

学理实验 大物实

华东师范大学出版社

马葭生 宦强主编

DAXUE WULI SHIYAN

MAJIASHENG

HUANQIANG ZHUBIAN

HUADONG SHIFAN

DAXUE CHUBANSHE

893356

华东师范大学教材出版基金资助出版

大学物理实验

马葭生 宦 强 主编

华东师范大学出版社

华东师范大学教材出版基金资助出版

责任编辑 李凌云

封面设计 周艳梅

大学物理实验

马葭生 宦强 主编

华东师范大学出版社出版发行

(上海中山北路 3663 号 邮政编码 200062)

新华书店上海发行所经销

江苏省句容市排印厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 21 字数 515 千字

1998 年 7 月第 1 版 1998 年 7 月第 1 次印刷

印数 001—5 000 本

ISBN 7-5617-1797-0/O·064

定价 23.00 元

前 言

《大学物理实验》是一本适用面较广的教材。该教材不但适用于物理专业,而且对设置有两学期物理实验课的理工类专业也适用。本书的内容由三部分组成:第一部分为本书的前三章,属于物理实验的基础部分,内容除包括物理实验的基本知识、基本实验方法和基本技能外,还选择了力学、热学、电学和光学中一些基本和典型的实验,通过这些内容的学习和实验训练,使学生得到规范化的严格训练,养成良好的科学实验习惯和具备初步的科学实验能力。第二部分为本书的第四章,内容是基础应用实验,着重于对学生进行应用能力的培养,通过这些实验的训练,达到学以致用目的。最后一部分为本书的第五章,内容则为选题实验和设计性的综合实验,目的是在前面学习的基础上,加强对学生灵活应用能力和综合分析能力的培养。

本书在内容的选择和编写上力求做到如下几点。

1. 考虑到本书的授课对象是刚入学的一年级大学生,其阅读和自学能力较弱,因而在编写中力求做到便于阅读和自学。在本书的第一部分中,对实验原理的介绍也较为详细,着重实验思路的引导,突出从提出问题到解决问题的逻辑思维过程,并尽可能以中学物理知识为基础,来解决实验可能超前理论教学的矛盾,使学生在学本课程中,主要精力集中在“三基”的训练和能力的培养上。

2. 本书在总体结构上,不再沿袭传统的实验教材按物质运动形态分为力学、热学、电磁学和光学几部份内容,而是根据各种不同运动形态之间的客观联系和学生由浅入深、由简到繁的认识过程来组织学科体系,因为学生遇到的和要解决的实际问题往往是各种运动形态相互渗透的。因此,本书是以训练的性质和层次,即按基础实验、基础应用实验和选题综合实验三个层次组织教学。

3. 物理实验作为一门独立设置的课程已有多年的教学实践,我们深感以往教材尚缺少对本课程内容的总结、概括和提高,仅在实验绪论中对物理实验的基本知识,即误差和数据处理的基本知识有系统的介绍,而对基本物理实验方法和基本技能缺少概括性的总结。因而,在本教材编写中,适当增加了这方面的内容。

4. 为适合因材施教,使不同层次的同学各得其所,教材编写中注意了纵向和横向的阶梯。纵向的阶梯体现在实验的不同训练层次及不同要求上,而每个实验的横向阶梯则体现在实验内容、要求和思考题中。某些打“•”的内容可供思维活跃、学有余力的同学选做。

5. 为适应不同专业和不同学时数的教学使用,本教材所列入的选题实验比必做实验数量多,以便在实验的选择上留有更大的余地。

实验教学是一项集体协同的教学工作,本书的内容凝聚了本教研室的许多教师和实验室工作人员多年辛勤劳动的成果。本教材编写人员如下:绪论、第一章、第五章由马葭生执笔,力、热学实验由薛士平、马葭生执笔,由磁学实验由宦强、薛士平执笔,光学实验由江一德、吴振德执笔,最后由马葭生、宦强统稿。此外,我们对参与这些实验的建设和改进的教师,特别是杨介信、陈国英、徐力平、杨家骏等表示谢意。在编写过程中,参考了一些兄弟院校,如南京大学、复旦大学、北京大学及全国高师院校统编实验教材。本校的邬学文教授和复旦大学的杨之昌

