绪　论

一、物理实验的目的和任务

认识来源于实践，又要得到实践的检验。实验作为一种重要的实践形式，在科学研究和生产活动中都有着十分重要的作用。大学物理实验作为一门独立的实验教学课程，既是物理理论的实践，也是其他实验课程的基础。物理实验不只是理论的简单应用或机械重复，它有自身的规律和特点。物理实验课的基本教学内容，如对实验数据的处理和分析、物理测试方法、仪器的使用方法等，是物理理论课所无法替代的。因而，物理实验的主要目的和任务为：

(1)理论联系实际，培养学生观察、分析物理现象的能力，加深对物理概念、规律和理论的理解。

(2)掌握基本的实验方法和实验技能，掌握基本实验仪器的构造、原理以及使用方法。正确记录、分析和处理实验数据。

(3)培养学生严谨自律、一丝不苟的工作作风和实事求是的科学态度。

二、物理实验的基本要求

物理实验教学应坚持以学生为主体的原则，学生应积极主动地参与实验，教师只作适当的指导。物理实验内容广泛，且与理论课并不同步。因此，有必要加强实验前的预习准备和实验后的归纳总结。一般情况下，物理实验课都要经历“预习、实验和写实验报告”三个基本程序。

1.预习

学生在实验课之前必须进行预习，必须写出书面预习报告。预习以理解原理为主，初步了解实验内容和过程。查证相应的公式，补足相关的理论知识。同时，根据实验要求画好数据表格，以便完整、准确地记录测量数据。

2.实验

实验操作前，首先听教师介绍基本原理、仪器使用方法及注意事项。然后按实验要求布置、安装并按操作规程调整好仪器。电学实验必须经教师检查线路后，方可接通电源。

实验过程应按实验步骤进行。测量的数据要立即记录下来，注意数据的有效数字。实事求是，不随意涂改数据。发现错误，应查找原因并重新测量。

3.实验报告

实验报告是对实验的全面总结，应以简明扼要的语句和表达方式来真实完整地撰写。可以在预习报告的基础上，进一步完成实验的数据处理、结果分析以及作图等。实验报告写在统一印制的实验报告纸上。

完整的实验报告应包括以下内容：①实验者的班级、姓名、学号；②实验名称；③实验目的；④简要原理和计算公式；⑤仪器设备型号、编号；⑥测得的数据；⑦计算、作图；⑧误差分析；⑨实验结果；⑩问题讨论。

第一章　测量误差与数据处理

第一节　基本概念

1. 测量

物理实验往往需要寻找或者验证各种物理量之间的相互关系。运用量具、仪器、仪表以及相应的方法，确定某一物理量的数值的过程，称为测量。

用米尺确定长度，用天平确定质量，用电压表、电流表结合欧姆定律确定电阻等等，都是物理测量。测量的实质，就是将某一物理量与作为计量标准的物理量进行比较的过程。

如果可直接从量具、仪表上读出待测量的值，称之为直接测量。如果待测量需由若干个直接测量的物理量通过一定函数运算才能得出，则称为间接测量。

在物理实验中，对长度、质量、时间、电压、电流、温度的测量，一般为直接测量。它们大多为SI制中的基本物理量。非基本物理量一般为间接测量。

2. 误差

物理量的客观存在值称为真值。误差是测量值与真值之差。用 x 表示测量值，Δx 表示误差，μ 表示真值，则

$$\Delta x = x - \mu \tag{1-1}$$

误差的绝对值越小，测量值就越好。但对不同的测量对象，误差相同，测量结果的优劣却不一定相同。例如，分别测量一个长方形的长和宽，若以米尺测量，误差都是 0.5(mm)，那么前者的结果比后者要好。用相对误差可以克服这一缺陷。用 E 表示相对误差，其定义为

$$E = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \tag{1-2}$$

3. 不确定度

事实上，由于测量仪器的精度限制、环境变化以及测量者主观因素的影响，测量值总是与真值不完全相等，因而误差总是存在的。另一方面，即使某一测量值恰好等于真值，我们也无法确认（因为这需要首先知道真值！）。为了表示“对真值认识缺乏的程度”，国际计量委员会（CIPM）决定引入“不确定度(Uncertainty)”概念。它是对测量的真值在某个量值范围的一个客观评定。

不确定度通常含有两类分量：用统计学方法计算的 A 类分量 u_A；用其他方法评定的 B 类分量 u_B。它们用“方和根法”合成

$$U = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \tag{1-3}$$

第二节　误差的确定

在各种不同的测量中，误差可能来源于测量仪器或测量方法，更普遍地来源于包括环境变化、测量者主观因素等在内的随机因素。

我们把在同一条件下多次测量同一物理量时，大小和符号保持恒定，或按规律变化的误差称为系统误差。对不同的实验，系统误差产生的具体原因也不相同。例如，伏安法测电阻，就存在由于测量方法而产生的系统误差。认真调整好仪器，改进实验方法，客观上可以减少系统误差。分析和查找系统误差产生的原因，发现减少系统误差的途径，也是物理实验的一个重要任务。系统误差可以进行修正。

在相同条件下多次测量同一量时，误差时大时小、时正时负、无确定规律，这类误差称为随机误差。随机误差普遍存在于测量之中，是不可消除的。本书重点讨论随机误差。

1.单次测量的随机误差

①取测量仪器标示的仪器误差。

②取仪器最小刻度的一半。

③根据具体情况，合理估算。

2.多次测量的随机误差

一次测量的结果并不可靠，物理实验中，往往需要在同一条件下进行多次测量。

设在相同条件下对某物理量 x 进行 n 次测量，每次测量值分别为 x_1、x_2、$x_3\cdots x_n$，则测量值的算术平均值为

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \qquad (1-4)$$

根据误差理论，在一组 n 次测量的数据中，算术平均值 $\bar{x}$ 最有把握接近于真值，称为近真值。容易证明，当 $n\to\infty$，$\bar{x}\to\mu$。

多次测量的随机误差虽然无“规律”，但它却表现出一定的统计规律，可以利用统计学原理来分析计算。数学家高斯最初研究了多种因素微小起伏引起的随机误差的概率分布，并于1795年发表了高斯分布函数，即正态分布函数。

