

文章编号:1001-5078(2024)09-01352-06

· 激光器技术 ·

自由曲面镜补偿大功率激光波前畸变技术研究

王 钢¹, 唐晓军¹, 王文涛¹, 王 超¹, 刘 磊¹, 赵 鸿¹, 吕坤鹏¹, 李佳蔚²

(1. 中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015; 2. 西北工业大学, 陕西 西安 710000)

摘要:对于一台性能稳定的激光器,在出光阶段整个系统处于热交换的稳定状态,即激光波前分布可以保持稳定不变。基于此特点,提出制造自由曲面镜,以校正激光器的波前畸变,提高光束质量。本文首先介绍了自由曲面镜的波前补偿原理、设计及加工过程,然后通过数学建模,从理论上对其波前补偿能力进行了仿真计算,最后在板条固体激光器中进行了波前补偿实验:在激光器输出功率为12.5 kW时,自由曲面镜对激光光束相位及远场光束质量都有明显的改善和提高。自由曲面镜不像变形镜那样受到致动器间距的限制,因此对于高阶像差的校正也更为有效,且成本低廉,再者也不会增加系统的复杂度,与自适应光学系统相比各有所长。

关键词:自由曲面镜;波前校正;万瓦板条;固体激光器;光束质量

中图分类号:O436;TN248.1 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.09.003

Research on compensation technology for high power laser wavefront aberration with freeform surface mirror

WANG Gang¹, TANG Xiao-jun¹, WANG Wen-tao¹, WANG Chao¹, LIU Lei¹,
ZHAO Hong¹, LV Kun-peng¹, LI Jia-wei²

(1. The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China;

2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710000, China)

Abstract: For a laser with stable performance, the entire system is in a stable state of heat exchange during the working status, that is, the laser wavefront aberration can remain stable and unchanged. Based on this feature, the fabrication of free-form mirrors is proposed to correct the wavefront aberration of the laser and improve the beam quality. Firstly, the wavefront compensation principle, design and manufacturing process of the free-form surface mirror are introduced, then its wavefront compensation ability is theoretically simulated through mathematical modeling, and finally the wavefront compensation experiment is carried out in the slab solid laser. The result is that the free-form surface mirror improves the laser beam phase and far-field beam quality at an output power of 12.5 kW. Unlike anamorphic mirrors, free-form mirrors are not constrained by actuator spacing, and are therefore more effective at correcting higher-order aberrations, are less expensive, and do not add to the complexity of the system, each of which has its own advantages over an adaptive optics system.

Keywords: free-form mirror; wavefront correction; slab; solid laser; beam quality

1 引言

在大功率固体激光器中,一个光路上使用了近百个光学元件,由于光学元件自身制造误差的累积,以及大口径光学元件在装夹中产生的变形等原因,使得系统不可避免呈现出较大的静态波前畸变,此外由于激光器的热畸变效应的存在,同时还存在着较大的动态波前畸变,这两种类型波前畸变直接影响着系统的光束质量。目前,对此类波前畸变的校正主要采用的是自适应光学技术^[1-3],根据哈特曼波前传感器探测的波前误差,由变形反射镜来实时校正整个系统的波前畸变。这种技术的优点是不但能校正系统的静态波前畸变,而且可以通过对系统光路的波前检测实时地调整、修正系统的动态波前误差。但变形镜的波前校正方法也有缺点,主要是系统造价很高,适用于大功率固体激光器波前校正的变形镜及其控制系统费用至少在百万元以上。另外变形镜的校正精度受子孔径间距的限制,而子孔径间距的大小受当前工艺水平的限制,不可能无限减小,因此对激光中高阶畸变成分校正能力十分有限。另一方面,自适应光学系统复杂,占用空间大,在引入自适应光学系统后,必然增加了整个激光装置的复杂程度。

对于一台性能稳定的激光器,在出光阶段整个系统处于热交换的稳定状态,即激光波前分布可以保持稳定不变。基于此特点,本文提出制造与激光波前形状共轭的自由曲面镜,以校正激光器的波前畸变^[4]。

