



高等学校新世纪系列教程
New Century Series Textbook of University

主编 王国栋

大学物理实验

科学出版社

高等学校新世纪系列教程
New Century Series Textbook of University

大学物理实验

王国栋 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是根据高等农林院校的特点, 结合面向 21 世纪物理实验课程教学改革成果编写而成。除基本实验外, 还包括结合专业特点和教改需要的综合实验和设计实验, 共列出实验项目 42 个。部分实验给出了两种方法, 以利于师生选择。每个实验后都附有思考练习题, 实验数据处理以不确定度计算作为基本要求。实验误差理论、通用仪器介绍及实验方法和技术均分章介绍, 以便于学生学习。全书采用 SI 单位制, 所用名词以全国自然科学名词审定委员会 1988 年公布的基础物理学名词为准, 书后附有常用物理参数表等。

本书可作为高等农林院校工科及农科类各专业的实验教材, 也可作为生物类专业和农林科技工作者科学实验的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验/王国栋主编. -北京: 科学出版社, 2001

高等学校新世纪系列教程

ISBN 7-03-009618-5

I. 大… II. 王… III. 物理 - 实验 - 高等学校 -
教材 IV. O4 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 046791 号

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>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2003 年 6 月第二次印刷 印张: 13 1/4

印数: 8 101—13 100 字数: 305 000

定价: 19.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

高等学校新世纪系列教程

农林类物理教材编写委员会

顾问 傅志东 (西北农林科技大学)
编委主任 王国栋 (西北农林科技大学)
编委副主任 (以姓氏笔画为序)
习 岗 (华南农业大学)
孙 凡 (西南农业大学)
刘亚龙 (西北农林科技大学)
张社奇 (西北农林科技大学)
武秀荣 (山西农业大学)
戚大伟 (东北林业大学)
曾庆军 (湖北农学院)
潘建斌 (河南农业大学)

《大学物理实验》

主 编 王国栋
副 主 编 张社奇 贾根良
参 编 (以姓氏笔画为序)
王文伟 冯朝岭 刘志贤 钱克红
曹 宁 解迎革 蒙文舜 蔡丽君
主 审 张振瀛 (西北农林科技大学)

前 言

物理学是自然科学中最具活力的带头学科，它是人类认识自然、创造物质财富与推动社会进步必不可少的重要理论和技术源泉。刚刚过去的 20 世纪，物理学理论及其在各个学科中的应用，为人类社会文明与进步做出了巨大贡献。物理学不仅在人类科技创新过程中起着举足轻重的作用，同时它的基本理论、分析和解决问题的方法，在强调素质教育的今天更有着极其重要的地位和作用，是培养学生科学精神、科学态度、科学思维方法的最好素材，也是大学生知识-能力-素质协调发展的催化剂。针对目前高等农林院校物理教学的现状，结合我们承担的教育部“面向 21 世纪农林院校基础物理教学内容和课程体系改革的探索与实践”课题，经过 4 年多的改革与研究，在西北农林科技大学、华南农业大学、西南农业大学、东北林业大学、山西农业大学、湖北农学院和河南农业大学等七所农林院校的物理同仁们的共同努力下，编写了这套适用于农林院校理科、农科各专业的《大学物理学》、工科各专业的《基础物理学》以及与之配套的《大学物理实验》和《大学物理学习指导》，共计四本教材或参考书。

在对大学物理的教学目的、任务和教材编写方案的研讨中，我们深切地感受到必须从人才的培养目标，培养规格、模式及方法等方面思考和定位。根据“厚基础、宽口径”的人才培养原则，以及注重学生“综合素质”和“创造能力”培养的教学原则，在整套教材的编写过程中力图遵循以下基本原则：

1. 能够使学生对物理学的内容和方法、物理图像和概念、工作语言、历史、现状和前沿有一个比较全面的了解，力求将比较新的前沿学科和技术问题中的物理学原理反映在教学内容中。

2. 在对理、农科教材的处理上，注重物理内容的两个“有机结合”：一是注重现代物理与经典物理的有机结合；二是注重物理学理论与生物类专业实际问题的有机结合。考虑到农林院校物理学时的限制，对原有经典内容做了删减，淡化过渡内容，突出主线，对某些与专业结合的问题只讲原理，不涉及具体的应用细节。

3. 在对工科教材的处理上，除遵循以上原则外，加重了“物”的份额，调节“物”与“理”的平衡，以物质的结构、运动和能量为基础，构建物质世界新的理性框架，突出方法论。

