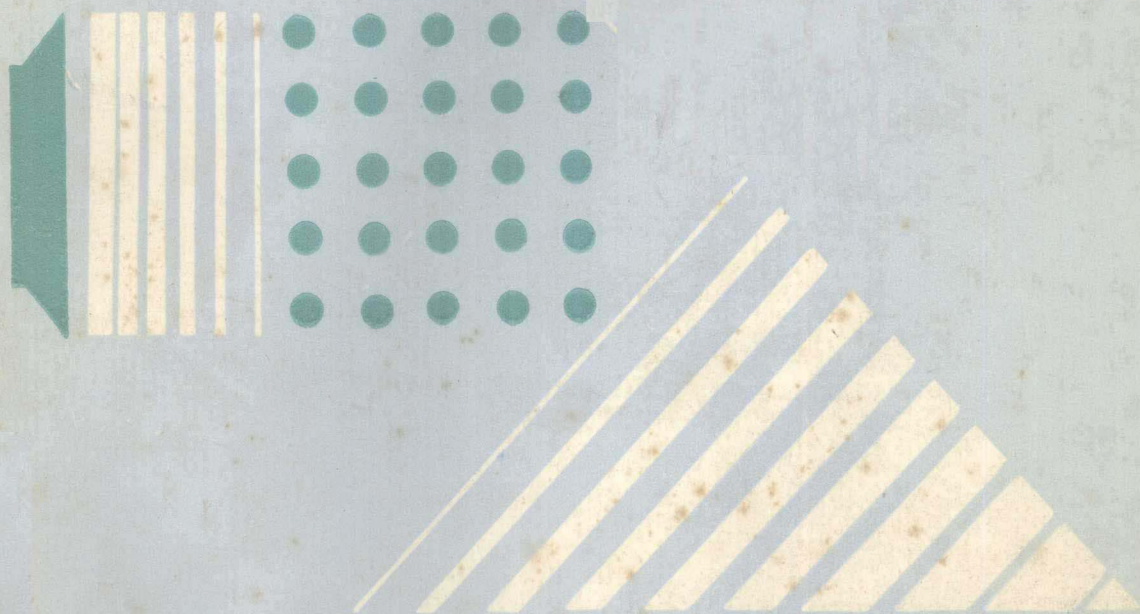


物理实验

王惠棣 柴玉瑛 邱尔瞻 郑永星 编



天津大学出版社

内 容 简 介

本书是按国家教委颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，以天津大学物理实验讲义为基础编写的大学物理实验教材。在教学要求、选题、内容以及对实验能力的培养训练等方面融合了该校长期积累的教学经验。

全书分10章，包括52个实验。在实验的预习、原理叙述、仪器使用和操作方法、数据处理和问题讨论等方面注重实验课的教学需要。一般学生借助本书可以顺利完成实验。多数实验既有体现基本训练的内容，又有进一步提高的选做或设计课题，便于师生灵活使用。

本书可供高等院校作为物理实验教材或教学参考书。

物 理 实 验

王惠棣 柴玉瑛 编
邱尔瞻 郑永星

*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省永清县印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本：787×1092毫米^{1/16} 印张：17^{3/4} 字数：443千字

1989年9月第一版 1989年9月第一次印刷

印数：1—13700

ISBN 7-5618-0149-1

O·17

定价：3.00 元

前 言

本书是按照国家教委颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，以天津大学多年使用的物理实验讲义为基础编写的物理实验教材。

书中编入的52个实验选题都是天津大学正在开设的。任课教师可以按学时数和教学要求让学生选做其中的部分实验。

本书对实验原理、主要的实验方法、常用实验仪器的正确使用以及实验记录 and 数据处理等基本知识和训练作了比较详细的介绍，力求体现一个“严”字。同时，也提出许多设计性实验，把完成这些实验的方法步骤等留给学生自己去思考，以利于发挥学生的主动性和创造性。

“测量误差和实验数据处理”一章的内容比“基本要求”略深，意图是让学生在大学一开始就能受到正规的实验训练，能按现代实验数据处理的规范要求去做。教师可以占用两次实验课的时间选讲部分内容，其余让学生自学掌握。