教授在百忙中审阅了全书的初稿并提出了宝贵的修改意见,这里一并致以深切的谢意。

按新的体系编写教材,是一种新的尝试,还需经教学实践检验和改进,才能日臻完善。因此,对本书中存在的缺点和错误,敬请读者批评指正。

编 者

1997年3月

目 录

绪论	1
§ 0.1 大学物理实验的地位和作用	1
§ 0.2 本课程的目的和任务	1
§ 0.3 大学物理实验的过程和要求	2
第一章 误差和实验数据处理的基本知识	6
§ 1.1 物理量的测量与测量误差的概念	6
1.1.1 测量与单位	6
1.1.2 误差及其分类	6
1.1.3 精密度、准确度和精确度	8
§ 1.2 直接测量量误差的估算	9
1.2.1 多次直接测量的误差估算与结果表示	9
1.2.2 单次直接测量结果的误差估算	13
*1.2.3 直接测量的数据处理及不确定度	14
§ 1.3 间接测量结果的误差传递	15
1.3.1 误差传递的基本公式	16
1.3.2 标准偏差的误差传递公式	18
*§ 1.4 误差分析的应用	20
§ 1.5 有效数字及其运算	21
1.5.1 有效数字的概念	21
1.5.2 有效数字的运算规则	22
§ 1.6 数据处理的基本方法	23
1.6.1 列表法	23
1.6.2 作图法及其应用	24
1.6.3 逐差法	26
1.6.4 最小二乘原理与曲线的拟合	28
*§ 1.7 非等精度测量、加权平均	31
习题	32
第二章 基本物理量的测量及常用测量仪器	36
§ 2.1 力学、热学基本物理量的测量及常用测量仪器	36
2.1.1 长度测量仪器和量具	38
2.1.2 质量测量仪器	41
2.1.3 时间测量仪器	45
2.1.4 温度测量仪器	49
2.1.5 气压计	51

2.1.6 密度计	52
§ 2.2 电学基本物理量的测量及常用测量仪器	53
2.2.1 磁电式指示仪表	53
2.2.2 灵敏电流计及冲击电流计	55
2.2.3 万用电表	58
2.2.4 晶体管毫伏表(DA-16 型)	60
2.2.5 晶体管万用电表(MF-20 型)	61
2.2.6 电阻器	62
2.2.7 电测量标准具	64
2.2.8 电源	67
2.2.9 开关	68
2.2.10 低频信号发生器	68
2.2.11 十进频率计	69
2.2.12 箱式惠斯通电桥(QJ-23 型)	70
2.2.13 示波器	71
§ 2.3 光学基本仪器及常用光源	76
2.3.1 测微目镜	76
2.3.2 显微镜和读数显微镜	77
2.3.3 望远镜	79
2.3.4 平行光管	80
2.3.5 照相机	81
2.3.6 分光计	83
2.3.7 常用光源	87
第三章 基础实验	91
§ 3.1 四个基本量的测量练习	91
3.1.1 长度测量	91
3.1.2 质量、时间和温度的测量	92
§ 3.2 物体密度的测定	92
3.2.1 固体和液体密度的测定	92
3.2.2 空气密度的测定	94
§ 3.3 惯性秤	98
§ 3.4 在气垫导轨斜面上测速度和加速度	100
§ 3.5 用单摆测重力加速度	103
§ 3.6 落球法测定液体的粘滞系数	106
§ 3.7 热电偶的定标和测温	109
§ 3.8 伏安法测电阻	111
§ 3.9 万用电表的使用	113
§ 3.10 示波器的使用	114
§ 3.11 用惠斯通电桥测量中值电阻	117

