

纵向莫尔条纹在自准直仪中的应用

吴文明^{1,2}, 高立民¹, 吴易明¹, 吴瑾昱¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了提高自准直仪的分辨力, 将纵向莫尔条纹引入到光路中, 用长光栅代替传统单狭缝, 将长光栅成像在 CCD 检测器上, CCD 作为标尺光栅, 通过两个光栅叠加形成的莫尔条纹的变化可以将成像位移分辨率提高到亚像元, 进而将自准直仪的角度分辨率提高到毫秒级. 实验结果表明, 相对于直接检测狭缝边缘的方法, 莫尔条纹法的分辨力提高了 25 倍.

关键词: 光学细分; 莫尔条纹; 自准直仪

中图分类号: TP274

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)12-2544-4

0 引言

光电自准直仪是一种精密角度测量仪器, 由于它具有较高的准确度和测量分辨力, 因而被广泛应用于精密的测量工作中, 如: 角度测量、平板的平面度测量、轴系的角晃动测量、导轨的直线度测量等方面. 其分辨力取决于成像器件的分辨力和光学系统的分辨力. 光栅是高准确度位移测量元件, 它与数字信号处理仪表配套, 组成位移测量系统, 被广泛地应用于数控机床等自动化设备当中. 光栅测量位移的原理主要是利用光栅莫尔条纹的放大原理, 将光栅莫尔条纹放大原理引入自准直仪的光学系统有效地提高了自准直仪的分辨力^[1].

1 CCD 光电自准直仪原理

一个位于准直透镜后部焦平面上照亮的目标被投射到无穷远, 并由反射镜反射, 反射回来的光波由一个成像器件接收, 见图 1. 自准直仪光轴与反射镜角度之间的微小变化会引起一个偏差, 此偏差能被仪器非常精确地测定. 假设此偏差为 ΔY , 准直透镜

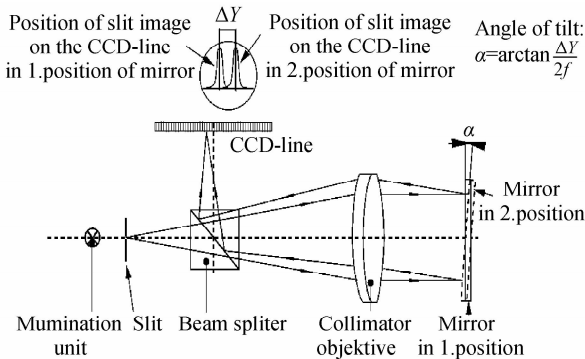


图 1 光电自准直仪的光学原理

Fig. 1 Optical principle of autocollimator with linear CCD

的焦距为 f , 成像器件像元大小为 a , 偏差覆盖的像元数为 n , 根据光路计算可得, 反射镜转过小角度的计算公式为^[1]

$$\alpha = \arctan \frac{\Delta Y}{2f} = \arctan \frac{na}{2f} \quad (1)$$

由式(1)可以看出, 所求角度的分辨力与成像器件上测得的偏差 ΔY 和焦距有关, 为了实现较高的光学系统成像质量、仪器小型化和使用携带方便等, 一般焦距选择在 300~500 mm 之间, 由于成像器件像元有一定大小, 它的分辨力不会太高. 假设一个 $f=300$ mm 的自准直仪, 成像器件的像元大小为 $7 \mu\text{m}$, 则该系统的理论分辨力为 $2.4''$, 远远不能胜任高准确度测量.

2 莫尔条纹测长原理

长光栅莫尔条纹分为横向莫尔条纹、光栅条纹、纵向莫尔条纹和斜向莫尔条纹. 横向莫尔条纹是两块光栅以小角度 θ ($\theta \neq 0$) 相叠加所形成的图形; 光栅条纹是指两块光栅以零度角相叠加所形成的图形; 若两块光栅的栅距很相近但不相等时, 就形成了纵向莫尔条纹.

对于纵向莫尔条纹来说, 指示光栅的移动方向、整个莫尔条纹区域的移动方向, 以及莫尔条纹的移动方向都是一致的, 因而可以有效地应用到自准直仪的测量中.

