

第二章 常用测量器具及物理实验基本方法和技术

§ 2.1 物理实验常用测量器具

实验中要测量各种各样的物理量，其中基本物理量如长度、质量、时间、温度、电阻、电流、电压等的测量最为常见。基本物理量的测量是物理实验的基础，了解常用测量器具的性能特点，掌握测量这些基本物理量的器具的原理和正确的实验方法是做好物理实验的良好开端，是物理实验教学的基本要求之一，也是进行专业实验、从事科学研究等工作的基础。本节仅对测量以上基本物理量的常用仪器作一简单介绍，更多的使用方法和技巧希望同学们在实验中不断学习、摸索。

一、长度测量

米尺、游标卡尺和螺旋测微器是最常用的测长度的仪器。表征这些仪器主要规格的有量程和分度值等量程是测量范围；分度值是仪器所标示的最小量度单位，分度值的大小反映仪器的精密程度。

1. 米尺

米尺是最简单和最常用的测长仪器。实验室常用的米尺分直尺、钢卷尺等，有 30, 50, 100, 200, 500cm 等规格。米尺的分度值是 1mm，即只能准确地读到毫米位，毫米以下的位是估读位，测量时根据实际可能和要求，估读出最小分度值的 1/10, 1/5, 甚至 1/2。当测量长度不太大时，米尺的仪器误差一般可取最小分度值的一半，即最大估计误差不会超过 0.5mm。

测量时可不用米尺的一端做测量起点，通常选择某个整数刻度值与被测物体一端对齐，读出物体另一端对应的刻度值，两刻度值之差即为待测物体的长度。

测量时应使米尺贴近被测物体或尽量靠近，垂直于米尺刻度盘读数，防止视差造成读数误差。

2. 游标卡尺

游标卡尺是由主尺(米尺)和附加在主尺上的能沿主尺滑动的副尺(游标尺)构成的。利用游标卡尺可以把米尺估读的那一位准确地读出来，得到比米尺更高的精度。如图 II.1 所示，游标卡尺主要由两部分组成，一部分是与量爪 1、3 相联的主尺 5；另一部分是与量爪 2、4 及深度尺相联的游标(副尺) 6。游标可紧贴在主尺上滑动，内量爪 3、4 用来测量内径，外量爪 1、2 用来测量外径或厚度，深度尺 7 用来测量孔槽的深度。

不同分度数(即格数)的游标，测量精确度不同。若用 a 表示主尺的最小分度值(即最小格数)， n 表示游标的分度数。使 n 个游标分度的长度与主尺的 $(n-1)$ 个最小格的长度相等，则每一个游标分度的长度 b 为

$$b = \frac{(n-1)a}{n}$$

显然，主尺最小分度值与游标分度值之差为

$$a - b = a - \frac{n-1}{n}a = \frac{a}{n}$$

该差值称为游标常量，也即游标的最小读数值，它等于主尺最小刻度的 $1/n$ 。

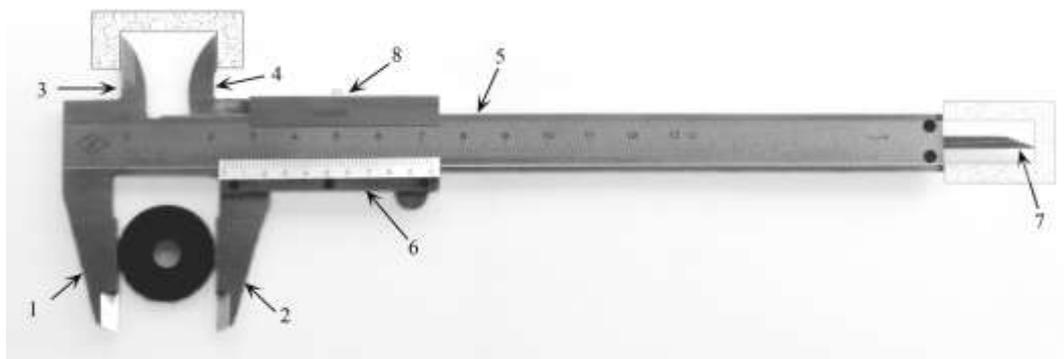


图 II.1 游标卡尺

1, 2—外量爪; 3, 4—内量爪; 5—主尺; 6—副尺; 7—尾尺; 8—紧固螺钉

a 为定值时，游标的格数 n 越大，其分度值就越小，游标卡尺的精确度也越高。若主尺的最小分度值为 1mm ，游标分度数为 $10, 20, 50$ 时(分别叫做： 10 分游标尺， 20 分游标尺， 50 分游标尺)，相应的最小读数分别为： $0.1, 0.05$ 和 0.02mm 。除游标卡尺外，其它有游标的仪器分度值判断和读数方法均与此相同。

以 50 分游标卡尺为例介绍其读数方法，主尺的分度值为 $a=1\text{mm}$ ，游标副尺上有 50 格($n=50$)，其总长度为 49mm ，游标的分度值为 $a/n=0.02\text{mm}$ 。

测量时先将游标卡尺合拢，游标的 0 刻线应与主尺的 0 刻线对齐，如图 II.2 所示。若不对齐，应记下此初始读数，以作测量数据修正用。记被测物体的长度为 l ，则游标 0 刻度与主尺 0 刻度的距离也是 l ，如图 3 所示。取 mm 为单位，可从主尺上直接读出长度 l 的整数部分，记为 l_0 ，从游标上读取余下部分的数值，记为 Δl 。方法为：先判定游标上哪条刻线与主尺的一条刻线对齐得最好，就以该游标刻线为准，从游标上读出 Δl ， Δl 即游标最小格值 0.02mm 乘以格数。参见图 II.3， $l_0=21\text{mm}$ ， $l=0.02\text{mm}/\text{格} \times 24\text{格} = 0.48\text{mm}$ ，则被测长度的测得值 $l=l_0+l=21.48\text{mm}$ 。

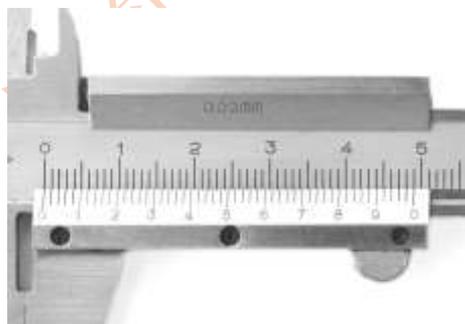


图 II.2



图 II.3

测量时，量爪要卡正被测物体，松紧适当。勿用游标卡尺测表面粗糙的硬物，勿使量爪中卡住的被测物挪动，以免磨损量刃。用毕卡尺，勿使量爪紧闭，并锁住紧固螺钉，以避免因热膨胀效应损坏卡尺。

3. 螺旋测微计

螺旋测微计也称千分尺，是比游标卡尺更精密的长度测量仪器。常用螺旋测微计的量程为 25mm，分度值为 0.01mm，准确度可达 0.01mm。

(1) 结构与测量原理

螺旋测微计的主要部分是测微螺旋，如图 II.4 所示。图中 5 为精密测微螺杆，10 是与之配合的螺母套管，螺距为 0.5mm。测微螺杆的后端套装一个 50 分度的微分筒 8，当微分筒相对螺母套管 10 转过一周时，测微螺杆沿轴向移动一个螺距 0.5mm。显然，当微分筒转过一个分度时，测微螺杆则移动 $0.5 / 50 = 0.01\text{mm}$ 。因此，读取的微分筒转过的刻度值就是测微螺杆沿轴向移动的距离，该距离由固定套筒 7 上的刻度读取，读数是 0.5mm 的整数倍，余下部分由微分筒上的刻度读出。

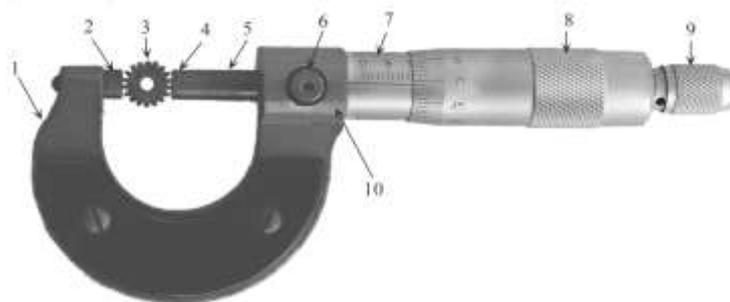


图 II.4

1—尺架；2—测砧测量面 A；3—被测物体；4—螺杆测量面 B；5—测微螺杆；
6—锁紧装置；7—固定套筒；8—微分筒；9—测力装置；10—螺母套管

图 II.4 中的 1 为螺旋测微计的弓形尺架，它的两端装有测砧 2 和测微螺杆。当转动螺杆使测砧与螺杆测量面 A 和 B 刚好接触时，微分筒锥面的边缘应与固定套筒上的 0 刻线对齐，同时微分筒上的零线也应与固定套筒上的轴向刻线对齐，这时的读数是 0.000mm，如图 II.5(a) 所示。

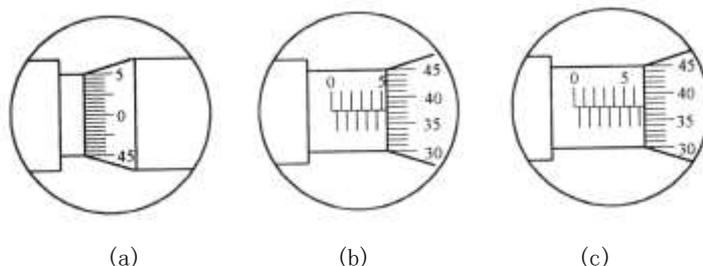


图 II.5

(2) 使用方法

把被测物体(如图 II.4 中的 3)放在测量面 A 与 B 之间,轻轻转动测力装置 9,使 A 和 B 分别与物体接触,在转动中出现“咯咯”声时,即停转并可读数。以微分筒的边缘为读数准线,先读取固定套筒上的刻度值,再以该筒上的轴向刻线为基准线读取微分筒上的刻度值,应估读至微分筒最小刻度值的 $1/10$,即 0.001mm ,故又称千分尺。

固定套筒上的标尺刻度分列于轴向刻线的两侧,一侧为 1mm 刻度,另一侧为 0.5mm 刻度。如果微分筒前沿未超过 0.5mm 刻线,则可读出整毫米数,再加上微分筒上的读数,即为被测数值,如图 II.5(b)所示,可读为 5.376mm 。如果微分筒前沿超过 0.5mm 刻线,则只需在前述方法读取的数据后加 0.5mm 即可。如对图 II.5(c)的情况可读为 6.875mm 。

(3) 注意事项

①测量前应检查 0 点是否对齐,若未对齐,应记下初始刻度值。若微分筒上的 0 刻线在固定套筒的轴向刻线上侧,初始读数取正,反之取负。此初始读数为定值系统误差,被测物体线度为:读数 \pm 初始读数。

②刻度线总有一定的宽度,当固定套筒的轴向刻线很靠近微分筒上的 0 刻线时,务必特别注意。通常微分筒上的 0 刻线在轴向刻线上方时,虽然固定套筒上的一条短刻度线似乎已经显露,但读数时不能计人,否则会误加 0.500mm 。

③螺旋测微计使用完毕,应使螺杆与测砧之间有一间隙,以免因热膨胀而损坏螺纹。

对长度直接测量,通常采用米尺、游标卡尺和螺旋测微计。若待测线度很小,由于人的视力限制及操作上的困难等,无法用上述测量器具直接测量,往往借助于显微镜或望远镜将被测物的像放大或移至适当距离(如明视距离),然后与米尺、长度规(经严格校准的刻度尺)或精密测微丝杆等比较而读取数据。利用显微镜、望远镜等光学仪器测量长度,读数的准确度可达 10^{-3}mm ,甚至达 10^{-4}m 。

二、质量测量

质量是基本物理量之一,通常用天平测量。常用的有物理天平和分析天平。前者的准确度较低,后者的较高。分析天平常用于化学分析,物理实验一般使用物理天平。现在,电子天平的使用逐渐普遍,以下只介绍物理天平和天子天平的构造和使用。