4. 注重对学生的科学素质培养，将科学方法论有机地融入教学内容中。培养学生的科学思维能力，使学生掌握正确的科学研究方法，具备发现问题、分析问题与解决问题的能力，具备探索自然规律的能力，并初步具备创新能力。

5. 实验教材自成体系，使学生对物理实验的基本原理、仪器的使用、实验方法及数据处理有一个全面了解，实验技能得到系统性训练，为后续课程学习打下坚实的基础。

6. 学习指导注重所学知识的归纳总结，特别注重对实际问题的分析思路、解决途径的引导与训练。给出的同步测试问题能够帮助学生及时检查和巩固所学内容。

7. 书中统一使用国际单位制, 所用名词术语以全国自然科学名词审定委员会 1988 年公布的基础物理学名词为准.

《大学物理实验》一书由西北农林科技大学王国栋教授任主编, 由西北农林科技大学张社奇、贾根良任副主编, 河南农业大学冯朝岭、西北农林科技大学刘志贤、蔡丽君、蒙文舜、钱克红、曹宁、解迎革、王文伟等参加了本书的编写工作.

全书由王国栋统稿, 原中国物理学会教学委员会农林分委会副主任委员、西北农林科技大学张振瀛教授主审, 感谢他对本书提出的宝贵意见. 西北农林科技大学物理教研室刘云鹏老师绘制了该书的全部插图, 在此一并致谢.

由于我们的学识与教学经验所限, 书中缺点和错误在所难免, 恳请使用本书的师生批评指正.

编 者

2001 年 5 月

目 录

前言

绪论	(1)
第 1 章 测量误差与数据处理基础	(3)
§ 1.1 测量误差	(3)
§ 1.2 随机误差的估算	(6)
§ 1.3 有效数字及其运算	(12)
§ 1.4 实验数据的列表和作图处理	(15)
§ 1.5 实验数据的线性拟合	(16)
第 2 章 常用物理实验仪器介绍	(20)
§ 2.1 物理天平	(20)
§ 2.2 气垫导轨和数字毫秒计	(22)
§ 2.3 物理实验常用电源	(25)
§ 2.4 电学测量常用仪器简介	(27)
§ 2.5 冲击电流计	(38)
§ 2.6 物理实验常用光源	(41)
§ 2.7 分光计	(42)
§ 2.8 移测显微镜	(44)
第 3 章 物理实验方法与技术	(47)
§ 3.1 比较测定法	(47)
§ 3.2 放大测量法	(50)
§ 3.3 补偿法	(52)
§ 3.4 零位测量法	(55)
§ 3.5 模拟法	(57)
§ 3.6 替代法	(59)
附表 常用基本物理量的测定方法及特点	(60)
第 4 章 基本实验	(72)
实验 4.1 基本测量	(72)
实验 4.2 用气垫导轨测定速度和加速度	(76)
实验 4.3 动量守恒定律研究	(79)
实验 4.4 刚体转动惯量的测定	(81)
实验 4.5 金属丝弹性模量的测量	(86)
实验 4.6 液体黏滞系数的测定	(90)
实验 4.7 液体表面张力系数的测定	(97)
实验 4.8 电源特性的研究	(99)

实验 4.9 惠斯通电桥	(101)
实验 4.10 电位差计的应用	(106)
实验 4.11 通用示波器的使用	(109)
实验 4.12 声速的测量	(114)
实验 4.13 电流磁场的测定	(118)
实验 4.14 RC 电路的充放电过程	(123)
实验 4.15 用模拟法测绘静电场分布	(128)
实验 4.16 用分光计测棱镜的折射率	(130)
实验 4.17 单缝衍射光强分布的测定	(132)
实验 4.18 用光栅测量光波的波长	(135)
实验 4.19 用牛顿环测液体折射率	(137)
实验 4.20 光谱定性分析	(141)
实验 4.21 光电效应	(144)
实验 4.22 不良导体导热系数的测定	(147)
第 5 章 综合实验	(150)
实验 5.1 用分光光度计测定吸收光谱特性	(150)
实验 5.2 用旋光仪测定有机溶液的浓度	(153)
实验 5.3 迈克尔逊干涉仪的调节和使用	(156)
实验 5.4 恒温自动控制器的安装与调试	(158)
实验 5.5 电表改装	(161)
实验 5.6 激光与超声波处理对作物种子萌发的影响	(164)
实验 5.7 晶体管电导仪的安装与调试	(165)
实验 5.8 普通摄影技术	(170)
实验 5.9 微距摄影与显微摄影技术	(173)
实验 5.10 暗室技术	(178)
第 6 章 设计实验	(182)
实验 6.1 用振动法测弹簧的劲度系数	(182)
实验 6.2 不规则形状固体密度的测定	(182)
实验 6.3 小灯泡伏安特性曲线的测定	(183)
实验 6.4 用滑线式电桥测毫安表内阻	(183)
实验 6.5 用箱式电桥测定电流计内阻	(183)
实验 6.6 电流表的扩程	(183)
实验 6.7 望远镜或显微镜的组装	(184)
实验 6.8 用光干涉法测定金属细丝的直径	(184)
实验 6.9 用牛顿环测定溶液的折射率	(184)
实验 6.10 测定光栅常数	(184)
附录	(185)
一、常用物理参数表	(185)
二、黑白冲洗配方及工艺	(191)

