前摇摇言

本书根据面向 圆员世纪物理实验教学内容与课程体系改革的精神，参照《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，结合本室原有的物理实验教材和近几年来我校国家工科物理教学基地建设成果编写而成。

本书打破了传统的实验项目按力、热、电、光、近代物理与综合实验设置的方式，建立以物理实验的基本知识、基本方法、基本技能训练为基础，以科学实验的基础能力和创新能力培养为主线的新模式，广容先进思想，重组知识单元。将精选的实验项目分为 :预备引导实验，基础实验，综合性实验，设计性实验，研究创新实验五个层次。每个层次中按难度递增排序。每个实验（设计性实验除外）按 :工程背景介绍和应用前景分析、实验目的、实验原理、仪器简介、实验内容、数据处理要求、思考题等格式编写。为了突出其中的创新点，有的实验在背景介绍中明确指出，有的实验前面引入了与本实验项目内容相关的诺贝尔物理学奖获得者主要事迹或获奖内容，还附有获奖者的头像。每章开头引入名人名言，用以活跃思维、增加知识、激发兴趣。力求教材层次分明，原理清晰，步骤简明，启迪思维，便于自学。

书中第一章介绍物理量的测量、误差和数据处理，这是大学物理实验课程中的基本知识之一。为了保持这部分内容的系统性，我们集中在第一章进行叙述，而这些知识的具体运用，则按教学进度和要求分别安排在后续的各个实验中，以便学生逐步学习和应用。考虑到目前中学物理实验的实际情况，我们安排了“预备引导实验”一章，一是弥补中学实验基础的不足或参差不齐，二是结合现代教育手段开阔学生的视野和思路，三是激发学生对物理实验的学习兴趣，使整个教学起点适中，落点较高。全书力求结合学生的实际，符合实验教学规律。书中收录了较多的实验项目，以配合开放式教学的进行。在保证教学基本要求的前提下，注重个性发展，为学生提供一个自己学习的发展空间。在实验内容的编写中，前面（如第三章）的实验不仅原理叙述清楚、公式推导完整，还有详细的实验步骤，以便初学者自学和了解规范要求。往后的实验编写逐步简化，有些内容让学生独立完成。对基本仪器（如电表、电桥、电位差计、示波器、分光计等）不仅要求学生会调节，而且要达到一定的熟练程度。为此，我们各安排了两个实验内容，使学生反复使用，加深印象。实验中的基本测量方法和操作技术，以及数据处理方法也是按照这个思路安排。第五章设计性实验，在介绍设计性实验基础知识、规范要求后，只提任务、要求和提供的仪器设备，由学生查阅有关资料，自拟实验方案，在老师的指导下完成实验。第六章中作者将自己在科研工作中对物理实验基本要求的感受融入到编写中，努力做到传授知识与培养能力、素质和创新精神并重，积极改进编写方法，启迪大家的创新意识、培养创新能力。第七章微机模拟、仿真实验，是在实验教学局域网建成后逐步完善起来的，它以全新的面貌展现在学生面前。上述实验 源源远远，远远是我院教师的科研成果转化为教学实验的项目，如实验 远远是谢教授小组自 圆猿世纪 愿园年代开始研究硅片的测试方法，从势能、动能转换和弹性碰撞定律出发，结合力学中的薄板小挠度理论，得出一种新的脆性材料强度测试方法

需要全本请访问 www.ertongbook.com

——圆片冲击法及强度测试仪。并按国家技术监督局的要求制定了国家标准——硅片抗弯强度测试方法([illegible])。将这些成果转化为实验教学,不仅使多课程之间的知识交叉融合,而且强化了工程综合应用意识,突出创新、创业精神培养。

我们编写了一本预习册,与本教程配套使用。书中各实验项目由教研室的老师分头执笔编写。其中绪论、第一章、第五章的实验[illegible]、第三章的实验[illegible]、第四章的实验[illegible]、第六章的实验[illegible]和书末附录由袁冬媛编写;第二章和第四章实验[illegible]由刘碧兰编写;第三章的实验[illegible]、第四章的实验[illegible]、第五章的实验[illegible]由徐富新编写;第七章由吴建好编写;第四章的实验[illegible]和[illegible]、第六章的实验[illegible]由刘雁群编写;第四章的实验[illegible]由许雪梅编写;第四章的实验[illegible]由陈鲤江编写、罗成林改写;第五章的实验[illegible]由吕桂芝编写;第六章的实验[illegible]由谢书银、袁冬媛编写;实验[illegible]由曹健,丁家峰编写。其余项目由原教材(许锦培主编)引入,有些地方作了修改、补充。另外,蒋礼、胡昭煌参与了部分工作。本书虽由上述同志执笔编写,但实际上是一项在继承基础上的集体创作,融入了不少老同志的贡献。实验课的教材和教学离不开实验室的建设和发展,无论是实验项目的筹建、准备和开出,还是教材的编写,都是实验室全体任课教师和实验技术人员多年辛勤劳动的成果,是集体智慧的结晶。本书在编写过程中参考了许多兄弟院校的教材,甚至引用了某些内容,在此表示衷心感谢。由于编者水平有限,书中的错误和不足之处敬请读者批评指正。

编者

[illegible]

