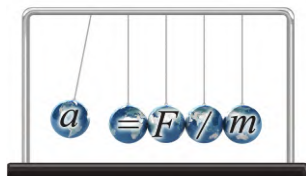


文章编号:1005-4642(2022)02-0020-04



普通物理实验

利用激光三角法测量钢丝的弹性模量

郑雪丽, 邱丽, 汪涛, 李巧梅, 杨骏骏

(重庆大学 物理学院 物理国家级实验教学示范中心, 重庆 401331)

摘要:以改进弹性模量实验测量方法为例,采用激光三角法测量钢丝的弹性模量.结合光电子技术,利用 PSD 测量系统将力学参量转变为电学参量,根据理论推导得到钢丝弹性模量的计算公式.实验结果表明该方法稳定性好、精度高,适合运用于“新工科”背景下的大学物理实验教学.

关键词:弹性模量;激光三角法;PSD 测量系统

中图分类号:O343

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2022.02.004

弹性模量是材料的固有属性,其大小能够表征材料抵抗形变的能力^[1],是工程选材时须考虑的重要参量,因此准确测量弹性模量对工业生产具有重要意义.弹性模量测量实验是各高校大学物理课程中必做的实验,其测量关键点是精确测量被测材料的微小形变量.本文基于弹性模量测量特点,结合光电子技术,采用激光三角法测量钢丝的弹性模量.

1 实验原理

1.1 激光三角测量法

采用激光三角测量法测距是短距离激光测距中常用的方法,根据激光照射角度不同可以分为直射式激光三角法和斜射式激光三角法^[2-3].本文采用斜射式激光三角法测量弹性模量,其光路如图 1 所示,光路符合沙姆定律^[4],即物平面(物体移动的面)、聚焦透镜平面和像平面三者交于 1 条直线.激光三角法测量微小位移时,激光照射到被测物上产生漫反射,反射光经凸透镜成像被 PSD 位置传感器接收,当物体移动时,成像光斑也会随着相应位移发生移动,根据 PSD 测距原理可以计算出像点位移,再根据几何关系即可计算出待测物的位移.根据图 1 中的几何关系,光斑位移为

$$\Delta y = \frac{a \Delta x \sin \varphi}{b \sin \theta + \Delta x \sin (\theta + \varphi)}, \quad (1)$$

其中, Δx 为像点在 PSD 上的位移, a 为物距, b 为像距, θ 为物法线与聚焦透镜光轴的夹角, φ 为 PSD 光敏面与光轴的夹角.

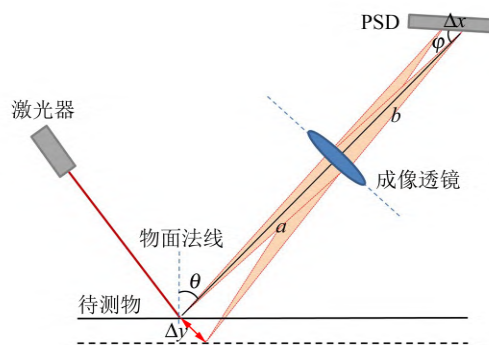


图 1 斜射式激光三角法光路图

1.2 系统结构和原理

采用斜射式激光三角法测量弹性模量的整体结构如图 2 所示.摆放光路时,要求柱形夹具的法线、成像透镜平面、PSD 接收的像平面交于 1 条直线,以遵循沙姆定律.在柱形夹具上贴磨砂纸片,激光照射到纸片上,产生漫反射,反射光经过凸透镜后在 PSD 位置接收传感器上成像.当在弹性模量测量仪上加载荷时,柱形夹具随钢丝

“第 11 届全国高等学校物理实验教学研讨会”论文

收稿日期:2021-07-09;修改日期:2021-11-11

基金项目:2019 年重庆市高等教育教学改革研究项目(No. 193008);2019 年重庆大学实验教学改革项目(No. 2019S08);2020 年重庆大学教学改革研究立项项目(No. 2020Y50)

作者简介:郑雪丽(1989—),女,安徽宿州人,重庆大学物理学院实验师,硕士,主要从事物理实验教学工作,研究方向为光电检测技术. E-mail:zhengxueli0315@cqu.edu.cn

