

# 无衍射光莫尔条纹准直、跟踪和定位系统的研制\*

张新宝 赵 斌 李 柱

(华中科技大学机械学院仪器系, 武汉, 430074)

**摘要:** 由于无衍射光莫尔条纹技术具有高的对心分辨精度和适用于长、短距离测量的特点, 在此技术的基础上研制了激光准直跟踪和定位测量系统。它具有抗强光干扰和抗机械振动的特点, 并具有高的定位、定向精度(0.12 $\mu$ m/5m)。

**关键词:** 无衍射光 莫尔条纹 激光准直跟踪和定位 抗强光干扰

## A collimating tracking and positioning laser system with non-diffracting beams and Moire fringe technology

Zhang Xinbao, Zhao Bin, Li Zhu

(Department of Instrumentation, School of Mechanical Science and Technology, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** Non-diffracting beams and Moire fringe technology is able to work in short, middle and long distance with high measuring resolution. Based on this phenomenon, a new collimating tracking, positioning laser system is developed. The system is highly immune to light vibration and mechanical vibration with high positioning accuracy of 0.12 $\mu$ m/5m.

**Key words:** non-diffracting beam Moire fringe laser collimating tracking and positioning immunity to high light vibration

## 引 言

在精密机械制造业、大型建筑安装、高速轨道铺设、大坝变形检测、大型航空航天器制造、特别是隧道建筑等许多领域经常采用准直跟踪技术。新兴的无衍射光技术和传统的莫尔条纹技术相结合发展起来的一种新测量技术兼有干涉法和波带片法的优点, 即测量精度高又适用于长、短距离的测量。无衍射光是一种光束截面形状不随光传播距离变化的特殊光束, 可以作空间直线测量的基准<sup>[1, 2]</sup>, 由于无衍射光对激光束的准直性要求小, 可以采取措大大减小激光器对激光束的漂移的影响。另外, 无衍射光可以用大光学口径, 光学数值孔径比准直的激光束大得多, 抗传输介质折光效应的影响的能力好, 可用于大距离的测量。我们开发了一种无衍射光莫尔条纹激光准直跟踪和定位系统。为了在高光噪下获得高信噪比, 还采用 3 种典型的滤波技术: 光学空间滤波器、光学滤光片和电子滤波, 从而优化了光学探测器的参数。

## 1 无衍射光莫尔条纹激光准直跟踪和定位原理

无衍射光莫尔条纹激光准直跟踪和定位系统框图见图 1。其基本原理是: 激光器、空间滤波器、扩束镜和锥镜形成无衍射光, 利用无衍射光所形成的、不随传播距离变化的贝塞耳函数光环作直线基准  $z$  轴。该光圆环与一圆环光栅相迭, 就可产生莫尔条纹。莫尔条纹图像被

\* 国家自然科学基金资助。

CCD 采集后存储于计算机。被测物移动过程中相对贝塞耳函数中心线的偏移将会改变莫尔条纹, 计算机根据莫尔条纹中心的二维偏移量就可以直接测量出贝塞耳函数光束中心与圆环光栅中心的距离。从而可以用五维驱动装置跟踪贝塞耳函数光环中心来补偿二维偏移量, 同时, 计算机根据莫尔

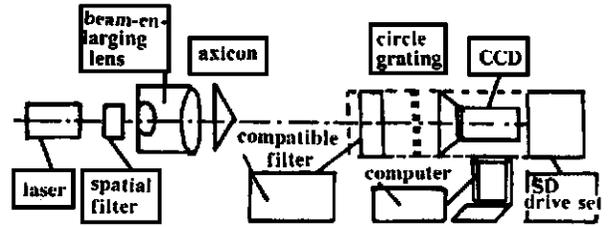


Fig. 1 The working principle of the laser collimating tracking and positioning apparatus

