

第一章 绪论

§ 1.1 怎样做好物理实验

一、明确做物理实验的意义

物理学是一门以实验为基础的科学。物理学中每个概念的确立、原理和定律的发现，无不有坚实的实验基础。诺贝尔物理学奖从 1901 年第一次获奖至今已有近百年的历史，已有得主近 150 名，实验物理方面重大发现或发明占 73%。在物理学的发展史上，伽利略用实验否定亚历士多德“力是维持物体运动的原因”的论断，麦克斯韦根据电磁学的实验定律建立电磁场理论，并预言了电磁波的存在，但这些也只有在赫兹进行了电磁波实验后才被人们所公认。实验还是物理理论演变、发展的动力。20 世纪初，光电效应、黑体辐射等一系列的物理实验事实与经典理论发生了矛盾，导致了相对论和量子力学的产生。实验又是理论付诸于应用的桥梁。热核聚变理论指出，通过热核聚变可以获得巨大的能量，但是要想很好地利用它，还需要通过许多艰苦的实验才能实现。当然，科学实验离不开理论的指导。实验研究课题的选择、实验的构思和设计、实验方法的确定、实验数据的处理，以及实验结果中提出的科学假设和科学结论等等，都始终受理论所支配。

物理实验不仅在物理学的发展中占有重要的地位，而且在推动其他自然学科、工程技术的发展中也起着重要的作用。物理实验的构思、方法和技术，与化学、生物学、天文学等学科的相互结合，已取得了丰硕的成果。例如，1953 年生物学家沃森和物理学家克里克利用 X 射线衍射的方法在卡文迪许实验室成功地确定了 DNA 的双螺旋结构。此外，物理实验还是众多高新技术发展的源泉。原子能、半导体、超导、核磁共振、激光、空间技术等科研成果，都与物理实验息息相关。

做好物理实验，可以使我们对物理现象获得具体、明确的认识，了解概念和规律是怎样在实验的基础上得出的，从而加深对概念和规律的理解；可以提高我们分析和解决问题的能力；可以使我们体会如何探究问题，有助于提高我们的观察能力和实验能力；可以培养我们严肃、认真和实事求是的科学态度，养成良好的工作作风。

二、做好实验前的准备工作

实验前要认真仔细地阅读实验内容，做到以下几点。

- (1)明确实验目的、要求，弄懂实验原理。
- (2)明确所用仪器装置，熟悉操作步骤及注意事项，特别是注意事项，不仅要仔细看，还要牢记，否则会造成仪器损坏，甚至引发人身事故。
- (3)设计好记录数据的表格。此外，根据实验内容，准备好实验中所需的绘图工具、计

算器等。

三、手脑并用，正确操作、观测和记录

实验过程中，首先要了解仪器装置的性能、规格、使用方法。要仔细安装和调整实验装置，使之符合实验条件，如多用电表测电阻时的调零、螺旋测微器的调零、光路调共轴等，以减小测量误差。

在实验操作时，要在实验原理的指导下，对实验在心中形成一个整体的物理情景，对所测内容做到心中有数。在可能的情况下，对数据的数量级和走向做出定性估计后，再定量地读取测量数据。测量时，要集中精力、细心操作、仔细观察，以获得所用仪器可能达到的最佳效果。

原始数据是宝贵的第一手资料，是今后计算和分析问题的依据，应按有效数字的规则正确记录。实验记录的内容应包括：日期、时间、地点、合作者、仪器的编号、名称和规格、原始数据及有关现象。实验数据是否合理，学生应首先自查，然后交给指导教师审查。对不合理的和错误的实验结果，应分析原因，及时补测或重做。

四、正确分析和处理数据，写好实验报告

实验报告应包括实验名称、实验目的、实验原理、实验步骤、原始数据、数据处理和讨论等内容。对于实验原理应在理解的基础上用自己的语言来阐述，做到简明扼要。实验步骤要写出关键性的仪器调整方法和测量技巧。原始数据一般要求以列表的形式出现。数据处理要写出数据计算的主要过程、图表和最后结果的误差分析。对实验过程和结果的讨论要具体深入，有分析、有见解，不要泛泛而谈。可以是对观察到的实验现象进行分析，对结论误差原因进行分析，也可以对实验方案提出改进意见。

实验报告要求文字通顺、字迹端正、数据完整、图表规范、结果正确。特别强调，严禁伪造实验数据。

§ 1.2 物理实验方法

物理实验方法是人们根据一定的目的和计划，利用仪器、设备等物质手段，在人为控制、变革或模拟自然现象的条件下获取科学事实的方法。而测量方法是指测量某一物理量时，如何根据测量要求，在给定的条件下，尽可能地消除或减小系统误差以及减小随机误差，使测量值更为精确的方法。由于现代物理实验离不开定量的测量，所以实验方法和测量方法两者之间相辅相成、相互依存，甚至无法予以严格区分。

一、比较法

比较法是测量方法中最基本、最常用的方法。它分为直接比较法和间接比较法。

1. 直接比较法

将待测量与经过校准的仪器或量具进行直接比较，测出其量值，称为直接比较法。这种方法的测量精度，受到测量仪器或量具自身的局限。此外，它还有如下特点：同量纲，待

测量与标准量的量纲相同，如用米尺测量某物体的长度，同为长度的量纲；直接可比，待测量与标准量直接进行比较而获得待测量的量值，如用天平称量物体的质量，当天平平衡时，砝码的示数就是待测量的量值；同时性，待测量与标准量的比较是同时发生的，没有时间的超前与滞后，如用秒表测量某过程的时间。

2. 间接比较法

借助于一个中间变量，或将待测量进行某种变换，来间接实现比较测量，这种方法称为间接比较法。例如，磁电式电流表是利用通电线圈在磁场中受到的磁力矩与游丝的扭转力矩平衡时，电流与电流表指针的偏角成正比制成的。通过电流表指针的偏转角的间接比较，测出电路中的电流强度。