§ 3·12	用电位差计校正电表	119
§ 3·13	静电场的描绘与研究	123
§ 3·14	磁场的描绘和研究	127
§ 3·15	常用助视和投影光学仪器	131
§ 3·16	照相技术	135
§ 3·17	用分光计测定棱镜的折射率	137
§ 3·18	用分光计测定液体的折射率	139
§ 3·19	透镜焦距的测定	141
§ 3·20	用牛顿环测平凸透镜的曲率半径	144
§ 3·21	测定衍射光栅的光栅常数	147
§ 3·22	用小型棱镜摄谱仪拍摄光谱	150
第四章	基础应用实验	154
§ 4·1	随机误差的正态分布规律	154
§ 4·2	杨氏模量的测定(拉伸法)	157
§ 4·3	三线摆法测转动惯量	160
§ 4·4	研究碰撞中的动量和能量	163
§ 4·5	简谐振动的研究	165
§ 4·6	阻尼振动——品质因数的测试	168
§ 4·7	声速的测量	171
§ 4·8	用混合法测固体的比热容	174
§ 4·9	良导体导热系数的测定	177
§ 4·10	用拉脱法测定液体的表面张力系数	179
§ 4·11	灵敏电流计的特性研究	182
§ 4·12	低电阻的测定	186
§ 4·13	霍尔法测定螺线管的磁场	189
§ 4·14	冲击电流计特性的研究	192
§ 4·15	用冲击法测铁磁物质的磁化曲线	195
§ 4·16	交流电桥	200
§ 4·17	RLC 电路的相频特性研究	203
§ 4·18	RLC 电路的幅频特性研究	207
§ 4·19	电子束线的聚焦与偏转研究	211
§ 4·20	用双棱镜测定光波波长	218
§ 4·21	单缝和双缝衍射光强分布的测定	220
§ 4·22	漫反射全息照相的摄制	223
§ 4·23	单色仪的定标和使用	227
§ 4·24	用迈克耳孙干涉仪测定光波的波长和波长差	230
§ 4·25	法布里-珀罗干涉仪的调整与使用	236
§ 4·26	光的偏振现象的观察和分析	239
§ 4·27	透镜组基点的测定	246

§ 4·28 阿贝成像原理和空间滤波实验	249
第五章 设计性综合实验	254
§ 5·1 设计性综合实验的性质和教学目的	254
§ 5·2 设计性综合实验的预备知识	255
5·2·1 处理和消除系统误差的一般知识	255
5·2·2 基本物理实验方法概述	259
§ 5·3 液体密度的实时测量研究	266
§ 5·4 用实验方法寻求弹簧振子的周期经验公式 ——优化法及多元线性回归方法的应用	269
§ 5·5 热敏电阻的特性测试, 温度的实时测量和控制	273
§ 5·6 在气轨上模拟研究势能曲线	276
§ 5·7 高温超导体的临界温度和临界电流的测量研究	278
§ 5·8 粘滞性阻尼常数的测定及磁阻尼、压差阻尼特性的研究	282
§ 5·9 固体和液体相对介电系数的测定	284
§ 5·10 长度量的电测法——电感式和电容式位移测量	287
§ 5·11 用运算放大器制作万用电表	289
§ 5·12 用光学方法测量细丝直径	292
§ 5·13 用不同方法测定玻璃薄片的折射率	293
§ 5·14 全息光栅和 θ 调制片的研制	294
§ 5·15 迈克耳孙干涉仪的组装和应用	298
§ 5·16 全息干涉计量的应用	299
§ 5·17 用椭圆偏振仪测量薄膜的厚度和折射率	303

附录

一、一些常用的物理数据表	305
二、常用固体、液体、气体的密度表	306
三、固体材料的各向同性弹性模量	309
四、固体的摩擦系数	310
五、表面张力系数	311
六、液体的粘滞系数	311
七、声速	312
八、水的沸点和压强的关系	314
九、空气的相对湿度与干湿泡温度计温差的关系	315
十、固、液体的膨胀系数	317
十一、物质的比热容	318
十二、导热系数	318
十三、某些金属或合金的电阻率及其温度系数	320
十四、热电偶分度表	320
十五、一些物质的折射率	322
十六、常用谱线波长	323

绪 论

§ 0.1 大学物理实验的地位和作用

物理学是一门实验性很强的学科。物理概念的确立,物理规律的发现、建立和检验都是通过大量实验结果概括得到的。所以,无论是过去和将来,物理实验在物理学的创立和发展中均占有十分重要的地位。例如:著名的迈克耳孙-莫雷实验对相对论的建立起了重要的奠基作用,而黑体辐射的实验研究,导致了经典物理学的危机,从而为量子力学的建立开辟了道路。特别是近代物理学前沿的发展,人们要进一步揭示宇宙的奥妙和基本粒子的内部结构,离开了科学实验几乎是不可能的。

此外,近代各学科相互渗透,发展了许多交叉学科。物理学在渗透到各边缘学科和技术领域中时,物理实验也起着重要的桥梁作用。例如非电量的电测法、传感器等新技术,都是物理学渗透到各相关技术领域中发展起来的。

