

激光直线准直的一种新方法

郑 刚 刘铁英 孙逸平

(上海机械学院, 200093)

提要: 本文提出用亮圆环在透镜后产生的衍射图样中心的连线作准直线的一种新方法。文中详细讨论了准直原理、准直精度及准直距离,并给出了实验例证。

关键词: 激光准直, 圆环, 衍射

A new method for laser alignment

Zheng Gang, Liu Tieying, Sun Yiping

(Shanghai Institute of Mechanical Engineering, Shanghai 200093)

Abstract: This paper proposes a new method for laser alignment. When a circle ring situated in the front focal plane of a convex lens is illuminated by a plane monochromatic wave, the center of diffraction pattern of the circle ring forms a straight line for alignment behind the lens. The principle as well as precision and distance for alignment are discussed in detail. The experimental results are also given.

Key words: laser alignment, circle ring, diffraction

我们曾提出用一张计算全息图代替玻璃锥体,用光通过计算全息图后的衍射图样中心的连线作准直线的方法^[1]。由于全息图后衍射图样的成分比较复杂,使得衍射图样中心点的大小及亮暗在一定数值范围内发生交替变化,给光电或人工对准带来困难。为此本文提出将一个亮圆环置于透镜的前焦面,用亮环在透镜后衍射(干涉)图样中心的连线作准直线的方法。这一中心点在整个准直距离内是一大小相同、强度均匀的亮圆点,从而避免了上述缺点。

一、原 理

产生衍射图样的亮圆环如图1所示。为分析方便,忽略环带宽度而把它简单地看成是环线。将这个亮环置于正透镜的前焦面,如图2所示,在相干平行光照明下,亮环线上的每一个点发出一个球面波,经透镜 L 准直后成平行光出射。这些平行光束是相干的,在它们的相交区域产生干涉叠加形成亮圆环的衍射图样。显然当系统中各元件的位置固定时,衍射图样在空间是稳定的。由于亮环上各点到衍射中心(即图2中光轴上的各点)的光程相等,位相相同,因此衍射中心是一个亮点,并且由于环线上各点经透镜后出射的平行光对在透镜后任意位置的

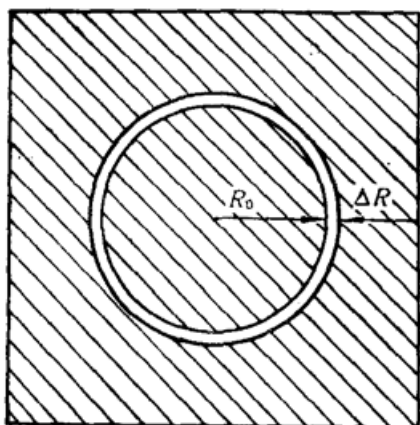


Fig. 1 Circle ring for generating diffraction

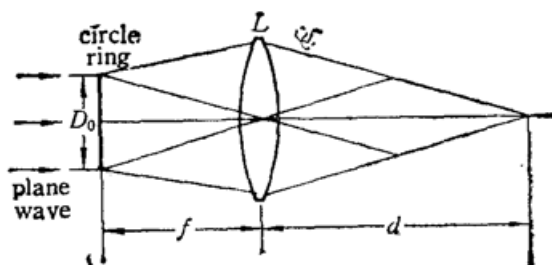


Fig. 2 Optical system for laser alignment

衍射图样中心点的会聚角恒定,因此中心点的大小在整个光束重叠区域内也是恒定不变的。我们即可利用这条由衍射图样中心点在空间形成的尺寸相同、亮度均匀的稳定亮线作准直线,亮点的大小决定了准直精度,平行光束相交区域的长度决定了准直距离。下面分别讨论准直精度和准直距离与亮环几何尺寸间及透镜参数间的关系。

1.1 准直精度

由上分析,在平行光束的相交区域内,衍射图样中心点的大小相同,因此为求准直线上亮点大小,只要求出透镜后任一截面内衍射中心点的宽度即可,取透镜的后焦面即圆环线的傅里叶频谱面是方便的。设用脉冲函数 $g(r) = \delta(r - R_0)$ 表示亮环线,其中 r 表示径向坐标, R_0 表示亮环的半径。对于一个圆对称函数其傅里叶谱为

$$G(\rho) = 2\pi \int_0^{+\infty} r g(r) J_0(2\pi r \rho) dr, \tag{1}$$

代入圆环线 δ 函数,则圆环在透镜后焦面上的衍射场为

$$G(\rho) = 2\pi \int_0^{+\infty} r \delta(r - R_0) J_0(2\pi r \rho) dr = 2\pi R_0 J_0(2\pi R_0 \rho), \tag{2}$$