2 原理介绍

自由曲面镜的补偿原理基于波前的相位共轭,即测出激光的相位分布,然后经过计算,加工出与畸变波前相位共轭的自由曲面镜,这样畸变波前经过自由曲面镜反射后,理论上可以校正为理想平面波。板条激光的典型激光波前分布如图1所示。

可以看出,该类型波前畸变中的高阶成分种类较多,其中离焦、象散等低阶像差量较大。考虑到其中的低阶像差可以用柱面镜系统进行消除,因此自由曲面镜设计优先校正波前畸变中的高阶成分。首先使用数学表达式(Legendre多项式)对波前进行描述,然后去除其中不需要校正的部分,如平移、倾

斜、离焦、象散等低阶像差,剩余部分使用自由曲面镜进行校正,以此来实现自由曲面镜对高阶像差的优先校正。

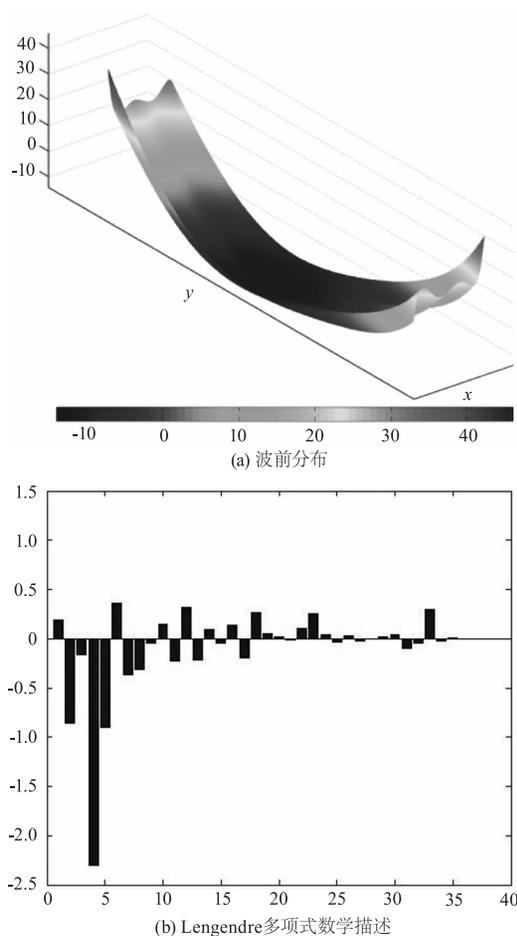


图1 板条激光的典型激光波前分布

Fig. 1 Typical laser wavefront distribution of flat noodles laser

为实现对激光二维波前畸变的准确校正,最关键的就是保证自由曲面镜的加工精度。自由曲面镜采用无氧铜作为基底材料,通过金刚石单点车床完成表面的面型加工^[5-6],为保证自由曲面的加工精度,一是需要对测量得到的波前数据进行处理,去除由于测量噪声引起的数据突变点,避免突然加大金刚石单点车床Z轴的进给速度,从而导致机床加工不出理想的光学面;二是使用二次样条算法对去除的突变数据点进行空位数据补全,代替了常规的使用多项式描述数据阵列的方法,得到连续光滑的规划刀路路径,有效降低了拟合误差。

3 自由曲面镜的加工

3.1 波前测量数据数据突变点识别与去除

波前传感器得到的波前数据为离散数据。由于电信号的漂移等原因,波前误差数据存在背景噪声,

这些噪声数据如果不处理掉,直接用于规划刀路,那么得到的路径刀路在执行时,会造成金刚石单点车床的抖动(z 轴的反应速度不够)。勉强加工后,零件表面表面粗糙度很低,反射率降低。

一般而言,由于背景噪声很小,很难在波前误差图上表示出来,我们取波前误差的一条线分析背景噪声,用差分法将误差提取出来。计算公式如下所示:

$$dz = F_i - \frac{F_{i-1} + F_i + F_{i+1}}{3} \quad (1)$$

其中, dz 代表采样点的背景噪声; F 代表采样点的波前误差; i 代表序号。

当数据与临近两个点的平均值的差值数据超过偏差时,认为这个点是突变点。离散背景噪声分布图如图2所示,明显有好几个点的离散噪声值已经超过了0.06。根据经验数据,一般希望如公式(1)计算得到的数据处在 ± 0.02 间(CCD像元为 $29.6 \mu\text{m}$ 时),超过0.02的数据我们全部当成突变点处理,需要将这些突变点从原始数据中扣除,从而得到光滑的离散数据点。

