21世纪高等学校教材

基础物理实验

主编摇吴俊林
编者摇袁胜利摇刘志存摇鲁佰左

陕西师范大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

前摇摇言

近年来，随着科学技术的迅猛发展和实验教学改革的不断深入，物理实验课教学从实验内容到实验技术都在不断更新变化 郾新概念、新方法、新的实验技术和科研领域中的新成果已逐步在物理实验课中得到反映 郾本书是在陕西师范大学物理实验室多年教学实践的基础上，经过反复实践、积累经验、不断改进、充实完善编写而成的，也是近年来物理实验课程内容和课程体系不断改革的成果反应，同时也是陕西师范大学“教育教学改革项目《普通物理实验重点课程建设》”的研究成果 郾本书可作为师范院校或综合性大学理科学生基础物理实验课程的教材，也可供理工科类专业学生的物理实验课程选用 郾

基础物理实验课是为理科学生开设的一门实践性很强的必修课 郾它的任务是通过实验过程培养学生发现、分析和解决问题的能力，为从事科学研究打下坚实的基础 郾为此，必须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 郾同时随着时代的发展，要从培养掌握现代科学技术的创新人才的高度出发，全面审视原有实验教学内容和教学体系，力求站在现代科学技术水平的高度上，从培养 圆员世纪高素质创新人才的目标出发，必须进行新的构想和内容精选，坚决淘汰已过时的内容、方法和手段，补充一些在物理学科中有代表性、有应用价值的先进的实验内容、方法和手段，使物理实验课教学内容和教学体系的改革融合时代信息，适应时代发展 郾

我校理科非物理类专业物理实验课以前只开设基础物理实验中部分最基本的内容，教材内容严重滞后于其他学科发展对物理学和物理实验技术的要求，滞后于学科交叉与融合的时代特征 郾在科学技术飞速发展的时代，化学、生物、数学、食品工程、计算机、电子信息等许多学科的发展对物理实验知识和技术已有了更宽广的要求，特别是化学、生物学的发展已进入分子、原子尺寸，大量应用现代光学技术、电磁学技术、核技术、载射线技术等 郾这就给基础物理实验课程内容的合理设置提出了新的要求，必须建立一个新的课程体系，既符合物理实验自身规律的合理、完整的体系，又能适应其他学科发展对物理实验的要求 郾对此本书共编写了 远愿个实验，内容包括力学、热学、电磁学、光学、误差理论与不确定度、数据处理等，对非物理类不同的系和专业可以从本教材的各章中分别选择不同的题目组成实验循环 郾尽管理科非物理类专业学生在计划学时内无法完成全部实验内容，但是本书在编写时十分注重因材施教，便于自学，亦可作为一本有益的资料，应用时便于查阅 郾

本书有以下特点：

员郾本书以“加强基础、重视应用、提高素质、培养能力、开拓视野”为指导思想，力求站在现代科学技术水平的高度上，从培养 圆员世纪高素质创新人才的要求出发，以培养学生的独立实验能力为核心，提高学生创新意识和创新能力为目标，对课程教学体系、教学内容进行了新的构思与设计 郾

圆郾本书进行了体系创新，打破了以传授知识为中心的传统物理实验教学体系，建立了符合学科自身发展规律和以培养学生创新能力为宗旨的一条主线、多个层次、综合化的新体系，改变了按照力、热、电、光分块编写的传统模式 郾

猿郾实验内容上进行了精选基础实验，做到“高度浓缩”，意在加强“三基”（基础知识、基本方法、基本技能）训练；综合提高与应用型实验有丰富的选择余地和灵活的运用空间，其目的是充分发挥学生的积极性、主动性，为个性培养创造一个相对自由、宽松的实验条件和环境，意在最大限度地促进学生实践能力，思考、解决问题能力以及创新思维能力的培养，为学生日后从事科研活动打下一定基础 郾

源郾实验内容注重了应用性和现代实验技术的引进，力争缩短基础与应用、教学与科研以及教科书与现代科学技术之间的距离 郾写作时部分经典实验内容增加了相关的物理学史料，注重人文环境熏陶 郾

物理实验课教学以及实验室建设和实验课程改革是一项长期的集体的事业，实验教材的编写离不开实验室的建设和发展，经过几十年的教学反复实践，作过多次调整，不断改进、更新和扩充，积累经验，不断充实完善，才达到目前的规模和水平 郾因而，我们说本书的编写凝聚了我校五十多年来所有从事物理实验课教学的教师和实验技术人员的智慧与劳动成果 郾多数实验题目都包含有许多同志先后的贡献，这里难以逐一记载他们的功绩 郾从初建物理实验室的秦牧民、魏忠仁等老先生，到员愿缘年物理实验独立设课参加原实验讲义编写的贾玉民、苏思恭、王石山等几十位同志先后为实验室的建设、实验课的改革、实验教材的编写都付出过辛勤的劳动，他们的无私奉献永远不会被忘记 郾近些年来，还有许多同志为实验室的建设做了不少工作，在新教材出版之际，谨向他们表示谢意！

本书由吴俊林同志主编，袁胜利同志编写了第二章的实验 员~圆员 第三章的实验 源圆~缘员；刘志存、鲁百佐同志编写了第二章的实验 圆圆~猿员 第三章的实验 缘圆~远园和附录；吴俊林同志编写了第一章、第二章的实验 猿圆~源员 第三章的实验 远员~远圆郾全书由吴俊林同志统稿 郾

衷心感谢世界银行贷款“高等教育发展”项目对本书出版的大力资助。本书在编写过程中，征求了许多老师的意见，参考并吸收了兄弟院校的有关资料和经验 郾在本书的编写和出版过程中得到了宝鸡文理学院、陕西师范大学资产处、财务处、教务处、物理学与信息技术学院和陕西师范大学出版社的大力支持，借此表示衷心的感谢 郾

