



北京航空航天大学

实验报告

学
班
姓
同
日
期:

评 分:

实验名称: 拉伸丝测钢丝弹性模量

一、实验目的

(1) 学习两种测量微小长度的方法,光杠杆法,激光位移传感器法。

(2) 熟练使用游标卡尺和千分尺,正确读取游标卡尺的规范操作。

二、物理原理

一条各向同性的金属棒(丝),原长为L,截面积为A,在外力F作用下伸长 δL 。当呈平衡状态时,如忽略金属棒本身的重力,则棒中任一截面上,内部的恢复力与外力相等。在弹性限度(比例极限内),胡克定律应有应力($\sigma = \frac{F}{A}$)与应变($\epsilon = \frac{\delta L}{L}$)成正比的关系,即 $E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/A}{\delta L/L}$ 。E称为该金属的弹性模量(又称杨氏模量)。弹性模量E外力F、物体长度L以及截面积A的大小均无关,只取决于棒的材料性质,是表征材料弹性能力的一个物理量。若金属棒为圆柱形,直径为D,在其两端(丝)下端悬以重物产生的拉力为F,则

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/A}{\delta L/L} = \frac{4FL}{\pi D^2 \delta L}$$

测出各式右边各项,就可算出该金属的弹性模量,其中F,L,D用一般的方法测得。测量的难点是,在线弹性限度内, $F=mg$ 不能起很大,相应的 δL 很小用一般的工具不易测出。

光杠杆如图,一个直立的平面镜装在倾角调节架上,它与望远镜、标尺、二次反射镜组成光杠杆测量系统。

实验时,将光杠杆的两个前足尖放在弹性模量测定仪的固定平台上,后足尖放在待测金属丝的测量端面上。当金属丝受力后,产生微小伸长,后足尖便随测量端面一起作微小移动,并使光杠杆绕前足尖转动一微小距离,从而带动光杠反射光束转动相应的微小角度。这样极大的像在光杠反射镜和二次反射镜之间反射,便把这微小角移放大或成放大的线位移。这就是光杠产生光放大的原理。

开始时光杠反射镜与标尺在同一平面,在望远镜上读到的标尺读数为;光杠

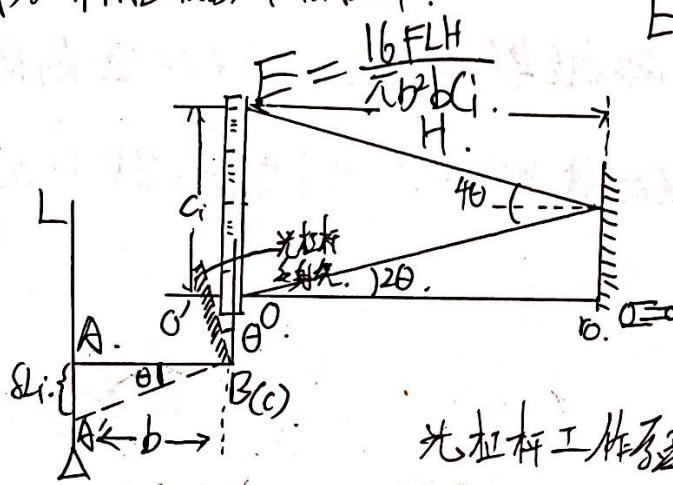
反射光的后视尺下降 SL 时, 产生一个微小偏转角 θ , 望远镜上读到的标尺读数为 i ; 测微大的钢丝伸长量 $(i-t)/t_0$ (常称作视差).

$$SL_i = b \cdot \tan \theta \approx b\theta. \quad b \text{ 为光杠杆前后之间的垂直距离, 称光杠杆臂长.}$$

由于经光杠杆反射而进入望远镜的光线方向不变, 故当平面镜旋转角度 α , 入射到光杠杆的光线的方向就要偏转 4α , 因 α 甚小, 4α 也甚小, 故可认为反射到标尺的距离 H 变化, 并有 $2\alpha \approx \tan \alpha = \frac{C_i}{H}$, $\alpha = \frac{C_i}{4H}$.

