

单脉冲高能激光系统动态焦斑位置测量

赵娟宁^{1,2}, 董晓娜¹, 达争尚¹, 李红光¹

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对普通焦距测量方法无法对单脉冲高能激光热畸变引起的焦斑轴向位置漂移进行测量的问题, 设计了一种由正交双楔板组分束、可实现瞬时焦斑位置测量的光斑阵列检测系统。两组垂直放置的楔板反射镜组对汇聚光束进行空间分束调制, 不同光束具有不同汇聚位置。这些光束最终被探测器接收, 形成尺寸不同、阵列分布的光斑阵列。通过对光斑阵列的单次探测, 实现了多种轴向焦斑位置变化量的获取及单发次高能激光脉冲系统的焦斑漂移测量。经过理论分析、软件模拟及具体实验验证, 该测量系统具有测量范围与测量精度可调、光斑离散性好、杂散光影响小等特点。

关键词: 动态焦斑测试; 双楔板; 杂光分析

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1925-05

Dynamical focus position detection of single pulse high power laser system

Zhao Juanning^{1,2}, Dong Xiaona¹, Da Zhengshang¹, Li Hongguang¹

- (1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To tackle the problem that traditional focus measure technologies cannot measure the focus shifting caused by thermal distortion in single pulse high power laser system, a system, composed with double vertical wedge groups producing array spots, can make instantly focus measure available. Two pairs of wedge-mirror groups which are placed vertically to each other are utilized as beam splitting system in this system. All those rays are finally detected by a detector, and formed a matrix of spots with various sizes. Through single detection of spots matrix, various focus position shifts and the focus shifting measurement of the high power laser with single shot are obtained. After theoretical analyzing, software simulating and experiment testing, this technique has the advantages such as the adjustable detecting accuracy and range, good disperse quality, and the ability of restraining the effect of parasitic light.

Key words: dynamical focal spots measurement; double wedge; parasitic light analysis

收稿日期: 2013-10-21; 修订日期: 2013-11-23

作者简介: 赵娟宁(1986-), 女, 博士生, 主要从事激光参数诊断方面的研究。Email: zxychangchun@126.com

导师简介: 董晓娜(1973-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事光学系统设计和精密激光参数测量系统的研究设计。

Email: dongxn@opt.ac.cn

0 引言

高功率光学系统在高能激光工作状态下焦斑位置相对于低能参考光入射时系统焦斑位置的差异是评估系统光束质量的重要参数,也是后续光学系统安装和调试的重要参考依据。高能激光系统中存在热畸变(引起波面畸变),引起焦斑位置随系统工作时间的加长而发生大小和方向不确定的变化^[1-2],如果变化量小于 1/2 焦深则认为系统工作稳定,反之该系统的热畸变过大,后继系统无法正常工作。

普通光学系统测焦距的方法可用于低能光学系统焦斑位置的测量,如:基于几何光学的滑动节点法,放大倍率法^[3]和 CCD 法^[4];基于物理光学的阿莫尔条纹技术^[5],径向剪切技术^[6],但是由于单脉冲高能激光系统中光束作用时间极短(3~5 ns),几何光学测量方法需要足够的调节时间来确定探测位置,无法完成对单脉冲系统测试;物理光学方法:阿莫尔条纹技术,径向剪切技术虽然可以达到较高的测量精度,但在高能状态下工作稳定性无法保证,而剪切系统装调困难且易受外部环境影响。

当激光系统工作模式为单脉冲时,后续系统没有足够的调节时间,获取前级系统焦斑位移量就更加重要^[7]。为了获取单发次高能脉冲的焦斑位置变化量,需要一种测量精度高、测量范围大的实时检测技术。又由于大型激光装置需要多节点同时检测光斑位置,这就需要在高精度的基础上,要求检测尽可能装调简单,工作稳定,替换性好且经济性好。基于上述现状和工程测量要求,文中提出基于双楔板阵列成像的动态焦斑测试理论。