“物理实验常用仪器”一章简要介绍仪器结构原理和使用方法，强调有关实验常识和技术，供学生做有关实验时查阅。

实验选题按物理内容分章编写，从实验原理和操作上讲，每章都包括一些较简单和较难的实验。至于以何种教学方法（例如“传统型”的或改革中出现的“开放型”以及“单元教学型”等等）组织教学，任课教师可按实际需要确定。

作为本书编写基础的原实验讲义是由排出各实验的教师起草，并在历年使用过程中经教研室多次修订和改编逐步积累而成的，这次编写出版又得到了许多同志的支持、鼓励和帮助。

万良风教授在百忙中细致地审阅了全部书稿，并提出了许多宝贵意见。

在此，谨向上述各位同事和万良风先生致以衷心感谢。

本书由王惠棣编写绪论和第一章并负责全书的统稿修改工作；柴玉瑛编写第二章（部分）、第三章和第四章，邱尔瞻编写第二章（部分）、第五章、第六章和第七章；郑永星编写第二章（部分）、第八章、第九章和第十章。

编者真诚欢迎使用本教材的教师、同学和各位读者提出宝贵意见。

编者 1989年1月

目 录

绪论	(1)
§0-1 要重视物理实验	(1)
§0-2 物理实验课的教学目的	(1)
§0-3 物理实验课的基本程序	(2)
§0-4 实验者和仪器设备	(3)
§0-5 实验记录和报告	(3)
第一章 测量误差和实验数据处理	(5)
§1-1 单位、标准和测量	(5)
§1-2 测量误差	(6)
§1-3 系统误差的修正和限制	(8)
§1-4 偶然误差的估算	(9)
§1-5 直接测量结果置信区间的确定	(14)
§1-6 间接测量的误差传递与合成	(16)
§1-7 有效数字	(19)
§1-8 用作图法处理实验数据	(20)
§1-9 用逐差法处理实验数据	(22)
§1-10 用最小二乘法处理数据	(23)
习题	(27)
第一章复习提要	(29)
实验1 数据处理练习——长度测量	(30)
第二章 物理实验常用仪器	(35)
§2-1 物理天平和分析天平	(35)
§2-2 停表和毫秒仪	(38)
§2-3 低摩擦装置	(41)
§2-4 温度计、湿度计和气压计	(43)
§2-5 电路元件	(45)
§2-6 直流电表	(50)
§2-7 光学元件	(54)
§2-8 常用光学仪器	(57)
§2-9 光源	(60)

第三章 力学	(62)
实验 2 牛顿第二定律.....	(62)
实验 3 动量守恒和机械能守恒.....	(67)
实验 4 简谐振动.....	(71)
实验 5 曲线运动.....	(76)
实验 6 二维碰撞.....	(77)
实验 7 转动惯量.....	(80)
实验 8 转动定律.....	(84)
第四章 物性	(88)
实验 9 物质的密度.....	(88)
实验10 杨氏模量.....	(92)
实验11 表面张力.....	(96)
实验12 液体的粘度.....	(100)
实验13 气体导热系数.....	(107)
第五章 直流电测量	(113)
实验14 惠斯通电桥.....	(113)
实验15 电阻温度系数.....	(117)
实验16 用双臂电桥测低电阻.....	(120)
实验17 电位差计.....	(125)
实验18 热电偶定标.....	(130)
实验19 灵敏电流计.....	(132)
实验20 用冲击电流计测高电阻.....	(139)
第六章 电场与磁场	(144)
实验21 用模拟法测绘静电场等位面.....	(144)
实验22 利用霍尔效应测磁场.....	(147)
实验23 用冲击电流计测磁场.....	(150)
实验24 铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线.....	(152)
实验25 电子束的电偏转与磁偏转.....	(157)
实验26 电子荷质比的测定.....	(164)
第七章 电容、电感和电子学	(169)
实验27 电容器的充放电.....	(169)
实验28 三极管的伏安特性.....	(173)
实验29 交流电桥.....	(177)
实验30 示波器.....	(182)

