

文章编号:1005-4642(2021)06-0055-04

居家环境下运用光衍射法测量弹性模量实验的设计

张澍辰^a,朱 玲^b,梁 燕^b

(中国科学技术大学 a. 少年班学院; b. 物理实验教学中心,安徽 合肥 230026)

摘 要:居家环境下,利用生活材料搭建了基于光衍射法测量金属丝弹性模量的实验装置. 并设计了简易螺旋测微器,提高了金属丝直径测量的精度. 实验测得弹性模量的结果表明,此方案适合学生居家实验. 该实验的完成,不仅锻炼了学生利用常见材料自主设计实验装置的能力,同时使学生对弹性模量及光衍射的理论知识有了更深刻的理解.

关键词:弹性模量;拉伸法;衍射;居家实验;螺旋测微器

中图分类号:O343;O436.1

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.06.009

拉伸法测量金属丝弹性模量是大学物理基础实验之一^[1]. 受疫情影响,大学物理基础实验难以在实验室进行,学生需要在缺乏实验室设备的条件下,利用生活材料搭建装置完成该实验^[2]. 相较于传统的光杠杆法,运用光衍射法测量金属丝受力时的微小变化量具有更高的精度;同时由于光衍射法是非接触方法,不需要在被测金属丝上连接整套杠杆装置,因而具有更好地灵敏性和稳定性^[3]. 相对而言,光衍射法对实验室设备的稳定性、精密度的要求更高,在居家条件下实现相对困难. 如果能够运用生活用品在非实验室环境下完成光衍射法的实验,不仅能够提高居家实验中弹性模量测量实验的精度,也能更好的锻炼学生的实验设计能力、动手组装实验装置的能力和观察实验现象的能力,同时也加深了学生对光的衍射理论的理解.

1 实验原理

1.1 弹性模量

弹性模量是描述固体材料抵抗形变能力的物理量^[4],是弹性材料最重要的力学性质之一,其大小仅取决于材料本身的物理性质. 材料受力后发生形变,在弹性限度内,条形材料(例如金属丝)

沿纵向的应力(单位面积上所受的力)与应变(长度相对伸长)之比,称为弹性模量. 根据定义弹性模量为

$$E = \frac{F}{\frac{S}{\Delta L}} = \frac{FL}{S\Delta L}, \quad (1)$$

其中, F 为施加在金属丝上的拉力, S 为金属丝的横截面积, L 为金属丝的长度, ΔL 为金属丝受力后的伸长量.

1.2 单缝夫琅禾费衍射

光的衍射可分为菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射^[5],其中夫琅禾费衍射是远场条件下衍射波趋于平面波的衍射,实验室条件下,通常通过增加透镜实现. 单缝夫琅禾费衍射图样由一系列明暗相间的衍射条纹组成. 其中中央零级条纹聚集了绝大部分光能,光强最强且宽度是其他亮条纹的 2 倍. 改变缝宽,中央亮条纹宽度也将随之变化. 本实验通过测量中央亮条纹宽度的变化来计算金属丝长度的变化. 根据夫琅禾费单缝衍射实验理论^[6],设狭缝到光屏距离为 a ,激光波长为 λ ,中央亮条纹宽度为 l ,则狭缝宽度为

$$b = \frac{2\lambda a}{l}, \quad (2)$$

收稿日期:2020-11-02;修改日期:2021-01-12

基金项目:中国科学技术大学教学研究资助项目(No. 2020xjyxm059)

作者简介:张澍辰(2005—),男,陕西西安人,中国科学技术大学少年班学院 2019 级本科生. E-mail: violet01@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:梁 燕(1967—),女,广东佛山人,中国科学技术大学物理实验教学中心高级实验师,学士,从事大学物理实验教学和凝聚态物理研究. E-mail:yanliang@ustc.edu.cn



记狭缝宽度变化为 Δb , 初始时中央亮条纹宽度为 l_0 , 加载一定重物后中央亮条纹宽度为 l , 则金属丝的伸长量 ΔL 为

$$\Delta L = -\Delta b = 2\lambda a \left(\frac{1}{l_0} - \frac{1}{l} \right), \quad (3)$$