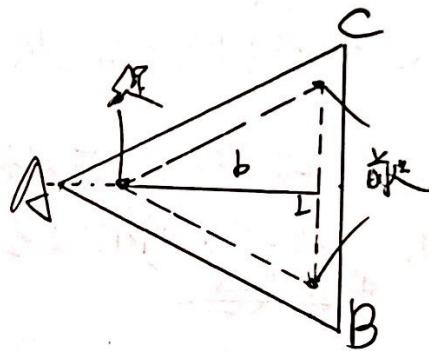
$$\text{则 } SL_i = \frac{b\alpha}{4H} = NC_i, \quad N = \frac{b}{4H}.$$

N = 称称作光杠杆的“放大率”。式(4.1.4)中 b 和 H 可以直接测量, 因此要从望远镜测得标尺刻线移过的距离 C_i , 即计算出钢丝的相应伸长 SL_i 。适当增大 H , 减小 b , 可增大光杠杆的放大率, 光杠杆可以做的很短, 对微小伸长或微小转角的反应很灵敏, 方便实用, 在精密仪器中常有应用。



光杠杆工作原理

$$E = \frac{16FLH}{\pi b^2 d C_i}$$



光杠杆前后之间距

三 实验仪器

弹性模量测定仪(包括: 细钢丝、光杠杆、望远镜、标尺及拉力测量装置), 钢丝游标卡尺和螺旋测微计。

四 实验内容:

(1) 调整测量系统

测量系统的调整校准的关键, 调整后的系统应满足光线沿水平面传播的条件, 即望远镜中看到的标尺刻度经两平面镜反射后进入望远镜视界。为此, 可通过以下步骤调节:

1. 固定调节

| 光杠杆前支持点高度 | 光杠杆后支持点高度 | 光杠杆中心高度 | 光杠杆总高度 |
|-----------|-----------|---------|--------|
| 65.0 | 115.0 | 90.0 | 50.0 |

$$0.6 \times 10^{-2}$$

$$2.210 \times 10^{-11}$$

首先调整望远镜使与光杠杆等高，然后左右平移望远镜与反射镜直至凭目测从望远镜上方观察到光杠板射镜中出现二支反射镜的像，再转动第三次反射镜至出现你人的像。

3) 调焦、找尺

首先调节望远镜目镜旋钮，使“十”字叉丝清晰成像（目视调焦）；然后调节望远镜物镜焦距，使像与“十”字叉丝无误差。

4) 细调光路水平：

观察望远镜对尺丝所对应的标尺读数与光杠杆在标尺上的实际位置读数是否一致，若有明显不同时则说明入射光线与反射光线未为水平面传播，可适当调节二次反射镜的俯仰，直到望远镜读出的读数为其实原位置为止。调节过程中还应兼顾杆尺上下清晰度一致，若清晰度不同，则可适当调节望远镜俯仰螺钉。

五、数据测准

- ①首先加大倍率，将钢丝拉直，然后逐步改变粗丝拉力，测量望远镜水平叉丝对应的标尺刻度。
- ②根据量程及相对不确定度大小，选择合适的长度测量仪器，分别用卷尺、游标卡尺或钢尺测L、H各一次，测钢丝直径D若干次。

~~数据处理~~

六、数据处理

$$\text{钢丝长度 } L/\text{cm} = 38.02\text{m}$$

$$\text{平面镜到杆尺距离 } H/\text{cm} = 109.58\text{m}$$

$$\text{光杠杆前后足间距 } 2.1 \pm 0.02\text{cm}$$

$$\text{钢丝直径 } D/\text{mm}$$

| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| D/mm | 0.729 | 0.731 | 0.733 | 0.729 | 0.731 | 0.728 | 0.733 | 0.733 | 0.729 | 0.730 |

$$\bar{D} = 0.7306\text{ mm}$$

$$\text{加法码后的读数 } r/\text{cm}$$

| i | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| r/cm | 0.1 | 0.96 | 1.74 | 2.60 | 3.41 | 4.41 | 5.32 | 6.22 | 7.15 | 8.03 |
| r/cm | 0.38 | 1.13 | 2.09 | 2.95 | 3.87 | 4.69 | 5.49 | 6.29 | 7.28 | 8.29 |
| r/cm | 0.24 | 1.045 | 1.94 | 2.715 | 3.64 | 4.55 | 5.45 | 6.25 | 7.25 | 8.16 |

| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 平均 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| h ₁₅ | 4.310 | 4.360 | 4.315 | 4.440 | 4.520 | 4.389 |

