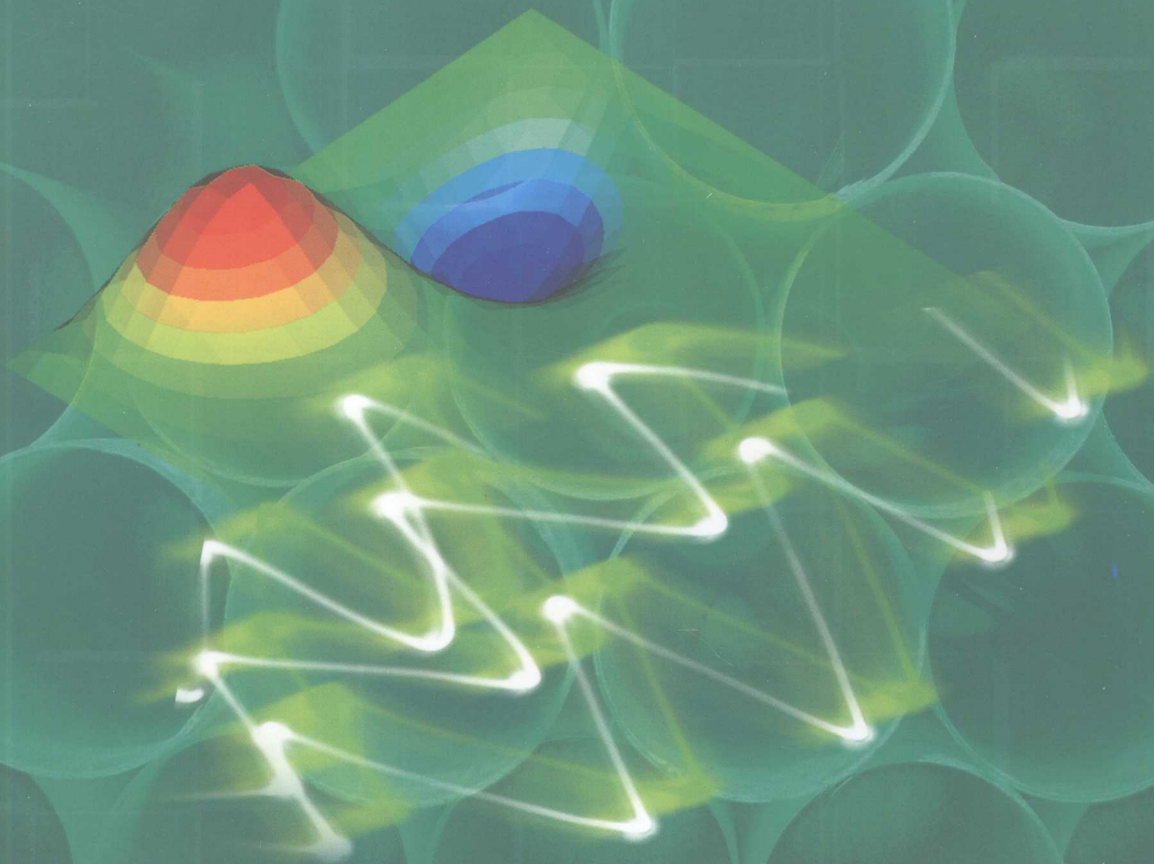


21世纪高等院校教材



主编 王 维 李志杰

副主编 姜 源 李兴元

# 大学物理实验



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

04-33/222

2008

21 世纪高等院校教材

# 大学物理实验

主 编 王 维 李志杰

副主编 姜 源 李兴元

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是根据《高等工业学校物理实验课程基本要求》编写的. 内容上包括绪论(不确定度及数据处理基本方法)、基本量的测量与仪器、力热、电磁、光学、近代物理、现代工程技术应用等方面的典型物理实验题目共计 62 个, 其中设计性实验 12 个. 实验题目相对独立, 实验仪器较为典型, 适合于开放式的教学环境.

本书可作为高等工科大学各个专业的大学物理实验教材或教学参考书, 也可供有关的科研和技术人员参考.

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/王维, 李志杰主编. —北京: 科学出版社, 2008  
21 世纪高等院校教材  
ISBN 978-7-03-021048-7

I. 大… II. ①王…②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 015712 号

责任编辑: 胡云志 唐保军 / 责任校对: 钟 洋  
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>

北京市文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2008 年 2 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2008 年 2 月第一次印刷 印张: 18

印数: 1—4 000

字数: 412 000

定价: 29.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈文林〉)

## 前 言

大学物理实验是理工科学生必修的一门重要实验课程,是理工科学生在大学阶段接触到的第一个较系统的实践类课程,是诸多后续实验课的基础.通过这门课程的学习,不仅可使学生较系统地掌握实验的基本理论和基本技能以及科学研究的方式和方法,而且可以培养学生严肃认真、实事求是的工作作风.

按照教育部《高等工业学校物理实验课程基本要求》,以“加强基础、培养能力、提高素质”为教学指导思想,以精品课程建设为目标,通过较大幅度地修改原有的实验讲义,推出本教材.

