

绪 论

0.1 大学物理实验课的目的

- (1) 观察、测量和分析,加强对物理理论、物理概念的理解和认识。
- (2) 学习物理实验的基础知识、基本方法,培养基本的实验技能。
- (3) 培养严肃认真、实事求是的科学态度和工作作风。

0.2 大学物理实验课的要求

为了达到上述目的,学生必须做好以下几个环节的工作:

1. 认真预习

通过预习,可明确所做实验的目的和要求、实验原理、待测物理量、实验方法、使用的仪器及实验步骤等。预习时按上述要求写出简明的预习报告。预习报告中要自行设计数据记录表格。此表格应按实验步骤列出实验项目,并把同类物理量排在一起,实验前把预习报告交给老师检查,不合要求的必须重新预习,没写预习报告的不能进行该次实验。

2. 严肃认真地进行观测与记录

实验时要爱护仪器,严格遵守实验规则和仪器操作规程。实验操作时精神要集中,观察要仔细,注意分析实验现象,及时排除实验故障,观察后应立即准确、如实地记录数据,不得拼凑、涂改或事后追记数据。如果发现数据不合理,应仔细分析其原因,然后重新测量。所有实验的原始数据都应整洁地记在专用的实验数据记录本上。

3. 做完实验后要及时写出实验报告

实验报告中简要写出实验目的、实验原理及使用仪器、实验步骤、实验观测的原始数据,按照原理公式进行数据处理、绘制图线,分析影响实验结果的因素并做修正、误差分析、计算以及回答老师指定的思考题,提出改进实验方法的设想,对实验课的安排提出建议,等等。

0.3 如何学好大学物理实验课

要学好物理实验课,除了要按照规定步骤进行实验外,还应注意以下几点:

(1) 注意学习和总结实验中所采用的实验方法,尤其是基本的测量方法。这些基本的测量方法是经常用到的,也是复杂测量方法的基础。

(2) 要自觉地培养分析实验、发现实验中的问题和解决问题的能力。不要得到一个所谓好的结果就高兴,就认为已经学好了这个实验。实际上,任何实验结果,由于各种因素的影

大学物理实验

响总会与实验结果有差异,关键在于分析这种差异的大小与存在是否合理。在实验过程中,仪器不可避免地可能会出现故障,遇到这种情况,要力求自己去分析,自己动手去解决。即使请教师解决,也要留意观察、细心体会教师是如何解决的。可以说,能否发现和排除仪器故障是实验能力强弱的重要表现,一定要注意这方面的锻炼。

(3)注意培养良好的实验习惯。在实验过程中,有些事情看来简单,但对保证实验安全顺利地进行、少出差错,都起着重要的作用,如清晰、准确、如实地记录实验数据,合理地布置仪器设备,记录实验的时间、地点和实验环境(温度、湿度、气压等),注意安全,注意节约及注意环境的肃静、整洁等。

0.4 大学物理实验的程序和要求

一般来讲,作为以训练实验技能和培养初步的实验设计能力为主的学生实验课程,其进行过程主要包括以下三个基本环节:

1. 实验前的预习

由于课堂实验时间是很有限制的,要想在规定的时间内高质量地完成要求的实验任务,做好实验预习是十分重要的。实验预习就是在实验进行之前,学生通过认真阅读和理解实验教材,并辅之以阅读一定的参考资料,了解实验目的要求、实验原理、实验的基本步骤、数据处理方法、注意事项等,并写好预习报告的过程。

预习报告的主要内容有实验名称,实验原理简述及主要测量计算式,实验基本步骤,注意事项,设计实验数据记录表格。

2. 实验操作

(1)认识仪器。熟悉将要使用的仪器、设备等的型号、构造特点、使用方法、测量误差等,并做好需要的记录。

(2)熟悉操作步骤。对照实物研究实验操作程序,想一想原方案是否合理。此时,不要急于动手,以免造成错误。

(3)调试安装实验仪器。首先对单个仪器进行检查调试,然后再按实验要求安装。应使用指定仪器,未经许可不得随意调换。仪器安装好后,必要时应请教师检查。

(4)实验试做和观察。为了事先纠正实验过程中可能出现的问题或错误,避免数据测量时出现问题,要重视实验试做。

(5)数据测量和记录。实验开始后,要仔细观察,认真思考,及时测量,准确读取和记录数据。读取数据要符合读数规则,记录数字应为有效数字,并注明单位。发现异常现象、仪器故障及损坏要及时报告,以便解决。

(6)数据检查。要求的数据测量完成后,不要忙于撤除仪器,首先自己检查数据的合理性,然后交由教师检查。有问题的数据应重做。

(7)结束实验。经教师检查签字后,方可拆除仪器,并将其放回原位摆放整齐,搞好清洁卫生。

3. 实验之后完成实验报告

写实验报告的目的是培养和训练学生以书面的形式总结实验工作或报告科学成果的能力。实验报告中不仅应该有清晰的思路,齐全的数据、图表,而且要有科学的结论。

一般要求实验报告包括实验名称;实验目的和要求;实验仪器设备;实验原理(扼要写出

绪 论

实验原理、主要公式,画出必要的原理图);实验的操作过程;数据记录和处理(写清实验数据记录表格,不能用原始数据代替,进行正确的计算,并求出误差或不确定度,得出实验结果或结论);实验效果分析(通过分析,说明通过实验得到的收获,提出改进建议,指出误差原因,对实验中观察到的异常现象进行解释与讨论,回答课后思考题,等等);实验报告提交(将原始数据记录粘贴在实验报告内一同交上,没有原始数据的实验报告不记成绩)。

测量误差与数据处理

要定量研究自然现象所遵从的规律,必须对大量的实验数据进行测定、记录和分析处理。数据处理及误差分析是科学实验的重要组成部分,贯穿于每个实验之中,是培养学生实验能力和提高科学素质不可缺少的学习内容和训练环节。测量误差与数据处理的理论,不仅要在每个实验中用到,而且是今后从事科学研究必须掌握的基础知识和基本技能。

由于测量误差与数据处理的内容涉及面广,不可能在一两次学习中全部掌握,因此在这一理论的学习中,应结合自己已经掌握的知识,对提到的问题先有一个初步的了解,然后针对每个具体实验再详细学习有关内容,并通过运用加以掌握。

1.1 测量与误差

1.1.1 测量

所谓测量,就是把待测的物理量与一个被选作标准的同类物理量进行比较,以确定它是标准量的多少倍。这个标准量称为该物理量的单位。这个倍数称为待测物理量的数值。一个物理量必须由数值和单位组成。

测量可分为直接测量和间接测量两类。凡是能以量具、仪器的刻度直接测得待测量大小的测量称为直接测量。例如,用米尺测量物体的长度,用天平称量物体的质量,用安培表测量电流的强度,用电势差计测量干电池的电动势等,均为直接测量。但是大多物理量都没有直接测量的仪器,需要进行间接测量。所谓间接测量,就是先经过直接测量得到一些量的量值,然后再通过一定的数学公式进行计算,才能得出所求结果的测量值。例如,用单摆测量重力加速度 g 时,先测出摆长 l 和周期 T 的量值,然后再用公式 $g = 4\pi l/T^2$ 求出 g 的量值。 g 的测量便是间接测量。

1.1.2 误差

任何物理量在一定条件下都客观地存在一个唯一确定的值,这个值称为真值。测量的目的就是希望能够获得被测量的真值。但由于实验理论的近似性,测量仪器灵敏度和分辨能力的局限性,环境的不稳定等因素的影响,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总会存在或多或少的偏差,这种偏差就称为测得值的误差。

设被测量的真值为 α ,测得值为 x ,误差为 ϵ ,则

$$\epsilon = x - \alpha \quad (1-1)$$

由于 α 无法测得, 所以用平均值 \bar{x} 代替 α , 那么可求残差 v_i , $v_i = x_i - \bar{x}$ 。没有误差的测量结果是不存在的, 在误差必定存在的情况下, 测量的任务有以下几个:

- (1) 设法将测得值中的误差减至最小。
- (2) 求出在测量的条件下, 被测量的最近真值(最佳值)。
- (3) 估计最近真值的可靠程度(接近真值的程度)。

1.1.3 误差的分类

从研究误差的需要出发, 根据误差产生的原因和性质的差异, 可将测量中的误差分为系统误差和随机误差。

1. 系统误差

在相同的实验条件下, 对同一物理量进行多次测量, 如果出现的误差大小与正负保持不变, 或按一定的规律变化(递增、递减、周期性等), 这种测量误差称为系统误差。系统误差的种类很多, 按其来源可分为方法误差、条件误差和仪器误差。

(1) 方法误差。方法误差是由于测量所用理论公式的近似性及公式中的各参数确定的近似性而引起的误差。产生这一误差的原因在于测量过程中存在着实际上起作用且不能忽略的因素, 如空气的阻力和浮力、电表的内阻、连线电阻的压降等, 这些因素在推导测量结果的表达式中没有得到反映或被忽略, 从而引起了实验误差。

(2) 条件误差。条件误差是由于外界环境因素(如温度、湿度、压力、振动、电磁场等)与要求的标准状态不一致, 使测量装置的指示量值发生变化, 以及观察者在生理上的视觉分辨能力、感觉器官的生理变化、反应速度和固有习惯引起的误差。

(3) 仪器误差。仪器误差是由于测量设备(包括测量工具、仪器、量具等)本身不完善, 或由于测量设备的安装、布置、调整不得当(如米尺刻度不准确、螺旋测微计有空行程、仪表调零不准等)而产生的误差。

由此可见, 系统误差的出现具有某种确定的规律性。但是, 这种规律对不同的实验测量却是不同的, 只能针对每种具体情况采用不同的处理方法。这就要求实验者对研究对象的特殊规律要有充分的掌握, 同时实验者在实践经验、实验技巧和理论水平等方面应有相当的水平, 并且使所用仪器设备的性能处于良好的工作状态。一般地说, 处理系统误差是比较困难的, 容易遗漏。

2. 随机误差

随机误差是由于不确定因素引起的误差。它的特征表现为, 就某一次测量来讲, 其误差值的大小和正负都带有随机性, 难以事先确定。但对大量次数的重复测量来说, 测量的结果却遵从一定的统计规律。这种误差产生的原因是多方面的, 如实验条件和环境因素的微小的、无规则的起伏及实验者生理分辨本领、实验技能的熟练程度等因素产生的误差。

随机误差可以根据统计理论进行处理。大量的实验事实及统计理论都证明, 当随机误差由许多微小的、彼此独立的随机因素决定时, 其误差分布服从正态分布规律(见图 1-1)。其主要特征表现在以下四个方面:

(1) 有界性。绝对值很大的误差出现的概率为零, 即误差的绝对值不会超过一定的界限。

大学物理实验

(2)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。

(3)对称性。绝对值相等的正误差和负误差出现的概率接近相等。

(4)抵偿性。由于绝对值相等的正、负误差出现的概率接近相等,因而随着测量次数的增加,随机误差的算术平均值将趋于零。

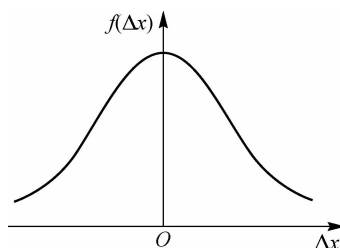


图 1-1 随机误差的正态分布

抵偿性是随机误差最本质的统计特征。一般地讲,凡是具有抵偿性的误差,原则上都可以按随机误差处理。

根据随机误差的分布特征可知,在多次测量中,正、负随机误差大致上可以相互抵消,因而多次测量的算术平均值表示测量结果可以减小随机误差的影响;测量值的分散程度直接体现随机误差的大小,测量值越分散,测量的随机误差就越大。因此,只有对随机误差做出估算才能表示出测量的精密度。

1.1.4 系统误差的处理

任何测量误差均由随机误差和系统误差两部分组成。因此,为了提高测量精度,在减少随机误差的同时,还应考虑系统误差的处理。

1. 研究系统误差的重要性

研究系统误差的重要性主要体现在以下几个方面:

(1)随机误差的基本处理方法是统计方法,它的基本前提是完全排除了系统误差的影响,认为误差的出现纯粹是随机的。因此,在实际测量中必须设法最大限度地消除系统误差的影响,否则,随机误差的研究方法及由此而得出的精度评定就将失去意义。

(2)系统误差与随机误差不同,尽管有确定的变化规律,但往往隐藏于测量数据中,不易被发现。又因系统误差往往各自服从自己独特的规律,在处理时,没有一种通用的处理方法,只能具体情况具体分析。处理方法是否得当,很大程度上取决于测量者的经验、知识和技巧。所以,系统误差虽然有规律,但处理起来要比随机误差困难得多,必须认真研究。

(3)通过对系统误差的研究,可以发现一些新事物。例如,惰性气体就是通过对不同方法获取的实验数据进行误差分析而发现的。

2. 系统误差的发现

系统误差往往隐藏于测量数据中,不易被发现,也不能通过多次测量来消除。因此,发现系统误差对后续的处理是至关重要的。发现系统误差的常用方法有以下几种:

(1)理论分析法。理论分析法包括分析实验所依据的理论和实验方法是否完善,仪器的工作状态是否正常,要求的使用条件是否得到满足,实验人员在实验过程中是否有产生系统误差的心理和生理因素,等等。

(2)对比测量法。通过改变实验方法、测量方法、实验条件(如仪器、人员、参数等)等手段,对测量数据进行比较,对比研究数据之间的符合性,从而发现系统误差。

(3)数据观察与分析法。在无其他误差存在的情况下,随机误差是服从统计规律的,如果测量结果不符合预想的统计规律,则可怀疑存在系统误差。对于一测量量,可采用列表或作图的方法观察残差随测量顺序的变化规律,如有明确的变化规律(如线性、周期性等),可判断存在系统误差,否则,无理由怀疑存在系统误差。另外,也可以采用按统计规律建立的方法进行判断,如残差校核法(又称马利科夫准则)、阿贝-赫梅特准则等。

3. 系统误差的处理方法

(1)从产生误差的根源上消除。测量之前,先对所采用的原理和方法及仪器环境等做全面的检查和分析,确定有无明显能产生系统误差的因素,并采取相应措施,不让系统误差在实验过程中出现。例如,为了防止系统误差产生,对仪器设备的工作状态进行调节、检查测量方法和计算方法是否合理、在稳定的环境条件下进行测量等。

(2)实验过程中采取相应的措施消除。对难以避免的系统误差,有时在测量过程中也可以采用一些专门的测量技术或方法使其减小或消除。常用的方法有以下几种:

①替代法。在一定条件下,对某一被测量进行测量后,不改变测量条件,再以一个标准量代替被测量,并使仪器呈现与以前相同的状态,此时的标准量即等于被测量值。这样就消除了除标准量本身的定值系统误差以外的其他系统误差。例如,用替代法测量电阻。

②异号法。改变测量中的某些条件(如改变测试部件左右移动的方向、变换接线端上的接线、改变导线中的电流方向等),保证其他条件不变,使两次测量结果中的系统误差的符号相反,通过求取平均值消除系统误差。例如,灵敏电流计(光点反射式)测电流时,改变流经电流计的电流方向,使指针左右偏转,求平均可以消除起始零点不准所产生的系统误差;拉伸法测量杨氏模量实验中,采用加减砝码的方法,记录不同拉力时的两组读数,最后对同一拉力的两个读数求平均,可以消除钢丝形变滞后效应引起的系统误差。

③交换法。交换法实质也属于异号法。它是将测量中的某个条件(如被测对象的位置等)相互交换,使产生的系统误差相互抵消。例如,用天平称量物体质量时,可将待测物与砝码交换位置,以消除天平不等臂所产生的系统误差。滑线电桥测量电阻时,可以交换被测电阻和标准电阻的位置,以消除接触电阻产生的系统误差。

④差值法。差值法是通过改变实验参数(如自变量)进行测量,并对测量数据求差值来获取未知量的方法。这种方法可以消除某些定值的系统误差。例如,伏安法测量电阻实验中,改变电压读取电流值,通过差值法可以消除电表零位不准带来的系统误差。同样,在差值法基础上发展起来的逐差法,也具有消除系统误差的作用。

(3)采用修正方法对结果进行修正。实验后,如果系统误差可以通过实验或计算得到其符号和大小,那么在实验结果中可以引入修正值加以消除。例如,对仪器、标准件等事先做检定,可以得到修正曲线或修正值,然后修正实验结果;某些量具或仪表的零点误差的修正;等等。

上述只是给出了部分针对定值系统误差的处理方法,如果系统误差是变化的,可根据系统误差的变化规律采用合理的方法进行处理。例如,测量中可以用对称测量法消除线性变化的系统误差,用半周期偶次测量法消除周期性变化的系统误差,等等。实际测量过程中,由于系统误差的复杂性,处理系统误差的方法和措施是多种多样的,采用何种方法和措施在

很大程度上取决于实验人员的经验和知识水平。对于未定系统误差,一般无法修正或消除,这时可估计出误差限,在结果中予以表示。

1.1.5 误差的表示形式

1. 绝对误差

用绝对大小给出的误差定义为绝对误差。用式子表示为

$$\text{误差}(\delta) = \text{测量值}(x) - \text{真值}(x_0)$$

绝对误差是带有单位的数,可正可负。绝对误差反映测量值偏离真值的大小与方向。

2. 相对误差

绝对误差与被测量真值的比值称为相对误差 E 。用式子表示为

$$\text{相对误差 } E = \text{绝对误差} \div \text{真值}$$

由于一般情况下真值未知,通常用测量值的平均值代替真值。相对误差是无量纲数,通常用“%”表示。相对误差可以反映测量的精度高低。

1.2 有效数字

1.2.1 有效数字的定义

我们规定,由若干位可靠数字和一位可疑数字组成的数字,称为有效数字。有效数字的最后一位是偶然误差所在的一位。对于一个测量值,从左边第一个非零数字算起到第一个发生误差的数字为止,都算作有效数字。有效数字的个数称为有效数位。例如,用米尺(最小分度值为 1 mm)测量一物体长度时,读数在 14.4 cm 和 14.5 cm 之间,目测估计为 14.46 cm。这里“14.4”是准确的,而最末位的“6”是估计的,因而是可疑的。尽管“6”是可疑的,但对于测量结果来说,读出它比不读出它要准确得多,所以测量的结果为 14.46 cm 是有意义的,这个数字就是有效数,并且是 4 位有效数字。

1.2.2 仪器读数规则

对于仪器的读数规则也要与有效数字的定义相符合,应该是在一般情况下,仪器读数的最后一位是读数误差所在的一位。

(1)直接测量时,必须读出仪器最小分度值的下一位,即应估读到最小分度值的 $\frac{1}{10}$ 。例如,最小分度值为 1 mm 的尺,测量时一定要估读到 $\frac{1}{10}$ mm 那一位;最小分度值为 0.1 A 的安培表,测量时一定要估测到 $\frac{1}{100}$ A 那一位。

(2)对于分度式仪表,若指针(或物体)恰好与刻度线对齐,则仪器读数的最后一位是“0”,不能省略。

(3)有的仪表,它的分度较窄,而指针较宽(大于最小分度值的 $\frac{1}{5}$),这时要读到最小分度的 $\frac{1}{10}$ 有困难,可以读到最小分度值的 $\frac{1}{5}$,甚至 $\frac{1}{2}$ 。

