

高等职业教育教学改革示范教材

W
U
L
I
Y
U
S
H
I
Y
A
N

物理与实验

W U L I Y U S H I Y A N

主 编 / 高海林

副主编 / 耿凤琴 徐鸿鹏 杨维华



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

高等职业教育教学改革示范教材

物理与实验

主 编 高海林

副主编 耿凤琴 徐鸿鹏 杨维华

东南大学出版社

内 容 简 介

本教材以实验为平台对专业课所需要的物理理论知识进行讲解,不追求传统物理理论的完整性和系统性,是传统物理理论教材和物理实验教材的整合。

本教材共分三个部分:物理与实验基础知识;基本量的测定:长度、密度、转动惯量、杨氏模量和薄透镜焦距等;基本仪器的使用:多用电表、惠斯登电桥、示波器和分光仪等;基本规律的研究:动量守恒定律、静电场分布规律、电源的输出功率和负载电阻的关系、线性元件和非线性元件伏安特性曲线、电子束偏转规律、螺线管内部磁场分布规律和光的干涉现象等;拓展和实践:数字万用表的设计。附录部分包括实验报告示例、我国的法定计量单位、常用物理常量、常用固体和液体密度、常用金属杨氏模量等。教材正文中穿插了几个阅读材料。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校理工科各专业的物理教材。

图书在版编目(CIP)数据

物理与实验/高海林主编. —南京:东南大学出版社,
2005.8

高等职业教育教学改革示范教材

ISBN 7-5541-0441-5

I. ①物... II. 高... III. 物理学—实验—高等学校:
技术学校—教材 IV. ①—33

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第086511号

物理与实验

出版发行 东南大学出版社(南京市西牌楼2号 邮编210000)

电 话 (025)8379580(发行);5771129(传真)

主 编 / 高海林

责任编辑 顾 礼

经 销 江苏新华集团股份有限公司

排 版 南京华昌图文制版有限公司

印 刷 南京永同印刷厂

印 次 2005年9月第1版 2005年9月第1次印刷

开 本 4、787mm×1092mm 1/16

印 张 8.75

字 数 228千字

印 数 1—4000

定 价 12.80元

(凡东大图书因装订质量问题,请直接向读者服务部调换。电话:025-8379580)

前 言

本书的书名为《物理与实验》，而不是大家熟悉的《物理学》、《大学物理》、《技术物理》或者《物理实验》、《大学物理实验》等等，要弄清其中缘由，还需要从我们编写这本书的目的讲起。

这本书的编写目的是为高等职业院校提供一本实用的教改试验物理教材。

高等职业教育是高等教育的重要组成部分，是以培养具有一定理论知识和较强实践能力，面向基层、面向生产、面向服务和管理第一线职业岗位的实用型、技能型专门人才为目的的职业教育，是职业教育的高级阶段。生产第一线的应用型、服务型、操作型人才是我们高等职业院校的培养目标。高职院校的物理教学和物理教材的编写也必须服务于这个培养目标。

物理学的基本规律渗透到自然科学的一切领域，运用于生产技术的各个部门，是工程技术，特别是高新技术的基础。高等职业教育的主要任务是培养应用型、技能型高级人才，学生掌握扎实的物理学理论知识，显然非常重要。但是，高职教育的培养目标决定了我们在教学过程中要更重视学生动手能力的培养，物理实验在培养学生动手能力方面的优势是显而易见的。

物理作为高职院校的文化基础课，在时间紧、任务重的大环境下，教学的总课时不可能很多。高职院校如果按照理工科各专业的传统做法，将物理课分为纯粹的物理理论课和纯粹的物理实验课，比较系统地讲解完整的物理学理论知识和实验知识，学时显然不够，同时也是不必要的；仅开设物理理论课，不开设实验课，又不符合物理课的教学规律，也不适应高职院校的培养目标；仅开设物理实验课，不开理论课，纯粹地搞实验，实验中所涉及的物理知识不加讲解，实验课又成了空中楼阁。为解决这些矛盾，我们对机械类、电类各专业的专业基础课和专业课内容进行了仔细研究，将其中所蕴含的物理概念和物理规律进行了梳理和过滤，本着“实用、够用”的原则，针对高职教育的特点，决定将传统的物理理论课和物理实验课进行整合，以实验为平台讲解专业课所需要的物理概念、物理规律，不追求物理理论知识和实验知识的完整性和系统性。