二、放大法

在试验中，常常会遇到一些微小量，直接测量，会带来很大误差，甚至无法进行。因此，需要把待测的物理量按一定规律加以放大，再进行测量，这种方法称为放大法。它分为累计放大法、机械放大法、电磁放大法和光学放大法等。

1. 累计放大法

在待测物理量能够简单重叠的条件下，将它展延若干倍再进行测量的方法，称为累计放大法。例如，测单摆的周期时，先测出 100 次全振动的时间 t 则周期为 $t/100$ 。

在使用累计放大法时要注意两点。一是展延过程中待测量不能发生变化；二是在展延过程中应尽可能避免引入新的误差。

2. 机械放大法

利用机械部件之间的几何关系，使标准单位量在测量过程中得到放大的方法，称为机械放大法。机械放大法可以提高测量仪器的分辨率，增加测量结果的有效数字位数。例如，螺旋测微器利用螺杆鼓轮机构，使仪器的最小刻度从 1mm 变为 0.01mm 从而提高测量精度。

3. 电磁放大法

要对微弱的电信号有效地进行观察和测量，常借助于电子学中的放大线路。例如，在用光电效应法测普朗克常量中，将微弱的光电流通过微电流测量放大器放大后，进行测量。

4. 光学放大法

光学放大法大体分两种，一种是使被测物体通过光学仪器（如测微目镜、读数显微镜等）形成放大的像，便于观察判别；另一种是通过测量放大的物理量来获得本身较小的物理量。例如，光杠杆法就是一种常用的光学放大法。光学放大法不易受环境的干扰，它被广泛地应用于各个科技领域。

三、平衡法与补偿法

1. 平衡法

平衡状态是物理学中一个重要概念，在平衡状态下，许多复杂的物理现象可以简单化，便于进行定性与定量研究。利用平衡状态测量待测物理量的方法，称为平衡法。例

如，用等臂天平测量物体的质量，用惠斯登电桥测电阻就是用的平衡法。

2. 补偿法

根据某一测量原理，在提供一种可调的标准量来抵消所显现的作用的条件下，对待测量进行测量的方法，称为补偿法。例如，利用电势差计测电动势就是用的补偿法。此方法经常与平衡法、比较法结合使用。

四、转换法

根据物理量之间的各种效应和定量的函数关系，通过对有关物理量的测量求出待测物理量的方法，称转换法。大致分为两种：参量换测法与能量换测法。

1. 参量换测法

利用各种参量在一定条件下的相互关系及其变化规律来实现待测量的变换测量，称为参量换测法。例如“测定金属丝的杨氏弹性模量”、“用光栅测波长”的实验方法就是此方法。

2. 能量换测法

电测方法具有控制方便、反应速度快、灵敏度高并能进行自动记录和动态测量等优越性，因此在实验中可以利用物理学中物理量间存在的各种效应与关系，把被测的非电量转化成电量进行测量，最后求出非电量物理量。这种利用能量变换器将一种形式的能量转换成另一种形式的能量进行测量的方法，称为能量换测法。此方法的核心是换能器。下面介绍几种典型的能量换测方法。

(1) 热电换测。这是将热学量转换成电学量再进行测量的一种方法。例如在导热系数的测定中，将温度的测量转换成热电偶温差电动势的测量。

(2) 压电换测。通过压力与电压之间的变换进行测量。例如，产生超声波的“探头”（晶体换能器）具有压电效应。话筒和扬声器，话筒能把声波的变化转换成相应的电压变化；扬声器则把电信号转换成声波。医用心电图，心脏跳动对压电陶瓷（换能器）产生的压力转换成电压输出。

(3) 光电换测。通过光学量的变化转换为电学量变化的测量称为光电换测。其变换原理是光电效应。因其机理不完全相同，光电效应又可分为外光电效应、内光电效应和光生伏特效应。利用外光电效应做成的转换器有光电管、光电倍增管等。在“光电效应法测普朗克常量”的实验中，我们已用到过光电管；利用内光电效应做成的转换器有光敏电阻、光敏二极管和光敏三极管；利用光生伏特效应的转换器就是光电池，光电池可把光能直接转换为电能，因此可作电源用。

(4) 磁电换测。这是磁学量与电学量之间的转换测量。磁感应强度 B 直接测量很困难，利用磁电换测后，可使测量变得简便、快速。在具体测量中，可根据被测磁场的类型和强弱来选择合适的方法。例如，实验“用霍尔元件测螺线管磁场”中，是利用霍尔效应，把对磁感应强度的测量转换为对霍尔元件的工作电流和电压的测量。此外，常用的方法还有冲击法和感应法。冲击法是将磁感应强度的测量转化为冲击电流计最大偏转刻度的测量；感应法是将磁感应强度的测量转换为交变感应电动势有效值的测量。

五、模拟法

在科学研究中，有很多课题是不能实际地反复实验，如要设计一项水利工程，不可能对设计的工程进行实地的测试，只能首先模拟。这种依相似理论为基础，不直接研究某物理现象或过程本身，而是用与该现象或过程相似的模型来进行研究的方法，称为模拟法。它分为物理模拟和数学模拟。

1. 物理模拟

保持同一物理本质的模拟方法即为物理模拟法。例如，用风洞（高速气流装置）中的飞机模型模拟实际飞机在大气中的飞行；用流槽模型预演河流的冲击作用等都属于物理模拟。

2. 数学模拟

两个不同本质的物理现象和过程，如果具有相同的数学表达式来反映它们的规律，可以根据数学形式的相似而进行模拟，这种模拟方法称为数学模拟法。例如，在实验“用模拟法描绘静电场”中，由于反映稳恒电流场性质的场方程与反映静电场性质的场方程相似，所以用稳恒电流场来模拟静电场。

