

大学物理实验教程

DAXUE WULI SHIYAN JIAOCHENG

李冠成
主编



中国矿业大学出版社

高等学校教学用书

大学物理实验教程

主 编 李冠成

副主编 李新华

编 者 卢佃清

吴云华

阎锡杰

王秉坤

房 毅

孟春站

朱仲淹

李 明

邵礼堂

唐小村

王鼎军

王恒民

刘 健

王素芹



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是根据“高等工业学校物理实验课程基本要求,结合“物理实验中心”的中期发展规划编写的。内容包括绪论、物理实验误差及数据处理、物理实验基本仪器、预备性实验、基本实验(包括力学、热学、电磁学、光学、近代与现代物理实验、综合性实验、设计性与开放性实验以及技术物理实验6个部分,28个实验)。本书内容丰富、覆盖面广、叙述清楚、宜于自学。

本书可作为高等工业院校本、专科及函授、夜大物理实验教材,亦可供第二课堂选用及相关人员参考。

责任编辑 朱明华

责任校对 关湘雯

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/李冠成主编. —徐州:中国矿业大学出版社,1999.12

ISBN 7-81070-092-8

I. 大… II. 李… 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 (1999) 第 52747 号

中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

出版人 解京选

中国矿业大学印刷厂印刷 新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 11 字数 265 千字

1999 年 12 月第 1 版 1999 年 12 月第 1 次印刷

印数 1~3100 册 定价 11.60 元

前 言

本书是按照国家教委高等学校工科物理课程教学指导委员会制定的“高等工业学校物理实验课程教学基本要求”，参照“物理实验教学大纲”编写的。

为了适应我国社会主义现代化建设和知识经济时代的需要，为了物理实验中心的建设以及物理学科的发展，物理实验的课程改革和教材建设必须具有时代特征，体现现代先进教育思想，以适应培养 21 世纪高素质的工程技术人才的需要。本教材的体系与内容就是根据以上精神编排和选择的。

为了培养学生的创新意识和探索精神及解决实际问题的能力，在体系上，本书虽然仍按过去的力学、热学、电学、光学、近代物理的旧体系排列，但在具体教学时，根据各系专业特点，将相关内容的实验组合成若干个实验教学模块，在教学模块中尝试用同一方法解决不同的问题和同一问题用不同的方法解决的教学方法，以培养学生的发散性思维和综合运用知识进行独立设计的能力。

在内容上，删除了陈旧的实验，增开能培养学生工程意识、适合现代科技要求的实验内容。这部分内容注意了现代科技新手段、新技术的运用及实验新领域的开拓，并注意用现代教学仪器改造传统实验，用现代电子技术、信息处理技术实现测量手段及数据处理的现代化。

在教学组织上，根据各系专业特点加大了选做、综合性、设计性及开放性实验的比重。

每个实验的编写包括下列部分：首先，对该实验的意义、历史和应用进行说明；其次，在“目的要求”中改变一般教材过于笼统的缺点，详细列出该实验从原理、方法、仪器到数据处理的明确、具体的要求；接下来依次是实验原理、仪器装置、实验内容、数据处理、注意事项、数据表格的分别叙述，避免了原理、仪器、步骤、处理等混在一起，区分不清，头绪较乱的缺点，最后是思考问题。各部分在叙述上注意要点明确，便于自学。

本书物理学名词已按 1996 年全国自然科学名词审定委员会公布的“物理学名词”订正。

编写本书过程中借鉴和参阅了兄弟院校的有关教材，谨表谢意！

物理实验课程的体系与内容应如何改革是新的课题。由于编者水平有限，错误之处在所难免，恳请批评指正！

编 者

1999 年 10 月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 大学物理实验的作用和地位	(1)
§ 1-2 物理实验课的教学组织	(3)
第二章 测量误差与数据处理	(6)
§ 2-1 测量与误差的概念	(6)
一、测量与误差	(6)
二、系统误差与随机误差	(8)
三、分布与随机误差	(10)
四、系统误差的发现与对策	(13)
§ 2-2 测量结果的表示	(15)
§ 2-3 测量结果的不确定度	(16)
一、测量结果不确定度的概念	(16)
二、直接测量量不确定度的估算	(17)
三、间接测量量的最佳估值	(20)
四、间接测量量不确定度的评定	(21)
五、直接测量量不确定度的贡献	(23)
六、微小误差准则	(24)
§ 2-4 有效数字与数字修约	(26)
一、有效数字与读数规则	(26)
二、测量结果的表示与数字修约	(27)
§ 2-5 数据处理	(28)
一、列表法	(28)
二、作图法	(29)
三、最小二乘法	(31)
四、逐差法	(33)
第三章 常用仪器介绍	(36)
§ 3-1 常用力学、热学仪器	(36)
§ 3-2 常用电学、光学仪器	(40)
§ 3-3 基本和常用的物理常数	(47)
第四章 力学、热学和声学实验	(54)
实验一 固体密度的测定	(54)
实验二 用自由落体法测定重力加速度	(56)

