

光学学报

高功率激光驱动器中的若干关键工程光学问题

朱健强^{***}, 杨朋千^{*}, 张艳丽^{**}, 刘诚, 周申蕾, 刘志刚, 唐顺兴, 郭爱林, 樊全堂, 刘代中, 张国文, 孙明营, 焦兆阳, 张燕, 康俊, 焦翔, 张雪洁, 任志远, 潘良泽, 黄大杰, 张笑琪, 朱坪, 华能, 姜卓偲, 王良玉, 杨雪莹, 杨富丽, 张琰佳, 林炜恒

中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

摘要 高功率激光装置是一个复杂的有源巨型光学工程,其性能指标要求逼近科学技术与物理极限。驱动器研制有物理设计、工程光学和结构工程设计三大过程,工程光学在其中起着重要作用。高功率激光装置工程光学设计需遵循其特有的设计原则和要点,以保证装置的高性能。根据驱动器设计指标和设计特点,从总体光学设计、光束质量控制以及光束打靶精度控制方面,综述了高功率激光装置工程光学设计中的关键科学技术问题以及相应解决方法,为未来高功率激光驱动器的发展提供必要的工程设计参考。

关键词 光学设计; 惯性约束聚变; 神光装置; 工程光学; 激光光学

中图分类号 O437 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS222126

1 引言

高功率钕玻璃激光驱动器是目前国际公认用于惯性约束聚变物理研究最成熟的激光驱动器,它也是开展高能量密度物理、极端条件物理问题研究和天体物理基础研究的重要平台。作为目前世界上最具代表性的巨型光学工程之一,激光驱动器集中了光学、激光、精密机械以及计算机控制等学科的先进研究成果,其规模与总体性能代表了一个国家强激光技术与工程的最高水平。世界科技强国均开展实施了激光聚变研究和驱动器研制计划,先后研制和建造了几代高功率激光装置。美国已经在 2009 年建成了世界上最大的激光聚变实验装置——国家点火装置(NIF)^[1]。法国正在建造与美国国家点火装置类似的大型激光核聚变装置 LMJ^[2],其中的 56 束激光已在 2019 年实现全能量运行。日本、英国、俄罗斯也已经或正在建造规模较小的激光核聚变装置^[3-5]。我国在激光聚变研究的国际舞台上也占据了举足轻重的地位,先后建造了大型单路激光装置、六路激光装置及神光系列激光装置等^[6-9]。随着我国高功率激光装置的迭代更替,驱动器总体、单元技术和元器件技术也得到了快速发展和进步。

高功率激光装置主要包含两大类型:纳秒激光装置和皮秒拍瓦激光装置。纳秒激光装置单路输出万焦耳级高能纳秒激光,皮秒拍瓦激光装置单路输出数

千焦耳的高峰值功率皮秒激光,它们的基本构成见图 1 和图 2。纳秒激光装置主要包含前端、预放大、主放大和终端靶场、参数测量和控制系统。前端系统为整个系统提供高质量的种子光源;预放大系统实现能量预放大,提供可控的高品质激光;主放大系统实现脉冲能量放大,提供高质量的基频激光;终端靶场系统实现激光多束编制和频率转换,提供高性能的三倍频激光;参数测量和控制系统作为支撑系统实现主激光的参数测量和光束控制。皮秒拍瓦激光装置主要包含脉冲产生、主放大和皮秒终端、参数测量和控制系统。脉冲产生系统为装置提供高信噪比的种子源以及对展宽的啁啾脉冲激光进行能量预放大;主放大系统实现啁啾脉冲的放大,皮秒终端系统则通过压缩光栅,实现脉冲由纳秒到皮秒级的放大;参数测量和控制系统作为支撑系统实现主激光的参数测量和光束控制。

高功率激光装置的设计分为能流设计、光束传输设计,这是激光驱动器的激光物理设计,在此基础上开展工程光学设计和精密光机结构设计,最后开展激光驱动器的研制,研制流程如图 3 所示。由此研究逻辑可以看到工程光学在激光驱动器研制过程中发挥了重要作用。高功率激光装置需要满足输出能力、光束质量、光束可控性等要求。装置的核心指标主要包括能量、功率、光束质量(焦斑分布)、波形(时间分布)、能量平衡和功率平衡、同步及打靶精度等,其中光束质量和

收稿日期: 2022-12-09; 修回日期: 2023-01-18; 录用日期: 2023-02-08; 网络首发日期: 2023-02-20

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA/25020000, XDA/25020203)

通信作者: *yangpengqian@siom.ac.cn; **zhangyl@siom.ac.cn; ***jqzhu@siom.ac.cn

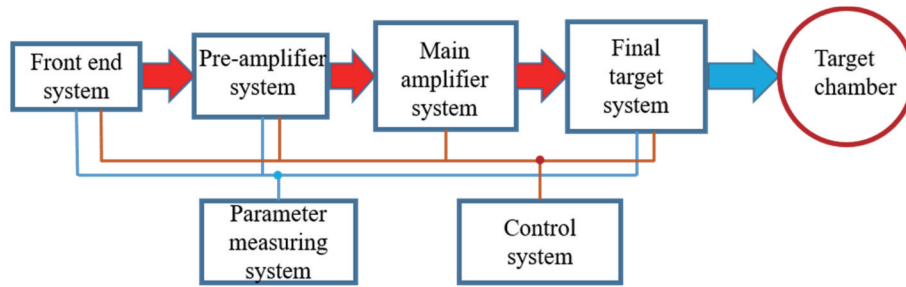


图 1 纳秒激光装置的单链路结构示意图

Fig. 1 Schematic of a chain of nanosecond laser facility

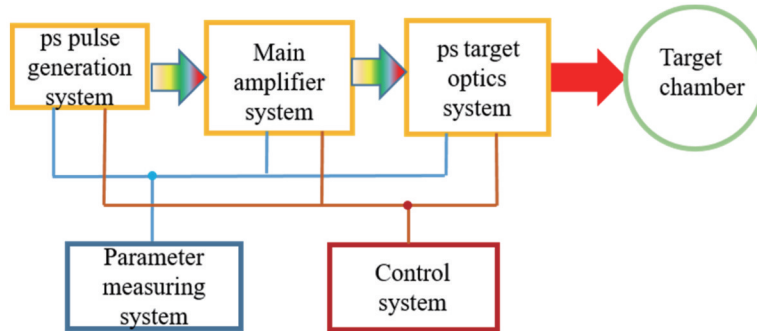


图 2 皮秒拍瓦激光装置的单链路结构示意图

Fig. 2 Schematic of a chain of picosecond pat-watt laser facility

打靶精度指标与工程光学设计紧密相关。由于高功率激光装置规模大、激光链路长、光学元件口径大,若要

满足上述指标的要求,各个研制过程需要有机结合,各系统指标合理分配,并对全系统实行策略管控。

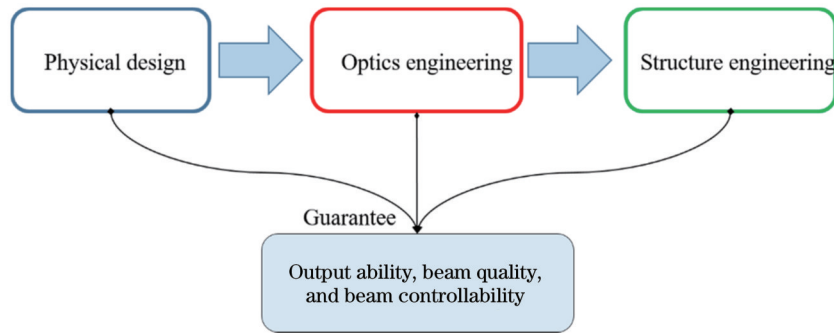


图 3 高功率激光装置研制过程

Fig. 3 Design process of high power laser facility

高功率激光装置的工程光学具有特殊性,装置中不仅包含传统的静态元器件,还包含激光放大、控制型元件等动态元器件。由于热效应,激光通过放大元件后,其光束质量出现劣化,需要辅以控制手段来保证系统具有良好的光束质量。另外,装置的输出能量高,可能会引起光束元件损伤,需采取必要措施将损伤风险降到最小来保证安全运行。本文从工程光学的主体-光学设计方面以及如何保证系统光束质量和打靶精度两大关键指标方面入手,综述了现有装置工程光学中所关注的关键科学技术与工程问题。装置总体光学设计主要是“搭框架”,建立整体光学传输链路,并给出元器件的指标要求;光束质量控制是“筑方法”,线性传输和非线性传输贯穿整个激光装置链路,不仅需要整体统筹考虑,并明确光学元件指标与光束质量的对应关

系以及特殊光学元件设计加工和检测方法,还需要匹配相应的光学检测手段和主动控制方法,对系统的残余波前以及强度不均匀性进行高精度度控制,以确保整个光束链路的光束质量;打靶精度是“夯地基”,主要给出指标的分解方法和有效的光轴控制手段,同时配合精确引导与准直技术。最后展望了我国高功率激光驱动器未来发展的基本趋势,为高功率激光驱动器的进一步发展提供必要的工程设计参考。

2 激光驱动设计中关键工程和科学问题

2.1 驱动器光学设计

2.1.1 驱动器总体光学链路

以物理需求为目标,从靶物理参数设计中分解获

得驱动器的总体性能指标。一般情况下,对基频远场质量的要求为 10 倍衍射限(纳秒激光,95% 环围能量)和 3 倍衍射极限(皮秒激光,50% 环围能量),对打靶精度指标的要求为 $6 \mu\text{rad}$ 。待装置设计总体方案和单元技术方案确定后,开展工程光学设计。为了获得良好的光束质量,不仅要求设计系统的像差最小,还要求全光路光学设计中遵循像传递原则,光束口径逐级增加。为了降低器件损伤风险,首先需要规避和控制系统杂散光。装置总体光路设计分为装置单光路设计和集束光路设计,单光路设计侧重于各个系统的光学设计,并最终给出元件公差要求和元件指标性能要求。集束光路设计中要尽可能保证各光路的光程相等,主要完成光路的集成化设计,确定各束光路的间距和布局等。本文主要侧重于描述单光路光学设计,并以典型装置神光 II 光路为例进行阐述。

纳秒激光装置主要采用光纤前置、多程预放大、大口径电光隔离开关、多程主放大和楔形靶镜聚焦相结合的总体技术设计思路。纳秒激光装置的总体光路排布如图 4 所示,光束从全光纤前端输出后,进入预放大系统。预放大系统包含再生放大、光束控制、多通放大、光束传输等功能组件;再生放大器将能量提升至数

十 mJ;光束控制组件实现光束近场整形和光谱预补偿,其中包含的多个空间滤波器可实现光束传输和口径变换;多通放大组件基于电光开关实现内外腔多通放大,由 3 台空间滤波器实现光束传输和变换;光束传输组件利用一台空间滤波器将光束口径调整到所需要的数值,通过二次光阑进行二次整形,实现与主放大系统的注入像面位置匹配。主放大系统采用“内腔四程放大+助推双程放大+大口径电光开关”的等口径多程放大结构,整个系统由片状放大器、腔内空间滤波器(CSF)、传输空间滤波器(TSF)和组合式腔反射镜、隔离组件等单元组件构成。终端靶场系统包括光束传输组件和终端光学组件。每束激光利用 4 块或 5 块大口径基频反射镜将基频激光导引传输到终端光学组件,最终将激光聚焦在靶点打靶。终端光学组件主要包含 10 个光学元件:利用基频真空窗口保证终端的真空环境;利用 KDP/DKDP 晶体实现三次谐波高效转换;一维离轴打靶透镜不仅将三倍频激光高质量聚焦在目标靶上,还起到靶面谐波分离的作用,实现纯净的三倍频激光打靶;通过基频、倍频连续相位板和偏振匀滑晶体实现对焦斑的整形控制;利用光束取样光栅实现光束取样。

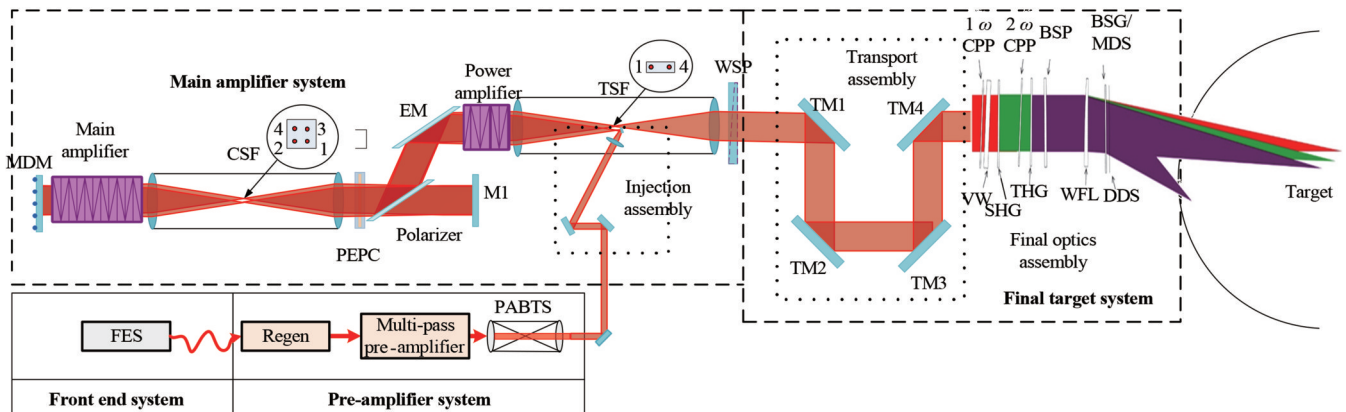


图 4 纳秒激光装置的总体光路排布示意图

Fig. 4 Overall lightpath layout of nanosecond laser facility

皮秒拍瓦激光装置采用“光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)、多程啁啾脉冲放大(CPA)、大口径电光隔离开关、多程主放大和大口径光栅压缩”总体技术设计思路。皮秒拍瓦激光装置的总体光路排布如图 5 所示。皮秒拍瓦激光装置的脉冲产生系统主要包含锁模激光器、皮秒 OPCPA 种子源和展宽器、微调压缩器、纳秒 OPCPA 放大和棒放组件,且该系统内通过多台空间滤波器实现光束传输和口径变换;皮秒拍瓦激光装置的主放大系统和纳秒激光装置的主放大系统相同,在此不再赘述;皮秒拍瓦激光装置的终端系统采用米量级的大尺寸介质膜光栅主压缩器,采用四光栅单通光学结构,合理选择压缩器的光束入射角、光栅参数、排布方式,使用真空变形镜完成皮秒终端系统的波

