

文章编号 : 0253-2239(2001)09-1103-04

镜像光衍射技术及其在测量中的应用 *

王冬云¹⁾²⁾ 杨国光¹⁾²⁾ 丛 虹¹⁾

(1), 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027
(2), 浙江大学微系统研究和开发中心, 杭州 310027

摘要 : 对光衍射技术提出了一种新方法,即在衍射缝后引入反射形成镜像,用以改变衍射条纹的光强分布,这种方法可提高测量精度,加大动态范围,改善因缝不理想所形成的场分布。还对参数的选取进行了讨论。

关键词 : 衍射 ; 镜像干涉 ; 光学测量 ; 在线测量

中图分类号 : TH744 文献标识码 : A

1 引 言

光衍射技术是一种非接触、精密、快速、实时、装置简单的近代光学测试系统^[1,2],在许多精密实时在线测量中得到应用。但常规的单缝衍射有一严重不足,即 90% 以上能量集中于零级(设为 I_0),高级次衍射条纹太弱(±3 级只有 0.8% I_0 ,级次越高能量越低),探测困难。而实际应用中从灵敏度与精度出发,又要尽可能探测高级次条纹,但因其信噪比极低,信息易被噪声干扰甚至淹没而使测量精度、灵敏度远低于理论值。因此,要发展光衍射技术,必须有效地改变衍射条纹的光强分布模式,这就是本文所讨论的要点。

2 镜像衍射

2.1 原理

上述问题归根结底在于能量分布的形式。从总体上说,光能过于集中于零级,从每条高级次条纹内部分布上看又过于平缓,峰谷不明显而可获得信息量少,且易受噪声干扰。而采用镜像衍射即引入双缝干涉可以有效解决这一问题,原理如图 1 所示。

狭缝 B 的缝宽为 w ,在离狭缝 B 的下刀口距离为 a 的位置上水平放置一平面反射镜 M,从而产生缝的镜像 B',缝宽仍为 w 。He-Ne 激光水平入射,经 B 发生衍射,通过狭缝直接出射的衍射波 E_1 与对称向下而经镜面反射的衍射波 E_2 产生干涉。这就相当于缝 B 和镜像缝 B' 形成了双缝衍射。

2.2 理论

单缝衍射光强分布为

$$I(\theta) = I_0 \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2}, \quad (1)$$

其中, I_0 为入射光强,

$$\alpha = \frac{\pi w \sin \theta}{\lambda}, \quad (2)$$

θ 为出射光线与水平方向的夹角, λ 为光波长。

如图 1 所示,加入镜面 M 后形成双缝衍射,有:

$$E_2(\theta) = E_1 \exp(ikd \sin \theta), \quad (3)$$

$$I_1(\theta) = (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2)^* = 2I_0 \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2} (1 + \cos 2\beta), \quad (4)$$

其中,

$$\begin{cases} \beta = \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}, \\ d = w + 2a. \end{cases} \quad (5)$$

图 2 为加镜前后衍射光强分布对比($d = 5w$)粗实线为一般单缝衍射光强分布,细实线为镜像衍射光强分布,虚线是其轮廓(0 级太强,削去顶端)。由图 2 可见:

1) 镜像衍射条纹只有正角度分布,轮廓包络特

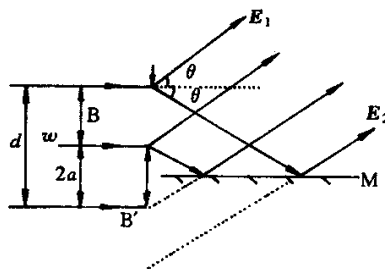


Fig.1 The scheme of mirror-image diffraction

* 国家自然科学基金(69847001)资助课题。

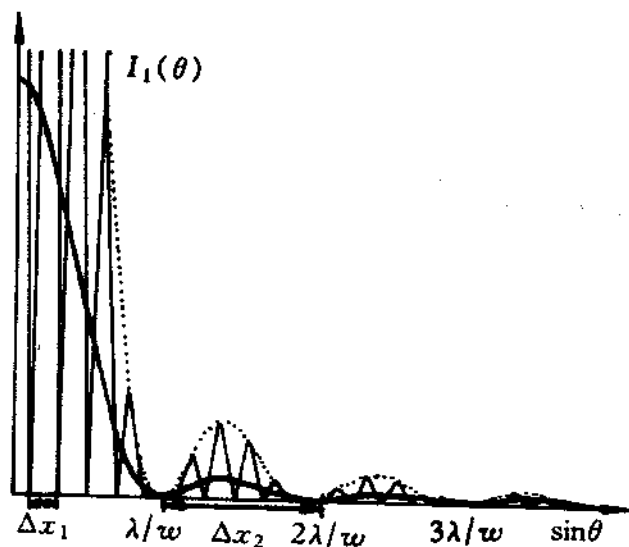


Fig. 2 Intensity distribution with different diffraction methods

征不变,而强度提高了 4 倍;