* 实验三	杨氏弹性模量测定	(58)
* * 实验四	牛顿第二定律和动量守恒定律的验证	(62)
* 实验五	用三线扭摆法测量物体的转动惯量	(66)
实验六	用拉脱法测量液体的表面张力系数	(69)
实验七	落球法测定粘滞系数	(73)
实验八	制冷循环实验及制冷系数的测量	(74)
实验九	空气中声速的测定	(81)
第五章	电磁学实验	(85)
实验十	用模拟法测绘静电场	(85)
实验十一	用电桥测量电阻	(90)
* 实验十二	用电位差计测量电动势	(95)
实验十三	示波器的使用	(100)
实验十四	学习灵敏检流计的使用	(103)
实验十五	线性电阻与非线性电阻的伏安特性曲线	(107)
* 实验十六	用霍耳效应法测量磁场	(111)
实验十七	电子荷质比的测定	(116)
第六章	光学和近代物理学实验	(119)
* 实验十八	薄透镜焦距的测定	(119)
实验十九	光的干涉	(121)
实验二十	光栅常数的测定	(123)
实验二十一	偏振光的实验研究	(125)
实验二十二	迈克尔逊干涉仪	(129)
实验二十三	全息照相	(132)
实验二十四	电子电荷的测定——密立根油滴实验	(134)
* * 实验二十五	夫兰克—赫兹实验	(138)
* * 实验二十六	光电效应普朗克常数测定	(144)
第七章	核磁共振及光纤传感实验	(151)
§ 7-1	磁共振的基本原理	(151)
实验二十七	核磁共振实验	(154)
§ 7-2	光纤传感器的特点和基本原理	(158)
实验二十八	光纤位移传感器实验	(159)
实验二十九	光纤振动传感器实验	(163)
实验三十	光纤转速传感器实验	(166)

注：* 为设计性实验；* * 为综合性实验。

第一章 绪 论

§ 1-1 大学物理实验的作用和地位

一、物理实验的作用

物理学是研究物质运动规律、物质结构及相互作用的科学。

物理学是自然科学的基础,物理学的一些分支学科是当代科学技术的前沿学科,它的发展与突破总是标志着人类征服自然界的新的里程碑。

物理学按其研究方法,可分为实验物理与理论物理两大分支。理论物理从一系列的基本原则(如质量守恒、能量守恒、万有引力定律……)出发,经过数学的推演得出结果,并将结果与观测和实验相比较,从而达到理解现象、预测未知的目的。实验物理以观测和实验为手段来发现新的物理规律,检验理论物理的结论,同时也为理论物理提供新的研究课题。两个分支相辅相成,共同推动着物理学蓬勃发展。

物理实验是在人为条件下再现物理现象,并对现象进行观测,对测量结果进行分析的过程。因而,物理实验是人们对自然界进行积极探索的一个组成部分。物理实验是发现物理规律、建立物理概念的源泉,检验物理理论的手段,开发工程技术的基础。下面举例说明物理实验的作用。

(一) 伽利略用实验纠正了欧洲人长达 2000 年关于力的错误概念

在历史上,用实验澄清科学概念的事件不胜枚举。在 16 世纪,伽利略以其多年的潜心研究,在巧妙设计实验的基础上建立了自由落体定律,从而推翻了统治欧洲长达 2000 年的错误观念——力是维持物体运动的原因。伽利略重视实验,重视实验方法与技巧,同时又重视实验研究与数学推理结合。这是研究物理学的正确方法。也正因为如此,爱因斯坦给伽利略以极高的评价:“伽利略的发现以及他所用的科学推理方法是人类思想史上最伟大的成就之一,标志着物理学的开端。”

(二) 在电磁学发展的各阶段中物理实验是理论的先导与裁判

电磁学的发展可划分为三个阶段,由实验总结出基本定律、建立麦克斯韦方程组和实验验证方程组的推论。麦克斯韦在前人实验工作的基础上,依靠他高超而又纯熟的数学技巧及敏锐的物理思想于 1864 年建立了完整的电磁场理论,多年后又预言了电磁波的存在。然而,当时并没有得到人们的普遍承认与重视。直到 1888 年,赫兹用实验证实了电磁波的存在,才极大地增强了人们对麦克斯韦理论的关注,并被公认为科学的真理。

(三) 物理实验事实与经典物理学理论之间的矛盾孕育着近代物理学

经典物理学在 19 世纪获得了全面的发展,形成了力学、光学、电磁学和热力学的完整体系。当时,许多物理学家对物理学的定律深信不疑,认为今后物理学的任务仅仅在于已知定律的应用和进行更为精确的测量。然而就在这庆幸物理学“成熟”的时期,一系列实验事实给

