

主编：胡连军 吴战明 国克喜

DA XUE PU TONG
WU LI SHI YAN



大学 普通物理 实验

山 东 大 学 出 版 社

内 容 简 介

本书是依据国家教委理科教材编审委员会实验教材编审组提出的大纲要求,结合高校的实际教学情况编写的实验教材。在教学要求、实验内容以及对学生实验能力的训练与培养方面体现了作者长期积累的教学经验。

本书分六部分,包括力热、电磁、光学实验等内容,共56个实验。本书比较系统地阐述了物理实验中有关的误差和数据处理知识。详细介绍了物理实验的基本方法、仪器的调试使用技术,以及实验设计的基本问题,是一本比较完整而实用的实验教材。

本书可作为高等院校物理实验教材使用,亦可作为有关实验教师和广大实验技术人员的参考用书。

主 编:胡连军 吴战明 国克喜

撰稿人:(以姓氏笔划为序)

马保民	孙培江	刘凤森	刘亚大	刘克学
刘学敏	吴战明	李月芹	李玉芳	张淑芝
连 洁	陈文床	何希庆	林佩丽	国克喜
段吉辉	胡连军	夏海瑞	魏爱俭	

前 言

本书是山东大学物理实验工作者集体劳动的成果,是为理科各系本、专科学生开设普通物理实验而编写的教学用书。全书包括力学、热学、电磁学、光学等内容,共收集了56个实验。

本书主要是依据国家教委理科教材编审委员会实验教材编审组提出的大纲要求、教委规定的实际教学时数以及学校的具体情况而编写的。首先,我们总结了近20年来普通物理实验教学的经验,认真考察了现有的实验教学条件,对实验题目进行了精心挑选,既保留了那些实践效果好的传统题目,又吸收了学校近年来的科研和教学成果,拟定了若干新题目。同时,为了培养学生综合运用知识和技巧以及独立分析和解决实际问题的能力,还设置了一定数量的设计实验题目。

实验教学是理论与实际紧密结合的教学环节。没有正确的理论作指导,便不能透彻地掌握操作的方法和技巧;没有严格的操作训练,仅背诵课本上的条文,便不可能真正解决实际问题。本书在叙述实验原理时力求简明扼要,对实验中的主要步骤及操作技巧则尽力表达清楚,以突出实验教学不同于理论教学的特点。

误差及数据处理既是实验教学中的重点又是难点。本书将它们单独列出,放在实验内容前面,以供学生系统学习和随时查阅。

本书由胡连军、吴战明、国克喜负责编写,共同组织和审定书稿。第一至第四部分由胡连军负责;第五部分由吴战明负责;第六部分由国克喜负责。

第一部分由胡连军撰稿。

第二部分由胡连军(第一、二、三、四、五节)、吴战明(第六节)撰稿。

第三部分由胡连军撰稿。

第四部分由胡连军(第一节、第二节和实验二、六、九、十、十六)、孙培江(实验一、五、十一、十二、十五)、夏海瑞(实验三、四、七、十三、十四)、段吉辉(实验八)撰稿。

第五部分由吴战明(电磁学基本知识及实验十九)、李玉芳(第一节、实验一、二、第五节、实验九、十七)、刘凤森(第二节、实验三、四、第四节、实验八、第七节、实验十二、十三、二十)、林佩丽(第三节、实验五、六、七)、刘亚大(第六节、实验十、十一、十四)、何希庆(第八节、实验十五、十六、第九节、实验十八、二十一)撰稿。

第六部分由国克喜(第一、第二节及实验一、八)、连洁(实验二)、马保民(实验三、十九)、刘学敏(实验四、五、十一)、魏爱俭(实验六、十)、张淑芝(实验七)、刘克学(实验九、十二、十三)、陈文床(实验十四、十五、十六)、李月芹(实验十七、十八)撰稿。

基础实验课是一项集体的工作。每一个实验的设计、实施和改进与每一次实验教材的修改、充实和完善,都是集体智慧的结晶,多年来,曾经有数十位同志先后在这一岗位上做出过奉献,本教材也包含着他们辛勤耕耘的成果。在此谨向他们致以崇高敬意!

