

面向(20)世纪高校教材

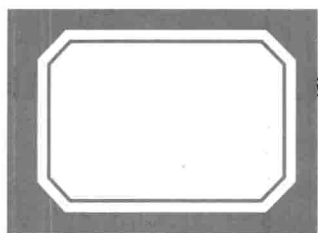
主编 崔益和 殷长荣

物理实验

(第二版)



◆ 苏州大学出版社



物 理 实 验

(第二版)

主 编 崔益和 殷长荣

副主编 孔令竹 史友进 杨诚成

苏 州 大 学 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

物理实验 / 崔益和, 殷长荣主编. —2 版. —苏州:
苏州大学出版社, 2012. 8
面向 21 世纪高校教材
ISBN 978-7-5672-0218-4

I. ①物… II. ①崔… ②殷… III. ①物理学—实验—
高等学校—教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 183565 号

物理实验(第二版)

崔益和 殷长荣 主编

责任编辑 周建兰

苏州大学出版社出版发行

(地址: 苏州市十梓街 1 号 邮编: 215006)

苏州恒久印务有限公司印装

(地址: 苏州市友新路 28 号东侧 邮编: 215128)

开本 787 mm×1 092 mm 1/16 印张 19 字数 494 千

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5672-0218-4 定价: 33.00 元

苏州大学版图书若有印装错误, 本社负责调换

苏州大学出版社营销部 电话: 0512-65225020

苏州大学出版社网址 <http://www.sudapress.com>

前 言

大学物理实验是理工科学生进入大学后较早遇到的一门系统、全面的实验课程。该门课程教学质量的好坏对学生独立工作能力的培养有十分重要的影响。大学物理实验课程教学质量的高低是由学校各级领导对物理实验的重视程度、师资水平、实验室设备条件、教师对学生的循循善诱和严格要求以及课程如何组织实施等诸多因素综合决定的,实验教材则是其中一个很重要的载体。

本书是根据《高等学校工科物理实验课程教学基本要求》,结合编者多年来的教学经验编写而成的。它是教学实践的产物,注重培养学生的独立工作能力和实验素养。

本书主要有以下特点:一是根据国际上统一测量不确定度量化表示的进展情况,结合物理实验教学的实际水平,实行以不确定度评定实验结果的新方法;二是解决了实验绪论与具体实验项目相互脱节的矛盾,使之更有机地融合;三是设计性实验紧贴相关实验项目,学生没有陌生感,稍加努力便可完成;四是与物理实验网络多媒体教学系统相互配套,易于学生自学。

参加本书编写工作的有孔令竹(实验 3、5)、史友进(实验 1、28)、殷长荣(实验 4、6、8、9、10、13、15、16、22)、杨诚成(实验 37、38、39、40、41、42、43、44、45)、程鲲(实验 2、7、11、12、14、17)、黄备兵(实验 47、48、49、50、51、52)、崔益和(绪论、第 1 章、电磁学实验基本知识、光学实验预备知识、附录 1、附录 2、附录 3、实验 18、19、20、21、23、24、25、26、27、29、30、31、32、33、34、35、36、46)。全书由崔益和组织编写并负责统稿。

在本书的编写过程中,我们参考了一些物理实验的教材,在此向有关作者谨致谢意。

本书的出版是大家共同努力的结果。在此编者特向为本书出版作出贡献的所有同志致以衷心的感谢。

本书可供高等院校工科有关专业物理实验教学之用。限于我们的水平,书中错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2008 年 6 月

第二版前言

本教材自 2003 年 12 月出版以来,已经使用了九个循环,达到了预期的效果。随着科学技术的发展、教学仪器设备的更新换代、教师教学经验的不断丰富和应用型大学人才培养理念的不断完善,我们适时对本书进行改版。

本次改版仍然按照教育部高等学校物理基础课程教学指导委员会《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》进行编写,在保留第一版的特色及风格的同时,考虑到应用型大学人才培养重在突出实践应用能力和创新能力,为此我们做了以下几方面的修改和补充。

1. 强化模块结构。本书的内容按相对独立性分为“测量误差与数据处理”、“基本实验(一)”、“基本实验(二)”、“综合性提高实验”、“计算机实测技术实验”、“设计性实验”六个模块,更便于不同专业和层次的学生选用。

