

文章编号:1002-2082 (2020) 03-0477-05

扭转角测量系统中焦距误差分析

杨文昌^{1,2}, 王志乾¹, 宋卓达^{1,2}, 杜 闻^{1,2}, 李勤文^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对莫尔条纹测量扭转变形方案, 分析了双光栅在光学系统存在焦距误差时对扭转角测量精度的影响。通过在传统的莫尔条纹测量扭转角理论公式的基础上引入焦距对于光栅像的缩放效应, 推导出含有焦距因子的扭转角测量模型。由模型可知, 随着光学系统焦距差异的增大, 对应的扭转角也会随之发生较大变化。特别当光栅夹角在小角度范围 ($1^\circ \sim 3^\circ$) 内变化时尤为明显, 最终影响到扭转变形的测量精度。在设计的实验中, 利用 2 个已知焦距的光学系统, 通过采集莫尔条纹图像进行扭转角精度分析, 验证了该文提出的理论。

关键词: 扭转变形; 莫尔条纹; 光学系统; 焦距

中图分类号: TN206, TH712

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0301007

Analysis of focal length error in torsion angle measurement system

YANG Wenchang^{1,2}, WANG Zhiqian¹, SONG Zhuoda^{1,2}, DU Wen^{1,2}, LI Qinwen^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the torsional deformation scheme of Moiré fringe measurement, the influence of double-grating on the measurement accuracy of torsion angle in the optical system with focal length error was analyzed. Based on the traditional Moiré fringe measurement torsion angle theory formula, the scaling effect of focal length on the grating image was introduced, and the torsion angle measurement model with focal length factor was derived. According to the derived model, as the focal length difference of the optical system increases, the corresponding torsion angle also changes greatly. Especially the change at small angles ($1^\circ \sim 3^\circ$) is particularly obvious, which ultimately affects the measurement accuracy of the torsional deformation. In the designed experiment, the theory proposed was verified by using two optical systems with known focal lengths to analyze the torsion angle accuracy by collecting the Moiré fringe image.

Key words: torsional deformation; Moiré fringe; optical system; focal length

引言

在工程实际中, 例如航天测量船在海上运行时, 处于同一基座的各测量设备之间在外力作用下总会产生三维相对角变形, 分别为俯仰角 (pitch)、方位角 (yaw)、扭转角 (roll), 最终会影响船载测量设备的测量精度^[1-2]。其中扭转角是指绕梁设备自身连线的角度变化, 相对其他两维角度测量难度要大得多, 对于扭转角的测量具有重要

的意义^[3-4]。扭转变形目前存在多种测量方法。在这些方法中, 光学测量方法是一种测量准确度、灵敏度非常高的非接触测量方法, 并得到了广泛的应用^[5]。利用双光栅叠加生成的莫尔条纹, 因为其能够有效放大各种位移变化, 可以大幅度提高设备变形的测量精度, 现已被广泛应用于角度和长度等物理量的测量中^[6-7]。文献^[8-9]提出将莫尔条纹应用于扭转变形的测量中, 并取得了很高的测

收稿日期: 2019-05-27; 修回日期: 2019-09-12

基金项目: 吉林省重点科技攻关项目 (20170204050GX, 20190302086GX)

作者简介: 杨文昌 (1992-), 男, 博士研究生, 主要从事光电测量及数字图像处理方面研究。E-mail: wenchang201506@126.com

通信作者: 王志乾 (1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事光电测量及数字信号处理方面的研究。E-mail: wangzhiqian@ciomp.ac.cn

量精度。

中长焦距的光学透镜和光学系统是天文望远镜、空间光学系统等装置中广泛使用的光学器件, 由于此类元件焦距长, 加工装调难度大, 使得不同光学系统之间的焦距值通常难以保持一致^[10-12]。要实现扭转角的非接触测量, 通常需要将 2 个测量光栅放置于 2 个自准直光学系统的焦面上, 并且理想情况下两光管焦距应该保持一致。因为焦距误差导致莫尔条纹成像与理论公式存在偏差, 从而给扭转角的测量引入了误差, 所以需要从理论层面上进行系统校正。

本文针对莫尔条纹测量扭转变形方案, 分析了光学系统焦距误差对于扭转角测量精度的影响。

1 理论模型

1.1 扭转角测量原理

测量模型原理如图 1 所示, 光源、光栅 1 固连在同轴上, 设备发生扭转变形时带动光栅 1 绕 z 轴实现同步转动。光线通过光学系统 1 后形成准直条纹光束, 并且理想情况下 2 个光学系统的焦距相同, 因此利用此光路可完成扭转变形的非接触测量, 从而增加测量距离^[13-14]。最终经过光栅 1 和光栅 2 形成的莫尔条纹图像被 CCD 接收。

