

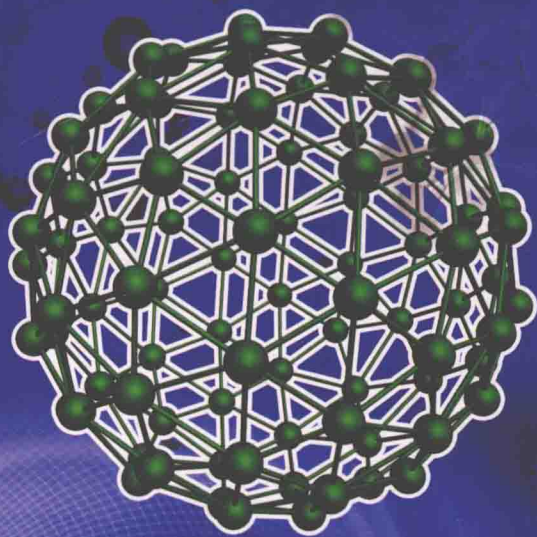


普通高等教育“十二五”理工类基础课程规划教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

吴定允 常加忠 主编



 河南科学技术出版社

普通高等教育“十二五”理工类基础课程规划教材

大学物理实验

吴定允 常加忠 主编

河南科学技术出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书共分四章,第一章详细介绍了大学物理实验基本知识,包括大学物理实验的目的、要求,误差理论和实验数据的基本处理方法.第二章选编了20个基础性实验,着重对学生进行基本测量工具、基本测量方法和数据处理等基础物理实验能力的训练.第三章选编了17个具有代表性的综合性实验,进一步培养学生的综合实验技能,提升学生科学实验的能力.第四章编写了10个设计性实验,本着开发学生智能,培养与提高学生的创新思维、创新方法、创新能力而安排.全书47个实验涵盖了力、热、电、光四部分内容,内容翔实、循序渐进、注重基础、启发创新,具有较强的可操作性和广泛的适用性.

本书可作为高等院校理工科类专业的大学物理实验教学用书,也可供相关工程技术人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 吴定允, 常加忠主编. — 郑州: 河南科学技术出版社, 2014. 3
普通高等教育“十二五”理工类基础课程规划教材
ISBN 978 - 7 - 5349 - 5478 - 8

I. ①大… II. ①吴… ②常… 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 (2014) 第 047861 号

出版发行: 河南科学技术出版社

地址: 郑州市经五路 66 号 邮编: 450002

电话: (0371) 65788622 65788001

网址: www.hnstp.cn

策划编辑: 徐素军

责任编辑: 李晓慧

责任校对: 柯 姣

封面设计: 宋贺峰

版式设计: 栾亚平

责任印制: 张 巍

印 刷: 河南省罗兰印务有限公司

经 销: 全国新华书店

幅面尺寸: 185 mm × 260mm 印张: 14 字数: 341 千字

版 次: 2014 年 3 月第 1 版 2014 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 28.00 元

如发现印、装质量问题, 影响阅读, 请与出版社联系并调换。

《大学物理实验》编写人员名单

主 编 吴定允 常加忠

副主编 李 健 徐朝辉 刘奎立

编 委 (以姓氏笔画为序)

刘奎立 李 健 李 颖 吴秀华

吴定允 张松锋 张鸿辉 袁焕丽

徐朝辉 常加忠

前 言

大学物理实验是理工科大学生必修的一门重要基础实验课程。大学物理实验作为科学实验的基础实验，其研究方法、观察和分析手段以及各种仪器设备均已被广泛地应用在自然科学和工程技术的各个领域。作为基础实验课，它既能让学生通过实验学习到科学实验的基础知识，又能使学生在实验方法的考虑、测量仪器的选择、实验误差的分析中得到训练，并为学生进行后续实验打下基础。

本教材的编写，参考了多家兄弟院校的大学物理实验教材，吸取了目前高校物理实验的一些新理念、新思想、新方法和新实验。考虑到本教材的主要适用对象为高校理工科专业的学生，为了更好地进行实验教学，我们组织长期从事大学物理实验教学的老师，按照国家教育部教学指导委员会 2010 年制订的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合实验室仪器设备现状，并融合近年来实验教学改革成果，进行了本教材的编写。