本教材更加重视培养学生的物理思维能力和科学研究能力,注重发挥学生的学习自主性,因材施教,突出学生的个性化发展.本教材在实验内容的安排与选择上,结合了理工科专业特点,由浅到深,从基本理论到物理前沿应用,从基础实验到综合性实验以及设计性实验,内容丰富,层次清楚,适用不同专业学生的需求.在新增加的实验内容中,较突出地展示物理在工程技术中的应用,增强了大学物理实验的综合性和实用性,提高了学生的学习兴趣和专业兴趣.在新增的实验设备中,将传感技术、现代电子技术、计算机技术等高新技术引入到物理实验中,体现了现代科学技术的多学科交叉和相互渗透的特点,拓宽了学生的知识面和视野,增强了基础理论知识和专业技术之间的联系.

在每个具体的实验过程中,强调了基本仪器的使用与操作,注重培养学生的动手能力,使学生掌握基本实验技能和实验方法.在实验数据记录的过程中,强调了规范性.在实验数据的处理中,强调了袖珍计算器和计算机的使用,提高学生的数字运算与处理能力.同时,新教材考虑到物理实验内容与数学、物理学的衔接,对有关的实验原理作了较详细的论述,尤其是对一些数学公式,在给出较严密的推导之后,又给出了定性的说明,方便学生自学与知识回顾.

教材中实验题目按教学要求可分成两大类:一类是必做实验;另一类是选做实验.必做实验是指每个学生必须完成的实验;选做实验是指学生按照大学物理实验课的总学分要求,在一定程度上可自由选择的实验题目.每个实验题目又给出多种可以操作的内容,在实际实验过程中,可以结合实验室的条件、实验学时等合理地取舍.每个学期初,学生通过校园网选择必做实验的时间;根据总学分的要求,结合自己的兴趣,选择选做实验的时间和实验题目.必做实验中所涉及的内容,都是大学物理实验课必须掌握的内容,对实验的各个环节都提出了较严格的要求,给出了一些示范性的记录表格,目的是提高学生的基本实验技能,为以后的科学研究打好基础;选做实验包括了一些设计性实验,只是粗线条提出实验的基本过程或只是提出实验的任务,目的是培养学生的自主实验能力和分析问

题、解决问题的能力。

本教材是在我校多年使用的实验讲义基础上改编而成的,是集体创作的结果,它凝聚了物理系和物理实验中心几代人的智慧.陆战红、王震、李晶、刘嘉慧、廉舒、徐菁华和李军等老师参加了部分内容的编写工作;在教材的编写过程中,得到了赵强、孙维民老师的大力支持;许多大学物理实验课任课教师,对具体实验内容也提出了宝贵的意见,在此一并表示衷心感谢!

