

用新型杠杆-光杠杆放大法测定金属丝的杨氏模量

杨氏模量是工程材料重要参数，它反映了材料弹性形变与内应力的关系，它只与材料性质有关，是选择工程材料的重要依据之一。任何物体在外力的作用下，都会发生形变，对于弹性物体，若作用的外力不太大时，则在外力作用停止后，由此引起的形变亦随之消失，这种形变称为弹性形变。

杨氏模量是反映物体在外力作用下发生形变难易程度的重要物理量，它仅与材料的性质有关，而与材料形状、长短等无关。它是工程技术中机械构件选材时的重要参数。本实验不仅介绍了如何测定此参数，更重要的是通过实验可以领会仪器的配置原则，了解为什么对不同的长度测量应选用不同的测量仪器，以及在测量中由于测量对象及方法的改变如何估算其系统误差。在实验方法上，通过本实验可以看到，以对称测量法消除系统误差的思路在其它类似的测量中极具普遍意义。在实验装置上的光杠杆镜放大法，由于它的性能稳定、精度高，而且是线性放大，所以在设计各类测试仪器中得到广泛的应用。

【实验原理】

设长为 L ，截面积为 S 的均匀金属丝，在两端以外力 F 相拉后，伸长 ΔL 。实验表明，在弹性范围内，单位面积上的垂直作用力 F/S （正应力）与金属丝的相对伸长 $\Delta L/L$ （线应变）成正比，其比例系数就称为杨氏模量，用 Y 表示，即

$$Y = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{FL}{S\Delta L} \quad (1)$$

这里的 F 、 L 和 S 都易于测量， ΔL 属微小变量，我们将用光杠杆放大法测量。

放大法是一种应用十分广泛的测量技术。我们将在本课程中接触到机械放大、光放大、电子放大等测量术。如螺旋测微计是通过机械放大而提高测量精度的，示波器是通过将电子信号放大后进行观测的。本实验采用的光杠杆法是属光放大技术。光杠杆放大原理被广泛地用于许多高灵敏度仪表中，如光电反射式检流计、冲击电流计等。

放大法的核心是将微小变化量输入一“放大器”，经放大后再作精确测量。

设微小变化量用 ΔL 表示，放大后的测量值为 N ，我们称

$$A = \frac{N}{\Delta L}$$

为放大器的放大倍数。原则上 A 越大，越有利于测量，但往往会引起信号失真。研究保真技术已成为测量技术的一个专门领域。

测量杨氏弹性模量的原理公式

设金属丝的直径 d ，将 $S = \frac{\pi d^2}{4}$ 带入式 (1)：

$$Y = \frac{4FL}{\pi d^2 \Delta L} \quad (2)$$

光杠杆放大原理：

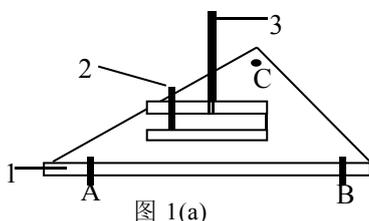


图 1(a)

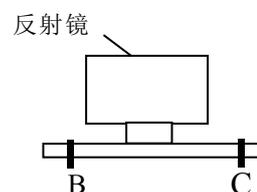


图 1(b)

图 1 (a) 为新型光杠杆的结构示意图。在等腰三角形铁板 1 的三个角上，各有一个尖头螺钉，底边连线上的两个螺钉 B 和 C 称为前足尖，顶点上的螺钉 A 称为后足尖，2 为光杠杆倾角调节架，3 为光杠杆反射镜。调节架可使反射镜作水平转动和俯仰角调节。测量标尺在反射镜的侧面并与反射镜在同一平面上，如图 2 (b) 所示。测量时两个前足尖放在杨氏模量测定仪的固定平台上，后足尖则放在待测金属丝的测量端面上，该测量端面就是与金属丝下端夹头相固定连接的水平托板。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角度，从而带动光杠杆反射镜转动相应的微小角度，这样标尺的像在光杠杆反射镜和调节反射镜之间反射，便把这一微小角度移放大成较大的线位移。这就是光杠杆产生光放大的基本原理。下面我们来导出本实验的测量原理公式。