本教材不是纯粹的物理理论内容，也不是纯粹的物理实验内容，而是二者的融合，因此就自然而然地定名为《物理与实验》了。

在这本教材中，我们没有系统地讲述完整的物理学理论知识，而是将专业所需要的物理概念，以实验的形式加以呈现。例如，动力学内容往往是物理理论教材的重点，我们只选取了其中的几个，也就是对学生后续专业课学习所需要的物理量进行讲授，以物理量为核心对相关知识进行扩展。如其中的转动惯量这个物理量，是机械类专业学生在后续专业课学习中经常要用到的概念，我们以中学物理知识为基础，从质点概念引出了刚体概念；从描述质点运动的物理量——位移、速度、加速度，引出了描述刚体转动的物理量——角位移、角速度、角加速度；从质点运动学公式，运用类比法引出了刚体定轴转动的运动学方程；从描述质点惯性大小的物理量——质量，类比引出了描述刚体定轴转动的转动惯性大小的物理量——转动惯量，后又对转动惯量这个物理量通过实验进行了测定。本次实验舍弃了复杂的理论论证和公式推导，着重讲解了各物理量的物理意义及相互关系，完全可以满足机械设计基础和机械制造基础两门专业课对相关知识的的要求，从理论到实践，加深了学生对转动惯量的认识，学生对该部分知识的

理解和掌握也相对容易得多。

物理量和物理公式是物理学在描述物体运动特性和规律时所使用的专门词汇。客观世界在物理学家的眼中变成了许许多多物理量,自然界的物理规律变成了联系物理规律的物理公式,每一个物理量都被赋予严格、准确的含义,我们只有透彻地理解每个物理量的含义,才能自由地进行抽象思维。物理课作为文化基础课,学生后续专业课程中所使用的物理知识,也只是物理量和物理公式,因此本书第2部分是基本物理量的测定,如长度、密度、转动惯量、杨氏模量和薄透镜焦距等。

基本物理实验仪器的使用,也是学生专业课学习的基础,为此本书的第3部分是基本物理仪器的使用,如多用电表、示波器、分光仪、惠斯登电桥等。当然在基本物理量的测定中,也贯穿了游标卡尺、螺旋测微器、物理天平等常用仪器的使用。

基本物理规律的研究始终是物理教学的重点,也是专业课学习的基础,为此本书的第4部分是基本规律的研究。如动量守恒定律研究、线性元件和非线性元件伏安特性曲线研究、电源输出功率与负载电阻的关系研究、电子束偏转规律研究、静电场分布规律研究、螺线管内部磁场分布规律研究等。

为了给学生创造一个实践和探索的机会,本书的最后安排了数字万用表的设计性实验。

本书结构体系新颖,各部分相对独立又相互联系,各实验“知识链接”部分重点讲述该实验所涉及的物理理论知识,又结合专业实际对相应的物理知识进行扩展。实验部分既设计详细,又给学生留有充分的思考余地。实验之后留有思考与练习,有的练习结合生产实际,有的练习结合实验本身,有的练习是对该实验的扩展,有的练习需要学生动脑思考来完成,有的练习需要学生在试验室通过动手实践来完成。

本书主编高海林,副主编耿凤琴、徐鸿鹏、杨维华,其中耿凤琴编写实验9、实验10和实验12,徐鸿鹏编写实验3、实验11、实验15和实验16,杨维华编写实验7和实验17,其余由高海林编写,全书由高海林统稿。

本书的出版得到了东南大学出版社领导和同志们的支持,也参阅了兄弟院校的相关教材,取得了不少宝贵经验,在此表示真挚的谢意。由于编写时间仓促,加之编者业务水平有限,错误和疏漏之处恳请斧正。

编 者
2005年8月

目 录

绪 论	(1)
1 物理与实验	(1)
2 物理与实验课的基本程序	(2)
3 实验课的基本要求	(3)
第 1 部分 物理与实验基础知识	(4)
1 测量与误差	(4)
2 数据处理	(8)
3 基本实验方法和测量方法	(24)
第 2 部分 基本量的测定	(27)
实验 1 长度的测定	(27)
实验 2 规则物体密度的测定	(33)
实验 3 转动惯量的测定	(36)
实验 4 金属杨氏模量的测定	(43)
实验 5 薄透镜焦距的测定	(48)
第 3 部分 基本仪器的使用	(52)
实验 6 多用电表的使用	(52)
实验 7 惠斯登电桥的使用	(57)
实验 8 示波器的使用	(63)
实验 9 分光仪的调节	(69)
第 4 部分 基本规律的研究	(76)
实验 10 动量守恒定律研究	(76)
实验 11 静电场分布规律研究	(81)
实验 12 电源的输出功率与负载电阻的关系研究	(84)
实验 13 线性元件和非线性元件伏安特性曲线研究	(88)
实验 14 电子束偏转规律研究	(91)
实验 15 螺线管内部磁场分布规律研究	(100)
实验 16 光的干涉现象研究	(107)

第 5 部分 探索和实践..... (111)

 实验 17 数字万用表的设计 (111)

附 录..... (124)

 附录 1 实验报告示例 (124)

 附录 2 我国的法定计量单位 (128)

