

文章编号: 1001-3806(2012)06-0798-04

## 精密测量微小转角的数字全息方法及应用

任真 樊则宾\* 李俊昌 邢小林 李兴华  
(昆明理工大学 理学院, 昆明 650500)

**摘要:** 微小转角的精密测量在工程应用中具有重要的意义。为了更精确地测量微小角度,采用一种数字全息、干涉计量2次曝光法和图像处理测量微小转角的方法,进行了理论分析和实验验证,利用该方法测量了钢丝的杨氏模量,取得了误差仅为1.1%的数据。结果表明,此方法精度高、可操作性强,具有广泛的实际应用价值。这一结果对今后设计更完善的测角仪是有帮助的。

**关键词:** 全息;微小转角测量;干涉计量;杨氏模量

**中图分类号:** O438.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.06.021

### Precision measurement of mini-rotating-angles based on digital holography and its application

REN Zhen, FAN Ze-bin, LI Jun-chang, BING Xiao-jin, LI Xing-hua

(Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** Precision measurement of mini-rotating-angle is of significance in practice engineering applications. In order to measure mini-rotating-angles with much higher precision, a new method was presented combining the digital holographic, double-exposure of interferometry with image processing. Through detailed theoretical analysis and experimental verification, the Young's modulus of steel wires was measured with this method, and its error was only 1.1%. Results indicate that the method can be widely used in practical application because of its high accuracy, strong feasibility. The results are helpful for the future design of more perfect goniometers.

**Key words:** holography; mini-rotating-angle measurement; interferometry; Young's modulus

### 引言

随着计算机技术的发展,数字图像处理技术和全息干涉计量技术已被应用到现代测量技术中<sup>[1-7]</sup>。现代机械工业生产中,对零件制造的精密度要求越来越高,对微小转角测量精度要求也提出了更高的要求。传统的机械式和电磁式测角技术大多为手工测量,不容易实现自动化,测量精度受到限制。而光学测角的方法具有灵敏度高、准确度高的特点,使光学测量在实际生产中的应用越来越广泛。目前,光学测微小转角的方法除众所周知的光学分度头法和多面棱体法外,常用的还有光电编码器法、自准直法、莫尔条纹法、平行干涉图法、圆光栅法、光学内反射法、激光干涉法以及环形激光法等<sup>[1-2]</sup>。作者提出了一种利用数字全息干涉计量技术测量微小转角的方法。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60977007)

作者简介:任真(1986-),女,硕士研究生,现主要从事光信息处理的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zebinfan@yahoo.com.cn

收稿日期:2012-03-19;收到修改稿日期:2012-04-05

### 1 测量原理及测量方法

#### 1.1 测量原理

全息干涉分为单次曝光(实时法)、2次曝光、多次曝光、连续曝光(时间平均法)、非线性记录和长曝光法等<sup>[4]</sup>。2次曝光法是当漫反射平板与全息干版平面处于相互平行的状态时,进行第1次曝光。然后,将漫反射平板沿着它的一端作为转动轴,旋转一个微小的角度静止后,再进行第2次曝光,此时获得的就是双曝光全息图。将该全息图作化学处理后,再用原参考光照射,便可以再现出两个物光波前,它们都是漫反射平板表面的虚像。其中一个平行于全息干版时的原始物光波前,另一个是相对全息干版平面旋转了一个微小角度后的变化了的物光波前。这两个物光波前相互干涉形成类似于劈尖干涉的平行干涉条纹图<sup>[5-6]</sup>。这些条纹中包含了物体变化的信息,它的计算方法和劈尖干涉类似,只是不需要像劈尖干涉那样考虑半波损失<sup>[7]</sup>。根据干涉条纹的走向,可以确定物体旋转的方向;根据条纹的间距,可以确定物体转动的角度。

本文中使用的是数字全息的方法。首先拍下初始时刻的数字全息图,再拍下一时刻的数字全息图,将两幅全息图的光场进行点除,求得相位角后,代入余弦函数里就可以得到干涉条纹。对干涉条纹进行傅里叶变换后就可以得到频谱,根据频率、周期与条纹宽度的关系推算出条纹的间距,利用劈尖干涉的计算方法就可以计算出转角的大小。