图 2 为指示光栅、标尺光栅及两者叠加形成的纵向莫尔条纹图. 指示光栅的栅距为 d_1 , 标尺光栅的栅距为 d_2 , d_1 和 d_2 很接近. 纵向莫尔条纹的周期 D 和指示光栅的栅距 d_1 、标尺光栅的栅距 d_2 的关系是

$$D = \frac{md_1d_2}{|d_1 - d_2|} \quad (2)$$

m 为莫尔条纹范围内, 两块光栅刻线数的差值.

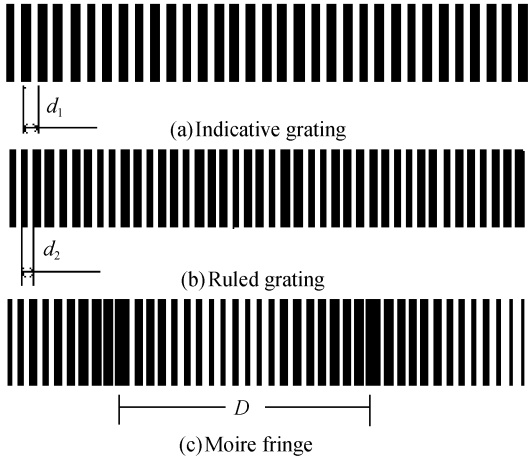


图 2 指示光栅、标尺光栅及纵向莫尔条纹

Fig. 2 Indicative grating, ruled grating and moiré fringe

当指示光栅在标尺光栅上横向移动一个标尺光栅的栅距时,莫尔条纹横向移动一个宽度;当指示光栅在标尺光栅上横向移动的距离小于标尺光栅的栅距时,莫尔条纹横向移动小于一个宽度,但移动的距离和指示光栅移动的距离成正比.由式(2)可知,莫尔条纹宽度是标尺光栅栅距的 $md_1/|d_1-d_2|$ 倍,即莫尔条纹的放大倍率为

$$N = \frac{md_1}{|d_1 - d_2|} \quad (3)$$

当 d_1 和 d_2 相差很小时,放大倍率可以很大.在成像器件分辨率一定的情况下,相比于直接检测指示光栅的移动距离,检测莫尔条纹的移动距离将大大提高系统分辨率^[2-3].

由于莫尔条纹中暗条纹的位置比较明显,检测容易,所以取暗条纹的位置代表莫尔条纹的位置.假设自准直仪零度角时指示光栅头部所处的位置是 b_1 像元,莫尔条纹暗条纹距莫尔条纹头部的距离为 a_1 个像元.当反射镜转过一个角度 α 之后,指示光栅像头部所处的位置是 b_2 像元,莫尔条纹的暗条纹距莫尔条纹头部的距离为 a_2 个像元,则转过角度 α 的计算公式为

$$\alpha = \begin{cases} \arctan \frac{a \left(\left| \frac{b_2 - b_1}{d_1/a} \right| + \frac{a_2 - a_1}{D} \right)}{2f} & (a_2 \leq a_1) \\ \arctan \frac{a \left(\left| \frac{b_2 - b_1}{d_1/a} \right| + \frac{a_2 - a_1 + D}{D} \right)}{2f} & (a_2 > a_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中, a 为像元大小, f 为物镜焦距.

通常成像器件都比较长,所以该原理的角度测量范围取决于指示光栅与标尺光栅的宽度差,以及透镜的焦距,假设指示光栅的长度为 D_1 ,标尺光栅的长度为 D_2 ,则测角范围为

$$\left[-\arctan \frac{D_2 - D_1}{4f}, \arctan \frac{D_2 - D_1}{4f} \right].$$

3 实验及结果

由于成像器件的像元是均匀分布的,各个像元间距,像元大小都相等,当均匀设置 n 个像元成像, n 个像元不成像时,就相当于一个黑白透射光栅.利用这个原理可以将系统更加简化.用线阵 CCD 取代标尺光栅,这时线阵 CCD 就有了双重作用,一方面作为成像器件,另一方面作为标尺光栅.此时,自准直仪的光学原理图和图 1 是一样的,只是将图 1 中的狭缝换成了指示光栅.