本书的编写工作得到了孟尔嘉教授的悉心指导,书稿中还借鉴了兄弟院校实验教材

中的有益成分,在此一并致以衷心的感谢!

由于时间仓促,水平有限,书中可能存在缺点和错误,敬请各位读者批评指正。

编 者

1995年5月于山东大学

目 录

第一部分 绪论

第一节 实验在物理学中的地位	1
第二节 物理实验课的教学目的和任务	2
第三节 实验课进行的过程与要求	3
第四节 实验报告的书写格式与要求	4

第二部分 物理实验中的有关误差理论

第一节 测量及其分类	6
第二节 误差的分类与表示法	8
第三节 随机误差的讨论与处理	15
第四节 “权数”与不等精度测量	35
第五节 间接测量中的误差传递与合成	36
第六节 系统误差	37

【附表】

表一 国际单位制(SI)
表二 误差函数 $\text{erf}(K)$ 表
表三 标准误差的置信限(χ^2 分布)
表四 t 分布表

第三部分 实验数据运算处理

第一节 有效数字	46
第二节 描点作图与图解法	49
第三节 分组平均法与逐差法	53
第四节 用最小二乘法进行曲线拟合	58

第四部分 力学、热学实验

第一节 力学量的测量	63
实验一 测长仪器的使用	64
实验二 伸长法测量杨氏模量	67
实验三 弯曲法测量杨氏模量	72
实验四 固体和液体密度的测量	73
实验五 电光分析天平	77
实验六 气垫导轨验证动量守恒定律	80
实验七 刚体转动惯量	86
实验八 水平轴型转动惯量实验仪	89
实验九 复摆研究	95

实验十 弦振动·····	100
实验十一 声速测定·····	104
实验十二 验证误差分布规律·····	107
第二节 热学量的测量·····	113
实验十三 落球法测液体粘滞系数·····	114
实验十四 液体表面张力系数的测定·····	116
实验十五 金属电阻温度系数的测定·····	118
实验十六 光杠杆法测金属杆的线膨胀系数·····	121

【附表】

表一 20℃时常见固体和液体的密度
表二 标准大气压下不同温度的纯水密度
表三 部分液体的粘滞系数
表四 水的粘滞系数和同空气接触面的表面张力系数
表五 海平面上不同纬度处的重力加速度
表六 20℃时部分金属的杨氏弹性模量
表七 部分物体的线膨胀系数
表八 部分金属和合金的电阻率 ρ 及电阻温度系数 α
表九 部分金属和液体的平均比热容

第五部分 电磁学实验

电磁学实验基本知识·····	128
第一节 伏安法·····	134
实验一 伏安法测电阻·····	134
实验二 测量二极管的伏安特性曲线·····	138
第二节 补偿法·····	140
实验三 电位差计的应用·····	140
实验四 热电偶的校正·····	146
第三节 电桥法·····	149
实验五 单臂电桥·····	150
实验六 双臂电桥测低电阻·····	153
实验七 交流电桥·····	157
第四节 模拟法·····	163
实验八 静电场的描绘·····	163
第五节 示波法·····	166
实验九 示波器的应用·····	166
第六节 弱电流与微电量的测量·····	177
实验十 灵敏电流计·····	178
实验十一 冲击法测电容及高阻·····	182
第七节 磁场的测量·····	184