作为培养理工科人才的理工类专业,不仅要使学生具备比较深广的理论知识,更要具有较强的科学实验能力。物理实验正是为了对学生进行科学实验基本训练而独立设置的必修课,是学生进入大学接受系统实验技能训练的开端,它对培养学生具有良好的科学实验素养,并为后继的实验课程打好基础有重要的作用。因此,在理工科各专业的教学计划中,大学物理实验是一门重要的必修课程。

§ 0.2 本课程的目的和任务

大学物理实验作为独立开设的一门必修基础课,它的主要目的和任务是:

1. 使学生获得物理实验的基本知识、基本方法和基本技能,也即“三基”的训练。学生必须充分认识到,科学实验能力的形成和提高,是建立在对“三基”的熟练掌握和灵活运用的基础上的。

2. 使学生具备从事科学实验的基本素质。这里包括理论联系实际和实事求是的科学态度,严肃认真、一丝不苟的工作作风;不怕挫折、积极进取的探索精神;遵守操作规程、爱护器材的良好习惯。

3. 培养基本的科学实验能力。就大学物理实验而言,基本的科学实验能力是指:

(1) 阅读理解能力。训练学生自行阅读实验教材和参考资料,正确理解实验要求和内容,做好实验前的准备。

(2) 动手操作能力。借助教材和仪器说明书,正确调整和使用常用的基本仪器,实施实验方案。

(3) 分析判断能力。运用所学的物理基本概念和知识,对实验现象和结果进行初步的分析判断,作出结论。

(4) 书写表达能力。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。

(5) 简单的实验设计能力。能根据课题要求,确定实验方法和条件,合理选择仪器,拟定具体的实验方案。

4. 通过实验的观察和分析,和课堂教学相互配合,从理论和实践的结合上加深对物理概念和规律的认识,巩固和扩大对物理内容的掌握程度。

物理实验课虽然是在教师指导下的学习环节,但在实验过程中,要尽可能发挥学习的主动性,学生应以研究者的态度去进行实验,组装调整仪器,进行观察和分析,探讨最佳的实验方案,从中积累经验,训练技巧,为今后科学工作中设计实验方案、选择并使用新的仪器设备打下基础。同时,从大学物理实验一开始就应注意养成良好的科学态度和作风。

§ 0.3 大学物理实验的过程和要求

物理实验和其他科学实验一样,一般可以分为如下几个阶段。

1. 确定研究课题。
2. 制订研究计划和方案。
3. 实验装置和仪器设备的选择与准备。
4. 进行实验测量与观察,获得实验数据与结果。
5. 分析处理数据,得出结论。
6. 撰写实验报告或论文。

应该说,一项实验研究工作的最重要部分是前面三个阶段。科学实验发展史早就证明,杰出的科学实验要以杰出的构思为基础。但是,如何立题和制订实验方案不是初学者一学就可掌握的,要有扎实的基础和优良的科学素养,要有经验的积累。因此,很难在早期的实验中进行这方面的训练。本课程作为初学者的基本训练,主要进行后面三个阶段的学习和训练,但在课程的后阶段,适当安排了设计性的综合实验内容,使同学在制订实验方案、进行仪器的选择和合理配置等方面得到初步的训练。

大学物理实验教学主要包括密切相关的三个教学环节,即实验前的准备(预习);实验的进行;实验后的报告。现就各教学环节提出如下具体要求。

一、实验前的准备(预习)

科学实验是一种有目的的实践活动。尽管最初的实验通常由教师制订方案和提出要求,但学生在实验前必须力求理解实验方案的全貌。为此,实验前需认真阅读实验教材,明确该实验的目的要求,实验原理,要测的物理量及测量方法。对实验中涉及的仪器,预习时就要阅读教材中有关该仪器的介绍,弄清构造原理、使用操作方法和注意事项。必要时,还可到实验室观看仪器实物。另外,按列表法记录数据的要求,在数据记录本上设计好数据记录表格。在此基础上简明扼要地写出书面的预习报告。预习报告的内容有:

1. 实验目的:说明本实验的主要目的。
2. 实验原理:应在对实验原理理解的基础上,用自己的语言简要地叙述。一般应写出本实验所依据的主要公式和公式中各量的意义,明确实验中所要直接测定的物理量及测量方法。必要时,还应画出原理图、电路图或光路图。

3. 实验步骤及注意事项:这部分内容一般在实验教材中均有详细说明,因而预习报告中

只要写出关键性的步骤和重要的注意事项。但本教材中某些实验为了培养学生的独立工作能力,对测量步骤没有具体指出时,在预习报告中,必须自己考虑安排测量步骤及注意事项,以保证实验的顺利进行。原则上,我们反对在这项标题下照抄实验教材。