实验室建设和实验教学改革是一项长期的、复杂的系统工程，我们深知改革还处于起步阶段，还有许多不完善和需要改进之处，加上本书编者水平有限，编写时间仓促，书中难免有疏漏谬误之处，恳请读者批评指正 郾对关心、支持本书编写的所有同仁表示衷心的感谢！

编摇摇者

圆园猿缘年 愿月

内 容 简 介

本书是在陕西师范大学基础物理实验教学中心长期教学实践经验总结的基础上，结合近年来教学内容和课程体系改革的成果，特别是吸收了陕西师范大学“教育教学改革项目《普通物理实验重点课程建设》”研究成果的基础上编写的 圆本书经加强基础、重视应用、提高素质、培养能力为指导思想，力求站在现代科学技术水平的高度上，从培养 圆员世纪高素质创新人才的要求出发，对课程教学体系、教学内容进行了全新的构思设计与整合，形成了一个新体系 圆全书包括测量误差与数据处理等基础物理实验基本知识、源员个基础实验、圆范个综合提高实验，分三部分，共 远愿个实验 圆本书有丰富的选择余地和灵活的运用空间，可供不同类型学校、不同专业选择 圆书末附有相关数据表可供查阅 圆

本书是师范类院校物理专业和理科非物理专业的基础物理实验课教材，也可作为综合性大学或其他理工科类院校基础物理实验课程的教材，并适合不同层次的教学需要 圆

目摇摇录

第一章摇基础物理实验基本知识…… 员
第一节摇绪论…… 员
第二节摇测量误差的基本知识…… 猿
第三节摇测量不确定度和测量结果的表示 …… 圆原
第四节摇有效数字及其运算 …… 圆愿
第五节摇实验数据处理的常用方法 …… 猿圆
第二章摇基础物理实验 …… 源缘
实验 员摇长度和体积的测定 …… 源缘
实验 圆摇固体和液体密度的测量 …… 缘圆
实验 猿摇单摆运动规律的研究 …… 缘愿
实验 源摇物体密度测量实验方案的设计与研究 …… 远圆
实验 缘摇空气密度的测定 …… 远圆
实验 远摇牛顿第二定律的研究 …… 远愿
实验 苑摇碰撞规律的研究 …… 苑原
实验 愿摇弦振动的研究 …… 苑愿
实验 怨摇金属线胀系数的测定 …… 愿圆
实验 员园摇刚体的转动惯量的测量 …… 愿原
实验 员员摇单摆周期实验公式的总结 …… 怨员
实验 员圆摇容器排水规律的研究 …… 怨圆
实验 员猿摇物质比热容的测定 …… 怨猿
实验 员源摇良导体导热系数的测定 …… 怨愿
实验 员缘摇用落球法测定液体的粘滞系数 …… 员园圆
实验 员远摇液体表面张力系数的测定 …… 员园苑
实验 员苑摇冰熔解热的测定 …… 员园源
实验 员愿摇空气比热容比的测定 …… 员园怨
实验 员怨摇电热当量的测量 …… 员员圆
实验 圆园摇简谐振动的研究 …… 员员猿
实验 圆员摇量热学实验散热误差的研究分析 …… 员员愿
实验 圆圆摇电磁学实验基本训练 …… 员圆员
实验 圆猿摇非线性无件伏安特性的测量 …… 员圆圆
实验 圆源摇示波器的原理及应用 …… 员圆缘
实验 圆缘摇惠斯登电桥测中值电阻 …… 员圆怨
实验 圆远摇模拟法测绘静电场 …… 员猿圆

需要全本请访问 www.ertongbook.com

实验 圆圆直流电位差计的原理及应用 …… 员远
实验 圆圆多功能电表的设计与校准 …… 员怨
实验 圆圆磁场分布的测量 …… 员猿
实验 猿圆砸脱串联电路谐振特性研究 …… 员缘
实验 猿圆霍耳效应及其应用 …… 员愿
实验 猿圆薄透镜焦距的测量及成像规律的研究 …… 员圆
实验 猿圆分光计的调节及三棱镜折射率的测定 …… 员缘
实验 猿圆用掠入射法测量物质的折射率 …… 员怨
实验 猿圆平行光管的调整及其应用 …… 员猿
实验 猿圆显微镜和望远镜放大率的测定 …… 员愿
实验 猿圆等厚干涉的应用 …… 员员
实验 猿圆用双棱镜干涉测光波波长 …… 员源
实验 猿圆迈克耳逊干涉仪的调节及光波波长的测定 …… 员苑
实验 源圆物质旋光性研究 …… 圆园
实验 源圆偏振光的观察与研究 …… 圆猿
第三章摇综合提高物理实验 …… 圆愿
实验 源圆弹簧振子的运动规律的研究 …… 圆愿
实验 源圆物体在流体中运动规律的研究 …… 圆园
实验 源圆耦合振子的运动规律 …… 圆圆
实验 源圆动力学法测材料弹性模量 …… 圆源
实验 源圆动态法测定物体的热导率 …… 圆员
实验 源圆铁磁材料居里温度的测定 …… 圆远
实验 源圆材料杨氏模量测定与拉伸规律的研究 …… 圆园
实验 源圆声波在不同介质中传播速度的测定 …… 圆缘
实验 缘圆物体惯性质量测量实验设计与研究 …… 圆愿
实验 缘圆液体粘滞系数与温度关系的研究 …… 圆员
实验 缘圆交流电桥测量电容电感 …… 圆员
实验 缘圆低值电阻的测量 …… 圆源
实验 缘圆砸脱串联电路暂态过程的研究 …… 圆苑
实验 缘圆孕晕结正向压降温度特性 …… 圆圆
实验 缘圆热敏电阻温度计的设计和制作 …… 圆缘
实验 缘圆电子束的偏转和聚焦 …… 圆远
实验 缘圆非线性电路混沌的研究 …… 圆源
实验 缘圆铁磁材料磁滞特性的研究 …… 圆怨
实验 远圆用 悦悦阅电视显微油滴仪测电子电荷 …… 圆源
实验 远圆单缝衍射的光强分布及缝宽的测量 …… 圆苑
实验 远圆光栅特性研究及光波波长的测定 …… 圆园
实验 远圆光电效应测定普朗克常量 …… 圆猿
实验 远圆超声光栅测液体中的声速 …… 圆远

