

949108

04-33  
4142

高等学校教材

# 大学物理实验

西北工业大学应用物理教研室 编

姬婉华 主编

李治中 副主编

西北工业大学出版社

949100

04-33  
4142

高等学校教材

# 大学物理实验

西北工业大学应用物理教研室 编

姬婉华 主编

李治中 副主编

西北工业大学出版社

1992年12月 西安

(陕)新登字009号

**【内容简介】** 本书是根据“高等工业学校物理实验课程教学基本要求”编写的。内容包括：绪论、测量误差及数据处理基础知识、基础实验(一)、基础实验(二)、近代物理实验、实验仪器使用指导、常用物理常数等7章。全书共列教学实验35个。

本书在保证循序渐进的原则基础上，尽量使各章及各教学实验在内容上相对独立，以适应不同循环方式教学的需要。为了贯彻因材施教，设计性实验安排在某些教学实验之后，其内容与所用仪器均与相应的教学实验密切配合。

本书可作为工科各专业60—80学时的物理实验教材，也可供函授大学、职工大学选用。

高等学校教材

**大学物理实验**

西北工业大学应用物理教研室 编

责任编辑 李珂

责任校对 生力

\*

西北工业大学出版社出版

(西安市友谊西路127号 邮编 710072)

陕西省新华书店发行

西安青山彩印厂印装

ISBN 7-5612-0392-6/O·51(课)

\*

开本787×1092毫米 1/16 15.75印张 376千字

1992年12月第1版 1992年12月第1次印刷

印数：1—6 000册 定价：3.70元

## 前 言

本书根据“高等工业学校物理实验课程教学基本要求”，结合西北工业大学物理实验课程教学改革试点情况，为配合一人一组套配置仪器的大循环方式组织教学的需要而编写。本书的编写特点是：

1. 为适应不同循环方式组织教学的需要及贯彻循序渐进的原则，本书各部分内容及每个教学实验的内容均尽量做到相对独立。第二章“误差及数据处理基本知识”是本课程的基本内容之一，这部分内容集中在一起便于不同循环顺序的学生使用，但完整掌握这一章的内容一定是在完成全部课程之后。第三、四、五章教学实验是遵循由简到繁、循序渐进的原则安排的。第三章基础实验（一），实验原理比较简单，实验方法提示比较详细，便于初学者在预习后能独立完成实验。第四章基础实验（二）及第五章近代物理实验，内容上比较复杂，综合性较强，并根据高等工科学校的特点，重点放在比较接近应用的实验内容上，如各种物理量的转换及测量方法。实验仪器的原理、结构及使用指导另立第六章。这样做既可适应各种循环方式的需要使各教学实验相对独立，又可使这方面的内容比较系统与完整。

2. 一人一组套配置仪器的大循环教学方式，要求学生独立阅读资料，独立完成实验并写出报告，这种教学方式能充分调动学生的学习积极性和主动性，有利于对学生进行科学实验能力的培养和训练。本书把隐含在教学实验中的物理思想、实验方法尽量显现出来，帮助学生在实验过程中体会与掌握。

3. 为了贯彻因材施教，本书把设计性实验安排在某些教学实验之后。这些设计性实验在内容上是教学实验的拓宽，所用仪器与相应教学实验所用仪器大同小异，所要增加的器材、设备很少，便于初学者完成。这使学有余力的学生在完成基本要求的实验内容的同时能自己动手设计并完成一到两个全过程实验。

实验教学是一项集体性的工作，本书是在西北工业大学应用物理教研室全体同志多年工作积累的丰富经验的基础上，在不断进行教学改革试点的基础上编写而成的，是集体的成果。全书主要由姬婉华、李治中、王六定、张国华同志执笔编写，其中实验3—12及实验5—6分别由雷开卓、杨德兴同志执笔。全书由姬婉华担任主编，李治中担任副主编。