2. 突出实践特色。以加强基本训练为主,让学生在学习物理实验知识、掌握实验方法、强化实验能力等方面受到系统的训练。在构建内容体系时,本书进一步注意到了“压缩验证性实验,增强综合性、设计性和开放性实验”的要求。

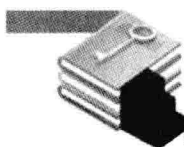
3. 注重学科发展。本书内容充分考虑到了学科发展的新趋势,使教学更好地适应现代科学技术的发展。例如,在实验内容上引入“光伏效应”和“数码照相”等新实验项目。

此次改版由崔益和、殷长荣主持,编写第一版的其他教师参与讨论,殷长荣编写实验 6、7、10、11、12、16、17;崔益和编写实验 23、24、25、31、32、55、56。

本次改版中,史友进教授审阅了全书并提出了许多中肯的修改意见。我们同时也参考了许多兄弟院校的实验教材和有关著作,在此表示衷心感谢。由于我们水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2012 年 6 月



目 录 CONTENTS

绪 论

第 1 章 测量误差和实验数据处理

§ 1 测量	(3)
§ 2 测量误差和不确定度	(3)
§ 3 系统误差的修正和消减	(6)
§ 4 随机误差的估计	(8)
§ 5 直接测量结果的不确定度	(11)
§ 6 间接测量结果的不确定度	(14)
§ 7 有效数字	(17)
§ 8 用作图法处理实验数据	(19)
§ 9 用逐差法处理实验数据	(22)
§ 10 用最小二乘法处理实验数据	(24)

第 2 章 基本实验(一)

实验 1 长度测量	(29)
实验 2 流体静力称衡法测物体的密度	(36)
实验 3 钢丝杨氏模量的测定	(39)
实验 4 刚体转动惯量的测定	(43)
实验 5 金属线膨胀系数的测定	(50)
实验 6 准稳态法测导热系数和比热容	(53)
实验 7 电磁电表的改装与校对	(61)
实验 8 模拟法测绘静电场	(67)
实验 9 自组惠斯登电桥测电阻	(71)
实验 10 金属电阻温度系数的测定	(76)
实验 11 用拉脱法测定液体表面张力系数	(78)
实验 12 落球法测定液体的粘滞系数	(82)

第 3 章 基本实验(二)

实验 13 用双臂电桥测低电阻	(89)
-----------------------	------

实验 14	用冲击电流计测电容及高电阻	(94)
实验 15	自组电位差计测电动势	(96)
实验 16	温差电偶的定标和测温	(102)
实验 17	弦振动共振波形及波的传播速度的测量	(105)
实验 18	示波器的使用	(110)
实验 19	声速测量	(116)
实验 20	铁磁材料磁滞回线的测定(智能法)	(121)
实验 21	铁磁材料磁滞回线的测定(示波器法)	(126)
实验 22	霍耳效应及其应用	(130)
实验 23	光伏效应实验	(135)
实验 24	光电效应测普朗克常数	(144)
实验 25	夫兰克-赫兹实验	(150)
实验 26	分光计的调整及三棱镜折射率的测定	(157)
实验 27	用透射光栅测定光波波长	(165)
实验 28	用牛顿环测透镜曲率半径	(167)
实验 29	用菲涅耳双棱镜测波长	(172)
实验 30	迈克尔逊干涉仪的调整和使用	(176)
实验 31	数码照相实验	(181)

第 4 章 综合性提高实验

实验 32	用波尔共振仪研究受迫振动	(185)
实验 33	弹簧振子简谐运动实验的研究(传感器法)	(192)
实验 34	用振动法测材料的杨氏(弹性)模量	(194)
实验 35	用传感器测空气相对压力系数	(199)
实验 36	密立根油滴实验	(201)
实验 37	电介质相对介电常数的测试	(207)
实验 38	偏振光的观察与分析	(210)
实验 39	单缝衍射相对光强分布的测量	(213)
实验 40	阿贝成像原理和空间滤波	(216)
实验 41	全息照相技术	(220)
实验 42	激光散斑干涉计量	(223)
实验 43	超声波探伤实验	(226)
实验 44	电阻应变式传感器的应用——电子秤实验	(230)
实验 45	扫描电子显微镜的应用	(233)
实验 46	集成电路温度传感器的特性测量及应用	(237)