三、实验不确定度表示建议书 INC-1 (1980)	(192)
四、CODATA 推荐的物理和化学基本常数	(193)
参考文献	(201)

绪 论

物理学是一门理论与实验紧密结合的学科。它是研究自然规律、认识客观世界、改造客观世界的基本手段。回顾物理学发展史，任何物理新概念的确立、新规律的发现，都须以严密的物理实验为依据，许多重要的规律都是在总结大量实验事实的基础上得到的。即使在今天，理论物理虽说是对实验物理的预见和指导起着重要作用，但理论规律和结论仍须受到实践的检验。所以要学好物理学，就应当学习物理实验的理论和方法，并在一定程度上掌握物理实验的基本技能。

1. 物理实验课程的地位和基本任务

物理实验是对理科、工科、农科学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修课，是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，也是培养学生实验技能和科学素质的基础。

在农林院校开设物理实验课，力求达到以下目的：

(1) 通过对物理现象的观察、分析和物理量的测量，学习物理实验的相关知识，加深对物理概念和原理的理解，培养实事求是的工作态度和作风。

(2) 培养和提高学生的实验技能。主要包括以下几方面的任务：

①通过预习实验内容及阅读有关资料、组织实验，提高查阅和运用资料的能力，并能概括出实验原理和方法的要点。

②通过正确的使用仪器，了解它的原理、结构和使用方法，掌握基本物理量的测量方法和实验操作技能。

③培养和提高学生从事科学实验的初步能力，包括实验数据处理及误差分析的能力、获得准确实验结果的能力。

④通过正确的记录及科学的处理实验数据，撰写合格的实验报告，提高科学论述能力、表达能力以及自行设计和完成某些不太复杂实验的能力。

2. 实验课的基本程序与要求

物理实验课的基本程序一般分为三个阶段：课前预习、进行实验和课后撰写实验报告。

(1) 课前预习：预习的目的在于实验之前对实验内容有一个总体上的了解。通过预习应当弄清以下问题：

- ①实验的理论依据和条件；
- ②实验仪器的选取；
- ③所用仪器的工作原理及操作方法；
- ④实验过程的注意事项；
- ⑤记录与处理实验数据的方法；

⑥对实验结果的预测。

在此基础上，写出预习报告，其主要内容包括：

- ①实验名称及要求；
- ②实验原理、计算公式及其使用条件、电路图、光路图和装置简图等；
- ③实验所需仪器的名称、数量及使用时的注意事项；
- ④实验步骤；
- ⑤合理的实验数据记录表格。

(2) 实验操作：实验操作是实验程序中的关键环节。学生须遵守实验室规则，听从教师指导，熟悉各个仪器的使用方法及操作规范，认真完成实验。实验操作应注意以下几点：

①按教材中规定的实验程序和步骤进行实验操作。这是因为，教材中的实验步骤是根据实验原理和具体仪器设计得出的，它是获得正确数据和结果的最佳实验方案之一。

②根据实验的具体要求，依据有效数字法则，认真记录实验数据，绝不允许伪造或抄袭他人数据。

③为养成良好的工作作风，在做完实验后，务必将所用仪器设备恢复原位，关闭电源和水源，做好实验室清洁工作，并将原始数据单交教师审阅签字后方可离开实验室。

(3) 撰写实验报告：撰写实验报告是对一次实验的全面总结，也可作为科学报告或论文写作的基本训练。所以在做完实验后，应对实验数据进行认真的处理和分析，作出合理结论，最后才能写出完整的实验报告。具体要求如下：