1 测量原理

1.1 实验原理

实验原理如图 1 所示。待测系统出射汇聚光束,光束经过 BSG1(Beam Splitting Group 1)在铅垂方向分裂为一列子束,各子光束经过 BSG2 在水平方向分裂为一行子束,两次分束形成二维子束阵列,最终被末端 CCD 接收。CCD 上不同尺寸的光斑分别代表不同聚焦位置的子光束,通过测量最小光斑在阵列中的相对位置变化,实现动态焦斑位置测量。

按光斑分布形式,列阵技术分为一维列阵和二

维列阵。采用单个 BSG 的系统为一维列阵;两个 BSG 垂直放置进行分光,形成多行列的光斑阵列是二维列阵。对测量精度要求不高的系统用一维列阵,反之用二维。

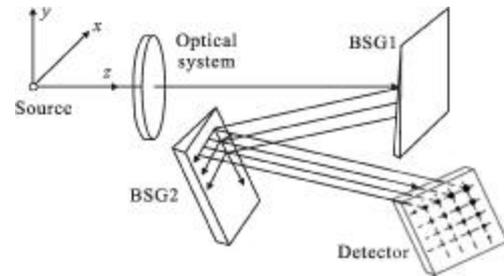


图 1 测量原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of measurement

1.2 BSG 分束模型

实验中分束组件为楔板反射镜,楔板后平行放置平面反射镜,楔板前后表面分别镀增透膜和分光膜,作用原理如图 2 所示。设 α 为光束入射角; θ 为楔角; n 为楔板玻璃折射率。根据光线的传输路径可

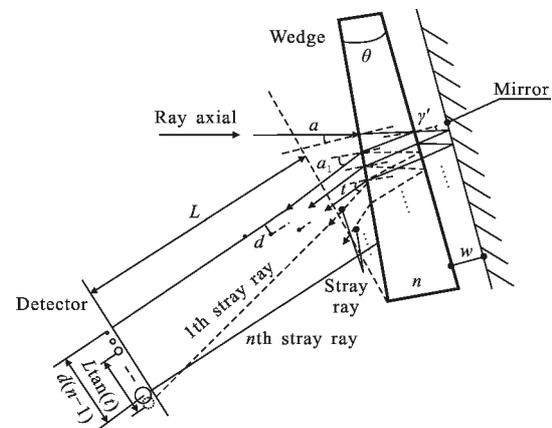


图 2 BSG 器件作用原理图

Fig.2 Schematic diagram of BSG

以计算出出射光线和楔板前表面法线的夹角为:

$$\alpha_1 = \arcsin \left[n \cdot \sin \left(2\theta + \arcsin \frac{\sin(\alpha)}{n} \right) \right] \quad (1)$$

两束相邻出射光束的光程差为:

$$S = 2w \left[\sec(\gamma') + n \frac{\sin(\theta) \tan(\gamma')}{\cos(\theta + \gamma)} - \tan(\gamma') \sin(\alpha_1) (\cos(\theta) + \sin(\theta) \tan(\theta + \gamma)) \right] \quad (2)$$

相邻光束的光轴间隔为:

$$d = 2w \cos(\alpha_1) \tan(\gamma') [\cos(\theta) + \sin(\theta) \tan(\gamma)] \quad (3)$$

式中： $\gamma = \arcsin\left(\frac{\sin(a)}{n}\right) + \theta$; $\gamma' = \arcsin(\sin(\gamma)n)$ 。

k 级出射杂散光和楔板前表面法线的夹角为：

$$t = \arcsin\left[n \cdot \sin\left(2k\theta + \arcsin\frac{\sin(a)}{n}\right)\right] \quad (4)$$

通过调整光束入射角 a、反射镜和楔板后表面距离 w 及楔板的夹角 θ 可以调整测量精度。对于焦距差异不大的待测系统，调节空气间隙可调整测量精度；对于焦距差异比较大的系统，可通过同时调节空气间隙和入射角来调整测量精度和量程。

