

文章编号:1001-4888(2020)01-0009-09

# CCD 云纹方法的光学放大作用分析 及其在干涉测量中的应用<sup>\*</sup>

李佳<sup>1</sup>, 马少鹏<sup>1</sup>, 朱海斌<sup>2</sup>, 马沁巍<sup>3</sup>

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081; 2. 浙江清华柔性电子技术研究院 柔性光学测量技术研究所, 嘉兴 314006;  
3. 嘉兴学院 建筑工程学院, 嘉兴 314001)

**摘要:** 几何云纹由于对栅线变形具有光学放大作用, 常被用于高密度栅线的微小变形测量。但是其需要分别设置参考栅和试件栅, 实验布置复杂。当使用数字相机直接拍摄试件栅时也会形成与几何云纹相似的 CCD 云纹, 但是基于此原理发展的变形分析方法是否可以应用于高密度栅线变形分析还缺乏相关的研究。本文基于 CCD 云纹的形成机理和周期公式, 分析并确认了其具有与几何云纹一样的光学放大作用, 因此可以将其应用于高密度栅线/干涉条纹的解析。利用此优势, 实现了对高密度干涉条纹间距的解析, 实现了两个相干点光源距离和迈克尔逊干涉实验转动角度的精密测量。本研究为干涉实验中高密度条纹分析提供了一种新的手段, 可以解决实验中条纹过密无法解析的问题。

**关键词:** CCD 云纹; 高密度栅线; 光学放大; 距离测量

**中图分类号:** O348.1      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-19-064

## 0 引言

几何云纹是由两组周期相近的栅线相互叠加所形成的明暗相间的条纹, 由于云纹的周期和栅线的周期之间存在定量关系, 因此栅线的变形可以通过对云纹条纹进行分析得到, 基于此原理所发展的光测力学方法称为几何云纹法<sup>[1]</sup>。由于云纹的周期通常比栅距大至少一个量级, 因此可以实现高密度栅线变形的解析, 特别适用于微小变形和转角的测量<sup>[2-5]</sup>。随着电子技术的不断发展, 数字相机已经成为了实验力学应用中的主要图像采集设备。研究人员发现在不设置参考栅的情况下, 仅使用数字相机拍摄高密度栅线结构时, 就会采集到与几何云纹形态相似的条纹, 被称为 CCD 云纹<sup>[6]</sup>。在光学干涉实验中, 当干涉条纹过密时也会出现类似的现象, 光学中被称为莫尔现象, 在研究中往往将这一现象看作是一种图像噪声。直至 Morimoto 等人发现 CCD 云纹中同样也包含有物体的变形信息, 并利用其测量了粉末压实过程中的面内位移, CCD 云纹才逐渐被用于力学测量。如, Tu 等人<sup>[7,8]</sup>基于几何云纹的原理, 推导了特定条件下的 CCD 云纹周期公式, 并利用该方法测量了一张受到挤压后发生弯曲变形纸板的离面位移。Li 等人<sup>[9]</sup>基于数字相机成像原理, 对 CCD 云纹的形成机理做了系统的分析与研究, 推导获得普适性 CCD 云纹周期公式。Zhang 等人<sup>[10]</sup>也基于 Bayer 滤光片成像原理, 研究了彩色 CCD 云纹的形成机理, 实现了圆柱曲面残余应力的测量。目前的研究都是利用 CCD 云纹对制作在被测物表面上的试件栅的变形进行分析, 将其应用于干涉测量领域的研究还未见报道。在电子散斑干涉等光测力学应用中, 变

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2019-04-20; 修回日期: 2019-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(11772053&11727801)资助

通讯作者: 马沁巍(1983-), 男, 博士研究生, 教授。主要研究领域: 光测实验力学。Email: maqw@bit.edu.cn

形较大条件下的干涉条纹会出现密度过大而难以分辨的情况,导致干涉类测量方法虽然灵敏度高但是量程较小。如能够利用 CCD 云纹来实现高密度干涉条纹的解析,则可以进一步提升干涉类方法的应用范围,但是 CCD 云纹是否与几何云纹一样具有光学放大作用还有待理论上的分析和实验上的验证。

本文从 CCD 云纹的形成原理出发,分析了该方法具有光学放大作用的原因。之后通过图像模拟的方法,对 CCD 云纹的光学放大作用进行了验证。最后,将其应用于两个相干点光源之间距离的精密测量。实验中通过分析图像中较粗的 CCD 云纹周期变化实现对较密干涉条纹变形的测量,完成了对超出图像成像与采集系统分辨能力的条纹间距分析,有效地拓宽了干涉测量的测量范围。本文的结构如下:第 1 部分介绍 CCD 云纹的形成机理,分析其光学放大作用并进行了验证。第 2 部分将 CCD 云纹应用于两个相干点光源间距测量实验中,实现了两个相隔较远点光源间距的精确测量。第 3 部分将其应用于迈克尔逊干涉实验中,实现了转动角度的精确测量。第 4 部分对本文的内容进行总结和展望。