实验十二 螺线管磁场的测量	185
实验十三 磁场的描绘	189
实验十四 地磁场的测量	192
第八节 RLC 电路的研究	195
实验十五 RLC 串联电路稳态分析	195
实验十六 RLC 串联电路暂态过程的观测研究	202
实验十七 RLC 谐振电路	210
第九节 综合实验	215
实验十八 电路故障分析	215
实验十九 万用电表设计	221
实验二十 叠加原理及代维宁定理的研究	226
实验二十一 非平衡电桥及其应用	229
第六部分 光学实验	
第一节 光学仪器的使用与保养	232
第二节 光学调整技术	233
实验一 薄透镜焦距的测定	235
实验二 平行光管的调整与使用	237
实验三 自制显微镜并测其放大率	242
实验四 550 型焦距仪的原理及使用	244
实验五 分光计调节及棱镜角的测量	249
实验六 光学材料折射率的测定	255
实验七 单色仪的定标与应用	262
实验八 小型棱镜摄谱仪的调试	267
实验九 双棱镜干涉法测激光波长	273
实验十 平行平板玻璃微小夹角的测量	275
实验十一 单缝双缝衍射的光强分布	278
实验十二 平面衍射光栅常数的测量及应用	283
实验十三 用牛顿环法测透镜凸面的曲率半径	285
实验十四 迈克耳逊干涉仪的调整及应用	287
实验十五 偏振现象的观察与研究	290
实验十六 旋光现象的观察及溶液浓度的测量	295
实验十七 激光全息照相	298
实验十八 阿贝成像原理的验证与空间滤波技术	302
实验十九 照相技术	306
【附表】 光学实验常用光源	316

第一部分 绪 论

第一节 实验在物理学中的地位

物理学是一门实验科学。

被爱因斯坦称之为“敏锐的深刻的思想家”的法国著名数学家、物理学家彭加勒(Jules Henri Poincaré, 1854 ~ 1912)曾说:“实验是真理的唯一源泉”,“唯有实验能够告诉我们任何新事物,唯有实验能够给予我们可靠性”,“科学定律不是人为的创造物”,“一切定律莫不来自实验。”彭加勒的论述深刻揭示了物理学的本质属性,科学地说明了物理理论对物理实验的依赖关系。

观察和实验是理论的基础。观察是对自然界中发生的某种现象,在不改变自然条件的情况下,对它的形态加以观测研究。实验是在人工控制的条件下,使现象反复重演,进行观测研究。在实验中,常把复杂的条件加以简化,突出主要因素,减低或排除次要因素的作用,以便得到比较准确的观测结果。从现代科学的观点来看,实验是研究自然规律与改造客观世界的基本手段。

第一,物理学是在实验基础上发展起来的,离开物理实验,物理学的发展就无从谈起。从某种程度上说,物理学从包罗万象的自然哲学中分离出来,其基本标志就是实验方法的引入。伽利略的实验研究,尤其是他把实验方法和数学方法结合起来研究物理规律,使物理学开始走上真正的科学道路。而实验手段的不断完善和发展,又为物理学最终形成自然科学中的一个独立学科奠定了坚实的基础。实验方法的使用不仅促进了物理科学的产生,而且是物理学发展的动力。物理学的每一次重大进展都离不开实验的推动。正是19世纪末,黑体辐射、光电效应、原子光谱等实验的结论,接二连三地向经典力学和经典物理学提出挑战,导致了经典力学理论的危机,特别是放射线的发现和研究,有力地冲击了原子不可分、质量不可变的传统物质观念,动摇了经典力学和经典物理学的神圣地位,最终导致了近代物理学的诞生。在经典物理学向近代物理学前进的进程中,理论的批判固然有助于动摇经典力学的基础,但最终摧毁它还是靠一系列的实验事实。

第二,物理学理论的正确与否,归根结底必须用实验检验。在物理学研究中,为了寻找事物的规律,对某些现象的本质会提出一些说明方案和逻辑推演,这些理论探索,还不能视为定论,只能称之为假说,只有经过不断的实验检验,证明是正确的假说,才能上升为物理学定律。物理定律一般是指实验定律而言,是实验事实的总结。物理学发展过程中,许多关键问题,最后都要诉诸实验。例如,杨氏的光干涉实验证实了光的波动说,赫兹的电磁波实验证实了麦克斯韦的电磁场理论,密立根的光电效应证实了爱因斯坦的光量子假说。可以说,在物理学中,每个概念的建立,每个定律的发现,无不有着坚实的实验基础。

