

《光电测控》专题文章导读

乔彦峰

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

我国从50年代筹建第一个靶场武器试验场区以来,至今已有50多年的历史,先后建立过多个试验基地及试验测量场区。光学测量设备也随着靶场的发展经历了一个从无到有,从小到大,从援建到自建的全过程。随着计算机技术、通信技术和电子技术的飞速发展,各种先进的测控技术、测控设备层出不穷,先进的光电测控技术已经在现代科学技术、工业生产和国防等诸领域中广泛应用。

至20世纪90年代初,国外研制的光电经纬仪,多采用组合式结构,组合任选、配置灵活、机动性好、适应性强。近几年,国外测控设备的功能不断完善,性能也不断提高。光电经纬仪空间飞行目标的坐标测量精度、目标的跟踪精度都有了很大的提高。我国自行研制的试验场光学测量设备,其总体技术和主要性能指标已与国外相当,但在精密跟踪及测量技术上还有一定的差距。

如何进一步提高光电测控设备的精密跟踪及测量技术,是测控设备设计和研制过程中必须考虑的关键性问题。采用先进的高性能的光电器件和技术是发展光电测量的主要趋势,这主要体现在两个方面,其一是采用最先进的传感器及光电器件使光测设备性能进一步提高;其二是采用图像、数据处理等技术来提高光测设备性能。为了实现精密跟踪,还在伺服系统中采用预测滤波、数据融合等技术来提高角跟踪精度。

本专题论文来源于光电测控课题,内容涉及提高光学测角精度、子母弹多目标事后提取方法、数据融合、大视场视频图像事后拼接和跟踪方式动态切换等。

《基于莫尔条纹测量扭转变形角的方案研究》一文,提出了一种基于双光栅干涉产生莫尔条纹测量扭转角的高精度光学测角方法。实验结果表明,该方案可以得到较为清晰的莫尔条纹图像,经过算法处理后,扭转角的测量精度为 $4.3''$ (3σ)。该方法满足了设备间扭转角高精度测量的要求。

《光电经纬仪子母弹多目标提取方法》一文,对子母弹多目标提取算法进行了研究。首先对数字图像采用改进的最大类间方差法(OSTU)进行二值处理,分别提取目标的形心位置、目标的面积大小、目标求灰度平均值、目标中轴线,然后计算目标的倾角。在匹配过程中,采用卡尔曼滤波,预测目标匹配搜索区域;利用改进的特征函数来完成序列图像子母弹多目标的数据关联,实现了子母弹多子弹目标提取。实验结果表明,目标提取的正确率可达90%。

《靶场测量中多镜头大视场视频图像的拼接》一文,分析了根据小波系数进行匹配的小波变换图像匹配算法。然后,分析了比较旋转标记重叠区算法,即先匹配出多个拟重叠区,旋转后再做匹配计算,进而标记出唯一重叠区。最后分析了基于小波包变换的图像无缝拼接算法,即对图像做小波包变换,按频率融合小波系数,再根据这些系数恢复图像。实验结果表明:拼接图像平滑无明显裂缝,处理速度可达10 frames/s,基本满足了靶场测量中大视场视频图像的需求。

《实时特征级数据融合系统在光电经纬仪上的应用》一文,介绍了多信息源数据融合技术在光电经纬仪上的应用方法。鉴于特征级数据融合计算量大,为实现实时运算的要求,开发一套双DSP并行计算系统,并在具有3个探测器的系统上进行了实验验证。仿真结果表明:该系统可满足探测器采样频率50Hz时的实时性要求,取得了较好效果。

《经纬仪控制模态切换时的动态分析和脱靶量跃变抑制》一文,分析了光电经纬仪在不同跟踪方式切换时产生的跃变、超调等问题,并从理论上阐述了产生这些问题的原因。针对这些问题,设计了一种基于补偿控制器输出的初值补偿切换算法。本文给出了加入初值补偿之后的系统数学模型和响应形式,以及该算法的具体实现,验证了该方法在目标处于不同运动形式下的补偿效果。

文章编号 1004-924X(2008)11-2132-08

莫尔条纹测量扭转变形角的方案研究

乔彦峰¹,王成龙¹,李向荣²,高峰端³,李波⁴,李耀彬¹

(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. 青岛科技大学机电学院,山东青岛 266061;

3. 中国船舶重工集团公司江苏自动化研究所,江苏连云港 222006;

4. 海军驻长春地区航空军代表室,吉林长春 130033)

摘要:提出了一种基于双光栅干涉产生莫尔条纹测量扭转角的高精度光学测角方法。为了验证莫尔条纹测量设备间扭

收稿日期:2008-07-25;修订日期:2008-09-28.

