绪　论

物理实验课的意义　物理学是一门以实验为基础的自然科学，物理概念的建立以及物理规律的发现都是以实验为依据的。如牛顿三定律、能的转换与守恒定律、欧姆定律，光的反射与折射定律等都是建立在实验的基础上。整个物理学发展史也告诉我们，人类的物理知识来源于实践，特别是来源于科学实验的实践。我们学习物理知识的过程，跟人类探索物理知识的过程有很多相似之处，因此认真上好物理实验课是学好物理知识的重要方法。

怎样上好物理实验课　实验能够帮助我们形成正确的物理概念，增加分析问题的能力，加强对物理知识的理解。为了做好实验，在每次实验之前要做好准备：明确实验的目的，弄懂它的原理，了解使用仪器的性能，搞清实验的步骤；实验中要遵守操作规程，认真观察现象，仔细记录必要的数据；实验后要对所得的数据进行分析，作出合理的结论，必要时还要进一步研究某些还不够清楚的问题。这里，事先的准备工作特别重要，这是因为：我们如果事前对实验目的和怎样去达到这个目的步骤都清楚了，那么，在具体操作中，就能够自觉地有目的地把实验做好。反之，如果事前不做好必要的准备，做实验时只是按照别人拟定的实验步骤去盲目操作，观察时不知道把注意力集中到重要的现象上，

需要全本请访问 www.ertongbook.com

记录数据时不知道记下这些数据干什么，这样，实验虽然做过了，收获却是很小的。总之，为了做好实验，并从实验中得到应有的收获，我们一定要做好事前的准备。

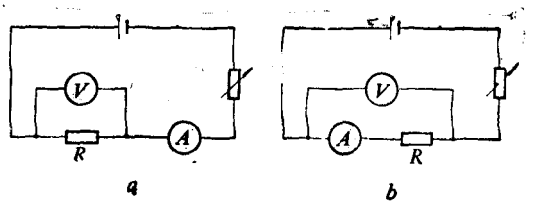
实验的误差　在实验中要对物理规律进行深入地研究，必须进行大量的测量工作，然后根据已知量与未知量的关系公式，把所需要的物理量求出来。所以物理量的测量是物理实验的基本方法。掌握物理量的测量知识和技术，是做好物理实验的保证。此外，还要掌握有关实验误差方面的基本知识。在实验中，由于方法不当或粗心大意，就会造成差错或错误，而误差和错误是不同的。在进行某一物理量测量时，由同一个人，用同一种仪器做多次同样的测量，无论仪器的精度如何，操作如何细心，都不可能做到每次测量结果相同。这种量度数值与真实数值之差，我们称为误差。从误差产生的原因来看，可以分为系统误差和偶然误差。

1.系统误差　系统误差产生的原因之一是所用仪器不够精密。仪器的精密程度可用测量的准确度 ϕ 来表示。测量的准确度就是仪器的最小分度值与真值的比，常用百分数表示。例如，我们测量 5 ℃的温差，如果用普通温度计，其最小温度值为 1 ℃，所测量的准确度 $\phi = 1/5 = 20\%$。如果用最小分度值为 0.1 ℃的温度计测量 5 ℃的温差，则测量的准确度 $\phi = 0.1/5 = 2\%$。又如用量程 3A、最小分度值为 0.1A 的安培表测量 0.5A 的电流强度，测量的准确度 $\phi = 0.1/0.5 = 20\%$。如用量程 0.6A、最小分度值为 0.02A 的安培表来测量，则测量的准确度 $\phi = 0.02/0.5 = 4\%$。再如，用最小分度值为 0.1cm 直尺测量 4cm 的长度，测量的准确度 $\phi = 0.1/4 = 2.5\%$。如果改用最小分度值为 0.005cm的游标卡

尺测量 4cm 的长度，则测量的准确度 $\phi = 0.005/4 = 0.125\%$。

在实验前，应估计各仪器测量时所能达到的准确度。如果不一致，则在测量中不必过分地超过各量中准确度最低的那个准确度的要求。如在测量物质密度的实验中，如果游标卡尺测量长度的准确度为 0.5 %，那应用准确度为 0.1—0.2 %的粗天平就足够啦。

