

基于单缝衍射原理的梁弯曲法杨氏模量的测量*

滕继慧 崔金玉 孙炳全

(营口理工学院基础教研部 辽宁 营口 115014)

张大伟

(营口理工学院电气工程学院 辽宁 营口 115014)

(收稿日期:2022-02-21)

摘要:梁弯曲法测量杨氏模量是大学物理实验中比较常用的方法之一,实验的关键技术在于样板中心的微小挠度(垂直位移)的测量.利用自制的单缝衍射实验装置,将待测黄铜板中心的微小挠度转化为狭缝的缝宽的变化量,测量单缝衍射条纹的变化记录不同负载时黄铜板的微小挠度,利用逐差法计算黄铜板的杨氏模量.此方法具有样品位置稳定,需要调节的部位少,操作简单,现象直观明显等特点,实验结果表明,该方法测量精度高、相对误差为1.4%.

关键词:杨氏弹性模量 单缝衍射 挠度 逐差法

杨氏弹性模量(简称杨氏模量)是描述固体抗形变能力的重要物理量,只与材料的性质有关,反映了材料弹性形变与内应力的关系,是工程技术中机械构件材料选择的重要参数之一^[1].杨氏模量的准确测定对研究金属材料、光纤材料、半导体、纳米材料、聚合物、陶瓷、橡胶等多种材料的力学性质以及机械零部件的设计等具有重要意义^[2].杨氏弹性模量的测量实验,国内大部分高等院校将其作为大学物理实验课程中的实验项目之一.因此,杨氏模量的测量实验^[3]在当前国内各大高校的大学物理实验课程中的重要性是不言而喻的.它在培养学生掌握基本理论、锻炼操作技能以及提高数据处理能力等方面具有非常重要的作用.杨氏模量的测量方法有多种,传统方法有拉伸法^[4]、梁弯曲法^[5]、百分表法^[6]、干涉条纹法^[7]和动态法^[8]等.随着科学的进步,有一些新的实验技术引入到实验中,如光纤位移传感器法^[9]、摩尔条纹法^[10]、霍尔位置传感器^[11]、激

光全息法^[12]和电桥法^[13]等.同时,生活中常见物体的杨氏模量也有很多被研究,例如利用杨氏模量测量仪研究头发丝^[14]、医用缝合线^[15]等.通过这些研究极大的丰富了杨氏模量测定实验项目的内容,促进了教师在实验教学过程中积极探索的精神,同时也提高了学生在实验过程中的积极性.

目前,采用霍尔位移传感器测量挠度的杨氏弹性模量实验装置已经得到广泛的使用.由于该仪器采用的是杠杆机构,是一种接触式的测量方法,测量的精度和操作性均不够理想.为了提高测量的精度和操作的稳定性,本文中采用波长为650 nm半导体激光器作为光源,利用单缝衍射缝宽与衍射条纹间距的线性关系,测量出黄铜板的杨氏模量,计算出相对误差,根据相对误差结果的范围验证了本文方法的有效性.该实验体现了对所学知识变通转化的思想,提高了学生自己动手设计制作实验设备,锻炼和培养了学生独立思考、分析问题和解决问题的能力.

* 国家自然科学基金理论物理专项,项目编号:11647033;辽宁省教育厅青年科技人才“育苗”项目,项目编号:L2019009;营口理工学院优秀科技人才计划,项目编号:RC201701

作者简介:滕继慧(1982-),女,博士,讲师,研究方向为量子光学、量子腔光机械系统.

1 实验原理

本实验采用弯曲法测量杨氏模量实验的单缝衍射装置如图1所示,以激光(波长为 λ)照射两刀片间的狭缝,狭缝在空载时的缝宽为 Z ,在距离狭缝为 L 的接收屏上将产生衍射条纹。

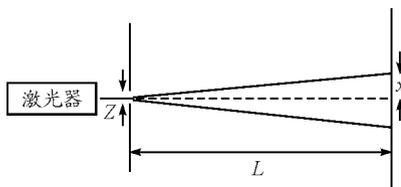


图1 单缝衍射示意图

图1中 x 为一级衍射暗条纹到中心的距离,实验装置图如图2所示,在两个支架中间有一个底座上,底座上固定刀片1,且在底座刀片1高度可调节,设支架在梁上的两支点间距为 d .在质量均匀黄铜板(厚为 a ,宽为 b)的中央处固定刀片2,使两刀片间距为 Z .将固定好刀片的玻璃板水平对称地放置在支架上.两刀片间的距离即为单缝衍射时的缝宽,基于单缝衍射原理的梁弯曲法测量杨氏模量的设备基本完成。