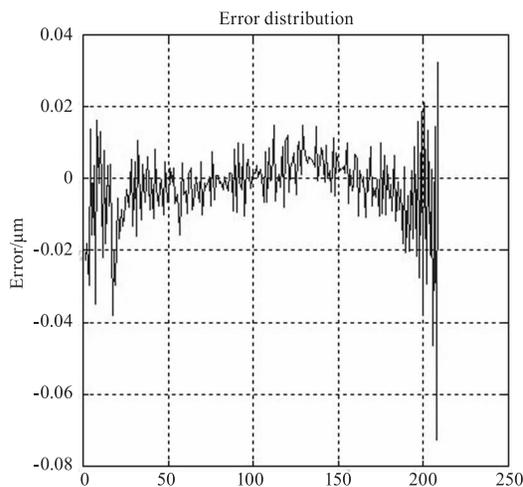


图2 CCD噪声分布图

Fig. 2 CCD noise distribution map

3.2 使用样条曲线拟合自由曲面

尽管多项式有很多优点,但是本文所讨论的曲线(面)无法用多项式来精确表达(使用最小二乘法拟合时,拟合后的残余误差值一直居高不下),此时如果强行用多项式方程来描述就会失去其本来的意义,最终导致校正后的波面 PV 和 rms 值均不能满足要求。本文选择用样条曲线^[7]来描

述所需要的自由曲面。用样条曲线描述有以下性质:①具有二阶几何连续性,②不存在拐点和奇异点,③可以描述局部细节。因此其更适合与描述自由曲面数据矩阵。

对测量得到板条激光波前(去除低阶像差)用样条曲线拟合后,考察拟合后的残余误差。图3(a)为原始波前分布图,图3(b)为拟合后方程构造出来的波前分布图,明显拟合后的波前畸变更加平滑(等高线更加圆滑)。

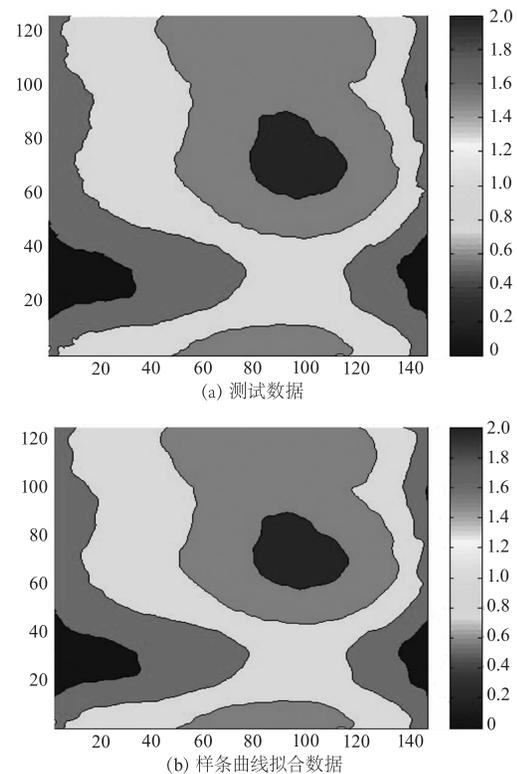


图3 拟合前后波前分布对比图

Fig. 3 Comparison of wavefront distribution before and after fitting

图4显示了在一条线上进行的数据采样分析。“十字”线代表原始曲线,此时其数据采样点比较稀疏。细点划线代表实际刀路所需要的数据,粗点划线代表采样误差(图中为了表述清楚,将误差扩大了10倍)。通过计算,误差小于 $0.005 \mu\text{m}$ (实际计算中我们要控制其采样误差小于 $0.2 \mu\text{m}$)。

