

文章编号: 1004-4213(2010)03-0494-5

CCD 在自准直仪中用于莫尔条纹成像研究

刘鹏^{1,2}, 高立民¹, 赵素文^{1,2}

(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: 讨论了基于纵向莫尔条纹检测的光栅自准直仪测量原理. 运用光学傅里叶原理推导出, 利用线阵 CCD 取代指示光栅可以在自准直仪中产生莫尔条纹. 实验验证了当标尺光栅在 CCD 投影光栅常量 d_2 与其光栅常量 d_1 之比为 $s=1.01$ 时, 纵向莫尔条纹的放大作用能达到 14.14 倍. 该方法消除了因指示光栅衍射作用影响试验结果的问题, 显著提高了系统的角分辨力, 并简化了自准直仪光学系统.

关键词: 莫尔条纹; 自准直仪; 成像光栅; CCD

中图分类号: TH741

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103903.0494

0 引言

自准直仪是利用光学自准直原理, 用于小角度测量或可转换为小角度测量的一种精密计量测试仪器. 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, 其分辨率取决于成像器件的分辨率和光学系统的分辨率. 光栅是高准确度位移测量元件, 它与数字信号处理设备可以组成位移测量系统, 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来实现的, 将光栅莫尔条纹放大原理引入到自准直仪的光学系统中能有效地提高自准直仪的分辨率. 但是由于指示光栅的衍射作用比较严重, 影响了实验结果. 本文通过理论推导和实

验论证, 采用线阵 CCD 取代指示光栅, CCD 既用作成像器件, 也可以起到指示光栅的作用, 利用这个原理, 不但克服了衍射的问题, 而且还将系统更加简化, 也能够得到较高的系统角分辨力^[1-2].

1 光栅自准直仪测量原理

光栅自准直仪测量原理如图 1. 激光器发出的光投射在位于准直物镜焦平面上的标尺光栅上, 光束通过准直透镜准直后, 经由反射镜反射, 反射的光经由物镜和分光镜, 最后在线阵 CCD 上成像, 即将标尺光栅成像于线阵 CCD 上. 标尺光栅的像与 CCD 相叠合而形成莫尔条纹, 线阵 CCD 本身又可以作为光电接受器件, 用来检测莫尔条纹的移动量.

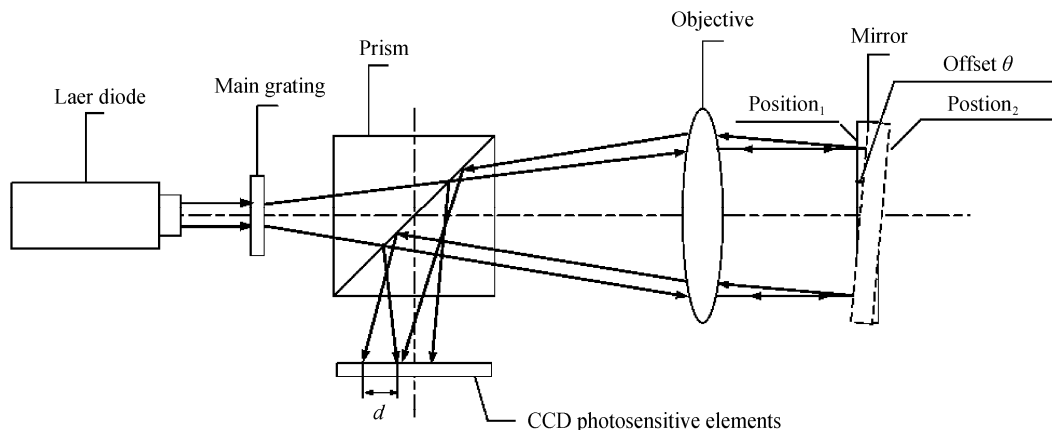


图 1 光栅自准直仪测量原理

Fig. 1 Illustration of auto-collimation measurement system based on grating

如图 1, 根据几何光学原理, 当反射镜由位置 1 到位置 2 偏移一个角度 θ 时, 反射光线相对于入射光线的夹角转动 2θ , 此时, 由标尺光栅所成像在

CCD 上会产生长度为 d 的位移量,设准直透镜的焦距为 f ,此位移量 d 与反射镜偏移量 θ 的关系为

$$\theta = \arctan \frac{d}{2f}$$

根据此公式,要测量角度 θ 的值,只需要测量标尺光栅的像在 CCD 上的位移量 d ,通过对采集信号进行放大、鉴相、细分、计数等处理环节,最终实现位置计量.光栅用于长度计量的优点是其既具有很高的分辨力又具有很大的测量范围.如果将其应用于光电自准直仪,将会得到较高的测角分辨力和较大的测量范围^[3-4].