第三,实验和理论的对立统一是物理学发展的根本动力。在科学进步日新月异、各种学说层出不穷的今天,现有理论体系之间的矛盾固然可以成为建立新理论的突破口,但是,实验结果仍然对理论研究具有直接的指导作用。第一,现在理论体系是建立在大量实验基础上的,要纠正、推翻现有理论就必须对它的实验过程、方法和结果进行认真的考察;第二,新理论往往是受到新的实验结果的启发而提出来的。物理学发展的历史表明,从来就没有一个真正有用和深入的理论是由纯粹思辨而发现的。就以高度抽象的相对论而言,狭义相对论固然主要是着眼于力学和电动力学之间关于运动相对性的不对称,但也不忽视光行差现象和菲索实验给爱因斯坦的启迪。广义相对论虽然是基于将相对性原理贯彻到底的信念,但等效原理的提出显然是受到了厄缶实验的启示。无数事实证明,物理学各个领域的进步无一不是理论和实验结合的产物。

第四,实验是理论付诸应用的桥梁。人类认识自然界的目的是为了改造自然,理论研究的价值就在于它能被用来指导实践。然而,物理理论,尤其是现代物理理论能够直接转换为生产技术,应用于生产领域的情况还很少见。例如热核巨变可以产生巨大的能量,这在理论上已没有多大问题,但至今这种能量还没有得到开发利用,要使它产生应有的经济效益,还必须经过大量的实验研究工作。所以,任何一种新技术、新材料、新产品的产生,都要经过大量的实验才能获得。原子能、半导体、激光等科技成果,不仅其理论的提出来源于实验事实的总结,而且它的产生、开发、应用都离不开实验室。因此,实验是物理科学用于其他学科和生产领域的必由之路,是物理学转化为生产力的桥梁。

我国古代科学技术的辉煌成就举世公认,曾在两千多年的时间里遥遥领先于西方。但是,近三百年来,西方倡导实验精神,大力发展科学实验和科学技术,取得了飞速进步,已远远地走在我们前面。中国落后的原因很多,但就科学研究而言,我国传统思想中“劳心者治人,劳力者治于人”的等级观念孕育了重理论、轻实践的不良学风。统治阶级流行的那种视科技发明为“雕虫小技”的陈腐观念,严重地窒息了科学创造精神,阻碍了科学技术的进步。这沉痛的历史教训,我们应当谨记。

今天,科学技术工作虽然已经受到高度重视,但是,多年来形成的旧传统并未得到彻底根除,它不仅影响着我们的科学研究,还给我们的教育留下了深刻的烙印。西方大学里的物理学课程,理论与实验并重,实验时间比授课时间还长,因此,西方学生的理论考试成绩可能不如中国学生,但其实验操作能力、独立创造能力比中国学生高出一筹。西方的科研成果能够迅速转化为生产力,这和他们的教育传统是分不开的。我国的大学物理课程是以理论教学为主,自觉不自觉地吧实验放在辅助地位,这就更加强了理论的统治地位。我们的社会主义现代化建设急需大批的实用型人才,大学毕业生90%以上要到科研机构 and 生产部门从事开发应用研究,仅以从事理论研究和教学作为培养目标,显然无法适应社会的需要。因此,重视加强科学研究和学校中的实验教学工作是十分必要的,它将对我国物理学乃至整个科学技术发展产生深远影响。

第二节 物理实验课的教学目的和任务

物理学教科书上的理论都是经过抽象概括、公式化表述出来的,理论产生的经过一般

不做介绍。这样的教学内容很容易使学生认为这些定律、理论是纯数学推导出来的,或者是轻而易举、唾手可得的。从而使学生认识不到实验的重大意义,丧失观察实验的兴趣。特别是我们的升学制度,从中学到大学,到研究生,考试内容很少或者基本没有实验的内容,这就更加助长了死抠书本的倾向,使学生把内容十分丰富生动的课程当作僵死的教条。这种学习方式必然导致思想呆板,思路狭窄,不利于培养和提高学生观察问题,提出问题,分析问题和解决问题的能力。因此,加强实验教学是学好物理学重要的一环。

