

文章编号:1005-4642(2018)03-0021-03

数字激光散斑照相技术测金属杨氏模量

房鑫, 刘成森, 张囡囡, 赵琳琳, 杨瑶,
孙娇月, 彭金金, 于国辉, 宋嘉琦

(辽宁师范大学 物理与电子技术学院, 辽宁 大连 116029)

摘要:介绍了利用数字激光散斑照相技术测量了金属细丝的杨氏模量的方法. 该方法将激光散斑随着金属丝的伸长而变化的过程用数字记录设备(CCD)拍摄下来, 通过计算机程序对采集到的图像进行处理, 并获得2张激光散斑图的干涉条纹, 从而得到金属细丝伸长量并计算出相应的杨氏模量. 该技术能够实现金属材料杨氏模量的自动测量, 保证了测量过程的快速稳定, 提高了测量精确度.

关键词:数字激光散斑; 杨氏模量; 图像处理; 傅里叶变换

中图分类号: O438.2

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2018.03.006

在普通物理实验中, 测量金属杨氏模量普遍采用光杠杆法. 该方法使用的光路较长, 易受外界不稳定因素的影响, 同时望远镜的小视场使实验调整比较困难. 一些研究人员提出用激光散斑照相技术测量金属杨氏模量, 利用全息干板记录2次曝光的激光散斑图, 干板在暗室下进行湿处理(显影、定影)^[1-2], 然后用平行激光束照明干板记录的散斑图像, 在夫琅禾费衍射区域获得干涉条纹, 实验过程繁杂, 无法进行自动化测量; 同时由于条纹间距只能由米尺测量, 测量费时、精度不高. 本文利用数字记录器件(电荷耦合元件 CCD)连续拍摄激光散斑图像, 经计算机处理得到2次曝光的散斑干涉条纹, 从而计算出相应的金属细丝伸长量, 实现了计算机控制下的自动化测量, 该方法光路简单、仪器紧凑、实验过程稳定连续.

1 实验原理

当激光照射物体的漫射表面(如纸张、未抛光的金属表面、混凝土表面等), 或通过透明的漫射体时, 会在其表面以及附近空间产生无规则分布的亮暗斑纹, 即激光散斑^[3]. 将毛玻璃作为漫射体, 建立图1的光路(G为毛玻璃), 设毛玻璃与CCD之间的距离为 f , 调整 f 找到最佳像平面, 用CCD接收并用计算机记录, 得到1张散斑图像, 在其他条件不变的前提下, 给钢丝加重, 毛玻

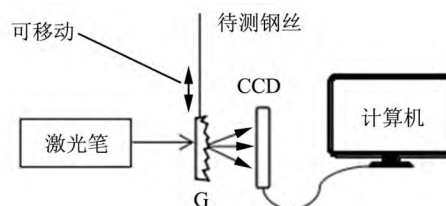


图1 实验原理图

璃随着钢丝的变化而移动, 用计算机记录, 得到第2张散斑图, 缓慢均匀地给钢丝加重, 得到一系列连续变化的散斑图, 依次选取相邻的2张散斑图, 用计算机模拟夫琅禾费衍射, 分别得到几组等间距的干涉条纹^[3-5]. 条纹间距为 x (其中 $\Delta L'$ 为钢丝的微小位移量), 有

$$x = \frac{f\lambda}{\Delta L'}, \quad (1)$$

根据杨氏模量公式

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

其中 $S = \frac{\pi d^2}{4}$, $F = mg$, $\Delta L = \sum_{i=1}^n \Delta L_i'$, $n = 1, 2, 3, \dots$ 得到

$$E = \frac{4mgL}{\pi d^2 \Delta L}. \quad (3)$$

式中, F 为钢丝产生形变时所加的外力, m 为钢丝产生形变时所加的质量, L 为钢丝原长度, S 为钢

收稿日期: 2017-11-24

作者简介: 房鑫(1993—), 女, 辽宁盘锦人, 辽宁师范大学物理与电子技术学院2016级硕士研究生.

通讯作者: 刘成森(1961—), 男, 山东济南人, 辽宁师范大学物理与电子技术学院教授, 博士, 主要研究方向为光信息技术.