§ 1.3 实验仪器的基本调整与操作技术

在物理实验中，正确的调整和操作不仅可将系统误差减小到最低限度，而且对提高实验结果的准确度有直接的影响，另外还可以保护仪器，可以延长仪器的使用寿命。

一、水平、垂直调整

有些仪器和实验装置必须在水平或垂直状态下才能正常地进行实验，否则就会产生附加误差。例如，需要水平放置的电表，若垂直或倾斜放置，就会因增大表针转轴的摩擦或产生附加力矩等原因而产生附加误差。因此，在实验中经常要对仪器进行水平、垂直调整。对于天平、气垫导轨、三线摆等，常借助水准仪或悬锤进行。凡是要做水平、竖直调整的仪器或装置，在其底座上大多数设有三个底脚螺丝（或一个固定脚，两个可调脚），通过调节底脚螺丝，借助于水准仪或悬锤，可将仪器调整到水平或垂直状态。对于电表等可目测调整至水平、竖直或与水平面成一定角度。

二、零位调整

绝大多数测量工具及仪表如游标卡尺、螺旋测微器、检流计、电流表、电压表、万用表等都有其零位（零点）。在使用它们之前，都必须检查或校正仪器零位。对于一些特殊的仪器或精度要求较高的实验，还必须在每次测量前校正仪器零位。

零位校正的方法一般有两种。一种是测量仪器本身带有零位校正装置，应使用零位校正装置使仪器在测量前处于零位。例如，万用表有两个调零旋钮，一个是机械调零旋钮，用于机械调零，一个是电子调零旋钮，用于欧姆调零；另一种仪器本身不能进行零位调整，如端点已经磨损的米尺、钳口已被磨损的游标卡尺，对于这类仪器，则应先记下零点读

数，然后对测量数据进行零点修正。

三、光路调整

1. 直线光路调整

在由两个或两个以上的光学元件组成的光学系统中，为了获得好的像质，满足近轴光线的条件，必须进行共轴调整。调整一般分为两步，第一步进行粗调——目测调整。将各光学元件紧靠在一起，使元件的中心（光心）重合于一条直线上，并使该直线与仪器的调整基线（如光具座的导轨）平行，将各元件的光轴也与其平行；第二步根据光学成像规律进行细调，常用的方法有自准法和共轭法（参见实验“非正常眼的模拟与纠正”）。如果在光具座上进行实验，为了获得正确的读数，还必须把光轴调整到与光具座的导轨的距离等高，并且光学元件的截面与导轨垂直。

2. 折线光路调整

折线光路调整的首要问题是垂轴调整。在可能的情况下，先将部分直线光路进行调整，然后放置折光器件进行垂轴调整，最后根据折光方向寻找光路，观察折光后光现象。例如，分光计的调整，首先将望远镜和平行光管调整好，并垂直，然后放置棱镜或光栅再进行垂轴调整，最后根据棱镜或光栅的折光方向寻找光路，并调整成像。再如，牛顿环干涉的调整，首先将显微镜和光源调整好，再将半反射镜（玻璃片）法线调整于垂直测量显微镜的移动方向上，转动半反射镜，找到反射光路，即可进行牛顿环条纹的清晰度调整。

四、消视差调节

在实验中，经常会遇到仪器的读数标线（指针、叉丝）和标尺平面不重合的情况。例如，电表的指针和刻度面总是离开一定的距离，因此当眼睛在不同的位置观察时，读得的指示值有时会有差异，这一现象称为视差。为了获得准确的测量结果，实验时必须消除视差。消除视差的方法有两种：一是使视线垂直标尺平面读数，如 1.0 级以上的电表的表盘上均附有平面镜，当观察到指针与其像重合时，保持眼睛位置不动去读指针示数，才能得到正确的读数，否则会引入视差。二是使读数标线与标尺平面密合于同一平面内，如游标卡尺上的游标尺加工成斜面，便是为了使游标尺的刻线下端与主尺接近于同一平面，以减小视差。

光学实验中的视差问题较为复杂，影响因素除了观测者的读数方法外，还有因仪器没有调节好而造成的较大视差。下面分析光学仪器测量时的误差。

在用光学仪器进行非接触式测量时，常使用带有叉丝的望远镜或读数显微镜，其基本光路如图 1 所示。它们的共同点是在目镜焦平面内侧附近装有一个十字叉丝（或带有刻度的分划板），若待测物体经物镜后成像 A_1B_1 在叉丝所在的位置处，人眼

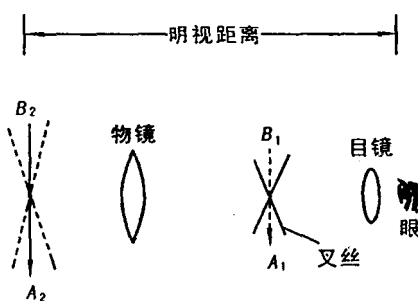


图 1 望远镜基本光路示意图

经目镜观察到叉丝与物体的最后虚像 (A_2B_2) 都在明视距离处的同一平面上, 这样便无视差。

要消除视差, 可仔细调节目镜 (连同叉丝) 与物镜之间的距离, 使待测物体经物镜成像在叉丝所在的平面上。一般是一边调节一边稍稍左右、上下移动眼睛, 看看待测物体的像与叉丝像之间是否有相对运动, 直至两者无相对运动为止。

五、逐次逼近调节

在物理实验中, 仪器的调节大多不能一步到位。例如, 电桥达到平衡状态、电势差计达到补偿状态、灵敏电流计零点的调节、分光计中望远镜光轴的调节等等, 都要经过反复多次调节才能完成。“逐次逼近调节”是一个能迅速、有效地达到调整要求的调节技巧。

依据一定的判断标准, 逐次缩小调整范围, 较快地获得所需状态的方法称为逐次逼近调节法。判断标准在不同的仪器中是不同的, 如天平是观察其指针在标度前来回摆动, 左右两边的振幅是否相等; 平衡电桥是看检流计的指针是否指零。逐次逼近调节不仅在天平、电桥、电势差计等仪器的平衡调节中用到, 而且在光路的共轴调整、分光计的调节 (参见实验“用分光计测定棱镜折射率”) 中也要用到, 它是一种经常使用的调节方法。

