

# 拉伸法测量金属丝杨氏模量拓展实验设计及实践研究

罗琪, 闫涵, 张宁, 卞一霖, 李晓兰\*, 孙士帅

天津理工大学理学院, 天津

收稿日期: 2022年6月22日; 录用日期: 2022年7月13日; 发布日期: 2022年7月25日

## 摘要

拉伸法测量金属丝杨氏模量实验是大学物理实验课程的重要组成部分, 通过对金属丝微小形变量的测量掌握光杠杆的原理是实验中的重要内容。光杠杆是以镜子作为支点, 光路作为放大臂的重要放大测量装置, 广泛的应用于各种精密测量中。光杠杆的放大臂常常称为光杠杆镜面到标尺的距离, 这段距离究竟是光杠杆镜面到标尺的垂直距离还是光杠杆镜面到标尺的直线距离常常引起学生困扰。以往的实验研究大多关注如何提高光杠杆放大率或者提高光杠杆的探测精度, 很少涉及来清楚的展示光杠杆的放大臂具体指的是那段距离。本文针对学生常常混淆的光杠杆放大臂测量, 设计了大角度光杠杆实验作为杨氏模量实验的拓展实验。通过将望远镜和尺子分开, 通过测量在不同尺子和光杠杆中垂线夹角时金属丝的伸长量来区分光杠杆放大臂的真正长度。经过多次实验, 证实在不同尺子和光杠杆中垂线夹角时金属丝的伸长量基本是相同的, 变化不超过0.6%, 非常清楚的示意出光杠杆镜面与尺子的垂直距离才是光杠杆放大臂的真正长度。经过调研, 通过拓展实验学生清楚的了解光杠杆的放大臂, 更加深入的掌握了测量原理, 并且熟练了望远镜的操作。

## 关键词

光杠杆, 杨氏模量, 放大臂, 垂直距离

# Experimental Design and Practical Study on Extending Young's Modulus Measurement of Wire by Tensile Method

Qi Luo, Han Yan, Ning Zhang, Yilin Bian, Xiaolan Li\*, Shishuai Sun

School of Science, Tianjin University of Technology, Tianjin

Received: Jun. 22<sup>nd</sup>, 2022; accepted: Jul. 13<sup>th</sup>, 2022; published: Jul. 25<sup>th</sup>, 2022

\*通讯作者。

文章引用: 罗琪, 闫涵, 张宁, 卞一霖, 李晓兰, 孙士帅. 拉伸法测量金属丝杨氏模量拓展实验设计及实践研究[J]. 传感器技术与应用, 2022, 10(3): 443-448. DOI: 10.12677/jsta.2022.103054

## Abstract

The experiment of measuring young's modulus of metal wire by tensile method is an important part of college physics experiment course. In addition, it is important to master the principle of light lever by measuring the tiny deformation of metal wire in the experiment. The light lever is an important magnifying measuring device using a mirror as a fulcrum and an optical path as a magnifying arm, which is widely used in various precision measurements. The magnification arm of the light lever used to be often called the distance from the mirror of the light lever to the scale. Whether this distance is the vertical distance from the mirror of the light lever to the scale or the straight distance from the mirror of the light lever to the scale often causes students to be troubled. Most of the previous experimental studies have focused on how to increase the magnification of the light lever or improve the detection accuracy of the light lever, but it is not yet possible to show clearly the real distance of the magnification arm. In this paper, a large Angle light lever experiment is designed as an extension of Young's modulus experiment. The true length of the optical lever amplifying arm is distinguished by separating the telescope from the ruler and measuring the elongation of the wire at the Angle between perpendiculars of different rulers and the optical lever. After many experiments, it is proved that the elongation of the metal wire is basically the same at the Angle between the vertical line of different rulers and the optical lever, and the change is not more than 0.6%. It clearly indicates that the vertical distance between the mirror of the light lever and the ruler is the real length of the optical lever magnifying arm. After investigation, the students clearly understood the amplification arm of the optical lever, grasped the measurement principle more deeply, and became proficient in the operation of the telescope through expanding the experiment.