(4)有些仪器,如数字式仪表和游标卡尺等,是不可能估读出最小分度值的 $\frac{1}{10}$ 的,此时,我们无须估读而直接把指示数值记下来,并且仍然认为最后一个数字是可疑的。因为在游标卡尺或数字式仪表中,最后一位总是有“±1”的误差,也就是最后一位确实是可疑的。

1.2.3 有效数字的运算规则

间接测量只能通过运算才能得出,运算结果有效数字位数的多少,仍然由不确定度计算确定。但是,在做误差计算以前的测量值运算过程中,可由有效数字运算规则进行初次取舍,以简化运算过程。

1. 加减运算

加减运算的规则:几个数相加减,以小数位数最少的为准,其余各数比该数多一位。

【例 1-1】

$$\begin{array}{r}
 30.3 \\
 1.384 \\
 +0.0067 \\
 \hline
 31.6907
 \end{array}
 \quad \text{可以简化为} \quad
 \begin{array}{r}
 30.3 \\
 1.38 \\
 +0.01 \\
 \hline
 31.69
 \end{array}$$

【例 1-2】

$$\begin{array}{r}
 12.6 \\
 -4.378 \\
 \hline
 8.222
 \end{array}
 \quad \text{可以简化为} \quad
 \begin{array}{r}
 12.6 \\
 -4.38 \\
 \hline
 8.22
 \end{array}$$

2. 乘除运算

乘除运算的规则:几个数相乘除时,以数字位数最少的为准,其余各数比该数多一位且与小数点位置无关。

【例 1-3】

$$\frac{10.505 \times 0.34}{1.118} \text{ 可以简化为 } \frac{10.5 \times 0.34}{1.12} = 3.19$$

【例 1-4】

$$\frac{160.41}{12.425 \times 4.11} \text{ 可以简化为 } \frac{160.4}{12.42 \times 4.11} = 3.142$$

3. 乘方、立方、开方运算

乘方、立方、开方运算的规则:结果可比原数多保留一位。

【例 1-5】

$$(341)^2 = 1\,163 \times 10^2 \text{ 或者 } 1.163 \times 10^5$$

4. 对数、三角函数运算

对数、三角函数运算的规则:所有函数表的位数随角度误差的减小而增加。角度误差为 $10''$, $1''$, $0.1''$, $0.01''$ 时,相应三角函数表的位数分别选择5位、6位、7位、8位。

【例 1-6】

$$\lg 3.142 + \lg 5.267 = 0.4972 + 0.7216 = 1.2188$$

1.2.4 与有效数字有关的问题

(1) 误差只取一位有效数字(首位是1的可保留两位)。

(2) 实验后计算误差,绝对误差有效数字的位数是确定有效数字位数的基本依据。测量值有效数字的末位必须与绝对误差的末位对齐。例如,测得 $L = 64.683 \text{ cm}$, 误差为 0.08 cm , 则应写成 $L = (64.68 \pm 0.08) \text{ cm}$, 而不应写成 $L = (64.683 \pm 0.08) \text{ cm}$ 。

(3) 在十进制单位中,测量结果的单位的变换不影响有效数字的位数。例如, $L = 15.03 \text{ cm} = 150.3 \text{ mm} = 0.1503 \text{ m} = 1.503 \times 10^{-4} \text{ km}$ 。在非十进制单位中,测量结果的单位变换时,还是要用误差来定有效数字的位数,如 $t = (1.8 \pm 0.1) \text{ min} = (108 \pm 6) \text{ s}$ 。

(4) 把大数写成科学表达式可以解决有效数字及误差的位数在表达式上的矛盾。例如, $(10\ 000 \pm 500) \Omega$ 应写成 $(1.00 \pm 0.05) \times 10^4 \Omega$, 有效数字是三位,误差是一位。

(5) 有效数字与相对误差之间有一定的对应关系。例如,与三位有效数字对应的相对误差是 $10^{-1} \sim 10^{-3}$, 与四位有效数字对应的相对误差是 $10^{-2} \sim 10^{-4}$, 等等。大体上我们可以说,一个数值的有效数字越多,其相对误差越小,即测量的精度越高。

1.2.5 有效数字的修约规则

(1) 有效数字的修约规则与我们平常所讲的“四舍五入”有相似之处,但又不完全相同。它的规定如下:

① 当被舍数字的第一个数小于5时,舍去,所留下的数字不变。例如,26.924 保留三位为 26.9。

② 当被舍数字的第一个数大于5时,在保留数字的最末一位数字上加1。例如,119.706 保留三位有效数字为 120。

③ 当被舍数字的第一个数等于5时,若后面的数不全为“0”,则进1;若后面的数字全为“0”,则保留数字的最末一位为奇数就加1,为偶数就不变,“0”做偶数化。例如,12.050 0 保留三位为 12.0, 12.150 0 保留三位为 12.2, 12.250 9 保留三位为 12.2。

④ 当所舍去的数字并非单独一个数字时,不得进行连续修约,应看舍去数字中第一个数的大小。例如,113.461 保留三位为 113,而不能连续修约为 $113.461 \rightarrow 113.46 \rightarrow 113.5 \rightarrow 114$ 。

(2) 误差的有效数字只取一位,只要首位数后面有数一律进1,不服从“四舍五入”的规律;若误差的首位数为1,则取两位有效数字,两位有效数字后面只要有数一律进位。

1.3 直接测量的误差估计

1.3.1 测量列的误差

对某物理量进行 n 次等精度的直接测量,各测量值分别为 x_1, \dots, x_n , 这组测量值就称为测量列,我们常用测量列的标准误差(σ)或者测量列的平均绝对误差(η)来评价该测量列的可靠性。

1. 测量列的标准误差 σ

测量列的标准误差 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \dots + \epsilon_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum \epsilon_i^2}{n}} \quad (1-2)$$

由于被测量的真值是未知数,所以按照式(1-2)无法计算出 σ 。理论分析表明,可以用残差(v)即测量值和算术平均值之差来表示标准误差,即

$$\sigma = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} \quad (1-3)$$

其中, $v_i = x_i - \bar{x}$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$ 是算术平均值。

按照偶然误差的高斯理论,当测量列的标准误差为 σ 时,此测量列中任一测量值的误差 ϵ_i 有68.3%的可能性是在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间内。

2. 测量列的平均绝对误差 η

η 的定义为各测量值误差的绝对值的平均值,即

$$\eta = \frac{|\epsilon_1| + |\epsilon_2| + \dots + |\epsilon_n|}{n} = \frac{\sum |\epsilon_i|}{n} \quad (1-4)$$

如用残差表示,则为

$$\eta = \frac{|v_1| + |v_2| + \dots + |v_n|}{\sqrt{n(n-1)}} \quad (1-5)$$

但是通常不使用式(1-5),而用近似式

$$\eta = \frac{|v_1| + |v_2| + \dots + |v_n|}{n} = \frac{\sum |v_i|}{n} \quad (1-6)$$

按照偶然误差的高斯理论,测量列中任一测量值的误差 ϵ_i 有57.55%的可能性是在 $(-\eta, +\eta)$ 区间内。

3. 测量列中异常数据的取舍

肖维勒准则认为,对于以相同精度独立测量到的数据,若测量值满足

$$|x_i - \bar{x}| > \omega_n \sigma \quad (1-7)$$

则 x_i 就是异常数据,应该在测量列中剔除它。式(1-7)中的 ω_n 与测量次数 n 有关,可查阅表1-1。

表 1-1 ω_n 与 n 的关系

n	3	4	5	6	7	8	9	10
ω_n	1.38	1.53	1.65	1.73	1.80	1.86	1.92	1.96
n	11	12	13	14	15	16	17	18
ω_n	2.00	2.03	2.07	2.10	2.13	2.15	2.17	2.20
n	19	20	21	22	23	24	25	30
ω_n	2.22	2.24	2.26	2.28	2.30	2.32	2.33	2.39
n	40	50	75	100	200			
ω_n	2.49	2.58	2.71	2.81	3.02			

4. 算术平均值的标准误差 S

理论分析表明,某一测量列的标准误差 σ 与其算术平均数的标准误差 S 之间的关系为

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1-8)$$

大学物理实验

若以残差表示,则为

$$S = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n(n-1)}} \quad (1-9)$$

由此可见,增加测量次数对于提高策论结果的精密度是有利的,但 n 不必取得过多, $n=4\sim 20$ 即可。算术平均值的误差有 68.35% 的可能性在 $(-S, +S)$ 区间内。

5. 算术平均值的平均绝对误差 T

算术平均值的平均绝对误差 T 和测量列的平均绝对误差 η 之间的关系为

$$T = \frac{\eta}{\sqrt{\eta}} \quad (1-10)$$

用残差表示为

$$T = \frac{\sum |v_i|}{n\sqrt{n-1}} \quad (1-11)$$

算术平均值的误差落在 $(-T, +T)$ 区间内的可能性为 57.5%。

6. 简化

在普通物理实验中,当测量次数不多时,有时用测量列的平均绝对误差 η 来评价测量结果(算术平均值),这时可以粗略地将其看成为算术平均值的最大误差。

1.3.2 单次直接测量的误差

有些实验,由于是在动态中测量的,不容许对被测量物做重复测量;也有些实验的精密度要求不高;或在间接测量中,其中某一物理量的误差对最后的结果影响较小。在这些情况下,可以对被测量物只测一次。对于单次测量的误差,一般是估计它的最大值。因为误差的来源很多,而各实验又有各自的特点,所以难以确定统一的规则。

在一般情况下,可按仪器出厂检定书或仪器铭牌上注明的仪器误差作为单次直接测量结果的误差;如果没有注明,误差也常用仪器最小分度值的一半来表示;数字式仪表的最大误差取末位数最小分度的一个单位。

有可能会遇到这种情况,在多次直接测量中,经过计算得到的偶然误差很小,甚至趋近于零,这主要是由于仪器的精度不足以反映其微小差异,如果不考虑仪器的系统误差,测量结果的最大误差估计方法与单次直接测量相同。

1.3.3 直接测量结果的表示式

对一物理量的直接测量结束后,必须进行适当的数据处理工作,给出测量结果的表示式,即

$$x = (\bar{x} \pm \Delta x) \quad (\text{单位}) \quad (1-12)$$

式中, x 为被测量值; \bar{x} 为被测量的最近真值(最佳值); Δx 为最佳值的绝对误差。必须注意的是,最佳值 \bar{x} 的有效位数是由其绝对误差 Δx 决定的, Δx 只取一位有效数字(首位是 1,可保留两位), \bar{x} 的末位必须和 Δx 的末位对齐。

1.4 间接测量的误差估计

计算间接测量结果时,是将各直接测量值的最佳值(而不是真值)代入公式求出的。由

于直接测量的最佳值都有一定的误差,因此,求得间接测量结果也必然具有一定的误差,其误差的大小取决于各直接测量值误差的大小,以及函数的具体形式。

表达各直接测量值误差与间接测量值误差的关系式,称为误差传递公式。下面仅介绍偶然误差的传递。

1.4.1 间接测量值的误差公式之一

设间接测量值 N 与各独立的直接测量值 x, y, z, \dots 有下列函数关系:

$$N = f(x, y, z, \dots) \quad (1-13)$$

各直接测量结果为

$$x = \bar{x} \pm \Delta x, y = \bar{y} \pm \Delta y, z = \bar{z} \pm \Delta z$$

则间接测量结果可表示为

$$N = (\bar{N} \pm \Delta N) = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) \pm \Delta N \quad (1-14)$$

下面导出 ΔN 的计算式。

对式(1-13)求全微分得

$$dN = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz + \dots$$

式中, dx, dy, dz, \dots 为 x, y, z, \dots 的微小变化量。由于误差都远小于测量值,我们把 dx, dy, dz, \dots 和 dN 都看成各测量值的绝对误差,并记为 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots$ 和 ΔN , 则间接测量值的绝对误差 ΔN 可表示为

$$\Delta N = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \Delta y + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \Delta z + \dots \quad (1-15)$$

式中取绝对值是考虑到误差有正负的情况,即各直接测量的量的误差会相互加强的情况。为了计算间接测量值的相对误差,可对式(1-13)先取对数,再求全微分,即

$$\begin{aligned} \ln N &= \ln f(x, y, z, \dots) \\ \frac{dN}{N} &= \frac{\partial \ln f}{\partial x} dx + \frac{\partial \ln f}{\partial y} dy + \frac{\partial \ln f}{\partial z} dz + \dots \end{aligned}$$

把微分号改为误差号,取各项绝对值,求算术和,得到间接测量值的相对误差为

$$E = \frac{\Delta N}{N} = \left| \frac{\partial \ln f}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial y} \right| \Delta y + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial z} \right| \Delta z + \dots \quad (1-16)$$

由式(1-15)和式(1-16)可见,对于加减运算的函数式,可通过直接全微分的方法求得绝对误差,对于乘除运算及乘方、开方的运算,可用先取对数后求全微分的方法求得相对误差,再用 $\Delta N = EN$ 方法求绝对误差。

【例 1-7】 用流体静力法测固体密度,其公式为 $\rho = \frac{m}{m - m_1} \rho_0$ 。其中, m 为固体在空气中称得的质量, m_1 为固体全部浸入密度为 ρ_0 的液体中称得的质量,由直接测量得 $m = (27.06 \pm 0.02) \text{g}$, $m_1 = (17.03 \pm 0.02) \text{g}$ 。已知 $\rho_0 = (0.9997 \pm 0.0003) \text{g/cm}^3$, 求 ρ 。

解:
$$\rho = \frac{27.06}{27.06 - 17.03} \times 0.9997 = 2.697 (\text{g/cm}^3)$$

取对数

$$\ln \rho = \ln m - \ln(m - m_1) + \ln \rho_0$$

取全微分

大学物理实验

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dm}{m} - \frac{dm}{m-m_1} - \frac{-dm_1}{m-m_1} + \frac{d\rho_0}{\rho_0} = \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m-m_1}\right) dm + \frac{1}{m-m_1} dm_1 + \frac{1}{\rho_0} d\rho_0$$

将微分号改为误差号,各误差项的系数取绝对值,即

$$\begin{aligned} E &= \frac{\Delta\rho}{\rho} = \left|\frac{1}{m} - \frac{1}{m-m_1}\right| \Delta m + \left|\frac{1}{m-m_1}\right| \Delta m_1 + \left|\frac{1}{\rho_0}\right| \Delta\rho_0 \\ &= \frac{m_1 \Delta m + m \Delta m_1}{m(m-m_1)} + \frac{\Delta\rho_0}{\rho_0} = \frac{17.03 \times 0.02 + 27.06 \times 0.02}{27.06 \times (27.06 - 17.03)} + \frac{0.0003}{0.9997} \\ &= 0.0035 \approx 0.4\% \\ \Delta\rho &= E\rho = 0.0035 \times 2.697 = 0.0094 \approx 0.01(\text{g/cm}^3) \\ \rho &= (2.7 \pm 0.01)\text{g/cm}^3 \end{aligned}$$

基本运算的误差公式如表 1-2 所示。

表 1-2 基本运算的误差公式

函数表达式	误差	
	绝对误差 ΔN	相对误差 E
$N=x+y$	$\Delta x + \Delta y$	$\frac{\Delta x + \Delta y}{x+y}$
$N=x-y$	$\Delta x + \Delta y$	$\frac{\Delta x + \Delta y}{x-y}$
$N=xy$	$y\Delta x + x\Delta y$	$\frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$
$N=\frac{x}{y}$	$\frac{\Delta x}{y} + \frac{\Delta y}{y^2}$	$\frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$
$N=x^m$	$mx^{m-1} \Delta x$	$m \frac{\Delta x}{x}$
$N=\sqrt[m]{x}$	$\frac{1}{m} x^{\frac{1}{m}-1} \Delta x$	$\frac{1}{m} \frac{\Delta x}{x}$
$N=mx$	$m\Delta x$	$\frac{\Delta x}{x}$

1.4.2 间接测量值的误差公式之二

式(1-15)和式(1-16)是在最不利情况下考虑的,误差合成的结果是间接测量值 N 的最大误差,因此,用这种误差合成法所得的结果是比较粗略的。为了使间接测量值 N 的误差更符合实际,通常采用方和根法。

可以严格证明,对某间接测量值 $N=f(x, y, z, \dots)$,其标准误差的传递公式为

$$S_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 S_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 S_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 S_z^2 + \dots} \quad (1-17)$$

相对误差为

$$E = \frac{S_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \left(\frac{S_x}{f}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \left(\frac{S_y}{f}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \left(\frac{S_z}{f}\right)^2 + \dots} \quad (1-18)$$

式中, $S_x, S_y, S_z, \dots, S_n$ 均为各测量量 x, y, z, \dots, N 的算术平均值的标准误差。

按式(1-17)和式(1-18)计算间接测量值的标准误差时,各直接测量的误差应为标准误

差,若直接测量值的误差为非标准误差时(如单次直接测量估计的误差),则所得结果将要比间接测量值的标准误差大一些。

常用函数的标准误差如表 1-3 所示。

表 1-3 常用函数的标准误差

常用函数	标准误差
$N=x \pm y$	$S_N = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$
$N=xy, N=\frac{x}{y}$	$\frac{S_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{S_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{S_y}{y}\right)^2}$
$N=x^m$	$\frac{S_N}{N} = m \frac{S_x}{x}$
$N=\sqrt[m]{x}$	$\frac{S_N}{N} = \frac{1}{m} \frac{S_x}{x}$
$N=mx$	$S_N = mS_x, \frac{S_N}{N} = \frac{S_x}{x}$

1.5 数据处理的基本方法

在物理实验中,为了使实验结果能清楚地表达出来,需对数据进行处理,处理数据的常用方法有列表法、作图法、逐差法和最小二乘法等。

1.5.1 列表法

在记录数据和处理数据时,为了清楚明确地表示相关物理量的关系,常将数据或处理数据的结果列成表格。一般的要求如下:

- (1)必须有标题,说明是什么量的关系式。
- (2)必须注明表中各符号所表示的物理量的名称,并写明单位。
- (3)表中的数据要正确反映测量值的有效数字。
- (4)必要时可对某一项目加以说明。

列表法示例,如表 1-4 所示。

表 1-4 测定铜的电阻温度系数 $R-t$ 的关系

测量次序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
温度 $t/^\circ\text{C}$	23.1	30.8	40.6	50.2	61.0	71.1	80.6	90.0	92.8	95.0	98.4
电阻 R/Ω	5.093	5.239	5.438	5.615	5.838	6.029	6.218	6.405	6.470	6.515	6.580

1.5.2 作图法

为了能直观地表达所测物理量之间的关系,找出它们的变化规律,物理实验所得出的一系列数据常用作图法来进行研究。作图法是求经验公式的常用方法之一。

1. 作图规则

- (1)根据函数关系选择适当的坐标纸(直角坐标纸、单时效坐标纸、双时效坐标纸、极坐

大学物理实验

标纸等),选择合适的比例,画出坐标轴的方向,标明物理量、单位和分度值,最好还在图上的明显部位写上图的名称和主要测试条件。

(2)光滑曲线的测试点应当用符号“+”或“×”标出,不要用“·”表示。实验数据应当与交叉点相对应。如果在同一图上绘几条曲线,属于不同曲线的点应当采用不同的标记。

(3)把点连成直线或光滑曲线时,不要强求让曲线通过所有的点,但线两侧的点应大体相当,点到线的距离尽可能地接近,个别偏离过大的点应重新核对,若确系失误可以删去。有些情况,如画校正曲线,应将点连成折线。