第 5 章 计算机实测技术实验

实验 47	计算机实测物理实验	(240)
实验 48	用计算机实测技术研究冷却规律	(244)

实验 49	用计算机实测技术研究声波和拍	(247)
实验 50	用计算机实测技术研究弹簧振子的振动	(250)
实验 51	用计算机实测技术研究单摆	(252)
实验 52	用计算机实测技术研究点光源的光照度与距离的关系	(253)
 第 6 章 设计性实验		
实验 53	用 UJ31 型电位差计校准电表和测定电阻	(256)
实验 54	设计和组装电磁欧姆表	(260)
实验 55	数字多用表的设计与校对	(263)
实验 56	温敏电阻温度计的设计与制作	(270)
56.1	用 p-n 结温度传感器制作数字温度计	(271)
56.2	热敏电阻数字温度计的制作	(274)
56.3	用模拟电流表制作热敏电阻温度计	(276)
附录 1	中华人民共和国法定计量单位	(279)
附录 2	基本物理常数	(281)
附录 3	物理常数	(283)
参考书目		(293)

绪 论

一、开设物理实验课程的目的

物理实验课是对高等工科院校学生进行科学实验基本技能训练的基础课程. 它可使学生得到系统的实验方法和实验技能的训练, 使学生了解科学实验的主要过程和基本方法, 为今后的科学实验活动奠定初步基础. 它的物理思想、数学方法及分析问题与解决问题的方法对发展学生的智力大有裨益. 同时, 在教学活动中, 可培养学生认真、踏实的学风以及严谨的、实事求是的科学态度和科学精神, 促进学生整体素质的提高.

二、物理实验课程的任务

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. 培养和提高学生的科学实验能力. 其中包括:
 - (1) 能够自行阅读实验教材或资料, 做好实验前的准备.
 - (2) 能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器.
 - (3) 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) 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.
 - (5) 能够完成简单的、具有设计性内容的实验.
3. 培养和提高学生的科学实验素养. 要求学生具有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, 主动研究的探索精神, 遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德.

三、怎样做好物理实验

1. 做好实验要抓好三个环节.

(1) 预习. 预习是重要的准备工作. 首先要明确本次实验要达到的目的, 以此为出发点, 弄清实验所依据的理论、所采用的实验方法; 搞清控制物理过程的关键及必要的实验条件; 知道实验要进行的内容和实施的步骤, 仪器如何选择、安排和调整; 预测实验中可能出现的问题等. 在此基础上写出实验预习报告.

预习的好坏至关重要, 它将决定能否主动地、顺利地进行实验.

(2) 实验. 在实验中要弄清为何要这样安排实验及如此规定实验步骤的道理; 要掌握正确的调整操作方法; 要注意观察实验现象, 如什么现象说明调节已达到规定的要求, 观察到的现象是否与预期的一致, 这些现象说明什么问题, 出现故障如何根据现象来分析产生的原因等; 应正确地记录数据, 如正确地设计出数据表格, 正确地判断数据的科学性, 如实、清楚地记录下全部原始实验数据和必要的环境条件、仪器型号与规格以及正确的有效数字等.

实验中要做到四多(多观察、多动手、多分析、多判断)、三反对(反对存在侥幸心理、反对

机械地操作、反对做实验的盲目性)。

(3) 写出实验报告。实验报告是实验成果的文字报道,是实验过程的总结。为了写好实验报告,应该做到:认真学习实验数据的处理方法;有根据地、具体地进行不确定度分析;正确地表示出测量结果,并对结果作出合乎实际的说明和讨论;记录并分析实验中发生的现象;认真回答思考题等。

能够在实验后书写出一份字迹清楚、文理通顺、图表正确、数据完备、结果明确的报告是对大学生的起码要求,也是大学生应具备的基本能力。

2. 严格训练,培养学生的动手能力。

基础实验训练是成才的基本功练习。“不积水流,无以成江海”,严格训练要从一点一滴、一招一式做起。例如,基本仪器的正确使用,就涉及仪器的安放、连线与拆线的方法、开关顺序、调零、消视差等最基本的步骤。

做实验时不能仅满足于测几个数据,要充分利用实践机会来培养自己的动手能力。可以通过重复实验、改变实验条件或参量数值以及作对比分析来判断测量结果的正确性;遇到困难或数据超过误差极限,不要一味埋怨仪器不好,或仅简单地重做一遍,而要认真地分析、找出原因,自己动手排除障碍,尽力把实验做好。

