

文章编号: 1001-3806(2007)04-0400-03

## 原型装置主放光路稳定性实验研究

周 维, 胡东霞, 李 强, 彭志涛, 景 峰, 刘红婕, 张 崑  
(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

**摘要:** 为了研究高功率固体激光器光束指向的漂移情况, 根据原型装置打靶误差预算中各部分的权重, 分析了主放光路输出光束允许的角度漂移误差, 即主放输出光束的角漂不超过  $10.6\mu\text{rad}$ 。实验中选取了其中的一束, 主放远场测量系统在 37 min 内共采集到了 144 发次的远场图像, 在 MATLAB 编程中使用阈值法和重心法处理每帧远场图像, 将光束的漂移量在  $x$  和  $y$  方向上分解, 利用均方根的概率统计方法, 计算得到了主放输出光束的角度漂移误差,  $x$  方向为  $3.47\mu\text{rad}$ ,  $y$  方向为  $4.09\mu\text{rad}$ 。实验结果表明, 主放光路的稳定性达到了设计指标, 能够满足打靶要求。

**关键词:** 激光器; 光路稳定性; 图像处理; 远场图像

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## Experimental study about stability of the main beam of SG-III prototype facility

ZHOU Wei, HU Dong-xia, LI Qiang, PENG Zhi-tao, JING Feng, LIU Hong-jie, ZHANG Kun  
(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** For studying the beam stability of high power solid-state lasers, drift error of main beam was analyzed on the basis of shooting error budget of prototype facility. The drift angle of main laser must be less than  $10.6\mu\text{rad}$ . In 37 minutes, 144 frames of far field images were collected. Two kinds of methods, threshold and gravity model, were used in far field image processing with MATLAB. The drift was calculated separately in  $x$  direction and  $y$  direction. The drift of  $x$  direction was  $3.47\mu\text{rad}$  and  $y$  direction was  $4.09\mu\text{rad}$ . Results indicate that requirement of the main laser stability is met and the requirement of practical shooting is also met.

**Key words** lasers; beam stability; image processing; far field image

### 引 言

用于激光聚变的大型高功率固体激光装置具有光路长、光学元件多、结构复杂等特点, 比如正在建设中的美国国家点火装置 (NIF) 以及我国的神光 II 原型装置等, 打靶是这类激光器的主要任务。为了确保激光器在每次打靶时, 激光束能准确的辐照在靶丸上, 除了光路的准直外还必须考虑光束的漂移, 打靶误差预算中很大一部分都来源于抖动和准直结束至发射之前这段时间内的光束漂移<sup>[1-3]</sup>, 原型装置打靶精度设计指标为  $30\mu\text{m}$ 。

原型装置主放大级输出的激光束是不可见的 (波长  $\lambda = 1.053\mu\text{m}$ ), 且激光束的能量较高, 直接测量光束的稳定性比较困难, 一般的测量方式是采取在主光

路里取样一束比较弱的激光束, 通过测量取样光远场位置变化来实现的<sup>[4]</sup>。

本文中根据原型装置打靶误差预算中各部分的权重, 针对主放输出光束的静态稳定性进行了详细讨论, 分析了主放光路漂移误差的来源, 并利用现有实验数据计算了主放输出光束漂移的角度。同时分析了预放输出光束指向的漂移对主放光路稳定性的影响, 提出了对主光路静态稳定性影响较大的反射镜, 进行有针对性的结构设计思想<sup>[5,6]</sup>。实验结果一方面为我国巨型固体激光器机械结构的设计和改造提供参考依据, 另一方面也为激光束的瞄靶提供了重要的实验数据。

### 1 稳定性分析

静态稳定性与系统的静态漂移误差密切相关, 静态漂移误差主要是由系统结构的稳定性和偶然事件等因素引入的误差。系统中各类透镜的横向位移误差  $\Delta X_L$  与反射镜角度的不稳定  $\Delta\theta_m$  是影响光束在靶面位置的两个重要因素。

神光 II 原型装置光路总体结构示意图如图 1 所示。图中 M 表示注入主放光路的反射镜。原型装置

基金项目: 国家八六三计划惯性约束聚变领域资助项目 (845040)