(4)坐标原点不一定是变量的零点,可以根据测量点的范围加以选择,坐标轴的比例应根据所测数据的有效位数和实际需要而确定。原则上有效位数的最后一位可靠数应与图形上的最小分格(或2格)相当。坐标轴的纵轴与横轴比例要选择适当,尽量不要使曲线处在坐标纸的一角。

(5)利用测量得到的直线求解时,为了减小误差,用来计算的点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 不应取得太近,也不应取原数据点。因为这将会失去作图取平均值的意义。斜率可用公式

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \text{ 求得。}$$

如果要从图线上求直线的截距,则横坐标的坐标原点必须是 $x=0$ 点,此时直线与纵轴的交点A到原点的距离即为(直线的)截距 b 。如果截距不能从图上直接得出,也可以再在直线上取点 (x_3, y_3) ,再由式 $b = y_3 - kx_3$ 求出。

2. 函数关系的线性化和曲线改直

在实验中,许多物理量之间的关系都不是线性的,但经过适当的变换可以使两个变量的函数具有线性关系,这种方法称为函数关系的线性化。如果原来的函数关系是用曲线表示的,则函数关系线性化后,可以用直线来表示,这称为“曲线改直”。现举例如下:

(1) $y = ax^b$,其中 a, b 均为常数,两边取对数得

$$\ln y = \ln a + b \ln x$$

若以 $\ln x$ 为自变量, $\ln y$ 为函数,则得到斜率为 b 、截距为 $\ln a$ 的直线。

(2) $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$,两边平方得

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g}L$$

若以 L 为自变量, T^2 为函数,则得到斜率为 $\frac{4\pi^2}{g}$ 的直线。

(3) $PV = c$,其中 c 为常数,若把此式写为 $P = c \frac{1}{V}$,则 P 为 $\frac{1}{V}$ 的线性函数。

1.5.3 逐差法

逐差法是物理实验中经常使用的处理数据的一种方法。

设有 $2n$ 个数据 $x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{2n}$,用逐差法处理这些数据时,把它们对半分成两组: x_1, x_2, \dots, x_n ,和 $x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{2n}$,然后隔 n 项逐项求差,即两组中的对应项相减,得差值为

$$\delta_1 = x_{n+1} - x_1, \delta_2 = x_{n+2} - x_2, \dots, \delta_n = x_{2n} - x_n$$

则差值的平均值为

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \cdots + \delta_n}{n} \quad (1-19)$$

若有 $2n-1$ 个数据,用逐差法处理数据时,把它们分成两组:

$$x_1, x_2, \cdots, x_{n-1} \text{ 和 } x_{n+1}, \cdots, x_{2n-1}$$

然后逐项求差。注意这里第 n 个数据 x_n 没用上。

1.5.4 最小二乘法

从实验数据直接求得经验公式的方法,称为方程回归法。为简单起见,这里介绍一元线性回归。

设自变量 x 是给定的精确值,而因变量 y 的误差具有随机的性质。对两个变量测得 n 组等精度数据,即 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \cdots, (x_n, y_n)$ 。假定变量 x 与 y 的关系是线性的,则回归方程的形式为

$$y = ax + b \quad (1-20)$$

这是一条直线,那么怎样根据这几组数据求出系数 a 和 b 呢?

由于测得的 (x_i, y_i) 总是不可能落在式(1-20)所表示的直线上,对于与某一个 x_i 相对应点与用回归法求得的直线式(1-20)在 y_i 方向的偏差为

$$\epsilon_i = y_i - y'_i = y_i - ax_i - b \quad (1-21)$$

我们这样来拟合回归方程(1-20),即要使 $\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2$ 为最小,这就是最小二乘法原理,可写成

$$\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 \quad (1-22)$$

为了求 $\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2$ 的最小值,把式(1-22)对 a 和 b 求偏微商,应用对多元函数求极值的方法,可求得 $\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2$ 最小时,对应的 a 和 b 分别为

$$a = \frac{n \sum (x_i y_i) - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{l_{xy}}{l_{xx}} \quad (1-23)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x} \quad (1-24)$$

其中

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

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$l_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)$$

$$l_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2$$

式(1-23)和式(1-24)求出的 a 和 b ,就是用最小二乘法对回归直线的斜率和截距的估

大学物理实验

计值。

对我们测到的数据点 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, n)$, 如果变量 x 与变量 y 具有密切的线性关系, 那么这些实验数据点密集地分布在所求回归直线的近旁, 即线性回归是正确的, 但如果变量 x 与变量 y 并不具有密切的线性关系, 那么这些实验数据点将远离所求回归直线, 即线性回归无意义, 必须用其他的函数形式重新试探。

线性相关系数是表示变量 x 与变量 y 之间线性关系密切程度的量, 即

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx}l_{yy}}} \quad (1-25)$$

其中

$$l_{yy} = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2$$

可以证明: 线性相关系数的绝对值总是介于 0 与 1 之间, $r=0$ 表示 x 与 y 完全不相关, $|r|=1$ 表示数据点 (x_i, y_i) 全部都在回归直线上。

表 1-5 列出了相关系数起码值 r_ϵ , 只有当 $|r| > r_\epsilon$ 时, 才能认为 x 与 y 完全是线性相关的。

表 1-5 相关系数检验

n	5	6	7	8	9	10
r_ϵ	0.959	0.917	0.874	0.834	0.798	0.765
n	11	12	13	14	15	16
r_ϵ	0.735	0.708	0.684	0.611	0.641	0.623
n	17	18	19	20	21	22
r_ϵ	0.606	0.590	0.575	0.561	0.549	0.537

为了描述回归直线的精度, 引入“剩余标准差”的概念, 即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{(1-r^2)l_{yy}}{n-2}} \quad (1-26)$$

在出现的全部数据点 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, n)$ 中, 约有 68.3% 的点落在两条直线 $y=(ax+b)-\sigma$ 和 $y=(ax+b)+\sigma$ 的范围内。用线性回归法所求出的系数 a 和 b 的标准偏差可用下述公式计算:

$$\sigma_a = \frac{\sigma}{\sqrt{l_{xx}}} \quad (1-27)$$

$$\sigma_b = \sigma_a \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (1-28)$$

思考题

(1)指出下列各种情况是属于偶然误差还是属于相对误差。

- ①读书时的“视差”
- ②游标卡尺或螺旋测微器的零点不准
- ③水银温度计的毛细管不均匀
- ④电表没有“调零”
- ⑤米尺的热胀冷缩

(2)计算下列数据的算术平均值、绝对误差和相对误差。

- ①320.5, 321.0, 320.0, 319.9, 320.2, 320.6, 320.4
- ②7.35, 7.31, 7.36, 7.33, 7.35, 7.32, 7.35, 7.38
- ③1.86, 1.85, 1.88, 1.84, 1.86, 1.87, 1.85, 1.80

(3)计算下列数据的平均值和平均值的标准差。

- ①2.04, 2.03, 2.03, 2.00, 2.02, 2.04, 2.01, 2.06, 2.08
- ②12.0, 11.8, 11.9, 12.1, 12.0, 12.2, 12.0, 19.9, 19.8

(4)比较下述三个长度的相对误差的大小： $L_1 = (54.98 \pm 0.02) \text{ cm}$, $L_2 = (0.498 \pm 0.020) \text{ cm}$, $L_3 = (0.0098 \pm 0.0002) \text{ cm}$ 。

(5)指出下列各式的错误,并加以改正。

- ① $L = (2.013 \pm 0.1) \text{ mm}$
- ②280 毫米 = 28 厘米
- ③ $m = (104.52 \pm 1.34) \text{ 克}$
- ④ $E_y = 1.25\%$

(6)写出下列函数误差表示式(等号右边除常数外,均为直接测量量)。

- ① $y = x_1 + 2x_2 - 3x_3$
- ② $R = \frac{l_1}{l_2} R_0$
- ③ $I_2 = I_1 \frac{r_1^2}{r_2^2}$
- ④ $f = \frac{uv}{u+v}$
- ⑤ $y = \frac{x_1 - x_2}{3x_3}$
- ⑥ $y = x_1 + \frac{x_2^2}{x_3}$
- ⑦ $f = \frac{L^2 - 1}{4L}$
- ⑧ $N = \frac{\sin i}{\sin r}$

(7)指出下列各数的有效数字的位数。

- ①真空中的光速 $C = 2.997\,924\,580 \times 10^8 \text{ m/s}$
- ②电子的电量 $e = 1.602\,189\,2 \times 10^{-19} \text{ C}$
- ③电子的质量 $m = 9.109\,534 \times 10^{-31} \text{ kg}$
- ④普朗克常数 $h = 6.626\,176 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

(8)利用有效数字的运算规则计算下列各式。

- ① 86.852 ± 2.6
- ② $105.50 - 3.5$
- ③ 111×0.100
- ④ $240.5 \div 0.10$
- ⑤ $\frac{4 \times 10.90}{\pi 0.62^2 \times 2.7}$
- ⑥ $\frac{200.0 \times (5.6 + 4.412)}{10.3 \times (2.0 - 1.08)}$

物理实验的基础知识

2.1 物理实验思想和方法的形成

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用和转化规律的学科。它本身以及它与各个自然学科、工程技术部门的相互作用创造了今天的科技进步和人类文明,为当代及未来高新科技的进步、相关产业的建立和发展提供了巨大的推动力。

在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现了一系列科学的世界观和方法论,深刻影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活,是人类文明的基石。物理学发展到公元十六七世纪,吉尔伯特和伽利略等一批科学家把实验方法与物理规律的研究结合起来,对物理学的发展做出了跨时代的贡献。伽利略是其中杰出的代表。

伽利略是近代物理学的先驱者,他对物理学做出了多方面的贡献。他发现的落体定律和惯性定律为近代物理学提供了两块坚固的基石。伽利略的成功,得益于他率先采用了科学的物理实验,更得益于他独创的物理实验与思想实验相结合的科学方法。他做了摆的实验,说明单摆的周期与摆长的平方根成正比,而与摆的质量和材料无关。他做了斜面实验,验证了物体在重力作用下做等加速运动的性质,总结出物体从静止开始做等加速运动时,运动的距离与时间的平方成正比的普通公式,并且利用几何关系建立了等加速运动的平均速度与末速度关系的数学表达式。他还根据实验事实或利用演绎推理得出许多物理学的理论结论。

伽利略首先为自然科学创立了两个研究法则:将实验和数学相结合、真实实验和理想实验相结合的科学研究方法,从而创造了和以往科学研究方法不同的近代科学研究方法,使近代物理学从此走上了以实验精确观测为基础的道路。伽利略之后,随着科技的发展和认识活动的深入,思想实验在物理学中得到了日益广泛的运用,出现了马赫、爱因斯坦等善于使用思想实验的物理学家。在物理学的各个分支中产生了一些著名的思想实验。例如,在力学中,有证明粒子波动性的单电子衍射实验、能量势阱等思想实验,有证明测不准关系的理想显微镜实验、电子束单缝衍射实验,等等;在相对论中,有证明同时性、相对性的“爱因斯坦列车”“光子火箭”的思想实验等。可以说没有思想实验,物理学的发展是困难的,它的理论体系是建立不起来的。物理学中的思想实验必须具有的基本特点是:实验的可操作性、严密的逻辑性、高度的创造性。

伽利略开创的实验物理学(包括实验的设计思想和实验方法)开创了自然科学发展的新局面。在实验物理学数百年的发展进程中,出现了许多在物理学发展史上起过里程碑作用的实验。它们以巧妙的物理构思、独到的处理和解决问题的方法、精心设计的仪器、完善的实验安排、高超的测量技术、对实验数据的精心处理和无懈可击的分析判断等,为我们展示了极其丰富和精彩的物理思想,开创了解决问题的途径和方法。这些思想和方法已经超越了各个具体实验而具有普遍的指导意义。学习和掌握物理实验的设计思想、测量和分析的方法,对物理实验课及其他学科的学习和研究都大有裨益。

2.2 物理实验的基本测量方法

一切描述物质状态和运动的物理量都可以从几个最基本的物理量中导出,而这些最基本物理量的定量描述只有通过测量才能得到,其内容广泛,涉及物理学领域许多物理量的测量,测量方法也不同。在此,仅介绍物理实验中遇到的几种基本测量方法。

2.2.1 比较测量法

比较测量法是物理实验中最普遍、最基本的测量方法,它是将待测量与标准量进行比较来确定测量值的。比较测量法按比较方式可分为直接比较法和间接比较法两种。

1. 直接比较法

直接比较法是将待测量与同类物理量的标准量直接比较、测量的方法,如用米尺测长度、用天平测质量、利用平衡法(如电势差计、电桥等)通过和标准电压或标准电阻的比较测电压或电阻等。直接比较法的特点是标准量与待测量之间的量纲相同,且简便实用、准确,它几乎存在于一切物理量测量中。但它也有一定的局限性,即要求标准量必须与待测量有相同的量纲且大小可比。例如,用米尺可以测定桌椅的尺寸,却不能测量原子的间距。

直接比较法的测量精度取决于标准量具(或测量仪器)的准确度。因此,标准量和测量仪器一定要定期校准,还要按照规定条件使用,否则就会产生很大的系统误差。

2. 间接比较法

很多待测量是无法直接比较的,只能通过间接比较的方法进行测量,即设法利用某些关系将它们转换成能够直接比较的物理量进行间接比较。例如,电流、电压表等均采用电磁力矩与游丝力矩平衡时,电流大小与电流表指针的偏转角度之间有一一对应关系而制成;温度计采用物体体积膨胀与温度的关系制成。虽然它们都能直接读出结果,但根据其测量原理应属间接比较。间接比较法是直接比较法的延续与补充。

应当指出,间接比较法是以物理量之间的函数关系为依据的。为了使测量更加方便、准确,在可能的情况下,应当尽量将上述物理量之间的关系转换成线性关系,使读数能以均匀刻度实现。例如,磁电系电表为了使电流与偏转角之间成线性关系,设计时通过在线圈中加一铁芯,使磁场由横向变为轴向,得到线圈转角 φ (或偏转格数 n)正比电流 I ,即

$$I = \frac{D}{BNS} \varphi$$

这样,在表盘上刻以均匀刻线,使读数比较方便、准确。

有时,只有标准量还不够,需要借助其他的仪器设备或装置,即组成比较系统,使待测量

大学物理实验

与标准量能够实现比较。例如,只有标准电池不能测量电压,还需要电势差计及其他附属配件组成比较系统,才能测量电压。

测量中常用的互换法和置换法是将待测量与标准量换位测量来消除系统误差,它们都可视为间接比较法。广义地看,所有的物理量测量都是待测量与标准量进行比较的过程。只不过有时比较形式不明显。

2.2.2 放大测量法

当待测量或待测信号数值过于小无法测量时,可以通过某种途径将其放大再进行测量,这种方法称为放大测量法,简称放大法。待测量不同,放大的原理和方法也不同,常用的放大法有以下几种:

1. 累积放大法

例如,一根很细的金属丝,要直接用毫米尺测出它的直径是很困难的,这时可以把它密绕在一个光滑且直径均匀的圆柱体上,用毫米尺测量 n 匝的长度 L ,则 L/n 就是细丝的直径, n 就是放大倍数。再如,测定单摆振动周期,测 1 次摆动时, $t=T$,周期测量误差为 $\Delta T=\Delta t$,即周期的测量误差等于秒表的误差;而测 100 次摆动时, $t=100T$,周期的测量误差则为 $\Delta T=\Delta t/100$,由于增加了摆动次数,虽然计时仪器误差 Δt 并未改变,但是周期的测量误差却大为降低,因而提高了测量准确度。又如,测量劈尖干涉条纹间距或光栅常数 l 时,可以测量 n 个条纹或光栅常数的长度 $L=nl$,从而得到干涉条纹间距或光栅常数。

以上几个测试所采用的方法都有先决条件,即细丝的直径必须均匀,每次摆动的周期必须相同,干涉条纹间距或光栅常数应均匀。这种方法即称为累积放大法。

2. 机械放大法

机械放大法是利用机械原理及相应的装置将待测量进行放大测量的方法。例如,螺旋测微计由主尺和鼓轮组成,测长就是将沿螺距的移动转化为沿周长的移动。若螺距为 0.5 mm,鼓轮上划分 50 格,则放大倍数为 100 倍。由于放大作用提高了测量仪器的分辨率,由 1.0 mm 提高到 0.01 mm,从而提高了测量准确度。游标卡尺也是利用放大原理将主尺上的 1.0 mm 放大为游标上的 n 格, n 一般为 10,20 和 50,仪器的分辨率分别提高到 0.1 mm,0.5 mm,0.02 mm。而迈克尔逊干涉仪则是将游标放大和螺旋放大结合起来,位移分辨率可达 0.000 1 mm,从而实现了精密测量。

3. 电学放大法

借助于电路或电子仪器将微弱的电信号放大后进行测量的方法,称为电学放大法。电学放大中有直流放大和交流放大,有单级放大和多级放大,放大率可以远高于其他放大方式。为了避免失真,要求电学放大的过程尽可能是线性放大,还要求抗外界干扰(温度、湿度、振动、电磁场影响),性能好,工作稳定,不发生漂移。

4. 光学放大法

光学中利用透镜和透镜组的放大构成各种光学仪器,既可“望远”又可“显微”,这已成为精密测量中必不可少的工具。光学显微镜就是光学放大仪器的典型例子,它的放大倍数最高可以达到 1 000 倍左右。除了直接进行光学放大外,还可以利用光学原理进行转换放大,在以后实验中将要用到的光杠杆法就是一例。

2.2.3 平衡测量法

“平衡”是物理学上的一个重要概念。利用满足某种平衡条件实现对物理量的测量就称为平衡测量法。例如,天平利用力学平衡原理实现了物体质量的测量;单臂电桥利用电流、电压等电学量之间的电学平衡,可以测量电阻。同样,稳态法也是平衡测量法在物理测量中的具体应用,是物理实验经常采用的测量方法。当物理系统处于静态或动态平衡时,系统内的各项参数不随时间变化,利用这一状态所进行的测量就是稳态测量。例如,测定不良导体的导热系数时,只有在稳定条件下,才满足导热速率等于散热速率这一关系,这是稳态法测导热系数的基本条件。

2.2.4 补偿测量法

若某测量系统受某种作用产生 A 效应,同时受另一种同类作用产生 B 效应,如果 B 效应的存在使 A 效应显示不出来,则称 B 对 A 进行了补偿。利用这一原理进行物理测量的方法就称为补偿测量法。补偿测量法大多用在补偿测量和补偿校正系统误差两个方面,往往与比较测量法结合使用。