第八章 几何光学.....	(190)
实验31 薄透镜.....	(190)
实验32 望远镜和显微镜的放大率.....	(195)
实验33 测定棱镜玻璃的折射率.....	(198)
实验34 用折射极限法测液体的折射率.....	(204)
第九章 波动光学.....	(207)
实验35 双棱镜和双面镜.....	(207)
实验36 牛顿环和劈尖干涉.....	(210)
实验37 单缝衍射.....	(213)
实验38 单缝衍射的光强分布.....	(215)
实验39 衍射光栅.....	(219)
实验40 光的偏振.....	(222)
第十章 近代物理和综合实验.....	(227)
实验41 光电效应-普朗克常数	(227)
实验42 氢原子光谱-里德伯常数	(230)
实验43 夫兰克-赫兹实验	(233)
实验44 迈克耳孙干涉仪.....	(237)
实验45 钠黄双线的波长差与光源的相干长度.....	(242)
实验46 空气的折射率.....	(245)
实验47 利用超声光栅测定液体中的声速.....	(247)
实验48 阿贝成像原理和空间滤波.....	(249)
实验49 全息照相.....	(254)
实验50 拍摄白光再现全息图.....	(258)
实验51 微波的布喇格衍射.....	(259)
实验52 盖革-弥勒计数器	(265)
附表.....	(271)
表1 具有专门名称的SI导出单位.....	(271)
表2 基本物理常数1986年国际推荐值.....	(272)
表3 在海平面上不同纬度的重力加速度.....	(272)
表4 在20℃时常用固体和液体的密度.....	(272)
表5 标准大气压下不同温度时水的密度.....	(273)
表6 在20℃时金属的杨氏模量.....	(273)
表7 在20℃时与空气接触的液体表面张力系数.....	(274)
表8 不同温度下与空气接触的水的表面张力系数.....	(274)
表9 不同温度下水的粘度.....	(274)

表10	液体的粘度.....	(274)
表11	常用材料的导热系数.....	(275)
表12	液体中的声速.....	(275)
表13	金属和合金的电阻率及其温度系数.....	(275)
表14	金属和合金对铂(化平纯)的热电动势(热端在100℃, 冷端在0℃时).....	(275)
表15	常用物质的折射率(相对空气).....	(276)
表16	常用光源的光谱线波长.....	(276)

绪 论

§ 0-1 要重视物理实验

几年的大学生活将为同学们攀登科学技术高峰打下必要的知识和能力的基础。自然科学是人类对自然的认识成果，是在长期改造自然的实践活动中积累起来的。获取并掌握自然科学知识是为了进一步改造自然。我们正处在科学技术迅猛发展的时代，仅仅在数十年的时间内了解自然和改造自然方面已取得令人惊异的进展。

人类改造自然的实践活动不外乎两种：一是生产实践，一是科学实验。所谓科学实验，是人们按照一定的研究目的，借助特定的仪器设备，人为地控制或模拟自然现象，突出主要因素，对自然事物和现象进行精密、反复地观察和测试，探索其内部的规律性。这种对自然的有目的、有控制、有组织的探索活动是现代科学技术发展的源泉。原子能、半导体和激光等最新科技成果仅仅依靠总结生产技术经验是发现不了的，只有在科学家的实验室里才会被发现。现代化的企业为了不断改进生产过程和创新产品，也十分注重实验研究工作，都建有相当规模的研究实验室。因而在大学教育中必须对学生进行科学实验能力的训练。物理实验就是这种训练的开端。

物理学是一门实验科学。无论是物理规律的发现，还是物理理论的验证，都要靠实验。例如，杨氏的干涉实验使光的波动学说得以确立；赫兹的电磁波实验使麦克斯韦的电磁场理论获得普遍承认；卢瑟福的 α 粒子散射实验揭开了原子的秘密；近代的高能粒子对撞实验使人们深入到物质的最深层——原子核和基本粒子内部来探索其规律性。在物理学发展中，人类积累了丰富的实验方法，创造出各种精密巧妙的仪器设备，涉及到广泛的物理现象，因而使物理实验课有了充实的教学内容。学生从中可以学到许多基本实验方法和实验技能，同时应用理论于实际中，加深理论知识，提高分析问题和解决问题的能力。