绪摇摇论

一、物理实验课的地位和作用

物理学是研究物质的运动规律、物质的结构及相互作用的学科。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理(如质量守恒、能量守恒、万有引力定律等)出发,经过数学推演得出结果,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。物理学的这两大分支相辅相成,互相促进。现代理论物理和实验物理学的发展,哺育着现代高新技术的成长和发展,由电子计算机技术和远程通讯技术组成的现代信息技术(隐藏),在短短的几十年里迅速改变了我们的社会。在此之前物理学为它的诞生作了大量理论和实验上的准备。员怨源源年贝尔实验室的巴丁提出结晶表面理论,员怨源愿年他和同室的布拉顿发明了第一个双点接触式晶体三极管,员怨缘缘年同室的肖克利提出半导体的孕原晕结理论和结型晶体管理论,并发明了结型晶体管。这是他们认识和掌握了半导中电子运动的规律,并成功地加以利用的结果。晶体管的发明可以看作是信息时代的开端。员怨缘怨年杰克·基尔比发明了第一块集成电路,随后集成电路向微型化方向发展,员怨苑园年产生了大规模集成电路,员怨愿园年超大规模集成电路诞生。依靠物理知识的深化和工艺技术的进步,使晶体管的尺寸(线宽)缩小了员园园园倍。今天的超大规模集成电路芯片上,在一根头发丝大小的横截面上,可以制备源园个左右的晶体管。世界性集成电路市场的年销售额接近一万亿美元[员]。这些高新技术大大促进了物理学的发展,推动着实验物理研究手段、方法和装备的发展。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,实验方法的确定,仪器的选择,数据的处理等大多数都是物理实验的移植与推广。工程技术中物理量的测量,其测量方法与技巧,也是物理实验中测量方法与技巧的移植或推广。可见物理实验推动着科学技术发展。

大学物理实验是理工科学生必修的一门基础课程。它将使学生受到系统的物理实验方法和实验技能的训练,并了解科学实验的主要过程和基本方法,为今后的科学实验活动奠定初步基础。同时,物理实验把理论与实际,方法与技能结合起来,促使学生既动手又动脑,在实践中学习,培养创新精神和科学实验能力。整个教学活动的进行,将有助于学生的知识、能力和素质的培养与提高。

二、本课程的任务[圆]

员.通过对实验的观察、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.培养与提高学生的科学实验能力。其中包括:

(员)能够自行阅读实验教材或资料,作好实验的准备;

(圆)能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器;

(1)能够运用物理学理论对实验进行初步分析判断；

(2)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；

(3)能够完成简单的设计性实验。

(4)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、团结协作、爱护公共财产的优良品德。

为了做好物理实验，同学们应该认真预习，遵守操作规程，仔细观察现象，正确记录数据。在做实验时应注意以下几方面：

(1)明确实验目的。首先要了解所做实验的目的和要求，弄清楚实验原理，以及测算的物理量，用哪些仪器，怎样进行测量等。

(2)要有严肃认真的态度。每次实验都须严肃认真，不能满足于一知半解。要真正掌握基本仪器的使用和基本测量方法，要仔细观察物理现象，严肃对待原始数据。

(3)知难而进、随时总结。实验中可能遇到各种困难，这正是探索、学习的机会，要主动、耐心地寻找产生问题的根源，分析实验结果与真实情况产生偏离的原因，这样才能通过做实验来提高实际工作能力。

三、物理实验的基本程序和要求

物理实验进行的程序大致分为：提出任务，确定方案，选择仪器设备，安装调试，按预先拟定的实验步骤进行实验，观察、测量，记录数据，总结分析，写出实验报告。每个程序中都有各自的要求和任务。物理实验的基本知识、基本方法和基本技能的学习和训练融于各个不同类型的实验中。因此，每一个实验都应认真地完成。

每个实验都有三个环节：预习实验教材、进行实验操作和写出实验报告。

(1)预习。预习是做好实验的重要环节。实验课前必须预习。弄清本次实验内容、有关原理，控制物理过程的关键因素和必要的实验条件，并对测量仪器、测量方法有一基本了解。在此基础上写出实验预习报告，绘出实验数据记录表格。

预习的好坏将决定实验能否顺利完成，务必引起重视。

(2)实验。实验时要努力弄懂为何这样安排实验，这样安排实验步骤的道理；要仔细阅读有关仪器使用注意事项和仪器使用说明书，掌握正确的调整、操作方法；要爱护仪器设备，稳拿、妥放，以防损坏；要注意观察实验现象，什么现象说明调节已达到要求；出现故障时如何根据现象来分析它产生的原因，怎样消除它。

做实验时要心中有数。根据误差分布，对结果影响较大的关键量要努力测准；有的量虽然测量不太准，但对结果影响很小，就不必花大力气作徒劳的工作。要在现有条件下使实验得出好的结果。

实验中用仪器或量具直接测量得到的数据是原始数据，原始数据决定着测量结果的准确度。因此，要认真观察，精心测量，细心记录。

做完实验，须将原始数据送请指导老师审核，经老师签字后，把仪器用具整理好，保持实验室的整齐清洁。

上实验课时，必须遵守实验室规则和学生实验守则。

实验操作环节是物理实验的中心,内容非常丰富,是学生主动研究、探索的好机会,一个实验收获的大小,取决于个人主观能动性的发挥程度。

猿.撰写实验报告摇实验报告是实验工作的简明总结,是实验结果的文字报道。应该做到书写整洁,文字工整,文理通顺,图表规范,数据完备,并有科学的结论。一份完整的实验报告应包括以下主要内容:

①实验名称 ;实验目的。

②实验原理简述。在理解的基础上简要概述实验原理,列出主要公式,画出必要的原理图、电路图、光路图。

③仪器设备。注明实验时的主要仪器名称、型号、规格,以及准确度等级、编号等。

④实验步骤。扼要地写出实验进行的主要步骤。

⑤实验数据表格。将老师签了字的原始数据整理后再记录于实验报告的数据表格中,并把原始数据贴在实验报告上,以便教师检查。

⑥数据处理。按实验要求计算待测量的量值,不确定度和相对误差。计算要有计算过程,如列出公式——→代入数据——→计算结果 ;计算误差时应列出公式——→代入数据——→单项误差——→总误差。绘出指定要画的图表 (图要画在毫米坐标纸上) 。