完整的补偿测量系统由待测量装置、补偿装置、测量装置和指零装置组成。待测量装置产生待测效应,要求待测量尽量稳定,便于补偿。补偿装置产生补偿效应,要求补偿量值准确达到设计精度。测量装置将待测量与补偿量联系起来进行比较。指零装置是一个比较仪器,由它来显示待测量与补偿量是否达到完全补偿。例如,电势差计利用电压补偿法可以精确测定未知电势差或电压。

另外,在某些测量中,由于存在某些不合理因素而产生系统误差,且无法排除,于是人们想办法制造另一种因素去补偿不合理因素的影响,使这种影响减弱或消失,这个过程就是用补偿测量法校正系统误差,如箱式电势差计中的温度补偿,迈克尔逊干涉仪中的光路补偿,等等。

2.2.5 模拟测量法

模拟测量法是以相似理论为基础,把不能或不易测量的物理量用与之类似的模拟量进行替代测量。模拟测量法一般可以分为以下两种:

1. 物理模拟法

物理模拟法是在相同物理本质的前提下,对物理现象或过程的模拟。例如,航空、航天飞行器研究中的风洞实验,可以模拟出一个与实际情况相同的大气环境;水洞可以从事水动力学方面的模拟实验;等等。这种方法的特点是在较短的时间内,以较小的代价,方便可靠地取得有关数据。

2. 数学模拟法

数学模拟法又称为类比法,这种模拟的模型与原型在物理形式上和实质上可能毫无共同之处,但它们却遵循着相同的数学规律。例如,机电(力电)类比中,力学的共振与电学的共振虽然不同,但它们却有相同的二阶常微分方程,声电类比也是如此。在物理实验中,静电场既不易获得,又易发生畸变,很难直接测量,可以用稳恒电流场来模拟静电场。

随着计算机技术的不断发展和应用,用计算机进行的模拟实验越来越多,并且能够有效

地将两种模拟方法相结合,取得更好的结果。

2.2.6 转换测量法

转换测量法是根据物理量之间的各种效应和定量函数关系,利用变换原理将不能或不易测量的物理量转换成能测或易测的物理量。由于物理量之间的关系是多种多样的,物理效应丰富多彩,因此有各种不同的转换法。随着科学技术的不断发展,这种方法已经渗透到各学科领域。科学实验能够不断地向高精度、宽领域、快速测量、遥感测量和自动化测量发展,也与转换测量法密切相关。

转换测量法实际上是间接测量法的具体应用,一般分成参量转换法和能量转换法两大类。

1. 参量转换法

参量转换法是利用各物理量之间的函数关系进行的间接测量。例如,伏安法测电阻,单摆测量重力加速度,以及前面讲到的间接比较法都属于此类。

2. 能量转换法

与参量转换法不同,能量转换法是将一种形式转换为另一种形式的物理量之间的对应关系所进行的测量。这种方法在物理实验中大量存在,其中应用最多的是非电量的电测技术,实现转换的主要部件是传感器(有时称换能器)。例如,在“超声声速的测量”实验中,利用压电换能器将电信号转换为压力变化产生超声波发射,又利用其逆变化将接收的声波信号转换回电信号在示波器上显示,由此测定声音在空气中的传播速度,这种变化称为压电转换;在“固体材料线膨胀系数的测量”实验中,利用霍尔元件的霍尔效应,可以将磁感应强度转换为电流、电压或其他电学量,这种转换称为磁电转换;“测量不良导体导热系数”实验中的热电偶和“热敏电阻数字温度计的设计与制作”实验中的热敏电阻,都可以将温度变化转化为电学量,从而实验对温度的测量,这种变化称为热电转换;“光电效应测量普朗克常数”实验中的光电管及“气垫导轨实验”中的光电二极管等,可以将光信号转换为电信号,实现光电转换。非电量的电测技术及各种类型的传感器已经发展成多个专门学科,在科研、生产各个领域获得了广泛的应用。

本章介绍了几种基本实验方法。但是每一种方法都不是孤立的,有些实验中可能是多种方法的结合,大家一定要在大学物理实验学习阶段善于总结,注意它们之间的互相联系,学会灵活运用和综合使用,以便在今后的工作中有所发明、创造。

2.2.7 近代物理实验中的其他方法

随着当今高新科学技术的发展日益趋于交叉综合,信息技术、新材料技术和新能源技术已成为高新技术的重要组成部分。近代物理的实验方法、实验技术和分析技术在高新技术的各个学科和领域都得到广泛的应用,并对高新技术和人类社会的发展起着巨大的推动作用。磁共振技术与方法、低温和真空技术、核物理技术与方法、扫描隧道显微技术与方法、薄膜制备技术与物性研究等现代物理实验方法与技术,都是高新技术领域常用的近代物理实验方法,有关它们的详细原理和方法在这里不赘述。

2.3 物理实验基本调整技术

使用仪器、仪表和装置测量之前,应首先对这些设备的工作状态进行调整,以达到最佳状态。这样才能将设备装置产生的系统误差减小到最低限度,保证测量结果的准确性和有效性。

2.3.1 零位调整

在测量之前应首先检查各仪器的零位是否正确。虽然仪器出厂时已经校准,但由于搬运、使用磨损或环境的变化等原因,其零位往往会发生变化。如果实验前未进行检查和校准,那么测量结果中将人为地引入系统误差。

零位校准时,如果测量仪器(如电表等)本身有零位校准器,可直接进行调整,使仪器在测量前处于零位。若仪器(如磨损了的米尺、游标卡尺、螺旋测微计等)零位不准,且无法调整和校准,则需在测量前记录初读数,以备在测量结果中加以修正。

2.3.2 水平、铅直调整

物理实验所用的仪器或装置,有些需要进行水平或铅直调整,如平台的水平、支柱的铅直等。大部分需调整的仪器或装置自身装有水准仪或铅锤,底座有两个或三个(排成等边或等腰三角形)可调节的螺丝,只需调节螺丝,使水准仪的气泡居中或铅锤的锤尖对准底座上的座尖,即可达到调整要求。对有些没有水准仪或铅锤的仪器,需要调节水平或铅直时,可用自身装置进行调整。

对于既没有配置水平仪又不能自身装置来调整水平的仪器,可选用相应的水准仪来调整。例如,用长方形水准仪来调整一般的平面,可在互相垂直的两个方向上调整;用圆形水准仪可较方便地调整较小的圆形平面,如三线摆的上下圆盘、分光计的载物平台等。

2.3.3 消除视差调整

使用仪器测量读取数据时,会遇到读数准线(如电表的指针、光学仪器中的叉丝等)与标尺平面不重合的情况,这时观察者的眼睛在不同方位读数时,得到的示值会有一些的差异,这就是视差。

有无视差可根据观察者在调整仪器或读取示值,眼睛上下或左右稍稍移动时,观察标线与标尺刻线间是否有相对移动来判断。要避免视差的出现,一般仪器仪表在读数时应做到正面垂直观测。例如,精密的电表在刻度盘下有平面反射镜,读数时应垂直正视,当指针和其平面镜中的像重合时,读出的标尺上的示值才是无视差的正确数值。

在光学实验中,消除视差是测量前必不可少的操作步骤。测量用光学仪器,如测微目镜、望远镜、读数显微镜等,在其目镜焦平面内侧装有作为读数准线的十字叉丝(或是刻有读数准线的玻璃分划板)。当用这些仪器观测待测物体时,有时会发现随着眼睛的移动,物体的像与十字叉丝或分划板间有相对位移,这说明两者之间有视差存在。调节目镜(包括十字叉丝)与物镜的距离,边调节边稍稍移动眼睛进行观察,直到十字叉丝与物体所成的像之间基本无相对移动,则说明被测物体经物镜成像到十字叉丝所在的平面上,视差消除。

2.3.4 等高共轴调整

在由两个或两个以上的光学元件组成的实验系统中,为获得高质量的像,满足近轴成像的条件,必须使各光学元件的主光轴重合,这就需要在观测前进行共轴调整。调整可分两步进行,首先进行目测粗调,把光学元件和光源的中心调到同一高度,同时调节各光学元件相互平行,这时各光学元件的光轴已接近重合;然后依据光学成像的基本规律来细调,调整可根据自准直法、二次成像法(共轭法)等,利用光学系统本身或借助其他光学仪器来进行。为了读数准确,还需把光轴调整得与光具座平行,即各光学元件与光具座等高且光学元件中心截面与光具座垂直。

2.3.5 逐次逼近法

仪器的调整都需经过仔细的反复调节,才能达到预期目的。依据一定的判据,由粗及细逐次缩小调整范围,快捷而有效地获得所需状态的方法,称为逐次逼近法。物理实验中常采用逐次逼近法进行调整,特别是运用零示法的实验或零示仪器,如天平测质量、电势差计测电压或电动势、电桥测电阻等实验;此外,逐次逼近法在光路共轴调节、分光计调节中也会用到。

2.4 物理实验基本操作技术

2.4.1 先定性后定量原则

实验前,通过预习实验内容对所使用的仪器设备都已经有所了解;实验时,不要急于获取实验结果,而是应遵循先定性后定量的原则进行实验。具体做法是:仪器调整好后,在进行定量测定前,先定性地观察实验变化的全过程,了解物理量的变化规律。对于有函数关系的两个或多个物理量,要注意观察一个量随其他量改变而变化的情况,得到函数曲线的大致图形;在定量测试时,可根据曲线变化趋势分配测量间隔,曲线变化平缓处,测量间隔大些,曲线变化急剧处,测量间隔小些。采用由不同测量间隔测得的数据作图比较合理。

2.4.2 电学实验操作技术

电学实验需要电源、电气仪表、电子仪器等,许多仪表都很精密,实验中既要完成测试任务,又要注意人身安全和仪器的安全,为此应注意以下几个方面:

1. 安全用电

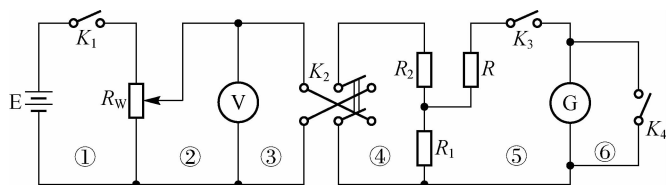
实验中的常用电源有 220 V 交流电和 0~30 V 直流电,有的实验电压高达上万伏,一般人体接触 36 V 以上的电压,就会有触电的危险。因此,实验中一定要注意用电安全,不要随意移动电源,接、拆线路时应先关闭电源,测试中不要触摸仪器的高压带电部位,能单手操作的,不要双手操作。

2. 合理布局

实验前对实验线路进行分析,按实验要求安排布置仪器,布局应遵循便于连线与操作,易于观察,保证安全的原则。需经常操作和读数的仪器放在面前,开关应放在便于使用的位置。

3. 正确接线

正确接线方法如下图所示。



正确接线方法

接线前应先将开关断开,弄清电源及直流电表的“+”“-”极性,然后从电源的正极开始,从高电位到低电位依次连接。如果电路比较复杂,可分成几个回路,按电路图的逐个回路接线,一个分回路接完后再接另一个分回路。例如,上图所示的电路可以分为6个回路(①~⑥),连线时应从回路①开始,依次连接到回路⑥。连线时,要合理分配每个接线端上的导线,注意利用等势点使每个接线端的线尽量少,还要注意接头要旋紧。电路接线完成后通电前,必须进行复查,确认电路无误,经指导教师检查同意后,才可接通电源进行实验。

4. 通电试验

通电试验前,各器件要同时调节到安全位置。当不知电压或电流的大小时,电表应取大量程,分压器应调到输出电压最小的位置,限流器的阻值要调到最大。

接通电路的顺序为:先接通电源,再接通测试仪器(如示波器等);断电时顺序相反。其目的是以防电源通或断时因含有感性元件产生瞬间高压而损坏仪器。接通电源时,应关注所有的仪器和元件,发现异常应立即切断电源,进行排查。实验过程中要暂停实验或改接电路时,必须断开电源。

5. 断电与拆线

实验完成后,经教师检查数据合格后,先切断电源,再拆除线路,拆线要按与接线相反的顺序进行。同时要整理好仪器,并注意将仪器恢复到原来状态。有零点保护的仪器(如灵敏检流计)要置于保护状态(开关扳至短路挡)。

2.4.3 光学实验操作技术

1. 光学仪器的使用

(1)光学仪器是精密仪器,其机械部分大都经过精密加工,易损坏,有些仪器结构复杂,使用之前需进行仔细调整,操作时动作要轻缓,用力均匀平稳,以达到最佳使用状态。仪器应在通风、干燥和洁净的环境中使用和保存,以防受潮后发霉、受腐蚀。对长期搁置不用或备用的仪器,要按仪器说明妥善保管,并定期进行保养。

(2)光学元件大部分都是用特种玻璃经过精密加工制成的,光学面经过精细抛光,表面光洁(如三棱镜),有些元件表面有均匀镀膜(如平面反射镜),使用时要防止磕、碰、打碎,取放时手不要接触光学面,避免擦、划和污损表面。若光学元件表面不干净,则需根据元件表面的具体情况,或用镜头纸,或用无水乙醇、乙醚等来处理,切忌哈气、手擦等违规操作。光学仪器、元件平时要注意防尘。

(3)对于光学实验所用的各种光源,实验前应了解其性能、正确使用,光源的高压电源要注意防护。高亮度的光源不要直视,特别是激光,绝对不要用眼睛正视,以防灼伤眼睛。

大学物理实验

(4)在暗房工作,各种器皿、药品要按固定位置摆放,不能随意放置,以防用错药品,造成操作失误。

以上几点只是一般光学仪器和元件使用时应注意的问题。随着科学技术的发展,实验仪器、设备不断更新,对于特殊的光学仪器和元件,操作技术会有特殊要求,使用与保管时应具体问题具体对待。

2. 成像位置的判断

光学实验中,有时要根据成像位置完成物理量的测量,这时对成像位置的准确判断是很重要的。例如,在透镜焦距的测量实验中,需要测量物距和像距,才能计算出焦距。根据透镜成像规律,像与物之间是共轭的,只有在共轭像面上才能得到理想的像。要准确地确定共轭像面的位置,必须有意识地找出焦深范围,即前后移动光屏,找到像开始变模糊的前后两个位置,两个位置之间的距离即为焦深。焦深的中点就是共轭像面的位置。

思考题

- (1)放大测量法主要有哪几种? 分别举出几例。
- (2)举例说明平衡测量法的测量原理。
- (3)简述补偿测量法的主要思路。
- (4)物理模拟与数学模拟有什么不同?
- (5)你见过的能量转换法中的传感器有哪些? 举出几例。
- (6)如果不对仪器进行零位调整会产生什么误差?
- (7)使用光学仪器(如测量显微镜、望远镜等)时应如何消除视差?
- (8)光学实验中的等高共轴调整主要分哪两步?
- (9)简述电学实验中正确接线的基本方法。

实验 3.1 互成角度的两个力的合成及 弹力与弹簧伸长关系的探索

【实验目的】

- (1) 验证力的合成的平行四边形法则。
- (2) 探索弹力与弹簧伸长的关系。
- (3) 学会图像处理数据的方法。

【实验原理】

1. 验证力的合成的平行四边形法则

如果用表示两个共点力 F_1 和 F_2 的线段为邻边作平行四边形,那么,合力 F 的大小和方向就可以用这两个邻边之间的对角线表示出来,这叫作力的平行四边形法则。

如果有两个以上的共点力作用在物体上,我们也可以应用平行四边形法则求出它们的合力:先求出任意两个力的合力,再求出这个合力跟第三个力的合力,直到把所有的力都合成进去,最后得到的结果就是这些力的合力。

根据力的平行四边形法则作图,可以看出,力 F_1 和 F_2 的合力 F 的大小和方向随着 F_1 和 F_2 之间夹角的变化而变化。当夹角等于 0° 时,力 F_1 和 F_2 在同一直线上且方向相同, $F=F_1+F_2$,合力的大小等于两个力之和,合力的方向跟两个力的方向相同。当夹角为 180° 时,力 F_1 和 F_2 在同一直线上但方向相反, $F=|F_1-F_2|$,合力的大小等于两个力的大小之差,合力的方向跟两个力中较大的那个力的方向相同。

2. 探索弹力与弹簧伸长的关系

发生形变的物体,由于要恢复原状,对跟它接触的物体会产生力的作用,这种力叫作弹力。

大学物理实验

弹簧受到拉力会伸长,平衡时弹簧产生的弹力和外力大小相等。弹簧的伸长越大,弹力就越大。可以用悬挂砝码的方法给弹簧施加拉力,用直尺测量弹簧的伸长或总长。但拉力不要太大,以免弹簧被过分拉伸,超出它的弹性限度。

【实验器材】

方木板、白纸、弹簧秤、橡皮条、三角板、刻度尺、图钉。

【实验操作】

1. 验证力的合成的平行四边形法则

(1)安装仪器。

(2)用一个测力计通过细绳套拉橡皮绳,将其末端拉至某点 O ,记录 O 点的位置;细绳套的取向,即合力 F 的方向;测力计的示数,即合力 F 的大小。

(3)以 O 点为起点,按比例做出表示合力 F 的线段,并画上箭头表示其方向。

(4)用两个测力计,通过两个细绳套同时沿不同的方向拉橡皮绳,将其末端仍然拉至 O 点,并记录两个细绳套的取向,即两个分力 F_1, F_2 的方向;两个测力计的示数,即两个分力 F_1, F_2 的大小。

(5)以 O 点为起点,按比例分别做出表示分力 F_1, F_2 的线段,并画上箭头表示它们的方向。

(6)用表示两个分力 F_1, F_2 的线段为邻边作平行四边形,再做出这个平行四边形的处于 F_1, F_2 之间的那条对角线。

(7)比较这条对角线与表示合力 F 的线段,即可验证力的合成的平行四边形法则。

(8)改变两个细绳套的取向,重复步骤(4)~(7),使验证的结论更具普遍性。

(9)整理实验仪器及桌面。

2. 探索弹力与弹簧伸长的关系

(1)测量弹簧的伸长(或总长)及所受到的拉力(或所挂砝码的质量),列表(见表3-1)进行记录。多测几组并分别记录。

表 3-1 砝码质量与标尺刻度测量记录

砝码质量 m								
标尺刻度 x								

(2)根据所测数据在坐标纸上描点,以力为纵坐标,以弹簧的伸长为横坐标。

(3)按照图中各点的分布和走向,尝试做出一条平滑曲线。

(4)以弹簧的伸长为自变量,写出曲线所代表的函数。

(5)解释函数表达式中常数的物理意义。

(6)整理实验仪器及桌面。

思考题

某同学用图3-1所示的装置做弹力与弹簧伸长关系的实验。他先测出不挂砝码时弹簧下端所指的标尺刻度,然后在弹簧下端挂上砝码,并逐个增加砝码,测出指针所指的标尺

刻度,所得数据列于表 3-2 中。(重力加速度 $g=9.8 \text{ m/s}^2$)

表 3-2 实验 1 思考题用表

砝码质量 $m/10^2 \text{ g}$	0	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
标尺刻度 $x/10^{-2} \text{ m}$	15.00	18.94	22.82	26.78	30.66	34.60	42.00	54.50

