

# 浙江大学

# 物理实验报告

实验名称: 金属材料杨氏模量的测量

实验桌号: \_\_\_\_\_

指导教师: 王宙洋

班级: \_\_\_\_\_

姓名: \_\_\_\_\_

学号: \_\_\_\_\_

实验日期: 2025 年 11 月 18 日 星期二上午

(此处填实验选课系统内日期)

浙江大学物理实验教学中心

如有实验补做, 补做日期:

情况说明:

# 一、预习报告（10 分）

（注：将已经写好的“物理实验预习报告”内容拷贝过来）

## 1. 实验综述

（自述实验现象、实验原理和实验方法，不超过 300 字，5 分）

实验原理：

金属材料在外力作用下会发生形变，如果外力撤去后相应的形变也随即消失，这种形变被称为弹性形变。如果外力撤去后仍有残余形变，这种形变被称为塑性形变。

应力是指单位面积上所受到的力（记为  $F/S$ ）。发生弹性形变时，物体内部产生的企图恢复物体原状的力叫做内应力。应变是指在外力作用下的相对形变（记为  $\Delta L/L$ ），它反映了物体形变的大小。

若取长为  $L$ ，截面积为  $S$  的均匀金属丝，在两端加外力  $F$ ，则作用在金属丝单位面积上的力  $F/S$  为正应力，相对伸长  $\Delta L/L$  定义为线应变。根据胡克定律，物体在弹性限度范围内，应力与应变成正比，其比例系数称为杨氏模量（记为  $E$ ），用公式表示为：

$$E = \frac{FL}{S\Delta L}$$

杨氏模量在数值上等于产生单位应变时的应力，它与金属丝的材料有关。杨氏弹性模量是材料的属性，与外力及物体的形状无关。

通过实验测得的数据，最终杨氏模量的计算公式为：

$$E = \frac{8DFL}{\pi d^2 b \cdot \Delta s}$$

用作图法处理实验数据：

$$\Delta s' = \frac{8DL}{\pi d^2 b E} \cdot F$$

用逐差法处理实验数据， $(\Delta s')$  为每增加 1kg 砝码钢丝的伸长量，作  $(\Delta s' - F)$  图，采用最小二乘法线性拟合，得一斜率为  $K$  的直线。直线的斜率  $K$  由图中得到，由此计算得到  $(E_0)$ 。

实验步骤：

1、系统安装调节：首先调节仪器底座，使支架竖直。然后挂上金属丝，并加上预载荷使其完全拉直。最后安放光杠杆。

2、光路调节：将望远镜对准光杠杆的镜面，调节目镜和调焦手轮，直到能清晰地看到标尺的像，并消除视差。

3、加减砝码并读数：记录初始读数后，开始逐次增加砝码，每次加 1 公斤，等待稳定后记录标尺读数。全部加完后，再逐次减去砝码，同样记录下每次的读数。

4、测量基本参数：使用米尺测量金属丝的长度  $L$  和镜面到标尺的距离  $D$ 。用螺旋测微器在不同位置多次测量金属丝的直径  $d$  并取平均值。用游标卡尺测量光杠杆常数  $b$ 。

5、计算结果：整理所有测量数据，用逐差法或作图法求出平均的标尺读数变化量。最后将所有数据代入公式，计算出杨氏模量  $E$  的值，并完成不确定度分析。

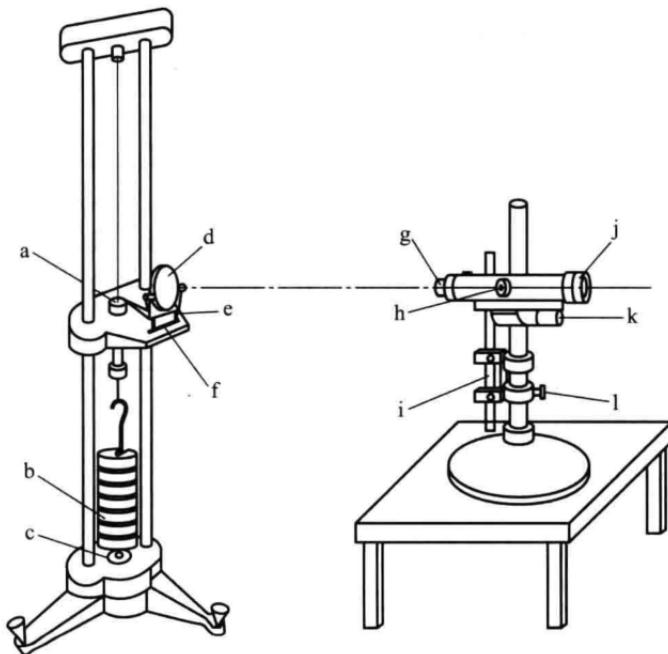


图 2-6-3

(a—平台小孔, b—砝码, c—水准仪, d—光杠杆镜, e—刀口, f—平台槽沟, g—目镜, h—调焦手轮, i—标尺, j—物镜, k—倾角调节螺钉, l—标尺架升降螺钉)