作者简介: 周 维 (1980), 男, 研究实习员, 主要从事高功率固体激光技术研究。

E-mail: ni\_he999@yahoo.com.cn

收稿日期: 2006-06-09; 收到修改稿日期: 2006-09-18

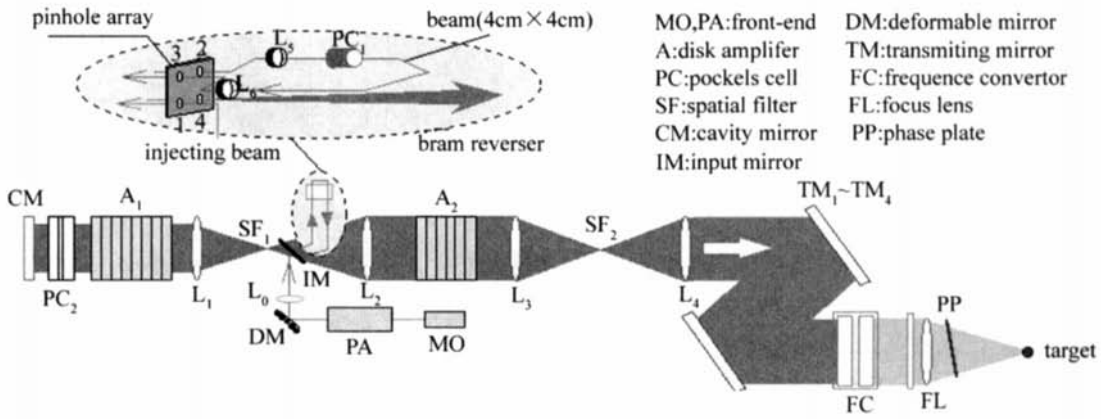


Fig 1 The schematic layout of TL ( prototype of Shengguang III)

打靶精度定义为光束瞄准点与实际弹着点之间的距离偏差的均方根值, 即同一发次中束与束之间或不同发次中同一束之间的距离偏差的统计分布。设垂直于光轴的靶面上, 光束弹着点的坐标为  $r_0(x_0, y_0)$ , 实际弹着点的坐标为  $r_i(x_i, y_i)$ , 则打靶精度  $\sigma_t$  可定义为:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r_i - r_0)^2} \quad (1)$$

原型装置总体设计要求, 打靶精度为  $30\mu\text{m}$ , 可表示为:

$$\sigma_t^2 = \sigma_a^2 + \sigma_d^2 \leq (30\mu\text{m})^2 \quad (2)$$

式中,  $\sigma_t$  为打靶精度,  $\sigma_a$  是全系统准直误差,  $\sigma_d$  是系统中各个不稳定因素引入的漂移误差总和, 静态漂移误差的大小决定了系统静态稳定性是否满足要求。原型装置  $\sigma_d$  的设计值为  $24.8\mu\text{m}$ , 对于  $2200\text{mm}$  的靶场聚焦透镜, 则相当于整个装置输出光束角漂移为  $11.27\mu\text{rad}$  考虑到这个值还包含有打靶透镜和靶场反射镜引入的角漂移误差, 因此, 主放光路的漂移误差可表示为:

$$\sigma_m^2 = \sigma_d^2 - \sigma_{f,d}^2 - \sigma_{t,d}^2 \quad (3)$$

式中,  $\sigma_m$  为主放光路漂移误差,  $\sigma_{f,d}$  为靶场终端聚焦透镜 FL 引起的光束角漂移误差,  $\sigma_{t,d}$  为靶场各反射镜引入的角漂移误差。  $\sigma_{f,d}$  的设计值为  $3.64\mu\text{rad}$ ,  $\sigma_{t,d}$  的设计值为  $1.20\mu\text{rad}$  根据 (3) 式可计算出主放光路漂移误差, 结果为  $\sigma_m = 10.6\mu\text{rad}$  即主放输出基频光的漂移角度误差的均方根值不超过  $10.6\mu\text{rad}$

## 2 实验及图像处理

### 2.1 实验原理

CCD 采集到的主放输出光束的远场图可以表示出当前发次焦斑的相对位置, 一系列这样的远场图则可以反映出一段时间内光束在 CCD 上弹着点的变化情况, 本次实验的  $37\text{min}$  时间内, 共采集到 144 帧远场灰度图。主放远场采集系统如图 2 所示, 根据光路图可计算出 SL 输出光束的漂移角度 ( $\sigma_{s,d}$ ) 比主放输出