编者

2007年10月

# 目 录

## 前言

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第 1 章 绪论             | 1  |
| 1.1 大学物理实验的程式        | 1  |
| 1.2 测量与误差            | 3  |
| 1.3 测量结果与误差分类        | 5  |
| 1.4 A 类不确定度的理论分析     | 7  |
| 1.5 实验结果的数值表示        | 12 |
| 1.6 数据处理的常用方法        | 16 |
| 1.7 最小二乘法与曲线拟合       | 19 |
| 习题                   | 21 |
| 第 2 章 基本量的测量与仪器      | 23 |
| 2.1 长度的测量            | 23 |
| 2.2 质量的测量            | 28 |
| 2.3 时间的测量            | 30 |
| 2.4 温度的测量            | 31 |
| 2.5 电流、电压的测量         | 36 |
| 2.6 光强的测量            | 38 |
| 第 3 章 力学实验           | 43 |
| 3.1 固体密度的测量          | 43 |
| 3.2 用落球法测量液体的黏滞系数    | 45 |
| 3.3 用光杠杆法测量金属丝的杨氏模量  | 48 |
| 3.4 用动力学法测量金属材料的杨氏模量 | 52 |
| 3.5 气垫导轨上测量速度、加速度    | 58 |
| 3.6 气垫导轨上验证动量守恒定律    | 61 |
| 3.7 导热系数的测定          | 65 |
| 3.8 气体比热容比的测量        | 68 |
| 3.9 超声波的声速测量         | 71 |
| 3.10 用三线摆测量刚体的转动惯量   | 77 |
| 第 4 章 电学实验           | 83 |
| 4.1 伏安法测电阻           | 83 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 4.2 电表的扩程与校准             | 85  |
| 4.3 用惠斯通电桥测电阻            | 89  |
| 4.4 用双臂电桥测低电阻            | 92  |
| 4.5 灵敏电流计的性能与应用          | 97  |
| 4.6 用电势差计测量电动势           | 104 |
| 4.7 示波器的使用               | 108 |
| 4.8 冲击法测螺线管磁场            | 115 |
| 4.9 用模拟法测绘静电场            | 117 |
| 4.10 利用霍尔效应测磁场           | 121 |
| <b>第5章 光学实验</b>          | 124 |
| 5.1 分光仪的调整与棱镜折射率的测量      | 124 |
| 5.2 牛顿环                  | 131 |
| 5.3 劈尖干涉                 | 134 |
| 5.4 光栅衍射                 | 137 |
| 5.5 光纤传感器实验              | 141 |
| 5.6 单缝和单丝衍射光强分布          | 150 |
| 5.7 双棱镜干涉法测量光波波长         | 154 |
| 5.8 迈克耳孙干涉仪              | 157 |
| 5.9 蔗糖的旋光度测量             | 160 |
| 5.10 薄透镜成像及焦距的测量         | 166 |
| 5.11 光的偏振                | 171 |
| 5.12 测量气体折射率             | 177 |
| <b>第6章 近代物理实验</b>        | 181 |
| 6.1 霍尔效应                 | 181 |
| 6.2 全息照相                 | 186 |
| 6.3 氢原子光谱                | 191 |
| 6.4 弗兰克-赫兹实验             | 195 |
| 6.5 光电效应测普朗克常量           | 198 |
| 6.6 核磁共振                 | 202 |
| 6.7 密立根油滴实验测量电子电荷        | 208 |
| 6.8 晶体的电光效应              | 214 |
| <b>第7章 物理在现代工程技术中的应用</b> | 221 |
| 7.1 太阳能电池基本特性研究          | 221 |
| 7.2 磁阻传感器的特性测量           | 223 |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 7.3 PN 结物理特性及弱电流测量 .....         | 228        |
| 7.4 集成电路温度传感器特性测量及应用 .....       | 232        |
| 7.5 电弧法制备金属纳米粉 .....             | 235        |
| 7.6 真空的获得与测量 .....               | 237        |
| 7.7 动态磁滞回线和磁化曲线的测量 .....         | 242        |
| 7.8 线阵 CCD 传感器的驱动原理 .....        | 249        |
| 7.9 热敏电阻温度特性测量 .....             | 255        |
| 7.10 X 射线晶体分析 .....              | 258        |
| <b>第 8 章 设计性实验</b> .....         | <b>263</b> |
| 8.1 组装数字式热电偶温度计 .....            | 263        |
| 8.2 热敏电阻温度特性研究 .....             | 263        |
| 8.3 电阻应变法测钢锯片的应力 .....           | 264        |
| 8.4 用电位差计校准电表 .....              | 264        |
| 8.5 利用气炮原理验证力学规律 .....           | 265        |
| 8.6 利用气垫导轨研究磁阻尼运动 .....          | 265        |
| 8.7 研究磁相互作用力与磁位能的关系 .....        | 266        |
| 8.8 气炮发射的力学问题研究 .....            | 266        |
| 8.9 制作全息光栅 .....                 | 266        |
| 8.10 双波罗棱镜的正像望远镜 .....           | 268        |
| 8.11 电子元件的伏安特性的测绘及电源外特性的测量 ..... | 269        |
| 8.12 设计数字万用表 .....               | 272        |
| <b>附录 常用物理常数表</b> .....          | <b>274</b> |

## 第1章 绪 论

实验的目的是定性地给出物理规律或定量地给出物理量的大小. 由于客观因素的限制, 实验必然有误差, 因此如何分析实验中的误差就显得十分重要. 本章简述了误差的类型、误差的分析方法以及实验数据的处理方法等问题. 部分内容可能超出了学员目前的数学水平, 因此可以忽略其具体推导过程, 掌握最终结论.

### 1.1 大学物理实验的程序

大学物理实验是一门重要的基础课. 通过这门课的学习, 使学生掌握物理实验的基本实验方法、基本实验技能, 培养学生严谨的工作作风、实事求是的态度、分析问题和解决问题的能力.

虽然大学物理实验涉及的是一些简单的基本实验, 但是它却包括了任何复杂实验的基本过程. 通过培养这些基本技能, 学生可以逐步掌握科学实验的方法, 为以后的科学研究打下良好的基础. 在物理实验过程中, 通过观察、实验操作、现象及结果分析, 学生可以加深对物理原理的认识与理解, 培养理论与实践相结合的科学研究方法与作风.

大学物理实验包括 3 个主要环节: 预习、课堂实验、总结.

#### 1.1.1 预习

学生在进行每个实验之前, 必须做好认真、充分的预习. 只有在充分预习的基础上, 才能保证在实验课上完成该实验的具体操作过程.

预习的过程, 是实验的设计过程. 学生通过预习, 明确该实验的目的与任务, 明确实验的原理, 了解实验设备, 拟定实验操作过程和每一过程应当观察到的现象、测量的结果以及应当记录的内容. 另外, 在预习的过程中, 还要弄清该实验的关键性步骤、有特色的仪器、仪器的使用方法. 应当指出的是, 在预习的过程中, 应特别注意该实验的注意事项、安全措施.

在大学物理实验中, 学生实验的主要过程、实验分析都体现在实验报告上. 学生应在认真弄懂、弄通实验的基础上, 完成预习报告. 预习报告写在实验报告的相应栏目里, 在进入实验室时, 交给指导教师审阅. 若有不清楚的、不懂的问题, 应在具体实验操作之前请教指导教师及实验室有关人员.