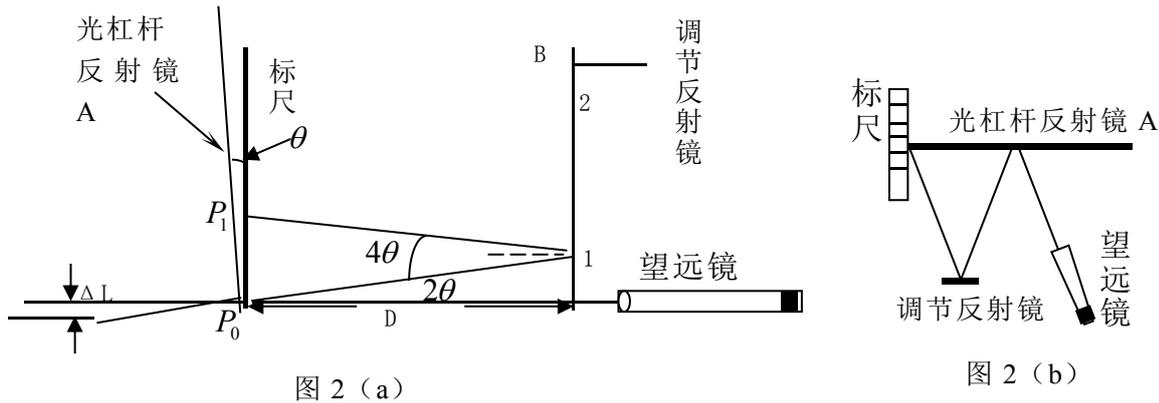


图 2(a) 为 NKY-B₁ 型光杠杆放大原理示意图；标尺和观察者在两侧，如见图 2 (b) 所示。开始时光杠杆反射镜与标尺在同一平面，在望远镜上读到的标尺读数为 p_0 ，当光杠杆反射镜的后足尖下降 ΔL 时，产生一个微小偏转角 θ ，在望远镜上读到的标尺读数 p_1 ， $P_1 - P_0$ 即为放大后的钢丝伸长量 N ，常称作视伸长。由图可知

$$\Delta L = b \tan \theta \approx b\theta$$

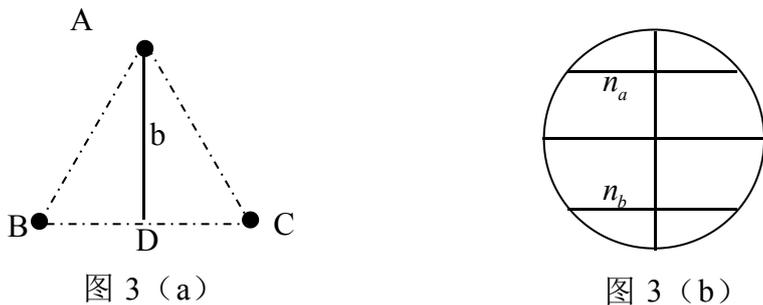
$$N = P_1 - P_0 = D \tan 4\theta \approx 4D\theta$$

所以它的放大倍数为 $A_0 = \frac{N}{\Delta L} = \frac{P_1 - P_0}{\Delta L} = \frac{4D}{b}$ 带入式 (2) 可得：

$$Y = \frac{16FLD}{\pi d^2 b N} \quad (3)$$

式中 b 称为光杠杆常数或光杠杆腿长，为光杠杆后足尖 A 到两前足尖 BC 连线的垂直距离，如图 3 所示 D 为反射平面镜到标尺即光杠杆反射镜之间的距离。

式中 b 称为光杠杆常数或光杠杆腿长，为光杠杆后足尖 A 到两前足尖 BC 连线的垂直距离，如图 4(a)



D为反射平面镜到标尺的距离，用光学方法测量，调节望远镜的目镜。聚焦后可清晰地看到叉丝平面上有上、中、下三条平行基准线，如图4(b)所示，其中心分别记为a、f、b，中间基准线称为测量准线，用于读取金属丝长度变化的测量值 n_1, n_2, \dots ，上下两条准线称为辅助准线。根据光学原理可以导出