我国著名核物理学家张文裕教授有一段话很值得我们深思。他说：“我国古代科学技术远远领先于西方，这种辉煌成就是全世界公认的。但是，近三百多年来，却远远落后于西方。我认为主要原因是：西方自伽利略和牛顿等人倡导科学实验以来，大力发展了科学实验，而我们却仍然未动。轻视科学实验是我们的不良传统之一，也是几千年封建思想的、特别是一千多年科举制度的遗毒，这是科学不发达的重要原因。”* 让我们永远记住这个历史教训吧！

§ 0-2 物理实验课的教学目的

根据国家教委颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》的规定，物理实验是

* 为郭奕玲、沙振舜等编著的《著名物理实验及其在物理学中的作用》一书作的序。山东教育出版社，1985年。

对高等工业学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程，是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端。

本课程应在中学物理实验的基础上，按照循序渐进的原则，学习物理实验知识、方法和技能，使学生了解科学实验的主要过程与基本方法，为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。

本课程的具体任务是：

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. 培养与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，作好实验前的准备；

(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分析判断；

(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) 能够完成简单的设计性实验。

3. 培养与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和遵守纪律、爱护公共财产的优良品德。

物理实验课是一门实践性课程，学生是在自己独立工作的过程中增长知识、提高能力。因而上列教学目的能否达到，在很大程度上取决于学生自己的努力。本课程进行两个学期，每学期单独考核。

§0-3 物理实验课的基本程序

物理实验课的基本程序一般可以分为三个阶段：

1. 实验前的预习。通过阅读实验讲义和参考资料，弄清实验的目的、原理、所要使用的仪器，明确测量方法，了解实验的主要步骤及注意事项等。在此基础上写出预习笔记。预习笔记包括：实验名称、目的、仪器、原理（或计算公式）、数据表格。电学与光学还应画出简单的电路图与光路图。

2. 实验操作。实验前应首先认识和熟悉仪器，了解使用方法，然后进行仪器的安装和调整。实验过程中要按实验步骤进行，随时注意保持工作场所的清洁和井井有条，认真观察现象，正确记录数据。实验中若发现问题，应及时向教师请教，不得随意处理。如果对实验有新的想法或做题外练习，需向指导教师说明并经同意后进入。实验完毕，数据应交教师审阅签字，再将仪器整理复原后方能离开实验室。

3. 写出完整的实验报告。做完实验后，应及时处理数据，根据要求写出实验报告。文字叙述力求简练、通顺、数据齐全、图表规矩正确。实验报告包括以下内容：1) 实验名称、日期；2) 目的；3) 仪器（写明规格）；4) 原理及公式（电学实验要画电路图，光学实验要画光路图）；5) 实验简要步骤；6) 数据表格及数据处理（包括要求的图）；7) 必要的讨论（包括回答教师指定的思考问题，实验中发现的现象及其解释，对实验装置和方法的改进意见等）。

§ 0-4 实验者和仪器设备

在实验教学中，常常有些学生颠倒了实验者和仪器设备的关系，不去认真研究仪器设备的性能、优点、缺点，不善于做各种调整和简单的检修工作，把实验中出现的种种不理想情况一概归咎于仪器设备，这是对自己无能的原谅和掩饰。

使用仪器和实验操作有许多讲究，这些讲究不仅要靠别人教，更要靠自己想。例如使用米尺测量一根两端齐整的铁棒的长度，首先要确保米尺与铁棒平行（为什么？）；要使尺的刻度紧贴铁棒（为什么？）；要避免使用尺的端头（为什么？）等。使用电表之前，检查一下电表指针是否偏转自如，有没有卡针现象，必要时轻轻拍拍它，以便证明指针没被卡住。使用惠斯通电桥，注意试试它的灵敏度，判断一下是否需要更换电池。一台悬丝检流计如果在桌上放得不平稳，就应该用些纸片垫平稳了再用。接线柱松动了要用改锥和钳子把它拧紧，导线头掉了用电烙铁把它焊好，等等。这些都是一个细心的实验者该做的事情。仪器布局也要考究。在条件允许的前提下，应该尽量把仪器配置得十分方便。在实验中越是不受外界条件的牵制，读数就越不会受到影响。例如把要读数的电表放到便于眼睛直视的位置；常要操纵的开关放在左手便于接触到的地方，因为右手大多要用来写字；而需要精细调节的仪器则放在右手便于接触到的地方。环境也是实验中的重要因素，温度、湿度、振动、周围的电场、磁场、光照等都应注意。例如测量很微弱的电流时，如果接线中有的接触点接近暖气或被日光直射就会产生温差电势而影响实验结果。诸如此类，看起来非常烦琐，但都是一个实验者的必要修养。