 附录 3 常用物理常量 (132)

 附录 4 在 20 ℃时常用固体和液体的密度 (132)

 附录 5 在 20 ℃时某些金属的杨氏模量 (133)

 附录 6 常用函数的误差传递公式 (133)

参考文献..... (134)

绪 论

物理学是以实验为基础的科学。所谓实验,就是根据研究目的,选用合适的仪器和装置,人为的控制、创造或纯化某种自然过程,同时在尽可能减少干扰的情况下进行观测,以探求该自然过程变化规律的一种科学实践活动。

1 物理与实验

纵观物理学三百年的发展历史可以看出,实验在物理学中占据非常重要的地位。

19 世纪末,经典物理学已经发展到了相当完美的地步,人们乐观地认为物理学的发展已经到顶了,留给后人的只不过是些修修补补的工作,例如如何把常数测得再准确些,如何利用现有的规律去解决各种实际问题等等。但好景不长,不久就出现了一系列与经典物理学理论有尖锐矛盾的实验事实,其中重要的有黑体辐射实验、固体比热容的测定和麦克斯韦-莫雷实验,对这些矛盾的深入研究,酿成了一场物理学的革命风暴,最终导致了量子论和相对论的建立。实验成为物理学发现新事实、探索新规律的源泉。

伽利略用实验否定了亚里士多德“力是维持物体运动状态的原因”的论断;麦克斯韦的电磁学理论用一组简洁的数学方程概括了所有的宏观电磁学规律,但当年却难以令人置信,直到 20 多年后,他预言的电磁波被赫兹的实验所证实,他的学说才成为举世公认的宏观电磁理论的基础;1955 年,李政道和杨振宁提出在弱相互作用的过程中,宇称不守恒,并建议通过钴 60 的衰变来对这一点进行判定性检验,第二年吴健雄用实验证实了这个判断,使杨、李二人的理论得以确立,并使杨、李二人获得了诺贝尔奖;勒尼奥用实验证实了波意耳定律只适用于理想气体等等。所有这些事实都说明,物理理论的确立有待于实验的验证,理论的适用范围也有待于实验来判定。

物理学的发展中,大量的实验是围绕常量进行的。了解物质的物理特性要通过实验测量与物质特性有关的各种常量,除此之外,对一些基本物理常量的测定和研究,在物理学的发展史上更占有重要的地位。

物理实验不仅在物理学的发展中占据重要地位,而且在推动其他自然科学、工程技术的发展中也起着重要作用。特别在不少交叉学科中,物理实验的构思、方法和技术与化学、生物学、天文学等学科相互结合已取得了丰硕成果。此外,物理实验还是众多高新技术发展的源泉,原子能、半导体、激光、超导体和空间技术等最新科技成果,都是与物理实验密切相关的。

当然,科学实验既是理论研究的基础,又离不开理论的指导。实验研究课题的选择、实验的构思和设计、实验方法的确定、实验数据的处理以及由实验结果提出的科学假设和科学结论等等,都始终受理论的支配。

总之,历史表明,物理学的形成与发展是以实验为基础的,物理学和科学技术的发展都是在实验和理论两方面的相互推动和密切结合下进行的。

物理学研究方法通常是在观察和实验的基础上对物理现象进行分析、抽象、概括和总

结,从而建立物理定律,进而形成物理理论,再回到实验中去经受检验。实验是物理学的基础,也是物理知识的源泉,加强物理实验是物理教学的时代特征,又是提高物理教学质量的先决条件。

在研究物理现象时,实验的任务不仅是观察物理现象,更重要的是找出各物理量之间的数量关系,找出它们的变化规律。任何一个物理定律的确定都必须依据大量的实验材料,即使已经确定的物理定律,如果出现了新的实验事实和这个定律相违背,那么便需要修正原有的物理定律或物理理论。因此我们说物理实验是物理理论的基础,它是物理理论正确与否的试金石。

物理与实验是高校理工科进行科学实验训练的一门基础课程,是各专业后继实验课程的基础之一。它的主要任务如下:

(1) 培养学生以确凿的事实为依据,理论与实践相结合的科学态度;认真仔细、一丝不苟的工作作风;善于观察,勤于思考,认真总结实验现象中所蕴涵的物理规律的学习习惯。

(2) 学习物理实验的基本知识、基本方法,培养基本实验技能(包括基本实验仪器的使用、基本物理量的测量、误差的分析和评定、数据的处理)。

(3) 使学生通过实验去观察、分析、研究物理现象和规律,加深对物理学的基本概念和基本规律的理解和掌握。

总之,学习的重点应放在培养科学实验能力与提高科学实验素养方面,使我们在获取知识、运用知识的同时,提高综合分析能力、动手实践能力、设计创新能力,养成严肃认真的工作作风和实事求是的科学态度。