预习报告应完成主要的内容是:

(1) 实验名称;

(2) 实验目的;

(3) 实验原理;

(4) 有特色的实验设备;

- (5) 主要的实验步骤;
- (6) 实验数据的记录表格.

### 1.1.2 课堂实验

课堂实验是物理实验的主要环节. 在这一环节里, 要求学生在规定的时间内完成已经预习过的实验. 学生应带着预习报告和其他有关资料准时进入实验室. 进入实验室后, 首先应签字登记, 然后按编号就座. 在开始上课时, 指导教师要做指导性讲解, 同时检查学生预习的情况, 解释学生提出的问题. 经指导教师同意后, 学生才可以开始实际操作.

课堂实验主要的内容有:

#### 1) 实验操作

学生首先应记录当天的实验时间、周围环境、编组、所使用仪器的型号、编号等. 然后将所需的仪器作必要的组合、连接, 使之构成所需要的实验装置. 按实验的要求与方法, 独立完成实验.

#### 2) 观测与记录

记录实验过程中观察到的现象及测量的数据. 观察物理现象、测量物理量时要及时、系统、准确, 记录要完整. 当出现问题时, 应及时找出原因, 适当安排重复观测. 测量数据要用钢笔完整、清晰地填写在预习报告中的记录栏内. 记录的数据要真实、可靠, 不允许弄虚作假.

物理实验的过程, 是客观地观察、实际地测量的过程. 需实验者准确地、客观地、真实地记录所观察到、测量到的结果. 通过具体的实验过程, 培养学生实际操作能力. 即使实验中由于某种原因得到的结果不理想, 若能正确地分析出原因也能达到实验的目的. 反之, 抄袭别人的记录、拼凑理想的数据或主观修改实测数据, 都是不正当的行为, 指导教师应根据情节不同做出重做实验、取消实验成绩等处罚.

#### 3) 清理

学生课堂操作的结果、记录的数据应主动送交实验指导教师检查, 当实验指导教师认为合格并签字后, 学生方可清理实验设备. 清理实验仪器及设备时, 要按仪器、设备原来摆放的位置或要求整理、摆放好, 将实验台打扫干净. 经指导教师同意后, 学生方可离开实验室.

### 1.1.3 总结

总结是物理实验的最后一个环节, 是对实验中观察、测量的结果进行全面分析、归纳整理、找出规律, 从中得出科学的结论的过程. 这是实验报告的主要任务.

总结的主要内容包括:

- (1) 对于观测的数据进行归纳、分析、计算、处理;
- (2) 对实验结果及结论进行评定;
- (3) 给出完整的图表、函数关系、实验结论;
- (4) 客观地分析实验过程, 提出自己的建议, 回答该实验有关的问题.

实验报告应能完整地反映实验的全部过程. 为使养成良好的习惯, 实验报告中应

附有实验的原始现场记录,并且不允许对其进行任何修改。

学生的每个实验的成绩是由预习、课堂提问、实验操作和实验报告等几项内容综合评定给出的。

## 1.2 测量与误差

### 1.2.1 测量

对物理量的测量,是物理实验的重要组成部分。测量的目的,是在给定的单位制中,获得该物理量的数值大小。一般来讲,任何物理量都具有数值和单位这两个属性。因此,物理实验的过程就是在一定的宏观条件下,在确定的单位制中,通过实验测出描述该物理量的数值大小。

对于测量的分类,可以从测量手段和测量条件两方面来划分。

1. 按测量结果获得的手段划分,可分成直接测量和间接测量

#### 1) 直接测量

直接测量是指相应的物理量可以用测量仪器直接进行测量。相应的物理量称为直接测量量。例如,用直尺测量物体的长度  $l$ ,用天平测量物体的质量  $m$  等,都是直接测量。 $l$  和  $m$  则称为直接测量量。

#### 2) 间接测量

间接测量是指相应物理量只能由一些直接测量量经过一定的函数运算才能够获得。相应的物理量则称为间接测量量。例如,测量物体的密度  $\rho$ ,须测出物体的体积  $V$  和质量  $m$ ,由  $\rho = \frac{m}{V}$  经运算才能获得。 $\rho$  在这样的测量中是间接测量量。

直接测量量和间接测量量的划分是相对的。随着选用的测量方法和测量手段不同,它们是可以相互转化的。例如,测量电阻  $R$ ,若用电流表和电压表来测量,则可以通过测出电阻两端的电压和通过电阻的电流,经过欧姆定律求出  $R$ ,此时  $R$  是间接测量量。也可以用欧姆表或单臂电桥直接测量电阻  $R$ ,此时  $R$  就是直接测量量。随着科技水平的提高,测量手段、方法和仪器越来越先进,能直接测量的物理量越来越多。

2. 按测量的条件来划分,可分成等精度测量和不等精度测量

#### 1) 等精度测量

对同一个物理量,在完全相同的条件下进行多次重复测量,每一次测量的精度是相同的,这样的测量称为等精度测量。

#### 2) 不等精度测量

对同一物理量的重复测量过程中,只要实验中任何一个条件发生了变化,则这种测量就是不等精度测量。

等精度测量和不等精度测量也是相对的概念。严格地讲,在完全相同的条件下进行多次重复的测量是比较困难的。比如,用电流表和电压表测量电阻,由于有电流通过电阻、仪

表,必然产生热效应和其他效应,因此,严格地讲,每次测量的条件是不一样的.应当是不等精度测量.但实际上,在每次测量过程中,这种条件的变化是较小的,对测量的结果几乎没有影响,是完全可以忽略的,此时这种测量仍可认为是等精度测量.

