



普通高校应用型本科“十三五”规划教材

PUTONG GAOXIAO YINGYONGXING BENKE SHISANWU GUIHUA JIAOCAI

大学物理实验

(一)

DAXUE WULI SHIYAN (YI)

熊泽本 张定梅 李传新 ○ 主 编



西南交通大学出版社

大学物理实验

(一)

熊泽本 张定梅 李传新 主 编

西南交通大学出版社
· 成都 ·

内容提要

本书根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会制定的《大学物理实验课程教学基本要求》，并结合多年的物理实验教学实践，在修改实验讲义的基础上编写而成。其主要内容包括测量误差及数据处理的基本知识以及力学、热学、电磁学、光学和近代物理实验中的基础实验。

本书可作为高等学校理工科各专业的实验教材，也可作为物理学专业和从事物理实验教学的教师和科技人员的参考资料。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理实验. 一 / 熊泽本, 张定梅, 李传新主编.

—成都: 西南交通大学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-5643-5768-9

I. ①大… II. ①熊… ②张… ③李… 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 (2017) 第 224369 号

大学物理实验 (一)

熊泽本 张定梅 李传新 / 主 编

责任编辑 / 牛 君

助理编辑 / 李华宇

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 成都蓉军广告印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm×260 mm

印张 15 字数 375 千

版次 2017 年 9 月第 1 版 印次 2017 年 9 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-5768-9

定价 42.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言 Preface

物理实验是物理专业的基础课程之一，是为理工科学生开设的全面系统和独立设置的必修实验课程。物理实验的任务是通过实验培养学生发现、分析和解决物理问题的能力，让学生系统地掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。

本书根据物理实验教学要求，从培养 21 世纪创新人才的目标出发，重视传授知识与能力、提高素质与增强创新意识等并重，加强实验技能训练，结合作者多年的实验教学实践，在修改实验讲义的基础上编写而成。为了使學生能系统地掌握物理实验的基本知识和基本方法，将不确定度及数据处理放在前面集中介绍。不确定度及数据处理是物理实验课的重要教学内容，也是学生实验中的难点，是学生耗费精力较多的地方，直接关系到后续实验的顺利进行。因此，本书用了较多的篇幅对其进行介绍，并在不同的实验中对测量误差的估计和数据处理方法提出不同的要求，为学生进一步理解、掌握误差理论提供帮助。

本书在编写过程中，首先注意到了独立设置物理实验课程的必要性与教材体系的完整性，主要内容包括测量误差及数据处理的基本知识以及力学、热学、电磁学、光学和近代物理实验中的基础实验；其次，遵循实验能力培养的规律性，对基本知识、基本仪器和基本方法等部分力求详细介绍，并按不同层次由易到难，逐步加强对知识的灵活应用，能力的综合训练；再次，注重实验教学的各个环节，每个实验都编写了思考题，促使学生认真准备、积极思考，加深理解实验目的、原理等内容；最后，注重计算机在实验教学中的应用，对一些数据的处理、图线的拟合、线性回归等问题使用计算机进行处理。

时值本书出版之际，要特别感谢荆楚理工学院物理教研室的所有老师们，这套教材的编写是大家共同智慧和汗水的结晶，是荆楚理工学院几十年物理实验教学经验的总结，更是这几年教学改革成果的体现。在主编和编委会的参与和指导下，大家集体讨论教材编写方案，以具体分工、个人执笔的方式完成书稿，参与编写的老师有：熊

泽本、张定梅、李传新、蒋再富、付承志、黄兴奎、周仙美、杨小云、曾令准、王红、钟明新。各部分编写人员名单附在各自编写部分之后。

本书的编写是我校精品资源共享课程建设项目之一，得到了校、院领导和各界友好人士的热情鼓励和帮助，编写中参考了许多兄弟院校的有关教材，出版时西南交通大学出版社给予了大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