2 物理与实验课的基本程序

实验与听课不同,它的特点是同学们在教师的指导下自己动手,独立地完成实验任务。通常,每个实验的学习都要经历3个阶段。

1) 实验的准备

实验前必须认真阅读教材,做好必要的预习。阅读时要以实验目的为中心,搞清楚实验原理(包括测量公式)、操作要点、数据处理及其分析方法等。同时要精心构思,写出简明的预习报告,内容包括目的、原理摘要、关键步骤、数据记录表格等等。

2) 实验的进行

内容包括仪器的安装与调整、选择测试条件、依据实验程序进行实验操作、观察实验现象、读取与记录实验数据、计算与分析实验结果等。

进入实验室,要遵守实验室规则;实验过程中对观察到的现象和测得的数据要及时进行分析,判断它们是否正常与合理;实验过程中可能会出现故障,在教师的指导下分析故障原因,学会排除故障的本领;实验完毕,做好仪器设备的整理工作。

3) 编写实验报告

编写实验报告是对实验进行全面总结分析的一个过程,必须予以充分重视。通常,实验报告分为以下3个部分。

第一部分:实验目的和原理,包括如下内容。

目的:说明本实验的目的。

原理:在理解的基础上,用简短的文字扼要地阐述实验原理,切忌整篇照抄,力求做到图文

并茂,作出必要的原理图、电路图或者光路图;写出实验所用的主要公式,说明式中各物理量的意义和单位,以及公式的适用条件(或实验的必要条件)。

第二部分:实验记录,包括如下内容。

仪器:记录实验所用主要仪器的编号和规格,便于以后对实验进行复查。

过程:实验内容和观测现象记录。

数据:数据记录应做到整洁、清晰而有条理,便于计算与复核,达到省工省时的目的;在标题栏内要注明单位;数据不得任意涂改,对确定测错而无用的数据,可在旁边注明“作废”字样,不要任意删去。

第三部分:数据处理与计算,包括如下内容。

计算结果与误差计算:计算时先将文字公式化简,再代入数值进行运算。误差计算要预先写出误差公式。

结果:按较准确形式写出实验结果,必要时注明结果的实验条件。

实验讨论及作业:对实验结果进行分析讨论(对实验中出现的说明和讨论),写出实验心得或建议等,完成教师指定的作业题。

实验报告是实验工作的总结,实验报告也可供他人借鉴,促进学术交流。因此,编写实验报告要求做到书写清晰、字迹端正、数据记录整洁、图表合适、文理通顺、内容简明扼要。

3 实验课的基本要求

为了保证实验的正常进行,培养严肃认真的工作作风和良好的实验工作习惯,特制定下列规则,望同学们遵守执行。

(1) 学生应在课表规定的时间内进行实验,不得无故缺席或迟到。实验时间若要更动,须经实验室同意。

(2) 学生在每次实验前应对安排要做的实验进行预习,并在预习基础上写出预习报告。

(3) 进入实验室,应携带必要的物品,如文具、计算器和草稿纸等。对于需要作图的实验,应事先准备毫米方格纸和铅笔。

(4) 进入实验室后,应将预习报告放在桌上由教师检查,并回答教师的提问,经教师检查合格后,才可准备实验。

(5) 实验前,根据实验仪器清单核对自己使用的仪器是否缺少或损坏。若发现问题,应向教师或实验室管理员提出。未列入清单的仪器,另向管理员借用,实验完毕后归还。

(6) 开始操作前,应细心观察仪器构造,看懂各种仪器仪表的操作规则及注意事项。尤其是电学实验,线路接好后先经教师或实验室工作人员检查,经许可后才可接通电路,以免发生意外。

(7) 实验时,应注意保持实验室整洁、安静。如有仪器损坏应及时报告教师或实验室工作人员,并填写损坏单,注明损坏原因。赔偿办法根据学校规定处理。

(8) 实验完毕前,应将实验数据交给教师检查,实验合格者由教师予以签字通过。将仪器、桌椅恢复原状,放置整齐。余下时间在实验室内进行实验计算与做作业题,待下课后方可离开。实验不合格或请假缺课的学生,由指导教师登记,通知在规定时间内补做。

第1部分 物理与实验基础知识

在物理实验中,总要进行大量的测量工作。测量包含两个必要的过程,一是对物理量进行检测;二是对测量的数据进行处理。在实验前,必须对所观测的对象进行分析研究,以确定实验方法和选择具有适当精度的测量仪器。在实验后,对测得的数据加以整理、归纳,用一定的方式(列表或图解)表示出它们之间的相互关系,并对实验结果给予合理的解释,做出正确判断。