经典物理实验集中了许多科学实验的训练内容,每个实验都包括一些具有普遍意义的实验知识、实验方法和实验技能。实验以后,可结合该实验目的和要求进行必要的归纳总结,提高自己驾驭知识的能力。例如,不同实验中体现出来的基本实验方法——比较法、放大法、模拟法、补偿法、干涉法及转换测量法等;实验中用到的数据处理的一些基本方法——列表法、作图法、逐差法、回归法等。在积累消化知识的基础上,还要注意培养自己获取和应用知识的能力,这可以结合对每个实验的分析、讨论及对思考题的探讨来进行。有兴趣的读者还可以对一些实验课题进行研究。

四、实验报告的内容

为了教学方便,我们将实验报告分为预习报告和课后报告两部分。

1. 预习报告的内容有:

(1) 实验名称。

(2) 预习思考题。

(3) 实验目的。

(4) 实验原理。包括:简要的实验理论依据,实验方法,主要计算公式及公式中各量的意义,电路图、光路图和实验装置示意图以及注意事项,有些实验还要求写出自拟的实验方案、设计的实验线路、选择的仪器等。

(5) 实验步骤。扼要地说明实验的关键步骤和主要注意事项。

(6) 数据表格。

预习报告在上课前交老师审阅,经教师认可后才能做实验。

2. 课后报告的内容有:

(1) 测量数据记录。

(2) 数据处理,包括计算公式、简单计算过程、作图、不确定度计算及最后测量结果。

(3) 实验后思考题。

课后报告与预习报告构成一份完整的实验报告。

第1章

测量误差和实验数据处理

物理实验的任务,一是在实验室条件下科学地再现自然现象;二是测量物理过程中有关物理量并找出它们之间的数量变化关系;三是通过对测量数据的误差分析和处理,科学地评价测得的物理量或物理关系接近于客观真实的程度。所以正确地进行实验误差分析和实验数据处理并掌握其原理是实验工作者必备的能力和知识。本章对这方面的知识作一入门介绍。

◆ §1 测 量 ◆

物理实验离不开测量。测量是指为确定被测对象的量值而进行的一组操作。测量操作是一种比较过程,就是把被测量和体现计量单位的标准量作比较,确定出被测量是计量单位的若干倍,这个倍数值和单位一起表示被测量的值。

测量从形式上又可分为直接测量和间接测量两类。用量具或仪表直接读出测量值的,称为直接测量。然而对于大多数物理量来说,没有直接读数用的仪表或量具,只能用间接的方法进行测量。例如,测量铜柱的密度时,可以直接用尺量出它的直径 d 和高度 h ,用天平称出它的质量 m ,则铜柱的密度可通过公式 $\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}$ 计算出来。像这样被测量的值是由直接测量值再经过物理公式计算得出的,称为间接测量。

任何测量都要追求一个“准”字。在科学技术高度发展的今天,无论是用于生产还是用于科研,对测量准确度的要求都愈来愈高。在实际工作中,并不是任何测量都要求愈准愈好,而是根据工作的实际需要而定。有人统计过,当把测量准确度提高一个数量级时,测量成本大致上也将提高一个数量级。但是任何测量在给出被测量的值的同时,必须给出准确程度的指标。一个没有说明准确度的测量结果,在科学技术上几乎是没有什么用处的数据。目前,国际社会已建议统一以“不确定度”(Uncertainty)作为测量结果准确程度的量化表示。

◆ §2 测量误差和不确定度 ◆

一、测量误差和不确定度概念

人们进行测量,总是希望获得被测量的真实大小,即被测量的客观真值。然而任何实际的测量都不可能达到绝对准确,各种不确定的误差因素始终伴随在测量过程之中,并使测量结果具有一定程度的不确定。这一点已为一切从事科学实验的人们所公认,因而称之为误差公理。

广义上讲,我们可以把某量值的给出值与其真值之差,定义为该给出值的误差.这里所讲的给出值可以是测量值、实验值、标称值、示值、计算近似值等.于是,测量误差 ΔX 可以用下式表示:

$$\Delta X = x - X. \quad (\text{Y1-1})$$

式中, x 代表测量值, X 代表被测量的真值. 由于 ΔX 反映的是测量值偏离真值的大小和方向, 因此也称为绝对误差或真误差.