## 1 CCD 云纹及其光学放大作用分析

文献[9]的研究表明,CCD 云纹是由试件栅投影到相机靶面后所成的像与 CCD 靶面单元之间相互作用所形成的条纹,如图 1(a)所示,图中  $p$  为试件栅的像的周期, $q$  为相机靶面单元尺寸, $d_v$  为每个单元的有效感光宽度, $d_t$  为两个邻近单元之间的间隔, $b$  为试件栅中白色区域投影到有效感光区域内的尺寸。 $d_v/q$  的值称为相机的填充因子,通常情况下,CCD 相机的填充因子在 0.2~0.8 之间。在采样时,每一个靶面单元对应于图像中的一个像素,每个像素点的灰度值  $G$  与靶面单元上接收到的平均光照强度之间可以表示为:

$$G = CI \frac{b}{d_v} \quad (1)$$

式中, $C$  为与相机芯片物理参数有关的常数; $I$  为落在像元上的所有栅线的光强。由式(1)可以计算出每个靶面单元输出的像素灰度值。由于  $p$  与  $q$  之间存在固定的差值,所以同一行上的感光单元接收到的光强会呈周期性变化,进而在采集到的图像中形成灰度呈周期性变化的 CCD 云纹。当节距比  $n$  ( $n = p/q$ ) 处于不同范围时,将会形成不同类型的 CCD 云纹,如图 1(b)所示。

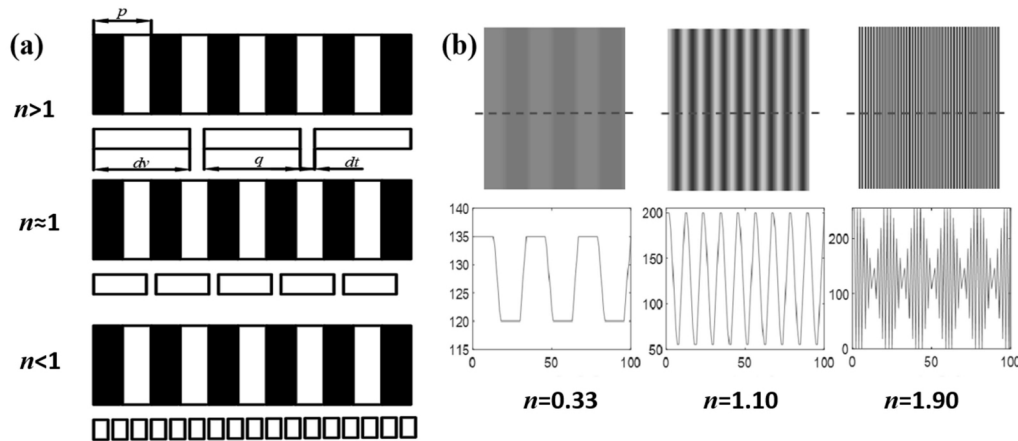


图 1 CCD 云纹的形成示意:(a) 形成原理;(b) 不同节距比  $n$  下所形成的三种形态的云纹<sup>[9]</sup>

Fig. 1 The formation indication of CCD moiré:(a) principle of formation;(b) three kinds of moiré pattern formed under different pitch ratios  $n$ <sup>[9]</sup>

基于 CCD 云纹的形成机理,适用于各种情况下的 CCD 云纹周期公式可表示为:

$$T = \begin{cases} \left\lceil \frac{n}{n \times \left\lceil \frac{1}{n} \right\rceil - 1} \right\rceil & n < 1 \\ \left\lceil \frac{n}{\lceil n \rceil - n} \right\rceil & n \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $T$  为 CCD 云纹的周期;  $[\ ]$  为四舍五入取整运算符。

通过模拟发现, 当  $\frac{2}{3} < n < \frac{3}{2}$  时会形成灰度呈正弦波分布的 CCD 云纹, 此时的云纹图像质量好, 最适合用于测量。由式(2)可得出此时的云纹周期  $T$  为:

$$T = \frac{p}{|p - q|} \quad (3)$$

这种情况下的 CCD 云纹周期公式与传统的几何云纹公式相同。当节距比  $n \approx 1$  时, 试件栅的像的间距  $p$  接近于 CCD 相机靶面单元尺寸  $q$ , 因此  $|p - q|$  的值接近于 0,  $1/|p - q|$  的值远大于 1, 即 CCD 云纹的周期  $T$  远大于试件栅的间距  $p$ 。在使用高密度栅作为变形载体以期获得更高测量分辨率的测量应用中, 直接观察低密度的 CCD 云纹同样可以解析出高密度栅线的变形, 也就是说 CCD 云纹同传统的几何云纹一样, 具有光学放大作用。

为了验证上述光学放大作用, 通过模拟生成了一系列频率已知的栅线图像, 基于数字图像采样原理将其采样为条纹图, 通过分析条纹法和 CCD 云纹法对图像进行处理, 对比了测量栅线周期结果的精度。具体方法为: 模拟生成分辨率为  $10000\text{pixels} \times 10000\text{pixels}$ , 周期  $p$  为  $40\text{pixels}$  的栅线图像, 假设 CCD 相机靶面的一个像元对应于栅线图像中的  $10\text{pixels}$ , 填充因子为  $0.7$ , 对该栅线图像进行模拟采样, 生成采样后像素尺寸为  $1000\text{pixels} \times 1000\text{pixels}$  的条纹图像。改变栅线的周期可以获得频率连续变化的采样条纹图像。