高斯的研究基于下列事实：

(1) 小的误差比大的误差出现机会多，故随机误差在零附近有最大的概率——单峰性。

(2) 大小相等、符号相反的正负误差出现的概率相等——对称性。

(3)十分大的误差出现的概率非常小，在一定的误差限以外，可认为出现十分大的误差的概率接近于零——有界性。

为了讨论的方便，令 $\theta=\Delta x$，则误差出现在 θ 到 $\theta+\mathrm{d}\theta$ 区间上的概率 p 与 $\mathrm{d}\theta$ 成正比：

$$p(\theta)=f(\theta)\mathrm{d}\theta \qquad (1-5)$$

式中 $f(\theta)$ 是单位误差的概率，称为概率密度，显然满足

$$\int_{-\infty}^{\infty}f(\theta)\mathrm{d}\theta=1 \qquad (1-6)$$

高斯证明，函数 $f(\theta)$ 具有以下形式

$$f(\theta)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\mathrm{e}^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}} \qquad (1-7)$$

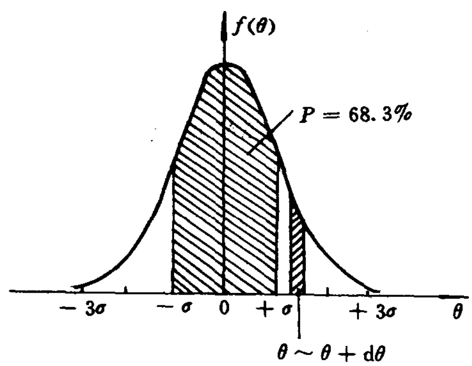

图 1—1　正态分布函数

$f(\theta)$就是正态分布函数，如图 1—1所示。曲线下 $\theta\sim\theta+\mathrm{d}\theta$ 区间的面积，就是相应区间误差发生的概率。整个曲线下所围的面积为 1。$\pm\sigma$ 是曲线的两个拐点坐标，当误差数值范围为

$\pm\sigma$时，曲线下的面积为 0.683，这表明误差出现在该区间的概率为 68.3%。此外，误差绝对值大于 3σ 的概率仅为 0.3%，故 3σ 亦称为"极限误差"。

σ 是误差正态分布函数的一个重要参数，对曲线的形状影响很大。σ 越小，曲线峰值越高，图形越尖锐，这表明测量数据集中，重复性好。

当测量次数 n 为有限次时，σ 由下式计算，

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{1-8}$$

n 不能少于 5 次，否则失去意义。

σ 是国家评定标准，故亦称为"标准误差"，在物理实验中，也采用标准误差来表示随机误差。

值得说明的是，正态分布不是误差的惟一分布，在实际工作中具体问题要具体分析，才能得到符合客观实际的结果。

3.误差的传递

在大学物理实验中，一般都是间接测量。设 N 是间接测量值，A、B、$C\cdots$ 是互不相关的直接测量值，它们有函数关系

$$N=f(A,B,C\cdots) \tag{1-9}$$

则

$$\mathrm{d}N=\frac{\partial f}{\partial A}\mathrm{d}A+\frac{\partial f}{\partial B}\mathrm{d}B+\frac{\partial f}{\partial C}\mathrm{d}C+\cdots \tag{1-10}$$

考虑到通常误差远小于测量值，可把 $\mathrm{d}N$、$\mathrm{d}A$ 等看作误差，即

$$\Delta N=\frac{\partial f}{\partial A}\Delta A+\frac{\partial f}{\partial B}\Delta B+\frac{\partial f}{\partial C}\Delta C+\cdots \tag{1-11}$$

这就是误差传递公式。

上式两边平方，并假设测了 n 次，可得

$$\begin{aligned}(\Delta N_i)^2=&\left(\frac{\partial f}{\partial A_i}\right)^2(\Delta A_i)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial B_i}\right)^2(\Delta B_i)^2+\cdots\\&+2\left(\frac{\partial f}{\partial A_i}\right)\left(\frac{\partial f}{\partial B_i}\right)(\Delta A_i)(\Delta B_i)+\cdots\\&(i=1,2,3\cdots n).\end{aligned} \tag{1-12}$$

若把各次测量相加，并考虑到正、负误差出现的概率相同，相加后交叉相乘项相互抵消，并把等式两边除以 $n-1$，得

$$\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta N_i)^2}{n-1}=\left(\frac{\partial f}{\partial A}\right)^2\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta A_i)^2}{n-1}+\left(\frac{\partial f}{\partial B}\right)^2\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta B_i)^2}{n-1}+\cdots \tag{1-13}$$

即

$$\sigma^2=\left(\frac{\partial f}{\partial A}\right)^2\sigma_{\mathrm{A}}^2+\left(\frac{\partial f}{\partial B}\right)^2\sigma_{\mathrm{B}}^2+\cdots \tag{1-14}$$

故

$$\sigma=\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial A}\right)^2\sigma_{\mathrm{A}}^2+\left(\frac{\partial f}{\partial B}\right)^2\sigma_{\mathrm{B}}^2+\cdots} \tag{1-15}$$

上式即标准误差的传递公式。

第三节　测量值与有效数字

1. 有效数字

用直尺测一本书的长度，读数为 18.54(cm)，其中前三位数"18.5"是从尺上刻度数直接读出的，称为可靠数字，而最后一位"0.04"是从尺上两刻度之间估计的，称为可疑数字。可靠数字与可疑数字合称为有效数字。18.54(cm) 是四位有效数字。

测量值一般只能取一位可疑数字，据此，误差一般也只能取一位有效数字。在测量时，每次的读数应满足上述要求。

要取得正确的测量值，除必须正确记录数据、单位外，还必须注意有效数字。

2. 有效数字运算规则

(1)和差运算。和差运算结果的小数点后数字的个数，应与参加运算各数中小数点后位数最少者相同。

例 1　$123.012\bar{5}+0.\bar{6}+1.3\bar{2}=124.\bar{9}$

$$\begin{array}{rr} & 123.012\bar{5} \\ & 0.\bar{6} \\ +) & 1.3\bar{2} \\ \hline & 124.\bar{9}\bar{3}\bar{2}\bar{5} \end{array}$$

式中，用加上横线的数字代表可疑数字，下同。

(2) 积商运算。积商运算结果的有效数字位数，应与参加运算各数中有效数字位数最少者相同。

例 2　$\bar{3}\times 248\bar{9}=\bar{7}\times 10^3$

$$\begin{array}{rr} & 248\bar{9} \\ \times) & \bar{3} \\ \hline & \bar{7}\bar{4}\bar{6}\bar{7} \end{array}$$

