

绪论

0.1 物理实验课程的地位、作用与任务

1. 物理实验课程的地位和作用

物理学是研究物质基本结构、物质基本运动形式、相互作用及其转化规律的科学,是自然科学的基础学科,其基本理论渗透到自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多环节,是自然科学和工程技术的基础。可以毫不夸张地说,任何一门学科都可以在物理学中找到其脉络或踪迹。反之,物理学的发展衍生出了许多新兴的学科并促使其进一步地发展。

早在 1993 年 3 月,在美国亚特兰大召开的第 23 届国际纯粹物理和应用物理联合会(IUPAP)代表大会上所通过的决议就阐述了物理学对社会的重要性。物理学——研究物质、能量和它们的相互作用的科学——是一项国际事业,它对人类未来的进步起着关键的作用。

从本质上说,物理学是一门实验科学。物理实验在物理规律的发现、物理理论的建立乃至整个物理学的产生、发展和应用过程中起着非常重要的作用。经典物理学规律是从实验事实中总结出来的。近代物理学是从实验事实与经典物理学的矛盾中发展起来的。物理学中的每一项突破和进展都与实验密切相关。很多工程学科是从物理学的分支中独立出去的,科学技术的进步离不开物理学理论和实验。作为未来的科技工作者和一般工程技术人员,必须要掌握物理知识、实验技能和物理学的研究方法。

以诺贝尔物理学奖为例。据不完全统计,从第一次颁奖至今,80%以上的诺贝尔物理学奖颁给了实验物理学家,其余 20%的诺贝尔物理学奖中有很多是由实验物理学家和理论物理学家共同分享的,由此可以看出实验对物理学的重要。另外,实验成果比较容易获得诺贝尔物理学奖,而理论成果则要经过至少两个实验的检验。还有,一些建立在共同实验基础上的成果可以连续多次获奖。事实证明,科学的理论来源于科学的实验,并受到实验的检验;而科学的实验也离不开科学理论的指导。

物理实验是大学生进入高等院校后首先接触到的实践性教学环节,是对大学生进行系统的科学实验方法和技能训练的重要必修课,是大学生从事科学实验的起步。物理实验课程的学习是后续专业课的基础,同时对大学生毕业后从事科学研究和工程技术实践也必将产生深远的影响。通过该课程的学习,不仅要培养大学生的实验操作能力,更主要的是培养

大学生的创造性思维能力以及分析问题、解决问题的能力。物理实验的重要意义不仅仅在于它在学习物理中的重要作用,更主要的是它是大学生认识、学习和研究物理问题的一种非常有效的途径和方法。

通过对物理实验现象的观察、分析及对物理量的测量,可以深入学习物理实验知识和设计思想,掌握和理解物理理论。

物理实验课程不同于一般的探索性的科学实验研究,每个实验题目都经过精心设计、安排,可使大学生们获得基本的实验知识,体会到精美的设计思想,在实验方法和实验技能等方面得到较为系统、严格的训练。同时,在培养良好的科学素质及科学的世界观方面,物理实验课程也起着潜移默化的作用。

2. 物理实验课程的基本任务

(1) 了解实验仪器设备构造,理解物理实验的基本原理,自主完成实验。

(2) 培养、训练和提高大学生从事科学实验的初步能力。包括:

① 能够自行阅读实验教材或查阅相关实验资料,做好实验前的准备,能概括出相关的实验原理;

② 能够借助教材或仪器说明书,熟悉并学会正确使用常用物理实验仪器;

③ 通过具体的实验过程,学习物理实验的基本方法,掌握一定的操作技能;

④ 能够运用物理学理论知识,对实验现象进行初步的分析和判断,体会实验的基本设计思想;

⑤ 能够处理实验过程中出现的简单问题,正常操作实验仪器设备,正确记录实验数据;

⑥ 能够正确处理实验数据、绘制相关曲线、分析误差原因、说明实验结果、撰写合格的实验报告;

⑦ 通过实验的具体操作,领会实验手段,掌握实验方法,学会常见问题的处理;