## Keywords

Light Lever, Young's Modulus, Magnifying Arm, Vertical Distance

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

杨氏模量是表征材料弹性形变性质的一个重要物理量，是建筑工程中材料选择需要参考的重要参数[1]。用拉伸法测量金属丝杨氏模量是大学物理实验课程的大多数高校中必开的一项实验[2]。由于常见金属的单位形变量  $\Delta L$  通常非常微小，常常采用光杠杆法来进行放大测量。光杠杆法以光路作为放大臂，广泛的应用于很多精密测量中如原子力显微镜，精密天平等[3] [4] [5]。拉伸法测量金属丝杨氏模量实验中，除了要同学理解杨氏模量的物理意义外，掌握光杠杆的放大原理也非常的重要[6]。

为了提高光杠杆的放大精度，以往人们对光杠杆法提出了很多改进，如：通过多次反射增加光杠杆的放大臂臂长[7] [8]、利用激光和 PSD 探测器进行探测[9] [10]、形成多级光杠杆[11] [12]、利用变异的光杠杆镜面[13]，及结合光干涉方法[14] [15]等。课本和研究中常常把光杠杆的放大臂解释为光杠杆镜面到标尺的距离或镜尺距离，这段距离究竟是光杠杆镜面到标尺的垂直距离还是光杠杆镜面到标尺的直线距离常常引起学生困扰。以往的实验研究大多关注如何提高光杠杆放大率或者提高光杠杆的探测精度，尚无法清楚的展示光杠杆的放大臂具体指的是那段距离。

针对这一问题，设计了大角度光杠杆实验作为杨氏模量拓展实验。将以往的望远镜与尺子分开，在不同尺子和光杠杆中垂线夹角时金属丝的伸长量，实验结果表明在不同夹角下变化不超过 0.6%，非常清楚的示意出望远镜与尺子的垂直距离才是光杠杆放大臂的真正长度。经过调研，通过拓展实验学生清楚的了解光杠杆的放大臂，更加深入的掌握了测量原理，并且熟练了望远镜的操作。

## 2. 测量原理及实验设计

根据胡克定律，如果在外力  $F$  的作用下，原长  $L$  的金属丝在弹性限度内产生形变  $\Delta L$ ，则金属丝的杨氏模量可表示为：

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

其中， $S$  为金属丝的横截面面积。由于  $\Delta L$  通常非常微小，所以大学物理实验中常常采用光杠杆法来进行测量。

光杠杆测量金属丝微小形变量的原理如图 1 所示，当镜子的后支点发生微小形变量  $\Delta L$ ，会引起镜子倾斜，倾斜角度为  $\theta$ 。望远镜中像位置发生改变的距离可表示为：

$$\tan \theta = \frac{\Delta L}{b} \quad (2)$$

$$\Delta n = x \tan(2\theta) = x \tan\left(2 \arctan \frac{\Delta L}{b}\right) \quad (3)$$

其中， $b$  为光杠杆装置的杆长， $x$  通常表述为光杠杆镜面到标尺的距离或镜尺距离。

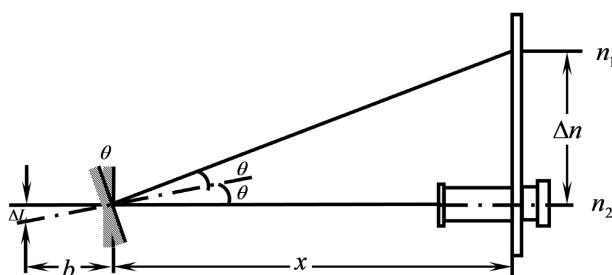


Figure 1. Schematic diagram of optical lever method  
图 1. 光杠杆法原理图

根据三角函数的特点，当角度小于  $3^\circ$  时，可满足  $\tan \varphi = \varphi$ ，那么微小形变量可表示为

$$\Delta L = \frac{b}{2x} \cdot \Delta n \quad (4)$$

可以看出  $x$  为光杠杆的重要测量。在图 1 的视图中  $x$  的距离非常清楚，但是在实际测量中望远镜和标尺并不是一个点，如上视图图 2 所示，望远镜和标尺固定在一个移动架上，两者之间约有 10 cm 的间距，那么“ $x$  为图中的  $x_1$  还是  $x_2$ ？”从图 1 的侧视图中， $x_1$  还是  $x_2$  是分辨不出来的，图 2 中  $x_2$  为镜子和尺子之间的直线距离，也是光走过的真正距离，究竟光杠杆镜面到尺子的垂直距离还是直线距离为真正的光杠杆放大臂距离。这引起了学生的极大困惑。

