

一种杨氏模量综合实验装置的设计

何爽 孙艳 高原 于丹

(空军航空大学航空基础学院, 吉林 长春 130022)

摘要 为培养学生创新意识,锻炼其学以致用能力,将物理实验教学中现有杨氏模量测定仪的基本结构与光学导轨结合,设计了一种可实现多种光学测量方法的杨氏弹性模量测量装置。基于此装置实现了用莫尔条纹法和单缝衍射法测量金属丝的杨氏弹性模量,实验现象明显,光路调节难度降低。实验结果分析表明与传统光杠杆法相比较,实验精确度明显提高,证明该实验装置具有良好的综合性和拓展性,后续可基于此装置开发更多测量方法,以丰富学习和研究内容。

关键词 杨氏模量;莫尔条纹;单缝衍射

DESIGN OF A COMPREHENSIVE EXPERIMENTAL DEVICE FOR YOUNG'S MODULUS

HE Shuang SUN Yan GAO Yuan YU Dan

(Aviation Basic Institut, Air Force Aviation University, Changchun, Jilin 130022)

Abstract In order to cultivate students' innovative awareness and exercise their ability to apply what they have learned, a Young's modulus measuring device that can realize various optical measurement methods has been designed by combining the basic structure of the existing Young's modulus measuring instrument in physics laboratory teaching with an optical rail. Based on this device, the Young's modulus of a metal wire has been measured using both the Moiré fringe method and the single-slit diffraction method. The experimental phenomena are distinct, and the difficulty of optical path adjustment has been reduced. Analysis of the experimental results shows that compared with the traditional optical lever method, the experimental accuracy has been significantly improved. This proves that the experimental device has good comprehensiveness and expandability. More measurement methods can be developed based on this device in the future to enrich the content of learning and research.

Key words Young's modulus; Moiré fringe; single slit diffraction

杨氏弹性模量是固体材料抵抗形变能力的一个重要物理量,是选定机械构建材料的依据之一^[1-3]。随着工业材料的发展,杨氏弹性模量的应用变得必不可少,同时对杨氏弹性模量的测量精

度要求也越来越高。因此涌现出多种实验方法测量杨氏弹性模量的大小^[4-10],此外在许多高等院校中也将杨氏弹性模量测量实验作为大学物理实验课程中的实验项目之一,杨氏弹性模量测量的重

收稿日期: 2025-08-07

通信作者: 何爽, shuang_he369@163.com。

引文格式: 何爽, 孙艳, 高原, 等. 一种杨氏模量综合实验装置的设计[J]. 物理与工程, 2025, 35(6): 170-175, 182.

Cite this article: HE S, SUN Y, GAO Y, et al. Design of a comprehensive experimental device for Young's modulus[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(6): 170-175, 182. (in Chinese)

要性不言而喻。在我校开设的实验中采用光杠杆法测量金属丝的杨氏弹性模量,基于对现有实验仪器的改造,设计了一种可实现多种光学测量方法的杨氏弹性模量测量装置。

1 杨氏模量综合实验装置的设计

要想测准材料杨氏模量的大小,关键是如何精准地测量金属丝受力时的微小形变量。本方案将物理实验教学中现有杨氏模量测定仪的基本结构与光学导轨结合,设计了一种可实现多种光学测量方法的杨氏模量测量装置。具体设计思路如下:

(1) 改造原有杨氏模量测定仪。装置见图 1 所示,去掉望远镜,拆掉光杠杆及其两侧支架,保留拉力架和拉力计。

(2) 杨氏模量拉力架与光学导轨组装。将光学导轨卸掉底脚,由拉力架下托板和底座之间穿过,再安装底脚。使光学导轨与拉力架垂直,导轨在拉力架前后长度可根据实验需要进行调整。这样组装成了杨氏模量综合实验装置,可在导轨上安放多种光学设备、配件等,利用导轨可降低光路的调节难度,并实现多种光学方法的测量。本文基于装置定量研究了莫尔条纹法和单缝衍射法测量杨氏模量的大小。