前像差校正,并采用离轴抛物面镜和投射反射镜组合实现宽频带的激光聚焦和激光落点的灵活调整。

下面详细介绍主放大系统和靶场系统的光路设计。主放大系统和靶场系统光路根据像传递面要求进行协调匹配。根据靶场传输总光路排布要求,首先初步确定靶场总体光程,然后评估主放大系统的尺寸要求。在这两个系统的具体光路设计中一方面考虑像差的影响,另一方面考虑鬼像规避问题。

2.1.2 主放大系统光路设计

主放大系统是占有空间最大的系统,因此以实际边界条件为依据开展设计。首先,根据主放大系统光学总长度和像传递面的要求^[10],确定空间滤波器的焦距;然后,根据系统口径扩束的要求,确定注入透镜的

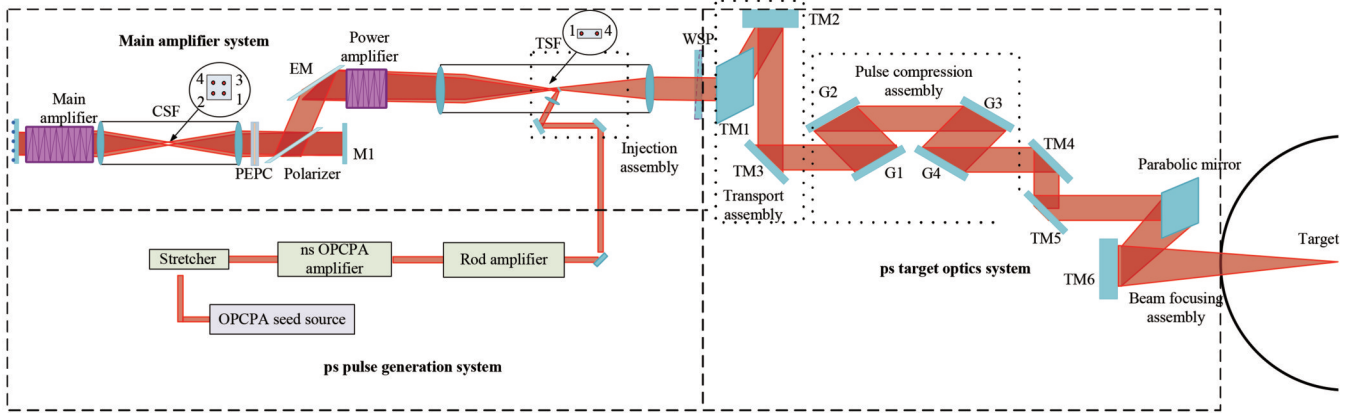


图 5 皮秒拍瓦激光装置的总体光路排布示意图

Fig. 5 Overall lightpath layout of picosecond pat-watt laser facility

焦距和物面距离;最后,根据主放大口径元件的真空抗压性能、自身强度和最小像差,确定透镜的形状和材料。另外,主放大光路的设计需要遵循杂散光规避原则^[11],在鬼像聚焦点避免放置光学元件,在鬼点相应位置放置吸收体以规避杂散光。主放大光路如图 6 所示,光束经过组合透镜后通过 TSF 的 1 孔,然后进入腔

放大器,并在通过 CSF 的 1 孔变形反射后进入第 2 程,通过隔离组件偏振产生变化,实现 3 程和 4 程传输,最后从腔放大器输出,进入 TSF 的 4 孔。光束在腔内为离轴传输,且腔内是一个严格的像传递系统^[7],光束由主放大系统输出后,通过 TSF 空间滤波器将像面传输到频率转换晶体附近。

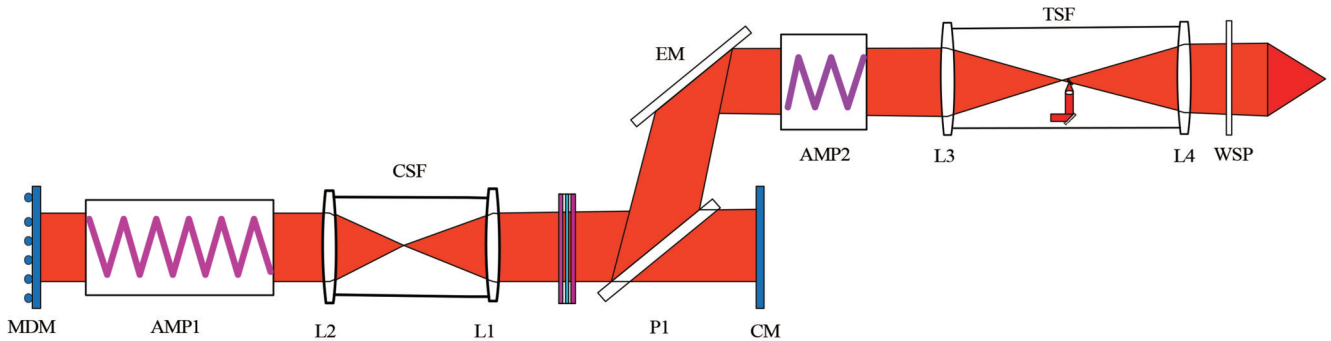


图 6 主放大光路图

Fig. 6 Lightpath of main amplifier system

主放大系统的 CSF 透镜采用非球面设计,并垂直放置。在零视场的理想情况下,由单个透镜带来的波前像差很小。由于主放大系统为四程离轴放大系统,CSF 透镜需在一定的视场角度下使用,因此单个透镜在焦点处会产生像差,该像差主要是彗差和像散。彗差的大小与光束的视场角度方向有关,每一程的彗差都可被校正。在非零视场角度下,CSF 的单程像差主要为像散,因四程对称,CSF 透镜产生的彗差和像散会相互抵消,近场像差分布如图 7 所示。通过 CSF 四程放大系统后,剩余的像差主要为球差和场曲项,由 CSF 四程放大系统带来的像差绝对量很小,峰谷(PV)值约为 0.0023λ 。主放大系统的 TSF 透镜也采用了非球面设计,与 CSF 的不同之处在于,TSF 透镜为满足规避鬼像的需求,需要使用倾斜安装方式^[12]。单个 TSF 透镜的零视场波前像差很小,主要是像散和彗差项,但在倾斜一定的角度后,所带来的像差则较大。理

想光束通过单程 TSF 后,像差如图 8 所示。可以看出,TSF 透镜的倾斜安装会导致输出波前为瓦楞形分布,其像差主要为像散和球差项,这种近场波前会导致末级输出激光的远场在水平方向上拉长。

主放大系统的全光路像差如图 9 所示,理想情况下系统最终的总体像差 PV 值为 0.78λ 。注入段空间滤波器输入透镜采用组合透镜,系统像差主要来自注入透镜、TSF-1 程的倾斜透镜和 TSF-2 程的倾斜透镜,CSF 引入的像差绝对量基本可以忽略。系统设计完成后,开展元件公差和系统公差分析。

2.1.3 靶场系统光学设计

靶场系统的光路排布、真空靶室和终端光学组件设计主要由聚焦透镜 F 数和楔形板参数决定。聚焦楔形透镜的参数设计主要需要考虑靶场的高度和终端光学组件的 B 积分增量^[13]。靶场的高度限制要求靶镜焦距不能很长,但在短焦距下楔角较大,厚度也较

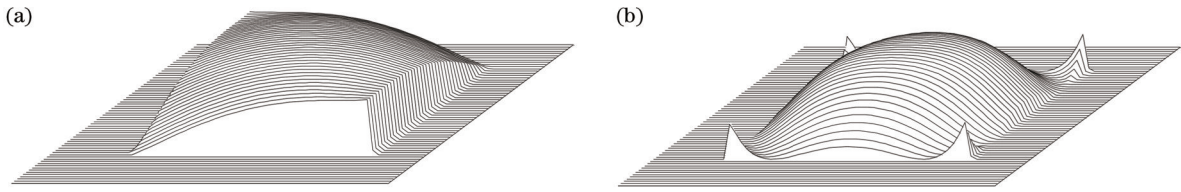


图 7 CSF 单程和四程近场像差分布。(a)单程像差;(b)四程像差

Fig. 7 Aberration distributions of single-pass and four-pass near-field of CSF. (a) Single-pass aberration; (b) four-pass aberration

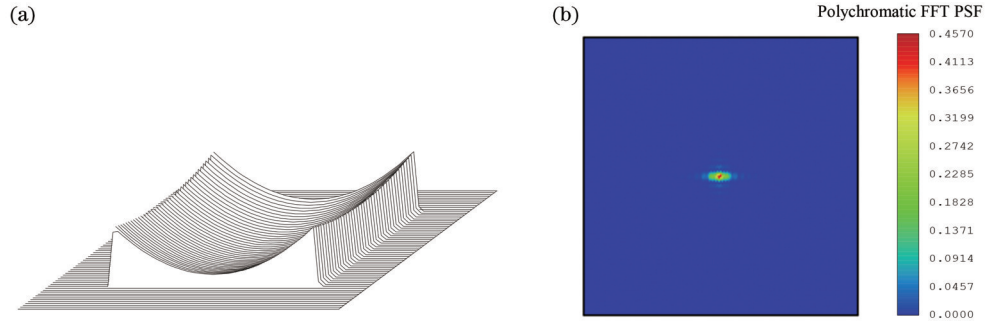


图 8 TSF 输出波前和点扩散函数(PSF)分布(倾斜角为 0.98°)。(a)波前分布;(b) PSF 分布

Fig. 8 Wavefront and PSF distribution of TSF (inclined angle is 0.98°). (a) Wavefront distribution; (b) PSF distribution

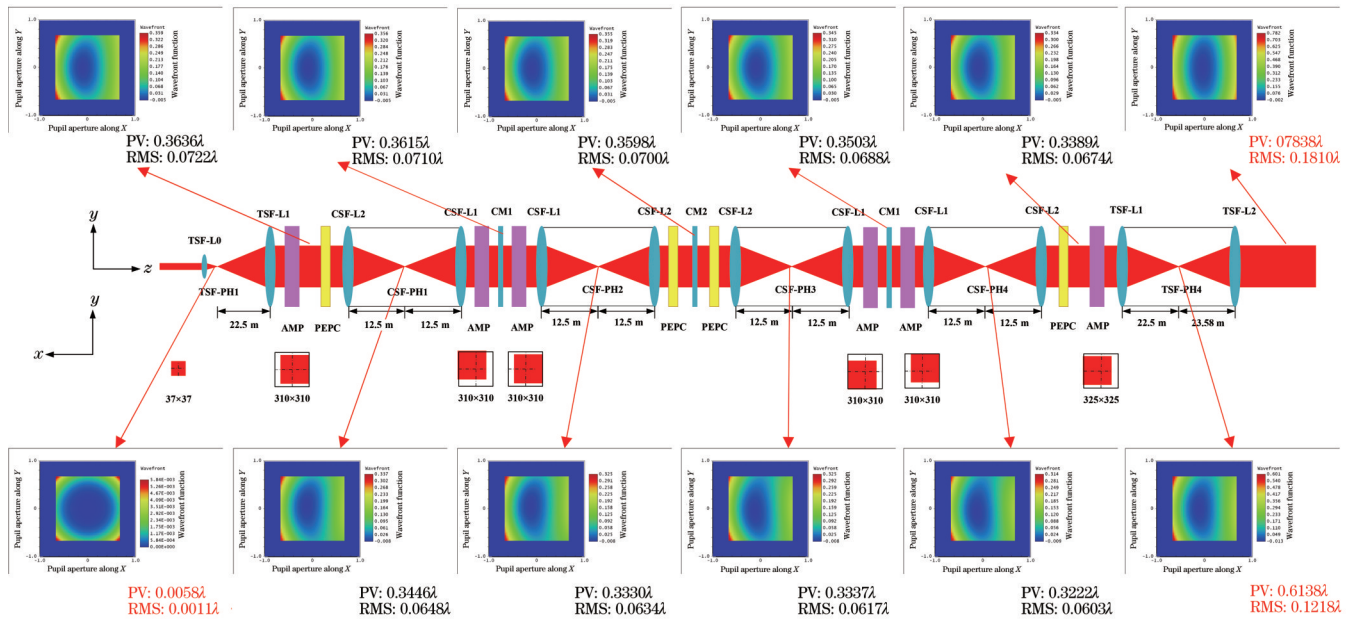


图 9 主放大系统全光路像差分析

Fig. 9 Full lightpath aberration distributions of main amplifier system

大, 从而造成 B 积分增量过大, 容易引起小尺度自聚焦破坏。因此, 在设计中需要尽可能地利用靶场的高度空间, 并分析和控制运行通量下的 B 积分增长情况。图 10 为神光 II 升级靶场排布的剖视图, 设计终端靶镜的焦距为 2234 mm, 靶面焦斑处色分离距离为 2 mm。

神光 II 升级靶场^[14]八路纳秒激光的光路排布如图 11 所示。光路为南北各四路对称排布, 第 1、3、5、7 路光在上层, 第 2、4、6、8 路光在下层。每路采用 4 块反射镜的方式引导激光注入真空靶室。4 块反射镜中前 3 块反射镜的方位角和俯仰角分别为 $45^\circ, 0^\circ$, 或 $0^\circ, 45^\circ$, 仅最

后一块反射镜的方位角和俯仰角分别为 $32^\circ, 20^\circ$ 。

皮秒拍瓦激光装置的终端具有三大功能: 1) 可实现 3 个数量级的脉冲宽度压缩; 2) 可实现宽频带且激光焦斑直径小于 $300 \mu\text{m}$ 的空间聚焦, 其中 50% 的能量集中于 3 倍衍射极限; 3) 可保证激光系统落点的瞄准稳定性, 实现靶定位和激光引导, 最终完成多功能激光脉冲在靶场的物理实验任务。

如图 11 所示, 皮秒拍瓦激光装置终端的光学设计遵循对称、等光程的基本设计原则, 使得各个组件能够同时完成脉冲压缩、真空段波前校正、光束自动准直、

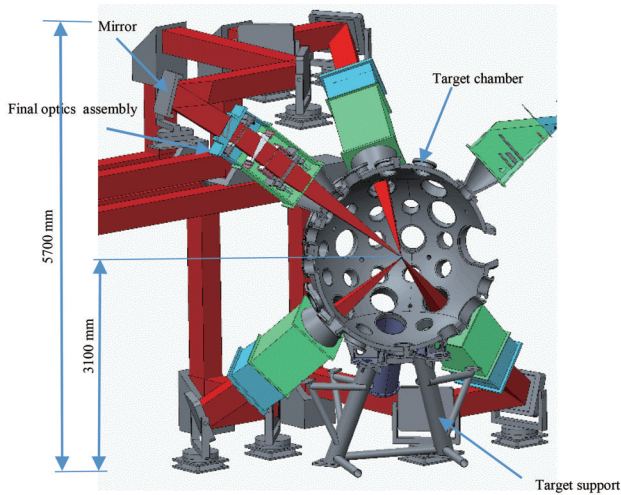


图 10 靶场终端光学组件的剖视图

Fig. 10 Section view of final optics assembly

聚焦、精密参数诊断等功能。压缩和聚焦分系统以平面反射镜、反射式衍射光栅、真空变形镜和离轴抛物面镜 4 类主要光学元件完成激光传输、脉冲宽度压缩、激光波前校正、宽频带激光聚焦、靶定位和激光引导。

