

文章编号: 1001-3806(2007)03-0333-04

多程放大系统中透镜倾斜对系统像差的影响分析

王 方, 朱启华, 蒋东宾, 胡东霞, 邓 武, 刘 华, 黄 征, 景 峰

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心 高能高密度等离子体物理国家实验室, 绵阳 621900)

摘要: 为了研究多程放大系统中的透镜倾斜对系统像差影响, 采用在商用光学设计软件 ZEMAX 中建模进行光线追迹结合实验验证的方法, 得到了初步分析结果。结果表明, 在此类多程放大系统中, 对远场能量集中度有较大影响的几种像差主要由透镜离轴倾斜使用造成的, 其中离轴四程透镜的影响较大, 而且离轴四程透镜的倾斜角度对整个多程系统输出的波前影响并非是线性上升。对校正装置的系统输出波前畸变及今后类似光路的优化设计有一定参考意义。

关键词: 激光光学; 像差理论; 透镜倾斜; Fringe-Zemke 多项式

中图分类号: TN206 文献标识码: A

Analysis of system aberration influenced by the lens tilt in a multi-pass amplifier

WANG Fang, ZHU Qi-hua, JIANG Dong-bin, HU Dong-xia, DENG Wu, LIU Hua, HUANG Zheng, JING Feng

(National Key Laboratory of Laser Fusion, Laser Fusion Research Center Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract After analyzing the resources of the system aberration in a four-pass amplification system, it was found that some aberrations which have a main influence on the energy concentration in the far field were caused by the off-axis transmission and tilt of lens. Firstly, the influence of the lens tilt at different positions on the system aberration was analyzed with the commercial ZEMAX software. It concludes that the four-pass lens has main influence. Secondly, the relation between the tilted angle of this lens and the aberration components was analyzed and compared based on the Fringe-Zemke polynomial. Finally, experiments were performed to prove the study reasonable. The conclusion provides guidance to control the wave front distortion of the output beams and optimize the design of the similar systems.

Key words laser optics; aberration theory; lens tilt; Fringe-Zemke polynomial

引 言

目前作为惯性约束聚变驱动器的高功率激光装置一般采用离轴四程放大^[1,2]。为了满足惯性约束聚变打靶的需要, 对光束质量, 特别是对光束远场焦斑的能量集中度有很高的要求^[3]。这就对控制装置的波前畸变提出了很高的要求。装置波前畸变的主要来源包括: 装置的固有像差; 光学元件的加工畸变; 光学元件的夹持畸变; 钨玻璃片的热畸变等^[4]。低频波前畸变的增加表现在远场上就会导致远场能量集中度的降低^[5], 采用变形镜的自适应光学校正系统是校正低频波前畸变的有效主动措施。而为了有效地校正低频波前畸变, 就必须对作为低频波前畸变的主要组成部分的系统像差进行仔细分析, 为控制和校正它提供依据。

通常把光束通过某光学元件或某光学系统一次称为一程, 美国的 NIF 装置采用了带大电光开关的全四程放大系统, 通过加长空间滤波器透镜的焦距和合理排布光学元件, 减小光束离轴量和基本不倾斜透镜, 有效控制了破坏性鬼点和系统像差^[6]。而带 U 型反转器的腔内四程光路因其特殊性整个鬼点分布和系统像差的组成都有本质的改变^[4]。针对此类型四程放大系统, LIU 等人^[7]主要分析了光学元件的波前畸变对系统波前的影响, 为光学元件的加工质量提供了依据; 而本文中主要对系统中影响系统波前的另一个主要原因——系统像差在系统中的引入作出了分析。

作者利用像差理论, 根据装置的光路特点对系统像差的构成作出了分析, 指出装置的系统像差主要是由于透镜的离轴倾斜使用引起的, 并对装置中的离轴四程透镜 L_1 进行了详细的分析, 得出的结论对校正装置的波前畸变以及今后的装置优化设计和类似光路的设计有一定的参考意义。

1 光路原理

图 1 为多程放大系统主放大级单束光的光路排布

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术基金资助项目 (20030436); 国家八六三高技术资助项目 (2005AA845050)