本书由西安交通大学物理系王希义高级工程师审稿，提出不少宝贵意见，在此特致谢意。

由于编者水平有限，实践经验不足，缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1992年1月

## 物理实验课学生守则

一、实验课不得迟到早退，迟到 15 分钟以上者不能参加本次实验课，并以旷课论处。

二、课前必须认真预习，明确该次实验的任务和方法，写出预习报告，经指导教师考核许可后方可进行实验操作。没有预习者不得进行本次实验，本次实验成绩为“0”。

三、实验前对照提示牌仔细清点仪器，如发现缺损及时向教师报告。实验后必须整理好仪器、坐椅，并了解下次实验的仪器后，方可离开。

四、爱护实验室一切仪器设施，不随意拆卸挪动。正确安装、调整、使用仪器。电学实验接线须经教师检查许可后，方能通电。

五、实验中如发生事故，须保护现场（电学实验应断开电源）并立即报告教师。当事人应如实填写仪器损坏登记表，由教师签署意见。因违章操作造成仪器损坏者，要负责赔偿。

六、以认真的态度和求实的作风做好每个实验，按时完成实验任务。实验测量数据必须当堂交教师审阅签字。

七、禁止在实验室内喧哗、打闹、抽烟、吃东西、随地吐痰及乱扔纸屑杂物。

八、课后按教师要求清扫实验室。

九、按时完成实验报告。交报告时应附上有教师签字的原始数据记录。

十、凡无故缺课三次以上，或缺交报告三份以上者不得参加学期考试。

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
一、物理实验课程的地位、作用和任务 .....	1
二、实验课的基本程序 .....	1
<b>第二章 测量误差及数据处理基础知识</b> .....	4
一、测量误差 .....	4
二、直接测量结果与误差估算 .....	6
三、间接测量结果与误差估算 .....	13
四、有效数字及其运算法则 .....	17
五、发现与消除系统误差的一般方法 .....	21
六、实验数据处理的常用方法 .....	23
练习题 .....	31
<b>第三章 基础实验(一)</b> .....	33
实验 3-1 密度的测量 .....	33
实验 3-2 拉脱法测定液体表面张力系数 .....	35
实验 3-3 弹性模量的测定 .....	38
实验 3-4 三线悬摆法测定转动惯量 .....	41
实验 3-5 混合量热法测定金属的比热容 .....	44
实验 3-6 落球法测定液体的粘滞系数 .....	46
实验 3-7 伏安法测定电阻 .....	49
实验 3-8 滑线变阻器的使用和特性研究 .....	56
实验 3-9 惠斯顿电桥 .....	62
实验 3-10 十一线电位差计测定电动势 .....	67
实验 3-11 灵敏电流计的研究 .....	71
实验 3-12 电子示波器的使用 .....	75
实验 3-13 空气中声速的测定 .....	84
实验 3-14 透镜焦距的测定 .....	88
实验 3-15 分光计的调节和使用 .....	92
实验 3-16 用牛顿环测定透镜的曲率半径 .....	98
<b>第四章 基础实验(二)</b> .....	102
实验 4-1 微小形变的电测法 .....	102
实验 4-2 热敏电阻温度系数的测定 .....	105
实验 4-3 测量金属电阻率 .....	107

实验 4-4	放电法测量高电阻 .....	111
实验 4-5	用热电偶校准水银温度计 .....	114
实验 4-6	电表的扩程与校准 .....	117
实验 4-7	用霍耳元件测量磁感应强度 .....	121
实验 4-8	用冲击电流计测定螺线管磁场 .....	125
实验 4-9	研究磁场对电流的作用 .....	129
实验 4-10	测定折射率 .....	132
I	最小偏向角法 .....	132
II	极限法 .....	134
实验 4-11	测量光栅常数 .....	137
实验 4-12	光的偏振 .....	139
实验 4-13	双棱镜干涉 .....	144
<b>第五章</b>	<b>近代物理实验 .....</b>	<b>150</b>
实验 5-1	电子电量的测量——密立根油滴实验 .....	150
实验 5-2	由光电效应测定普朗克常数 .....	155
实验 5-3	迈克尔逊干涉仪 .....	158
实验 5-4	单色仪定标 .....	165
实验 5-5	激光全息照相 .....	168
实验 5-6	氢原子发射光谱 .....	172
<b>第六章</b>	<b>实验仪器使用指导 .....</b>	<b>177</b>
一、	长度测量仪器 .....	177
(一)	米尺 .....	177
(二)	游标卡尺 .....	177
(三)	螺旋测微计(外径千分尺) .....	182
(四)	测微目镜 .....	184
(五)	测量显微镜 .....	185
(六)	读数显微镜 .....	186
(七)	光杠杆及望远镜尺组 .....	187
二、	质量及力测量仪器 .....	189
(一)	物理天平 .....	189
(二)	焦利秤 .....	193
三、	时间测量仪器 .....	194
(一)	机械秒表 .....	194
(二)	电子秒表 .....	195
四、	电学常用仪器 .....	195
(一)	常用直流电源 .....	195
1.	晶体管直流稳压电源 .....	195
2.	蓄电池 .....	197