1.2 测量方法

该实验是利用光杠杆法测金属丝杨氏模量实验中反射镜 M 转过的角度来进行验证的。反射镜 M 和光杠杆系统的结构如图 1 和图 2 所示。长为  $L$  的金属丝上端固定于拉伸架上,下端固定在圆柱形卡头上,卡头可在平台中间的孔中自由上下的滑动,卡头下挂有一砝码钩<sup>[8]</sup>。可以通过拉伸架底脚螺丝的调整,使钢丝铅直。当钢丝下再加负荷  $F$  时,钢丝伸长量为  $\Delta L$ ,则圆柱形卡头与光杠杆后脚  $O$  下移  $\Delta L$ ,反射镜 M 前两脚  $z$  和  $x$  不动。于是后脚  $O$  以  $z$  和  $x$  连线为轴,以  $b$  为半径转过一个角度  $\theta$ ,小平面镜 M 法线也转过角度  $\theta$ ,可得  $\tan\theta = \frac{\Delta L}{b}$ 。激光器发射出激光束,先由分束镜分为两束光束,分别经过扩束滤波成为面光源,一束光束作为物光由反射镜 M 反射,另一束光束作为参考光与其发生干涉,并由互补性氧化金属半导体 (complementary metal-oxide semiconductor, CMOS) 相机拍下全息图。每增加一个砝码的负荷,反射镜 M 便转过一个角度,拍摄 1 张全息图。实验光路图如图 3 所示。

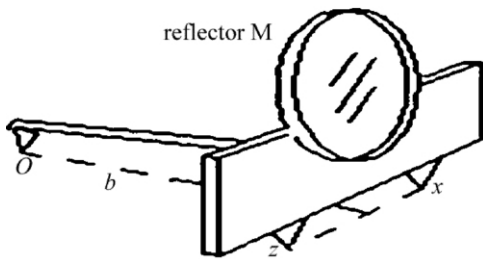


Fig. 1 Structure of reflector M

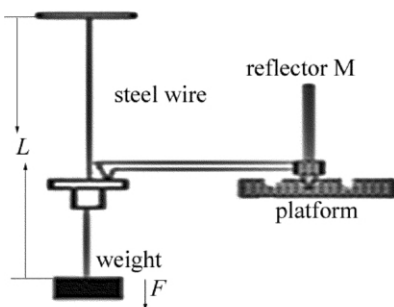


Fig. 2 Structure of optical lever system

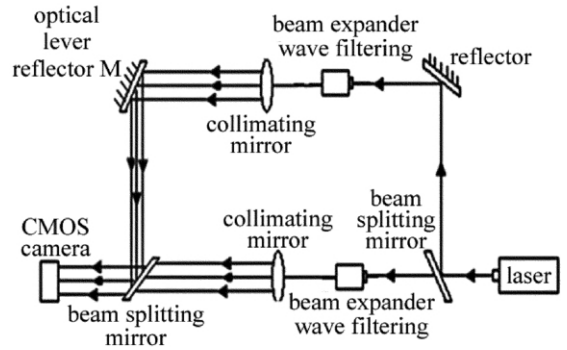


Fig. 3 Light path diagram

1.3 实验器材参量

实验中选取的钢丝直径为  $d = (0.588 \pm 0.005)$  mm,长度为  $L = (43.50 \pm 0.05)$  cm,钢丝的标准杨氏模量为  $Y_0 = 2.0 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>。光杠杆的臂长为  $b = (7.80 \pm 0.05)$  cm,激光器为波长 532nm 的半导体抽运倍频激光器,采集图像使用的 CMOS 的像素点大小为  $\Delta x \times \Delta y = 3.2\mu\text{m} \times 3.2\mu\text{m}$ 。实验中使用的砝码为  $m = (1.000 \pm 0.001)$  kg,  $g = (9.784 \pm 0.004)$  N/kg。