实验能力的提高是一点一滴累积起来的。教学中选择的实验，其中包含了一些典型观测方法和物理思想，要求实验者应该把实验原理和方法彻底弄懂，在操作中对每一步的工作意义进行思考，只有这样才能加快你的实验能力的提高。

§ 0-5 实验记录和报告

做好实验记录是科学实验的一项基本功。科学实验的记录看来很平凡，但要做好却并不简单。经常有这样的现象，由于实验过程中有些条件和现象误记、漏记或数据涂改得模棱两可，而使难得的实验现象不能重复，重要的实验结果失去价值。

一个好的实验记录可以通俗地归纳为“四懂”，即：自己看得懂，别人看得懂，现在看得懂，将来也看得懂。具体如何记呢？这里提供一些方法供同学们参考。首先，应该准备一个活页的实验记录本，记录本应编好页码。在一个实验的起页上，写明实验名称，实验日期，同组人，必要时还应注明天气、室温、大气压、湿度等环境条件。接着要记下实验所用仪器装置的名称型号、规格、编号和性能情况以及被测样品的号码或者其他标记，以便以后需要时可以用来重复测量和利用仪器的准确度校核实验结果的误差。在实验记录上，关于实验原理和操作要领是作为准备实验时的备忘录而记载，因而应该简明扼要。必要的电路图、光路图、仪器简图等可以徒手画出，以节省时间。应该事先画好记录数据的表格，并且把格画大一些。实验记录，应用钢笔（不用铅笔）记录，文字、数码、符号要求写清楚，不应让别人或自己以后辨认时引起误解。数据如确有理由需要删改，应该在原数据处做一删掉记号，在

旁边重写更改的数据，并应注明更改理由。最忌讳在原数据上涂改。在实验过程中观察到的现象，出现的故障及排除的情况都要随手记录下来。

总之，实验记录应该包括所有检验实验结果时所必须的记载。实验记录是整理实验报告的底稿，一份好的实验报告，不仅应包括上述实验记录的主要内容，而且应该把原理和实验方法写清楚，特别是要对实验结果的可靠性以及结论进行必要的分析讨论。整篇报告应该做到不繁不乱、重点突出、字迹工整、一目了然。

第一章 测量误差和实验数据处理

科学实验的任务不仅要定性地观察自然现象，而且要定量测量有关的物理量以及它们之间的数量关系，通过对测量数据的误差分析和数学处理，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，以求得对自然现象本质的认识。

如果需要更深入地了解测量误差和实验数据处理方面的知识可参阅下列著作：

肖明耀编著《实验误差估计与数据处理》，科学出版社，1984；

李惕碚著《实验的数学处理》，科学出版社，1983；

龚镇雄编著《普通物理实验中的数据处理》，西北电讯工程学院出版社，1985；

[英]J.托平著《测试误差及处理方法》，中国农业机械出版社，1983。

§ 1-1 单位、标准和测量

测量是一种“比较”的过程，就是把待测量和体现计量单位的标准量作比较。这种标准须是国际公认的、唯一的、稳定不变的，例如真空中的光速，某些物质的光谱频率，或人为制定的标准“原器”，如“千克”原器等等。各种测量仪器，如米尺、秒表、天平与砝码等等，都有合乎标准的单位和与单位成倍数的标度。测量的结果都包含有这个物理量的单位和数值（单位的倍数）。

因为各个物理量之间并不是互相独立的，而是由许多物理定义和物理规律联系起来的，所以，只要人们规定了少数几个物理量的单位，其他物理量的单位就可以根据定义或物理规律推导出来。独立定义的单位叫做基本单位，所对应的物理量叫基本量。由基本单位导出的单位叫做导出单位，对应的物理量叫导出量。例如，长度的单位为米（m），质量的单位为千克（kg），物质密度 ρ 的单位就可根据定义 $\rho = m/V$ 导出为千克/米³（kg/m³）。