(3)乘方与开方。其结果的有效数字应与其底的有效数字相同。

(4) 三角函数。三角函数的有效数字位数由角度的有效数字而定。物理实验中，角度多由分光计测出，其精度为 $1'$。$\sin 1'=0.0003$，故一般取四位有效数字。

例 3　$\sin 9°31'=0.1650476=0.1650$

$\sin 19°2'=0.3261181=0.3261$

有效数字运算结果，我们规定用四舍五入约整。运算中的各种物理常数、无理数、公认值，其有效数字位数应比运算结果所应取的有效数字至少多保留一位。

例 4　$27.13/(\pi\times 0.561^2\times 10.085)$

$=27.13/(3.142\times 0.561^2\times 10.085)$

$=27.13/9.97$

$=2.72$

$0.0048246\div 0.0000123=3.92\times 10^2$

第四节　测量数据的正确处理及结果表示

每完成一次实验，学生必须写出实验报告。对测量的数据进行分析处理，归纳总结，得出相应的实验结果。实验数据可以用三种形式表达。

1.代数表示

实验中测量的原始数据经过整理，去除坏值，便可进行处理。为简单起见，设测量为直接测量，共测 n 次，得 x_1、x_2、$x_3\cdots x_n$。则可先求平均值 $\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$,然后计算标准误差

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}},$$

再计算相对误差

$$E=\frac{\sigma}{\bar{x}}\times 100\% \qquad (1-16)$$

测量结果的正确表示为

$$\begin{cases} x=\bar{x}\pm\sigma \\ E=\frac{\sigma}{\bar{x}}\times 100\% \end{cases} \qquad (1-17)$$

在上式中，σ一般取一位有效数字，$\bar{x}$ 的末位与 σ 的有效位同位。E 一般也只取一位有效数字。建议使用计算器统计功能直接计算 σ、$\bar{x}$，但最后结果的有效数字必须正确取舍。

2.列表表示

列表的优点是简单易行，数据易于参考比较，形式紧凑齐整有序，同一表格内可以同时表示几个变量间的变化关系。

列表时要注意：

(1)表格的设计要利于记录和检查。

(2)表格的每行（或列）的第一格应标明物理量的符号、单位，表格中的数据单位要与标明的单位一致（这是同学们易犯错误之处）。

(3) 表格中的测量值应按有效数字填写清楚，不可随意增减位数。

3.作图法

作图法是在坐标纸上，根据实验数据描点，再依据这些点作出光滑曲线，用图形来形象地揭示待测量之间的函数关系的方法。

作图法是一种非常重要的数据处理方法，特别是在还没有完全掌握科学实验的规律和函数形式时，可以总结规律；利用外推法和内插法预测无测量点处的情况和变化趋势；还可从图中得到许多有用的参数，如极值、斜率和截距等。

. 作图的步骤：

(1)选择图纸。一般用直角坐标纸。

(2)坐标轴与坐标的分度。应根据测量值的范围来合理选择坐标分度。横轴代表自变量，纵轴代表因变量，不可颠倒。坐标原点不一定是 0 值，要使图形的规律较好地反映出来。分度值的有效数字应与数据一致。

(3) 描点。在已分度的坐标纸上，以对应于数据的点为中心，用“ × ”等作出标记。

(4)连线。将各点连成曲线时，不一定要通过每一个点，只要求各点能均匀分布在曲线两侧附近，并使一侧各点到曲线的距离之和，约等于另一侧各点到曲线的距离之和。曲线应光滑。外延线、辅助线应用虚线描出。

(5)标图名。必要时，还可作少量注解和说明。

例 5 图 1－2 是根据表 1－1 的数据绘制的，它是铝圆柱体散热时在其稳恒温度 ±1.5(℃) 范围内温度 T 随时间变化的曲线。具体实验内容参见实验十一。

表 1－1

时间间隔 Δt(分)	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0
温度 T(℃)	28.75	28.20	27.95	27.65	27.20	26.95	26.60	26.40	26.15	25.90	25.70	25.50	25.45	25.25

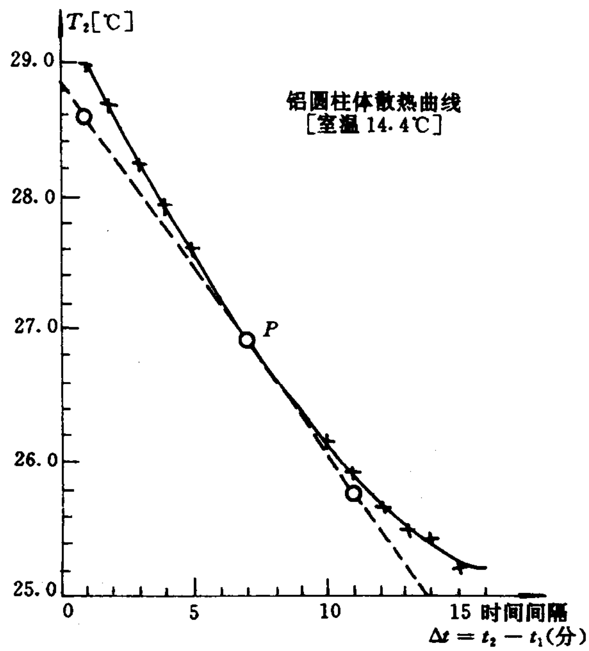

图 1－2 铝圆柱体散热曲线

第五节 实验数据的计算机处理

我们已经讨论了实验数据的最佳值和误差的估计。一切科学实验的目的，是为了找出事物的内在规律，或检验某种理论的正确性，或作为后续研究或实际工作的依据。对实验测量所搜集的大量数据资料进行正确的处理，是科学研究工作中十分关键的环节。恰当的实验数据处理，能明确地揭示隐含在复杂实验数据中的内在规律，为进一步的理论研究和实验探索提供依据。最为形象有效的方法，是将实验数据按某些特定要求制成图表，从而将规律图形化。以往

对数据进行图形处理时，往往使用坐标纸、尺、笔等绘图工具，工作量大，效率低，精度不高。现代计算机技术的突飞猛进，为我们今天的数据处理，提供了新的强有力的手段。在本节内容中为大家介绍一种在实验研究工作中广泛使用的数据软件 Origin。使用该软件，不但可快捷地绘制实验数据曲线，而且可对实验数据进行各种数学处理和函数拟合分析。该软件为迅速揭示数据所表达的内在规律，检验理论的正确性或探索新的规律提供了强有力的高效工具。