1 测量与误差

1.1 基本概念

进行物理实验时,不仅要定性观察所发生的物理现象,而且要定量地测定物理量的大小,找出物理量之间的定量关系,因此任何实验都离不开测量。所谓**测量**,就是以测量出某一物理量值为目的的一系列有意识的科学实践活动。也就是将待测量与一个选作单位的同类量进行比较,其倍数与单位的乘积即为待测量的量值。显然数值的大小与选用的单位有关,选用的单位越大,数值就越小,反之亦然。因此,在表示一个被测对象的量值时,就必须包含数值和单位两个部分。

根据《中华人民共和国计量法》,规定采用以国际单位制(SI)为基础的中华人民共和国法定计量单位,即以米(长度)、千克(质量)、秒(时间)、安培(电流)、开尔文(热力学温度)、摩尔(物质的量)和坎德拉(发光强度)作为基本单位,其他量的单位都由这7个基本单位导出,称为国际单位制的导出单位。

任何被测量都有一个客观存在的真实数值,物理学中这个客观存在的真实数值叫**真值**。而实验测定的值叫**测量值**。由于测量条件的限制(如仪器的灵敏度和分辨能力,环境的不稳定性和实验者的实验技能等),使得待测量的真值是不可测得的,误差的存在是必然的。测量值和真值之间的偏差,称为**测量值的误差**。

设测量值为 N , 真值为 N' , 误差为 ΔN , 则

$$\Delta N = N - N' \quad (1-1)$$

测量的任务,一是设法使测量值中的误差减到最小,求出被测量的最近真值,即**最佳估计值**;二是确定最佳估计值的可靠程度,即误差或不确定度。

真值无法精确得到,因此误差不仅不能完全避免而且也不能完全确定,只能通过各种方法加以估计。本书后面提到的误差都是最佳估计值的估计误差。

1.2 测量分类

按测量方法的不同,测量可分为直接测量和间接测量。

1.2.1 直接测量

用测量仪器直接测定物理量的值叫**直接测量**。如用米尺测量物体的长度,用天平称铜块的质量,用秒表测量单摆的周期等。仪表上所标明的刻度或从显示装置上直接读取的值,都是直接测量的量值。

在直接测量中,按测量条件的不同,测量又分为等精度测量和不等精度测量。

1) 等精度测量

对某一量 N 进行 k 次测量,得 k 个数值为 $N_1, N_2, \dots, N_k$,如果每次测量都是在相同的条件下进行的,则没有理由认为所得的 k 个值中,某一个值比另一个值要测得准确些。在这种情况下,所进行的一系列测量称为**等精度测量**。所谓相同条件的含义,是指同一个人用同一台仪器,每次测量的周围条件都相同(如测量时环境、气温、照明情况等未变动)。这种情况就可认为各测量值的精确程度是相同的。本书中,对某一物理量进行的多次测量,除作特殊说明外,都是等精度测量。

2) 不等精度测量

对某一量 N 进行了 k 次测量,得到 k 个值为 $N_1, N_2, \dots, N_k$,如果每次测量的条件不同,那么这些值的精确程度不能认为是相同的。在这种情况下,所进行的一系列测量叫做**不等精度测量**。例如,同一实验者用精度不同的 3 种天平称量某一物体质量 m ,得到 3 个值 m_1, m_2, m_3 ,或者用 3 种不同的方法测量某一物质的密度 ρ ,得 3 个值 ρ_1, ρ_2, ρ_3 ,这都是不等精度测量。

1.2.2 间接测量

在物理实验中,能够直接测量的量毕竟是少数,大多数是根据直接测量所得数据,用物理公式通过运算得出所需要的结果。这种测量称为**间接测量**。例如,直接测量测出单摆的长度

l 和周期 T ,应用公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 求重力加速度 g ,则求 g 的测量就是间接测量。

1.3 误差分类

测量的任务之一是减小测量误差,那么怎样才能最大限度地减小测量误差,并估算出误差的范围呢?要回答这些问题,首先要了解误差产生的原因及其性质。根据误差的性质,可把误差归纳为系统误差、随机误差和粗差三大类。

1.3.1 系统误差

在同一条件下,多次测量同一量值时误差的大小和正负总保持不变,或在条件改变时按一定规律变化,这种由固定不变的或按确定规律变化的因素所造成的一类误差称为**系统误差**。

例如用天平测量物体质量,当天平不等臂时,测出物体质量总是偏大或偏小;再例如当我们的手表走得很慢时,测出每一天的时间总是小于 24 小时。

系统误差有些是固定的,如游标卡尺的零点不准;有些是积累的,如用受热膨胀的钢卷尺进行测量时,其测量值就小于真值,误差随测量长度成正比例增加;还有些是周期性变化的,如停表指针的转动中心与刻度的几何中心不重合,造成偏心差,其读数误差就是一种周期性的系统误差。

