



全国高职高专公共基础课教学改革规划教材

实验物理

Shi Yan Wu Li

高海林 ● 主编



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



全国高职高专公共基础课教学改革规划教材

实 验 物 理

主 编 高海林

副主编 徐鸿鹏

参 编 耿凤琴 杨维华



机械工业出版社

本书以实验为载体,在遵循“适度、够用”原则的基础上,对传统的物理理论教材和物理实验教材进行了有机的整合。

本书共分4个部分:实验物理基础知识;基础实验(包括长度的测定、规则物体密度的测定、万用表的使用、示波器的使用、薄透镜焦距的测定);综合实验(包括恒力矩转动法测刚体的转动惯量、金属丝杨氏模量的测定、电子束的偏转与聚焦、霍尔效应及其应用、分光仪的调整和使用、光的干涉——牛顿环、光电效应);设计性实验(包括线性元件和非线性元件伏安特性曲线研究、电源的输出功率与负载电阻的关系研究、单臂电桥测电阻、数字万用表的设计)。书中还穿插了一些阅读材料。

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

实验物理/高海林主编. —北京:机械工业出版社, 2007. 11

全国高职高专公共基础课教学改革规划教材

ISBN 978-7-111-22535-5

I. 实… II. 高… III. 物理学-实验-高等学校:技术学校-教材

IV. 04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第157794号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王玉鑫 责任编辑:李大国 版式设计:霍永明

责任校对:陈延翔 封面设计:王伟光 责任印制:邓博

北京市朝阳展望印刷厂印刷

2008年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·11.25印张·249千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-22535-5

定价:18.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379541

封面无防伪标均为盗版

前言

近年来,高职院校高深的、纯粹的物理理论教学内容已不能很好地满足专业课教学的需要。同时,传统的课堂教学方法也不适应当前高职教育的实际,高职院校物理教学课时被大幅度地缩减,有些专业甚至将其完全取消。物理课不开了,后遗症也出来了,因为在专业课学习中,如果学生没有一定的相关物理理论知识做基础,就会直接影响到他们对专业课的掌握;实验实训课中,如果学生没有一定的误差理论知识和一定的实验数据处理能力,书写规范的实验报告就会成为他们的一大难题。如何让高职物理课程以全新的教学内容和教学形式更好地服务于专业课教学,以适应高职教育的要求,编者所在学校于2004年6月便开始了高职机电类专业物理课程教学改革试点。此次教学改革的思路是,停开纯粹的物理理论课,将物理理论课内容与实验课内容进行整合,偏重实验,弱化理论,以实验为载体,讲授学生专业课学习所需的物理理论内容,强化对学生实际动手操作能力的培养。本书就是为配合此次教学改革而编写的。

从内容上看,本书并没有系统地讲述完整的物理学理论知识和实验知识,而是本着“适度、够用”的原则,将传统的物理理论课内容和物理实验课内容进行优化、重组,将学生专业课学习所需要的物理概念和物理规律以实验的形式加以讲解。本书共分为4个部分。第1部分为“实验物理基础知识”,着重讲述了专业实验、实训所需的误差理论和数据处理等知识。第2部分为“基础实验”,着重培养学生的实际动手操作能力和书写规范实验报告的能力。第3部分为“综合实验”,以实验为载体,讲授了专业课学习所需的物理理论知识,进一步培养学生的动手操作能力和实验报告的书写能力,该部分是本书的重点。例如,转动惯量是机电类专业学生在后续专业课学习中经常要用到的概念,本书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，通过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，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。另外，通过对质点运动和刚体运动物理量、物理规律进行比较，加深了学生对相关内容的理解，降低了学习难度，同时又为学生构建了刚体转动的物理理论知识的框架。最后，通过实验对转动惯量这个物理量进行测定。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要求，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。在学生具有了一定的物理实验知识和一定的操作能力之后，本书安排了第4部分内容，即“设计性实验”。第4部分给出了实验目的，提出了设计要求，并且对实验器材不加限定，让学生自己提出设计思路和所用器材的规格要求，目的是锻炼和检查学生的动手操作能力。为保证学生能顺利完成“设计性实验”，本书对这些设计性实验给出了“原理提示”、“设计指导”和“注意事项”等。此外，为提高学生的阅读兴趣，扩大学生知识面，本书在正文中穿插了“普通万用电表的巧妙应用”、“常用电学实验仪器的选择”、“扩音机与扬声器的配接”等阅读材料。