2 实验结果及数据处理

2.1 图像处理

初始时刻全息图如图 4 所示,加一个砝码后拍摄到的 1 时刻的全息图如图 5 所示。

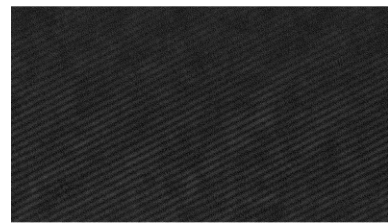


Fig. 4 Hologram of initial time

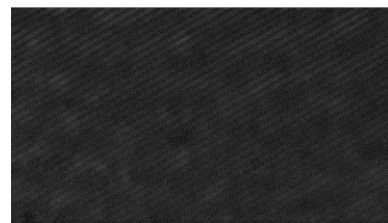


Fig. 5 Hologram while loading 1kg

这次图像处理的运行环境是 MATLAB7.0。对图 4 和图 5 分别进行快速傅里叶变换,可以得到其频谱图,分别如图 6 和图 7 所示。

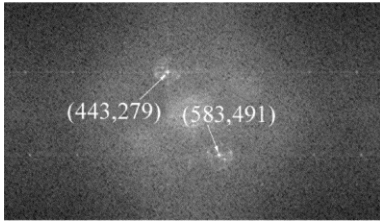


Fig. 6 The frequency spectrum of the hologram at initial time

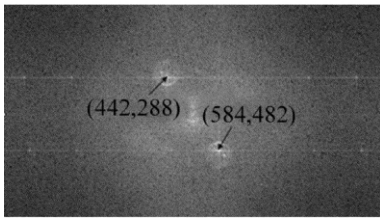


Fig. 7 Frequency spectrum while loading 1kg

可以看出傅里叶变换后,两幅全息图的频谱都为关于中心点对称的两个点<sup>[9-10]</sup>。图6中的两个点的坐标分别为(443, 279)和(583, 491),图7中的两个点的坐标分别为(442, 288)和(584, 482)。对图6中坐标为(443, 279)的点进行快速傅里叶逆变换,就可以得到初始时刻的光场 $U_0$ ,同理对图7中坐标为(442, 288)的点也进行快速傅里叶逆变换,可以得到加载1kg负荷时的光场 $U_1$ 。用得到的光场 $U_0$ 和 $U_1$ 进行点除(矩阵),再用MATLAB里的angle函数求得相位角<sup>[7]</sup>。将相位角代入余弦函数就可以看到前后两个时刻的全息图进行干涉后的干涉条纹,如图8所示。最后,对图8进行快速傅里叶变换,就可以得到干涉条纹的频谱。两个点的坐标分别为 $(x_1, y_1) = (512, 376)$ ,  $(x_2, y_2) = (512, 394)$ ,如图9所示。



Fig. 8 Interference fringe

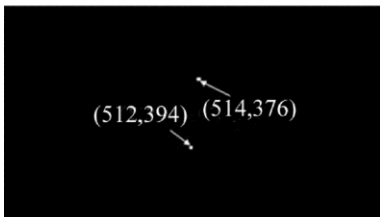


Fig. 9 Frequency spectrum of interference fringe

### 2.2 数据处理

经 CMOS 采样在  $x$  方向上的频率总量为  $\frac{1}{\Delta x} = \frac{1}{3.2\mu\text{m}}$ , 在  $y$  方向上的频率总量为  $\frac{1}{\Delta y} = \frac{1}{3.2\mu\text{m}}$ 。采集到的图像大小为  $1024 \times 768$ , 则频率在  $x$  方向上的分量为  $f_x = \frac{x_1 - x_2}{2 \times 1024} \cdot \frac{1}{\Delta x} \approx 305.176/\text{m}$ , 在  $y$  方向上的分量为  $f_y = \frac{y_1 - y_2}{2 \times 768} \cdot \frac{1}{\Delta y} \approx 3662.109/\text{m}$ 。条纹的宽度为  $T = \frac{1}{\sqrt{f_x^2 + f_y^2}} \approx 2.721 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。

劈尖干涉的光程差  $\delta = 2ne + \frac{\lambda}{2}$ <sup>[7]</sup> 其中  $\lambda$  为光的波长,空气折射率  $n = 1$ ,  $e$  为劈尖的高度,可推出相邻两条明条纹或暗条纹在表面上的距离  $T = \frac{\lambda}{2n\sin\theta}$ , 则  $\theta \approx \sin\theta = \frac{\lambda}{2T}$ 。