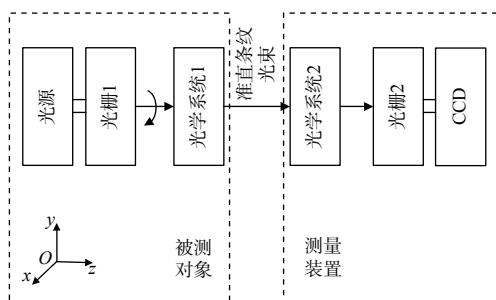


图 1 测量原理图

Fig. 1 Principal diagram of torsion angle measurement

扭转角非接触测量是通过双光栅干涉产生的莫尔条纹来构建理论模型的^[15-16]。建立如图 2 所示直角坐标系, 假设有 2 块黑白型长光栅尺, 光栅面相互平行, 光栅栅线间距分别为 d_1 和 d_2 , 取光栅常数为 d_1 的光栅 G1 的任一栅线为 y 轴, 与其垂直的方向取为 x 轴。那么两光栅栅线夹角为 θ , 莫尔条纹之间距离为 W , 以此坐标系求取光栅叠合后的莫尔条纹方程。

通过图 2, 根据平面几何原理可以推导出莫尔条纹的宽度公式:

$$W = \frac{d_1 d_2}{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 - 2d_1 d_2 \cos \theta}} \quad (1)$$

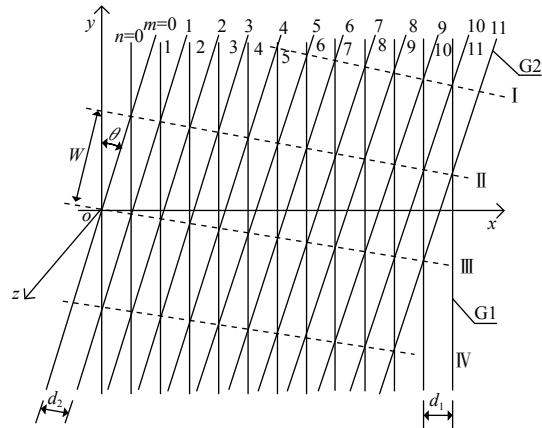


图 2 两光栅叠加产生的莫尔条纹坐标系

Fig. 2 Moiré fringe coordinate system generated by two gratings superposition

在实际工程中, 通常采用栅线间距 d 相同的 2 个光栅, 以上公式可简化为

$$W = \frac{d}{2 \sin(\theta/2)} \quad (2)$$

由公式(2)可得光栅夹角的表达式如下所示:

$$\theta = 2 \arcsin \frac{d}{2W} \quad (3)$$

由(3)式可知, 只要求得莫尔条纹的宽度 W 就可求得两光栅的夹角 θ , 只要求得莫尔条纹的宽度 W 变化, 就可求得两光栅的夹角 θ 的变化。因此在用双光栅产生的莫尔条纹进行扭转角的测量时, 设备间的扭转变形带动光栅转动, 根据莫尔条纹的间距变化, 即可求解扭转角。

1.2 光学系统焦距与扭转角关系模型

取 2 个光学系统焦距分别为 f_1, f_2 (其中 $f_1 > f_2$), 则两焦距差异对光栅栅距的缩放作用 σ_d 可用下式表示:

$$\frac{\sigma_d}{d} = \frac{f_2 - f_1}{f_1} \quad (4)$$

将公式(4)带入公式(1)可得带有焦距的莫尔条纹宽度关系式:

$$W' =$$

$$\frac{\left(1 + \frac{f_2 - f_1}{f_1}\right) d^2}{\sqrt{\left[2 + \left(\frac{f_2 - f_1}{f_1}\right)^2 + 2\left(\frac{f_2 - f_1}{f_1}\right)\right] d^2 - 2\left(1 + \frac{f_2 - f_1}{f_1}\right) d^2 \cos \theta}} \quad (5)$$

则此时不同扭转角度下对应的扭转角为

$$\theta' = 2 \arcsin \frac{d}{2W} \quad (6)$$

通过公式(6)得出, 由于受到 2 个光学系统不同的焦距 f_1, f_2 的影响, 扭转角与莫尔条纹宽度之间关系式发生改变, 对扭转角的测量精度造成了影响。

对比公式(3)和(7)可得在不同光栅夹角下对应的扭转角误差为 $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = \theta' - \theta \quad (7)$$