⑦实验结果。给出完整的量化表达式。注意有效数字和单位的正确表达。

⑧讨论和建议。找出影响结果的主要因素,减少误差应采取的措施,对实验中观察的现象 (特别是异常现象) 的解释,改进实验的建议或心得体会等。

实验报告在规定时间内连同原始数据记录一起交上。报告中如有严重错误,或字迹不清楚,则须重作。

实验测量中必然存在误差,应经常从减少误差的角度去体会实验的内容,学习实验方法,评价实验结果,探讨改进实验的途径。

* * * *

目录

摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇绪摇摇论 …… (员

第一章摇物理量的测量、误差及数据处理 …… (源

第一节摇测量和误差 …… (源

第二节摇直接测量结果及其随机误差的估算 …… (员园

第三节摇测量不确定度和测量结果的表示 …… (员源

第四节摇间接测量结果及其合成不确定度 …… (员愿

第五节摇有效数字及其运算规则 …… (圆源

第六节摇实验数据处理方法 …… (圆愿

第七节摇系统误差的发现与消除 …… (猿苑

第八节摇量纲分析法 …… (猿圆

第二章摇预备引导实验 …… (猿愿

第一节摇长度测量 …… (猿愿

第二节摇密度测量 …… (缘员

第三节摇时间测量 …… (缘猿

第四节摇温度测量 …… (缘缘

第五节摇电磁学实验预备知识 …… (缘苑

第六节摇光学实验预备知识 …… (远苑

实验 员摇用模拟法测绘静电场 …… (苑员

第三章摇基础实验 …… (苑缘

实验 猿摇拉伸法测杨氏弹性模量 …… (苑缘

实验 猿员摇刚体转动惯量的测定 …… (愿园

实验 猿圆摇气轨上运动定律的研究 …… (愿缘

实验 猿猿摇电桥实验 …… (怨员

实验 猿源摇补偿原理与电位差计 …… (怨苑

实验 猿缘摇示波器及其应用 …… (员园园

实验 猿远摇光的干涉及其应用 …… (员员源

实验 猿苑摇用衍射光栅测光波波长 …… (员员怨

第四章摇综合性实验 …… (员园苑

实验 源员摇声速的测量 …… (员园苑

实验 源圆摇霍耳效应及其应用 …… (员猿缘

实验 源猿摇折射率的测量 …… (员源愿

实验 源源摇磁性材料特性参数的测量 …… (员缘园

实验 源缘摇摄影技术 …… (员缘缘

实验 源远摇静物全息摄影 …… (员远源

实验 源苑摇迈克尔逊干涉仪实验 …… (员苑员

实验 源怨摇偏振光的研究 …… (员苑愿

目录

第五章 设计性实验 …… (1)
实验 1 自选项目实验 …… (1)
实验 2 简谐振动的研究 …… (2)
实验 3 电阻测量优化研究 …… (3)
实验 4 电子元件伏安特性测量 …… (4)
实验 5 电位差计的应用研究 …… (5)
实验 6 简易万用表的制作 …… (6)
实验 7 照度监视器的设计与制作 …… (7)

第六章 研究创新实验 …… (8)
实验 1 硅片抗弯强度的测试研究 …… (8)
实验 2 电容器介质损耗及电容量测量 …… (9)
实验 3 介质色散的研究 …… (10)
实验 4 数字万用表的研制 …… (11)

第七章 微机模拟仿真实验 …… (12)
实验 1 长螺线管磁场的测量 …… (12)
实验 2 密立根油滴实验 …… (13)
实验 3 不良导体导热系数的测量 …… (14)
实验 4 光电效应测普朗克常数实验 …… (15)

附录Ⅰ 中华人民共和国法定计量单位 …… (16)
附录Ⅱ 基本物理常数 (1998 年国际推荐值) …… (17)
附录Ⅲ 常用光源谱线波长表 …… (18)
附录Ⅳ 20 世纪诺贝尔物理学奖大事记 …… (19)
参考文献 …… (19)

摇摇科学实验是科学理论的源泉，是自然科学的根本，也是工程技术的基础。

——张文裕

第一章摇物理量的测量、误差及数据处理

本章主要介绍测量、误差的概念，测量结果的表示和实验数据处理方法等方面的初步知识，作为实验前的基础准备。这些知识在每次实验中都要用到，而且是今后从事科学实验工作所必须了解和掌握的。误差理论以数理统计的概率论为其数学基础，研究误差的起因、性质、规律和如何减少或消除误差，提高测量结果的可信赖程度。由于这部分内容涉及面很广，深入讨论它已超出了本课程的范围。因此，只能着重介绍一些概念，引用一些结论和计算公式，以满足本课程教学的需要，不进行严密的数学论证。

这一章内容较多，有些部分有一定的难度，不可能在一两次课中完全掌握，需要在以后的实验过程中通过运用逐步加以理解和掌握。

第一节摇测量和误差

一、测量

在科学实验和生产中，要定量地测量出有关物理量的大小。例如测量一摆线的长度，测量某物体的质量等。测量是为确定被测对象的量值而进行的实验过程。在这个过程中通常借助专门的工具、仪器，把被测对象直接或间接地与同类标准量（量具）进行比较，得出用数值和单位共同表示的测量结果。简言之，测量就是借助仪器用某一计量单位把待测量的大小表示出来，即待测量是该计量单位的多少倍。

