

普通物理实验

## 基于迈克耳孙干涉的金属丝杨氏模量测量

徐勋义<sup>a</sup>, 张祖豪<sup>a</sup>, 刘子健<sup>a</sup>, 常相辉<sup>b</sup>, 樊代和<sup>b</sup>

(西南交通大学 a. 机械工程学院; b. 物理实验中心, 四川 成都 611756)

**摘 要:**在拉伸法测量材料的杨氏模量实验中,为了精确地测量被测物体微小伸长量,采用了迈克耳孙干涉法,该方法可将测量精度提高到激光波长的量级. 本文详细介绍了该方法的实验原理、实验步骤及实验测量结果.

**关键词:**杨氏模量;迈克耳孙干涉;微小伸长量

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

文章编号:1005-4642(2016)09-0019-04

杨氏模量是表征固体材料在弹性限度内纵向抗拉或抗压性能的物理量,是工程技术设计领域中常用的参量,也是材料选定的重要依据之一,对其精密而便捷地测量具有重要的意义和应用价值. 目前,常用的测量杨氏模量的方法有:光杠杆法<sup>[1]</sup>、光的衍射法<sup>[2]</sup>、基于 CCD 图像传感器测量杨氏模量的方法<sup>[3]</sup>、基于 PSD 位置传感器测量杨氏模量的方法<sup>[4]</sup>等,但在工程技术和实验教学中通常采用拉伸法<sup>[5]</sup>. 当给金属材料施加一定的拉力  $F$  时,在弹性限度内,其相对于未加拉力时的原始长度  $L$ ,会有一定的伸长量  $\Delta L$ . 杨氏模量  $E$  被定义为应力(材料横截面积  $S$  上受到的拉力  $F$ )与应变( $\Delta L$  与  $L$  的比值)的比值. 在通常的大学物理实验室条件下(如被测金属材料的杨氏模量值在  $10^{10} \sim 10^{11} \text{ N/m}^2$  数量级,材料原长在  $1 \text{ m}$  数量级),此微小伸长量约在  $10^{-4} \text{ m}$  甚至  $10^{-5} \text{ m}$  量级,通常采用光杠杆法、光电法<sup>[6]</sup>、双缝干涉法<sup>[7]</sup>等方法进行测量. 总体而言,以上实验室介绍的测量杨氏模量的方法主要存在以下缺点:1) 被测测量原长过长,导致很难保证被测金属丝没有自然的弯曲,也即当有拉力作用在金属丝时,实际是将其拉直的过程,而不是测量应变的过程;2) 为满足光杠杆放大率的要求,要使望远镜和被测量之间的距离要足够长(大于  $1 \text{ m}$ ),导致实验调节和测量的难度增大;3) 利用光杠杆法测微小伸长量  $\Delta L$  的测量精度不高.

迈克耳孙干涉仪是大学物理实验中常用的仪器,基于激光干涉原理工作. 干涉仪两臂间的光

程差的改变,即可反映到由于激光干涉而导致的强度变化. 由于光程差在激光波长量级内的变化,即可观察到明显的强度变化,因此其可用于实现微小伸长量的测量. 例如,2016 年 2 月,激光干涉引力波天文台(LIGO)的研究人员就公布了用超大的迈克耳孙干涉仪(干涉仪的臂长为  $4 \text{ km}$ ),通过测量引力波对时空造成的微小扭曲,进而验证了爱因斯坦预言的引力波的存在<sup>[8]</sup>. 鉴于此,本文设计了基于迈克耳孙干涉法测量微小伸长量的装置,用于解决以上提到的、通常大学物理实验室杨氏模量测量实验中的存在问题.

### 1 测量原理及装置

以测量未知材料圆柱体金属丝的杨氏模量值为例,假设粗细均匀的被测金属丝初始长度为  $L$ ,横截面积为  $S$ (直径为  $d$ ). 将其一端固定,另一端沿伸长方向加一外力  $F$ ,则在弹性限度内,金属丝在外力  $F$  的作用下将有一定的伸长量  $\Delta L$ . 由胡克定律可知金属丝的杨氏模量为<sup>[9]</sup>

$$E = \frac{4FL}{\pi d^2 \Delta L} \quad (1)$$

从(1)式可知,在杨氏模量的测量过程中,关键是准确测量微小伸长量  $\Delta L$ . 本文设计的基于迈克耳孙干涉仪装置的具体实验原理图如图 1 所示.