在大学物理实验中,除极特殊情况外,对于一个物理量的多次重复测量都可以认为是等精度测量.在以后的叙述中,多次测量都是指等精度测量.

### 1.2.2 误差

任何一个物理量,在一定宏观条件下和确定的单位制中,都有一个客观存在的数值,这个值称做该物理量的真值,用  $X_0$  表示.这个值是客观存在的,与测量仪器、测量方法等无关.测量的目的就是要获得物理量的真值  $X_0$ .

在实际的测量中,准确地给出真值是不可能的.因为在测量的过程中,总是要受到测量仪器的精确度、测量的方法、测量的环境以及测量者的能力等因素的影响.换句话说,测量值  $X$  和真值  $X_0$  之间总是有偏差的.这种偏差称做绝对误差.用  $\Delta$  表示

$$\Delta = X - X_0 \quad (1.2.1)$$

$\Delta$  表示了测量值  $X$  和真值  $X_0$  的数值差别大小,不能反映出测量的精确程度.比如,测量两个物体的长度,其绝对误差都是 0.2mm.其真值分别是 1.0mm 和 1000.0mm.显然,其精确程度是不相同的.对测量真值是 1.0mm 的物理量来说,在 1.0mm 范围内,有 0.2mm 的误差;而对真值是 1000.0mm 的物理量来说,在 1000.0mm 范围内,有 0.2mm 的误差.显然,后一种测量精确程度较高.这说明,测量的精确程度与物理量真值的数值大小有关.为了表示测量的精度,通常引入相对误差  $E_r$ ,并用百分比表示,因此有时也称百分比误差, $E_r$  数值越大,测量精度越低;数值越小,测量精度越高.由于  $E_r$  与测量的精度有关,因此有时也称其为精度.

$$E_r(X) = \frac{\Delta}{X_0} \times 100\% \quad (1.2.2)$$

被测物理量的真值是客观存在的.一般来说,该值是未知的,测量的目的是给出该物理量的准确值.因此,式(1.2.1)的定义是矛盾的,按这种定义是求不出  $\Delta$  和  $E_r$  的.在实际测量中,往往采用被测量的实测值或修正过的算术平均值来代替被测物理量的真值,这个值有时也称做约定真值( $\bar{X}$ ).被测物理量的真值可用约定真值来近似表示.或者说,被测物理量应在约定真值附近的一个较小的范围内.这个较小的范围称做不确定度  $\Delta X$ .被测物理量的真值应在  $\bar{X} - \Delta X$  至  $\bar{X} + \Delta X$  的范围内.因此测量值和测量精度可表示为

$$X = \bar{X} \pm \Delta X \quad (1.2.3)$$

$$E_r(X) = \frac{\Delta X}{\bar{X}} \times 100\% \quad (1.2.4)$$

式(1.2.3)、式(1.2.4)是实验结论中被测物理量最终表示的形式.

不确定度和精度从两个方面反映了实验结果的准确程度.精度表明了测量的精确程度,不确定度表明了测量结果的可信程度.例如,用一把最小刻度单位是 1mm 直尺,测量一根铁棒的长度  $L$ ,大约是 600mm,若将不确定度认定为 50mm,则这个实验结果认定铁棒的真值在 550~650mm.若将不确定度认定为 5mm,则实验的结果认定铁棒的真值在

595~605mm. 显然,铁棒的真值在 550~650mm 的可信度要高,或者说,有百分之百的把握认定铁棒的真值在这个区间,测量的精度为  $E_r^{(1)} = 8.3\%$ . 而将铁棒的真值认定在 595~605mm,其精度  $E_r^{(1)} = 0.83\%$ ,精度较高,可信程度是比较低的. 也就是说,被测铁棒的真值很有可能不在这个范围内. 因此,不确定度表明了测量结果的置信程度. 在实验中,合理地选取测量方法,科学地给出不确定度  $\Delta X$ ,可使测量的结果更可靠,同时精度更高.

在大学物理实验中,约定真值除了采用算术平均值来代替之外,有时用公认物理量的值、理论计算值、实验室给出的值或用具有较高精度的仪器测出的物理量的值作为约定真值. 在具体的实验过程中,实验室会具体给出这种情况下的约定真值,指导教师也会做出特殊说明与要求. 在实验的过程中,需要注意这一点.

### 1.3 测量结果与误差分类

测量的结果通常用式(1.2.3)、式(1.2.4)表示. 真值将以某一个确定的概率落在约定真值附近的某一个区间内,这个区间就是不确定度.