基金项目:中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目

扭转变形精度的有效性,进行了方案设计及实验分析。采用平行光管模拟设备,通过微调机械结构调节平行光管的扭转角来模拟三维物体的扭转变形,在独立的地基平台上进行了方案设计测量实验,并通过实验比较了不同的设计方案。选择的实验方案首先使 CCD 靶面在平行光管内像面处安装固定,然后采用滤波细化等图像处理方法得到采集到的莫尔条纹的宽度,进而根据条纹宽度变化通过数学模型计算出扭转变形量。实验结果表明,当微调机构使平行光管在 $\pm 7'$ 的视场内旋转时,该方案可以得到较为清晰的莫尔条纹图像,经过算法处理后,当莫尔条纹宽度为 $1\ 615\sim 1\ 712\ \mu\text{m}$ 时,扭转角的测量精度为 $4.3''(3\sigma)$ 。该方法满足了设备间扭转角高精度测量的要求,为提高光电测量设备的测量精度奠定了基础。

关键词:扭转变形;扭转角测量;莫尔条纹;图像处理

中图分类号: TB922;O436.1 **文献标识码:** A

Measurement of torsion angular distortion based on Moiré fringe

QIAO Yan-feng¹, WANG Cheng-long¹, LI Xiang-rong², GAO Feng-duan³, LI Bo⁴, LI Yao-bin¹

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Mechanical and Electronic Engineering Department, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China*;
3. *Jiangsu Automation Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Lianyungang 222006, China*;
4. *Aviation Commissary of Navy in Changchun, Changchun 130033, China*)

Abstract: A high-precision optical angular measurement method is proposed to measure the torsion angle based on the Moiré fringe produced by double diffraction grating interference. In order to validate the validity of measurement equipment by Moiré fringe, the schematic design and experimental analysis are carried out. The torsional flexibility of a three-dimensional object is simulated by collimator simulation equipment adjusted by a fine-tuning mechanical structure. The measurement experiments are carried out on the independent foundation platform. By comparing different design proposals with experiments, a scheme of CCD target surface installed in the image surface of parallel light is selected to use in this measurement. In this scheme, the image processing technology of filtering thinning is used to obtain the stripe width by treating the collected Moiré fringe, and the torsional flexibility value is calculated by the mathematical model and the changes of stripes width. The experimental results show that the clearer Moiré fringe image can be gotten in the scheme when the collimator is circumgyrated by fine-tuning institution in the field of view of $\pm 7'$. And the measuring accuracy of torsion angle is $4.3''(3\sigma)$ by the algorithms process when the Moiré fringe width is $1\ 615\sim 1\ 712\ \mu\text{m}$. This method meets the measurement requirements of high-accuracy of torsion angle between equipments, and it lays the foundation to enhance the photoelectric precision of measurement equipment.

Key words: torsional flexibility; torsion angle measurement; Moiré fringe; image processing

1 引言

在工程实际中,精密的基准设备或测量设备中除了有能完成测量任务相应的测量设备外,设

备本身之间的相对位置变形也需要进行精确测量,以便对最终的精确测量任务进行相应的补偿,达到提高测量精度的目的。设备之间存在的三维微小角度变化分别称为纵向挠曲、横向挠曲和扭转,纵向挠曲和横向挠曲是发生在两设备连线平

面内的变形,而扭转变形是绕梁设备连线的扭转角。扭转角的测量具有重要的工程意义,大型工程测量设备都需要对扭转角进行精确测量^[1-2]。

角度测量作为最基本的物理量测量之一,测量方法已很多,光学测角方法由于具有非接触、高准确度和高灵敏度的特点而倍受人们的重视,尤其是稳定的激光光学测角法,其它新的光学测角方法也都很有应用意义。本文介绍的基于莫尔条纹的扭转角测量具有设备简单、价格低、方法新颖等特点,很有工程实用价值^[1-4]。