由于该软件工具的功能十分强大，全面的介绍将导致篇幅过大。此处仅就最常用的功能作一初步介绍。其他功能的使用，相信同学们能通过数据处理实践和阅读该软件的在线帮助文件，举一反三，融汇贯通。

一、程序的启动与数据输入

在 Windows 下，点击 Origin 的图标，即可进入该软件的工作表区。该区主要是进行数据输入和对数据进行数学处理。工作表区由行和列构成。一组数据，一般以行为序，放在同一列中。以不同的列放置不同的物理量。开机状态下工作表区只有二列空白表单元。在屏幕顶端点击“Column”子菜单，选择“Add new Columns”可增加工作表中的空白数据列数。表 1－2 是输入数据后的工作表区。

表 1－2　工作表区结构

	$A(X)$	$B(Y)$	$C(Y)$
1	25	709.1	2.92
2	30	701.6	3.38
3	40	686.8	4.239
4	50	671	5.2
5	60	655.6	6.12
6	70	641	6.976
7	80	625.2	7.894
8	90	609.8	8.792
9	100	594.4	9.7

在一个工作表区，只可同时有一个代表 X 轴量的列，可有多个 Y 列。也可同时有多个 X 轴列，但只能有一个 Y 列，这需预先设置。但可随时将任一列设为 X 轴或 Y 轴。（这时原来的 X 列则变为 Y 列）。数据的输入有两种方式：以手工逐个输入或以 ASCII 文件形式自动输入。前者是将光标移到相应空白工作表单元上，从键盘逐个敲人数据，按回车键认可后转入下一单元，直至输入完毕。而以文件形式自动输入，则需要有预先形成的 ASCII 格式的数据文件。该文件既可是由计算机自动采集得到的 .dat 文件也可是手工编辑的 .dat 文件。这时，只要在 FILE 菜单下选择“Import”条目，再在该菜单下选择 ASCII 文件，并依提示输入路径和文件名，即可将 ASCII 格式数据文件自动装入工作表区中供进一步处理。

二、数据图形的绘制

数据输入完毕后，如欲对某列数据进行数学处理，可先点击该列名称使整列变黑后，再在屏幕顶端点击“Column”子菜单，选择“Set Column Value”并输入数学公式，即可将该列数据经你定义的数学式转换成新的量值。在工作表区点击“Plot”子菜单，将为你提供多达 20 余种绘图形式的选择。进入你选择的绘图模式后，你可自由选择任一列为 X 轴变量，另一列为 Y 轴函数。选定后点击 OK 键即可在一瞬间完成绘图。双击 X 或 Y 轴，可设置 X、Y 轴的名称和显示范围，得到你感兴趣的局部范围的细节。你可选择任意两列为 XY 轴，绘出二者关系曲线。注

意两列数据个数须相等。在 Template(模板)中,还可选择双 Y 轴，将两不同量级但有相同 X 范围的两列数据图形，同时绘制在二维图中。图 1—3a 为 Scatter 模式下获得的图，图 1—3b 为 Line 模式下获得的图，图 1—3c 为 Line+Symbol 模式下获得的图。图 1—4 为双 Y 轴绘出的图。

三、数据与曲线的拟合

当获得一组实验测量数据并绘出曲线后，对其进行分析拟合并得到定量规律，是数据分析的一个重要任务。Origin 为此提供了强大的工具。对于一个绘制好的曲线，我们可在“ Analysis ”子菜单下，选择多达近二十种不同的常用函数对数据进行分析拟合，你可对待拟合的函数进行限制如线性拟合，多项式拟合，指数增长，指数衰减，FTT 变换，Lorentz 分布，Gauss 分布等等，还可自定义函数，选择好欲拟合的函数和变量阶数等参量后，点击 OK，即可立即得到拟合的结果。结果不但给出定量的函数关系，亦给出拟合方差。这对于验证理论公式，寻找实验规律，物理参量校正等十分有用。图 1—5 中实心圆点是实验测得的热敏电阻在不同温度下的阻值。图中空心圆点加曲线为以温度的一阶负指数衰减拟合得到的曲线。图 1—6 中的实心圆点是实验测得的石英晶体振荡器在不同温度下的输出频率值。光滑的连续曲线是以温度的三阶多项式拟合得到的曲线。

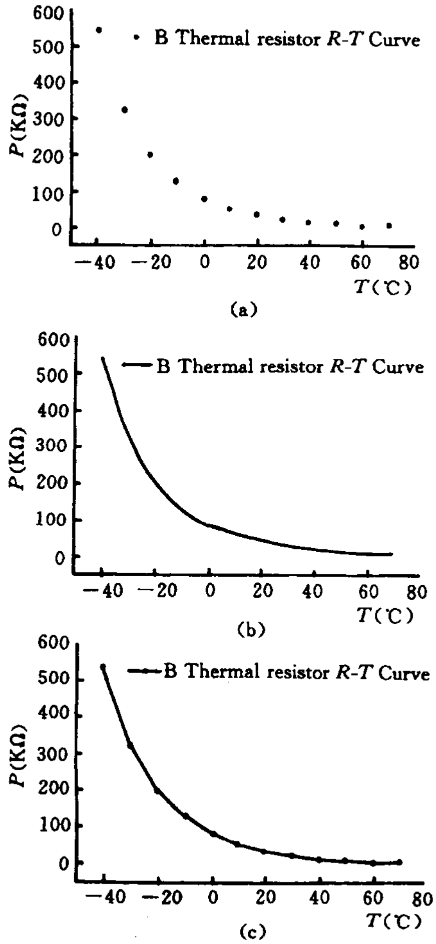

图 1—3

四、数据处理结果和绘制图形的输出

绘制完成并经拟合或其他数据处理的图形文件，可在“ FILE ”子菜单下选择“ Save 条目，依提示输入保存文件的路径和文件名，回车后即将结果保存到你指定的路径中。亦可在“ FILE ”子菜单下选择“ Print ”条目，直接将图形打印出来。图形亦可在“ Edit ”子菜单下选择“Page Copy”将其拷贝到粘贴板上，直接将其插入到 Word 等字处理软件形成的 .doc 或 .txt 文件中，形成图文混排文件。此处的文稿，就是在 Word 中直接插入 Origin 图后形成的。