从编写体例上看，与传统实验教材相比，本书为帮助学生搞好实验预习，在“基础实验”和“综合实验”部分的每一个实验前，都添加了“预习提示”和“预习测试”。预习提示指出了该实验的要点和应重点掌握的内容。预习测试的目的是督促和检查学生的预习情况。“观测内容”部分列出了实验中要观察的具体现象和要测定的具体数据，使学生明白每个实验的具体任务。“步骤提示”中只给出了重要步骤的提示，并没有对实验的具体步骤作硬性的、详细的规定，其目的是既保证学生能顺利完成实验任务又给学生留出创新思维的余地。

本书的最大特色就是在“综合实验”部分的绝大多数实验中，根据专业课的教学需要加入了“知识链接”和“最新科研成果摘编”。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，并结合专业实际对相应的物理知识进行扩展，力求通过一个实验，给学生构建起相关物理理论知识的框架，作为停开理论课后学生必备物理理论知识的补充。“最新科研成果摘编”部分，摘编了与本实验有关的最新科研成果，有的是对本实验的应用，有的是对本实验的改进，或对本实验数据处理的方法等。由于篇幅所限，对不能一一摘编的内容，给出了查找的线索，以拓展学生的知识面。

本书结构体系新颖，各部分相对独立又相互联系，实验内容既详细又给学生留有思考的空间。实验后的思考与练习，有的结合生产实际，有的结合实验本身，有的则是对该实验的扩展，还有的练习则需要学生在实验室通过动手实践操作来完成。

本书由高海林任主编，徐鸿鹏任副主编。参加本书编写的有徐鸿鹏（实验8、实验9、实验11和实验13），耿凤琴（实验10和实验14），杨维华（实验12、实验15

和实验 16)，其余部分由高海林编写。

本书的出版得到了机械工业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

目录

前言	
绪论	1
第1部分 实验物理基础知识	7
第一节 测量与误差	7
第二节 实验数据的处理及测量结果的表示	14
第三节 Excel 软件在实验数据处理中的应用	26
第2部分 基础实验	33
实验1 长度的测定	33
实验2 规则物体密度的测定	40
实验3 万用表的使用	47
实验4 示波器的使用	58
实验5 薄透镜焦距的测定	64
第3部分 综合实验	71
实验6 恒力矩转动法测刚体转动惯量	71
实验7 金属杨氏模量的测定	83
实验8 电子束的偏转与聚焦	93
实验9 霍尔效应及其应用	107
实验10 分光仪的调整和使用	119
实验11 光的干涉——牛顿环	130
实验12 光电效应	138
第4部分 设计性实验	152
实验13 线性元件和非线性元件伏安特性曲线的研究	152
实验14 电源的输出功率与负载电阻的关系研究	155
实验15 单臂电桥测电阻	158
实验16 数字万用表的设计	163
参考文献	173

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,人为地控制、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。

一、实验物理的作用和地位

纵观物理学三百年来的发展历史,可以看出,实验在物理学中占据着非常重要的地位。

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。但好景不长,不久就出现了一系列与经典物理学理论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,它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。

在物理学的发展中,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占有更加重要的地位。

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。特别是在不少交叉学科中,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领域的最新科技成果,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,都始终受到理论的支配。

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。

物理学的研究方法通常是,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,最后,再回到实验中去经受检验。实验是物理科学的基础,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。任何一个物理定律的确定都必须依据大量的实验材料,即使是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,也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,是物理理论正确与否的试金石。