六、先定性、后定量原则

在测量某一物理量随另一物理量变化的关系时, 为了避免测量的盲目性, 应采用“先定性、后定量的原则”进行测量, 即在定量测量前, 先对实验的全过程进行定性观察, 在对实验数据的变化规律有一初步了解的基础上, 然后进行定性测量。例如, 在测绘晶体二极管的伏安特性曲线时, 对于电流 I 随电压 U 变化的情况先进行定性观察, 然后在分配测量间隔时, 采用不等间距测量, 在电压增量 ΔU 相等的两点之间, 如果电流 I 的变化较大时, 就应多测几个点。这样采用由不同间隔测得的数据来作图就比较合理。

七、回路接线法

在电磁学实验中, 常遇到按电路图接线问题。一张电路图可分解为若干个闭合回路, 接线时由回路 I 的始点 (往往为高电势点或低电势点) 出发, 依此首尾相连, 最后仍回到始点, 再依此连接回路 II、回路 III ……这种接线方法称为回路接线法。按此法接线或查线可确保电路连接正确 (参见实验“热敏电阻的特性及其应用”)

八、先串联后并联的原则

在电磁学实验中, 经常把一些仪表连接到电路中测量数据, 为了使仪表能准确地连到电路中或能使电路准确、快速地连好, 应采取先串联后并联的原则。例如, 先把电流表连同其他元件串联到电路中, 再把电压表并联进去, 或把仪表的电流部分先串联到电路中, 再并联电压部分 (如功率表的使用)。

九、避免空程误差

由丝杠和螺母构成的传动与读数机构, 由于螺母与丝杠之间有螺纹间隙, 往往在测量

刚开始或刚反向转动时，丝杠需要转过一定的角度（可能达几十度），才能与螺母啮合。结果与丝杠连结在一起的鼓轮已有读数改变，而由螺母带动的机构尚未产生位移，造成虚假读数而产生空程误差。为了避免产生空程误差，使用这类仪器（如螺旋测微器、读数显微镜）时，必须待丝杠与螺母啮合后，才能进行测量，且只能向一个方向旋转鼓轮，切忌反转。

§ 1.4 物理实验基本规则

一、电磁学实验基本规则

在电磁学实验中，为了防止元器件、仪器、仪表的损坏和人身触电事故，确保实验顺利进行，必须注意以下几点。

(1) 使用元器件、仪器和仪表前，必须结合说明书（或实验指导书）了解该器件、仪器和仪表的面板结构（见表 1）和使用方法，了解各开关、插口、旋钮、按钮和接线柱的位置和功能。切不可在不了解（或不甚了解）仪器性能和操作规程的情况下，抱着试试看的心态，随意使用操作。

表 1 常见电气仪表面板上的标记

名称	符号	名称	符号
指示测量仪表的一般符号	○	整流式仪表	
检流计		电动式仪表	
安培表	A	电动式比率表	
毫安表	mA	感应式仪表	
微安表	μA	静电式仪表	
伏特表	V	直流	—
毫伏表	mV	交流	~
千伏表	kV	交流、直流	— ~
欧姆表	Ω	三相交流	3N~
兆欧表	MΩ	以标度尺量程百分数表示的精确度等级，例如 1.5 级	1.5
负端钮	—	以标度尺长度百分数表示的精确度等级，例如 1.5 级	1.5
正端钮	+	以指示值的百分数表示的精确度等级，例如 1.5 级	
公共端钮	*	标度尺位置为垂直	⊥
接地端钮		标度尺位置为水平	
调零器		标度尺与水平倾角为 30°	∠30°
磁电式仪表		不进行绝缘耐压试验	
磁电式比率表		绝缘强度试验电压为 500V	☆
电磁式仪表		绝缘强度试验电压为 2kV	
电磁式比率表		II 级防外磁场及电场	II : II

(2) 根据实验线路和具体设备，在接线前，首先估计电路中可能出现的电流和电压的

大小，初步判断所用电表和其他实验器件的规格是否适用。在把握不大的情况下，应尽可能使用大量程，最后根据实际情况改用适当量程。

(3)接线前，应合理放置仪器，尽可能使连线距离短捷，否则连接线路容易出错，而且不易查出。如条件可能，可选用不同颜色的连接导线。仪器布置的原则应该是：“便于连线 利于操作 易于观察 保证安全。”

(4)按电路图连接时，依据先串联后并联的原则，从电源开始，用回路接线法依次连接线路，这叫“脉络相承，分区接线”。要充分注意电路中的等位点，不宜在一个接线柱上接太多的导线，否则容易造成接触不良。将导线弯曲好，并使弯曲的方向与接线柱螺母旋紧的方向一致。接头要旋紧，但不要旋死。

(5)电路接好，自己检查认为无误后，再请教师检查，确认正确后，方可接通电源，进行实验。检查时特别要注意连线是否有误；开关是否断开；电源的输出调节旋钮是否处于使电压输出为最小的位置；电源、电表正负极性的连接是否正确；电表量程是否恰当；电阻箱阻值是否正确（切不可为零）；作分压或限流用的变阻器是否处于安全位置等。一定要养成检查电路的习惯。

(6)通电合闸前，要事先想好通电瞬间各仪器的正常反应是怎样的。合闸时应手握电源开关，眼睛密切注意仪器、仪表的反应是否正常，出现异常，随即拉闸断电，并报告老师。

(7)实验过程中需要暂停（如更改线路某一部分或改变电表量程等）时，必须断开电源。

(8)注意安全。不管电路有无高压，要养成避免用手或身体直接接触电路中导体的习惯。

(9)实验完毕，不要忙于拆线路，应将电路中的仪器拨到安全位置，断开电源开关，经老师检查实验数据后再拆线。拆线时应先拆去电源，并整理好仪器。

二、光学实验基本规则

光学仪器的主体是光学元件。光学元件大多是用光学玻璃制成的，对其光学性能都有一定要求，而它们的机械性能和化学性能都很差。光学仪器出厂前，均经过精密调整和校正，如果使用维护不当，很容易损坏和报废。为了维护光学元件和仪器的正常工作，确保实验顺利进行，光学实验中，必须注意以下几点。