伸长而向下移动,像点也会随之有相同的位移量。根据胡克定律,弹性模量为

$$E = \frac{FL}{S\Delta L}, \quad (2)$$

其中, F 为施加在钢丝上的力, S 为钢丝横截面积, L 为钢丝的有效长度, ΔL 为在施加载荷后钢丝的伸长量。通过几何关系可知

$$\Delta L = \Delta y \tan \theta \approx \frac{a \Delta x \sin \varphi}{b \cos \theta}. \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),可得钢丝的弹性模量为

$$E = \frac{FLb \cos \theta}{Sa \Delta x \sin \varphi}, \quad (4)$$

因此,只要测出式(4)中的相关参量即可计算出钢丝的弹性模量。

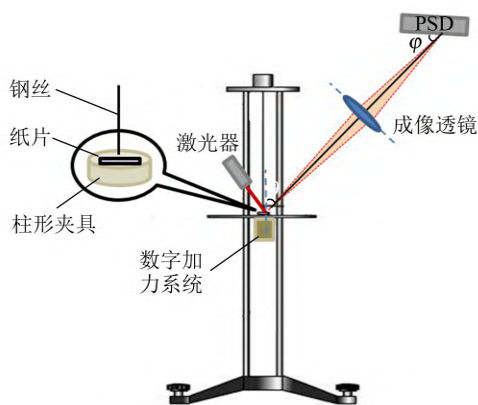


图2 测量弹性模量的结构图

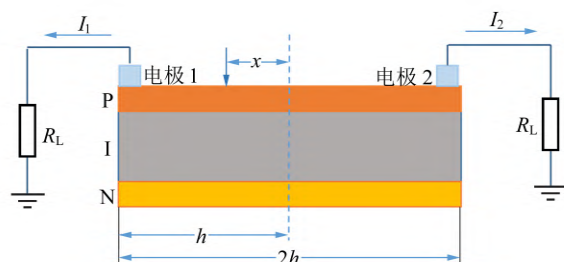
PSD 位置传感器是对入射光位置敏感的 PIN 型光敏二极管,分为 P 层、I 层和 N 层,其结构如图 3(a)所示。当光照射到光敏面时会在下表面形成光电子,光电子通过均匀分布的 P 型电阻层被电极收集。以 PSD 集合中心为坐标原点,在 PIN 位置传感器上加反偏电压 V ,由于入射光点和输出电极 1 和 2 之间存在电动势,则光电子形成的光电流 I_1 和 I_2 通过 PIN 位置传感器分别流向电极 1 和 2,如图 3(b)所示,其大小与入射光点和电极间距成反比^[5],即

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{h+x}{h-x}, \quad (5)$$

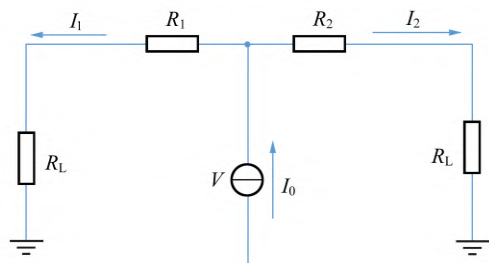
其中 R_1, R_2 分别为入射光点与电极 1 和电极 2 之间的等效电阻, h 为 PSD 器件长度的 $1/2$, x 为入射光点到 PSD 几何中心的距离。根据式(5)得

$$x = h \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}, \quad (6)$$

因此,入射光点到 PSD 几何中心的距离可直接通过探测光电流来确定,而与表面上的光斑强度、分布、对称性和尺寸无关^[3]。



(a) 一维结构图



(b) 等效电路

图3 PSD 的一维结构图和等效电路

选用型号为 DRX-1DPSD-0A03-15 的 PSD 器件,其有效光敏面为 $1 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,采用具有高精度、高线性度、位置连续变化等优点的双电源 ($\pm 12 \text{ V}$) 进行供电。外电路采用运算放大器 (OPA4101NJ) 对 PSD 输出的微小电流信号进行 $I-V$ 放大及运算处理,其电路框图如图 4 所示。