实验 远缘摇空气折射率的测定 …… 圆愿
实验 远苑摇利用周期性光信号测定光速的研究 …… 圆园
实验 远愿摇数字信号光纤传输技术实验 …… 圆源
实验 远怨摇悦悦阅光栅光谱仪与物质吸收光谱分析 …… 猿员
附表…… 猿圆

第一章摇基础物理实验基本知识

第一节摇绪摇论

物理学本质上是一门实验科学,在物理学的建立和发展过程中物理实验一直起着十分重要的作用 郾从人们认识客观事物的规律来看,总是先从实验出发,经过分析和归纳,上升为理论,然后再回到实践中去指导实践,并接受实践的检验 郾三四百年前,伽利略和牛顿等学者,以科学实验方法研究自然规律,逐渐形成了一门物理科学 郾从此物理学中每个概念的提出,每个定律的发现,每个理论的建立,都以坚实、严格的实验为基础,且还要经受实验的进一步检验 郾所以物理实验是物理学的基础 郾例如,法拉第于 员愿猿员年在实验室里发现了电磁感应现象,进而得出电磁感应定律和其他几个实验定律 郾麦克斯韦系统地总结了电磁学的成就,在 员愿远缘年提出著名的电磁场理论 郾二十几年后,赫兹的电磁波实验又检验和证实了电磁场理论的正确性 郾物理实验在物理学自身发展中有着重要的作用,同时在推动其他学科、工程技术的发展中也起着重要的作用 郾

纵观科学技术的发展史,可以看出每次重大的技术革命都源于物理学的发展 郾物理学的每一项新突破,都转化为工程技术上的重大变革,继而发展成为新的生产力,推动社会的发展 郾历史上热力学、分子物理学的发展,使人类进入热机、蒸汽机时代 ;电磁学的发展使人类跨入电气化时代 ;哈恩发现了原子核裂变,才有了今天的核动力 ;现代无线电通信,是基于麦克斯韦电磁场理论和赫兹的无线电波实验 ;原子物理学、量子力学的发展,促使了半导体的研究,导致晶体管的出现,进而有了今天超大规模集成电路和高速计算机的迅猛发展,使我们进入新的信息时代 ;激光器的发明,把许多工程技术领域推向完全新的历史阶段等等 郾这些令人感慨的例子,数不胜数,都说明了物理学及物理实验对人类社会发展的重要性 郾

物理学的整个发展过程,充分表现出理论和实践的辩证关系 郾在研究物质世界的规律性的过程中,理论研究和实验研究是不可分割的两个方面,它们是相辅相成和相互促进的关系 郾没有理论指导的实验是盲目的 ;没有以实验事实为依据的理论是难以令人信服的 郾坚持理论联系实际,理论与实践相结合,是科学技术人才必须具备的基本素质之一 郾

一、物理实验课的目的和任务

大学物理实验课是一门单独开设的实践性很强的课程,它和理论课具有同等重要的地位 郾实验研究有自己的一套理论、方法和技能 郾通过本课程的学习使我们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基础 郾本课程以基本物理量的测量方法,基本物理现象的观察和物理思想研究,常用测量仪器的结构原理和使用方法为主要内容进行教学,对学生的基本实验能力、分析能力、表达能力和综合运用及设计能力进行严格的培养 郾本课程是对理工科学生进行科学实验基本训练的一门必修基础课,是学生进入大学后接受系统的实验方法和实验技能训练的开端 郾基本实验能力是科学研究的基本功,只有具备熟

练扎实的实验基础知识、方法和技能，才有可能在科学研究中做出成绩 圆在培养既懂理论又会动手，能解决实际问题的高级人才的过程中，大学物理实验课具有独特的、不可替代的重要作用 圆

开设物理实验课的目的简单说来有以下三点：

员援学习物理实验的基本知识、基本方法和基本技能援不仅要学习如何使用各种测量仪器，以及各种物理量的测量方法，观察分析各种实验现象等，还要学习测量误差的理论知识，学会正确地记录和处理数据，正确地表达实验结果，对实验结果进行正确的分析评价等，为以后的科学研究工作或其他科学技术工作打下良好的实验基础援

圆援逐步培养起严肃认真、实事求是的科学态度和工作作风，养成良好的实验习惯援科学是老老实实的学问，来不得半点虚假和马虎援良好的实验习惯是做好实验的重要条件，一旦形成不好的习惯，以后就很难改正 圆要在每次实验中有意识地锻炼自己援

猿援通过实际的观察和测量，加深对物理理论知识的理解和掌握，同时激发大家学习物理科学的兴趣 圆

物理实验课程的具体任务是：

员援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 圆

圆援培养与提高学生的科学实验能力 圆这包括：(员 自学能力：能够自行阅读实验教材和资料，能正确理解实验原理，作好实验前的准备；(圆 实践能力：能够借助教材或仪器的说明书，正确使用常用仪器，完成实验操作；(猿 思维判断能力：能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析，作出判断；(源 表达书写能力：能够正确记录和处理实验数据，绘制图线，说明实验结果，撰写合格的实验报告；(缘 简单的设计能力：能够完成综合提高实验和设计性实验；(远 创新能力：能够举一反三，灵活运用，有所创新 圆

猿援培养与提高学生的科学实验素质 圆要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风，严肃认真的科学态度，主动研究的探索精神，遵守纪律、团结协作和爱护公共财物的优良品德 圆

