

淮南师范学院实验报告

学院： 电子工程学院 专业： 物理学 班级： 请输入

学号： 请输入 姓名： 请输入 日期： 请输入

一、实验名称：拉伸法测量金属杨氏模量

二、实验目的：

- 学会用拉伸法测量金属丝的杨氏模量。
- 掌握光杠杆放大法测量微小伸长量的原理和方法。
- 掌握钢卷尺、游标卡尺、螺旋测微器和数字拉力计的正确使用方法。
- 学会用逐差法和最小二乘法处理实验数据。
- 掌握测量不确定度的估算及实验结果的规范表达。

三、实验原理：

（一）杨氏模量的定义

设金属丝原长为 L ，横截面积为 S ，沿长度方向受到拉力 F 后产生伸长量 ΔL 。在弹性限度内，正应力与线应变满足胡克定律：

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \frac{\Delta L}{L}$$

比例系数 E 为杨氏模量。对于直径为 d 的圆柱形金属丝， $S = \pi d^2/4$ ，且拉力 $F = mg$ ，因此：

$$E = \frac{4mgL}{\pi d^2 \Delta L}$$

（二）光杠杆放大原理

金属丝受力伸长时，光杠杆动足随夹头下降，使平面镜转过微小角度 θ 。根据反射定律，反射光线转角为 2θ 。设反射镜中心到标尺的垂直距离为 H ，光杠杆常数为 D ，望远镜中标尺刻度改变量为 Δx ；在小角度近似下有：

$$\Delta L = \frac{D \Delta x}{2H}$$

将其代入杨氏模量定义式，得到本实验的计算公式：

$$E = \frac{8mgLH}{\pi d^2 D \Delta x}$$

（三）逐差法与最小二乘法

加力和减力过程中，在同一拉力下分别读取标尺刻度 x_i^+ 与 x_i^- ，取二者平均值以减小回程差和弹性滞后的影响：

$$x_i = \frac{x_i^+ + x_i^-}{2}$$

逐差法取 $\Delta x_i = x_{i+5} - x_i$ ，对应质量增量 $m = 5.00 \text{ kg}$ ，再以五组逐差的平均值计算 E 。最小二乘法以拉力视值 m 为自变量、平均标尺刻度 x 为因变量，拟合直线 $x = km + b$ ；由于 $\Delta x = km$ ，可用斜率 k 计算：

$$E = \frac{8gLH}{\pi d^2 D k}$$

四、主要仪器设备：ZKY-YM 数显近距转镜式杨氏模量仪、数字拉力计、望远镜、光杠杆组件、薄膜标尺、钢卷尺、游标卡尺和螺旋测微器。

五、实验步骤：

- 检查金属丝上下夹头是否夹紧，连接数字拉力计和标尺背光源，开机预热约 10 min 。
- 调节光杠杆动足至适当高度，在纸上压出三足痕迹，作两前足连线的高并用游标卡尺测得光杠杆常数 D 。
- 施加约 3 kg 的预拉力，使金属丝拉直；用钢卷尺测量金属丝原长 L 和反射镜中心到标尺的距离 H 。
- 记录螺旋测微器零差 d_0 ，在金属丝不同位置、不同方向测量直径视值 6 次，并进行零差修正。
- 调节望远镜和反射镜，使标尺像及十字分划线清晰，并使初始读数处于标尺量程的较小端。
- 数字拉力计清零，缓慢加力，每增加 1 kg 记录一次标尺刻度；达到最大值后再缓慢减力，在相同拉力点记录减力刻度。
- 整理仪器，计算同一拉力下的平均刻度，分别用逐差法和最小二乘法求杨氏模量及其不确定度。

六、原始数据记录：

实验条件： L=720 mm，H=690 mm，D=35.26 mm；螺旋测微器零差 d_o=0.062 mm；重力加速度 g=9.80 m/s²。

表 1 一次性测量数据

L/mm	H/mm	D/mm
720	690	35.26

表 2 金属丝直径测量数据

序号 i	1	2	3	4	5	6	平均值
直径视值 d _视 /mm	0.578	0.595	0.581	0.590	0.560	0.588	0.582
修正直径 d/mm	0.516	0.533	0.519	0.528	0.498	0.526	0.520

表 3 加减力时标尺刻度与对应拉力数据

序号 i	1	2	3	4	5
拉力视值 m/kg	1	2	3	4	5
加力刻度 x ⁺ /mm	36.10	40.50	44.90	49.00	53.00
减力刻度 x ⁻ /mm	36.10	40.50	45.00	49.00	53.10
平均刻度 x/mm	36.10	40.50	44.95	49.00	53.05