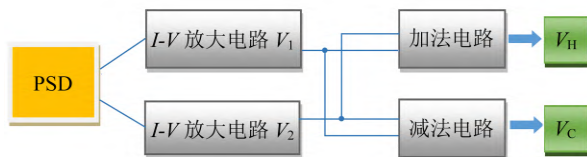


图4 PSD 电路框图

将 I_1 和 I_2 转换为 V_1 和 V_2 ,经加法电路和减法电路输出为 $V_1 + V_2$ 和 $V_1 - V_2$,其大小可用万用表分别测出。为叙述方便,分别用 V_H 和 V_C 表示 $V_1 + V_2, V_1 - V_2$,则式(6)可改写为

$$x = h \frac{V_C}{V_H}. \quad (7)$$

光点在 PSD 器件上的位移为光点移动前后偏离 PSD 器件中心的距离之差,其表达式为

$$\Delta x = h \left(\frac{V_C'}{V_H'} - \frac{V_C}{V_H} \right). \quad (8)$$

2 实验测量与数据处理

2.1 实验测量

在实验教学中,选用光敏面长度为 15 mm 的 PSD,并选用直径 $d=0.796$ mm,有效长度 $l=760.0$ mm 的钢丝作为待测材料.采用斜射式激光三角法测量其弹性模量的步骤为:

- 1) 打开弹性模量测量仪系统电源,调节系统,使施加在钢丝上的载荷为 2.000 kg;
- 2) 选用焦距 $f=100$ mm 的聚焦凸透镜,打开激光器,按图 2 所示调节光路;
- 3) 调节光路时,使物距等于像距,即 $a=b=200$ mm;
- 4) 打开 PSD 电源和万用表,将钢丝上载荷从 2.000 kg 增加到 17.000 kg,用万用表测量并记录输出电压 V_H, V_C ;
- 5) 将钢丝上的载荷从 17.000 kg 减少到 2.000 kg,用万用表记录输出电压 V_H, V_C .

2.2 数据处理

测量数据如表 1 所示.

表 1 测量数据记录表

m_i/kg	V_H/mV	V_C/mV	m_i/kg	V_H/mV	V_C/mV
2.000	324.1	43.5	17.000	358.0	-9.0
3.000	327.2	40.5	16.000	357.4	-5.7
4.000	330.3	37.3	15.000	356.5	-0.4
5.000	333.3	34.3	14.000	355.5	3.2
6.000	336.4	31.1	13.000	353.9	7.1
7.000	340.0	27.0	12.000	351.2	11.2
8.000	341.5	23.6	11.000	349.3	14.8
9.000	343.5	19.5	10.000	347.3	17.6
10.000	346.4	16.3	9.000	345.3	20.8
11.000	349.8	14.1	8.000	342.2	24.0
12.000	351.9	11.4	7.000	339.3	26.8
13.000	353.6	8.2	6.000	336.7	30.3
14.000	355.6	4.4	5.000	333.7	33.6
15.000	357.5	0.3	4.000	330.8	37.0
16.000	358.5	-3.8	3.000	327.5	40.4
17.000	359.8	-8.0	2.000	324.1	43.5

根据表 1 进行数据处理,处理要求为:

- 1) 采用最小二乘法计算每加 1.000 kg 载荷,钢丝的伸长量;

2) 计算弹性模量的不确定度;

3) 与标准值比较求出相对偏差.

下面以 1 组测量数据为例介绍数据处理方法和过程.

在实验光路满足沙姆定律的条件下,调整 PSD 接收平面,使其与被测平面平行.根据图 1 中的几何关系可知 $\varphi+\theta=90^\circ$,则 $\sin \varphi=\cos \theta$,代入式(3)可得

$$\Delta L = \frac{a \Delta x}{b}. \quad (9)$$

调节光路,使物距等于像距,即 $a=b$,则弹性模量可表示为

$$E = \frac{FL}{S \Delta x}, \quad (10)$$

将 $S = \frac{1}{4} \pi d^2$ 和 $F = mg$ (m 为施加在钢丝上的载荷质量)代入式(10),光点在 PSD 器件上的位移可表示为

$$\Delta x = \frac{4gL}{\pi d^2 E} m. \quad (11)$$

根据表 1 中载荷相同的 V_H, V_C 的 2 次测量值,分别求其平均值,并代入式(8)计算出增加不同质量的载荷时,光斑在 PSD 器件上的位移量 Δx ,再利用最小二乘法拟合得到 $\Delta x-m$ 曲线,如图 5 所示.拟合得到的斜率代入式(11)计算得到钢丝的弹性模量 $E = (1.94 \pm 0.04) \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, $E_r = 3.5\%$.