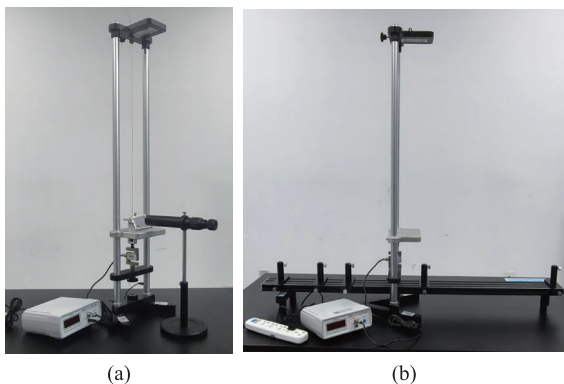


图 1 实验装置图

(a) 原杨氏模量测定仪装置图; (b) 杨氏模量综合实验装置基本框架

2 实验方法

2.1 莫尔条纹法测量杨氏模量

2.1.1 莫尔条纹形成原理

莫尔条纹是指利用两个光栅交叠放置,当光

栅距远大于光源波长时衍射现象不明显,依照光的直线传播原理,光栅栅线之间的遮光效应导致莫尔条纹的形成,见图 2 所示。栅线交点的连线上由于光线互相遮挡,形成了不透光的条纹,即莫尔条纹。莫尔条纹技术具有位移高倍率放大的光学特征,可对微小的位移量进行精准的测量,在一些微小位移测量中有较多的应用。

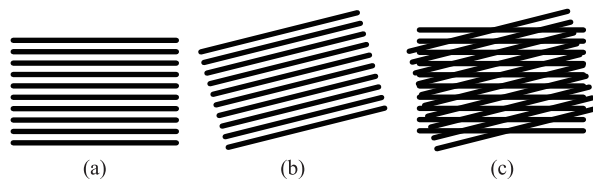


图 2 莫尔条纹简图

(a) 光栅 I; (b) 光栅 II; (c) 两光栅交叠效果

当两者栅线有很小的交角 θ 时,则相邻莫尔条纹的间距 D 与光栅栅线距离(即光栅常数) P 之间有如下关系^[11]

$$D = \frac{P}{\theta} \quad (1)$$

当两光栅交角 θ 很小时,相当于把栅距 P 放大了 $1/\theta$,则可将很小的光栅位移同步放大为莫尔条纹的位移。固定一片光栅,另一片光栅随着被测物体沿着光栅栅线排列方向移动,即可通过莫尔条纹将物体的位移量转化为莫尔条纹的移动数目而间接测得。莫尔条纹的放大倍率取决于两个光栅之间的角度和光栅常数,在测量中可以根据测量需要适当调整。

2.1.2 杨氏模量测量原理

设长为 L 、截面积为 S 、直径为 d 的均匀金属丝,一端固定,另一端在伸长方向上加以外力 F 后,伸长 ΔL 。当金属丝受拉力时,在金属丝内任一截面上都会产生与拉力相平衡的内力。根据胡克定律,在弹性范围内,单位面积上的内力 F/S (正应力)与金属丝的相对伸长 $\Delta L/L$ (线应变)成正比,即

$$\frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

其比例系数 E 就称为杨氏模量(弹性模量),即

$$E = \frac{F}{S} \cdot \frac{L}{\Delta L} = \frac{4FL}{\pi d^2 \Delta L} \quad (3)$$