二、实验物理课程的任务和基本要求

实验物理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。对于高等职业技术学院,它的主要任务是:

(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含的理论规律的学习习惯。

(2) 学习实验的基本知识、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),为专业课的实验、实习、实训打下良好的实验理论基础。

(3) 强化学生动手能力的培养,以适应生产、管理、服务等生产一线对技能性人才的要求。

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,使学生在获取知识、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、实事求是的科学态度。

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, 弄懂各种仪器仪表的操作规则及注意事项。尤其是电学实验, 线路接好后应先经教师或实验室工作人员检查, 经许可后才可接通电源, 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, 通知其在规定时间内补做。

三、实验课的基本程序

实验与纯粹的理论课不同, 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. 实验的准备阶段

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: 实验目的、原理摘要、关键步骤、数据记录表格等。

2. 实验的进行阶段

该阶段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判断, 判断它们是否正常与合理。实验过程中可能会出现故障, 应在教师的指导下, 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. 编写实验报告阶段

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 3 个部分。

第一部分: 实验目的和原理。

(1) 目的 说明本实验的目的。

(2) 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, 包括内容如下:

(1) 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。

(2) 过程 实验内容和观测现象记录。

(3) 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。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:

(1) 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。

(2) 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。

(3) 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。



阅读材料

一、黑体辐射实验

任何物体都具有不断辐射、吸收、发射电磁波的本领。辐射出去的电磁波在各个波段是不同的,也就是具有一定的谱分布。这种谱分布与物体本身的特性及其温度有关,因而被称为热辐射。为了研究不依赖于物质具体物性的热辐射规律,物理学家们定义了一种理想物体——黑体,以此作为热辐射研究的标准物体。

所谓黑体是指入射的电磁波全部被吸收,既没有反射,也没有透射(当然黑体仍然要向外辐射)。显然,自然界不存在真正的黑体,但许多物体是较好的黑体近似(在某些波段上)。

基尔霍夫辐射定律表明,在热平衡状态的物体所辐射的能量与吸收的能量之比与物体本身特性无关,只与波长和温度有关。按照基尔霍夫辐射定律,在一定温度下,黑体必然是辐射本领最大的物体,所以又叫做完全辐射体。

普朗克辐射定律则给出了黑体辐射的具体谱分布,即在一定温度下,单位面积的黑体在单位时间、单位立体角内和单位波长间隔内辐射出的能量:①在一定温度下,黑体的谱辐射亮度存在一个极值,这个极值的位置与温度有关。据此可以估算,当 $T = 6000\text{K}$ 时, $\lambda_m = 0.48\mu\text{m}$ (绿色),这就是太阳辐射中最大的最大谱辐射亮度处;②在任一波长处,高温黑体的谱辐射亮度绝对大于低温黑体的谱辐射亮度,不论这个波长是否是光谱最大辐射亮度处。

但现实世界不存在这种理想的黑体,那么用什么来刻画这种差异呢?对任一波长,可

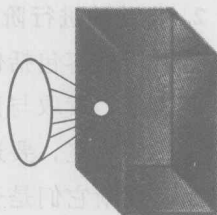


图 0-1 黑体

以定义发射率为该波长的一个微小波长间隔内, 实物体的辐射能量与同温下的黑体的辐射能量之比。显然发射率为介于 0 与 1 之间的正数, 一般发射率依赖于物质特性、环境因素及观测条件。如果发射率与波长无关, 那么可把物体叫做灰体, 否则叫做选择性辐射体。

二、赫兹实验

赫兹在柏林大学随赫尔姆霍兹学习物理时, 受赫尔姆霍兹的鼓励研究麦克斯韦电磁理论。当时德国物理界深信韦伯的电力与磁力可瞬时传送的理论, 因此赫兹决定以实验来证实韦伯与麦克斯韦谁的理论正确。