式中 $\rho = \frac{r'}{\lambda f}$ 为径向频率, $J_0(z)$ 为零阶贝塞耳函数, f 为透镜焦距, r' 为后焦面上的径向坐标。 $J_0^2(z)$ 的截面图如图 3 所示,其函数值在一般的数学手册上均可查到,它的第一个零点值为 $z = 2.4048$,于是(2)式中与之对应的透镜后焦面上的径向坐标为

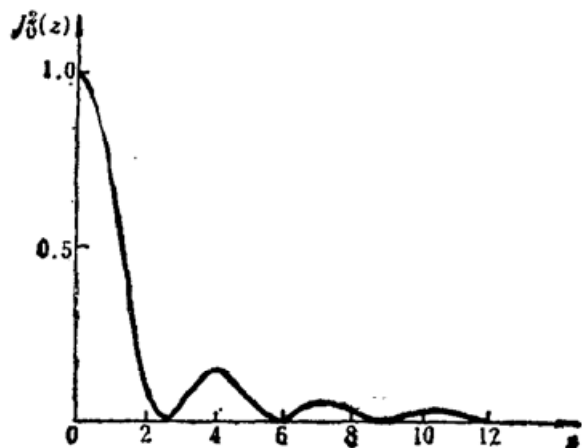


Fig. 3 Relation between $J_0^2(z)$ and z

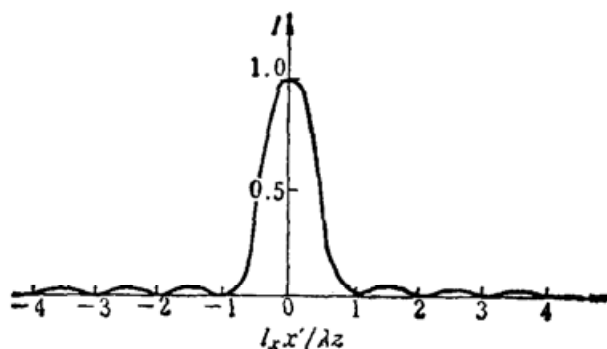


Fig. 4 Fraunhofer diffraction pattern of rectangular aperture

$$r'_0 = 2.4048 \times \frac{\lambda f}{2\pi R_0} \approx 0.38 \frac{\lambda f}{R_0}, \quad (3)$$

由此得衍射图样中心点的宽度

$$b = 2r'_0 = 1.52 \frac{\lambda f}{D_0}, \quad (4)$$

式中 D_0 为圆环线直径。如果设人眼的瞄准精度为十分之一的圆斑直径, 则准直精度为

$$\Delta = \frac{1}{10} b = 0.152 \frac{\lambda f}{D_0}. \quad (5)$$

1.2 准直距离

准直距离即准直线存在的范围, 由亮环线上各点经透镜后出射的平行光束相交(重叠)区域的长度决定。根据图 2 的几何关系, 相交区域的长度即准直距离为

$$d = \frac{D_1}{D_0} f, \quad (6)$$

式中 D_1 表示准直透镜本身的通光口径。当考虑到亮环线并不是真正的一条线, 而具有一定宽度时, 上式中的 D_1 应作适当修正。设亮环的宽度为 ΔR , 并有 $\Delta R \ll R_0$ (见图 1), 当平行光照明亮环时, 亮环的衍射光的有效衍射角(衍射能量集中的角度)并不能达到 $\pi/2$, 而与 ΔR 的大小有关, 往往使得衍射光不能充满整个透镜口径。有效衍射角与 ΔR 之间的关系可通过考察矩孔在透镜后焦面上的夫朗和费衍射得到。如果把圆环分割成许多小段, 那么每一小段都可以看作是一个矩孔。对于一个孔径宽度分别为 l_x, l_y 的矩孔, 其夫朗和费衍射图样为^[2]

$$I(x', y') = \frac{L_x^2 L_y^2}{\lambda^2 f^2} \text{sinc}^2\left(\frac{l_x x'}{\lambda f}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{l_y y'}{\lambda f}\right) \quad (7)$$

图 4 示出了衍射图样沿 x' 轴的截面图。由于能量大部分集中在主瓣内, 我们把第一个零点对应的衍射角 $\theta_e = \frac{\lambda}{l_x}$ 定义为衍射光的有效衍射角, 与之相应, 定义衍射光到达透镜面上的口径为有效通光口径, 于是亮环衍射的衍射光的有效口径为

$$D_e = 2(\theta_e f + R_0) = 2\left(\frac{\lambda f}{\Delta R} + R_0\right), \quad (8)$$