二、实验的进行

在进入实验室正式进行实验测量前,首先应核对提供的仪器设备是否完备、齐全。如有问题,应向指导教师反映解决。应仔细阅读教材中有关仪器的介绍和使用注意事项,做到按操作规程进行操作调试,切忌盲目操作。其次,要认真思考和安排好实验操作程序,不要一上来就急于求成,因为一些关键性步骤的疏忽或错误,会导致整个实验的失败。对于电学实验,一般还应由指导教师检查电路的接线正确无误,才可接通电源。

实验测试中,不要单纯追求顺利地测好数据,要养成对实验现象仔细观察和对所测数据随时进行分析判断的习惯,这样才能及时发现和纠正差错。对实验中遇到的故障要积极思考,尽可能自己排除。要如实记录实验测量的原始数据,实验数据记录应做到整齐清洁而有条理,养成列表法记录数据的习惯,以便于计算和复核。我们特别反对用零碎的小纸片记录数据,开始时,如果没有把握直接记录在实验报告上,可另备一本专门的数据记录本。

其他如对于基本仪器的使用,在实验中观察到的现象和存在问题,也可扼要记下。

实验结束后,必须整理复原所使用的仪器,断开电源。

在实验中,实验报告上应记录的内容为:

1. 仪器。记录本实验中所用仪器的型号、编号和规格。记录仪器的编号和规格是一种良好的科学习惯,因为这样便于在原来的仪器上重复实验测量,复查实验结果。

2. 数据记录。要求如前所述。

三、实验报告的书写

完整的实验报告是在实验结束后完成的。写实验报告的目的是为了训练学生如何以书面的形式总结反映自己的实验成果,为将来撰写科研论文打基础。因而,如何写一份合格的实验报告,是物理实验基本功训练的重要组成部分。完整的实验报告除包括上面所列各项目外,还包括实验后完成的如下内容:

1. 数据处理与结果分析。要求写出数据处理的主要过程,并根据误差理论计算误差。对要求作图的实验必须作出相应的实验图线。

2. 最后结果。写出测量的最后结果,并表明绝对和相对误差或百分差。必要时,还须注明得此结果的实验条件。

3. 问题讨论。对实验中观察到的现象或你感兴趣的问题进行分析,改进实验的建议,实验中的体会及回答思考问题等。

附: 实验报告范例

用单摆测定重力加速度

专业 _____

学号 _____

姓名 _____

实验日期 _____

【实验目的】

1. 用单摆测定重力加速度,学会停表和镜尺的使用。
2. 学习用图解法处理数据。

【实验原理】

在摆角很小(小于 5°)的条件下,重力加速度

$$g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2} \quad (0.3.1)$$

式中 T 为单摆摆动的周期,用秒表进行多周期累计测量法测得。 L 为单摆的摆长(即摆的悬点到摆球重心的距离),用镜尺测量,摆长 L 为:

$$L = \left| \frac{S_2 + S_3}{2} - S_1 \right| \quad (0.3.2)$$

式中 S_1 、 S_2 及 S_3 分别为镜尺上单摆的悬挂点,摆球上端点和下端点的读数。

利用实验测得的 L_i 及 T_i 值,作 $L_i - T_i^2$ 图,求比值 $\frac{L_2 - L_1}{T_2^2 - T_1^2}$,代入(0.3.1)式求 g ,并和本地区重力加速度的标准值比较求百分差。

【仪器】

单摆及镜尺: 编号 09, 最小刻度 0.1cm。

秒表: 编号: M022·011, 最小刻度 0.1s。

【数据记录】

实验地点: _____ 温度: 24.3°C 。

$S_1(\text{cm})$	4.35	4.35	4.35	4.35	4.35	4.35
$S_2(\text{cm})$	92.70	88.10	80.80	71.60	65.15	60.15
$S_3(\text{cm})$	96.70	92.10	84.80	75.60	69.15	64.15
n 周期次数	100	100	100	100	100	100
t (s)	191.6	186.0	178.6	168.0	159.2	152.6
	191.4	186.6	177.6	168.2	159.4	152.8
	190.8	186.2	178.2	168.0	158.6	153.4
$\bar{t}$ (s)	191.3	186.3	178.1	168.1	159.1	152.9