2) 对单缝衍射条纹进行了强度调制,周期为 Δx_1 ,为原条纹周期 Δx_2 的 d/w 分之一;

3) 强度调制由于干涉引起,而轮廓包络信息仍反映衍射,都含有 w 的信息。

3 技术方案

3.1 实施方法

为能达到大的动态测量范围,具体测量方案如下:

- 1) 探测器接收 10 级以上的条纹。
- 2) 数据处理时形成调制高频与低频(包络)两套数据,得到调制周期 Δx_1 ,包络周期 Δx_2 。

设 x 为接受面上衍射条纹到零级中心的距离,狭缝距探测器的距离 $R \gg x$,如图 3 所示,有

$$\sin\theta \approx \frac{x}{R}, \tag{7}$$

则

$$\Delta x_1 = \frac{\lambda R}{d}, \tag{8}$$

$$\Delta x_2 = \frac{\lambda R}{w}. \tag{9}$$

由于条纹强度提高了 4 倍,探测所得信噪比获得很大提高,又有高频调制使得信号峰谷明显,更易判断位置,从而提高了测量精度。

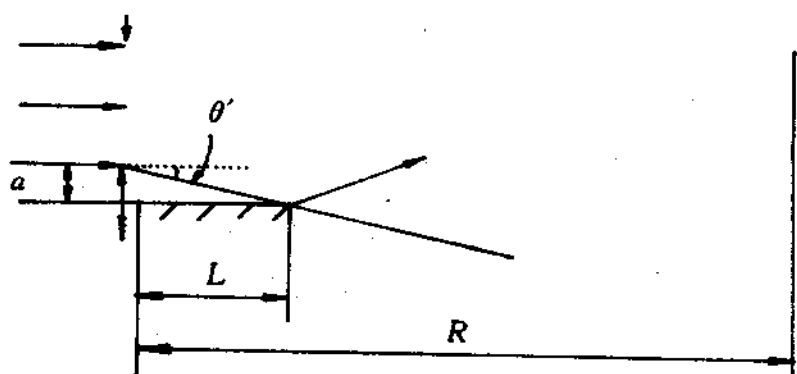


Fig. 3 Principle sketch about the mirror-image diffraction

两套数据同时使用可加大探测动态范围。当缝很窄时,条纹很弱,难以探测。而镜像衍射后仍可以通过 Δx_1 算出 d ,根据(6)式定出 w 。可用一般的 He-Ne 激光器进行实测,最窄可测至 0.03 mm 的缝宽。用亮度更高的激光可测更窄的缝。当缝很宽时只有用 Δx_1 。

在一般情况下,两套都可给出结果时,可根据需要确定采用哪套数据。 Δx_2 可直接获取,处理简单,但给出的 w 精度较差。 Δx_1 处理要复杂些,但精度高。

3.2 抑制场分布恶化的讨论

在实际应用中,尽管刀口可做得接近理想地薄、平直,但被测物总在光路方向有一厚度,且不平直,它们都会导致衍射光场畸变、恶化。实测中发现镜像衍射可抑制如图 4 所示的对称厚刃所成缝的衍射场分布恶化,改善不平滑缝的衍射光场。

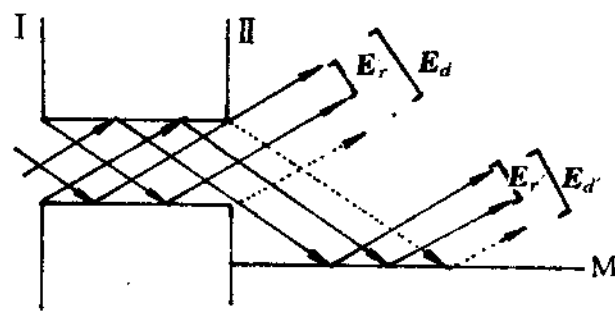


Fig. 4 Light diffracting through the real slot
讨论如下:

1) 对光滑对称厚刃衍射光场恶化的抑制

光通过这种刀刃夹成的缝时,情况如图 4 所示。在未加镜面时,只有从左端面 I 以 θ 角向下通过下刀口反射的 E_r 与从右端面 II 出射的 E_d 是以 θ 角出射的。设 E_r 强度是 E_d 的 r 倍,并从图 4 可知这两束平行光相位差为 $k\omega(\sec\theta - q)$,设其为 θ_r ,则由于干涉可知出射光强为

$$I = (E_r + E_d)(E_r + E_d)^* = E_r^2(1 + re^{i\theta_r})(1 + re^{-i\theta_r}) = I_d^2(1 + r^2 + 2r\cos\theta_r). \tag{10}$$

由上式可以看出条纹的对比度 r 是随角度 θ 变化的。角度越大(级次越高)对比度越低,对比度变化的频率越高。实测如图 5(a)所示,正符合上述分析。

加了镜面后

$$I = (E_r + E_d + E'_r + E'_d) \times (E_r + E_r + E'_r + E'_d)^*,$$

由于

$$E'_r = E_r \exp(ikd \sin\theta),$$

$$E'_d = E_d \exp(ikd \sin\theta),$$

可得

$$I = 2I_0^2(1 + \cos 2\beta)(1 + r^2 + 2r \cos \theta_r) \quad (11)$$

与(4)式比较可看出场分布中双缝干涉调制依旧不变(周期为 $\lambda R/d$),只是多了一个变频率的变对比度

弱调制因子。若用干涉的一套数据(Δx_1)计算 w ,则完全不受这种光场恶化的影响。实测如图5(b)所示,条纹的对比度有很大改善。

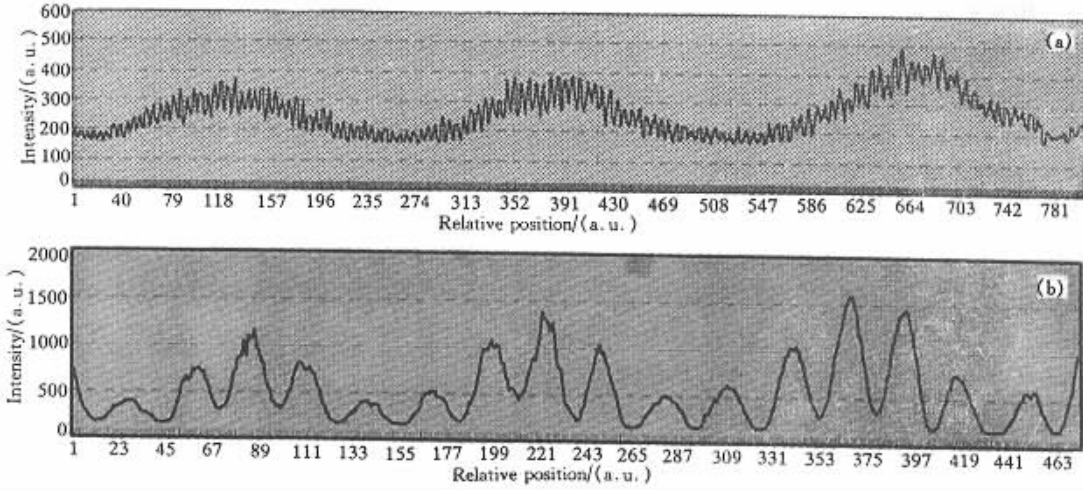


Fig.5 (a) The partial light intensity distribution of diffraction through standard slot ;(b) The partial light intensity distribution of mirror-image diffraction through standard slot