本教材按照循序渐进的方式进行物理实验。结合大学物理理论课的教学实际，按照两个大循环对实验进行编排。第一循环为基础实验，着重进行基本测量工具、基本测量方法和数据处理等基本物理实验能力的训练。在第一循环中，每个实验都有可能成为学生的第一次实验，所以各实验中实验原理的描述都十分完整，实验仪器的介绍也较清楚，实验步骤尽可能详细，并给出了完整的数据记录表格、具体的数据处理及误差分析方法。第二循环为综合和设计性实验。第二循环的编排则采取了较简略的方式，特别是部分实验需要学生自拟数据表格，对数据的处理和误差的分析由学生独立进行，以培养学生的动手动脑能力。每个实验都有简单的前言，作为实验知识面的扩充；实验后留有思考题，可让学生对实验内容做进一步的分析和讨论。基于以上考虑，全书共分四章，第一章详细介绍了大学物理实验基本知识，包括大学物理实验的目的和要求，误差理论和实验数据的基本处理方法。第二章选编 20 个基础性实验，完成第一循环的任务。第三章选编 17 个具有代表性的综合性实验，进一步培养学生的综合实验技能，提升学生科学实验的能力。第四章编写了 10 个设计性实验，本着开发学生智能，培养与提高学生的创新能力而安排。

本实验教材有以下几个方面的特点：

(1) 结合实际，适应教学。本教材适用对象是高校理工科专业的学生，因而在内容的组织上，结合现有实验仪器设备的实际情况和当前的教学实际，将力、热、电、光的多项内容融合为一体，用理论指导实践，用实验来验证理论的正确性，实验内容由浅入深、由单一到综合，每个实验都有实验目的、实验原理、实验内容和思考题等，便于学生阅读以达到预期的目的。

(2) 注重基础，加强实践。本教材体现了新的教学思想，在体系安排上划分为四个层

次，即基础知识的学习、基础性实验、综合性实验、设计性实验。实验内容上，既注重基础性的验证实验，以使学生在基本的实验训练中培养动手能力，又增加了部分设计性实验，着重培养学生实验设计能力和分析问题、解决问题的能力。

(3) 内容新颖，启发创新。本教材充分考虑了内容的创新性，随着时代的不断发展，实验内容也日新月异，不断地改进，因此本教材选编了部分创新性实验，以求更符合时代的要求，为学生发挥创新思维能力解决实际问题提供了广阔的空间。

本教材由吴定允、常加忠担任主编，具体编写分工为：第一章、第二章的实验 1 至实验 10、第三章的实验 21 至实验 24 由李健和刘奎立完成；第二章的实验 11 至实验 16、第三章的实验 25 至实验 30 由徐朝辉和张鸿辉编写；第二章的实验 17 至实验 20、第三章的实验 31 至实验 37 由袁焕丽和张松锋编写；徐朝辉完成了第四章中的实验 38 至实验 47 以及书后附录的整理工作；李颖、吴秀华绘制了全部插图。全书由吴定允、常加忠负责统稿定稿。

在本教材的编写过程中，编者还得到了周口师范学院相关领导和教师的支持，编者也参阅了兄弟院校的大学物理实验教材，在此一并致谢。

谨在本书出版之际，诚挚地感谢河南科学技术出版社的同志们，他们不辞劳苦编排、审读、校对，使此书得以顺利出版。

由于编者知识水平和教学经验所限，再加上编写时间仓促，虽经我们不懈地努力，但书中不妥和疏漏之处在所难免，恳请广大师生和同行专家及时批评指正，以便进一步完善本教材。

编 者
2014 年 3 月

目 录

第一章 大学物理实验基础知识	(1)
第一节 大学物理实验课的目的和要求	(1)
第二节 测量与误差	(5)
第三节 实验误差分析	(8)
第四节 测量结果的评定和不确定度的计算	(10)
第五节 物理实验中基本的测量方法	(14)
第六节 有效数字及其运算法则	(21)
第七节 实验数据处理的基本方法	(24)
第二章 基础性实验	(31)
实验一 长度测量	(31)
实验二 单摆振动的研究	(39)
实验三 密度的测量	(42)
实验四 物体惯性质量的测量	(48)
实验五 弹簧振子的研究	(51)
实验六 验证平行轴定理	(54)
实验七 液体黏滞系数的测量	(59)
实验八 固体比热容的测量	(62)
实验九 冰的熔解热的测量	(66)
实验十 热功当量的测量	(68)
实验十一 制流电路与分压电路	(70)
实验十二 静电场的描绘	(81)
实验十三 磁场的描绘	(85)
实验十四 用惠斯通电桥测电阻	(91)
实验十五 示波器的使用	(94)
实验十六 铁磁物质磁化曲线与磁滞回线的测绘	(103)
实验十七 分光计的调节和使用	(107)
实验十八 等厚干涉——牛顿环、劈尖	(113)
实验十九 薄透镜焦距的测定	(116)