2 仿真分析

取 2 个光学系统焦距差异分别为 0.5%、1.0%、2.0%, 2 个光栅栅距同为 70 μm , 利用公式(7)计算得到在不同光栅夹角下的扭转角误差曲线如图 3 所示。可以看出当光学系统焦距存在差异时, 在不同光栅夹角下计算所得各扭转角要大于理想情况(焦距误差为零)下的真实值, 也即说明随着焦距差异的增大, 莫尔条纹的宽度变化要相对缓慢一些。在 2 个光学系统焦距误差为 0.5% 时, 扭转角测量误差整体小于 0.05°, 而当焦距误差增大至 2% 时, 扭转角的测量误差平均增大近 10 倍。说明扭转角误差随焦距误差呈现非线性变化, 对测量精度影响较大。同时在同一变化曲线中, 光栅夹角的测量误差随着光栅夹角的增大先减小后缓慢增大。理论模型误差在 1°~3° 范围内变化尤为明显, 说明在小角度下焦距误差对于扭转角测量精度影响较大。

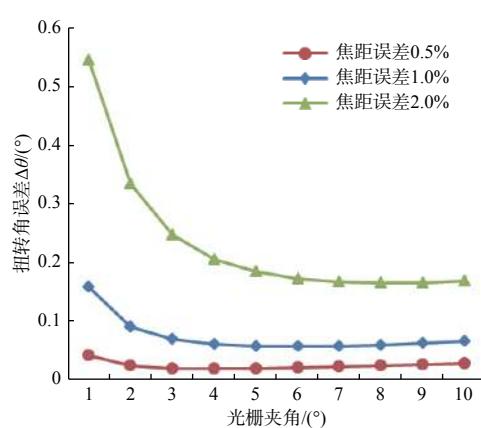


图 3 扭转角与焦距误差关系曲线

Fig. 3 Torsion angle and focal length error curve

3 实验验证

3.1 实验装置介绍

图 4 为设计的仿真实验装置, 主要设备有:

红色发光二极管作为光源, 光学系统 1 的焦距为 1 325 mm, 光学系统 2 的焦距为 1 295 mm, 2 个矩形测量光栅栅距同为 70 μm , 分辨率(pixel)为 1 999 × 2 000、像元尺寸为 4.8 $\mu\text{m} \times 4.8 \mu\text{m}$ 的面阵 CCD 以及图像采集装置, 轴角编码器采用的是海德汉 MRP5080, 测量精度优于 2.5"。图 5 为采集获得的莫尔条纹图像。

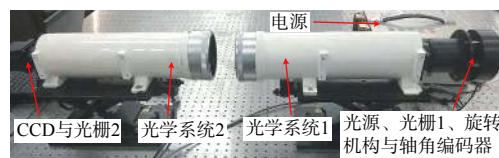


图 4 实验设备布局

Fig. 4 Experimental equipment layout

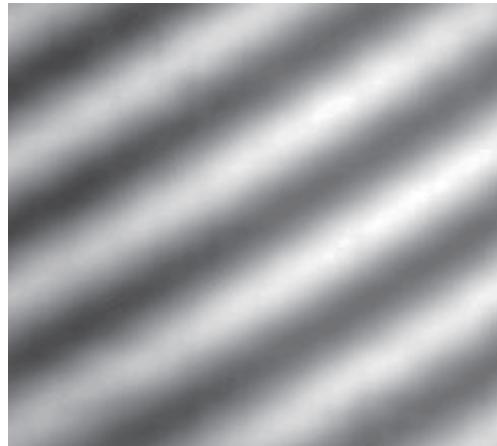


图 5 采集得到的莫尔条纹图像

Fig. 5 Captured Moiré fringe image

整个装置的操作原理如下: 控制旋转机构转动, 模拟扭转变形, 同时带动光栅 1 和轴角编码器发生转动, 通过轴角编码器可以获得光栅 1 发生的转动角度。2 个自准直光学系统焦距存在差异, 在像面处形成大小不同的光栅像。在不同角度下, 叠加在 CCD 上的莫尔条纹图像发生变化, 然后从零位开始每隔 1° 采集对应图像, 并将编码器转动的角度作为真值, 计算焦距在不同光栅夹角下存在的误差。

3.2 实验结果分析

表 1 是将编码器转动角度作为真值, 光栅夹角在 1°~10° 范围内进行测量的结果。可以看出 2 个光学系统的焦距差异使得扭转角的整体测量误差较大, 在 1°~3° 的小角度范围内这种现象尤为明显。在光栅夹角为 1° 时测量误差达到最大值, 测量精度下降了 67%。因此在利用莫尔条纹测量扭

扭转变形时, 2 个光学系统的焦距误差会严重影响扭转变形的测量精度。

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

真值/(°)	测量值/(°)	误差/(°)
1	1.67	0.67
2	2.42	0.42
3	3.31	0.31
4	4.26	0.26
5	5.23	0.23
6	6.21	0.21
7	7.21	0.21
8	8.20	0.20
9	9.20	0.20
10	10.21	0.21