1. 物理天平

(1). 物理天平的构造

物理天平如图 II.6 所示,它由底座、立柱、横梁和两个称盘等组成。横梁上有 3 个刀口,中间的刀口支持在固定于升降杆顶端的刀垫上,调节手轮,可使横梁上升或下降。两边的刀口用来支持称盘。横梁固接一指针,横梁摆动时,指针尖端随之在固定于立柱下方的标尺前摆动。横梁两端有两个平衡螺母,用于天平空载时调节平衡。横梁上装有游码,用于 1g 以下的称衡。底座上有水准器,旋转底座的可调节螺丝,使水准器的气泡居中,即表明天平已处于工作位置。

(2). 天平的调整和使用

(a) 旋转天平底座下可调螺丝,使水准器的气泡居中。

(b) 使游码前侧边对齐横梁的 0 刻线,转动手轮,支起横梁,待梁停摆后,指针应

位于标尺中央。如指针偏向一侧，调节横梁两端的平衡螺母(调节前应止动天平，即降下横梁)，直到支起横梁时指针指在标尺中央。

(c) 被称衡物体放在左称盘中，右称盘放置砝码，轻轻支起横梁，观察是否平衡。如不平衡，则适当加减砝码或移动游码，直至横梁平衡为止。此时砝码的质量加游码的读数即为物体的质量。

(3). 注意事项

(a) 使用天平时要缓慢平稳地转动手轮。加减砝码和移动游码前都必须将横梁降下止动。

(b) 被称物体和砝码都应放在称盘中部，使用多个砝码时，大砝码置中间，小砝码放在周围。

(c) 勿称衡质量超过天平称量范围的物体。

(d) 天平用毕，必须先

降下横梁，再取下物体和砝码。砝码放回砝码盒中，将称盘等清理干净。

(e) 取放砝码必须用镊子，严禁手拿。

2. 电子天平

电子天平是最新一代的天平，是根据电磁力平衡原理，直接称量，全程不需砝码。放上称量物后，在几秒钟内即达到平衡，显示读数，称量速度快，精度高。电子天平的支承点用弹性簧片，取代机械天平的玛瑙刀口，用差动变压器取代升降枢装置，用数字显示代替指针刻度式。因而，电子天平具有使用寿命长、性能稳定、操作简便和灵敏度高的特点。此外，电子天平还具有自动校正、自动去皮、超载指示、故障报警等功能以及具有质量电信号输出功能，且可与打印机、计算机联用，进一步扩展其功能，如统计称量的最大值、最小值、平均值及标准偏差等。由于电子天平具有机械天平无法比拟的优点，尽管其价格较贵，但也会越来越广泛地应用于各个领域并逐步取代机械天平。

(1) 电子天平结构原理

电子天平构造原理基本构造是相同的。见图 II. 7，主要由以下几个部分组成：

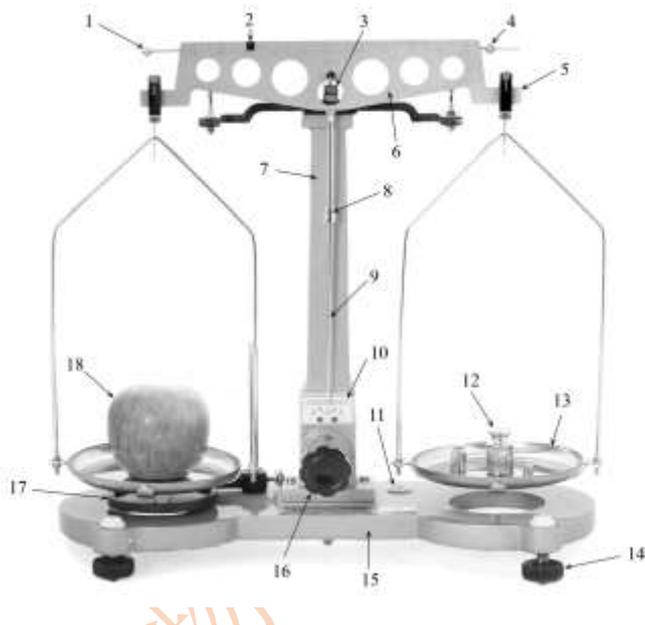


图 II. 6 物理天平

1. 平衡螺母 2. 游码 3. 中刀托 4. 平衡螺母 5. 边刀吊架
6. 横梁 7. 立柱 8. 感量砣 9. 指针 10. 标尺 11. 气泡水准器
12. 砝码 13. 砝码盘 14. 调平螺丝 15. 底座 16. 手轮
17. 杯托盘 18. 待测物

a、秤盘

秤盘多为金属材料制成，安装在天平的传感器上，是天平进行称量的承受装置。它具有一定的几何形状和厚度，以圆形和方形的居多。使用中应注意卫生清洁，更不要随意掉换秤盘。

b、传感器

传感器是的关键部件之一，由外壳、磁钢、极靴和线圈等组成，装在秤盘的下方。它的精度很高也很灵敏。应保持天平称量室的清洁，切忌称样时散落物品而影响传感器的正常工作。



图 II.7 电子天平

c、位置检测器

位置检测器是由高灵敏度的远红外发光管和对称式光敏电池组成的。它的作用是将秤盘上的载荷转变成电信号输出。

d、PID 调节器

PID（比例、积分、微分）调节器的作用，就是保证传感器快速而稳定地工作。

e、功率放大器

其作用是将微弱的信号进行放大，以保证天平的精度和工作要求。

f、低通滤波器

它的作用是排除外界和某些电器元件产生的高频信号的干扰，以保证传感器的输出为一恒定的直流电压。

g、模数 (A/D) 转换器

它的优点在于转换精度高，易于自动调零能有效地排除干扰，将输入信号转换成数字信号。

h、微计算机

此部件可说是电子天平的关键部件了。它是电子天平的数据处理部件，它具有记忆、计算和查表等功能。

i、显示器

现在的显示器基本上有两种：一种是数码管的显示器；另一种是液晶显示器。它们的作用是将输出的数字信号显示在显示屏幕上。

j、机壳

其作用是保护电子天平免受到灰尘等物质的侵害，同时也是电子元件的基座等。

k、底脚

电子天平的支撑部件，同时也是电子天平水平的调节部件，一般均靠后面两个调整脚来调节天平的水平。

(2) 电子天平操作程序（以 JY 系列电子天平为例）

①、调水平

调整地脚螺栓高度，使水平仪内空气气泡位于圆环中央。

②、开机

安装电池或接通电源变压器，按开关键，天平自检，显示天平型号后，显示“0.0g”，表示机器正常，可以使用。

③、预热

电子天平接通电源后一般 1~2 分钟即可使用，但若对精度有较高要求时，在初次接通电源或长时间断电之后，至少需要预热 30 分钟。为取得理想的测量结果，天平应保持待机状态。

④、校正

首次使用天平或长时间使用后须进行校正。按一下校正键天平显示全“0”，再长按键 10 秒左右，显示窗出现“C-XXX”（校正砝码值），几秒钟后显示“0.0g”，此时将相应的校正砝码放在天平秤盘上，显示窗显示“-”（表示等待）。几秒钟后显示上述校正砝码值，天平自动完成校正。若仍不准确，可按上述方法进行再一次校正。

⑤、称量

将重物放于秤盘上，待示数稳定后，即为该重物的重量。

⑥、去皮

按一下去皮键“T”，即可去皮清零。若重量还未稳定，可再次去皮。

⑦、计数

电子天平可以对具有相同重量的物体进行计数。长按去皮键“T”，显示屏将在 0.0g → CAL → 10P → 25P → … → —g 之间循环，在哪一个显示时松开，即进入该状态。如在显示 25P 时松开，表示计数标准为 25 个样本，将 25 个待计数物体（样本）放于秤盘上，十几秒后显示“PASS”再显示“PCS”，表示校准完毕，然后放置任意个相同重量的物体后，将显示物体（样本）个数。

⑧、关机：

天平应一直保持通电状态（24 小时），不使用时将开关键关至待机状态，使天平保持保温状态，可延长天平使用寿命。

（3）电子天平使用注意事项

①、待称物体的重量不能超过天平的量程。不可用手或其他重物按压秤盘，以免损坏天平。

②、将天平置于稳定的工作台上，避免振动、气流及阳光照射。

③、在使用前，调整水平仪气泡至中间位置，否则读数不准。

④、电子天平使用时，称量物品之重心，须位于秤盘中心点；称量物品时应遵循逐次添加原则，轻拿轻放，避免对传感器造成冲击，损坏天平。

⑤、称量易挥发和具有腐蚀性的物品时，要盛放在密闭的容器中，以免腐蚀和损坏电子天平。另外，若有液体滴于称盘上，立即用吸水纸轻轻吸干，不可用抹布等粗糙物擦拭。

⑥、每次使用完天平后，应对天平内部、外部周围区域进行清理，不可把待称量物

品长时间放置于天平周围，影响后续使用。

⑦、仪器管理人经常对电子天平进行校准，一般应3个月校一次，保证其处于最佳状态。使天平内干燥剂保持蓝色状态，及时更换。

三、时间测量

测量时间的方法很多，测时器具通常基于物体机械、电磁或原子等运动的周期性而设计的。目前，利用原子周期性运动制造的原子钟精确度为最高。实验室常用的计时器有机械式秒表、电子秒表和数字毫秒计等。机械式秒表功能比较简单，且目前使用逐渐减少。功能单一的数字毫秒计也逐渐被智能型毫秒计代替。下面介绍功能较多的电子秒表的功能和使用方法，而智能型毫秒计参见实验二。

电子秒表：

实验室所用的电子秒表即石英液晶精密计时器。其机芯全部由电子元件组成，利用石英振荡频率作为时间基准。具有6位液晶数字显示器，显示出月、日、星期、时、分、秒，并有 10^{-2} S计数的单针秒表和双针秒表功能。有的在机芯内还装有硅太阳电池，可以延长表内氧化银电池的寿命。

电子秒表的外形如图 II.8 所示。由于此种表的功能较多，而在实验室主要用于计时，这里只介绍 1/100 秒计时的使用方法。表壳配有四个按钮， S_1 为起动、停止、调整按钮， S_2 为功能转换按钮。 S_3 为选择按钮， S_4 为分段、设置、复零按钮。首先，按 S_2 ，置于秒表功能状态。



图 II.8 电子秒

首先，按 S_2 ，置于秒表功能状态。

(1) 基本秒表功能

按 S_1 秒表开始计时，再按 S_1 ，计时停止。秒表显示计时数据。按 S_4 复零。

按 S_1 秒表开始计时，再按 S_1 ，计时停止。再按 S_1 秒表累加计时，再按 S_1 计时停止。如此往复，实现累加计时。

(2) 分段计时功能

分段计时功能即用一个秒表可同时记录两段时间，分段计时又分为标准分段计时与部分分段计时。

标准分段计时即两段时间同时开始，不同时结束。使用方法为：按 S_3 置于标准分段计时状态。按 S_1 开始计时，按 S_4 第一段计时结束，显示第一段计时时间。按 S_1 第二段计时结束，仍显示第一段计时时间。按 S_4 显示第二段时间。按 S_4 复零。

部分分段计时即第一段计时结束时，第二段计时同时开始。使用方法为：按 S_3 置于部分分段计时状态。按 S_1 第一段计时开始，按 S_4 第一段计时结束，显示第一段时间，同时第二段计时开始。再按 S_1 ，第二段计时结束，仍显示第一段时间。按 S_4 ，显示第二

段计时时间。按 S_4 复零。

四、温度测量

1. 水银温度计(水银—玻璃温度计)

利用液体体积受热膨胀和受冷收缩的性质测定温度的温度计叫液体温度计。最为常用的是水银温度计(水银—玻璃温度计)。其优点为构造简单,读数方便,水银与玻璃管壁不相粘附,在标准大气压下,在 $-38.87\sim 356.58\text{C}$ 范围内水银为液态,膨胀系数变化很小,可视其体积的改变量与温度的改变量成正比。其缺点是玻璃毛细管内径不均匀,玻璃热膨胀后不易恢复原状,即有热滞后现象,并且易碎,撒出的水银会造成污染等。