3. 一次性电池 .....	198
4. 标准电池 .....	198
(二) 常用电阻器 .....	200
1. 滑线变阻器 .....	200
2. 标准电阻 .....	200
3. 测量电阻箱 .....	200
(三) 常用电表 .....	204
1. 检流计 .....	205
2. 冲击电流计 .....	209
3. 磁电系电流表 .....	214
4. 磁电系电压表 .....	215
5. 电流表及电压表的合理选择与正确使用 .....	215
6. 电表盘面常用符号的意义 .....	216
7. 万用电表的使用 .....	216
(四) 直流电桥 .....	219
1. QJ24 型单臂电桥 .....	219
2. QJ19 型单双臂电桥 .....	221
(五) 直流电位差计 .....	224
1. 学生型电位差计 .....	224
2. UJ31 型电位差计 .....	226
五、几种常用的光源 .....	228
(一) 热电极弧光放电型 .....	228
1. 钠光灯 .....	229
2. 汞灯 .....	229
3. 镉灯 .....	229
(二) 冷电极辉光放电型 .....	229
(三) 氦-氖激光器 .....	231
六、环境参数测量仪器 .....	231
(一) 最高最低寒暑表 .....	231
(二) 福廷气压计 .....	232
(三) 干湿泡温度计 .....	233
附录 常用物理参数 .....	235
附表一 物理基本常数 .....	235
附表二 常用物质的密度 .....	236
附表三 我国部分城市的重力加速度 .....	236
附表四 弹性常数 .....	237



附表五	常见物质的比热容 .....	238
附表六	水和冰在不同温度下的比热容 .....	238
附表七	水同空气接触面的表面张力系数 .....	239
附表八	蓖麻油的粘滞系数 .....	239
附表九	铜-康铜热电偶分度表 .....	240
附表十	物质的折射率 .....	241

# 第一章 绪 论

科学实验是科学理论的泉源，是工程技术的基础，是研究自然规律、认识世界、改造世界的基本手段。作为培养德、智、体、美全面发展的高级工程技术人才的高等工业学校，不仅要使学生具备比较深广的理论知识，而且要训练学生具有从事科学实验的较强能力，以适应科学技术不断进步和社会主义建设迅速发展的需要。

## 一、物理实验课程的地位、作用和任务

物理学是一门实验科学。物理学在其发展过程中，实验物理形成了自己的一套理论、方法和技术，它们是进行各类科学实验的基础。所以，物理实验成了高等工业学校对学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课。也是工科学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端。

本课程对学生进行物理实验理论、物理实验方法和物理实验技能方面的基本训练，使学生初步了解科学实验的主要过程和基本方法。

本课程的具体任务是：

1. 从以下几方面初步培养学生进行科学实验的能力：

(1) 通过自行阅读实验教材（或资料）、组织实验，提高阅读和运用资料的能力。

(2) 通过实验，熟悉常用仪器的原理、结构及使用方法，并在进行具体测试中，提高获得准确实验结果的能力。

(3) 通过对实验现象的观察，判断，实验结果的数据处理及误差分析，提高理论联系实际的分析问题能力。

(4) 通过正确记录及处理实验数据、撰写合格的实验报告，提高正确论述的表达能力。

2. 通过实验培养学生实事求是、理论联系实际的科学作风，严肃认真、一丝不苟的工作态度，主动研究的探索精神，遵守纪律和爱护公共财物的优良品德。

3. 通过实验加深对物理学理论的理解。

总之，通过每一个实验完成规定的测量任务、获取应有的数据是本课程的教学手段，而目的是培养与锻炼学生进行科学实验的能力并获取实验知识、提高实验技能。因此，每个学生必须认真对待每一个实验，主动、积极地进行学习。

## 二、实验课的基本程序

本课程计划 60 学时左右，安排在两个学期完成。每次实验 3 节课。共进行 18 个实验左右和一次讲课（误差与数据处理基本知识）。按每人一套配置仪器，采用大循环方式组织教学。