系统误差产生的原因，除了上面所说的仪器不够精密之外，采用的实验方法不够严格也是一个原因。例如，采用图 0—1a 所示的电路测量电阻 R 的阻值，忽视了伏特表中流过的电流；采用图 0—1b 所示的电路测量电阻 R 的阻值，忽视了安培表本身的电压降。因此测量出来的数值必然与标准值之间有误差。这一误差产生的原因是由于实验方法不严密所致。



a　　b

图　0—1

系统误差出现的最后一个原因是测量者个人生理与心理特点引起的。例如在以秒表记录时间时，有人常停表过慢，有人常停表过快，造成计时的误差。

系统误差总是使实验结果偏向一边，或总是过大，或总是过小，增加测量的次数并不能减小这种误差的影响。但是通过实验前认真调好或校准仪器，尽可能完善实验方法，可

使系统误差显著减少，但不能完全避免。

2.偶然误差　是由各种偶然因素对实验者、测量仪器、被测物理量的影响而产生的。例如，用有毫米刻度的尺量物体的长度，毫米以下的数值只能用眼睛估计，各次测量的结果就不一致，有时偏大，有时偏小。实验表明，偶然误差中偏大或偏小的机会是相同的。因此，我们可以多进行几次测量，取其算术平均值，以减少偶然误差。

除了上述的系统误差和偶然误差外，由于实验者粗心大意，违反操作规程而使仪器安错、读错、算错数字等，这种情况一般不叫误差而叫错误。只要严格遵守操作规程，精力集中，认真细致地做实验，错误是可以避免的。因此在实验报告中不允许这种错误存在，一旦发现，应立即重做，直到取得比较准确的结果为止。

3.误差的表示法　常采用绝对误差和相对误差来表示误差的大小。

待测物理量的真正大小叫真实值，简称真值。由于误差不能完全避免，所以测量值与真值之间总有一个差值，这个差值的绝对值，叫做绝对误差。但是，真值是无法测到的，而被人们公认的精确测量值比较接近于真值，所以我们就用公认值代表真值来求绝对误差。用 A表示公认值，N表示测量值，则绝对误差 ΔN为

$$\Delta N = |A - N|$$

例如铝的密度公认值为 $2.7\times10^3\mathrm{kg/m^3}$，如果测量值是 $2.6\times10^3\mathrm{kg/m^3}$，则绝对误差是

$$\Delta N = |A - N| = |2.7\times10^3 - 2.6\times10^3|$$
$$= 0.1\times10^3\mathrm{kg/m^3}.$$

如实验中无法找到公认值，可用多次测量的平均值代替真实值，即

$$\bar{N}=\frac{N_1+N_2+N_3+\cdots\cdots+N_k}{K}$$

此时绝对误差$\Delta N=|\bar{N}-N|$。

仅用绝对误差往往表达不了实验的准确程度。例如，用同样的方法测得水的密度为 $1.1\times10^3\text{kg/m}^3$，水银的密度为 $13.5\times10^3\text{kg/m}^3$，它们的公认值分别是 $1.0\times10^3\text{kg/m}^3$ 和 $13.6\times10^3\text{kg/m}^3$。但前者占了公认值的 10 %，而后者还不到公认值的 1 %，显然后一个实验结果准确的多。因此我们就用绝对误差与公认值之比 $\Delta N/A$（或 $\Delta N/\bar{N}$）来表示实验的准确程度，叫做相对误差。一般用百分比来表示，又叫做百分误差。在所举的例子中，水的密度测定值的相对误差是

$$\frac{\Delta N}{A}=\frac{1.1-1.0}{1.0}=0.1=10\%.$$

水银密度测定值的相对误差是

$$\frac{\Delta N}{A}=\frac{13.6-13.5}{13.6}=0.007=0.7\%.$$

有效数字　在实验室中记录物理量的数据时，由于各种量度仪器的精密程度不同，测量出来的数据的可靠位数也有所不同。例如，用米尺量出课本的宽度为 12.85cm，米尺上的最小分度值为 1mm，毫米的数值可从米尺上直接读出来，所以前三位数字是可靠的，而最后一位数字是估计的，只有一定的可靠性。估计数字只可取一位，多取无意义。