当栅线周期  $p$  为  $40\text{pixels}$  时 ( $n=4$ ), 采样得到清晰的条纹图像, 如图 2(a) 所示。通过对条纹区域每一行上的灰度进行拟合并平均, 可以直接计算出栅线的周期  $p$ 。以  $1\text{pixel}$  为步长, 逐渐减小生成栅线的周期  $p$ , 模拟采样得到的条纹图像也会逐渐变密。当条纹的周期减小到  $20\text{pixels}$  时 ( $n=2$ ), 采样得到的条纹图像开始变得模糊, 如图 2(b) 所示, 但从 CCD 云纹的形成机理可以得知视域中存在带有高频谐波

$$P = \frac{2Tq}{T+1} \quad (4)$$

计算出此时的高频谐波 CCD 云纹的周期  $T$ , 将计算结果代入式(4)中就可以计算出栅线的间距。继续减小条纹的周期, 当条纹周期达到  $15\text{pixels}$  ( $n=1.5$ ) 时, 满足形成高质量的正弦波形 CCD 云纹的要求, 在采样生成的图像中再次出现清晰的条纹, 即正弦波形 CCD 云纹, 如图 2(c) 所示。由式(2)可以计算得到此时条纹的周期  $p$  如式(4)所示。在已知相机靶面单元尺寸  $q$  的情况下, 将拟合得到的 CCD 云纹周期  $T$  代入式(5)中, 同样可以计算出对应的栅线间距  $p$ 。

$$p = \frac{Tq}{T-1} \quad (5)$$

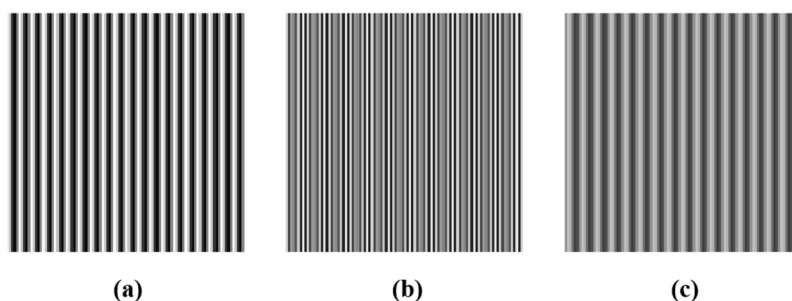


图 2 模拟结果: (a) 条纹图; (b) 模糊的条纹图; (c) CCD 云纹图

Fig. 2 Experimental results: (a) fringe pattern; (b) blurred fringe pattern; (c) CCD moiré pattern

模拟的结果如图 3 所示, 图中横坐标为节距比  $n$ , 纵坐标为模拟栅线的周期。当栅线频率较低时, 节距比  $n$  远大于 1, 通过模拟采样可以采集到清晰的条纹而观察不到 CCD 云纹, 对图像中条纹区域直接拟合得到的条纹周期与理论值吻合, 图 3 中 A 点为使用图 2(a) 所展示的条纹图像测量的结果; 随着栅线频率的增大, 节距比  $n$  随之减小, 通过直接分析条纹获得的结果误差将增大, 但对此时期图像中形成

的高频谐波 CCD 云纹进行分析,计算出 CCD 云纹的周期  $T$ ,将计算结果代入式(4)中仍可以精确地计算出干涉条纹的间距,图 3 中 B 点为使用图 2(b)所展示的节距比  $n=2$  时的条纹图像测量的结果。当栅线频率继续增大到满足形成正弦波形 CCD 云纹的要求时,同样可以对 CCD 云纹图像进行分析,达到测量目的,而这种情况下观察不到条纹图像。通过对正弦波形的 CCD 云纹进行分析,也可以计算得到栅线的周期,并且计算结果与理论值吻合,图 3 中 C 点为使用图 2(c)所展示的 CCD 云纹图像的测量结果。观察图 3 曲线可以发现,当节距比  $n \geq 2$  时,可以采集到清晰的条纹图像,使用直接分析条纹的方法就可以对其实现测量。随着栅线频率的增大,采样生成的条纹也随之变密,当条纹密度接近相机分辨能力时,即  $0 < n < 2$  时,从图像中无法分辨出清晰的条纹,此时使用直接分析条纹的方法对其进行测量的误差急剧增大。但是通过对图像中形成的带有高频谐波分量的 CCD 云纹或正弦波形的 CCD 云纹进行分析,仍然可以实现对栅线的精密测量。针对密度较大条纹的变形测量,CCD 云纹法凭借其具有光学放大作用,相比于直接分析条纹的方法具有更大的优势。