3.1 实验

受条件限制,实验采用普通白光光源照明;指示光栅的光栅常量 $d_1 = 50 \mu\text{m}$,刻线数为 49;成像器件采用像元大小 $11 \mu\text{m}$ 、有效采集面积 $4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的面阵 CMOS;物镜的直径 30 mm ,焦距 150 mm .光路如图 3.

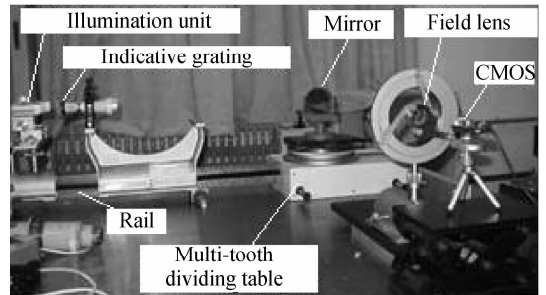


图 3 实验光路

Fig. 3 Figure of experiment

搭建过程中利用自准直经纬仪观测来保证指示光栅位于自准直光管物镜的焦面上.各器件均在同一光轴上.

3.2 数据获取

调整指示光栅的像在 CMOS 的一端,以便可以转过一个大角度进行标定,拍摄下一幅指示光栅的像,并假设该图代表零位图,用 0 值命名该图.转动多齿分度台,拍摄下另一幅图片,用转过的角度值命名该图片,这样得到了一系列角度值 ($3.1''$ 、 $5.7''$ 、 $9.6''$ 、 $21.1''$ 、 $93.1''$ 、 $600''$) 的图片.最后转动一个大角度 ($1200''$),用于实验参量的标定.捕获的实验图片如图 4.

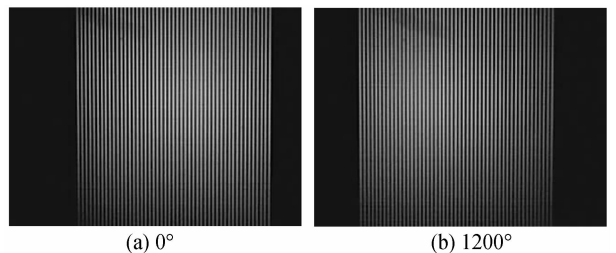


图 4 实验结果

Fig. 4 Result of experiment

3.3 数据处理

采用 MATLAB 软件编程处理, 首先处理 0° 图像.

3.3.1 数据预处理

首先把采集到的图像转化为灰度图像, 为了模拟线阵器件, 取其中的一行进行处理. 同时, 为了避免 CMOS 摆放不正带来的误差, 在处理不同图像时取相同行 (以下图片及数据是取第 80 行时计算得到的结果). 0° 图像处理后得到一个灰度值矩阵 f .

3.3.2 插值

受实验条件限制, 成像器件 CMOS 的像元大小为 $11 \mu\text{m}$, 为了模拟标尺光栅, 选择 4 个像元宽度作为标尺光栅的栅距, 即 $44 \mu\text{m}$. 这样做的好处在于模拟标尺光栅时明暗条纹各占 2 个像元. 同时为了提高测量准确度有必要对采集到的图像进行插值, 此时需要进行 11 倍的插值. 这样插值后的像元大小为 $1 \mu\text{m}$, 指示光栅的光栅对占用 50 个单位, 而标尺光栅的光栅对占用 44 个单位.

由于三次样条插值具有二阶连续的导函数, 并在相邻给定点之间为三次多项式, 它对被插值函数的逼近是收敛的, 数值稳定的等优点, 这里采用三次样条插值, 得到插值后的矩阵 $ig^{[4-5]}$.

3.3.3 莫尔条纹的生成

开设一个和矩阵 ig 相同大小的零矩阵 rg , 位置 $1 \sim 22$ 的值设置为 0, $23 \sim 44$ 的值设置为 1, $45 \sim 66$ 的值设置为 0, 依此类推, 得到一个类似于光栅常量为 44 个单位的标尺光栅矩阵. 将矩阵 rg 和矩阵 ig 中相同位置的值相乘, 得到的结果放到一个新矩阵 $moire$ 中的相同位置. 得到的矩阵即为莫尔条纹的分布状况, 见图 5.