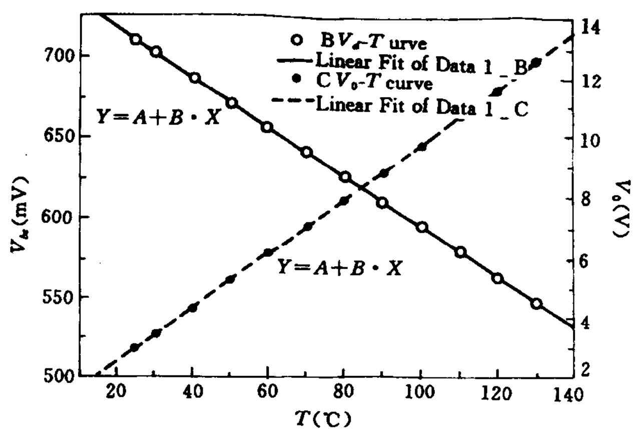

图 1—4　用双 Y 坐标绘出的二极管结电压随温度变化曲线及该电压经过反向放大器放大后输出电压与温度的关系

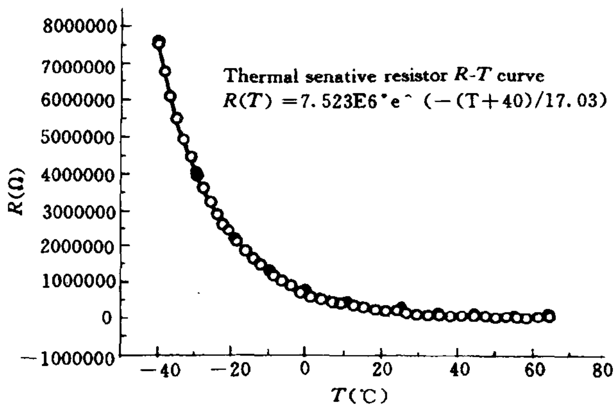

图 1—5 热敏电阻随温度的变化曲线经一阶负指数拟合后得到的电阻随温度变化的定量关系

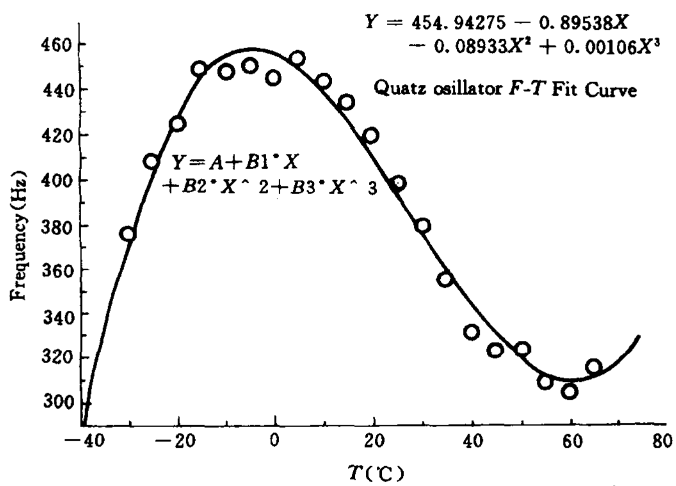

图 1—6

[思考题]

1.指出下列各数据的有效数字位数，并作单位换算。

4.0(cm)=________ (m)=________(mm) (____位)

0.5050(cm)=________ (m)=________(mm) (____位)

6.0×10⁻³(cm)=________(m)=________(mm) (____位)

0.8080(cm)=________ (m)=________(mm) (____位)

2.用米尺测量一物体的长度 L,测量 10次所得的数值依次为 98.98,98.94,98.96,98.97,99.00,98.95,98.97,98.95,99.00,98.93 ,单位是 cm。试求其平均值 $\bar{L}$,标准误差 σ，相对误差 E，并写出测量结果的数学表达式

$$\begin{cases} L = \bar{L} \pm \sigma \\ E = \dfrac{\sigma}{\bar{L}} \times 100\% \end{cases}$$

3.有人认为 8×10^{-5}(g)比 8.0(g)测得准。这种说法为什么不对？

4.按有效数字运算规则计算：

(1)$10.1+4.178=$

(2)$32.4\times\sqrt{2}=$

(3)$98.754+1.3=$

(4)$\sin 15°23'=$

(5)$\pi\times(0.100)^2=$

(6)$76.000/(40.001-2.0)=$

(7)$237.5\div 0.10=$

(8)$\frac{100.0\times(5.6+4.412)}{(78.01-77.0)\times 10.000}+110.0=$

5. 根据误差理论和有效数字运算规则，改正以下错误：

(1)$h=(3.070\pm 0.5)(\mathrm{cm})$

(2)$28(\mathrm{cm})=280(\mathrm{mm})$

(3)$m=(270.00\pm 0.50)(\mathrm{g})$

(4)$(400\times 1500)/(12.61-11.6)=600000$

6. 有一正立方体，用米尺测量某一棱边的长共 10 次，数据如下（单位：cm）：

2.01， 2.00， 2.04， 1.98， 1.97，

2.02， 2.03， 2.04， 2.00， 1.99，

求此立方体体积的测量结果。注意误差传递。

7. 测得一弹簧的长度 l 和所加负载 m 的数据为：

m(g)	0.0	3.0	6.0	9.0	12.0	15.0	18.0	21.0	24.0	27.0
l(cm)	16.50	18.55	20.60	22.95	25.15	27.20	29.40	31.50	33.85	35.80

试用作图法求出弹簧的倔强系数 K。

[提示：$mg=K(l-l_0)$，l_0 是弹簧原长。]

8. 将表 1－2 中的数据输入到 Origin 的工作表区中，绘出以 $A(x)$ 为横轴，$B(y)$和 $C(y)$为纵轴的曲线及双 Y 坐标曲线图，并对上述曲线进行线性拟合，求出各曲线的斜率及方差。

第二章　预备引导实验

实验一　长度和密度的测量

[目的]

(1)学习游标测量原理，掌握游标卡尺的使用方法；学习螺旋测微原理，掌握螺旋测微计的使用方法；学会物理天平的使用方法。

(2) 掌握测量规则物体密度的一种方法。

(3)通过实验，要求掌握科学的读数、记数、直接测量和间接测量的数据处理方法。

[原理]