普通物理实验课是理科各专业的一门必修课,是学生大学四年中受到系统实验技能训练的开端。物理实验的理论、方法、手段是所有实验中最基本、最普遍的理论、方法和手段,是其它实验的基础。因此对于大学理科学学生来说,不管所学专业如何,物理实验技能的培养是必不可少的。

物理实验课是一门综合性的课程,它不仅包括力学、热学、光学、电学,而且包括许多物理理论教科书中所没有的专门知识、技能和方法。因此,物理实验课的教学目的,最主要的是让学生在亲身实践中,系统地掌握物理实验的一整套专门技能。这些技能是:实验的设计方法,各种实验仪器的工作原理,调整和控制实验设备的技巧,熟练的测量方法和技术,数据处理中的误差理论、计算方法以及对实验结果的科学分析方法等。在培养学生掌握这些专门知识和技能、提高科学实验素养的同时,培养学生理论联系实际、实事求是的科学作风,严肃认真的工作学习态度以及主动钻研和探索未知世界的创新精神。

第三节 实验课进行的过程与要求

无论做什么科学实验,大体经历以下过程:

- (1) 实验任务的提出。
- (2) 实验构思与设计。
- (3) 实验仪器的安装调试。
- (4) 测量、读取并记录数据。
- (5) 处理数据,分析结果。
- (6) 写出实验报告或论文。

实验课的进行大体也是如此,只是所做的实验不是开创性的实验,而大多是重复前人的成功实验。学生主要是通过教师的指导,亲自动手学习实验技能。所以,重点不是追求成果和发明,而是通过严格训练,提高各方面的能力。

为了达到实验课的目的和要求,在目前极少或没有安排实验理论教学时间的情况下,希望学生首先能通读本教材的第一、第二、第三部分,尽量了解有关误差、测量、有效数字、作图、数据处理等必须了解的内容和章节。其中难度较大的问题可随着高等数学的学习和实验课的进行逐渐掌握。

在每一次实验课中,同学们应重视以下几个学习环节:

1. 课前预习。为保证做好实验,每次实验课前都要仔细阅读本次实验的教材和有关资料,弄清学习要求、实验原理,明确实验条件和实验的主要步骤、测量方法及注意事项等。并根据实验内容,画好记录数据的表格,准备好实验中所需自备的纸、笔、尺等。

2. 进入实验室后,应遵守实验室规则,不要大声喧哗。要认真听指导教师有关实验的原理、仪器的使用、应掌握的重点和注意的问题等方面的讲授,尤其要注意听老师所讲的自己在预习中没有弄懂或书上根本没有介绍的内容以及有关仪器的调试技巧和人身安全等方面的特殊规定。

总之,通过预习和听讲,应在实验开始前,就在脑子里较清楚地形成如何进行本次实验的大体轮廓,做到心中有数。带着问题和办法进行实验,会收到良好的效果。

3. 实验开始前,首先应检查核对实验仪器,如有缺少或损坏,及时向老师提出,绝不允许擅动别组的仪器。

实验操作过程是整个实验的核心,正确布置和调试仪器是实验成败的关键。一般调试需占整个实验的大部分时间,所以同学们要有耐心,象一个科学工作者那样认真对待调试中的每一步,不要期望一次成功。调试中遇到仪器有故障,要在老师的指导下排除,并把遇到问题看成是学习的好机会,直至将仪器调到最佳状态为止。因为做实验的重点不是为了测出几个正确数据,而是实验技能的培养和训练,因此,同学们在记录数据时,要如实记录从仪器上直接读出的各种数据,不应是经过计算后的数据,也不能为了得到一个好的测量结果,而随便更改不符合已知结果的某些数据,更不能为了结果而凑数据。