如图 5 所示。因此衍射光通过透镜的实际口径 D_1 应是透镜本身光阑口径与衍射有效口径两者

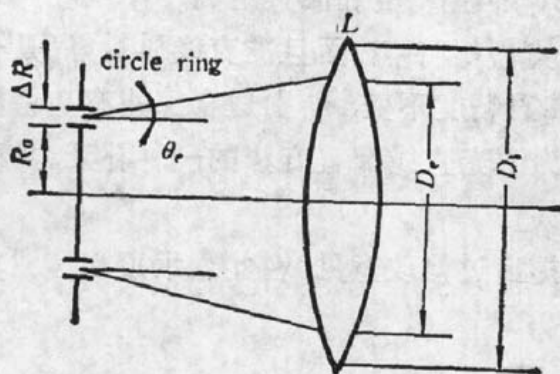


Fig. 5 Effective aperture of diffraction light

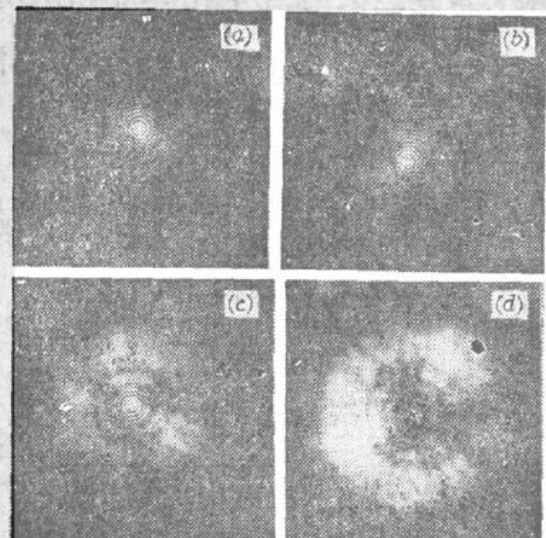


Fig. 6 Diffraction patterns of bright circle ring behind the lens

同的较小者,即

$$D_i = \min(D_0, D_1) \quad (9)$$

式中 \min 表示取最小值。于是(6)式变为

$$d = \frac{f}{D_0} D_i \quad (10)$$

二、实验结果

实验光路如图2所示,各元件的参数如下:亮环的直径 $D_0=1.6$ mm,环带宽度 $\Delta R=0.019$ mm,准直透镜焦距 $f=302$ mm,口径 $D_1=50$ mm,用 2mW He-Ne 激光照明。在以上参数条件下,根据(4)、(5)式算出的衍射图样中心点的宽度 $b=0.181$ mm,准直精度为 $\Delta=0.018$ mm,根据(8)、(9)及(10)式算出的衍射光的实际通光口径约为 $D_i=21$ mm,准直距离约为 $d=4$ m。在透镜后的不同位置,用测量显微镜实际观察和测量了衍射图样中心亮点的大小和亮点存在的范围(即准直距离),实测结果同理论值吻合得很好。图6(a)、(b)、(c)、(d)分别是在距透镜 0.5 m、1.5 m、3 m、4 m 处的衍射图样照片,注意图样中心有一很小的亮点。对其他尺寸参数的亮圆环也做过类似的实验,实测结果也与相应的理论值一致。

三、讨 论

1. 由(8)式知,为增加衍射有效通光口径,扩大准直距离范围,应尽量减小环带宽度 ΔR ,但 ΔR 太小又会减弱衍射图样的光强度,因此应根据所用照明激光源的功率及实际对准直范围的要求适当选取。此外,亮圆环直径的选取也应兼顾准直精度与准直距离间的关系(见(4)式及(10)式)。

2. 亮圆环的制作可采用照相复制的方法,如先在白纸上画一个尺寸合适的黑环,然后照相缩小并复制到照相干板上。实际使用时,还应对干板采用液门装置。

3. 应该提出的是,圆环本身(不经透镜准直)也能用于准直,当平行光照明时,圆环衍射图样的中心也是一个亮点,但其大小随着传播距离的增大而增大,从而影响准直精度。

4. 由于是平行光照明,激光束本身的漂移基本不影响准直精度和准直距离。

5. 本方法不但具有原理简单,装置容易实现,调节方便等特点,而且准直线质量好(是一条大小不变亮度足够的连续直线),在整个准直范围内准直精度不变,特别适合那些有高精度准直要求,但准直距离要求不太大的各种场合使用。作为激光直线准直方法的一种补充,具有一定的实用价值。

本文工作得到顾去吾教授的指导,顾教授还对本文提出过修改意见,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 郑 刚 *et al.*, 光学学报, 9(8), 720(1989)
- 2 J. W. Goodman, 傅里叶光学导论, 科学出版社, 北京, 1979, 69~72