设此时重物质量变化为 Δm , 金属丝横截面积可由其直径 d 得到, $S = \pi d^2 / 4$, 重力加速度为 g , 则根据式(1)可得弹性模量为

$$E = \frac{2\Delta mgL}{\pi d^2 \lambda a \left(\frac{1}{l_0} - \frac{1}{l} \right)}, \quad (4)$$

实际数据处理中, 记 $2 \left(\frac{1}{l_0} - \frac{1}{l} \right) = \Delta w$, 运用最小二乘法求出 $\Delta w - \Delta m$ 图像的斜率 k , 则有

$$E = \frac{4gL}{\pi d^2 \lambda a k}. \quad (5)$$

2 实验仪器装置设计

金属丝受力后拉伸的距离是非常微小的量, 该距离的测量是此实验的重点和难点. 本实验利用光衍射法对其进行测量, 实验装置示意图如图 1 所示.

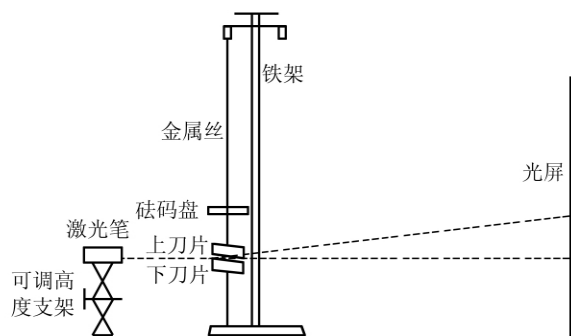


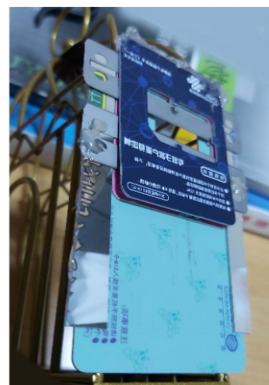
图 1 光衍射法测弹性模量实验装置示意图

在铅直面上平行放置 2 片刀片形成狭缝, 激光笔发射的光线垂直入射狭缝, 在接收光屏处形成明暗相间的衍射条纹. 逐渐增加砝码盘中重物的质量, 金属丝受力产生微小形变, 导致衍射条纹宽度随狭缝宽度的变化而变化.

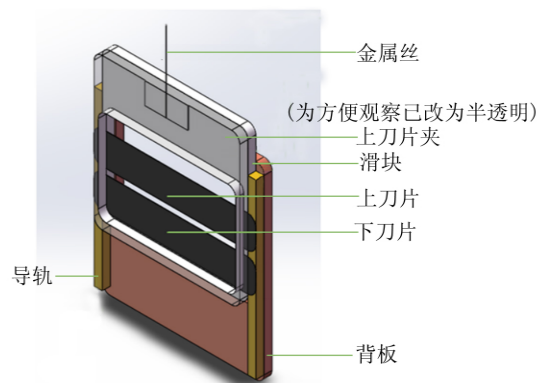
居家实验中, 利用家用物品制作光学狭缝是此实验设计的重点和难点. 本文利用废弃的电话卡设计制作了光学狭缝, 步骤如下:

将 2 张小号电话卡上端粘在一起, 下端分开, 把上刀片夹在它们中间, 并用双面胶粘在电话卡上. 再将 1 张面积较大的电话卡粘在中空支架上, 并在其外表面的左右两侧粘 2 个宽约 5 mm

的长条, 使其中间构成空槽. 然后将下刀片粘在长条上使其架在空槽上. 最后将夹有上刀片的 2 张小号电话卡中的 1 张插入凹槽内, 将待测金属丝与上刀片组件的外表面粘在一起, 其实物图和示意图如图 2 所示. 此方案设计的狭缝不仅保证上下刀片始终在同一平面, 而且光滑的卡片表面也减小了阻力, 保证了上刀口能够自由滑动.