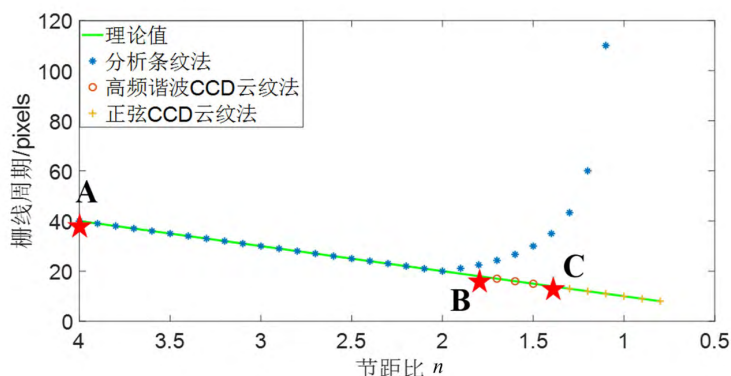


图 3 实验结果曲线

Fig. 3 Experimental result curve

## 2 基于 CCD 云纹的两点光源间距精密测量

干涉测量作为一种精密测量手段在实验力学中有着非常重要的作用,包括电子散斑干涉测量在内的光学干涉测量技术在厚度、折射率和间距的测量中均有应用<sup>[11]</sup>。但是,当采集到的干涉条纹较密时,无法对其进行高精度的解析,限制了该方法的测量范围。上一节已经对 CCD 云纹的光学放大作用进行了验证,当条纹过密时可以通过对较粗的 CCD 云纹进行分析,实现对较密的干涉条纹的测量。本节将这一特点应用于两个相干点光源距离测量中,以验证该方法在干涉测量中的可行性和精度。

当两束相干光汇聚在接收器上时,形成合成光的光强度可以表示为:

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y)] \quad (6)$$

式中,  $A$  是干涉条纹的背景光强度;  $B$  是调制光强度;  $\varphi$  是条纹的相位。

在两束光重叠的区域内将形成明暗相间的正弦条纹。实验时通常将两个点光源干涉简化为双缝干涉,其原理如图 4 所示。干涉条纹的条纹间距  $\Delta l$  为:

$$\Delta l = \frac{D}{d} \lambda \quad (7)$$

式中,  $D$  为两个相干点光源到干涉平面的垂直距离;  $d$  为两个相干点光源之间的距离;  $\lambda$  为相干光波长。

在已知相干光的波长  $\lambda$  和垂直距离  $D$  的情况下,只要测量出干涉条纹的间距  $\Delta l$ ,就可以计算出两个相干点光源的距离  $d$ 。

由于双缝干涉实验中的两个点光源的距离很小,实际实验时为了方便布置,通常采用图 4 中所示的等效光路:将两个激光点光源垂直分布,位于下方的点激光经过分光镜后,将折射到与另一束激光平行的方向上,在两束激光重合的区域内形成干涉。通过点光源 2 在图中水平方向上的移动,实现两个等效点光源在纵向上的距离变化。通过对干涉条纹间距的分析,就可以计算出两个点光源之间的距离。

搭建如图 5 所示的两相干点光源干涉光路,使用一分二单模保偏光纤将激光器发出的激光分为相干的两束激光,其中一束使用连杆直接固定于隔震台上,另一束使用连杆固定在 Zolix sc300-2A 步进电机平移台上(步进精度  $0.625\mu\text{m}$ ),再将电动平移台使用螺钉固定于隔震台上,使用数字相机(AVT Pike F-421B,分辨率:  $2048\text{pixels}\times 2048\text{pixels}$ ,像元尺寸:  $7.4\mu\text{m}$ ,选用 Nikon 50mm 定焦镜头)采集图像。

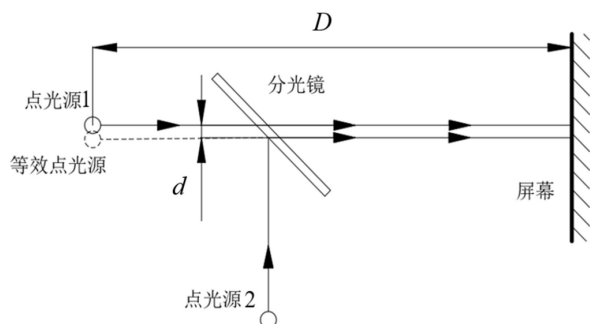


图 4 干涉实验原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of interference experiment principle

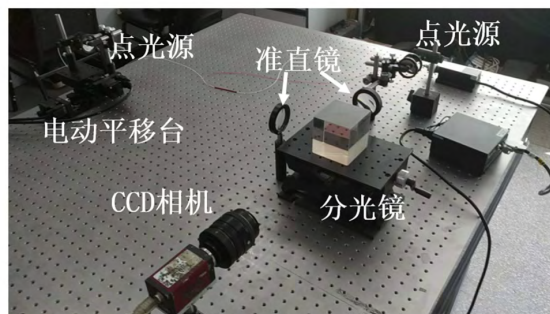


图 5 干涉实验布置图

Fig. 5 Experimental layout of interference experiment

调整两个点光源的空间位置,使得两束激光在相机靶面上重叠形成干涉,控制步进电机导轨使得两个点光源之间错开较小的间隙,得到干涉条纹,如图 6(a)所示,此时的节距比  $n$  远大于 1,所以图中观察不到 CCD 云纹。选取图中一行上的灰度进行拟合可以发现,此时的干涉条纹的灰度呈正弦分布,如图 6(b)所示。控制步进电机平移台使点光源 2 以  $93.75\mu\text{m}$  的步长相对于点光源 1 移动,每移动一步后使用 CCD 相机采集一张条纹图像。随着两个点光源之间距离的不断增大,干涉条纹的频率也随之增大,此时的条纹形式仍为正弦条纹。当移动距离达到  $2250\mu\text{m}$  时,对应的节距比  $n\approx 1.77$ ,视场中已经分辨不出清晰的条纹,即此时的干涉条纹频率过高已经无法分辨,如图 7(a)所示。但是通过对图像视场中的条纹区域进行灰度拟合,可以看出此时采集到的图像为带有高频谐波分量的 CCD 云纹(即图 1(b)中所展示的第三种形态的云纹,实际如图 7(b)所示)。继续增大两个点光源的距离达到  $2625\mu\text{m}$  时,通过式(7)可以计算出此时的干涉条纹间距约为  $11.07\mu\text{m}$ ,对应的节距比  $n\approx 1.49$ ,因此采集到的图像中再次出现清晰的明暗相间的高质量 CCD 云纹(即图 1(b)中所展示的第二种形态的云纹,实际如图 8(a)所示),此时的条纹灰度分布如图 8(b)所示。