予了物理学发展的新动力。1900年,开尔文指出,在物理学上空形成了“乌云”。第一朵乌云是迈克尔逊-莫雷实验结果与经典电磁理论关于存在以太的预言相矛盾;第二朵乌云是黑体辐射能量密度按波长分布的实验结果与分子运动论的重要结论——能量均分定理相矛盾。当时物理学上空远不止这两朵乌云,经典物理学陷入了危机。

“乌云”促进了物理学理论的发展。此后,爱因斯坦提出了符合实验而违反经典物理学的假设(相对性原理与光速不变原理),建立了相对论;普朗克提出了符合实验而违反经典物理学的假设(谐振子能量量子化),25年后建立了量子力学。相对论与量子力学构成了近代物理学的两大分支。由此可见,近代物理学诞生的必要条件是物理实验。

二、大学物理实验是工程技术的基础

从物理学的观点看,在工程技术领域中人们从事的工作主要是材料的制作、加工、转运以及对生产条件的控制。这些工作与测量密切相关,不进行测量或测量失去了应有的准确程度必将带来混乱。这里举一个最简单的例子,若电机的轴径大于孔径,轴就不可能在该孔内正常转动。可以说,测量是工程技术的生命。工程技术中绝大部分的测量(如长度、角度、时间、质量、力、电流、电压……)都是物理量的测量,这些量的测量方法与技巧多是物理实验中测量方法与技巧的移置或推广。工程技术要不断地探索新理论、新材料、新方法、新工艺,以求提高质量、降低成本,为此要进行科学实验,有关实验的设计、方法的确定、仪器的选择、数据的处理等等同样也多是物理实验的移置与推广。正是在这个意义上说,大学物理实验课是工科学生必修的基础课。大学物理实验课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。大学物理实验课的任务是繁重的,对学生的影响也是深远的。工科院校设置大学物理实验课是国内外教育专家的共识,是历史上正反两个方面经验的总结。有人认为,大学物理实验“不结合专业”,其实这正是本门课的特点,正是在未来能发挥作用的原因;有人认为“学了无用”,这是目光短浅的庸人之见。

三、大学物理实验课的任务与基本要求

(一) 大学物理实验课的任务

大学物理实验课要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。大学物理实验课的具体任务是:

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. 培养和提高学生的科学实验能力。其中包括:

自学能力 能够自行阅读实验教材或资料,做好实验前的准备;

动手能力 能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器并完成实验操作;

分析能力 能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断;

表达能力 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;

设计能力 能够完成简单的设计性实验。

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和遵守纪律、爱护公共财产的优良品德。

(二) 大学物理实验课对学生的基本要求

1. 能够自行完成预习、进行实验和撰写报告等主要实验程序。
2. 能够调整常用实验装置,并掌握基本的操作技术。例如,零位校准、水平或铅直调整、光路的共轴调整、视差的消除、逐次逼近调节和根据给定的电路图正确接线等。
3. 熟悉物理实验中基本的实验方法和测量方法。例如,比较、放大、转换、模拟、补偿、平衡和干涉等方法。
4. 能够进行常用物理量的一般测量。例如,长度、质量、时间、热量、温度、电流、电压、电动势、电阻、磁感应强度、折射率等。
5. 了解常用仪器的性能,并学会使用方法。例如,测长度仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、直流电表、直流电桥、电位差计、通用示波器、低频信号发生器、分光计、常用电源和常用光源等。

在进行以上各项基本训练的过程中,要重视对物理现象的观察和分析,运用理论去指导实践,解决实验中的问题。

§ 1-2 物理实验课的教学组织

大学物理实验课的性质、内容、任务以及教学条件决定了它具有特殊的系统性,要求大学物理实验课与大学物理课同步并行是不切实际的。

学好大学物理实验课不是一件容易的事。下面提出一些建议并说明一些教学上的规定。

一、怎样学好大学物理实验课

1. 坚持从四个方面下功夫。几乎在每个实验中都要涉及四个方面的内容:实验理论(包括每个实验的原理与物理实验的基本知识),仪器的结构,原理与操作,现象的观察与分析,数据处理。只有那些不以获得实验数据为满足,又在上述四个方面下功夫的人才有可能真正地提高科学实验能力。

2. 养成观察现象、分析现象的良好习惯。对一次实验课来说,重要的不是简单地取得一个合理的数据,而是通过不断地观察分析,达到熟悉仪器、了解实验方法、测量方法的目的。特别要注意观察异常现象,并努力分析出现异常的原因。