与绝对误差相对应, 我们还可以引出相对误差的定义, 即

$$E_r = \frac{\Delta X}{X} \times 100\%. \quad (\text{Y1-2})$$

一般情况下误差都是比较小的, 因而计算时分母的真值 X 常用测量值 x 代替.

以上关于测量误差的定义, 可以一般地认为: 误差愈小, 测量值愈准确. 但是, 并不能直接用作测量结果准确程度的量化表示. 问题在于被测量的真值正是我们要测量的对象, 是未知的. 因而不能利用式(Y1-1)计算出测量值的真误差. 为了对测量值的准确程度给出一个量化的表述, 有必要在测量误差的基础上引入测量不确定度的概念. 它表示测量值可能变动(不能确定)的一个范围, 或者说以测量结果作为被测量真值的估计值时可能存在误差的范围, 并用在这个范围内以一定的概率包含真值. 这个范围我们可以表述为

$$\text{测量结果} = x \pm u \quad (P). \quad (\text{Y1-3})$$

式中, x 是测量值, u 是测量不确定度, P 是包含真值的概率. 仿照相对误差的定义, 我们也可以定义相对不确定度:

$$u_r = \frac{u}{x} \times 100\%. \quad (\text{Y1-4})$$

二、测量误差的来源

伴随在测量过程中的误差主要来源于以下几个方面:

(一) 仪器装置误差

任何量具、标准器、指示仪表等, 都有一定的准确度等级限度, 也就是说它们的标称值、分度值或指示值在体现计量单位时就有一定的误差范围. 一些指零仪器(如天平、检流计、水平仪等)的灵敏度也是有限度的, 在它们表观上指“零”时, 只是表明某种变化量已小到它们的灵敏度以下. 此外, 仪器装置的调整(如水平、垂直、平行、准直、零点等)达不到规定的要求, 使用时不满足规定的使用条件等还会引起附加误差.

(二) 原理方法误差

例如, 用单摆测量重力加速度实验, 在直接测摆的周期 T 和摆长 l 后, 可以通过公式 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ 计算出重力加速度. 实际上, 该公式在推导中就做了小摆角的近似, 同时还做了没有空气阻力、悬线是柔软而不伸长的假设. 这种由实验原理和方法上的某些近似处理, 给实验结果带来的误差称为原理方法误差.

(三) 环境条件误差

由于各种环境因素(如温度、湿度、气压、震动、电磁场、光照等)不能控制在所要求的状态, 或者在空间上有梯度, 在时间上有起伏, 从而引起测量装置和被测量本身发生变化造成的实验误差.

(四) 个人误差

由于实验者的生理、心理、习惯以及工作经验和能力等因素引起的误差。例如,用停表计时掐表的反应能力;估读仪表最小分度以下值时对单数或双数的偏爱;以及对成像清晰、视场亮暗、声音大小等的判断能力,在测量中表现为观测误差、估读误差、视差等。

(五) 被测量本身的起伏变化

由于自然界中一切物质都处于运动变化之中,严格地讲,测量对象的客观值应限定在某一时刻和某一位置(或状态)之下。实际上,许多测量都需要一段时间,特别是多次重复测量。比如,称量质量时,液体要蒸发,固体要吸潮,都会引起测量过程中质量的微小变化;电学测量中电压、电流的不稳定;光学测量中光源发光的不稳定等。

(六) 测量仪器对被测量的扰动

例如,测量温度时,要使温度计与被测物体接触,这个温度与原物体的温度会有一些差异。用电压表测量线路中负载的电压时,电压表的接入会对负载有一个小的分流,负载上的电流将有一小的改变。在研究电场和磁场时,探针或探测线圈的引入会改变原电场或磁场的分布。因而在设计实验时,应该仔细考虑这种扰动影响。好的测量仪器,一般都把这种扰动影响减小到仪器误差以下。