已知杨氏模量公式为  $Y = \frac{FL}{S\Delta L} = \frac{FL}{Sb\theta}$ <sup>[11]</sup> 其中  $\Delta L$  是钢丝伸长量;  $F = 1\text{mg} = 9.784\text{N}$ ;  $L = (47.50 \pm 0.05) \text{ cm}$ ;  $S = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 0.271\text{mm}^2$ ;  $\tan\theta = \frac{L'}{b}$ , 则  $\Delta L = b\tan\theta \approx b\sin\theta = \frac{b\lambda}{2T} = 7.625 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。可得  $Y = (2.012 \times 10^{11}) \text{ N/m}^2$ 。

依次递增 1kg 的载荷,同理可以依次计算出反射镜 M 转过的角度  $\theta$  和杨氏模量  $Y$  的值,如表 1 所示。

Table 1 Data sheet

number	rotation angle of reflector M $\theta/\text{rad}$	Young's modulus $Y/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$
1	$9.776 \times 10^{-4}$	$2.060 \times 10^{11}$
2	$10.004 \times 10^{-4}$	$1.966 \times 10^{11}$
3	$9.864 \times 10^{-4}$	$2.021 \times 10^{11}$
4	$9.998 \times 10^{-4}$	$1.968 \times 10^{11}$
5	$10.065 \times 10^{-4}$	$1.955 \times 10^{11}$
6	$10.208 \times 10^{-4}$	$1.927 \times 10^{11}$
7	$10.112 \times 10^{-4}$	$1.946 \times 10^{11}$

计算可得杨氏模量平均值为  $\bar{Y} \approx (1.978 \times 10^{11}) \text{ N/m}^2$ , 平均值的相对误差为  $Y_r = \frac{\bar{Y} - Y_0}{Y_0} \times 100\% = 1.1\%$ , 标准误差为  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_0)^2}{n}} = (0.0485 \times 10^{11}) \text{ N/m}^2$ , 相对不确定度为  $U_Y = \frac{\sigma}{Y_0} = 2.425\%$ 。

### 3 结 论

提出了利用光学全息计量技术测微小转角的方法,将该方法应用于测量钢丝的杨氏模量,研究结果表明,本文中所提出的微小转角的测量方法是可行的,该方法具有精度高、非接触等优点,可实现微小角度的远距离测量,未来将此光学系统集成设计成全息干涉计量仪器,有望在实际生产中得到推广和应用。

#### 参 考 文 献

- [1] YANG G J, MEI Y, BAI Y X. Development and application of holography[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(2): 96-100( in Chinese).
- [2] WU Y M, GAO L M, CHEN L Y. Precision measurement and transmission of azimuthal information based on polarization modulated light [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(3): 525-529( in Chinese).
- [3] MA H, Zh Y A. Application of the real-time digital holograph in the measurement of temperature field [J]. Laser Journal, 2009, 30(3): 24-25( in Chinese).
- [4] WU X K, WU C N, SONG H Q. Explanation of the interference fringes of double-exposure holography with the object moving along the longitudinal direction of speckle plane [J]. Physics Experimentation, 2007, 27(7): 39-40( in Chinese).
- [5] ZHU X G, CUI W. A new data processing algorithm for angle measurement with interferometer [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(6): 541-544( in Chinese).
- [6] HUANG Y, SHE W L. Mini-rotating-angle measurement based on the linear electrooptic effect: a new method [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(1): 133-137( in Chinese).
- [7] XIONG B H, LI J Ch. The principles and methods of holographic interferometry [M]. Beijing: Science Press, 2009: 323-327( in Chinese).
- [8] QI J J, MA W H, XIAO H. Measuring elasticity modulus of wire with michelson interferometer by using linear CCD [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2010, 29(1): 19-22( in Chinese).
- [9] LIU Q W. Computer simulation of digital holography [J]. Physics and Engineering, 2010, 20(4): 45-48( in Chinese).
- [10] CHEN F Ch, HUANG Z R, LI R. Measurement of the period of straight interference fringes and its application in phase detection [J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 105-108( in Chinese).
- [11] ZHANG X B, LI X Y. University physics experiment [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008: 38-39( in Chinese).

版权所有 © 《激光技术》编辑部