图 1 光杠杆镜

## 2. 实验重点

(简述本实验的学习重点, 不超过 100 字, 3 分)

- 1、理解杨氏模量的物理意义及基于胡克定律的测量原理。
- 2、掌握利用光杠杆法将微小长度变化进行放大的测量思想与操作。
- 3、学会运用逐差法和作图法等科学方法处理数据, 以减小随机误差。

## 3. 实验难点

(简述本实验的实现难点, 不超过 100 字, 2 分)

- 1、光路精细调节: 需要在望远镜中快速寻找到清晰的标尺像, 并彻底消除视差, 难度较大。
- 2、操作平稳性: 加减砝码过程需极度平稳, 防止因震动导致光杠杆足尖移位或金属丝晃动, 从而使实验数据失效。

## 二、原始数据 (20 分)

(将有老师签名的“自备数据记录草稿纸”的扫描或手机拍摄图粘贴在下方, 完整保留姓名, 学号, 教师签字和日期。)

### 三、结果与分析 (60 分)

#### 1. 数据处理与结果 (30 分)

(列出数据表格、选择适合的数据处理方法、写出测量或计算结果。)

注：千分尺零点误差为 0.152mm，已在数据中减去

表 1 原始数据记录

测量次数	D/mm	b/mm	L/mm	d/mm
1	1427.2	69.22	1011.9	0.615
2	1426.9	69.20	1011.5	0.617
3	1426.7	69.22	1011.6	0.607
4	1427.1	69.22	1011.3	0.615
5	1426.8	69.20	1012.0	0.612
6	1427.1	69.20	1011.8	0.609
平均值	1427.0	69.21	1011.7	0.613
A 类不确定度	0.08	0.004	0.11	0.0016
$\Delta_{\text{仪}}$	±0.5	±0.02	±0.1	±0.004
B 类不确定度	0.29	0.012	0.06	0.0023
合成不确定度	0.3	0.013	0.12	0.0028

表 2 金属丝伸长量数据记录

实验次数	作用力/kg	标尺读数/mm			
		增砝码	减砝码	平均值	逐差法求 $\overline{\delta s}$
1	1	4.9	5.9	5.4	7.4
2	2	9.9	11.2	10.6	
3	3	17.2	18.8	18.0	
4	4	24.9	29.5	27.2	
5	5	31.1	36.5	33.8	
6	6	38.8	43.5	41.2	
7	7	45.7	50.6	48.2	
8	8	54.5	57.2	55.9	

#### (1) 逐差法

由：

$$\delta s_i = \frac{(s_{i+4} - s_i)}{4}, \quad \overline{\delta s} = \frac{\Sigma(\delta s_i)}{4}$$

求得  $\overline{\delta s} = 7.4 \text{ mm}$ 。

由表 1 得  $D=1427.0 \text{ mm}$ ,  $b=69.21 \text{ mm}$ ,  $L=1011.7 \text{ mm}$ ,  $d=0.613 \text{ mm}$ 。