规定:冰点[纯冰和纯水在 $101.3\text{kPa}(1\text{atm})$ 下达到平衡的温度]为 0C ,汽点(纯水和 水蒸气在蒸汽压为 101.3kPa 时达到平衡的温度)为 100C 。温度计标度是定出冰点与汽点刻度后,将两刻度之间的玻璃管长度均分,若分为 100 等份,每一等份就是 1C 。实验室常用的水银温度计有最小分度值为 $0.1, 0.2$ 和 1C 等几种。

液体温度计有“半浸式”和“全浸式”两种。使用液体温度计应将温度计插入被测介质至温度计上的“浸没线”处。读数时,视线应正对读数并与温度计垂直,以防视差造成读数误差;测量室温时,勿使其他物体或手等触到储液泡。

对于标度正确的温度计,在使用中为保证测量的精确度,需注意以下几点:

(1) 零点位置的确定。一般是将液体温度计加热至标尺上限的温度后,取出温度计,待液柱降至室温,再将它“全浸”入含有冰水混合物的槽内,测出相应的刻度值作为零点修正值。

(2) 液体温度计露出部分的影响。在实际使用中,往往不能使玻璃管全部浸入待测介质中,露出的部分与待测介质难以达到热平衡,故应注意修正。

(3) 热滞后影响。当待测介质的温度变化时,液体温度计由于存在热滞后现象,其读数不能及时反映待测介质的实际温度,应予修正。

2. 数字温度计

采用热敏电阻为感温元件的数字温度计,体积小,重量轻,灵敏度高,稳定性好,适用于对各种气体、液体和固体的温度测量。更换不同形式的传感器,可用作各种待测系统的温度的测量。图 11.9 所示数字温度计的使用方法如下:

按下电源开关接通电源,显示屏应有数字显示。按下校正按钮,显示屏应显示面板



图 11.9 数字温度计

1. 传感器接口
2. 电源开关
3. 校正按钮
4. 传感器柄
5. 满度值
6. 满度调节
7. 温度显示
8. 保护套
9. 传感器

所标明的满度值，随即调节满度电位器，使之与所标满度值相等。放开校正按钮，根据待测量温度范围拨正量程开关，这时显示屏上出现被测系统的温度。

3. 热电偶(温差电偶)

将两种不同的金属材料两端彼此焊接成一闭合回路，即制成热电偶。若使两接点处在不同温度下，回路中就会产生电动势及电流，这种现象为温差电现象，该电动势称作温差电动势。温差电动势的大小与组成热电偶的金属材料有关，与热端和冷端的温度差有关，在测量温度变化范围不大的情况下，可近似看作成线性关系，当热电偶的高、低温端温度为 T 和 T_0 时，其温差电动势 $E = \alpha(T - T_0)$ 。其中 α 称为热电偶的温差系数。通常把冷端置入冰水混合物中，即低温端为 0°C 。测出温差电动势，由该热电偶的校准的曲线或数据，就可得知待测温度。

热电偶的测温范围广，(使用范围为 $-200\sim 2000^\circ\text{C}$)；灵敏度和准确度很高(在 10^{-3}°C 以下)，特别是铂和铑的合金制成的热电偶稳定性很高，常用作标准温度计等。

常用的热电偶有以下几种：铜-康铜热电偶，用于 300°C 以下的温度测量；测高达 1100°C 的温度用镍铬—镍镁合金组成的热电偶；测更高的温度，通常用铂—铂铑合金的热电偶(测温范围为 $-200\sim 1700^\circ\text{C}$)；如果温度高达 2000°C ，则可用钨—钨铼热电偶。

五、电流测量

电磁学测量器具种类繁多，结构与功能千差万别。第一类是作为测量单位标准的度量器，如标准电池、标准电阻等；第二类则是将被测量与度量器进行比较，然后确定出被测量的较量仪器，如电桥、电位差计等；第三类是能直接读出被测量大小的直读仪表。此外，还有一些辅助器具，如电源、开关、滑线变阻器等。

电测仪表的类型、性能、实验条件等一般在表盘上都有表示，电表性能标志见表 1，一般它们都位于电表面板的右下角或左下角。必须明确各种标识符号及其意义，才能保

表 1

符 号	意 义	符 号	意 义	符 号	意 义
	磁电式仪表		交直流		以指示值的百分数表示准确度等级
	电磁式		(仪表放置) 垂 直		以标尺量程的百分数表示准确度等级
	静电式		水 平		绝缘强度实验电压 2kV
	整流式		倾 斜		
	检流式		接 地 端		三级防外磁场和电场

证使用的合理，保证电测仪表的精确性。

电测仪表有磁电式、电动式、感应式等多种。实验室常用的电表大都是磁电式。这类仪表灵敏度高，刻度均匀，读数方便。本节只介绍磁电式仪表。

目前实验室测量电流主要使用电流表(安培计)，图 II. 10 为一常见电流表。在电流计(表头)的线圈两端并联一个阻值很小的分流电阻，就构成了电流表，并联不同阻值的电阻，可使电流表有不同的量值，从而制成不同规格的电流表(安培表、毫安表、微安表，符号分别为 A, mA, μ A)。

(1) 电流表的使用方法

①选择合适的量程。一般应使量程略大于待测量，若测前不能确定被测量的最大值，应先选用量程的最大挡，然后根据示值选定合适的量程。作为指针式仪表，恰当的量程应保证指针接近满偏位置。

②连接方法。电流表应串联在被测电路中，使电流从“+”端流入，从“-”端流出。

③读数。电表的读数为准确数字加欠准数字。对刻度盘式电表，准确数字为最小格值的整数倍，欠准数字即最小格值的分数值(此数为估计值)。

④电流表的等级与系统误差。按照国标(GB)，电表的准确度等级有 7 个，即 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0。表的最大测量误差限值为 $(\pm AS)\%$ (系统误差)，其中 A 为特定值，它可以是测量挡的量程值；S 为表的准确度等级。S 越小，表的等级越高。

(2) 注意事项

为减小使用仪器引入的系统误差，应选择恰当的量程尽量使表的指针趋于满量程，或在 2/3 至满量程之间。读数时，视线要正对待读刻度并垂直于电表表盘(0.5 级以上电表的面板上通常附有平面反射镜，测量时应使指针与它的像重合后再读数)。

六、电压测量

1. 电压表(伏特计)

在电流计线圈的一端串联一个阻值较大的分压电阻，就构成电压表。由于分压电阻大大于表头内阻，所以分压电阻在线路中起限流作用，使大部分电压降落在分压电阻。改变成电压表，可得到不同规格的电压表(伏特计、毫伏计等，符号为 V 和 mV)。使用电压表时，应把它并联



图 II.10 电流表

1. 调零旋钮
2. 0.5A 量程正极接线柱
3. 1A 量程正极接线柱
4. 负极接线柱
5. 量程调整短路片(根据所选量程短接相应的接线柱)
6. 电表性能标志



图 II.11 电压表

1. 表盘
2. 量程选择孔
3. 负极接线柱
4. 量程选择柱
5. 正极接线柱
6. 电表性能标志

在被测电路两端。使用直流电压表时，表的“+”端接高电位端，“-”端接低电位端。图 II. 11 为一常见电压表，它的量程选择方式与前面介绍的电流表有所不同，将选择柱 4 插如不同的量程选择孔 2，可获得不同的量程。

2. 直流电位差计

用磁电式电压表测量电压时，由于表的分流作用以及其他因素，会引进测量误差。直流电位差计采用补偿测量法，这种测量几乎不损耗被测对象的能量，测量结果稳定可靠，而且可达到很高的准确度。可用来直接测量电动势、电压，也可间接测电流、电阻以及某些可转换成电压的非电参量。

由于电位差计使用比较复杂，现在多数情况下被高内阻的数字电压表代替（固体热电系数的测定实验中，热电偶电动势的测量）。

七、电阻测量

传统测量电阻的器具有欧姆表、电阻箱等，但测量方便的是数字万用表、测量准确的是直流电桥。

电桥是一种将被测量与标准量进行比较而获得较准确的测量结果的比较式仪器。电桥种类很多，有平衡电桥、非平衡电桥、直流电桥和交流电桥等。直流电桥又分为单臂电桥（惠斯登电桥）和双臂电桥（开尔文电桥）。直流单臂电桥一般用于电阻测量，测量 $10 \sim 10^6 \Omega$ 的电阻，准确度分为 8 个级别：0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 1.0, 1.5, 2.0。直流双臂电桥一般用来测量低电阻（ 10Ω 以下），其设计思想主要是为了避开引线电阻和接触电阻对待测低电阻阻值的影响。减小电桥测量的误差，应从提高电桥的灵敏度和选择最佳测量条件等方面入手。

关于惠斯登电桥详见“热敏电阻温度系数的测定”实验，关于开尔文电桥详见“导体电阻率的测定”实验。

八、万用电表

顾名思义，它是一种多功能测量仪表。一般万用电表可以测量直流电流、交流电压、直流电压、电阻等电学量，有些万用电表还可以测量三极管的某些参数，以及温度等物理量。

万用电表种类繁多，型号各异。有指针式和数字式两大类，如图 II. 12 所示。万用电表的不同测量功能通过转换开关进行选择。

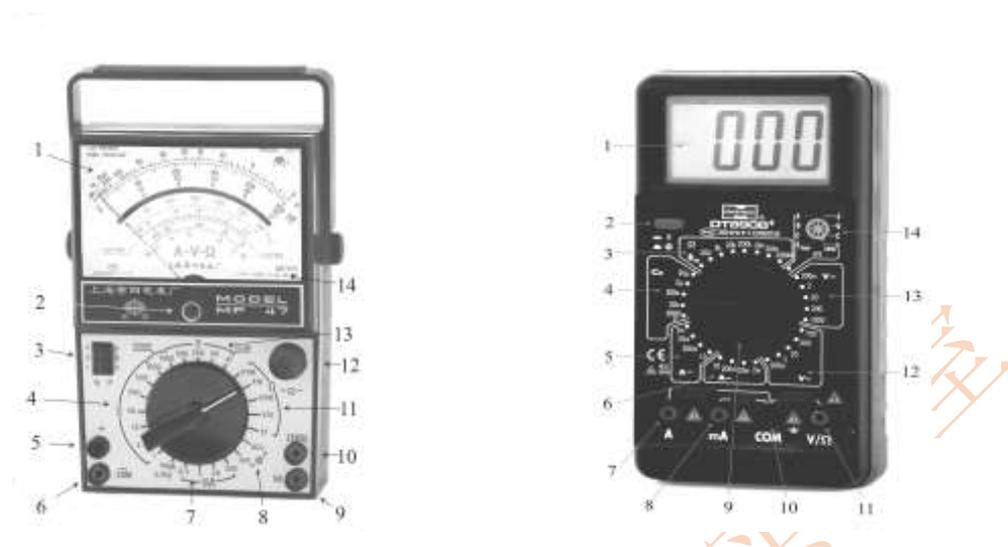


图 II.12 万用表

(a) 指针式万用表

1.表盘 2.调零旋钮 3.晶体管插座 4.直流电压档 5.正极表笔插孔 6.公共(负极)表笔插孔 7.电流档 8.晶体管档 9. 5A 电流档 10.2500V 电压档 11.电阻档 12.电阻档调零 13.交流电压档 14.性能标志

(b) 数字式万用表

1.表盘 2.电源开关 3. 电阻档 4.电容档 5.直流电流档 6. 交流电流档 7.大电流档 8.小电流档 9.选择开关 10.公共(负极)表笔插孔 11. 电压/电阻(正极)表笔插孔 12.交流电压档 13.直流电压档 14.晶体管档及插座

使用万用电表时，除注意各表的使用方法外，还应注意：

- (1) 黑表笔(*)为电表各档的公共负端，红表笔为正端。
- (2) 读数时，要根据转换开关的指示，从表盘上按类别和倍率关系读数。由于交流 10V 以下电压变化不均匀，所以交流 10V 以下的测量读数单独设置。
- (3) 切不可用直流挡测交流量，不可用电流档测电压，不可用电阻挡测电压、电流，以免烧坏电表。
- (4) 在测量中不能转换档，以免接触点产生电弧而氧化变质。
- (5) 测量完毕，应将旋钮置于空挡或交流高压挡，以免再测量时误用。