二、基础物理实验课的三个环节

物理实验课是学生在教师指导下独立进行实验的一种实践活动，无论实验内容的要求或研究的对象如何不同，无论采用什么方法，其基本程序大致相同，一般都有三个基本环节：

员援实验课前预习

物理实验课不同于理论课，做实验前一定要认真预习，预习的好坏直接影响实验的成败，因此，预习是做好实验的基础 圆预习时首先要仔细阅读教材的有关章节及实验，不能只将实验内容通读一遍，关键是要理解其意，明确实验的目的要求，搞清实验所依据的原理和采用的方法，初步了解所用量具、仪器、装置的主要性能及使用方法，明白如何进行操作，要测量哪些数据，要注意哪些事项 圆对一时搞不清楚的问题，应做出记录，以便在实验过程中加倍注意，通过实验来解决 圆

阅读教材后要在规定的实验报告本或报告纸上写出简明扼要的预习报告，设计并画出记录原始数据的表格 圆上课时，教师将通过不同的方式检查预习情况，并作为评定课内成绩的一项内容 圆对于没有预习的学生，不允许做本次实验 圆

圆援实验观测

实验课内操作是实验课的关键环节，是学习科学实验知识，培养实验技能，完成实验任

务的主要过程 郾进入实验室要遵守实验室规则 郾实验前应首先清点量具、仪器及有关器材是否完备，然后根据实验内容和测量方法进行合理布局，对量具、仪器进行调整或按电路、光路图进行连接 郾清楚了解所用仪器的性能、使用方法，牢记注意事项 郾实验前如有必要应请指导教师检查 郾实验开始，如果条件允许，可先粗略定性地观察一下实验的全过程，了解数据分布情况，有无异常现象 郾如果正常就可以从头按步骤进行实验测试 郾实验过程中如出现异常情况，应立即中止实验，以防损坏仪器，并认真思考，分析原因，力求自己动手寻找、排除故障，当然也可与指导教师讨论解决 郾通过实验学习探索和研究问题的方法 郾

物理实验过程中要仔细观察实验现象，手脑并用，边做实验边思考，做到认真测量，如实记录原始数据 郾实验完毕，原始数据记录经教师检查后，方能归整仪器，离开实验室 郾

猿郾实验报告撰写

实验报告是实验完成后的书面总结，是把感性认识转化为理性认识的过程，是培养表达能力的主要环节 郾首先应该完整地分析一下整个实验过程，实验依据的理论和物理规律是什么 ;通过计算、作图等数据处理，得到什么实验结果，有的还要进行科学合理的误差或不确定度估算 ;有哪些提高 ;存在什么问题 郾应该注意的是，写实验报告不要不动脑筋地去抄教材 郾因为实验教材是供做实验的人阅读的，是用来指导别人做实验的 ;实验报告则是向别人报告实验的原理、方法，使用的仪器，测得的数据，供别人评价自己的实验结果 郾认真书写实验报告，不仅可以提高自己写科研报告和科研论文的水平，而且可以提高材料组织、语言表达、文字修饰的写作能力，这是其他理论课程无法替代的 郾

物理实验报告一般包括以下几项内容：

① 实验名称

② 实验目的 (或要求)

③ 实验仪器和用具

④ 实验原理 摇简要叙述实验的物理思想和依据的物理规律、主要计算公式 郾电学和光学实验应画出相应的电路图和光路图 郾

⑤ 数据表格及数据处理 摇把教师签字的原始数据如实地誊写在报告的正文中，写出计算的主要过程及误差或不确定度估算过程 郾进行数值计算时，要先写出公式，再代入数据，最后得出结果 郾若用作图法处理数据，应严格按作图要求，画出符合规定的图线 郾

⑥ 讨论分析小结 摇讨论分析实验中遇到的问题，写出自己的见解、体会和收获，提出对实验的改进意见等 郾讨论分析是培养分析能力的重要途径 郾

⑦ 回答问题 摇回答指定的问题 郾

第二节摇测量误差的基本知识

物理学是建立在实验基础上的科学，物理实验离不开对物理量进行测量 郾由于人们认识能力和科学技术水平的限制，使得物理量的测量很难完全准确 郾也就是说，一个物理量的测量值与其客观存在的值总有一些差异，即测量总存在误差 郾由于误差的存在，使得测量结果带有一定的不确定性，因此，对一个测量质量的评估，要给出它的误差或不确定度，不知道可靠程度的测量值是没有意义的 郾本节主要介绍测量误差的基本知识，同时要注意体会误差分析的思想对于做好实验和实验设计的意义 郾

一、测量与误差

员郾测量及其分类

在物理实验中，不仅要定性地观察各种物理现象，还必须定量地说明物理量的变化规

律，为此就需要对物理量进行测量 圆测量是将被测物理量与选作标准单位的同类物理量进行比较的过程 圆其比值即为被测物理量的测量值，被测物理量的测量结果用标准量的倍数和标准量的单位来表示 圆因此，测量的要素是被测物理量、标准量及操作者 圆测量结果应是一组数字和单位，必要时还要给出测量所用的量具或仪器，测量的方法和条件等 圆

按照测量的方法，可将测量分为两类 圆一类是可用标准计量仪器直接和待测量进行比较而得到结果的测量，称为直接测量，相应物理量称为直接测定量 圆如用米尺测量单摆摆线长度为 蕴越忍园圆糟，用停表测量单摆周期 栽越员圆员泽用电流表测量线路中的电流等 圆另一类是被测物理量不能用标准计量仪器直接比较，而需要依据待测量和某几个直接测定量之间一定的函数关系计算出测定量的值，这种测量称为间接测量，相应的物理量称为间接测定量 圆如用单摆测定重力加速度，可在直接测定摆长和周期后，依据公式 早越原圆 $\frac{蕴}{栽}$ 计算出测量结果 圆