以上几方面的误差来源可以作为分析实验误差的思路。在实际工作中,常常只有一两个影响较大的因素需要仔细考虑,而其他影响较小的因素可以忽略。

三、误差的分类

从研究和处理误差的需要出发,根据误差的表现形式,可将误差分为系统误差和随机误差两类。

(一) 系统误差

系统误差的特征是:在同一条件下多次测量同一量时,误差的绝对值和方向保持恒定,或在条件改变时,误差的绝对值和方向按一定规律变化。例如,计时的停表走得快或走得慢,水银温度计零刻度偏离冰点,钢尺的受热膨胀,原理方法上的某些近似,以及观测者生理和心理上的偏向等。原则上讲,这类误差能够针对产生的原因进行消除或修正。但是在实际工作中,有时因为知识的不足,或者不需要花费更高的代价和时间去深入追究所有的系统误差,于是从对系统误差掌握的程度,又可分为已定系统误差和未定系统误差两种。已定系统误差,即产生原因、大小、正负都已知的误差,可以找出修正值对测量结果加以修正。未定系统误差可以通过改进测量方法进行消减,或者凭经验估计出它们可能产生的大小范围,而纳入到测量结果的不确定度中。

(二) 随机误差

随机误差的特征是:在同一条件下多次重复测量同一个量时,每次出现的误差大小、正负没有确定的规律,以不可预知的方式变化着。这种误差多数情况是由于对测量值影响微小的、相互独立的多种变化因素造成的综合效果。例如,各种实验条件在控制范围内的波动使测量仪器和测量对象产生的微小起伏变化,重复测量中实验者每次操作在对准、估读、判断、辨认上产生的微小差异等。由于随机误差在多次测量中,有时正时负、时大时小的特点,因而把多次测量值取平均,必然会抵消掉部分影响。

在多次重复测量取得大量数据后,虽然每一个数据中所含随机误差是不可预知的,但大

量数据中所含随机误差是按一定统计规律分布的,可以用统计方法计算出它的散布范围,纳入到测量结果的不确定度中。

(三) 误差的相互转化

系统误差和随机误差在一定条件下是可以相互转化的。例如,一米尺刻度不均匀,如果固定米尺的端面测量某一物体长度时,测量结果会产生一系统误差,若采用尺的不同刻度部分来多次测量又可把分度不均匀的误差随机化。又如,工厂成批生产的电阻对标称值的允许起伏变化是随机的,但当你买来一个电阻使用时,它所引起的误差又是固定的。一个具体测量中出现的误差往往既含有随机误差,又含有系统误差。在实验中,当实验条件稳定且系统误差可以掌握时,就尽量保持在相同条件下做实验,以便更正系统误差;当系统误差未能掌握时,常常想出一些办法使系统误差随机化,以便在多次测量取平均值中抵消其一部分。

以上所说的误差并不包括错误,如读错数、记错数、对错位置等。这种因粗心大意造成的错误,实验者是必须避免的。

习惯上常用“精密度”这个词来反映随机误差的大小程度;用“正确度”反映系统误差的大小程度;用“准确度”反映它们的综合影响。当我们说测量准确度高时,既有测量结果偏离真值小的含意,又有在同样实验条件下多次测量重复性好的含意。“准确度”有时也简称为“精度”。

◆ § 3 系统误差的修正和消减 ◆

在实验工作中发现和消减系统误差相对来说是一件较困难的工作。它既需要理论指导,又需要丰富的实验工作经验,往往是针对实际工作情况采取灵活多样的办法去解决。以下介绍的是常用的一些方法。

一、如何发现系统误差

要发现系统误差,就必须仔细研究测量理论和方法的每一步推导,检验或校准每一件仪器,分析实验理论和仪器所要求的各种实验条件是否能满足,考虑每一步调整和测量中各种因素对实验的影响情况等。下面简述几种常用的方法:

(一) 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,如用两只电流表接入同一电路中对比;改变测量步骤对比,如测某物理量与温度的关系可用升温测量与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的差异,即说明实验中存在系统误差。

(二) 理论分析法

包括分析实验所依据的理论公式要求的条件与实际情况有无差异;分析仪器所要求的使用条件是否达到了;等等。

(三) 分析数据法

这种方法的理论依据是随机误差服从一定的统计分布规律,如果结果不遵从这种规律,则说明存在系统误差。在相同的条件下得到大量数据时,可采用这种方法。

如按测量次序记录的测量数据的偏差是单向的或呈周期性变化,说明存在固定的或变

化的系统误差,因为按照偶然误差的统计分布理论,测量值的散布在时间和空间上均应是随机的。

以上只是从普遍的意义介绍了几种发现系统误差的途径,实际工作中,还会有许多种具体办法。

二、系统误差的修正和消减

能掌握的系统误差,可以通过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较低级的电表测出修正曲线等。但实际中,有时不易找到确切的系统误差值,则常在测量中设法抵消它的影响。下面介绍几种典型的从测量方法上抵消系统误差的方法。