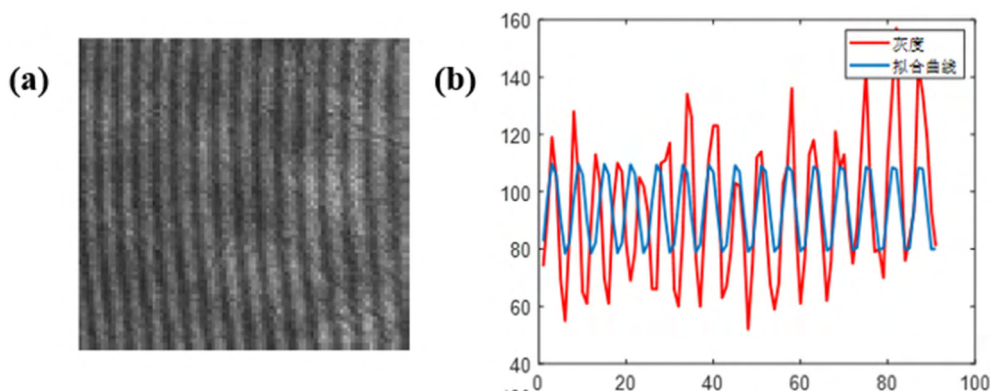


图 6 干涉条纹:(a) 相机采集到的图像;(b) 条纹灰度分布

Fig. 6 Interference fringes: (a) captured image; (b) fringe gray distribution

实验结果与由式(7)计算出来的理论结果对比如图 9 所示。图中横坐标为两个点光源之间的距离,纵坐标为干涉条纹的条纹间距。当两个点光源间的距离较小时,干涉条纹的间距较大,通过 CCD 相机可以采集到清晰的干涉条纹图像,对干涉条纹图像直接进行灰度拟合即可获得条纹的间距,此时测量的条纹间距与计算值较为吻合,如图中 A 点按照式(8)计算出的相对误差为 2.82%。随着两点光源之间



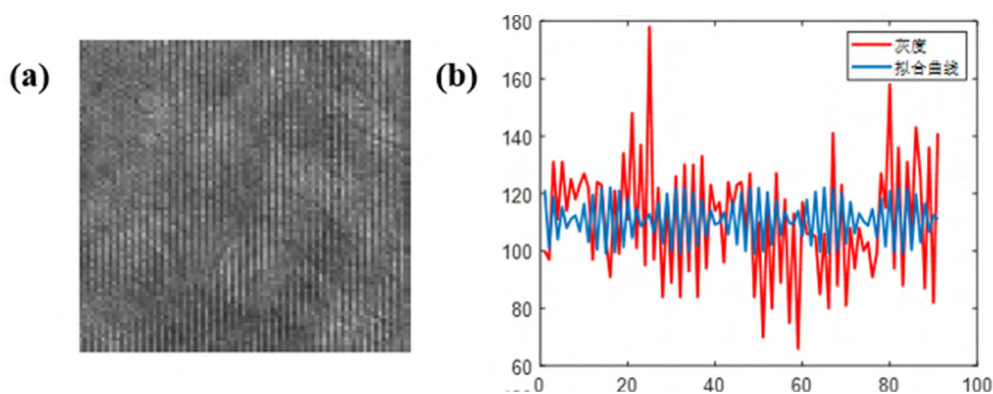


图 7 带有高频谐波分量的 CCD 云纹:(a) 相机采集到的图像;(b) 条纹灰度分布

Fig. 7 CCD moiré with high frequency harmonic components: (a) captured image; (b) fringe gray distribution