2017 年 6 月

目录 Contents

理论部分

绪 论

第一章 测量误差及数据处理

第一节 测量与误差

第二节 测量结果的评定和不确定度

第三节 有效数字及其运算法则

第四节 数据处理

第二章 基础实验

第一节 电磁学实验基本知识

第二节 光学实验基本知识

实验部分

实验 1 基本测量

实验 2 气垫导轨上测速度、加速度

实验 3 牛顿第二定律的验证

实验 4 动量守恒定律的验证

实验 5 惠斯通电桥测电阻

实验 6 分光计的调整及棱镜折射率的测定

实验 7 制流电路与分压电路

实验 8 伏安法测电阻

实验 9 示波器的使用

实验 10 杨氏模量的测定（拉伸法）

实验 11 等厚干涉现象的研究（牛顿环）

实验 12 超声波测声速

实验 13 霍尔效应

实验 14 液体黏度的测量

- 实验 15 刚体转动惯量的测定
- 实验 16 铁磁材料磁滞回线的测量
- 实验 17 超声光栅测液体中的声速
- 实验 18 空气热机实验
- 实验 19 多普勒效应综合实验
- 实验 20 波尔共振
- 实验 21 电表的改装与校准
- 实验 22 燃料电池综合特性实验
- 实验 23 可见光波分复用 (WDM) 实验
- 实验 24 可见光分插复用 (OADM) 实验
- 实验 25 测定固体导热系数
- 实验 26 液晶电光效应综合实验

附 录

- 附录 A 国际单位制
- 附录 B 常用物理常数
- 附录 C 常用电气测量指示仪表和附件的符号

参考文献

理论部分

绪论

第一章 测量误差及数据处理

第二章 基础实验

绪 论

一、物理实验的地位和作用

物理学研究的是自然物质的最基本、最普遍的形式。物理学研究的运动，普遍地存在于其他高级的、复杂的物质运动形式之中。因此，物理学所研究的物质运动规律，具有最大的普遍性。物理学从本质上说是一门实验科学，物理规律的研究都以严格的实验事实为基础，并且不断得到实验的检验。用人为的方法让自然现象再现，从而加以观察和研究，这就是实验。实验是人们认识自然和改造客观世界的基本手段。科学技术越进步，科学实验就显得越重要，任何一种新技术、新材料、新工艺、新产品都必须通过实验才能获得。由实验观察到的现象和测出的数据，加以总结和抽象，找出内在的联系和规律就能得到理论。实验是理论的源泉。理论一旦提出，又必须借助实验来检验其是否具有普遍意义，实验是检验理论的手段，是检验理论的裁判。麦克斯韦提出的电磁理论（他预言电磁波存在）只有在赫兹做出电磁学实验后才被人们公认；杨振宁、李政道于 1956 年提出基本粒子在“弱相互作用下宇称不守恒”的理论，只有在实验物理学家吴健雄用实验验证后，才被同行学者承认，从而才有可能获得诺贝尔奖。然而，人们掌握理论的目的是在于应用它来指导生产实际，促进科学进步，推动社会前进。当理论在实际中应用时，仍必须通过实验，实验是理论和应用的桥梁。任何一门科学的发展都离不开实验，这便使实验物理课有了充实的教学内容。物理实验是主要基础课程之一。

任何物理概念的确立，物理规律的发现，都必须以严格的科学实验为基础。物理实验的重要性，不仅表现在通过实验发现物理定律，而且物理学中的每一项重要突破都与实验密切相关。物理学史表明，经典物理学的形成，是伽利略、牛顿、麦克斯韦等人通过观察自然现象，反复实验，运用抽象思维的方法总结出来的。近代物理的发展，是在某些实验的基础上提出假设，例如，普朗克根据黑体辐射提出“能量子假设”，再经过大量的实验证实，假设才成为科学理论，实践证明物理实验是物理学发展的动力。在物理学发展的进程中，物理实验和物理理论始终是相互促进、相互制约、相得益彰的。没有理论指导的实验是盲目的，实验必须经过总结抽象上升为理论，才有其存在的价值，而理论靠实验来检验，同时理论上的需要又促进实验的发展。1752 年，富兰克林利用风筝把天空的电引入室内，进行室内雷鸣闪电实验，证实了雷电与电火花放电有同样的本质，进而找出了雷电的成因，并且在此基础上发明了避雷针。这个简单的实验事实，足以说明物理实验在物理学发展中所起的重要作用。