根据获取测量数据的方式不同，可将测量分为直接测量和间接测量。根据测量条件的不同，可分为等精度测量和不等精度测量。

（一）直接测量

直接测量是指被测量量可以直接从测量仪器或量具上读出其数值的测量。例如用米尺测量长度，天平称量质量，停表记时间，温度计测温度，等等，都是从仪器上直接读出该量的大小，都属于直接测量。

（二）间接测量

间接测量是指被测量量不能用直接的方法得到，而是利用若干个直接测量值通过一定的函数关系计算出被测量的数值，这种测量称为间接测量。例如测量一个圆柱体的体积，需要先

直接测量其直径 阅和高 匀，再根据函数关系 灾越 $\frac{\pi}{4}$ 阅^{2}匀，计算出体积。在这里，体积 灾的测量是间接测量。在物理实验中有的量只能用间接测量才能得到其值，而有的量既可用间接测量得到，也可用直接测量得到。例如用伏安法测电阻，先测出通过 砸的电流和两端的电压，再根据欧姆定律算出 砸的值，这 砸的测量是间接测量。如果用欧姆表测量，可直接读出 砸的值，这时砸的测量是直接测量。所以，一个被测量量的数值采用哪种测量方法得到，要视实验的具体情况和要求而定。

(三) 等精度测量

等精度测量是指在相同条件下对同一被测量量进行多次重复测量，即在测量仪器、测量方法、测量人员、测量环境均不变的情况下对同一物理量进行重复测量，所得到的测量值都有相同的精度，或者说它们具有相同的可信赖程度。

(四) 不等精度测量

不等精度测量是指各次测得数据的精度不同。即每次测量的条件、环境、仪器、人员等都变动，使测得数据的精度不同。

等精度测量与不等精度测量的数据，在处理方法上有所不同，在以下的讨论中所涉及的测量数据均为等精度测量的情况。

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：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环境的温度、湿度、大气压力、气流、振动、辐射强度等。

二、误差

(一) 误差的定义

物理量在客观上本身所具有的确定数值，称为真值。然而在实际测量时由于测量条件、实验方法、仪器精度的限制不够完善，以及实验人员的技术水平等原因，使得测量值与客观上存在的真值之间有一定的差异，我们定义测量值与被测量真值之差称为测量误差，即

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

它反映了测量值偏离真值的大小和方向。由于是与真值的绝对大小相比较，故又称为绝对误差，简称误差。误差存在于一切测量之中，而且贯穿测量过程的始终。测量误差的大小反映我们的认识接近于客观真实的程度。

真值是一个理想概念，通常不可能确切地知道 (若考虑到微观的量子效应，就应该排除惟一的真值的存在)。为了实际工作的需要，人们采用约定真值来近似地代表真值。所谓约定真值是指它非常接近真值，如在我们所研究的领域内，用标准设备对被测量量所测得的量值，一般常称之为实际值 曾$_{实}$。所以，今后提到的绝对误差概念，都是把真值作为实际值来理解。

根据上述定义，有时为了使用方便，又提出了一个新的概念，称为修正值 (或称更正值)，用符号 藻表示。并有如下关系：

$$\text{曾}_{实} = \text{曾} + \text{藻}$$

此式的物理意义是：当用某种仪器去测量一个物理量时，得到一个测得值 曾如果已知该

仪器在该示值 x 处的修正值为 c 则这一被测物理量的实际值 $x_{实}$ 是测得值与修正值之差。例如用直流电位差计装置检定一只电流表，在其示值为 I_x 的工作点测得的读数为 I_s，已知标准装置在这一工作点的修正值为 c，于是可得电流表在该示值的实际值为

$$I_{实} = I_s + c$$

在该示值的绝对误差为

$$\delta = I_x - I_{实} = I_x - (I_s + c)$$

(二) 误差的表示

设被测量的真值为 A_0 测量值为 x 误差为 δ，由误差的定义得：

$$\delta = x - A_0 \tag{1.2.1}$$

为了全面评价测量的优劣，还需要考虑被测量本身的大小。例如，有两根铁棒，其中一根铁棒的长度为 L_1，另一根铁棒的长度为 L_2，经过测量得知两根铁棒的绝对误差都是 Δ，即 $\delta_{绝1} = \delta_{绝2} = \Delta$，如果用绝对误差的概念来观察问题，这两根铁棒长度的误差是相等的，但实际上，同样大小的两个 Δ 对两根铁棒长度的影响程度显然不一样。为了反映这种相对影响的程度，还必须引用相对误差。

相对误差是指某一物理量的绝对误差与其真值或实际值之比。通常都以百分比的形式来表示，即

$$\text{相对误差 } \eta = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值 (或实际值)}} \times 100\% \tag{1.2.2}$$

在实际工作中我们通常用理论值或公认值或标准值或测量的最佳值代替真值。

由上述可知，测量误差可以用绝对误差表示，也可以用相对误差表示。如果待测量的理论值或公认值已知，也可用百分误差表示测量结果的好坏。即

$$\text{百分误差 } \gamma = \frac{\text{测量值} - \text{公认值}}{\text{公认值}} \times 100\% \tag{1.2.3}$$

(三) 引用误差

在某些测量仪器，例如指示仪表中，各点示值的绝对误差基本上是一样的，如果用相对误差来表示其误差大小，则一块指示仪表在不同的工作点，其相对误差的差别很悬殊，故不能用相对误差概念来反映这一客观存在的误差现象。为了表示这类误差的特点，提出了引用误差的概念。