3. 最好对讲义的叙述提出可能的反思,提出你认为更好的测量方案。如果有可能,就用实验去证实新方案是否合理(但必须保障人员及仪器的安全)。

二、大学物理实验课的三个教学阶段

大学物理实验课是学生在教师指导下独立进行的一种实践活动。教学的效果直接与学生自己的主观努力有关。每一个实验的学习过程都可分为三个阶段:预习阶段、操作阶段、复习与完成实验报告阶段。下面分别说明各个阶段中,学生的任务与验收要求。

(一) 预习阶段(实验课前)

学生的任务:

1. 阅读实验教材指定的内容,做到熟悉[预习要求]所提出的各种问题。
2. 写出预习报告,预习报告的内容包括实验名称、实验目的、实验原理与记录表格。学生无预习报告不得进实验室。实验测得的原始数据填在记录表格内,老师签字后方可算做完了实验。实验课后学生还要按要求写出正式的实验报告,并把预习报告贴在正式报告后面,由实验组长收齐,在下一一次做实验时交给指导老师批改。

预习是非常重要的学习阶段。只有在充分准备之后才能在操作中从容地观察现象,思考问题。历年的经验说明,对实验有较大收获的人都是在预习阶段肯下功夫的人。充分预习可以收到事半功倍的效果。

检查与要求:没有完成预习阶段任务者不得进行实验。

(二) 操作阶段(实验课上)

学生的任务:

1. 应记录:① 实验设备编组号、实验装置、仪器的名称与型号;② 实验室提供的数据;③ 测量的数据。

2. 调整仪器,进行测量,观察分析现象,理解(观察与思考)的问题。

对实验课来说,数据是实验的成果,在实验报告中占有重要的地位,这是有形的,也是容易获得的东西。但是,对无形的东西——正确地使用仪器、了解实验方法与测量方法往往容易忽视。应该注意,在学习阶段,这是比数据更为宝贵的东西。为此,学生在重视实验数据的同时,必须以极大的努力注意观察分析现象,尤其要注意分析实验中的各种异常现象(非正常操作或仪器不正常时出现的现象),并力求做到能独立排除故障。

检查与要求:

学生离开实验室前,教师要审查数据、检查仪器,对不合格者不予签字。

(三) 复习与完成实验报告阶段(实验课后)

不能把取得实验数据当作实验学习的终结。在实验操作阶段会遇到许多仪器结构、现象解释、操作步骤的问题,课后要结合教材重新回顾,把感性知识理论化是必要的。在复习的基础上撰写实验报告。

学生的任务:

(1) 通过复习全面理解本实验的原理、仪器、现象及数据处理方法。

(2) 撰写实验报告并给出必要的分析或讨论。

检查与要求:

下次实验课前交实验报告,教师批阅后评定成绩。

三、实验报告的内容

1. 实验名称。

2. 实验目的。指本实验中测量哪个物理量或研究什么规律(不要写教学目的)。

3. 实验原理。在充分阅读有关资料,掌握实验原理的基础上,用高度概括的语言写出计算公式的导出线索(只说过程,不要推导),并明确写出计算公式,要指出用什么仪器测量哪些量、画出电路图或光路图。

4. 实验仪器。包括仪器名称、型号、量具名称与材料。

5. 实验数据。实验数据是测量工作的结晶,是宝贵的财富,应妥善保存,实验课后应重新在实验报告上画好记录表格。用钢笔或圆珠笔工整的楷书写数据,不允许用草稿纸、小纸片草率记录。

6. 数据处理。数据处理是用数学手段对测量数据的再提炼。在书写这部分内容时要注意以下几点:

① 使用公式计算间接测量量时须先写出公式,代入数值,再写出答案,并注明单位,缺一不可。

② 一般物理量测量的最后结果写成下列形式:

$$N = \bar{N} \pm \sigma(\text{单位}) \textcircled{1}$$

③ 曲线必须画在坐标纸上,图上醒目地标出实验点,坐标轴要有名称、分度值及单位。

7. 分析、讨论或体会。分析讨论的问题可以是不确定度问题(定性或定量地说明,尤其是当测量值与公认值或给定值有较大差别时,更应注意分析误差的来源),也可以是在实验中你所感兴趣现象的分析,也可以是你实验方法或实验装置的新建议。

四、有关成绩的几点说明

1. 物理实验课是重点基础课程。为促进学生期末全面复习,系统掌握物理实验课的内容,学生的总评成绩以期末考试的成绩为主。

2. 教师对学生在实验室的表现评定“印象分”,并在实验记录纸上签字时注明。

3. 实验测量完毕,仪器、桌凳的整理是实验训练的一个组成部分,在学生学习成绩中占有一定的比重。每次实验课后留两名同学(值日)负责整理实验室卫生。

4. 期末考试的方法与内容。期末考试有两种形式:一种形式是“有操作的考试”,考试地点在实验室;另一种形式是“笔试”,考试地点在教室。但是,不论哪种形式的考试都将涉及到实验理论、仪器的结构、原理与操作、现象分析与数据处理四个部分的内容。