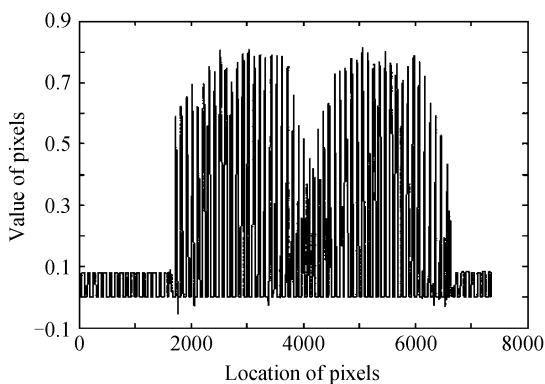


图 5 0° 角的莫尔条纹

Fig. 5 Moiré fringe in 0° figure

3.3.4 指示光栅和莫尔条纹暗条纹的位置计算

设置一个阈值, 当矩阵 ig 中某一位置对应的灰度值大于该阈值, 则指示光栅占据的头像元即为该位置, 将该位置赋给 $b_1 = 771$.

设置另一个阈值, 当矩阵 $moire$ 中有一段的数

值都小于该阈值, 则把该段的头位置记做暗条纹所处的位置 e_1 . 这里 $e_1 = 968$, 因而, 暗条纹相对标尺光栅头位置的距离为 $a_1 = e_1 - b_1 = 197$.

用相同的方法处理平面镜转过 $1200''$ 的图像, 得到另一组指示光栅和暗条纹的位置 $b_2 = 503$, $a_2 = 245$.

将 a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , d_1 , d_2 , α ($d_1 = 44$, $d_2 = 50$, $\alpha = 1200$) 代入到式 (4) 中, 标定出式中的 $a/2f = 2.1878e-005$.

3.4 结果及误差分析

分别处理其他角度值所对应的图像, 利用式 (4) 及标定的 $a/2f$, 计算得各个图像所对应的角度值, 表 1 比较了真实值和计算值之间的对应关系.

表 1 莫尔条纹法测得的角度值和真实值比较

真实值/s	3.1	5.7	9.6
计算值/s	2.346 6	2.527 1	10.649 9
真实值/s	21.1	93.1	600
计算值/s	24.729 5	96.182 9	604.156 7

从表 1 可以看出, 计算值和真实值之间的误差较大, 最大误差值达到 $4.1567''$. 但是自准直仪的准确度和光学系统以及成像器件的分辨力是息息相关的. 而实验的准确度除了这两个方面的因素, 还和光照以及实验搭建的准确度是分不开的.

首先, 由于成像物镜选择的是普通的自准直光管, 在成像过程中带入了畸变等像差, 导致图像的变形.

其次, 光照的不均匀对图像的后续处理带来了相当大的误差, 可以明显地看出图 5 中图像中心的亮度比边缘高, 这就导致了它的灰度图像呈现一个抛物线形, 中间高两边低, 而图像的特征采集过程中使用的是暗条纹, 也就是莫尔条纹图像中像元灰度值相对较小的一段, 而莫尔条纹两端的像元灰度值总是比中心小一点, 在获取莫尔条纹暗条纹的位置时引入了一个不可忽视的误差.

最后, 实验的搭建也存在很大误差. 自准直成像要求指示光栅放在物镜的前焦面上, 成像器件安放在物镜的后焦面上, 但是实验光路搭建过程中不能保证两者的准确位置, 致使不能达到一比一成像, 降低了成像分辨力和准确度. 还有平面镜由于震动带入的误差等.

直接检测插值后的 0° 图像和 $1200''$ 图像中指示光栅的边缘, 得到两者指示光栅相对平移的像元数, 利用式 (1) 及这个平移量标定出 $a/2f$. 然后检测出其他角度图像指示光栅边缘的位置, 计算出相对 0° 角图像指示光栅边缘位置的变化量 n , 再利用式 (1) 计算出各自的角度值 α , 见于表 2.