2.1.4 杂散光抑制系统设计

高功率激光的杂散光主要是由光学系统各元件表面、边缘面、光阑面、镜筒和检测面的反射与散射造成的,其中平面元件多重反射和透镜表面多重反射是产生鬼像的最主要原因^[15]。大部分光学元件的表面都镀

有增透膜,但是这些表面的微小反射(即使只有 0.1% 的相对能量)经会聚后仍具有较高的峰值功率。特别是当这些反射的鬼光束经过一系列非线性放大和聚焦,峰值功率出现激增,对各种光学元件和整个系统产生较大的破坏,甚至会引起气体击穿产生等离子体,严重影响激光的光束质量和传输特性。因此,反射鬼点是高功率激光装置光学设计中必须要考虑的重要问题,它决定了整个实验装置的排布、各光学器件的空间间隔和透镜的形状,然而大功率激光系统的结构一般比较复杂,光学元件种类繁多,空间排布各不相同,导致鬼像分析的难度较高,一般进行光学设计时会根据鬼点位置考虑规避与控制问题。

高功率激光装置中还有一种特殊的杂散光——笔形光束,其形成过程如图 12 所示,是一部分鬼光束通过空间滤波器小孔形成的,它的特点为:1)指向性好;2)由于笔形光束只是鬼光束的一部分,即使鬼光束指向有很大角度的倾斜,也无法规避笔形光束;3)时间上与主激光分离。笔形光束的危害在于经过放大器的放大以及传输中形成的自激振荡,笔形光束的强度显著增强,并会在主光束近场上形成局部强区,而且会一直伴随主光束传输,甚至对元件产生破坏。可从以下两个方面抑制笔形光束形成自激振荡:一方面,由于笔形光束在时间上与主光束分离,可以通过开关进行隔离;另一方面,通过倾斜部分元件偏离小孔位置的方法将笔形光束反射出主光路,避免其形成自激振荡。

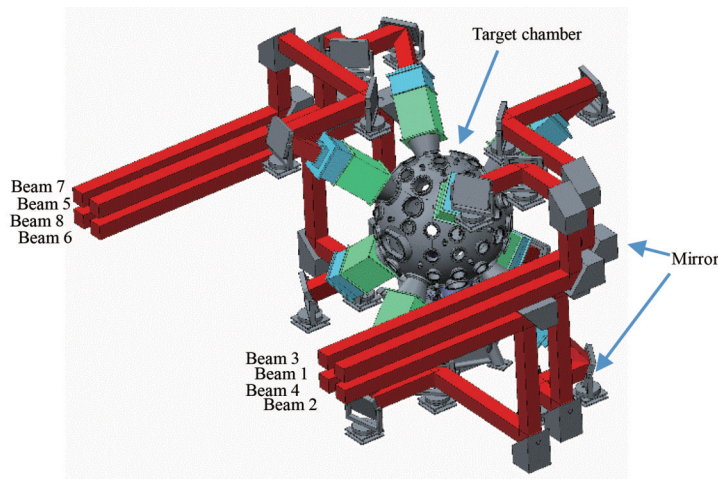


图 11 靶场八路纳秒激光的光路排布示意图

Fig. 11 Eight nanosecond beams configuration of target bay

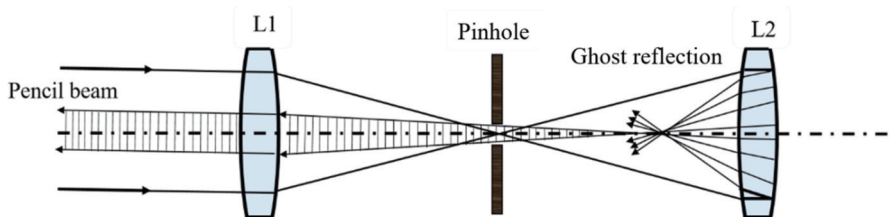


图 12 笔形鬼光束形成示意图

Fig. 12 Schematic of pencil ghost beam formation

抑制杂散光的措施主要如下:主放大系统的光学设计要综合考虑鬼点位置来确定元件距离,如 CSF 透镜和腔放大器之间需要留有足够的距离以规避一阶次鬼点,TSF 透镜和助推放大器之间也需要留有足够的距离以规避一阶次鬼点;光学排布中通光窗口与光轴形成一定的倾斜角度,避免鬼像在光学系统中传输而形成有破坏力的杂散光;在计算得到的能量较大的杂散光位置放置吸收体来吸收杂散光,如在助推放大器附近加放吸收体;利用空间滤波器小孔有限的孔径角隔离部分杂散光;改进机械表面涂层质量,加强对杂散光的吸收,提高抗辐照能力;通过倾斜安装 TSF 透镜的方式来规避很强的鬼像点和笔形光束。采用大口径电光开关对主放大系统级间反向激光进行隔离,一般在空间滤波孔的附近位置设置必要的吸收体进行吸收。

终端光学组件需实现真空密封、焦斑控制、谐波转换、激光聚焦、谐波分离、参数取样和防护溅射等功能^[16-17],其中的各大口径光学元件均涂有基频、二倍频和三倍频激光的化学减反膜,其单面反射率小于 0.5%。虽然单面反射率极低,但是由于终端内激光的能量在万焦耳量级,十几个光学表面带来的杂散光能量可达数百焦耳,尤其还存在大量的鬼点,这些杂散光极易对终端内机械件和光学件造成破坏。在物理设计中,终端光学组件杂散光抑制与规避主要两种方式:第一种杂散光规避方式是调整终端光学组件内元件之间的距离和部分元件法线与主光轴的夹角,保证杂散光鬼点不落在光学元件的表面和体内,或尽可能偏离主光轴^[14,18]。待终端光学组件的元器件确定后,利用光学设计分析软件 ASAP 进行杂散光分布建模分析,最终分析确定终端光学组件鬼像分布情况。图 13 所示为神光 II 升级装置的鬼像分布,其中:红色点为三倍频鬼像点,蓝色点为基频鬼像点;三角状为一阶鬼像,方形为二阶鬼像,点状为三阶鬼像,圆状为四阶鬼像。通过鬼像分析确定了终端光学组件的结构设计排布图,即各个光学元件的排布间距和部分元件与光轴的倾斜角度,以及聚焦透镜的基本参数。第二种杂散光抑制方式是增加杂散光吸收阱或漫反射隔离器,使杂散光鬼点不落在机械结构表面而产生间接污染颗粒^[18]。

2.2 光束质量控制

2.2.1 光束传输分析

高功率激光系统中的光束质量控制是一个系统性问题,需从光学元器件、光束传输及主动控制方面综合考虑。光束质量控制首先需要明确光学元件指标与光束质量的对应关系,给出合理的指标精度以及最佳的分配协调方案。NIF 建立了一套完备的光学元件指标体系来控制元件指标^[19]。根据大口径光学元件波前影响程度的差异,将波前划分为低频、中频和高频波段,各个频段的指标要求不同。线性传输和非线性传输贯穿整个激光装置链路:线性传输的设计应明确光束演

变的基本规律,以确保光束无畸变传输;非线性传输的设计应明确光束非线性增长的程度,采取合理有效方法进行适度控制,降低装置的运行风险。装置中通常分段采用空间滤波器^[20]实现光束低通滤波,滤除非线性增长较快的高频成分,抑制光束传输的衍射调制效应,提高光束质量。但是空间滤波器的控制能力有限,空间滤波器的级间与终端靶场的线性传输和非线性传输特性尤其值得关注。

2.2.1.1 线性传输分析

光场线性传输会引起强度调制,可能会对三倍频段的元件造成损伤,从而削弱装置的负载能力。一定口径的均匀光束因为长距离传输会产生衍射条纹,使得光束质量变差;均匀光束如果受到局域相位调制和振幅调制,在较短的距离也会产生强度调制。产生局域调制的空间噪声可以归结为以下几种:由非均匀泵浦和热畸变等产生的低频调制噪声、由元器件加工及损伤等缺陷造成的衍射调制噪声、由杂散光与主光束产生的干涉调制噪声。不同物理过程产生的近场噪声在光场分布上呈现出不同特征的纹理,其中衍射会形成艾里斑图样,多光束干涉会形成条纹。Mainguy 等^[21]基于 CEA MIRÓ 研究了元件前后表面缺陷对激光链路中光学元件的影响,认为相位调制型缺陷会引起强烈的调制。本课题组在线性传输方面也做了许多研究工作,利用等效菲涅耳数来简化分析由光学元件表面缺陷引起的衍射光场^[22],通过对等效菲涅耳数的讨论和验证,获得传播光束近场衍射形态的演变规律。

系统存在单个相位缺陷时,光场调制会比较严重。当缺陷位于光束中心时,小尺度纯相位型缺陷调制后的衍射光场可采用等效菲涅耳数来表征。当等效菲涅耳数大于 1 时,在缺陷调制区域内传播光束会产生强烈的调制,轴上点的相对强度振荡起伏,并在等效菲涅耳数为奇数时取得极大值;当等效菲涅耳数小于 1 时,随着传播距离的增加,传播光束的调制程度将逐渐减小并趋于稳定,因此将后续光学元件置于缺陷等效菲涅耳数小于 1 的区域较为安全。不同观察平面的横向分布出现了明暗相间的同心衍射环,如图 14 所示,其中 r 为缺陷半径, φ 为缺陷引入的相位调制, t 为振幅透过率。从衍射环中可以观察到明显的暗条纹。在暗条纹区域内,明暗条纹的数量与等效菲涅耳数一一对应,且当等效菲涅耳数为奇数时,光束中心受到严重调制。

2.2.1.2 非线性传输分析

自聚焦效应是限制高功率激光装置功率负载提升和破坏光束质量的主要因素之一^[23]。热像是一种特殊的非线性效应,是由非线性自聚焦效应导致的局域光场增强效应,其峰值强度可达平均光强的数倍到数十倍,是限制高功率激光器输出能力的一个关键因素。已有的热像研究表明,单一缺陷会在非线性介质下游的共轭面上产生一个热像^[24],而在多个缺陷或者级联

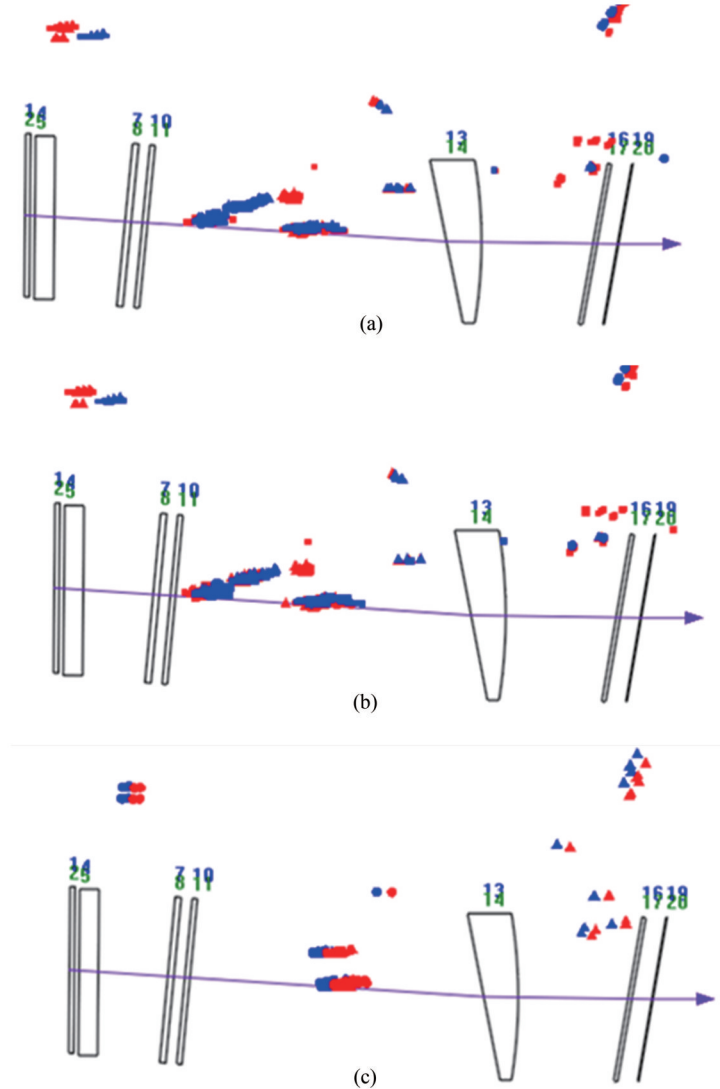


图 13 最终优化方案的鬼像分布情况。(a)楔形透镜处于相对零位的+15 mm位置;(b)楔形透镜处于相对零位的-15 mm位置;(c)考虑靶面2%反射

Fig. 13 Ghost image distribution of the final optimization scheme. (a) Wedge lens is in the +15 mm position of the relative zero position; (b) wedge lens is in the -15 mm position of the relative zero position; (c) target surface is considered for 2% reflection

非线性介质的条件下,甚至会出现轴上多峰热像^[25]。单个缺陷热像的位置分布规律和光场增强程度是驱动器安全设计的重要依据,因此对系统链路中热像的预测和规避具有极其重要的意义。You等^[26]发现单个缺陷条件下非线性介质的厚度会影响轴向强度结构。

即使是在单块非线性介质的作用下,单一缺陷也可在一定条件下产生双峰热像,而能否产生双峰结构以及峰值强度的大小对缺陷边缘陡峭性具有强烈的依赖性。Wang等^[27]采用超高斯模型来模拟缺陷的边缘陡峭性,发现硬边衍射是形成双峰热像的主要原因,并给出由缺陷尺寸和超高斯阶次共同决定的双峰热像形成的临界条件。单一缺陷诱致双峰热像的发现对高功率装置的安全设计具有深刻影响,因为双峰的强度都足以引起光学元件损伤,而共轭面后第二峰的存在是被忽视的一个潜在威胁,如图 15、图 16 所示。该工作