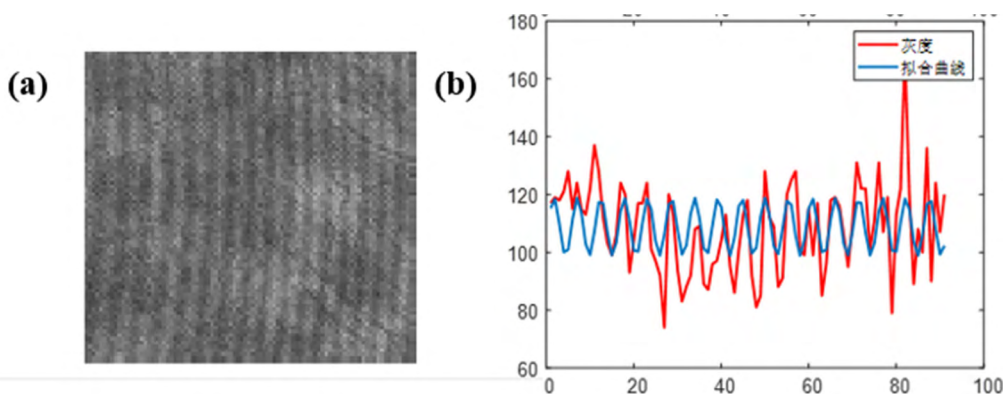


图 8 正弦型的 CCD 云纹:(a) 相机采集到的图像;(b) 条纹灰度分布

Fig. 8 Sinusoidal CCD moiré: (a) captured image; (b) fringe gray distribution

距离的增大,条纹频率也将增大,采集到的干涉条纹过密并且接近相机的分辨率,此时通过直接对条纹图像进行分析计算出的结果精度降低(相对误差为 8.73%),如图中 B 点所示。

$$\delta = \frac{\nu - \mu}{\mu} \times 100\% \quad (8)$$

式中, $\delta$  为测量值与计算值的相对误差; $\nu$  和  $\mu$  分别为干涉条纹间距的测量值和计算值。

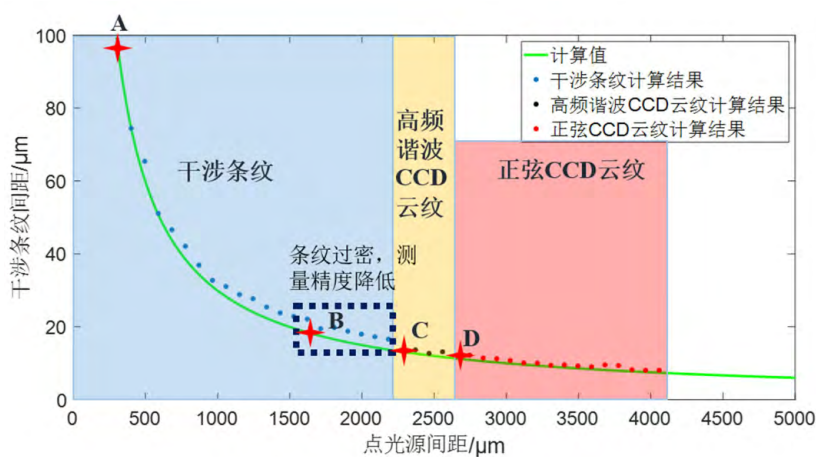


图 9 两个相干点光源间距测量结果

Fig. 9 Measurement results of spacing between two coherent point sources

继续增大两个点光源之间的距离,当间距达到  $2250\mu\text{m}$  时,可以算出此时的节距比  $n \approx 1.77$ ,相机视域中已经分辨不出清晰的条纹,无法通过灰度拟合直接获得干涉条纹间距,但从灰度拟合曲线可以看

出,此时视域中存在带有高频谐波的 CCD 云纹,如图 9 中 C 点。计算出此时的高频谐波 CCD 云纹的周期  $T$ ,将计算结果代入式(4)中可以计算出干涉条纹的间距,并且计算值与理论值较为吻合,相对误差仅为 1.18%。

继续增大两个点光源的间距,当间距达到  $2625\mu\text{m}$  时,节距比  $n \approx 1.49$ ,视域中将再次形成清晰的明暗相间的条纹,即正弦波型的 CCD 云纹,通过对 CCD 云纹进行灰度拟合计算出正弦波 CCD 云纹的周期  $T$ ,将计算结果代入式(5)中可以精确地计算出干涉条纹的间距,如图 9 中 D 点所示。此时的相对误差仅为 1.01%。

本节将 CCD 云纹应用于两个相干点光源间距的测量中。实验结果表明,使用直接分析干涉条纹间距来测量两个相干点光源之间距离的方法具有局限性,只适用于两点间距离较小的情况。当两个点光源之间的距离较大时,干涉条纹频率往往过密而超出图像采集系统的分辨率。但是利用 CCD 云纹方法可以很好地解决上述问题,实现在两个点光源之间距离的高精度分析。实验结果证明了在干涉实验中,可以通过对较粗的 CCD 云纹的分析实现对较密的条纹的测量。

### 3 基于 CCD 云纹的转动角度精密测量

CCD 云纹法不仅能够对两个点光源的间距进行精密测量,还可以结合迈克尔逊干涉,实现转角的精密测量,其光路图如图 10(a)所示。激光器发出的入射光经过分光镜分成两束后各自被反射镜反射回来,因为这两束光频率相等,且存在恒定的相位差,在汇聚平面上会产生干涉<sup>[12]</sup>。