1) 系统误差的产生原因

(1) 测量方法因素。测量所依据的理论和公式的近似性引起的误差,例如单摆实验中使用的测重力加速度公式 $g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$ 就是近似公式;测量条件或测量方法不能满足理论公式所要求的条件等引起的误差,例如在实验中一般忽略了摩擦、散热、电表的内阻等引起的误差都属于这一类。

(2) 测量装置因素。由于仪器设计制造方面的缺陷(例如尺子刻度偏大、表盘刻度不均匀等),仪器安装、调试不当等因素产生的误差。

(3) 环境因素。测量时实际温度与所要求的温度有偏差,测量过程中温度、湿度、气压等按一定规律变化的因素引起的误差。

(4) 测量人员因素。由于测量者本身的生理特点或固有习惯所引起的误差,例如某些人在进行动态测量记录某一信号时有滞后的倾向等。

2) 系统误差的减小和消除

下面简单介绍几种减小和消除系统误差的方法和途径。

(1) 从产生系统误差的根源上消除。采用近似性较好又比较切合实际的理论公式,尽可能满足理论公式所要求的实验条件;选用能满足测量误差所要求的实验仪器装置;严格保证仪器设备所要求的测量条件;采用多人合作,重复实验的方法。

(2) 引入修正项消除系统误差。通过预先对仪器设备将要产生的系统误差进行分析计算,找出误差规律,从而找出修正公式或修正值,对测量结果进行修正。

(3) 采用能消除系统误差的其他方法进行测量。对于某种固定的或有规律变化的系统误差,可以采用交换法、抵消法、补偿法、对称测量法、半周期偶数次测量法等特殊方法进行清除。

系统误差是测量误差的重要组成部分,发现、估计和消除系统误差,对一切测量工作都是非常重要的。采用什么方法要根据具体的实验情况及实验者的经验来决定。无论采用哪种方法都不可能完全将系统误差消除,只要将系统误差减小到测量误差要求允许的范围内,或者系统误差对测量结果的影响小到可以忽略不计,就可以认为系统误差已被消除。

1.3.2 随机误差(又称偶然误差)

在相同条件下,多次测量物理量时,若误差的符号时正时负,其绝对值时大时小,没有确定的规律,则这种由不可预料的随机因素的影响而造成的误差称为随机误差。它的特点是大小不定值,一切都是随机发生的,但它的出现服从正态分布规律。若以横坐标表示误差 ΔN ,纵坐标表示误差分布的概率密度函数,它表示在误差附近处每单位 ΔN 出现的概率,或称为概率密度。由图 1-1 可以看出,满足正态分布规律的随机误差具有如下特点:

(1) 单峰性。测量值与真值相差越小,其可能性越大;与真值相差很大,其可能性较小。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。

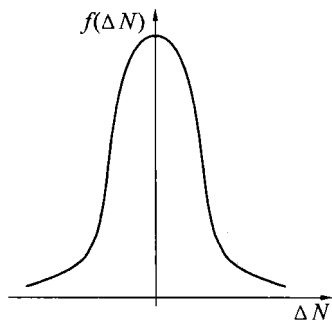


图 1-1 随机误差的正态分布

(2) 对称性。测量值与真值相比,大于或小于某量的可能性是相等的。即绝对值相等的正、负误差出现的概率相同。

(3) 有界性。在一定的测量条件下,误差的绝对值不会超过一定的限度。

(4) 抵偿性。随机误差的算术平均值随测量次数的增加越来越小。

根据上述特性,通过多次测量求平均值的方法,可以使随机误差相互抵消。算术平均值与真值较为接近,一般可作为测量的结果。

随机误差用误差范围来表示,它可由误差理论估算出来,其表示方法有标准误差、平均误差和极限误差等。它们的区别仅在于概率大小的不同。对于初学者来说,首先需要的是建立误差概念,学会对实验结果进行评价以及用简单误差理论来进行误差估算。有些计算器有标准误差的计算程序,可以直接进行标准误差的计算,具体的用法可参阅计算器的使用说明书。

1.3.3 粗差

在测量中还可能出现错误,如读数错误、记录错误、操作错误、计算错误等等,由这些原因引起的误差称为粗差。含有粗差的测量值称为坏值或异常值,在数据处理中,应尽量剔除这些异常值。粗差已不属于正常的测量工作范畴,应当尽量避免。克服粗差的方法,除端正工作态度、操作方法无误外,可用与另一次测量结果相比较的办法发现并纠正。

1.4 误差的表示形式

误差的表示形式有绝对误差和相对误差两种。

1.4.1 绝对误差

测量值 N 与被测量的最佳估计值 $\bar{N}$ 之差,且同被测量值有相同单位,这种误差称为绝对误差。它反映了测量值偏离真值的大小,用公式表示为

$$\Delta N = N - \bar{N} \quad (1-2)$$

绝对误差 ΔN 表示测量结果 N 与最佳估计值 $\bar{N}$ 间的相差范围。由测量结果 N 及其绝对误差 ΔN 可看出真值所在的可能范围为 $N - \Delta N \leq N' \leq N + \Delta N$ 。