	实验二十 用旋光仪测旋光性溶液的旋光率和浓度·····	(121)
第三章	综合性实验·····	(125)
	实验二十一 气垫导轨实验·····	(125)
	实验二十二 弦上驻波的研究·····	(134)
	实验二十三 声速的测量·····	(138)
	实验二十四 表面张力系数的测量·····	(143)
	实验二十五 伏安法测晶体二极管特性·····	(146)
	实验二十六 直流电表的改装和校准·····	(148)
	实验二十七 交流电桥·····	(152)
	实验二十八 RLC 电路暂态特性的研究·····	(159)
	实验二十九 电子束的偏转·····	(165)
	实验三十 电子束的聚焦·····	(168)
	实验三十一 偏振光的研究·····	(173)
	实验三十二 迈克耳孙干涉仪·····	(177)
	实验三十三 衍射光栅的特性与光波波长的测量·····	(181)
	实验三十四 光电效应及普朗克常数的测量·····	(185)
	实验三十五 光学系统基点的测量·····	(189)
	实验三十六 自组望远镜·····	(191)
	实验三十七 自组显微镜·····	(194)
第四章	设计性实验·····	(197)
	实验三十八 测量物理天平游码的质量·····	(197)
	实验三十九 测量木块的密度·····	(197)
	实验四十 测定重力加速度·····	(198)
	实验四十一 测量小灯泡的伏安特性曲线·····	(198)
	实验四十二 测量电阻丝的电阻率·····	(199)
	实验四十三 小功率直流稳压电源的设计与制作·····	(200)
	实验四十四 温差电偶温度计的设计与制作·····	(201)
	实验四十五 金属电阻温度系数的测量·····	(202)
	实验四十六 用 M - 干涉仪测量物质折射率和物体长度·····	(203)
	实验四十七 测定椭圆偏振光的振动强度分布图·····	(204)
附 表	·····	(206)
	附表 1 基本物理常量(国际推荐值)·····	(206)
	附表 2 常用物理量的国际单位制·····	(207)
	附表 3 国际单位制中的 7 个基本单位·····	(208)
	附表 4 20°C 时常见固体和液体的密度·····	(209)
	附表 5 海平面上不同纬度处的重力加速度·····	(209)
	附表 6 部分固体和液体的比热容·····	(210)
	附表 7 水同空气接触面的表面张力系数·····	(210)
	附表 8 部分液体的黏滞系数·····	(211)

附表 9 标准大气压下不同温度的纯水的密度	(211)
附表 10 常见仪器的容许误差 Δ 值	(212)
参考文献	(213)

第一章 大学物理实验基础知识

第一节 大学物理实验课的目的和要求

大学物理实验是高等学校理工科各专业开设的一门基础课程，是理论课教学的延伸和有益的补充。通过完成适当数量的实验题目，学生在掌握初步实验能力的同时，着重培养良好的实验习惯和严谨的科学作风。

一、实验是物理学的基础

物理学是一门以实验为基础的自然科学。物理学理论的建立和新规律的发现都离不开反复的实验，并不断接受实验的检验。物理学中的每一项重要突破几乎都与实验密切相关。但是物理实验不同于一般的自然观察和试验，其在方法上具有两个显著的特点：