由杨氏模量计算公式：

$$E = \frac{8DmgL}{\pi d^2 b \delta s}$$

求得  $E=1.92 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 。

(2) 作图法

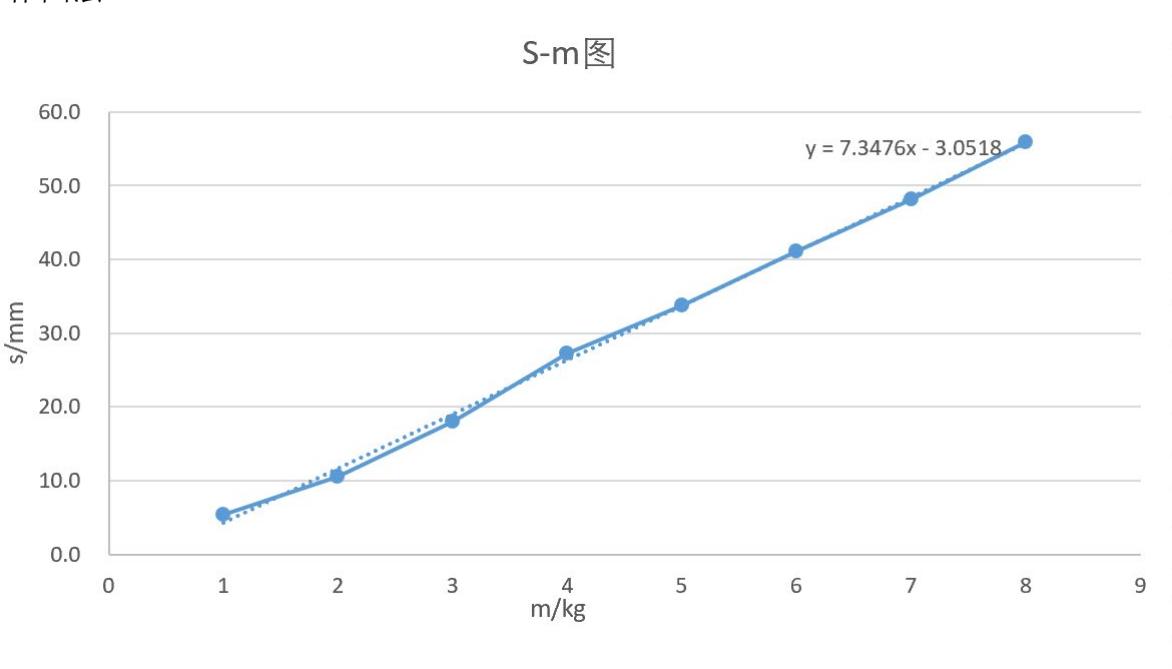


图 2 s-m 图

作 s-m 图得斜率  $K=7.35$

$D=1427.0\text{mm}$ ,  $b=69.21\text{mm}$ ,  $L=1011.7\text{mm}$ ,  $d=0.613\text{mm}$ 。

由

$$E = \frac{8DLg}{K\pi d^2 b}$$

求得  $E=1.93\times 10^{11}\text{Pa}$ 。

(3) 不确定度计算

由 s 的 A 类不确定度计算公式求得:

$$u_A(\delta s) = \sqrt{\frac{\sum (\delta s_i - \bar{\delta s})^2}{4 * 3}} = 0.54\text{mm}$$

由  $\Delta_{\text{仪}}s=0.2\text{mm}$ ,  $u_B(\delta s) = 0.12$  计算出 s 的合成不确定度为:  $u_s=0.5\text{mm}$

其他物理量的不确定度通过计算公式求得:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n * (n - 1)}}$$

$$u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}$$

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

$u_m=300\text{mg}$ ,  $u_D=0.3\text{mm}$ ,  $u_b=0.012\text{mm}$ ,  $u_L=0.06\text{mm}$ ,  $u_d=0.0028\text{mm}$ 。

由不确定度传递公式:

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta s)}{\Delta s}\right)^2}$$

求得  $\frac{\Delta E}{E} = 6.8\%$

逐差法:

$$E = (1.92 \pm 0.13) \times 10^{11} Pa$$

作图法:

$$E = (1.93 \pm 0.13) \times 10^{11} Pa$$

## 2. 误差分析 (20 分)

(运用测量误差、相对误差或不确定度等分析实验结果, 写出完整的结果表达式, 并分析误差原因。)

### (1) 实验结果

逐差法:

$$E = (1.92 \pm 0.13) \times 10^{11} Pa$$

作图法:

$$E = (1.93 \pm 0.13) \times 10^{11} Pa$$

相对不确定度为: 6.8%

### (2) 结果准确性分析

查表得, 钢的杨氏模量为:  $192 - 216(10^9 Pa)$ 。

本实验逐差法测得的结果位于标准值范围的下限, 作图法结果也落在标准范围内。这表明本实验采用了正确的测量方法, 实验结果准确可信。

### (3) 误差来源定量分析

根据不确定度合成公式分析各物理量对最终结果的贡献:

1、光杠杆标尺读数差是最大的误差来源。计算显示其相对不确定度约为 6.7%, 占总相对不确定度 (6.8%) 的绝大部分。

2、金属丝直径 (d) 是次要误差来源。虽然千分尺测量精度较高, 但杨氏模量公式中直径为平方项 ( $d^2$ ), 其测量误差会被放大传递, 贡献了约 0.9% 的相对误差。

3、质量 (m)、钢丝长度 (L)、标尺距离 (D) 等其他物理量的相对误差极小, 对最终结果的影响基本可以忽略。

### (4) 误差产生的具体原因

#### A. 随机误差

##### 1、弹性滞后与摩擦:

观察表 2 原始数据可以发现, 在相同载荷下, 增砝码与减砝码时的标尺读数存在显著

差异（例如第 5 组数据，差值达 5.4mm）。这说明金属丝在形变过程中存在弹性滞后现象，以及钢丝与夹具、滑轮之间存在摩擦力，导致形变不能完全即时恢复。这是导致  $\Delta s$  不确定度较大的根本原因。