(a) 上下刀口组成的狭缝



(b) 总体结构示意图

图 2 狭缝组装部件与整体图

在组装实验装置时, 将金属丝上端固定, 金属丝下端挂一大矿泉水瓶并加入一定量水, 使其预拉直. 将装有狭缝的中空支架和激光笔分别放在 2 个千斤顶上(家用汽车配件中提供), 用于调节高度; 将坐标纸粘在墙上作为光屏. 实验时尽量增大狭缝与光屏之间的距离, 这样形成的衍射条纹宽度较大, 测量精度更高. 设置合适狭缝宽度, 调整千斤顶高度使激光垂直照在狭缝上, 记录此时条纹的宽度. 此后逐次加入 150 mL 水并待系统稳定后记录条纹宽度. 实验装置如图 3 所示, 实验现象如图 4 所示.

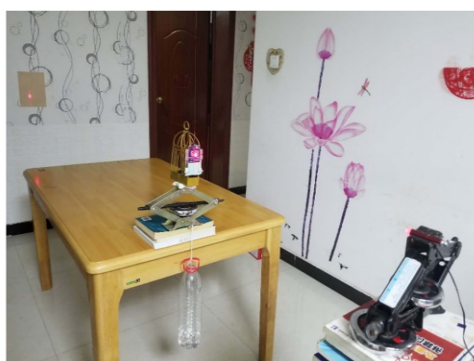


图 3 实验装置整体图

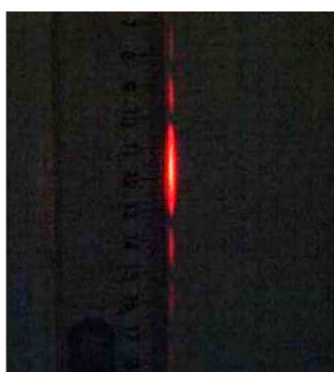


图 4 实际衍射条纹图

在非实验室环境下通常使用密绕法测量金属丝的直径,但一些刚性较好的金属丝很难做到严格的密绕. 利用钢笔的旋转部分的等间距螺距,自制了简易螺旋测微器,如图 5 所示,设计方案如下:将钢笔笔头与笔杆连接处拧开,并在有螺距一端粘上卷尺,再利用已知厚度的物体进行定标(比如硬币),确定倍率,即可用于测量金属丝的直径.

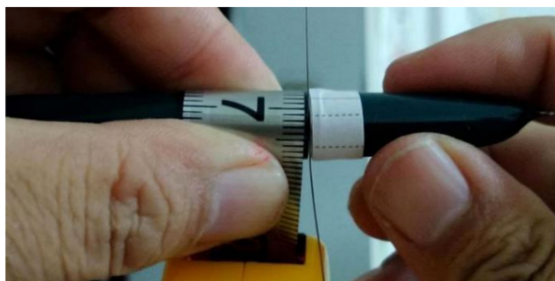


图 5 自制螺旋测微器

为测试上述实验装置的实际效果,验证其精度和稳定性,现对 1 根已知弹性模量的钢丝进行实验测量,其理论值为 $2.00 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$.

3 实验数据测量与处理

实验测得的数据如表 1~2 所示.

表 1 $\Delta m, l, \Delta w$ 数据

$\Delta m/\text{kg}$	l/mm	$\Delta w/\text{m}^{-1}$	$\Delta m/\text{kg}$	l/mm	$\Delta w/\text{m}^{-1}$
0	9.0	0	0.18	17.7	109.23
0.02	9.5	11.70	0.20	19.7	120.70
0.04	10.0	22.22	0.22	22.3	132.54
0.06	10.7	35.31	0.24	25.5	143.79
0.08	11.7	48.31	0.26	30.3	156.22
0.10	12.5	62.22	0.28	36.7	167.73
0.12	13.5	74.07	0.30	47.0	179.67
0.14	14.5	84.29	0.32	59.1	191.36
0.16	16.0	97.22			

表 2 L, d 和 a 的测量数据

序号	L/m	d/mm	a/m
1	1.062 0	0.029 6	2.011 0
2	1.064 0	0.029 9	2.012 0
3	1.066 0	0.029 6	2.005 0
4	1.066 0	0.030 0	2.004 0
5	1.066 0	0.029 3	2.006 0

通过计算可得 $L = (1.064 8 \pm 0.001 8) \text{ m}$, $d = (0.029 7 \pm 0.000 6) \text{ mm}$, $a = (2.007 6 \pm 0.003 6) \text{ m}$. 采用最小二乘法拟合 $\Delta w - \Delta m$ 图像,如图 6 所示,斜率 $k = (597.5 \pm 1.7) \text{ m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$,通过计算可得弹性模量 $E = (1.93 \pm 0.08) \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$.