条纹的圆形来调整光学探测器的方向。

## 2 原理理论分析

### 2.1 无衍射光空间直线基准

2.2.1 无衍射光的光强 垂直传输方向( $z$  轴)的横截面上无衍射光的归一化光强分布见图 2。它是零阶贝塞耳函数光强分布, 见

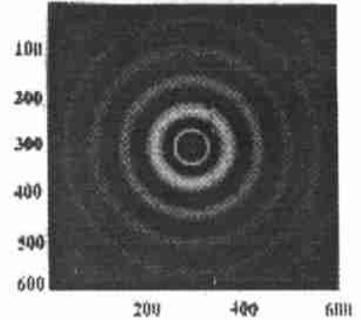


Fig. 3 The gray image of Bessel function optic ring

2.2.2 圆环光栅的通光特性 圆环光栅的通光特性  $t$  是三角函数(见(2)式和图 4)。

$$t = (1 + \cos r_1) / 2 \quad (3)$$

$r_1 = (x_1^2 + y_1^2)^{0.5}$  是偏离中心的距离。

2.2.3 莫尔条纹图像的形成 横截面上的贝塞耳函数光环与垂直传输方向( $z$  轴)的圆

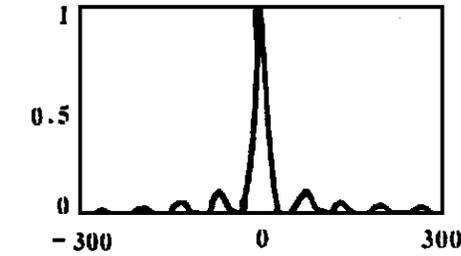


Fig. 2 The optic density distribution of non-diffracting beam(level unit: pixel)

(1) 式。图 2 作中心旋转就是无衍射光的横截面上的图像——贝塞耳函数光环(见图 3)。

$$I_0 = J_0(0.05r) \quad (1)$$

$$\rho = 2.405/0.05 = 48.1 \quad (2)$$

$r = (x^2 + y^2)^{0.5}$  是偏离中心的距离;  $\rho$  是中心光斑的半径。注: 均以 CCD 的像元(pixel) 尺寸为单位(文中采用  $640 \times 762$ , pixel =  $7\mu\text{m}$  的 CCD)。

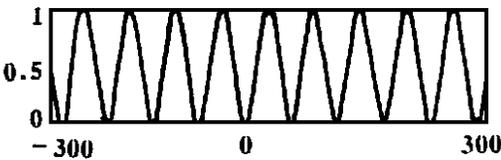


Fig. 4 The optic feature  $t$  of ring grating(level unit: pixel)

环光栅相迭就产生莫尔条纹。由(1)式和(3)式得到莫尔条纹的光强的分布(4)式。

$$I = I_0 \cdot t = J_0(0.05r) \cdot [1 + \cos(r_0 + r_1)] / 2 \quad (4)$$

$r_0 = (x^2 + y^2)^{0.5}$  是圆环光栅中心对贝塞耳函数光环中心偏离的距离。

从(4)式可以得到, 在连心线上的光强分布随  $r_0$  呈周期性的变化。它的周期就是(3)式的周期。而其它点却不具有周期性, 但光强分布是与  $r_0$  的变化——对应的。

## 3 莫尔条纹图像信号处理和跟踪

### 3.1 莫尔条纹图像信号处理

莫尔条纹图像的形成后被 CCD 采集传给计算机, 计算机来处理获得的图像信号。当是圆环光栅中心对贝塞耳函数光环中心偏离的距离为 60 个像元时, 图 5 是连心线上的莫尔条纹的光强分布和图 6 是莫尔条纹图像。图 6 的图像信号经过小波低通滤波。

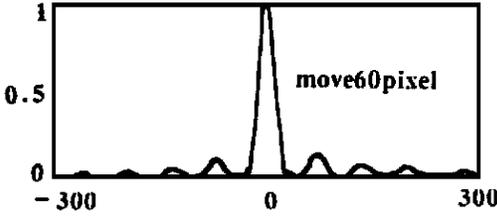


Fig. 5 The optic density distribution along the straight line through the two centers (level unit: pixel)

而从莫尔条纹图像求得对应的  $r_0$ , 并且从现有的图像中来看,  $r_0$  可以达到十几个周期而对周期的细分影响不大。而  $r_0$  与  $x, y$  是一一对应的。

初步的计算结果为分辨率 0.09 个像元。当然, 功能分类 Robust 特性的三维滤波器快速算法和模式识别的快速算法也可能会影响精度, 需要进一步的设计图像处理算法。

### 3.2 直线基准的跟踪

$r_0$  可用来控制五维驱动装置来补偿偏移量。由莫尔条纹的形成理论可以知道<sup>[3]</sup>, 当圆环光栅的周期和贝塞耳函数光环的一条主条纹宽一样时, 光栅效应就呈现明显的放大效应, 大约放大 10 倍, 分辨率为 0.009 个像元/0.06 $\mu\text{m}$ 。

### 3.3 消噪措施<sup>[4]</sup>

为了在高光噪下获得高信噪比, 我们采用 3 种典型的滤波技术: 光学空间滤波器、光学滤光片和电子滤波, 并优化了参数使最后的信噪比为 -20dB。

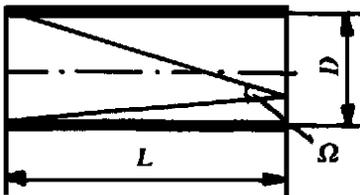


Fig. 7 The optical spatial filter's counting rule ( $L$ —length,  $D$ —diameter,  $\Omega$ —the optical spatial filter's conial angle)