4. 做完实验后,数据记录要经过指导老师审阅,以免发生有大的数据错误或漏测数据的情况。数据记录和实验仪器设备经老师检查无误后,可关好仪器电源,整理仪器恢复原位,打扫实验室卫生,待老师签字允许后,才可离开实验室。

5. 写出完整的实验报告。这一步一般应在课后完成,下次做实验时,再交上实验报告。

第四节 实验报告的书写格式与要求

实验报告是对自己实验工作的一个总结。写实验报告是整个实验的一部分,是对实验内容、实验原理深入理解的过程。写好实验报告,也是为将来进行科学研究、写科学论文打好基础。

实验报告要求使用本校印刷的实验报告纸来写,文字叙述要简练,字迹要清晰整洁,作图要正规,数据表格要齐全。

实验报告包括以下几个内容:

(1) 姓名、系别、年级、组别、同组者、日期。

(2) 学科名称、实验题目。

(3) 学习要求。

(4) 实验仪器。

(5) 实验原理(包括实验的理论根据、重要的公式及实验原理示意图等)。

(6) 操作步骤。可简述实验过程中的几大步骤。

(7) 数据记录列表。将原始数据整理后重新在报告中列表,间接测量结果和最终计算结果也可记录在表中。老师签字的原始数据记录纸要附在报告后面交上,不能弄丢。

(8) 数据处理。将测得数据按实验内容要求进行运算,求出最终结果和误差。数据处理中要注意有效数字和单位。

(9) 思考题的讨论。根据实验过程中所观察的现象,特别是异常现象,以及实验结果,讨论分析本实验内容中所给出的思考题。并可提出自己的疑问和见解,特别是对实验的改进建议。这些最能反映同学们观察和分析问题的能力。

第二部分 物理实验中的有关误差理论

第一节 测量及其分类

一、测量与国际单位制

科学实验的目的,就是要定性地观察、定量地测量有关的物理量,通过对测量数据的误差分析和数据处理,揭示和探索自然界物质和现象的本质,以便更真实合理地掌握自然界物质和现象的内部规律性。因此,测量是人类认识自然界的最基本的手段。

所谓测量,就是一种把待测量和代表标准计量单位的量具做比较的过程,经过比较得出待测量相当于计量单位的多少倍,这个倍数称为读数。读数加上单位就称为测量数据。一个数值只有加上单位才有了具体的物理意义,如 4.85 是一个数值,若加上单位“米”便成了一个表示长度的数据 4.85 米。若加上单位“秒”就成了一个表示时间的数据 4.85 秒。所以在测量数据中,数值和单位两者都不可缺。

为定量测量各种物理量,需有统一的量度单位,国际计量大会 1960 年正式通过了一种通用的适合一切计量领域的单位制,即国际单位制,它的代表符号为(SI)。(Standard International Unit 的缩写)我国也已于 1987 年 7 月 1 日正式颁布了“中华人民共和国计量法”以保证国际单位制 SI 在我国实施。

国际单位制的七个基本单位定义为:

1. 长度单位——米(m)

等于氪 86 原子的跃迁于能级 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 之间的辐射在真空中波长的 1650763.73 倍。

2. 质量单位——千克或公斤(kg)

千克等于国际千克原器的质量。

3. 时间单位——秒(s)

秒是铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9192631770 个周期的持续时间。

4. 电流强度单位——安培(A)

在真空中,截面积可忽略的两根相距 1m 的无限长平行圆直导线内通以恒定电流时,若导线间相互作用力在每米长度上为 2×10^{-7} N,则每根导线中的电流为 1A。

5. 热力学温度单位——开尔文(K)

开尔文是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。除了以 K 表示的热力学温度外,也可用摄氏温度,它们可按数值方程进行换算:

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273.15$$

式中 t ——摄氏温度；

T ——热力学温度。

6. 发光强度单位——坎德拉(cd)

坎德拉是在 101325 帕斯卡压力下,处于纯铂凝固温度(2045K)的绝对黑体的 1/600000 平方米垂直方向上的发光强度。

7. 物质的量单位——摩尔(mol)