2 CCD 在自准直仪中产生莫尔条纹的原理

2.1 莫尔条纹的测量原理

光栅测量位移主要是利用光栅莫尔条纹原理,当两块玻璃透射光栅叠合在一起时,根据其栅距 W 的大小和其叠加在一起的角度,可以将莫尔条纹分为几种类型:当光栅栅距大小相同,但以小角度 $\theta(\theta \neq 0)$ 相叠加时,形成横向莫尔条纹;当以零度角相叠加时,形成光栅莫尔条纹.当栅距大小相差很小时,横向莫尔条纹就变为斜向莫尔条纹,光栅莫尔条纹就变为纵向莫尔条纹.

对于纵向莫尔条纹,当指示光栅相对于标尺光栅移动一个光栅栅距 W ,莫尔条纹就跟着在与栅线垂直的方向移动一个条纹宽度 D ,它们之间存在着——对应的关系.所以,只要知道莫尔条纹移动的条数就可以得到指示光栅的位移量.由于莫尔条纹的空间周期比栅线宽很多倍,因此可以在技术上容易实现.之前提出的光栅自准直仪原理中,采用线阵 CCD 替代了指示光栅,即将标尺光栅的像成于线阵 CCD 感光面上,CCD 对光信号进行积分后,将采集到的信号进行输出,可以采用示波器对输出信号进行采集和分析.

2.2 莫尔条纹光强分布

由于 CCD 传感器的像敏单元具有规则的几何结构,各个像元间距,像元大小都是相等的,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 取代指示光栅,这时线阵 CCD 就有了双重作用,一方面作为成像器件,另一方面作为指示光栅.

由于线阵 CCD 传感器具有规则的几何结构,所以可以通过式(1)来描述其在均匀光场的光响应特性

$$L_1(x) = \begin{cases} 0 & \text{非感光区} & td_1 + \frac{a_1}{2} < x < (t+1)d_1 - \frac{a_1}{2} & t=0, \pm 1, \pm 2 \dots \\ 1 & \text{感光区} & td_1 - \frac{a_1}{2} < x < td_1 + \frac{a_1}{2} & t=0, \pm 1, \pm 2 \dots \end{cases} \quad (1)$$

式中, a_1 为感光单元宽度, d_1 为像元间的中心间距, $(d_1 - a_1)$ 为非感光区宽度.

当感光单元与感光面的垂直轴有 θ_1 角度的偏差时,则 CCD 光响应特征的傅里叶表达式为

$$L_1(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp [2\pi ni(xv_1 \cos \theta_1 + yv_1 \sin \theta_1)] \quad (2)$$

式中

$$v_1 = \frac{1}{d_1}, A_n = \alpha \times \sin c(n\alpha), \alpha = \frac{a_1}{d_1} \quad (3)$$

式(3)中 v_1 为感光单元的空间频率, A_n 为傅里叶系数.

由图 1 可知,当反射镜转动 θ 角后,由标尺光栅投影在 CCD 在上的空间频率为 $v_2 = \frac{1}{d_2}$ 的矩形光栅会沿着 x 轴有 d 的位移,当矩形光栅在绕同一垂直于感光面平面轴线转动 θ_2 角,则其傅里叶表达式为

$$L_2(x-d, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} B_m \exp \{2\pi mi[(x-d)v_2 \cos \theta_2 + yv_2 \sin \theta_2]\} \quad (4)$$

$$d)v_2 \cos \theta_2 + yv_2 \sin \theta_2] \} \quad (4)$$

式中

$$\text{若 } \beta = \frac{a_2}{d_2}, \text{ 则 } B_m = \beta \times \sin c(m\beta) \quad (5)$$

式中 B_m 为傅里叶系数.