① 此式的意义见 § 2-3-1

第二章 测量误差与数据处理

一切科学实验,不论实验方案多么完善,操作者多么细心,测量误差是永远不可能消除的。误差理论以数学为工具,研究误差的起因、性质、规律,分析计算方法以及如何减小误差等问题。误差理论与数据处理是不可分割的两个部分,已经形成了一门科学,受到科技界的极大重视。大多数实验都要进行误差分析,其目的是评定测量结果的可信赖程度,指出可能减少误差的方法。

误差理论以概率论和数理统计为其数学基础,近年来误差理论的基本概念与数据处理的方法发展很快。对低年级的学生来说,这一部分的内容难度很大。本书仅限于简单介绍误差分析的初步知识,在材料的取舍上,着眼于几个重要概念以及最简单情况下的处理方法,并作一些简化处理,不进行严密的论证。

§ 2-1 测量与误差的概念

本节首先介绍误差理论中常见的几个名词,然后说明如何发现与处理系统误差。

一、测量与误差

(一) 量与量的单位

(可测)量是现象、物体和物质可以定性区别和定量确定的一种属性,用于定量描述物理现象的量是物理量,一般可简称为量。量由数值与单位两部分组合而成。

根据国际标准化组织(ISO)编辑出版的 ISO 标准手册 2(1982)和我国国家标准 GB 3100~3102-93,物理量按其学科可划分为 11 类。

1. 空间和时间的量,如长度、角度、时间、速度等;
2. 周期及其有关现象的量,如频率、波长、振幅、阻尼系数等;
3. 力学的量,如质量、密度、力、功、能、流量等;
4. 热学的量,如热力学温度、热量、热容、热导率等;
5. 电学和磁学的量,如电流、电位(电势)、磁通量、磁导率等;
6. 光及有关电磁辐射的量,如发光强度、光通量、照度、辐射强度等;
7. 声学的量,如声压、声速、声强、声功率等;
8. 物理化学和分子物理学的量,如物质的量、阿伏加德罗常数、摩尔质量、渗透压、玻耳兹曼常数等;
9. 原子物理学和核物理学的量,如原子质量、电子质量、普朗克常量、里德伯常量等;
10. 核反应和电离辐射的量,如粒子通量密度、能通量密度、活度、吸收剂量等;
11. 固体物理学的量,如霍耳系数、汤姆逊系数、里查逊常量等。

工程上常见的量除了上述物理量外还有物质的硬度、表面粗糙度、感光度等等。然而,就

量的种类而言,可以毫不夸张地说,工程上绝大部分的测量都是对物理量的测量。

量的单位是表述测量结果必不可少的一个组成部分。1984年2月27日我国国务院发布统一实行法定计量单位的命令,规定了以国际单位制(国际上简称SI)为我国法定计量单位的基础,一切属于国际单位制的单位都是我国的法定计量单位。

(二) 测量

测量是人类认识自然、改造自然必不可少的手段。物理实验是一门定量的科学,研究物理量的测量原理、测量方法、测量装置、以及测量结果的准确度。

1. 测量:以确定被测对象量值为目的的一组操作称为测量。粗略地说,测量就是把被测量与选作计量单位的同类量进行比较,确定其倍数的过程。按是否直接获得测量值,测量可分为两类:直接测量与间接测量。

2. 直接测量:直接测量就是把被测量与选作计量单位的同类量直接相比,由仪器(或量具)上直接读出测量结果的方法。如用米尺或游标卡尺测长,用停表测时间,用箱式惠斯登电桥测电阻,用箱式电位差计测电势差……都属于直接测量。直接测量中的被测量称为直接测量量。

3. 间接测量:凡是需先由直接测量获得数据,利用已知的函数关系经过运算才能得到待测量数值的那种测量方法就是间接测量。例如,直接测量球体直径 d ,而后按函数关系

$$V = \frac{1}{6} \pi d^3$$

算出球体体积 V ,对球体体积的测量就是间接测量。

间接测量中的被测量称为间接测量量。在上例中, d 是直接测量量, V 是间接测量量。

4. 测量条件:测量条件是指一切能影响测量结果、本质上又可控制的全部因素。测量条件包括有:进行测量的人、测量方法、测量仪器及其调整方法、环境条件等。环境条件是指测量过程中环境的温度、湿度、大气压力、气流、振动、辐射强度等等。

在科研与工程测量过程中应遵守下列原则:测量仪器须检定合格、放置得当、处于良好的工作状态,操作员熟悉操作要领,避免危及人或仪器的危险举止,保持清洁卫生。

(三) 误差

1. 误差

测量误差简称误差。误差定义为测量结果与被测量真值之差。即

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

一切测量结果都含有误差。同一个物理量,即使由同一个人,用同一台仪器,在相同的条件下进行多次测量,各次测量的结果一般也不完全相同,更不一定等于待测量的真值。测量与误差是形影不离的。测量误差来自多个方面,如测量方法与测量仪器、测量环境、操作人员等等方面。