实验课的基本程序为：课前预习、课内操作、课后撰写实验报告。

### (一) 课前预习

课前预习是主动积极完成实验全过程的基础。预习时认真阅读教材，达到明确实验任务、教学要求（通过实验要求掌握的内容）；正确理解实验所依据的原理和采用的实验方法；了解所用实验仪器的原理、结构、主要参数及注意事项。回答每个实验所提出的预习思考题。

在认真阅读教材的基础上，用预习报告纸写出预习报告。其内容包括：

(1) 实验名称。

(2) 实验任务。

(3) 原理简述：实验依据的物理定律（或公式）、测量公式，测量公式的使用条件，电学实验画出电路图。

(4) 实验仪器的名称，使用时的注意事项。

(5) 实验的主要步骤。

(6) 记录数据的表格。

上课时，教师将首先检查每个学生的预习情况。预习的好坏作为评定课内成绩的一项内容。对于没有预习的学生，教师有权停止其本次实验，且课内成绩定为不及格。

### (二) 课堂操作

课堂操作是完成实验的关键。学生必须按循环次序做排定的实验，必须遵守实验室规则，听从教师指导、独立完成实验。

实验时，首先看桌上的提示牌，明确本次实验的具体要求及所用仪器。认真了解所用仪器（包括：名称、量程、准确度、读数方法、主要功能、使用规则、注意事项）。电学实验，在接好线路并请教师检查后方可通电。实验开始可先粗略观察实验过程，其目的是：做到测量时心中有数；检查有无异常现象。确认无误后再开始实验。

记录数据必须用钢笔或圆珠笔，所记录的数据不得涂改。若确认所记录数据有错误时，可将其划掉，把正确数据记在旁边。实验时还应记录所用仪器的名称、规格、型号、准确度级别；实验时的环境条件，如室温、气压等。

实验完成后，将记录的数据请教师审阅，待教师签字后，再把仪器复原整理。

### (三) 课后撰写实验报告

实验报告是实验的书面总结，是让别人（同行）评价自己实验结果的依据。所以报告应用自己的语言表达出：所作内容；依据的物理思想及反映的物理规律；实验结果及对结果的分析；自己对实验的见解及收获。绝不应把报告写成教材的缩写（教材是给没有做过实验的人看的）。

实验报告一般可包括下列内容：

(1) 姓名、班组号、实验日期、地点、环境条件（天气、室温、气压、温度等）。

(2) 实验名称。

(3) 实验任务。

(4) 原理：简要说明实验所依据的原理、测量公式及其适用条件，画出实验的线路图或

光路图，以及必要的原理示意图等。

(5) 仪器：记录实验所用仪器的名称、规格和型号、准确度、额定参数、量程等。

(6) 列出实验数据和数据处理过程：把教师签字的原始数据如实誊写在报告正文中。简要地写出计算过程和误差估算过程。完整正确地表示出实验结果。用作图法处理数据时，应严格按作图规则画出合格的图线。进行数值计算时，要先写出公式、再代入数据，最后得出结果。公式的推导和运算过程可以从略。

(7) 分析讨论：一般包括两方面的内容：① 误差分析和对实验结果作出评价，对实验过程中出现的现象进行具体讨论分析，以及做实验的心得体会和对实验的改进建议等；② 回答教师指定的练习题。

经教师签过字的预习报告纸，应作为实验报告的附件与报告一起，于下一次实验时交指导教师批阅。

## 第二章 测量误差及数据处理基础知识

实验中的误差估算及数据处理贯穿于实验的全过程。它表现在实验前的实验设计与论证、实验进行过程中的控制和监视、实验后的数据处理和结果分析。所以，测量误差与数据处理不但是物理实验的基础理论，也是一切实验的基础理论。

测量误差和数据处理是一门专门的学科，深入地讨论它需要有丰富的实验经验和较多的数学知识。本课程只初步介绍有关测量误差与数据处理的基本知识。通过本章的学习和在各个实验中的练习与讨论，要求达到：

- ① 建立误差的概念，正确估算直接测量量和间接测量量的误差；
- ② 掌握有效数字的概念及运算法则，有效数字与误差的关系；
- ③ 懂得如何正确、完整地表示实验测量结果；
- ④ 了解系统误差在实验中的重要性，并学习发现某些系统误差与减小它们的方法；
- ⑤ 掌握列表法、作图法、逐差法、线性回归等常用数据处理方法。