1. 长度测量原理

长度测量是最基本的测量之一。一般来说，长度测量是直接测量，即用一个经过标定的米尺、卡尺或千分尺等与一个未知的长度量去进行直接比较便可得知其测量结果，因此长度测量亦是最为简单直观的测量。下面介绍游标卡尺及螺旋测微计的原理和使用方法。

(1)游标卡尺的测量原理。游标卡尺的外形结构如图 1 所示，它由主尺及套在主尺上的滑

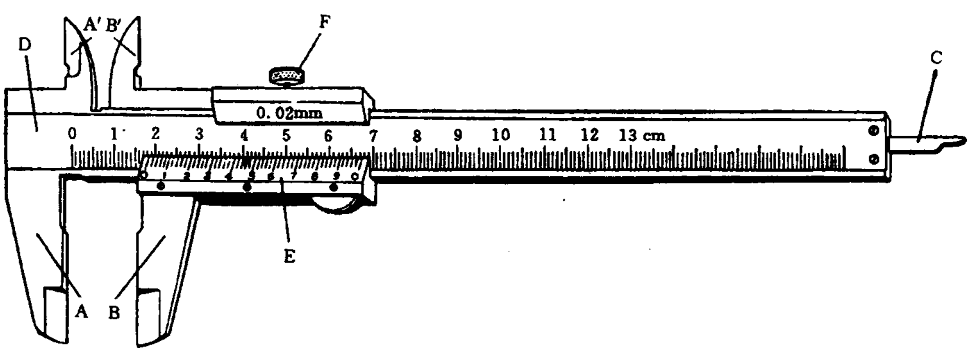

图 1　一种常用的游标卡尺外形结构图

框——副尺所构成。主尺 D 是一根钢制的毫米分度尺；副尺是一个钢制的滑框及一细长尾尺，滑框上刻有游标。主尺头上有钳口 A 和刀口 A′。副尺上有钳口 B 及刀口 B′，另有尾尺 C。当钳口 A 与 B 合拢时，刀口 A′ 与 B′ 亦应合拢，且尾尺 C 应与主尺尾部齐平，此时游标的零线刚好与主尺上的零线对齐，读数即正好为零，如要测量物体，须滑开副尺；通过钳口 A 与 B 可测物体的外部尺寸，通过用刀口 A′ 与 B′ 可测物体的内径或内距，用尾尺 C 可测物体的内深度。测量时，须注意各钳口、刀口或尾尺须保持与物体紧密接触。

为了研究游标卡尺的原理及读数方法，我们设游标刻度 E 共有 n 个分格，游标总长度为 L，游标上每一分格的长度为 b；主尺上每一分格的长为 a。游标卡尺的制造要求是：使游标总长 $L=nb$ 与主尺的 $(rn-1)a$ 相等，即

$$L = nb = (rn-1)a \tag{1}$$

其中 r 是任意正整数，称为游标卡尺的模数。当一把游标卡尺做好后，r 便确定了，如图 2 所示，这把卡尺的模数 r 为 1。从图上可以看出，游标共有分格 n 为 50 格，游标总长为 49(mm)，主尺分度 a 为 1(mm)，显然，上面数据满足公式(1)。在研究游标原理时，还有一重要参数 i，该参数定义是用主尺的分度 a 去除以游标的分格数 n，即 $i=\frac{a}{n}$，我们将之称为游标精度。那么如何进行读数呢？前面已述当游标卡尺闭合时，游标零线与主尺零线对齐。因此在测量时，待测长度的值实际上便是主尺的零线至已滑开的游标零线之间的距离，如图 3 所示，该距离 l 应等于 y 及 Δx 之和。y 值可由主尺直接读出，为 21(mm)，Δx 由游标来确定，设游标上第 k 条刻线与主尺上某一刻度线对齐，则 $\Delta x = kra - kb = ki$，图 3 中，$\Delta x = ki = 24\times\frac{1}{50}(\text{mm}) = 24\times 0.02(\text{mm}) = 0.48(\text{mm})$，所以待测物体的长度值 l 为

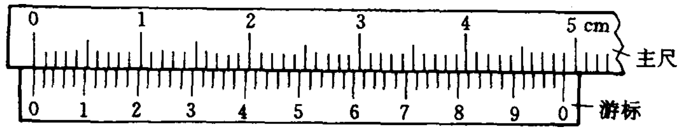

图 2　游标卡尺闭合时的图示

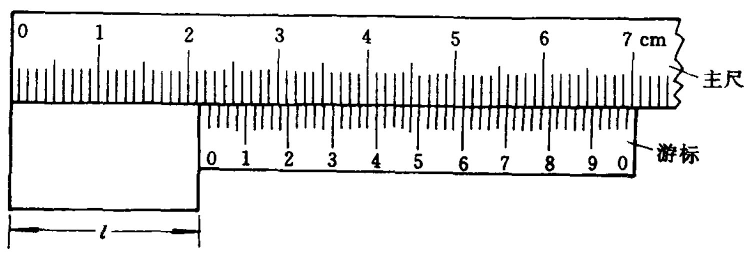

图 3　游标卡尺的读数

$$l = y + \Delta x = 21 + 0.48(\text{mm}) = 21.48(\text{mm})$$

游标卡尺是常用的一种精密量具，使用时应注意维护。推拉游标时不要用力过猛，并注意保护钳口、刀口及尾尺。

(2)螺旋测微计的测量原理。螺旋测微计是一种常见的精密量具，测量时可估读到千分之一毫米，故又称千分尺。

螺旋测微计的结构如图 4 所示，主要部分是测微螺旋，它由一根精密的测微螺杆（5）和固定的螺母套管（7）(螺距为 0.5(mm))组成。测微螺杆的后端与一个有 50 分格的微分筒（8）相连。当微分筒相对于螺母套管转过一圈时，测微螺杆就会在螺母套管内沿轴线方向前移或后移 0.5(mm)。显然，当微分筒转动一个分格，则测微螺杆就会相应移动 $\frac{1}{50}\times 0.5 = 0.01$