2 莫尔条纹测量扭转角原理

该扭转角测量是用双光栅叠合在一起产生的莫尔条纹进行测量的^[5],测量原理如图 1 所示,将光栅与莫尔条纹建立在统一坐标系下,光栅 G_1

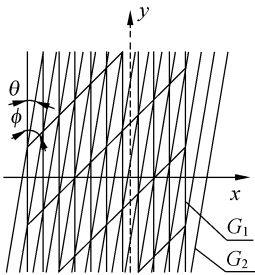


图 1 两光栅叠合产生莫尔条纹

Fig. 1 Moiré fringe produced by double gratings superposition

的栅线与 y 轴平行,光栅 G_2 的栅线与 y 轴的夹角为 θ , d_1 和 d_2 分别是两光栅 G_1 和 G_2 的栅线间距, φ 为 G_1 和 G_2 干涉形成的莫尔条纹与 y 轴的夹角,即莫尔条纹的倾角, h 是莫尔条纹的宽度,上述各参数满足式(1)、(2):

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

$$\cos \theta = \frac{(d_1^2 + d_2^2)h^2 - d_1^2 d_2^2}{2h^2 d_1 d_2}. \quad (2)$$

在实际测量中,采用光栅间距 d 相同的两光栅,公式可简化为式(3)、(4):

$$\phi + \theta/2 = \pi/2, \quad (3)$$

$$\sin(\theta/2) = d/(2h), \quad (4)$$

其中 φ 和 θ 都取锐角,由式(3)可知,只要求得莫尔条纹的倾角就可求得两光栅的夹角 θ ;由式(4)

可知,只要求得莫尔条纹的宽度 h ,就可求得两光栅的夹角 θ 。因此在用双光栅产生的莫尔条纹进行扭转角的测量时,可以根据莫尔条纹的宽度变化和倾角变化,进行扭转角求解,这两式是求扭转角的理论依据。

3 测量扭转角方案结构设计

3.1 扭转测量结构组成

本文所研究的变形扭转角测量的测量范围小,在 $\pm 30'$ 之内,测量精度要求不超过 $5''$,扭转角的变化周期通常为 $7 \sim 15$ s。采取以大钢管基准法的测量扭转角原理^[6-7]为基础设计了利用莫尔条纹测量扭转角的方案。本方案采用平行光管模拟设备,设备变形的模拟可以通过微调旋转机构使平行光管产生角度转动,整个实验仿真在具有独立地基的光学平台上进行。

实验设备布置方案如图 2 所示,将两光栅分别放置在发射光管和接收光管的焦面上,用面阵红色发光二极管作为发射光管的光源,接收光管接收来自发射光管的平行光束,旋转机构使发射光管绕发射轴小角度旋转。将 CCD 放置于接收光管的焦面处接收两光栅干涉产生的并因发射光管旋转而变化的莫尔条纹,并用视频采集卡对此莫尔条纹信号进行采集,用计算机处理,得到发射光管的扭转角,与 $0.2''$ 基准光管测量的扭转角真值比较,求扭转角测量误差。

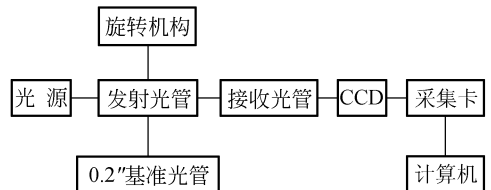


图 2 实验设备布局方案

Fig. 2 Layout scheme of laboratory apparatus

3.2 光源选择

由于实验所用 CCD 具有低照度和高灵敏性的特点,当将自动增益关闭,即使光源非常微弱,CCD 仍然达到饱和。用自然光时,CCD 能探测到莫尔条纹,但对比度较低。用 20 mW 的红色发光二极管作光源,CCD 能探测到莫尔条纹,只是在图像的中央部分亮暗条纹相连近似为一亮斑。改

用 5 mW 的红色发光二极管作光源,效果较好,可以得到较为清晰的莫尔条纹。

为了使光源发光更加均匀,研制了一个由 9 个发光二极管均匀分布的圆形面阵光源,通过拨码开关可以控制二极管的发光个数。通过实验对光源逐步改善,以得到能产生最佳莫尔条纹的光源。结果表明随着均匀光源数目的增多,莫尔条纹越来越清晰。当用 9 个均布的 5 mW 红色发光二极管面阵光源时,采集的莫尔条纹图片最为清晰,可以作为莫尔条纹进一步处理的依据。