注意:绝对误差不同于误差的绝对值,它可正可负,不仅反映了测量值偏离真值的大小,也反映了偏离的方向。

1.4.2 相对误差

在同一测量条件下,绝对误差可以表示一个测量结果的精确程度,但比较不同测量结果时,问题就出现了。例如,用米尺测量两个物体的长度时得到如下结果:

$$L_1 = (1\,000 \pm 1) \text{ m}$$

$$L_2 = (1.00 \pm 0.01) \text{ m}$$

测量值分别是 1 000 m 和 1.00 m,它们的绝对误差分别是 1 m 和 0.01 m,虽然后者的绝对误差远小于前者,但是前者的绝对误差占测量值的 0.1%,而后者的绝对误差却占测量值的 1%,说明前一个测量值的精确程度远大于后者。为了便于比较不同测量值的精确性,需要引入相对误差的概念。

测量值的绝对误差与测量值的最佳估计值之比叫相对误差。用公式表示为

$$E = \frac{\Delta N}{N} \times 100\% \quad (1-3)$$

相对误差表示绝对误差在所测物理量中所占的比重,一般用百分比表示,没有单位。

由于存在误差,任何测量值 N 都只能在一定近似程度上表示真值 N' 的大小,而误差大致说明这种近似的程度。完整的测量结果,不仅要说明所得数值 N 及其单位,还必须说明相应的误差,用以下的标准形式表示:

$$N = (\bar{N} \pm \Delta N)(\text{单位})$$

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

例如,测得某物体的密度

$$\rho = (7.91 \pm 0.03) \text{ g/cm}^3$$

$$E = \frac{0.03}{7.91} \times 100\% = 0.38\%$$

不标明误差的测量结果,在科学上是没有价值的。

如果待测量有理论值或公认值,也可用百分差来表示测量结果的精确程度。即

$$\text{百分差 } E_0 = \frac{\text{测量值 } N - \text{公认值 } N''}{\text{公认值 } N''} \times 100\% \quad (1-4)$$

绝对误差、相对误差和百分差通常只取 1~2 位数字来表示。

2 数据处理

2.1 直接测量的最佳值及误差估计

2.1.1 单次直接测量

在同一次实验里,常常由于条件不许可,或不需要进行多次测量等原因,对一物理量的直接测量只进行了一次。这个单次测量值就是本次直接测量的最佳值,其误差应根据仪器精度(最小刻度和仪器误差)、测量方法、实验条件以及实验者的感觉能力、技术水平等实际情况进行合理估计,不能一概而论。

(1) 对有仪器说明书或注明仪器精度等级的仪器,可用仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ (仪器出厂时的检定) 作为绝对误差,即

$$\Delta N = \Delta_{\text{仪}} \quad (1-5)$$

比如,螺旋测微器(0~50 mm), $\Delta_{\text{仪}} = 0.004 \text{ mm}$; 电磁仪表(指针式电流表、电压表), $\Delta_{\text{仪}} = AK\%$ (A 为量程, K 为仪表精度等级)。

(2) 对可估读测量数据的仪器,取仪器最小分度值 a 的一半作为 $\Delta_{\text{仪}}$, 即

$$\Delta_{\text{仪}} = a/2 \quad (1-6)$$

比如,米尺的最小刻度为 1 mm, 则米尺的 $\Delta_{\text{仪}} = 0.5 \text{ mm}$ 。

(3) 对不可估读测量数据的仪器,取 $\Delta_{\text{仪}} = a$; 有时也可以根据实际情况,采用比仪器最小分度更大的合理数值。

比如,精度为 0.05 mm 的游标卡尺,则其 $\Delta_{\text{仪}} = 0.05 \text{ mm}$; 精度为 0.02 mm 的游标卡尺,则其 $\Delta_{\text{仪}} = 0.02 \text{ mm}$; 分辨率分别为 $30''$ 和 $1'$ 的分光计,则其 $\Delta_{\text{仪}}$ 分别为 $30''$ 和 $1'$; 各类数字仪

表,其 $\Delta_{\text{仪}}$ 为仪器最小读数。

(4) 如果在几个测量值中,某些测量值的误差相对来说显得很小,它的误差在计算时可以忽略。

2.1.2 多次直接测量

1) 测量结果的“最佳估计值”——算术平均值

在相同条件下对同一物理量 N 进行 n 次测量,其测量值分别为 $N_1, N_2, \dots, N_n$, 根据误差理论,绝对值相等的正的误差和负的误差出现的机会相同,当 n 趋于无穷大时,由于正负误差相互抵消,算术平均值趋近于真值。因此,多次测量的算术平均值是真值的最佳估计值,有

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad (1-7)$$

例 1 测量 10 次标的长度,得到的各测量值如表 1-1 所示,则杆长度 $\bar{x}$ 是多少?