为非线性热像的研究提供了一个新的维度,研究结果对高功率激光系统中光学元件的缺陷评估、系统排布设计和终端负载能力提升具有重要的指导意义。

2.2.2 光学元件的设计、加工、检测

2.2.2.1 空间滤波器透镜的设计

空间滤波器透镜的设计包括鬼像设计分析与透镜选型(鬼点和笔形光束)、像差校正及真空效应(偏振)分析,在此基础上控制系统像差水平^[28]。TSF透镜不仅需要进行鬼点位置控制,还需要倾斜透镜来抑制笔形光束,CSF透镜则主要考虑控制一阶鬼像位置。

对于空间滤波器透镜,当准直光束入射到透镜表面时,来自第二表面的鬼像反射光线与光轴的交点表示为

$$f_G = -\frac{r_1 r_2}{2[nr_1 - r_2(n-1)]}, \quad (1)$$

式中: n 为透镜折射率; f_G 为一阶鬼像与系统主点的距

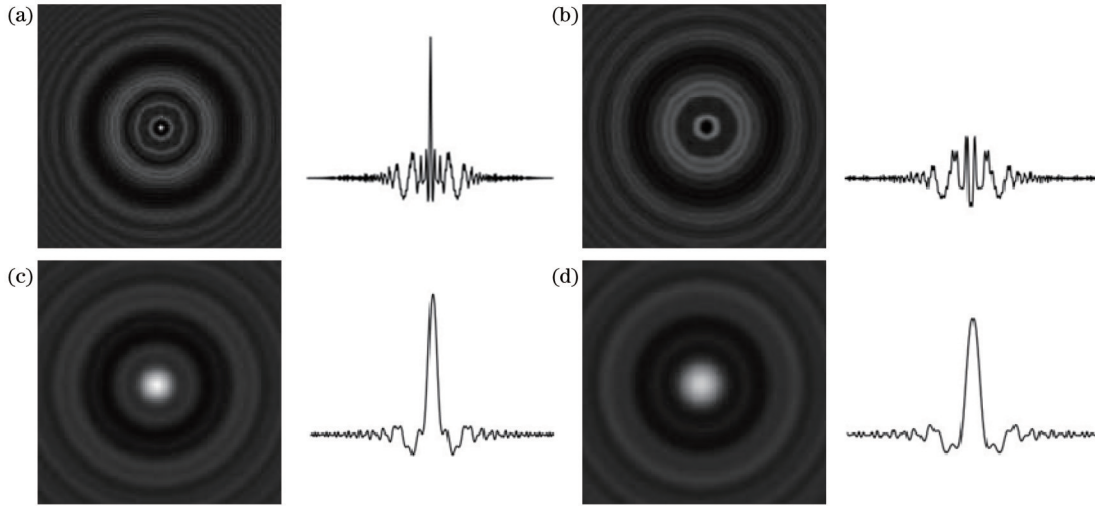


图 14 缺陷的 $r=0.2\text{ mm}$ 、 $\phi=\pi/2$ 、 $t=1$ ，等效菲涅耳数 N 取不同值时的横向光场分布。(a) $N=7$ ；(b) $N=4$ ；(c) $N=1$ ；(d) $N<1$
 Fig. 14 Transverse optical field distribution of defect of $r=0.2\text{ mm}$, $\phi=\pi/2$, and $t=1$, as the Fresnel numbers take different values.
 (a) $N=7$; (b) $N=4$; (c) $N=1$; (d) $N<1$

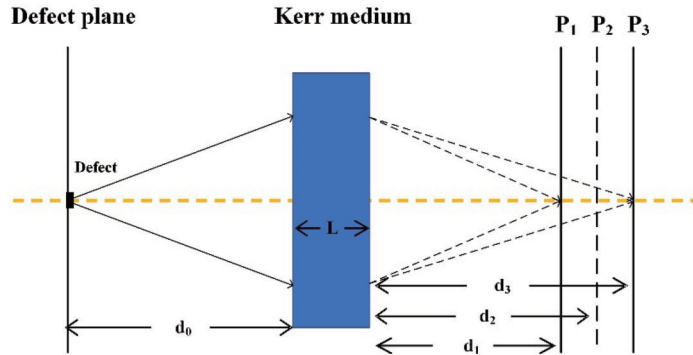


图 15 多峰热像的光路模型^[27]。其中 P_1 代表第一热像平面, P_2 代表共轭面, P_3 代表第二热像平面
 Fig. 15 Lightpath model of multi-peak thermal image^[27]. P_1 represents the first thermal image plane, P_2 represents the conjugate plane, and P_3 represents the second thermal image plane

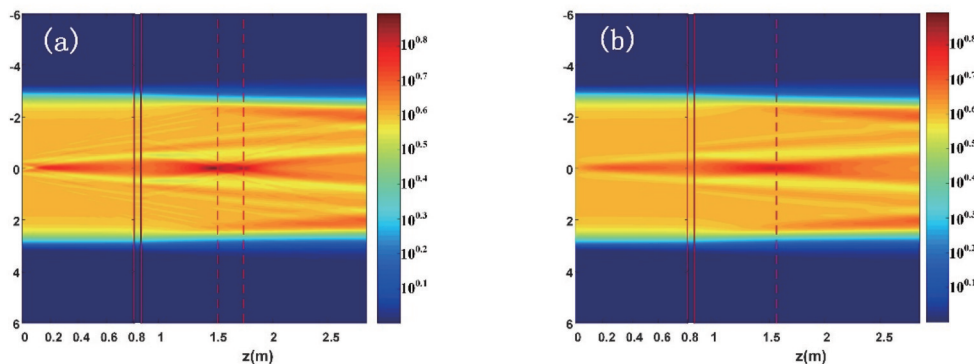


图 16 具有不同缺陷的横向光场沿轴向的传输演变,其中红色虚线代表热像面位置^[27]。(a)超高斯缺陷;(b)高斯缺陷
 Fig. 16 Transmission evolution of transverse optical field with different defects along axial direction, and the red dotted line represents the position of the thermal image plane^[27]. (a) Super-Gaussian defect; (b) Gaussian defect

离; r_1 和 r_2 分别为空间滤波器透镜前、后表面的曲率半径。弯月透镜的一阶鬼像在无穷远处,当平行光入射到平凸透镜平面时,多程放大系统中容易产生自激振荡;双凸透镜的一阶鬼像位置在 $0.15f_G \sim 0.5f_G$ 范围内。综合考虑鬼像规避、像差控制、加工检测难易程度

等因素,TSF 透镜一般采用近等凸透镜。CSF 透镜设计主要考虑过孔(远场),TSF 透镜设计主要考虑规避鬼像,因此使用 TSF 透镜时采用倾斜约 1° 的安装方式^[13]。TSF 透镜采用球面和非球面时像差优化结果如图 17 所示。

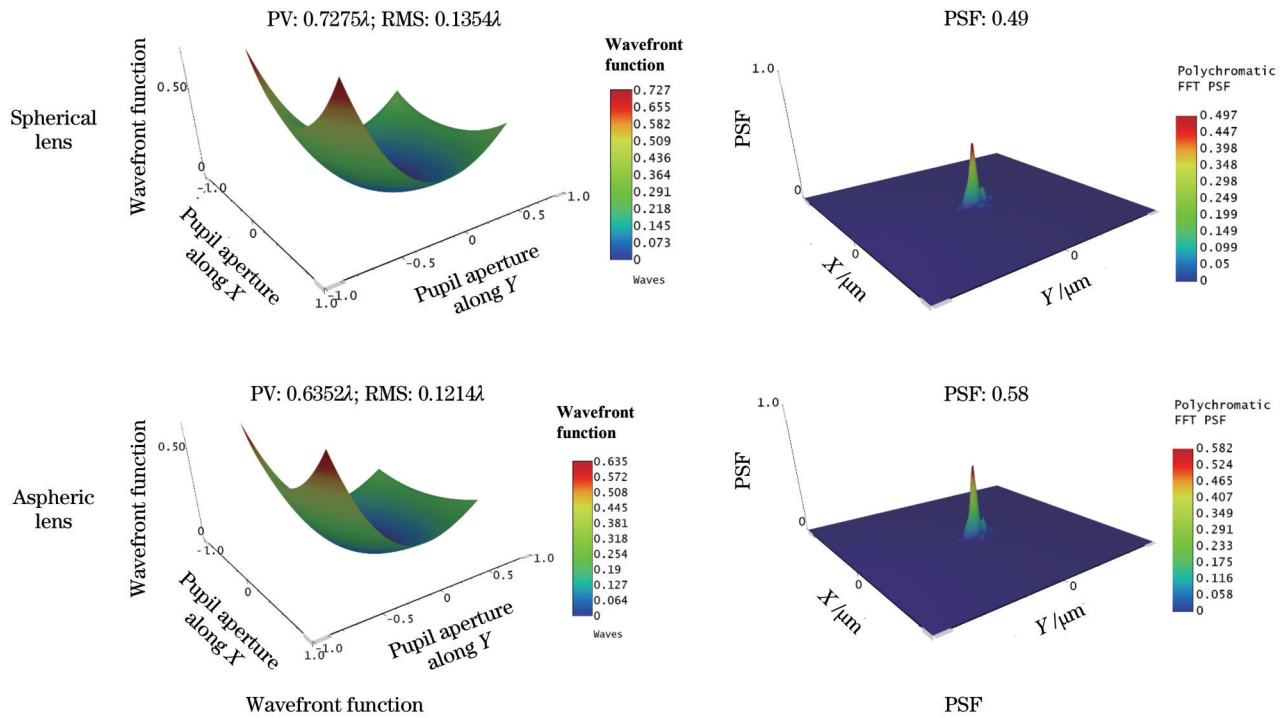


图 17 TFS 单个透镜的像差分析

Fig. 17 Aberration analysis of single TFS lens

经过比较分析, TFS 透镜在倾斜使用的情况下, 采用球面和非球面结构时波前误差相当, 因此 TFS 输出透镜可采用球面透镜取代圆锥曲面透镜。根据目前升级设计、装校、运行(自适应光学校正)现状, CSF 透镜设计主要考虑过孔和波前校正问题, 因此采用圆锥曲面的设计。

2.2.2.2 超长焦距元件加工检测

长焦透镜焦距的测量结果以及焦点的定位精

度, 直接影响空间滤波器的安装和滤波效果。长焦距透镜的数值孔径小、焦深长, 检测光路长, 易受环境干扰, 使用一般的测量方法很难获得理想的测量精度。如图 18 所示, 利用组合透镜方法, 将待测长焦透镜焦距的测量转化为标准平面镜移动距离的测量, 极大地缩短了测量距离, 同时利用干涉仪观测到的干涉条纹精准确定焦-顶点位置, 极大地提高了检测精度。

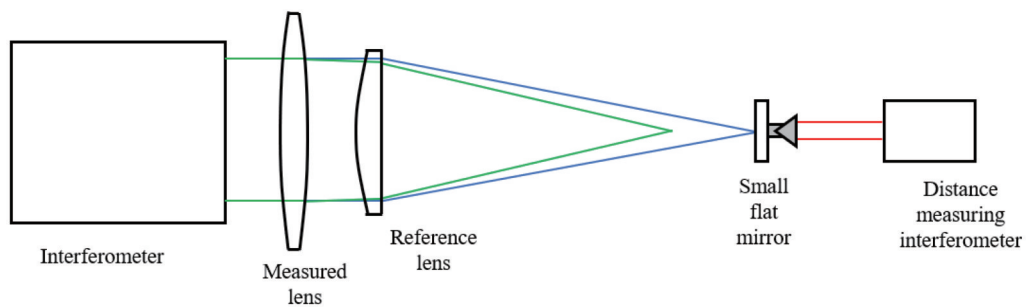


图 18 长焦透镜的检测方案

Fig. 18 Detection scheme for telephoto lenses

对于非球面长焦透镜的加工, 应先将其加工成球面, 然后在此基础上抛修非球面, 长焦透镜的非球面度非常小, 磨削去除量约为 $0.1 \mu\text{m}$ 量级。长焦透镜加工中的焦距控制、单面面形控制以及中心偏差控制是主要难点。对空间滤波长焦透镜的要求是将焦距误差控制在千分之一以下, 相当于两面曲率精度都要控制在万分之五以内, 使用常规球面透镜的加工方式很难加

工出满足焦距控制精度要求的透镜。在透镜双面曲率设计相同的情况下, 双面可以用同一抛光盘交替抛光, 以保证双面曲率一致。方形和矩形元件加工过程中容易出现像散或塌边塌角等问题, 工件转速和摆速不能呈现简单的比例关系, 以保证轨迹的复杂和均匀, 且摆幅要合理, 不能过大, 否则边角多抛容易导致塌边塌角。精抛时要控制抛光压力, 以减小元件受压引起的

变形。如果像散和塌边塌角经过常规加工后仍持续存在,则需要通过走高低圈的方式消除。中心偏差的控制主要在磨砂环节,抛光过程中严格控制偏心程度,使其不会引起很大的变化。以一面几何中心的法线为旋转轴转动透镜,根据高度差修磨较高侧,直至满足要求。

2.2.2.3 大尺寸元件的设计及面形保持

高功率激光装置采用的光学元件的通光口径大、厚度小,导致比刚度低,同时对面形精度的要求又很高,若安装方式不当极易引起大口径光学元件表面光学畸变^[29],同时重力作用下的大口径光学元件表面变

形也会造成面形质量下降^[30]。

以光学元件通光区域整体光学面形畸变的均方根(RMS)误差最小值为约束条件,优化边界约束支撑方式,能够有效地解决高功率激光驱动装置中大型光学元件的重力变形问题,有效校正平面甚至球面光学元件全口径透光区域的面形误差,同时能够突破大尺寸光学元件的加工精度极限,降低加工成本。在板条状光学元件边界约束支撑下有限元软件的模拟结果如图 19 所示,可以看到,在合理的预紧力作用下,光学元件的大部分通光区域可以获得接近零应变的变形结果。