作者简介: 王 方 (1979), 男, 研究实习员, 现主要从事高功率固体激光技术研究和光学设计。

Email: mengli_wang@263.net

收稿日期: 2006-02-28 收到修改稿日期: 2006-04-14

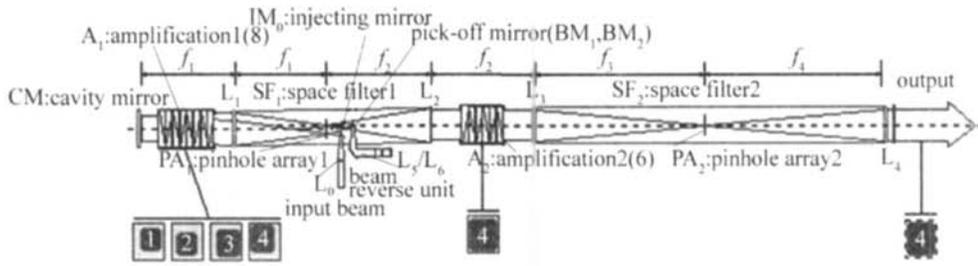


Fig 1 The schematic layout of 4 pass amplification system

示意图。其工作原理是从预放模块输出的激光脉冲从腔内空间滤波器组件 SF_1 的小孔阵列板 PA_1 附近注入,经一小反射镜 M_0 反射后,穿过 SF_1 的透镜 L_1 到达主放大器 A_1 被放大。然后,光束经腔镜 CM 反射回主放大器 A_1 被再次放大。经两次放大后激光束在 SF_1 的小孔阵列板 PA_1 附近被反射镜 BM_1 和 BM_2 导入 U 型光束反转器。光束反转器内插入一小口径等离子体电光开关模块,用于隔离主放大级内部的寄生振荡。光束反转器的角反射器将光束的近场和偏振方向同时旋转 90° ,准直透镜 L_5 和聚焦透镜 L_6 与腔内空间滤波器组件透镜 L_1 构成两级空间滤波器对光束进行滤波。然后,激光束被反射镜反射而返回主放大器 A_1 被第 3 次放大。被放大的光束经腔镜 CM 反射回主放大器 A_1 被第 4 次放大后,经过腔内空间滤波器 SF_1 的输出透镜 L_2 传输到助推放大器 A_2 ,经助推放大后被传输空间滤波器组件 SF_2 滤波。

出于躲避鬼点的需要, L_1 , L_2 和 L_3 分别倾斜了 1.1° , 1.6° 和 1.6° 使用。根据像差理论,单透镜本身具有球差,倾斜和离轴使用透镜引起轴外光束的主光线不与光学系统的各个表面对称轴重合,使出射光束失去对称,引入非对称性像差^[8]。在装置中,影响远场焦斑质量的像差主要是像散、慧差和高阶球差。

2 模拟计算与分析

在进行波前分析时, Fringe-Zernike 多项式经常被用来描述波前畸变,它有 37 项,按不同阶数排列,每一项都对应很明确的物理含义^[9]: 第 1 项为常数,第 2 项~第 9 项分别对应 x 向倾斜、 y 向倾斜、离焦、与轴成 0° 或 90° 像散、与轴成 45° 像散、 x 轴的三级慧差、 y 轴的三级慧差、三级球差等。第 1 项~第 3 项由于和远场质量关系不大^[4],可以略去。利用商用光学设计软件 ZEMAX 计算得到近轴焦点处光束波前,由于所取位置是近轴光线的焦点,离焦量是相对于近轴光线焦点位置,而在实际打靶时,可以通过调节焦点位置等方法,来基本消去离焦对远场能量集中度的影响。因此,在进行透镜不倾斜及倾斜了一定角度后的波前对比时,应该将离焦量也消去。图 2a 图 2b 就是利用 ZEMAX 计算得到多程放大系统实际光路和将透镜全

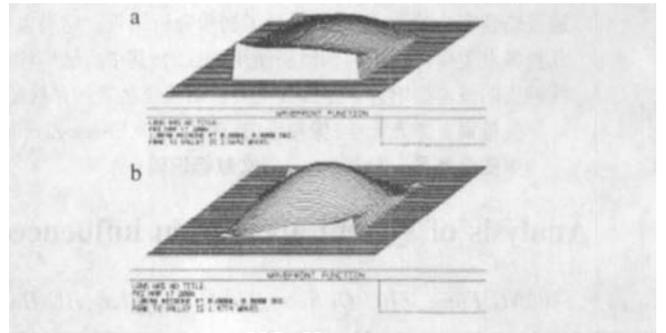


Fig 2 The comparison of wave front aberrance caused by lens tilt (消去了离焦等的影响)。

部正放后的波前(消去了离焦等的影响)。针对如图 1 所示的离轴多程放大构形,由图 2 可以得出以下结论: (1) 透镜的倾斜引起系统像差增大; (2) 透镜倾斜引入的不对称像差,包括像散和慧差,导致波前畸变,特别是低频畸变有较大增加。