摩尔是一系统的物质的量,该系统中所包含的基本单元数与 0.012kg 碳-12 的原子数目相等。

在使用摩尔时,基本单元应予指明,可以是原子、分子、离子、电子以及其它粒子,或是这些粒子的特定组合。

除上述 7 种基本单位外,国际单位制(SI)还有两个辅助单位,而且可以随意把它们当作基本单位或导出单位。它们是:

1. 平面角单位——弧度(rad)

弧度是一个圆内两条半径之间的平面角,这两条半径在圆周上所截取的弧长与半径相等。

2. 立体角单位——球面度(Sr)

球面度是一个立体角,其顶点位于球心,而它在球面上截取的面积等于以球半径为边长的正方形面积。

其它物理量的单位都可由这几个基本单位导出。基本单位所对应的物理量叫基本量,通过数值系数为 1 的只含乘、除运算的代数式用基本单位导出的单位叫做导出单位,所对应的物理量叫导出量。

二、测量的分类

物理实验的过程就是测量各种物理量的过程。根据所获得数据的方法不同,测量可分为直接测量和间接测量两类。按测量条件的不同,这两类测量中又都有等精度测量和不等精度测量之分。

(一) 直接测量和间接测量

直接测量,是指在测量中用标准量具或仪表直接读数获得数据。如用米尺测量金属丝的长度,用秒表测量复摆周期,用温度计测量温度等等,都属直接测量,可见直接测量是最基本的量度。

对于无法用标准量具和仪器直接读出数据的物理量,可以找出这些物理量与某些可直接测量的量的函数关系,待测出直接测量值后,通过函数关系间接计算得出结果,这种测量称间接测量。例如要测量某物体的运动速度 v ,只有直接测量出该物体移动的距离 s 和所用时间 t ,才能用公式 $v = s/t$ 算出速度 v 。所以对 s 和 t 的测量是直接测量,其值为直接测量值;对 v 的测量是间接测量,其值为间接测量值。在实际实验中,除直接测量外,大多属间接测量的内容,实验原理、方法、步骤、数据处理等,大都与间接测量有关。但要注意,区分直接和间接测量与单位制中的基本量和导出量没有直接联系。

(二) 等精度测量和不等精度测量

等精度测量是指在测量过程中,影响测量值的诸多因素都是一样的,即在相同的条件下进行的测量为等精度测量。如,同一个人用同一台仪器上采用同样的测量方法对同一物理量进行多次测量,每次测量的环境条件都一样,可信程度都相同,这种测量就是等精度测量,这一系列测量值称为等精度测量列。

不等精度测量是指在对同一物理量的测量中,采用了不同的仪器,不同的方法,或由不同的人测量了不同的次数,即测量的条件完全不同或部分不同,那么每个测量结果的可信程度也就不相同,这样的测量称不等精度测量。测量所得的一组数据,称为不等精度测量列。以后的误差理论分析中,将分别讨论这些不同测量的处理方法。

第二节 误差的分类与表示法

一、误差的基本概念

虽然我们有国际上统一的量度单位,有经计量部门检验合格的各种测量工具及精密仪器,但应该认识到,在任何的测量中,由于各人的自身因素、工具的误差、环境的影响等等,测量值与待测量的真值之间总是存在着或多或少的差异。即测量误差总是客观存在着的。误差的定义为:

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

测量误差就是测量值与被测物理量客观真实值之差。

· 国际计量委员会对不确定度的建议

通常,人们在表示测量结果的时候,除了用明确表示误差值大小的“+”号或“-”号表示误差外(如 16.85 ± 0.02),还常采用“ $\pm$ ”号表示误差(如 9.54 ± 0.03);这种以“ $\pm$ ”表示的误差实际上不是指误差值的具体大小,而是给出了一个数值区间,即给出了一个误差大小的变化范围,也就是给出了以“ $\pm$ ”号前面的数值为中心,以“ $\pm$ ”号后面的数值为区间的范围,被测量的真值极可能在此范围内。如上面所说的测量结果 9.54 ± 0.03 ,是说真值有极大的可能是在 9.51 至 9.57 之间。过去把表示区间范围的数值称为误差是不正确的,因为它并不是误差的具体值。为了避免造成概念上的混乱,人们提出了“不确定度”的概念,以此定义代替以前被称为误差的“ $\pm$ ”号后面数值。1981 年国际计量委员会第 70 届会议同意了这一概念的采用。国际计量委员会按不确定度数值评定方法的不同,把测量结果的不确定度归纳为两类:

A 类:用统计方法计算的那些分量;

B 类:用非统计方法计算的那些分量。

我国 1984 年 11 月召开了“测量误差讨论会”,认为“不确定度”的定义是测量误差理论和数据处理表述方法的一个提高。国家计量总局给不确定度的定义是:由于测量误差的存在而对测量不能肯定的程度。鉴于现在国内在实际使用中还缺乏严格的统一标准,正在进一步做宣传试用工作,不可能立刻改正过来。因此本教材中仅将“不确定度”的概念告之读者,以便对此有所了解。

二、误差的分类

误差产生的原因很多,且性质也不相同,概括起来可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。在实际测量中,这三类误差常常是混在一起的。下面分别讨论其产生原因和规律。

(一) 系统误差

在相同条件下多次测量同一物理量时,测量结果的误差,总是偏向一个方向,或按一定规律变化,这类误差称为系统误差。

系统误差产生的原因有以下几方面:

1. 仪器误差,指所用量具和装置本身固有的误差。如螺旋测微器因长期使用磨损而使零刻度不能对准,电表指针不在零值,天平的两臂不等及仪器的准确度、灵敏度、最小分度值不标准,从而使得每次测量结果都存在一定规律的偏离。

2. 理论误差,指所依据的实验理论、实验方法或理论公式本身存有近似性,或忽略了一些在测量过程中实际在起作用的因素而产生的误差。

3. 环境误差,指因为周围环境因素对测量的影响而产生的误差。如地心引力、机械振动、电场、磁场、大气压和空气的温湿度都可能对实验装置产生不同程度的影响。

4. 人员误差,指由于测量者感觉器官的分辨能力差,或反应不灵敏,有习惯性不当操作和实验技术水平不高等因素而引起的观测误差。如测长度时,脑袋习惯歪向一边,眼睛总是斜对量具刻度。使用秒表时反应总是滞后,以致数据总比真值大。

对于一般因器具不准引起的系统误差,只要在使用前将其进行校正处理便可基本消除。如螺旋测微器,游标尺及电流表、控温仪等一切指针式表头,测量前应注意校正其零点,但某些系统误差却不易发现,常产生错误的测量结果。

(二) 随机误差(也称偶然误差)

随机误差是指在测量过程中,因存在许多不可预测的随机因素的影响,使测量值带有大小和方向都难以预测的测量误差。如测量时待测物与量具对的不准,平衡点确定的不准,读数不准确,实验仪器由于环境、温度、湿度、电源电压的起伏不稳而产生诸多微小量度的变化及实验室地面的微振动等等因素。这些因素的影响是很微小的,并且经常混杂出现,没有规律,无法控制,因而难以确定是哪种因素在影响着测量结果,也就不可能象对待系统误差那样找出原因加以排除。

但随机误差并非毫无规律,它的规律性是在大量的测量数据中显现出来的一种统计规律。下面,介绍它的这种规律性。

在实验中,对同一条件下的同一物理量进行大量重复测量,在极力排除和改正一切明显的有规律的偏差之后,其测量误差会表现出以下规律性:

1. 对称性。绝对值相等的正、负误差出现的概率相同,即当测量次数 n 相当大时,绝对值相等符号相反的随机误差出现的机会相同。

2. 有界性。绝对值很大的误差出现的概率为零,即在一定的条件下,随机误差的绝对值不会超过某一界限。

3. 单峰性。绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率多,并在真值附近形成一个