#### 1.3.1 约定真值的求法

约定真值的求法往往与测量的方法有关. 按被测物理量获得方法的不同,可将物理量分成直接测量量和间接测量量. 对这两种量约定真值的求法分别叙述如下:

##### 1. 直接测量量

对直接测量物理量,如果只测一次,即单次测量,则测量值就是约定真值.

对多次测量,约定真值为多次测量值的算术平均值  $\bar{X}$ . 若进行了  $n$  次测量,每次测量值为  $X_i, i=1, 2, \dots, n$  则

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

若在每次测量的过程中,都存在零点偏差  $\delta$ ,如螺旋测微器的零点修正,指针类仪表的示零位置偏差等. 这时,约定真值为

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - \delta \quad (1.3.1)$$

##### 2. 间接测量量

间接测量量  $W = f(x, y, z, \dots)$ , 是通过直接测量量  $x, y, z, \dots$  经过函数运算而获得的. 对单次测量,物理量  $W$  的约定真值由  $x, y, z, \dots$  的单次测量值经过计算获得,即  $W = f(x, y, z, \dots)$ . 对多次测量,又可根据直接测量量  $x, y, z, \dots$  的相关性分成独立测量和非独立测量. 所谓独立测量是指测量物理量  $x, y, z, \dots$  时可独立地进行测量. 如测量立方体的体积  $V = abc$ , 测量长  $a$ 、宽  $b$ 、高  $c$  时可独立地进行多次测量. 另一类是非独立性测量. 即测量物理量  $x, y, z, \dots$  时是相互有关系的. 如用电流表和电压表测量电阻  $R$ , 此时,

测量电流  $I$  的同时应测量相应的电压  $U$ , 然后计算  $R$ . 在电压  $U$  和电流  $I$  的测量过程中, 由于电源、导线等多方面原因, 使得测量值之间相互关联、相互制约. 因此, 虽然测量  $U$  和  $I$  是用不同的仪器检测的, 但测量值之间是有关联的, 是非独立性测量. 在非独立性测量情况下, 可引入相关系数来描述物理量之间的相互关联的程度.

对独立性测量, 间接量  $W$  的约定真值是

$$\bar{W} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) \quad (1.3.2)$$

式中,  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots$  为直接测量量  $x, y, z, \dots$  的约定真值, 用式(1.3.1)计算.

对非独立性测量, 若进行  $n$  次测量, 可得到  $n$  组数据  $(x_i, y_i, z_i, \dots)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , 间接测量量的约定真值为

$$\bar{W} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i, y_i, z_i, \dots) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i \quad (1.3.3)$$

### 1.3.2 误差的分类

误差是由测量的不准确性引起的. 其产生的原因是多方面的, 分类方法较多. 若按产生的原因来划分, 通常有系统误差、过失误差、随机误差等. 测量存在误差, 就使得测量结果的可靠性降低, 最终只能以一个设定的概率来确定一个不确定的区间  $\Delta X$ , 用  $\bar{X} \pm \Delta X$  来近似表示被测物理量真值范围. 更进一步讲, 我们只能以某一种可信程度来说明被测物理量的真值将落在  $(\bar{X} - \Delta X, \bar{X} + \Delta X)$  区间内.

显然, 不确定度  $\Delta X$  的大小, 是测量过程中各种各样的误差的综合结果, 是对测量过程中各种误差的综合评价. 一般来说, 不确定度包含多个分量. 若按统计性质来划分, 可分成 A 类不确定度分量和 B 类不确定度分量. A 类不确定度分量 ( $\Delta_A$ ) 是指符合统计规律的不确定度分量, 符合统计规律, 可通过数理统计的方法来分析、评定. B 类不确定度分量 ( $\Delta_B$ ) 是用非统计方法来评定的不确定度, 不符合统计规律. 总的不确定度  $\Delta X$  为

$$\Delta X = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (1.3.4)$$

$\Delta X$  也称做合成不确定度.

#### 1. A 类不确定度分量 $\Delta_A$

A 类不确定度分量通常是由测量的偶然因素引起的误差. 如测量仪器示数的不稳定性、观察者感官分辨力的限制、测量环境微小变化等因素引起的误差. 其主要特点是, 每一次测量前对测量结果的变化是不可预知的, 但多次测量的结果, 表现出测量值符合一定的统计分布规律. 因此, A 类不确定度分量可由统计规律确定其大小. 具体分析见 1.4 节.