在弹性限度内相应的 ΔL 很小(在 10^{-2} mm 数量级),用一般的工具不易测出,这也是解决测

量问题的关键。实验中通过对杨氏模量实验仪进行改造,使金属丝的伸长量与光栅位移量建立联系,利用关系式 $\Delta L = kP$ 可求得金属丝伸长量,其中 k 为莫尔条纹移动条数, P 为光栅常数,从而利用莫尔条纹放大法测量金属丝杨氏模量,测量模型为

$$E = \frac{F}{S} \cdot \frac{L}{\Delta L} = \frac{4FL}{\pi d^2 k P} \quad (4)$$

2.1.3 实验仪器

实验装置由三部分组成,包括光源系统,杨氏模量测定仪和成像系统,见图 3 所示。实验中采用光强可调的半导体激光器作为光源,结合焦距为 5cm 和 10cm 的凸透镜共同组成光源系统,使出射光为平面光源,更易于观察实验现象。杨氏模量测定仪经改进后由两个栅距相同的光栅替换原仪器上的光杠杆组件,见图 3 和图 4(b)所示,一个光栅固定于金属丝夹具上,另一个光栅则置于可定量改变角度的夹具上,旋转施力手轮使金属丝伸长时,莫尔条纹位置发生移动。成像系统则采用测微目镜,所观察到的莫尔条纹图样见图 5 所示,测微目镜内置有分划板,可记录条纹移动位置,测量精度可达 0.001mm,实验中每移动 5 条莫尔条纹,记录一次拉力计读数,多次重复测量即可计算获得杨氏模量大小。

2.1.4 实验数据

实验中开展两组对照试验,其一为采用光栅常数分别为 $P=0.02\text{mm}$ 和 $P=0.01\text{mm}$ 不同光栅常数的光栅片进行测量,见表 1 和表 2,实验结果表明光栅常数越小,观察到的莫尔条纹越密集,

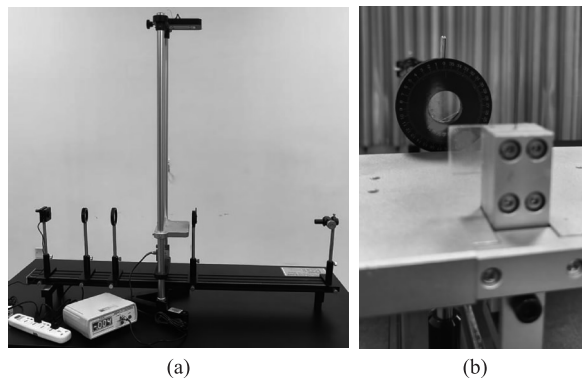


图 4 莫尔条纹法实验仪器图
(a) 实验仪器图; (b) 光栅装置结构

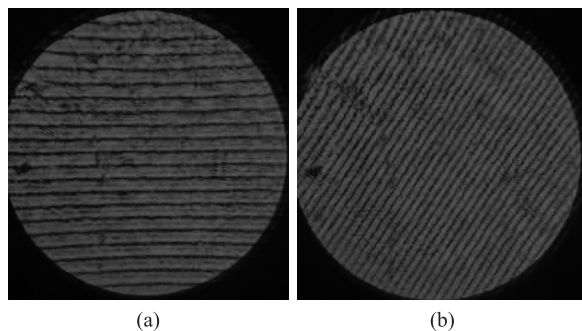


图 5 两光栅不同交角 θ 现象图
(a) 交角 θ 较小时; (b) 增大交角 θ 时

测量误差越大;其二对于光栅常数相同的装置,改变两光栅片的相对角度,随着角度变大,莫尔条纹越密集,见图 5 所示,测量相对误差越大。测量结果与理论分析即式(1)相符,可依据这一分析指导实验参数的设计。