2 光斑质量分析

2.1 粘连性分析

如图 3 所示，探测器上相邻光斑直径 $(R_m + R_{m+1})/2$ 大于相邻光斑中心间隔 d，光斑会产生粘连并限制测量精度。这里仅分析单个 BSG 一维光斑粘连性，二维与之类似。假设系统入射理想光束，焦斑尺寸近似为零，即初阶光斑(经过 BSG 单次分束后产生的光斑)半径为零时，探测器上第 i 个光斑的理想半径为 R_i ，可表示为：

$$R_i = \frac{D}{2f} S \quad (5)$$

式中：D 为系统光束孔径；f 为待测系统低能状态下的焦距；S 为 BSG 分束后相邻光束的光程差。

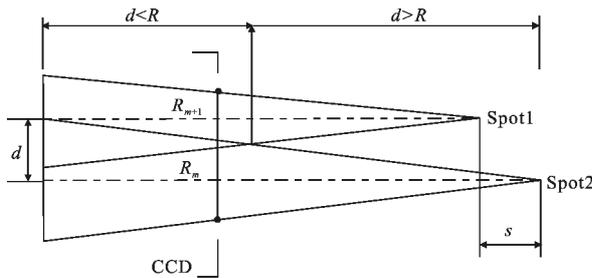


图 3 光斑粘连示意图

Fig.3 Spots adhesive schematic

实验要求待测系统在工作波长为 1 053 nm、焦距为 1 300 mm、光束口径 50 为 mm 时，焦斑位置偏移测量的范围 ± 40 mm，测量步长小于 4 mm，则实验中需要探测的光斑阵列尺寸大于 $40/(2 \times 4)$ ，即最少为 6×6 。楔板楔角 1° ($n=1.4768$)、空气间隙 w 设定为极限状态 0.1 mm 时，由公式(3)可知此时粘连最严重。

将以上参数带入 Matlab 中光斑尺寸 R_i 和光束

光轴间距 d 的表达式，改变入射角 a(范围为 $0 \sim 12^\circ$)，绘制出如图 4(a)所示的 a-(d, R) 曲线。由图可知：入射角增加，光斑间距 d 曲线上升，光斑中心距离加大，更多的光斑不粘连。设计中要求 6×6 光斑阵列可辨，考虑像差影响取 7×7 阵列可分辨。取 d 曲线和 R_7 曲线相交处的 a 值，即 a 等于 6.5° 。由于该结果是在假定光学系统零像差、安装加工零误差情况下仿真出的理想值，考虑工程的实际应用，具体装配时对入射角增加 20% 余量后取整，即 a 取 8° (对于普通系统，入射角的最小值与系统焦距和口径有关)。

入射角 8° ，空气间隙 w 可调，则系统的 w-(d, R) 曲线如图 4(b)所示。由图可知，选择适当的入射角可使焦斑之间避免粘连，在一定入射角下，合理调节空气间隙 w 可以调整测量精度。

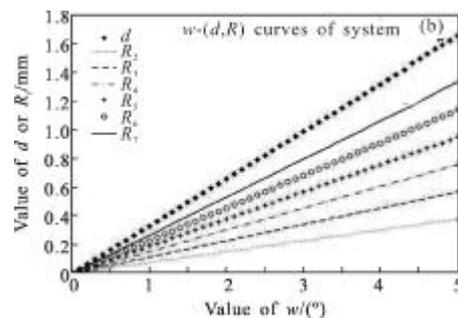
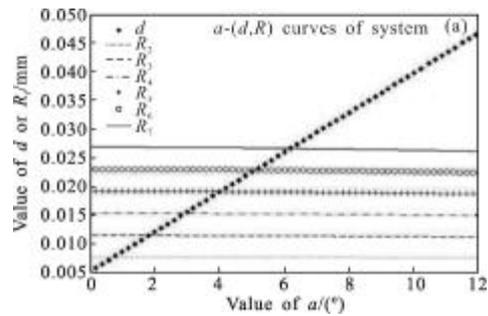