【数据处理与结果分析】

单摆摆长和周期平方关系,由计算列成下表。

$L(\text{cm})$	57.70	62.80	69.25	78.45	85.40	90.35
$T(\text{s})$	1.529	1.591	1.681	1.781	1.863	1.913
$T^2(\text{s}^2)$	2.338	2.531	2.826	3.172	3.471	3.660

由作图可得 $L - T^2$ 的关系曲线为直线。图上取两点求斜率: $L_1 = 64.00\text{cm}$, $T_1^2 = 2.600\text{s}^2$, $L_2 = 86.40\text{cm}$, $T_2^2 = 3.500\text{s}^2$; 求得直线斜率:

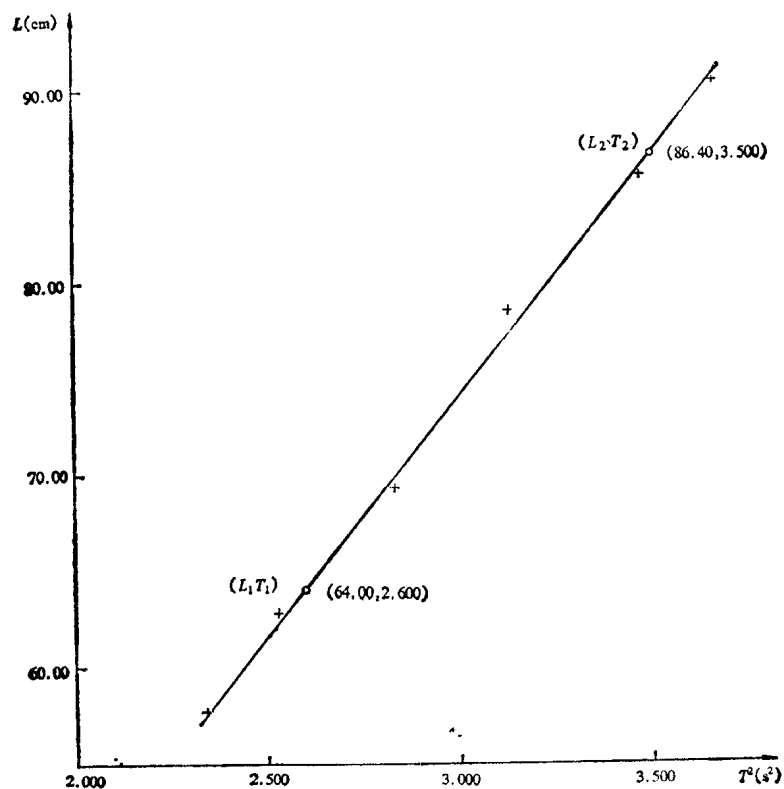
$$b = \frac{L_2 - L_1}{T_2^2 - T_1^2} = \frac{86.40 - 64.00}{3.500 - 2.600} = 24.88\text{cm/s}^2,$$

于是求得重力加速度测定值:

$$g = 4 \cdot \pi^2 b = 4 \times (3.1416)^2 \times 24.88 = 982.2\text{cm/s}^2.$$

上海地区重力加速度的标准值为 $g_0 = 979.4\text{cm/s}^2$, 故百分差;

$$P = \frac{|g - g_0|}{g_0} \times 100\% = 0.3\%$$



【最后结果】

重力加速度测定值为：

$$g = 982.2 \text{ cm/s}^2; \quad P = 0.3\%$$

第一章 误差和实验数据处理的基本知识

§ 1.1 物理量的测量与测量误差的概念

1.1.1 测量与单位

物理实验是将自然界中物质的物理运动形态(机械运动、分子原子的热运动、电磁运动、原子运动等)按人们的意愿在预定的条件下以比较纯粹或典型的形式再现,从而使人们有可能在较有利的条件下,探索各相关量之间的关系,确定其数值大小,并由此寻求相关量之间规律性的关系或验证理论。而要获得这种定量的认识,测量是必不可少的重要手段。因此,我们可以说,测量是物理实验最重要的组成部分。

从广义上说,测量是人们对自然界中的现象和实体取得定量概念或数字表征的过程。从计量角度说,测量就是把待测量直接或间接地与另一个选作标准的同类量(即单位)进行比较,从而得到待测量与选作标准的同类量之间的倍数(即数值)关系的实验过程。例如,我们说测得的某物体的质量为 83.4 克,则表示所选取的标准(即单位)为克,而待测物的质量为标准的 83.4 倍(数值)。显然,数值的大小和所选用的单位有关。因此,在表示某一待测量的测量结果时,必须同时给出数值和单位,两者缺一不可。