对实验室现有的迈克耳孙干涉仪的改造为:

1) 将原来经过扩束的半导体激光器,更换为商用的 He-Ne 激光器. 这样一方面观察到的干涉结果不再是同心圆环,而是强度明暗变化的干

收稿日期:2016-04-20;修改日期:2016-05-19

作者简介:徐勋义(1995-),男,陕西西安人,西南交通大学机械设计制造及自动化专业 2013 级本科生.

通讯作者:樊代和(1981-),男,山西河曲人,西南交通大学物理实验中心讲师,博士,研究方向为光学.



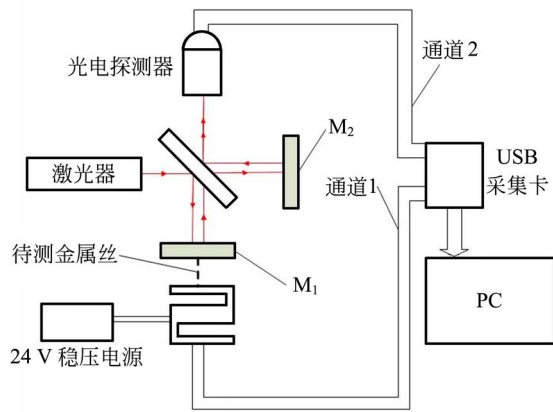


图 1 实验原理图

涉,便于利用常用的强度探测器进行自动探测并分析干涉结果;另一方面可精确确定激光的波长( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ).

2)在迈克耳孙干涉仪动镜的后面固定了拉力传感器,并将被测的金属丝固定于动镜  $M_1$  和拉力传感器之间.

3)将迈克耳孙干涉仪中用于观察干涉圆环的毛玻璃屏更换为常用的强度探测器.

另外,使用了双通道的 USB 数据采集卡,对探测到的强度干涉以及拉力传感器输出的拉力电信号进行同步采集并在计算机中分析.

调节迈克耳孙干涉仪动镜的手轮,一方面可实现干涉仪两臂光程差的改变,另一方面也对被测金属丝进行拉伸操作.对如上的装置,根据干涉原理,铜丝的微小伸长量  $\Delta L$  可通过激光干涉图样中出现波峰(波谷)的个数来确定,即

$$2\Delta L = \Delta N\lambda. \quad (2)$$

其中: $\Delta N$ 为光电探测器探测到的干涉图样中波峰(或波谷)的个数; $\lambda$ 为入射激光的波长,与激光器的选择有关.选用的激光器的波长越短,在单位波峰(波谷)个数下,可测的微小伸长量越小.在转动迈克耳孙干涉仪手轮的过程中,被测金属丝所受到的拉力  $F$  可由拉力传感器同步方便地测出.

由(1)~(2)式可得金属丝杨氏模量值为

$$E = \frac{8FL}{\pi d^2 \Delta N \lambda} = \frac{8L}{\pi d^2} \frac{1}{\lambda K}, \quad (3)$$

其中  $K = \Delta N/F$  表示单位拉力下探测到的干涉波峰(波谷)的个数.当用采集卡同步采集到拉力信号和干涉信号后,通过分析得到出现波峰(波谷)个数随拉力的变化关系,通过计算可得到  $K$  的

值.式(3)中的其他量,如  $L$  和  $d$ ,由于其通常情况下并非微小量,因此可用游标卡尺和螺旋测微计精确测出.

## 2 实验数据测量及分析

由于使用了迈克耳孙干涉法测量微小伸长量,因此可选用长度非常短的金属丝作为被测材料.实验中,游标卡尺测得的金属丝原长为  $L=133.66\text{ mm}$ ,比通常杨氏模量测量实验中用到的金属丝原长(通常在  $1\text{ m}$  左右)小 1 个数量级.这样可有效减小由于金属丝原长过长而导致的自然弯曲对金属丝原长  $L$  的测量带来的误差.使用螺旋测微计测量得到金属丝的直径为  $d=1.361\text{ mm}$ .通过调节迈克耳孙干涉仪的微调手轮,使用了采集率为  $1\text{ kB/s}$  的数据采集卡,同步采集到了激光干涉强度以及拉力随时间的变化关系,如图 2~3 所示.