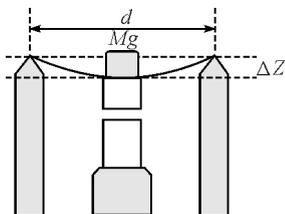


图2 梁弯曲法测杨氏模量实验装置示意图

将质量为 M 的负载放在黄铜板的中心,忽略黄铜板本身负载的重力作用使黄铜板发生微小弯曲,即自由端上升,而中心点下降,使得两刀片间距变小,根据单缝衍射公式

$$Z \sin \varphi = k\lambda$$

对于较小衍射角有

$$\sin \varphi \approx \tan \varphi = \frac{x}{L}$$

我们测量一级暗条纹间距($k = \pm 1$)则有

$$x = \frac{\lambda L}{Z}$$

式中 λ 为激光的波长, x 为衍射时形成的一级暗条纹到中心的距离, L 为单缝到接收屏的距离, Z 为单缝的宽度,当在黄铜板上施加不同负载(砝码)后,该公式为

$$x_n = \frac{\lambda L}{Z_n}$$

此时 x_n 为施加第 n 个砝码时形成的一级暗条纹到中心的距离, Z_n 为施加第 n 个砝码时单缝的宽度,利用弯曲法测杨氏模量公式

$$E = \frac{d^3 Mg}{4a^3 b \Delta Z} \quad [2]$$

可求得黄铜板的杨氏模量.其中 d 为两刀口之间的距离, M 为所加砝码的质量, a 为黄铜板的厚度, b 为黄铜板的宽度, ΔZ (挠度)为黄铜板中心由于外力作用而下降的距离, g 为重力加速度。

2 实验方法和数据处理

2.1 实验方法

实验装置包括激光发生装置、待测杨氏模量的黄铜平板和刀片组成的单缝衍射图像接收装置.通过调节木块高低可以使两个刀片间距可变,从而形成缝宽可调的单缝,在固定2个刀片时保证两刀片在同一平面上,形成的单缝上下边缘要平行,从而使得单缝衍射出的图案有效.对于单缝的长度,则要求刀片的长度要远小于负载截面的长度,保证负载的重力能够集中作用在刀片上,消除因刀片长度引起的负载重力被分散所造成的误差.衍射图像接收装置包括坐标纸和游标卡尺测量衍射条纹间距.测量装置实物照片如图3所示。

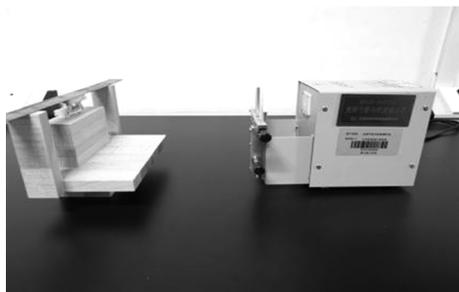


图3 梁弯曲法测杨氏模量的实验装置实物图

实验步骤:

(1) 按图2组装和搭建实验设备,打开半导体激光器并预热30 s左右.

(2) 首先进行粗调.目测上下两刀片是否水平,是否彼此平行且在同一竖直平面内,以单缝为参照,调节半导体激光器的高度,使激光束、单缝在同一水平直线上,将坐标纸贴在接收屏上并放置在单缝的后方,调节接收屏与单缝的间距,直到看到明显的衍射条纹为止.

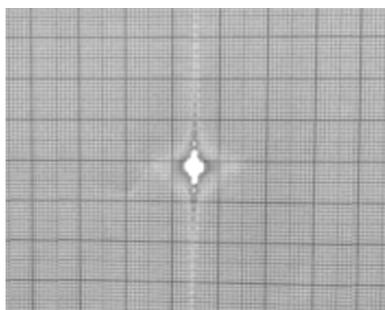
(3) 其次进行微调.固定好待测黄铜板,调节底座刀片的高度,形成合适的单缝宽度,当激光照射两刀片形成的单缝时,在接收屏上形成明暗相间的衍射条纹.

(4) 开始测量.调节单缝的宽度,在接收屏上寻找主极大和次极大,用游标卡尺测量主极大两侧一级暗条纹的间距,即中央主极大的线宽度.

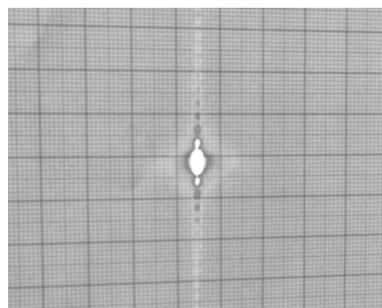
(5) 在待测黄铜板上依次加负载0、10、20、30、40、50 g砝码后,测量 ± 1 级暗纹间距,并将数据记录到表1中.

(6) 用千分尺测量黄铜板的厚度 a ,游标卡尺测量黄铜板的宽度 b ,用米尺测量两支点间距 d 及接收屏到单缝的距离 L ,并将数据记录到表2中.