3.3 耐高温辐照设计

考虑自由曲面镜要用于高功率的激光波前校正,因此需要对其高功率密度激光照射下的温升进行控制,避免由于温度过高带来的镜面面型变化而引起额外的波前畸变。文中采取两种方法,一是在

自由曲面镜镀高反射率的介质膜;二是在自由曲面镜背面采用微通道设计,采用通水冷却的方式控制镜面温升,如图5所示。

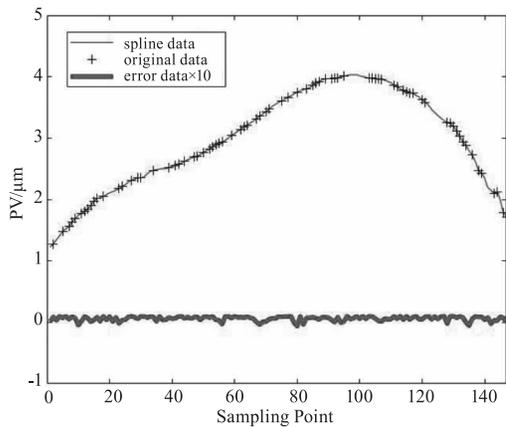


图4 在一条线上进行采样

Fig.4 Sampling on a single line

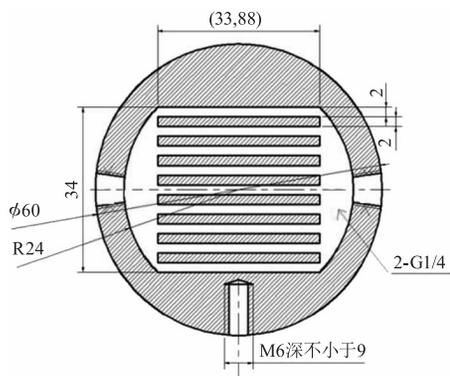


图5 自由曲面镜背面水冷通道设计

Fig.5 Design of water cooling channel on the back of freeform mirror

4 实验过程和结果

4.1 实验光路

实验是基于端泵的板条固体激光器进行的,激光器满功率工作时,平均输出功率为12.5 kW。在激光链路后搭建自由曲面镜校正系统,使用SID4波前探测器,获取经自由曲面镜反射后输出的legendre 像差系数作为闭环校正的误差信号;通过控制三向位移台和旋转台调节自由曲面镜,实现对像差的稳定控制,达到最佳补偿效果。试验方案如图6所示。实验分为两步:第一步:在激光器满功率工作时,测量未加入自由曲面镜时激光的波前分布和远场强度;第二步:在激光器满功率工作时,测量加入自由曲面镜后激光的波前分布和远场强度,然后对二者进行比较。同时,使用热像仪对自由曲面镜的温升进行了测量。

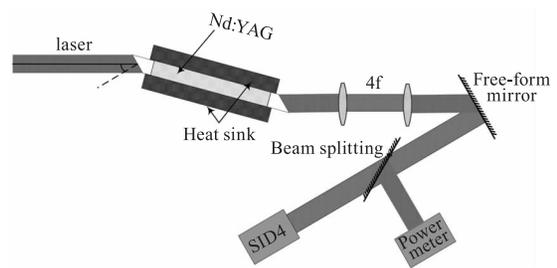
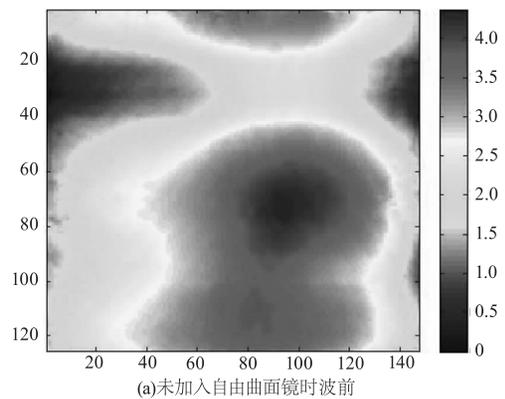