2. 真值与偏差

当某量能被完全确定并能排除所有测量上的缺陷时,通过测量所得的量值称为该量的真值。但是,一个物理量的完善定义极其困难,人们也不能排除测量中的所有缺陷。因而,可以说,一个量的真值是一个理想的概念。某些单位制中的基本量的真值是已知的。例如,在国际单位制中,国际千克原器的质量是1 kg,光在真空中经过 $1/299\,792\,458$ s走过的距离是1 m,水的三相点的温度是273.16 K……这些值都是对应物理量的真值。大学物理实验课

中所测物理量的真值都是不知道的,为了进行某些计算,常采用公认值或较高准确度仪器的测量或多次测量的平均值近似地代替真值,称为约定真值。

测量值与约定真值之差不是误差,称为偏差。在多次测量的情况下,某次测量值与测量平均值之差就是该次测量值对平均值的偏差。在误差分析中,要经常计算这种偏差。

3. 绝对误差与相对误差

设待测量的真值为 N_0 , 测量值为 N , 由误差的定义得测量误差 ΔN 。

$$\Delta N = N - N_0 \quad (2-1-1)$$

这里的误差就称为绝对误差。由上式可见:绝对误差的符号可正可负,绝对误差不是误差的绝对值。相对误差是绝对误差与真值之比,常用符号 E 表示

$$E = \frac{\Delta N}{N_0} \times 100\%$$

其值一般用百分数表示,用于表示测量结果的相对准确度。一般情况下, $\Delta N \leq N_0$, 而且真值 N_0 不知道,所以计算相对误差时常用约定真值 N 代替 N_0 。在这情况下, N_0 位置是公认值或高一级精密仪器的测量值或测量结果的平均值。

二、系统误差与随机误差

为了便于理解系统误差与随机误差,首先介绍一点统计规律的概念。

(一) 确定性规律与统计性规律

从数学观点来看,自然界中存在着两种类型的规律:确定性规律与统计性规律。这两种规律分别与两类现象相对应。

1. 确定性规律:服从确定性规律的现象具有的特点是,在一定条件下,某个结果一定会出现。例如,同性电荷相斥。这里,电荷同性为条件,相斥是结果,可用函数关系——库仑定律描述条件与结果的关系。显然,这种现象的结果是可以预测的。

2. 统计性规律:服从统计性规律的现象具有的特点是,在一定条件下,某个结果可能出现,也可能不出现。例如,上抛的硬币,下落后国徽朝上既不是一定的,也不是不可能的。国徽朝上这一结果具有偶然性,每次抛掷的结果事先都是不可预言的,然而,尽管不可预言,实验证明,大量抛掷后,国徽朝上的机会约为 $1/2$ 。这就表明,这类事先不可预测结果的现象也存在着规律性。寻找这种规律的最原始的方法是对大量的数据进行统计分析。这正是将其称为统计规律的原因。

完善地描述统计规律的数学方法有分布函数或分布密度函数。

【例 1】 人口按年龄的分布可以用人口按年龄的分布函数去描述。所谓人口按年龄(比例)的分布函数就是小于某一年龄(年龄是自变量)的人口比例数。

【例 2】 气体分子按速率的分布可以用气体分子按速率(比例)的分布函数描述。数学上已总结出来的分布有多种,本书将提到的有正态分布与均匀分布两种。应该注意,用分布函数描述统计规律并没有改变被描述现象的随机性。前面两例中“比例数”一词换用“概率”更为恰当,因为反映比例数的分布函数的值是概率。

通常把误差按性质和特点划分为两类:系统误差与随机误差。

(二) 系统误差

在同一量的多次测量过程中,保持恒定或以可预知方式变化的测量误差分量叫做系统误差。系统误差服从确定性规律。让我们举一个最简单的例子,一个米尺,零点端磨掉了

0.2 mm。若仍以尺端为计长的始点进行测量时,测量值将总比真值大 0.2 mm(假设没有其他误差)。这 0.2 mm 的误差是尺子缺陷引起的,属于系统误差。

(三) 随机误差

实验中发现,在对同一量进行多次测量的过程中,测量值不完全相同,即测量的读数值是分散的。其原因是,测量过程中环境条件、进行测量人的技术状态以及被测对象自身都存在微小的随机性的波动。正是由于波动的随机性,即使进行多次测量后,也无法预言下一次的测量结果。例如,用一个焦距约为 20 cm 的凸透镜使日光灯在墙上成像。凸透镜的位置由成像是否清楚来确定。当进行多次测量后,你会发现,凸透镜各次的位置明显不同。这是人眼对成像清晰程度辨认能力不足引起的随机误差。然而,在进行大量测量后又会发现,这些测量值服从一种分布,即测量值小于某个值的概率是确定的。像这样一类在对同一量进行多次测量过程中,误差以不可预知方式变化的测量误差分量称为随机误差。随机误差中,数学期望值为零的那种随机误差称为偶然误差。