### 一、测量误差

科学实验是从测量开始的，对自然界所发生的量变现象的研究常常需要借助于各式各样的实验与测量来完成。而测量结果都是有误差的，误差自始至终存在于一切科学实验与测量之中。

#### (一) 测量

物理实验离不开对物理量进行定量的测量和计算。所谓“测量”，就是用一定的量具或仪器、通过一定的实验方法直接或间接地找出待测物理量的数值和单位。即把待测量与一个选作标准的同类量进行比较，定出它是标准量的多少倍。

根据测量方法的不同，可分为直接测量和间接测量两类：

1. 直接测量 凡使用量具或仪器直接与待测物比较，就能测得待测量的数值，称为直接测量。例如，用米尺测量长度、用电表测量电流或电压、用温度计测温度等，都是直接测量。

2. 间接测量 在实际测量中，许多物理量都没有直接测量的仪器，常常需要根据某些原理、公式，由直接测量量通过数学运算才能得到测量结果，这种测量称为间接测量。例如，第三章实验 3-1 测空心圆柱体的密度，就是先直接测得它的质量  $m$ ，长度  $L$ ，外径  $D$

和内径  $d$ ，然后通过公式  $\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi L(D^2 - d^2)}$  计算出密度。  $\rho$  的测量就是间接测量。

物理实验中，多数都是间接测量。但它们都建立在直接测量的基础上。

## (二) 测量误差

在一定的条件下，任何一个物理量的大小都是客观存在的，都有一个实实在在的真值。在测量过程中，我们的主观愿望总希望十分准确地测得待测量的真值。但是，测量是依据一定的理论或方法、使用一定的仪器、在一定的环境中、由一定的人进行的。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、环境的不稳定性、人的实验技能和判断能力的影响等，使得测量值不可能与待测量的真值完全相同，而只能是真值的近似值。也就是说，测量值与真值之间总存在着一个差数，我们把这个差数称为测量的误差  $x$ ，即

$$x = N - N' \quad (2-1)$$

式中， $N$  为测量值， $N'$  为真值。误差  $x$  可以是正值（正误差），也可以是负值（负误差），通常称为绝对误差，它反映了测量值偏离真值的程度。误差愈小两者近似程度愈高。所以，误差的大小也就标志着测量结果的可靠程度或可信赖的范围。

虽然，在测量中误差不可避免，但是，实验者应努力减小各种因素的影响，测出在给定条件下待测量的最佳值或最可信赖值。为此，就必须进一步研究误差的性质和来源。

根据误差的性质，一般将误差分为系统误差和随机误差两类。

1. 系统误差 在相同条件下，对同一物理量进行多次测量，测量值总是向一个方向偏离真值，其数值一定或按一定的规律变化，这类误差称为系统误差。

实验中的系统误差主要来源于以下几方面：

(1) 仪器误差，是由仪器的结构和标准不完善或使用不当引起的。如天平的不等臂、螺旋测微器的螺纹间隙、电表的示值与实际值不符等引起的误差均属前者。而仪器、量具不在规定的状态，如不垂直、不水平、偏心、零点不准等引起的误差均属后者。前者是由仪器、量具自身带来的系统误差，使用时应尽量消除。而使用不当则应当避免。

(2) 方法误差，是由测量方法或计算公式的近似性引起的。如“单摆”实验测重力加速度  $g$  所用的公式是近似的；“伏安法”测电阻时忽略电表内阻的影响等。

(3) 环境误差，是由于外界环境如温度、湿度、光照等与仪器要求的环境条件不一致引起的系统误差。

(4) 人员误差，是由于观测者心理或生理特点所造成的。如用停表计时时，总是超前或总是滞后。读数时，头总偏向一边等。

从理论上讲，这类误差是可以通过分析研究其产生的原因，而采取措施加以消除的，但事实上，发现和消除系统误差是一个极其复杂的问题，常常成为实验结果是否可信的主要矛盾。因此，这是实验者应努力去解决的问题。

2. 随机误差 在测量中，即使系统误差消除以后，对同一物理量在相同条件下进行多次重复测量，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，呈显无规则的涨落，这类误差称为随机误差或偶然误差。

随机误差是由测量过程中的一些随机的或不确定的因素引起的。如人的感官灵敏度及仪器精密度有限、周围环境的干扰，以及随测量而来的其它不可预测的随机因素的影响等。

由于随机误差产生的原因是多种多样的，事先无法估计，因此就不可能完全消除它。但是理论和实践证明，随机误差是服从统计规律的。当进行无限多次重复测量时，误差分布服从正态分布规律。