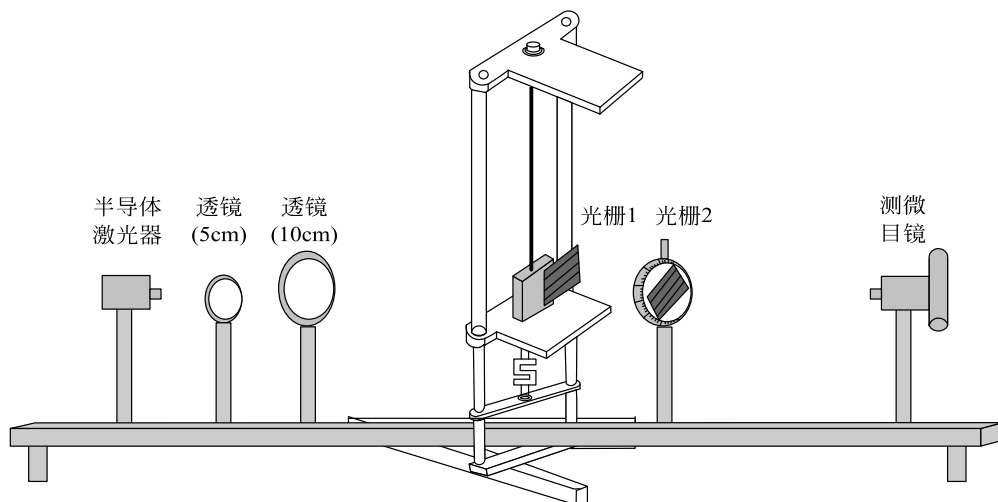


图 3 莫尔条纹法实验装置结构示意图

表 1 拉力大小数据表($P=0.02\text{mm}$)

i (次数)	m_1/kg ($\theta=0^\circ$)	m_2/kg ($\theta=2^\circ$)	m_3/kg ($\theta=4^\circ$)
1	0.598	0.611	0.615
2	0.601	0.615	0.617
3	0.604	0.613	0.620
4	0.592	0.610	0.619
5	0.609	0.615	0.622
6	0.605	0.612	0.618
$\bar{m}/\text{kg}$	0.603	0.613	0.618
$E \times 10^{11}/\text{Pa}$	1.97	1.99	2.01
$\Delta E/100\%$	1.9	3.6	4.6

表 2 拉力大小数据表($P=0.01\text{mm}$)

i (次数)	m_1/kg ($\theta=0^\circ$)	m_2/kg ($\theta=2^\circ$)	m_3/kg ($\theta=4^\circ$)
1	0.298	0.320	0.336
2	0.304	0.318	0.341
3	0.307	0.322	0.334
4	0.305	0.315	0.343
5	0.301	0.317	0.339
6	0.306	0.315	0.332
$\bar{m}/\text{kg}$	0.304	0.317	0.338
$E \times 10^{11}/\text{Pa}$	1.98	2.07	2.19
$\Delta E/100\%$	2.6	7.3	14.1

2.1.5 实验分析

(1) 实验中采用的金属丝为 304 不锈钢,在实验室环境温度($t=22.0^\circ\text{C}$)下,其杨氏模量参考值为 $1.93 \times 10^{11} \text{Pa}$,将测量值与理论值相比较,相对误差较小,说明测量结果真实可靠,证实了该方法的可行性与可实践性。

(2) 金属丝拉伸后有弹性滞后效应,因此施加拉力后需等待拉力计示数稳定后再进行读数,防止数字拉力计跳字现象引起测量误差。

(3) 实验中由于莫尔条纹测量位置无法准确测定,同时金属丝的弹性滞后效应还会引起金属丝的微小收缩,使得实际观测的 5 个条纹变化并不严格完整,由此测量结果有一定误差。