①数据处理：实验结果是对大量数据的总结和升华，只有一丝不苟地处理实验数据，才能实现从感性认识到理性认识的飞跃。所以，在数据处理过程中，应首先按照误差理论和有效数字运算规则整理数据，列表或绘出曲线；然后计算和分析实验数据的特点和规律以及由此而得出的结论；最后分析误差的来源，并讨论存在的问题和改进方法。

②撰写实验报告：完整的实验报告应包括：实验目的、实验仪器（仪器的名称、性能及精度）、实验原理和方法、实验数据记录及处理（包括图表）、误差分析及问题讨论。

在撰写实验报告时，应力求报告内容简单明了，用语确切，文字通顺，字迹工整。还应在报告的开头注明实验时间、实验者姓名。经教师签名的原始数据记录单也应作为实验报告的附件一起上交。

第 1 章 测量误差与数据处理基础

要定量研究自然现象所遵从的规律，必须对大量的实验数据进行测定、记录和分析处理。数据处理及误差分析是科学实验的重要组成部分，贯穿于每个实验之中，是培养学生实验能力和提高科学素质不可缺少的学习内容和训练环节。由此形成的有关测量误差与数据处理的理论，不仅要在每个物理实验中用到，而且是今后从事科学研究必须掌握的基础知识和基本技能。

但由于测量误差和数据处理的内容牵涉面广，不可能在一两次学习中掌握，因此在这一理论的学习中，应结合自己已掌握的相关知识，对提到的问题先有一个初步的了解，然后针对每一个具体实验再详细学习有关内容，并通过运用加以掌握。顺便指出，对数据处理和测量误差的深入讨论已成为普通计量学以及数理统计学的任务，本章只引用其中的某些结论和计算公式，详细的理论探讨和证明留在数理统计课中去学习。

§ 1.1 测量误差

测量是物理实验的基础。对每个物理现象的研究、物质特性的认识、物理原理的验证都要通过测量来实现。一般说来，测量必须借助一定的仪器，采用一定的方法，在人为控制的环境下由实验者来完成。但在实际的测量中，往往由于测量仪器的限制，测量依据的理论公式应满足的条件不可能绝对保证，加之实验技术、环境条件等因素的影响，测量不可能无限制的精确。测量值与被测量的真实值（简称真值）之间总是存在着差异，即测量不可避免地会产生误差。因此，分析测量中可能产生的各种误差，尽可能地消除其影响，并对测量结果中未能消除的误差作出准确估计，是所有科学实验必不可少的任务。为此，本节主要介绍误差的概念、特点、产生的原因和估算方法等有关知识。

1.1.1 误差的概念

测量误差就是测量结果与被测量的真值（或约定真值）间的差值。测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差可以用绝对误差表示，也可以用相对误差来表示。

绝对误差 = 测量结果 - 被测量的真值

$$\text{相对误差 } E = \frac{\text{测量值的绝对误差}}{\text{被测量的真值}} \times 100\%$$

事实上，被测量的真值是未知的。人们对客观物质世界建立的“量”的概念，也只能通过各种测量手段和方法了解到其测量值，因而以上关于误差的定义还不能直接用于实际中。于是，人们便依据测量学原理和数理统计学的理论建立了各种误差理论，用来科学地估算测量误差。

1.1.2 误差的分类

从研究误差的需要出发, 根据误差产生的原因和性质的差异, 可将测量中的误差分为系统误差和随机误差.

1.1.2.1 系统误差

在相同实验条件下, 对同一物理量进行的多次测量中, 如果出现的误差大小与正负保持不变, 或按确定的规律变化 (如递增、递减、周期性等), 这种测量误差称为系统误差. 系统误差的种类很多, 按其来源可分为:

①方法误差: 它是由测量所用理论公式的近似性及公式中的各参数确定的近似性而引起的误差. 产生这一误差的原因在于, 测量过程中存在着实际上起作用而不能忽略的因素, 如空气的阻力和浮力、电表的内阻、连线电阻的压降等, 这些因素在推导测量结果的表达式中没有得到反映或被忽略, 从而引起了实验误差.

②条件误差: 由于外界环境因素 (如温度、湿度、压力、振动、电磁场等) 与要求的标准状态不一致, 使测量装置的指示量值发生变化, 以及观测者在生理上的视觉分辨能力、感觉器官的生理变化、反应速度和固有习惯引起的误差.