⑧ 能够根据实验目的和仪器设备设计出合理的实验,并自行完成简单的综合性、设计性实验。

(3) 通过对物理实验现象的观察、分析以及对物理量的实际测量,学习运用理论指导实验,了解分析解决实际问题的方法,掌握基本的物理实验知识,体会实验设计思想,加深对物理学原理的理解。

(4) 在理解掌握物理学基本原理的基础上,能根据实际需求设计初步的实验方案,能结合实际情况调整和修改实验方案,并自行完成具有一定理论意义或实际价值的实验。

0.2 物理实验课程的教学基本要求

依据《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》(2010版)的主要精神,对物理实验课程提出如下教学基本要求。

(1) 掌握测量及测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的基本能力。

① 掌握测量、测量误差及不确定度的基本概念,逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估。

② 学习实验数据的常用处理方法,包括列表法、作图法和最小二乘法等,了解计算机通用软件处理实验数据的基本方法。

③ 了解实验方法、实验条件、实验环境等对测量结果的影响,能够自行进行分析和处理。

(2) 掌握基本物理量的测量方法。

学会测量长度、质量、时间、热量、温度、湿度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、光强度、折射率、电子电荷、普朗克常量等常用物理量及物性参数,了解数字化测量技术和计算技术在物理实验教学中的应用。

(3) 了解常用的物理实验方法,并逐步学会使用。

学会比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法、干涉法和衍射法等常用物理实验方法,以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法。

(4) 掌握实验室常用仪器的性能,并能够正确使用。

了解常用仪器的基本原理、结构性能,能正确使用长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、通用示波器、低频信号发生器、分光仪、常用电源和光源等常用仪器。同时应在物理实验课中逐步引进激光技术、传感器技术等当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术。

(5) 掌握常用的实验操作技术。

注重实验基本技能的训练,掌握零位调整、水平/铅直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整,根据给定的电路图正确接线,掌握简单的实验故障检查与排除方法,以及近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的调节和使用。

(6) 适当介绍物理实验史料和物理实验在现代科学技术中的应用知识。

(7) 培养理论联系实际和实事求是的科学态度,培养求真务实严肃认真的工作作风,树立克服困难坚韧不拔的信念,养成整洁有序的实验习惯,激发主动研究和创新的探索精神,发扬爱护公共财产、保持环境卫生和遵守纪律的优良品德,强调团结协作。

(8) 培养科学实验基本能力,提高科学实验综合素养。

培养学生进行科学实验的基本能力,即如何从测量目的(研究对象)或课题要求出发,依据实验原理,采取最佳方法,正确选用仪器和确定测量程序去获得准确的实验结果。强调学习和运用物理实验原理、方法研究实际的未知现象,自行设计实验方案,完成具体测试,取得实验数据,得出相关结论,解决实际问题。

0.3 物理实验课程的教学基本程序

物理实验课程的教学模式多种多样,并不断地改革更新,但物理实验课程的教学基本程序大致是相同的。物理实验课程的作用和任务决定了物理实验课程的教学方式都将以学生的动手操作实践训练为主。学生应在教师和实验相关资料的指导下,充分发挥主观能动性,利用已有资源,了解实验室规章制度,熟悉实验仪器设备,加强实验能力的训练,提高实验的综合素质。物理实验通常按下列程序进行。

1. 实验前的预习

物理实验课前,学生应该认真阅读教材,仔细研究有关实验资料。明确每次实验的目的和任务,弄清实验原理和实验方法,了解实验仪器、实验条件、内容步骤及注意事项。根据实验任务设计好实验数据记录表格,查阅好实验中可能使用的参数资料,充分做好实验前的各项准备工作。

实验开始前,结合实验教材和实验仪器设备,由教师抽查学生的预习情况。对于准备不充分的学生,应该责成其进一步准备;对完全没有准备的学生,教师可以停止其当次实验。

2. 实验中的操作

学生应提前进入实验室,了解实验室规章制度,严格遵守实验室规则,注意安全。

学生应该按学号,在对应号的实验位就座。首先阅读实验资料,对照实物认识和熟悉实验器材。全面考虑当次实验的操作程序,做到胸有成竹,不可盲目搬动和调节实验仪器设备。

实验开始时,实验仪器设备要摆放合理,保证安全,方便操作。实验中要认真细致耐心地调节实验仪器设备,细心观察实验现象。要冷静对待实验中遇到的问题,并认真分析产生的原因和解决的办法,学会排除故障。必要时可相互讨论或询问教师。实验的重点应放在对实验仪器设备的了解、实验技术的掌握和综合能力的培养上,切记不要测完几个实验数据就敷衍了事。测量数据要力求全面、准确。要爱护仪器设备。