九、电源

电源是电学实验必不可少的设备，而直流稳压电源是最常用的电源之一。直流稳压电源是一种直流供电仪器，它输入 220V 交流电，经仪器降压、整流、滤波、稳压后输出所需的直流电。图 II.13 所示的 SS1710 型直流稳压电源可输出 0~30V 连续可调的直流电，其允许的最大输出电流可达 5A。图 II.14 所示的直流稳压电源可同时双路输出 0~32V 连续可调的直流电，其允许的最大输出电流为 2A。

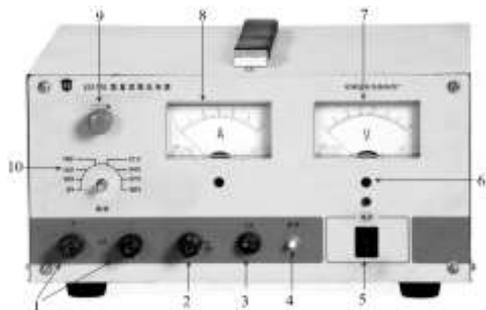


图 II.13 单路直流稳压电源

1. 输出接线柱 2. 接地 3. 保险丝 4. 复位
5. 电源开关 6. 电表调零 7. 电压表
8. 电流表 9. 电压微调 10. 电压醋调

使用直流稳压电压应注意避免输出短路和过流供电。目前常用的稳压电源一般都具有过流保护装置，输出电流一旦超过最大允许电流，电源即自行保护，如自动断开输出，待检查线路，排除过流故障后，按“复位”按键即可恢复供电；图 13 所示的电源则当输出电流达到设定的最大输出电流后，即使试图增大输出电压，输出电流也不会增大，此时过流指示灯 10（红色）点亮，而输出电流没有达到最大输出电流时是指示灯 11（绿色）点亮。有的稳压电源过流保护断开输出后，需要关闭电源开关，再重新打开恢复供电。

直流稳压电源在使用中还应注意在打开电源开关前，将电压调节旋钮逆时针旋到底（使输出电压最小），打开电源开关后，再顺时针调节至所需的电压值。使用完毕后，应将电压调至最小，再关闭电源开关。



图 II.14 双路直流稳压电源

1. 电压本地/遥控调节选择 2. 输出 3. 输出电流(限)调节 4. 电压粗调 5. 电压细调 6. 输出开关 7. 外测开关 8. 电压显示 9. 电流显示 10. 过流指示 11. 工作正常指示 12. 数显表 13. 表头量程选择 14. 电源开关 15. 显示选择开关 16. 外测插孔

十、光学实验器具

为了使你能顺利完成光学实验，特别是你第一次走进光学实验室做实验时，首先你应了解实验使用的光学元器件和仪器装置，特别是它们的性能指标、使用规范和保护要求。下面对光学实验基本仪器和使用注意事项做一简单介绍。

1. 光源

(1) 白炽灯

在物理实验中，除需要一般照明用的光源外，常需要体积小而亮度大的光源。为此，

人们常选用小型放映机用的灯泡，例如全反射型灯泡和钨卤素灯泡等。它们的额定功率都较大(多为 100W 以上)，工作电压都很低(如 6V, 12V, 24V 等)，因而工作电流很大。使用时应注意有关参数。电源电压必须与所用灯泡的额定电压相符，灯座接触必须良好，以免烧坏灯泡或引起电路故障。

(2) 汞灯(又称水银灯)和钠灯

汞灯和钠灯分别是以汞蒸气或钠蒸气在强电场中游离放电而形成弧光的气体放电光源。

汞灯按其灯管内的的工作气压分为三种：低压汞灯、高压汞灯和超高压汞灯。在普通物理实验中常用的是前面两种汞灯。汞灯是一种复色光源，看起来它发的光为绿白色，其光谱由许多分离的谱线组成。其可见光范围内的几条强谱线的波长为：404.66, 404.78, 435.83, 546.07, 576.96, 579.07, 623.45nm。汞灯光源经分光或滤色后，可用作单色光源。高压汞灯还辐射很强的紫外线，故不可裸眼正视，以免伤害眼睛。

钠灯常用作单色光源。其光谱为两条波长接近的黄色谱线：588.99nm 和 589.59nm。通常视作波长为 589.3nm 的单色光。

汞灯和钠灯都要与合适的扼流圈串联于交流 220V 供电线路中，汞灯和钠灯的电源可通用；灯管应竖直安装，管脚在下，见图 II.15。启动后需经几分钟发光才会正常；不可在短时间内频繁启动。废管要妥善处理，钠灯破裂遇水会引起爆燃！

(3) 激光器

激光器的种类很多，普通物理实验中常用的氦—氖(He-Ne)激光器。它发射的激光的波长为 632.8nm(红色)。氦氖激光管输出的激光功率通常为几毫瓦到十几毫瓦，相应的管长为 200—500mm。它的阳极和阴极之间需加几千伏电压才能点燃，正常工作时也要维持一二千伏的电压，因此要有专用的电源。使用时要防止触及电极，用完并切断开关后还应使其正、负输出端短接，令其中电容器放电，以免导致电击事故。氦—氖激光器输出功率虽小，但亮度极大，切不可直视未经扩束的激光，以免烧伤视网膜！图 II.16 显示了两种常见的氦氖激光器，其中图 16(a)中的激光器的激光管和电源装于一个机箱

内。使用时要防止触及电极，用完并切断开关后还应使其正、负输出端短接，令其中电容器放电，以免导致电击事故。氦—氖激光器输出功率虽小，但亮度极大，切不可直视未经扩束的激光，以免烧伤视网膜！图 II.16 显示了两种常见的氦氖激光器，其中图 16(a)中的激光器的激光管和电源装于一个机箱

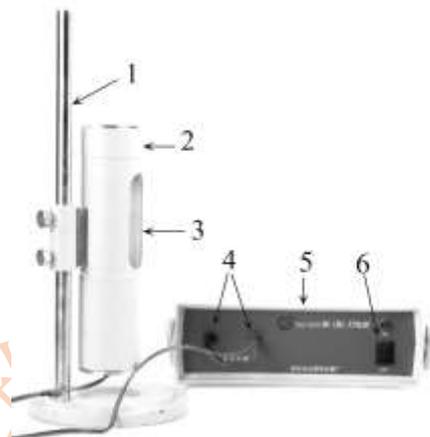


图 II.15 汞(钠)灯

1. 支架 2. 灯座(可升降) 3. 出光孔
4. 灯管接线 5. 电源 6. 电源开关



(a)



(b)

图 II.16 氦氖激光器

中，通过调节工作电流可改变激光功率；而图 16(b)中的激光器的激光管和电源分开安装，其激光管可根据需要便于安装在不同位置。

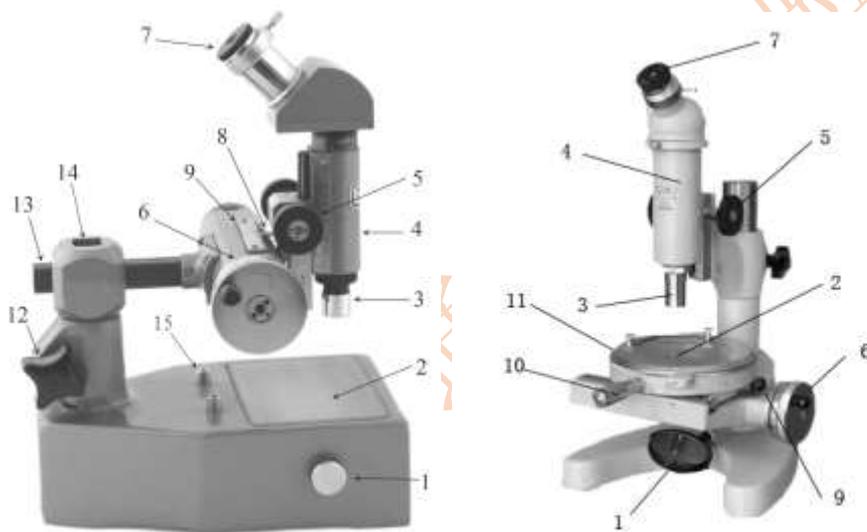
目前，半导体激光器在物理实验中应用的越来越多.半导体激光器体积小、重量轻，使用方便。常见的半导体激光器波长为 650nm（红色），也有绿的。半导体激光器的工作电压一般为 3 伏。半导体激光器的光线平行性和单色性不如氦-氖激光器。

2. 读数显微镜与望远镜

(1) 读数显微镜

实际使用中的显微镜种类是很多的，其构造上也各不相同。现仅就物理实验中常用的读数显微镜作一简单介绍。

读数显微镜也叫移测显微镜，图 II.17 显示了两种常见的读数显微镜，它由长焦距



图II.17 读数显微镜

1. 反光镜调节手轮 2. 毛玻璃 3. 物镜 4. 镜筒 5. 调焦手轮 6. 水平鼓轮 7. 目镜
8. 读数指标 9. 读数主尺 10. 垂直鼓轮 11. 旋转工作台（可测转角） 12. 垂直调节固定旋钮 13. 水平移动杆 14. 转接轴 15. 弹簧压片安装柱

显微镜和可移动的读数系统组成，能够精确测量微小长度。它是在显微镜的目镜上装上十字叉丝，并把镜筒固定在一个左右(或上下)可移动的圆柱轨道上，移动的距离可精确测出。读数显微镜它既可作长度测量，又可作观察用的光学仪器。由于读数显微镜可以水平放置，也可以竖直放置，故可搭配成各种测试装置，以方便操作。读数显微镜的主要作用是精确测量微小长度或不能用夹持量具测量的物体的尺寸。放大观察部分和读数测量部分是相对独立的。它直接测量物体长度或宽度。读数显微镜放大倍数一般固定不变，例如物镜倍数为 3 倍，目镜倍数为 10 倍。其工作距离约 40mm，测量时以目镜内叉丝为标志，它与鼓轮(副尺)同步移动。鼓轮转一圈，具有读数指示的读数主尺移动 1mm，主尺表示读数显微镜测量范围，例如 0—50mm。鼓轮副尺上刻有 100 等分的刻

线，相邻两刻线间距是 0.01mm，所以，读数显微镜测量结果可估读到 0.001mm。主尺和副尺的读数和就是测量的数值大小。

a、基本结构与使用方法

如图 II.17 所示，它主要由三大部分组成：显微镜、读数装置、传动装置。

a) 显微镜由目镜、物镜、十字叉丝及镜筒支架、调焦手轮、锁紧螺丝等组成。使用时显微镜可以处在竖直方向的位置，也可以利用方轴 13 将测量架插入接头轴 14 的十字孔中，用旋手紧固后使显微镜处于水平位置，如“单色仪的定标”实验中这样放置显微镜，用以观测出射狭缝处的谱线。