2、读数误差：

光杠杆系统灵敏度高，实验台的微小震动会导致望远镜视野中刻度晃动，增加了读数难度。此外，人眼在望远镜中读取标尺估读位时可能存在视差。

3、钢丝微小弯曲：

钢丝在拉伸初期可能存在微小弯曲，未完全拉直前的形变数据可能引入误差。

## B. 系统误差

1、理论近似误差：

光杠杆测量原理公式是建立在偏转角极小的近似条件下的 ( $\tan 2\theta \approx 2\theta$ )，虽然本实验满足小角度条件，但理论上仍存在微小偏差。

2、钢丝的不均匀性：

实验公式假设钢丝是均匀圆柱体，但实际钢丝各处直径可能不完全一致，截面形状也可能非完美圆形，虽然进行了多点测量求平均，仍存在一定系统误差。

综上所述，本实验测得的杨氏模量与标准值符合较好。为了进一步减小误差，可以在正式测量前对钢丝进行多次预加载以消除部分滞后效应，并在读取标尺时严格控制环境震动。

## 3. 实验探讨（10 分）

（对实验内容、现象和过程的小结，不超过 100 字。）

本实验利用光杠杆放大法测定钢丝杨氏模量。通过逐次增减砝码，观测到标尺读数呈线性变化。采用逐差法与作图法处理数据，有效消除了误差，测得结果与标准值吻合，掌握了微小量放大测量原理。

## 四、思考题（10 分）

（解答教材或讲义或老师布置的思考题，请先写题干，再作答。）

1. 伸长法测量钢丝的杨氏弹性模量中需要测量哪些物理量？分别用什么仪器测量？应估读到哪一位？

钢丝伸长量 $s$	光杠杆镜	0.1mm
标尺到镜面距离 $D$	卷尺	0.1mm
光杠杆镜前后脚垂直距离 $b$	游标卡尺	不估读
钢丝长度 $L$	米尺	0.1mm
钢丝直径 $d$	螺旋测微计	0.001mm

2. 加减砝码测量钢丝伸长量的过程中，如何及时检查所测得的数据？

（1）检查数据的线性关系：由于在弹性限度内，钢丝的伸长量与外力成正比，因此每次增加或减少相同质量（如 1kg）的砝码，标尺读数的变化量理论上应该大致相等。如果发现某次变化的数值与其他次差异过大，可能表明读数错误、金属丝滑动或已超出弹性范围，需立即检查。

(2) 检查数据的重复性：对比同一负载下，增加砝码时的读数与减少砝码时的读数。理论上在消除弹性滞后和摩擦后，两者的数值应非常接近。如果同一负载下的两个读数相差太大，说明实验过程中可能出现了金属丝滑动、光杠杆脚尖移动或摩擦力过大等问题。

3. 从光杠杆的放大倍数考虑，增大  $D$  与减小  $b$  都可以增加放大倍数，那么它们有何不同？是否可以增大  $D$  从而无限制地增大放大倍数。光杠杆放大倍数增大有无限制？

(1) 增大  $D$  与减小  $b$  的区别：

减小光杠杆的臂长  $b$  是通过改变光杠杆镜本身的结构参数来提高放大倍数；而增大标尺到平面镜的距离  $D$  是通过改变光路的空间布局来提高放大倍数。

减小  $b$  会受限于光杠杆镜的机械结构稳定性， $b$  太小会导致光杠杆站立不稳容易倾倒；增大  $D$  则受限于实验场地空间和望远镜的光学性能。

(2)  $D$  不能无限制地增大：

不可以。随着距离  $D$  的增大，望远镜中观察到的标尺像会变小且变暗，导致读数困难。此外， $D$  过大时，微小偏差对光路的影响会被显著放大，导致视场中的像晃动剧烈，严重影响测量的准确性和稳定性。

(3) 光杠杆放大倍数增大的限制：

- (1) 物理结构的限制： $b$  不能太小，否则仪器不稳定。
- (2) 光学条件的限制： $D$  不能太大，受限于望远镜的分辨率、标尺像的清晰度以及照明显亮度。
- (3) 环境因素的限制：放大倍数过大时会同时放大环境噪声（如震动、气流），使得测量数据不稳定，从而失去测量的意义。

#### 注意事项：

1. 用 PDF 格式上传“实验报告”，文件名：学生姓名+学号+实验名称+周次。
2. “实验报告”必须递交在“学在浙大”本课程内对应实验项目的“作业”模块内。
3. “实验报告”成绩必须在“浙江大学物理实验教学中心网站” – “选课系统”内查询。
4. 教学评价必须在“浙江大学物理实验教学中心网站” – “选课系统”内进行，学生必须进行教学评价，才能看到实验报告成绩，教学评价须在本次实验结束后 3 天内进行。

浙江大学物理实验教学中心制