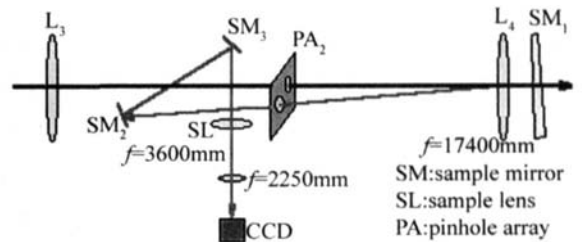


Fig 2 The schematic system of far field measurement

光束漂移角度的表达式为  $\sigma_{s,d} / \sigma_m = f_{L4} / f_{SL}$ , 根据图 2 中  $L_4$  和 SL 的焦距可计算出 SL 输出光束的漂移角度是主放输出光束漂移角的 4.83 倍。

如图 2 所示, 透镜  $L_4$  后输出的平行光经过取样劈板反射进入取样光路, 最后 SL 输出的平行光经过聚焦透镜 ( $f = 2250\text{mm}$ ) 聚焦, CCD 采集到形状规则的远场, 图像保存为 BMP 格式 (单色位图), 远场图中各个点的灰度大小可以表示这一点上光斑的光强大小, 典型的远场如图 3 所示。远场采集所使用的 CCD 参数: CCD 光



Fig 3 The picture of far field

敏元尺寸  $12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$ , 阵列大小  $1024 \times 1024$  灰度分辨率 12bit (4096 灰级), 信噪比大于 70dB。

### 2.2 图像处理

实验中采集到的远场图保存为 BMP 格式的单色位图。如图 3 所示, 图中高亮的区域表示为激光焦斑所在的位置, 这个区域的灰度值比较大, 衰减后焦斑的最大灰度值大约为 2700 (CCD 最高灰级的  $2/3$ ), 本底灰度值大约为 80。

实验中采取了有效的屏蔽周围杂散光的措施,所以本底灰度值比较小,并且采集到的远场图中噪声点的灰度值也比较小,因此可以在 MATLAB 编程中用阈值法去掉本底和噪声,得到形状比较规则的远场焦斑<sup>[7]</sup>。灰度阈值的选择关系到远场焦斑的完整性,如果阈值过高就会损失掉远场焦斑的某些信息,从而会在对测量数据的处理过程中影响到远场焦斑位置坐标的确定。实际图像处理过程中,专门针对每帧图像进行了阈值的判定,来保证所选取的灰度阈值能够满足图像完整性的要求<sup>[8]</sup>。阈值法处理后的远场焦斑图可以清楚地显示出远场焦斑的形状,然后使用重心法计算出每帧图像中远场焦斑位置的坐标值 $(x_i, y_i)$ ,由于 CCD 的每个像元代表  $12\mu\text{m}$  的尺度,由此可以得到实验时间内的远场焦斑在 CCD 面阵上的分布情况。

### 2.3 实验结果

由实验中采集到的远场焦斑图像,可计算出远场位置的相对坐标值,远场坐标由远场焦斑图中灰度重心的位置决定。远场焦斑在 CCD 上位置分布图如图 4 所示。图 4 显示远场焦斑的位置在  $x$  方向上的分布

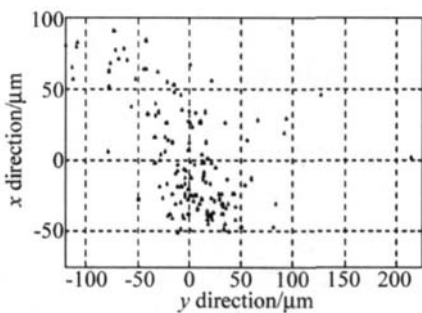


Fig 4 The point of far field

比  $y$  方向上的分布更集中,其中,  $y$  方向上有个别点离散量比较大,这使  $y$  方向上偏移量的 P-V 值偏大。

焦斑在 CCD 上的位置坐标为  $r_i(x_i, y_i)$ ,取这些位置坐标的平均值  $r_0(x_0, y_0)$  为瞄准点的坐标,则根据 (1) 式以及 CCD 的参数可求出实验时间内 SL 输出光束的角度漂移误差  $\sigma_{s,d}$ ,而主放输出光束角度漂移误差可由  $\sigma_m = \sigma_{s,d}/4.83$  得出。主放输出光束指向随时间变化曲线如图 5 所示,图中  $\sigma_{P-V}$  为角漂的峰值,  $\sigma_{RMS}$  表示主放光路的角度漂移误差。由图可知,角度漂移误差:  $x$  方向  $3.47\mu\text{rad}$ ,  $y$  方向  $4.09\mu\text{rad}$ 。