如果按测量次数来分类，可将直接测量分为单次测量和多次测量，而根据测量条件有无变化又可将多次测量分为等精度测量和不等精度测量两类 圆由于所有测量都是依据一定的方法，使用一定的仪器，在一定的环境中，由一定的观察者进行的，所以我们把这一定的测量方法、仪器、环境和观察者统称为条件，如果多次测量时，每次的测量条件都完全相同（同一方法、同一仪器、同一环境、同一观察者），则这种测量称为等精度测量，测得的一组数据称为测量列 圆如果在多次重复测量过程中，有一个或几个条件发生了变化，则这种测量称为非（不）等精度测量 圆物理实验中尽量采用等精度测量 圆

圆圆测量误差及其分类

（员）真值与测量值

任何一个物理量在确定条件下客观存在的、也就是实际具备的量值称为真值 圆例如某一物体在常温条件下具有一定的几何形状及质量 圆真值是一个比较抽象和理想的概念，一般来说不能确切知道这个值 圆真值包括理论真值（如三角形内角和之和恒为 员圆圆）、约定真值（如指定值）、标准值、公认值及最佳估计值等 圆

通过各种实验所得到的量值称为测量值，多是仪器或装置的读数或指示值、测量值是被测量真值的近似值，包括：①单次测量值，②算术平均值，③加权平均值等 圆

（圆）测量误差

每一个物理量在一定条件下具有的客观大小称为物理量的真值 圆进行测量的直接目的就是力图获得待测量的真值 圆但是由于测量条件的不完善，如实验理论的近似性、实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性及环境的不稳定性等因素的影响，任何测量结果和待测量的真值间总有差异，这种差异在数值上的表示称为误差 圆误差自始至终存在于一切科学实验和测量过程中，测量结果都存在误差，这就是误差公理 圆

任何测量所得数据，都不可避免地要出现误差，因而没有误差的测量结果是不存在的 圆在误差必然存在的情况下，测量的任务是：第一，尽量设法减小误差；第二，求出待测量的最近真值，并估算其误差 圆为此，必须研究误差的性质、来源及其对测量结果的影响，以便采用适当措施，得到最好的结果 圆

（猿）测量误差的分类

按照测量过程中误差的性质及其产生的原因，可将误差分为系统误差、随机误差（偶然误差）及粗大误差三大类 圆实验数据中三种误差是混杂在一起的，但是由于不同性质的误差，对测量结果的影响不一样，因而对它们的处理方法也不相同 圆我们可根据这一基本特点，分别讨论三者的变化规律，研究其对结果的影响，以便采用相应的措施减少误差 圆

需要全本请访问 www.ertongbook.com

① 系统误差：在相同条件下（指方法、仪器、环境、人员相同）多次重复测量同一量时，误差的大小和符号（正、负）均保持不变或按某一确定的规律变化，这类误差称为系统误差 郾它的特征是确定性 郾前者称为定值系统误差，后者称为变值系统误差 郾

系统误差的来源有以下几个方面：

蕤郾仪器误差：这是由于仪器或装置的缺陷或未按正常工作条件操作使用所造成的误差 郾例如，刻度不准、零点没有调准、仪器垂直或水平未调整、砝码未经校正等 郾

遭郾方法（理论）误差：由于实验方法不完善或这种方法所依据的理论本身具有近似性等所产生的误差 郾例如：称重量时未考虑空气浮力，采用伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响等 郾

糟郾环境误差：这是由于环境的影响或没有按规定的条件使用仪器所引入的误差 郾例如：标准电池是以 [illegible]时的电动势数值作为标准的，若在 [illegible]条件下使用时，不加以修正，就引入了系统误差 郾

[illegible]主观误差：这是由于实验者生理或心理特点，或缺乏经验引入的误差 郾例如：有人习惯于侧坐斜视读数，就会使估读的数值偏大或偏小 郾此种误差因人而异 郾

系统误差的消除、减小或修正可在实验前、实验中、实验后进行 郾例如：实验前对测量仪器进行校准，使方法完善，对人员进行专门的训练等等；实验中采取一定的方法对系统误差加以补偿；实验后在结果处理中进行修正等等 郾

虽然系统误差的发现、消除、减小或修正是一个技能问题 郾但是，要找出原因，寻求其规律绝非轻而易举之事 郾这是因为：

第一，实验条件一经确定，系统误差就获得了一个客观上的恒定值，在此条件下进行多次测量并不能发现该系统误差 郾

第二，在一个具体的测量过程中，系统误差往往会和随机误差同时存在，这给分析是否存在系统误差带来了很大困难 郾

能否识别和消除系统误差与实验者的经验和实际知识有密切关系 郾因此对于实验初学者来说，从一开始就逐步地积累这方面的感性知识，在实验时要分析采用这种实验方法（理论）、使用这套仪器、运用这种操作技术会不会给测量结果引入系统误差 郾如果找到了某个系统误差产生的原因，掌握了它的变化规律，就可采用不同的方法去消除它的影响，或者对测量结果进行修正 郾

科学史上曾有这样一个事例：[illegible]年间美国著名物理学家密立根以他设计巧妙的油滴实验，证实了电荷的不连续性，并精确地测得基本电荷量

摇摇摇摇摇摇摇摇摇藻越（[illegible]）伊[illegible]悦

后来，由 载射线衍射实验测得的值与油滴实验值相差千分之几，通过查找原因，发现密立根实验中所用的空气粘度数值偏小，以致引入系统误差 郾在重新测量了空气的粘度之后，油滴实验测得

摇摇摇摇摇摇摇摇摇藻越（[illegible]）伊[illegible]悦

它与 载射线衍射法测得的结果 [illegible]悦 十分吻合 郾

此例说明了实验条件一经确定，多次测量（密立根曾观察了几千个带电油滴）发现不了系统误差，必须要用其他的方法（本例中改变了产生系统误差根源的条件）才可能发现它；同时也说明了实验应该从各方面去考虑是否会引入系统误差，当忽略某一方面时，系统误差就可能从这一方面渗透到测量结果中去 郾