误差

$$\frac{4.389}{5} = 0.879 \text{ mm}$$

$$由 E = \frac{16FLH}{\pi d^2 b C_i}$$

$$\begin{aligned} \text{有 } E &= \frac{16 \times 0.1 \times 10 \times 9.8 \times 380.2 \times 10^{-2} \times 109.55 \times 10^{-2}}{344 \times (0.7306 \times 10^{-3})^2 \times 2 \times 10^{-2} \times 0.879 \times 10^{-2}} \\ &= 2.216 \times 10^{11} \text{ Pa.} \end{aligned}$$

2. 不确定度计算:

$$\Delta L = 0.3 \text{ cm} \quad \Delta H = 0.5 \text{ m} \quad \Delta b = 0.02 \text{ cm.}$$

$$U(L) = \frac{\Delta L}{\sqrt{3}} = 0.173 \text{ cm} \quad U(H) = 0.289 \text{ cm} \quad U(b) = 0.0115 \text{ m.}$$

$$1> U_a(C_i) = \sqrt{\frac{2(C_i - \bar{C})^2}{k(k-1)}} = 0.000614 \text{ mm.}$$

$$U_b(D) = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.00289 \text{ mm.}$$

$$\therefore U(D) = \sqrt{U_a(C_i)^2 + U_b(D)^2} = 0.00295 \text{ mm.}$$

$$2> U_a(C) = \sqrt{\frac{2(C_i - \bar{C})^2}{k(k-1)}} = 0.0402 \text{ mm.}$$

$$U_b(C) = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.00289 \text{ mm.}$$

$$\therefore U(C) = \sqrt{U_a(C)^2 + U_b(C)^2} = 0.0403 \text{ m.}$$

$$3> E = \frac{16FLH \cdot 10}{\pi D^2 b \cdot \frac{C}{S}} \Rightarrow \ln E = \ln L + \ln H - 2 \ln b - \ln b \ln \frac{C}{S} + \ln 16 + \ln \pi + \ln \rho + \ln C$$

$$\therefore \frac{dE}{E} = \frac{dL}{L} + \frac{dH}{H} - \frac{2db}{b} - \frac{db}{b} - \frac{dc}{c}$$

$$\therefore \frac{U(E)}{E} = \sqrt{\left(\frac{U(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{U(H)}{H}\right)^2 + \left(\frac{U(b)}{b}\right)^2 + \left(\frac{U(b)}{b}\right)^2 + \left(\frac{U(C)}{C}\right)^2}$$

$$= 0.0145.$$

$$\therefore U(E) = 0.032 \times 10^{11} \text{ Pa.}$$

3. 测量结果

$$E \pm U(E) = (2.216 \pm 0.032) \times 10^{11} \text{ Pa.}$$



北京航空航天大学

实验报告

实验名称: 拉伸法测钢丝弹性模量

日期: _____
评分: _____

六、误差分析:

1. 测量误差: 实验数据的测量易造成误差, 如测H时不足垂直距离, 则螺旋夹紧钢丝, 测量过程未完全对准等。
2. 测量杆长差: 记录C时反射面的不稳定, 导致水平尺有微小震动, 造成误差。
3. 测量C时放杆不规范。
4. 光路放大的误差。

七、误差减小:

1. 由不确定度观, C与b影响最大。

方法:
① 多次测量取平均值

② 不同位置进行测量



北京航空航天大学

实验报告

学
班
姓
同
日
评
分:

实验名称: 扭摆法测定转动惯量

一、实验目的

- ① 学习两种物理实验方法—比值测法中转换测量法;
- ② 熟悉扭摆的构造及使用方法,掌握数字式计时器的正确使用;
- ③ 用扭摆测定几种不同形状物体的转动惯量,并与理论值进行比较;
- ④ 验证转动惯量平行轴定理;
- ⑤ 用振动法(三线摆)测量物体的转动惯量。