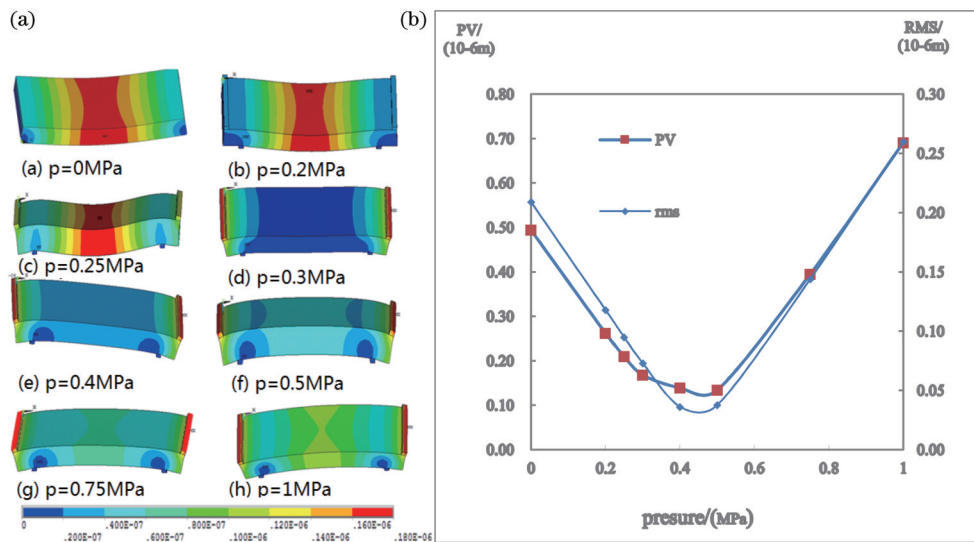


图 19 不同预紧力下光学元件变形图^[31]。(a)不同预紧力情况下镜片变形云图;(b)不同预紧力状态下镜片变形的有限元分析结果
Fig. 19 Deformation contours of the mirror with different preload forces^[31]. (a) Deformation contours of the mirror with different preload forces; (b) FEM result of the relationship between PV value and RMS value with different preload forces

通过搭建结构尺寸为 $700\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的光学元件施加边缘挠性力矩的实验平台,采用波前调制法进行面形质量测试实验,测试结果如图 20 所示。在施加预紧力为 0.4 MPa 情况下,PV 值以及 RMS 值分别比未施加预紧力情况下减小了 79.6% 和 58.5% 。 350 mm 通光口径内的面形质量参数的 PV 和 RMS 最优值可达到 0.0569λ 和 0.0219λ 。因此,基于边界约束支撑理论,通过在光学元件边缘施加适当的预紧力,实现了光学元件全口径通光条件下的通光口径光学畸变 PV 值和 RMS 值极小的目标。另外,为弥补由边界约束支撑引起的光学元件应力破坏及应力双折射的不足,通过优化光学元件厚径比以及挠性支撑结构,实现大尺寸光学元件在边界约束支撑下的小应力装夹。

2.2.3 近远场测量及控制

2.2.3.1 高功率激光空域传统精密测量

空域测量在高功率激光系统输出性能和精密程度评估、运行安全、性能提升等方面具有不可替代的作用,涉及的主要技术内容包括空域测量总体技术和单

元技术。总体技术包括总体光学设计、能流设计、高倍率衰减和杂散光管理等;单元技术包括高分辨高动态近场测量技术、高精度波前测量技术、高动态远场测量技术等。

高功率激光空域参数用于表征光束几何参数、空间强度分布、波前分布等。强度分布包括近场和远场强度分布如图 21、图 22 所示。对测量系统的放大率进行精密标定,就可以测量激光几何参数。

测量系统的空域设计包括像传递设计、空间分辨率设计等。在线测量是指在不影响激光装置正常发射的情况下实现激光参数的测量,总体光学设计需要解决在线测量时如何保证采样光束真实准确地表征主光束的难题。空域测量光学系统设计需要确保测量系统符合空间畸变小、波前畸变小、由装调误差引入的像差小、空间分辨率高等技术要求。能流设计主要根据系统特点设计合适的取样方式、取样率,以不影响主光路、易于调试为原则,确保采样信号真实为设计基线,还需要根据各测量单元的能量响应特性对采样光束进行能量分配,以到达探测器的能量满足装置常规工作

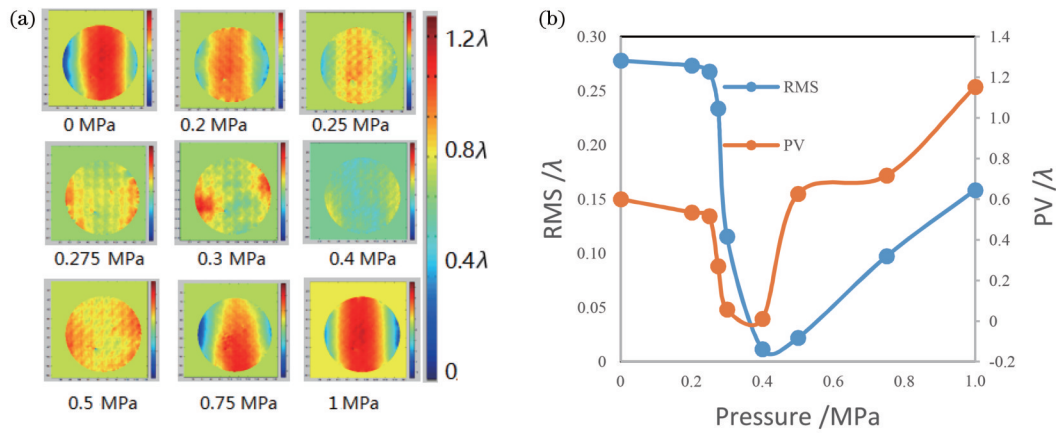


图 20 大口径光学元件边界约束条件下的面形质量。(a)使用波前调制法的镜片面形测试结果;(b)不同预紧力状态下镜片PV值和RMS值

Fig. 20 Surface quality of large aperture mirror under bending moment on the fringe. (a) Results of deformation contours of the mirror with different preload forces by phase modulation method; (b) result of the relationship between PV value and RMS value with different preload forces

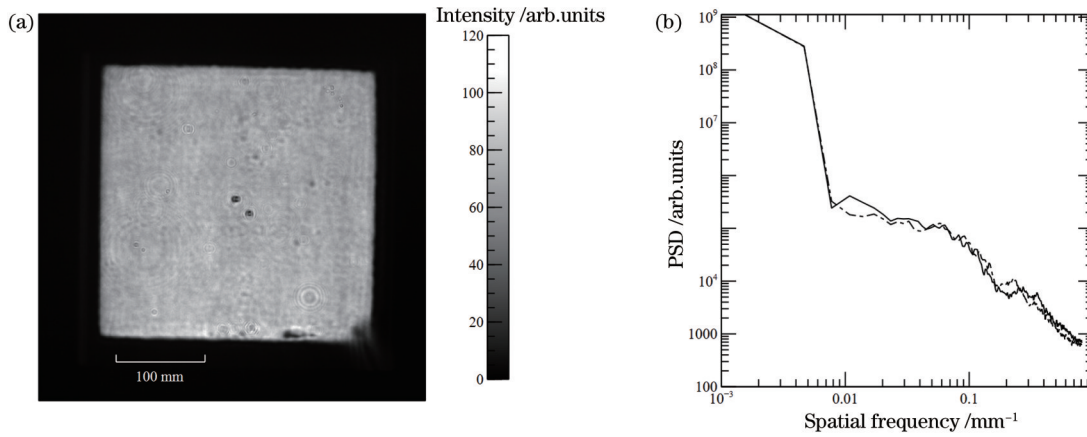


图 21 高功率激光的近场(发次编号:20160906002)强度分布及功率谱分布。(a)强度分布;(b)功率谱分布

Fig. 21 Intensity and power spectrum distribution of near-field of high power laser system (No. 20160906002). (a) Intensity distribution; (b) PSD power spectrum distribution

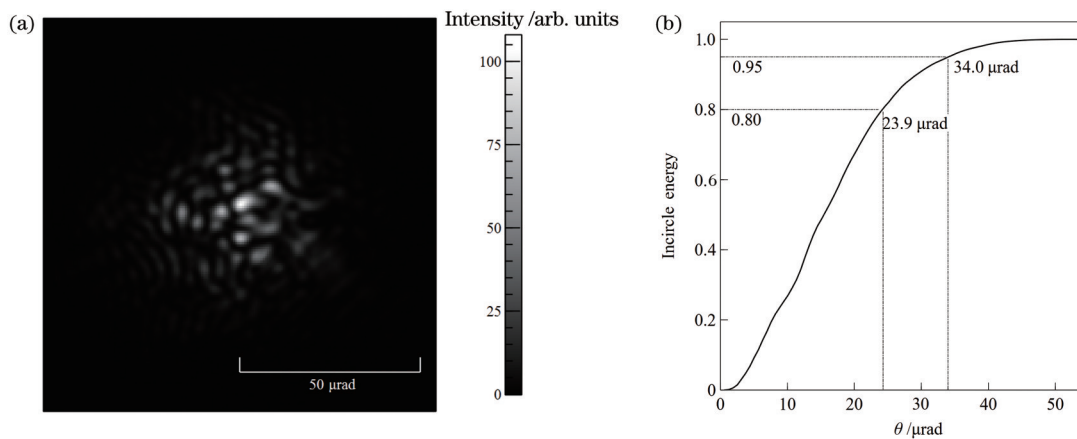


图 22 高功率激光的远场分布及环围能量分布。(a)远场分布;(b)环围能量分布

Fig. 22 Intensity and incircle fluence distribution of far-field of high power laser system. (a) Far-field intensity distribution; (b) incircle fluence distribution

点为基本要求,可以采用各类衰减片进行动态配置,提高探测器的适应范围。

由于高功率激光动态发射和静态调试能量跨度一般超过 3 个数量级,最高甚至达到 6 个数量级,因此高

倍率衰减是空域测量必须配置的手段,涉及衰减策略设计和衰减器件选型等。图 23 所示为某高功率激光系统的基频测量光路。缩束后光束口径约为 24 mm,大能量发射时的衰减配置是静态调试时的 5×10^6 倍。

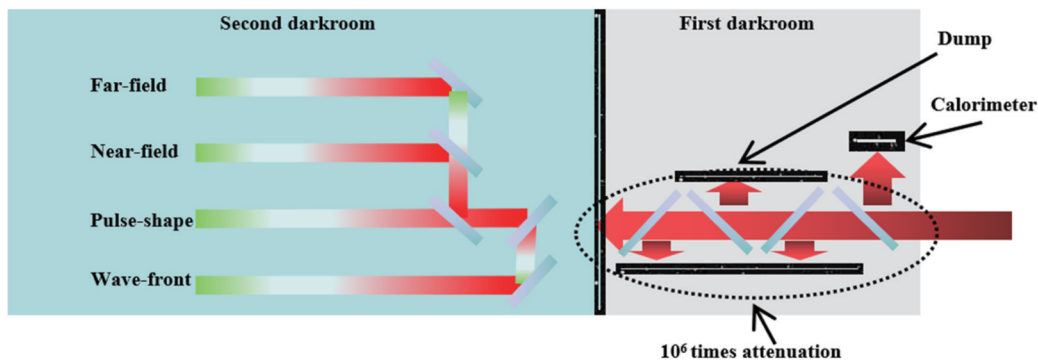


图 23 多程放大构型主放两级暗室的高倍率衰减设计(宽度为 11 cm)

Fig. 23 High-magnification attenuation design of main two-stage darkroom in the multi-range amplification configuration (width is 11 cm)

在如此高倍率衰减情况下,杂散光管理在高功率激光参数测量中尤为重要。微弱的杂散光就可能对测量结果造成决定性的影响。杂散光一般伴随着测量系统的高倍率衰减而出现,一方面要尽量避免杂散光的产生,另一方面通过对杂散光的控制,避免已经产生的杂散光进入探测器。在图 23 所示的方案中,采用两级暗室技术,一级暗室用于实现高倍率衰减,二级暗室用于分光至各类探测器,确保包括杂散光在内的所有光束仅能通过高倍率衰减通道进入二级暗室。

2.2.3.2 计算光学空域精密测量

在高功率激光装置结构紧凑的多功能高精度测量技术需求的牵引下,本课题组发展了相干调制成像(CMI)技术,该技术可以实现高精度、高分辨率的复杂光场测量^[32-34]。利用记录的衍射图案[图 24(a)]和 CMI 算法重建待测光场在相位板平面上的振幅和相位分布,其结果如图 24(b)所示。此时利用重建得到的复振幅可以计算任意平面上的波前和强度分布,进而进行数值分析,这是相较于传统监测方法的一个突出优势。图 24(c)所示为一系列被测光束在焦平面附近的强度分布,可以通过判断能量集中度来快速找到实际的焦点位置。另外结合过饱和和处理算法^[35],在光斑重建过程中,将饱和位置的强度替换为计算得到的强度,CMI 算法可以不受记录衍射光斑部分饱和的影响,焦点强度的动态范围可以扩大 2200 倍以上,而在直接测量远场强度时,CCD 的动态范围只有 255 DN。同时待测光场的近场分布也可以同时计算得到,由图 24(e)可知,在此条件下可区分的线对是第 0 组、第 2 组,对应的实际分辨率约为 1 mm。

CMI 技术也被用于测量由气流或机械振动引起的激光束动态波前变化,以及激光放大器的相位畸变^[36-37]。

2.2.3.3 近场控制及强度补偿

近场控制在高功率装置中是十分必要的,主要实现精确控制光束口径、特殊近场分布整形、预屏蔽大口径光学元件上的损伤点、注入光束边缘二次整形等功能。神光 II 升级装置中的近场控制主要通过三级光束整形实现,主要功能与结构如图 25 所示。

第一级、第三级整形参数的设计关键在于软边光阑通光尺寸与软化因子的最优化设计。如图 26(a)所示,软化因子的定义为 $S = (D_0 - D_1) / (2D_0)$ 。一方面,需要有效抑制光束传输过程引起的菲涅耳衍射调制;另一方面,需要尽可能提高整形后光束的填充因子,以提升能量利用率,但同时也需要降低预放大系统注入处由类高斯光整形为超高斯平顶光过程中产生的能量损失。另外,软化因子的最优值也和空间滤波器尺寸直接相关,空间滤波器尺寸越大,通过的高频成分越多,软化因子的最优值越小。如图 26(b)所示,最优超高斯阶数随着空间滤波器尺寸的增大而增大,对应的光束填充因子也相应增大。第一级和第三级整形通常采用介质膜二元振幅光学元件,通过误差扩散算法设计二元分布图案实现。

第二级整形的参数主要包括两个方面:1)增益预补偿设计。通过对预放大阶段与主放大阶段能量放大介质的增益不均匀进行预补偿,实现基频段光束均匀输出。主要基于系统传输与放大模型,并结合基频输出的近场分布实测数据进行预补偿透过率设计与迭代优化。2)屏蔽点分布设计。需要结合损伤点的实际尺寸,一方面使能量损失尽可能小,另一方面尽可能降低空间滤波、自由传输等过程引起的屏蔽点附近的光场调制。将仿真设计与实测相结合,优化设计屏蔽点分布形态。从整形角度看,整形后的分布形态与空间滤波器大小有关,选择较大的滤波孔,能较好地保持整形