假设入射到光栅上的准直光束的光强度为 $I_0(x, y)$,则入射光在经过标尺光栅,然后在 CCD 感光面上接收到的光强度为

$$I_0(x-d, y) = I_0 \times L_1(x, y) \times L_2(x-d, y) = I_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_n B_m \exp \{2\pi i[x(nv_1 \cos \theta_1 + mv_2 \cos \theta_2) - mdv_2 \cos \theta_2]\} \exp \{2\pi yi(nv_1 \sin \theta_1 + mv_2 \sin \theta_2)\} \quad (6)$$

利用 CCD 传感器所具有的规则几何尺寸,在特定情况下可以将其视为一光栅.这样在光栅式自准直仪中,用线阵 CCD 取代了指示光栅,CCD 既用作成像器件,也起到标尺光栅的作用.那么,当标尺光栅与其叠加产生的莫尔条纹,是由它们之间拍现象

所产生的最低频率含量所组成. 由拍现象所产生的最低频率及其谐波组成的莫尔条纹图样的一般表达式, 取 $n = -km$ (k 为一特定正整数).

即, 取 $V_x = v_2 \cos \theta_2 - kv_1 \cos \theta_1, V_y = v_2 \sin \theta_2 - kv_1 \sin \theta_1$ 则可得

$$I(x-d, y) = I_0 \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_{-km} B_m \exp \{2\pi m i [xV_x + yV_y - dv_2 \cos \theta_2]\} \quad (7)$$

V_x, V_y 分别代表了 CCD 光响应特征分布函数的空间频率在 X 轴和 Y 轴上的分量.

由式(3)和(5)可得, 当 $m=0$ 时, $A_0 = \alpha, A_{-km} = A_{km}$, 同理 $B_0 = \beta, B_m = B_{-m}$, 由以上各式可推得 CCD 传感器莫尔条纹光强分布及位移与光强关系的普遍表达式.

$$I(x-d, y) = \alpha\beta I_0 + 2I_0 \sum_{m=1}^{\infty} A_{km} B_m \cdot \cos \{2\pi m [xV_x + yV_y - dv_2 \cos \theta_2]\} \quad (8)$$

当 $n=1$ 时, 形成莫尔条纹的基波, 当 n 为其它值时, 形成相应的各次谐波.

2.3 线阵 CCD 产生纵向莫尔条纹的原理

以 V 表示莫尔条纹基波的空间频率, D 为莫尔条纹的周期, Φ 为莫尔条纹相对于 X 轴的夹角, 则有

因为 $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$, 并且取一般情况下 $v_1 = sv_2$ (s 为正实数), 则有

$$D = \frac{1}{V} = \frac{1}{v_2 \sqrt{1 + s^2 K^2 - 2sK \cos(\theta_1 - \theta_2)}} \quad (9)$$

$$\Phi = \arctan \frac{V_x}{V_y} = \arctan \left[\frac{\cos \theta_2 - Ks \cos \theta_1}{\sin \theta_2 - Ks \sin \theta_1} \right] \quad (10)$$

当 $\theta_1 = \theta_2 = 0, v_1 = sv_2, s$ 为正分数时, 形成纵向莫尔条纹, 其光强分布为

$$I(x-d, y) = I_0 \alpha \beta + 2I_0 \sum_{m=1}^{\infty} A_{km} B_m \cdot \cos \{2\pi m v_1 [x(\frac{s-k}{s}) - d]\} \quad (11)$$

通过调节标尺光栅投射在感光单元的光栅常量 d_2 , 可以得到不同的 s 值. 当 $s - \text{int}(s) \geq 0.5$ 时, 取 $K = \text{int}(s) + 1$; 当 $s - \text{int}(s) < 0.5$ 时, 取 $K = \text{int}(s)$; 则由式(10)可以得到: $V_x = \frac{v_1(s-K)}{s}, V_y = 0$.

莫尔条纹周期

$$D = \frac{s}{v_1(s-K)} = \frac{sd_1}{s-K}, \Phi = \arctg \frac{V_x}{V_y} = 90^\circ \quad (12)$$

通过本文的理论推导, 可以知道采用 CCD 取代指示光栅在原理上是可以的, 但是是否能够在实验中取得良好效果, 还需要实验进一步证明^[5].

对于纵向莫尔条纹来说, 标尺光栅的移动方向、整个莫尔条纹区域的移动方向, 以及莫尔条纹暗条纹的移动方向都是一致的. 因此, 在实验过程中, 采用纵向莫尔条纹的方式搭建实验平台.

