

## 激光与光电子学进展

## 基于莫尔条纹的红外光束准直技术

蔡尚宸, 程其变, 张纾, 谭佐军\*

华中农业大学理学院, 湖北 武汉 430070

**摘要** 基于球面波照明时光栅的 Talbot 像及其与光束准直性的关系, 提出一种基于莫尔条纹进行红外光束准直调整的方法, 通过移动光栅, 由红外面阵 CCD 观察并测量莫尔条纹方向的变化来调整光束准直, 实现了红外光束快速便捷准直。结果表明, 在光栅移动时, 由于移动同一距离, 0 级、 $\pm 1$  级光波的光程变化不同, 条纹将呈现周期性的垂轴移动和周期性的对比度明暗变化, 但条纹方向不变, 条纹移动及对比度变化不影响准直精度。所提方法克服了红外光束不可见的困难, 相较于传统的准直方法, 实现了更简单更快速更便捷的准直校正。

**关键词** 红外光束; 准直; 光栅; Talbot 效应; 莫尔条纹

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231187

## Collimation Technique for Infrared Beam Based on Moire Fringe

Cai Shangchen, Chen Qiluan, Zhang Shu, Tan Zuojun\*

College of Science, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, Hubei, China

**Abstract** A method of infrared beam collimation adjustment based on the Moire fringe is proposed based on the Talbot image of the grating and its relationship to beam collimation under spherical wave illumination. When the grating is moving, the change in the Moire fringe direction is observed and measured by an infrared array charge-coupled device (CCD) to adjust the beam collimation. As a result, fast and convenient collimation of the infrared beam is realized. The results show that, when the grating moves, because the distance is the same, the optical path changes of 0-order and  $\pm 1$ -order light waves differ. The fringe shows periodic vertical axis movement and periodic contrast change, but the fringe direction remains unchanged. The fringe movement and contrast change do not affect the collimation accuracy. This method overcomes the difficulty of an invisible infrared beam and achieves simpler, faster, and more convenient collimation correction than the traditional collimation method.

**Key words** infrared beam; collimation; grating; Talbot effect; Moire fringe

## 1 引言

光束准直性的校正技术是光学系统中一项最基本和使用最频繁的技术。光束准直性校正方法主要有哈特曼法、剪切干涉法、五棱镜扫描法、Talbot 自成像与叠栅法等。哈特曼法测量精度高<sup>[1]</sup>, 夏克-哈特曼法通过微透镜阵列进一步提高了测量精度<sup>[2]</sup>, 但是这两种方法光路光阑成本昂贵且制作困难; 剪切干涉法定量分析过程复杂且难以形成相移, Wang 等<sup>[3]</sup>引入自参考准直改进了该方法; 五棱镜法扫描法检测效率低<sup>[4]</sup>。刘颖仪等<sup>[5]</sup>提出利用光折射晶体衍射效应来检测光束准直性的方法, 测量精度高但是系统复杂。张明丽

等<sup>[6]</sup>提出 CCD 轴向扫描检测激光束准直性的方法, 该方法简单但精度不高。因此, 一种方便简单的光束准直方法是非常需要的, 特别是在红外光学系统中, 由于光的不可见性, 如何准直更为重要。Talbot 自成像与叠栅法通过叠栅莫尔条纹的变化可以灵敏地反映光束的准直性, 因其具有检测精度高、装置简易、现象直观等优点而受到广泛关注<sup>[7-8]</sup>。本文提出一种基于线性叠栅莫尔条纹进行红外光束准直调整的方法, 该方法通过移动光栅, 由红外面阵 CCD 观察并测量莫尔条纹方向的变化来调整光束准直, 实现了红外光束快速便捷准直。

收稿日期: 2023-04-27; 修回日期: 2023-06-07; 录用日期: 2023-06-28; 网络首发日期: 2023-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(61605053)、中央高校基本科研业务费专项(2662016PY059)

通信作者: \*tzj@mail.hzau.edu.cn

## 2 基本原理

### 2.1 球面波照明时光栅的 Talbot 像

设 Ronchi 光栅  $G_1$  的振幅透过率<sup>[9-10]</sup>为

$$G(x, y) = \sum_{-\infty}^{+\infty} A_n \exp \left\{ -i \left[ \frac{2n\pi}{P_1} (x \cos \theta - y \sin \theta) \right] \right\},$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (1)$$