#### 2. B 类不确定度分量 $\Delta_B$

B 类不确定度分量通常是由非偶然因素引起的, 产生的原因较多, 需具体问题具体分析. 产生 B 类不确定度分量常见的原因有:

##### 1) 系统误差

系统误差的主要特点是在测量的结果中出现偏差的绝对值和符号恒定或以某一种可预知的方式变化. 环境因素不变, 系统误差也不变. 产生该类误差常见的原因有: 仪表的某

些缺陷、偏差、温度漂移、测量环境的某些变化(如温度、湿度、气压、电源等)等。

## 2) 过失误差

过失误差是实验者使用仪器的方法不正确、不合理、观察方法错误、数据记录错误等原因引起的,是实验者人为的因素造成的测量偏差。

B类不确定度分量在测量的范围内无法做出统一的评定,应具体问题具体分析。一般情况下,可根据经验,对多次实验结果的规律性和其他的信息进行综合分析,给出合理值。可以通过改进测量方法、测量环境等手段来减小B类不确定度分量的大小。在大学物理实验中,一般只考虑由仪器误差及环境条件不符合要求而引起的误差,通常情况下取 $\Delta_B = \Delta_{\text{仪}}$ 。其中 $\Delta_{\text{仪}}$ 是在正确使用仪器的条件下,测量结果的最小误差。其大小与仪器的制造水平、仪器的性能、使用环境等因素有关。

仪器的生产厂家一般都在仪表上注明示值误差或者精度等级。举例说明如下:

(1) 游标卡尺一般不分精度等级而直接给出示值误差,该误差就可以作为 $\Delta_{\text{仪}}$ 。例如,0~300mm游标卡尺上注明0.02mm,则 $\Delta_{\text{仪}} = 0.02\text{mm}$ 。

(2) 电表等仪表常常给出精度等级。按国家标准,精度等级通常分为0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0等7个精度等级,根据精度等级和测量时所选用的量程可按式(1.3.5)计算出 $\Delta_{\text{仪}}$ 。

$$\Delta_{\text{仪}} = \text{量程} \times \text{精度等级} \% \quad (1.3.5)$$

例如,若使用0.5级的电流表,选用的量程是200mA,则 $\Delta_{\text{仪}} = 200 \times 0.5\% = 1(\text{mA})$ 。

(3) 物理天平常常给出感量及误差表。通常由感量算出 $\Delta_{\text{仪}}$ 。例如,某一天平称量是5000g,感量20mg,通常可选 $\Delta_{\text{仪}} = 20\text{mg}$ 。

不同的仪表其标志有所不同。实验者可根据仪表的说明书,找出或计算出相应的 $\Delta_{\text{仪}}$ 。在大学物理实验中, $\Delta_{\text{仪}}$ 由实验室统一给出,标定在仪表或黑板上。

## 1.4 A类不确定度的理论分析

如前所述,若不考虑B类不确定度分量,A类不确定度是符合统计规律的,可由数理统计的方法给出其大小。

在不考虑测量仪器的测量精度情况下,将物理量X所有的、可能的观测结果的全体称为总体。由统计理论可知,所有可能的观察结果,即总体,符合正态分布:

$$\varphi(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(X-X_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1.4.1)$$

$\varphi(X)$ 函数的曲线如图1.4.1所示。

该函数曲线对称于直线 $X = X_0$ ,并在 $X = X_0$ 处达最大值 $\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$ 。函数在 $X = X_0 + \sigma$ 处和 $X = X_0 - \sigma$ 处有拐点;当 $X \rightarrow \pm\infty$ 时,曲线以X

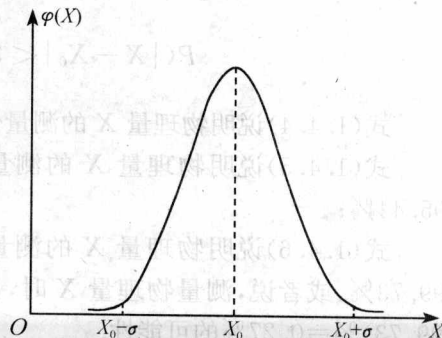


图1.4.1 正态分布曲线1

轴为其渐近线. 该曲线与  $X$  轴围成的面积为 1, 即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) dx = 1$$

其数字特征有:

### 1) 数学期望

$$X_0 = MX = \int_{-\infty}^{+\infty} x\varphi(x) dx \quad (1.4.2)$$

式(1.4.2)说明, 数学期望  $X_0$  是物理量  $X$  测量值的平均值, 在没有非统计性误差的情况下,  $X_0$  是物理量  $X$  的真值.

### 2) 方差

$$\sigma^2 = DX = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - X_0)^2 \varphi(x) dx \quad (1.4.3)$$

式中,  $\sigma^2$  称为方差;  $\sigma$  称为均方差 ( $\sigma > 0$ ).

正态分布曲线的形状与  $\sigma$  的大小有关, 如图 1.4.2 所示.

当  $\sigma$  较小时, 曲线的形状像一个尖塔, 较陡峭, 曲线与  $X$  轴围成的面积几乎全部集中在以  $X_0$  为中心的一个不大的区域内. 这种情况说明, 物理量  $X$  的测量值偏差比较小、比较集中. 当  $\sigma$  较大时, 曲线较为平坦. 说明物理量  $X$  的测量值偏差程度较大、比较分散. 因此,  $\sigma$  的大小反映了物理量  $X$  的测量值在数值上的分散程度.