在本书中,各物理量的单位都采用中华人民共和国法定计量单位,即采用国际单位制(SI)为基础的单位。国际单位制是国际上公认的、使用最普遍的单位制,它是在 1960 年第十一届国际计量大会上提出并建议世界各国采用的一种单位制,我国也已普遍采用。

测量按其过程分为直接测量和间接测量。直接测量就是将待测量与预先标定好的仪器、量具直接进行比较,读出其量值的大小。例如:用米尺量长度,天平称质量,停表测时间等。但也有许多物理量,不能直接用仪器和量具测得,而是通过对某些相关物理量的直接测量,再根据相应的公式计算得出待测量的大小。这种测量称为间接测量。例如:测圆柱体的体积,是通过其高度 h 和直径 D 的测量,然后由公式 $V = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot h$ 求得其体积;又如单摆实验中,通过对单

摆摆长 L 和摆动周期 T 的测量,利用公式 $g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2}$ 来求得重力加速度 g 。其次,按不同测量情况也可把测量分为等精度测量和非等精度测量。如果对某物理量重复测了多次,而每次的测量条件都完全相同,即是同一观测者,同一仪器,同一测量方法,同一环境,因此,我们没有理由说其中某次测量比其他测量更准确些,这些测量称为等精度测量。但只要测量中有某一条件发生变化,就称为不等精度测量。例如原来用米尺测某一长度,后改用游标卡尺测,则两者就是不等精度测量。在本书后面的章节中,将会看到,对等精度测量和非等精度测量,其数据处理的方法是不同的。

1.1.2 误差及其分类

在测量中,我们所要测的物理量在一定的条件下总有一个客观的真正大小,称为真值。但

在实际测量过程中,由于测量仪器的精度限制,测量原理和方法不完善,测量者感官能力的限制,所得的测量结果和真值总存在一定的差异。这种测量值 x 与真值 a 之差称为测量误差 ε , 简称误差。它有确定的,但一般又不能求出的具体值,用下式表示:

$$\varepsilon = x - a. \quad (1.1.1)$$

由于测量中误差是不可避免的,它存在于科学实验的全过程中,所以测量的目的应是在尽可能减少误差的前提下求得在该条件下被测量最接近于真值的最佳估计值,并同时对它的精确度作出合理的估计。有关误差和数据处理的理论,就是基于这一目的而发展起来的。

由于在实际测量中,往往不能确切知道真值 a ,而只能求得最接近于真值的估计值,即最佳估计值,用 $\bar{x}$ 表示,因而,实际能求得的仅是测量值和最佳估计值之差,即

$$v_i = x - \bar{x}, \quad (1.1.2)$$

v_i 称为偏差(或称残差)。

根据误差的性质及产生的原因,可将误差分为两类,即系统误差和偶然误差。

一、系统误差

在同一条件下(指测量方法、仪器、环境和观测者保持不变)对同一量进行多次测量时,误差的符号和绝对值保持不变或按某一规律变化,该误差称为系统误差。其产生的原因是:

1. 测量仪器本身的缺陷。例如:米尺刻度不准;称衡质量时,所用的砝码偏轻,造成称衡的结果偏大;温度计的零点刻度不准确等。

2. 实验理论和方法的不完善。例如:在精密称衡物体质量时,未考虑到空气浮力的影响;采用伏安法测电阻时,没有考虑到电表内阻的影响等。

3. 环境的影响或没有在所规定的条件下使用仪器。例如:使用米尺未考虑到周围环境温度变化引起量具本身的热胀冷缩所产生的影响;标准电池不是在所规定的 20°C 的条件下使用,又未进行温度修正,测量结果就包含了系统误差。