引用误差指的是一种简化和方便的仪器表示值的相对误差，它是用示值误差与仪器仪表的满刻度值 x_m 之比的百分数来表示，即

$$\text{引用误差} = \frac{\text{示值误差}}{\text{满刻度值}} \times 100\%$$

如果用符号 $\gamma_{引}$ 来表示引用误差，则得

$$\gamma_{引} = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \tag{1.2.4}$$

引用误差通常在多档和连续刻度的仪表中应用，这类仪表可测范围不是一个点，而是一个量程，各刻度的示值都不一样，计算相对误差所用的分母也不一样，计算很烦，这时用引用误差较为方便。

例 圆摇满刻度值为 员园园毫安的电流表,指针指示值为 愿园毫安处的实际电流值为 愿员毫安,求电流量在这一点的相对误差和引用误差。

解摇相对误差 η 越$\frac{\text{愿园原愿员}}{\text{愿园}}$越原员豫

引用误差 $\gamma_{仪}$ 越$\frac{\text{愿园原愿员}}{\text{员园园}}$越原员豫

一台仪表有若干个刻度,各刻度示值皆有误差,其中最大的一个称为最大引用误差。一只仪表允许的最大引用误差的百分数的分子称为该仪表的准确度等级。电表的准确度等级有园郾员,园郾圆,园郾缘,员郾园,员郾缘,圆郾缘和 缘郾园 一般来说,如果一台仪表的准确度等级为 泽级,则仅仅说明合格仪表最大引用误差不会超过 泽豫,而不能认为它在各刻度上的示值误差是 泽豫。

例如,全量程为 员园园Ω 的 圆郾缘级电阻箱,则允许的最大引用误差为 圆郾缘豫,故所有的示值误差都不会起过 员园园Ω 伊圆郾缘豫 越员缘Ω。

设 泽级仪表满刻度值为 A_m,在某测量点的刻度值为 A 则该仪表在这个测量点附近的绝对误差为

$$\delta_{仪} \leqslant A_m \cdot 泽\% \qquad (员郾缘)$$

相对误差为

$$\eta_{仪} \leqslant \frac{A_m}{A} \cdot 泽\% \qquad (员郾缘)$$

因为 $A \leqslant A_m$,故当 A 越接近于 A_m 时,其测量准确度越高,A 越远离 A_m 时,其测量准确度越低。因此,这类仪表应尽可能使用其 圆猿量程以上的刻度 (即在$\frac{A}{A_m}$跃$\frac{圆}{猿}$条件下使用) 。

例 圆摇设待测电压约 员园园伏,现有 圆郾缘级、量程为 园~猿园园伏和 员郾园级、量程为 园~员园园伏的电压表各一块,问应选用哪一块电压表。

解摇根据式 (员郾缘)

$$\eta_{猿园园} \leqslant \frac{猿园园}{员园园} 伊圆郾缘豫 越员缘豫$$

$$\eta_{员园园} \leqslant \frac{员园园}{员园园} 伊员郾园豫 越员郾园豫$$

所以应选用 员郾园级的电压表。

此例说明,如果量程选择适当,用 员郾园级的电压表反而比 圆郾缘级的电压表测量所得结果的准确度高。因此选用仪表时,不但要考虑仪表的准确度等级,还要考虑比值 A/A_m 的大小,比值越大越好。不能简单地认为仪表的准确度等级越高越好。在使用这类仪表时,测得值的误差应按式 (员郾缘) 和式 (员郾员) 换算,而不直接使用引用误差。

三、误差的性质和分类

误差按其性质及规律可以分为系统误差和随机误差两类。

(一) 系统误差

在相同的条件下多次重复测量同一物理量时,如果测量结果的误差大小和符号 (正负) 都

需要全本请访问 www.ertongbook.com

保持不变,或者当条件有所改变时,测量结果的误差是按某一确定规律而改变的,这类误差称之为系统误差。

系统误差主要来源于以下四方面:

①仪器装置误差

这类误差主要是由于在测量过程中所使用的测量器具(例如量具、仪器、仪表和辅助设备等)的缺陷或不理想而造成的。一旦这些测量器具组合在一起构成一个完整的测量装置以后,它们所形成的综合误差也就确定了,所以这类性质的误差属于系统误差。

②方法或理论误差

这种误差是由于测量方法本身不完善或所依据的理论有一定的缺陷(例如近似性等)所造成的。例如,在用天平称质量时,没有考虑空气浮力的影响;利用周期 $T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ 公式测量重力加速度 g 时,忽略了摆长(长为 L)的质量的影响,所取摆角 θ 较大等。

③环境误差

当周围环境的影响量(例如温度、湿度、气压、电磁场和电源频率等)发生变化时,也可能引起测量误差的变化。如果这种变化是有一定规律性的,则也属于系统误差。例如,标准电池随环境温度变化就是有规律的,对这种系统误差可以利用其温度修正公式进行修正。

④人员误差

实验人员在操作经验、分辨能力、反应速度、读数习惯等方面彼此有差异而造成的误差。例如用停表计时间,由于每个人的操作习惯或反应速度不同,可能有人每次计时总是超前,有人总是滞后。

必须注意:以上各种误差来源,有时是联合起作用的。

系统误差的消除或减少是实验技能问题,应尽可能采取各种措施将它降低到最小程度。例如将仪器进行校正,改变实验方法,纠正不良实验习惯等。能否识别和降低系统误差,这与实验者的经验和实际知识有密切关系,学生在学习过程中要积累这方面的感性知识,结合实验具体情况对系统误差进行分析和讨论。