(四) 系统误差与随机误差的关系

前面我们分别独立地介绍了系统误差与随机误差,可能形成一种印象,似乎这两种误差截然不同,互不相关。其实并非如此,现在补充两点说明:

1. 在任何一次测量中,误差既不会是单纯的系统误差,也不会是单纯的随机误差,而是两者兼而有之,各自占有的比例与具体的测量有关,不能一概而论。然而,在以后的讨论中,我们需要单独地谈一种误差。此时,应该意识到,另一种误差并非没有,而是假设不存在。

2. 两种误差之间没有严格的分界线。在实际测量中,有许多误差是无法准确判断其从属类型的。不仅如此,随着测量技术水平的提高,人们对环境条件中随机变动规律的认识及其控制能力也将提高,于是,随机误差的一部分将转变为系统误差。由此可知,尽管人们把误差分为系统误差和随机误差,但是这种分类方法并不是完美的。

(五) 精密度、正确度、准确度与等精度测量

1. 精密度(Precision)——表示测量数据集中的程度。它反映随机误差的大小与系统误差无关。测量精密度高,则数据集中,随机误差小。

2. 正确度(Correctness)——表示测量值与真值符合的程度。它反映系统误差的大小与随机误差无关。测量的正确度高,则平均值对真值的偏离小,系统误差小。

3. 准确度(Accuracy)——是对测量数据的精密度与正确度的综合评定。测量的准确度高,说明测量数据比较集中而且接近真值,即系统误差与随机误差都比较小。

用打靶时弹着点的分布可以说明上面的三个名词,见图 2-1-1。图 2-1-1(a)表示精密度高而正确度低;(b)表示正确度高而精密度低;(c)表示精密度与正确度都高,即准确度高。

4. 精度——精度不是一个含义确切的名词,一般情况下多指准确度,用于定性地说明问题。

5. 等精度测量——在测量条件相同的情况下进行的一系列测量就是等精度测量。例如,由同一个人在同样的环境条件下,在同一仪器上采用同样测量方法对同一被测量进行多次测量,每次测量的可靠程度都相同,没有任何理由认为某个测量值比另一个测量值更为准确。这些测量就是等精度测量。在对同一量进行多次测量的过程中,若改变测量条件,如更换仪器、更换测量方法、更换测量参数、更换测量人员等,那么在测量条件变更前后,测量结果的准确度不会相同。这样的测量系列就称为不等精度测量。

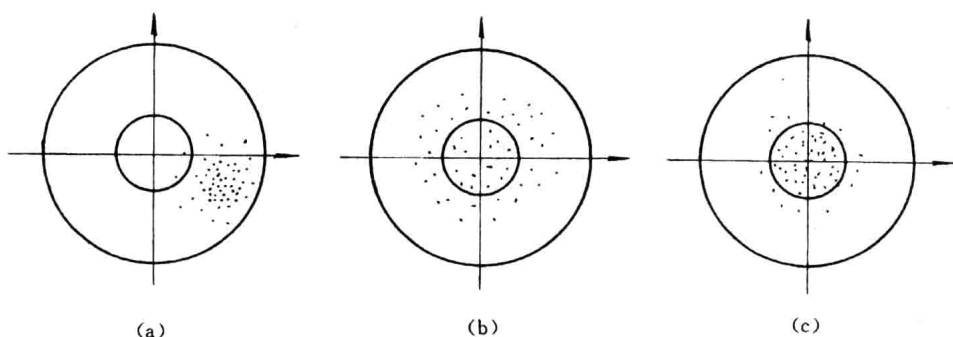


图 2-1-1 弹着点的分布

大学物理实验一般都采用等精度测量,本书也只限于介绍等精度测量的数据处理方法。

三、分布与随机误差

本节从人口分布谈起,重点介绍正态分布与均匀分布及其描述分布的两个特征参数的计算方法,最后说明粗大误差的处理方法。

(一) 人口按年龄的分布规律

统计规律用分布描述,分布可以用图形表示。例如,人口按年龄的分布规律用图 2-1-2 (a)与(b)描述。图 2-1-2(a)的纵坐标 P 是概率,横坐标 N 是年龄。该图表示出:人口小于某一年龄的概率;随着年龄的增加曲线纵坐标的高度(概率)不断上升,向概率等于 1 逼近。图 2-1-2(b)的纵坐标 f 是概率密度,表示某一年龄人口的(概率)密度,曲线反映出某国 1992 年年龄是 23 岁的人口密度最大,对应着曲线的峰值。曲线也反映出超过 100 岁以后,随着年龄的增加人口密度趋近于 0。