再如，量程 0.6A 的安培表的最小分度值为 0.02A，其

需要全本请访问 www.ertongbook.com

刻度盘如图 0—2 所示。图中指针示数应在 0.12 和 0.14 A 之间，估计为 0.13A，最后一位数字是估计数字。关于有效数字，应当掌握下列几点：

1）一切非零数字都是有效数字，如 87.8 ℃是三位有效数字。

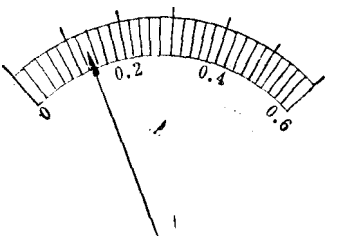


图 0—2

2）两个非零数字之间的一切数字（包括零在内）都是有效数字。如 1080.05m 是六位有效数字。

3）对于小于 1 的数字，在小数点右边，在非零数字左边的零不是有效数字。如 0.0064734m 是五位有效数字，小数点左边的那个零表示小数点的位置，它与所取的单位有关，如用毫米作单位，则可用 6.4734 毫米表示，仍是五位有效数字。所以它不能算有效数字。

4）有效数字的写法。如 5m 是一位有效数字， 5.0m 是两位有效数字。小数点右边的非零数字后的“0”，是有效数字，例如， 7.3 和 7.30 两个数，虽然数值相同，但意义不同。前者是两位有效数字， 3 为估计数，只有一定的可靠性；后者是三位有效数字， 3 为准确数字。

5）遇到大的数目时，表示有效数字的方法可以写成这样：

1.5×10^{4} 表示两位有效数字；

1.50×10^{4} 表示三位有效数字；

1.500×10^{4} 表示四位有效数字。

遇到小数目时，如 0.00157 ，可以改写为 1.57×10^{-3}

结果仍表示三位有效数字。

有效数字的运算，遵从下列两个基本规则：

（1）不可靠数字与别的数字相加减、相乘除，所得到的结果也是不可靠的；

（2）计算结果只能保留一位不可靠数字。

加减法取计算结果中由左向右数所遇到的第一个不可靠数字，为最末一位有效数字。也可以取计算结果中由左向右数所遇到的第一和第二个不可靠数字，按四舍五入的原则①，将第二个不可靠数字进入到第一个不可靠数字之中，成为有效数字的最末一位数字。为了清楚起见，我们在不可靠数字上面加一横线。

例 1：

$$\begin{array}{rr} & 13.0\overline{5}\ \text{cm} \\ & 309.\overline{2}\ \text{cm} \\ +) & 3.78\overline{5}\ \text{cm} \\ \hline & 326.\overline{0}\,\overline{3}\,\overline{5}\ \text{cm} \end{array}$$

计算结果中最后一位 5、倒数第二位 3 以及倒数第三位 0都只有一定的可靠性，因此应取 326.0 cm为计算结果，是四位有效数字。

例 2：

$$\begin{array}{rr} & 381.2\overline{9}\ \text{cm} \\ -) & 18.\overline{3}\ \text{cm} \\ \hline & 362.\overline{9}\,\overline{9}\ \text{cm} \end{array}$$

①如果实验次数较多，重复观测某一个物理量，其有效数字处理的原则可改为“四舍六入五留双”，即奇数次测得的数据够五也舍掉，偶次数测得的数据够五才进位。

最后应取 363.0 cm为计算结果，是四位有效数字。

乘除的法则是：一个不可靠数字与另一个数字相乘或相除时，其所得结果也是不可靠的。

如：

$$\begin{array}{r} 15.6\overline{3}\ \text{cm} \\ \times\quad 4.\overline{2}\ \text{cm} \\ \hline \overline{3126} \\ 62\overline{52} \\ \hline 6\overline{5}.\overline{646}\ \text{cm}^2 \end{array}$$