图 5 显示了主放输出光束在  $x$  方向的指向是有规律地向同一方向漂移,在实验中也观察到:在对应的方向上,预放输出的准直光源指向有着相同的变化规律。图 6 显示了预放输出准直光源的指向一天中的变化情况,其中 13:05~13:42 这 37min 内,预放输出的准直光源相对应的方向上的角度漂移量约为  $30\mu\text{rad}$ ,这对主放光束  $x$  方向角漂有  $8\mu\text{rad}$  (P-V 值) 的贡献。主放

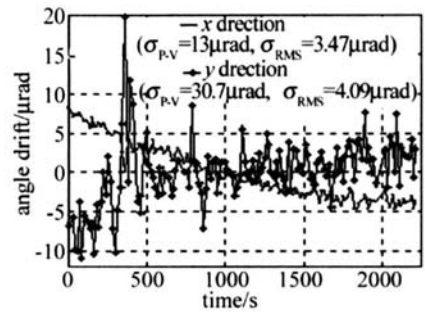


Fig 5 The curve of angle drift versus time

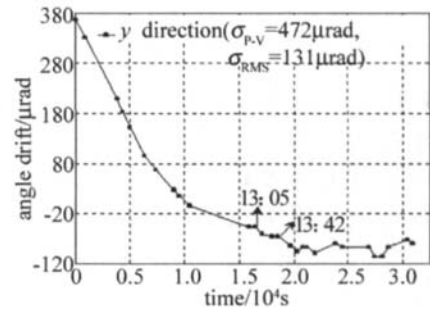


Fig 6 The curve of alignment beam angle drift

输出光束在  $y$  方向上光束角度漂移误差的 P-V 值偏高,同时波动的幅度比  $x$  方向大,但统计规律显示  $x$  和  $y$  方向的随机漂移误差并不大,经分析,  $y$  方向波动的幅度比较大的原因可能是,4程光路中的腔反射镜的角度随机变化引起的(反射镜架使用了顶拉结构,  $y$  方向上的弹簧更容易受到重力和周围振动源的影响),这在光路的准直中得到了验证。

### 3 结论

根据原型装置设计的要求,分析了主放大级输出光束的稳定性要求,开发了基于 CCD 图像采集和图像处理的光路稳定性分析程序。由稳定性分析程序计算得到了一段时间内主放输出光束的  $x$  和  $y$  方向的角度漂移。结果表明,在 37min 内主放输出光束的角度漂移误差满足设计要求。实验中也发现了注入主放光路的准直光源的角度漂移,是主放输出光束漂移的重要因素,因此,有必要在预放与主放的对接光路中,引入一对伺服反射镜来校正预放输出光束的角度漂移误差。另外,有必要对光路稳定性影响比较大的反射镜的结构进行合理的设计。

### 参考文献

- [1] ZACHARIAS R A, BEER N R, BLISS E S *et al* Alignment and wave front control system of national ignition facility [J]. *Opt Engng* 2004 43(12): 2873~2884
- [2] ZHU Q H, ZHANG X M, JING F *et al* Study of the layout stability of multipass amplification system [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 1999 11(6): 653~656 (in Chinese).

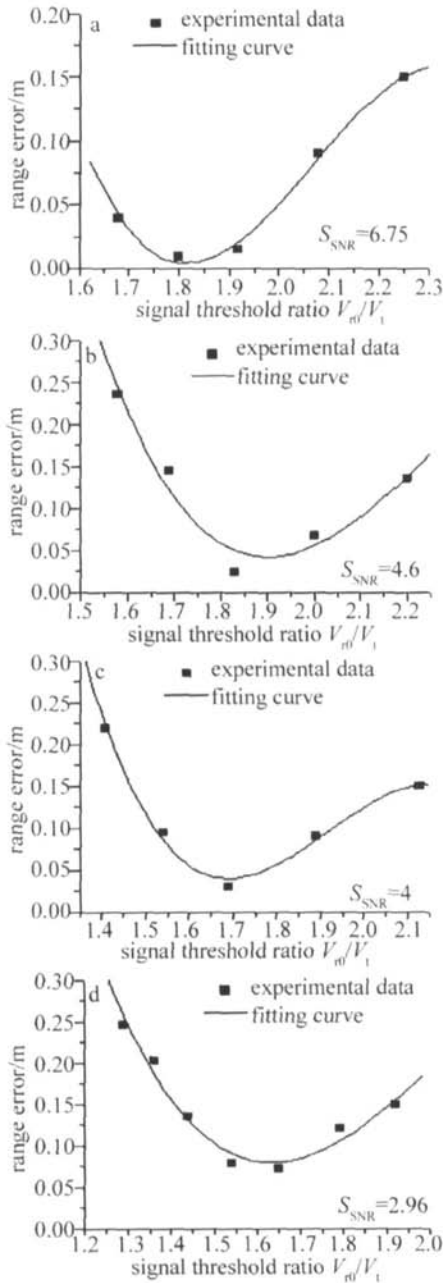


Fig 3 Relation of signal threshold ratio and range error

提取回波信号的幅值、脉宽等物理量,从而确定并设置测距系统的最佳信号门限比,然后对待测目标进行距离测量,这样,激光雷达系统具有最小的测距误差。

(上接第 402 页)