(1)使用仪器前，必须了解仪器的结构、原理、操作和使用方法，切不可在不了解仪器的操作和使用的情况下，随意调整和拆卸光学元件。

(2)更换仪器位置之前必须把所有可能脱落的部件取下。搬动时，要防止光学元件位置移动，轻拿轻放，勿使光学仪器或光学元件受到冲击或振动，特别要防止摔落。安放要稳妥。

(3)不许用手触摸光学元件的光学面。须用手拿光学元件时，只能接触其磨砂面或边缘 如图 2 所示。

(4)除实验规定外，不允许任何溶液接触光学元件表面，不要对着光学元件表面说话，更不要对着它咳嗽、打喷嚏，以防含有机物的水汽玷污光学表面使之生霉发雾。

(5)光学元件表面不清洁时 不可加压擦拭 更不准用手、手帕、卫生纸和衣角擦拭 不

可用嘴吹气。可按下述方法进行处理。

1)用橡皮吹风除掉镜头表面的纤维或浮灰。

2)未镀膜的光学表面上如有附着力不强的斑点,可用专用镜头刷、镜头纸或麂皮等柔软清洁的材料轻轻拂去。压力不宜过大,也不要重复擦拭,以防止划伤光学表面。

3)抛光的玻璃表面(或某些镀膜面)上有油污、斑痕,可用50%的无水乙醇和50%的无水乙醚混合液处理。首先用脱脂棉球蘸一下溶液,并在洁净的纱布上挤去多余的液汁(液汁过多不易干燥,还会留下擦痕),沿着一个方向轻轻擦拭一部分表面,而后再用棉球的另一侧擦拭其他部分(切勿重复使用)



图2 手持光学元件的方式
I—光学面;II—磨砂面

上述三条仅适用于一般光学元件。对全息光栅、用晶体材料加工成的透镜或棱镜等特殊元件,应采用特别的方法处理。

(6)光学仪器的机械结构一般都比较精密,要做到不该调节的部件不调节,应该调节的部件操作时动作要轻并缓慢进行,用力要平稳均匀,不得强行扭动,也不能超出其行程范围。若使用不当,仪器精密度会大大降低,甚至被损坏。

(7)实验完毕,光学元件不得随意乱放,应放还原箱内,按原来的状态先放主机后放附件。注意防尘、防湿和防腐蚀。

§ 1.5 测量误差和数据处理

一切物理量的测量不可能是完全准确的,这是由科学技术发展水平、人们的认识能力、测量仪器的发展状况及其制造精度所决定的,即测量误差的存在是难以避免的。如何面对测量误差,怎样分析、处理测量数据是实验的一项重要内容。本章主要介绍测量误差的产生和分类、误差估计、有效数字及其运算、实验数据处理的基本方法和实验结果的表示等内容。

一、测量和单位

研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理都离不开测量。按测量方法,测量可分为直接测量和间接测量。直接测量就是将待测量与一个被选作单位的同类量进行比较,其倍数即为该测量的测量值。例如,用米尺测量长度是以“m”作为单位,用天平测量质量是以“kg”作为单位等等。

在我国,《中华人民共和国计量法》规定,采用以国际单位制(SI)为基础的中华人民共和国法定计量单位,即以长度的单位“米”(m)、质量的单位“千克”(kg)、时间的单位“秒”(s)、电流强度的单位“安培”(A)、温度的单位“开尔文”(K)、物质的量的单位“摩尔”

(mol) 和发光强度的单位“坎德拉”(cd)为基本单位,其他量的单位都可以由这七个基本单位导出,称为导出单位。基本单位和导出单位构成单位制。

在实际测量中,为了便于表达,还规定了与“主单位”相对应的辅助单位,如“km”、“cm”、“ μm ”和“t”。“g”“mg”分别是“m”和“kg”的辅助单位。测量数值的大小与选用的单位有关。对同一次测量,选用的单位越大数值越小。因此,记录每一个测量值时都应包含数值和单位两部分即“测量值=测量数值+单位”。一个没有单位的数字是毫无意义的。

在物理测量中,许多物理量是不能或者不便于直接测量的,但可以根据某些可直接测量的物理量与被测量之间的函数关系,得出所需的结果,这种测量称为间接测量,如伏安法测电阻、固体密度的测定、地球质量的测量等。

按测量条件,测量可分为等精度测量和不等精度测量。如果在相同的条件下对同一个量进行 n 次测量得到 n 个数据,那么没有理由认为其中的某一个数据比其他数据测得更准些,在这种情况下进行的测量称为等精度测量。这里的相同条件包括:同一个实验者、同一台仪器、同样的周围环境等可能影响测量结果的因素。在不同条件下对同一量的多次测量称为不等精度测量。例如,不同实验者用各自的天平测量同一物体的质量,同一实验者用不同电表测同一电流的电流强度等。

二、误差及其分类

大量的实验事实表明,在任何环境和仪器条件下进行的测量,不论是哪一种形式的测量,都存在着测量结果和测量真值之间的差异。分析测量中可能存在的各种误差,尽可能消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差予以估计,是物理实验和许多科学实验中必不可少的工作。为此,了解误差的概念、特性、产生的原因和估计方法,是实验者必备的知识。下面介绍误差及有关概念。

真值是反映物质特性的物理量的客观量值,它不可能非常精确地测出,实际测量只能是对真值的尽量接近,因而真值是一个理想概念。在实际测量中,常用被测量的实际值或已修正过的算术平均值作为测量结果。测量结果与真值之间的偏差称为误差。误差可以减小,但不可能完全消除。

测量值(x)与真值(X)之差(Δ)称为测量误差(简称误差)。即: $\Delta = x - X$ 。误差有两种表示方法:绝对误差和相对误差。

$$\text{绝对误差}(\Delta) = \text{测量值}(x) - \text{真值}(X)$$

$$\text{相对误差}(E) = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \times 100\% \quad (\text{用百分数表示})$$