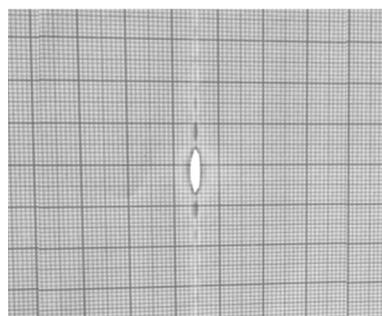
空载和负载为30 g和50 g时的衍射图像分别如图4所示,实验测得数据如表1和表2所示.由图4(a)的衍射图样我们可以看出,空载时中央主极大条纹宽而亮,两侧条纹具有对称性,亮纹较窄、较暗.当增加负载时,单缝变窄,中央条纹变宽,各级条纹间距变大,如图4(b)、(c)所示.单缝越窄,条纹间距越大,测量越精确.



(a) $M=0$



(b) $M=30\text{ g}$



(c) $M=50\text{ g}$

图4 单缝衍射图样

表1 一级衍射暗条纹位置及单缝宽度的测量

实验次数	负载质量 M/g	一级暗纹位置 x/mm	单缝宽度 Z/mm
1	0	1.503	1.137
2	10	2.206	0.775
3	20	2.865	0.596
4	30	3.022	0.564
5	40	7.128	0.239
6	50	14.726	0.116

我们对黄铜的厚度、宽度、支点间距离以及屏距测量3次,测得的数据如表2所示.

表2 黄铜板的几何尺寸及屏距的测量

参数	1	2	3	平均值
a/mm	0.975	0.973	0.974	0.974
b/mm	22.44	22.42	22.46	22.44
d/cm	25.28	25.30	25.26	25.28
L/cm	262.53	262.48	264.50	262.50

2.2 实验数据处理

用逐差法对表1的数据进行处理,计算出黄铜板在 $M=30\text{ g}$ 的作用下产生的位移量 ΔZ

$$\Delta Z = \frac{1}{3}[(Z_6 - Z_3) + (Z_5 - Z_2) + (Z_4 - Z_1)]$$

得到黄铜板的挠度为

$$\Delta Z = 0.529 \times 10^{-3} \text{ m}$$

根据杨氏模量公式求出黄铜板的杨氏模量为

$$E_{\text{测}} = \frac{d^3 \Delta Mg}{4a^3 b \Delta Z} = 10.7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$$

已知黄铜板样品的杨氏模量的标准值为

$$E_0 = 10.55 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$$

实验相对误差为

$$\epsilon = \frac{|E_{\text{测}} - E_0|}{E_0} \times 100\% = 1.4\%$$

与霍尔位置传感器的弯曲法测量金属杨氏模量的实验相比,该实验优点在于不存在加减码时引起的微小摆动,并且读数简单,待测黄铜板和单缝相连,更具有稳定性、可重复性.实验操作中由于负载对横梁的受力面积较大,不能保证中心点受力,从而使负载对单缝的宽度有影响,造成加载不同负载时黄铜板的挠度测量有误差.

3 总结

本文通过梁弯曲法,利用自制的简易装置来测量微小形变量,既可以测量金属材质黄铜板的杨氏模量,也可以测量合金材料以及其他固体材料的杨氏模量,例如合金金属板和玻璃板等.该实验不但拓展了测量杨氏模量的新方法,同时也加深了学生对于杨氏模量原理的进一步理解.通过自制相关的设备装置,锻炼了学生动手能力、处理分析能力、解决问题的能力,培养了学生利用所学知识进行自主创新的思维.实验中将黄铜板的微小形变量转化为狭缝改变量,利用单缝衍射装置将微小形变量进行测量,实验装置较为简便,实验现象直观明显,原理通

俗易懂,操作过程简单.适合一般的理工科大学生用来做学生实验,具有一定的实用价值.