(一) 替换法

在测量装置上对待测量进行测定后,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,从而得出待测量等于标准量。例如,用电桥测量电阻时,调平衡后,把被测电阻用可变标准电阻替换,调标准电阻值使电桥达到平衡,则标准电阻的示值即为被测电阻的阻值。这样,就消除了电桥中某些元件引起的系统误差,使待测电阻的准确度主要取决于标准电阻的准确度。

(二) 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 E 的电路中,若有温差电动势 E_0 的干扰(图 Y3-1),测出的数值 E_1 实为两电动势之差,即 $E_1 = E - E_0$ 。若将 E 反向后,再测量,则测量值 $E_2 = E + E_0$ 。将两次测量结果取平均,温差电动势引入的误差就被排除了。

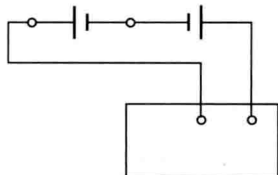


图 Y3-1 异号法示例

(三) 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,取两次测量值的平均值,就可消减滑线电阻丝不均匀引起的误差。

(四) 对称观测法

若有随时间线性变化的系统误差,可将观测程序对某时刻对称地再做一次。例如,一只灵敏电流计零点随时间有线性漂移,测量读数前记录一次零点值,测量读数后再记录一次零点值,取两次零点值的平均来修正测量值。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,取两次平均值作为该点温度值,等等。

由于很多随时间变化的误差在短时间内均可近似认为是线性变化,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常用方法。

(五) 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,测角计刻度盘偏心带来的角度测量误差是以 360° 为周期,就采取相差 180° 的一对游标,每次测量读两个数,则两个角位置之间的夹角是两个游标上分别算出的夹角的平均值。

以上仅仅列举了几种减小或消除某些简单的系统误差的方法,实际上,许多系统误差的出现,常常是由于实验所用理论的不完善,或理论背后还隐藏着未被发现的某些规律性。历史上不乏先例,系统误差的出现,促使人们更深入地进行研究并获得新的发现。

◆ § 4 随机误差的估计 ◆

一、随机误差的正态分布规律

假设系统误差已经消除,被测量本身又是稳定的(被测量本身若有较大起伏,测量结果将显示出被测量本身的统计分布),在相同的实验条件下,多次重复测量所得结果彼此互有差异,这就是随机误差引起的.造成随机误差是多种不确定因素的综合效果,如果诸多因素中并没有哪一个因素的影响超过其他因素,则尽管每一个因素的概率分布不同,甚至是未知的,但综合影响将使测量的随机误差趋于正态分布.

符合正态分布的随机误差有以下几点统计规律:

- (1) 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.
- (2) 有界性: 绝对值很大的误差出现的概率为零. 误差的绝对值不会超过某个界限值 Δ .
- (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,随机误差的算术平均值将趋于零.

根据以上统计规律,可以从数学上推导出随机误差出现的概率密度函数. 这个函数首先由德国数学家和理论物理学家高斯(Karl Friedrich Gauss)于 1795 年导出,因而称高斯分布,又称正态分布. 其函数式为

$$G(\Delta x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}}. \quad (\text{Y4-1})$$

函数的图形如图 Y4-1 所示.

式中, $\Delta x = x - X$, 表示每次测量的随机误差; $G(\Delta x)$ 是误差 Δx 出现的概率密度; σ 是该函数式的一个参量, 它的值是曲线拐点的横坐标值(与随机误差 Δx 有相同的量纲).