物理学发展到当今的时代，与实验的关系就更为密切，而且在许多边缘科学的建立过程中，物理实验也起了重要的桥梁作用。物理实验在探索和研究新科技领域，在推动其他自然科学和工程技术的发展中，起到的重要作用是不可低估的。自然科学迅速发展，新的科学分支层出不穷，但基础学科就是数学和物理两门，物理实验是研究物理测量方法与实验方法的

科学，物理实验的特点是在于它具有普遍性——力、热、光、电都有；具有基本性——它是其他一切实验的基础；同时它还有通用性——适用于一切领域，把高、精、尖的复杂实验分解成为“零件”，绝大部分是常见的物理实验。在工程技术领域中，研制、生产、加工、运输等都普遍涉及物理量的测量及物理运动状态的控制，这正是成熟的物理实验的推广和应用。现代高科技发展，设计思想、方法和技术也来源于物理实验。因此，物理实验是自然科学、工程技术和高科技发展的基础，科学技术的发展离不开物理实验。

二、物理实验课的目的和任务

1. 大学物理实验课的目的

(1) 通过对物理实验现象的观测和分析，学习运用理论指导实验，分析和解决实验中的问题和方法。从理论和实际的结合上加深对理论的理解。

(2) 培养学生从事科学实验的初步能力。通过实验阅读教材和资料，能概括出实验原理和方法的要点；能正确使用基本实验仪器，掌握基本物理量的测量方法和实验操作技能；能正确记录和处理数据，分析实验结果和撰写实验报告；能自行设计和完成不太复杂的实验任务等。

(3) 培养学生实事求是的科学态度、严谨的工作作风，勇于探索、坚韧不拔的钻研精神以及遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品德。

2. 大学物理课的具体实验任务

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习物理实验的基本知识、基本方法和基本技能，加深对物理概念和规律的认识，对物理学原理的理解，为后继课程打下基础。

(2) 培养和提高学生的科学实验素养，要求学生具有：

- ① 理论联系实际和解决实际问题的能力；
- ② 勤奋学习，认真实验的良好学风；
- ③ 主动研究和积极探索的创新精神；
- ④ 遵守实验室守则，注意仪器操作要领，爱护仪器的优良品德。

(3) 培养学生组织有关中学物理教学、指导中学物理实验的基本能力。物理实验课的进行程序大致可分为：提出问题，确定方案，选择仪器设备，安装调试，观察测量，记录数据，总结分析写出科学论文（实验报告）。每个实验环节都有一定的基本要求、基本技能训练。科学实验基本技能的训练贯穿于实验的全过程中，实验方法各自分散在不同的实验中。因此，实验课有它自身的体系，要达到学会实验、掌握基本技能的目的，就要认真进行每个实验环节的训练，并且在不同实验中学习实验方法。

(4) 培养学生做好实验的能力。

① 实验前要做好预习。预习时，主要阅读实验教材，了解实验目的，搞清楚实验内容，要测量什么量，使用什么方法，实验的理论依据（原理）是什么，使用什么仪器，其仪器性能是什么，如何使用，操作要点及注意事项等，在此基础上，回答好思考题，草拟出操作步骤，设计好数据记录表格，准备好自备的物品。

只有在充分了解实验内容的基础上，才能在实验操作中有目的地观察实验现象，思考问题，减少操作中的忙乱现象，提高学习的主动性。因此，每次实验前，学生必须完成规定的预习内容，一般情况下，教师要检查学生预习情况，并评定预习成绩，没有预习的学生不许做实验。

② 课堂认真进行实验，实验课一般先由指导教师作重点讲解，交代有关注意事项，扼要、简单地讲授内容，具有指导性和启发性，学生要结合自己的预习逐一领会，特别要注意那些在操作中容易引起失误的地方。

在实验进程中，首先是布置、安装和调试仪器。桌面上若干个仪器是否布置合理，读数是否方便，做到操作有序，需要动脑子，使仪器设备尽量能为我所用。为了使仪器装置达到最佳工作状态，必须细致、耐心地进行调试。这样很可能要花较多时间，切忌急躁。要合理选择仪器的量程，如果在调试中遇到了困难而自己不能解决时，可以请教指导老师。