序号 i	6	7	8	9	10
拉力视值 m/kg	6	7	8	9	10
加力刻度 x ⁺ /mm	57.20	61.50	65.90	70.00	74.10
减力刻度 x ⁻ /mm	57.80	62.00	66.00	70.00	74.10
平均刻度 x/mm	57.50	61.75	65.95	70.00	74.10
逐差 Δx _{i-5} /mm	21.40	21.25	21.00	21.00	21.05

七、数据处理：

（一）金属丝直径与逐差位移

螺旋测微器零差为正，故各次修正直径按 d_i=d_{视i}-d_o 计算。六次修正直径的平均值为：

$$\bar{d} = (1/6)\Sigma d_i = 0.520 \text{ mm}$$

同一拉力下取加力、减力刻度的平均值，再采用逐差法得到：

$$\Delta x_i = x_{i+5} - x_i = 21.40, 21.25, 21.00, 21.00, 21.05 \text{ mm}$$

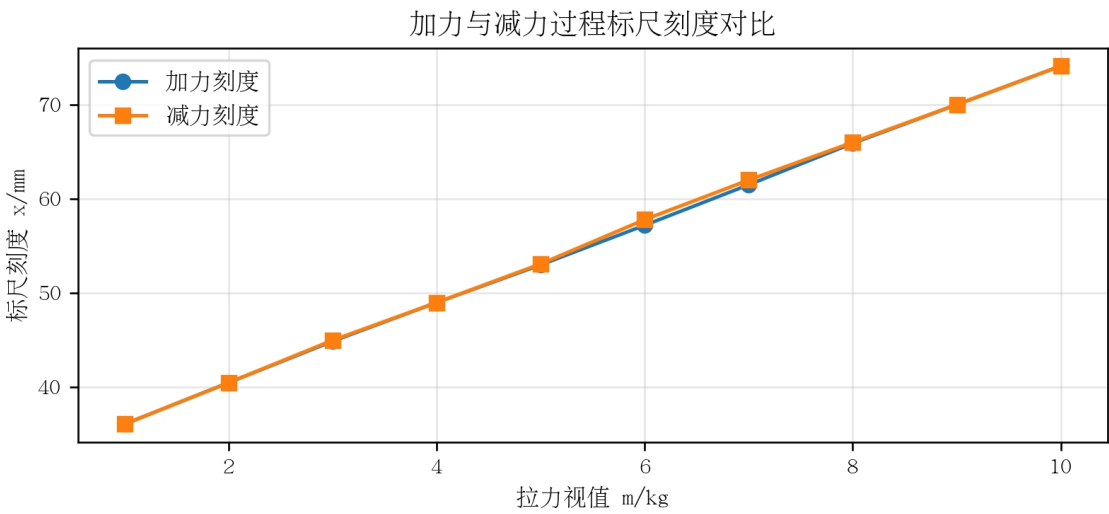
$$\Delta \bar{x} = (1/5)\Sigma \Delta x_i = 21.14 \text{ mm}$$

（二）逐差法计算杨氏模量

逐差间隔为 5 个拉力等级，对应质量增量 m=5.00 kg。将各物理量换算为 SI 单位，代入计算公式：

$$E = \frac{8mgLH}{\pi d^2 D \Delta x} = 3.076 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

故逐差法得到金属丝杨氏模量 E≈3.08×10¹¹ Pa。



（三）标准不确定度分析

一次性测量量 L、H、D 仅考虑 B 类标准不确定度；金属丝直径 d 和逐差位移 Δx 同时考虑 A 类与 B 类标准不确定度。按仪器误差限计算：

物理量	标准不确定度	物理量	标准不确定度
L	0.462 mm	H	0.462 mm
D	0.0115 mm	m	0.0041 kg
d	0.0056 mm	Δx	0.2995 mm

$$u_r(E) = \sqrt{[(u_m/m)^2 + (uL/L)^2 + (uH/H)^2 + (2u_d/d)^2 + (u_D/D)^2 + (u_{\Delta x}/\Delta x)^2]}$$

$$u(E) = E \cdot u_r(E) = 0.079 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