式中:  $P_1$  为光栅  $G_1$  周期;  $\theta$  为光栅线与  $x$  轴的夹角;  $A_n$  是  $n=0$  时的透过率;  $x, y$  为光栅上任意一点的坐标。设点光源  $S$  距光栅  $G_1$  距离为  $L$ , 在满足傍轴近似的条件下, 由 Talbot 效应可知<sup>[6]</sup>,  $G_1$  后面有光栅的 Talbot 像  $G'_1$ , 它的周期  $P'_1$  满足:

$$\frac{P'_1}{P_1} = \frac{L + Z}{L}, \quad (2)$$

式中:  $Z$  为  $G_1$  到其 Talbot 像面  $K$  的距离, 如图 1 所示。当  $K$  的位置 (即  $G'_1$  的位置) 固定时, 移动光栅  $G_1$ ,  $L$  与  $Z$  变化,  $P'_1$  相应也会改变。当  $L$  为无穷大, 即准直光束照明时, 移动光栅  $G_1$ , 恒有  $P'_1 = P_1$ , 即无论  $Z$  如何变化,  $P'_1$  总不变, 总与  $P_1$  相同。

### 2.2 莫尔条纹与光束准直性的关系

在光场中  $G'_1$  处放入周期为  $P_2$  的光栅  $G_2$ , 栅线方向与  $G'_1$  栅线夹角为  $\theta$ , 则  $G_2$  与  $G'_1$  两者合成莫尔条纹, 莫尔条纹方向由下式确定:

$$\tan \alpha = (\cos \theta - P_2/P'_1) / \sin \theta, \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为莫尔条纹与  $x$  轴的夹角,  $\alpha$  随  $P'_1$  变化而变化。

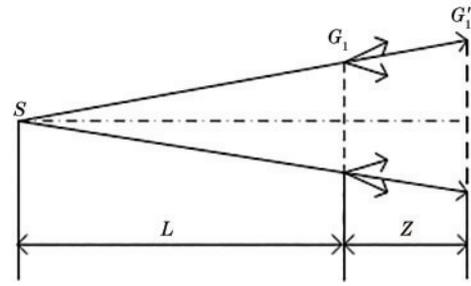


图 1 球面波照明光栅的 Talbot 像

Fig. 1 Talbot image of grating illuminated by spherical wave

当采用球面波照明时, 移动光栅  $G_1$ ,  $Z$  变化, 则  $P'_1$  变化, 此时莫尔条纹方向将旋转。当照明光波为准直光波时, 移动光栅  $G_1$ ,  $P'_1$  不变化, 莫尔条纹方向保持不变, 总与  $Z=0$  时的莫尔条纹方向相同, 此时

$$\begin{cases} P'_1 = P_1 = P_2 \\ \tan \alpha = \tan(-\theta/2)^\circ \end{cases} \quad (4)$$

### 2.3 红外光束准直调整测量实验

基于莫尔条纹与光束准直性的关系, 搭建红外光束准直调整实验装置, 其光路图如图 2 所示。由近红外半导体激光器发出的红外光束经过准直镜照射光栅  $G_1$ , 将面阵 CCD 紧贴光栅  $G_2$ , 直接接收莫尔条纹信号。由近红外半导体激光器发出的红外光束照射光栅  $G_1$ , 将面阵 CCD 紧贴光栅  $G_2$ , 直接接收莫尔条纹信号。图 3、图 4 分别为球面波和准直光束照明时的莫尔

