

# 一种高精度激光准直仪的理论分析

于克明 樊玉珍

(天津大学精密仪器系)

**提要:** 提出一种新型激光准直仪理论根据, 证明在一定范围内激光束平移或角位移并不影响基准线的位置。实验结果与理论分析很好相符。

## Theoretical analysis of a high precision laser alignment instrument

Yu Keming, Fan Yuzhen

(Precision Instrument Department, Tianjin University)

**Abstract:** A new theoretical basis of novel laser alignment instrument is put forward. It proves that the position of the basic line will not be influenced when the laser beam has translation and angular motion. This character is very important in increasing the precision of alignment instruments and the analysis is in good agreement with the experiment results.

响, 同样, 当激光束的方向产生角位移达  $10'$  时, 也不受影响。

### 一、引言

激光准直仪一般是利用平行的激光束, 以其能量中心的轨迹作为准直和测量的基准轴线, 但光束能量中心的轨迹并不是一条稳定的直线, 它随激光器件的变形而产生漂移。因此, 也就直接影响准直测量精度。这里介绍的新型激光准直仪, 则是以一种环形干涉结构的轴线为基准线, 它在时间上和空间上具有高度的稳定性, 因此基本上不受激光束漂移(包括线位移和角位移)的影响。利用光波衍射理论详细分析了这种环形干涉结构, 证明了这种结构的时空稳定性(实验结果相符)。当激光束的方向轴平移 45% (相对于激光束的直径), 环形干涉结构的轴线不受影

### 二、准直仪的基本结构

基本结构见图 1, 它是由 He-Ne 激光器、负透镜 3 和透镜 1、2 所构成的开普勒望远镜(伽里略望远镜也可以)、以及光电接收装置(图上未划出)组成。负透镜 3 的作用是为了增加落在透镜 1 上的光斑直径。

该准直仪可以形成光学环形结构。需要

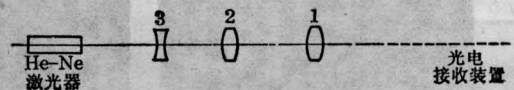


图 1

收稿日期: 1985年2月12日。

指出的是, 光学环形结构不是在准直仪输出透镜 1 后面立即出现, 而是在一定距离后出现(人眼才能看清), 由于激光束有较强的时间相干性和空间相干性, 在 100m 甚至更长的距离上可以保持清楚的环形结构。

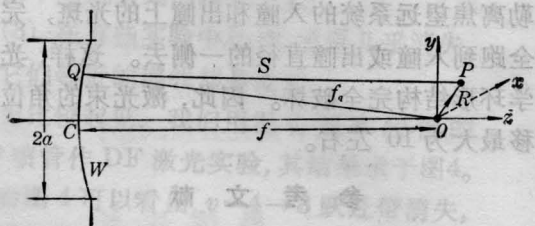
上述光学系统以及利用它所得到的环形结构, 具有一系列对度量学很重要的性质, 其中最重要的性质是激光器输出光束的方向漂移基本不影响基准线的位置。当激光束的基准方向相对于准直仪的光轴有平移或角位移时, 只要有一个环在结构中保持清楚, 同心环的基准轴线就不移动。

当激光束方向轴线平移 45% (相对于激光束直径) 时, 虽然很多环已经变形并变成长尾巴的斑点, 有一部分同心环变成辐状结构, 但中心亮斑几乎不移动。当激光器方向轴线相对于准直仪轴线产生角位移达 10' 也有类似的结果。

### 三、理论分析

参考图 1, 由于加了透镜 3, 因此对略微离焦的开普勒望远系统(2、1 透镜所组成), 相当于一个单色点光源所发射的球面波入射到入瞳上, 而从出瞳出射一球面波(参看图 2)。考虑到用于准直, 该球面波的会聚点  $O$  离出瞳面相当远, 即  $f \rightarrow \infty$ 。

我们利用洛梅耳函数计算从出瞳出射的球面单色波, 在远离出瞳的焦点(球面波会聚点)  $O$  附近某代表点  $P$  处的扰动  $U(P)$ 。利



出瞳平面

$$u = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{a}{f}\right)^2 z, \quad v = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{a}{f}\right) \sqrt{x^2 + y^2}$$

图 2 会聚球面波在圆孔上的衍射

用惠更斯—菲涅耳原理, 德拜积分进行计算。在计算衍射积分时, 引进两个无量纲变量  $u$  和  $v$  来表示  $P$  点位置

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{a}{f}\right)^2 z, \\ v &= \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{a}{f}\right) r = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{a}{f} \sqrt{x^2 + y^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

借用下列洛梅耳函数  $U_n(u, v)$  和  $V_n(u, v)$ :

$$\left. \begin{aligned} U_n(u, v) &= \sum_{s=0}^{\infty} (-1)^s \left(\frac{u}{v}\right)^{n+2s} J_{n+2s}(v), \\ V_n(u, v) &= \sum_{s=0}^{\infty} (-1)^s \left(\frac{v}{u}\right)^{n+2s} J_{n+2s}(v), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

最后得到焦点附近的强度  $I = |U|^2$  由下列两个等效表达式给出

$$I(u, v) = \left(\frac{2}{u}\right)^2 [U_1^2(u, v) + U_2^2(u, v)] I_0, \quad (3)$$

和

$$\begin{aligned} I(u, v) &= \left(\frac{2}{u}\right)^2 \left[ 1 + V_0^2(u, v) + V_1^2(u, v) \right. \\ &\quad \left. - 2V_0(u, v) \cos\left\{\frac{1}{2}\left(u + \frac{v^2}{u}\right)\right\} \right. \\ &\quad \left. - 2V_1(u, v) \sin\left\{\frac{1}{2}\left(u + \frac{v^2}{u}\right)\right\} \right] I_0, \end{aligned} \quad (4)$$