(二)随机误差

在测量时,即使排除了产生系统误差的因素,在相同条件下,对同一物理量进行多次重复测量,各次测量值都会有些差异,误差的大小和正负随机变化,这种误差称为随机误差。

随机误差产生的原因是由于实验过程中存在着某些不可预料或未被掌握规律而不能控制的偶然因素。例如,电磁场的微变、环境热流的起伏、对流空气的扰动、大地的微小振动、测量者感觉器官的生理变化等,都是属于这类的影响因素。

进行单次测量时,随机误差是没有任何规律的,既不可预测,也无法控制。但是,作为多次测量来说,随机误差的出现和分布服从一定的统计规律。

在测量过程中,除上述两种性质的误差外,还可能发生读数、记录上的错误,仪器损坏、操作不当等造成测量上的错误。错误不是误差,它是不允许存在的,错误数据应当剔除。克服错误的方法除端正工作态度、严格工作方法外,可用和另一次测量结果相比较的办法去发现、纠正,或者运用异常数据剔除准则判断出因过失而引入的异常数据,并加以剔除。

系统误差与随机误差产生的原因不同,误差的性质不同,处理的方法也不同。前者是非随机量,处理方法针对具体实验情况来确定;后者是随机量,在处理上有一套完整的统计方法。

需要指出的是,系统误差与随机误差之间没有严格的分界线。误差的性质在一定的条件下可以相互转化。例如,尺子的分度误差,对于制造厂来说,在进行分度时是具有随机性质的,故可看做为随机误差。但是,某一尺子制造出来之后,对于检定人员或者用户来说,它的分度误差就是确定的了,因此成为系统误差。又如加工的长管,管径误差在各处都有确定的值,它是系统误差。但对于该管平均效应来说,管径各处的误差有大有小,有正有负,具有随机的性质。

在实际测量中,影响测量结果的因素有时以系统误差为主,有时以随机误差为主,有时两者均不可忽略。由于这两种误差分布所遵从的规律不同,在处理实验数据时两种误差应分别处理,然后再求出总的测量误差。对某些规律比较复杂,难以严格区分的误差可当作随机误差处理。

随着科学技术水平的不断发展和误差理论的不断完善,人们对测量误差的认识会更加深入,从而使我们对被测物理量的认识也更加符合客观实际。

四、精密度、正确度和准确度

精密度、正确度、准确度是评价测量结果好坏的三个术语。

精密度——表示对同一被测量量作多次重复测量时,各次测量值之间彼此接近的程度。精密度高,说明重复性好,各自测量误差的分布密集,即随机误差小(但系统误差的大小不明确)。它是反映随机误差大小的术语。

正确度——表示测量值与真值接近的程度。正确度高,说明测量值接近真值的程度好,即系统误差小。可见,它是反映测量结果系统误差大小的术语。

准确度——用于综合评定测量结果与真值接近的程度。准确度高,说明精密度和正确度都高,它反映随机误差和系统误差的综合效果。因此准确度又称精确度。

以打靶为例子来比较说明。如图 员源员,靶心为射击目标。

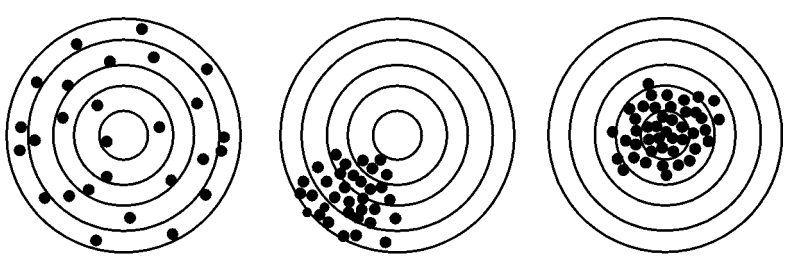


图 员源员

(葬正确度高,精密度低摇 (遭精密度高,准确度低摇 (糟精密度、正确度和准确度皆高

在实验中,由于要求尽可能地消除或减小系统误差,误差计算主要是估算随机误差,因此,往往不再严格区分精密度和准确度,而泛称为精度。

第二节摇直接测量结果及其随机误差的估算

一、随机误差的分布规律及其特点

现在,我们假定在系统误差可以忽略不计的情况下,讨论随机误差的问题。

随机误差的特点是它的随机性。也就是说,在相同的实验条件下,对同一物理量进行多次重复测量,各测量值有的比真值偏大,有的比真值偏小。换句话说,随机误差无论在数值的大小或符号上都是不固定的,似乎是纯属偶然的。但若测量次数很多的话,随机误差的出现服从一定的统计规律。根据实验情况不同,随机误差出现的分布规律有正态分布、贼分布、均匀分布、反正弦分布等等。根据教学要求,这里只简要介绍随机误差的正态分布。正态分布(又称高斯分布),可以用正态分布曲线形象地表述出来。如图 员猿圆-员 横坐标表示随机误差 δ,纵坐标表示随机误差的概率密度分布函数 $f(\delta)$,这个连续曲线称为随机误差的正态分布曲线。

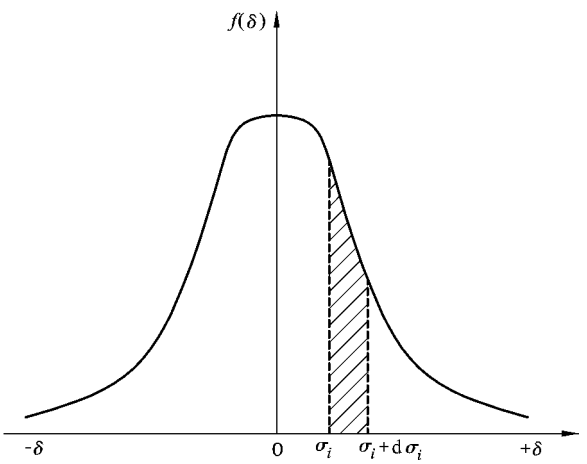


图 员猿圆-员

服从正态分布规律的随机误差具有以下四大特征:

(员)单峰性。绝对值小的误差出现的可能性比绝对值大的误差出现的可能性大。

(圆)对称性。绝对值相等的正误差与负误差出现的可能性相等。

(猿)有界性。非常大的正误差或负误差出现的可能性几乎为零。

(源)抵偿性。当测量次数非常多时,正误差与负误差互相抵消,于是随机误差的代数和趋近于零。

图 员猿圆-员中曲线下斜线部分的面积 $f(\delta)\mathrm{d}\delta$ 表示数值在 δ 到 $\delta+\mathrm{d}\delta$ 之间的误差出现的概率。当测量次数趋于无穷时,随机误差严格服从正态分布,误差值从 原肆到 垣肆出现的总概率为员。在有限次测量中,测量次数越多,越近似服从正态分布。关于如何判断误差是否服从正态分布,可以用正态性检验的方法来确定,本书不赘述。

由概率论和数理统计可知,概率密度分布函数为

$$f(\delta)=\frac{员}{\sigma\sqrt{圆\pi}}e^{-\frac{\delta^{圆}}{圆\sigma^{圆}}} \qquad (员猿圆-圆)$$

式中 δ 为随机误差,σ 为标准偏差,e 为自然对数的底,等于 圆援苑员愿圆愿圆愿源缘源缘员怨……

设 $\delta_{蚤}$ 为第 蚤次的测量误差,灶为测量次数,则系列测量中单次测量的标准偏差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}(\delta_1^2 + \delta_2^2 + \cdots + \delta_n^2)} \qquad (1.3.5)$$

可见标准偏差是各个误差的平方和取平均，再开方得到。故标准偏差又称为均方根误差。

二、标准偏差的物理意义

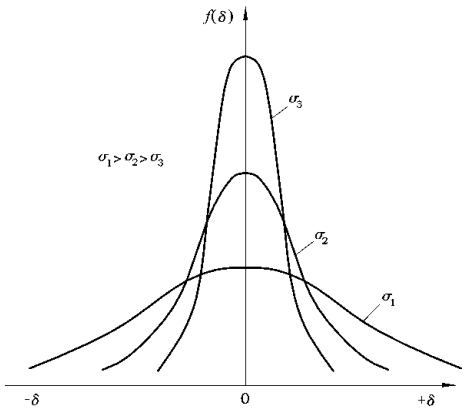


图 1.3.1

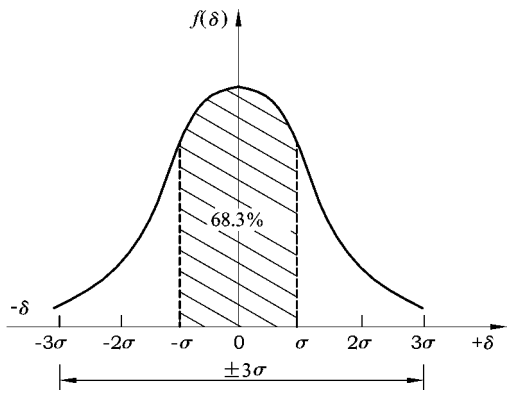


图 1.3.2

由式 (1.3.4) 可知，δ 越小时 y 越大，σ 越小时 y 也大，正态分布曲线的形状取决于 σ 值的大小。如图 1.3.1 所示，σ 值愈小，分布曲线愈陡，说明绝对值小的误差出现的机会多，测量值的重复性好 (数据比较集中)，测量的精密度高。反之，σ 值愈大，曲线愈平坦，说明测量值的重复性差，分散程度大。可见标准偏差反映了测量值的离散程度。请注意：标准偏差 σ 与各测量值的误差 δ_i (用 x_i 代替真值，则 δ_i 越 x_i 原) 有着完全不同的含义，δ_i 是实在的测量误差值，而 σ 并不是一个具体的误差值，它只反映在一定的条件下等精度测量列随机误差的概率分布情况，只有统计性质的意义，是一个统计特征值。

由上述分析可知，测量值的随机误差出现在 δ 至 $\delta + d\delta$ 区域内的概率为 $y(\delta)d\delta$，则测量值的误差出现在 $(-\sigma, \sigma)$ 区域内的概率就是

$$P(-\sigma, \sigma) = \int_{-\sigma}^{\sigma} y(\delta)d\delta = \int_{-\sigma}^{\sigma} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta \approx 0.683 \qquad (1.3.6)$$

这说明任一测量值的误差出现在 $(-\sigma, \sigma)$ 范围内的概率为 0.683。如图 1.3.2 所示，这个概率值称为置信概率或置信水平。假如我们对某物理量在相同条件下进行了 100 次测量，则测量值的误差可能有 68 次落在 $-\sigma$ 到 $+\sigma$ 范围内。可见，标准偏差具有统计性质。与上述相仿，同样可以计算，在相同条件下对某一物理量进行多次测量，其任意一次测量值的误差出现在 $(-k\sigma, k\sigma)$ 范围内的概率 P_k 及出现在 $(-3\sigma, 3\sigma)$ 范围内的概率 $P_{3\sigma}$ 为：

$$P_k = \int_{-k\sigma}^{k\sigma} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \cdot d\delta \qquad (1.3.7)$$

$$P_{\pm\Delta}=\int_{-\Delta}^{+\Delta}\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}}\,d\delta \qquad (2.3.3)$$