- [3] HUANG J, YUAN X D, WANG Ch Ch *et al* Measurement of laser argle drift by means of measure microscope [J]. Laser Technology 2005 29(3): 328~ 331( in Chinese).
- [4] WANG Ch Y, LIU X F, YUAN Y H *et al* The diagnosis on spot and drift of CW-COIL laser beam [J]. High Power Laser and Particle Beams 1997, 9(1): 23~ 28( in Chinese).
- [5] YU D L, SANG F T, JIN Y Q *et al* Study of the drift and deformation for COIL output beam spot [J]. High Power Laser and Particle Beams 2001, 13(2): 151~ 154( in Chinese).

### 3 结论

讨论了恒电压幅度鉴别模式下,回波信号幅度和宽度变化对激光测距仪测距精度的影响。结果表明,激光测距仪和激光雷达系统存在一个最佳信号门限比  $V_{th}/V_1 = e^{\frac{A}{S}}$ , 此时测距系统具有最小的测距误差。在此基础上,通过实验验证了最佳信号门限比的存在,并确定了 XLD-II 型激光雷达的最佳信号门限比约为 1.8, 该研究为不同应用条件下,激光雷达鉴别电平合理选取提供了理论依据,对提高提高激光测距仪和激光雷达系统的测距精度具有重要参考价值。

### 参考文献

- [1] GUO G J, LI Sh K, HU Y H. Study on the ranging performance of the airborne lidar [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2001, 12(6): 595 (in Chinese).
- [2] SUN B, WANG X B, LI N Y *et al* Range-finding capability of laser range finder by extinction-ratio measurement without target [J]. Laser Technology 2004, 28(1): 82~ 84 (in Chinese).
- [3] MRSTK V, van BLARICUM G, CARDILLO B *et al* Terrain height measurement accuracy of interferometric synthetic aperture radars [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 1996, 34(1): 219~ 228
- [4] ZHANG L, QIN Sh Q, WANG Sh Sh *et al* Mini LD laser rangefinder used in intelligent vehicles [J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 130~ 131( in Chinese).
- [5] DAI B M, ZHANG Ch, LI D Sh. Analysis of ranging error of pulse laser ranger [J]. Laser Technology, 1999, 23(1): 50~ 52( in Chinese).
- [6] ZHANG Y, HUANG P Ch. High precision time interval measurement techniques and methods [J]. Progress in Astronomy, 2006, 24(1): 1~ 15( in Chinese).
- [7] HU Y H, WEI Q N, LIU J G *et al* An analysis of the characteristics of the return pulse in airborne laser beam scanning [J]. Applied Laser 1997, 17(3): 109~ 111( in Chinese).
- [8] PNG Q W, HE P K. Detecting probability and false alarm rate study of digital signal processor of laser ranger [J]. Laser Technology 2004, 28(5): 527~ 530( in Chinese).
- [9] BUFTON J L. Laser altimetry measurements from aircraft and spacecraft [J]. Proc IEEE, 1989, 77(3): 463~ 477
- [10] HU Y H, XUE Y Q. A study on the precision of airborne scanning laser ranging [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics 1999, 16(3): 193~ 197( in Chinese).
- [6] LIU Y, JIN Y Q, SANG F T *et al* Measure and research of mirror displacement for COIL resonator [J]. High Power Laser and Particle Beams 2003, 15(3): 221~ 224( in Chinese).
- [7] LIU F N, LIU D Zh, XU R F *et al* Performance of image processing in beams automatic alignment system [J]. Optical Technique, 2005, 31(3): 335~ 337( in Chinese).
- [8] CHEN Zh, CHANG Sh L, HU Y M *et al* An imaging processing method for measuring the array position of diffraction spot of high-power laser beam [J]. Optoelectronic Engineering 1998, 25(1): 6~ 12( in Chinese).