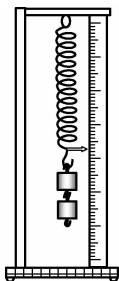


图 3-1 弹力与弹簧伸长关系的实验装置

(1) 根据所测得的数据,在坐标纸上(见图 3-2)做出弹簧指针所指的标尺刻度 x 与砝码质量 m 的关系曲线。

(2) 根据所测得的数据和关系曲线可以判断,在_____ N 范围内弹力的大小与弹簧伸长的关系满足胡克定律。这种规格弹簧的劲度系数为_____ N/m。

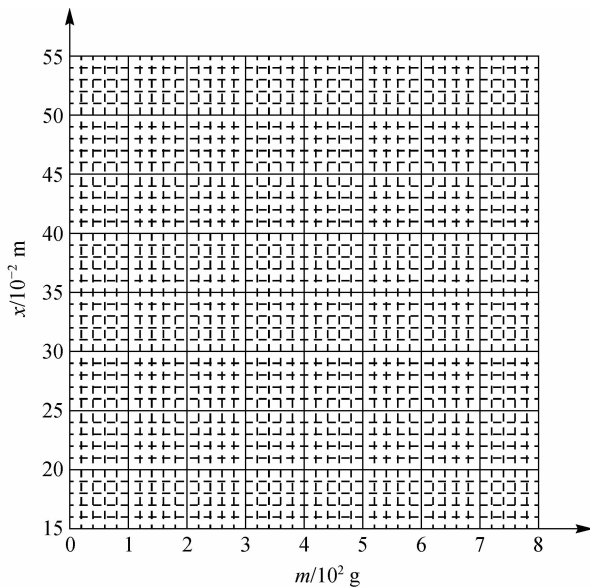


图 3-2 坐标纸

实验 3.2 物体密度的测量

密度是物体单位体积的质量,国际单位为千克每立方米(kg/m^3),此外还常用克每立方厘米(g/cm^3)。对于液体或气体还用千克每升(kg/L)、克每毫升(g/mL)。密度是物质的特

大学物理实验

性之一,每种物质都有一定的密度,不同物质的密度一般是不同的。因此,我们可以利用密度来鉴别组成物体的材料,计算物体中所含各种物质的成分,计算某些很难称量的物体的质量或形状比较复杂的物体的体积,判定物体是实心还是空心,等等。

综上所述,密度在科学研究和生产生活中有着广泛的应用。对于鉴别未知物质的密度是一个重要的依据。氩就是通过计算未知气体的密度发现的。在农业上可用来判断土壤的肥力,含腐殖质多的土壤肥沃,其密度一般为 $2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,根据密度即可判断土壤的肥力。在选种时也可根据种子在水中的沉浮情况进行选种,饱满健壮的种子因密度大而下沉,瘪壳和其他杂草种子因密度小而浮在水面上。在工业生产中,如淀粉的生产以土豆为原料,一般来说含淀粉多的土豆的密度较大,故通过测定土豆的密度可估计淀粉的产量。又如工厂在铸造金属物之前需估计熔化多少金属,可根据模子的容积和金属的密度算出需要的金属量。

【实验目的】

- (1)掌握物理天平的使用方法。
- (2)掌握用流体静力称衡法测量大块固体密度的方法。
- (3)掌握用比重瓶法测量小粒固体密度的方法。
- (4)学习液体密度的测量法。

【实验原理】

物体的密度为某温度时单位体积的质量,用公式表示为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3-1)$$

式中, ρ 为密度(kg/m^3 或 g/cm^3); m 为质量(kg 或 g); V 为体积(m^3 或 cm^3)。

质量 m 用物理天平称出。体积 V ,对于规则的大块固体,可先用直尺测出长、宽、高等,然后利用体积公式计算出体积。通常固体的外观尺度不规则,因此采用流体静力称衡法(大块固体)和比重瓶法(小粒固体)测量密度。

1. 用物理天平称质量 M

物理天平为等臂天平,如图 3-3 所示。

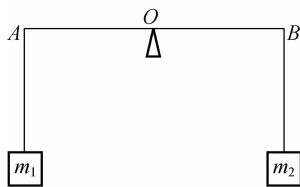


图 3-3 等臂天平

由图 3-3 可看出,

$$\overline{AO}m_1g = \overline{OB}m_2g$$

若 $\overline{AO} = \overline{OB}$,则

$$m_1 = m_2$$

物理天平如图 3-4 所示。

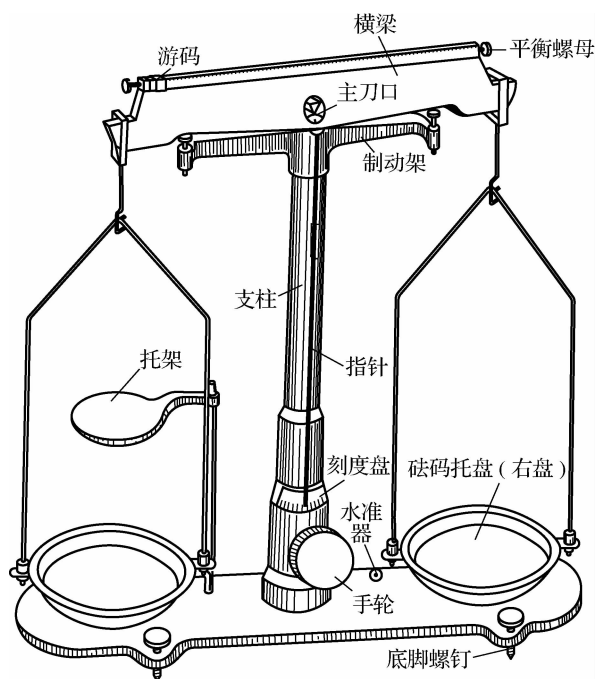


图 3-4 物理天平

(1) 物理天平的使用方法。

①使用前,首先调节前面的调平螺丝,使重锤的锤尖对准底座上的锥尖(有的天平底座上附有水准器,调节到水泡移至正中即可)。然后调整平衡位置——零点,即把游码移至左方零位,升起横梁,经摆动后静止时,指针应落在刻度盘的中线上。如果不在中线位置,说明平衡位置不对,必须调节平衡螺母,使静止位置回到中线上。如果偏差太大,多次调节平衡螺母都不能达到平衡位置,应检查挂钩、吊架、称盘是否挂错,待交换后再重新调整。

②先逆时针方向轻轻转动手轮,使天平横梁搁在休息架上。把被称的物体轻放在左盘上,再在右盘上轻放砝码,然后顺时针方向轻轻转动手轮使横梁升起,观察天平是否平衡;如果不平衡,适当加减砝码或移动游码至横梁平衡为止。此时右盘中砝码所示的质量加上游码所示数,即为物体的质量。

小于 10 g 的质量可直接用游码称量,即右盘不放砝码,移动游码至横梁平衡,则游码所示数即为物体的质量。

③为了消除横梁两臂不完全相等所引起的误差,常用复称法(高斯式法),即把所称物体放在左盘中,在右盘中放质量为 m_1 的砝码称一次;然后把物体放在右盘中,在左盘中放质量为 m_2 的砝码再称一次。根据力矩平衡条件可得物体的质量 $m = \sqrt{m_1 m_2}$ 。

(2) 使用物理天平时的事项。

①物理天平使用时,要缓慢平稳地转动手轮,切勿突然开启。物理天平摆动时,不要用手拨动游码或加减砝码,以免影响天平的灵敏度与精度。

②被称物与砝码都要放在盘的中间,以免手轮开启时砝码托盘摇摆过大。

③被称物体的质量切不可超过物理天平规定的称量。对具有吸湿性、挥发性和腐蚀性的物质及液体,必须先将其放在一定的器皿或容器内加盖后再称量。

大学物理实验

④称量后必须旋回手轮,使横梁处于休息状态再进行读数,然后取下物体和砝码。

2. 流体静力称衡法测大块固体的密度

(1)称出被测固体的质量 M 。

(2)用烧杯装上一定量的已知密度的液体(一般为室温中的纯净水),放在物理天平的托架上,托架可绕轴转动。

(3)用细绳一端扎紧被测固体,使其浸入烧杯的液体中,托架转到称盘的上方,把被测固体悬挂在天平挂钩上。测出此状态下的视质量 m ,依据阿基米德原理有如下关系式:

$$m_0 g = Mg - mg \quad (3-2)$$

式中, m_0 为排开液体的质量,则排开液体的体积 V 为

$$V = \frac{m_0}{\rho_0} \quad (3-3)$$

式中, ρ_0 为已知液体的密度(液体的密度与温度有关),于是由式(3-2)和式(3-3)可得物体的密度为

$$\rho = \frac{M}{M - m} \rho_0 \quad (3-4)$$

3. 比重瓶法测小粒固体的密度

对于小粒固体,无法用流体静力称衡法测密度,需用比重瓶法测定。比重瓶如图 3-5 所示。



图 3-5 比重瓶

比重瓶的瓶塞中间有一根毛细管,当瓶内装满液体,塞紧瓶塞后,多余的液体会从瓶塞的毛细管中溢出。

比重瓶法测小粒固体的密度的方法如下:

(1)称出小粒固体的质量 m_1 。

(2)称出装满已知密度的液体(纯净水)的比重瓶的质量 m_2 (用吸水纸擦干比重瓶,下同)。

(3)把小粒固体装入含有液体的比重瓶中,塞紧瓶塞,称出质量 m_3 ,则比重瓶中被排出的液体的质量 m_4 为

$$m_4 = m_1 + m_2 - m_3 \quad (3-5)$$

排出的液体的体积 V 为

$$V = \frac{m_4}{\rho_0} \quad (3-6)$$

该体积即为被小粒固体占据的体积,将式(3-5)和式(3-6)代入式(3-1)中,有

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 + m_2 - m_3} \rho_0 \quad (3-7)$$

式(3-7)即为用比重瓶法测小粒固体密度的公式。

4. 流体密度的测量

流体静力称衡法和比重瓶法都以已知密度的液体为条件,测量不规则大块固体的密度和小粒固体的密度。若条件反之则可测未知液体的密度。实验者可自行设计测量。

【实验仪器】

物理天平、砝码、比重瓶、烧杯、待测大块固体、待测小粒固体、待测液体等。

【实验操作】

- (1) 物理天平调节——调水平,调零点。
- (2) 物理天平测物体的质量,左右盘各测量一次,读数时注意左盘的物重等于右盘的物重加上游码指示的读数。
- (3) 用流体静力称衡法测铜块的密度,测量结果与标准值求百分误差。
- (4) 用比重瓶法测铅粒的密度,测量结果与标准值求百分误差。

思考题

- (1) 用流体静力称衡法测密度需满足哪些条件?
- (2) 给定一已知密度 ρ_0 的液体,用比重瓶法测未知液体的密度,试描述测量方法,推出测量公式。

提示:

- ① 铜的 $\rho_0 = 8.933 \text{ g/cm}^3$, 铅的 $\rho_0 = 11.34 \text{ g/cm}^3$ 。
- ② 悬挂在液体中的固体若附上气泡会影响浮力,注意消除。
- ③ 比重瓶内壁及小粒固体若附上气泡会影响测量的体积,注意消除。

实验 3.3 单摆法测量重力加速度

重力加速度是一个重要的地球物理参数,准确测量它的值,无论在理论上还是在科研和工程技术方面都有着极其重要的意义。本实验采用集成开关型霍尔传感器和多功能毫秒仪实现自动计时,能在很短的几个振动周期内准确测得单摆在大摆角下的周期,这样便可忽略空气阻尼的影响,顺利研究周期与摆角的关系,推出摆角极小时的振动周期,从而精确地测量重力加速度。

【实验目的】

- (1) 学习用集成霍尔开关和电子计时器测定重力加速度。
- (2) 研究单摆的摆角和周期的关系。
- (3) 学习用外推法求极小摆角的振动周期。

【实验仪器】

(1) 单摆实验仪一套,包括单摆实验架、带磁钢的小球、霍尔开关、水平直尺、MS-1 多功能毫秒仪,如图 3-6 所示。

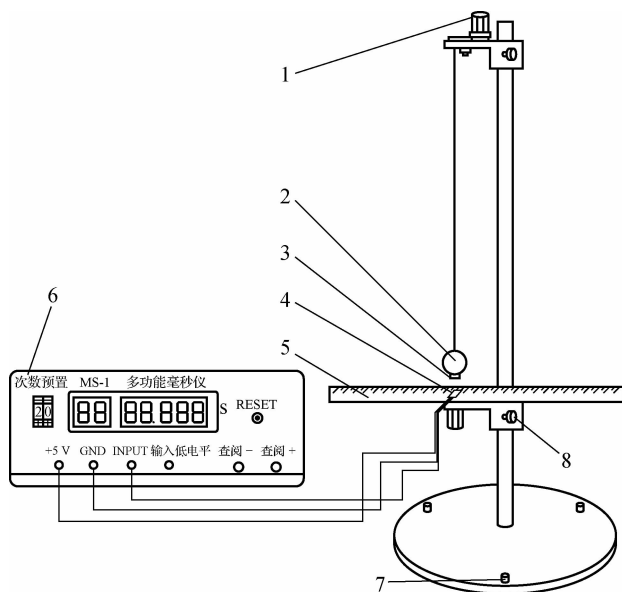


图 3-6 单摆实验仪

1—摆线锁紧旋钮；2—小球；3—磁钢；4—霍尔开关；5—水平直尺；
6—MS-1 多功能毫秒仪；7—调节螺钉；
8—锁紧螺钉

(2)游标卡尺(见图 3-7)。

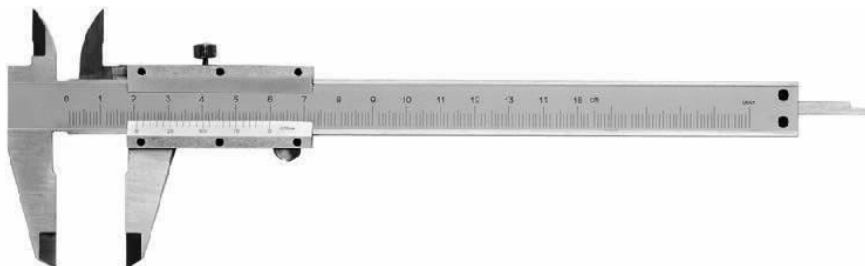


图 3-7 游标卡尺外形

【实验原理】

1. 单摆的摆角与周期的关系

如果不考虑线的质量,则单摆可看作一个不计质量的细线系住一个质点(见图 3-8),单摆往返摆动一次所需要的时间称为单摆的周期 T 。

假设小球在摆角为 θ_m 处释放,摆动中任意时刻 t 的摆角为 θ ,则根据机械能守恒定律(忽略空气阻力和浮力)有

$$mgL(1 - \cos \theta_m) = \frac{1}{2}mL^2 \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + mgL(1 - \cos \theta) \quad (3-8)$$

则单摆的振动周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \left(1 + \frac{1^2}{2^2} \sin^2 \frac{\theta_m}{2} + \frac{1^2 \times 3^2}{2^2 \times 4^2} \sin^4 \frac{\theta_m}{2} + \dots \right) \quad (3-9)$$

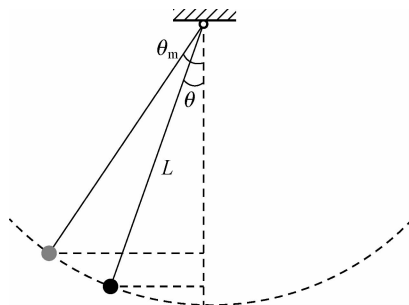


图 3-8 单摆

考虑到摆角对周期的影响,本次试验我们采用二级近似公式来计算振动周期,即

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \left(1 + \frac{1^2}{2^2} \sin^2 \frac{\theta_m}{2} \right) \quad (3-10)$$

2. 自动计时的实现

实验采用 UGN3109 型集成开关型霍尔传感器与 MS-1 型多功能毫秒仪来实现自动计时。如图 3-9 所示,集成霍尔开关放于小球正下方 1.0 cm 处,钕铁硼小磁钢放置在小球正下方。当小磁钢随小球从霍尔开关上方经过时,集成霍尔开关依次输出的由高电平向低电平的跳变信号使 MS-1 型多功能毫秒仪开始计时,当达到计时器面板上预置的次数时,停止计时。计时器锁存和显示计数,精度为 0.001 s。

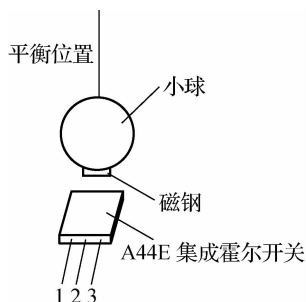


图 3-9 单摆计时
1—V₊; 2—V₋; 3—V_{out}

【实验操作】

(1) 测量摆长。测量悬线端点到小球顶端的距离(摆线长度) L_1 , 5 次测量摆球的直径 d , 计算其平均值 \bar{d} , 有效摆长 $L = L_1 + \frac{\bar{d}}{2}$ 。

(2) 按图 3-6 正确连接集成霍尔开关和多功能毫秒仪。

(3) 调节集成霍尔开关的位置,使霍尔开关恰好在小球铅直位置时磁钢的正下方。使霍尔开关输出低电平,多功能毫秒仪面板上的低电平指示灯亮。

(4) 预置开关次数“6”次。

(5) 将小球拉开指定距离,使小球摆动,记录小球摆动二倍周期的时间 $2T$ 。重复测量 6 次。

(6) 改变小球拉开距离,得到一组 $2T$ 与 $\sin^2 \frac{\theta_m}{2}$ 数据。用最小二乘法做线性拟合,计算 $\theta_m = 0$ 时单摆的周期 T_0 , 从而计算出重力加速度 g 。

【数据分析及处理】

(1) 摆线长度 $L_1 =$ _____ cm。

大学物理实验

(2) 摆球直径数据记录(见表 3-3)。

表 3-3 摆球直径数据记录

测量次数	1	2	3	4	5	\bar{d}
d						

(3) 有效摆长 $L=L_1+\frac{\bar{d}}{2}=\underline{\hspace{2cm}}$ cm。

(4) 小球摆动二倍周期的时间 $2T$ (见表 3-4)。

表 3-4 小球摆动二倍周期的时间 $2T$

测量次数	1	2	3	4	5	6	T_0
$2T$							

(5) 计算重力加速度 $g=\underline{\hspace{2cm}}$ m/s²。

【注意事项】

单摆必须在垂直面内摆动,防止形成圆锥摆。

思考题

- (1) 用外推法求重力加速度有哪些优点?
- (2) 式(3-10)中,若忽略 $\sin^2\frac{\theta_m}{2}$ 项,可引入多大系统误差?若要求误差小于 1%,则摆角应为多少?
- (3) 随着摆角的增大,周期将如何变化?周期 T 与 $\sin^2\frac{\theta_m}{2}$ 之间是什么关系?

