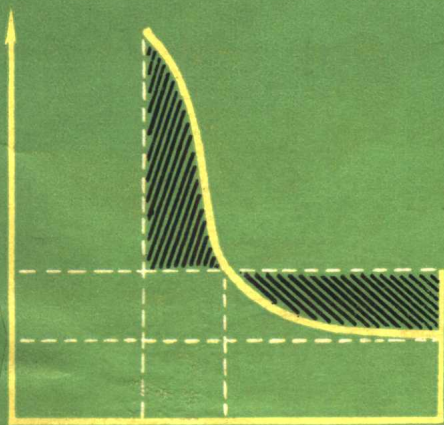


普通物理学实验讲义

中央电大物理组



中央广播电视大学出版社

普通物理实验讲义

中央广播电视大学物理组 编

中央广播电视大学出版社

普通物理实验讲义

中央广播电视大学物理组 编

*

中央广播电视大学出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

开本 787×1092 1/32 印张 5.5 千字116

1984年4月第1版1984年5月第1次印刷

印数1—180,000

书号:13300·12 定价:0.49元

编者的话

本讲义是以《物 3 号》为基础, 结合中央广播电视大学八二级学生的使用情况, 为配合八四级学生的普通物理实验课而修订的。

在本书介绍的内容中有以下十个电大学生必须完成的实验项目: 1. 长度的测量。2. 固体密度的测量。3. 单摆实验或验证牛顿第二定律。4. 刚体转动实验或用自由落体测定重力加速度。5. 测定冰的溶解热或用冷却法测盐水比热容或用电热法测定热功当量。6. 伏安法测电阻或电表的扩程和校准。7. 惠斯登电桥。8. 万用电表的使用或学生式电位差计。9. 薄透镜焦距的测量或望远镜和显微镜实验。10. 利用菲涅耳双棱镜测量光波波长或用牛顿环测量球面的曲率半径, 或测量单缝衍射的相对光强分布。

同时本书还集中介绍了有关测量误差、有效数字和数据处理方法等内容。

由于各地电大条件不同, 在不降低要求的前提下, 在有些实验项目中, 可以选取其他的实验方法或仪器。如在学生式电位差计这个实验中, 可以用滑线式电位差计代替学生式电位差计等。

在编写与修订过程中, 我们得到北京大学物理系和一些地方电大的大力支持, 在此一并表示衷心地感谢。

本讲义的力学和热学部分由北京工业学院查述传副教授审阅; 电学和光学部分由清华大学李功平副教授审阅; 修订后由北京钢铁学院李化平副教授审阅。

目 录

绪论	1
前言	1
误差的基本知识	5
有效数字的一般概念及数据处理	15
力学实验	23
实验一 长度测量	23
实验二 固体密度的测定	32
实验三 单摆实验	39
实验四 验证牛顿第二定律	43
实验五 刚体转动实验	48
实验六 用自由落体测定重力加速度	52
热学实验	56
热学实验知识	56
实验七 测定冰的溶解热	59
实验八 用冷却法测盐水比热容	65
实验九 用电热法测定热功当量	71
电学实验	77
电学实验知识	77
实验十 伏安法测电阻	86
实验十一 电表的扩程和校准	92
实验十二 惠斯登电桥	98
实验十三 万用电表的使用	104
实验十四 学生式电位差计	113
光学实验	122

实验十五	薄透镜焦距的测量	122
实验十六	望远镜和显微镜放大率的测量	131
实验十七	利用菲涅耳双棱镜测量光波波长	141
实验十八	用牛顿环测量球面的曲率半径	147
实验十九	测量单缝衍射的相对光强分布	153
附录	实验报告范例	159
实验一		159
实验十九		162
中央广播电视大学普通物理实验教学大纲		167