使用时可根据测量对象的具体情况来确定显微镜的位置，然后把待测物体置于物镜的正下或正前方。为精确读数，应用目镜对叉丝调焦，使叉丝清晰可辨，然后紧固锁紧螺丝。对准目镜观察，调节调焦手轮可以改变物镜和物体间的距离，使目镜中看到清楚的物像。

b) 读数系统有主尺和附尺，主尺和一般的米尺刻度相同，附尺采用螺旋测微计形式，其读数原理同螺旋测微计。对于 JCD-II 型读数显微镜，在镜筒上还刻有毫米刻尺，以作垂直方向的粗略测量。

c) 传动装置是由圆柱导轨、测微手轮、精密丝杆、方轴、旋手等组成。转动测微手轮，可使镜筒支架带动镜筒沿圆柱导轨移动，移动的距离可由标尺和旋转手轮上套筒的刻度精确读出。为了调节整个测量系统的高度，可通过旋手 12 使接头轴 14 升降、旋转。

d) 其它部分：弹簧压片插入底座孔 15 中，用来固定被测工件。反光镜用旋转手轮 1 转动，为了防止灰尘进入导轨和精密丝杆中，还增加了防尘罩。为了便于做牛顿环实验，还制备有半反射镜组附件（参见“等厚干涉”实验），不需要时可从显微镜筒上取下附件放在装置箱内。

b、使用步骤

a) 依测量需要放置好显微镜与待测物体。

b) 用目镜对叉丝调焦，然后用显微镜筒对待测物体聚焦。

c) 使叉丝的一条线平行于镜筒的移动方向，即与主尺的位置平行，另一条线用来测量物体的位置。

d) 旋转测微手轮 15 或者轻移待测物体，使十字叉丝中的一条线与待测物体一边相切，由主尺和附尺读得该叉丝位置 x ，然后保持待测物体位置不变，旋转测微手轮使待测物的另一边与叉丝相切，读得 x' 。于是待测物体的长度 L 为

$$L = |x - x'|$$

c、注意事项

a) 当用镜筒对待测物聚焦时，为防止损坏显微镜，只允许使镜筒移离待测物体(即提升镜筒)。

b) 如需多次测量时，每次测量中测微手轮只能向单一方向转动，不能时而正转，时而反转(即往复测量)，否则由于丝杆和螺母套管间有间隙会造成螺距差。如需要朝反

方向进行, 应转动测微手轮使镜筒超过测量目标, 然后反向空转几圈之后重新带动镜筒沿导轨移动。

(2) 望远镜

长焦距的物镜与短焦距的目镜 (两者均为凸透镜) 所组成的望远镜是常用的望远镜, 称为开普勒望远镜, 其光路如图 II.18(a) 所示。无限远物体发出的光透过物镜后成像于物镜的后焦面上, 因通常使目镜的前焦点与物镜的后焦点重合, 故由中间像发出的光经目镜后将形成位于无穷远的虚像, 但其视角得到放大。

观察有限远物体时, 或者需要同时看清叉丝 (分划板) 时, 中间像与分划板应重合地处于目镜的前焦距之内, 并形成位于明视距离处的虚像, 而无视差 (如图 18(b) 所示)。

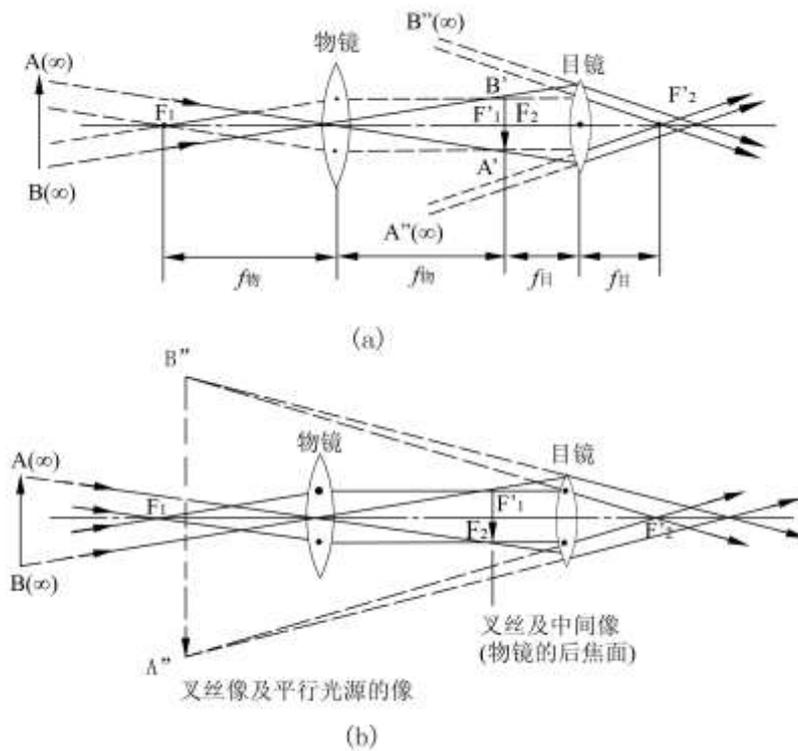


图 II.18 望远镜原理

观测时也应先调节目镜与分划板之间的距离, 看清叉丝准线后再调节分划板 (连同目镜) 与物镜之间的距离, 直到物体的像与叉丝准线的像两者无视差为止。

高斯目镜与阿贝目镜是分光计的望远镜常用的两种目镜结构, 其原理和使用方法详见“衍射光栅测波长”实验。

§ 2.2 物理实验基本方法

物理实验可分为 3 种类型——再现自然界的物理现象、寻找物理规律和对指定物理量的测量。具体还可以细分为：探索性实验与验证性实验、定性实验与定量实验、析因实验与判断实验、对比实验与模拟实验等。由此可看出，严格说来物理实验与物理测量并非一回事，但任何物理实验几乎都离不开物理量的测量，可见物理测量是物理实验的基础、关键和重点。因此，人们常把物理测量称为物理实验，而归纳起来的有共性的测量方法称为物理实验方法。

实验方法是指在给定的条件下，如何根据要求，尽可能地消除或减小系统误差以及减小随机误差，获得更为准确的测量值或结果的方法。由于物理实验有许多种类型，因此起实验方法也多种多样的。在这里仅就一些常见的实验方法作一简单介绍。

一、比较法

比较法是实验测量方法中最基本、最普遍的方法。测量就是将待测物理量与规定的该物理量的标准单位进行比较，以确定待测量是标准单位的几倍，从而得到该待测量的测量值。

1. 直接比较

(1) 将待测量与标准量具进行直接比较测出其大小，称为直接比较法(如米尺测量长度)。这种直接比较法的测量精度，受到测量仪器自身精度的限制，要提高测量精度就得提高量具的精度。有些物理量难于制成标准量具，就需要先制成与标准量值相关的仪器，再将这些仪器与待测物理比较，这些仪器也可称为量具，如温度计、电表等。

(2) 通过一定机械装置或电路使待测物理量与标准量具达到平衡、补偿或零示状态而进行直接比较，在物理实验中常采用的有：平衡比较（如物理天平等）；补偿比较(如电位差计等)；零示比较(如检流计等)。

必须指出，要有效地运用直接比较法，应考虑下面两个问题：

创造条件使待测量能与标准件直接对比，无法直接对比时，则视其能否用零示测量法子以比较，此时只要注意选择灵敏度足够高的平衡指示仪即可。

2. 间接比较

许多物理量是无法通过直接比较而测出的，通常需要利用物理量之间的函数关系将待测物理量与同类标准量进行间接的比较而得到待测物理量。此种见解比较法在测量中是较为普遍的。如将待测电阻 R 与电源和电流表串联接成一回路，记下电流表的示数；用一可调标准电阻 R_0 替换待测电阻 R ，调 R_0 使电流表示数接待测电阻时相等；此时 R_0 的值即为待测电阻的阻值。

二、补偿法

补偿法的定义为：某系统受某种作用产生 A 的效应，受到另一种同类作用产生 B 的效应，如果由于 B 效应的存在而使 A 效应显示不出来，就叫做 B 对 A 进行了补偿。

补偿法在实验中的应用是比较广泛的。如迈克尔逊干涉仪，虽然两反光镜到半反膜的距离相等，但由于两路光所经过的介质不完全相同，产生光程差，当加入补偿板后，将这一光程差补偿（抵消），使光路中的光程对称。

由于补偿法可以减弱甚至消除某些测量状态产生的影响，可大大提高实验的精度，因此，补偿法在精密测量和自动控制等方面得到广泛的应用。例如，用电压补偿法弥补因电压表在直接测量电压时引起被测支路电流的变化（电位差计）；用温度补偿法弥补因某些物理量（如电阻）随温度变化而对测试状态带来的影响；用光程补偿法弥补光路中光程的不对称性等等。

一个完整的补偿测量系统一般由以下四部分组成：

- (1) 待测装置：产生尽量稳定的待测效应。
- (2) 补偿装置：产生补偿效应，要求补偿量值准确达到设计的精度要求。
- (3) 测量装置：将待测量与补偿量联系起来进行比较。
- (4) 比较装置：比较待测效应和补偿效应的差异。从方法上可分为零示比较和差示比较。

零示比较也称完全补偿，在物理实验中常采用零示比较法。如电位差计测量电动势其基本原理就是“补偿法”。

差示比较也称为不完全补偿。它是利用标准量把待测量的绝大部分先补偿掉，剩下的微量再用仪器检测。也就是说，待测量等于一个标准量加上一个剩余微量。由于此微量在整个待测量的数值中所占比例很小，对整个测量的准确度的影响不会很明显。

还有一种情况，实验中所关心的不是待测量的绝对大小，而只需精确知道待测量的微小变化量。也可以采用差值补偿法，把待测量的绝大部分先行补偿掉，然后再用仪器测量出其剩余微量的变化值。比如在许多使用传感器的测量电路中的非平衡电桥（参见应变片传感器实验）。

三、换测法

在实验中，有许多的物理量无法直接测得，或虽可直接测量，但测量的准确性不等，可以通过变量代换的方式转换待测量，通过测量一些容易测量、且测量更准确的量，再利用函数关系求得待测量。即把计算待测量的公式中一些难以测量的某些量化成易测量的量，逐一进行测量，从而可得到实验的测量结果，这样一种方法称为换测法。换测法大致可分为参量换测法和能量换测法两类。

1. 参量换测法

参量换测法利用各种参量在一定实验条件下的相互关系来实现待测参量的变换测量，以达到测量某一物理量的目的。这种参量换测法，几乎贯穿于所有实验之中。

例如，最常见的玻璃温度计，就是利用在一定范围内材料（水银、酒精等）的热膨胀与温度的线性关系，将温度测量转换为长度测量。再如测量杨氏模量实验中利用光杠杆将微小的金属伸长量转换为容易测量的米尺读数等量的测量。

2. 能量换测法

能量换测法是指某种形式的物理量，通过能量变换器，变成另一种形式物理量的测

量方法。在物理实验中，常利用传感器来进行这种能量转换的测量。传感器的种类很多，原则上讲，所有的物理量，如：长度、速度、加速度、光强、温度、压力、流量、电压、电流等等，都能找到与之相应的传感器，从而可将这些物理量转换为电信号量进行测量。常用换测方法有：热电换测、磁电换测、压电换测、光电换测等。

四、模拟法

受实验条件限制，许多物理过程难以真实再现或很不经济，可以采用模拟法来进行实验。模拟法并不直接研究某物理现象或物理过程的本身，而采用与之相似的模型进行研究，它是弥补实验室有限条件的有效方法。它可分为物理模拟、数学模拟和计算机模拟。

1. 物理模拟

若被模拟的物理过程与模拟的物理本质与过程是一致的，称之为物理模拟。例如用风洞(高速气流装置)中的飞机模型来模拟实际飞机在大气中的飞行。又如用水泥造出河流的落差、弯道、河床的形状，一些不同形状的挡水状物，模拟河水流向、泥沙的沉积、水坝对河流运动的影响。

2. 数学模拟

两个物理量，尽管它们的物理本质和产生的物理现象或过程并不相同，但它们却有相同的数学表达式来反映它们的规律。这样，就可以用其中的一个物理过程来模拟另一个物理过程，这称为数学模拟。例如模拟静电场实验中用稳恒电流场来模拟静电场。

3. 计算机模拟

计算机模拟实验就是通过计算机控制仿真实验画面动作来模拟真实实验的过程。随着计算机多媒体功能的不断提高，计算机模拟实验有单纯的过程模拟发展到具有很强真实感的仿真，因此也称为计算机仿真实验。计算机仿真实验利用计算机丰富实验教学的思想、方法和手段，改变了传统的实验教学模式。

五、光学法

利用几何光学和物理光学的原理可以实现大量的物理量的无损测量。例如干涉法利用各种机械波、电磁波、光波的干涉可将瞬息变化并难以测量的动态研究对象变成稳定的静态对象“干涉图案”，从而简化了研究方法，提高了研究的精度。光学法具有高速、高精度、无损等特点，在物理量的测量得到越来越广泛的应用。在下一节将对光学测量技术作进一步的介绍。

六、放大法

当待测物理量很小而无法直接测量时，可考虑采用放大法进行测量，而且必须是线性放大。常见的放大有以下几种：

1. 机械放大

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，从而提高了测量仪器的分辨率，增加了测量的有效数字的位数(如游标尺、游标盘、十分尺等)。