3.3 莫尔条纹接收系统

当采用微变焦距光学系统时,莫尔条纹像面在接收光管的焦面处,CCD 不便于接近像面处安装固定^[6],因此采集的莫尔条纹图像总是非常小,不便于处理,即使能处理,误差也非常大。在现有的实验条件下,选择了不用光学系统,而是直接将 CCD 靶面置于莫尔条纹像面,相当于 1 倍光学系统。关于莫尔条纹接收系统的设计有两种方案。

莫尔条纹像面外移:该方案是根据平行平板的成像特性,在莫尔条纹成像前,加入玻璃平行平板,使莫尔条纹像面从光管的焦面处沿光管轴向外移到光管之外,这种接收方式使 CCD 接收外部杂光,影响莫尔条纹的图像质量。

使 CCD 靶面在平行光管内像面处安装固定:该方案是基于莫尔条纹像面不动,使 CCD 靶面置于莫尔条纹像面处安装固定。由于光管的焦面处空间太小,不便将 CCD 固定,为此设计一机械固定机座将焦面处的光栅置于机械座内,CCD 也安装固定于该机械座内,且 CCD 靶面和光栅之间留有调整余量。CCD 和光栅间的装配如图 3 所示。

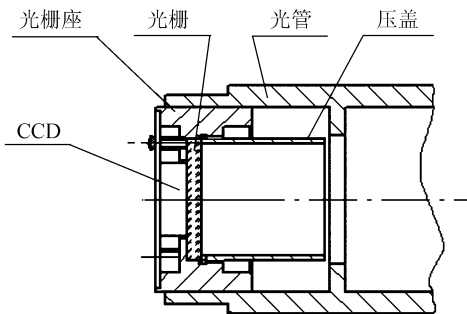
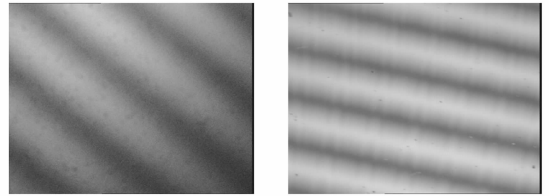


图 3 CCD 和光栅装配关系

Fig. 3 Assemblage of CCD and grating

CCD 与光栅通过该机械座固定在一起,实验时,只需前后调节机械座,便可使光栅处于光管的焦面上,同时 CCD 也接收到清晰的莫尔条纹。

采用两种方案的莫尔条纹接收系统,采集的莫尔条纹图像比较如图 4 所示,图 4(a)图像的对亮度低,图 4(b)图像接收效果优于前者,本文采用第二个莫尔条纹接收系统。



(a) CCD 在像面外移处 (b) CCD 处于像面处
(a) CCD located at image offset place (b) CCD located at focal plane

图 4 两种方案接收的图像比较

Fig. 4 Comparison of images produced by two schemes

3.4 微调旋转机构

为使发射光管产生扭转变形,因此需设计一微调旋转机构,且转动量级为秒级。微调旋转机构如图 5 所示,其中发射光管置于光管上下压盖

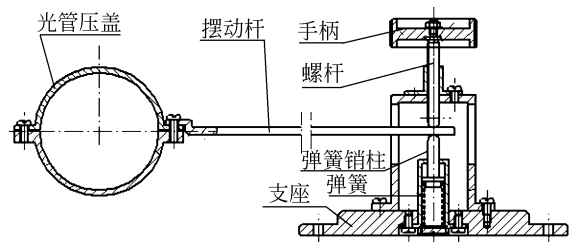


图 5 旋转机构

Fig. 5 Circumgyration framework

中,手柄旋转带动摆杆转动,从而使发射光管旋转,理论上摆杆越长,转角分辨率越高,但考虑到摆杆的刚性,摆杆不宜太长。使用旋转机构可以使发射光管在 $\pm 7^\circ$ 的视场范围内连续旋转,从而产生变化的莫尔条纹。对采集到的莫尔条纹可以通过图像处理方法计算它们之间的条纹宽度变化和条纹倾角变化。