图 0-2 赫兹

依照麦克斯韦理论, 电扰动能辐射电磁波。赫兹根据电容器经由电火花隙会产生振荡的原理, 设计了一套电磁波发生器, 赫兹将一感应线圈的两端接于电容器二铜棒上。当感应线圈中的电流突然中断时, 其感应高电压使电火花隙之间产生火花。瞬间后, 电荷便经由电火花隙在锌板间振荡。由麦克斯韦理论, 此火花应产生电磁波, 于是赫兹设计了一个简单的检波器来探测此电磁波。他将一小段导线弯成圆形, 线的两端点间留有小电火花隙。若电磁波在此小线圈上产生感应电压, 则会使电火花隙产生火花。所以他坐在一暗室内, 检波器距振荡器 10m 远, 结果他发现检波器的电火花隙间确有小火花产生。赫兹在暗室远端的墙壁上覆上可反射电波的锌板, 若入射波与反射波重叠, 则应产生驻波, 他以检波器在距振荡器不同距离处加以侦测, 证实了这一结论。赫兹先求出振荡器的频率, 又以检波器测得驻波的波长, 二者乘积即电磁波的传播速度。正如麦克斯韦预测的一样, 电磁波传播的速度等于光速。

1888 年, 赫兹的实验成功了, 麦克斯韦理论也因此获得了无上的光彩。赫兹在实验时曾指出, 电磁波可以被反射、折射和如同可见光、热波一样的被偏振。由他的振荡器所发出的电磁波是平面偏振波, 其电场平行于振荡器的导线, 而磁场垂直于电场, 且两者均垂直传播方向。1889 年在一次著名的演说中, 赫兹明确地指出, 光是一种电磁现象。

第一次以电磁波传递信息是 1896 年由意大利的马可尼开始的。1901 年, 马可尼又成功地将信号送到大西洋彼岸的美国。20 世纪无线电通信更有了异常惊人的发展。赫兹实验不仅证实了麦克斯韦的电磁理论, 更为无线电、电视和雷达的发展找到了途径。

三、物理学家——吴健雄

吴健雄 (1912—1997), 核物理学家, 1912 年 5 月 31 日生于江苏太仓县济河镇。她出身于书香门第, 1923 年考入苏州第二女子师范学校, 1927 年以优异成绩从师范学校毕业, 任一所小学教师。两年后考入南京国立中央大学数学系, 一年后转入物理系, 1934 年获得学士学位后, 受聘到浙江大学任物理系助教, 后进入中央研究院从事研究工作, 1936 年入美国加利福尼亚大学, 1940 年获博士学位, 1944 年参加了“曼哈顿计划”(研制原子弹), 1952 年任哥伦比亚大



图 0-3 吴健雄

学副教授，1958 年升为教授，同年，普林斯顿大学授予她名誉科学博士称号，并当选为美国科学院院士，1972 年起任普林斯顿大学物理学教授直到 1980 年退休，1975 年曾任美国物理学会第一任女性会长，同年获得总统福特在白宫授予她的国家科学勋章。这是美国最高科学荣誉，1978 年在以色列获得沃尔夫奖。吴健雄曾受聘为南京大学、北京大学、中国科学技术大学等校的名誉教授，中国科学院高能物理研究所学术委员会委员，1997 年 2 月 16 日在纽约病逝，终年 85 岁。

吴健雄是世界最杰出的女性实验物理学家，有“核物理女皇”、“中国居里夫人”和“物理科学的第一夫人”之称，她的主要科学贡献有以下几方面：

(1) 1957 年用 β 衰变实验证明了在弱相互作用中的宇称不守恒。1956 年李政道、杨振宁提出在 β 衰变过程中宇称可能不守恒之后，吴健雄立即领导她的小组进行了一个实验，实验结果证实了弱相互作用中的宇称不守恒。由此，在整个物理学界产生了极为深远的影响。