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

在误差理论中，将 $f(x)$ 称为误差概率分布密度函数。 $f(x)$ 随 $x$ 的分布曲线如图2-1所示。曲线下的面积元 $f(x)\Delta x$ 表示测量值的误差出现在 $x$ 至 $x+\Delta x$ 范围内的概率，所以曲线表示了随机误差的概率分布。这一分布规律在测量次数足够多时近似成立。从曲线可以明显地看出随机误差分布有如下特征：

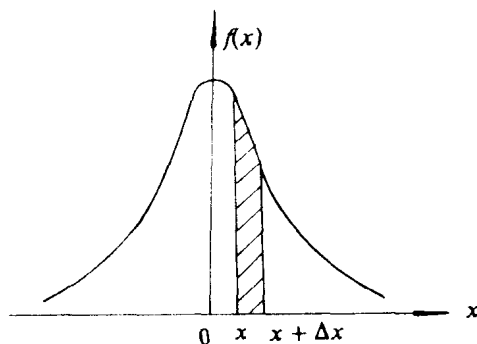


图 2-1 误差分布曲线

- (1) 抵偿性——绝对值相等的正、负误差出现的概率相等。
- (2) 单峰性——绝对值大的误差出现的概率小于绝对值小的误差出现的概率。
- (3) 有界性——在一定测量条件下，误差的绝对值不超过一定限度。

因此，在实验中往往采用多次重复测量的办法，来减小随机误差对测量结果的影响。

3. 测量的精密度、正确度和准确度 精密度、正确度和准确度都是用来评价测量结果好坏的，都与测量误差相联系。但这三者的涵义不同，使用时应加以区别。

精密度是指测量中所测数据重复性的程度，它反映随机误差的大小。精密度高，则随机误差小，即重复测量所得的结果相互接近的程度好。

正确度是指测量值与真值的符合程度，它反映系统误差的情况。正确度高表明系统误差小。

准确度则考虑了两者的综合情况，只有准确度高的实验或测量结果，才是最可信赖的，表明它的系统误差和随机误差均小。

为了形象地理解这些概念，可用图2-2的打靶记录来说明。(a)表示精密度好，但正确度差，系统误差大；(b)精密度、正确度均好，即准确度高；(c)两者都差。

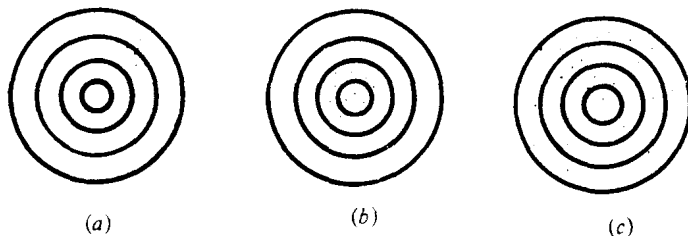


图 2-2 中靶记录

## 二、直接测量结果与误差估算

下面我们在假定系统误差基本消除的条件下，讨论随机误差。

### (一) 测量值的最佳值——算术平均值

由于误差存在于一切测量之中，又贯穿测量的全过程，因此，测量量的真值是未知

的。实际上，常用近似真值（称为约定真值）来代替。在对某一物理量做多次重复测量情况下，用多次测量的算术平均值近似代替真值作为测量结果。

设在相同条件下，对某物理量  $l$  进行了  $n$  次测量，各次测量值分别为

$$l_1, l_2, \dots, l_n$$

设真值为  $l'$ ，则各次测量值的绝对误差  $x_i = \Delta l_i = l_i - l'$  分别为

$$\Delta l_1 = l_1 - l', \Delta l_2 = l_2 - l', \dots, \Delta l_n = l_n - l' \quad (2-3)$$

也可写成

$$l_1 = l' + \Delta l_1, l_2 = l' + \Delta l_2, \dots, l_n = l' + \Delta l_n$$

$n$  次测量的算术平均值  $\bar{l}$  为

$$\bar{l} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (l' + \Delta l_i)}{n} = l' + \frac{\sum_{i=1}^n \Delta l_i}{n} \quad (2-4)$$

根据误差的抵偿性：当测量次数  $n \rightarrow \infty$  时，有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \Delta l_i}{n} = 0 \quad \text{则} \quad \bar{l} = l' \quad (2-5)$$