实验 3.4 扭摆法测定物体转动惯量

转动惯量是刚体转动时惯性大小的量度,是表明刚体特性的一个物理量。刚体转动惯量除了与物体质量有关外,还与转轴的位置和质量分布(形状、大小和密度分布)有关。如果刚体形状简单,且质量分布均匀,可以直接计算出它绕特定转轴的转动惯量。对于形状复杂、质量分布不均匀的刚体(如机械部件、电动机转子和枪炮的弹丸等),转动惯量的计算将极为复杂,通常采用实验方法来测定。

转动惯量的测量,一般都是使刚体以一定形式运动,通过表征这种运动特征的物理量与转动惯量的关系,进行转换测量。本实验使物体做扭转摆动,由摆动周期及其他参数的测定计算出物体的转动惯量。

【实验目的】

- (1) 熟悉扭摆的构造及使用方法,以及转动惯量测试仪的使用方法。
- (2) 测定扭摆的扭转常数(弹簧的扭转常数) K 。

(3)测定塑料圆柱体、金属圆筒、木球与金属细杆的转动惯量,并与理论值比较,求百分误差。

(4)验证转动惯量平行轴定理。

【实验原理】

扭摆的构造如图 3-10 所示,在垂直轴上装有一根薄片状的螺旋弹簧,用以产生恢复力矩。在轴的上方可以装上各种待测物体。垂直轴与支座间装有轴承,以降低摩擦力矩。水平仪用来调整系统平衡。

将物体在水平面内转过一个角度 θ 后,在螺旋弹簧的恢复力矩作用下开始绕垂直轴做往返扭转运动。根据虎克定律,弹簧受扭转而产生的恢复力矩 M 与所转过的角度 θ 成正比,即

$$M = -K\theta \quad (3-11)$$

式中, K 为弹簧的扭转常数,根据转动定律:

$$M = I\beta \quad (3-12)$$

式中, I 为物体绕转轴的转动惯量; β 为角加速度。

由式(3-12)得

$$\beta = \frac{M}{I} \quad (3-13)$$

令 $\omega^2 = \frac{K}{I}$, 忽略轴承的摩擦阻力矩,由式(3-11)和式(3-13)得

$$\beta = \frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{K}{I}\theta = -\omega^2\theta \quad (3-14)$$

方程(3-14)表示扭摆运动具有角简谐振动的特性,角加速度与角位移成正比,且方向相反。此方程的解为

$$\theta = A\cos(\omega t + \varphi)$$

式中, A 为谐振动的角振幅; φ 为初相位角; ω 为角速度。此谐振动的周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{I}{K}} \quad (3-15)$$

由式(3-15)可知,只要实验测得物体扭摆的周期,并且 I 和 K 中任何一个量已知时即可计算出另一个量。

由于本实验采用的是一个几何形状规则的物体,因此它的转动惯量根据它的质量和几何尺寸用理论公式即可计算得到,求出转动惯量 I 后,就可算出本仪器弹簧的扭转常数 K 值。若要测定其他形状物体的转动惯量,则只需将待测物体安放在本仪器顶部的各种夹具上,先测定其摆动周期 T ,然后由式(3-15)即可算出该物体绕转动轴的转动惯量 I 。

理论分析证明,若质量为 m 的物体绕通过质心轴的转动惯量为 I_0 ,当转动轴平行移动距离 x 时,则此物体对新轴线的转动惯量变为 $I_0 + mx^2$ 。这称为转动惯量的平行轴定理。

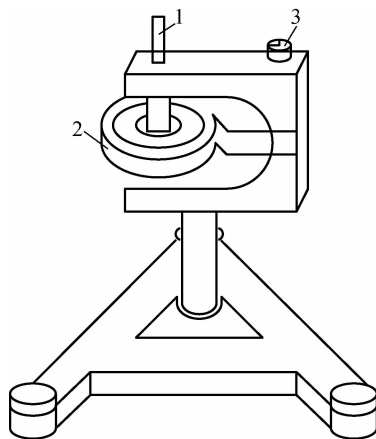


图 3-10 扭摆的构造

1—垂直轴; 2—螺旋弹簧; 3—水平仪

【实验仪器】

1. 扭摆及几种有规则形状的待测转动惯量的物体

空心金属圆筒；实心高矮塑料圆柱体；木球；验证转动惯量平行轴定理用的金属细杆，杆上有两块可以自由移动的金属滑块。

2. 转动惯量测试仪

转动惯量测试仪如图 3-11 所示。



图 3-11 转动惯量测试仪

(1)操作方法。TH-I 型智能转动惯量实验仪测试面板如图 3-12 所示。

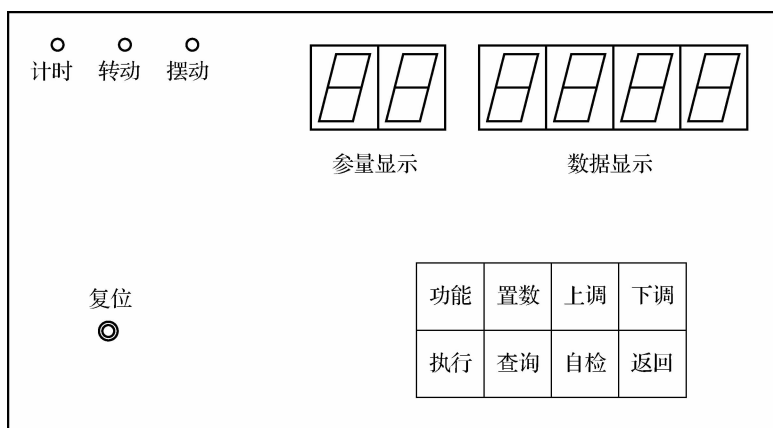


图 3-12 TH-I 型智能转动惯量实验仪测试面板

①开启主机电源后摆动指示灯亮，参量显示为“P1”，数据显示为“———”；若情况异常(死机)，可按“复位”键，即可恢复正常。

②功能选择。按“功能”键，可以选择扭摆和转动两种功能(开机及复位默认值为摆动)。

③置数。按“置数”键，参量显示为“n=”，数据显示为“10”，按“上调”键，周期数依次加 1，按“下调”键，周期数依次减 1。

④执行。按“执行”键，数据显示为“000.0”，表示仪器已处于等待测量状态。此时，当被测的往复摆动物体上的挡光杆第一次通过光电门时，由“数据显示”给出累计的时间，同时仪器自动计算周期 C_1 并予以存储，以供查询，进行多次测量求平均值，至此，P1(第一次测量)测量完毕。再次按“执行”键，参量显示由“P1”变为“P2”，数据显示又回到“000.0”，仪器处

于第二次待测状态,本机设定的重复测量的最多次数为5次,即P1,P2,⋯,P5。通过“查询”键可知各次测量的周期值 C_i ($i=1,2,\dots,5$)以及它们的平均值 C_A 。

⑤查询。按“查询”键,可查询每次测量的周期($C_1\sim C_5$)和多次测量的周期平均值 C_A ,及当前的周期数 n ,若显示“NO”则表示没有数据。

⑥自检。按“自检”键,仪器应依次显示“ $n=N-1$ ”“ $2n=N-1$ ”“SC GOOD”,并自动复位到“P1”,表示单片机工作正常。

⑦返回。按“返回”键,系统将无条件地回到最初状态,清除当前状态下的所有执行数据,但预置周期数不改变。

⑧复位。按“复位”键,实验所得数据全部清除,所有参量恢复为初始时的默认值。

(2)显示信息说明。

①P1:初始状态。

② $n=N-1$:转动计时的脉冲次数 N 与周期数 n 的关系。

③ $2n=N-1$:摆动计时的脉冲次数 N 与周期数 n 的关系。

④ $n=10$:当前状态的预置周期数。

⑤F1 end:摆动周期预置确定。

⑥F2 end:转动周期预置确定。

⑦Px 000.0:执行第 x 次测量(x 为1~5)。

⑧Cx xxx. x:查询第 x 次测量(x 为1~5,A)。

⑨SC GOOD:自检正常。

(3)注意事项。

①在使用过程中,若遇强磁场等原因而使系统死机,请按“复位”键或关闭电源重新启动机器,但之前测得的所有数据都将丢失。

②为提高测量精度,应先让扭摆自由摆动,然后按“执行”键进行计时。

3. 数字式电子台秤

数字式电子台秤是由数字电路和压力传感器组成的一种台秤。本实验所用的台秤,称量为1.999 kg,分度值为1 g,仪器误差为1 g。使用台秤前应检查其零读数是否为“0”。若显示值在空载时不是“0”值,则应调节台秤右侧的手轮,使显示值为“0”。物体放在秤盘上即可从显示窗中直接读出该物体的重量(近似看作质量 m),最后一位出现 ± 1 的跳动属于正常现象。

4. 游标卡尺

这里不再赘述。

【实验操作】

(1)用游标卡尺测出实心塑料圆柱体的外径 D_1 ,空心金属圆筒的内、外径 $D_{内}$ 、 $D_{外}$,木球的直径 $D_{球}$,金属细杆的长度 L ;用数字式电子台秤测出各物体的质量 m (各测量3次取平均值)。

(2)调整扭摆基座底脚螺丝,使水平仪的气泡位于中心。

(3)在转轴上装上对此轴的转动惯量为 I_0 的金属载物圆盘,并调整光电探头的位置使载物圆盘上的挡光杆处于其缺口中央且能遮住发射、接收红外光线的小孔,并能自由通过光电门。测量10个摆动周期所需要的时间为 $10T_0$ 。

(4)转动惯量 I_1 的理论值 I'_1 可由实心塑料圆柱体的质量 m_1 和外径 D_1 算出,即

$$I'_1 = \frac{1}{8} m_1 D_1^2$$

大学物理实验

将转动惯量为 I_1 的实心塑料圆柱体放在金属载物圆盘上,则总的转动惯量为 $I_0 + I_1$, 测量 10 个摆动周期所需要的时间为 $10T_1$ 。

由式(3-15)可得出

$$\frac{T_0}{T_1} = \frac{\sqrt{I_0}}{\sqrt{I_0 + I_1}}$$

或

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{T_0^2}{T_1^2 - T_0^2}$$

则弹簧的扭转常数为

$$K = 4\pi^2 \frac{I_1}{T_1^2 - T_0^2} \quad (3-16)$$

在 SI 制中 K 的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (或 $\text{N} \cdot \text{m}$)。

(5) 取下实心塑料圆柱体,装上空心金属圆筒,测量 10 个摆动周期所需要的时间 $10T_2$ 。

(6) 取下金属载物圆盘、装上木球,测量 10 个摆动周期所需要的时间 $10T_3$ 。(在计算木球的转动惯量时,应扣除夹具的转动惯量。)

(7) 取下木球,装上金属细杆,使金属细杆中央的凹槽对准夹具上的固定螺丝,并保持水平。测量 10 个摆动周期所需要的时间 $10T_4$ 。(在计算金属细杆的转动惯量时,应扣除夹具的转动惯量。)

(8) 验证转动惯量平行轴定理。

将金属滑块对称地放置在金属细杆两边的凹槽内(见图 3-13),此时滑块质心与转轴的距离 x 分别为 5.00 cm, 10.00 cm, 15.00 cm, 20.00 cm, 25.00 cm, 测量对应于不同距离时的 5 个摆动周期所需要的时间为 $5T$ 。验证转动惯量平行轴定理。(在计算转动惯量时,应扣除夹具的转动惯量。)

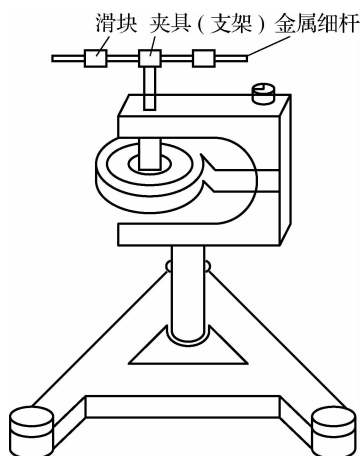


图 3-13 验证平行轴定理的扭摆装置

【数据记录和处理】

(1) 弹簧扭转常数 K 和各物体转动惯量 I 的确定,数据记录及处理如表 3-5 和表 3-6 所示。

表 3-5 弹簧扭转系数及物体转动惯量的测定(1)

塑料圆柱直径/mm	$D_1 =$			
圆筒内外径/mm	$D_{内} =$	$D_{外} =$		
扭摆空盘 $10T_0$ 三次/s	$10T_{01} =$	$10T_{02} =$	$10T_{03} =$	$\overline{T_0} =$
圆柱和空盘共同摆动 10 个周期 $10T_1/s$	$10T_{11} =$	$10T_{12} =$	$10T_{13} =$	$\overline{T_1} =$
圆筒和空盘共同摆动 10 个周期 $10T_2/s$	$10T_{21} =$	$10T_{22} =$	$10T_{23} =$	$\overline{T_2} =$
细杆摆动 10 个周期 $10T_3/s$	$10T_{31} =$	$10T_{32} =$	$10T_{33} =$	$\overline{T_3} =$

表 3-6 弹簧扭转系数及物体转动惯量的测定(2)

 $m_{柱} =$ _____, $m_{筒} =$ _____, $m_{杆} =$ _____, $L_{杆} =$ _____, $I_{夹} =$ _____

测量值(I_x)	理论值(I'_x)	百分差 $E = \frac{ I_x - I'_x }{I'_x} \times 100\% =$
扭摆扭转常数 $K = \frac{4\pi^2 I'_1}{T_1^2 - T_0^2} =$		
载物盘转动惯量 $I_0 = \frac{K T_0^2}{4\pi^2} =$		
实心柱体转动惯量 $I_1 = \frac{K T_1^2}{4\pi^2} - I_0 =$	$I'_1 = \frac{1}{8} m_{柱} D_1^2 =$	
空心筒体转动惯量 $I_2 = \frac{K T_2^2}{4\pi^2} - I_0 =$	$I'_2 = \frac{1}{8} m_{筒} (D_{内}^2 + D_{外}^2) =$	
金属细杆转动惯量 $I_3 = \frac{K T_3^2}{4\pi^2} - I_{夹} =$	$I'_3 = \frac{1}{12} m_{杆} L_{杆}^2 =$	

(2)转动惯量平衡轴定理的验证,数据记录及处理如表 3-7 所示。

表 3-7 验证转动惯量的平行轴定理

$x/10^{-2}$ m	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00
摆动周期 $5T/s$					
\overline{T}/s					
实验值/ 10^{-4} $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ $I = \frac{K}{4\pi^2} T^2$					
理论值/ 10^{-4} $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ $I' = I'_4 + I'_5 + 2mx^2$					
百分差 $E_0 = \frac{I' - I}{I'} \times 100\%$					

大学物理实验

【注意事项】

(1) 弹簧的扭转常数 K 值不是固定常数, 它与摆动角度有关, 摆角在 90° 左右时基本相同, 在小角度时变小。

(2) 弹簧有一定的使用寿命和强度, 应正确使用。为了降低实验时摆动角度变化过大而带来的系统误差, 在测定各种物体的摆动周期时, 摆角不宜过小, 也不宜过大, 摆幅也不宜变化过大。

(3) 光电探头宜放置在挡光杆的平衡位置处, 挡光杆不能与其接触, 以免增大摩擦力矩。

(4) 机座应保持水平状态。

(5) 安装待测物体时, 其支架必须全部套入扭摆主轴, 并将止动螺丝旋紧, 否则扭摆不能正常工作。

(6) 在称木球与金属细杆的质量时, 必须分别将支座和安装夹具取下, 否则将带来极大的误差。

思考题

(1) 实验中, 为什么在称木球和细杆的质量时必须分别将支座和安装夹具取下?

(2) 转动惯量实验仪的计时精度为 0.001 s , 实验中为什么要测量 $10T$?

(3) 如何用本实验仪来测定任意形状物体绕特定轴的转动惯量?

实验 3.5 音叉受迫振动与共振

受迫振动与共振现象在工程和科学研究中经常用到, 如在建筑、机械等工程中, 经常需要避免共振现象, 以保证工程的质量; 在一些石油化工企业中, 经常用共振现象来检测液体密度和液体高度, 所以受迫振动与共振是重要的物理规律, 在物理与工程技术领域越来越受到重视。

【实验目的】

(1) 研究音叉振动系统在驱动力作用下振幅与驱动力频率的关系, 测量并绘制它们的关系曲线, 求出共振频率和振动系统振动的锐度。

(2) 通过对音叉双臂振动与对称阻尼块质量关系的测量, 研究音叉共振频率与附在音叉双臂一定位置上阻尼块质量的关系。

(3) 通过测量共振频率的方法, 测量附在音叉上的一对物块的未知质量。

(4) 在音叉增加阻尼力的情况下, 测量音叉共振频率及锐度, 并与阻尼力小的情况进行对比。

【实验原理】

1. 简谐振动与阻尼振动

许多振动系统如弹簧振子的振动、单摆的振动、扭摆的振动等, 在振幅较小且空气阻尼可以忽略的情况下, 都可做简谐振动处理。即此类振动满足简谐振动方程

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0 \quad (3-17)$$

式(3-17)的解为

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (3-18)$$

弹簧振子振动的圆频率 $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m+m_0}}$, 其中, K 为弹簧劲度系数, m 为振子的质量, m_0 为弹簧的等效质量。弹簧振子的周期 T 满足

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{K}(m+m_0) \quad (3-19)$$

但实际的振动系统存在各种阻尼因素, 因此式(3-17)左边须增加阻尼项。在小阻尼情况下, 阻尼与速度成正比, 表示为 $2\beta \frac{dx}{dt}$, 则相应的阻尼振动方程为

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (3-20)$$

式中, β 为阻尼系数。

2. 受迫振动与共振

阻尼振动的振幅随时间会衰减, 最后会停止振动。为了使振动持续下去, 外界必须给系统一个周期变化的驱动力。一般采用的是随时间做正弦函数或余弦函数变化的驱动力, 在驱动力作用下, 振动系统的运动满足下列方程

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{F}{m'} \cos \omega t \quad (3-21)$$

式中, m' 为振动系统的质量, $m' = m + m_0$; F 为驱动力的振幅; ω 为驱动力的圆频率。

式(3-21)为振动系统做受迫振动的方程, 它的解包括两项, 第一项为瞬态振动, 由于阻尼的存在, 振动开始后振幅不断衰减, 最后较快地变为零; 第二项为稳态振动的解, 其为

$$x = A \cos(\omega t + \varphi)$$

式中

$$A = \frac{\frac{F}{m'}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \approx \omega_0$$

当驱动力的频率接近共振频率时, 振幅 A 出现极大值, 此时称为共振。显然 β 越小, $x-\omega$ 关系曲线的极值越大。描述这种曲线陡峭程度的物理量称为锐度, 其值等于品质因素

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$

式中, f_0 表示共振频率; f_1, f_2 表示半功率点的频率, 也就是对应振幅为振幅最大值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍的频率。

3. 可调频率音叉的振动周期

一个可调频率音叉一旦起振, 它将按某一基频振动。音叉的两臂是对称的, 以致两臂的振动是完全反向的, 从而在任一瞬间对中心杆都有等值反向的作用力。中心杆的净受力为零而不振动, 从而紧紧握住它而不会引起振动衰减。同样的道理, 音叉的两臂不能同向运动, 因为同向运动将对中心杆产生震荡力, 这个力会使振动很快衰减掉。

可以通过将相同质量的物块对称地加在两臂上来减小音叉的基频(音叉两臂所载的物块必须对称)。对于这种加载的音叉的振动周期 T 由式(3-22)给出, 其与式(3-19)相似。

$$T^2 = B(m+m_0) \quad (3-22)$$

大学物理实验

式中, B 为常数, 它依赖于音叉材料的力学性质、大小及形状; m_0 为每个振动臂的有效质量有关的常数。

利用式(3-22)可以制成各种音叉传感器, 如液体密度传感器、液位传感器等, 通过测量音叉的共振频率可求得音叉管内的液体密度或液位高度。这类音叉传感器在石油、化工工业等领域进行实时测量和监控中发挥着重要作用。