图 6 即为旋转机构使发射光管 $\pm 7^\circ$ 的范围内旋转时,采集的 8 幅莫尔条纹图片,可以通过对莫

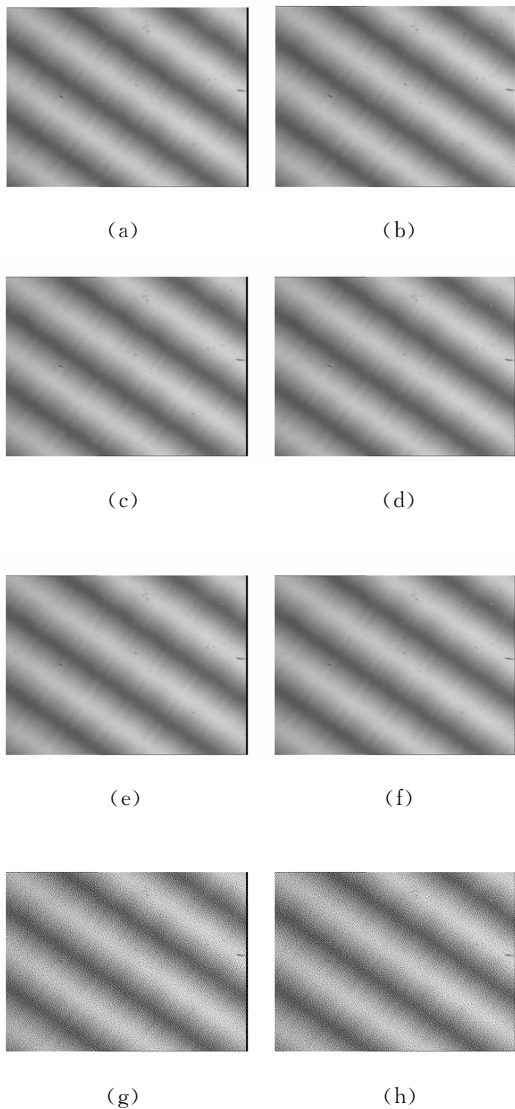


图 6 连续采集的 8 幅图片

Fig. 6 Eight continuously gathered pictures

尔条纹进行二值、细化、最小二乘法等图像处理方法求解出莫尔条纹宽度的变化和条纹倾角的变化^[8-9]。

4 扭转角测量信号处理及精度分析

4.1 莫尔条纹的处理

通过莫尔条纹宽度或倾角的变化求发射光管的旋转角度。由测量原理知,对莫尔条纹处理的最终目的是得到莫尔条纹的宽度或者莫尔条纹的倾角,它们都必须以得到莫尔条纹的中心线为前提。经实验发现 Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、Canny 算子、LOG 算子,以及在这些算

子基础上自定义的与水平方向成 45° 的 Sobel 算子等,对莫尔条纹边缘的提取均不理想,因为莫尔条纹的黑白条纹过渡的梯度变化太小,因此采用阈值法对莫尔条纹的中心粗定位,再经过二值、细化得到一个像素精度的莫尔条纹中心线。

本文的细分原理^[10-11]如下:记第 i 行上相邻两条纹之间的水平距离为 $D_{hi,k}$,记第 j 列上相邻两条纹之间的垂直距离为 $D_{vj,l}$,则莫尔条纹在水平方向的平均距离 \bar{D}_h 和垂直方向的平均距离 \bar{D}_v 分别为:

$$\bar{D}_h = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{m_i-1} D_{hi,k} / \sqrt{\sum_{i=1}^M m_i}, \quad (5)$$

$$\bar{D}_v = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^{n_j-1} D_{vj,l} / \sqrt{\sum_{j=1}^N n_j}, \quad (6)$$

其中, M 为有效行数, m_i 为第 i 行上莫尔条纹数, N 为有效列数, n_j 为第 j 列上莫尔条纹数。

则 \bar{D}_h 和 \bar{D}_v 的测量误差为:

$$\delta_h = 1 / \sqrt{\sum_{i=1}^M m_i}, \quad (7)$$

$$\delta_v = 1 / \sqrt{\sum_{j=1}^N n_j}. \quad (8)$$

采集的莫尔条纹图像大小为 768×576 (为了防止图像边缘存在较大误差和因处理引起的失真等,要求截取最小图片 $< 500 \times 350$),而且即使在采集粗条纹时,每幅图像的莫尔条纹数至少为 3 条,所以 \bar{D}_h 和 \bar{D}_v 的最大测量误差分别为 $\delta_h = 1 / \sqrt{(500 * 2)} = 0.01 \text{ pixel}$, $\delta_v = 1 / \sqrt{(350 * 2)} = 0.036 \text{ pixel}$ 。莫尔条纹细分的最大误差可达到 0.036 pixel ,满足测量分辨率的要求。