(4) 测微目镜观察视野有限,在有限视野内很难实现多组连续力加载,需要进一步提高实验装置的成像系统,实现连续力多组测量。

2.2 单缝衍射法测量杨氏模量

2.2.1 单缝衍射原理

光在传播过程中遇到障碍物时偏离直线传播,进入几何阴影区域,使光强重新分布的现象称为光的衍射。如果光波波长与缝、孔或障碍物尺寸相当或者更大时,衍射现象最明显。当一束平行光垂直照射狭缝时,在接收屏处会观察到明暗相间的衍射条纹,如图 6 所示。由衍射图样中强度极小的一般公式

$$a \sin \theta = k\lambda \quad (k=1,2,3,\dots) \quad (5)$$

其中, a 为狭缝宽度, λ 为半导体激光器波长 650nm , k 为暗条纹级数, $\sin \theta$ 可由下式计算

$$\sin \theta = \frac{y}{r} = \frac{y}{\sqrt{y^2 + x^2}} \quad (6)$$

其中, x 为狭缝到接收屏的距离, y 为某一级暗纹到中央明纹的距离,将式(6)代入式(5)中则有

$$a = \frac{k\lambda \sqrt{y^2 + x^2}}{y} \quad (7)$$

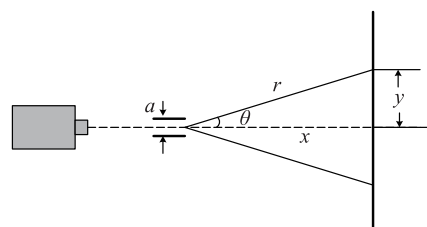


图 6 单缝衍射原理图

2.2.2 杨氏模量测量原理

将狭缝装置安装在杨氏模量实验仪上,将金属丝的微小伸长量与狭缝宽度大小建立联系构建实验测量模型即可测量得到杨氏模量的大小。未加力时可依据观察测量的条纹宽度计算得到狭缝宽度 a_1 ,当加力后,条纹宽度发生改变,再次测量计算得到狭缝宽度 a_2 ,则金属丝的伸长量为 $\Delta L = a_1 - a_2$,将其代入式(3)得到测量模型即为

$$E = \frac{F}{S} \cdot \frac{L}{\Delta L} = \frac{4FL}{\pi d^2 (a_1 - a_2)} \quad (8)$$

2.2.3 实验仪器

实验装置由三部分组成,包括光源系统,杨氏模量测定仪和成像系统,见图 7 所示。实验中采用光强可调的半导体激光器作为光源。杨氏模量测定仪经改进后由两个壁纸刀片替换原仪器上的光杠杆组件^[12],见图 8(b)所示,一个刀片固定于