图6 自由曲面镜波前补偿实验方案

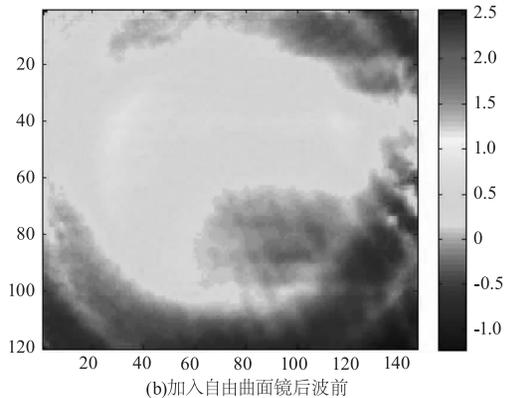
Fig.6 Experimental scheme for wavefront compensation of freeform mirror

4.2 实验结果

图7为加入自由曲面镜前后测量所得激光波前分布情况:在未加入自由曲面镜时,波前 $PV = 4.5 \mu\text{m}$;加入自由曲面镜后,波前 $PV = 1.2 \mu\text{m}$ 。



(a)未加入自由曲面镜时波前



(b)加入自由曲面镜后波前

图7 加入自由曲面镜前后波前变化对比

Fig.7 Comparison of wavefront changes before and after adding a freeform mirror

图8为使用Legendre多项式对补偿前后波面的表达式的各项系数的变化情况,可以看出,经自由曲面镜补偿后的波前像差的Legendre表达式的系数从第六项开始都控制在0.4之内,相比补偿前的系数明显变小。图中Legendre表达式的前五项分别为平移,两维倾斜,离焦和象散,这五项没有变化是

因为设计自由曲面镜时没有考虑这几种像差:平移和倾斜不影响光束质量的评价,离焦和象散可以使用柱面镜系统予以消除,然后再使用自由曲面镜对剩余的像差进行校正,以此实现自由曲面镜对高阶像差的优先校正。

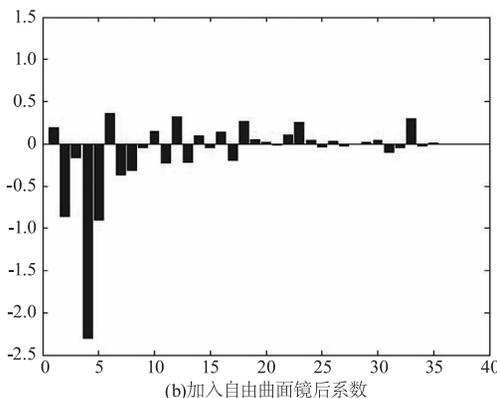
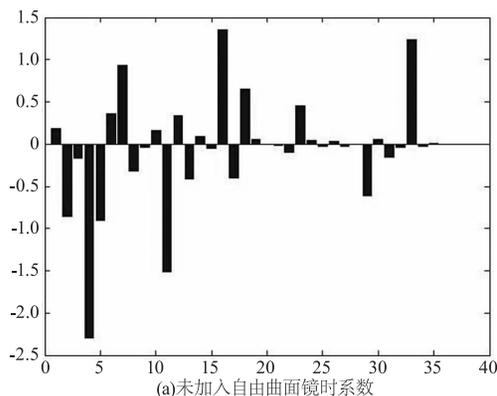


图 8 加入自由曲面镜前后波前 Legendre 系数对比
Fig. 8 Comparison of Legendre coefficients before and after adding a freeform mirror

图 9 分别为用 CCD 采集使用自由曲面镜前后万瓦激光的远场变化情况:图 8(a)为在未加入自由曲面镜时,远场 $\beta = 10.2$;图 8(b)为经自由曲面镜校正后,远场 $\beta = 2.8$ 。

