

# 神光Ⅰ装置的靶瞄准系统

黄宏一 顾 震 范滇元  
(中国科学院上海光机所 上海 201800)

**提要** 详细描述了神光Ⅰ装置激光聚变物理实验靶瞄准定位系统的原理和结构,提出了“空间坐标法”进行靶定位和靶瞄准,利用“离焦定半径”完成了激光调焦。并给出系统综合实验的初步结果。

**关键词** 靶瞄准,靶定位,激光调焦

## 1 引 言

神光Ⅰ装置是 8 路大型高功率固体钕玻璃激光器,其基频总能量达 6 kJ。主要用于激光约束聚变(Inertial Confinement Fusion,以下简称 ICF)、X 光激光、状态方程等物理实验。不同

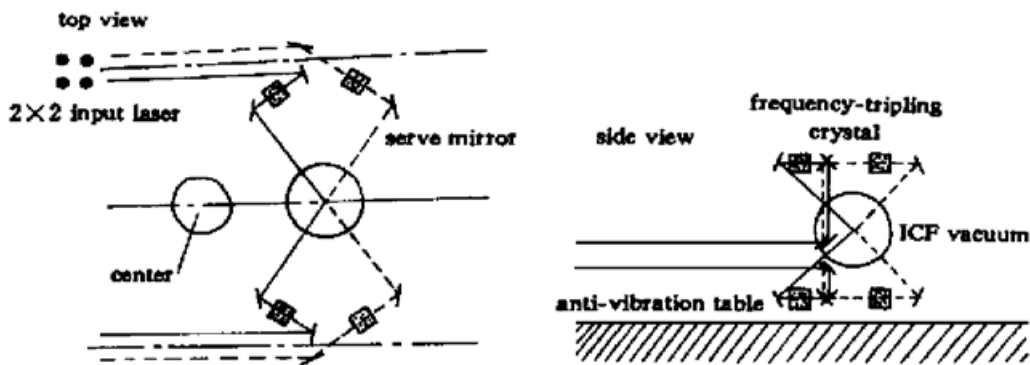


图 1 神光Ⅰ装置 ICF 物理实验光路图  
Fig. 1 Scheme of SG-ICF experiment

于神光Ⅰ装置的两路激光平面垂直入射靶丸,8 路激光对称大角度(45°)倾斜入射黑腔靶丸(如图 1 所示)是神光Ⅰ装置 ICF 物理实验重要特色之一,同时也需要不同于神光Ⅰ装置的靶瞄准系统。神光Ⅰ装置上采用的是原光路返回共轭像瞄准的方法(如图 2 所示),模拟靶与真实靶通过可移动反射镜 2 对监漂仪成共轭像关系,模拟光源通过可移动反射镜 1 与入射主激光耦合后通过聚焦靶

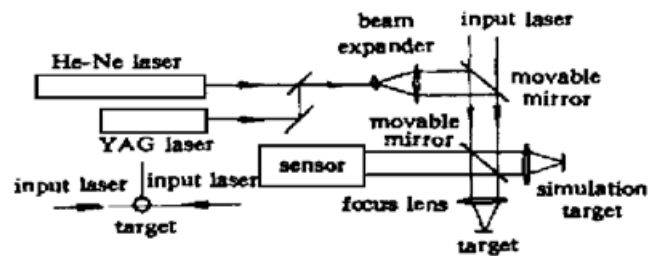


图 2 神光Ⅰ装置靶瞄准系统原理图  
Fig. 2 Scheme of the Shenguang-1 target point system

镜汇聚在靶丸上,经原光路返回进入监漂仪。通过监漂仪的观察调整靶架和激光引光系统实现激光打靶。但该方法在神光Ⅰ装置上因8路激光大角度倾斜入射靶丸而无法使用(实验结果为当角度大于 $30^\circ$ 时,在原返回光路上已无可实用信号)。同时根据物理实验测试表明,任一束激光即使有0.01%能量的光照射到黑腔靶靶丸两端注入孔边缘都会产生等离子体并向孔中心喷射而形成堵口效应。神光Ⅰ装置上黑腔靶入射孔直径不大于 $350\ \mu\text{m}$ ,其中心的定位精度要达到 $10\ \mu\text{m}$ 以内。因此我们研究新型的靶瞄准系统。本文详细介绍了在黑腔靶洞口垂直的方向上接受靶面激光散射的信息,通过图像处理控制靶定位、靶瞄准和激光调焦,完成引导激光精确打靶的系统的原理和系统在神光Ⅰ装置上综合测试的结果。