常用的光杠杆装置尺子和望远镜是固定在一个支架上的，之间的间距通常小于 10 cm。对于  $x_1$  大于 1 m 的情况下， $x_1$  还是  $x_2$  相差非常小，无法通过最终杨氏模量的测量数值来验证  $x$  为图中的  $x_1$  还是  $x_2$ 。对

于在实验室中测量金属丝杨氏模量时,  $x$  采用  $x_1$  和  $x_2$  并不会对测量结果有明显影响, 但是在实际一些应用  $x_1$  较小时尤其是在进行多光杠杆实验时, 还是会有较大的影响的。

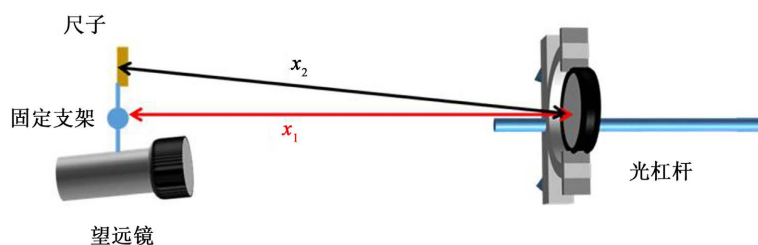


Figure 2. Top view of optical lever method  
图 2. 光杠杆法测量俯视图

因此为了让学生更清楚, 设计了大角度光杠杆实验。实验设计如图 3 所示, 将原本固定在一起的望远镜与尺子分开, 望远镜斜对光杠杆镜面。测量在不同角度入射的情况下, 金属丝发生的单位弹性形变量。随着入射角度增加,  $x_1$  和  $x_2$  的差别增加, 同时尺子距离光杠杆中心轴线偏离  $p$  越远。 $p$  越远测量要比入射角度更容易, 因此, 实验设计为在不同的  $p$  越远测量下测量金属丝发生的单位弹性形变量。

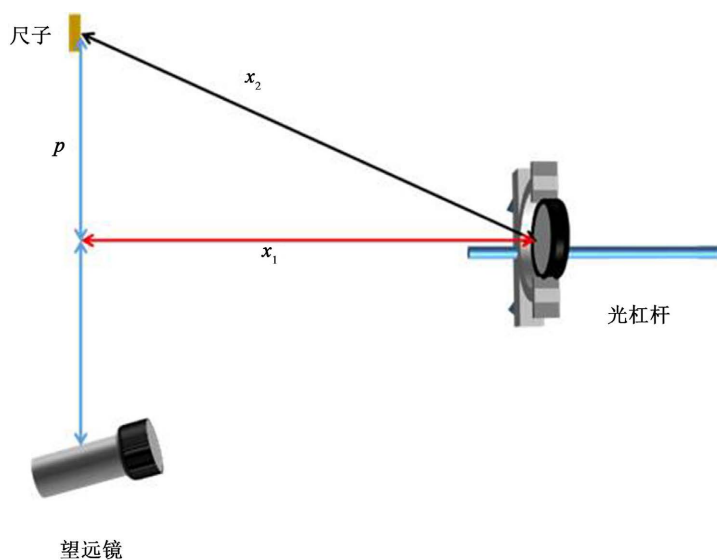


Figure 3. Schematic diagram of large angle incident light lever method  
图 3. 大角度入射光杠杆法测量示意图