装置光路中所需要倾斜的透镜 L_1 , L_2 , L_3 在光路中所处位置不同,参数不同,进而在系统像差中的贡献也不一样。为了确定 L_1 , L_2 和 L_3 的倾斜对系统像差影响的权重,利用 ZEMAX 进行模拟计算,在保持其它透镜均不倾斜的情况下,改变其中一个透镜的倾斜角度,对系统输出的光束利用焦距为 2200mm 理想透射球面进行聚焦,并记录在近轴焦点处光束波前的峰谷

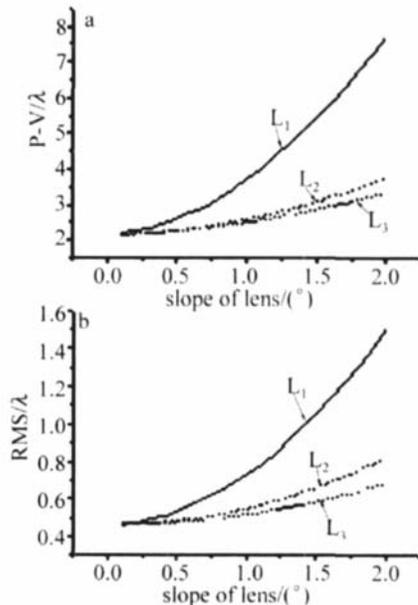


Fig 3 P-V wave front and RMS wave front vs. tilt of lens

值 (P-V 值) 和均方根值 (RMS 值), 画出其随倾斜角度变化的曲线。如图 3a 图 3b 所示。

从图中可以看出, 由于光束是 4 次通过 L_1 与 L_2 , L_3 相比, 随 L_1 的倾斜角度变化, 波前变化要快得多。因此, L_1 的倾角变化所引起的像差变化在整个系统像差变化中所占权重比较大。要控制系统像差, 首先就需要对 L_1 所引起像差变化的规律进行详细分析, 进而为控制 L_1 所引入的像差提供依据。

根据高阶球差近似公式^[10]: $\delta L_s' = \delta L_{0.707} - \delta L_m' / 2$ (其中, $\delta L_s'$ 为高阶球差, $\delta L_{0.707}$ 为 0.707 孔径球差, $\delta L_m'$ 为透镜边缘球差的变化量), 高阶球差的变化主要由边缘球差的变化量引起, 而边缘球差主要由透镜本身的参数决定。在只改变透镜的倾斜角度而不改变透镜本身参数的情况下, 高阶球差数值基本不变。因此在倾斜透镜的情况下, 引起远场能量集中度变化的主要是离焦、像散和慧差这 3 种低频像差。在这 3 种像差中, 慧差对远场能量集中度的破坏最大, 离焦次之, 像散最小^[5]。ZEMAX 直接提供了 Fringe-Zemke 多项式来描述波前畸变, 随着 L_1 透镜倾斜角度的变化, 多项式的各项系数的变化就可以代表所对应的像差的大小变化。图 4a 就是对四孔处的波前进行了 Fringe-Zemke

多项式拟和后, 上述 3 种低频像差所对应的多项式中的 5 项系数随 L_1 透镜倾斜角度变化的关系曲线。从图 4a 中可以看出, 离焦量的绝对值和增长速度与其它像差相比都比较大。出于上面所提到的离焦量的特殊性, 可以对它进行单独考虑。为了方便比较, 将剩下的 4 种像差系数都取绝对值, 得到图 4b。从图中可以看出, 在 L_1 透镜倾斜角度变大的过程中, x 轴和 y 轴三级慧差系数基本上线性增加, 与轴成 45° 像散系数基本保持不变, 与轴成 0° 或 90° 像散系数呈二次曲线增长。

因此, 对于带 U 型反转器的离轴多程放大构形, 当离轴四程透镜 L_1 倾斜角度加大时, 四程输出的: (1) 三级慧差呈线性增长, 绕 x 轴倾斜时, y 轴三级慧差增长较快; 相应的, 绕 y 轴倾斜时 x 轴三级慧差增长较快; (2) 与轴成 45° 像散主要由离轴使用引起, 基本保持不变; (3) 与轴成 0° 或 90° 像散与倾斜直接相关, 呈二次曲线增长; (4) 离焦量呈二次曲线增长, 且比与轴成 0° 或 90° 像散增长得更快; (5) 像散和慧差的增大将降低光束远场质量, 导致远场能量集中度的下降。