③仪器误差: 由于测量设备 (包括测量工具、仪器、量具等) 本身不完善, 或由于测量设备的电路安装、布置、调整不得当 (例如米尺刻度不准确、螺旋测微计有空行程、仪表调零不准等) 而产生的误差.

由此可见, 系统误差的出现都具有某种确定的规律性. 但是, 这种规律对不同的实验测量却是不相同的. 它不像下面将要介绍的随机误差那样, 在处理上有完整而通用的理论公式与计算方法, 而只能针对每一具体情况采用不同的处理方法. 这就要求实验者对研究对象的特殊规律要有充分的掌握, 同时实验者在实验经验、实验技巧和理论水平等方面应有相当的水平, 并且使所用仪器设备的性能要处于良好的工作状态. 一般地说, 处理系统误差是比较困难的, 甚至在自觉或不自觉之中容易将其遗漏.

1.1.2.2 随机误差

随机误差是由不确定因素引起的误差. 它的特征表现为, 就某一次测量来讲, 其误差值的大小和正负都带有随机性, 难以事先确定. 但对大量次数的重复测量来说, 测量结果却遵从一定的统计规律. 这种误差产生的原因是多方面的, 例如实验条件和环境因素微小的、无规则的起伏变化及其与实验者生理分辨本领、实验技能的熟练程度等因素产生的误差.

随机误差可以根据统计理论进行处理. 大量的实验事实及统计理论都证明, 当随机误差由许多微小的、彼此独立的随机因素决定时, 服从正态分布规律. 绝大多数实验都属于这一情况, 因而以下的讨论均是以正态分布为前提.

但应指出, 由于实验者的粗心大意, 使用仪器不当, 或者弄错了实验程序, 或者读错了仪器的标度等造成的差错, 不属于误差而是错误, 这些错误是应该避免的.

1.1.3 系统误差的修正与限制

1.1.3.1 如何发现系统误差

要发现系统误差,就必须认真研究测量理论和方法的严密性,仔细检验或校准每一台仪器,分析每一个实验条件,考虑每一步的调整和测量,并注意每一个可能因素对实验的影响等.以下从普遍的意义上介绍几种发现系统误差的途径,而在实际工作中,也会有许多具体办法.

(1) 实验对比法:包括实验方法的对比,即用不同方法测同一个量,看结果是否一致;仪器的对比,如用两个电流表接入同一电路对比;改变测量步骤对比,如测某物理量与温度的关系可用升、降温测量看读数点是否一致;改变实验中某些参量的数值;改变实验条件以及换人测量等方法进行对比.在对比中如果发现实验结果有差异,即说明实验中存在系统误差.

(2) 理论分析法:包括实验所依据的理论公式所要求的条件与实际情况有无差异的分析,仪器的使用条件是否达到要求等.

(3) 分析数据法:由于偶然误差服从一定的统计分布规律,如果不遵从这种规律,则说明存在系统误差.在相同的条件下得到大量数据时,可用这种方法判断实验中是否有偶然误差和系统误差存在.例如,按顺序记录的测量数据的偏差是单向周期性变化,说明存在固定的或变化的系统误差.如果实验中存在偶然误差,根据偶然误差的统计分布理论,测量值的分布在时间和空间上均应是随机的.

1.1.3.2 系统误差的修正和限制

若发现有系统误差出现,就要引入修正值加以修正.例如,对千分尺的零点修正;利用较高级的电表对低级的电表测出修正曲线等.在实际中,确切的系统误差值有时不易找出,但我们可以通过以下方法从测量方法上抵消系统误差,提高测量的准确度.

(1) 替换法:在测量装置上对待测量对象进行测量后,立即用一个标准量替换待测量,再次进行测量,并调到同样的情况,从而使待测量等于标准量.例如:在天平上称物体质量,如果采用通常的测量方法,即左盘放待测物,右盘放砝码,会把天平两臂不等长的系统误差带入测量值.采用替换法,就可避开这一系统误差.具体方法是:设待测物质量为 x ,先利用质量为 T 的中介物(例如干净的细砂)与之平衡,若天平臂长分别为 l_1 和 l_2 ,则平衡时有 $x = \frac{l_1}{l_2} T$.移去待测物,换以质量为 P 的标准砝码再与中介物 T 达到平衡,则有 $P = \frac{l_1}{l_2} T$.于是可得 $x = P$.