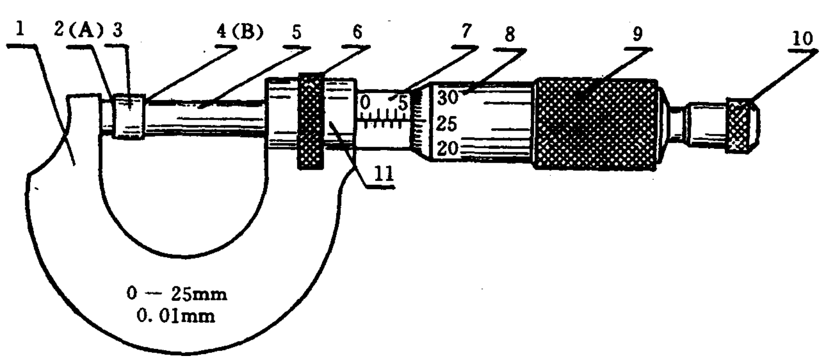

图 4　螺旋测微计

(mm)。由此可见，由微分筒转动的刻度就可以准确地读出测微螺杆沿轴线移过的微小长度。为了读出测微螺杆移过的毫米和半毫米值，在固定套管上刻有“毫米”、“半毫米”和“准线”等刻线。

用千分尺进行测量时，应先将测微螺杆退开，把待测物体（3)放在测微螺杆和测砧 A、B 之间，转动手柄(9),当 A、B 面与待测物体快要接触时改为轻轻转动测力装置（10),当听到有“咔、咔”声就表示 A、B 与待测物体已接触。此时在固定套管上和微分筒锥面上进行读数即可。

但待测物体的实际长度——真值或近真值可能并不与上述读数值一致。因为当没有待测物体时，将 A、B 面贴近，同样转测力装置直至听到“咔、咔”声时，此时微分筒上的零线应与固定套管上的“准线”对齐，也就是说，此时读数应为 0.000(mm)。但大多数情况下微分筒上的零线与套管上的“准线”未对齐，也就是说它有一个初始值，此时应将该初始值读出，而待测物体的近真值应为测得值与初始值的差，而该初始值则通常把它定义为更正值。所以：

近真值＝测得值一初始值（或更正值）

图 5 是当 A、B 面已接触，无待测物体时，图 5b 初始值为零；图 5a 的初始值为＋0.012(mm)；图 5c 的初始值为－0.010(mm)，如果初始值太大，则应松开手柄（9),先使 A、B 面接触，再使微分筒与准线对齐，然后拧紧手柄即可。

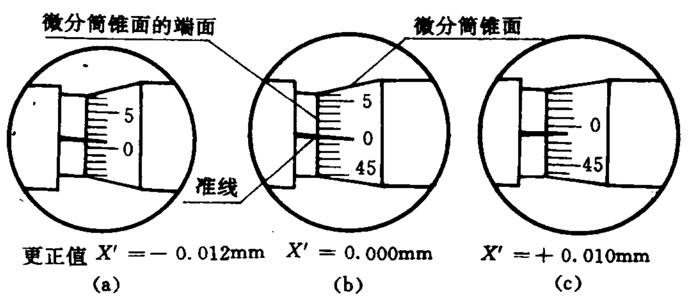

图 5　更正值或初始值示例

千分尺的读数方法是先读固定套管上的毫米和半毫米刻线，读法是露出多少读多少，刻线有上下之分，上下相邻的刻线为 0.5(mm)一格，如图 6 所示，从图可以看出固定套管上的读数应为 5.5(mm)；然后再读微分筒上的读数，当然微分筒的读数是以固定套管上的横向准线为基准，准线对准微分筒上的数是多少就读多少，前已所述，微分筒每格为 $\frac{1}{50}\times 0.5=0.01$(mm)，读微分筒上的数须进行估读一位；再看图 6，可知该图示的微分筒读数应为 0.385(mm)。所以在图 6 中，读数和应为 5.5＋0.385＝5.885(mm)。而待测物体的实际长度即近真值应为：

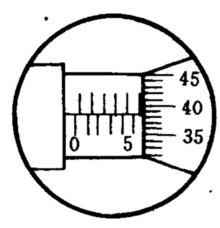

图 6　读数示例

近真值＝测得值一初始值（更正值）

　　＝5.885－0.012（如初始值取＋0.012(mm)）

　　＝5.873(mm)

千分尺使用完后应在测微螺杆与测砧之间留下间隙，否则天气变化、热胀冷缩会导致千分尺卡死而损坏。

2. 质量测量原理

质量测量原理大多是采用杠杆原理，本实验中的物理天平是常用的测量物体质量的仪器，它采用的是等臂杠杆，因此秤盘中的砝码重量及横梁上的游码一起便可反映待测物体的质量，而不需要进行复杂的计算程序过程。天平的外形如图 7 所示。天平的横梁（7)上装有三个刀口，中间刀口置于支梁顶上，两侧刀口各支撑一个悬挂秤盘的吊耳(6)，吊耳下面是秤盘架及秤盘，注意吊耳、秤盘架、秤盘及天平横梁左右侧刀口均有编号，编号相同的应置于同一侧，否则天平难以调水平。横梁正中固定有一个下垂指针（10)，当横梁摆动时，指针尖端就在中柱（12）下方的标牌（13)前摆动。升降横梁旋钮（3)可以使横梁上升或下降。横梁下降时，支架上两小柱就会把它托住，免于磨损刀口。横梁两端有两个调节螺母（9)用来调节天平空载时水平用的。横梁上有游码(8)，用于 1 克以下的称衡。(11）是感量调节器，出厂时已调整好，请不要移动。底板(2）下有两个调节螺钉（1)，是用来调节底板水平，也就是调节中柱（12）竖直的。水准器(4)中的气泡调到中央圈时，底板就水平了。

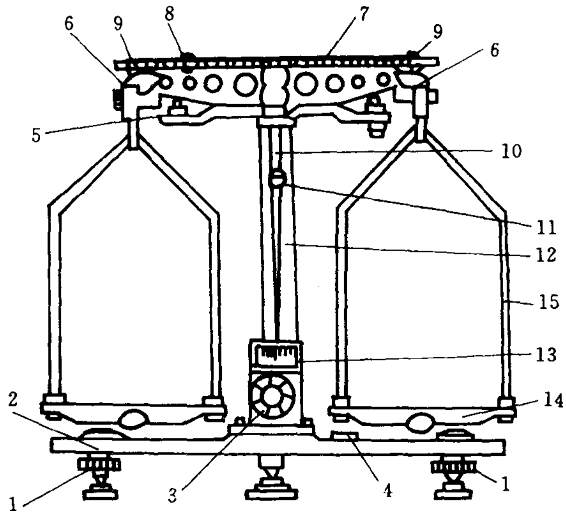

图 7 物理天平

物理天平的规格由下列两个参数来表示：

(1)感量。是指天平平衡时，为使指针产生可觉察的偏转（一般取指针偏转一格为准）在一端需加的最小质量。感量越小，天平灵敏度越高。

(2）称量。是天平允许称衡的最大质量，又称天平的最大载荷。

感量和称量这两个参数在出厂时均会在天平上用标牌标示出来。

使用天平时应注意以下几点：

(1)使用前，应先将底板调至水平状态。

(2）要检查秤盘、秤盘架、呆耳和横梁刀口的编号是否一致；然后将游码移至横梁零线处，支起横梁，观察指针是否停在读数标牌中间点处；如不在中点，则应放下横梁，调平衡螺母，再支起检查，直至指针指中为止。

