

基于单缝衍射原理测量金属丝杨氏模量仪器的设计

郝 奎^{1,2}, 何 军¹, 雷玉霞³, 邓文杰³, 方 澈³, 陈光伟¹

(1. 湖南工业大学 理学院, 湖南 株洲 412007; 2. 长郡自贸临空高级中学, 湖南 长沙 410100;
3. 湖南工业大学 科技学院, 湖南 株洲 412000)

摘要: 运用光的单缝衍射原理, 设计了一种可精准测量杨氏模量的实验仪器。通过弹簧拉力调节装置, 实现了拉力双向连续调节并实时直读, 并将金属丝的微小形变量与光学原理相结合, 用 10:1 杠杆结合单缝衍射原理直接准确测出金属丝的微小形变量。另外, 仪器还具有操作简便、成本低廉和现象直观的优点, 为材料的杨氏模量测量提供了一条创新性的路径。

关键词: 单缝衍射; 微小形变; 杨氏模量; 可视化测量

中图分类号: O348.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2026)02-0098-05

引文格式: 郝 奎, 何 军, 雷玉霞, 等. 基于单缝衍射原理测量金属丝杨氏模量仪器的设计 [J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(2): 98–102.

Design of an Instrument for Measuring Young's Modulus of Wire Based on the Principle of Single-Slit Diffraction

HAO Kui^{1,2}, HE Jun¹, LEI Yuxia³, DENG Wenjie³, FANG Shu³, CHEN Guangwei¹

(1. School of Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Changjun Free Trade Linkong Senior High School, Changsha 410100, China;
3. College of Science and Technology, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412000, China)

Abstract: An experimental instrument has been designed for an accurate measurement of Young's modulus by using the principle of single-slit diffraction of light. Through the spring tension adjustment device, a bidirectional continuous adjustment can be achieved of the tensile force and real-time direct reading. Combing the micro-deformation of the wire with the optical principle, the micro-deformation of the wire can be directly and accurately measured by using a 10:1 lever based on the principle of single slit diffraction. In addition, the new instrument is characterized with such advantages as easy operation, low cost and intuitive phenomenon, which provides an innovative way to measure the Young's modulus of materials.

Keywords: single-slit diffraction; minor deformation; Young's modulus; visualization measurement

0 引言

在材料科学和工程技术领域中, 杨氏模量常被用作描述材料固有弹性特性的关键参数。多种材料, 包

括金属、聚合物等, 在不同的温度、湿度及其他环境条件下, 其杨氏模量可能会发生变化^[1]。这种变化增加了测量的复杂性, 且微妙的变化可能影响到结构的稳定性和其他性能, 因此, 杨氏模量的准确测定尤为

收稿日期: 2024-06-14

基金项目: 湖南省大学生创新创业国家级基金资助项目 (S202311535022); 湖南省研究生科研创新基金资助项目 (QL20230262)

作者简介: 郝 奎, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为中学物理教育教学, E-mail: 313075037@qq.com

通信作者: 何 军, 男, 湖南工业大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为纳米与分子电子学, E-mail: 28388992@qq.com

重要。材料的杨氏模量测量有多种方法, 如拉伸法, 虽然现象直观, 但由于金属丝在增减砝码时可能发生扭转, 这种方法可能会对测量结果造成不利影响^[2]; 同时, 国内高校大学物理实验中大多采用静态拉伸法测量金属丝的杨氏模量, 该方法原理简单、现象直观, 但增减砝码时由于振动过大使金属丝扭转, 会对测量结果造成不利影响^[3]。随着科技的进步, 更精确的测量方法在日益增加^[4]。近年来, 杨氏模量的测量结合光学知识比较常见, 尤其是干涉和衍射技术。劈尖干涉技术能够在纳米尺度上有效地测量形变, 而单缝衍射技术在材料科学领域也被广泛采用, 它们为微小形变提供了高度敏感的测量手段^[5]。基于上述考虑, 结合现有基础设计了一套基于单缝衍射原理的测量材料杨氏模量的实验装置。将金属丝的微小形变量与光学原理相结合, 巧妙地设计 10:1 杠杆放大微小形变, 结合单缝衍射原理精准地测出金属丝的微小形变量, 最终计算出金属丝的杨氏模量。该装置克服了传统的测量方法在测定杨氏模量时的诸多限制, 在测量精度、操作便捷性以及测量结果的重复性上展现出明显优势。