图 4 系统 a, w-(d, R) 曲线

Fig.4 a, w-(d, R) curves of system

2.2 杂散光分析

楔板(平板)前表面的不完全透射会引起杂散光，若其汇聚于能量较小的焦斑附近会影响测量精度。用杂散光分析软件对其进行模拟，得到探测器上的光能模拟分布如图 5 所示。

由图 5 可知，分布在光斑阵列之外的杂散光不影响测量结果。这是由于楔板存在楔角，随着杂散光级数的增加，其出射角和待测光出射角的差异加大，

同时杂散光出射位置也更远离测量焦斑阵区域,如图 2 所示,所以若一级杂光不与焦斑阵列重叠,其余杂光也不会影响测量结果。一级杂光及系统第 n 级光束经距离 L 的传播后被探测器接收,当 $L \cdot \tan(\theta) + 2d > (n-1) \cdot d$, 角度差异转换为空间距离上的充分分离,一级杂光及所有杂光对整个系统不产生影响。BSG 系统的工作状态与位置无关,压缩 BSG 之间及 BSG1 与待测系统之间的距离,提供足够的 L 使杂散光对系统不产生影响。

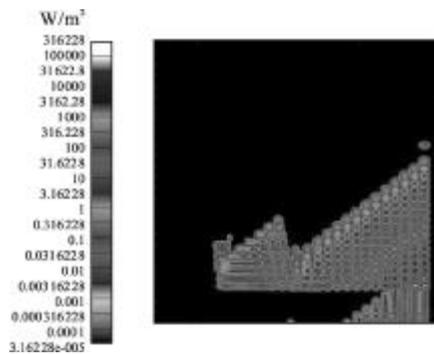


图 5 光斑模拟图

Fig.5 Spots array configuration

3 实验结果及数据分析

实验中透镜组焦距 1 300 mm,光束口径 50 mm×50 mm,BSG1 中的楔板楔角 1°,入射角 8°,空气间隙 6 mm(BSG2, 1°, 12°, 9 mm),工作波 1 053 nm,楔板折射率均为 $n=1.4768$ 。实验三维装配图如图 6(a)所示。由于光斑阵列尺寸较大,实验中取 120 型红外黑白胶片(400 粒度)为光斑接收器件。

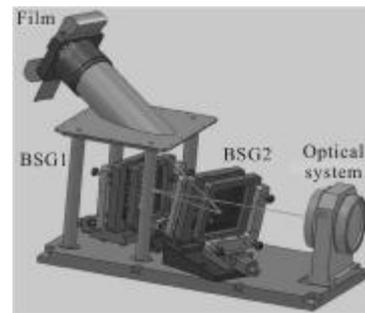
为了减少光学系统像差引起的最小光斑位置误判误差,前置光学系统波前差应小于 $\lambda/4$,同时使用小楔角楔板降低慧差。

3.1 实验结果

将实验参数代入公式(2),可得 BSG1 相邻光束光程差为 $S_1=11.8359$ mm;BSG2 为 $S_2=17.5029$ mm。产生高能热畸变需特殊激光光源,普通实验室无法满足要求。对该系统的调试采用低能状态下的替代实验:将光斑阵列初始光斑(经 BSG1 和 BSG2 各一次分束后形成的光斑,位置为一行一列)作为基准光斑,将其尺寸调到最小后固定探测面位置,然后改变光学系统轴向位置产生探测面和初始光斑的相对离焦量。通过最小光斑位置的变化反推光学系统轴向

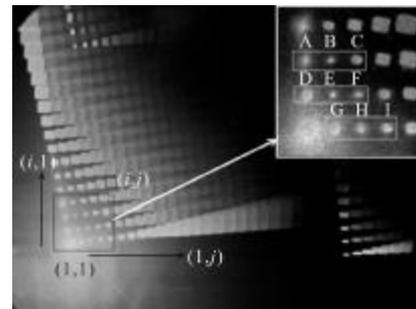
变化量,实际调节量和该计算量作对比可得到系统测量精度。

由于 m 行 n 列的光斑的光程为 $L_m=(n-1)S_1+(m-1)S_2$,整个光斑阵列的光程分布是离散的。为了研究焦斑位置判读误差,要求设定的位移量避开系统离散光程值,实验中焦量取 33 mm,测量结果如图 6(b)所示,待测的光斑阵列中 6×11 阵列可辨,上侧和右侧的次级光斑阵列为杂光阵列,其干扰可忽略。