在物理学发展过程中曾建立过各种不同的单位制，这些单位制选取的基本量各不相同，使用中常造成混乱，给学习和工作带来许多不便。1960年国际计量大会正式通过了一种通用的适合一切计量领域的单位制，叫做国际单位制，用符号“SI”表示。SI的七个基本单位定义如下：

1. 长度单位——米（m）。米等于光在真空中299 792 458 分之一秒时间间隔内所经路径的长度。

2. 质量单位——千克（kg）。千克等于国际千克原器的质量。

3. 时间单位——秒（s）。秒是铯133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9 192 631 770个周期的持续时间。

4. 电流单位——安培（A）。在真空中，截面积可忽略的两根相距1 m的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时，若导线间相互作用力在每米长度上为 2×10^{-7} N，则每根导线中的电流为1 A。

5. 热力学温度单位——开尔文（K）。开尔文是水三相点热力学温度的1/273.16。

6. 发光强度单位——坎德拉 (cd)。坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度，该光源发出频率为 $540 \times 10^{12} \text{Hz}$ 的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 $(1/683) \text{W/sr}$ 。

7. 物质的量单位——摩尔 (mol)。

(1) 摩尔是一系统的物质的量，该系统中所包含的基本单元数与 0.012kg 碳-12 的原子数目相等。

(2) 在使用摩尔时，基本单元应予指明，可以是原子、分子、离子、电子以及其它粒子，或是这些粒子的特定组合。

除以上 7 个基本单位外，SI 制还有两个辅助单位，即平面角以弧度为单位 (rad) 和立体角以球面度为单位 (sr)。有了这几个基本单位，其它物理量的单位就全部可以导出。

为了保证单位量值的统一，国际计量局有复现单位标准的专门实验室，每个国家又都有自己的计量组织。迄今为止，我国已在五十多个物理量中，建立起一百四十二项国家基准和标准，并相应建立了量值传递系统、管理制度和专门的计量人员队伍。任何工厂生产的量具、仪表都要经过计量单位检定才能出售使用，以保证这些量具能在规定的准确度标准下体现出量度单位。

测量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，相应的物理量称为直接测得量。但对于大多数物理量来说，没有直接读数用的量具，只能用间接的办法进行测量。例如，测量铜柱的密度时，可以用米尺量出它的高 h 和直径 d ，算出体积 $V = \pi d^2 h / 4$ ，然后用天平称出它的质量 m ，则铜柱密度 $\rho = m / V = 4m / \pi d^2 h$ 。像这类测得量是由几个直接测得量再经过物理公式计算得出的称为间接测量，相应的物理量称为间接测得量。

要注意的是，在测量中区分直接测量和间接测量与制定单位制系统中的基本量和导出量二者之间没有直接联系。如上述对铜柱密度测量的例子中，如果利用手册中查得的铜柱的密度，通过测量体积来计算铜柱的质量，则质量就是间接测得量。

§ 1-2 测量误差

每一个实验者都希望能尽可能地把待测量测准。准到什么程度，要看测量的目的和研究的需要而定。有时只要用简单的方法得到一个粗略的结果就够了；有时需要用很复杂的方法得到准确度很高的结果才能揭示出所研究对象的规律。用什么方法来定量表达测量结果的准确程度呢？最容易想到的方法是，测量值与被测对象的客观真值差多少，差得多当然准确程度就低，差得少准确程度就高。如果我们以 X 表示被测量的客观真值，以 x 表示实际测量得到的测量值，则差值

$$\Delta x = x - X \quad (1-2-1)$$

就定义为测量的绝对误差。例如，假定已知一个物体的真实质量是 1.05kg ，而测量结果为 1.04kg ，则测量误差为 -0.01kg 。再比如，另一个物体的真实质量是 0.05kg ，而测量结果为 0.06kg 。则测量误差为 $+0.01 \text{kg}$ 。从绝对误差上看，一个测得值小了 0.01kg ，一个测得值大了 0.01kg ，好象两个测量准确程度相当，其实不然。很显然，评价一个测量结果的准确程度不仅看误差的绝对大小，还要看被测量本身的大小。于是，又定义出相对误差的概念，即

$$E_r = \frac{\Delta x}{X} \times 100\% \quad (1-2-2)$$

由公式 (1-2-2) 可以算出第一个测量: $E_r = \frac{-0.01}{1.05} = -0.95\%$; 而第二个测量: $E_r = \frac{+0.01}{0.05} = +20\%$ 。这就更明显地表示出, 第一个测量比第二个测量准确程度要高得多。