丝横截面积, ΔL 为钢丝伸长量, d 为钢丝直径.

2 实验内容及实验结果

实验时,将杨氏模量测定仪(加重范围为 0~30.0 kg)置于稳定的光学平台上,如图 2 所示,激光束打在毛玻璃上用 CCD 承接,先给钢丝加重 10.0 kg 使钢丝拉直,用米尺量取此时钢丝的长度作为钢丝原长,用螺旋测微仪量取钢丝直径 d ,在 10.0 kg 的基础上给钢丝加重,同时用 CCD 连续采集移动的散斑图,共采集 7 张连续变化的激光散斑图. 图 3 分别为采集到的加重为 13.0 kg 和 16.0 kg 的数字激光散斑图.

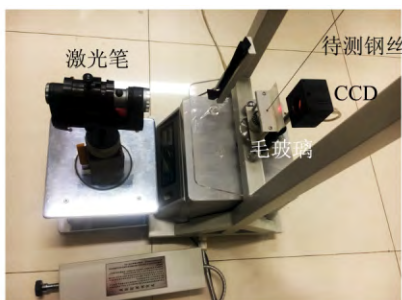


图 2 实验实物图

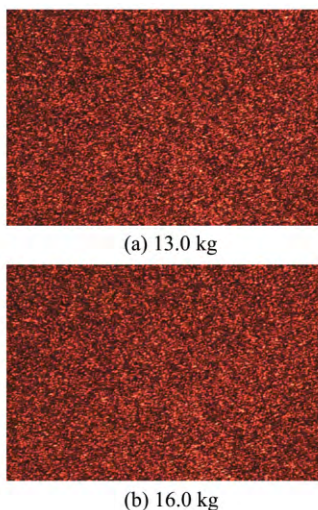


图 3 数字激光散斑图

用计算机选取加重为 13.0 kg 和 16.0 kg 的数字激光散斑图,将 2 张散斑图像的光强叠加,做傅里叶变换得到如图 4 的夫琅禾费衍射图,将图 4 中干涉条纹光强沿着横向叠加得到条纹强度分布曲线,对其进行中值滤波处理^[7],获得如图 5 的光滑的条纹分布曲线图(图中 ξ 轴为沿着移动方向频谱平面的坐标轴),在图 5 上选取 2 个连续的

峰值,峰值横坐标之差即为 2 个条纹的间距 x ,根据式(1)计算出金属细丝相应的微小位移量 $\Delta L'$,依次用计算机选取相邻的激光散斑图像,重复上述处理过程,得到表 1 的实验数据.

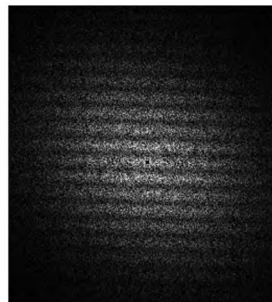


图 4 夫琅禾费衍射图

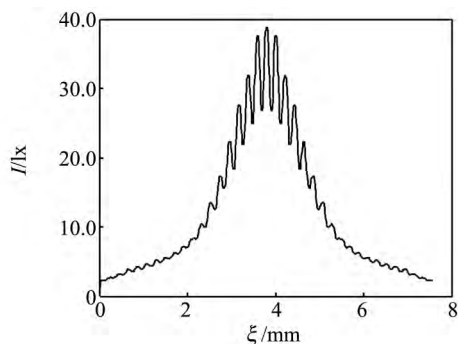


图 5 条纹强度分布曲线

表 1 实验数据

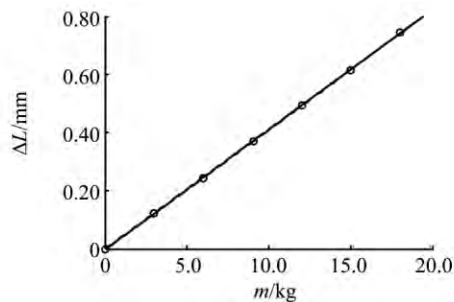
m'/kg	x/mm	$\Delta L'/\text{mm}$	$\Delta L/\text{mm}$
10.0	0	0	0
13.0	0.197	0.122	0.122
16.0	0.199	0.121	0.243
19.0	0.190	0.127	0.370
22.0	0.193	0.125	0.495
25.0	0.199	0.121	0.616
28.0	0.188	0.128	0.744