2) 对不平滑缝衍射光场的改善

实测中,用旧刀刃代替标准缝,光强恶化,如图

(a)所示。而加镜后包络明显改善,如图6(b)所示。原因尚待深入研究。

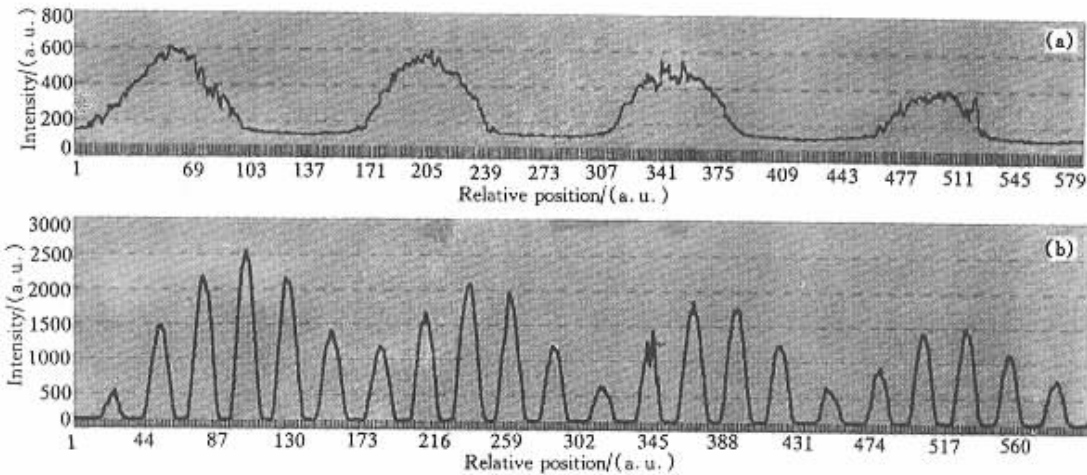


Fig.6 (a) The partial light intensity distribution of diffraction through irregular slot ;(b) The partial light intensity distribution of mirror-image diffraction through irregular slot

3.3 参数选取的讨论

1) 对 a 的选取

一方面,强度调制频率 $d/\lambda R = (w + 2a)/\lambda R$ 越高越好,这样轮廓可精确定出,提高精确度和灵敏度。这就要求 a 大。另一方面, a 大了,使得在一定镜长下,可产生干涉的角区域变小,如图3所示。角度小于 θ' 的光不能由镜面进行强度调制,而只在更高级次条纹重新分布能量,信号微弱,带来较大的误差。

2) 镜长 L 与测量级数的选取

就像上面讨论的一样, L 大,可使探测级次降低,信号增强。但长镜面的安装、固定都不容易,在实际应用中还会有振动等一系列问题产生。所以要综合考虑,适当选取。

4 实验和结果

进行了两组对比实验来验证所提出的镜像衍射法与抑制场分布恶化的分析。

由 He-Ne 激光入射的点光束经缝后形成线状衍射条纹, CCD 线阵垂直于条纹伸展方向, 为图中 x 轴。横坐标仅反映与位置有关的相对量, 纵坐标数值反映了光强大小情况。

第一组实验是对称刃的衍射测试, 所用为标准缝。 $w = 0.12 \text{ mm}$ ($d = 0.58 \text{ mm}$), $R = 2.3 \text{ m}$ 。图 5 (a) 为由探测器接收的第 19 至 21 级条纹的光强分布图。可见暗纹位置难以准确确定。加镜, 产生镜像衍射后, 信号幅值提高至原先不加镜时的 4 倍, 且有效抑制了原信号中的纹波, 场分布得到很好的改善。如图 5 (b) 所示。

第二组实验是旧刀刃缝的衍射测试。 $w = 0.21 \text{ mm}$ ($d = 1.16 \text{ mm}$), $R = 2.3 \text{ m}$ 。图 6 (a) 为由探测器接收的第 12 至 15 级衍射条纹的光强分布图。图 6 (b) 所示为相应级数镜像衍射时的光强分

布。两图比较不难看出, 通过镜像衍射, 不仅增强了信号而且极大改善了原恶化的场分布。包络清晰可见, 干涉调制间隔均匀, 信噪比也得到很大改善。

结论 镜像光衍射技术的优点在于: 1) 可提高信噪比, 从而提高测量灵敏度和精度; 2) 可提供两套数据, 从而加大动态范围; 3) 增大了 w 的信息量, 使得抗干扰与抗畸变能力加强, 提高了对缝边缘不平滑的适应性。

参 考 文 献

- [1] 杨国光. 近代光学测试技术. 杭州: 浙江大学出版社, 1997.
[2] 梁铨廷. 物理光学. 北京: 机械工业出版社, 1987

Diffraction Technique of Mirror Image and Its Application in Measurement

Wang Dongyun¹⁾²⁾ Yang Guoguang¹⁾²⁾ Cong Hong¹⁾

(1), State Key Laboratory of Modern Optical Instruments, Zhejiang University, Hangzhou 310027
(2), Micro System Center for Research and Development, Zhejiang University, Hangzhou 310027

(Received 31 May 2000; revised 2 August 2000)

Abstract: Aiming at the improvement of the normal diffraction technique, a kind of new method is presented. The reflection is introduced to form mirror image. By this way, the light intensity distribution of the diffraction fringe can be changed to improve the measuring accuracy, increase the dynamic range, and restrain the degradation of the field distribution caused by the unevenness of the slot. The parameter preferences are discussed.

Key words: diffraction; interference of mirror image; optical measurement; online measurement