(1) 依据以一定的科学思想为指导而精心设计的仪器，能够对被研究的对象和它的环境条件进行控制。

(2) 实验得出的结论说明某种重复发生现象的一般规律，可以用简明而又精确的数量关系表示。

历史上首先将实验作为物理学主要研究方法的是伽利略，他通过著名的比萨斜塔实验，证明了物体下落所需的时间与物体自身的质量无关的事实，从而彻底推翻了以往所固守的物体质量越大、下落速度越快的猜想。另外他在研究光滑平面上物体的运动时，采用表面磨得精光的铜球，使其沿表面光滑且底部对接呈“V”形的金属斜面下落，“V”形斜面的一端倾斜角度固定，另一端倾斜角度逐渐减小。铜球每次从倾角固定的一端的同一水平高度开始下落，结果显示，无论另一端倾角如何变化，铜球几乎都能上升至同一水平高度。由此，伽利略进行了大胆的逻辑推理：若另一端斜面倾角逐渐减小，只要倾角不为零，忽略铜球和斜面之间的摩擦阻力，经过一段有限的距离，铜球总能沿斜面上升至同一水平高度；若倾角为零，铜球为了上升至同一水平高度，将沿倾角为零的斜面（水平面）一直运动下去。从而，他得出力不是物体运动的原因，而是物体运动状态改变的原因，而这实际上就是惯性定律的另一种表达方式。伽利略所做的工作为日后牛顿总结出惯性定律奠定了实验基础。这足以说明实验在物理学理论的建立和新规律的发现中所起的重要作用。

实验亦起着检验理论的作用。1917年爱因斯坦预言了“诱导发射”现象的存在。“诱导发射”是电子在再结合过程中发出的光可以引发其他电子的再结合过程，从而持续不断地发出相位、波长相同的光的现象。“诱导发射”成为激光重要的理论基础，但直到1960年，第一台红宝石激光器在实验室中诞生，爱因斯坦预言的“诱导发射”理论才为人们所

完全接受。

总之，物理学的理论来源于物理实验又必须最终由物理实验来检验和验证。因此要从事物理学的研究，必须掌握物理实验的基本功。

物理实验不仅对物理学的研究工作极其重要，而且对物理学在其他学科的应用也十分重要。当代物理学的发展已使我们的世界发生了惊人的改变，而这些改变正是物理学在各行各业中应用的结果。

物理电子、电子工程、光源工程、光科学信息工程等学科显然是以物理学为基础的，当然需要应用大量的物理学知识；在材料科学中，各种材料的物性测试、许多新材料的发现（如 C_{60} 、高温超导材料等）和新材料制备方法的研究（如离子束注入、激光蒸发等）都离不开物理学的应用；在化学中，从光谱分析到量子化学，从放射性测量到激光分离同位素，无不是物理学的应用；在生物学的发展史中，离不开各类显微镜（光学显微镜、电子显微镜、X 光显微镜、原子显微镜）的贡献，近代生命科学更离不开物理学，DNA 的双螺旋结构就是美国遗传学家和英国物理学家共同建立并为 X 光衍射实验所验证的，而对 DNA 的操纵、切割、重组也都需要实验物理学家的帮助；在医学中，从 X 光透视、B 超诊断、CT 诊断、NMR 诊断到各种理疗手段，包括放射性治疗、激光治疗、伽玛刀等都是物理学的应用。物理学正在渗透到各个学科领域，而这种渗透无不与实验密切相关。显然，实验正是从物理基础理论到其他应用学科的桥梁，只有真正掌握了物理实验的基本功，才能顺利地把物理原理应用到其他学科而产生质的飞跃。

综上所述，要研究与发展物理学，把物理理论应用到各行各业的实践中去，都必须重视物理实验，学好物理实验。

二、大学物理实验课的目的

大学物理实验课是对学生进行实验教育的入门课程，其教学目的在于使学生学习物理实验基础知识的同时，着重培养学生良好的实验习惯和严谨的科学作风。

例如在进行力学实验时，测量一个物理量（如长度），要严格遵守以下几点：

（1）选择合适的测量仪器或设备（如米尺或螺旋测微器），按照仪器设备的使用规则进行测量。

（2）对测量数据进行估读。

（3）对物理量进行重复测量。

培养良好的实验习惯需要教师不断地提醒和督促，直至学生真正贯彻进每个实验、每个物理量的测量，成为学生自觉的行为。

大学物理实验课的教学目的在于培养并逐步提高学生观察和分析实验现象、实验结果的能力以及理论联系实际的独立工作能力。在做实验的过程中，学生要有耐心、细心的实验态度，更要逐步养成敏锐的观察能力和思考能力。

许多成就卓著的物理学家给我们做了很好的榜样。1804 年，英国物理学家瑞利测定空气中氮气的密度为 $1.256\ 5\text{ g/L}$ ，而他从分解氨气的实验中得到的氮气的密度为 $1.250\ 7\text{ g/L}$ ，经过认真地分析，他肯定两者的差异超出了实验的误差范围（他当时认为空气中除了氧都是氮）。后来经过进一步地研究，最终发现了空气中的氩气。若没有敏锐的观察能力和独立的思考能力，空气中氩气的发现至少还要向后推迟几十年。