事实上, 所谓被测量的客观真值是不知道的。人们对客观世界建立起的“量”的概念, 只能靠测量, 能知道的只是测量值。因而以上关于误差的定义还不能用于实际中去。于是, 人们就建立起各种误差理论, 用来科学地估算测量误差。

从研究误差的需要出发, 根据误差产生的原因和性质的不同, 可将误差分为两类。

1. 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, 误差的大小和方向保持恒定, 或在条件改变时, 误差的大小和方向按一定规律变化。它来源于以下几方面: (1) 由于实验原理和实验方法不完善带来的误差。例如, 计算公式是近似的, 或忽略了一些因素的影响等。(2) 由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的误差。例如, 水银温度计零度不是在水的三相点温度, 电阻箱转盘接触电阻增大等。(3) 由于环境条件变化所引起的误差, 如室温的变化、气压的变化等。(4) 由于观测者生理或心理特点造成的。例如, 有人估计读数总偏小或偏大等。

由于系统误差在实验条件不变时有确定的大小和方向, 因此, 在同一实验条件下多次测量求平均值不能减小或消除它。必须找出产生系统误差的原因, 针对原因去消除或引入修正值对测量结果加以修正。

2. 偶然误差 (随机误差)

偶然误差的特征是在同一条件下多次测量同一个量时, 每次出现的误差时大时小, 时正时负, 没有确定的规律, 但就总体来说服从一定的统计规律。这种误差来源于多种因素的微小扰动。例如, 环境的温度、气压、电场、磁场等的微小扰动; 读数时, 每次对准标志 (刻线、指针等) 的不一致, 以及估读数的不一致; 被测对象本身的微小起伏变化等。

由于偶然误差有时正时负, 时大时小的特征, 因而多次测量取平均可以抵消部分影响。

应该指出, 把误差分为系统误差与偶然误差, 是研究误差的需要。原则上讲, 系统误差可以消除, 而偶然误差不能消除。一个具体测量中出现的误差往往既含有偶然误差, 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, 以便修正掉系统误差。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中抵消一部分。例如一支米尺刻度不均匀, 可以利用米尺不同刻度部位来测量, 然后取平均。

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”这个词来反映偶然误差的大小程度, 用“准确度”反映系统误差的大小程度, 用“精确度”反映系统误差与偶然误差的综合效果。“精确度”又常常简称为“精度”。这些词许多书中使用起来含意不尽统一, 应予以注意。

§ 1-3 系统误差的修正和限制

1. 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,分析每一个实验条件,考虑每一步调整和测量,注意每一个因素对实验的影响等。下面简述几种常用方法。

(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入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。

(2) 理论分析法

包括分析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,分析仪器所要求的使用条件是否达到了等等。

(3) 分析数据法

这种方法的理论依据是偶然误差服从一定统计分布规律,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,可用这种方法。

如:按顺序记录的测量数据的偏差是单向或周期性变化,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,会有许多具体办法。

2. 系统误差的修正和限制

能掌握的系统误差,就能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。但实际中,有时不易找出确切的系统误差值,也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。

(1) 替换法

在测量装置上对待测量进行测量后,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,从而得出待测量等于标准量。例如:在天平上称物体质量,如果采用通常测法,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 ,先利用中介物 T (例如干净的细砂)与之平衡,若天平两臂长分别为 l_1 和 l_2 ,则平衡时有 $x = (l_2/l_1) \cdot T$ 。移去待测物,换之以标准砝码 P 再与中介物 T 达平衡,则有 $P = (l_2/l_1) \cdot T$ 。于是,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 E 的电路中,若有温差电动势 $\mathcal{E}_0$ 的干扰(如图1-0-1所示)测出的数值 E_1 实为两电动势之差,即 $E_1 = E - \mathcal{E}_0$,若将