3.3.1 光学空间滤波器 这种光学空间滤波器是用来消除大部分辐射干扰的。光学空间滤波器的计算原理见图 7。

$$E_{no} = M \cdot \Omega / \pi \quad (5)$$

$E_{no}$  是通过光学空间滤波器的光学噪声,  $M$  是加热炉内的光学噪声, 而  $\Omega$  是光学空间滤波器的立体张角。如果  $\Omega$  小,  $E_{no}$  当然小。这就意味着  $L$  长而  $D$  小。  $E_{no}$  等于 0.03M。

3.3.2 光学滤光器的应用 光学滤光器由两个光学滤光片组成。它使  $E_{no}$  降为  $E_{no_1}$ 。  $E_{no_1} = 0.0016E_{no}$  是 CCD

接受到的光学噪声。通过以上两项措施是信噪比改善为 -10dB。

3.3.3 电子滤波的应用 电子滤波是用来消除光辐射干扰产生的光生电流。这些光生电流的频率很低就是热辐射的绕道频率, 所以, 通过电子滤波可使信噪比大为改善。由于以上的措施获得了高的信噪比 -20dB。

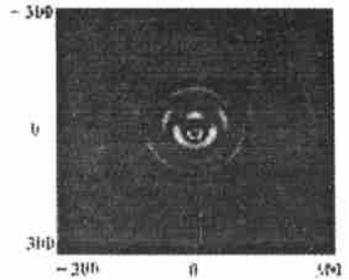


Fig. 6 Moire fringe image when the offset between two centers is 60 pixels

## 余弦高斯光束的传输特性\*

王喜庆 柯尊平

吕百达\*\*

(西南交通大学应用物理系, 成都, 610031) (四川大学激光物理与激光化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 对新型光束——余弦高斯光束在无光阑情况下自由空间的传输及通过薄透镜的传输和聚焦特性进行了分析计算。给出了在自由空间传输及通过薄透镜聚焦场的解析式, 以及轴上光强和相对焦移的解析表达式, 并对计算结果进行了比较。

关键词: 余弦高斯光束 自由空间 薄透镜 传输

## Propagation properties of cosine-Gaussian beams

Wang Xiqing, Ke Zunping

(Department of Applied Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

L Baida

(Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

**Abstract** The properties of cosine-Gaussian beams propagating in free space and propagating through an unapertured thin lens are respectively analyzed and calculated. The closed form expressions of the diffraction field are obtained by using the general Huygens-Fresnel diffraction integral. Axial intensity and relative focal shift are derived. The calculated results are analyzed and compared.

**Key words:** cosine-Gaussian beams free space thin lens propagation

\* 西南交通大学科学研究基金资助。 \*\* 西南交通大学客座教授。

## 4 试验结果

光谱波长  $\lambda = 632.8\text{nm} \pm 3.5\text{nm}$ , 光强调制频率  $f_0 = 100\text{Hz}$ , 最大试验距离  $z = 5\text{m}$  时,  $x, y$  的分辨率小于  $0.12\mu\text{m}$ , 在  $200\mu\text{m}$  的范围内, 定位精度  $0.5\mu\text{m}$ 。在  $1000\text{lx}$  光辐射强度下的信噪比为  $-20\text{dB}$ , 并且工作光谱可在  $400\text{nm} \sim 900\text{nm}$  段内随激光的光谱调节。

理论和试验证明无衍射光莫尔条纹激光准直跟踪和定位系统可以用于工业环境的中远距离的定位、准直和跟踪。这种技术将获得广泛的应用。

## 参 考 文 献

- 1 赵 斌, 李 柱. 华中理工大学学报, 1997; (3):
- 2 张 青, 赵 斌, 范光照 *et al.* 华中理工大学学报, 1997; (9): 1~ 3
- 3 严瑛白. 应用物理光学. 北京: 机械工业出版社, 1990: 11
- 4 Zhang X B, Zhao B, Li Zh. Typical signal processing technique in the special dual-dimensional optoelectronic sensor, 1st International Symposium on Instrumentation Science and Technology, Proceedings of ISIST' 99, Luoyang, China, China Metrology Press, Aug. 23~ 26, 1999: 334~ 337

作者简介: 张新宝, 男, 1965 年出生。讲师。现从事激光应用技术和精密工程工作。