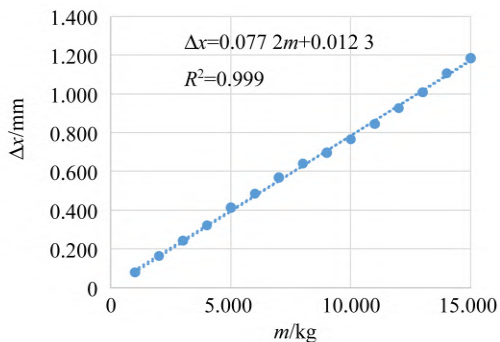


图 5 $\Delta x-m$ 线性拟合图

3 结果分析

对比斜射式激光三角法和光杠杆法测量数据的相对偏差,如图 6 所示.从图中可知,斜射式激光三角法测量数据的稳定性更高、误差更小.其误差的可能来源有:

1) 在钢丝伸长过程中,物像各点可能没有严格满足物像关系;

2) 由于凸透镜放置的位置、角度不够精确,导致像在移动时,其中心位置和 PSD 的中心没有完全重合;

3) 透镜成像畸变;

4) 钢丝直径和有效长度的测量误差;

5) 测量实验装置中的光源、载荷、夹具的稳定性不够;

6) 背景光的影响。

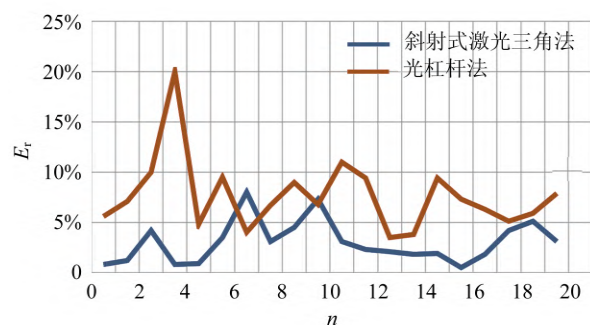


图6 斜射式激光三角法和光杠杆法测量相对偏差对比图

4 结束语

斜射式激光三角法测量弹性模量是将现代技术与经典实验相结合,具有光路简单、精度高、稳定性好等优点,适用于普通物理实验课。另外,该方法为非接触式测量,除用于本实验外还可以用于热膨胀测量、厚度测量、热形变等实验中。将激光三角法用于其他测量实验,可以拓宽学生的视野,提高实验的综合性和现代性。

参考文献:

- [1] 何光宏,汪涛,韩忠. 大学物理实验[M]. 北京:科学出版社,2017:78.
- [2] 汪涛,唐清清,刘江,等. PSD 微位移测量系统的设计与验证[J]. 传感技术学报,2014,27(4):472-476.
- [3] 于丽霞,王福明. 一维 PSD 器件及其在测量中的应用[J]. 现代电子技术,2007,30(7):143-144.
- [4] 王飞,程耀瑜. 基于 PSD 的三角测距系统的研究[J]. 数字技术与应用,2013(2):79.
- [5] 曾光宇,张志伟,张存林. 光电检测技术[M]. 北京:清华大学出版社,2005:69-71.

Measuring elastic modulus of steel wire based on laser triangulation method

ZHENG Xue-li, QIU Li, WANG Tao, LI Qiao-mei, YANG Jun-jun

(National Demonstration Center for Experimental Physics Education, College of Physics, Chongqing University, Chongqing 401331, China)

Abstract: Taking the improved measurement method of elastic modulus as an example, the elastic modulus of steel wire was measured based on the laser triangulation method. Combined with optoelectronic technology, the PSD measurement system was used to convert the mechanical parameters into electrical parameters, and then the calculation formula of the elastic modulus was derived. The experimental results showed that the method had the advantages of good stability and high precision, and was suitable for college physics experiment teaching under the background of “new engineering”.

Key words: elastic modulus; laser triangulation method; PSD measurement system

[责任编辑:郭 伟]