由数理统计理论可知

$$P(|X - X_0| < \sigma) = \int_{x_0 - \sigma}^{x_0 + \sigma} \varphi(x) dx = 68.26\% \quad (1.4.4)$$

$$P(|X - X_0| < 2\sigma) = \int_{x_0 - 2\sigma}^{x_0 + 2\sigma} \varphi(x) dx = 95.44\% \quad (1.4.5)$$

$$P(|X - X_0| < 3\sigma) = \int_{x_0 - 3\sigma}^{x_0 + 3\sigma} \varphi(x) dx = 99.73\% \quad (1.4.6)$$

式(1.4.4)说明物理量  $X$  的测量值  $x$  落在区间  $X_0 - \sigma < x < X_0 + \sigma$  概率是 68.26%;

式(1.4.5)说明物理量  $X$  的测量值  $x$  落在区间  $X_0 - 2\sigma < x < X_0 + 2\sigma$  的概率是 95.44%;

式(1.4.6)说明物理量  $X$  的测量值  $x$  落在区间  $X_0 - 3\sigma < x < X_0 + 3\sigma$  的概率是 99.73%, 或者说, 测量物理量  $X$  时, 出现测量值大于  $X_0 + 3\sigma$  或小于  $X_0 - 3\sigma$  只有  $(1 - 99.73)\% = 0.27\%$  的可能性.

在实际测量过程中, 不可能进行无限多次的测量, 找出物理量  $X$  所有的、可能的测量

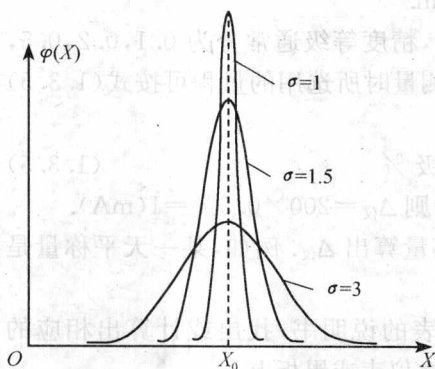


图 1.4.2 正态分布曲线 2

值(即总体). 这是不现实的,也是没有必要的. 对物理量  $X$ , 一般只进行  $n$  次独立的等精度测量, 从而获得  $n$  个实际测量值, 即  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . 在实验中, 常称做一个测量列. 这样的—个测量过程, 相当于从物理量  $X$  的所有可能测量值(总体)中独立地、随机地抽取—组可能的测量值. 在数理统计中, 这组测量值  $x_1, x_2, \dots, x_n$  称做一个样本(测量列和样本只是从不同的角度来称呼这一组测量值). 样本中每一个单独的测量值  $x_i$ , 称做个体. 样本中个体的数量称做样本容量. 我们现在选取的这个样本, 其容量为  $n$ .

显然, 每个个体都服从总体的分布函数, 即正态分布函数. 对这样选取的一个样本, 相当于进行了  $n$  次独立的实验. 我们可以计算出

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.4.7)$$

式中,  $\bar{X}$  称做样本的平均值, 每一次的测量值  $x_i$  与样本平均值  $\bar{X}$  之差  $\Delta x_i = x_i - \bar{X}; i=1, 2, \dots, n$ , 称做残差, 或称做偏差.

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2$$

$\sigma_s^2$  称做样本方差.

由式(1.4.7)计算出的  $\bar{X}$  也是具有随机性的, 不同的样本有不同的  $\bar{X}$ . 由数理统计可知, 当总体符合数学期望为  $X_0$  (平均值)、方差为  $\sigma^2$  的正态分布时, 样本平均值  $\bar{X}$  符合数学期望为  $X_0$ 、方差为  $\frac{\sigma^2}{n}$  的正态分布. 表征样本平均值  $\bar{X}$  分散程度的均方差是  $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ . 这说明,  $\bar{X}$  的分散程度随着样本容量  $n$  的增加而减小.

当以容量为  $n$  的一个样本来进行统计时, 可以计算出  $\bar{X}$ 、 $\sigma_s^2$ . 显然  $\bar{X}$ 、 $\sigma_s^2$  不是总体的  $X_0$  和方差  $\sigma^2$ , 当用它们来估计总体  $X_0$  和方差  $\sigma^2$  时, 就需要考虑其偏差性, 或者说是否有偏差.

例如, 我们从总体中随机抽取  $m$  组样本. 这相当于对物理量  $X$  进行了  $m$  组次的实验, 每组实验都对物理量  $X$  进行了  $n$  次测量. 每组实验都可以算出一个样本平均值  $\bar{X}_j$ ,  $j=1, 2, \dots, m$ ;

$$\bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ji}, \quad j=1, 2, \dots, m$$

显然, 每组实验算出的  $\bar{X}_j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) 是不可能完全一样的, 也就是说,  $\bar{X}_j$  具有随机性. 当实验组数无限多时, 将有

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_j \bar{X}_j = M\bar{X} = X_0$$

这种性质叫做无偏性. 这说明, 用任意一组样本来计算的  $\bar{X}_j$  是总体数学期望  $X_0$  的无偏估计值. 但是, 样本方差  $\sigma_s^2$  不是总体方差  $\sigma^2$  的无偏估计值. 事实上, 样本方差

$$\begin{aligned} \sigma_s^2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - X_0) - (\bar{X} - X_0)]^2 \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - X_0)^2 - (\bar{X} - X_0)^2 \end{aligned}$$