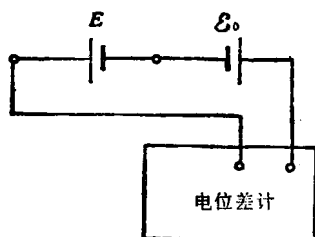


图100-1 异号法示例

E 反向后, 再测量之, 则测阻值 $E_2 = E + \mathcal{E}_0$ 。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, 取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, 在测量读数前记下一次零点值, 测量读数后再记一次零点值, 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, 就采取相距 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。

以上仅仅是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的理论不完善, 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, 促使人们去深入研究, 发现新的更精细的规律性。

§ 1 4 偶然误差的估算

1. 偶然误差的统计规律

假设系统误差已经消除, 而被测量本身又是稳定的*, 在同样条件下, 多次重复测量, 其结果彼此互有差异, 这就是偶然误差引起的。在取得大量数据后, 便能发现偶然误差的统计规律。这种统计规律表现在以下四点:

(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。

根据以上统计规律, 可以从数学上推导出偶然误差出现概率的分布函数, 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, 因而称为高斯误差分布函数也称正态分布函数。其函数式为

* 被测量本身若有很大起伏, 测量结果将显示出被测量本身的统计规律。

$$G(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-4-1)$$

函数的图形如图1-0-2所示。

式中， $\Delta x = x - X$ 表示测量的偶然误差；函数 $G(\Delta x)$ 表示在误差值为 Δx 附近单位误差间隔内，误差值 Δx 的出现概率； σ 是该函数式中唯一的参量。在一定测量条件下， σ 是一个常数，从而分布函数就唯一确定下来。测量条件不同造成偶然误差大小不同，反映在分布函数上就是 σ 大小不同（如图1-0-3）。 σ 大偶然误差离散大，测量精密度低， σ 小偶然误差

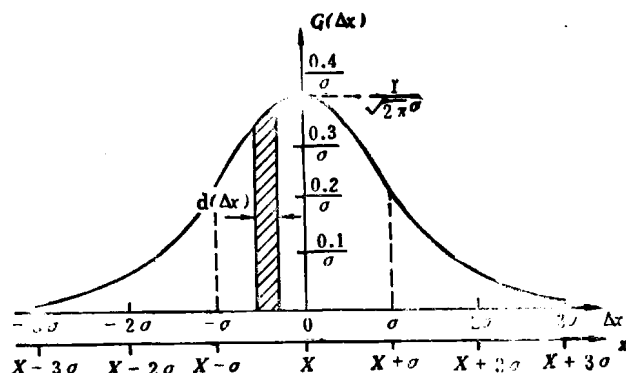


图1-0-2 正态分布

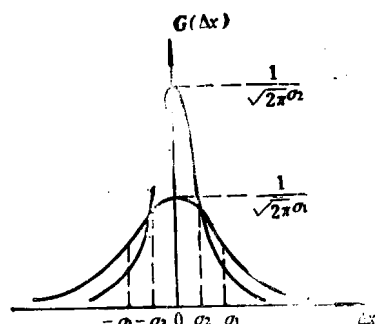


图1-0-3 具有不同参量 σ 值的两个正态分布

差离散小，测量精密度高。因而参量 σ 可以做为测量精密度的量度。 σ 的数学表达式是：

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{n}} \quad (1-4-2)$$

这个关系式称为均方根误差或标准误差。

从函数图形上看，坐标原点对应 $\Delta x = 0$ ，即相当于真值 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%。由 $\Delta x = -\sigma$ 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%，它表示偶然误差落在区间 $[-\sigma, \sigma]$ 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%（当总测量次数无限多时）；再一种说法是：在区间 $[x_i \pm \sigma]$ 内包含真值 X 的概率是68.3%。这后一种说法很重要，它表明对于只存在偶然误差的测量值，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，当然不知道它的误差究竟是多少，但在标准误差 $\pm \sigma$ 范围内，包含被测对象真值的概率为68.3%。这就提供了一个用概率来表达测量误差的方法。区间 $\pm \sigma$ 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 $[\pm 2\sigma]$ 内，置信概率为95.4%，在区间 $[\pm 3\sigma]$ 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概率 P ，就表达了测量结果的精密程度。 $\pm 3\sigma$ 这个置信区间表明偶然误差超过这个范围的测量值大约在一千次测量中只出现三次左右，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。