要认真做好实验条件和数据的记录,不可弄虚作假,不可拼凑和抄袭别人的数据。测量的原始数据要用钢笔或签字笔整齐地记录在原始数据表格中,不得用铅笔记录,也不可使用涂改液涂改。

实验结束后,要保持当时的测试条件和仪器状态,以备教师检查和有遗漏时补测。测量的原始数据需经教师检查签阅,发现错误要重新测量。仪器设备要整理还原,并经实验室教师检查签字后方可离开实验室。

3. 实验后的总结

实验后要进行认真的总结,并以实验报告的形式体现。

实验报告的书写质量反映出学生报告实验成果的能力。实验报告的撰写,要求简洁明了、工整规范、文字通顺、记载清楚、数据齐全、图表正确美观、结论明确、分析全面,数据处理包括计算、作图、误差分析。计算要有计算式,记入数据要有根据。

实验报告要用统一印刷的报告纸来书写。基础实验和综合设计性实验的报告纸版本虽不同,但都有完整的文本格式,包括下列基本内容:

- (1) 实验项目名称。
- (2) 学生个人信息。
- (3) 实验时间和地点信息。
- (4) 实验目的。即实验希望达到的目标。
- (5) 实验原理。简要叙述有关原理,包括理论依据、主要公式及简要推导过程,也包括电路图、光路图或实验装置示意图等。
- (6) 实验数据记录。实验测得的原始数据要用表格形式列出,正确表示其有效数字和

单位。同时还要列出当次实验主要仪器设备的名称、型号、规格、精度等。

(7) 实验数据处理。对实验测量的数据进行计算或作图,计算部分要写出主要的计算内容,作图要正确、整洁、美观。

(8) 实验结果。作出完整的数据处理表格,绘制实验曲线,写出实验结果,并对实验结果进行误差或不确定度评定。

(9) 分析讨论。包括实验现象分析,关键问题的研究体会,实验误差的主要来源,对实验仪器选择和实验方法改进的建议,实验异常现象的解释,实验故障的排除、回答实验思考题等。

实验报告是考核学生学习实验课程的主要依据,必须严肃对待,认真完成。

(马颖)

第

1

章

测量的不确定度及实验数据处理

但凡需要定量描述事物的特征和性质时,都离不开测量。

定性地观察物理现象、变化过程和运动规律,定量地测量物理量的大小,探寻各物理量之间内在的联系和规律,进而揭示宇宙的奥秘是物理实验本原的目标和任务。

任何实验都必须遵循一定的原理,按照一定的方法,使用一定的仪器,在一定的环境中进行。由于测量原理的局限性、测量方法的不完善、测量仪器的精度限制、测量环境的不理想、测量者实验技能的差异等若干因素的影响,一切测量都不可避免地有不确定性。

随着科学技术的不断发展,促使人们的实验知识、实验手段、实验经验和实验技能在不断提高。但是,所有实验都只能做到相对准确,作为实验测量的结果,必须对被测结果进行综合分析,给出被测量的量值和单位,还应该估计被测量量值的可靠程度,并对实验结果作出合理的解释。没有不确定程度评定的实验测量结果是没有意义的。

本章介绍测量及分类、测量结果的不确定度评定、有效数字等基本知识。

1.1 测量及其分类

1.1.1 测量的概念

为更广泛地研究和探索自然现象,更深入地认识事物本质、揭示自然现象的内在规律,需要进行大量的、各种类型的科学实验。进行科学实验,不仅可以运用归纳和演绎、分析与综合以及抽象与概括等方法加以研究,主要还要解决为研究对象“有没有”或者“是不是”等问题获取定性的信息,而且还希望获取能够运用现代数学方法,将所涉及的变量与研究目标之间的关系以数学公式的形式表达出来,进而探寻达到研究目标的最佳途径所需要的定量的信息。