神光Ⅰ装置要求8路激光精确会聚于物理实验的靶丸上,为便于调整引入一基准点,下面分别描述将靶丸精确定位于空间基准点的靶定位系统、及将激光精确定位于空间基准点的激光调焦和准直系统。

## 2 靶定位

靶定位即通过靶架的多维运动调整将物理实验靶丸和用于调整激光光束的模拟靶精确定

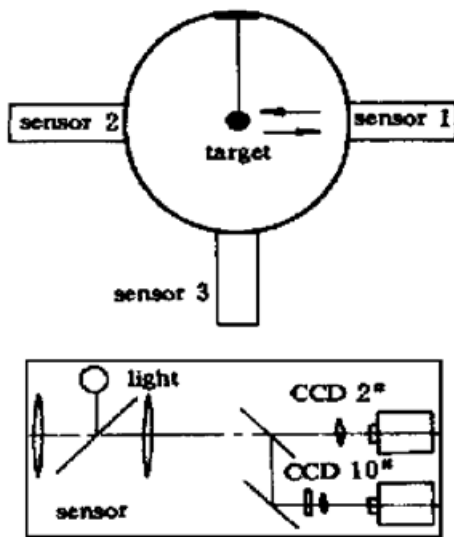


图3 神光Ⅰ装置靶定位传感系统

Fig. 3 Target point system of Shenguang I

位于基准点。为确定靶丸的空间位置即其空间三维坐标,我们采用在正交位置上布置传感器以检测靶丸的空间信息,如图3所示,为增加系统的冗余度及物理实验的需求,我们在真空靶室南北方向各安置一个传感器1和2,在垂直于南北方向安置一个传感器3,传感器结构如图所示为一个光学成像系统,将物理靶丸面上的信息传递到CCD上,为解决分辨率与视场及景深的关系,采用了放大2倍及10倍的光学系统。通过实验表明,采用非相干光源照明靶丸可以消除散斑、干涉及衍射条纹等,有利于CCD的计算机图像处理<sup>[1]</sup>。通过图像分析可以精确定位物理靶丸的空间二维坐标,综合三个传感器的信息以判断其空间位置与基准点的偏差,驱动靶架调整完成精确定位靶丸的目标。该系统的精度取决于CCD的分辨率、光学系统的误差、靶架的调整误差等,在CCD

像元为 $10\ \mu\text{m}$ 而光学系统为放大10倍时理论精度为 $1\ \mu\text{m}$ (现在的图像处理技术精度甚至可达亚像元),在神光Ⅰ装置上按上述原理研制了靶瞄准定位系统并初步进行了实验,靶定位精度为 $5\ \mu\text{m}$ 左右。

## 3 靶瞄准

激光靶瞄准是指如何精确地引导神光Ⅰ装置8路激光到物理实验靶丸指定的部位上,因此如图4所示,采用同一系统观察激光在模拟靶面上的位置(在完成激光靶瞄准后,模拟靶将换成真实靶并调整到空间基准点,因此模拟靶面上激光的位置代表真实靶上激光的位置)。通过图像处理定出激光光斑的中心,综合各个传感器的信息可以判断出激光在靶面上的空间坐

标, 即激光的光束指向性, 通过与标准点偏差的比较, 调整伺服反射镜可以完成引导激光到指定点的要求。其引导精度与靶定位精度类似决定于 CCD 分辨率、光学成像系统放大倍数及误差、伺服反射镜调整误差和图像处理误差等。由于不可避免的激光散斑等引起的图像处理误差, 在实际装置的实验中, 其精度略低于靶定位精度。

由于神光 I 装置激光打靶是瞬态(纳秒量级)的脉冲, 以上调整均使用模拟光源, 这就存在实际打靶光路与模拟光光路耦合的误差。在打靶过程中, 我们采用多次发射小能量激光, 在模拟靶上确定主激光光路方向, 调整模拟光光源使之与主激光光路耦合, 以避免各个环节引起的系统误差。在调整模拟光源光路后, 可以用模拟光按上述方法调整打靶光路。