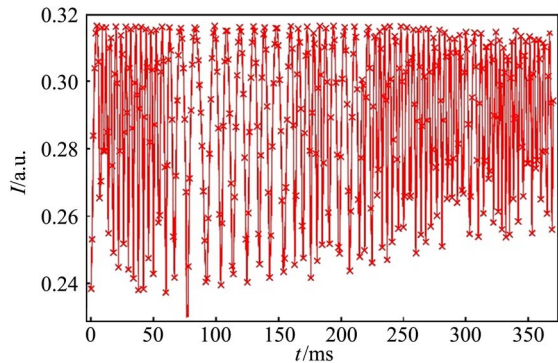


图 2 激光干涉强度随采集时间的变化关系

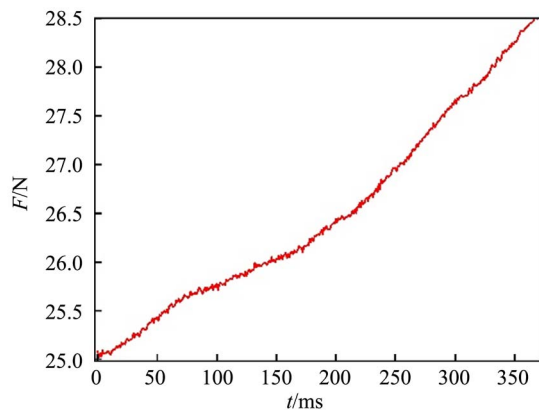


图 3 拉力随采集时间的变化关系

从图 2 中可以清晰地看出,随着手动调节迈克耳孙干涉仪的手轮,探测到了明显的干涉条纹,图中中间部分干涉条纹较两边稀疏,是由于手动

调节手轮时,拉力随时间的不均匀性造成的,这一结果可从图3中拉力随时间的变化关系图看出:中间部分斜率要较两边要小.但这一结果并不影响得到(3)式中的K值.

结合图2~3中同步采集到的2组数据(对图2中出现的干涉波峰进行顺序编号,同时从图3中取出对应峰的拉力值),在图4中给出了出现的激光干涉波峰个数随拉力F的变化关系曲线.可以看出,实验数据呈现出较好的线性变化关系,表明整个实验测量是在金属丝的弹性限度范围内进行的.这是因为,一旦超过金属丝的弹性极限点,出现波峰的个数(对应着微小伸长量)随拉力的变化将明显变缓,整体将不可能呈现出较好的线性变化关系<sup>[10]</sup>.测量过程中仅测量到约60个干涉波峰,考虑到He-Ne激光器的波长(632.8 nm),说明整个测量过程中金属丝的伸长量小于19 μm.这表明改进后的实验装置,可以高精度地测量得到杨氏模量实验中的微小伸长量.

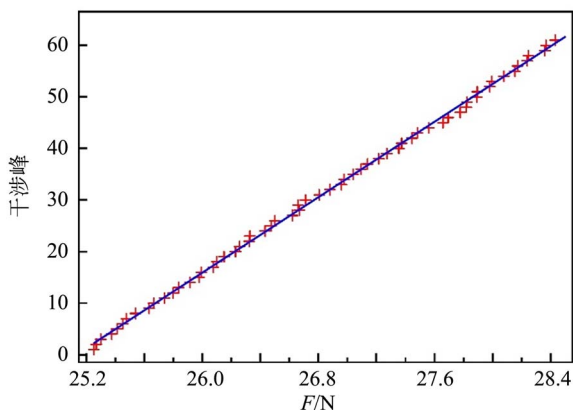


图4 激光干涉波峰个数随拉力的变化关系曲线

图4中线性拟合实验数据得到的斜率为 $k=18.29 \pm 0.07$ ,此值表示在单位拉力下出现的干涉波峰的个数为18.29个,此斜率值应与(3)式中的K值相同.通过将测量得到的 $L, d$ 和K值代入(3)式,得到金属丝的杨氏模量值为

$$E_{\text{cop}} = 1.588 \times 10^{10} \text{ N/m}^2. \quad (4)$$

根据(3)式结合不确定度的传递公式,可知测量的杨氏模量值的不确定度 $u_E$ 为

$$u_E = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial E}{\partial x_i} u_{x_i} \right)^2}. \quad (5)$$

式中: $x_i = \{L, d, \lambda, k\}$ ,  $u_{x_i}$ 分别为对应量的不确定度.由于实验没有对 $L$ 和 $d$ 进行多次测量,因此,

2个量的不确定均由其B类不确定得出,即: $u_L = \frac{\Delta_L}{\sqrt{3}}$ ,  $u_d = \frac{\Delta_d}{\sqrt{3}}$ ,其中, $\Delta_L = 0.02 \text{ mm}$ 和 $\Delta_d = 0.004 \text{ mm}$ 分别为所用游标卡尺和螺旋测微计的仪器误差限.所用He-Ne激光器的线宽较窄,因此波长的不确定度可忽略,即 $u_\lambda \approx 0 \text{ mm}$ .结合实验结果得到的 $u_k = 0.07$ ,杨氏模量值的不确定度为 $u_E \approx 0.009 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ .综上,实验测量得到的杨氏模量值为:

$$E_{\text{cop}} = (1.588 \pm 0.009) \times 10^{10} \text{ N/m}^2. \quad (6)$$

实验所用的未知金属材料从外观看起来主要成分可能为黄铜(杨氏模量值约为 $9.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ <sup>[11]</sup>),但(4)式的实验结果低于黄铜材料的杨氏模量值.由于杨氏模量值是有效地判断金属材料成分的方法,因此可判断本实验所用的金属丝并非由纯黄铜制成,其可能是合金,可能为黄铜掺杂了杨氏模量值较小的其他金属材料制成.