若  $n$  为有限次，但足够大时，有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \Delta l_i}{n} \approx 0 \quad \text{或} \quad \bar{l} \approx l' \quad (2-6)$$

它表明，无限多次重复测量的算术平均值，正好等于真值。在实际测量中，测量次数是有限的，但只要测量次数足够多，算术平均值是真值的最好近似，是多次测量的最佳值。因此，常用算术平均值来近似代替真值，作为测量结果。

## (二) 多次直接测量的误差估算

测量一定会产生误差，故真值是未知的，所以由公式 (2-1) 定义的误差也是未知的。因此，对误差只能进行估算。估算绝对误差的方法颇多，本书中只简单介绍常用的两种绝对误差估算方法：算术平均误差及标准误差。

1. 算术平均误差 在式 (2-3) 中，以算术平均值  $\bar{l}$  代替真值  $l'$ ，就得到各次测量值  $l_i$  与  $\bar{l}$  的误差，它们分别为

$$\Delta l_1 = l_1 - \bar{l}, \Delta l_2 = l_2 - \bar{l}, \dots, \Delta l_n = l_n - \bar{l} \quad (2-7)$$

则  $n$  次测量中某一测量值的算术平均误差  $\bar{\Delta l}$  定义为

$$\bar{\Delta l} = \frac{1}{n} \left( |\Delta l_1| + |\Delta l_2| + \dots + |\Delta l_n| \right) = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta l_i|}{n} \quad (2-8)$$

由于随机误差具有正负误差相抵偿的性质，所以用误差的绝对值的平均值定义算术平均误差。



算术平均误差比较简单, 计算方便, 常在设计实验、仪器选配与控制实验过程中使用。由于它比较简单, 因此, 便于建立误差概念、掌握误差估算的基本方法。本课程中大多数实验用算术平均误差处理。

2. 标准误差 在相同条件下, 对某物理量  $l$  进行无限多次测量得  $l_1, l_2, \dots, l_i$ 。某一测量值对真值  $l'$  的标准误差定义为

$$\sigma' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - l')^2}{n}} \quad (n \rightarrow \infty) \quad (2-9)$$

当测量次数  $n$  有限, 用平均值  $\bar{l}$  代替真值  $l'$  时, 可以证明,  $n$  次测量中某一测量值的标准误差  $\sigma$  为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2}{n-1}} \quad (n \text{ 有限}) \quad (2-10)$$

在有限次测量中平均值不等于真值, 所以它也是一个随机量, 因此也存在标准误差, 其值为

$$\sigma_{\bar{l}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2-11)$$

标准误差虽然计算复杂, 但物理意义明确, 又有概率统计理论为基础, 所以被公认为评定测量精密度的标准。本课程将在某些实验中要求用标准误差处理数据, 为进一步学习打下基础。

3. 误差的物理意义 为使概念明确, 我们从讨论标准误差的物理意义开始。

由误差概率分布密度函数  $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-x^2/(2\sigma^2)}$  可以看出, 当  $x=0$  时  $f(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$ , 由于  $f(x)$  曲线下的面积为 1 (概率分布的归一化条件), 所以  $\sigma$  越小,  $f(0)$  越大, 曲线越陡, 数据越集中, 测量值相对于平均值的离散程度越小。相反,  $\sigma$  越大,  $f(0)$  越小, 曲线越平坦, 数据越离散, 即测量值相对于平均值的离散程度越大。所以某一测量量的标准误差反映了测量值相对于平均值的离散程度, 它是反映测量精密度的定量指标。

由概率的运算公式可得

$$P\{-\sigma \leq x \leq \sigma\} = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(x) dx \approx 0.683 \quad (2-12)$$

此式表明, 在相同条件下 (或称等精度) 的  $n$  次测量中任一测量值  $l_i$  落在  $\bar{l} - \sigma \sim \bar{l} + \sigma$  范围内的概率为 68.3%。误差理论把这一概率称为置信度  $P$ 。所以标准误差表示了在一定置信度下测量值偏离平均值的误差范围。

类似式 (2-12) 的计算表明, 算术平均误差表示了在一列等精度测量 (相同条件下的

\* 严格讲, 有限次测量时,  $\bar{\Delta l}$  应称为算术平均偏差,  $\sigma$  应称为标准偏差。