二、实验原理

扭摆的构造如图,在其垂直轴上装有一根薄片状的螺旋弹簧,可以产生恢复力矩,在轴的上方可以装上各种待测物体。垂直轴与支点间装有轴承,摩擦阻力矩尽可能减小。将物体在水平面内转过一定角度 θ 后,在弹簧的恢复力矩作用下,物体就开绕垂直轴作往复摆运动。根据胡克定律,弹簧受扭转而产生的恢复力矩与所转过的角度 θ 成正比,

$$\text{即: } M = K\theta$$

其中 K 为弹簧扭转常数。根据转动定律 $M = I\beta$ (转动惯量, 角加速度), 得 $I\beta = -K\theta$ 。

由 $\beta = \frac{d\theta}{dt^2}$, 并令 $\omega^2 = K/I$, 得

$$\beta = \frac{d\theta}{dt^2} = -\frac{K}{I}\theta = -\omega^2\theta.$$

$$\theta = A \cos(\omega t + \phi).$$

A 为谐振动的角振幅, ϕ 为初相位角, ω 为(固)频率, T 为谐振动的周期。

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{K}}.$$

三、实验仪器

扭摆、塑料圆柱体、金属空心圆筒、实心塑料球(木球)、金属细长杆(两个滑块在上面自由移动)、数字式计时器、电子天平; 三线摆、钢卷尺、电子秒表、圆环、光学水准仪。

四、实验内容

17. 用水准仪调平仪器水平, 设置计时器。

(2) 测摆数据

1) 装上金属载物盘，测定其摆动周期₁。将塑料圆柱体垂直放在载物盘上，测出摆动周期₂，测定扭摆的弹簧扭转常数。

2) 测定金属圆筒、塑料(或木)球与金属细长杆的转动惯量，列表时注意给出待测物体转动惯量的测量公式(金属圆筒J₁、塑料球J₂以及金属细长杆J₃)和理论计算公式(金属圆筒J₁、塑料球J₂、金属细长杆J₄)。

3) 验证转动惯量平行轴定理。将滑块对称地放置在细杆两边的凹槽内(此时滑块重心离转轴距离分别为5.00、10.00、15.00、20.00、25.00 cm)摆动周期₃。

4) 测摆其他常数

五. 数据处理

周期T₁：测得圆柱质量：m_柱 = 110.32 g

$$d_{柱} = 100.26 \text{ mm}$$

$$l_{柱} = 33.12 \text{ mm}$$

$$D_{内1} = 94.06 \text{ mm}$$

$$m_{块1} = 105.08 \text{ g}$$

$$m_{块2} = 240.05 \text{ g}$$

$$D_{外1} = 100.26 \text{ mm}$$

$$P_{内块} = 6.04 \text{ mm}$$

$$m_{块3} = 720.06 \text{ g}$$

$$D_{外块} = 35.02 \text{ mm}$$

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 平均 |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 金属圆柱 T ₁ /ms | 11.704 | 11.701 | 11.701 | 11.700 | 11.699 | 11.701 |
| 盘柱 T ₁ /ms | 22.381 | 22.377 | 22.379 | 22.376 | 22.375 | 22.378 |
| 盘筒 T ₁ /ms | 23.909 | 23.903 | 23.904 | | | 23.905 |
| 球 T ₃ /ms | 18.114 | 18.115 | 18.114 | | | 18.114 |
| 杆 T ₄ /ms | 26.570 | 26.573 | 26.572 | | | 26.571 |

平行轴定理：

| 距离r/cm | 1 | 2 | 3 | 平均 |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 5.00 | 32.407 | 32.405 | 32.408 | 32.406 |
| 10.00 | 44.788 | 44.771 | 44.777 | 44.779 |
| 15.00 | 59.917 | 59.962 | 59.963 | 59.947 |
| 20.00 | 76.250 | 76.30 | 76.265 | 76.275 |

$$(1). \text{计算轴 I} = \frac{1}{2}mr^2 = \frac{1}{8}MD^2$$

塑料圆盘:

$$\begin{cases} T_1^2 = \frac{4\pi^2}{K} (I_{ref} J_0) \\ T_0^2 = \frac{4\pi^2}{K} I_0 \end{cases} \quad I_1 = \frac{1}{8} m D^2 = \frac{1}{8} \times 110.32 \times 10^{-3} \times (100.26 \times 10^{-3})^2 = 1.345 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$$

$$\Rightarrow K = \frac{4\pi^2 I_1}{T_1^2 - T_0^2} = \frac{\Sigma T_i}{S \times 15} = 1.495. \quad \bar{T}_0 = \frac{\Sigma T_i}{S \times 15} = 0.785.$$

$$\text{代入有: } K = 3.414 \times 10^{-2} \text{ N/m},$$

(2). 计算圆角的转动惯量 I_2

$$\bar{T}_2 = \frac{\Sigma T_i}{S \times 15} = 1.595.$$

$$I_2 = \frac{K}{4\pi^2} (T_2^2 - T_0^2) = \frac{3.414 \times 10^{-2}}{4\pi^2} (1.59^2 - 0.78^2) = \cancel{1.688 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2} 1.688 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$$

$$j_2 = \frac{1}{8} m (D_A^2 + D_B^2) = \frac{1}{8} \times 120.06 \times 10^{-3} \times [(94.06 \times 10^{-3})^2 + (100.26 \times 10^{-3})^2] = 1.71 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$$

$$\text{相对误差 } E_2 = \frac{I_2 - j_2}{j_2} = -0.76\%$$

(3). 计算圆球转动惯量 I_3

$$\bar{T}_3 = \frac{\Sigma T_i}{S \times 15} = 1.205.$$

$$I_3 = \frac{K}{4\pi^2} (T_3^2) = \frac{3.414 \times 10^{-2}}{4\pi^2} \times 1.20^2 = 1.245 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$$

$$j_3 = \frac{1}{16} m D^2 = \frac{1}{16} \times 120.06 \times 10^{-3} (110.10 \times 10^{-3})^2 = 1.333 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$$

$$\text{相对误差 } E_3 = \frac{I_3 - j_3}{j_3} = -6.6\%$$

(4). 计算金属杆转动惯量 I_4

$$\bar{T}_4 = \frac{\Sigma T_i}{S \times 15} = 1.775.$$

$$I_4 = \frac{K}{4\pi^2} T_4^2 = \frac{3.414 \times 10^{-2}}{4\pi^2} \times 1.77^2 = 2.709 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$$

$$j_4 = \frac{1}{32} m l^2 = \frac{1}{32} \times 105.08 \times 10^{-3} \times (535.5 \times 10^{-3})^2 = 2.511 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$$

$$\text{相对误差 } E_4 = \frac{I_4 - j_4}{j_4} = 7.89\%$$

3. 验证转动定理

$$T=2\pi \sqrt{\frac{I_{ext} \alpha^2}{K}}, 对 T^2 \alpha^2 作线性回归分析, 令 y=T^2, x=\alpha^2 且 y=a+bx$$

$$\bar{x} = \frac{1}{4} \sum x_i = 0.01875.$$

$$\bar{y} = \frac{1}{4} \sum y_i = 22125 \times 10^{-4} = 5.53 \times 10^{-4}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{4} \sum y_i = 13.82$$

$$\bar{xy} = \frac{1}{4} \sum x_i y_i = 0.37$$

$$\bar{y^2} = \frac{1}{4} \sum y_i^2 = 255.41.$$

$$\therefore b = \frac{\bar{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\bar{x}^2 - \bar{x}^2} = 5.7 \times 10^2.$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} = 3.2$$

$$r = \frac{\bar{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\sqrt{(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2)}} = 0.9990 \quad 线性相关强烈.$$

$$\therefore T^2 = 5.7 \times 10^2 \alpha^2 + 3.2$$

$$理论值: J_1: \frac{1}{16} m_1 (D_A^2 + D_B^2) + \frac{1}{12} m h^2 = 4.089 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_2: \frac{1}{16} m_2 (D_A^2 + D_B^2) + \frac{1}{12} m h^2 = 4.089 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum x_i}{K}}$$