既然测量必然存在误差,那么怎样最大限度地减小测量误差,并估算出误差的范围呢?这就要了解误差的产生原因及其性质。产生误差的原因主要有:仪器设备的精度、实验环境、实验人员的习惯、测量原理及方法等。根据误差的性质,误差可分为系统误差和随机误差两大类。

(一) 系统误差

系统误差具有以下特征:在同一条件下,多次测量同一量值时误差的大小和正负保持

不变，或在条件改变时，误差按一定规律变化。这表明系统误差是带有系统性和方向性的误差。

系统误差在某些情况下对测量结果的影响比较大，研究和分析系统误差的产生原因，发现和减小系统误差，使测量结果趋于正确和可靠，是误差理论的重要课题之一。

系统误差是由固定不变的或按确定规律变化的因素造成的。具体来说，有以下几方面。

1. 测量装置方面

由于仪器制造方面的缺陷（如螺旋测微计、游标卡尺的零点不准，表盘刻度不均匀等）、仪器安装和调整不当等因素产生的误差，这些因素造成的误差其大小和正负保持不变。

2. 测量方法方面

测量依据的理论方法和公式本身就是近似的，如用单摆测重力加速度的实验中，单摆的周期公式就是近似公式；测量条件或测量方法不能满足理论的要求，如实验中忽略摩擦、忽略电表的内阻、忽略能量损耗等，类似这些因素都将造成系统误差。

3. 环境方面

测量中空气的温度、湿度、压强等的有规律的变化，造成有规律变化的误差产生，如温度的变化造成物体热胀冷缩、影响物体的导电性能等。

4. 实验者方面

由于实验者本身的心理特征和固有习惯造成某些固定误差，如有的人读数时总是偏小，有的人读数时则总是偏大，这体现出一定的倾向性等。

根据系统误差的产生原因，实验者应在测量前对可能影响结果的各种因素进行分析研究，预见、发现、估算和检验一切可能产生系统误差的因素，并设法予以纠正；在实验结束后，要学会分析测量结果中可能包含的系统误差，以进一步提高实验质量。

（二）随机误差

随机误差是指在对同一被测物理量的多次测量中，绝对值和符号以不可预知的方式变化着的误差。随机误差的产生，是由测量过程中的一系列随机因素的影响造成的。例如，测量环境的随机变化、测量者心理的变化对读数的影响、仪器部件组合不稳定等等。

随机误差具有随机性，就某一测量值来说其变化是没有规律的，即其符号可能为正，可能为负，其数值可能偏大，可能偏小。但对一个量进行足够多次的测量，发现随机误差是按一定的统计规律分布的。大多数实验随机误差服从正态分布，这种分布的特点是：正方向误差和负方向误差出现的次数大体相等，数值较小的误差出现的次数较多，很大的误差在没有错误的情况下通常不出现。基于这一特点，实验中常对多次测量的数据求算术平均值，并用算术平均值表示测量结果，可以有效减小随机误差的影响。

另外，由于实验者使用仪器的方法不正确，操作错误，设计不合理，读数错误或数据记录错误，使得测量结果明显偏离实际可能，这种偏差可称为疏失误差。疏失误差的实质是实验错误。只要实验者具备严肃认真的实验态度、严谨细致的作风、实事求是的科学态度，疏失误差是可以避免的。

三、直接测量随机误差的估算

(一) 随机误差的统计规律

从某一次测量来看,随机误差具有随机性,当测量次数足够多时,就会显示出明显的规律性。大量的事实和统计理论都表明,在大多数情形下,随机误差服从正态分布,如图1所示。图中横坐标为误差 Δ ,纵坐标为误差分布概率密度函数 $f(\Delta)$,它表示误差 Δ 在其附近处单位误差间隔内出现的概率。由图可见,随机误差具有以下几个特征。

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

绝对值相等的正、负误差出现的概率相同。

3. 有界性

在一定的测量条件下,误差的绝对值不超过一定限度。

4. 抵偿性

随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋向于零,这是由正、负误差相互抵偿造成的,体现出随机误差具有抵偿性。因此,增加测量次数可以减小随机误差。

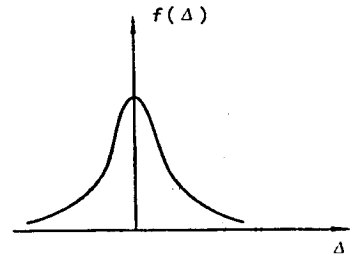


图1 随机误差的正态分布

(二) 多次测量的平均值的误差

根据随机误差的统计理论,在一组对物理量 X 的 n 次(一般要求 $n > 10$)测量的数据中,其算术平均值 \bar{x} 最接近真值,称为测量的最佳值或近真值,用 \bar{x} 表示。由于不能确切地知道真值,所以常用测量的最佳值代替真值。算术平均值的计算公式为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

每一个测量值与测量结果的差值称为该测量值的偏差。可表示为: $d_i = x_i - \bar{x}$ 。一般情况下,可用测量值偏差的算术平均值作为绝对误差范围。用 Δx_i 表示。其计算公式为:

$$\Delta x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$$

相应的,相对误差的计算公式为:

$$E = \frac{\Delta x_i}{\bar{x}} \times 100\% \quad (\text{用百分数表示})$$

显然,偏差有正有负,有大有小,求其平均值得到的结果 Δx_i 不能反映测量数据的离散程度。这里把各次测量值的偏差 d_i 的平方和与 $(n-1)$ 之比的平方根称为在多次测量中某一次测量的标准偏差,用 δ_x 表示。计算公式为:

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{(n-1)}}$$

标准偏差的大小表示测量值的精密度。标准偏差大表示测量数据分散,测量的精密

度低；标准偏差小，表示测量数据密集，测量精密度高。

在介绍了某一次测量的标准偏差后，再来介绍数据处理中记录结果时用到的一个重要概念：平均值的标准偏差，它定义为 n 次测量中任一次测量值标准偏差的 $1/\sqrt{n}$ 。用 δ_x 表示。其计算公式为：