按四舍五入的原则，将小数点后一位的 6 进入到小数点的前一位 5 中，其所得结果 66cm²，是两位有效数字。最后一位 6 只有一定的可靠性。

再如：$39.5\overline{2} \div 5.0\overline{3} = 7.8\overline{56}$

$$\begin{array}{r} 7.8\overline{59} \\ 5.0\overline{3}\,\big/\,\overline{39.52} \\ 35\ 21 \\ \hline 4\ \overline{310} \\ 4\ 0\overline{24} \\ \hline \overline{2860} \\ \overline{2515} \\ \hline \overline{3450} \\ 3018 \\ \hline \overline{4320} \end{array}$$

除式中第二次余数 $\overline{2860}$ 四位都是估计数字，所以商数的第三位“ 5 ”是估计数字。按四舍五入的原则，将 6 进入

5 中，计算结果为 7.86，是三位有效数字。最后一位 6 只有一定的可靠性。

从以上例子中可以看出：在和或差中，从左边起，哪一位出现了不可靠数字，有效数字就保留到哪里；在相乘或相除时，积或商的有效数字的位数一般与原来数据中有效数字位数最少的相同（有时多一位或少一位），因此，在相乘或相除时，对位数过多的有效数字应进行简化，把不必要的位数去掉，使它只比位数最少的多一位，这对于计算结果并没有影响，从而可以避免无意义的冗长计算。

应注意的是，物体的个数，实验的次数等，是准确数，它们与近似数相乘或相除时，有效数字应等于原来近似数的有效数字的位数。例如，8 个相同的小球共重 92.8g，每个小球的重量是 11.6g，商数要取三位有效数字。如果误认为 8 是一位有效数字，因此商数也取一位有效数字，那就错了。

对于无限循环或不循环小数，如π $\sqrt{2}$ 1/3等等，它们有效数字的位数是没有限制的，可以根据需要选取。在加减时，可比小数点后位数最少的有效数字多取一位小数点后的位数。乘除时，它们有效数字的位数，要比位数最少的有效数字多取一位。例如，求半径为 20.5mm 的圆周长，则在公式 $L=2\pi r$ 中的 π 取 3.142，不能取 3.14，也没有必要取 3.1416。

实验曲线作图法　物理学中的规律，反映了某些物理量间的关系。在物理实验中，还常常用图解法来整理测量的数据，把物理量间的关系，用图线直观地表示出来。具体作图时应遵循下列几个步骤：

1.确定两物理量中的自变量，一般横坐标表示自变量，纵坐标表示因变量，然后根据自变量和因变量的变化情况选取坐标纸。

2.按所测数据，在坐标轴上选取适当的比例，使坐标纸上的每一格对应于便于计算的单位数，但要注意，坐标的数值要能反映测量数据的有效数字。

作图时，除需要从零点开始外，一般情况坐标原点也可不从零开始，以充分利用图纸。

3.画曲线。根据所测的数据，在坐标纸上找出对应点（最少 5 点），然后连成光滑的曲线，一般情况，因实验误差的存在，曲线不会通过所有的测量点，但曲线两侧的点的分布应比较均匀。对个别偏离过大的点应加以分析，决定取舍。

实验实习一　游标卡尺和螺旋测微器的使用

实验目的

了解游标卡尺和螺旋测微器的构造原理，并练习使用它们来测量长度。

实验器材

1.游标卡尺；2.螺旋测微器；3.金属管一段（或硬塑料管一段）；4.长方形金属块一块；5.铁丝一段。

实验原理

1.游标的刻度及原理。游标卡尺由主尺 a 和可以沿主尺滑动的游标 b 两部分组成。主尺最小分度值为 1mm，游标上有 10 个小的等分刻度，总长为 9mm。当游标零刻度线正好对准主尺零刻度线时，游标刻度 10正好对准主尺 9mm 处。游标刻度 1 和主尺 1mm 处相差 0.1mm，游标刻度 2 和主尺 2mm 处相差 0.2mm 等等。所以当游标刻度 2和主尺 2mm 刻度正好对准时，被测物长为 0.2mm。图 1—1为游标卡尺的构造，图 1—2 为游标卡尺的刻度。

如图 1—1 所示。游标卡尺左测脚固定在主尺 a 上并与主尺垂直；右测脚与左测脚平行，固定在游标 b 上，可以随同游标一起沿主尺滑动。利用上面的一对测脚可测量槽的宽和管的内径；利用下面一对测脚可测量物体的厚度和圆柱形体的外径；利用固定在游标尺上的窄片 c 可测量槽和筒的深