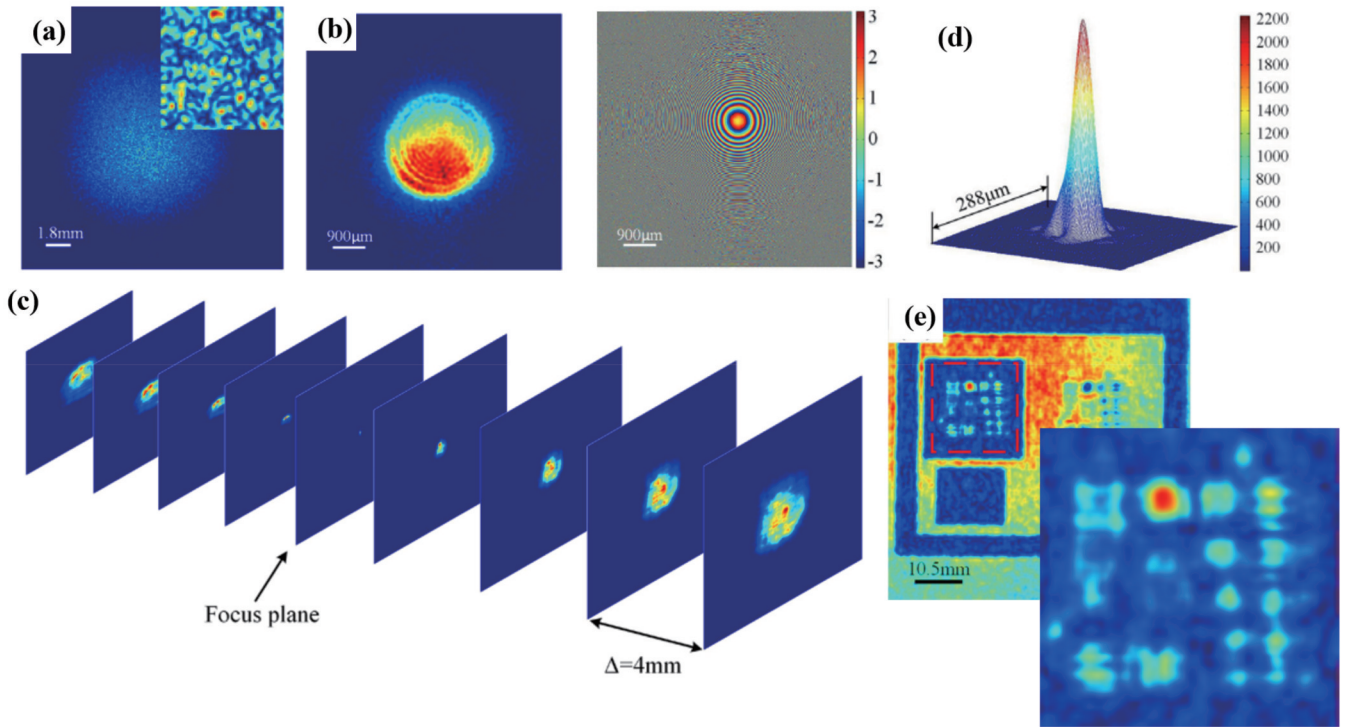


图 24 高功率激光系统中的相干衍射成像测量结果^[34]。(a)记录的衍射图,插图为更详细的放大图;(b)重建得到的相位板平面的照明光分布,其中左为振幅图,右为相位图;(c)计算出的焦平面附近的强度分布,所有相邻平面的距离为 4 mm;(d)获得的焦点强度 3D 分布;(e)重建得到的位于会聚透镜附近的 USAF 1951 近场振幅分布

Fig. 24 Results of coherent modulation imaging in high power laser system^[34]. (a) Recorded diffraction pattern, the magnified view is presented in the top-right corner; (b) reconstructed illumination distribution on the phase plate, the amplitude distribution is presented on the left and the phase distribution is presented on the right; (c) intensity in a series of planes with different deviation distances to focus plane according to numerical calculation, and the distance between the adjacent planes is 4 mm; (d) 3D intensity distribution of focal point; (e) reconstructed amplitude distribution of USAF 1951 that is placed near a convergent lens

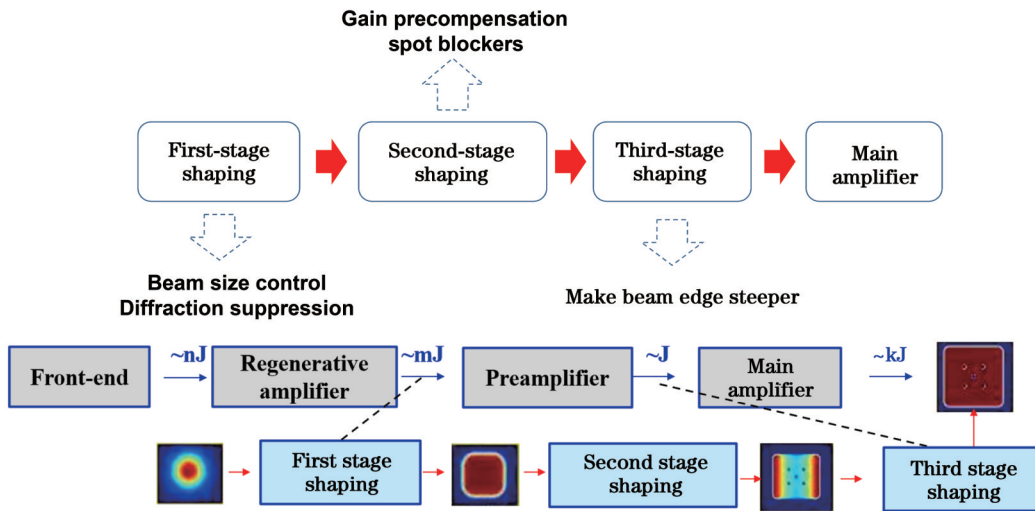


图 25 具有三级整形功能的光束近场控制系统的主要功能与结构

Fig. 25 Main functions and structures of beam near-field control system with three-level shaping function

形态,同时具有较小的能量损失以及近场对比度,但是也要兼顾滤波孔增大带来的装置风险。

为满足上述功能,整形元件须具备透过率高、波前畸变小以及损伤阈值高等特点。NIF 与 OMEGA 装置

早期采用镀铬二元振幅元件实现软边光阑与增益预补偿的功能^[38],但是这种元件损伤阈值只有 100 mJ/cm²左右;本课题组提出基于介质膜和光刻工艺的方法研制介质膜二元振幅光学元件,使器件损伤阈值超过

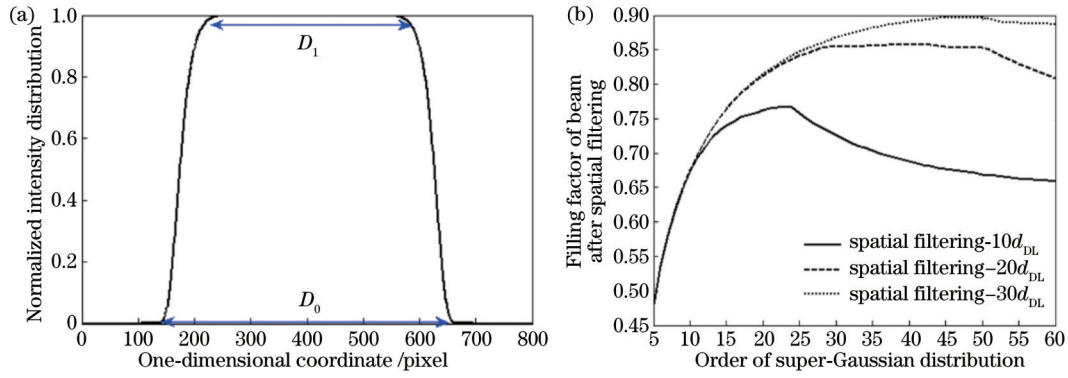


图 26 超高斯分布与空间滤波器的影响。(a) 超高斯光束的一维强度分布; (b) 不同滤波孔时, 超高斯阶数对光束填充因子的影响 (d_{DL} 为衍射极限)

Fig. 26 Super-Gaussian distribution and the influence of spatial filter. (a) One-dimensional intensity distribution of super-Gaussian beam; (b) influence of super-Gaussian order on beam filling factor with different spatial filtering holes (d_{DL} : diffraction limit)

7 J/cm²[39-40]。透射式光寻址空间光调制器不仅实时可调, 而且具有高透过率、无黑栅效应、低光谱畸变等优点, 可用于增益预补偿与损伤点屏蔽的灵活调控。NIF 首次报道这种器件是用来实现损伤点屏蔽的功能[41-43], 后期报道了这种器件在装置近场调控与通量密度提升方面的重要作用[44]。本课题组通过解决介质膜图案化加工、液晶光学工艺与器件集成、透射光谱优化等问题, 已实现介质膜二元振幅光学元件和光寻址空间光调制器从设计、加工到集成的完全自主研制[40, 45-47], 并基于自

研软件建立了近场优化闭环反馈系统, 在神光 II 系列装置、焦耳级重复频率预放大系统等获得了优质的近场光束, 有效提升了系统运行通量水平[47-48], 部分整形效果如图 27 所示。介质膜二元振幅光学元件达到的主要技术指标为: 透过率 > 99%, 最大口径为 50 mm, 损伤阈值 > 7 J/cm²; 光寻址空间光调制器达到的主要指标为: 透过率 > 85%, 最大通光口径为 30 mm, 分辨率 ≥ 500 × 500, 损伤阈值约为 300 mJ/cm²。

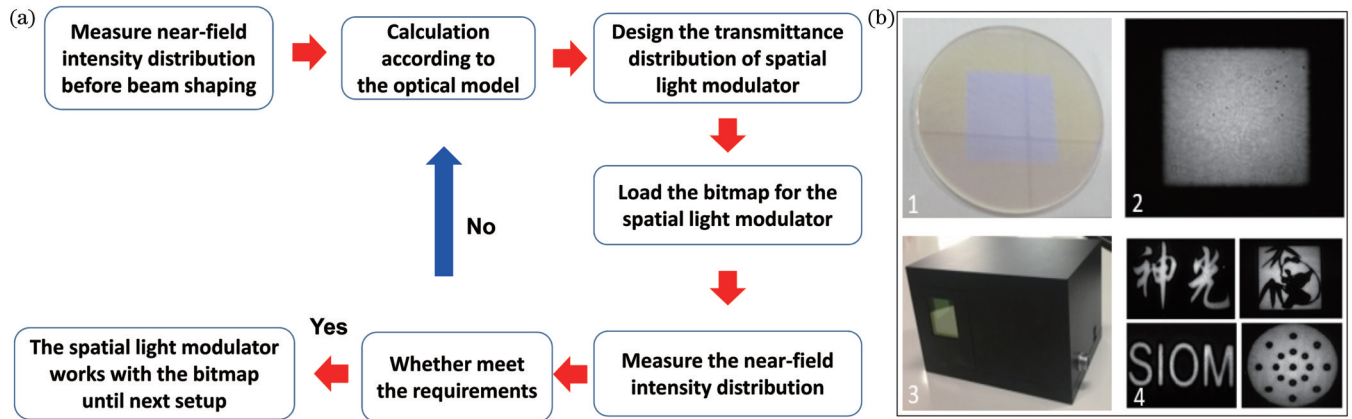


图 27 光束整形方案与整形效果。(a) 近场优化的反馈控制流程; (b) 两类光场调控器件及光束整形效果 (1—介质膜二元振幅元件; 2—高填充因子光斑; 3—光寻址空间光调制器; 4—任意形态整形光斑)

Fig. 27 Scheme and effect of beam shaping. (a) Control flow of beam near-field optimization; (b) two types of beam shapers and their shaping effects (1—dielectric-film binary amplitude mask; 2—spot with high filling factor; 3—optically addressed spatial light modulator; 4—arbitrary shaped beam)

2.2.3.4 自适应光学远场控制

根据激光装置的不同特点, 远场控制的工程设计也有所不同。一般地, 纳秒激光装置的能量高达数万焦耳, 更关注的是激光的安全传输; 超短脉冲激光的能量在数十到数千焦耳, 更关注的是靶室内的小焦斑聚焦[49]。根据物理光学衍射理论, 影响激光焦斑的核心因素是波前像差, 因此远场调控的实质是减小光束的波前像差。技术手段主要包括两个方面: 一是在

源头上降低波前像差, 如要求光学元件的面形质量和光学系统的安装精度; 二是引入自适应光学技术对波前像差进行主动控制。

自适应光学系统主要由波前传感器和变形镜组成, 其中变形镜的校正能力设计是自适应光学远场控制的关键。由于激光远场是近场复振幅的傅里叶变换, 用傅里叶变换来分析激光波面的空间频谱, 可以定量地分析出激光焦斑能量的受控状态, 按照频率从低

到高分可控能量、不可控制但可传输能量以及阻挡能量。可控能量属于有益部分,占比越高越好,其余的能量均为有害部分,其中阻挡能量应小于空间滤波小孔的能量阈值,而不可控制但可传输能量是造成激光损伤的主要因素^[50]。

变形镜是通过多个分布式驱动器的不同伸缩量来实现面形控制的,因此驱动器数量越多,变形镜的分辨率越高,对面形的拟合能力越强^[51]。变形镜的驱动面形和像差拟合结果如图 28 所示,其中 $\beta = (R_{\text{RMS-Pa}} - R_{\text{RMS-Pi}}) / R_{\text{RMS-Pi}}$, $R_{\text{RMS-Pa}}$ 为实际拟合面形的 RMS, $R_{\text{RMS-Pi}}$ 为理想面形的 RMS。但是,随着驱动器数量的增加,相应的中高频成分也增加,因此在高功率激光装置中变形镜的设计需要平衡变形镜的拟合能力和频率成分

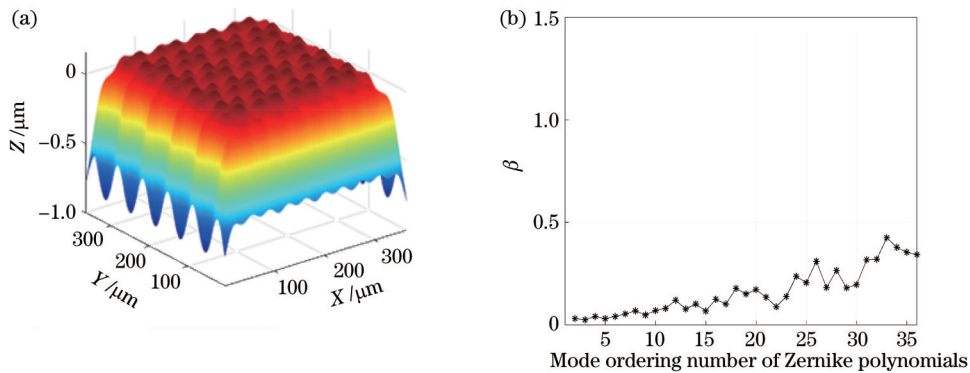


图 28 变形镜的驱动面形和像差拟合结果。(a)变形镜的驱动面形;(b)变形镜对前 36 项 Zernike 多项式的拟合能力
Fig. 28 Fitting results of driving surface and aberration of the deformable mirror. (a) Driving surface of the deformable mirror;
(b) fitting ability of the deformable mirror to the first 36 Zernike polynomials