3 CCD 在自准直仪中产生莫尔条纹的实验及结果分析

在实验中采用了 TCD1500C 线阵 CCD, 其感光单元中心间距为 $7 \mu\text{m}$; 标尺光栅的光栅常量 $d_m = 50 \mu\text{m}, \beta = \frac{1}{2}$; 准直透镜焦距 f 为 150 mm, 直径 30 mm, 视场角为 11.4° ; 激光光源采用 5 mW 的半导体激光器. 为了让实验更容易实现, 对光路结构做出了一定改动, 实验搭建的平台如图 2.

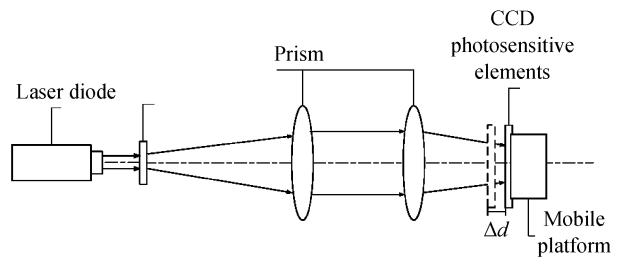


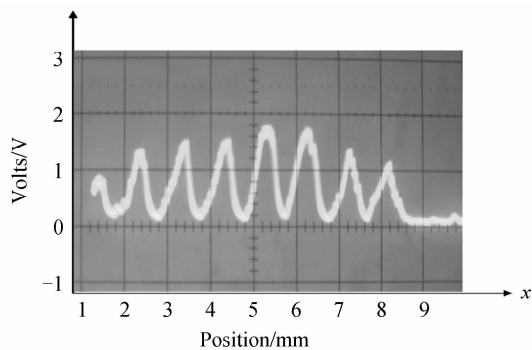
图 2 光栅自准直仪实验原理图
Fig. 2 Illustration of auto-collimation experimental system based on grating

将 CCD 放置于位移平台上面, 通过调节线阵 CCD 和准直透镜之间的距离, 可以转换得到投射在线阵 CCD 上的光栅常量 d_2 , 由 CCD 接收到的信号通过示波器进行显示. 为了更加直观的检测到产生的莫尔条纹, 先在位移平台上放置直视 DC130 面阵 CMOS 传感器对图像进行显示, 面阵 CMOS 像素尺寸为 $5.2 \times 5.2 \mu\text{m}^2$, 在位移平台上调节 CMOS 的位移量 Δd , 可以得到莫尔条纹产生的图像如图 3.



图 3 面阵 CMOS 接收图像 ($s \approx 1$)
Fig. 3 Array CMOS received image ($s \approx 1$)

将 CMOS 接收器换为线阵 CCD, 在小范围重新调节位移量 Δd , 连接示波器对输出信号进行检测, 其输出波形如图 4.

图4 线阵 CCD 输出波形图($s \approx 1$)Fig. 4 Linear CCD output waveform image($s \approx 1$)

理论上,当 Δd 在一定范围内进行调节,得到不同的 s 值,当 $\theta_1 = \theta_2 = 0$, s 为正分数时,可以得到纵向莫尔条纹.通过实验,不同的 s 值,会对 CCD 输出信号产生不同的影响,当 $s \approx 1$ 时,能够产生利于系统分辨的莫尔条纹,为后续信号处理带来了基础.调节 Δd ,使得 $\frac{d_2}{d_1} = s = 1.01$,带入式(14),可以得到莫尔条纹周期为

$$D = \frac{sd_1}{s-k} = \frac{1.01 \times 7}{1.01-1} = 707 \mu\text{m}$$

则相对于标尺光栅的光栅常量 $d_m = 50 \mu\text{m}$,通过莫尔条纹的放大作用,其放大倍数为

$$N = \frac{D}{d_m} = \frac{707 \mu\text{m}}{50 \mu\text{m}} = 14.14$$

因此,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.通过检测莫尔条纹的移动量 x ,可以精确的得到标尺光栅像在 CCD 上的移动量 $d^{[6]}$,它们之间存在

$$d = (1/k)x = (1/k)(nD + q)$$

式中, n 表示莫尔条纹移动量的整数部分, D 表示莫尔条纹周期, q 表示莫尔条纹移动量的小数部分, k 表示 d 和 x 之间的斜率.