表 2 直接检测边缘法得到的角度值和真实值的比较

真实值/s	3.1	5.7	9.6
计算值/s	0	4.477 7	8.955 3
真实值/s	21.1	93.1	600
计算值/s	17.910 6	89.553 2	604.482 7

在不考虑系统误差而只关注算法误差的情况下,比较两种方法的最大误差,平均误差以及均方差,列于表 3 中。

表 3 两种方法的误差比较

算 法	误差		
	最大误差/s	平均误差/s	均方差
莫尔条纹法	4.156 7	1.332 1	2.935 2
直接法	4.482 7	-1.203 4	3.010 2

从表 3 可以看出两种算法的准确度,莫尔条纹法的最大误差、均方差都比直接检测法小,说明它的离散度比直接检测法好。再者,莫尔条纹法的分辨力为 $0.180 5''$,直接法的分辨力为 $4.477 7''$,分辨力提高了 24.8 倍,和理论上的 25 倍细分相吻合,这在很大程度上说明莫尔条纹的细分作用在自准直仪中的应用是可行的。

4 结 论

利用栅距分别为 $50 \mu\text{m}$ 的指示光栅和 $44 \mu\text{m}$ 的标尺光栅,将自准直仪光学系统部分的分辨力提高了 25 倍,根据纵向莫尔条纹的读数,即像游标卡尺那样提高了读数分辨力。当系统中其他误差比较

大时,分辨力可以适当减小,诸如 $20:19, 10:9$ 等。

致谢:感谢各位老师和同事在实验及论文撰写过程中给予的帮助和建议。

参考文献

- [1] GAO Li-min, LUO Chang-zhou, CHEN Liang-yi. Development of photoelectric autollimation theodolite [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5):622-624.
高立民, 罗长洲, 陈良益. 一种新型光电准直经纬仪[J]. 光子学报, 2003, **32**(5):622-624.
- [2] ZHU Shao-qi, HUANG Xuan-shao, CAO Xiang-qun. Grating digital shows technology and its applications [M]. Beijing: China Machine Press, 1992. 1-66.
祝绍箕, 黄宣劼, 曹向群. 光栅数字显示技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1992. 1-66.
- [3] LI Xin, HUANG Shi-tao, ZHANG Yun, *et al.* Study on the subdividing technique for moiré fringes of grating [J]. *Machinery Manufacturing Engineer*, 2004, **6**:83-85.
李欣, 黄世涛, 张云, 等. 光栅莫尔条纹细分技术的研究[J]. 现代制造工程, 2004, **6**:83-85.
- [4] GU Lin, HU Xiao-dong, CHEN Liang-yi, *et al.* SOC of measuring the sub-pixel edge of linear CCD based on FPGA [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5):617-621.
谷林, 胡晓东, 陈良益, 等. 基于 FPGA 的线阵 CCD 亚像元边缘检测片上系统[J]. 光子学报, 2004, **33**(5):617-621.
- [5] WU Wen-ming, GAO Li-min, WU Yi-ming, *et al.* Improving precision of autocollimation with cubic spline interpolation functions[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8):1561-1564.
吴文明, 高立民, 吴易明, 等. 利用三次样条插值提高自准直仪的准确度[J]. 光子学报, 2007, **36**(8):1561-1564.

Application of Moiré Fringe in Autocollimator

WU Wen-ming^{1,2}, GAO Li-min¹, WU Yi-ming¹, WU Cui-gang¹

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received date:2007-03-30

Abstract: In order to improve the precision of autocollimator, Moiré fringe was used in the optical system. Indicate grating was imaged in CCD instead of single slit, CCD was considered as a ruled grating, and then Moiré fringe was formed by the indicate grating overlapped to the ruled grating. The results show that the resolution of displacement of Moiré fringe can be improved into sub-pixel, and the resolution of autocollimator can be improved into milli-arcsec. The resolution of the method was four times than the method of direct detection.

Key words: Optical subdivision; Moiré fringe; Autocollimator



WU Wen-ming was born in 1982. He achieved his B. S. degree from Zhejiang University in 2004. And now he is studying at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, for his M. S. degree, and majors in optical engineering.