3 实验验证

在实际的实验过程中, L_1 倾斜了 1.1° , 将有害鬼点规避到了腔镜镜框上, 图 5 中白圈圈出的两个点即为 CCD 采集到的鬼点的像。同样出于躲避有害性鬼点和笔形光束的影响, L_2, L_3 都倾斜了 1.6° 。

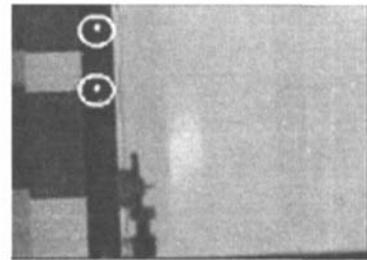


Fig 5 The CCD picture of ghost in age caused by L_1

根据上面的讨论知道, L_1 的倾斜对整个系统像差的影响最大, 因此计算了 L_1 透镜倾斜 $0^\circ \sim 2^\circ$ 时的系统输出波前变化情况 (见图 6)。从图中可以发现整个系统波前的形状有明显的渐变过程, 当 L_1 倾斜角度超过 1° 时, 系统输出的波前 P-V 值有明显的快速增长; 对本

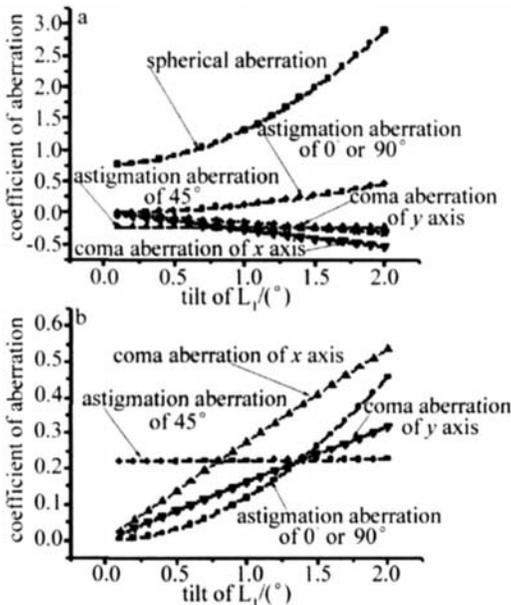


Fig 4 The relationship between 4-pass aberration and tilt of L_1

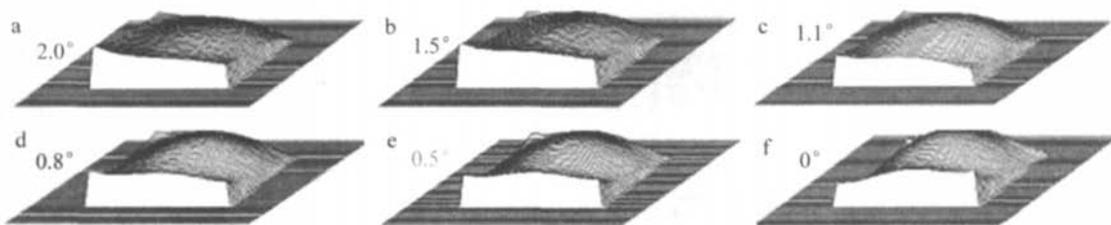


Fig 6 The change of wave front along with the tilt degree of L_1

a— peak to valley is 5 7429 waves b— peak to valley is 4. 9993 waves c— peak to valley is 3. 5692 waves d— peak to valley is 2 4570 waves e— peak to valley is 2 2673 waves f— peak to valley is 1 9771 waves

系统而言, L_1 透镜的倾斜角度超过 1° 时, 对系统像差即有很大影响。

为了验证模拟计算的结果, 在不影响整体实验进程的情况下, 利用微透镜阵列测量了系统的静态和动态波前畸变。微透镜阵列的列阵数为 32×32 数据采集用 512×512 的科学级 CCD 相机来完成。图 7a 为主放大级放大器不工作时, 利用预放大级准连续光测到的全系统静态重构波前, 图 7b 是主放大级放大器工作时所测到的重构动态波前。