中托板上,另一个刀片则置于金属丝夹具上,旋转施力手轮使金属丝伸长时,衍射条纹宽度改变,如图9所示。利用游标卡尺测量出衍射条纹宽度大小。

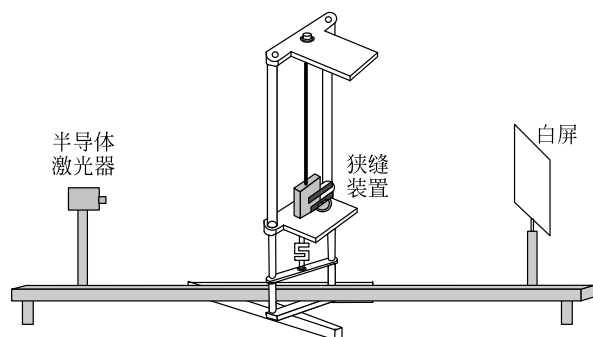


图7 单缝衍射法实验装置结构示意图

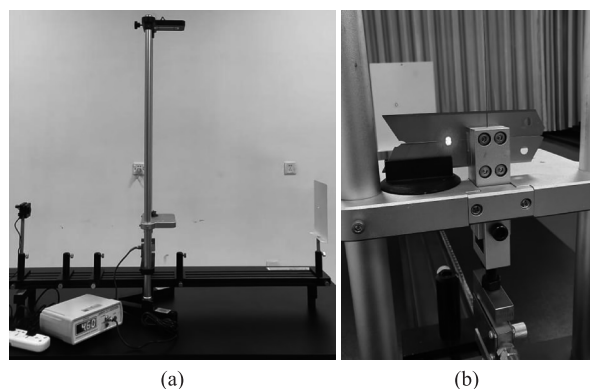


图8 单缝衍射法实验仪器图
(a) 实验仪器图; (b) 单缝装置结构

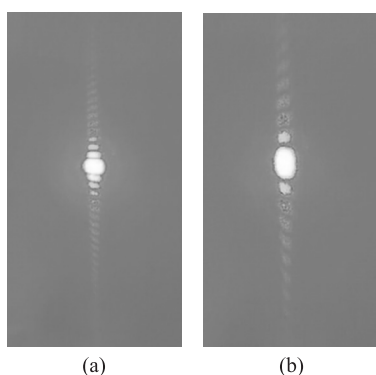


图9 改变狭缝宽度 a 衍射现象图
(a) 未加力时衍射图样; (b) 加力后衍射图样

2.2.4 实验数据

实验中利用数字拉力计约每加0.2kg力后观察并用游标卡尺分别测量 ± 1 级和 ± 2 级暗纹宽度,实验数据见表3所示。依据测量模型公式(4),狭缝宽度变化量(即金属丝伸长量)与拉力

变化量呈线性关系,采用作图法求出直线斜率大小 $k_1=5.59 \times 10^4 \text{ N/mm}$, $k_2=5.74 \times 10^4 \text{ N/mm}$,见图10所示。再结合测量模型及测量物理量经过计算得出:测量对象为1级暗纹时,测得杨氏模量 $E_1=1.82 \times 10^{11} \text{ Pa}$;测量对象为2级暗纹时,测得杨氏模量 $E_2=1.87 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 。结合理论值计算相对误差分别为 $\delta_1=5.6\%$, $\delta_2=2.9\%$ 。实验结果分析表明,随着拉力增大,单缝宽度变小,衍射现象更为明显;实验中所测量 ± 1 级和 ± 2 级暗纹宽度均随拉力增大而变大,其中 ± 2 级较 ± 1 级暗纹宽度变化稍明显,实验中更易测量,测量结果相对误差更小。

表3 条纹宽度数据表

F/kg	± 1 级暗纹/mm	± 2 级暗纹/mm
0.000	4.02	8.14
0.195	4.26	8.58
0.397	4.54	9.10
0.618	4.90	9.72
0.825	5.28	10.36
1.005	5.62	11.08
1.193	6.20	11.96
1.395	6.74	12.76
1.598	7.26	14.12
1.787	8.20	15.90
2.01	9.40	18.10
2.20	10.80	20.28
2.40	12.56	23.40
2.60	15.48	29.60
2.78	20.12	36.58

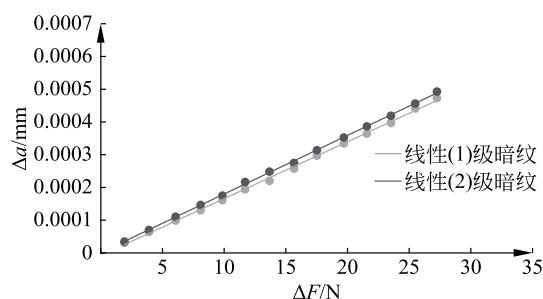


图10 狭缝宽度变化量随拉力大小变化图

2.2.5 实验分析

(1) 测量值与理论值相比较,相对误差较小,说明测量结果真实可靠,证实了该方法的可行性与可实践性。

(2) 实验误差主要来源于衍射条纹测量位置的确定。衍射图样明暗分界并不是特别清晰,因此进行定量测量时存在估量的成分。需要进一步改进成像测量装置,如采用光强探测器辨别衍射图样的位置。

(3) 实验中采用的数字拉力计显示拉力值大小,分辨率为 0.01kg。2kg 量程以下拉力值在数显式仪表中可读取 4 位数显读数,而超出 2kg 拉力值后仅能读出 3 位数显读数,因此拉力值越大,受仪器自身限制,测量精度有所下降。若采用更高精度拉力值测量仪器,实验结果将更加精确。