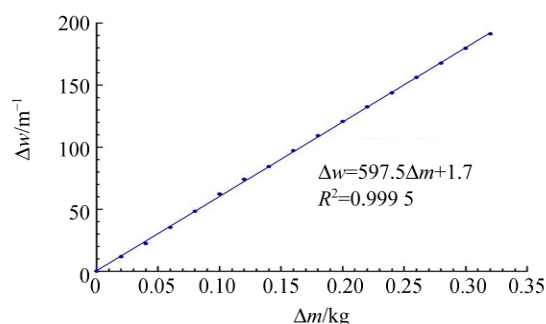


图 6 $\Delta w - \Delta m$ 散点图与最小二乘法拟合直线图

弹性模量相对不确定度为 4.1%,主要来源于中央亮条纹宽度的不确定度和金属丝直径的不确定度.

同时,需要指出的是,本实验装置的主要误差来源于以下几个方面:

1) 金属丝顶端固定的刚性不足,当重物较重时,固定处可能发生形变;

2) 采用逐渐加水的方法,需要提前留出一定的初始狭缝宽度.狭缝宽度过宽则无法测量初始条纹宽度,过窄则会导致可用区间不足.采用逐渐减少水量的方法可以解决此问题,但在居家条件下很难做到从水瓶中抽水而不对实验装置造成扰动;

3) 光衍射法对系统稳定性的要求很高,而居家条件下,装置较为简陋,扰动较多.

4 结束语

疫情期间,在大学物理实验难以在实验室环境进行的背景下,本文利用光衍射法测量金属丝的弹性模量,通过对实验室环境下的装置和实验方案进行改进,在居家条件下,创造性地设计了光

学狭缝和螺旋测微器,并进行了实验,较大程度地提高了居家测量弹性模量精度,实验结果的相对误差 $\leq 5\%$,符合实验中对精度的要求.

参考文献:

- [1] Whittle R M, Yarwood J. 伦敦工学院 200 个物理实验[M]. 北京:科学技术文献出版社,1984.
- [2] 李永治,侯小娟,李林凤,等. 非实验室环境下完成拉伸法测金属丝的杨氏模量[J]. 物理实验,2020,40(5):15-17.
- [3] 梁霄,田源,铁位金,等. 横梁弯曲衍射法测杨氏模量实验仪的研制[J]. 物理实验,2011,31(8):31-33.
- [4] 孙丽媛,祖新惠. 大学物理实验[J]. 北京:清华大学出版社,2014:42.
- [5] 戴兵. 利用球面波夫琅禾费衍射放大衍射图样[J]. 物理实验,2004,24(6):36-39.
- [6] 姚启钧. 光学教程[M]. 北京:高等教育出版社,2002.

Design of elasticity modulus measurement experiment by light diffraction in the home environment

ZHANG Shu-chen^a, ZHU Ling^b, LIANG Yan^b

(a. School of Gifted Young; b. Physics Experimental Teaching Center, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The experimental device for elasticity modulus measurement of metal wire by light diffraction is built using living materials in the home environment. A simple spiral micrometer is also designed to improve the accuracy of measuring the diameter of the metal wire in the experiment. The process and result of this experiment show the special suitability for students' home experiment. During the experiment, the students' ability is exercised to independently design experimental devices using common materials, and they could also gain a deeper understanding on the theoretical knowledge of elastic modulus and light diffraction.

Key words: elasticity modulus; stretching method; diffraction; home experiment; micrometer

[责任编辑:郭伟]