### 3. 测量结果及分析

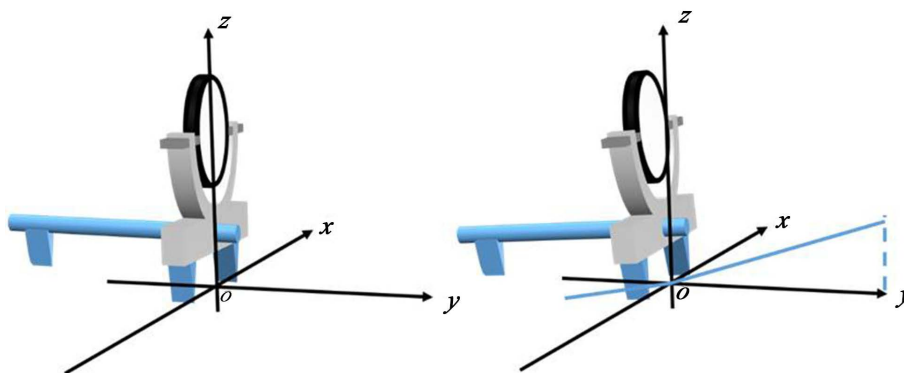
测量使用的金属丝直径为  $0.700 \mu\text{m}$ , 所使用的光杠杆的杆长为  $7.444 \text{ cm}$ 。为了保持每次测量中  $x_1$  不发生变化, 用一个标尺沿  $p$  变化做一个辅助线。

表 1 为在不同的  $p$  值下的测量的, 随着增加和减小砝码望远镜中心观察到的尺子的像的变化。利用逐差法计算获得,  $p$  为  $21.00$ ,  $46.00$  和  $48.00 \text{ cm}$  时,  $6 \text{ kg}$  砝码对应的放大后的位移量  $\Delta n_6$  分别  $1.90$ ,  $1.91$  和  $1.91 \text{ cm}$ 。常用的光杠杆  $p$  为  $5.00 \text{ cm}$  时,  $6 \text{ kg}$  砝码对应的放大后的位移量  $\Delta n_6$  为  $1.91 \text{ cm}$ 。通过对比可以发现, 不同  $p$  值情况下对金属丝的伸长量变化的放大量基本是一致的, 可以明确表示光杠杆的放大臂为  $x_1$  而不是  $x_2$ 。

**Table 1.** The image changes with the weight observed in telescopes at different P-valued location  
**表 1.** 不同  $p$  值望远镜中观察到的尺子的像随砝码的变化

M (kg)	$p = 21.00$ (cm)			$p = 46.00$ (cm)			$p = 68.00$ (cm)		
	$n_i$ (cm)			$n_i$ (cm)			$n_i$ (cm)		
	增加	减小	平均值	增加	减小	平均值	增加	减小	平均值
0	3.94	3.94	3.94	4.69	4.70	4.70	5.18	5.10	5.14
2	3.12	2.90	3.01	3.82	3.66	3.74	4.38	4.10	4.24
4	2.50	2.30	2.40	3.27	2.99	3.13	3.78	3.43	3.60
6	1.95	1.75	1.85	2.69	2.41	2.55	3.20	2.89	3.04
8	1.23	1.12	1.18	2.05	1.89	1.97	2.50	2.30	2.40
10	0.60	0.60	0.60	1.32	1.32	1.32	1.80	1.80	1.80
$\Delta n_6$	1.90			1.91			1.91		

以光杠杆和镜面建立坐标系, 如图 4 所示, 杆的方向为  $y$  轴, 前足支点连线为  $x$  轴, 垂直  $xoy$  平面的为  $z$  轴。当光杠杆后足下降或上升, 引起的镜面的倾斜角度只产生在  $yozy$  平面, 所以只有在  $y$  方向的距离才起作用。因此镜尺距离为  $x_1$  而不是  $x_2$ 。



**Figure 4.** Three-dimensional diagram of tilt angle of the light lever  
**图 4.** 光杠杆倾斜角度三维示意图

为了进一步保证实验准确性, 对每个实验条件下进行了多次测量, 测量结果记录计算获得 6 kg 砝码对应的放大后的位移量  $\Delta n_6$  记录如表 1 所示。