2.2.3.5 焦斑匀滑设计

靶面辐照性能的要求为入射光束要尽可能均匀地辐照特定的靶面区域。高功率激光系统中的激光束会有不同程度的振幅和相位调制,影响了近场强度分布,而且这些调制最终在靶面位置相互叠加,严重破坏了辐照的均匀性,导致靶面焦斑的质量下降以及焦斑分裂和调制等。此外,高功率激光系统中要求尽可能利用入射激光的能量,并对焦斑大小和形态也有不同要求。这就需要采取焦斑控制技术来改善焦斑质量,控制焦斑形态,降低焦斑中的调制。焦斑控制技术可以分为两类:空域整形平滑技术和时域平滑技术。空域平滑技术依靠连续相位板(CPP)技术和偏振平滑(PS)技术来实现;时域平滑技术则基于光谱色散平滑(SSD)技术。

CPP 技术最早由 Lin 等^[53]于 1996 年提出。基于混合型分布相位板设计,通过连续变化的相位分布,使焦斑的能量利用率达到 95% 以上。一个有效的空域平滑光学均匀辐照必须对入射光的振幅、相位和频率有一定的宽容度。CPP 设计方法通常采用相位恢复算法。顾名思义,即给定目标焦斑的光强分布,利用正向和逆向传输的循环迭代,最终计算得到束匀滑元件的相位结构。常用的算法有 G-S、I-O 等。CPP 设计完成

的矛盾关系,获得最优配置。高能纳秒激光装置一般以安全传输为目的来设计变形镜,飞秒激光装置则以聚焦功率密度为目标来设计变形镜,因此后者的驱动器数量相对更多。

由于激光装置采用单次运行模式,因此自适应光学系统采用的是预校正的工作模式。由于每发次放大器的瞬态像差存在随机性差异,预校正时无法准确获知下一发次放大器的瞬态像差,使得预校正存在偏差。实验数据表明,瞬态像差预校正偏差是造成输出激光波前和焦斑退化的主要因素^[52]。因此,远场调控不仅要求自适应光学系统具备相应的校正能力,激光系统自身的波前稳定性也要满足远场聚焦的要求。一般情况下,要求输出激光波前残余像差的 RMS 值应低于 $\lambda/4$ 。

后,将其掩模化,转换为磁流变加工所需的数据格式,并根据该数据进行设备加工制作。需要指出的是, CPP 设计中必须采用相位连续化算法对其解包裹,使得相位峰谷连接平滑,便于磁流变加工。

CPP 调控焦斑的能力很强,可方便将其整形为圆形、椭圆以及矩形。图 29 所示为 CPP 设计面形和对应的输出圆形焦斑,其中图 29(a)展示了面形数据轮廓(单位为 rad),可见整体相位起伏范围 50 rad,即约 8λ ,通过一定数据转换得到的刻蚀深度约为 $6 \mu\text{m}$ 。图 29(b)所示为该面形调制状态下焦面光斑的强度分布,可见 CPP 输出焦斑是一个标准的圆形焦斑,其光强分布均匀性很好,数值统计上考虑 $10 \mu\text{m}$ 尺度的滤波, $\text{RMS} < 20\%$ 。

SSD 技术由美国 Rochester 大学激光动力实验室(LLE)的 Skupsky 等^[54]于 1989 年首先提出。参考 NIF 相关文献的实验数据,发现其单束激光的焦斑不均匀性在 0.2 左右^[1]。该技术在保持均匀化强度包络的同时,可降低子光束间的相互干涉效应对靶面光强分布的影响。SSD 技术的基本原理是将具有角色散的宽带激光入射到衍射光学元件上,每个衍射阵列元的入射频率不同,使得从不同单元出射的子光束因频率不同,其相对相位随时间快速变化,每束子光束在远场非

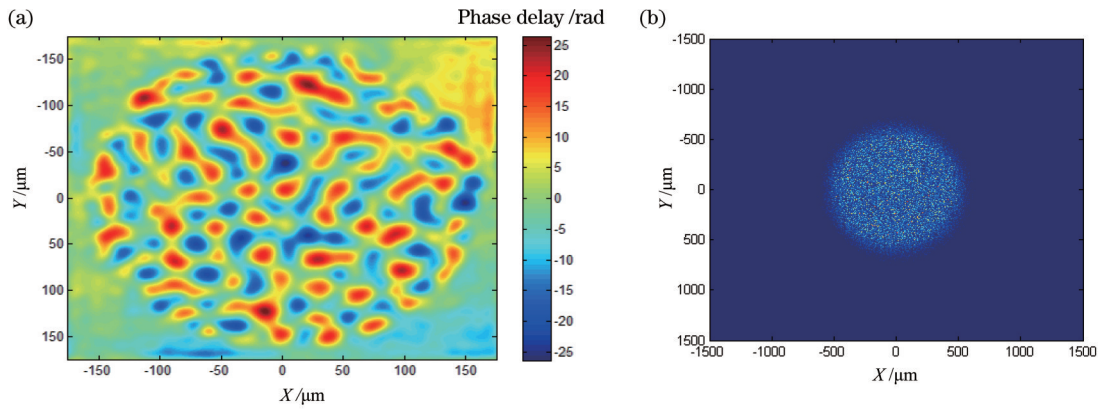


图 29 CPP 设计面形和对应的输出圆形焦斑。(a) CPP 设计面形; (b) CPP 的输出焦斑

Fig. 29 CPP design surface and corresponding output circular focal spot. (a) CPP design surface; (b) CPP output focal spot

相干叠加,在很短的相干时间里聚焦光束的散斑迅速变化,达到平滑中小尺度不均匀性的目的。在实际应用中,SSD 技术通常和其他光滑设备如各类衍射光学相位板结合使用,使具有一定角色散和谱宽的激光束入射到相位片阵列元上。焦斑的基本形状由相位板决定,而 SSD 技术的频谱展宽和光栅色散使各频率的子光束所产生的干涉散斑在色散方向上产生一个位移,且不同频率的子光束之间非相干叠加得到最终的焦斑,因此实际光束的焦斑将增大。光谱色散平滑技术旨在实现光谱展宽和光谱色散,同时需要考虑色散光束在高功率激光系统中的传输,具体包括调频-调幅(FM-AM)效应控制、近场光束强度调制、输出波形控

制、空间滤波器小孔效应抑制、谐波转换等主要问题。

高功率激光系统一般综合应用 CPP 技术、SSD 技术以及配合 PS 技术实现对靶面光强的有效控制。以空域平滑技术为焦斑控制的出发点,满足形态、大小、能量利用率和热斑分布的基本要求,使用时域平滑技术(主要为 SSD)平滑焦斑内中高频空间调制,改善焦斑的均匀性、有效控制各类不稳定性,同时应用 PS 技术再次进行匀滑控制。图 30 所示为 CPP 整形 1 mm 圆形焦斑的实验结果,其中图 30(a)所示为单纯使用 CPP 技术得到的焦斑轮廓,图 30(b)所示为在结合时间扫描 SSD 技术后得到的焦斑轮廓。可以看到,两者结合后的光斑均匀性更好。

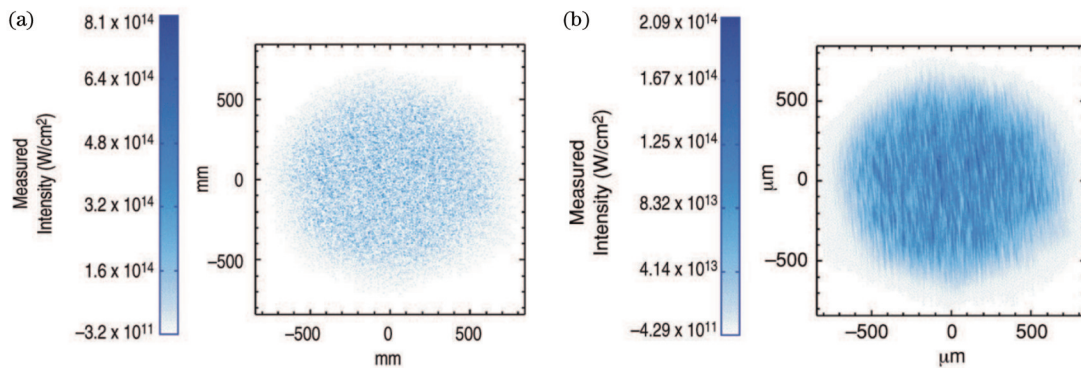


图 30 CPP 整形 1 mm 圆形焦斑的实验结果^[1]。(a)单纯使用 CPP 技术得到的焦斑轮廓; (b)结合时间扫描 SSD 技术后得到的焦斑轮廓

Fig. 30 Experimental results of 1 mm circular focal spot shaping by CPP^[1]. (a) Focal spot contour obtained only by CPP technology; (b) focal spot contour obtained by time scanning SSD technology and CPP technology

2.2.4 色差控制

在宽带激光传输、放大的过程中,大口径空间滤波器透射元件的色散效应引入传输时间延迟,造成脉冲畸变,使得光束横截面内脉冲时间前后沿不一致,被称为 PTD 效应。PTD 效应将导致光强下降,对应全光束口径的等效脉冲宽度增加,在空间上表现为系统的轴向色差,会影响系统的焦斑形态,降低功率密度。为补偿空间滤波器引入的传输时间延迟,同时考虑到系

统的复杂程度,在脉冲产生分系统采取相应的预补偿措施,避免后续传输过程中引入脉冲的时空畸变,影响系统的输出能力^[55]。

康俊等^[56]提出一种可精确调节色差预补偿量的新装置。加入色差补偿单元后,系统终端聚焦焦斑得到了显著改善,如图 31 所示,焦斑尺寸从补偿前的 $32 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$ 缩小至补偿后的 $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ (半峰全宽)。焦斑(半峰全宽)已接近衍射极限(艾里斑半径为 $2.23 \mu\text{m}$)。

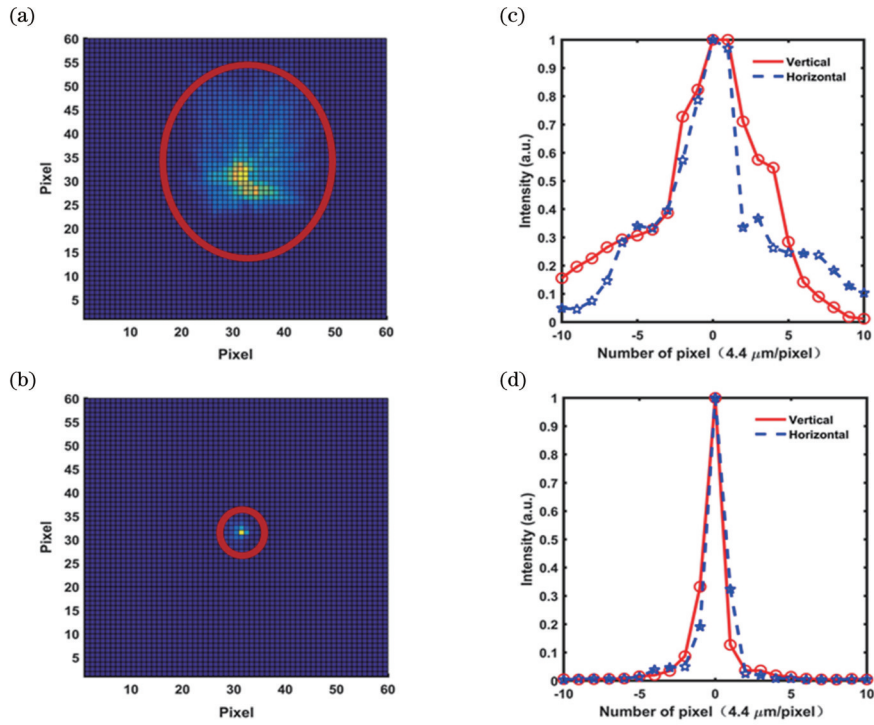


图 31 色差补偿前后系统终端靶点焦斑^[56]。(a)(c)补偿前;(b)(d)补偿后

Fig. 31 Terminal target focal spot of the system before and after chromatic aberration compensation^[56]. (a)(c) Before compensation; (b)(d) after compensation

2.3 指向控制及束靶耦合

2.3.1 光轴控制

高功率激光脉冲进入空腔时对光束定位精度非常敏感,当光束中心与预先设定的定位点之间存在偏差时打靶性能降低,需要考虑靶的激光辐照需求的特点。打靶精度定义为光束瞄准弹着点与实际弹着点之间的 RMS 值,即同一发次中不同光束之间或不同发次中同一光束之间的距离偏差的统计分布。影响光束指向稳定性的因素归纳起来主要有三大类:一是结构件微振动产生的误差;二是光学元件的热畸变误差;三是环境振动引起的随机误差。NIF 的设计报告中指出,结构件微振动产生的误差占 60%,热畸变误差占 35%,随机误差只占 5%。因此,控制光束指向性的设计重点主要是考虑结构件的微振动误差及其动态变化过程,再通过有效的控制手段降低相应的误差,从而达到光束指向稳定的目标。

2.3.1.1 指向性误差分解

在大型高功率激光装置中,为了保证激光经过复杂的光路传输后还能到达最终的光束落点,Sommer 等^[57]在 NIF 设计中提出静态误差分配的概念,将全光路的指向性误差根据传输光学元件的特性以 RMS 的方式进行分解,并给出了整个光学链路各元件的误差范围,实现了系统的误差预测。

考虑到靶点上的误差是所有光路误差的相干叠加,因此每一束光的定位均方差可以表示为

$$\sigma_T^2 = \sigma_A^2 + \sigma_D^2 \leq (50 \mu\text{m})^2, \quad (2)$$

式中: σ_T^2 为总方差; σ_A^2 为在打靶前的准直方差; σ_D^2 为准直与打靶时间内系统漂移所产生的方差。以等概率分配的原则评估环境振动对光学元件稳定性的影响,进一步获得振动激励源的稳定性指标。

2.3.1.2 指向误差的时空耦合

为了更加深入地分析单个光学器件的误差,徐嘉等^[58]提出一种基于动态分布的光束稳定性分析方法,从时域和空域两个方面更准确地表征光束指向的稳定性。该方法不仅可以表征光束静态的误差区间,还可以描述光束在该区间内随时间的变化过程,从而更精确地描述光学器件微振动对光束指向稳定性的影响,并可以根据误差区间内的动态分布得到各光学器件的误差或稳定性要求。