需要全本请访问 www.ertongbook.com

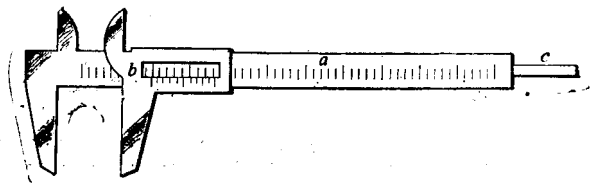


图 1—1　游标卡尺

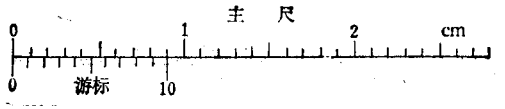


图 1—2　游标卡尺的刻度

度。一般游标卡尺最多可以测量十几个厘米的长度。

2.游标卡尺的读法。在量长度大于 1 mm 的物体时，整的厘米和毫米数由主尺上直接读出，十分之几毫米读数由游标读出。例如，图 1—3 上的读数应为 2.37cm，这种游标卡尺精确到 0.1mm。

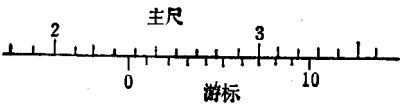


图 1—3　游标卡尺的读法

有的游标上有 20个小的等分刻度，它的每一分度比主尺的最小分度 1mm相差 0.05mm。使用时，整的毫米数由主尺上读出，再看游标的第几条刻线与主尺某一刻线重合，毫米以下的长度就是二十分之几毫米。用这种游标卡尺测长可以准确到 0.05mm。如图 1—4为 20 个等分刻度的游标卡尺，从图上看到游标的第九条刻度线与主尺的某一刻度线对

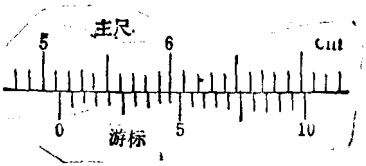


图 1—4

齐,主尺上的读数为 5.1cm；游标上的读数为 1/20×9mm，即为 0.45mm，因此整个读数为 5.145cm。

3.螺旋测微器的原理及读法。螺旋测微器的螺距很短，一般等于 0.5mm，而螺旋圆周很长，一般等于 50mm。把周长分为 50 等分,每一等分为一格(1mm)，在周长每转动一格，螺旋沿轴线移动 0.01mm；沿周长转动一周 (50格)，螺旋沿轴线移动 0.5mm。因此，大于0.5mm 读数由固定刻度尺上直接读出，小于 0.5mm 部分由可转动的螺旋刻度读出。图 1—5 是螺旋测微器的构造。它的小砧 A 和固定刻度

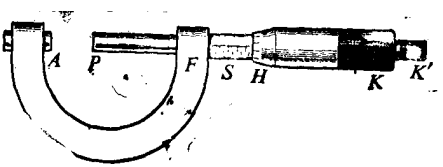


图 1—5 螺旋测微器

S固定在框架F上。旋钮K、微调旋钮 K' 和可动刻度H与可动小砧 P 连在一起，通过精密螺纹套在 S 上。在读数的时候，要注意固定刻度尺上半毫米的刻线是否已经露出。例如图 1—6所示的读数是 6.727mm，最后一位为估计数字。它可以准确到 0.01mm,估计到 0.001mm。螺旋测微器最

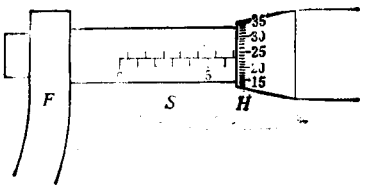


图1—6　螺旋测微器的读法

多可测到几个厘米的长度。

4.游标卡尺和螺旋测微器的零误差。游标卡尺在不测量物长而使两测脚并拢时，游标的零刻度线可能不与主尺零刻度线重合，此时游标卡尺的读数叫零误差。

当两测脚并拢，卡尺读数比零多 0.1mm 时，零误差为 −0.1mm 。每次量物体长时，所量的读数都要减 0.1mm，才是实际的物长。当两脚并拢，读数比零少 0.2mm时，零误差为＋ 0.2mm，每次量物长都要加 0.2mm。