$$D = \frac{100}{3} \times \text{视距}$$

【实验内容】

1. 将光杠杆放置好，两前足尖放在平台槽内，后足尖置于与钢丝固定的圆形托盘上，并使光杠杆反射镜平面与照明标尺基本在一个平面上。
2. 调节光杠杆平面镜的倾角螺钉，使平面镜与平台面基本垂直。
3. 调节望远镜高度，使其与光杠杆基本处于等高位置。
4. 调节反射镜的倾角螺丝，使反射镜镜面与光杠杆镜面基本平行。
5. 转动调节反射镜的同时，通过目测观察照明标尺在光杠杆反射镜的二次反射像。
6. 将望远镜对准照明标尺在光杠杆上的像，然后调节望远镜的目镜和物镜焦距，看清叉丝平面的三条准线和光杠杆反射回的标尺像并无视差。上述步骤属于光路调节，调节前要动脑筋，体会光路调节中的“等高同轴要领”的含义，就一定会获得满意的图象。
7. 加载过程 在砝码盘中，每加一个砝码(100g)观测一次标尺读数。读取相应的数据，填入记录表格中。然后逐一减少砝码读取相应数据，记入相应的表格中。为了减少驰豫现象的影响，每测取一组数据，请停留 15 秒钟左右。
8. 重复上述步骤，重做一遍。
9. 测量 D, L, b, d 值，其中 D, L, b 只测一次，d 用千分尺在金属丝的不同位置测 6 次，记入自行设计表格中。

【数据记录】

标尺读数记录

次数	拉力示值 (kg)	标尺读数 (mm)						逐差值 (mm)		
		第一次			第二次			逐差 1	逐差 2	
		加载	减载	平均 1	加载	减载	平均 2			
0								$N_1 = P_5 - P_0 $		
1								$N_2 = P_6 - P_1 $		
2								$N_3 = P_7 - P_2 $		
3								$N_4 = P_8 - P_3 $		
4								$N_5 = P_9 - P_4 $		
5								\bar{N}		
6								总平均 \bar{N}		
7										
8										

9								
---	--	--	--	--	--	--	--	--

注：

这里列举了 8 组数据进行逐差，具体做法由各校自定，加力范围最好选在 10.00-25.00 kg，以便有 10.00Kg 的预拉力。

【思考题】

1. 杨氏模量测量数据 N 若不用逐差法而用作图法处理，请想一想如何处理？
2. 根据误差分析，要使 Y 的实验结果理想，关键应抓住什么量进行测量？为什么？为什么不同的长度量（共几个）要用不同仪器进行测量（有哪几种）？
3. 用光杠杆放大法测量微小长度变化有什么优点？怎样提高光杠杆放大系统的放大倍数？
4. 试证明：若测量前光杠杆反射镜与调节反射镜不平行，不会影响测量结果。
5. 怎样才能又快又好调节光路，试画出光路图并说明其原理。

【附录 1】 操作要点：

调节好光路是本实验的基础，为此必须充分理解光杠杆的放大原理。调节好照明标尺-调节反射镜-光杠杆反射镜-望远镜光路系统，使照明标尺在光杠杆反射镜中的反射像能进入望远镜；调节望远镜的目镜和物镜焦距，确保在望远镜中能清晰且无视差地看到叉丝平面的三条准线和标尺像的刻度线。弄清光杠杆和调节反射镜调节俯仰角的方法，操作时动作要轻，要精细准确。

【附录 2】 系统误差分析与消减办法

1. 由于钢丝不直或钻头夹具夹得不紧将出现假伸长，为此，必须用力将钻头卡夹紧钢丝。同时，在测量前应将金属丝拉直并施加适当的预拉力。
2. 由于钢丝在加外力后，要经过一段时间才能达到稳定的伸长量，这种现象称为滞后效应，这段时间称为驰豫时间。为此每次加力后应等到显示器数据稳定后再进行测读数据。
3. 金属丝（钢丝）锈蚀或长期受力产生所谓金属疲劳，将导致应力集中或非弹性形变，因当发生钢丝锈蚀或使用 2 年以上应作更换。
4. 砝码的误差，本实验所用的砝码是按国家 M1 级做的，其精度为 $\pm 10\text{mg}$ ，200g 的砝码的正确表达是 $200.000 \pm 10\text{g}$ ，可见其精度是很高的，可以忽略不计。
5. 加力杠杆系统的误差 其加工精度为 0.5%
6. 关于其他测量量的误差分析与估算：
 - （1）由于测量条件的限制， L, D, b 三个量只作单次测量，它们的误差限应根据具体情况估算。其中 L, D 用钢尺测量时，其极限误差可估算为 $1 \sim 3\text{mm}$ 。
 - （2）测量光杠杆常数 b 的方法是：将三个足尖压印在硬纸板上，作等腰三角形，从后足尖至两前足尖连线的垂直距离即为 b 。由于压印，作图连线宽度可达 $0.2 \sim 0.3\text{mm}$ ，故其误差限可估算为 0.5mm 。
 - （3）金属丝直径 d 用千分尺多次测量时，应注意测点要均匀地分布在上、中、下不同位置，千分尺的仪器误差取 0.004mm 。