【实验仪器】

HLD-SPZ- II 型受迫振动与共振实验仪(见图 3-14)。

在音叉两臂的一侧放置一个激振线圈, 在由低频信号发生器供给的正弦交变电流作用下产生交变磁场激振音叉, 使之产生正弦振动。当线圈中的电流最大时, 吸力最大; 当线圈中的电流为零时, 磁场消失, 吸力为零, 音叉被释放, 因此音叉产生的振动频率与激振线圈中的电流有关。频率越高, 磁场交变越快, 音叉产生的振动频率越大; 反之则越小。在音叉两臂的另一侧为振幅探测器。音叉的振动信号被接收到后, 经放大成为与振幅成正比的电压信号, 在数字电压表的显示窗中显示。由此可研究音叉受迫振动系统在周期外力作用下振幅与驱动力频率的关系及其锐度, 以及在增加音叉阻尼力的情况下, 振幅与驱动力频率的关系及其锐度。信号发生器频率显示窗中显示的是策动信号源的频率, 由于音叉系统有其固有频率, 当策动信号源的频率与音叉固有频率接近时, 音叉的振幅急剧增大, 由此就可显示出共振的现象。

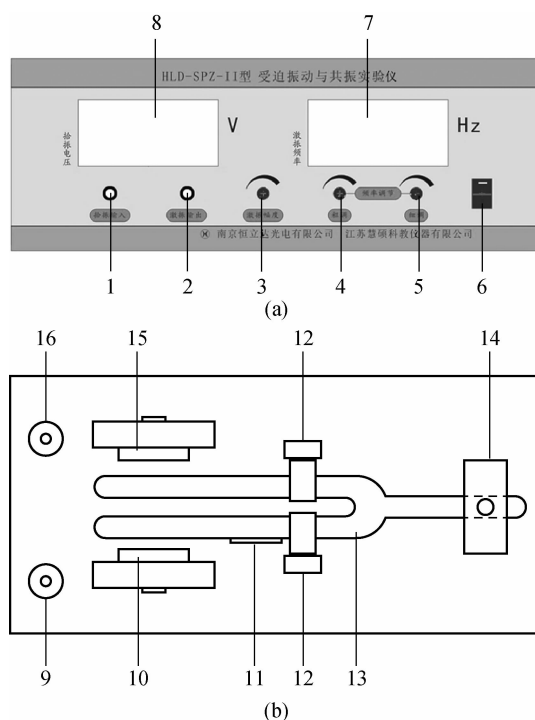


图 3-14 HLD-SPZ- II 型受迫振动与共振实验仪

(a) 主机部分 (b) 音叉振动装置

- 1—拾振输入调节钮; 2—激振输出调节钮; 3—输出信号频率调节钮; 4—频率微调钮; 5—频率粗调钮;
- 6—电源开关; 7—信号发生器频率显示窗; 8—数字电压表显示窗; 9—激振线圈输入接口;
- 10—激振线圈; 11—阻尼片; 12—质量块; 13—音叉; 14—固定支座;
- 15—振幅探测器; 16—电压输出接口

【实验操作】

(1) 仪器接线。用一根屏蔽导线把低频信号发生器的输出端与激振线圈的信号(电压)输入端相接;用另一根屏蔽导线将电磁激振线圈的信号(电压)输出端与数字电压表的输入端相连。

(2) 接通电子仪器的电源,将激振输出调节钮 2 逆时针调到最小,使仪器预热 15 min。

(3) 测定共振频率 f_0 和振幅 A_r 。在音叉臂空载,空气阻尼很小的情况下,将低频信号发生器的输出信号频率调节钮 3 由低到高缓慢调节(参考值约为 250 Hz),仔细观察数字电压表的读数,当交流电压表的读数达最大值时,记录音叉共振时的频率 f_0 和共振时交流电压表的读数 A_r 。

(4) 测量共振频率 f_0 两边的数据。在信号发生器输出幅度保持不变的情况下,频率由低到高,测量数字电压表的读数 A 与驱动力的频率 f_i 之间的关系。注意:应在共振频率附近,通过调节频率微调钮 4 多测几个点。总共须测 20~26 个数据,记录在表 3-8 中。

(5) 在音叉一臂上(近激振线圈)用小磁钢将一块阻尼片吸在臂上,用电磁力驱动音叉。在增加空气阻尼的情况下,按照步骤(3)、(4)测量音叉的共振频率,记录音叉振动频率 f_i 与交流电压表的读数 A ,填在表 3-9 中。

(6) 在电子天平上称出 5 对不同质量块的质量值 m ,记录在表 3-10 中。

(7) 将不同质量块分别加到音叉两臂指定的位置上,并将螺丝旋紧。测出音叉两臂对称加相同质量块时相对应的共振频率 f_0 。记录 f_0 - m 关系数据于表 3-10 中。

(8) 用一对未知质量的质量块 m_x 替代已知质量的质量块,测出音叉的共振频率 f_x ,求出未知质量的质量块 m_x 。

【数据记录及处理】**1. 共振频率 f_0 和振幅 A_r 的关系**

(1) 在音叉臂空载、空气阻尼很小的情况下,记录音叉振动的频率 f_i 与数字电压表的读数 A ,数据记录在表 3-8 中。

表 3-8 空气阻尼很小时频率 f_i 与数字电压表读数 A 的关系

f_i/Hz												
A/V												
f_i/Hz												
A/V												

(2) 根据表 3-8 的数据绘制 A - f_i 关系曲线,测出共振频率,求出两个半功率点 f_2 和 f_1 ,计算音叉的锐度(Q 值)。

(3) 在音叉臂上加薄片,增加空气阻尼,记录音叉振动的频率 f_i 和数字电压表的读数 A 于表 3-9 中,绘制 A - f_i 关系曲线,测出共振频率,计算音叉的锐度(Q 值),并与空气阻尼小的情况(见表 3-8)进行比较说明。

表 3-9 振动频率 f_i 与数字电压表读数 A 的关系

f_i/Hz												
A/V												
f_i/Hz												
A/V												

2. 音叉的共振频率与双臂质量的关系

(1) 将逐次加载的质量块的质量值 m 与音叉的共振频率 f_0 记录在表 3-10 中。

表 3-10 共振频率 f_0 与质量块的质量值 m 的关系

m/g									
f_0/Hz									
$T^2 \times 10^{-5}/\text{s}^2$									

(2) 根据表 3-10 的数据绘制 T^2-m 关系曲线, 求出直线斜率 B 和在 m 轴上的截距 m_0 。

(3) 用音叉共振法测物块质量。测得共振频率 $f_0 = \underline{\hspace{2cm}}$ Hz, 利用 T^2-m 关系曲线测得未知物块的质量 $m_x = \underline{\hspace{2cm}}$ g。

【注意事项】

(1) 本实验所绘制的曲线是在驱动力幅恒定的条件下进行的。所以一旦低频信号发生器的输出电压被确定后, 其在整个实验过程中都要保持不变, 并且要及时核对调节。

(2) 注意信号源的输出不要短路, 以防止烧坏仪器。

(3) 请勿随意用工具将固定螺丝拧松, 以避免电磁线圈的引线断裂。

(4) 传感器部位是敏感部位, 外面有保护罩防护, 使用者不可以将保护罩拆去, 或用工具伸入保护罩, 以免损坏电磁线圈传感器及引线。

(5) 适当调节激振输出调节钮, 使信号发生器输出电压不宜过大, 避免共振时因输出振幅过大而超出数字电压表的量程, 或造成音叉响度过大, 给人耳带来不适。

思考题

(1) 在测量振动频率与振幅间关系的过程中, 为什么低频信号发生器的输出幅度要保持不变?

(2) 从实验所绘制的共振曲线来看, 在驱动力幅不变的情况下, 欲降低振动系统的共振幅度应采取什么措施? 有何实际价值?

(3) 举例说明共振现象在实际生活中的应用。

实验 3.6 声速的测量

声波在媒质中的传播速度与介质的特性及状态因素有关, 因而通过介质中声速的测定, 可以了解媒质的特性或状态变化。例如, 通过介质中声速的测定可以得知氯气(气体)的浓

度、蔗糖(溶液)的浓度、氯丁橡胶乳液的比重及输油管中不同油品的分界面等,从而使其有效地成为生产、军用、科研领域里动态性无损检验的一种重要手段。由于超声波具有方向性好、功率大、不可闻、抗干扰性强等优点,因此一般采用在超声波段测量声速。

【实验目的】

- (1)进一步熟悉示波器的原理和使用。
- (2)了解产生超声光栅的原理。
- (3)掌握用超声光栅来测量超声波速度的方法,理解驻波和振动合成理论。
- (4)学会用逐差法进行数据处理。

【实验原理】

1. 超声波与压电陶瓷换能器

频率为 20 Hz~20 kHz 的机械振动在弹性介质中传播形成声波,高于 20 kHz 称为超声波。超声波的传播速度就是声波的传播速度,而超声波具有波长短、易于定向发射等优点。声速实验所采用的声波频率一般都为 20~60 kHz。在此频率范围内,采用压电陶瓷换能器作为声波的发射器和接收器效果最佳。

压电陶瓷换能器根据其工作方式分为纵向(振动)换能器、径向(振动)换能器和弯曲振动换能器。声速教学实验中所用的压电陶瓷换能器大多为纵向换能器。图 3-15 所示为纵向换能器的结构简图。

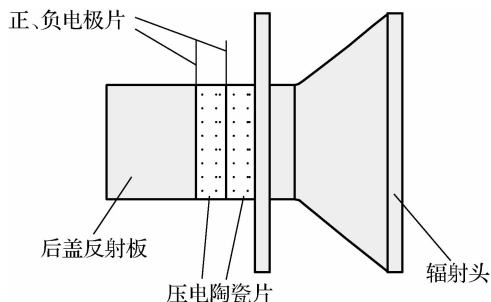


图 3-15 纵向换能器的结构简图

2. 测量声速的实验方法

(1)驻波法。按照波动理论,发生器发出的平面声波经介质传到接收器,若接收面与发射面平行,则声波在接收面处会被垂直反射,于是平面声波在两端面间来回反射并叠加。当接收面与发射面间的距离恰好等于半波长的整数倍时,叠加后的波就形成驻波。此时相邻两波节(或波腹)间的距离等于半个波长($\lambda/2$)。当发生器的激励频率等于驻波系统的固有频率时,将产生驻波共振,波腹处的振幅达到最大值。

声波是一种纵波。由纵波的性质可以证明,驻波波节处的声压最大。当发生共振时,接收面处为一波节,接收到的声压最大,转换成的电信号也最强。当移动接收器到某个共振位置时,示波器上出现了最强的信号,继续移动接收器,当示波器再次出现最强的信号时,两次共振位置之间的距离即为 $\lambda/2$,如图 3-16 所示。

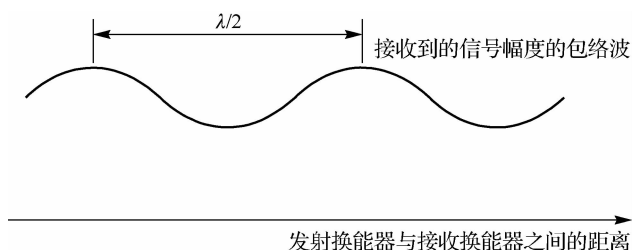


图 3-16 换能器间距与合成幅度

(2)相位法。波是振动状态的传播,也可以说是相位的传播。在波的传播方向上的任何两点,如果其共振状态相同或者相位差为 2π 的整数倍,则这两点间的距离应等于波长的整数倍,即

$$l = n\lambda \quad (3-23)$$

式中, n 为正整数。

利用式(3-23)可以精确测量波长。

若超声波发生器发出的声波是平面波,则当接收器端面垂直于波的传播方向时,其端面上的各点都具有相同的相位。当沿传播方向移动接收器时,总可以找到一个位置使得接收到的信号与发射器的激励电信号同相。继续移动接收器,直到找到的信号再一次与发射器的激励信号同相时,移动的这段距离就等于声波的波长,如图 3-17 所示。通过示波器,用李萨如图法测出声波的波长。

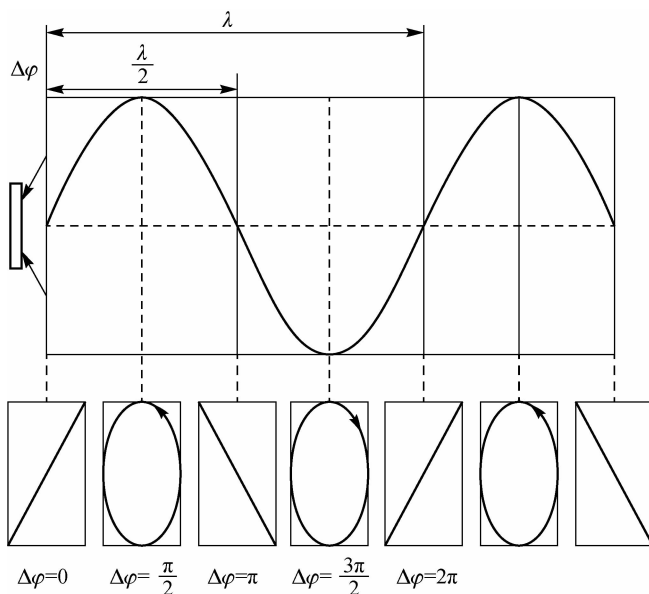


图 3-17 用李萨如图法观察相位变化

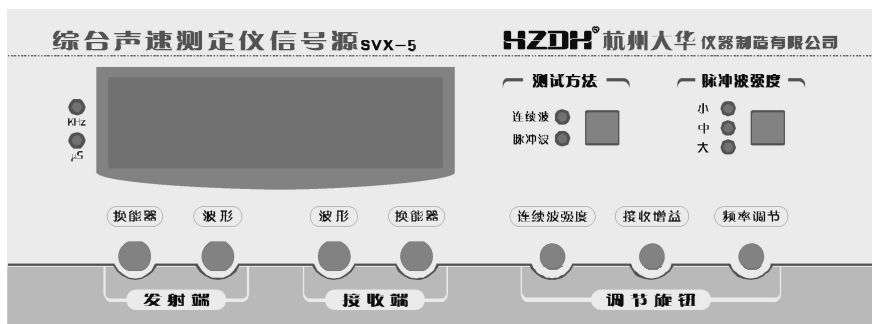
【实验仪器】

声速测定仪、示波器、信号发生器。

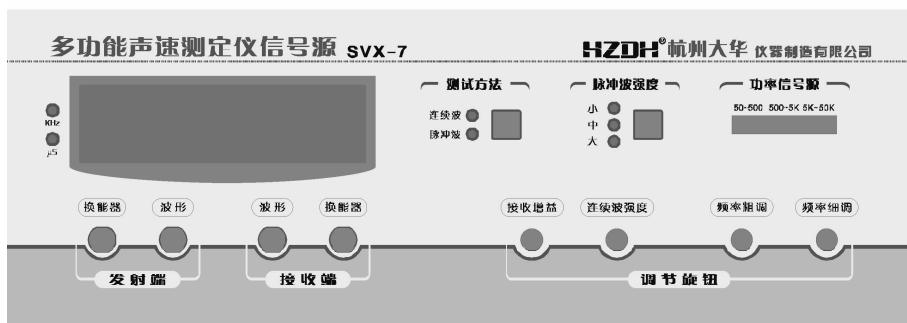
图 3-18 所示为 SVX-5、SVX-7 声速测定仪信号源面板,图 3-19 所示为声速测试架外形。

调节旋钮有以下作用：

- (1) 信号频率：用于调节输出信号的频率。
- (2) 发射强度：用于调节输出信号电功率(输出电压)，仅连续波有效。
- (3) 接收增益：用于调节仪器内部的接收增益。



(a)



(b)

图 3-18 SVX-5、SVX-7 声速测定仪信号源面板

(a)SVX-5 声速测定仪信号源面板 (b)SVX-7 声速测定仪信号源面板

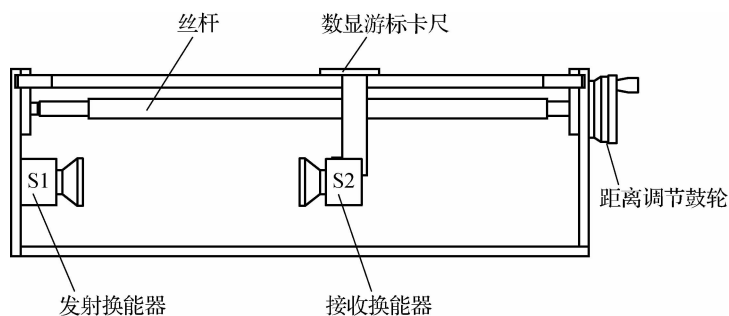


图 3-19 声速测试架外形

【实验操作】

(1) 仪器在使用之前，加电开机预热 15 min。在接通市电后，自动工作在连续波方式，这时脉冲波强度选择按钮不起作用。

(2) 驻波法测量声速。

① 测量装置的连接。如图 3-20 所示，信号源面板上的发射端换能器接口(S1)用于输出

大学物理实验

一定频率的功率信号,将其接至测试架的发射换能器(S1);将信号源面板上的发射端的发射波形 Y1 接至双踪示波器的 CH1(Y1),用于观察发射波形;接收换能器(S2)的输出接至示波器的 CH2(Y2)。

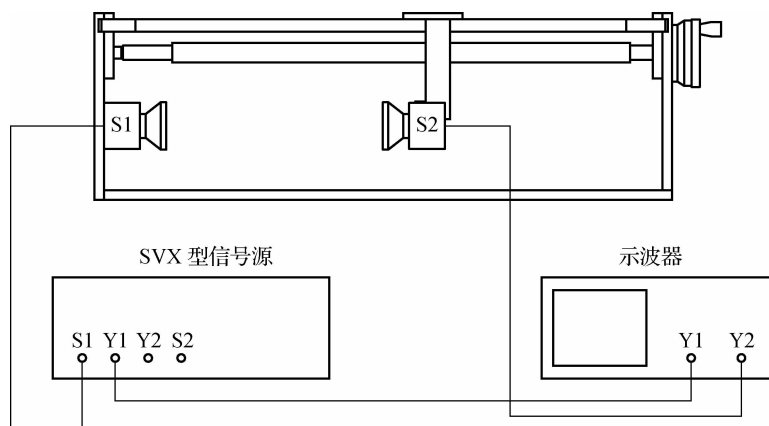


图 3-20 驻波法、相位法连线

②测定压电陶瓷换能器的最佳工作点。只有当换能器 S1 的发射面和 S2 的接收面保持平行时才有较好的接收效果;为了得到较清晰的接收波形,应将外加的驱动信号频率调节到换能器 S1、S2 的谐振频率点处,才能较好地进行声能与电能的相互转换(实际上有一个小的通频带),以得到较好的实验效果。按照调节到压电陶瓷换能器谐振点处的信号频率,估计一下示波器的扫描时基 t/div , 并进行调节,使在示波器上获得稳定波形。