(a) 实验装配图

(a) Assembly diagram of experiment



(b) 实验光斑图

(b) Spots array of experiment

图 6 焦斑检测实验及结果

Fig.6 Focus detection experiment and results

3.2 数据处理与精度分析

位置为两行两列的光斑 E 尺寸近似最小的光斑,对应焦移量 $L_0=29.34$ mm,绝对测量误差为 $\delta_{\Delta L} = |29.34 - 33.00| = 3.66$ mm,相对测量误差为 $3.66/33 \times 100\% = 11\%$ 。现给出一种修正方法:将光斑尺寸分为 3 组,第 1 组为 A、B、C;第 2 组为 D、E、F;第 3 组为 G、H、I。各组中尺寸相对较小的两个光斑相对基准光斑的光程值进行平均得到 L_n ,三组平均值取平均得到 L_e 。比较 L_e 和 L_0 ,若两者满足 $2|L_e - L_0| \leq \min(S_1, S_2)$ 则计算准确;若 L_e 与另外光斑的 L_m 近似,则 L_m 与 L_0 平均后的结果 L 可作为实验结果,

过程如表1所示。

表1 各点对应光程及修正算法(单位:mm)

Tab.1 Optical path of each point and correction algorithm (Unit: mm)

Point	Spot radius	L	L_n	L_e
A		35.00		
B	$R_C > R_A \cong R_B$	46.84	40.92	
C		58.68		
D		17.50		
E	$R_D > R_F > R_E$	29.34	35.25	35.25
F		41.17		
G		11.84		
H	$R_G > R_H \cong R_I$	23.6	29.59	
I		35.51		

由于A点离焦量35.00 mm与计算结果 $L_e = 35.25$ mm十分相近,而A不是最小尺寸光斑点,这个矛盾是由取点错误或判读错误引起的,校正 $L = |L_e + L_0|/2 = 32.30$ mm。 L 的绝对为误差 $\Delta L = |32.30 - 33.0000| = 0.70$ mm,相对测量误差 $\delta L = \Delta L/33 \times 100\% = 2.1\%$ 。由光学系统参数及焦深计算公式 $L = \lambda/(n'(u'm)^2)$ 可得系统焦深为1.423 8 mm,则修正后测量误差小于1/2焦深。

4 结论

就测量高能激光热畸变引起的光斑漂移问题,文中结合已有方法提出焦斑位置的列阵探测理论。通过对该方法进行理论分析和软件模拟及实验结果

分析,验证了该方法的测量灵活性、光斑粘连性、杂散光影响和测量精度方面各自的特性。测量精度、量程可调的特点可以使它应用到不同的焦距系统,数据修正处理提高了测量精度,补偿了该系统最主要的缺点。该实验系统目前已经投入到国内某大型激光装置中,并得到了预期的实验数据和测量精度。

参考文献:

- [1] Peng Y F, Cheng Z H, Zhang Y N, et al. Temperature distributions and thermal deformations of mirror substrates [J]. *Appl Opt*, 2001, 40(27): 4824-4830.
- [2] Wang Kuilong. Focal shift in focused anomalous hollow beam [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 869-874. (in Chinese)
王奎龙. 聚焦异常空心光束的焦移 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 869-874.
- [3] R Kings Lake. *Applied Optical Engineering* [M]. New York: Academic, 1965: 208.
- [4] Wang Jianwei, An Zhiyong. Automatic measuring technology of optical system focal distance based on CCD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(21): 255-260. (in Chinese)
王建伟, 安志勇. 基于 CCD 的光学系统焦距自动测量技术 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(21): 255-260.
- [5] Greene P L, Hall D G. Focal shift in vector beams [J]. *Opt Express*, 1999, 4(10): 411-419.
- [6] Priti Singh, Mohammad Shoeb. Measurement of focal length with phase-shifting Talbot interferometry [J]. *Appl Opt*, 2005, 44(9): 1572-1576.
- [7] Kiyofumi Matsuda, Thomas H Barnes, Bob F Oreb, et al. Focal-length measurement by multiple-beam shearing interferometry [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(16): 3542-3548.