2. 电磁放大

在电磁学物理量的测量中，鉴于被测量微弱，常需放大才便于检测。另外在非电量测量中将其转换成电学量再进行放大而测量之，几乎成为科技人员的惯用方法。如在用霍尔效应法测磁场的实验中，通过对放大的霍尔电压测量，以得到对磁场的测量。

3. 光学放大

望远镜、读数显微镜以及许多仪表中应用的“光杠杆”皆属于光学放大。光学放大具有稳定性好、受环境的干扰小的特点。

七、对称测量法

对称测量法是消除测量中出现的系统误差的重要方法。当系统误差的大小与方向是个确定值(或按一定规律变化)，在测量中可以用对称测量法予以消除。例如“正向”与“反向”测量，平衡情况下的待测量与标准量的位置互换，测量状态的“过度”与“不足”(如超过平衡位置与未达平衡位置的对称、过补偿与未补偿的对称)等，这类测量方法常常可以帮助测量人员消除部分系统误差。

1. 双向对称测量法

它对于大小及取向不变的系统误差，通过正、反两个方向测量，可收到加减相消的结果。如：静态法测杨氏弹性模量实验中，通过对被测材料增加外力和减小外力的对称测量，可消除因材料的弹性滞后效应而引起的系统误差；霍尔效应法测磁场的实验中，分别对霍尔片通以正向和反向电流的对称测量，可消除霍尔附加效应对测量结果的影响。

2. 平衡位置互易法

在应用平衡比较法测量时，将待测量与标准量位置互换，交换前后两次测得的数据，通过乘除来消除部分直接测量的系统误差。如：天平称衡时，对因天平两个臂的不等长而引起的系统误差，可通过交换被测物与砝码的位置来消除；电桥测量中，比率臂电阻的误差可通过交换比较臂电阻与被测电阻的位置而消除。

§ 2.3 物理实验基本技术

物理实验的基本技术包括调整、操作和测量技术等，在实验中十分重要。正确地调整、操作和测量不仅可将系统误差减到最低限度，而且可以提高实验结果的准确度。所以任何正确的测量结果都是来自仔细地调节，严格地操作，认真的观察和合理地分析。有关实验基本技术的内容相当广泛，需要通过具体的实验逐渐积累起来，熟练的实验技能只能来源于自身的实践。下面仅简单地介绍一些最基本的实验技术。其他一些特殊的调整、操作技术将在各有关的实验中加以讨论。

§ 2.3.1 基本调整技术

一、零点的调整

仪器在使用前应首先检查其零点是否正确，由于搬运、使用磨损或环境条件的改变等原因，其零点会发生变化。对于有偏差的零点要进行调整或校准，否则，将对测量结果引入系统误差。

零点校准的方法，应根据不同的仪器采用不同的方法。对有校准器的仪器如电表等，则应调整校准器，使仪器处于零位。对于电路调零可以通过调整电位器进行(称电器调零)，如开尔文电桥检流计放大器的电器调零是通过调整 w 旋钮。有的仪器可以使用专用工具(如小扳手)进行零位调整，如螺旋测微计等。对于没有进行调整或者暂不能进行调整零位的仪器，可在测量前先记下初读数，再在测量结果中加以修正。

二、水平、铅直的调整

在实验中，有些仪器需要进行水平或铅直的调整，如平台的水平或支柱的铅直状态等。需要调整水平或铅直状态的实验装置，一般在平台或支柱上装水准仪或悬锤，调整时只要调整底座上的三个底脚螺丝使水准仪中的气泡居中，或使悬锤的锤尖对准底座上的座尖即可。例如，刚体转动实验仪平台水平的调整和天平立柱铅直的调整等。

对没有装置水平仪或悬锤的仪器，可利用自身的装置进行调整，如焦利秤可以通过调整底脚螺丝使悬镜处在玻璃管的中间；对杨氏模量仪，可以通过调整底脚螺丝使砝码托处在两立柱的中间，以达到立柱的铅直。

对于不能利用自身装置的仪器，可取一长方形的水准仪，先放在与任意两底脚边线平行的方位，调节该两底脚螺丝使气泡居中，然后将水准仪置于与前位置垂直的方位，调节另一底脚螺丝使气泡居中，再反复进行调节，逐次逼近，直至水准仪置于任意位置时气泡都居中。这时立柱即处于铅直状态。

三、视差的消除

在测量读数时，经常会遇到读数标线(指针、叉丝)与标度尺(盘)不重合的情况，例如，电表的指针和标度面总是离开一定的距离。当眼睛在不同位置观察时，读得指示值就会有一定的差异，这就是视差。有无视差可根据观察时人的眼睛稍稍移动。标线与标尺刻度是否有相对运动来判断。为了消除视差，应做到正面垂直观察。对有反射镜的电表读数时，人的视线应垂直盘面，使指针与刻度槽下平面镜中的像重叠，读出指针与刻度盘上重合处的读数，即为无视差的读数。

在光学测量时，常用到带有叉丝的测微目镜、望远镜或读数显微镜。它们的共同的特点是在目镜焦平面附近装有一个十字叉丝(或带有刻度的玻璃分划线)，使用时应通过旋转(或推拉)目镜和调节物镜，分别使十字叉丝和待观测物体同时成像在目镜的焦平面上，此时叉丝与物体的虚像都在明视距离的同一平面内，这样便无视差。要判断是否有视差，可上下轻微晃动眼睛，若叉丝与物体间无相对运动，说明无视差。要消除视差且

可轻松地长时间观测，可先放松眼睛，然后仔细调节目镜(连同叉丝)使成像在明视距离上(可长时间轻松看清)，再调节物镜(焦距)，使被观察物体成像在叉丝的像重合，即可消除视差。杨氏模量实验中望远镜的调节、等厚干涉实验中读数显微镜的调节均可这样操作。

四、等高、共轴的调整

1. 在光具座上应用激光做实验时，先以导轨为准，调节激光束的方向平行于导轨，用光屏沿导轨平稳地移动较长一段距离，若屏上激光斑点的中心位置不变，则表明光束的方向已平行于导轨。再以激光束为准，依次放置并调节各元件的高低和左右，使光束经过各元件后光斑的中心仍在原来的位置。

2. 在光具座上采用普通光源做实验时，应以光具座的导轨为准。先用目测法进行粗调，使光源、物体、透镜和光屏的中心大致等高共线，各元件均不倾斜。再利用光学系统本身，依据透镜或成像规律进行细调。例如，由共轭法细调时，使物与屏的间距大于四倍焦距，逐步将凸透镜从物移向屏，在移动过程中，屏上将先后获得一次大的和一次小的清晰的像，若两次成像的中心重合，即表示已达到等高共轴的要求。

3. 安排二维光路(如全息照相光路)时，应以平台面为准，调激光束的俯仰，使光束平行于台面。当光屏在平台上滑动较长一段距离时，屏上光斑的中心应保持同一高度，放置其他元件时，应使经反射或折射后的光束保持原高度。经扩束镜形成的光锥轴线也保持原高度。

§ 2.3.2 基本操作技术

一、电学实验的基本操作

1. 仪器的布局

做电学实验时，合理地布局仪器是顺利做好实验的重要一环。仪器布局得当，可使接线顺手，操作方便，不易出错。仪器布局的原则是：为了连线方便，一般设备仪器应按照电路图中的位置摆好，但是，为了便于操作，易于观察，保证安全，有的仪器可不完全按照电路图中的位置对应布置。例如，经常要调节或读数的仪器可放在操作者近处，电源应放在最后，电源开关前不要放东西，以防万一在电路出故障时可以及时断开电源。仪器总体排放要整齐。

2. 电路接线

接线时不要随意接，应将复杂的电路分成若干闭合的简单回路，一个回路一个回路地接，一个回路完成后再接下一个回路。每个回路都是从电位最高处(如电源正极)开始，到电位最低处(如电源负极)结束。

对于有正负极性之分的器件要特别注意，要避免接错，可在仪器摆放时就按照电路图把正负极摆好。按照前述的方法先接的是正极，再由负极接其后的元器件。

当有两个以上元器件并联时，可先将它们并联好；若有两个以上的元器件有极性，则应将同极性的一侧并联；在连接子回路时，并联后的元器件与单一元器件一样对待。

接线柱旋钮要旋紧。电路中一个接线柱上不宜连上过多的线，否则，容易出现接头脱落等现象，可分散到电路上等位点的接线柱上。接线完毕后，要先自查一遍，再请教师检查，无误后方可通电实验。

3. 通电试验

通电试验之前，须将电源的电压输出旋钮逆时针调至最小。电路中各变阻器调至安全位置，如限流器的阻值要调至最大，分压器要调到输出电压最小的位置，检流计的保护电阻应调至最大位置等。当对电路中待测的电流、电压等的量值大致范围尚不明确时，电流表、电压表等应取最大量程。

接通电源时应手按电源开关，仔细观察全部仪器装置，发现有表针反向偏转或超出量程，电路打火、冒烟，出现异味或特殊响声等异常现象时，应立即切断电源，重新检查。在排除故障前千万不可再通电。实验过程中要改接电路时，必须先断开电源。

4. 断电和整理仪器

实验做完后不应忙于拆线路，应先分析数据是否合理，有无漏测或可疑数据，必要时应及时重测或补测。在实验课上须经老师检查，确认实验数据无误后方可拆线。拆线前应首先把分压器和限流器再度调至安全位置，减小电压和电流，以免断电时电表剧烈打靶，或者交流元件产生反向感应电压，击穿其他元件或仪器仪表。然后切断电源开关，开始拆线。拆线应从电源开始，这样做可以防止忘记断开电源时因自由导线短路而引起烧坏仪器、触电、起火等事故。拆下的线整理成束捆好，再将仪器、仪表摆放整齐。

二、光学实验的基本操作

1. 光学实验的校准的三种方法

(1) 自校准

自校准是利用自身的设冒来校准自身状态的一种方法。例如，分光计上的自准直望远镜就是通过自身装置的调节达到标准状态，即适合观察平行光，其转轴又垂直于仪器转轴。

(2) 被校准

被校准就是内一个作为基准的仪器校验待校的仪器。例如，分光计上的平行光管是以校准后的自准直望远镜为基准进行校准，使之出射平行光就是被校过程。被校准是应用最多的校准方法。在光学系统调节过程中，首先弄清哪个是基准，对谁进行调节、应出现什么现象，然后再动手进行操作，就会取得事半功倍的效果。

(3) 互校准

互校准是指待校准的双方均未达到标准状态，而又根据二者之间的关系进行调整的方法。比如在分光计上平行光管调整中，一边调分划中心的横向位置，一边调反射镜的角度，使分划线中心处于光轴上的调节就是一例。因为在互校准的过程中，谁都不处于标准状态，因此，必须采用互为参照，互相逼近的调节方法。

2. 成像准确位置的判断

根据透镜成像规律，像与物是共扼的，只有在共扼面上才能得到理想的像。为了准确地定出共扼像面位置，必须有意识地找出焦深范围，即向前向后移动光屏，找到两个

像开始变模糊的位置，两个位置之间的距离即焦深。焦深范围的中点就是共扼像面的位置。

3. 光学仪器的使用

由光学仪器的特点：光学元件大都是玻璃制品，光学面都要经过精细抛光；光学仪器的机械系统，大都要经过精密加工。所以，光学仪器精度高、价格贵、易损坏。

光学器件和仪器的操作注意事项：

- ① 光学元件多为玻璃器件，使用时要轻拿轻放，防止碰撞和摔坏。
- ② 光学元件的工作表面(即“光学表面”)是经过精密研磨抛光的，甚至经过精密镀膜的。其光洁度和厚度不可破坏。不允许直接用手触摸元件的光学表面，也不许对着光学表面说话、咳嗽和打喷嚏。
- ③ 拿元件时只能接触非光学表面(如边框或磨砂面等，见图 II.19)，以免留下指纹等脏迹。
- ④ 暂时不用的元件应放在安全的位置，不可放在书上或桌边，以免被无意扫落地面打破。
- ⑤ 若光学表面已被玷污(如有指纹、污痕、霉点和灰尘等)，应请示老师，采取妥善