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n-1)}}$$

需要指出的是，误差表示测量值与真值之差，偏差表示测量值与近真值之差，二者是有区别的。由于真值是一个理想概念，近真值与真值最接近，因此偏差就接近于误差。在这里，我们不去区分二者的细微区别，数据处理中一般用标准偏差代替标准误差。

运用以上概念，多次测量的结果可表示为：

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

(三) 仪器的标准误差

使用仪器进行任何测量，都存在由仪器引起的测量误差。使用不同精度的仪器，测量误差不同。我们把在规定的使用条件下正确使用仪器时，仪器的示值和被测量的真值之间可能出现的最大误差称为仪器误差，以 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示。仪器误差一般由生产厂家在仪器铭牌或说明书中给出，也可由生产厂家给出的仪器准确度级别或所用仪器的量程和级别（或只用级别）算出。对于未说明仪器误差、又不知精确度级别的仪器，可根据具体情况进行估算，如可以取仪器的最小分度作为仪器误差，或者取仪器最小分度的 $1/2$ 作为仪器误差。

仪器误差概率密度函数一般遵从均匀分布的规律，其标准误差可由下式计算：

$$\delta_{\text{仪}} = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3}$$

(四) 单次直接测量的误差估算

在某些实验中，由于实验条件不许可或不能进行多次测量，对某一物理量的测量只有一次，在随机误差不大的情况下，可用仪器的标准偏差表示该次测量的标准偏差，该次测量的数据作为近真值。测量结果可表示为：

$$x = x_{\text{测}} \pm \delta_{\text{仪}}$$

四、间接测量的最佳结果及其误差的计算

对间接测量来说，其结果由直接测得量决定。将各直接测得量的最佳值（算术平均值）代入公式计算得到的结果，称为间接测得量的最佳值。由于各个直接测得量的最佳值都有一定的误差，因此由直接测量值经过运算得到的间接测量结果必然也有误差。表达直接测量误差与间接测量误差之间的关系式，称为误差传递公式。误差传递公式是运用相关数学知识由理论计算得到。表 1 列出了常用的标准误差传递公式和算术平均误差的传递公式，以便查找使用，有关推导可参看有关书籍。

表 1 常用的标准误差传递公式和算术平均误差的传递公式

数学运算关系	算术平均误差传递公式		标准误差传递公式
	绝对误差	相对误差	
$N=A+B$	$\Delta A+\Delta B$	$(\Delta A+\Delta B)/(A+B)$	$\delta_N = \sqrt{\delta_A^2 + \delta_B^2}$
$N=A-B$	$\Delta A+\Delta B$	$(\Delta A+\Delta B)/(A-B)$	
$N=A \cdot B$	$A\Delta B+B\Delta A$	$\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$	$\frac{\delta_N}{N} = \sqrt{(\frac{\delta_A}{A})^2 + (\frac{\delta_B}{B})^2}$
$N=\frac{A}{B}$	$\frac{B\Delta A+A\Delta B}{B^2}$	$\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$	
$N=A^n$	$nA^{n-1}\Delta A$	$n\frac{\Delta A}{A}$	$\frac{\delta_N}{N} = n\frac{\delta_A}{A}$
$N=\sqrt[n]{A}$	$\frac{1}{n}A^{\frac{1}{n}-1}\Delta A$	$\frac{\Delta A}{nA}$	$\frac{\delta_N}{N} = \frac{1}{n}\frac{\delta_A}{A}$
$N=\sin A$	$\cos A \cdot \Delta A$	$\text{ctg} A \cdot \Delta A$	$\delta_N = \cos A \delta_A$
$N=\cos A$	$\sin A \cdot \Delta A$	$\text{tg} A \cdot \Delta A$	$\delta_N = \sin A \delta_A$
$N=\ln A$	$\frac{\Delta A}{A}$	$\frac{\Delta A}{A \ln A}$	$\delta_N = \frac{\delta_A}{A}$

五、有效数字及其运算

(一) 有效数字的概念

在前面的内容中，我们已经知道误差在测量中是普遍存在的。在实际测量中，误差包含在记录的结果（如数据）中。在直接测量中，从仪器上读出的数字，通常都应尽可能地估计到仪器最小刻度线的下一位。例如，在图 2 中 被测物体的长度可记为 2.57cm，其中的最后一位数字“7”是估计出来的，但它在一定程度上反映客观实际，因此也是有效的，“7”

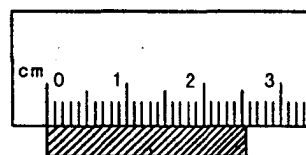


图 2 用直尺测物体

称为存疑数字；“2.5”则是精确的，称为准确数字。对这次测量来说，“2.5”和“7”都是有效的，准确数字和存疑数字的全体称为有效数字，一般来说，存疑数字取一位，即“有效数字”=“准确数字”+“一位存疑数字”。一般可以认为误差包含在存疑数字之中。根据有效数字的概念，15.3mm 与 15.30mm 是不相等的，这是因为得到这两个数据的测量精度不相同：15.3mm 的精度是 1mm 数字“3”是估计的；15.30mm 的精度是 0.1mm 数字“0”是估计的。在实验中记录数据时，请同学们注意以下几点。

1. 在测量数据中，1,2,3,...,9 九个数字都是一位有效数字，而“0”是特殊的

(1) 数字中间的“0”为有效数字 如 70.03cm 是 4 位有效数字。

(2) 数字后的“0”为有效数字 如 15.900cm 是 5 位有效数字。

(3) 数字前的“0”不是有效数字 如 0.159 00m 或 0.000 159 00km 的有效数字都是 5 位。1 前面的“0”表示的是数量级的大小。

2. 有效数字的位数与小数点的位置无关

记录数据的单位变化时，数据的有效数字的位数要保持不变（见上例）。为了书写规范，我们常采用以下的标准形式：使小数点前有一位有效数字，用 10 的 n 次方幂来表示其数量级，如上述数据写成标准形式为： $7.003 \times 10^{-1} \text{ m}$ ； $1.5900 \times 10^{-1} \text{ m} = 1.5900 \times 10^{-4} \text{ km}$ 。