调试准备就绪后，开始进行测量。实验时一定要先观察实验现象，通过观察对被验证的定律或被测的物理量有个定性的了解，而后再进行精确的测量。测量的原始数据要整齐地记录在自己设计的表格中，读数一定要认真仔细，实验原始数据的优劣，决定着实验的成败。记录的数据一定要标明单位。不要忘记记录有关的环境条件，如温度、压强等。如果两个学生同时做一个实验，既要分工又要协作，各自记录实验数据，共同完成实验任务。

在测量过程中要尽量保持实验条件不变，要注意操作姿势，身体不要靠着桌子，不要使仪器发生移动，或受到振动。如果遇到仪器装置出现故障，学生应力求自己动手解决，或留意观看教师是怎样分析判断仪器的毛病及怎样修复仪器的（可能当场修复的仪器）。测量完数据后，记录的数据要经指导教师审阅签字，然后再进行数据处理。如果发现数据错误时，要重新进行测量。

③ 写实验报告。实验报告是对实验工作的总结，是交流实验经验、推广实验成果的媒介。学会编写实验报告是培养实验能力的一个方面。写实验报告要用简明的形式将实验过程、实验结果完整、准确地表达出来，要求文字通顺，字迹端正，图表规范，结果正确，讨论认真。实验报告要求在课后独立完成，用学校统一印制的“实验报告纸”来书写。

实验报告通常包括以下内容：

实验名称：表示做什么实验。

实验目的：说明为什么做这个实验，做该实验要达到什么目的。

实验仪器：列出主要仪器的名称、型号、规格、精度等。

实验原理：阐明实验的理论依据，写出待测量计算公式的简要推导过程，画出有关的图（原理图或装置图），如电路图、光路图等。

数据记录：实验中所测得的原始数据要尽可能用表格的形式列出，正确表示有效数字和单位。

数据处理：根据实验目的对实验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，计算要写出主要的计算内容。

实验结果：扼要写出实验结论，要体现出测量数据、误差和单位。

问题讨论：讨论实验中观察到的异常现象及其可能的解释，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建议，简述自己做实验的心得体会，回答实验思考问题。

为了保证实验课程的正常进行，现在对实验报告提出以下 3 点要求：

- 课前要求预习实验内容，明确实验目的，了解实验原理，弄清实验步骤，初步了解仪器的使用方法，画好实验数据记录表格。未做好预习者不得动手做实验。

- 在测量时，应如实、即时做好实验数据记录（数据记录要整洁，字迹清楚，避免错记），不可事后凭回忆“追记”数据，更不可为拼凑数据而将实验数据记录做随心所欲地涂改。

- 实验报告要认真按时完成。

在做物理实验时，我们不是要一个塞满东西的脑袋，而是要一个善于分析问题的头脑，实验的目的和任务不仅要有知识，更重要的是将知识转化为能力！

第一章 测量误差及数据处理

物理实验的任务不仅是定性地观察各种自然现象，更重要的是定量地测量相关物理量。而对事物定量地描述又离不开数学方法和对实验数据进行处理。因此，误差分析和数据处理是物理实验课的基础。本章将从测量及误差的定义开始，逐步介绍有关误差和实验数据处理的方法和基本知识。误差理论及数据处理是一切实验结果中不可缺少的内容，是不可分割的两部分。误差理论是一门独立的学科。随着科学技术事业的发展，近年来误差理论基本的概念和处理方法也有很大发展。误差理论以数理统计和概率论为其数学基础，研究误差性质、规律及如何消除误差。实验中的误差分析，其目的是对实验结果做出评定，最大限度地减小实验误差，或指出减小实验误差的方向，提高测量质量，提高测量结果的可信赖程度。对低年级大学生来说，这部分内容难度较大，本课程仅限于介绍误差分析的初步知识，着重点放在几个重要概念及最简单情况下的误差处理方法，不进行严密的数学论证，减小学生学习的难度，这样有利于学好物理实验这门基础课程。