实验中的相关参量为: $L = 40.50 \text{ cm}$, $d = 0.800 \text{ mm}$, $f = 3.80 \text{ cm}$, $\lambda = 635 \text{ nm}$, CCD 像素尺寸 $\Delta = 10.0 \text{ }\mu\text{m}$. m 为钢丝产生形变时加的质量 $m = m' - 10.0 \text{ kg}$

用计算机对 m 和 ΔL 数据进行线性拟合,拟合斜率 $k = 0.0413$,得到图 6. 根据式(3)可得

$$\Delta L = \frac{4Lg}{\pi d^2 E} m, \quad (4)$$

设 $k' = \frac{4Lg}{\pi d^2 E}$, 则

图6 $m-\Delta L$ 关系图

$$\Delta L = k' m, \quad (5)$$

由 $k' = k = 0.0413$ 求得

$$E = 1.95 \times 10^5 \text{ N/mm}^2.$$

由式(3)和式(5)结合不确定度的传递公式得到杨氏模量的不确定度^[6]为

$$u_E = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial E}{\partial x_j} u_j \right)^2}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

$x_j = \{L, d, k\}$, u_j 为对应变量的不确定度, L 和 d 只测量了1次, 因此选取 L 和 d 的B类不确定度

$$u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}},$$

其中米尺和螺旋测微仪的仪器误差限分别为 $\Delta_L = 0.5 \text{ mm}$, $\Delta_d = 0.004 \text{ mm}$, 结合图6得到 $u_k \approx 0$, 代入式(6)得杨氏模量的不确定度 $u_E \approx 0.01 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$. 故实验测得的杨氏模量值为

$$E = (1.95 \pm 0.01) \times 10^{11} \text{ N/m}^2.$$

3 结束语

该测量杨氏模量的方法, 利用 CCD 和计算机快速自动的采集和处理数字激光散斑图, 保证了测量过程的连续稳定. 利用光学干涉技术的高精度的特点, 提高了测量精度. 数字激光散斑技术操作简单, 受外界因素影响小, 在实验教学中体现了现代的科技手段, 具有广泛的应用前景和实用性, 这种原理还可用于其他微小位移量的测量.

参考文献:

- [1] 张存恕, 李德宽. 用激光散斑法测金属的杨氏模量[J]. 物理实验, 1983, 3(3): 97-102.
- [2] 李淑春. 用激光散斑测微小位移及应用[J]. 中国民航学院学报, 1994, 12(3): 104-107.
- [3] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 357-375.
- [4] 李晓英, 郎晓萍. 激光散斑位移测量方法研究[J]. 北京机械工业学院学报, 2008, 23(1): 39-61.
- [5] 姚启军. 光学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 16-18.
- [6] 贾永红. 数字图像处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2015: 77-79.
- [7] 徐勋义, 张祖豪, 刘子健, 等. 基于迈克耳孙干涉的金属丝杨氏模量测量[J]. 物理实验, 2016, 36(9): 19-22.

Digital laser speckle photography to measure the Young modulus of metal

FANG Xin, LIU Cheng-sen, ZHANG Nan-nan, ZHAO Lin-lin, YANG Yao,

SUN Jiao-yue, PENG Jin-jin, YU Guo-hui, SONG Jia-qi

(School of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: A method of measuring Young modulus using digital laser speckle photography was introduced. This method using CCD camera to capture the laser speckle images which carried the elongation information of metal wire. The interference fringes were obtained by the computer simulation of Fraunhofer diffraction of two specklegrams, thus the elongation of the wire was obtained, and the Young modulus was calculated. This method was fast and stable, which realized automatic measurement and improved the accuracy under computer control.

Key words: digital laser speckle; Young modulus; image processing; Fourier transformation

[责任编辑: 尹冬梅]