螺旋测微器也有零误差。因此，在每次使用前要先让小砧 A 和 P合拢，找出零误差，用来修正以后测出的数据。

应该注意的是，螺旋测微器是一种精密的量具，在使用时，当小砧P快靠近被测物体时，应停止使用旋钮 K，改用微调旋钮K'。这样就不会在小砧 P 和被测物体间产生过大的压力，既可以使测量结果精确，又可以保护螺旋测微器。

实验步骤

1.仔细观察游标卡尺及螺旋测微器的构造及刻度。

2.让游标卡尺的两个测脚并拢，螺旋测微器的两个小砧并拢，记下零误差（注意正负）。

3.用卡尺的两个测脚测长方体金属块的长、宽、厚，各

测两次，填入记录表Ⅰ。用长、宽、厚的平均值算出长方体的体积（注意有效数字）。

4.用卡尺的两个下测脚测圆管外径和管长，上测脚测金属管的内径，各测两次，方位相互垂直，填入记录表Ⅱ，算出圆管体积（注意有效数字）。

5.分别用游标卡尺和螺旋测微器测同一金属丝直径，各测两次，方位相互垂直，填入记录表Ⅲ，并分别求出在这步测量中卡尺和螺旋测微器的准确度 ϕ 各是多少。

6.每次读数必须加减零误差。

实验记录

表Ⅰ　测长方体金属块的体积

次数 \ 被测物	长（m）	宽（m）	厚（m）
1			
2			
平　均			

算出体积 $V=$ _____ m^3。

表Ⅱ　测金属圆管的体积

次数 \ 被测物	金属管长度 L（m）	金属管外径 D（m）	金属管内径 d（m）
1			
2			
平　均			

算出体积 $V=\pi\cdot L\left[\left(\frac{D}{2}\right)^2-\left(\frac{d}{2}\right)^2\right]$

$=$ _____ m^3。

表Ⅲ　测出金属丝的直径（m）

测量工具 \ 测量次数	1	2	平　均
游标卡尺			
螺旋测微器			

游标卡尺的准确度ϕ_1 = _____%，

螺旋测微器的准确度ϕ_2 = _____%。

讨论题

1.在测量金属丝直径时，游标卡尺和螺旋测微器测出数值的有效数字各是多少位？这说明什么问题？

2.用游标卡尺测长方体体积时，最后得出的体积数有效数字取几位？为什么？

3.如果有一种游标卡尺，游标上有 50个小等分刻度，对应主尺 49mm（49个小格），它的每一分度比主尺的最小分度 1mm 相差 0.02mm，你能说明这种游标卡尺的使用方法吗？用它测长度可以准确到哪一位数字？

实验实习二　验证平行四边形法则

实验目的　验证两个互成角度的力合成时的平行四边形法则。

实验器材

1.木板一块；2.测力计两个；3.细绳；4.橡皮条一段；5.白纸；6.铅笔；7.尺；8.图钉；9.量角器。

实验原理

作用于一点而互成角度的两个力，它们的合力的大小和方向，可以用表示这两个力的线段为邻边所画出的平行四边形的对角线来表示。

实验步骤

1.如图2—1所示，先把纸钉在板上，再把橡皮条的一端钉在木板上A点。

2.用两条细绳拴结在另一端上，细绳的另一端各有一个套环。用两个测力计通过细绳互成角度拉紧橡皮条，使橡皮条伸长到某一位置

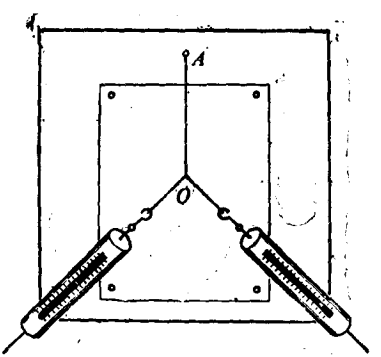


图　2—1

需要全本请访问 www.ertongbook.com