(2) 异号法:使误差在测量过程中出现一次为正值,另一次为负值,取其平均值以消除系统误差.例如,使用电位差计测微弱电动势 $\mathcal{E}$ 的电路中,若有温差电动势 $\mathcal{E}_0$ 的干扰,测出的值 $\mathcal{E}_1$ 实为两电动势之差,即 $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E} - \mathcal{E}_0$,若将 $\mathcal{E}$ 反向,再测量之,则测量值 $\mathcal{E}_2 = \mathcal{E} + \mathcal{E}_0$.将两次测量结果平均,温差电动势引入的误差就被排除了.

(3) 交换法:例如用滑线式惠斯通电桥测电阻时,把待测电阻与标准电阻交换位置

再次测量, 得到两次测量值的平均值, 就可消除滑线电阻丝不均匀引进的误差。

(4) 对称观测法: 若有随时间线性变化的系统误差, 可将观测程序沿对称的时间序列再做一次。例如, 利用一只灵敏电流计的零点平均值来修正测量值。又如, 测电阻温度系数的实验, 测电阻前记录一次温度, 测电阻后再记录一次温度, 取两次平均值做为该点温度值等。

由于很多随时间变化的误差在短时间内均可认为是线性变化, 因此对称观测法是一种能够消除随时间变化的系统误差的好方法。

(5) 半周期偶数观测法: 对周期性误差, 可以每经过半个周期进行偶数次观测。例如, 分光计刻度盘偏心带来的角度测量误差是以 360° 为周期, 可采取相距 180° 的一对游标, 每次测量读两个数, 则这种方法在一个周期内读取了两个读数, 角位移将是两个角位移的平均值。

以上仅列举了几种减小或消除某些简单系统误差的方法。实际上, 许多系统误差的出现, 常常是由于实验所用的理论不完善, 或理论背后还隐藏着未发现的、新的更精细的规律性。

由此可见, 系统误差可限制到最小程度, 实验过程中出现的错误和不当也应该避免。而随机误差是不可避免的, 所以测量结果的精确程度主要受随机误差的影响。因而在一般的误差理论中, 都重点讨论随机误差产生的规律、估算方法及其对总的不确定度的贡献大小。

§ 1.2 随机误差的估算

1.2.1 随机误差的分布特征

就某一次测量值来说, 随机误差的出现是没有规律的, 其大小和方向也是不能预知的, 但对一个量进行足够多次的测量, 则会发现它们的随机误差有一定的分布特征。这些分布特征主要表现在以下四个方面:

(1) 有界性: 绝对值很大的误差出现的概率为零, 即误差的绝对值不会超过一定的界限。

(2) 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。

(3) 对称性: 绝对值相等的正误差和负误差出现的概率接近相等。

(4) 抵偿性: 由于绝对值相等的正、负误差出现的概率接近相等, 因而随着测量次数的增加, 偶然误差的算术平均值将趋于零。

抵偿性是偶然误差最本质的统计特性。一般地讲, 凡是具有抵偿性的误差, 原则上都可以按偶然误差处理。

根据随机误差的分布特征, 我们知道: ①在多次测量中, 正负随机误差大致上可以相互抵消, 因而用多次测量的算术平均值表示测量结果可以减小随机误差的影响; ②测量值的分散程度直接体现随机误差的大小, 测量值越分散, 测量的随机误差就越大。因此, 只有对测量的随机误差作出估算才能表示出测量的精密程度。下面我们就以直接测量与间接测量两种类型分别予以讨论。

1.2.2 直接测量量的误差估算

直接测量是以一个未知的物理量与作为标准的量值直接相比较而得出未知物理量量值的测量方法。例如，用米尺测量某一物体的长度；用秒表测量某一过程的时间；用温度计测量某一系统的温度；用电流表测量某支路中的电流强度等，均属于直接测量。其特点是，由实验测得的数据直接确定被测物理量的量值。