$$\therefore \frac{K}{4\pi^2} T^2 = J_{杆} + J_1 + J_2 + 2md^2$$

$$\therefore T^2 = \frac{4\pi^2}{K} \cdot 2md^2 + (J_{杆} + J_1 + J_2) \cdot \frac{4\pi^2}{K}$$

$$= 5.5 \times 10^2 \alpha^2 + 3.0$$

\therefore 平行轴定理成立

误差分析

1. 称量时天平不校定造成误差。

2. 扭摆时桌面可能因发出微小振动带来误差。

八、思考题

1. 金属支座转动惯量很大，忽略不计。称量不应加上支架质量，因为支座质量与细长杆塑料球相比很大，会造成误差。修正：另测支座转动惯量并相减。
2. $I = \frac{1}{2} \left[\frac{K}{4\pi^2} (T_2^2 - T_4^2) - 2m\alpha^2 \right]$ 取 $\alpha = 20 \text{ cm} = 0.2 \text{ m}$ $T_2 = 5.08 \text{ s}$
 $I = 2.02 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad J = 4.09 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$



北京航空航天大学
实验报告

实验名称: _____

学号: _____
班级: _____
姓名: _____
同组者: _____
日期: _____
评分: _____

| r_f | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9. |
|------------|------|-------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|
| r_{+}/cm | 0.1 | 0.75 | 1.46 | 2.20 | 3.19 | 4.11 | 4.92 | | | |
| r_{-}/cm | | | | | | | | | | |
| r^{+}/cm | 0.10 | 0.96 | 1.79 | 2.60 | 3.41 | 4.41 | 5.32 | 6.22 | 7.15 | 8.03 |
| r^{-}/cm | 0.38 | 1.13 | 2.09 | 2.95 | 3.87 | 4.69 | 5.49 | 6.29 | 7.18 | 8.29 |
| F/cm | 0.24 | 1.045 | 1.94 | 2.775 | 3.64 | 4.55 | 5.405 | 6.255 | 7.215 | 8.16 |

直丝 b/mm

i 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10.

D_i/mm 0.729 0.731 0.733 0.729 0.731 0.728 0.733 0.733 0.729 0.730.

钢丝长度 L/cm . 38.02cm

福线到标尺距离 H/cm . 109.55cm

$$\bar{D} = 0.7306 \text{ mm.}$$

误差：

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5. | 平均 |
|---------------------------------|---|--|--------------|-------|-------|---|
| 直接 H. $\times 10^{-3}$ | 5.165 | 5.210 | <u>5.275</u> | | | |
| 修正 t_1/m | 4.310 | 4.360 | <u>4.315</u> | 4.440 | 4.520 | 4.389 |
| $E = \frac{16FLH}{\pi b^2 c_i}$ | $\frac{16 \times 5 \times F L H \times 4.8}{\pi (b^2 b c_i)}$ | $\frac{16 \times 0.1 \times 1 \times 9.8 \times 38.02 \times 10^{-2} \times 109.55 \times 10^{-2}}{3.14 \times (0.7306 \times 10^{-3})^2 \times 2 \times 10^{-2} \times 0.879 \times 10^{-2}}$ | | | | $4.389/5 - 0.879$ |
| | | | | | | $= 2.216 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 破壁机 |

实验二：

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 金属盒 T_0/ms | 11.704 | 11.701 | 11.701 | 11.700 | 11.699 |
| + 杆 T_1/ms | 22.381 | 22.377 | 22.379 | 22.376 | 22.375 |
| + 杆 T_2/ms | 23.909 | 23.903 | 23.904 | | |
| 球 T_3/ms | 18.114 | 18.115 | 18.114 | | |
| 杆 T_4/ms | 26.570 | 26.573 | 26.572 | | 破壁机 |

| 卷尺/cm | 1 | 2 | 3 | |
|-------|--------|--------|--------|-----|
| 5.06 | 32.407 | 32.405 | 32.408 | |
| 16.00 | 44.78 | 44.77 | 4.777 | |
| 15.00 | 59.917 | 59.962 | 59.963 | |
| 20.00 | 76.250 | 76.310 | 76.265 | 砾石块 |

$$m_{\text{总}} = 1110.32 \text{ g}$$