由图 2.3.3 不难看出，曲线下的总面积（即总概率 $\int_{-\infty}^{+\infty}$ 等于1）当 σ 不变，σ 值小，曲线变高变窄；σ 值大，曲线较平坦。

由概率 $P_{\pm\Delta}$ 可知，测量值的误差超出 $\pm\Delta$ 范围的情况几乎不会出现，所以我们把 Δ 称为极限误差。对测量值的误差的绝对值超过 Δ 的数据，可以认为这是由于过失引起的异常数据而加以剔除。（但在测量次数较少的情况下，这种判别方法不可靠，需要采用另外的判别准则）

在实际测量中置信概率有不同的取值，根据国家计量技术规范[1]，在写出测量结果的表达式时，要注明它的置信概率。在 $P=0.683$ 时，不必注明 P 值；当 P 取 0.95 或 0.99 时要求注明 P 值。在物理实验教学中，我们约定取置信概率 $P=0.683$。

三、算术平均值与标准偏差

（一）以算术平均值代表测量结果

前已说过，由于测量误差的存在，在计量性测量中，真值总是不能确切知道的。对于某一物理量 A 进行多次测量，结果不完全一样。那么怎样最好地表示测量结果，使它最合理的代表真值呢？常用的是，在测量条件相同的情况下，对某物理量 A 进行了 n 次测量，其测量值分别为 $x_1, x_2, \cdots, x_n$，则根据误差的定义，得相应的随机误差为

$$\delta_1=x_1-A,\quad \delta_2=x_2-A,\quad \cdots,\quad \delta_n=x_n-A$$

上述各式两边求和，得

$$\sum_{i=1}^{n}\delta_i=\sum_{i=1}^{n}x_i-nA \qquad (2.3.4)$$

两边除以 n，得

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_i=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i-A \qquad (2.3.5)$$

根据随机误差的抵偿性，当测量次数很多时，有

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_i\to 0 \quad (n\to\infty)$$

于是得

$$A=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \quad (n\to\infty) \qquad (2.3.6)$$

式（2.3.6）表明，当对一系列等精度重复测量所得的测得值，消除了它的系统误差之后，计算得到的算术平均值最接近于真值。因此一般应把测定值的算术平均值当作被测量的最可依赖的值，称为测定值的最佳值或约定真值。所以，其平均值

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \qquad (2.3.7)$$

（二）有限次等精度测量的标准偏差

随机误差可以用均方差式（2.3.2）来表示，但由于通常真值 A 未知，使得真误差 δ 求不出，而

且测量次数也往往有限，如果用算术平均值$\bar{x}$代替真值，则得

$$\Delta x_1 = x_1 - \bar{x},\quad \Delta x_2 = x_2 - \bar{x},\quad \cdots,\quad \Delta x_n = x_n - \bar{x} \tag{2-3-5}$$

Δx_i称为偏差，用偏差代替误差（实际测量中只能得到偏差），显然可得

$$\sum_{i=1}^{n} \Delta x_i = 0$$

误差理论证明：有限次（n次）测量列中的某一次测量结果的标准偏差σ为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\left[\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2\right]} \tag{2-3-6}$$

上式又称为贝塞尔公式。它表示某次测量值的随机误差在$-\sigma \sim +\sigma$之间的概率为68.3%。由式（2-3-6）可以看出，当$n=1$时，σ的值是不定的，故测量一次不能用式（2-3-6）进行计算；一般说来，至少要五次以上的测量才能用此公式进行计算。

（三）算术平均值的标准偏差

上文给出了单个测量值的标准偏差。现在就来研究用算术平均值表示测量结果时，标准偏差的计算。

由（2-3-4）式可知，有限次等精度重复测量的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \cdots + x_n)$$

由于是等精度测量，故对于每个测得值而言，它们的标准偏差都应该相等，即

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \cdots = \sigma_n = \sigma$$

因为每个测得值对于总的测量结果只有$\frac{1}{n}$的贡献，故每个测得值的标准偏差给总的测量结果的标准偏差的贡献为$\frac{1}{n}\sigma$。

如果对多次测量结果的误差采用方和根合成法，则算术平均值的标准偏差为

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{n}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{n}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\sigma_n}{n}\right)^2} = \sqrt{\frac{n}{n^2}\sigma^2} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

亦即

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \tag{2-3-7}$$

由式（2-3-7）可见，算术平均值的标准偏差$\sigma_{\bar{x}}$要比单个测得值的标准差缩小$\sqrt{n}$倍。而且随着测量次数n的不断增加，$\sigma_{\bar{x}}$的值将不断缩小，即测量结果的精密度越高。因此，增加测量次数可以减少随机误差。但是，由于$\sigma_{\bar{x}}$是与n的平方根成反比，当n增大到一定时，$\sigma_{\bar{x}}$的减少就不太明显了。故在实际测量工作中，并不是测量次数越多越好。因为增加测量次数必定要延长测量时间，这将给保持稳定的测量条件带来困难，同时也引起观测者的疲劳，又可能带来较大的观测误差。另外，增加测量次数只能对降低随机误差有利而与系统误差的减小无关。误差理论指出，随着测量次数的不断增加，随机误差的降低越来越缓慢。图2-3-1表示算术平均值的标准偏差$\sigma_{\bar{x}}$随测量次数n的变化情况，可以看出，当测量次数n达到10后，$\sigma_{\bar{x}}$的减少小极慢。

需要全本请访问 www.ertongbook.com