无论是定性分析还是定量研究,都离不开量的测量。

测量是借助一定的实验仪器设备,通过一定的实验方法,直接或间接地将选作计量标准的同类物理量与待测量进行比较,以某一计量单位把待测对象定量地表示出来的全过程。简言之,确定被测对象量值的全部操作称为测量。

广义地说,测量过程由两个方面任务组成。一方面是采集和表达被测物理量,另一方面是与标准进行比较。同时,测量必须满足被测量有明确的定义和测量标准必须事先通过协议确定两个基本前提条件才能实施。

量是事物存在和发展的规模、程度、速度等可以用数量来表示的规定性,以及它的构成

成分在空间上的排列组合。量是现象、物体可区别于其他对象的确定的属性,如质量、长度、时间等。

量值是被测量对象的大小或数值,量值一般由一个数乘以测量单位来表示,如 56kg、1.23m、12s 等。量值包含数值和单位两个部分。

1.1.2 测量的分类

测量的分类方式有多种。按获得测量结果的方式,可分为直接测量和间接测量;按测量条件的同异,可分为等精度测量和非等精度测量;按比较方式,可分为绝对测量和相对测量;按接触形式,可分为接触测量和非接触测量;按同时测量参数的数目,可分为综合测量和单项测量;按测量时被测件的运动情况,可分为静态测量和动态测量等。

本节主要介绍直接测量、间接测量、等精度测量和非等精度测量。

直接测量是指能够从已标定的量具或仪表上直接读取待测量数值的测量方法,或者是将待测未知量与同类标准量在仪器中进行比较,从而直接获得待测未知量数值的方法。

直接测量的优点是测量过程简单快速,它是一般测量中普遍采用的方式。例如,可直接使用天平称质量、米尺测长度、电表测电流等。

间接测量是由若干个直接测量结果通过函数关系计算出待测量量值的测量。例如测量均匀立方体的密度 ρ ,可先由直接测量测出立方体的质量 m 和立方体的边长 l ,由公式 $\rho = \frac{m}{l^3}$ 计算得到。 m 、 l 是直接测量量, ρ 是间接测量值。例如在直流电路中测量电功率 P ,可直接测出负载的电流 I 和电压 U ,再根据功率 $P = IU$ 的函数关系,间接地计算求得负载消耗的电功率 P 。

间接测量比直接测量复杂、费时,一般在直接测量很不方便、误差较大或缺乏直接测量的仪器等情况下才采用。尽管如此,间接测量在工程测量中仍被广泛使用。

等精度测量是在实验方法、实验仪器、实验环境和实验者等都相同的条件下,对同一物理量进行反复多次测量的过程。例如同一个实验者,使用同一套实验仪器,采用同样的方法,在同一实验环境中,对同一待测量连续进行多次测量,这样的各次测量被认为有相同的可靠程度,故称为等精度测量。

非等精度测量是在实验方法、实验仪器、实验环境和实验者不同的条件下(只要有一个测量条件变化)对同一物理量进行测量的过程,这样的各次测量的可靠程度一般不相同,故称为不等精度测量。

等精度测量的不确定度评定和数据处理相对较简单,本书将对其进行介绍。

1.2 测量误差

1.2.1 真值

每一个物理量都是一个客观存在。这个客观存在具有不依人的意志为转移的确定的量值。在一定条件下,被测量所具有的客观真实的数值称为该物理量的真值。被测量的真值是一个理想概念,它无法测出,却又客观存在。

进行测量的目的就是希望获得待测量的真值。然而,任何测量都要依据一定的理论或方法,使用一定的仪器或量具,在一定的条件和环境中,由具体的个人或群体来完成。由于实验理论存在着近似性,实验方法也难以至善至美,实验仪器的灵敏度和分辨能力不可避免地存在局限性,实验环境不稳定、观测者观察力的波动等因素的影响,待测量的真值是不可能测得的。测量结果和被测量真值之间一定会存在或多或少的偏差。