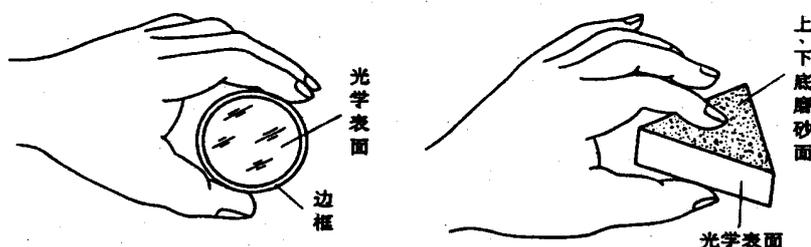


图 II.19 光学器件的拿法

措施处理，不可擅自随便擦拭。

⑥ 光学仪器的机械部件大多数都加工和装配得很精密，造价也很高昂。使用之前必须熟悉其结构，轻缓调节，不可蛮扭强旋，更不许随便拆卸。暂不使用的附件不可随意乱放，以免丢失和损坏。

光学器件和仪器的保养维护时应做到：

- ① 光学仪器应在通风、干燥和洁净的环境中使用和保存，以防光学元件受潮、发霉或结雾，受到腐蚀。
- ② 从仪器箱内取出时，要注意各部件在箱内的安放位置和方法。取时要先取附件后取主机；放回时要按原来位置，先放主机后放附件。
- ③ 对长期搁置不用或备用仪器，要装箱或加盖罩，并定期检查和保养。仪器箱内的干燥剂要及时烘干，以保持去潮能力。在活动的金属部件间隙可注入少量的润滑油。

④ 光学表面(或某些镀膜面)如有油污、斑痕, 绝不要随便擦拭, 可以用 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出多余的液汁(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位(切勿重复使用)。

⑤ 狭缝刀口上如有纤维或灰尘, 可用细软的小木条(如削尖的火柴棒)清理。

以上仅适用于处理一般光学仪器和元件。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, 不许自己擦拭。

三、其他操作技术(技巧)及原则

除了以上两个方面的操作技术之外, 为能更快捷、更精确地得到待测量的测量结果, 在物理实验中还常常用到以下操作技术与原则:

1. 逐次逼近调节技术

对任何仪器进行的调节几乎都不能一蹴而就, 都要根据一定的判据, 进行多次反复调节。逐次逼近法是一种快速而有效的调节方法, 如电桥调平衡、天平调平衡、电位差计测电动势时调整补偿点等, 均用到该方法。其核心内容是: 在调节过程中, 应首先确定平衡点所在的范围, 然后逐渐缩小这个范围, 直至最后调到平衡点。

例如, 调节电桥平衡时, 若待测电阻 R_x 与其他已知桥臂电阻满足关系

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0 = k R_0 \text{ 时, 电桥达到平衡, 检流计指零。常用单臂电桥(如 QJ23 型惠斯登}$$

电桥)有五个调节旋钮(比率 k 和 R_0 的 $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 100$ 和 $\times 1000\Omega$ 四位), 若待测电阻 R_x 范围未知, 可先将 $k R_0$ 取最大, 即 k 放置在最大值位上, R_0 的四位全部放在最高档 9 上, 此时是电桥的最大量程。按电桥电计按键, 检流计指针一般会向负方向偏转, 说明 $k R_0 > R_x$ 。将 k 降低一档, 若检流计指针仍向负方向偏转, 将 k 再降低一档, 直至检流计指针换向, 将 k 倒回至前一档; 若测试前已知待测电阻的数量级, 可直接将比率 k 放到合适的档位(比待测电阻的数量级小 3 个数量级)。将 R_0 的最高位($\times 1000\Omega$)逐档下调, 当检流计指针由向负方向偏转改为向正方向偏转时, 将档位后退一档, 再用相同的方法依此调节其余的位, 如此逐次逼近, 可迅速找到平衡点。当 R_0 的最后一位($\times 1$)调好后, 全部调节完成, 读出 k 和 R_0 的值相乘即得待测电阻的阻值。

2. 先定性后定量原则

为避免测量的盲目性, 在进行定量测量之前, 应先对实验现象的整体或全过程进行定性观察。在对实验现象或数据的变化规律有一初步的了解后, 再着手进行测量。

例如, 在“衍射光栅测波长”及“单色仪定标”实验中, 应先定性地观察待测光谱的整体状况, 如待测谱线的呈现是否完整, 强度能否满足易于分辨的需要, 位置的大致分布范围。又如测量透镜焦距实验, 可先利用成像原理简单判断待测透镜的类型和焦距的大概值, 再根据实验条件选择合适的方法精确地测量, 等等。这样, 在进行定量测量时就可避免盲目性。

实验中, 还可以根据已有知识和实验公式对实验中的待测量进行估计, 这样, 可以

在实验中有目的寻找待测目标,对实验过程进行有针对性的指导,避免盲目实验。如“衍射光栅测波长”中,光栅常数 $d=1/600\text{mm}$,可见光范围在 $400\sim 700\text{nm}$ 之间,黄光靠近红光,在可见光范围的中间偏上位置,估计一值,如 580nm ,则根据光栅方程 $d\sin\theta=k\lambda$,取 $k=1$ 得 $\theta\approx 20^\circ$,即黄色谱线应在与入射方向成 20° 角的方向附近寻找。

3. 单向性测量原则

在物理实验中,有许多测量仪器都是通过鼓轮由螺丝杆推动测量准线移动的,如测微目镜、读数显微镜、单色仪、迈克尔逊干涉仪等。由于齿轮与螺纹间不可能是理想的密合结构,所以使用这类仪器时,当鼓轮正、反向换向旋转之初会出现由于齿轮与螺纹间间隙的存在导致的鼓轮转动而测量准线尚未移动的情况,产生空转误差(空程差)。

为了避免这类空转误差的产生,在使用这类仪器时,要在测量的全过程中始终保持鼓轮沿一个方向转动调节,即单向旋转。

在具体的实验中,不同的实验要求其单向旋转的具体做法也有所不同。有的实验所需要的是仪器两次状态间的差值,而于测量方向无关,对于这样的测量只要单向旋转即可,可不管转动方向,像牛顿环直径的测量、光栅实验中衍射角的测量;有的实验需要绝对位置,这时不仅需要单向旋转,还要记录转动方向,因为不同的测量方向会有不同的结果,如单色仪定标实验,必须要记录转动方向,否则所得的定标曲线是没有意义的。

§ 2.3.3 基本测量技术

一、非电量电测技术

电学量如电阻、电流、电压等的测量有比较成熟的仪器和方法,电测方法具有控制方便、灵敏度高、反应速度快,能进行动态测试和自动记录。对一些非电量,如力学量中的速度、位移、力,热学量中的温度、压强、流量,光学量中的光强、照度、功率等,利用传感器转换为电学量,再采用电测量方法,可充分发挥电测方法特点。

非电量电测系统包括放大器、传感器、测量电路和显示器等。其中传感器是这一测量技术的核心。传感器实际上是一种接触器,它们是利用物理学中的物理量之间存在的各种效应与关系,把被测的非电量转换成电量,从而获得被测信息,输入到测量电路中去,测量电路把这一电信号放大、检波、整形等,再输入至显示装置进行显示或记录。下面仅就一些常用传感器作简单介绍。

1. 热电式传感器

热电式传感器是一种将温度变化转换为电学量变化的装置。它是通过传感元件的电磁参数随温度变化的特性来实现测量的目的。典型的热电式传感器是热敏电阻和热电偶。

热敏电阻是利用半导体材料的电阻率随温度变化而变化的效应制成的温度敏感元件。半导体热敏电阻的电阻温度系数一般是负的。即热敏电阻的阻值是随温度的升高按指数规律衰减(详见热敏电阻温度系数的测定实验)。它的主要优点是:电阻温度系数大、

体积小、重量轻、热惯性小、结构简单等。被广泛应用于测点温度、表面温度、温差、温场分布等。

由于热敏电阻体积较小，点温计除可以测量液体、气体相固体的温度外，还可以用来测量晶体管外壳温升，植物叶片温度和人体内血液温度等。利用热敏电阻还可以进行自动控温和温度补偿等应用。

热电偶具有热容量小、反应速度快、测温范围宽、便于自动化测量等优点，是目前应用十分广泛的热电式传感器。热电偶的应用举例详见“固体导热系数的测定”实验。

2. 压电式传感器

压电式传感器是一种力敏感元件。它以某些电介质的压电效应为基础，当受到一定方向的外力作用而发生形变时，内部就产生极化现象，在它的两个表面上就带有符号相反的电荷；当外力去掉后，它又重新恢复不带电时的状态，这种现象称为压电效应。当作用力方向改变时，电荷极性也随着改变。反之若在介质的极化方向施加电场时，这些电介质也会产生变形，若施加交变电场，电介质因变形而振动，这种现象称为逆压电效应，或称电致伸缩效应。具有压电效应的物质很多，如天然形成的石英晶体，人工制造的压电陶瓷、锆钛酸铅等。

压电传感器不仅可实现对各种力的电测，而且可以使那些最终能转变为力的物理量(如位移、速度和周期等)实现非电量电测。

压电器件目前也大量作为换能器件使用，如压电陶瓷作扬声器、超声波换能器等，它们被大量应用于家电、工业检测设备中，像超声波加湿器、超声波清洗机、超声测深仪等，本教材中“声速测量”实验中有超声波换能器的具体应用实例。

3. 光电式传感器

光电式传感器是将光信号转换为电信号的一种装置。用这种装置对于能够转换为光信号或能使光信号发生变化的非电量都可以进行购置。例如，可用来测量转速、位移、距离、温度、浓度、浊度等参量，也可以用作对各种产品的计数，机床的保护装置等。总之，是应用很广泛的传感器之一。常见的光电式传感器有以下几种：

(1) 光敏电阻

光敏电阻是根据半导体光电导效应，用光导材料制成的光电元件。有些半导体(如硫化铜等)在黑暗中它的电阻值很高，但当它受到光照时，光子能量将激发出电子—空穴对，从而加强了导电性能，使电阻降低，并且照射的光线越强，阻值越低。这种由于光线照射强弱而导致半导体电阻值变化的现象，称为光电导效应。具有光电导效应的材料就称为“光敏电阻”。用光敏电阻制成的器件称为“光导管”。

(2) 光敏晶体管

光敏晶体管是一种利用光照时载流子增加的半导体光电元件，它与普通晶体管一样，也有P—N结。一般把有一个P—N结的叫做光敏二极管，而把有两个P—N结的叫做光敏三极管。光敏三极管常常只装有两根引线。

当光通过透镜照射到光敏二极管时，在一定的反向偏压下，光敏二极管的反向电流，要比没有光照射时大几十倍甚至几千倍，因此有较大的光电流。由于光电流是光子激发

的光生载流子形成的，所以光照越强，光生载流子也越多，光电流也越大。与光敏电阻相比，它具有暗电流小，灵敏度高等优点。

(3) 光电倍增管

在光很弱时，普通光电管产生的光电流很小，此时可采用光电倍增管。光电倍增管是应用电子的二次发射，所以可使光电灵敏度大大提高，其放大倍数可高达 $10^4 \sim 10^6$ 。另外它比一般光电管信噪比大、线性度好、工作频率高。所以，它在弱光测量方面有很广泛的应用。

(4) 光电池

光电池是一种利用半导体光生伏特效应直接把光能转变为电能的光电气元件。常见的光电池有硅光电池、锗光电池、硒光电池和硫化镉光电池等。目前应用最广泛的是硅光电池，它有性能稳定、光谱范围宽等优点，但对光的响应速度还不够高。

光电池一般是作为一种能源，如把太阳光能转换成电能的太阳能电池。另一种应是把光电池作为一种光电信号转换器。

(5) CCD (电荷偶合器件) 是近几年来发展十分迅速的图像传感器，它除了在传统的电视摄像、数码相机中应用外，也越来越多地被应用到各种测量中。本教材中有多个实验也采用了 CCD 图像传感器，可参阅“CCD 摄像法测径实验”等实验。

二、磁测量技术

磁场的测量包括对空间磁场和磁介质内部磁场的测量。目前，常用的空间磁场的测量方法已有十多种，测量的磁感应强度范围为 $10^{-15} \sim 10^8 \text{T}$ ，从测量方法所涉及的原理，有电磁感应，热磁效应，光磁效应等等。下面仅就旋转线圈法和霍耳效应法作一简要介绍。