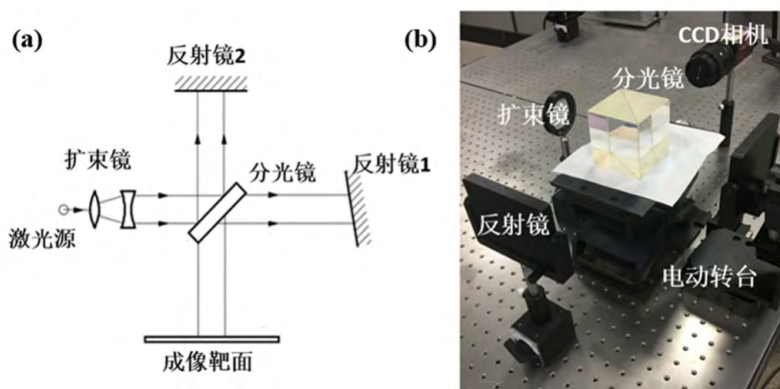


图 10 迈克尔逊干涉实验:(a)原理图;(b)实验布置图

Fig. 10 Michelson interference experiment: (a) schematic diagram; (b) layout

实验中如果两个反射镜相互垂直,可以实现等倾干涉;当两个反射镜之间形成夹角时,可以实现等厚干涉。等厚条纹是平行的明暗相间的直条纹,两条相邻的亮条纹之间的距离为:

$$L = \frac{\lambda}{2k \sin \varphi} \approx \frac{\lambda}{2k \varphi} \quad (9)$$

式中,  $k$  为空气的折射率;  $\lambda$  为激光的波长;  $\varphi$  为两反射镜之间的夹角。

由式(9)可看出,等厚条纹是等间距的,且条纹间距与两反射镜的夹角呈反比,即夹角  $\varphi$  越大,条纹越稠密,  $\varphi$  越小,条纹越稀疏。因此通过调整两个反射镜之间的夹角,可以获得不同频率的标准条纹图。

搭建如图 10(b)所示的迈克尔逊干涉实验,将一个反射镜固定在精密步进电机转台上(转角分辨率为  $4.5''$ ),通过步进电机的转动可以改变两个反射镜之间的相对夹角。调整迈克尔逊干涉光路产生清晰的干涉条纹。以  $4.5''$  为步长转动步进电机转台,同时使用数字相机(AVT Pike F-421B,分辨率:  $2048\text{pixels} \times 2048\text{pixels}$ ,像元尺寸:  $7.4\mu\text{m}$ ,镜头选用 Nikon 50mm 定焦镜头)采集图像。

实验中,当两个反射镜间的夹角较小时,干涉条纹间距较大,如图 11(a)所示(夹角为  $31.5''$ )。随着夹角的增大,干涉条纹频率同样增大,相机采集到的条纹图像变得模糊。当反射镜间的夹角为  $364.5''$  时,由于干涉条纹频率过大,采集到的图像中无法识别出清晰的条纹,如图 11(b)所示。继续增大反射镜间的夹角,视场中再次出现清晰的条纹图像,即 CCD 云纹(夹角  $630''$  时),如图 11(c)所示。

当能够采集到清晰的干涉条纹时(如图 11(a)所示),可以直接对条纹区域的灰度进行拟合来精确地测量出干涉条纹的间距。当采集到的图像中为清晰的 CCD 云纹时(如图 11(c)所示),可知此时干涉条纹的间距如式(5)所示,在已知相机靶面单元尺寸  $q$  的情况下,将拟合得到的 CCD 云纹周期  $T$  代入式(4)中,便可以计算出对应的干涉条纹间距  $p$ ,再将结果代入式(9),就可以计算出转台转动的角度  $\varphi$ 。

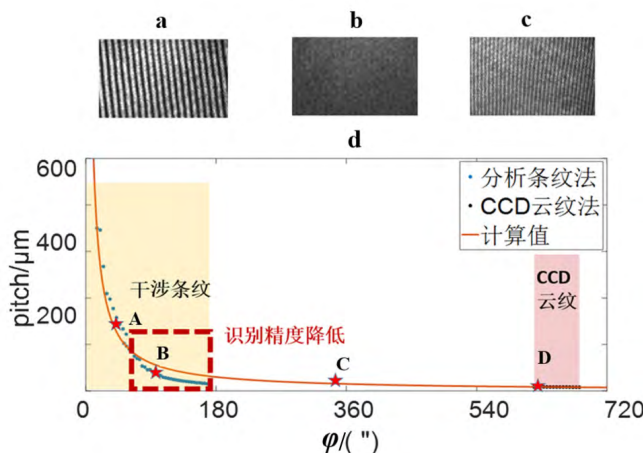


图 11 实验结果:(a)干涉条纹图;(b)模糊的条纹图;(c)CCD 云纹图;(d)实验结果曲线  
Fig. 11 Experimental results: (a) interference fringe pattern; (b) blurred fringe pattern;  
(c) CCD moiré pattern; (d) experimental result curve

实验结果如图 11(d)所示,图中横坐标为两个反射镜之间的夹角  $\varphi$ ,纵坐标为干涉条纹的条纹间距  $L$ 。当干涉条纹频率较低时,节距比  $n$  远大于 1,通过相机可以采集到清晰的干涉条纹而观察不到 CCD 云纹,对图像中干涉条纹区域直接拟合得到的条纹间距与理论值相吻合,如图 11(d)中点 A 处按照式(8)计算出来的相对误差为 2.3%。随着两个反射镜之间夹角的不断增大,干涉条纹的频率也随之增大,采集到的干涉条纹图像也逐渐变得模糊,对干涉条纹直接拟合得到的条纹间距与理论值之间的相对误差也逐渐增大,图 11(d)中 B 点处的相对误差为 52%。