② 随机误差（偶然误差）：在测量时，即使消除了系统误差，在相同条件下多次重复测量同一量时，每次测得值仍会有些差异，其误差的大小和符号没有确定的变化规律 郾但如大量增加测量次数，其总体（多次测量得到的所有测得值）服从一定的统计规律，这类误差称为

随机误差，它的特征是偶然性 郾

随机误差产生的原因很多，主要是由于测量过程中存在许多难以控制的不确定的随机因素引起的 郾这些随机因素有空气的流动，温度的起伏，电压的波动，不规则的微小振动，杂散电磁场的干扰，以及实验者感觉器官的分辨能力、灵敏程度和仪器的稳定性等等 郾某一次测量的随机误差往往是由多种因素的微小变动共同引起的 郾如用停表测量三线摆的周期，按下按钮的时刻有早有迟，动作迟早的程度有差异，就会产生不可避免的随机误差 郾

实践和理论都证明，在相同条件下，对同一物理量进行大量次数的重复测量，可以发现大部分测量的随机误差服从统计规律 郾统计规律用分布描述，分布常用图形表示，其中最常见的是高斯分布，又称正态分布 郾

服从正态分布的随机误差具有下面的一些特性：

葬郾单峰性：由大量重复测量所获得的测量值，是以它们的算术平均值为中心而相对集中分布的 郾即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（次数多）郾

遭郾对称性：绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相同 郾

糟郾有界性：误差的绝对值不会超过某一界限，即绝对值很大的误差出现的概率趋于零，随机误差的分布具有有限的范围 郾

凿郾抵偿性：随着测量次数的增加，随机误差的代数和趋于零，即随机误差的算术平均值将趋于零 郾实际上，抵偿性可由单峰性及对称性导出 郾

③ 粗大误差（粗差）：明显地歪曲了测量结果的异常误差称为粗大误差 郾通常用测量时的客观条件不能解释为合理的误差，或超出了规定条件下随机误差范围的误差，均称为粗差 郾它是由没有觉察到的实验条件的突变，仪器在非正常状态下工作，无意识的不正确的操作等因素造成的 郾含有粗大误差的测量值称为可疑值，或异常值、坏值 郾在没有充分依据时，绝不能按主观意愿轻易地去除，应该按照一定的统计准则慎重地予以剔除 郾

由于实验者的粗心大意、疏忽失误，使观察、读数或记录错误，是应该及时发现和力求避免的 郾错误不是误差 郾

在分析误差时，必须根据具体情况，对误差来源进行全面分析，不但要找全产生误差的各种因素，而且要找出影响测量结果的主要因素 郾首先剔除粗差，消除或减弱系统误差，然后估算随机误差 郾

（源 测量误差的表示

尽管误差有几类，但对于测量结果而言，在剔除粗差后，其误差应是系统误差和随机误差的总和 郾测量误差通常有两种表示方法：一是定性说明，一是定量表示 郾

① 测量的精密度、准确度和精确度：为了定性地描述各测量值的重复性及测量结果与真值的接近程度，常用精密度、准确度和精确度来描述 郾

精密度：表示重复测量各次测量值相互接近的程度，即测得值分布的密集程度，它表征随机误差对测得值的影响，精密度高表示随机误差小，测量重复性好，测量的数据比较集中 郾精密度反映随机误差大小的程度 郾

准确度：表示测量值或实验所得结果与真值的接近程度，它表征系统误差对测量值的影响，准确度高表示系统误差小，测量值与真值的偏离小，接近真值的程度高 郾准确度反映了系统误差大小的程度 郾

精确度：描述各测量值重复性及测量结果与真值的接近程度，它反映测量中的随机误差和系统误差综合大小的程度，测量精确度高，表示测量结果即精密又准确，数据集中，而且偏离真值小，测量的随机误差和系统误差都比较小 郾

图 员是以打靶时弹着点的分布为例，说明这三个量的涵义 郾（葬图表示射击的精密度高

但准确度低，即随机误差小系统误差大 郾(遭 图表示射击的精确度高但精密度低，即系统误差小而随机误差大 郾(糟图的弹着点比较集中，又都聚集在靶心附近，表示射击的精确度高，既精密又准确，随机误差和系统误差都小 郾

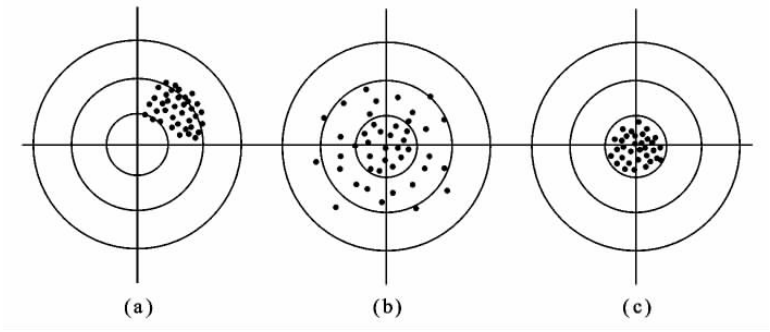

图 员

②绝对误差：误差的定义为

测量误差 σ 曾越测量值 曾原真值 曾圆

测量误差是测量值与真值的差值，常称为绝对误差，绝对误差可正可负，具有与被测量值相同的量纲和单位，它表示测量值偏离真值的程度 郾但要注意，绝对误差不是误差的绝对值 郾由于真值一般是得不到的，因此误差也无法计算 郾实际测量中是用多次测量的算术平均值 曾来代替真值，测量值与算术平均值之差称为偏差，又称残差，用 Δ 曾表示，即

摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇 Δ 曾越曾原曾 (圆原员)

假定一个物体的真实长度为 员园园园宅宅，而测得值为 员园园缘宅宅，则测量误差为 园园缘宅宅郾另一个物体的真实长度为 员园园园宅宅，测得值为 员园园缘宅宅，测量误差也为 园园缘宅宅郾从绝对误差看两者相等，但测量结果的准确程度却大不一样 郾显然，评价一个测量结果的优劣，不仅要看绝对误差的大小，还要看被测量值本身的大小 郾