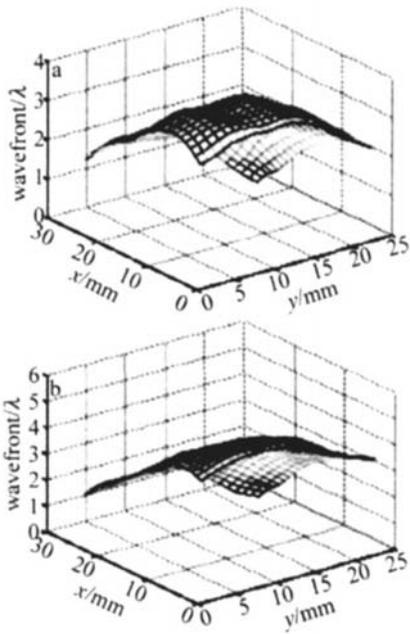


Fig. 7 Wavefront of the output beam in the system
a—wavefront pattern in quasi-static state b—wavefront pattern in dynamic state with output of kilojoules

通过对图 7a 和图 2a 的比较可以发现, 模拟计算和实际测量所得的波前恢复图样无论是数值大小还是整体形状上都非常接近 (由于理论计算时的视角与实际视角相差了 45° , 因此, 波前重构图与理论计算波前视角相差 45°), 说明模拟计算的结果是具有可信性的。而实测的系统波前与模拟计算所得波前相比数值更大、波前形状更不规则, 主要是由系统中各个光学元件引入各种波前畸变引起的; 图 7 和图 2a 图 2b 相比较可以看出, 元件的畸变及热畸变等其它因素虽然造成整个波前畸变大大增加, 但波前形状并未发生大的改变, 波前大小未发生质的变化。说明元件的畸变及热畸变等其它因素对波前畸变的影响是建立在整个光学系统的固有像差的基础上的。

4 小 结

从理论计算和实验验证两个方面详细分析研究了

在如图 1 所示带 U 型反转器的离轴多程放大构型中透镜的倾斜对整个系统的固有像差的影响。实验的结果也进一步证明系统固有像差在整个系统波前畸变的构成中具有非常重要的地位。

通过计算和分析, 明确了在此类大型激光装置中, 出于躲避鬼点等目的, 倾斜透镜后对系统像差有较大影响, 特别是离轴四程透镜的倾斜所引起的像差变化在整个像差变化中权重较大, 对它的倾斜角度应该重点控制。离轴四程透镜的倾斜角度对整个多程系统输出的波前并非是线性上升的, 针对所研究的系统, 倾斜角度在 1° 以上时系统像差增长非常快, 因此应尽量将倾斜角度控制在 1° 左右或以下。在类似光学系统的设计中, 应该尽量考虑不倾斜透镜, 尤其是不倾斜离轴四程透镜, 在不得已的情况下, 要对整个系统进行仔细分析, 找出系统所能容的倾斜角度, 控制因倾斜引入的系统像差的大小。

参 考 文 献

- [1] WANG F, ZHU Q H, ZHANG Q Q *et al* The relations between the first-order ghost image and the focal length in the high power laser facility [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3): 334~336 (in Chinese).
- [2] ZHANG B, LÜ B D. Solution of the inverse of high-power multi-pass amplifier with improved successive iteration method [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(1): 12~14 (in Chinese).
- [3] SHEN W M, WU Q Y, XUE M Q. Optical design of far field beam diagnosis system in Shengguang III intense laser [J]. *Acta Photonica Sinica* 2004, 33(8): 965~969 (in Chinese).
- [4] WANG F, ZHU Q H, JIANG D B *et al* Pilot study of optical design in off-axis and multi-pass amplification systems [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2005, 17(12): 1842~1846 (in Chinese).
- [5] WAN M, SU Y, ZHANG W *et al* Influence of the surface error of optical elements on beam quality [J]. *Acta Optica Sinica* 2002, 22(4): 495~500 (in Chinese).
- [6] ENGLISH R E, MILLER J, LAUMANN C *et al* Optical system design [EB/OL]. http://www.lh1.gov/nif/icf/icfpubs/qtrly_reports/apr-june97/4_english.pdf 2006-02-28
- [7] LIU L Q, JING F, PENG Zh T *et al* Study of the static wavefront distortion of optical elements in the multi-pass amplification system [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2003, 15(3): 241~244 (in Chinese).
- [8] LIX T. Geometrical optics and optical design [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997. 17~29 (in Chinese).
- [9] SHAN B Zh, WANG Sh Y, NIU H B *et al* Zernike polynomial fitting method and its application [J]. *Optics and Precision Engineering* 2002, 10(3): 318~323 (in Chinese).
- [10] YUAN X C. Optical design [M]. Beijing: Science Press, 1983. 37~56 (in Chinese).