三、大学物理实验课的要求

对学生而言,大学物理实验课的教学要求主要体现在以下三个方面:

第一,掌握有关物理实验的基本知识,基本方法和基本技能,这是做好物理实验的基础。

基本知识包括实验的原理、各类仪器的结构与工作原理、实验的误差分析与不确定度的评定、实验结果的表述方法、如何对实验结果进行分析与判断,等等。

基本方法包括如何根据实验目的和要求确定实验的思路与方案、如何选择和正确使用仪器、如何减少各类误差、如何采用一些特殊方法来获得通常难以获得的结果等。

基本技能包括各种调节与测试技术(粗调、微调、准直、调零、读数、定标等),真空技术(真空获得、维持、测量、应用等),电工技术(识别元件、焊接、排除故障、安全用电等),电子技术(微电流检测、弱信号放大等),传感器技术(力传感器、位移传感器、温度传感器、磁传感器、光传感器等),金工技术(机械制图及基本的车工和钳工技术等)以及查阅文献的能力、自学的能力、协作共事的能力、总结归纳的能力、口头表达的能力等。

例如在力热实验中,要始终围绕长度、时间、质量和温度等四种基本物理量进行,要掌握这四种基本物理量在每个实验中所用测量仪器设备的结构和工作原理的基本知识;掌握选择合适的仪器、按照使用规则正确使用仪器以及采用一些特殊方法测量微小量等的基本方法;掌握所选用的测量这四种物理量的仪器设备的调节和测试技术以及对测量结果总结归纳的能力等基本技能。

这种训练有时可能会比较枯燥,但却是完全必要的,它体现了最基本的实际动手能力,因此必须首先保证这一要求的实现。

第二,学习用实验方法研究物理现象、验证物理规律,加深对物理理论的理解和掌握,并在实践中提高发现问题、分析问题和解决问题的能力。

进行物理实验也是真正理解和掌握物理理论的重要方式和手段。只从书本上得到的知识往往是不完整的、不具体的,只有通过实验,才能使抽象的概念和深奥的理论变成具体的知识和实际的经验,变成在解决实际问题中的有力工具。因此要真正理解和掌握物理理论,是不能只从课堂上学习,还必须到实验室中亲自动手、亲身体会,这样才能学到真正的活生生的物理。

第三,通过物理实验课锻炼坚韧不拔、勇于探索的开拓精神,养成珍惜和爱护实验仪器,遵守纪律的优良品德。

四、实验报告

实验报告是一次实验的全面总结,要用简明的形式将实验结果完整而又真实地表达出来。写报告时,要求文字通顺、字迹端正、图表规矩、结果正确、讨论认真,应养成实验结束后尽快写完实验报告的习惯,这样做可以收到事半功倍的效果。

1. 实验报告的内容

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验仪器. 列出实验中所用的仪器、设备和辅助用具.

(4) 理论依据. 简要叙述有关原理内容, 写出主要计算公式的推导过程, 画出有关的原理或装置图.

(5) 实验步骤. 列出主要的实验步骤.

(6) 实验记录. 实验中测得的原始数据用表格形式列出, 正确记录有效数字和单位.

(7) 数据处理. 根据实验目的对测量结果进行计算或作图表示, 并对测量结果进行评定, 计算不确定度, 要写出主要的计算内容; 若实验是为了观察某一物理现象或验证某一物理定律, 应扼要写出实验结论.

(8) 结果与分析. 正确表达实验结果并分析实验误差的主要来源, 对实验仪器的选择和实验方法的改进提出意见或建议.

(9) 实验后的思考. 包括讨论实验中观察到的异常现象及其可能的解释, 回答实验思考问题, 谈谈对实验的心得体会.

2. 写实验报告时应注意的几点

(1) 不确定度(误差)的分析. 测量不确定度的分析与计算是实验工作的重要方面. 计算不确定度的意义在于:

- 1) 可以正确评定测量的质量.
- 2) 从各来源的不确定度分量说明测量有待改进的重点.
- 3) 比较仪器引入的不确定度和非仪器引入的不确定度, 说明仪器配置是否合理.
- 4) 增强分析不确定度的能力对以后独立进行实验, 预测不确定度是有利的.

