测量值时必须附以单位。

1.1.2 直接测量与间接测量

所谓直接测量就是将待测量与预先选定的仪器、量具进行比较,直接从仪器上读出待测量的大小。例如,用米尺测量长度,用天平测量质量,电压表测量电压等。

应该指出的是,能直接测量的物理量并不多。对大多数物理量来说,没有可供直接进行测量的仪器。只能用间接的方法进行测量,即将待测量表示成另外几个可直接测量的量的函数,由直接测量结果经过公式计算出待测量的结果,称为间接测量。例如,要测量物体的密度,需要先测出质量和体积,再计算出密度。

1.1.3 真值和误差

一个待测的物理量,客观上在一定条件下都有一定的大小,我们称之为真值。显然,我们的测量目的也正是为了寻找这一真值。但具体的测量总要使用一定的仪器,通过一定的方法,在一定的环境条件下,由一定的观测者去完成,而仪器、方法、环境和测量者都不可能是尽善尽美、没有缺陷的,因此,得到的测量值和真值之间总不可避免地存在着或多或少的差异,这种差异叫做误差。

如果用 A 表示待测量的真值, X 表示具体的测量值, 则可将测量的误差 ϵ 表示为

$$\epsilon = X - A \quad (1.1.1)$$

测量得到的一切值, 都毫无例外地存在误差, 误差存在于一切测量之中, 而且贯穿于测量过程的始末。在误差无法避免的情况下, 我们所做的工作应该是:

- (1) 尽量设法减小测量中的误差;
- (2) 找到在同一测量条件下, 最接近真值的最佳近似值;
- (2) 估计最佳值的可靠程度, 或者说明一个值域范围内包含真值的概率。

1.1.4 误差的分类

为尽量减小测量中的误差, 我们需要对误差的种类有所了解。根据误差形成的不同原因及表现出不同特性通常将其分为系统误差、偶然误差和过失误差三类。

1) 系统误差

在一定的实验条件下, 对同一物理量进行多次测量时, 误差的绝对值和符号总保持不变或总按某一特定的规律变化, 这一类误差称为系统误差。系统误差的产生原因可归结为以下几个方面:

- ① 仪器本身的缺陷。如刻度不准确, 零点未校准, 仪器未按要求调到最佳测量状态等。
- ② 理论与方法上的不完善。例如, 用伏安法测电阻没有考虑电表内阻的影响, 进行热学实验时有热量的散失等。
- ③ 外界环境因素的影响。例如, 金属尺的热胀冷缩, 标准电池的电动势随温度的改变而发生变化。
- ④ 测量者的习惯和偏向。例如, 有的测量者习惯于侧坐斜视。

系统误差的发现、减小或修正是一项重要的实验课题, 对于广大学生而言, 则是需要通过具体的实验训练培养的一种重要的实验技能。原则上讲, 系统误差的分析处理可以根据具体情况在实验前、实验中或实验后进行。例如, 实验前选择合适的测量方法, 对测量仪器进行校准; 在实验中采取一定的方法和手段使测量中的系统误差消除或减小; 在实验测量后可对实验值进行理论修正等。

2) 偶然误差

在相同条件下, 多次测量同一物理量时误差时大时小, 时正时负, 以一种不可预定的方式随机变化着, 这类误差称为偶然误差。它是由一系列随机的、不确定的因素所形成的, 又称为随机误差。例如:

- ① 人的感官判断力的随机性, 在测量与读数时总难免存在时大时小的偏差。
- ② 外界因素的起伏不定, 如温度的起伏, 电源电压的不稳定等。
- ③ 仪器内部存在的一些偶然因素, 如零部件配合不稳定等。

在实验过程中, 上述因素往往混杂出现, 难以预知, 难以控制。所以, 对待偶然误差, 不可能像对系统误差那样, 找出原因, 一一加以分析处理。

值得注意的是, 所谓偶然误差(随机误差)仅仅是指在某一次具体的测量中, 其误差的大小与正负带有偶然性(随机性), 而不能理解为在测量过程中, 这类误差是偶然出

现的,也不能理解为“偶然误差是完全偶然的,随机的,没有什么规律可循”。事实上,当测量次数充分多时,偶然误差会显示出其特有的规律性。这一问题,我们将在下一节中讨论。

3) 过失误差

过失误差又称为粗大误差。它是由于不正确使用仪器,粗心大意,观察错误或记错数据等不正常情况引起的误差。只要实验者抱以严肃认真的科学态度,一丝不苟的工作作风,过失误差是可以避免的;即使不小心出现了,也应该在分析后予以剔除。

1.2 测量结果的最佳值——算术平均值

在测量不可避免地存在偶然误差的情况下,每次测量值各有差异,那么,怎样的测量值是最接近于真值的最佳值呢?

如前所述,就每一次测量而言,其偶然误差的大小和符号都是不可预知的,具有“偶然性”或“随机性”。但理论和实践证明,当测量次数足够多时,这一组等精度测量数据(称为一个测量列)其偶然误差一般服从如图 1.2.1 所示的统计规律,图中横坐标表示误差 ϵ ,纵坐标表示一个与该误差出现的概率相关的概率密度函数 $f(\epsilon)$ 。

$$f(\epsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\epsilon^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.2.1)$$

这种分布称为正态分布(或高斯分布),其中, $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\epsilon_i)^2}{n}}$ 是分布函数的特征量。

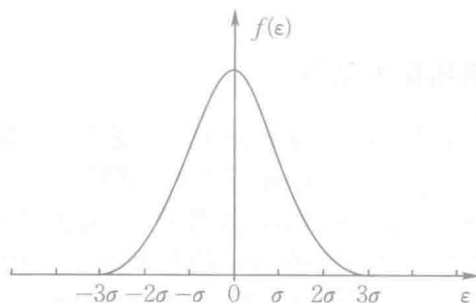


图 1.2.1 正态分布

服从正态分布的偶然误差具有以下一些特征:

- ① 单峰性。绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的出现的概率大。
- ② 对称性。绝对值相等的正、负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。偶然误差的算术平均值随测量次数的增加而趋向于零。

$$\text{即 } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i = 0。$$

设对某一物理量进行了 n 次等精度的测量, 得到的测量列为 X_1, X_2, \dots, X_n 。设测量中的系统误差可忽略, 每次测量的偶然误差分别为

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= X_1 - A \\ \epsilon_2 &= X_2 - A \\ &\vdots \\ \epsilon_n &= X_n - A\end{aligned}\quad (1.2.2)$$

则

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - A \quad (1.2.3)$$

式中, $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ 显然为 n 次测量值的算术平均值 \bar{X} , 即

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1.2.4)$$

按偶然误差的抵偿性, $n \rightarrow \infty$, $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i \rightarrow 0$, 因此 $\bar{X} \rightarrow A$, 由此可见, 在测量次数充分多时测量列的算术平均值趋向于真值。所以, 在相同条件下进行多次测量后, 我们总是取测量列的算术平均值作为测量列的最佳近似值(最佳值)。

1.3 直接测量结果的可靠程度估计

在直接对一个物理量进行测量时, 测量值中往往同时存在系统误差和偶然误差。在本节中, 我们将首先讨论偶然误差的分析方法, 然后引入不确定度的概念说明如何表示直接测量的结果。

1.3.1 多次测量的偶然误差估计

当我们在相同条件下对同一物理量进行了 n 次测量后, 我们已经得到了真值的最佳近似值——算术平均值。应如何表示测量中的偶然误差呢? 目前, 最常用的方法是采用偶然误差的正态分布函数密切相关的“标准偏差”来表示偶然误差。

现在我们来分析式(1.2.1)中的特征量 σ 的物理意义。图 1.3.1 表示的是不同 σ 值的 $f(\epsilon)$ 图线。由图可见, σ 值小, 则曲线较陡, 说明这组数据的分散性小, 重复性好; 而 σ 值大, 则曲线较平坦, 分布较宽, 说明测量数据的重复性差。由此可见, 这一特征量可用来反映一组测量数据的重复性好坏, 即偶然误差的大小, 故将 σ 定义为这组测量列的标准偏差。其值为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - A)^2}{n}} \quad (1.3.1)$$

应该指出, 标准偏差 σ 和各测量值的误差 ϵ_i 有着完全不同的意义, σ 并不是一个具体的测量的误差值, 而是一个统计性的特征量。当测量列的标准偏差为 σ 时, 该测量列

的各测量值的误差可能都不不等于 σ ，但可以证明，该测量列中任一测量值的偶然误差落在 $(-\sigma, \sigma)$ 区间的概率为 68.3%。

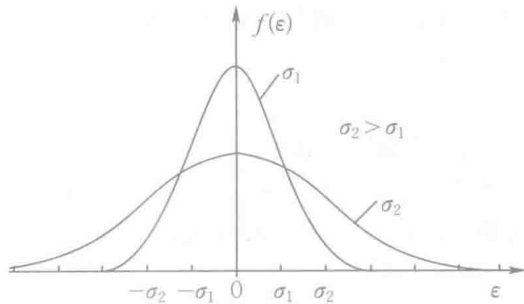


图 1.3.1 不同标准偏差的正态分布曲线

还应该指出的是，在实际测量中，真值是无法确定的，我们只能用多次测量的算术平均值 \bar{X} 来近似地代表真值 A 。因而只能用各测量值与算术平均值之差 $V_i = X_i - \bar{X}$ （称为残差）来估计误差。

可以证明，在这种情况下，测量列的标准偏差公式应修改为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (1.3.2)$$

上式表示的是一测量列中各测量值所对应的标准偏差，那么各测量值的算术平均值 \bar{X} 的偶然误差该如何估算呢？如前所述，从统计上讲， \bar{X} 应比每一个测量值 X_i 都更接近于真值，应用误差理论可以证明，算术平均值的标准偏差可表示为

$$\sigma(\bar{X}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}} \quad (1.3.3)$$

注意， $\sigma(\bar{X})$ 也是一个统计性的特征量，它表示真值落在 $\bar{X} - \sigma(\bar{X})$ 到 $\bar{X} + \sigma(\bar{X})$ 区间内的概率为 68.3%，真值落在 $\bar{X} - 2\sigma(\bar{X})$ 到 $\bar{X} + 2\sigma(\bar{X})$ 区间内的概率为 95.4%，真值落在 $\bar{X} - 3\sigma(\bar{X})$ 到 $\bar{X} + 3\sigma(\bar{X})$ 区间内的概率为 99.7%。

由上式可知，随着测量次数 n 的增加， $\sigma(\bar{X})$ 将减小，这就是通常所说的增加测量次数可以减小偶然误差的意义所在。但在 $n > 10$ 后， $\sigma(\bar{X})$ 变化很慢，所以，测量次数过多也没有多少实际意义，综合各种因素考虑，在我们的实验中一般取 $5 \leq n \leq 10$ 。

1.3.2 单次测量的误差

在实验测量中，经常会遇到没有必要或不可能对某一被测物理量进行多次测量的情况，只能进行单次测量。

单次测量没有测量列，没有算术平均值，我们只能将这一测量值本身作为真值的近似值。同时，单次测量也不存在所谓数据的发散性问题，但这绝不意味着单次测量不存在误差。事实上，单次测量的误差与所用仪器的精度，测量者的实验技能等均有关系，当做粗略估计时常取仪器的最大误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 作为单次测量的误差估计值。