4.2 扭转角的计算

采集的莫尔条纹图片经过图像预处理、二值、细化之后,得到莫尔条纹的细化中心线。根据前述的扭转角测量原理可以通过莫尔条纹的倾角变化求扭转角;也可以通过莫尔条纹的宽度变化求扭转角^[5,10]。

通过条纹倾角求扭转角是根据两幅莫尔条纹图片的条纹倾角的变化,反求引起莫尔条纹倾角变化的扭转角。通过条纹宽度求扭转角。根据测量原理公式(3)和(4),至少采集两幅莫尔条纹图片,分别求莫尔条纹的宽度 h ,再求莫尔条纹对应的两光栅夹角 θ ,这样不同莫尔条纹对应的两光栅夹角 θ 的变化量 $\Delta\theta$ 就可通过宽度 h 的变化 Δh

求得。

设两幅不同的莫尔条纹图片对应的光栅夹角分别为 θ_1 和 θ_2 , 则扭转角 $\Delta\theta$ 可通过式(9)求解:

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2. \quad (9)$$

实际测量中, 首先求出扭转变形前初始状态两光栅的夹角 θ 。两光栅在初始位置时的夹角 θ , 仅通过一幅莫尔条纹图片求解, 含有较大的随机误差, 可通过两幅莫尔条纹图片求解初始角 θ 。

求出初始夹角 θ 后, 记两光栅初始位置对应的莫尔条纹的宽度为 h_1 , 发生一个扭转角后两光栅对应的莫尔条纹宽度为 h_2 , 为消除莫尔条纹宽度中所含有的系统误差, 扭转角 $\Delta\theta$ 可通过公式(10)求解, 通过莫尔条纹的宽度比值求扭转角 $\Delta\theta$, 在莫尔条纹宽度中含有的相同系统误差, 可以通过比值约掉, 从而大大减小测量误差。

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\sin[(\theta + \Delta\theta)/2]}{\sin(\theta/2)}. \quad (10)$$

4.3 测量精度分析

由测量公式(4)知, 能对扭转角误差直接传递的误差因素有光栅间距 d 的刻制误差和莫尔条纹宽度 h 的测量误差。下面分析光栅间距的刻制误差 Δd 和莫尔条纹宽度的测量误差 Δh 对扭转角测量误差 $\Delta\theta$ 的影响。

由误差传递原理知, 公式(4)的误差传递公式为式(11):

$$\delta_\theta = \frac{1}{\cos(\theta/2)} \times \left(\frac{\Delta d}{\omega} - \frac{d\Delta\omega}{\omega^2} \right). \quad (11)$$

显然, 扭转角的测量误差 δ_θ 由两个部分构成, 其中之一为光栅间距刻制误差 Δd 对扭转角测量误差 δ_θ 的影响, 记为 $\delta_{\theta 1}$, 另一为莫尔条纹宽度的测量误差 Δh 对扭转角测量误差 δ_θ 的影响, 记为 $\delta_{\theta 2}$ 。由式(11)知, 光栅间距刻制误差 Δd 对扭转角测量误差 δ_θ 的影响 $\delta_{\theta 1}$ 可表示为式(12), 莫尔条纹宽度的测量误差 Δh 对扭转角测量误差 δ_θ 的影响 $\delta_{\theta 2}$ 可表示为式(13):

$$\delta_{\theta 1} = \frac{1}{\cos(\theta/2)} \times \frac{\Delta d}{\omega}, \quad (12)$$

$$\delta_{\theta 2} = \frac{-d\Delta h}{\cos(\theta/2)h^2}. \quad (13)$$

从式(12)、(13)还可以看到, 当光栅间距刻制误差 Δd 、莫尔条纹宽度的测量误差 Δh 一定, 扭转角测量误差还受两光栅夹角的影响, 两光栅夹角越小, 即莫尔条纹宽度越粗, 前两者引起的误差

越小。

除上面有原理公式分析到的影响因素外, 在测量过程中大气扰动、光源的亮暗适宜程度及均匀性都会对莫尔条纹的生成有不同程度的影响。另外对莫尔条纹采用不同处理算法也会对精度产生影响。测量及处理过程中应尽可能减少这些方面引起的影响。