(2) 测量结果的评价. 在实际工作中, 对测量的质量总是有要求的, 比如实验要求不确定度不能大于百分之几. 在实验中往往不明确提出具体的质量指标, 这时如何评价测量的质量呢?

1) 计算不确定度和相对不确定度. 若总的不确定度与来源于仪器的不确定度相差不是显著过大, 可以认为测量达到了仪器可以达到的精度.

2) 测量结果(y)和其公认值(标准值) A_y 相差不超过其标准不确定度 $u(y)$ 的3倍, 即 $|y - A_y| \leq 3u(y)$, 则可认为测量结果和公认值在测量误差范围内是一致的.

3) 当 $|y - A_y| > 3u(y)$ 时, 可能的原因是: 测量结果有误, 存在未发现的比较大的不确定度来源; 实验原理或仪器有问题; A_y 作为 y 的近似真值是不合适的, 即 y 不可与 A_y 进行比较. 这时, 要经过分析以后, 重复测量或调整实验去探索问题的所在.

实际工作中的测量一般是面对未知的, 因为如果已知就不必测量了. 我们在不断的学习中, 做各种测量和分析, 提高测量与分析的准确性, 使我们对自己的测量结果和不确定度计算越来越有信心, 这样实验报告不仅是针对一个实验, 而是和我们的科学素质的提高密切相关.

(3) 分析与思考. 实验后可供思考的问题很多, 如:

- 1) 实验中遇到的困难是如何处理的?
- 2) 实验设计的特点是什么? 普遍意义何在?
- 3) 对实验设计的改进设想和问题.
- 4) 对实验中出现的异常现象的分析与判断等.

学生实验一般是按指定的方法, 使用指定的仪器进行的. 由于实验方法与仪器是经

细设计和反复实验检验过的，一般均可获得较好的结果。对于学生实验，虽然希望实验有好的结果，但从根本上讲，重要的不是结果如何好，而是对实验设计的认识和实验全过程对学生的锻炼。

第二节 测量与误差

一、测量及其分类

(一) 测量的定义

在生活、生产和科学实验中，为了获得某一事物或某一物理量的定量信息，经常需要对该物理量进行测量。所谓的测量，就是指为确定被测量对象的量值而进行的被测物与测量仪器相比较的过程。测量结果给出被测量的量值，包括数值和单位两部分。

(二) 测量的分类

1. 按照测量方式分类

按照测量方式的不同，可将测量分为直接测量和间接测量。

(1) 直接测量是指被测量和仪器直接比较，得出被测量量值的测量。用螺旋测微器测量小球的直径即属于直接测量。

(2) 间接测量是由一个或几个直接测得量经已知函数关系计算出被测量量值的测量。例如直接测量出单摆摆长 l 和摆动周期 T ，由已知函数关系式 $g = 4\pi^2 l / T^2$ 计算出重力加速度 g 的过程即为间接测量。

2. 按照测量精度分类

按照测量精度的不同，可将测量分为等精度测量和不等精度测量。

(1) 等精度测量是指在相同的测量环境下，同一测量者采用同一组测量仪器、同一种实验方法对某一物理量进行的多次重复测量。物理实验中大多采用等精度测量。

(2) 不等精度测量是指部分或全部不符合等精度测量条件的其他所有的测量。

(三) 测量仪器的选取

测量仪器是指用以直接或间接测出被测对象量值的所有仪器，如物理天平、游标卡尺、水银温度计、周期测定仪、电流表、电压表等。标明仪器性能的有许多指标，其中最基本的是测量范围和准确度等级。仪器的测量范围是指仪器的最大测量量程；仪器的准确度等级是由国家规定的，等级越大，仪器的精密度越高。实验时想恰当地选取仪器，首先估计被测物理量的量值，约占仪器最大量程的 $2/3$ 左右为最佳；选择的仪器的准确度等级能够满足测量要求即可，并不是准确度等级越高越好，否则会对测量和数据处理带来诸多不便。合理地选取测量仪器可以更有效地使用准确度高的仪器，延长仪器的使用寿命。