在实际测量中,为了减少或消除误差,通常需对同一个物理量进行多次等精度测量,测得一系列测量值 x_1, x_2, \dots, x_n , 则测量结果的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2.1)$$

算术平均值不是真值,但它比任一次测量值的可靠性都要高。系统误差忽略不计时的算术平均值常称为最佳值或近真值。

1.2.2 误差

测量结果与被测量真值之间的偏差称为测量值的误差。测量总是存在误差的。误差不同于错误,错误是应该而且可以避免的,而误差是不可能绝对避免的。从实验的原理、实验所用的仪器及仪器的调整,到对物理量的每次测量,都不可避免地存在误差,误差存在于所有的科学实验和测量过程之中,而且贯穿实验和测量过程的始终。

误差的大小反映测量结果的准确程度。

至此,我们应该考虑一个问题:为什么要进行测量?答案是肯定的,因为要得到测量结果值 x 。如果我们已经知道了待测物理量的真值 x_0 ,为什么还要去测量待测量结果值 x ? 我们的测量目的肯定不是为了要知道测量的误差!事实上,正是因为不知道待测物理量的真值才要去进行测量。那么,误差的定义又有什么意义呢?

使用每一种仪器,进行每一次测量,都会产生误差,没有误差的测量结果是不存在的。在误差必然存在的情况下,测量的任务应该是:

- (1) 获取测量数据,求出在特定测量条件下,被测量最接近真值的值,称为最近真值(最佳值),并据此了解误差。
- (2) 设法将测量结果的误差减至最小。
- (3) 估计最近真值的可靠程度(被测量的测量结果接近真值的程度)。

为此,需要分析研究误差的性质和来源,以便采取适当的措施,以期获取最可信的测量结果。

1.2.3 误差的表示

测量误差可以用绝对误差,也可以用相对误差表示。

我们把测量值与真值的差称为绝对误差。设被测量的真值为 x_0 ,测量结果值为 x ,则测量的绝对误差 Δx 为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.2.2)$$

由于误差无法避免,真值不可能得到,绝对误差的概念只有理论上的意义。因此又定义

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \times 100\%$$

即相对误差

$$E = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1.2.3)$$

绝对误差可以表示单一测量结果的可靠程度,而相对误差则可以比较不同测量结果的可靠性。相对误差有时更能反映测量的准确程度,相对误差越小,准确度越高。例如,测量两条线段长度的结果如表 1.2.1。

表 1.2.1 两条线段长度的测量结果

被测物	量具	测量读数/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
线段 1	刻度尺 (最小刻度为 mm)	11.3	0.1	0.88
	游标卡尺 (准确度为 0.02mm)	11.28	0.02	0.18
线段 2	刻度尺 (最小刻度为 mm)	22.1	0.1	0.45
	游标卡尺 (准确度为 0.02mm)	22.14	0.02	0.09

比较这两条线段的测量结果,可以看到:

- (1) 用相同的测量工具测量时,绝对误差没有变化;
- (2) 用不同的测量工具测量时,绝对误差明显不同,准确度高的工具所得到的绝对误差小;
- (3) 相对误差不仅与所用测量工具有关,而且也与被测量的大小有关;
- (4) 当用同一种工具测量时,被测量的数值越大,测量结果的相对误差就越小。

1.2.4 误差的来源与分类

按误差的来源及性质可将其分为系统误差、随机误差和过失误差(粗大误差)。

1. 系统误差

在测量条件不变的情况下,对同一物理量进行多次测量过程中保持恒定或以某种确定的规律变化的测量误差称为系统误差。系统误差的特点是测量结果向某一个方向偏离,其数值按一定规律变化。如测量结果与真值之间产生固定偏离,不服从统计性规律,不能靠增加测量次数来减少误差。