5 实验结果分析

用旋转机构使发射光管绕光轴旋转, 旋转角度不超过基准光管的的视场范围, 在绕同一方向旋转时采集 8 幅莫尔条纹图片, 将这 8 幅图片规定为一组图像数据, 在采集每一幅莫尔条纹图片时记录 $0.2''$ 基准光管测得的发射光管旋转的角度真值。数据处理的基本流程是, 首先求各幅莫尔条纹对应的宽度, 根据条纹宽度变化求扭转角, 并与 $0.2''$ 基准光管提供的扭转角真值比较, 从而求出最后的扭转测量误差。

表 1 和表 2 是两组不同的测量处理结果。每一组是连续采集 8 幅莫尔条纹图片后, 后 7 幅图片的测量值分别与第一幅图片对应的测量值之间的差值, 计算即得发射光管的扭转角测量值。其中第一组的莫尔条纹的初始宽度为 1.616 mm, 第二组的莫尔条纹的初始宽度为 1.708 mm, 扭转角理论真值是由 $0.2''$ 的自准直光管测量得到的。由扭转角测量值和扭转角理论真值, 即可计算出扭转角测量误差。

表 1 扭转变形测量(1)

Tab.1 Torsional flexibility measurement (1)

测量宽度 (mm)	计算扭转 ($''$)	理论扭转 ($''$)	误差 ($''$)
1.629	42.41	41.4	-1.01
1.637	67.36	68.5	1.14
1.646	97.82	97.2	-0.62
1.654	122.97	123	0.03
1.664	153.11	152.1	-1.01
1.674	184.03	184.9	0.87
1.686	218.22	219.9	1.68

表 2 扭转变形测量(2)

Tab.2 Torsional flexibility measurement (2)

测量宽度 (mm)	计算扭转 (")	理论扭转 (")	误差 (")
1.698	-30.13	-30.3	-0.17
1.690	-51.42	-50.5	0.92
1.678	-87.11	-84.4	2.71
1.670	-111.82	-112.1	-0.28
1.659	-143.97	-145.1	-1.13
1.643	-191.91	-192.5	-0.59
1.631	-230.99	-232.5	-1.51

经过计算,第一组实验测量精度(1σ)为 1.103 mm,第二组实验测量精度(1σ)为 1.426 mm。多次实验结果表明,当莫尔条纹宽度在 1 615~1 712 μm 测量时,扭转角的测量精度(3σ)为 4.3"。

6 结 论

莫尔条纹测量扭转角是基于光栅叠合产生的

莫尔条纹的特性而实现的。本文在基于大钢管基准法的测量扭转角原理的基础上,设计了莫尔条纹测量扭转角的方案,并设计了仿真试验方案。莫尔条纹测量扭转角是莫尔条纹原理应用的延伸,突破了莫尔条纹的常规应用^[9]。测试原理实验是在独立的地基平台上进行的,仿效大钢管测量的原理,用微调结构调节平行光管模拟了船体的变形,用 CCD 接收莫尔条纹的变化情况。实验结果表明,利用此机构在 $\pm 7'$ 的视场范围内旋转时,通过图象处理可使 1 615~1 712 μm 的莫尔条纹扭转变形测量精度(3σ)在 4.3"以内。分析可知,可以采用高精度等间距的光栅减小光栅刻度不均匀带来的误差、改善光源的亮度及均匀性来获得更好对比度的莫尔条纹、通过改进的图像处理并优化算法等方法来进一步提高扭转角的测量精度。

参考文献:

- [1] 节德刚,刘延杰,孙立宁,等. 基于双光栅尺的高速高精度位移测量方法[J]. 光学精密工程, 2007,15(7):1077-1083.
JIE D G, LIU Y J, SUN L N, *et al.*. A high speed and high precision displacement measurement method using double grating scales[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(7):1077-1083. (in Chinese)
- [2] 冯法军,耿小丕. 莫尔条纹的观察与测量[J]. 承德石油高等专科学校学报, 2007,9(1):28-29,51.
FENG F J, GENG X P. Observation and measurement of Moire silk[J]. *Journal of Chengde Petroleum College*, 2007,9(1):28-29,51. (in Chinese)
- [3] 裘建新,檀亮,钟平. 莫尔条纹三维精细测量方法的研究与应用[J]. 上海工程技术大学学报, 2007,21(1):1-6.
QIU J X, TAN L, ZHONG P. 3-D topography measurement by Moiré fringe[J]. *Journal of Shanghai University of Engineering Science*, 2007,21(1):1-6. (in Chinese)
- [4] 熊文卓,孔智勇,张炜. 光电轴编编码器光电信号正交性偏差的相量校正方法[J]. 光学精密工程, 2007,15(11):1745-1748.
XIONG W ZH, KONG ZH Y, ZHANG W. Phase correction of quartering deviation of photoelectric rotary encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(11):1745-1748. (in Chinese)
- [5] 伏燕军,杨坤涛. 投影型莫尔法的成像理论研究[J]. 中国激光, 2006, 33(4):521-525.
FU Y J, YANG K T. Imaging theory research of projection Moiré method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(4):521-525. (in Chinese)
- [6] 张有,王家骥. 扭转角动态实时监测系统[J]. 光学机械, 1986(5):25-36.
ZHANG Y, WANG J Q. Dynamical real-time monitor system for twist angle[J]. *Optical Machine*, 1986(5):25-36. (in Chinese)
- [7] 王建军,张光明. 测量船船体横扭角测量的双频偏振法[J]. 光学精密工程, 1999,7(3):118-123.

- WANG J J, ZHANG G M. Two frequency polarization method for metering of instrumentation ships hull transverse twist[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999,7(3):118-123. (in Chinese)
- [8] 满玉春, 张学军. 子区域拼接数字莫尔条纹非球面检测的理论分析[J]. *光学精密工程*, 2008,16(3):420-425.
MAN Y CH, ZHANG X J. Theoretical anlysis of asphere testing using digital Moiré patterns base on sub region stitching method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(3):420-425. (in Chinese)
- [9] 李向荣, 乔彦峰, 刘微, 等. 船体三维角度变形的自准直干涉测量方法[J]. *光学技术*, 2005,31(5):761-763.
LI X R, QIAO Y F, LIU W, *et al.*. Autocollimation interferometry method for boats'three-dimensional distortion [J]. *Optical Technique*, 2005,31(5):761-763. (in Chinese)
- [10] 李向荣, 乔彦峰, 刘微, 等. 扭转变形测量的干涉条纹处理技术[J]. *光电工程*, 2005, 32(12):47-50.
LI X R, QIAO Y F, LIU W, *et al.*. Interferometry fringe processing for torsion measurement[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(12):47-50. (in Chinese)
- [11] 李向荣. 莫尔条纹的高精度细分技术研究[J]. *光电工程*, 2007,34(11):74-77.
LI X R. High precision subdivision of Moiré fringe[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(11):74-77. (in Chinese)

作者简介:乔彦峰(1962—), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电测量与控制方面的研究。E-mail: qiaoyf@ciomp. ac. cn

高峰端(1979—), 男, 河南南阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事光电测量、惯性测量及数据处理方面的研究。

李向荣(1979—), 女, 山东潍坊人, 副教授, 博士, 主要从事光电测量、图像处理及控制系统的研究。

李波(1972—), 男, 湖北随州人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事光电检测方面的研究。

通讯作者:李耀彬(1969—), 男, 吉林长春人, 研究员, 主要从事光电测量与控制方面的研究。E-mail: liyaobin7025@163. com

● 下期预告

用双晶片驱动的棒板结合式压电驱动器

褚祥诚, 陈翔宇, 李龙土

(清华大学材料科学与工程系 新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室, 北京 100084)

设计制作了一种采用双晶片压电陶瓷结构的棒板结合式压电驱动器。和参考文献中的驱动器不同, 两个压电陶瓷片分别粘接在青铜定子的上下两侧。定子上的金属圆柱体被用来放大振动的横向位移, 并对金属棒状的转子进行激振, 使其旋转。利用 FEA(有限元分析)对定子进行了分析, 发现在同样的驱动模式下, 该驱动器可以提供更多的横向和纵向的振动位移, 大约提高 25% 左右。这种新结构也可避免不同振动模式之间的模态耦合现象, 并产生理想的振动模态, 以提高驱动器的运行稳定性。实验表明, 驱动器在 25 V_{op} 低电压下可以提供 512 r/min 的转速, 而之前的单片陶瓷驱动器在该电压下不能工作。这种压电驱动器可以经过优化和调整, 以满足不同的实际应用, 如精确定位仪器, 生物工程和光聚焦系统等。