二、误差

在一定条件下，一个待测物理量的大小在理论上有一个确定的数值，此值称为该物理量的真值。但是，由于测量方法、测量仪器、测量条件及测量者的种种问题，实际测量的数值即测量值，只能是真值的一个近似值，测量值与真值之差称为测量的误差，即

$$\text{测量值}(x) - \text{真值}(a) = \text{误差}(\varepsilon)$$

误差 ε 是一个代数值, 当 $x \geq a$ 时, $\varepsilon \geq 0$; $x < a$ 时, $\varepsilon < 0$. ε 值反映了测量值偏离真值的大小和方向, 因此又称 ε 为绝对误差. 与之对应称 ε 与 a 的比值 $E = \varepsilon/a$ 为相对误差. 绝对误差相同的两次测量, 其相对误差不一定相同. 绝对误差和相对误差只是误差的两种数学表示形式, 都可以用来表示某一次测量结果的优劣.

一般来说, 真值仅是一个理论上的概念, 是不能确知的, 所以测量值的误差也不能确切知道. 在此情况下, 测量的任务是:

- (1) 选用合适的测量方法和仪器, 尽可能减小测量误差.
- (2) 根据测量的数据给出被测量真值的最佳估计值.
- (3) 给出真值最佳估计值的可靠程度的估计.

三、误差的分类

根据产生的原因和性质, 误差可分为系统误差、偶然误差和过失误差.

(一) 系统误差

1. 系统误差的定义

在同一条件下 (方法、仪器、环境和观测者不变) 多次测量同一量值时, 符号和绝对值的大小保持不变, 或按一定规律变化的误差称为系统误差. 所谓一定的规律, 通常是指这种误差可以归结为某一因素或某几种因素的函数, 这种函数一般可用解析公式、曲线或数表来表达.

例如, 用物理天平称衡物体的质量时, 由于砝码的标称质量 (即刻在砝码上的质量数值) 不是准确地等于砝码的真实质量而引入的误差; 由于空气浮力的影响引入的误差; 由于天平臂不等长引入的误差等. 所有这些误差在多次反复称衡同一物体的质量时是恒定不变的, 都属于系统误差.

2. 系统误差的来源

(1) 仪器误差. 由于仪器本身的缺陷或没有按条件使用引起的误差, 如仪器零点未调准、仪表刻度不准、米尺弯曲等.

(2) 理论或方法误差. 由于测量所依据的理论公式的近似或者测量方法本身的局限性, 或者实验条件达不到理论公式所规定的要求引起的误差, 如单摆测重力加速度时所用公式的近似性, 用天平称衡质量时未考虑空气的影响等.

(3) 环境误差. 由于外部环境如温度、湿度、光照、电磁场等因素与仪器要求的环境条件不一致产生的误差.

(4) 人身误差. 由于观测者的感觉或运动器官的反应灵敏度引入的误差, 此项误差因人而异, 并与观测者当时的精神状态、注意力集中程度密切相关.

3. 系统误差的分类

(1) 已定系统误差. 在一定的条件下, 采用一定的方法, 对误差取值的变化规律及其大小和符号都能确切掌握的系统误差, 在测量结果中可以进行修正. 螺旋测微器的零点误差即属于此类误差.

(2) 未定系统误差. 它指不能确切掌握误差取值的变化规律及其大小和符号, 而仅知最大误差范围 (或极限误差) 的系统误差. 如一块 2.5 级 0 ~ 100 mA 的电流表, 在测量范

围内其最大误差为 $100 \text{ mA} \times 2.5\% = 2.5 \text{ mA}$ ，但对于某一次测量的误差的大小和符号都是未知的。

4. 研究系统误差的目的和任务

系统误差的特征是其确实性，表现为数值大小和符号的恒定或按一定的规律变化。鉴于此，对系统误差的研究主要是：

- (1) 探索系统误差的来源，设计实验方案消除或削减该项误差。
- (2) 估计残存系统误差的可能范围。

(二) 偶然误差

在相同条件的重复测量中，所得测量值一般不尽相同，这表示每次测量的误差不同，并且在测量之前不可预知测量值是偏大些还是偏小些，这一类由不确定的偶然性因素造成的误差统称为偶然误差。如用手按秒表测量单摆的摆动周期而每次不尽相同即属此种情形。