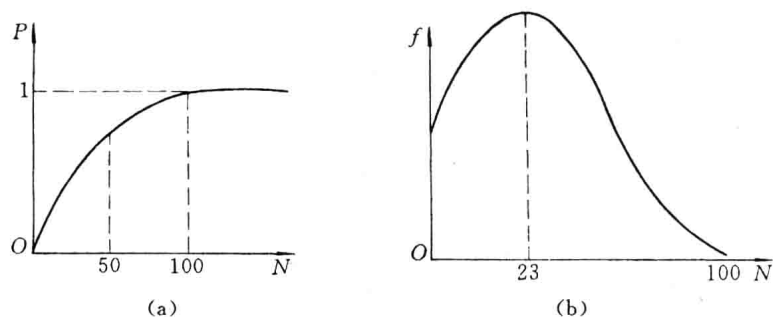


图 2-1-2

图 2-1-2(a)与(b)中曲线均可描述分布,两者之间的关系是:把概率微分得到概率密度,把概率密度积分得到概率,见图 2-1-2 中曲线下面积。

(二) 正态分布

理论与实践都证明,在大量均匀微小随机因素影响下,物理量的测量值服从正态分布。测量中许多种类的误差,工业生产中许多产品的公差都服从正态分布。正态分布是随机现象中最重要、最常见的一种分布。

归一化的正态分布概率密度曲线如图 2-1-3 所示,曲线的特点是单峰对称。在测量中它

表现为:

1. 小误差的概率大,大误差的概率小;
2. 正误差与负误差的机会相等;
3. 曲线下的面积对应着测量误差在 $-\infty \sim +\infty$ 的概率,其值为1。

不同的规一化正态分布曲线区别在于峰值的位置与曲线的宽度。峰值的横坐标 μ 对应最大概率密度,依正负误差机会相等可知,峰值的位置 μ 是测量次数 n 趋于无穷时的平均值,其估计值为

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

曲线的半宽(这里指曲线上两拐点间距离的一半)能代表测量值的离散程度,本书用 S_x 表示,称为标准(偏)差。图2-1-3(b)画出了三条曲线。分别对应 $S_x=0.5, 1, 2$ 。由图可见,随着 S_x 的增加曲线趋于平坦,峰值高度降低,对应着测量值 x_i 之间的差别在增大,表征单次测量离散程度的标准差用式

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (\text{贝塞尔公式}) \quad (2-1-3)$$

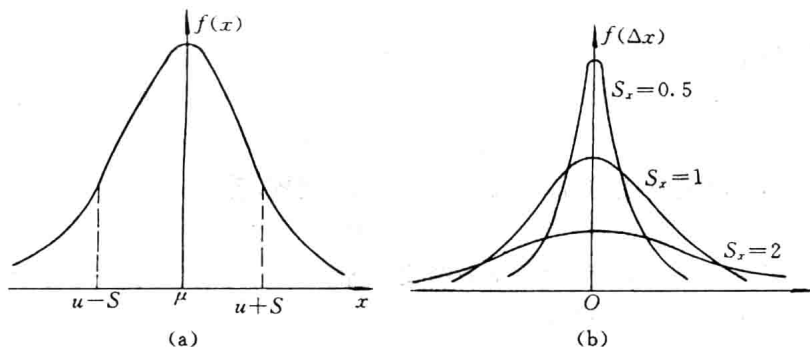


图 2-1-3

估算;表征平均值的标准差用式

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2-1-4)$$

估算。上面两式中 $(x_i - \bar{x})$ 是第 i 次测量的偏差;将 $(x_i - \bar{x})$ 平方以防止正负偏差相消;求和以反映全部测量值的贡献;开方便标准差的量纲与被测量的一致。用标准偏差可以统计性地描述随机误差。对于正态分布,测量结果在 $(\bar{x} - S) \sim (\bar{x} + S)$ 之间的概率为68.3%,或测量误差在 $-S \sim +S$ 之间的概率为68.3%。

(三) 均匀分布

测量误差服从均匀分布是指在测量值的某一范围内,测量结果取任一可能值的概率相等。均匀分布的概率密度曲线如图2-1-4,概率密度 $f=1/(b-a)$ 。均匀分布的平均值与标准差的计算方法与正态分布的相同,仍用式(2-1-2)、式(2-1-3)与式(2-1-4)。在这里要提醒

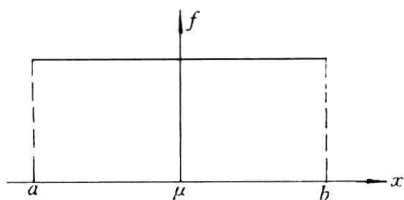


图 2-1-4