我们应根据具体的实验条件,系统误差的特点,找出产生系统误差的主要原因,采取适当措施减小其影响。产生系统误差的原因一般可分为如下几种。

(1) 仪器设备原因。是指由于结构设计不够完善或没有很好校准等一些量具、仪器自身固有缺陷或仪器设备没有按照规定条件使用或调整不到位达不到应有的准确程度而产生的误差。例如,各种刻度尺的热胀冷缩;温度计、表盘的刻度不准确,仪器零点未校准、偏心、灵敏度低,天平砝码缺损,等臂天平的臂长不等,测量显微镜精密螺杆存在回程差,计时工具总是偏快或偏慢等仪器原因造成测量结果相对于真值出现固定偏离。这种误差需要通过修理仪器,提高仪器准确度来消除或减小。

(2) 理论或方法原因。由于实验本身所依据的理论、公式的近似性,或者实验条件达不到理论公式所规定的要求,或者对实验条件、测量方法的考虑不周、实验方法不完善等也会

造成误差。例如热学实验中常常没有考虑散热的影响而造成误差。又如用伏安法测电阻时,没有考虑电表内阻的影响。事实上,电压表的内阻不可能为无穷大,电流表的内阻也不可能为零。如果使用欧姆定理 $R=U/I$ 计算测量结果,则必然会出现误差。又例如利用单摆测重力加速度,其理论依据是 $T=2\pi\sqrt{l/g}$, 即 $g=4\pi^2(l/T^2)$, 该公式成立要求单摆的摆角 $<5^\circ$, 忽略摆线的质量, 还要求忽略空气阻力和浮力等。物理实验的实际操作当中, 这些要求都难以完全达到。

(3) 个人原因。由于测量者在测量时的主观原因、当时的生理特点, 例如反应速度、分辨能力, 甚至心理状况或者个人固有习惯等也会在测量中造成误差。例如使用秒表计时, 操之过急的人, 计时总是偏短; 反应迟缓的人, 则计时总是偏长。还有的人, 在观察仪表和测取读数时, 总是习惯性地头偏向一方。

(4) 环境原因。由于如温度、湿度等外界环境因素的变化, 以及测量仪器规定的使用条件无法满足, 从而造成误差等。例如将要求水平放置使用的电表竖直放置读数, 测磁场时受地磁场的影响, 在不同的室温下使用在某一特定温度时标定的标准电池等所产生的误差。

系统误差又可分为可定系统误差和未定系统误差。可定系统误差是能够被测量者确定其大小和符号的系统误差, 一般是可消除和修正的。例如螺旋测微计(千分尺)的零点修正值就是可定系统误差。未定系统误差是测量者不能够确定其大小和符号的系统误差, 这样的误差一般不能完全修正, 只能估计出其极限范围。

发现系统误差, 并采取相应的措施予以消减或修正, 是一项艰巨而又重要的任务, 也是实验者实验水平和技能的重要体现。每一位实验者都必须对每次实验所依据的原理、方法、步骤, 以及将要使用的仪器等进行认真仔细的分析, 发现可能产生系统误差的地方。实验前, 要尽可能采取有效措施来减少或消除系统误差。实验后, 进行数据处理时, 也要对系统误差进行必要的修正, 以期得到理想的实验结果。

减小和消除系统误差的方法有以下几种:

(1) 从系统误差产生的根源入手, 采取措施减小系统误差。

- ① 在测量中, 从测量原理和测量方法上尽可能做到正确、严格;
- ② 对测量仪器进行定期检定和校准, 注意测量仪器正确的使用条件和使用方法;
- ③ 尽量减少周围环境对测量的影响;
- ④ 尽量减少或消除测量人员主观原因造成的系统误差。

(2) 用修正方法减少系统误差。

修正方法是预先通过检定、校准或计算得出测量器具的系统误差的估计值, 作出误差表或误差曲线, 然后取与误差数值大小相同、方向相反的值作为修正值, 将实际测量结果加上相应的修正值, 即可得到经过修正的测量结果。

(3) 尝试采用诸如替代法、交换法、对称测量法和减小周期性系统误差的半周期法等一些专门的测量方法。

系统误差有时是可以忽略不计的, 准则是: 如果系统误差或残余系统误差代数和的绝对值不超过测量结果扩展不确定度的最后一位有效数字的一半, 就认为系统误差已经可以忽略不计。

2. 随机误差(偶然误差)

在相同实验条件下, 对同一物理量进行多次测量, 由于各种偶然因素, 会出现测量值时