3 结语

通过对现有实验仪器的改造和组装,可定量实现莫尔条纹法和单缝衍射法测量杨氏模量的大小,实验现象明显,实验结果的重复性和稳定性好。两种方法对比来看,莫尔条纹法的实验精度略高于单缝衍射法,但光路调节更为复杂,因此在开展实验时应合理选择实验方法及实验仪器。此外该实验有以下明显优势:(1)两种方法均提高了杨氏模量的测量精度。利用原有实验仪器开展实验时,学生实验数据表明会产生约 8% 的相对误差,而改进后的实验装置在合理设计仪器参数,规范调节下,相对误差可以控制在 5% 以下。(2)改进后的实验仪器拓展性强,可开展多项实验内容的探究,符合“积木式”仪器设计思想,在导轨上放置其他实验仪器实现微小量的测量,如微小位移、金属材料的线胀系数等。(3)将该实验装置作为学生拓展性实验研究,有利于动手实践训练,加深对理论知识理解,更好地培养理论联系实践的能力。

附录

表 4 螺旋测微计测金属丝直径测量数据表
螺旋测微计分度值:0.01mm; 量程:0~25mm; 零点读数:0.005mm 仪器误差:±0.004mm

测量次数	1	2	3	4	5	平均值 D_0	修正值
直径 d_i/mm	0.510	0.508	0.512	0.510	0.513	0.511	0.506

金属丝原长 L :668.5mm

单缝到屏的距离 x :1905.6mm(米尺仪器误差:±0.5mm)

参 考 文 献

- [1] 苑东明. 基于静电激振法测量微机械材料的杨氏模量[J]. 新型工业化, 2018, 8(6): 41-44.
YUAN D M. Young modulus measurement of micromechanical materials based on electrostatic excitation method[J]. The Journal of New Industrialization, 2018, 8(6): 41-44. (in Chinese)
- [2] 张丹丹, 战再吉. 石墨烯/金属复合材料力学性能的研究进展[J]. 材料工程, 2016, 44(5): 112-119.
ZHANG D D, ZHAN Z J. Progress in research on mechanical properties of graphene/metal composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(5): 112-119. (in Chinese)
- [3] 傅敏, 王会才, 洪友士. 微米/纳米尺度的材料力学性能测试[J]. 力学进展, 2000(3): 391-399.
FU M, WANG H C, HONG Y S. Mechanical properties testing of materials at micro/nano scale[J]. Advance in Mechanics, 2000(3): 391-399. (in Chinese)
- [4] 车东伟, 姜山, 张汉武, 等. 静态拉伸法测金属丝杨氏模量实验探究[J]. 大学物理实验, 2013, 26(2): 33-35.
CHE D W, JIANG S, ZHANG H W, et al. Inquiring on measuring Young's modulus of tinsel by pulling and stretching method[J]. Physical Experiment of College, 2013, 26(2): 33-35. (in Chinese)
- [5] 黄琪莉, 钱圳, 彭艺, 等. 动态法测量固体材料的杨氏模量的一种新方法[J]. 大学物理实验, 2018, 31(3): 25-28.
HUANG Q L, QIAN Z, PENG Y, et al. A new method for measuring Young's modulus of solid materials by dynamic method[J]. Physical Experiment of College, 2018, 31(3): 25-28. (in Chinese)
- [6] 刘颖, 张嘉誉, 王颖, 等. 激光杠杆弯曲法测杨氏模量[J]. 大学物理实验, 2015, 28(6): 28-30.
LIU Y, ZHANG J Y, WANG Y, et al. Measuring the Young's modulus of laser lever bending method[J]. Physical Experiment of College, 2015, 28(6): 28-30. (in Chinese)
- [7] 赵绍智, 蒋添雨, 刘志翔, 等. 基于超声波压缩波测量软组织杨氏模量[J]. 中国医疗设备, 2019, 34(2): 35-37, 53.
ZHAO S Z, JIANG T Y, LIU Z X, et al. Measurement of Young's modulus of soft tissues using ultrasonic compression wave[J]. China Medical Devices, 2019, 34(2): 35-37, 53. (in Chinese)
- [8] 李忠遇, 程琳. 基于排水法的金属丝杨氏模量测量研究[J]. 物理与工程, 2022, 32(3): 100-104.
LI Z Y, CHENG L. Steady on measurement of Young's modulus of metal wire based on drainage method[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(3): 100-104. (in Chinese)
- [9] 翦知渐, 周艳明, 谢中, 等. 利用悬臂梁测量材料的弹性模量[J]. 物理实验, 2022, 42(2): 24-28.
JIAN Z J, ZHOU Y M, XIE Zhong, et al. Measuring elastic modulus of materials using cantilever[J]. Physics Experimentation, 2022, 42(2): 24-28. (in Chinese)