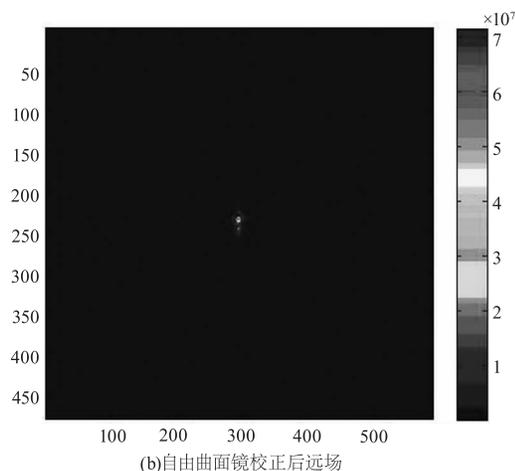
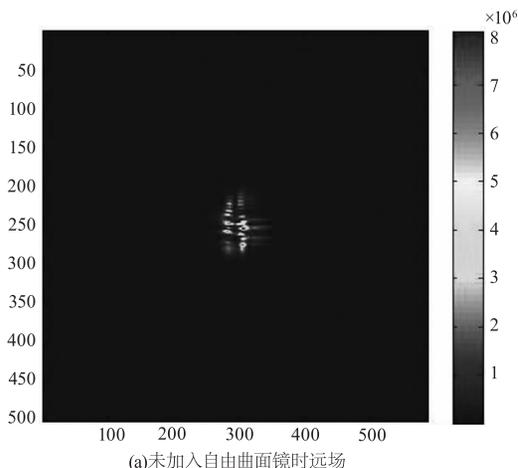


图 9 经自由曲面镜校正后远场对比
Fig. 9 Far field comparison before and after compensation with a freeform mirror

图 10 为出光过程中自由曲面镜表面的温度变化情况,可以看出,在功率密度 14 kW/cm^2 ,出光 50 s 的条件下,自由曲面反射面温度基本没有变化,说明通过相关温控设计,自由曲面的反射面温度非常稳定,不会由于激光照射带来额外的波前畸变,将其用于高功率激光波前校正是可行的。

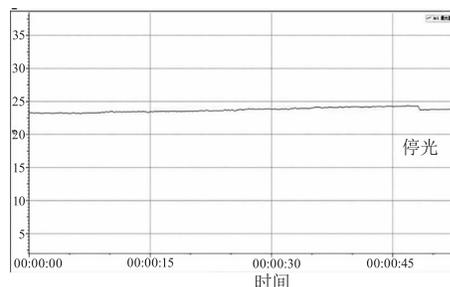


图 10 自由曲面镜激光辐照温升情况

Fig. 10 Temperature rise during laser irradiation of free-form mirror

5 总结

通过自由曲面镜的精细加工以及对万瓦激光的波前补偿实验可以看出,自由曲面镜对激光光束波前及远场光束质量都有明显的改善和提高。在激光器输出功率为 12.5 kW ,功率密度 14 kW/cm^2 时,自由曲面镜对激光光束近场强度、相位及远场光束质量都有明显的改善和提高,校正效果显著,并且其反射面温度稳定,由此也说明了自由曲面镜波前校正方法的可行性和有效性,该方法与使用变形镜校正的方法相比各有所长。

参考文献:

[1] Walter Lubeigt, Gareth Valentine, David Burns. Enhancement

- of laser performance using an intracavity deformable membrane mirror[J]. *Opt. Express*, 16(15):10943–10955.
- [2] Wang Jian, Chen Xianhua, et al. Application of CNC polishing in wavefront distortion correction[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1). (in Chinese)
王健, 陈贤华, 等. 数控抛光加工应用于波前畸变校正[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(1).
- [3] Wang Gang, Liu Lei, et al. Research on wavefront precompensation technology of high energy lasers[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(9):1344–1349. (in Chinese)
王钢, 刘磊, 等. 高能激光器波前预补偿技术研究[J]. *激光与红外*, 2023, 53(9):1344–1349.
- [4] Jin Qi, Huo Hongwei, et al. Design of free-form surface reflector for wave-front correction[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(2):169–173. (in Chinese)
金奇, 霍宏伟, 等. 用于波前校正的自由曲面反射镜设计方法研究[J]. *激光与红外*, 2017, 47(2):169–173.
- [5] Xu Q. Optimizing parameters for computer controlled polishing precision planar mirror[J]. *SPIE*, 2000, 4231:156–162.
- [6] R K Tyson. *Principles of adaptive optics*[M]. 2nd ed, San Diego: Academic Press, 1998:214–218.