(3）称物体时，物体放左盘，砝码放右盘，加减砝码时，必须用镊子取放，严禁用手拿。

(4）取放物体和砝码、移动游码或调节平衡螺母等操作，都应先将横梁降下后方可进行，以免损坏刀口。

3. 密度测量原理

本实验是按密度的定义来测黄铜管的密度的。其方法是先用游标卡尺测出黄铜管的几何尺寸，计算出它的体积，然后用天平测出它的质量。则黄铜管的密度为

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{4M}{\pi(D^2 - d^2) \cdot H} \tag{2}$$

[实验装置]

准确度为 0.02 毫米的游标卡尺一把；称量为 1000 克、感量为 100 毫克的物理天平一架；千分尺一把。

[实验内容和步骤]

1. 测黄铜管密度

(1)先测黄铜管的几何尺寸：用游标卡尺将黄铜管内径 d、外径 D 以及高 H 各测六次。

(2) 用天平称衡黄铜管的质量。

(3) 计算密度。

2. 测钢球直径

(1)先记读千分尺的初始值。

(2) 然后用千分尺测钢球直径，共测十次。

[数据记录及处理]

1. 测黄铜管密度

表 1 测量黄铜管几何尺寸

数据 次数 实验项目	1	2	3	4	5	6	平均值	标准差
外直径 D(mm)							$\overline{D}=$	σ_D
内直径 d(mm)							$\overline{d}=$	σ_d
高 H(mm)							$\overline{H}=$	σ_H

2. 用天平称衡黄铜管的质量

物理天平编号：

称量： 感量 $m=$ (g)

黄铜管质量 $M=$ (g)

标准误差 $\sigma_m=\frac{1}{2\sqrt{3}}m=$ (g)

3. 数据处理方法

计算黄铜管的密度和测量误差 $E_{\rho\sigma}$，σ_ρ

$$\bar{\rho}=\frac{4\overline{M}}{\pi(\overline{D}^2-\overline{d}^2)\overline{H}}=$$

$$\sigma_\rho=\bar{\rho}E_{\rho\sigma}=$$

4. 测量结果

$$\begin{cases}\rho=\bar{\rho}\pm\sigma_\rho\\ E_{\rho\sigma}=\end{cases}$$

5. 用千分尺测小钢球直径 ϕ

实验项目数据次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
钢球直径 ϕ(mm)											$\bar{\phi}=$ (mm)

测量结果为

$$\begin{cases} \phi = \bar{\phi} \pm \sigma_\phi \\ E_\phi = \dfrac{\sigma_\phi}{\bar{\phi}} \times 100\% \end{cases}$$

[思考题]

1.确定下列几种游标卡尺精度 i 和模数 r，并将它们填入表格（设主尺分度 $a=1$(mm)）。

游标分格数 n	10	10	20	20	50
游标总长 L(mm)	9	19	19	39	49
游标刻度 i(mm)					
模数 r					

2.已知游标卡尺精度 $i=0.01$(mm)，主尺的最小分格 $a=0.5$(mm)，试问游标的分格数 n 为多少？以 mm 为单位，游标总长 L 可能取哪些值？

实验二　在气垫导轨上验证动量守恒定律

[目的]

(1)观察碰撞过程，了解碰撞的分类、特点等。

(2)在气垫导轨上验证动量守恒定律。

(3)研究碰撞过程中的机械能损失。

[原理]

气垫导轨是一种先进的力学实验设备，结构如图 1所示，导轨上以一定规律分布着若干小孔，压缩空气从小孔中喷出，在导轨表面和滑块内表面间形成薄“气垫”，将滑块浮起，使滑块能在导轨上作近似无摩擦的运动，从而克服了摩擦力给力学实验带来的种种困难，使实验结果接近理论值，实验现象也更为直观。利用气垫导轨与其他仪器组合，可以完成多组力学实验。

一力学系统，当它所受合外力为零时，系统的总动量保持不变，这就是“动量守恒定律”。即当 $\Sigma F_i=0$，则 $\Sigma M_i V_i=$ 恒量，其中 F_i、M_i、V_i 分别为系统中第 i 个物体所受的外力、质量、速度。

在水平气垫导轨上，当滑块 A 以速度 $\boldsymbol{V}_{A1}$ 向静止的滑块 B 运动并发生正碰撞时，碰撞瞬间在水平方向上两滑块只受到相互作用力而无任何其他外力作用，碰撞前后两滑块的总动量将守恒。设碰撞后两滑块的速度分别为 $\boldsymbol{V}_{A2}$、$\boldsymbol{V}_{B2}$，则有

$$M_A \boldsymbol{V}_{A1} = M_A \boldsymbol{V}_{A2} + M_B \boldsymbol{V}_{B2} \tag{1}$$

选定 $\boldsymbol{V}_{A1}$方向为正方向，将上式改写为标量式：

$$M_A V_{A1} = M_A V_{A2} + M_B V_{B2} \tag{2}$$

上式中其余各速度标量的符号取决于各速度方向是否与 $\boldsymbol{V}_{A1}$方向一致，相同为正，相反为负。

碰撞前后系统机械能损失为

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} M_A V_{A1}^2 - \left(\frac{1}{2} M_A V_{A2}^2 + \frac{1}{2} M_B V_{B2}^2 \right) \tag{3}$$

恢复系数（两滑块碰撞后的分离速度 $V_{A2}-V_{B2}$与碰撞前的接近速度 $V_{A1}-V_{B1}$之比的绝对值)为

$$e = \left| \frac{V_{A_2} - V_{B2}}{V_{A1} - V_{B1}} \right| = \frac{|V_{A2} - V_{B2}|}{V_{A1}} \tag{4}$$