(2) 1963 年用实验证明了核 β 衰变在矢量流守恒定律。吴健雄对 β 衰变的一系列实验工作，特别是 1963 年证明的核 β 衰变中矢量流守恒定律，是物理学史上第一次由实验证实电磁相互作用与弱相互作用有密切关系，对后来电弱统一理论的提出起到重要作用。

(3) 在 β 衰变研究中的其他贡献。 β 衰变的研究对原子核物理和粒子物理的发展具有极为重要的意义。吴健雄从事这一专门领域的研究多年，被公认为是这方面的权威。

(4) 在 μ 子、介子和反质子物理方面的实验研究。从 20 世纪 60 年代中期开始的 10 年间，吴健雄集中力量从事这一中、高能物理领域的实验工作，发表了大量论文，有不少工作富有首创性和很高的学术价值。

吴健雄在实验核物理方面的研究工作涉及面广，尤其注意实验技术的不断改进。她曾对多种核辐射测试器的开发、改进做出贡献，如薄窗盖革计数器、某些塑料闪烁探测器、半导体探测器等。

第 1 部分 实验物理基础知识

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，还须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，对实验结果给予合理的解释，并作出正确判断。

第一节 测量与误差

一、基本概念

进行物理实验时，不仅要定性地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，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七个基本单位导出，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，物理量这个客观存在的真实数值称为真值。实验测定的值称为测量值。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 $\Delta N'$ ，则

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

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。误差只能通过各种方法加以估计。本书后面提到的误差都是指最佳估计值的估计误差。

二、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。

(一) 直接测量

用测量仪器直接测定物理量值的测量称为**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。从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 进行多次测量,得到 k 个数值: $N_1, N_2, \dots, N_k$, 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 个数值中,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**,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、照明等情况未变动)。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 个数值: $N_1, N_2, \dots, N_k$, 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称为**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 , 得到 3 个值 ρ_1, ρ_2, ρ_3 , 这都是不等精度测量。

(二) 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,并通过计算得出所需要的结果。这种测量称为**间接测量**。例如,通过直接测量测出单摆的长度 l 和周期 T , 应用公式 $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ 来求重力加速度 g , 求 g 的测量就是间接测量。

三、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,误差可归纳为系统误差、随机误差和粗差三大类。

(一) 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,误差的大小和正负按一定规律变化。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;再如,当手表走得很慢时,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,如用受热膨胀后的钢卷尺进行测量时,其测量值就小于真值,且误差随测量长度成正比例增加;还有些是周期性变化的,如钟表指针的转动中心由于与刻度的几何中心不重合而造成偏心差,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,如单摆实验中所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引起的误差,如在实验中一般由于忽略摩擦、散热、表的内阻等因素而引起的误差都属于这一类误差。

(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等因素所引起的误差。

(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

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,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。

(二) 随机误差(又称偶然误差)

在相同条件下,多次测量同一物理量时,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,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。它的特点是大小无定值,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 1-1-1 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；与真值相差越大，其可能性越小。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。

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。

(三) 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。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。错误已不属于正常的测量工作范畴，应当尽量避免。克服错误的方法，除工作态度端正、操作方法无误外，还可通过与另一次测量结果相比较的办法发现并纠正。

四、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。

(一) 绝对误差

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

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

绝对误差 ΔN 表示测量值 N 与最佳估计值 $\bar{N}$ 之间的相差范围。由测量结果的最佳估计

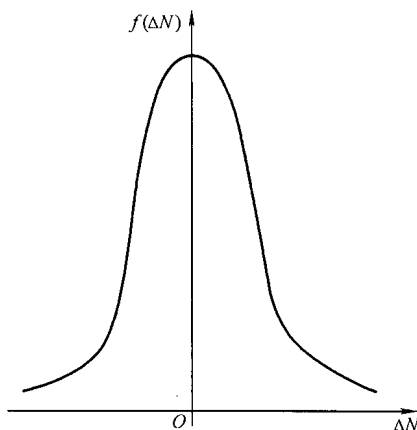


图 1-1-1 随机误差的正态分布