逐差法的相对标准不确定度为 2.57%，结果按不确定度位数修约后表示为：

$$E=(3.08\pm0.08)\times10^{11}\text{Pa}$$

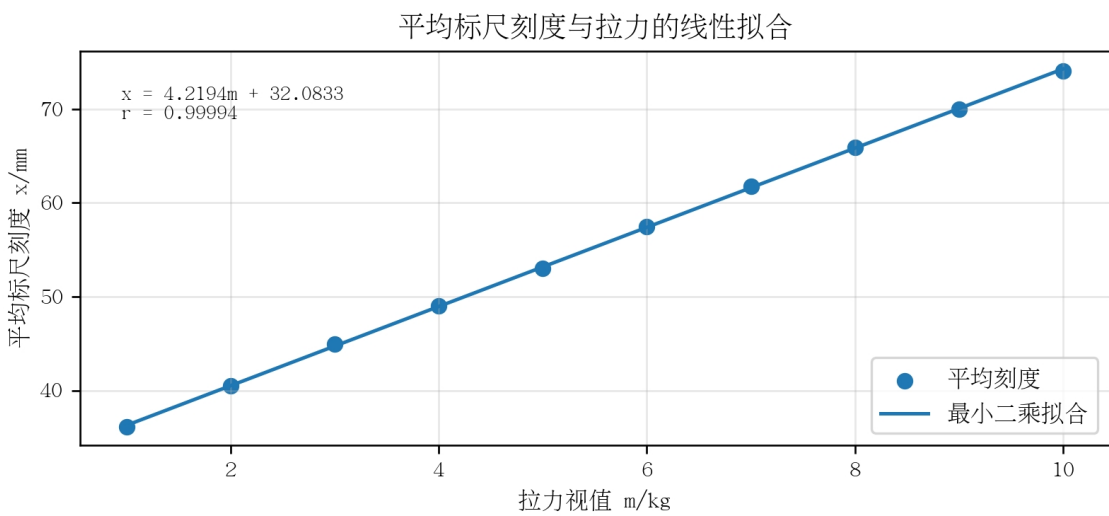
（四）最小二乘法处理

以拉力视值 m 为横轴、平均标尺刻度 x 为纵轴进行直线拟合，得到：

$$x = km+b = 4.2194m+32.0833 \text{ (mm)}$$

$$r = 0.99994$$

相关系数接近 1，表明平均标尺刻度与拉力之间具有良好的线性关系。在实验拉力范围内，金属丝基本满足胡克定律。



用拟合斜率 k 代替 $\Delta x/m$ ，计算杨氏模量：

$$E=\frac{8gLH}{\pi d^2Dk}=3.082\times10^{11}\text{ Pa}$$

斜率标准不确定度 $u_k=0.0164\text{ mm/kg}$ 。按不确定度传递计算， $u(E)=0.067\times10^{11}\text{ Pa}$ ，相对标准不确定度为 2.18%。因此：

$$E=(3.08\pm0.07)\times10^{11}\text{Pa}$$

八、实验结果与讨论：

（一）关于实验规律

实验数据显示，随着拉力视值由 1 kg 增加到 10 kg，平均标尺刻度由 36.10 mm 增至 74.10

mm，整体近似线性增加。最小二乘拟合相关系数 $r=0.99994$ ，说明在本实验的加载范围内，金属丝的伸长量与所受拉力近似成正比，符合胡克定律。

（二）关于两种数据处理方法

逐差法得到 $E=(3.08\pm0.08)\times10^{11}\text{ Pa}$ ，最小二乘法得到 $E=(3.08\pm0.07)\times10^{11}\text{ Pa}$ 。两种方法的中心值几乎一致，表明数据内部一致性较好。最小二乘法利用了全部测量点，受单个读数波动的影响较小，所得相对标准不确定度略低。

（三）关于加減力差异

加力与减力读数总体接近，但在 6~8 kg 附近减力刻度略高于加力刻度，最大差值约为 0.6 mm。这种差异可能与金属丝、夹头及光杠杆机构的弹性滞后、摩擦和微小回程差有关。取同一拉力下的平均刻度能够在一定程度上减弱该影响。

（四）关于误差分析

产生误差的主要原因包括：

- (1) 金属丝直径较小，且杨氏模量公式中 d 以平方形式出现，因此螺旋测微器零差、测量位置差异和读数误差会被放大，是主要不确定度来源。
- (2) 光杠杆常数 D 、金属丝原长 L 及标尺距离 H 的测量存在仪器误差和端点定位误差。
- (3) 加力和减力过程中存在弹性滞后、夹头微滑移、螺母回程差以及施力速度不完全一致等影响。
- (4) 望远镜分划线与标尺刻度的对准具有主观性，实验台振动和反射镜微小晃动也会造成读数波动。
- (5) 理论推导采用小角度近似，并假设金属丝始终处于均匀、纯轴向拉伸状态；装置偏斜或金属丝初始弯曲会带来系统偏差。

（五）实验结论

本实验利用光杠杆法放大金属丝的微小伸长量，分别采用逐差法和最小二乘法处理数据，验证了弹性范围内伸长量与拉力的线性关系。综合两种方法，金属丝杨氏模量约为 $3.08\times10^{11}\text{ Pa}$ ，实验达到了预定目的。