（二）有效数字的运算规则

实验操作结束后，数据处理中常常需要对测得的数据进行运算。在运算过程中，首先要保证测量的准确程度，并尽可能减少运算时间，以免浪费精力。运算后要使结果有合理位数的有效数字，应遵循下面的运算规则。

规则一：加减运算。

几个量相加（或相减）时，最后结果的存疑数字与相加减各数中最大的那个存疑数对齐。例如，在下边的运算式中，加下划线的数字是存疑数字，存疑数字与其他数字的加、减、乘、除结果应为存疑数字，因此运算结果中的“9”和“6”都是存疑数字。参与运算的量只有一位存疑数字，运算结果中只能有一位存疑数字。按照“四舍六入五凑偶”（即尾数小于五则舍，大于五则入，等于五时前一项是偶数则舍，前一项是奇数则入）法则，其结果应记为 107.60mm。

$$\begin{array}{r} 106.05 \\ + 1.54 \underline{6} \\ \hline 107.5 \underline{9} \underline{6} \end{array}$$

规则二 乘除运算。

几个量相乘（或相除）的积（或商），其有效数字的位数一般与各数值中有效数字位数最少的数的位数相同（或最多再多保留一位）。

规则三：乘方、开方运算。

乘方、开方运算结果的有效数字的位数与其底数相同。

附则：对常用公式中的绝对准确数字（如 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 其系数 $\frac{1}{2}$ 中的 2 和其他常数如 $S = \pi r^2$ 中的 π ），计算时其有效数字的位数参照实验数据的有效数字的位数确定。

如果由于各项误差的积累，使得间接测得量的绝对误差比较大，那么在最后的结果中，使结果的最后一位与绝对误差的位数对齐，而舍去其他多余的存疑数字。因误差本身只是一个估计的范围，在一般情况下，误差的有效数字只取一位。在大学物理中约定误差只取一位。

应用以上规则，请看以下两例的运算过程。

$$\begin{array}{r} 23.7 \underline{5} \\ - 2.836 \underline{5} \\ \hline 20.9 \underline{1} \underline{3} \underline{5} (\text{mm}) \end{array} \qquad \begin{array}{r} 5.236 \underline{4} \\ \times 0.2 \underline{3} \\ \hline 1 \underline{5} \underline{7} \underline{0} \underline{9} \underline{2} \\ 1 \underline{0} \underline{4} \underline{7} \underline{2} \underline{8} \\ \hline 1. \underline{2} \underline{0} \underline{4} \underline{3} \underline{7} \underline{2} (\text{m}^2) \end{array}$$

结果为 20.9 1(mm)

结果为 1. 2m²

六、数据处理的基本方法

在操作完成后,需要对记录的数据进行整理、计算和分析,得出结论,验证实验目的是否达到,总结得失,以便更好地进行实验。我们把从获得原始数据起到得出结论为止的加工过程称为数据处理。数据处理是实验工作必不可少的重要环节。下面介绍物理实验中常用的数据处理方法 列表法、图解法、逐差法。

(一) 列表法

列表法是记录和处理实验数据的基本方法,是其他实验数据处理方法的基础。对一个物理量进行多次测量,或者同时测量几个量并研究这几个量间的函数联系,将实验数据列成适当的表格,可以使大量数据表达清楚、有条理,有助于及时发现和检查实验中存在的问题,判断测量结果的合理性;有助于分析结果,反映出有关物理量之间的对应关系,找出物理量之间存在的规律。一个好的数据表格可以提高数据处理的效率,减少或避免错误。列表处理数据时应遵循以下原则。

(1)表格的设计和栏目的选定要力求简单明了,便于分析各物理量间的关系。

(2)各栏目要标明所记录的物理量的名称及其单位,并按照国家标准(GB3100—3102)的规定使用物理量及其单位的符号。对自己定义的符号,须加以说明。

(3)栏目的顺序应充分注意数据间的联系和计算顺序,力求简明、完整、有条理。

(4)表中数据要按照有效数字的规则,正确地记录,并按由小到大或由大到小的顺序排列。

(5)表中除列入原始测量数据外,处理过程中的一些中间结果也应列入表中或者附于表格后。

(二) 图解法

数学上用函数的图像形象、直观地反映自变量和因变量之间的变化关系,我们利用物理实验数据,将实验中物理量之间的函数关系用几何图线(函数图像)表示出来,这种方法称为图示法。根据已经绘好的图线,应用解析的方法,求出对应的函数关系式和有关参量,确定被测物理量间的关系,得出实验结论,这种方法称为图解法。图解法是数据处理的重要方法之一,经常被科研工作者使用。用此法处理数据时,要注意以下几点。

1. 作图纸的选择

作图必须用专用坐标纸,以便于做出合乎规范的图线。一般常用的是直角坐标纸(即毫米方格纸),根据需要还可选用对数坐标纸、半对数坐标纸、极坐标纸等。

由于直线最容易精确地绘出,直线的斜率和截距较易计算,所以当两个量之间的函数关系是非线性时,可以通过转换变量将函数变为线性的,这种处理方法称为曲线改直。请看几个例子:

(1) $PV=C$ (C 为恒量),令 $x=1/V$ 则 $P=Cx$,即 P 与 x 为线性关系。

(2) $T^2=\frac{4\pi^2}{g}l$,令 $y=T^2$, y 与 l 成线性关系,求出其斜率 $\frac{4\pi^2}{g}$ 即可求出 g 。

(3) $y=\frac{x}{ax+b}$ 式中 a, b 均为常数。将等式两边取倒数,有 $\frac{1}{y}=a+\frac{b}{x}$,令 $u=\frac{1}{y}$, $v=$