(下转第 182 页)

- [9] 张全哲, 邹升, 张红. 基于电子顺磁共振谱的残磁测量应用及进展[J]. 光谱学与光谱析, 2024, 44(1): 22-28.
ZHANG Q Z, ZOU S, ZHANG H. Application and progress of residual magnetometry based on electron paramagnetic resonance spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(1): 22-28. (in Chinese)
- [10] 袁嘉悦, 付鹏翔, 高松, 等. 高频高场电子顺磁共振技术在自旋量子态研究中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(3): 144-156.
YUAN J R, FU P X, GAO S, et al. The application of high-frequency/high-field electron paramagnetic resonance in the research on spin qubits[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(3): 144-156. (in Chinese)
- [11] WEIL J, BOLTON J. Electron paramagnetic resonance: Elementary theory and practical applications[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2007.
- [12] SCHWEIGER A, JESCHKE G. Principles of pulse electron paramagnetic resonance[M]. Oxford: Oxford University Press, Oxford, 2001.
- [13] 徐元植. 实用电子顺磁共振波谱学-基本原理和实际应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
XU Y Z. Elementary principle & practical applications [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [14] 荣星. 脉冲电子顺磁共振谱仪研制及应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
RONG X. The development and application of the pulsed electron paramagnetic resonance spectrometer[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)
- [15] 王力, 施芸城, 李梓萱, 等. 基于 LabVIEW 的电子顺磁共振信号的采集[J]. 物理实验, 2013, 33(12): 27-29.
WANG L, SHI Y C, LI Z X, et al. Measurement of electronic paramagnetic resonance spectrum based on LabVIEW[J]. Physics Experimentation, 2013, 33(12): 27-29. (in Chinese)

(上接第 175 页)

- [10] 张纯森, 吴雅苹, 刘伟杰, 等. 采用安培力与偏振法测量杨氏模量[J]. 物理实验, 2024, 44(6): 18-22.
ZHANG C M, WU Y P, LIU W J, et al. Measuring Young's modulus by using Ampere's force and polarization method[J]. Physics Experimentation, 2024, 44(6): 18-22. (in Chinese)
- [11] 马欣宇, 赵晨旭, 王欣悦, 等. 莫尔条纹测量金属线膨胀系数[J]. 大学物理实验, 2020, 33(3): 27-29.
MA X Y, ZHAO C X, WANG X Y, et al. Measuring thermal expansion of metal by using moire fringe[J]. Physical Experiment of College, 2020, 33(3): 27-29. (in Chinese)
- [12] 王一有, 马凤翔. 单缝衍射法测量玻璃板的杨氏模量[J]. 物理实验, 2016, 36(7): 36-38, 42.
WANG Y Y, MA F X. Electrical property of vanadium oxides films prepared by reactive RF sputtering[J]. Physics Experimentation, 2016, 36(7): 36-38, 42. (in Chinese)