1 实验原理

物体在发生弹性形变时, 其内部会产生恢复原状的内应力, 而杨氏模量正是反映固体材料形变与内应力关系的物理量^[6]。设金属丝原长为 L , 横截面积为 S , 在弹簧作用下, 受到的拉力改变导致长度改变 ΔL 。

单位横截面积上所受垂直作用力 F/S 称为正应力, 金属丝的相对伸长量 $\Delta L/L$ 定义为线应变, 由胡克定律可知, 在弹性限度内, 正应力与线应变成正比^[7], 即

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

式(1)中的系数 E 称为杨氏模量, S 可由金属丝的直径求得, L 可通过卷尺测得, F 的大小可由图 1 中数显拉力示数直接读得, 如图 1 实验装置所示。



图 1 弹簧拉力调节示意图

Fig. 1 Spring tension adjustment schematic map

弹簧所受的金属丝拉力 $F_{\text{拉}}$ 、弹力 $F_{\text{弹}}$, 合力为 0, 处于平衡状态, 则有:

$$F = F_{\text{拉}} - F_{\text{弹}}。 \quad (2)$$

拉力计示数即为金属丝所受实际拉力 $F_{\text{拉}}$ 的大小, 通过调节旋钮改变弹簧的长度改变 $F_{\text{弹}}$, 即金属丝在变化过程中受到的拉力 F 增大。因此, 利用数显拉力计示数的改变量 ΔF , 便可求出金属丝所受的实际拉力 $F_{\text{拉}}$ 的变化, 即 F 的大小变化^[8]。

对于金属丝微小形变量 ΔL , 采用单缝衍射法进行测量。光的衍射法是利用缝宽 d 与衍射条纹的中央亮条纹线宽度 δ 之间的固定关系直接测出微小长度的变化量。

如图 2 所示, 半导体激光器发出波长为 λ 的近似平行光束经过单缝时发生衍射^[9]。由夫琅禾费单缝衍射原理得单缝缝宽 d 与中央亮条纹线宽度 δ 的关系为

$$d = \frac{2\lambda R}{\delta}。 \quad (3)$$

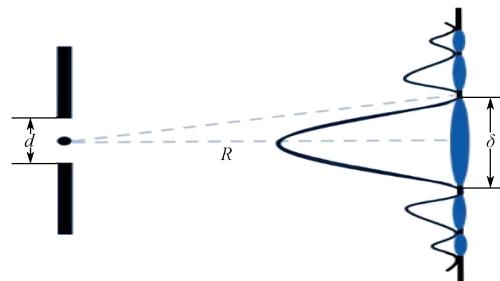


图 2 衍射原理示意图

Fig. 2 Diffraction schematic map

实验时, 光的波长 λ 和狭缝至屏幕的距离 R 均保持恒定。因此, 衍射中央亮条纹的线宽度 δ 将严格依赖于单缝的宽度 d 。即中央亮条纹线宽度的变化 $\Delta\delta$ 时刻反映可调单缝缝宽的变化 Δd , 即微小长度改变量 ΔL ^[10]。

$$\Delta L = \Delta d = d_2 - d_1。 \quad (4)$$

用千分尺测得金属丝的直径为 D , 则金属丝的横截面积 S 为

$$S = \frac{\pi D^2}{4}。 \quad (5)$$

将式(2)~(5)代入式(1), 可得如下杨氏模量表达式:

$$E = \frac{4FL}{\pi D^2 \Delta L}。 \quad (6)$$

2 实验仪器设计及装置概述

本研究设计的实验测量装置如图 3 所示。本实验装置主要由 3 个系统组合而成, 分别是可直接通过数显拉力计读出拉力 F 的拉力动态调节系统, 可精

确读取金属丝微小形变量 ΔL 的衍射系统和手机以及 iPad 组成的观测系统。

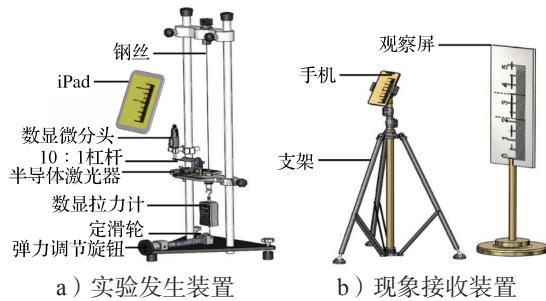


Fig. 3 Design of experimental measurement devices

2.1 拉力动态调节系统

定滑轮、弹簧、弹力调节旋钮和数显拉力计等构成了实验仪器的拉力动态调节系统。通过旋转弹力调节旋钮，可以精确调节弹簧的弹力大小，从而改变金属丝所受的拉力，所受拉力可以通过拉力计的示数直接读出。