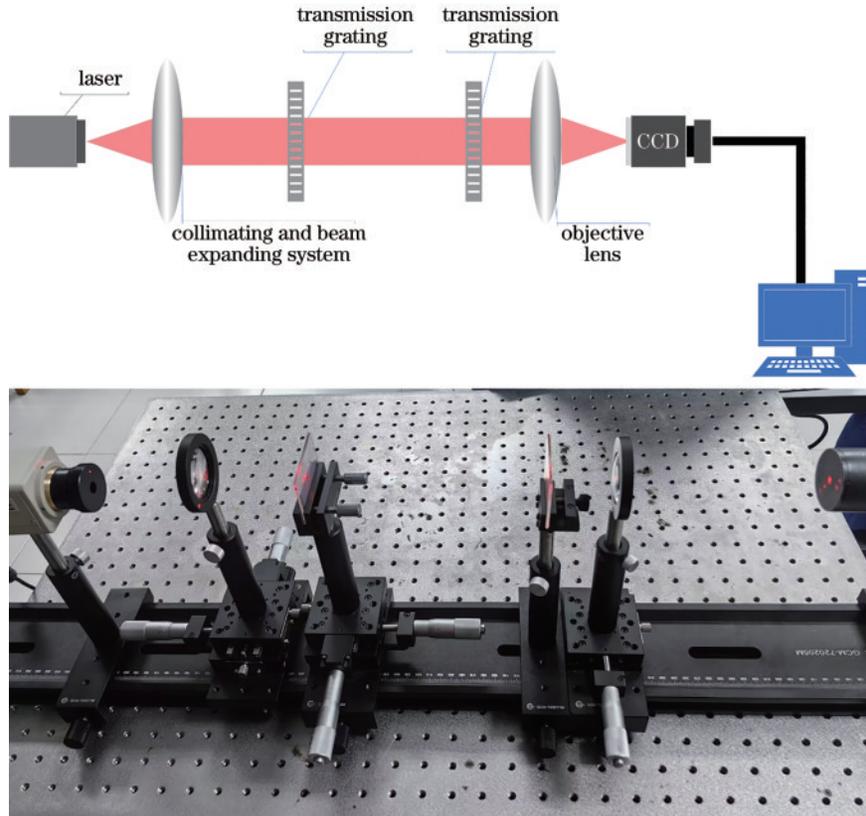


图 2 红外光束准直调整实验装置图

Fig. 2 Experimental setup diagram of infrared beam collimation adjustment

条纹。当  $Z=0$  时,计算莫尔条纹的方向角,标记出莫尔条纹的方向,如图 3 和图 4 中的瞄准线  $L$  所示。移动光栅  $G_1$ ,调整准直镜的位置,当  $G_1$  移动莫尔条纹相对于瞄准线  $L$  方向不变时,红外光束准直调整完成。通过面阵 CCD 采集到莫尔条纹图像后,对图像进行平滑滤波、自适应二值化、条纹细化处理,然后利用最小二乘法进行直线拟合,根据反正切函数计算拟合直线的倾角,即莫尔条纹的方向角<sup>[11-12]</sup>。



图 3 球面波照明时的莫尔条纹图形

Fig. 3 Moiré fringe pattern illuminated by spherical wave

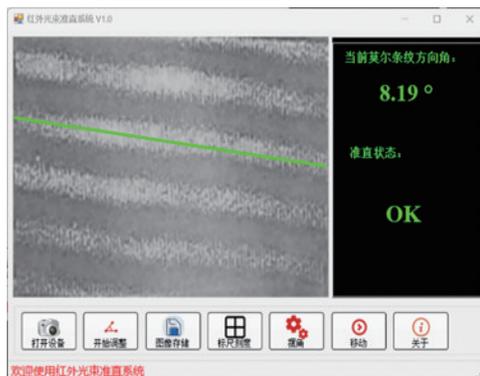


图 4 准直光束照明时的莫尔条纹图形

Fig. 4 Moiré fringe pattern illuminated by plane wave

减小光栅栅线夹角  $\theta$ , 增加光栅间隔  $Z$  可提高准直度, 但是  $\theta$  太小, 条纹宽度太大, 不便于瞄准;  $Z$  也不能

过大, 不能超过 Talbot 像的最大成像距离  $Z_{MAX}$ , 即不能超过 0 级与  $\pm 1$  级光波的相干区域。在保证瞄准精度的条件下, 增加光栅的栅距可提高  $Z_{MAX}$ 。

### 3 分析与讨论

系统的准直精度取决于条纹方向的瞄准误差  $\Delta\alpha$ 。将式(2)代入式(3), 有

$$\tan\left(-\frac{\theta}{2} + \Delta\alpha\right) = [\cos\theta - (L + Z)/L] / \sin\theta. \quad (5)$$

设准直透镜与光栅  $G_1$  的距离很小, 将牛顿成像公式  $L = (f'^2/\Delta f') - f$  代入式(5), 当  $\theta$  很小时, 光源的离焦量为

$$\Delta x = \Delta f' = \Delta f'^2 \cdot \theta \cdot \Delta\alpha / Z. \quad (6)$$

光束的发散度与通光口径有关。由于采用 0.5 inch (1 inch = 2.54 cm) 的面阵 CCD 直接接收, 在  $G_2$  处的通光口径即为 CCD 的大小。因为光束发散度  $\phi = (D/2)/(L + Z)$ , 考虑到  $L + Z \approx L$ , 因此

$$\phi = D \cdot \theta \cdot \Delta\alpha / 2Z. \quad (7)$$

设照明光波波长  $\lambda = 865$  nm, 两个 Ronchi 光栅栅距相同,  $P_1 = 0.2$  mm, 两光栅栅线夹角  $\theta$  约为  $4^\circ$ , 栅线夹角可调, 两光栅的最大距离  $Z$  为 400 mm, 通光面积为  $80$  mm  $\times$   $80$  mm, 准直透镜焦距  $f' = 300$  mm, 口径  $\phi = 60$  mm。瞄准用的参考线倾斜约  $-2^\circ$ , 设瞄准误差  $\Delta\alpha$  为  $4^\circ$ , 由式(6)可得光源的离焦量  $\Delta f' = 1.1$  mm, 由式(7)可得发散度  $\phi = 0.077$  rad。经过准直后的光束的发散角是评价光束平行性的重要参数。采用所提光学系统对相隔 5 m 的光斑进行重复测量, 测量结果如表 1 所示。