第一节 测量与误差

物理实验不仅要定性地观察物理现象，更重要的是找出有关物理量之间的定量关系。因此就需要进行定量的测量，以取得物理量数据的表征。对物理量进行测量，是物理实验中极其重要的一个组成部分。对某些物理量的大小进行测定，实验上就是将此物理量与规定的作为标准单位的同类量或可借以导出的异类物理量进行比较，得出结论，这个比较的过程就叫做测量。例如，物体的质量可通过与规定用千克作为标准单位的标准砝码进行比较而得出测量结果；物体运动速度的测定则必须通过与两个不同的物理量，即长度和时间的标准单位进行比较而获得。比较的结果记录下来就叫做实验数据。测量得到的实验数据应包含测量值的大小和单位，二者是缺一不可的。

国际上规定了7个物理量的单位为基本单位，其他物理量的单位则是由这7个基本单位按一定的计算关系式导出的。因此，除基本单位之外的其余单位均称它们为导出单位。如以上提到的速度以及经常遇到的力、电压、电阻等物理量的单位都是导出单位。

一个被测物理量，除了用数值和单位来表征它外，还有一个很重要的表征它的参数，这便是对测量结果可靠性的定量估计。这个重要参数却往往容易为人们所忽视。设想如果得到一个测量结果的可靠性几乎为零，那么这种测量结果还有什么价值呢？因此，从表征被测量这个意义上来说，对测量结果可靠性的定量估计与其数值和单位至少具有同等的重要意义，三者是缺一不可的。

测量可以分为两类。按照测量结果获得的方法来分，可将测量分为直接测量和间接测量两类；而从测量条件是否相同来分，又有所谓等精度测量和不等精度测量。

根据测量方法可分为直接测量和间接测量。直接测量就是把待测量与标准量直接比较得出结果，如用米尺测量物体的长度，用天平称量物体的质量，用电流表测量电流等，都是直接测量。间接测量借助函数关系由直接测量的结果计算出所谓的物理量，例如，已知路程和时间，根据速度、时间和路程之间的关系求出的速度就是间接测量。

一个物理量能否直接测量不是绝对的。随着科学技术的发展，测量仪器的改进，很多原来只能间接测量的量，现在可以直接测量了。比如电能的测量本来是间接测量，现在也可以用电度表来进行直接测量。物理量的测量，大多数是间接测量，但直接测量是一切测量的基础。

根据测量条件来分，有等精度测量和非等精度测量。等精度测量是指在同一（相同）条件下进行的多次测量，如同一个人，用同一台仪器，每次测量时周围环境条件相同，等精度测量每次测量的可靠程度相同。反之，若每次测量时的条件不同，或测量仪器改变，或测量方法、条件改变，这样所进行的一系列测量叫做非等精度测量。非等精度测量的结果，其可靠程度自然也不相同。物理实验中大多采用等精度测量。应该指出：重复测量必须是重复进行测量的整个操作过程，而不是仅仅为重复读数。

测量仪器是进行测量的必要工具。熟悉仪器性能。掌握仪器的使用方法及正确进行读数，是每个测量者必备的基础知识。下面简单介绍仪器精密度、准确度和量程等基本概念。

仪器精密度是指仪器的最小分度相当的物理量。仪器最小的分度越小，所测量物理量的位数就越多，仪器精密度就越高。对测量读数最小一位的取值，一般来讲应在仪器最小分度范围内再进行估计读出一位数字。如具有毫米分度的米尺，其精密度的为 1 mm，应该估计读到毫米的十分位；螺旋测微器的精密度的为 0.01 mm，应该估计读到毫米的千分位。

仪器准确度是指仪器测量读数的可靠程度。它一般标在仪器上或写在仪器说明书上。如电表仪表所标示的级别就是该仪器的准确度。对于没有标明准确度的仪器，可粗略地取仪器最小的分度数值或最小分度数值的一半，一般对连续读数的仪器取最小分度数值的一半，对非连续读数的仪器取最小的分度数值。在制造仪器时，其最小的分度数值是受仪器准确度约束的，对不同的仪器准确度是不一样的，对于测量长度的常用仪器：米尺、游标卡尺和螺旋测微器，它们的准确度依次提高。