**Table 2.** Comparison of total image changes with the weight observed in telescopes at different P-valued location  
**表 2.** 不同  $p$  值望远镜中观察到的尺子的像随砝码的变化

$p$ (cm)	21.00	21.00	46.00	46.00	48.00	48.00
$\Delta n_6$ (cm)	1.89	1.90	1.91	1.89	1.89	1.91

从表 2 中可以看出在不同夹角下变化不超过 0.6%, 进一步证实望远镜与尺子的垂直距离才是光杠杆放大臂的真正长度。

## 4. 结论

本文设计了大角度光杠杆实验作为杨氏模量拓展实验, 通过将望远镜与尺子分开, 以不同角度斜对光杠杆镜面来测量金属丝随砝码的伸长量。大角度光杠杆实验更清楚的解释了光杠杆放大臂的距离, 方便学生理解和进一步利用不对称的多级光杠杆。并且实验仪器没有增加新的装置, 非常适合开展拓展实验。

## 基金项目

天津理工大学校级教材建设基金项目 JC21-01。

## 参考文献

- [1] 赵莹, 罗旺, 李奇楠. 用读数显微镜法测量发丝的杨氏弹性模量[J]. 高师理科学刊, 2019, 39(11): 41-43.
- [2] 张雷, 肖梅, 潘渊, 等. 集成式杨氏模量测量综合实验教学设备的设计与实现[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(6): 112-116.
- [3] Anand, V., Bhattacharya, S. and Rosen, J. (2019) Spatial Multiplexing Technique for Improving Dynamic Range of Speckle Correlation Based Optical Lever. *Scientific Reports*, 9, Article No. 16035. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52394-0>
- [4] Tan, R.S., Chen, C., Zheng, Y.Q., et al. (2021) High-Precision Calibration Method for Fiber Bragg Grating Strain Sensing Based on an Optical Lever. *Optical Fiber Technology, Optical Fiber Technology*, 61, Article ID: 102392. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102392>
- [5] 张会玲, 鲍丙豪, 吴迪, 等. 基于 PSD 光杠杆自平衡精密电磁天平的研究[J]. 传感技术学报, 2019, 32(5): 779-783.
- [6] 郭涛, 盛琛, 杨悦. 光杠杆测量杨氏模量的研究[J]. 大学物理, 2016, 35(3): 40-42+53.
- [7] 顾倍康, 柳铄, 刘振鹏, 等. 基于旋转上升式光路的小型光杠杆[J]. 物理实验, 2020, 40(5): 54-57+61.
- [8] 胡训美, 张波. 近距二次反射法测量金属丝杨氏模量[J]. 皖西学院学报, 2020, 36(2): 76-79.
- [9] 黎绮毓, 刘树娜, 程丽桦. 激光反射法测量金属丝杨氏模量的改进[J]. 科技风, 2019(21): 140.
- [10] 王建伟, 易俊全, 罗浩, 等. 基于杨氏模量仪的微小伸长量测量方法改进与实践[J]. 大学物理实验, 2018, 31(3): 55-58.
- [11] 殷鹏飞, 薛健, 王杨. 多级光杠杆放大原理及探讨[J]. 大学物理实验, 2012, 25(1): 20-22.
- [12] 骆敏, 黄嘉欣, 余观夏. 拉伸法测量金属丝杨氏模量实验仪器的改进[J]. 大学物理实验, 2020, 33(5): 92-94.
- [13] Yao, Z., Xia, X.C., Hou, Y.P., et al. (2019) Metasurface-Enhanced Optical Lever Sensitivity for Atomic Force Microscopy. *Nanotechnology*, 30, Article ID: 365501. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab2435>
- [14] 文硕, 田星雨, 严琪琪, 等. 基于双光栅夹角变化测量金属丝杨氏模量[J]. 大学物理, 2020, 39(8): 58-63.
- [15] 赵杰, 杨偲源. 基于莫尔条纹的金属杨氏模量测量[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(8): 92-95.