继续增大反射镜之间的夹角,条纹频率继续增大,图像中无法识别出清晰的条纹,所以无法对此时的图像进行分析,如图 11(d)中 C 点处。当干涉条纹频率继续增大到满足形成 CCD 云纹的要求时,使用相机可以采集到清晰的 CCD 云纹图像而观察不到干涉条纹,通过对 CCD 云纹进行分析,可以再次计算得到干涉条纹的间距,如图 11(d)中 D 点处所示的测量结果的相对误差仅为 1.2%,而此时对干涉条纹直接进行分析的方法已经失效。由此看出,当条纹频率较大时,图像中不存在清晰的干涉条纹,也就无法对其进行解析,但是当采集到的图像中形成 CCD 云纹时,通过对图中的 CCD 云纹进行分析可以实现对密度较大的迈克尔逊干涉条纹的解析,进而实现对转台转动角度的精密测量。

#### 4 结论

本文基于 CCD 云纹的形成原理,从理论上证明了 CCD 云纹同传统的几何云纹一样具有光学放大作用,并通过实验对此作用进行了验证。研究表明,CCD 云纹的周期  $T$  与栅线在成像靶面上所成的像的栅距  $p$  之间存在  $1/|p-q|$  的放大系数(其中  $q$  为像元尺寸), $p$  与  $q$  越接近,其放大作用越明显。因此在实验中,应尽量通过调整光学系统放大倍数将表征  $p$  与  $q$  比例的参数  $n$  调整在 1 附近,以获得高质量大周期的云纹条纹。

基于 CCD 云纹的这一特点,本文将其应用于两个相干点光源间距测量实验中。实验结果表明,当两个点光源之间距离较大,干涉条纹过密而无法分辨时,使用 CCD 云纹方法同样可以获得很好的测量结果,实测值与理论值之间的相对误差可控制在 1% 左右。

由此可知,CCD 云纹不仅更适用于微小变形的测量,而且凭借其具有光学放大作用这一特点,可以用于对高密度条纹的高精度分析,在干涉实验中由于变形较大导致干涉条纹过密时,同样可以使用



CCD 云纹方法对其进行高精度的测量,有效地拓宽了干涉测量的测量范围。

#### 参考文献:

- [1] Rastogi P K. Photo-mechanics[M]. Berlin: Springer, 2000.
- [2] Chiang F P. Moiré methods of strain analysis[J]. Experimental Mechanics, 1979, 19(8):290—308.
- [3] Meadows D M, Johnson W O, Allen J B. Generation of surface contours by moiré patterns[J]. Applied Optics, 1970, 9(4):942—947.
- [4] Post D, Han B, Ifju P. High sensitivity moiré: experimental analysis for mechanics and materials [J]. Experimental Techniques, 1994, 18(2):100—104.
- [5] Rastogi P K, Hack E. Optical methods for solid mechanics[M]. Berlin: Wiley-VCH, 2012.
- [6] Morimoto Y, Hayashi T. Deformation measurement during powder compaction by a scanning-moiré method[J]. Experimental Mechanics, 1984, 24(2):112—116.
- [7] Tu T, Goh W B. Moiré patterns from a CCD camera—are they annoying artifacts or can they be useful? [C]. Lisbon, INSTICC, 2009:51—58.
- [8] Tu T, Goh W B. Using CCD moiré pattern analysis to implement pressure-sensitive touch surfaces[C]. Munster, Springer, 2009:1228—1235.
- [9] Li J, Zhang Y, Wang J, et al. Formation mechanism and a universal period formula for the CCD moiré[J]. Optics Express, 2014, 22(17):20914.
- [10] Zhang H, Wu C, Liu Z, et al. A curved surface micro-moiré method and its application in evaluating curved surface residual stress[J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(9):095002.
- [11] 戴福隆, 沈观林, 谢惠民. 实验力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010 (DAI Fulong, SHEN Guanlin, XIE Huimin. Experimental mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010 (in Chinese))
- [12] Shen Y C, Hess P. Real-time detection of laser-induced transient gratings and surface acoustic wave pulses with a Michelson interferometer[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(10):4758.

## Analysis of optical amplification of CCD moiré method and its application in interferometry

LI Jia<sup>1</sup>, MA Shao-peng<sup>1</sup>, ZHU Hai-bin<sup>2</sup>, MA Qin-wei<sup>3</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Flexible Optical Measurement Technology Center, Institute of Flexible Electronics Technology of THU, Jiaxing 314006, China;

3. Jiaxing University, School of Architectural Engineering, Jiaxing 314001, China)

**Abstract:** Geometric moiré is often used for small deformation measurement of high density grating because of its optical amplification effect. But the experimental setup is very complicated due to the need of using reference grating and specimen grating. It's known that CCD moiré, similar to geometric moiré, can be formed when the specimen grating is captured directly by a camera. However, there is still a lack of research on whether this method has the same optical magnification effect as geometric moiré and whether it can be applied to the analysis of high density grating. Based on the formation mechanism and periodic formula of CCD moiré, this work theoretically analyzes its optical amplification effect, and show its applicability for high density interference fringes analysis. Using this advantage, the distance between two coherent point sources with long distance and the rotation angle of Michelson interference experiment is measured accurately. This research provides a new method for the analysis of high density fringes in interferometric experiments, which can solve the problem that fringes are too dense to be resolved in experiments.

**Keywords:** CCD moiré; high density grating; optical amplification effect; distance measurement