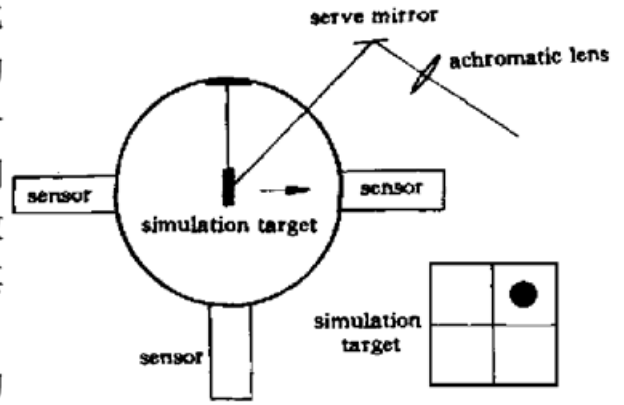


图 4 激光准直和调焦示意图  
Fig. 4 Scheme of laser alignment and focus

### 4 激光调焦

为确定激光光束汇聚点的空间位置除了要求上述的激光指向性外, 还要求确定其焦点位置。传统测量光束焦点采用最小光斑法, 即通过测量光束光斑半径, 在半径最小处认定为焦点, 但理想的高斯光束其焦深定义为腰斑半径  $\omega_0$  增加到  $\sqrt{2}$  倍处两端位置的距离。即  $\Delta f = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$ , 而对于光学系统以波像差不超过 1/4 波长定义焦深有

$$\Delta f = \frac{\lambda}{u_m^2} = F^2\lambda \tag{1}$$

其中  $u_m$  为光学系统孔径角,  $F$  为光学系统孔径比。

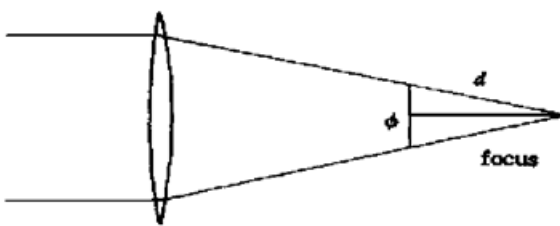


图 5 离焦定半径法示意图  
Fig. 5 Scheme of focus measurement

在神光 I 靶场系统中, 根据公式(1) 计算理论理想焦深为  $10 \mu\text{m}$  左右 ( $F = 3, \lambda = 1.06 \mu\text{m}$ )。而在实际实验中, 由于激光光束并非理想的高斯光束, 而且光学系统也非理想聚焦系统, 因此实际焦深达近百微米, 即激光光斑半径变化不敏感区有近百微米。为避免由于光学系统的焦深而引入的调焦困难, 我们采用离焦定半径法, 如图 5 所示当测量半径远离理论焦点(即在焦深范围外) 时根据几何光学有

$$\phi = d/F \tag{2}$$

本系统中  $F = 3$ , 类似于上述靶瞄准激光准直单元, 用模拟光耦合主激光用于调焦可以通过多次实验确定真实焦点, 排除系统误差, 因此模拟光调焦主要在于确定焦点的相对位置。由公式(2) 有

$$\Delta d = \Delta\phi \times F \tag{3}$$

即调焦误差与测量光斑半径误差成正比, 在神光 I 装置系统中, 激光光斑半径测量误差约为  $5 \mu\text{m}$  左右, 因此焦点测量误差相对值为  $15 \mu\text{m}$ , 远小于最小光斑法所测量的近百微米。

## 参 考 文 献

- 1 Huang Hongyi, Qiu Yue, Fan Dianyuan. Image process on target point. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(7) : 649~ 652 (in Chinese)

**Shenguang  $\bar{\bar{}}$  Target Pointing System**

Huang Hongyi Gu Zhen Fan Dianyuan

*(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)*

**Abstract** This paper introduces the principle and structure of the Shenguang  $\bar{\bar{}}$  target pointing system used in inertial confinement fusion experiment. We use a space coordinate method to position and point the target and align the laser beam, and use an off-focus radius-finding technique to find the laser focus. The experimental results are given.

**Key words** target pointing, laser alignment, laser focus