量程是指仪器所能测量的物理量最大值和最小值之差，即仪器的测量范围（有时也将所能测量的最大值称量程）。测量过程中，超过仪器量程使用仪器是不允许的，轻则仪器准确度降低，使用寿命缩短，重则损坏仪器。

一、误差与偏差

测量的目的就是为得到被测物理量所具有的客观真实数据，但由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的限制，只能获得该物理量的近似值，也就是说，一个被测量值 N 与真值 N_0 之间总是存在着这种差值，这种差值称为测量误差，即

$$\Delta N = N - N_0$$

显然误差 ΔN 有正负之分，因为它是指与真值的差值，常称为绝对误差。注意，绝对误差不是误差的绝对值！

误差存在于一切测量之中，测量与误差形影不离，分析测量过程中产生的误差，将影响降低到最低程度，并对测量结果中未能消除的误差做出估计，是实验中的一项重要工作，也是实验的基本技能。实验总是根据对测量结果误差限度的一定要求来制订方案和选用仪器的，不要以为仪器精度越高越好。因为测量的误差是各个因素所引起的误差的总合，要以最小的代价来取得最好的结果，就要合理地设计实验方案，选择仪器，确定采用这种或那种测量方法。如比较法、替代法、天平复称法等，都是为了减小测量误差；对测量公式进行这样或那样的修正，也是为了减少某些误差的影响；在调节仪器时，如调仪器使其处于铅直、水平状态，要考虑到什么程度才能使它的偏离对实验结果造成的影响可以忽略不计；电表接入电路和选择量程都要考虑到引起误差的大小。在测量过程中某些对结果影响大的关键量，就要努力想办法将它测准；有的测量不太准确对结果没有什么影响，就不必花太多的时间和精力去对待。在进行处理数据时，某个数据取到多少位，怎样使用近似公式，作图时坐标比例、尺寸大小怎样选取，如何求直线的斜率等，都要考虑到引入误差的大小。

由于客观条件所限，人们认识的局限性，测量不可能获得待测量的真值，只能是近似值。设某个物理量真值为 x_0 ，进行 n 次等精度测量，测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ （测量过程无明显的系统误差）。它们的误差为

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= x_1 - x_0 \\ \Delta x_2 &= x_2 - x_0 \\ &\vdots \\ \Delta x_n &= x_n - x_0\end{aligned}$$

求和

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^n \Delta x_i &= \sum_{i=1}^n x_i - nx_0 \\ \text{即 } \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n} &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - x_0\end{aligned}$$

当测量次数 $n \rightarrow \infty$ ，可以证明 $\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n} \rightarrow 0$ ，而且 $\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{x}$ 是 x_0 的最佳估计值，称 $\bar{x}$ 为测量值的近似真实值。为了估计误差，定义测量值与近似真实值的差值为偏差，即 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ 。偏差又叫作“残差”。实验中真值得不到，因此误差也无法知道，而测量的偏差可以准确知道，实验误差分析中要经常计算这种偏差，用偏差来描述测量结果的精确程度。

二、相对误差

绝对误差与真值之比的百分数叫做相对误差。用 E 表示：

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

由于真值无法知道，所以计算相对误差时常常用 N 代替 N_0 。在这种情况下， N 可能是公认值，或高级精密仪器的测量值，或测量值的平均值。相对误差用来表示测量的相对精确度，相

对误差用百分数表示，保留两位有效数字。

三、系统误差与随机误差

根据误差的性质和产生的原因，可分为系统误差和随机误差。

1. 系统误差

系统误差是指在一定条件下多次测量的结果总是向一个方向偏离，其数值一定或按一定规律变化。系统误差的特征是具有一定的规律性。系统误差的来源具有以下几个方面：① 仪器误差，它是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；② 理论误差，它是由于测量所依据的理论公式本身的近似性，或实验条件不能达到理论公式所规定的要求，或测量方法等所带来的误差；③ 观测误差，它是由于观测者本人生理或心理特点造成的误差。例如，用“落球法”测量重力加速度，由于空气阻力的影响，多次测量的结果总是偏小，这是测量方法不完善造成的误差；用停表测量运动物体通过某一段路程所需要的时间，若停表走时太快，即使测量多次，测量的时间 t 总是偏大为一个固定的数值，这是仪器不准确造成的误差；在测量过程中，若环境温度升高或降低，使测量值按一定规律变化，是由于环境因素变化引起的误差。