4 结论

本文建立了光学系统焦距对扭转角测量精度影响的理论模型, 通过分析得出在非接触测量时光学系统焦距误差使得莫尔条纹成像规律发生改变, 从而影响了扭转变形的测量精度。通过实验获取的计算结果, 扭转角最大测量误差达到 0.67°。与理论仿真相对照, 证明了光学系统焦距对扭转角测量精度, 尤其是在小角度下有着较大影响。因此在利用莫尔条纹进行扭转变形测量时, 应对光学系统焦距进行精确测量, 并进行相应补偿, 从而将光学系统焦距误差控制在合理目标范围内。

参考文献:

- [1] LI Baolin, CAI Sheng. Three-dimensional small angle measurement based on pyramid prism[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 32(6): 76-80.
李保霖, 蔡盛. 基于金字塔棱镜的三维小角度测量方法[J]. *光电技术应用*, 2017, 32(6): 76-80.
- [2] LYU Yong, FENG Qibo, LIU Lishuang, et al. Six-degree-of-freedom measurement method based on multiple collimated beams[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3597-3602.
吕勇, 冯其波, 刘立双, 等. 基于多准直光的六自由度测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(11): 3597-3602.
- [3] LIU X M, ZHANG Y Y, FENG X Y, et al. A novel method for hull's three dimensional deformation measurement[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013(344): 93-98.
- [4] BAO Haige. Ship body deformations and measurement method[J]. *Ship Engineering*, 2013, 35(5): 72-74.
鲍海阁. 舰船船体变形及其测量方法[J]. *船舶工程*, 2013, 35(5): 72-74.
- [5] GAO Y, WANG X S, WU W, et al. Method for estimating the impact of atmospheric turbulence on 3D angular deformations measurement[J]. *Optik*, 2014, 125(17): 4855-4859.
- [6] GAO Jinlei, ZONG Mingcheng. Development of symmetrical double-grating interferometric displacement measuring system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 43(9): 126-132.
高金磊, 宗明成. 一种对称式双光栅干涉位移测量系统的研制[J]. *中国激光*, 2018, 43(9): 126-132.
- [7] YANG Dongxing, YAN Shuhua, DU Liebo, et al. Design of a miniature single-grating displacement measuring system with nanometer resolution[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 1020-1025.
杨东兴, 颜树华, 杜列波, 等. 一种小型化纳米级单光栅位移测量系统的研制[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(4): 1020-1025.
- [8] LI Xiangrong. The research on roll measurement based on moire fringe[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2006.
李向荣. 基于莫尔条纹法的扭转测量技术研究[D]. 北京: 中国科学院, 2006.
- [9] QIAO Yanfeng, WANG Chenglong, LI Xiangrong, et al. Measurement of torsion angular distortion based on moiré fringe[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2132-2139.
乔彦峰, 王成龙, 李向荣, 等. 莫尔条纹测量扭转变形角的方案研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2132-2139.
- [10] CHEN H, HE Y, LI J, et al. Measurement of long focal lengths with a double-grating interferometer[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(27): 6696-6702.
- [11] JIANG ZHengdong, ZHU Ronggang, CHEN Lei, et al. Research on focal length measurement based on double Ronchi gratings[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(5): 687-690.
蒋正东, 朱荣刚, 陈磊, 等. 基于双朗奇光栅的焦距测量技术研究[J]. *应用光学*, 2018, 39(5): 687-690.
- [12] YE Miao. Error analysis of focal length of lens based on quasi-Monte Carlo algorithm evaluation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 061202.

叶苗. 基于准蒙特卡罗算法的测透镜焦距数据误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(6): 061202.

[13] CAO B X, HOANG P L, AHN S, et al. Measurement of focal length based on laser-beam-spot tracking system using diffractive beam sampler[J]. *Measurement*, 2018, 122: 135-140.

[14] LOU ZHIBIN, ZHAO Hui, LIU Quan, et al. Two-dimensional rotation angle dynamic measurement system combining laser collimation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(3): 561-568.

楼志斌, 赵辉, 刘权, 等. 结合激光准直的二维转角动态测量系统[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(3): 561-568.

[15] TAO Wei, PU Zhaobang, SUN Yunbin. Development of angle measurement technology[J]. *Journal of Laser*, 2002, 23(2): 5-7.

陶卫, 浦昭邦, 孙运斌. 角度测量技术的发展[J]. *激光杂志*, 2002, 23(2): 5-7.

[16] TONG Gang, WANG Fang. Analysis and correction for influence of vehicle platform deformation on measuring errors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 775-782.

佟刚, 王芳. 车载平台变形对测角误差的影响分析与修正[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4): 775-782.