2.2 衍射系统

如图 3~4 所示：衍射系统包括 10:1 杠杆、数显微分头、半导体激光器、可调单缝、观察屏等。在本实验中，10:1 杠杆的上刀口尖顶距杠杆转轴 10.0 mm，微分头尖顶距杠杆转轴 100.0 mm。上刀口在 10:1 杠杆的作用下可上下移动，数显微分头通过 10:1 杠杆控制上刀口位移，因此调节微分头即可精确调节缝宽。

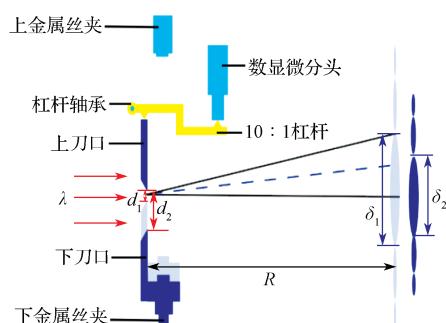


Fig. 4 Schematic diagram of diffraction system

单缝的下刀口固定在联动板侧面与下金属丝夹相连，金属丝受力伸长带动下刀口下移，使缝宽由 d_1 增大至 d_2 ，同时衍射中央亮条纹线宽度由 δ_1 缩短至 δ_2 。此时调节数显微分头控制上刀口下移，将中央亮条纹的线宽度由 δ_2 恢复至 δ_1 ，单缝宽度也由 d_2 恢复至 d_1 ，因此数显微分头示数改变量的 1/10 即微小长度变化量 ΔL 。

2.3 观测系统

传统衍射实验需要两人合作进行数据记录，容易

产生沟通误差。使用手机进行实时无线投屏，允许单人同时进行缝宽调整与衍射图样观察。手机相机捕捉的图样实时显示在 iPad 上，调整过程中可清晰地看到每一次变化，确保精确控制。同时，运用数显微分头和数显拉力计实现数据实时直读，提高了实验的效率和数据准确性。

3 实验方法和数据处理

3.1 实验方法

将整个装置放水平台上，调整杨氏模量测量仪底座和载物平台水平，使底座上的两个立柱处于铅直状态，拉直金属丝；将数显拉力计挂在金属丝下端挂钩上，并将其与弹簧垂直连接，确保滑轮旋转轴线与地面垂直且与金属丝在同一平面上，利用拉力动态调节系统，测出拉力 F 的大小变化。

图 5 为实验现象观测装置图。



Fig. 5 Observation of experimental phenomena

如图 5 所示，调整缝宽及半导体激光器位置，使激光从水平方向垂直狭缝入射并在观察屏上形成清晰的衍射图样，使用手机相机对观察屏进行实时捕捉，并投屏到 iPad 上，以可视化观察条纹变化；观察屏上标定中央亮条纹的初始位置，并将数显微分头的示数置于 0；旋转弹力调节旋钮，当观察到中央亮条纹的线宽度变窄时，每当拉力计示数增加 3 N 时，暂停旋转，调节数显微分头使中央亮条纹复位到初始位置，记录此时的数显微分头的示数 d_1 和拉力计的示数 F_1 ；重复此步骤，记录数显微分头的示数 d_i 和相应的拉力计的示数 F_i ，测量多组数据。

3.2 实验数据处理及误差分析

3.2.1 数据处理

若仪器的误差符合均匀分布，则 $u_{\text{仪}} = \Delta / \sqrt{3}$ 。根

$$\text{据不确定度公式 } u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}} , \quad u_B = u_{\text{仪}}^{[10]}.$$

根据表1~2数据分别计算出金属丝直径 D 、长度 L 的不确定度: $u_D=0.005 \text{ mm}$, $u_L=0.6 \text{ mm}$ 。

表1 金属丝直径 D 测量记录表Table 1 Wire diameter D measurement record table

| 上部 | | 中部 | | 下部 | | 平均值 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 前后 | 左右 | 前后 | 左右 | 前后 | 左右 | |
| 0.805 | 0.806 | 0.805 | 0.804 | 0.805 | 0.805 | 0.805 |