1. 旋转线圈法

旋转线圈法是发电机原理的直接应用，测量范围为 $10^{-8} \sim 10^2 \text{T}$ ，精度为 $\pm (0.1 \sim 0.01)\%$ 。旋转线圈法的测量精度受转速的稳定性及电压测量精度的限制。一般说来，它的测量误差为 2%。

2. 霍耳效应法

美国物理学家霍耳(Hall)于 1879 年发现，当金属薄片通以电流时，若同时存在垂直于电流方向的磁场，则在片两侧产生与电流和磁通方向垂直的电场，这种现象称为霍耳效应。20 世纪 50 年代以来，由于半导体工艺的进展，先后制成了有显著霍耳效应的材料，如 N-Ge, N-Si, GaAs 等。这一效应的主要应用是用来测量磁场。用霍耳效应测量磁场具有以下一些特点：可连续并线性地获得读数；无触点，无可动元件，机械性能好，使用寿命长；能在很小的空间和小气隙中测量磁场；可用多个探头测量磁场，以便实现自动化测量和数据处理。用霍耳效应测量磁场的原理和方法见“用霍耳元件测磁场”的实验。用霍耳效应制造成的测量仪器称特斯拉计(原名高斯计)，可测量 $10^{-2} \sim 2.5 \text{T}$ 的交直流磁场。霍耳元件在许多定性、定量检测和报警电路有广泛应用。

三、光测量技术

光学测量技术在工程技术与物质的原子、分子结构分析中都曾发挥了巨大作用。随着激光技术的发展,使光学实验方法和技术进一步得到了提高。

在几何光学测量技术范围内,通常以光的直线传播为基础,测定光学材料的物质特性和光学元件的基本参数。例如,光学材料的折射率,光谱透射特性(透射率、透射光谱曲线)等。使用的仪器有测微目镜、显微镜、望远镜,平行光管、光谱谐振腔等。

物理光学测量技术是以光的电磁波动性为基础,利用物理光学中的干涉、衍射、偏振等各种现象及光谱技术进行测量。在干涉法、衍射法测量中基本规律是:测量干涉条纹、衍射条纹之间的间距(或条纹宽)、及衍射角度,以达到测量微米数量级的大小或变动量;测量条纹的数目或条纹的移动数,以测定光的波长、材料的折射率、光学表面的物理待性及光学元件的基本参数等;测量干涉条纹和衍射图像的强度分布。

1. 干涉测量技术

两束光波在空间相通时,若在其叠加区域可以观察到明暗相间的条纹,这就是光的干涉现象,获得光干涉的装置一般有两类:一是分波阵面法的干涉装置;二是分振幅法的干涉装置。

光束在传播过程中,同周相的面称为波阵面,把一束光的波阵面人为地分割成两束光,再使这两束光汇合,在叠加区形成干涉的方法,称为分波阵面法。常用的装置有双缝、双棱镜、双镜、洛埃镜等,一般用来测量光波波长和薄膜折射率。但由于这种测量技术误差大而干涉条纹亮度差,因此已很少应用。

分振幅法可采用扩展光源,所以可得到亮度较高的干涉条纹。典型的双光束分振幅法干涉装置是劈尖和牛顿环装置。劈尖和牛顿环的测试原理详见“等厚干涉”实验。

分振幅法产生的干涉条纹亮度大,在实际生产中应用极其广泛。其主要应用有以下几个方面:

①利用等厚干涉条纹检验光学表面质量及测量一些基本物理量。例如,测量光波波长,球面的曲率半径,玻璃或液体的折射率和微小厚度等。

②组成迈克耳逊干涉仪和法布里—珀罗干涉仪(多光束干涉装置)等。这些装置可以大大提高测量精度。

③激光散斑干涉。这是近年来发展起来的干涉计量方法。激光照射到漫反射物体表面时。

在不透明物体表面的前方,或透明物体表面的后面,产生无规则分布的亮点和暗点,这些亮点和暗点称为散斑。散斑的线度和形状与照射光的波长、物体表面结构和观察点位置有关。散斑干涉计量就是利用散斑图与物体表面变形或位移有内在联系,从而可将变形或位移测量出来、由于它具有非接触、无损伤、测量灵敏度高、设备简单等优点,已成为光测技术中的一个重要分

2. 衍射测量技术

光波遇到障碍物,当障碍物足够小时,产生偏离直线传播的现象称为光的衍射现象。产生衍射现象的装置有单缝衍射装置和光栅衍射装置。过去在加工仪表游丝的过程中,

是依靠人工用千分尺或读数显微镜逐段检验。工作量大，速度慢。现在可以利用激光照射游丝的衍射现象进行无接触的动态测量和检验，使测量速度和成品的合格率大为提高。

利用光栅衍射可以测定光波波长或光栅常数。光栅衍射测量装置原理见“衍射光栅测波长”实验。将光栅作为分光元件装在光谱仪上，就成为光栅光谱仪，可以进行元素成分及含量的分析。利用晶体的晶格作为空间光栅，可以得到 x 光的衍射。x 射线衍射仪就是利用这一原理制成的，它可用来研究晶体结构。

3. 偏振测量技术

光的干涉和衍射测量技术是利用了光的波动性，而光的偏振测量技术则是利用光是横波的特性。有关光的偏振现象和测试原理在“光的偏振”实验中有详细说明，在此仅对偏振光测量技术的应用方面作以简单介绍。

(1) 光测弹性和应力仪

各向同性介质在外压力作用下也会有双折射特性。这种现象称为光弹性效应。双折射效应的强弱是与应力成正比，所以可利用光弹性和偏振光干涉原理测定机械结构的应力大小。研究这一测量技术的学科称为光测弹性学，常用的仪器是应力仪。

除用机械外力获得人为双折射外，还发现在强电场的作用下，某些各向同性的物质也能产生双折射现象，称为克尔电光效应。克尔电光效应反应极为迅速(约 10^{-9} s)，目前用来制作高速电光开关。

(2) 偏光显微镜

它是鉴定矿石，研究晶体光学性质——双折射的一种重要的工具*与普通生物显微镜的差别主要在于偏光显微镜上面装有两个偏振元件——起偏器与检偏器。

(3) 旋光现象与旋光仪(糖量计)

某些晶体或液体能使通过它们的偏振光的振动面旋转，这种现象称为旋光现象，这种物质称为旋光物质。我们迎着光传播的方向看去，使偏振光振动方向按顺时针方向旋转的物质，称为右旋光物质，反之称左旋光物质，引起旋光现象的主要原因是这些旋光物质中原子层之间的排列略有扭曲的缘故。右旋光物质的原子层绕顺时针方向扭转，左旋光物质则相反。例如，糖溶液的旋光性就是由于碳原子的排列略有扭曲而不对称所引起的。

旋光仪是测定旋光率的仪器，通过旋光率的测定可以测量溶液纯度和杂质含量。在医药工业上使用较广泛。

除了天然旋光物质外，某些非旋光物质在磁场作用下，也会显示出旋光现象。物质具有这种旋光性质称作磁旋光性，又称法拉弟效应。磁旋光的方向与磁场方向有关，与光的传播方向无关，利用这一特点，可以制成单通光闸。

§ 2.4 教材中实验涉及实验方法及技术对应

每一个实验中都具体采用一定的实验方法、数据处理方法，操作过程中也需要一定的操作技术或技巧，才能将实验做的既快又准确。本节把书中各实验中所涉及的有关实验方法、主要仪器、数据处理方法和使用的关键操作技术和技巧做一粗略的总结，以使读者在使用中方便查找、对照参考。

序号	实验	实验方法	数据处理方法	调整操作技术	关键仪器
1	用谐振子测量重力加速度	累计放大法	逐差法	垂直调整，三线对齐	焦利称、秒表
2	气轨上速度加速度的测定	参量换测法	图解法，外推法	水平调整	气垫导轨、数字毫秒计
3	气轨上简谐振动的研究	累计放大法	图解法，外推法	水平调整	气垫导轨、数字毫秒计
4	液体粘度的测定	落球法	误差修正，标准误差计算	垂直调整，零点调整	秒表，螺旋测微计，游标卡尺
5	液体表面张力系数的测定	能量换测法	标准误差计算	对称操作临界拉膜	数字电压表
6	刚体转动惯量的测定	验证性实验，曲线改直	图示法，图解法，最小二乘法	水平调整	刚体转动实验仪，秒表
7	固体导热系数的测定	能量换测法，物理模拟法	误差修正，图解法	时间温度同步测量	热电偶，数字电压表
8	热敏电阻温度系数的测定	替代比较法	图示法（对数），图解法，	逐次逼近法	单臂电桥
9	电热法测量热功当量	能量换测法	散热修正	平衡位置互易法	量热器，稳压电源，天平
10	导体电阻率测定	替代比较法，四端接法	仪器误差估计	逐次逼近法	双臂电桥
11	示波器的原理与使用	换测法	图像比对		示波器，信号发生器
12	薄透镜焦距的测量	自准直法等		共轴调节	光具座
13	折射率的测定	折射极限法	偏心差消除	单向旋转垂直调节	分光计
14	衍射光栅测波长	衍射法，补偿法	偏心差消除	逐次逼近法，自校准，被校准，互校准，视差	分光计
15	应变片式电阻传感器测应变及质量	能量换测法，平衡位置互易法，差值补偿法	累加法	单向旋转，调零	传感器实验仪，物理天平
16	声速的测量	能量换测法	逐差法	单向旋转	声速测量仪，示波器
17	光纤位移传感器工作特性研究	能量换测法	最小二乘法	单向旋转	传感器实验仪

18	莫尔条纹法测位移	换测法	数字图像处理	单向旋转	光电传感器实验仪
19	霍尔元件测磁场	换测法, 双向对称平衡法	图示法		数字电压表、电流表
20	电路故障分析	电压检查法	图示法	排除法	万用表
21	CCD 摄像法测直径	换测法, 比对测量	数字图像处理		光电传感器实验仪
22	迈克尔逊干涉仪实验	干涉法, 补偿法		共轴调节, 单向旋转	迈克尔逊干涉仪
23	单色仪定标	色散法	图示法	单向旋转	单色仪, 汞灯
24	等厚干涉	干涉法	逐差法	单向旋转, 显微镜消视差	读数显微镜, 钠灯
25	偏振光特性研究	偏振法	偏心差消除	单向旋转	椭圆偏振仪, 分光计
26	金属杨氏模量测定	放大法, 双向对称测量法, 参量换测法	逐差法	共轴调节, 望远镜消视差	望远镜尺组, 螺旋测微计, 游标卡尺
27	电子电荷测定	计算机模拟	静态平衡法	水平调节	计算机
28	光电效应实验	计算机模拟, 验证实验	图解法, 最小二乘法		计算机
29	阿贝比长仪和氦气光谱的测量	计算机模拟,	线性内插法	调零	计算机
30	塞曼效应	计算机模拟,		消除视差	计算机
31	核磁共振	计算机模拟,			计算机
32	电子自旋共振	计算机模拟,			计算机
33	数码影像技术		数字图像处理		数码相机, 计算机
34	迈克耳逊干涉仪测折射率	干涉法		单向旋转	迈克尔逊干涉仪
35	弹簧振子特性研究	双向对称测量法, 累计放大法	图解法, 最小二乘法	垂直调整	秒表
36	金属丝直径测量	衍射法(光栅、单缝)		补偿法	光盘, 半导体激光器
37	透镜焦距测量及选定透镜装成望远镜	设计性实验		共轴调节, 换向补偿法	透镜、白光光源
38	图像处理法测定工件体积	换测法	数字图像处理	参量相同	光电传感器实验仪
39	测量平板玻璃两面的楔角	干涉法		共轴调节	透镜、半导体激光器等
40	测量球面的曲率半径				球径仪
41	综合光学实验	换测法、衍射法等		共轴调节等	组合光学实验仪等
42	色散实验	衍射法等		自校准, 被校准, 互校准, 视差	分光计

43	旋光实验				旋光实验仪
44	超声定位和形貌成像实验	换测法	图像处理		超声探测试验仪
45	热辐射与红外扫描实验	换测法	图像处理		热辐射实验装置

山东大学普通物理实验室