参考文献

- 1 段阳,杨浩林,伍泓锦,等.杨氏弹性模量测量实验综述[J].物理与工程,2020,30(3):89~102
- 2 孙炳全,赵涛,刘凤智,等.大学物理实验[M].北京:化学工业出版社,2016.7
- 3 马堃.基于拉伸法测量金属丝杨氏模量的实验研究[J].大学物理实验,2018,33(1):17~20
- 4 黄菊,梁小冲.拉伸法测钢丝杨氏模量实验仪器的改进[J].实验科学与技术,2018,16(5):178~184
- 5 李凡生,欧晓璇.拉伸法测金属杨氏模量的测量方法改进[J].广西民族师范学院学报,2016,33(3):14~16
- 6 张岩,王素红.拉伸法测杨氏模量快速调节十字诀[J].物理与工程,2016,26(2):62~64
- 7 宋连鹏,孙瑜,刘鹏,等.弯曲法测量圆柱形试样杨氏模量的研究[J].物理实验,2016,36(6):22~26
- 8 陈育林,陈永安.利用百分表巧测金属丝杨氏模量[J].昆明理工大学学报(理工版),2003(6):154~156
- 9 曹旭,王杰,亓凯,等.干涉法测量橡胶材料杨氏模量的研究[J].大学物理,2017,36(3):40~43
- 10 刘盛循,邓小伟,吴益文,等.基于多阶固有频率的动态法弹性模量精确测量[J].实验室研究与探索,2020,39(8):39~42
- 11 薛思敏,史明哲.利用反射式光纤位移传感器测量钢丝的杨氏模量[J].大学物理实验,2020,33(2):22~24
- 12 李玉冰,陈福龙,许浩然,等.莫尔条纹法改进杨氏模量测量[J].大学物理实验,2020,33(4):14~16
- 13 金正宇,张笛儿,陆申龙.一个经典力学实验测量方法的改进——霍尔传感器测杨氏模量[J].实验室研究与探索,2000(2):36~38
- 14 李冠成.激光全息法测钢板的杨氏模量[J].激光杂志,2007,28(6):58~59
- 15 彭涛,王新春,王宇,等.电桥法测杨氏模量的实验研究[J].大学物理实验,2011,24(1):52~54

Measuring Young's Modulus Using Beam Bending Method Based on Single Slit Diffraction Principle

Teng Jihui Cui Jinyu Sun Bingquan

(Basic Department, Yingkou Institute of Technology, Yingkou, Liaoning 115014)

Zhang Dawei

(College of Electrical Engineering, Yingkou Institute of Technology, Yingkou, Liaoning 115014)

Abstract: The Young's modulus of brass plate measured by the beam bending method is one of the methods commonly used in university physics experiments. The key technique of the experiment is to measure the tiny deflection (vertical displacement) of the center of the template. In this experiment, the small deflection of the center of a brass plate is transformed into the change in the width of a slit by self-made single-slit diffraction experimental equipment, and the Young's modulus of brass plate is calculated by gradual deduction method. This method has the stability of sample position, less parts need to be adjusted, simple operation, and the experimental phenomena is obviously. Experimental results show that the method has high precision and relative error of 1.4%.

Key words: Young's modulus; single slit diffraction; deflection; gradual deduction method

(上接第 127 页)

根据表 1 数据绘出 $I-U$ 图像,如图 7 所示.

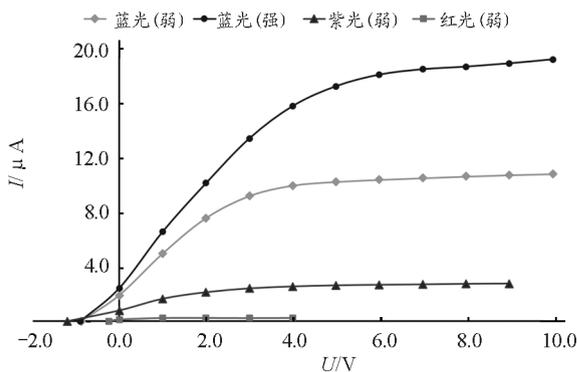


图 7 光电流与阳极电压关系图像

(5) 实验结论

1) 通过图 7 可以清楚看出同种颜色但强弱不同的遏止电压相同,不同颜色光的遏止电压不同,紫光的遏止电压最高,说明光的频率越大遏止电压越高.

2) 饱和电流大小与光的强弱有关,同一种颜色光照越强饱和电流越大.

3 结束语

用锌板和紫外线灯演示光电效应现象操作方

便、成本低,但是用传统的验电器难以检测到是否有光电子射出,用自制的电子验电器可以很好地检测光电效应现象是否发生.上述实验无法对光电效应现象进行定量探究,根据教材给出的实验原理图自行寻找原材料制作的光电效应定量探究实验装置可以完成对光电流规律的探究,可以清晰明确地得出教材所列出的实验结果.教学中让学生在完成此实验基础上根据实验结果自行归纳出光电流的规律,是新版课程标准中“科学思维”“科学探究”等核心素养教学的直接体现^[4],既掌握了光电效应规律又学会了科学探究的思想和方法.

参考文献

- 1 人民教育出版社,课程教材研究所,物理课程教材研究开发中心.普通高中课程标准实验教科书物理选修 3-5 [M].北京:人民教育出版社,2010.30~36
- 2 邵荣考.光电效应实验的改进[J].实验教学与仪器,2016,33(5):26~28
- 3 江山,于路军.光电效应演示实验改进[J].中学物理教学参考,2017,46(Z1):58~61
- 4 中华人民共和国教育部.普通高中物理课程标准[M].北京:人民教育出版社,2018.4~5