换能器工作状态的调节方法如下:各仪器都正常工作以后,首先调节发射强度旋钮,使声速测试仪信号源输出合适的电压,再调节信号频率(25~45 kHz)旋钮,选择合适的示波器通道增益(一般为 0.1~0.5 V/div 的位置),观察频率调整时接收波的电压幅度变化,在某一频率点处(34.5~37.5 kHz)的电压幅度最大,此频率即是压电换能器 S1、S2 相匹配频率点,记录频率 F_N ,改变 S1 和 S2 间的距离,适当选择位置,重新调整,再次测定工作频率,共测 5 次,取平均频率 f 。

③测量步骤。将测试方法设置到连续波方式,选择合适的发射强度。完成步骤①、②后,观察示波器,找到接收波形的最大值。然后转动距离调节鼓轮,这时波形的幅度会发生变化,记录幅度最大时的距离 L_{i-1} ,距离由数显尺或机械刻度尺读出,再向前或向后(必须是一个方向)移动距离,当接收波经变小后再到最大时,记录下此时的距离 L_i ,即有波长 $\lambda_i = 2|L_i - L_{i-1}|$,多次测定用逐差法处理数据。

(3)相位法/李萨如图法测量波长的步骤。将测试方法设置到连续波方式,选择合适的发射强度。完成前述步骤①、②后,将示波器打到“X-Y”方式,并选择合适的通道增益。转动距离调节鼓轮,观察波形为一定角度的斜线,记录下此时的距离 L_{i-1} ;距离由数显尺或机械刻度尺读出,再向前或向后(必须是一个方向)移动距离,使观察到的波形又回到前面所说的特定角度的斜线,记录下此时的距离 L_i ,即有波长 $\lambda_i = |L_i - L_{i-1}|$ 。

【注意事项】

(1)示波器。

①辉度只要调至能看清波形即止。

②若发现示波器光点长时间停留,则应将辉度旋钮关小,以免烧坏荧光屏。

(2)频率计、示波器、信号源及声速测定仪等都应良好接地,以避免干扰且保证安全。

(3)声速测试架上的两换能器应尽量保持平行,为此可在断电状态下将两换能器彼此贴紧后再拉开。

【实验数据处理】

(1)共振频率。共振频率测量结果记录在表 3-11 中。

表 3-11 共振频率测量结果

测量次数	1	2	3	4	5	平均值 \bar{f}
测量结果/Hz						

(2)利用逐差法进行数据处理,计算声波的波长 λ (见表 3-12)。

表 3-12 声波波长 λ 的计算

驻波法					相位法				
次数	L_i	次数	L_{i+10}	$5\lambda = L_{i+10} - L_i$	次数	L_i	次数	L_{i+10}	$5\lambda = L_{i+10} - L_i$
1		11			1		11		
2		12			2		12		
3		13			3		13		
4		14			4		14		
5		15			5		15		
6		16			6		16		
7		17			7		17		
8		18			8		18		
9		19			9		19		
10		20			10		20		
平均值 $\bar{\lambda}$					平均值 $\bar{\lambda}$				

(3)由公式 $\bar{v} = \bar{\lambda} \bar{f}$ 计算声波的速度。

思考题

- (1)声速测量中共振干涉法、相位法有何异同?
- (2)为什么要在谐振频率条件下进行声速测量?如何调节和判断测量系统是否处于谐振状态?
- (3)为什么发射换能器的发射面与接收换能器的接收面要保持互相平行?
- (4)声音在不同介质中传播有何区别?声速为什么会不同?

实验 3.7 数码照相

数码相机又名数字式相机(digital camera, DC), 是利用电子传感器把光学影像转换成电子数据的照相机。数码相机与普通照相机在胶卷上靠溴化银的化学变化来记录图像的原理不同, 数码相机的传感器是一种光感应式的电荷耦合器件(CCD)或互补金属氧化物半导体(CMOS)。在图像传输到计算机以前, 通常会先储存在数码存储设备中。存储设备通常是使用闪存, 而软磁盘与可重复擦写光盘(CD-RW)已很少用于数字相机设备。

【实验目的】

- (1) 掌握数码相机的基本原理。
- (2) 学习使用数码相机。
- (3) 利用图形处理软件进行相应的工作, 改善最后的图像。

【实验原理】

数码相机是集光学、机械、电子于一体的产品。它集成了影像信息的转换、存储和传输等部件, 具有数字化存取模式、与电脑交互处理和实时拍摄等特点。光线通过镜头或者镜头组进入相机, 通过数码相机成像元件转化为数字信号, 数字信号通过影像运算芯片储存在存储设备中。数码相机的成像元件是 CCD 或者 CMOS, 该成像元件的特点是光线通过时, 能根据光线的不同转化为电子信号。数码相机最早出现在美国, 20 多年前, 美国曾利用它通过卫星向地面传送照片, 后来数码摄影转为民用并不断拓展应用范围。

数码相机的主要配件如下:

1. UV 镜片

UV 镜片用于过滤空气中多余的紫外线, 同时起到保护镜头的作用。选择 UV 镜片时要注意 UV 镜片的表面是有镀膜的, 尤其是在强光下晃动时会看到五颜六色的颜色, 通光性能非常好, 把镜片放到眼前时有一种看不到镜片的感觉。而几十元的镜片严格上讲并不是 UV 镜片(而叫保护镜), 首先镜片没有镀膜(没有镀膜就没有 UV 镜片的上述功能, 仅仅只是起到了保护镜头和防止镜头落灰的作用), 放到镜头上就像是加了一个比较高档的玻璃。成像效果反倒不如不加镜片的好。

2. 液晶保护膜

液晶保护膜主要起到防止液晶屏幕划伤的作用, 它靠静电作用吸附在液晶屏幕的表面, 经长时间使用, 当保护膜表面的划伤比较严重时可以进行更换; 同时液晶保护膜对液晶屏幕的表面没有腐蚀作用。

3. 吹头

气吹用于清理镜头以及相机表面的灰尘, 不过在清理的时候一定要注意, 吹头必须离镜头有一段距离, 通过手掌的瞬间用力去吹, 这样可以保证吹头不会因为不注意而碰到镜头, 导致镜头划伤。

4. 镜头布

镜头布应该配合气吹使用, 在擦拭镜头的时候不能用嘴去吹镜头上的浮灰, 以避免镜头

上面沾上唾液(尤其是刚吃完油腻的东西,镜头上面一旦沾上油腻的唾液就不好擦拭了)。

5. 摄影包

摄影包要根据其性能来选择,如防雨、防震、防尘、防火等。

【实验仪器】

数码相机(见图 3-21、图 3-22)、计算机。

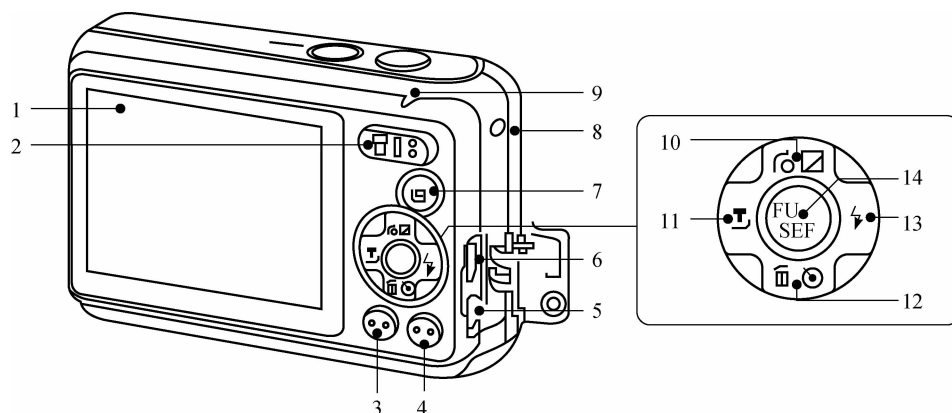


图 3-21 数码相机正面功能结构

- 1—屏幕(液晶显示屏); 2—变焦按钮,拍摄 \square (长焦)/ \square (广角),播放 \square (放大)/ \square (索引); 3— \odot (模式)按钮;
 4—MENU(菜单)按钮; 5—A/V OUT(音频/视频输出)端子; 6—DIGITAL(数码)端子; 7— \square (播放)按钮;
 8—相机带安装部位; 9—指示灯(背面); 10— \square (曝光补偿)/ \square (跳转)/ \blacktriangle 按钮; 11— \square (微距)/ \blacktriangleleft 按钮;
 12— \square (自拍)/ \square (删除单张图像)/ \blacktriangledown 按钮; 13— \square (闪光灯)/ \blacktriangleright 按钮;
 14— \odot FUNC/JET(功能/设置)按钮

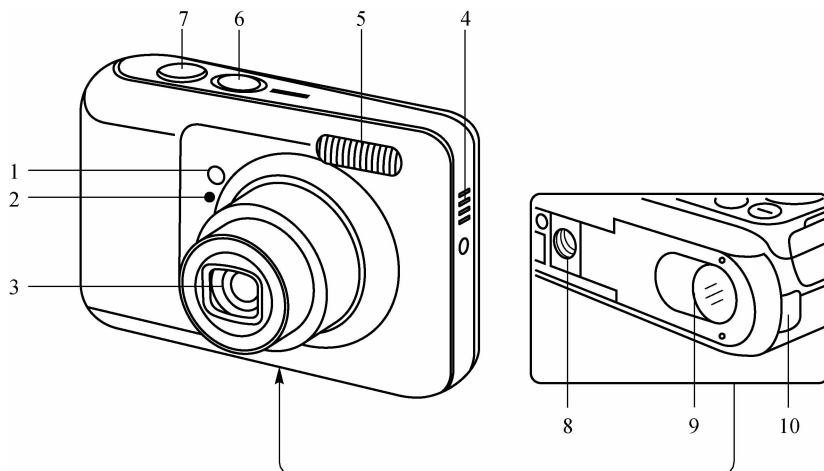


图 3-22 数码相机背面功能结构

- 1—指示灯(前面); 2—麦克风; 3—镜头; 4—扬声器; 5—闪光灯; 6—电源按钮; 7—快门按钮;
 8—三脚架插孔; 9—存储卡/电池仓盖; 10—直流电连接器连接线通孔

【实验操作】

1. 拍摄照片

(1)检查电池是否装好,若没有,则打开相机底部的电池门,给相机安装好电池。

(2)设定拍摄模式。转动相机后背上的模式转盘,将相机的“拍摄模式”(mode)设定在“拍摄”(capture)位置上。

(3)开启电源,检查相机内是否已经装有存储卡。

安装存储卡的方法是:先打开卡门,按存储卡的插入方向将存储卡插入相机指定的插槽,并将卡全部推入插槽,然后关闭卡门即可。

解卸存储卡的方法是:打开卡门,按相机底部的“弹出卡”键(eject),存储卡就会自动地从插槽内滑出一部分,只要用手小心地拿住卡将它从插槽中取出,然后关上卡门即可。使用存储卡要养成一个良好的习惯:在数码相机取景器左边的“预备灯”(ready)还在闪烁时,千万不能插、拔存储卡,否则可能会造成“机毁卡亡”的严重后果。

(4)拍摄照片。检查屏中的指示,准备相机,对被拍摄物体进行取景构图,对焦后拍摄照片。

(5)查看照片。按下按钮,查看其他照片然后关闭相机电源。

2. 传输照片

关闭相机,开启计算机,将所拍摄照片传输到计算机中。如有需要,可利用 photoshop 等软件按要求对照片进行处理。

【注意事项】

(1)拍摄前注意设定好相机的参数。每次拍摄前特别是更换电池之后,必须重新检查一次相机的设置菜单,确认分辨率、光圈等的设置,否则,极有可能拍出的照片达不到预期的效果。

(2)尽量使用高分辨率进行拍摄。当使用数码相机时,处理的照片只有非常有限的分辨率,对于高档相机也是如此,更不用说低档相机了。

(3)正确运用光照条件。数码相机的照片是完全依赖于光线的。如果在数码相机照片范围内的光照太强,则会产生带状效果。另外,由于 CCD 有一定的感光阈值,如果光线较暗,达不到要求的起码照度,数字照片就会受到严重损坏。

(4)慎用闪光灯。在许多情况下,闪光灯可能会破坏一幅完美的照片或者会制造出以后难以清除的错误。

(5)将拍好的照片下载到电脑硬盘上进行观察取舍并保存。

数码相机上一般都有液晶显示屏(LCD),这是一种特别有用的功能,但是并不能完全依赖它。大多数 LCD 显示屏是背光式的,在它上面显示的照片可能比在计算机上显示的照片看起来要好得多,特别是在色彩饱和以及明亮的区域。只有将图像下载到计算机硬盘上,再做修改可能更有意义。将图像按照原样下载并保存起来常常是最好的方式。因为并不知道何时才想对这些原始的图像进行处理。在做出任何修改之前下载并保存原始图像,可以保持一组原件,再取出复制件进行修饰和创意制作。

思考题

- (1) 数码相机和普通相机有何不同?
- (2) 如何拍摄出满意的数码照片?
- (3) 数码相机的主要特点是什么?

实验 3.8 不良导体导热系数的测定

导热系数是反映材料导热性能的重要参数之一,导热系数大、导热性能较好的材料称为良热导体;导热系数小、导热性能较差的材料称为不良热导体。一般来说,金属的导热系数比非金属的要大,固体的导热系数比液体的要大,气体的导热系数最小。本实验介绍一种比较简单的利用稳态法测定不良导体导热系数的方法。

【实验目的】

- (1) 掌握稳态法测定不良导体导热系数的方法。
- (2) 了解物体散热速率和传热速率的关系。

【实验原理】

1. 热传导定律

当物体内部各处的温度不均匀时,就会有热量从温度较高处传递到温度较低处,这种现象叫热传导现象。

早在 1882 年,著名物理学家傅立叶就提出了热传导的定律:若在垂直于热传导方向 X 上作一截面 ΔS ,以 $\left(\frac{d\theta}{dx}\right)_{x_0}$ 表示 x_0 处的温度梯度,那么在时间 Δt 内通过截面 ΔS 所传递的热量 ΔQ 为

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\lambda \left(\frac{d\theta}{dx}\right)_{x_0} \Delta S \quad (3-24)$$

式中, $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ 为传热速率;负号代表热量传递方向是从高温区传至低温处,与温度梯度方向相反;比例系数 λ 为导热系数,其值等于相距单位长度的两平面的温度相差为一个单位时,在单位时间内通过单位面积所传递的热量,单位是瓦·米⁻¹·开⁻¹(W·m⁻¹·K⁻¹)。

2. 稳态法测传热速率

测定样品导热系数的实验装置如图 3-23 所示。图中待测样品(圆盘)半径 $R_1 = 60$ mm,厚度 $h_1 = 5$ mm,样品上表面与加热盘(位于上方的黄铜盘)的下表面接触,温度为 θ_1 ,加热盘由内部电热丝供热,热量由加热盘通过样品上表面传入样品,再从样品下表面向散热盘(位于样品下面的黄铜盘)的上表面相接,温度为 θ_2 ,即样品中的热量通过下表面向散热盘散发。样品的上、下表面的温度可以认为是均匀分布的,在 h_1 不很大的情况下可忽略样品侧面散热的影响,则式(3-24)改为

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \frac{\theta_1 - \theta_2}{h_1} S \quad (3-25)$$

大学物理实验

式中, S 为样品的横截面积。

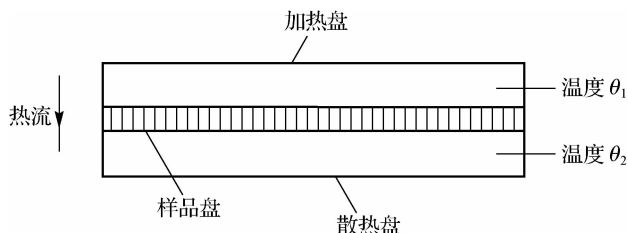


图 3-23 测定样品导热系数的实验装置

当 θ_1, θ_2 稳定时, 传热也达到稳定, 即通过待测样品的传热率和黄铜盘侧面及下面的散热率相同。

$$\left. \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right|_{\theta_1 = \theta_{10}} = \left. \frac{\Delta q}{\Delta t} \right|_{\theta_2 = \theta_{20}} \quad (3-26)$$

式中, θ_{10}, θ_{20} 分别为传热稳定时样品的上、下表面温度; $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ 为样品的传热速率; $\frac{\Delta q}{\Delta t}$ 为黄铜盘的散热率。

那么式(3-25)可表示为

$$\left. \frac{\Delta q}{\Delta t} \right|_{\theta_2 = \theta_{20}} = \lambda \frac{\theta_{10} - \theta_{20}}{h_1} S \quad (3-27)$$

由式(3-27)可见, 关键是求黄铜盘的散热率 $\left. \frac{\Delta q}{\Delta t} \right|_{\theta_2 = \theta_{20}}$ 。因此, 当测出稳态时样品的上、下表面的温度 θ_{10} 和 θ_{20} 后, 拿走样品, 让加热盘的下表面直接与散热盘的上表面接触, 加热下面的黄铜盘使温度上升到高于 θ_{20} 若干摄氏度后再拿开上面的黄铜盘, 让下面的黄铜盘自然冷却, 直接向周围散热。下面的黄铜盘在 $\theta_2 = \theta_{20}$ 附近的冷却速率为 $\left. \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right|_{\theta_2 = \theta_{20}}$ 。

黄铜盘的散热率与其冷却速率的关系为

$$\left. \frac{\Delta q}{\Delta t} \right|_{\theta_2 = \theta_{20}} = mC \left. \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right|_{\theta_2 = \theta_{20}} \quad (3-28)$$

在样品传热过程中, 只考虑下面的黄铜盘的下表面和侧面散热。但在测冷却速率 $\frac{\Delta \theta}{\Delta t}$ 时, 黄铜盘的上表面也暴露在外, 实际上黄铜盘的上、下表面和侧面都在散热。由于物体冷却速率与它的表面积成正比, 因而修正式(3-28)可得

$$\begin{aligned} \left. \frac{\Delta q}{\Delta t} \right|_{\theta_2 = \theta_{20}} &= mC \left(\left. \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right|_{\theta_2 = \theta_{20}} \right) \left(\frac{\pi R_2^2 + 2\pi R_2 h_2}{2\pi R_2^2 + 2\pi R_2 h_2} \right) \\ &= mC \left(\left. \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right|_{\theta_2 = \theta_{20}} \right) \left(\frac{R_2 + 2h_2}{2R_2 + 2h_2} \right) \end{aligned} \quad (3-29)$$

式中, R_2, h_2 分别为散热黄铜盘的半径和厚度。

将式(3-29)代入式(3-27)并整理得待测样品的导热系数为

$$\lambda = mC \left(\left. \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right|_{\theta_2 = \theta_{20}} \right) \left(\frac{R_2 + 2h_2}{2R_2 + 2h_2} \right) \left(\frac{h_1}{\theta_{10} - \theta_{20}} \right) \left(\frac{1}{\pi R_1^2} \right) \quad (3-30)$$

【实验仪器】

THQDC-1 型导热系数测定仪、游标卡尺、天平、镊子。