绪 论

前 言

一、物理实验的重要意义

物理学是自然科学中最重要的基础学科之一。它是一门实验科学。物理学的许多原理、定律都是总结大量的实验事实而获得,并被实验所检验的。

人类要认识物理现象的规律性,首先要对物理现象进行观察,分析其主要因素,变换条件进行实验,找出物理量间的关系,并进行定量的测量。其次是分析和概括,对实验所得的结果进行分析,排除次要的偶然的因素,找出现象的本质,从而找出物理量间的定量关系,提出理论的假设。这中间往往要进行再观察和再实验,以便使假说更完善、更全面。从实验中抽象出来的假说必须再回到实践中去,如果大量的实验和生产实践证明我们的假说是正确的,那么这个假说就上升为原理和定律。

一切物理原理和定律都是有条件的,相对的。随着实践的发展,新的观测、新的实验会和以前创立的理论发生矛盾,这就要求我们重新审查旧的理论,总结所有的实验事实,在新的基础上提出更新、更完善的理论。而这种新的理论随着时间的推移,又会被更新的理论所代替。如此推动认识过程以

至无穷延续下去。

在物理学中,这样的例子是很多的。例如:人类对光的本性的认识就是如此。十七世纪,牛顿的微粒说和惠更斯的波动说都是在一定的实验观测的基础上提出的假说。这两种观点斗争了近一个世纪,直到十九世纪,一些决定性的发现才使人们普遍地确认波动说而摒弃了微粒说。这些发现主要包括杨氏对干涉现象的研究及菲涅耳对衍射现象的研究,其中特别值得一提的是泊松从菲涅耳关于衍射的理论推导出,圆盘的阴影中心应该出现一个亮斑,而阿喇果由实验验证了这一论断果然属实。随后是对光波本性的探索,在弹性机械波,“以太”波的假说遇到严重的困难时,麦克斯韦总结了电磁理论,发现电磁波的传播速度和光速相同,因而提出光波是一种电磁波的假说。这个假说能解释一切和光的传播有关的现象,因而是一种理论。到此为止,光的电磁波的本性就被确立了。但是这个理论不能解释光电效应,因而它仍然是相对的,有条件的,需要进一步发展。本世纪初,在普朗克量子假说的基础上,爱因斯坦成功地解释了光电效应,认为光在发射和吸收时能量的传递具有量子性,即粒子性(这种粒子不是十七世纪牛顿的机械粒子模型)。这样,我们就认识到光的本性的两个侧面:波动性和粒子性,即波粒二象性。

由此可见,实验是科学认识过程中一个不可缺少的部分,它对于真理的来源和判断具有决定的意义。

二、实验课的目的

作为电大工科一门课程的普通物理实验,是学员进入大学学习而受到的系统的实验技能训练的开端,是后续课实验

的基础。因此,设置普通物理实验课要达到如下目的:

1. 学习物理实验的基本知识,基本方法,培养实验技能。

其中包括:

(1) 对实验结果,观察到的现象,测量的数据能够正确地记录,并能对实验结果进行分析。写出完整的实验报告,包括实验数据的处理和有效数字的运用等。

(2) 弄懂实验的基本原理,熟悉一些物理量(如长度、时间,质量,温度,电阻和波长等)的测量方法,物理学的常用物理常数(如重力加速度,密度,比热容等)的测量方法。

(3) 熟悉常用仪器及测量工具的基本结构原理,掌握其使用方法。

2. 通过实验,加深对物理概念和规律的认识。

3. 通过实验课,培养学员严格的科学的工作态度,严谨的工作作风及良好的实验习惯。

三、物理量的测量

物理实验不仅要观察物理现象的变化过程,而且要经常定量地研究过程中各物理量的变化,从中了解物理过程的规律;对实验的原理、方法进行深入地分析。为此必须对物理量进行测量。测量包括以下几个步骤:

1. 选择仪器:根据实验的要求,选择适当的测量仪器,这包括对仪器的种类,量程和准确度的选择。

2. 检查并调节仪器:为了能在仪器的准确度允许的限度内正确读出被测量的数值,在测量进行之前,必须对仪器进行检查和调节,如仪器的零点是否正确,仪器的安装是否恰当等。此外,一些外界因素(如大气压,温度,湿度等)在一些量的

测量中要发生影响,我们也必须设法消除它,或在计算中考虑到这些影响予以修正。

3. 观察示数并进行读数:在观察仪器示数时,我们有时需要调节仪器的某些部位,待示数稳定后再读数,如用电桥测电阻,需移动电桥的滑动接触器,待电流计的指针不发生偏转时方可读数。

四、数据处理

由测量结果算出我们所需要的量是实验的一个目的。为了得出正确的实验结论,必须对所得数据进行必要的整理和归纳,代入所需的公式中计算或作图来求出所需要的结果。由于测量中存在着误差,在计算中必须遵从近似计算法则。最后还要对实验结果进行误差分析和误差计算。

五、实验室规则

1. 在做物理实验前要认真预习实验讲义,以便理解实验原理,了解实验步骤,操作方法,并画好记录数据表格。表格上标明文字符号所代表的物理量及其单位,并确定测量次数。

2. 每种实验仪器都有其特有的性能和操作方法,使用时要遵守操作规程,注意安全,爱护仪器,不了解仪器的操作方法不能乱动仪器。

3. 细心操作、认真观察,及时记录实验数据,不允许实验后追记。

4. 如果遇到自己不能处理的问题,如仪器失灵等,应及时报告教师。在教师排除故障时,应认真观察教师的操作。电学实验在联好线路后应请教师检查,线路正确无误方能接通电源。

5. 实验完毕,应将仪器整理清点,放回原处,切断电源,关闭水源。

六、报告要求

实验报告一般应包括以下几方面的内容:

1. 实验的目的、仪器、原理和测量方法要点。
2. 实验记录:这是实验中最主要的部分,数据要详细,要按测量工具或仪表的实际情况正确地表示出有效数字及单位。
3. 数据处理:数据处理包括两部分,第一部分是将所得数据代入有关公式,计算出所需要的结果,或作图。第二部分是对所得数据作误差分析。
4. 结论和讨论:说明对实验目的的完成情况,分析产生误差的原因。
5. 完成实验所要求的作业。

以上是实验报告中大体上应包括的项目,不同的实验应有所取舍,不必千篇一律。

误差的基本知识

误差理论是一门专门的学科,深入地讨论它,需要有丰富的实践经验和较多的数学知识。这里我们只介绍一些有关误差的最基本的知识,要求学生着重了解它的物理内容,学会简单的计算,体会误差分析对于做好实验的意义。

物理实验离不开对物理量的测量。由于测量仪器、实验条件、环境等因素的局限,测量结果和客观存在的物理量之

间,总是存在着一定的差异,也就是存在着测量误差。

误差存在于一切测量之中,误差贯穿于整个物理实验的始终。从实验的设计,仪器的选择,实验过程中仪器的调整,每个物理量的每次测量都会给实验的结果带来误差。

一、测量值、真值和误差

在实验中用量仪或量具测量出的某物理量的值称作测量值,用 x 表示。该物理量的客观存在值称作真值,用 x_0 表示。测量值和真值之差

$$\Delta x = x - x_0$$

就称作误差。上式定义的误差反映的是测量值偏离真实值的大小和方向,因此又常称它为绝对误差。

二、误差的种类

根据误差的性质及其来源可将它分为两大类:系统误差和偶然误差(或称随机误差)。

1. 系统误差

系统误差所表现的特点是测量的结果向某一方向偏离,即对某个量的多次测量,由于这种误差的影响,测得结果相对于真值或者总是偏大,或者总是偏小。系统误差的大小总是一定的,或者按确定的规律变化。产生系统误差有以下几方面的原因:

(1) 仪器误差: 仪器误差是由于仪器本身构造上的不完善、仪器未经很好的校准所造成的误差。例如天平的两臂不等,米尺、温度计、表盘等刻度不均匀等。

(2) 理论误差或方法误差: 这是指实验本身所依据的理论、公式的近似性,或对实验条件及测量方法考虑不周带来的

系统误差,如力学中用单摆测重力加速度的实验,振幅对周期的影响,热学实验中热量的散失等常被忽略而造成的误差。

(3) 测量者个人因素带来的误差: 这是指测量者本人生理上的特点,(譬如反应速度的快慢,分辨能力的高低,个人的固有习惯)使得测量某一物理量时,有超前或滞后的趋向,出现读数始终偏大或偏小等等。

由于系统误差是定值的,多次测量中的每一次都会使结果固定地偏向一边。因此,系统误差不能通过多次测量来消除。但是如果能找出产生系统误差的原因,我们就可以采取适当的方法(如对仪器或仪表的示值引入修正值,对理论公式或测量结果进行修正等)来消除或减小它的影响。

2. 偶然误差

偶然误差是指由于某些偶然的或不确定的因素所造成的每次测量值相对于真值无规则的涨落。偶然误差的特点是在相同条件下,对同一量作多次测量,其测量值有时偏大有时偏小。每次测量是偏大或偏小具有偶然性,但是大量次数的测量所得到的一系列数据的偶然误差服从一定的统计规律: 在多次测量的数据中,离真值近的出现次数较多,离真值远的则较少,绝对值相等的正负误差出现的几率相等。在理论上,当测量次数趋于无穷时,各次测量的算术平均值就等于待测量的真值。也就是说增加测量的次数可以减少偶然误差,但是不能消除偶然误差。

因此在条件许可下我们经常采取对同一物理量作多次重复测量,以其平均值作为该物理量的最佳值。

1. 直接测得量及其误差的估计

前面谈到误差有系统误差和偶然误差之分，在后面的讨论中是假定系统误差已经消除或者已经加以修正，只存在偶然误差的前提下进行的。同时，前面又谈到，为了减小偶然误差，取得测得量的最佳值，在条件许可下，采用多次重复测量，求出各次测量值的算术平均值作为测得量的结果。

设在相同的条件下，对同一物理量 x 重复测量 n 次，分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ，则算术平均值 $\bar{x}$ 为：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

n 越大， $\bar{x}$ 越接近真值。

在这种情况下，测得值的误差可以用算术平均偏差或均方根偏差（标准误差）表示出来。这里我们只介绍算术平均偏差。

设各测量值 x_i 与平均值的偏差为 Δx_i ，即

$$\Delta x_i = |x_i - \bar{x}| \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

则算术平均偏差 $\Delta \bar{x}$ 定义为

$$\Delta \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|$$

$\Delta \bar{x}$ 也叫做平均绝对误差。它的大小反映了测量精密度的高低（或重复性的好坏）。

这样，我们把最后测得结果表示为下面的形式：

$$x = \bar{x} \pm \Delta \bar{x}$$

它表示对物理量 x 进行 n 次测量的最佳值为 $\bar{x}$ ，而其偶然误差的范围是 $\pm \Delta \bar{x}$ 。 $\Delta \bar{x}$ 相当于误差限，因而我们可以认为 x 值是在 $\bar{x} + \Delta \bar{x}$ 与 $\bar{x} - \Delta \bar{x}$ 之间，而不是表示 x 只有 $\bar{x} + \Delta \bar{x}$ 和 $\bar{x}$

$-\Delta\bar{x}$ 两个值。

例如, 设对一铁块的长度 x 进行了五次测量, 得到数据如下:

单位: cm

测量次数 (n)	1	2	3	4	5
x_i	2.32	2.34	2.36	2.35	2.33
$\Delta x_i = x_i - \bar{x} $	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01

算术平均值为

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ &= \frac{1}{5} (2.32 + 2.34 + 2.36 + 2.35 + 2.33) \\ &= 2.34(\text{cm})\end{aligned}$$