因此,通过莫尔条纹的放大作用,可以很大程度上提高光栅的位移分辨率,通过后期的信号处理,可以很容易让光栅的位移分辨率 Δd 达到 $0.5 \mu\text{m}^{[7-8]}$,如果采用的准直物镜的焦距为 300 mm ,则光栅自准直仪的分辨率可以达到

$$\theta = \frac{1}{2} \times \arctan\left(\frac{\Delta d}{f}\right) \approx 0.17''$$

相对于传统的光电自准直仪,由于受到 CCD 像元大小的限制,其理论分辨率仅仅在秒级^[9],而采用之前提出的光学测量原理,可以将其理论分辨率提高 14 倍左右,可以大大提高自准直仪测量准确度.

4 结论

在自准直仪光路中引入光栅的纵向莫尔条纹放

大作用可以提高其测量准确度,但是光栅的衍射作用会对结果带来影响,通过前面的公式推导和实验结果可以看出,利用 CCD 像元所具有规则的几何排列,使用线阵 CCD 取代指示光栅,可以很好地解决这个问题. CCD 既用作成像器件,也起到指示光栅的作用,这样既简化了自准直仪系统,也可以提高系统的角分辨率.今后的工作中将在如何得到最大的莫尔条纹放大倍数和如何提高 CCD 上的莫尔条纹细分能力两方面入手,做更加深入的研究.

参考文献

- [1] ZHANG Ji-you, FAN Tian-quan, CAO Xue-dong. Present state and perspectives of photo electric autocollimator [J]. *Measurement Technique*, 2004(7): 27-29.
张继友, 范天泉, 曹学东. 光电自准直仪研究现状与展望[J]. 计量技术, 2004(7): 27-29.
- [2] WU Wen-ming, GAO Li-min, WU Yi-ming, et al. Improve 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.
- [3] ZHANG Ji-you, FAN Tian-quan, CAO Xue-dong. Auto-collimation angular measurement method based on imaging grating[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(11): 49-52.
张继友, 范天泉, 曹学东. 成像式光栅自准直测角方法研究[J]. 光电工程, 2006, 33(11): 49-52.
- [4] GAO Li-min, LUO Chang-zhou, CHEN Liang-yi. Development of photoelectronic autocollimation 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.
- [5] LIU Ji-fang. Modern optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004: 145-158.
刘继芳. 现代光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 145-158.
- [6] LIU Wei-guang, ZHOU Li-hua. Thinning based on image edge pixel gray level distribution[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(9): 1122-1125.
刘卫光, 周利华. 基于图象灰度分布的边缘中心定位算法[J]. 光子学报, 2003, 32(9): 1122-1125.
- [7] WANG Jian-Lin, ZHU Ming-wu, CUI Xiu-hua. A novel single linear CCD two-dimensional auto-collimator [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000, 21(3): 229-233.
王建林, 朱明武, 崔秀华. 一种新颖的单线阵 CCD 双坐标自准直仪[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(3): 229-233.
- [8] CAO Guo-rong, JING Fang-sheng, REN Ying. A technique for subdividing Moire fringes by using CCD[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1995, 16(2): 116-121.
曹国荣, 景芳盛, 任莹. CCD 用于莫尔条纹细分的技术[J]. 计量学报, 1995, 16(2): 116-121.
- [9] GU Lin, HU Xiao-dong, CHEN Liang-yi. 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. 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.

CCD in the Autocollimator Used for Moiré Fringe Imaging

LIU Peng^{1,2}, GAO Li-min¹, ZHAO Su-wen^{1,2}

(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*)

Abstract: The measuring principle of the grating autocollimator is discussed based on vertical stripes Moiré detection. Using the Fourier optics theory, it is able to deduce that the method is feasible which uses the linear array CCD to replace the instructions grating to produce moiré fringes in the autocollimator. The experiment validates that when the ratio s between projection grating constant d_2 on CCD and grating constant d_1 equals to 1.01, the amplification ratio of the vertical moiré fringes can reach to 14.14. The proposed method can solve the problem that the grating diffraction affects the trial result, simplify the autocollimator optical system, and enhance the system's resolution.

Key words: Moiré fringe; Autocollimator; Imaging grating; Linear CCD



LIU Peng was born in 1984. Now he is pursuing the M. S. degree at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, majored in optical engineering.



GAO Li-min was born in 1965. From 1991 to 2002, he received the M. S. and Ph. D. degrees from Xi'an Institution of Optics and Precision Mechanics of CAS. His main research interests focus on optical engineering.