造成偶然误差的因素是多方面的，如测量者的感官（听觉、视觉、触觉等）的分辨能力不尽相同，表现为每个人的估读能力不一致；外界环境的干扰（温度不均匀、湿度、振动、气流、噪声等）既不能消除，又无法估量；测量对象本身的不确定性（气压、小球直径不均匀、液体温度局部不均匀等）；所有影响测量的次要因素不尽全知等。这种误差是无法控制的，且对于某一次测量来说，测量误差的大小和正负是无法预知的。

偶然误差的特征是其随机性。在相同的条件下，对某一物理量进行多次测量，当测量次数增多时，偶然误差就显示出明显的规律性。实践和理论都证明，偶然误差服从一定的统计规律（正态分布规律），其特点是：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；绝对值相等的正负误差出现的概率相同；绝对值很大的误差出现的概率趋于零。因此增加测量次数，可使误差绝对值小的数据出现的概率增大，亦即减小偶然误差，但不能完全消除。

(三) 过失误差

过失误差是指由于实验者使用仪器的方法不正确、实验方法不合理、注意力不集中、粗心大意、过度疲劳、记错数据等引起的误差，是一种人为的误差，不属于测量误差。只要实验者采取严肃认真的态度、具有一丝不苟的作风、遵守实验室纪律和仪器使用规则，过失误差是完全可以避免的。

四、算术平均值

设 n 次测量值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，误差为 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ ，真值为 a ，则

$$(x_1 - a) + (x_2 - a) + \dots + (x_n - a) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n$$

将上式展开整理后，两侧除以 n ，得

$$\frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) - a = \frac{1}{n} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n)$$

设 $\bar{x} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n$ ，则有

$$\bar{x} - a = \frac{1}{n} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n)$$

这表示算术平均值的误差等于各测量值误差的平均。假若各测量值的误差只是偶然误差，而偶然误差有正有负，相加时可抵消一些，所以 n 越大，算术平均值越接近真值。因此，

可以用算术平均值作为被测量真值的最佳估计值。

另外，当测量值的误差中包含有已知的系统误差（如螺旋测微器的零点误差），相加时它们不能抵消，这时应当用算术平均值加上修正值作为被测量真值的最佳估计值（修正值与系统误差绝对值相等，符号相反）。

第三节 实验误差分析

在实验中，一般需要对多个物理量测量大量的数据，而只要有测量就会有误差。测量误差可按照误差的分类将其归入系统误差、偶然误差和过失误差进行分别处理。测量值的误差一般同时包含系统误差、偶然误差和过失误差，进行误差分析的目的在于：

- (1) 尽量减小测量值中的误差。
- (2) 对残存的误差的大小给出某种估计值。

对于测量误差产生的原因可从以下三个方面进行分析。

1. 测量仪器及标准量的问题

在许多情况下，测量仪器上的刻度（或数字显示）就代表了标准值，如米尺、温度计等。但是这种“标准量”也并非真正标准，它与真正的标准有时会有较大的差距。例如，物理天平的砝码经过长时间的使用磨损，其质量一般比其标示的质量要小。

2. 测量方法的问题

采用不同的测量方法会得到不同的测量结果，其影响是很明显的。例如，测重力加速度，用测单摆周期的方法和用倾斜气垫导轨上滑块运动的方法测量会得到不同的结果。

3. 测量者的问题

这方面的问题比较多。首先是估读能力的不同，待测量位于标准量的某两刻度之间时，必须估读其数值，不同测量者的估读会有不同，这与测量者的位置、熟练程度及仪器所处的环境状况等有关；其次是判断能力的不同，例如用秒表测量单摆摆动的周期，当摆动到平衡位置时开始和停止计时，或早或晚都会引入较大的误差，准确及时的操作需要较丰富的经验和敏锐的判断能力；最后还有“误读”的可能，即测量者在较长时间的实验中难免犯错误，将数据读错也是很有可能发生的。

从以上三个方面将误差产生的原因进行归类后可分别进行处理。下面介绍系统误差、偶然误差和过失误差的处理方法。

一、系统误差的分析处理

在许多情况下，系统误差常常不明显地表现出来，然而它却是影响测量结果精密度的主要因素，有些系统误差会给实验结果带来严重影响。因此，发现系统误差，设法修正、减小或消除它的影响是误差分析的一项很重要的内容。

（一）发现系统误差的方法

1. 数据分析法

当偶然误差比较小时，将待测量的绝对误差按测量次序排列，观察其变化。若绝对误差不是随机变化而呈规律性变化，如线性增大或减小、周期性变化等，则测量中一定存在