它的平均绝对误差为

$$\begin{aligned}\Delta\bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \\ &= \frac{1}{5} (|x_1 - \bar{x}| + |x_2 - \bar{x}| + |x_3 - \bar{x}| \\ &\quad + |x_4 - \bar{x}| + |x_5 - \bar{x}|) \\ &= \frac{1}{5} (0.02 + 0.00 + 0.02 + 0.01 \\ &\quad + 0.01) \\ &= 0.01(\text{cm})\end{aligned}$$

结果测得铁块的长度为

$$x = \bar{x} \pm \Delta\bar{x}$$

$$=(2.34 \pm 0.01) \text{ (cm)}$$

这个式子表示: 铁块长度的最佳值是 2.34cm, 真值在 2.33—2.35cm 范围内的可能性最大。显然, $\Delta \bar{x}$ 越小, 说明测量越准确。

在实际的实验过程中, 有的物理量不能重复测量, 或是虽然能多次测量, 但其结果读数的偶然误差远小于仪器的最小分度值, 甚至为零, 遇到这种情况, 只需进行一次测量即可。此时的测量误差由仪器的精度级别或分度值来定, 多数仪器的仪器误差常以其最小刻度的一半来估计。

前面讲的误差 Δx 是绝对误差, 它的单位和测量值的单位相同, 它的大小反映了测量精密度的高低, 但不能明显地反映出测量的相对精度。例如: 测棒的长度为 $l = 100.00 \pm 0.05$, 测棒的直径为 $d = 1.00 \pm 0.05$, 两者的绝对误差都是 0.05, 但到底哪个结果精确程度更高呢? 为了比较测量结果的精度, 我们引入相对误差。

绝对误差和最佳值的比值叫相对误差。相对误差没有单位, 一般用百分数表示:

$$\delta = \frac{\text{绝对误差}}{\text{最佳值}} \times 100\%$$

上例相对误差分别为:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{0.05}{100.00} \times 100\% = 0.05\%$$

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{0.05}{1.00} \times 100\% = 5\%$$

这就是说, 棒长的测量比棒的直径的测量要精确得多。可见相对误差较其绝对误差能更完备地反映测量结果的精确

性。

2. 间接测得量及其误差的计算

把直接测得量代入公式而计算出的量称作间接测得量。由于直接测得量具有误差,因而间接测得量也必然具有误差。这种误差和直接测得量的误差是有关系的,称为误差的传递,它可以通过计算求得。

(1) 间接测得量是直接测得量的和、差、积、商

设间接测得量为 $y = \bar{y} \pm \Delta \bar{y}$, 直接测得量为 $x_1 = \bar{x}_1 \pm \Delta \bar{x}_1$, $x_2 = \bar{x}_2 \pm \Delta \bar{x}_2$, 若

$$y = x_1 + x_2$$

则

$$\bar{y} \pm \Delta \bar{y} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 \pm \Delta \bar{x}_1 \pm \Delta \bar{x}_2$$

容易看出

$$\bar{y} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2$$

所以绝对误差

$$\pm \Delta \bar{y} = \pm \Delta \bar{x}_1 \pm \Delta \bar{x}_2$$

这里, $\Delta \bar{x}_1$ 和 $\Delta \bar{x}_2$ 可能有四种组合情况, 这就是既可能使误差增大, 也可能使误差抵消。但是我们应当计算最坏的情况, 即计算可能产生最大的误差的情况, 因而应取作

$$\Delta \bar{y} = |\Delta \bar{x}_1| + |\Delta \bar{x}_2|$$

我们规定此最大误差为间接测量的误差。若

$$y = x_1 - x_2$$

$$\bar{y} = \bar{x}_1 - \bar{x}_2$$

则绝对误差为

$$\Delta \bar{y} = |\Delta \bar{x}_1| + |\Delta \bar{x}_2|$$