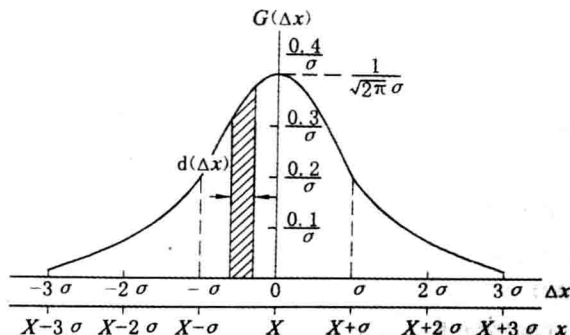


图 Y4-1 正态分布

在一定测量条件下对同一量进行多次测量,随机误差的统计分布是唯一确定的,即 σ 有一确定值. 测量条件不同,随机误差的散布不同,反映在概率密度函数上就是 σ 大小不同(图 Y4-2). σ 大,随机误差分布离散大,测量精密度低; σ 小,随机误差分布离散小,测量精密度高. 因而参量 σ 可以作为随机误差散布情况的量度. σ 的数学表达式为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{n}}. \quad (\text{Y4-2})$$

该式表示 σ 值是无穷多次测量所产生的随机误差的方均根值,称为标准误差。

从函数图形上看,坐标原点对应 $\Delta x = 0$ 。如果不是以误差值为横坐标,而是以测量值为横坐标,原点处相当于真值 X 的位置。

曲线下的总面积表示各种大小(包括正负)误差出现的总概率,当然应该是 100%。从 $\Delta x = -\sigma$ 到 $\Delta x = \sigma$ 之间的曲线下的面积可以计算出来,为总面积的 68.3%,它表示随机误差值落在区间 $[-\sigma, \sigma]$ 内的概率。根据 $|\Delta x| = |x_i - X| \leq \sigma$ 的关系,这个概率还可说成是:测量值落到区间 $[X - \sigma, X + \sigma]$ 内的次数占总测量次数的 68.3%(当总测量次数足够多时)。再一种说法是:在区间 $[x_i - \sigma, x_i + \sigma]$ 内包含真值 X 的概率是 68.3%。这后一种说法很

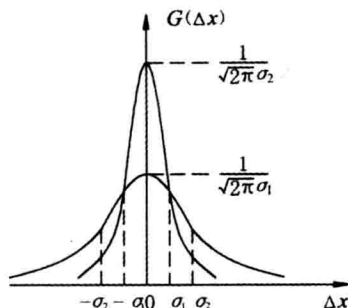


图 Y4-2 具有不同 σ 值的两个正态分布

重要,它表明对于只存在随机误差的测量值,在测量次数无限多时,如果以任意一次测量值表示测量结果,当然不知道它的真误差究竟是多少,但在 $x_i \pm \sigma$ 范围内,包含被测量真值的概率为 68.3%。这就提供了一个以一定概率包含被测量真值的量值范围来表达测量结果精密度的方法。区间 $[-\sigma, +\sigma]$ 称为置信区间,在给定置信区间内包含真值的概率 ($P=68.3\%$) 称为置信概率。扩大置信区间,置信概率就会提高。例如,在区间 $[-2\sigma, +2\sigma]$ 内,置信概率为 95.4%,在区间 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 内,置信概率为 99.7%。因而只要对测量结果给出置信区间和置信水平 P ,就表达了测量结果的精密程度。 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 这个置信区间表明随机误差超过这个范围的测量值在 1000 次测量中大约只出现 3 次左右,在一般几十次测量中,几乎不可能出现,所以将 3σ 称为极限误差。

二、有限次数测量的平均值及标准偏差

实际上测量不可能进行无限多次,只能是有限次。如果把无限多次测量结果称为总体,有限次测量(无论是测量几次,甚至仅测一次)得到的测量值,都是从这个总体中抽出的一个样本。样本在一定程度上必然带有总体的信息。从前面讨论的正态分布可知,关键是利用样本来估计总体分布的两个特征值,即真值 X 及标准误差 σ 。

(一) 算术平均值是真值 X 的最佳估计值

在测量条件不变的情况下,如果对待测量测量了 n 次,获得了 n 个测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$,取怎样的值才是真值 X 的最佳估计值呢?

随机误差的统计理论的结论是:对待测量 x 作了有限次的等精度的独立测量,结果是 $x_1, x_2, \dots, x_n$,若不存在系统误差,则这 n 个测量值的算术平均值

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Y4-3})$$

作为真值 X 的最佳估计值。也就是说, n 次等精度测量的一组数据的算术平均值就是真值的最佳估计值。所以在多次测量时,用算术平均值表示测量结果。