1.2.2.1 直接测量的算术平均绝对误差

设在实验中对某一物理量 x 进行了 n 次等精度的重复测量，获得了 n 个数据，分别为

$$x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$$

若该物理量的真值为 R ，则第 i 次测量的误差为

$$\Delta_i = x_i - R \quad (1.1a)$$

那么被测量 x 的平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1b)$$

$\bar{x}$ 虽可作为测量值，但它不是真值 R 。要确定 $\bar{x}$ 与 R 之间的偏离程度，需要从计算各个测量值 x_i 偏离真值 R 的大小来着手，最简单的方法就是用算术平均的方法估算误差。如前所述，在 n 次测量中，每次测量产生的误差为 Δ_i ，则测量的算术平均绝对误差为

$$\bar{\Delta}_x = \frac{1}{n} (|\Delta_1| + |\Delta_2| + \dots + |\Delta_n|) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta_i| \quad (1.2)$$

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

测量结果通常表示为

$$x = \bar{x} \pm \bar{\Delta}_x \quad (1.3)$$

算术平均绝对误差 $\bar{\Delta}_x$ 与算术平均值的比值

$$E = \frac{\bar{\Delta}_x}{\bar{x}} \times 100\%$$

叫做平均相对误差。

直接测量量的算术平均绝对误差计算较为简单。但从理论上讲，只有当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时，被测量的平均值才能趋于真值。因此，在实际测量中有限次测量误差估算的物理意义并不十分明确。

1.2.2.2 直接测量的标准偏差

如果用各次测量误差平方和的平均值来表示平均误差的平方，可得

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - R)^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2} \quad (1.4)$$

其中 S_x 称为一组测量值 x_i 的标准偏差。这是当前用得最多也是最基本的一种随机误差表示方法。

但实际上，真值 R 是未知的，所以不能从式 (1.1) 直接求出 Δ_i 的数据。因此，常将式 (1.1) 改写为 $\Delta_i = x_i - \bar{x}$ (其中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$)，由式 (1.2)、(1.3) 及标准偏差定义可以证明

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.5)$$

式 (1.5) 中的 S_x 称为标准偏差。其值可通过各次测量值与平均值 $\bar{x}$ 之差来计算，当 S_x 值较小时，测量的数据比较集中，说明测量的精密度（简称精度）高，则测量值较为可靠；当 S_x 值较大时，数据较分散，则测量的精密度低， $\bar{x}$ 值不大可靠。

应该指出， S_x 表示的只是一组测量值的偏差，它只反映获得算术平均值的那组数据 x_i 的离散性，而不能表示平均值偏离真值的情况。 $\bar{x}$ 的离散性是平均值本身的波动。例如，当我们获得一组测量数据，并用平均值 $\bar{x}$ 作为测量结果，那么，无论任何人完全按照相同的情况重复上述测量时，由于随机误差的影响，并不一定能得到完全相同的 $\bar{x}$ 。几次测量所获得的平均值之间的不同就表示其本身具有离散性。

要表示 $\bar{x}$ 值的离散程度，可用平均值的标准偏差 $S(\bar{x})$ 来表示。可以证明，平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差可表达为

$$S(\bar{x}) = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1.6)$$

一般情况下， S_x 值愈大， $S(\bar{x})$ 也愈大，但 $S(\bar{x})$ 随测量次数的增加而减小。

1.2.2.3 直接测量结果的表示和总不确定度的估计

要表示完整的测量结果，应给出被测量的量值 x_0 ，并同时标出测量的总不确定度 Δ ，然后写成 $x_0 \pm \Delta$ 的形式。它表示了被测量的真值在 $(x_0 - \Delta, x_0 + \Delta)$ 的范围之外的可能性（或概率）很小。因此，不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度，是对被测量的真值所处的量值范围的评定。

在直接测量时，被测量的量值 x_0 一般取多次测量的平均值 $\bar{x}$ ；若实验中有时只能测一次或只需测一次，就取该次测量值 x_0 。最后表示直接测量结果的被测量 x_0 时，通常还必须将已定系统误差分量（即绝对值和符号都确定的已可估算出的误差分量）从平均值 $\bar{x}$ 或一次测量值 x 中减去，以求得 x_0 ，即对已定系统误差分量进行修正。如螺旋测微计的零点修正、伏安法测电阻中电表内阻影响的修正，等等。

参考国际计量委员会通过的《BIPM 实验不确定度的说明建议书 IBC-1 (1980)》（见附录三）的精神，普通物理学实验的测量结果表示中，总不确定度 Δ 从估计方法上也可分为两类分量：A. 多次重复测量用统计方法计算出的分量 Δ_A ；B. 用其他方法估计出的分量 Δ_B 。它们可用方和根法合成（下文中的不确定度及其他量一般都是指总不确定度及其分量）：

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (1.7)$$