③相对误差：测量值的绝对误差与被测量值真值之比 郾由于真值不能确定，实际上常用约定真值，如公认值、算术平均值 郾相对误差 ε 是一个无单位的无名数，常用百分数表示，如

摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇 ε 越 $\frac{\Delta 曾}{曾}$ 伊员园园缘 (圆原圆)

前述第一个测量的相对误差 ε 越 $\frac{园园缘}{员园园园}$ 越园园缘缘，而第二个测量的相对误差 ε 越 $\frac{园园缘}{员园园园}$ 越缘缘郾第一个测量比第二个测量准确程度高 郾

二、直接测量结果随机误差的估算

在下面的讨论中，我们都是在排除系统误差的前提下进行的，或者认为系统误差已经小到可以忽略不计的程度了 郾随机误差的大小常用标准误差、平均误差和极限误差表示 郾

员缘测量结果的最佳值——算术平均值

设对某一物理量进行了 灶次等精度的重复测量，所得的一列测量值分别为 曾员，曾圆，…，曾圆，…，曾灶，测量结果的算术平均值为 曾郾

根据最小二乘法原理：一个等精度测量列的最佳值是能使各次测量值与该值之差的平方和为最小的那个值 郾设那个值为 曾圆，则

摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇 $\text{枣}(曾圆)$ 越 $\sum_{蚤圆员}^{灶}(曾圆原曾圆)^{圆}$ 越最小量

取 $\text{枣}(曾圆)$ 的一阶导数，并令其等于零，即

摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇 $\frac{\text{当某}\ x_i}{\text{当}\ n}$ 越圆$\sum_{i=1}^{n}$（x_i原x_0） 越园

摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇 $\sum_{i=1}^{n} x_i$ 越灶x_0

从而得到

摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇 x_0 越$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$ 越x （圆原猿

也就是说，这一组测量数据 x_i的算术平均值 x就是这一测量列真值的最佳估计值，所以测量结果用算术平均值来表示 郾对于有限次测量，平均值会随测量次数的不同而有所变动，当测量次数无限增加时，算术平均值将无限接近于真值 郾

可见测量次数越多，算术平均值就越接近于真值 郾所以，测量结果可用多次测量的算术平均值作为接近真值的最佳值 郾但是，测量结果的随机误差究竟有多大呢？如何来表示呢？

圆援等精度多次测量结果随机误差的估算

（员）算术平均误差（平均误差）

对某一物理量进行多次测量，将 Δx_i越x_i原x_0的绝对值的算术平均值定义为算术平均误差，即

摇摇 $\overline{\Delta x}$越$\frac{|\Delta x_1| 垣 |\Delta x_2| 垣\cdots 垣 |\Delta x_n|}{n}$ 越$\frac{\sum_{i=1}^{n}|x_i 原 x_0|}{n}$ 越$\frac{\sum_{i=1}^{n}|\Delta x_i|}{n}$ （圆原源

当测量次数少，测量仪表准确度不高时，或数据离散度不大时，可用算术平均误差估算随机误差 郾

这里要注意，算术平均误差不是测量值的实际误差，也不是误差范围，它只是对一组测量数据可靠性的估计 郾算术平均误差小，测量的可靠性就大一些 郾反之，则测量不大可靠 郾按照误差理论，测量列的算术平均误差为$\overline{\Delta x}$时，则测量列任一测量值的误差 Δx_i有 缘愿豫豫象的可能性在（原$\overline{\Delta x}$ 垣$\overline{\Delta x}$区间之内 郾

（圆）标准偏差

评价测量列的质量，经常用到的另一种绝对误差是标准偏差 郾随机误差服从统计规律，其中最常见的是高斯分布，这一统计规律在数学中可用高斯误差分布函数来描述，其概率密度函数为

摇摇摇摇摇贡(δx) 越$\frac{1}{\sigma\sqrt{圆\pi}}$蕴$^{原\left(\frac{\delta x}{圆\sigma}\right)^{圆}}$ （圆原缘

式中 σ 是唯一参量，是高斯分布的特征量 郾在一定的测量条件下 σ 是一个常量，从而分布函数也就唯一确定下来 郾测量条件不同造成随机误差大小不同，反映在分布函数上就是 σ 大小不同 郾

下面讨论 σ 的物理意义：

当 σ 较大时，分布曲线峰值较低而且平坦，表明随机误差离散程度大，测量精密度低，大误差出现的次数多 郾即各次测量值的分散性大，重复性差 郾

当 σ 较小时，分布曲线陡而峰值高，表明随机误差离散程度小，测量精密度高，小误差占优势 郾即各测量值的分散性小，重复性好 郾

在重复测量中，对于一组测量值可用特征量 σ 来描述测量的精密度 郾特征量 σ 的数学表达式为

摇摇摇摇摇摇摇摇 σ 越 $\sqrt{\frac{员}{灶}\sum_{蚕=员}^{灶}(曾_{蚕}原曾_{囱})^{圆}}$ 摇摇（灶→肄） （圆原迈

σ 称为标准误差，又称为方均根误差 圆对同一量进行无限多次测量，各次测量值与被测量真值 $曾_{囱}$ 之差的平方和的算术平均值，再开方所得的数值即为标准误差 圆

应该注意，$\Delta曾$ 是实在的误差值，是真误差，可正可负；而 σ 并不是一个具体的测量误差值，它表示在相同条件下进行多次测量后的随机误差概率分布情况，是按一定置信概率给出的随机误差变化范围的一个评价参量，具有统计意义 圆 σ 是评价所得测量列精密程度高低的指标 圆当测量次数趋于无限多时，可以推出