4. 实验者的习惯与偏向引入的系统误差。例如:用秒表测时间,有人动作总是迟缓,撒表的动作总是慢些,结果造成系统误差。

从上述系统误差产生的原因可知,测量者不能依靠在相同条件下进行多次重复测量来消除和发现它。但在今后的实验中,原则上应尽可能进行系统误差的修正和处理。按对系统误差掌握的程度,常将其分为两类加以考虑,即已定系统误差和未定系统误差。已定系统误差是指采用一定方法,可以对误差的数值和符号都能确定的系统误差。未定系统误差是指不能知道误差的大小和符号,而仅知误差的范围(或称误差限)。对于已定系统误差,可对测量值进行修正。设已知测量某量的已定系统误差为 Δx ,则修正值

$$c_x = -\Delta x, \quad (1.1.3)$$

修正后的测量实际值为:

$$\text{实际值}(x') = \text{示值}(x) + \text{修正值}(c_x). \quad (1.1.4)$$

对未能消除的未定系统误差,应设法估计其误差限的大小。但寻找系统误差并估计其大小是一个十分复杂的问题,往往没有普遍的规律可以遵循,在很大程度上有赖于实验者的经验积累与实验素养。因此,在大学物理实验中,只可能在某些实验中给予分析和处理系统误差的初步训练,使同学逐步地积累这方面的感性知识。

二、偶然误差

在同一条件下多次测量同一物理量时,测量值彼此之间总有稍许差异,而且变化不定,并

在消除系统误差后仍然如此,这种绝对值和符号随机变化的误差称为偶然误差或随机误差。其来源是:

1. 实验者本人感觉器官分辨能力的限制。例如:用米尺或螺旋测微计测量长度,用温度计测温度,在最小刻度以下一位是估读数,由于受眼睛分辨本领的限制,最后的估读数可能偏大,也可能偏小。

2. 测量过程中,实验条件和环境因素的微小的、无规则的起伏变化。例如:用分析天平称衡时,外界气流的影响,地板或桌子的无规振动,均可能造成测量结果的起伏。

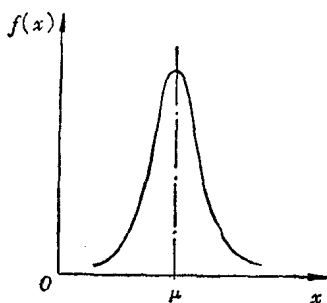


图 1.1.1

按照辩证法的观点,偶然性中包含着必然性,就某次测量而言,其偶然误差大小和正负是不确定的,但当测量次数增加时,我们就会发现偶然误差的正负和大小的出现服从一定的统计分布规律,但究竟遵从何种统计规律,则要由所研究问题的性质决定。根据大量的实验事实和运用统计规律进行分析检验,在大学物理实验中,测量中的偶然误差服从正态分布规律。关于这一结论可参阅有关参考书,这里仅给出偶然误差所服从的正态分布图来反映其主要特点,正态分布图如图 1.1.1 所示。其横

坐标是测量值 x , 纵坐标则是每单位 x 出现的概率,或称为概率密度。从图可定性地给出服从正态分布的偶然误差所具有的三个特点:

1. 单峰性: 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: 分布曲线对 $x=\mu$ 是对称的,这说明绝对值相同的正负误差出现的概率相同。
3. 有界性: 超过一定大小范围的误差出现的概率趋近于零。

根据偶然误差所具有的以上的性质,在实验中,我们虽不能完全排除偶然误差的影响,但可以采用多次重复测量求平均来减小偶然误差的影响。如上所述,由于正负误差出现的概率相同,而小误差出现的概率又大,因而在消除系统误差的条件下,多次测量的算术平均值就最接近于真值。因此,在实验条件许可的情况下,常采用多次测量求平均值的方法来减少偶然误差的影响。其次,还可以根据偶然误差服从的统计分布规律,对偶然误差的大小及测量结果的可靠性作出合理的评价。

1.1.3 精密度、准确度和精确度

由以上的分析讨论可知,偶然误差和系统误差的原因、规律和处理方法是不同的,为了分别反映它们对测量结果的影响,提出了精密度、准确度和精确度的概念。

精密度: 是指重复测量所得的结果彼此离散的程度。测量结果彼此非常密集则测量的精密度高,反之则精密度低。因此,精密度是测量结果偶然误差大小的反映。

准确度: 是指测量结果接近真值的程度。准确度高则表示测量结果接近真值的程度好,即系统误差小。所以准确度反映了系统误差的大小。

精确度: 综合反映测量结果的离散程度及与真值接近的程度。精确度高就是精密度与准确度都高。所以精确度是系统误差与偶然误差的综合反映。

我们用打靶时弹着点图 1.1.2 来形象化地说明以上的三个名词的含意。(a)图表示射出的精密度高而准确度欠佳。(b)图表示射击的准确度高,但精密度欠佳。(c)图表示精密度和准