### 3 结束语

本文设计了一种基于迈克尔逊干涉仪来高精度测量微小伸长量,进而获得材料杨氏模量值的装置.与传统的拉伸法测量杨氏模量相比,本文设计测量杨氏模量的方法克服了光杠杆法中存在的各项不足.在此基础上,我们实际测量了一种实验室现有的金属丝的杨氏模量值,得到的结果为 $E_{\text{cop}} = (1.588 \pm 0.009) \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ .

采用激光干涉技术来测量微小形变,具有精度高、便于实现计算机自动测量等优点.如果采用其他手段实现金属丝原长、直径的自动测量,结合我们改进后的微小伸长量测量装置,能够使杨氏模能够做到数据采集、处理的自动化,使得杨氏模量测量仪具有一定便携性.在满足实验教学的基础上,该方法和仪器同时具备实用性和推广性.最后,该装置将有广泛的实际应用前景,除应用于杨氏模量测量外可以应用于其它许多微小量的工程测量领域.

### 参考文献:

- [1] 秦艳芬. 光杠杆底脚、望远镜轴线不水平造成的系统误差的分析[J]. 大学物理实验, 2002, 15(3): 68-69.
- [2] 李彦敏, 陈向炜. 光的衍射法测量杨氏模量[J]. 大学物理实验, 1998, 11(2): 16-17.

- [3] 漆建军,马文华,肖化. 基于线阵 CCD 的迈克尔逊干涉仪测量金属丝的弹性模量[J]. 实验室研究与探索,2010,29(1):20-21.
- [4] 吴立峰,杨广华. 基于 PSD 位置传感器的杨氏模量测量[J]. 五邑大学学报(自然科学版),2004,18(2):18-21.
- [5] 姜伟. 拉伸法测金属丝杨氏模量的研究[J]. 大学物理实验,1996,9(3):32-33.
- [6] 陈武军,宗妍,郑新亮. 光电法测量金属丝的杨氏模量[J]. 物理实验,2014,34(12):24-26.
- [7] 方运良,崔娟,朱伟玲. 双缝干涉法测量金属的杨氏模量[J]. 物理实验,2014,34(1):37-39.
- [8] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger [J]. Phys. Rev. Lett., 2016, 116 (6): 061102.
- [9] 张帮,袁广宇,意志敏,等. 利用迈克尔逊干涉原理测杨氏模量[J]. 大学物理实验,2007,20(3):8-10.
- [10] Halliday D, Resnick R, Walker J. Fundamentals of physics [M]. 8th. Wiley, 2007:373.
- [11] 皮萨连科 Г С, 亚科符列夫 А И, 马特维也夫 В В. 材料力学手册[M]. 范钦珊,朱成祖,译. 北京:中国建筑工业出版社,1978:165.

## Measuring Young modulus of metal wire based on Michelson interferometer

XU Xun-yi<sup>a</sup>, ZHANG Zu-hao<sup>a</sup>, LIU Zi-jian<sup>a</sup>, CHANG Xiang-hui<sup>b</sup>, FAN Dai-he<sup>b</sup>

(a. School of Mechanical Engineering; b. Physics Experiment Center,  
Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** In order to measure accurately the small elongation of metal wire in the experiment of measuring Young modulus with stretch method, the Michelson interferometer was adopted. The measurement accuracy was increased to nanometer level. This paper detailed the experiment principle, procedure and measurement results.

**Key words:** Young modulus; Michelson interferometer; small elongation

[责任编辑:尹冬梅]

(上接第 18 页)

## Diversity reception system for indoor LED visible light communication

XUE Jia-hao, LI Qi, XU Sheng-nan, ZHAN Kai-yun, CHEN Wen-juan, LIU Bing

(Department of Physics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** According to the principle of diversity reception, a signal selection reception device was designed for indoor LED visible light communication system, and the output signal of the device was analyzed theoretically and measured by experiment. The results showed that the device could increase the number of channels and automatically select the signal with the maximum signal-noise ratio, which could effectively avoid channel interruption.

**Key words:** visible light communication; diversity reception; analog signal; signal-noise ratio

[责任编辑:任德香]