摇摇摇摇摇摇摇 $\overline{\Delta曾}$ 越 $\sqrt{\frac{圆}{\pi}}\sigma \approx$ 园郡 $\sigma \approx \frac{源}{缘}\sigma$ （圆原苑

随机误差的正态分布为归一化分布函数，曲线下的总面积表示各种误差出现的总概率为 员园缘，给定区间（即随机误差大小的变化范围）不同，误差出现的概率，也就是测量值出现的概率不同 圆这个给定的区间称为置信区间，相应的概率称为置信概率，用 责表示 圆

从 σ 到 σ 之间曲线下的面积占总面积的 迈猿缘，它表示测量列中任一测量值的随机误差落在区间［原 σ，σ］内的概率 圆或者说，当测量次数无限多时，测量值落在区间［曾原 σ，曾垣 σ］内的次数占总测量次数的 迈猿缘圆也就是说，在区间［曾依 σ］内包含真值的可能性是 迈猿缘圆

在区间［原猿 σ，垣猿 σ］内的置信概率为 怨怨苑缘，也就是在 员园园次测量中，大约只有 猿次测量值落在该区间之外，而一般测量次数为 缘~员园次，几乎不可能出现在区间之外，所以将猿 σ 称为极限误差，也称误差限 圆这也是剔除具有粗大误差数据的拉依达准则的依据 圆

置信区间为［原圆 σ，垣圆 σ］的置信概率为 怨缘苑缘圆把算术平均偏差［原 $\overline{\Delta曾}$，垣 $\Delta曾$］作为置信区间，相应的置信概率为 缘苑缘圆

由于真值 $曾_{囱}$ 不能确定，所以 $\Delta曾_{蚕}$ 越 $曾_{蚕}原曾_{囱}$，$\overline{\Delta曾}$ σ 也无法计算 圆那么如何来估算随机误差的大小呢？前面讨论过，测量列的算术平均值 是测量结果的最佳值，所以用各次测量值与算术平均值之差（$曾_{蚕}原曾$）——残差，来估算有限次测量的随机误差 圆

①测量列的算术平均偏差

由误差理论可证明算术平均偏差为

摇摇摇摇摇摇摇摇摇 $\Delta曾$ 越 $\frac{\sum_{蚕=员}^{灶}|\Delta曾_{蚕}|}{\sqrt{灶(灶原员)}}$ （圆原愿

②算术平均值的算术平均偏差

算术平均值的算术平均偏差 $\Delta\overline{曾}$ 与测量列的算术平均偏差 $\Delta曾$ 间的关系是

摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇 $\Delta\overline{曾}$ 越 $\frac{\Delta曾}{\sqrt{灶}}$

摇摇摇摇摇摇摇摇摇 $\Delta\overline{曾}$ 越 $\frac{\sum_{蚕=员}^{灶}|\Delta曾_{蚕}|}{灶\sqrt{灶原员}}$ （圆原怨

在基础物理实验中常用 $\Delta曾$ 代替 $\Delta\overline{曾}$ 但要明确 $\Delta曾$ 与 $\Delta\overline{曾}$ 的含义是不同的 圆 $\Delta曾$ 是测量列中任何一次测量值 $曾_{蚕}$ 的算术平均偏差，$\Delta\overline{曾}$ 是测量列的算术平均值 $\overline{曾}$ 的算术平均偏差 圆

③测量列的标准偏差

由于真值无法知道，误差常用残差来计算，称为标准偏差或标准差，用 泽表示，可以导出

摇摇摇摇摇摇摇摇 泽越 $\sqrt{\frac{员}{灶原员}\sum_{蚕=员}^{灶}(\Delta曾_{蚕})^{圆}}$ （圆原员园

上式称为贝塞尔公式，S_x是测量列中任何一次测得值的标准偏差 郾

④算术平均值的标准偏差

由于算术平均值比任何一次测量值都更接近于真值，也就是 $\bar{x}$的可靠性比任一次测量值都高，所以算术平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$就理所当然地小于测量列的标准偏差 S_x可以证明

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

有了上述误差的讨论后，就可将测量结果表示为

$$\left.\begin{aligned}&x=\bar{x}\pm S_{\bar{x}}\\ &P=\text{置信概率}\end{aligned}\right\}\text{（用标准偏差表示）}$$

或

$$\left.\begin{aligned}&x=\bar{x}\pm\Delta\bar{x}\\ &P=\text{置信概率}\end{aligned}\right\}\text{（用算术平均偏差表示）}$$

$S_{\bar{x}}$或$\Delta\bar{x}$称为测量结果的不确定度，P称为置信概率 郾

3. 不等精度多次测量结果随机误差的估算

实验中经常遇到另一类测量，就是不等精度测量，此时对一物理量进行多次测量，所得的一组测量数据 $x_1,x_2,\cdots,x_n$具有不同的权重，就是说数据中每一测量数据的可信程度或者在结果中所占的比重不同 郾设其权重分别为 $\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n$郾则对这组测量数据求平均值就要用加权平均的方法不是用算术平均法，即

$$\bar{x}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\omega_i x_i}{\sum_{i=1}^{n}\omega_i} \qquad (\text{加权平均})$$

$\bar{x}$称为加权算术平均值 郾并且定义权重 ω_i与标准差 S_i成反比 郾所以，标准误差越小，其权重越大 郾在基础物理实验中，常常直接将权重表示为

$$\omega_i=\frac{1}{S_i^2} \qquad (\text{权重})$$

加权平均值的标准偏差为

$$S_{\bar{x}}=\sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{S_i^2}}} \qquad (\text{加权平均的标准偏差})$$

为了熟悉上述加权计算方法，举例说明如下 郾

例 员摇已知同一电阻的三种（或三组）测量结果为：

砸越载藻园（欧）

砸越载藻源（欧）

砸越载藻缘（欧）

式中各误差均为相应的标准偏差，现在我们来计算其加权平均值和标准偏差 郾

需要全本请访问 www.ertongbook.com