在任何一项实验工作和具体测量中，必须要想尽一切办法，最大限度地消除或减小一切可能存在的系统误差，或者对测量结果进行修正。发现系统误差需要改变实验条件和实验方法，反复进行对比，系统误差的消除或减小是比较复杂的一个问题，没有固定不变的方法，要具体问题具体分析各个击破。产生系统误差的原因可能不止一个，一般应找出影响的主要因素，有针对性地消除或减小系统误差。以下介绍几种常用的方法。

检定修正法：指将仪器、量具送计量部门检验取得修正值，以便对某一物理量测量后进行修正的一种方法。

替代法：指测量装置测定待测量后，在测量条件不变的情况下，用一个已知标准量替换被测量来减小系统误差的一种方法。如消除天平的两臂不等对待测量的影响可用此办法。

异号法：指对实验时在两次测量中出现符号相反的误差，采取平均值后消除的一种方法。例如，在外界磁场作用下，仪表读数会产生一个附加误差，若将仪表转动 180° 再进行一次测量，外磁场将对读数产生相反的影响，引起负的附加误差。两次测量结果平均，正负误差可以抵消，从中可以减小系统误差。

2. 随机误差

在实际测量条件下，多次测量同一量时，误差的绝对值符号的变化，时大时小、时正时负，以不可预定方式变化着的误差叫做随机误差，有时也叫偶然误差。当测量次数很多时，随机误差就显示出明显的规律性。实践和理论都已证明，随机误差服从一定的统计规律（正态分布），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（单峰性）；绝对值相等的正负误差出现的概率相同（对称性）；绝对值很大的误差出现的概率趋于零（有界性）；误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零（抵偿性）。因此，增加测量次数可以减小随机误差，但不能完全消除。

引起随机误差的原因也很多。仪器精密度和观察者感官灵敏度有关。如仪器显示数值的

估计读数偏大和偏小；仪器调节平衡时，平衡点确定不准；测量环境扰动变化以及其他不能预测不能控制的因素，如空间电磁场的干扰，电源电压波动引起测量的变化等。

由于测量者过失，如实验方法不合理，用错仪器，操作不当，读错数值或记错数据等引起的误差，是一种人为的过失误差，不属于测量误差，只要测量者采用严肃认真的态度，过失误差是可以避免的。

实验中，精密度高是指随机误差小，而数据很集中；准确度高是指系统误差小，测量的平均值偏离真值小；精确度高是指测量的精密度和准确度都高。数据集中而且偏离真值小，即随机误差和系统误差都小。

四、测量的精密度、准确度和精确度

测量的精密度、准确度和精确度都是评价测量结果的术语，但目前使用时其含义并不尽一致，以下介绍较为普遍采用的意见。

测量精密度表示在同样测量条件下，对同一物理量进行多次测量，所得结果彼此间相互接近的程度，即测量结果的重复性、测量数据的弥散程度，因而测量精密度是测量偶然误差的反映。测量精密度高，偶然误差小，但系统误差的大小不明确。

测量准确度表示测量结果与真值接近的程度，因而它是系统误差的反映。测量准确度高，则测量数据的算术平均值偏离真值较小，测量的系统误差小，但数据较分散，偶然误差的大小不确定。测量精确度则是对测量的偶然误差及系统误差的综合评定。精确度高，测量数据较集中在真值附近，测量的偶然误差及系统误差都比较小。

五、随机误差的估算

对某一测量进行多次重复测量，其测量结果服从一定的统计规律，也就是正态分布（或高斯分布）。我们用描述高斯分布的两个参量（ $\bar{x}$ 和 σ ）来估算随机误差。设在一组测量值中， n 次测量的值分别为： $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。

1. 算术平均值

根据最小二乘法原理证明，多次测量的算术平均值

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

是待测量真值 x_0 的最佳估计值。称 $\bar{x}$ 为近似真实值，以后我们将用 $\bar{x}$ 来表示多次测量的近似真实值。

2. 标准偏差

误差理论证明，平均值的标准偏差

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