表2 金属丝长度 L 测量记录表Table 2 Wire length L measurement record table

| 计次 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 平均值 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 长度 L/mm | 502.1 | 502.0 | 502.1 | 502.1 | 502.1 | 502.2 | 502.1 |

表3 数显拉力计示数与缝宽变化

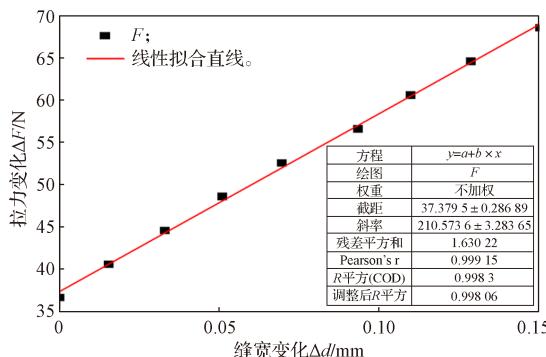
Table 3 Tension gauge digital display and seam width variation

| 数显微分头示数 /mm | 缝宽变化 d/mm | 拉力计示数变化 F/N |
|-------------|--------------------|----------------------|
| 0.000 | 0.000 0 | 36.61 |
| -0.154 | 0.015 4 | 40.61 |
| -0.330 | 0.033 0 | 44.61 |
| -0.509 | 0.050 9 | 48.61 |
| -0.695 | 0.069 5 | 52.61 |
| -0.934 | 0.093 4 | 56.61 |
| -1.099 | 0.109 9 | 60.61 |

为了便于数据处理, 将式(6)变形为

$$\Delta d = \frac{4L}{\pi D^2 E} F。 \quad (7)$$

ΔF 与 Δd 关系拟合曲线如图6所示。

图6 ΔF 与 Δd 关系拟合图Fig. 6 Fitting diagram of the relationship between ΔF and Δd

由图6可得金属丝缝宽变化 Δd 与拉力计示数变化 ΔF 具有线性关系, 利用Origin软件对这两个测量数据进行线性拟合, 再由图6和表1~3中的数据, 可以求得

$$\Delta d=0.001 \text{ mm}, \Delta F=0.006 \text{ N},$$

$$\bar{E}=2.10 \times 10^{11} \text{ N/m}^2,$$

相对不确定度

$$E_r=\sqrt{\left(\frac{u_L}{L}\right)^2+\left(\frac{u_{\Delta F}}{\Delta F}\right)^2+\left(\frac{u_{\Delta d}}{\Delta d}\right)^2+\left(2\frac{u_D}{D}\right)^2}=0.96\%,$$

不确定度为

$$u_E=\bar{E} \cdot E_r=0.02 \times 10^{11} \text{ N/m}^2。$$

求得待测金属丝的杨氏模量为

$$\bar{E}=(2.10 \pm 0.02) \times 10^{11} \text{ N/m}^2$$

3.2.2 误差来源分析

实验可能导致误差的原因如下: 1) 外界的较大震动会使干涉条纹抖动, 产生误记影响数据记录; 2) 金属丝受力不在装置铅垂线上, 使干涉条纹产生移动, 导致实验误差; 3) 单缝两刀口没有完全调节到同一平面或严格平行时会给测量结果带来误差; 4) 螺旋测微器测金属丝直径时, 钢卷尺测金属丝长度等测量带来误差; 5) 金属丝在初态存在的扭矩可能会干扰联动板的垂直移动, 导致实验误差。

4 结语

利用光的单缝衍射原理, 采用弹簧、单缝等部件改进的杨氏模量测量仪能够精确地测量金属丝的杨氏模量。与传统的光杠杆法相比, 其测量精度更高、可重复性更好, 并且实现了平稳地加力、减力以及拉力直读; 运用手持设备进行实时无线投屏, 实现单人进行缝宽调整与衍射图样的观察; 同时运用数显微分头和数显拉力计实现数据实时直读; 可直接在微分头上读取缝宽的变化, 提高了实验的效率和数据准确性, 简化了对数据的处理。另外, 设计的实验仪器成本较低, 操作简便, 更综合了力学、光学的实验原理, 除了应用于杨氏模量测量^[11~13]外, 还可以应用于其他微小量的工程测量领域。

参考文献:

- [1] 汪雨寒. 杨氏模量与温度关系的实验研究 [J]. 重庆科技大学学报(自然科学版), 2014, 16(1): 158~160.
WANG Yuhuan. Through Experiments to Explore the Young's Modulus and Temperature[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2014, 16(1): 158~160.
- [2] LU H M, MENG X K. Correlation Between Band Gap, Dielectric Constant, Young's Modulus and Melting Temperature of GaN Nanocrystals and Their Size and Shape Dependences[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 16939.
- [3] 赖学辉, 梁咏棋, 苏文青, 等. 利用等厚干涉测量钢

- 丝的杨氏模量 [J]. 大学物理实验, 2019, 32(1): 50-52, 58.
- LAI Xuehui, LIANG Yongqi, SU Wenqing, et al. Measurement of the Young's Modulus of the Wire with the Equal Thickness Interference[J]. Physical Experiment of College, 2019, 32(1): 50-52, 58.
- [4] 张进治, 谢亮, 铁小匀. 单缝衍射法测 TbDyFe 的磁致伸缩系数 [J]. 北方工业大学学报, 2020, 32(5): 135-139.
- ZHANG Jinzhi, XIE Liang, TIE Xiaoyun. Measurement of Magnetostrictive Coefficient of TbDyFe by Single Slit Diffraction Method[J]. Journal of North China University of Technology, 2020, 32(5): 135-139.
- [5] 姚启钧. 光学教程 [M]. 6 版. 北京: 高等教育出版社, 2019: 38-39; 80-81.
- YAO Qijun. Optics Tutorial[M]. 6th ed. Beijing: Higher Education Press, 2019: 38-39; 80-81.
- [6] 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.
- LUO Min, HUANG Jiaxin, YU Guanxia. The Improvement of Young's Modulus Experiment Device for Measuring Metals by Stretch Method[J]. Physical Experiment of College, 2020, 33(5): 92-94.
- [7] 肖旭, 冯辉, 梁霄, 等. 基于单缝衍射原理的横梁弯曲法杨氏模量实验仪的结构变形分析 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(1): 46-52.
- XIAO Xu, FENG Hui, LIANG Xiao, et al. Structural Deformation Analysis for an Experimental Apparatus of Young's Modulus Measuring Based on Single Slit Diffraction and Beam Bending[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2017, 31(1): 46-52.
- [8] 孙二平, 李英杰, 苗永平, 等. 基于光干涉和拉力传感器的金属丝杨氏模量测量系统的设计 [J]. 大学物理实验, 2021, 34(6): 26-31.
- SUN Erping, LI Yingjie, MIAO Yongping, et al. Design of the Measuring System for the Young's Modulus of Metal Wire Based on Optical Interference and Tension Sensor[J]. Physical Experiment of College, 2021, 34(6): 26-31.
- [9] 王文芳. 物理实验中微小长度的几种测量方法 [J]. 科技信息, 2012(15): 211, 207.
- WANG Wenfang. Methods for Measuring Minute Length in Physical Experiment[J]. Science & Technology Information, 2012(15): 211, 207.
- [10] 周明秀, 徐寒, 丁中华, 等. 测量杨氏模量的一种新方法 [J]. 淮阴工学院学报, 2008, 17(5): 17-20.
- ZHOU Mingxiu, XU Han, DING Zhonghua, et al. A New Method of Measuring Yong's Modulus[J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology, 2008, 17(5): 17-20.
- [11] 王国友, 范沁, 资雄, 等. 用光干涉和衍射装置替换光杠杆的杨氏模量测量方法 [J]. 大学物理, 2024, 43(4): 44-48, 74.
- WANG Guoyou, FAN Qin, ZI Xiong, et al. Method for Measuring Young's Modulus by Replacing Optical Levers with Optical Interference and Diffraction Devices[J]. College Physics, 2024, 43(4): 44-48, 74.
- [12] 洪焕灼, 朱镜红, 张雄, 等. 单缝衍射法测量金属棒杨氏模量的实验研究 [J]. 物理通报, 2016(6): 62-64.
- HONG Huanzhuo, ZHU Jinghong, ZHANG Xiong, et al. Experimental Study on Measuring Young's Modulus of Metal Bar by Single Slit Diffraction Method[J]. Physics Bulletin, 2016(6): 62-64.
- [13] 黄增光, 马再超, 卢佃清, 等. 衍射法测量金属丝的杨氏模量 [J]. 物理与工程, 2008, 18(5): 27-30.
- HUANG Zengguang, MA Zaichao, LU Dianqing, et al. Young's Modulus Measurement for a Wire with Diffraction Method[J]. Physics and Engineering, 2008, 18(5): 27-30.

(责任编辑: 申剑)