表 1-1

次 数	测量值(cm)	次 数	测量值(cm)
1	25.80	6	25.75
2	25.85	7	25.82
3	25.80	8	25.75
4	25.78	9	25.78
5	25.82	10	25.85

$$\begin{aligned} \text{解} \quad \bar{x} &= \frac{1}{10} (25.80 \times 2 + 25.75 \times 2 + 25.78 \times 2 + 25.82 \times 2 + 25.85 \times 2) \\ &= 25.80 \text{ (cm)} \end{aligned}$$

2) 误差估计

多次测量中,每一次测量值与算术平均值的差值为 $N_1 - \bar{N} = v_1, N_2 - \bar{N} = v_2, \dots, N_n - \bar{N} = v_n$ 。在普通物理实验中,通常采用算术平均误差作为绝对误差范围,即

$$\Delta N = \frac{1}{n} (|v_1| + |v_2| + |v_3| + \dots + |v_n|) \quad (1-8)$$

它表示对物理量 N' 做任意一次测量,其测量误差出现在 $-\Delta N$ 到 $+\Delta N$ 之间的概率为 58% (可参阅误差理论的有关资料)。这是对测量结果可靠性的一个估计。求出绝对误差后,相对误差容易求出,即

$$E = \frac{\Delta N}{\bar{N}} \times 100\% \quad (1-9)$$

当多次测量所求得的误差小于仪器误差时,为了谨慎起见,常取仪器误差作为测量结果的误差。

多次测量的随机误差也可用标准误差来估算,即对于 n 次测量中某一次测量值的标准误差(偏差) S (标准误差是由真值计算得出,而标准偏差是由平均值计算得出,为避免表述错误,统称标准差,可参阅有关资料)可用下式表示:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2} \quad (1-10)$$

式中: N_i ——第 i 次测量值;

$\bar{N}$ ——有限次测量的算术平均值。

n 次测量结果的平均值 $\bar{N}$ 的标准误差(偏差)为

$$S_{\bar{N}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2} \quad (1-11)$$

上式的物理意义是,在多次测量的随机误差遵从正态分布的条件下,对多次测量结果,真值在 $[\bar{N} - S_{\bar{N}}, \bar{N} + S_{\bar{N}}]$ 区间内的概率为 68.3%。

采用标准差计算时,测量次数 n 不宜过少,以 $n \geq 10$ 为宜。如果只进行几次或单次测量,则标准差为

$$S = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (1-12)$$

说明:

(1) 在物理实验中,标准偏差 $S_{\bar{N}}$ (或最大误差 δ) 一般只取一位,相对误差一般取两位,而且在对误差截尾时,为了不人为地缩小误差范围,都采用进位的方法。例如,对标准差 0.38 和 0.33 都应取成 0.4。

(2) 算术平均值 $\bar{N}$ (或单次测量值) 应保留的位数应由误差所在位确定,原则是末尾一位数必须与误差末尾数对齐。例如,应将 (3.5625 ± 0.033) cm 写成 (3.56 ± 0.04) cm。

(3) 算术平均值 $\bar{N}$ (或单次测量值 N) 的截尾原则为“四舍六入,逢五凑偶”,是指对于该截尾的那个数 5,其前一位是奇数时,则进位,如前一位是偶数,则将 5 舍去。例如, $S_{\bar{N}} = 0.03$ cm, 如果 $\bar{N} = 18.625$ cm, 则 $\bar{N}$ 应取成 18.62 cm; 如果 $\bar{N} = 18.635$ cm, 则 $\bar{N}$ 应取成 18.64 cm。

例 2 用天平称一小球的质量 m , 一共称了 $n=9$ 次, 结果如表 1-2 所示, 请正确表达直接测量结果。

表 1-2

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m_i (g)	18.79	18.72	18.75	18.71	18.74	18.73	18.78	18.76	18.77

解 (1) 算术平均值

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^9 m_i = 18.750 \text{ g}$$

(2) 平均值的标准偏差

$$S_m = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^9 (m_i - \bar{m})^2} = 0.0091 \text{ g}$$

因标准偏差只取一位, 且采用进位法, 故 S_m 为 0.01 g。

(3) 相对误差

$$E = \frac{S_m}{\bar{m}} \times 100\% = 0.0533\%$$

因相对误差只取两位, 且采用进位法, 故 E 为 0.054%。

(4) 测量结果

$$m = \bar{m} \pm S_m = (18.75 \pm 0.01) \text{ g}$$