由表 1 可见, 实际发散度要大于上述计算所得, 这是由于照明光束的发散度往往以满口径量度。即使光束已准直, 当光栅移动时, 由于移动同一距离, 0 级、 $\pm 1$  级光波的光程变化不同, 条纹将呈现周期性的对比度明暗变化和周期性的垂轴移动, 但条纹方向不变, 条纹移动及对比度变化不影响准直精度。在第 2 块透射光栅上放置透明的漫反射屏, 可以扩大接收面, 从而提高分辨率。

表 1 相隔 5 m 的光斑大小及准直后发散度

Table 1 Spot size and divergence angle after collimation at 5 m

Position	Spot size /mm										Divergence angle /mrad
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$Z_1(0.51$ m)	2.436	2.437	2.438	2.435	2.436	2.438	2.501	2.438	2.432	2.431	0.633
$Z_2(5.51$ m)	5.648	5.658	5.563	5.688	5.628	5.563	5.683	5.561	5.533	5.563	

## 4 结 论

详细讨论了球面波照明时光栅的 Talbot 像及其与光束准直性的关系, 并将上述关系用于红外光学系统准直, 提出基于莫尔条纹的红外光束准直调整方法, 该方法克服了红外光束不可见的困难, 利用光栅移动感受光

束准直度, 由红外面阵 CCD 观察并测量莫尔条纹方向的变化来调整光束准直, 实现了红外光束快速便捷准直。

### 参 考 文 献

- [1] Liu S R, Xue B, Cheng Y, et al. High-accuracy twist measurement based on the spherical wave Talbot effect

- for a bi-grid modulation collimator[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(22): 6547-6553.
- [2] 卫劲锋, 王海龙, 杜雪, 等. 光学微透镜阵列成像质量预测和测量[J]. *光学学报*, 2023, 43(4): 0411001.  
Wei J F, Wang H L, Du X, et al. Imaging quality prediction and measurement for optical microlens array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(4): 0411001.
- [3] Wang Y, Zhai H C, Jutamulia S, et al. Collimation test of a corrected laser diode beam using lateral shearing interferometer[J]. *Optics Communications*, 2007, 274(2): 412-416.
- [4] 刘威剑, 高志山, 马焱岑, 等. 基于非均匀采样的五棱镜阵列扫描测量大口径准直波前[J]. *中国激光*, 2022, 49(24): 2404001.  
Liu W J, Gao Z S, Ma Y C, et al. Measurement of large aperture collimated wavefront by pentaprism array scanning based on non-uniform sampling[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(24): 2404001.
- [5] 刘颖仪, 程静. 单轴晶体中垂直光轴方向上的二维泰伯效应[J]. *光学学报*, 2023, 43(5): 0505001.  
Liu Y Y, Cheng J. Two-dimensional Talbot effect in uniaxial crystals orthogonal to optical axis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(5): 0505001.
- [6] 张明丽, 刘立人, 万玲玉, 等. CCD扫描检测光束准直度[J]. *光学学报*, 2005, 25(8): 1067-1071.  
Zhang M L, Liu L R, Wan L Y, et al. Method of CCD scan for collimation testing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(8): 1067-1071.
- [7] 黄磊, 苏显渝. 双螺旋叠栅条纹检测光束准直性的两种方法[J]. *光学学报*, 2007, 27(4): 609-615.  
Huang L, Su X Y. Two methods in checking light beam collimation with double spiral Moiré fringes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(4): 609-615.
- [8] 蔡盛, 乔彦峰. 基于莫尔条纹的自准直测角技术[J]. *测试技术学报*, 2007, 21(6): 519-522.  
Cai S, Qiao Y F. The technology of autocollimation angle measurement based on Moiré fringe[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2007, 21(6): 519-522.
- [9] 杨晓铭, 郑三超, 黄高坤, 等. 二维叠栅条纹的傅里叶变换[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 092302.  
Yang X M, Zheng S C, Huang G K, et al. Fourier transform of 2D Moiré fringe[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 092302.
- [10] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2016.  
Yu D Y, Tan H Y. *Engineering optics*[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [11] 陈颖, 杨坤涛. 基于Talbot效应的光准直测量方法研究[J]. *光学与光电技术*, 2005, 3(2): 37-40.  
Chen Y, Yang K T. Research on the check of light collimation based on Talbot effect[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, 3(2): 37-40.
- [12] 程伟昊, 陈云云, 段传森, 等. 基于莫尔测量技术的光栅常数测定方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(6): 062001.  
Cheng W H, Chen Y Y, Duan C S, et al. Method of measuring grating constant based on Moiré measurement technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(6): 062001.