式中

$$I_0 = \left(\frac{\pi a^2 |A|}{\lambda f^2}\right)^2 \quad (5)$$

是几何焦点  $u = v = 0$  处的强度。

当观察点在几何焦平面上时,  $u = 0$  (即  $f \rightarrow \infty$ ), (3)式化为

$$I(0, v) = 4 \lim_{u \rightarrow 0} \left[ \frac{U_1^2(u, v) + U_2^2(u, v)}{u^2} \right] I_0, \quad (6)$$

从(2)式洛梅耳函数  $U_n$  的定义方程可以得出

$$\left. \begin{aligned} \lim_{u \rightarrow 0} \left[ \frac{U_1(u, v)}{u} \right] &= \frac{J_1(v)}{v}, \\ \lim_{u \rightarrow 0} \left[ \frac{U_2(u, v)}{u} \right] &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

所以

$$I(0, v) = \left[ \frac{2J_1(v)}{v} \right]^2 I_0 \quad (8)$$

这样, 我们就得到圆孔夫琅和费衍射的爱里公式, 这是理所当然的。

作为准直系统，一般光路调成  $f$  在几米以外，甚至更远的距离，即  $f \rightarrow \infty$ 。这样，不同位置爱里斑中心连线构成了准直测量的基准线。各个不同位置  $XY$  平面上光斑呈明暗相间的环形结构。

下面讨论当 He-Ne 激光束的轴线偏离光学系统轴线时对光学环形结构的影响。分两种情况：

平移：当 He-Ne 激光束的轴线相对光学系统轴线平移 45% 时，如图 3 所示，相当于倒置开普勒望远系统入射光瞳上的光斑变得不对称。因倒置开普勒望远镜略微调成离焦，即透镜 2 和透镜 1 的焦点不重合，但它们之间距离不大，那么，激光束经透镜 2 会聚于透镜 1 前焦点  $F_1$  附近的  $S$  处，但是与  $F_1$  点不重合，如图 3 所示 ( $F_2$  未划出)。

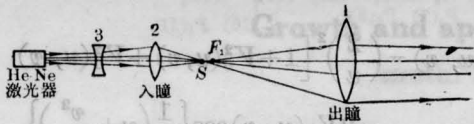


图 3

这样，出射光瞳处光斑不对称，但在出瞳处仍有以出瞳直径的 5% 为半径的中心对称圆斑在无限远处形成夫琅和费衍射光斑（即环形结构）。但是，由于出瞳处光斑的不对称性，在直径的一侧光斑拉长，其夫琅和费衍射光斑出现长尾巴现象。这是由于当孔沿某一方按比例  $\mu:1$  均匀拉伸时，则夫琅和费图样在同一方向按比例  $1:\mu$  收缩，同时新图样上各点的强度，是原图样上对应点强度的  $\mu^2$  倍。

利用这个结果，我们立即可以从圆孔的夫琅和费图样，确定出椭圆孔的夫琅和费图样，如图 4 所示。光束平移到  $\frac{h}{d_0}$  接近 50% 时（其中  $h$  为平移距离， $d_0$  为激光束直径），入射光瞳处中心对称光斑完全破坏。那么，衍射光斑的中央亮斑也随之破坏。因此，激光束的平移  $\frac{h}{d_0}$  最大为 45% 左右。

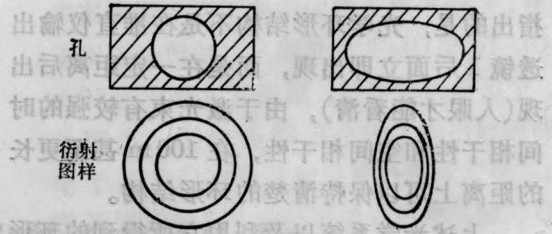


图 4 圆孔和椭圆孔夫琅和费衍射的比较



图 5

角位移：取透镜 2 距 He-Ne 激光器为 150 mm，开普勒望远镜放大倍数为 10，激光束直径为 1 mm。那么，激光束中心线经透镜 3，到达透镜 2（即倒置开普勒望远镜的入瞳）时，则激光束中心线与透镜交点距光学系统对称轴高度约为 0.44 mm。也就是，在入瞳处仍能保留半径为 0.06 mm 的完整光斑。这部分光能经过透镜 3 时，因位于接近对称轴，所以，发散不显著。因开普勒望远镜略微调成离焦，那么，激光束经透镜 2 会聚于透镜 1 前焦点  $F_1$  附近的  $S$  处，但与  $F_1$  不重合，如图 5 所示 ( $F_2$  未划出)。在出瞳处（透镜 1 所在位置）光斑放大 10 倍，仍有以出瞳直径的 6% 左右为半径的中心，对称圆斑，在无限远处形成夫琅和费衍射光斑（即环形结构）。由于出瞳处光斑的不对称性，在直径的一侧光斑拉长，其夫琅和费衍射光斑出现长尾巴现象，其道理与平移的情况相同。

当角位移超过  $10'$  时，激光束射到开普勒离焦望远系统的入瞳和出瞳上的光斑，完全跑到入瞳或出瞳直径的一侧去。这样，光学环形结构完全破坏。因此，激光束的角位移最大为  $10'$  左右。

### 参 考 文 献

- [1] Вагнер Е. Т.; "Лазеры в самолетостроении", М., Машиностроение, 1982.
- [2] М. 波恩, Е. 沃耳夫著, 杨蔚荪等译校; "光学原理" (上册), 科学出版社, 1978.