考虑到光学器件对近轴光学系统的影响,可以将光学器件偏离理想光轴位置的距离和角度看作动态失调量。对于失调光学系统的光束描述,一般通过在没有失调的光学系统(理想光学系统)光束描述的基础上加上失调量对光学系统光束的影响来实现(图 32)。对于二维光学系统,可以通过增广矩阵来描述,即

$$\begin{bmatrix} x' \\ \theta' \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & E(t) & F(t) \\ C & D & G(t) & H(t) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \theta \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $\begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix}$ 为输入光信息; $\begin{bmatrix} x' \\ \theta' \end{bmatrix}$ 为输出光信息; $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 为光学器件在理想光轴位置的传输矩阵,只与光学系

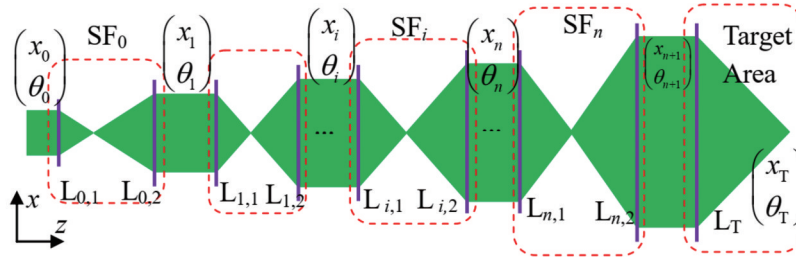


图 32 神光 II 装置光束传输模型^[59]

Fig. 32 Beam transmission model of the SG II device^[59]

统参数有关; $\begin{bmatrix} E(t) & F(t) \\ G(t) & H(t) \end{bmatrix}$ 为由光学器件偏离理想光轴产生的失调量引起的光束变化量,它包括结构安装误差等静态失调和光学器件微振动引起的动态失调,与光学系统参数和失调量有关。

以上通过分析失调光学系统的传输特性和元件结构的位移响应,获得了单元件系统光束落点概率密度分布。通过类似的分析过程,可以建立起结构运动与光束指向性之间的关系,并由此获得光束动态分布的更多细节。

2.3.1.3 指向误差控制

要解决光束指向性控制难的问题,传统方法采用

被动控制方式,例如分配器件的固有频率,使得器件的固有频率避开相互的共振频率,从而降低激励能量的传递效率。NIF 的相关文献^[60]指出,建筑的固有频率为 5~8 Hz,基础桁架的固有频率为 12~20 Hz,支撑镜架的固有频率为 30~50 Hz,镜架的固有频率 > 80 Hz。器件增加阻尼,可增加能量的耗散,减少振动的幅值,如在桁架中灌入水泥以提高阻尼(图 33)。改变器件的振型,降低敏感模态对器件的影响,如:反射镜的影响因素是两维角度,因此在桁架设计中提高转角的刚度,减少平移刚度;透镜的影响因素为两维平移,因此在桁架设计中提高平移刚度,减少转角刚度。

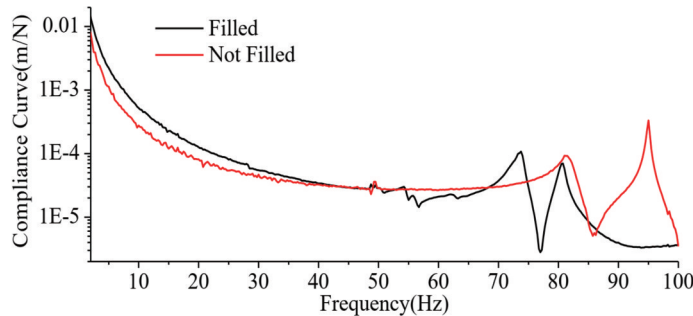


图 33 神光 II 八路升级装置中某桁架浇灌水泥前后的传递率对比^[59]

Fig. 33 Compliance curves before and after pouring cement of a truss in the SG II eight-way upgrade device^[59]

除了采用被动方式提高结构稳定性外,近年来研究人员还发展了主动光束指向控制技术。2019年,唐顺兴等^[61]提出一种将快反镜及高速相机用于高功率激光系统光束指向控制的方法,其特点是复用光束传输光学系统,使该光学系统既是光束传输的光学系统,又可用于光束落点位置反向成像,从而实现光束落点位置反馈。2022年在神光 II 第九路装置上实现了静态闭环控制,优化后光束指向稳定性达到 0.63 μrad (RMS)^[62]。

2.3.2 光束准直

高功率激光装置的准直系统主要是实现预放大和主放大系统的光束自动准直。预放大系统的准直利用近场基准和远场基准,如图 34 所示,通过 CCD 采集信息,利用光束和基准的中心误差实现光束准直的闭环控制^[63]。

如图 35 所示,在四程放大的主放大系统中,腔空间滤波器的准直系统必须同时检测光束的远场指向位置,使得 4 个远场焦斑能够顺利准确地穿过腔空间滤波器的 4 个小孔中心,准直精度要求小于毫米级小孔直径的 5%,且给准直系统的预留空间非常狭小^[64]。准直系统中采用基于衍射元件的远场基准定位技术和激光远场取样技术,该技术在单程空间滤波器和四程空间滤波器中得以应用和实施,并大幅提高了系统的准直精度和稳定性。通过在光路中建立近场和远场的绝对基准,根据光栅取样原理,同时对 4 个焦斑采样成像,在国内首次实现大口径光电开关式四程空间滤波器的远场准直^[65-66]。

2.3.3 靶定位瞄准

靶定位瞄准是通过送靶机构将靶送至靶室内预定位置的过程,并通过特定观察机构将激光瞄准

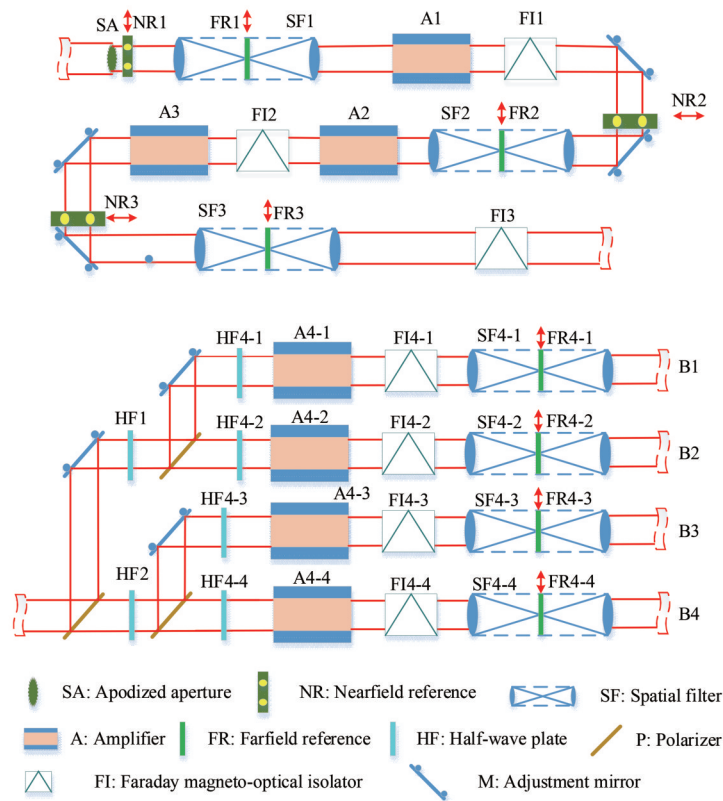


图 34 预放大系统的准直光路示意图^[64]

Fig. 34 Schematic of alignment lightpath in the preamplifier alignment system^[64]

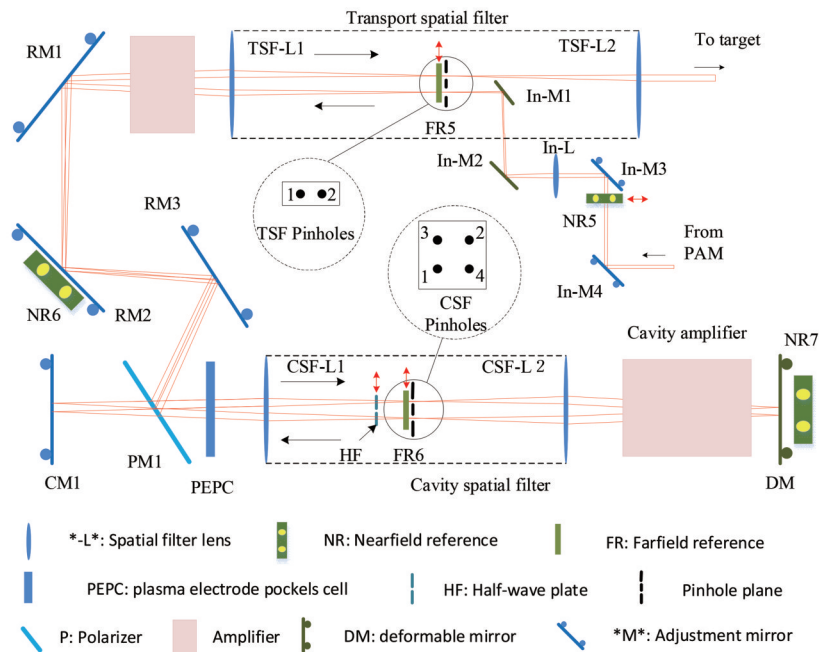


图 35 多程放大主放大系统的自动准直光路示意图^[64]

Fig. 35 Schematic of alignment lightpath in the multi-pass main amplifier^[64]

靶^[67]。以神光 II 升级靶定位瞄准系统为例,展开靶定位瞄准中的光学问题讨论。其中靶定位瞄准系统如图 36 所示。典型的靶定位瞄准系统大致可以分为两个部分:1)观测系统 CCRS/TAS;2)执行机构 TPS。

神光 II 升级靶场装置上有两套用于靶定位的观测系统:CCRS 与 TAS 系统。这两套系统各自在不同的条件下使用,以保证整个系统的自动化程度与兼容性^[68]。

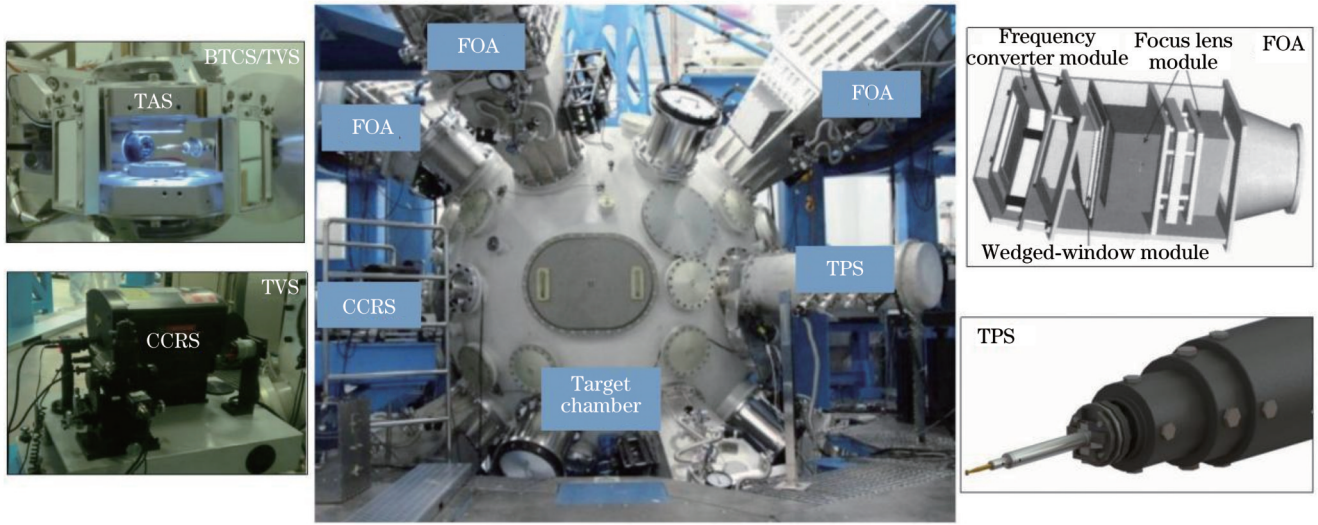


图 36 SG-II-U 的靶定位瞄准系统

Fig. 36 Target positioning and pointing system of SG-II-U

2.3.3.1 CCRS 观测系统

CCRS 系统主要由 2 组安装于靶室赤道面上的正交观测器组成。CCRS 一般安装在靶室外, 独立支撑, 用于观测靶室内的信息, 其基本光机结构^[69]如图 37 所示。CCRS 系统的基本光学部分包括: 1) 将卡塞格林

望远镜模组作为主成像系统进行高分辨率、大视场的成像; 2) 将内调焦望远镜系统作为辅助成像系统, 提供准直光源以及十字叉丝; 3) 通过光学成像传递系统将二者有机结合。

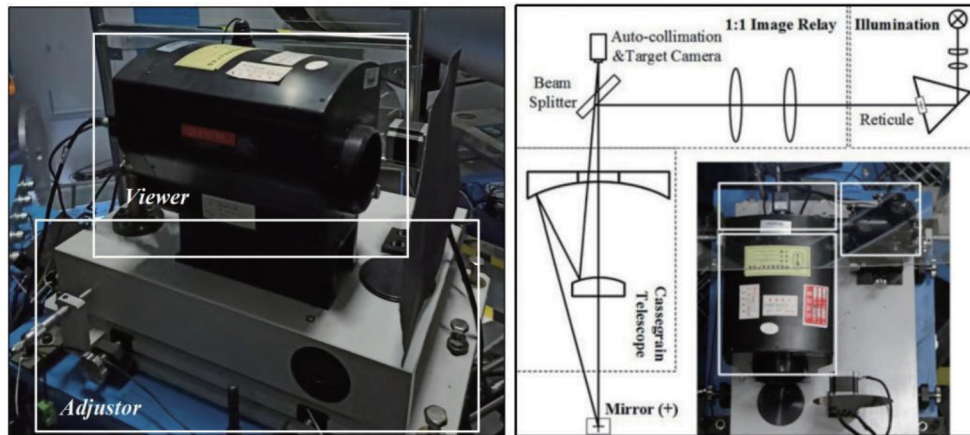


图 37 CCRS 基本光机结构^[69]

Fig. 37 Basic opto-mechanical structure of CCRS^[69]

CCRS 系统可以在 1 m 的工作距离上提供 $10 \mu\text{m}$ 左右的成像分辨率。该成像系统一般有 3 种工作模式: 1) 大视场模式, 拥有 $24 \mu\text{m}$ 左右的成像分辨率以及接近 50 mm 的视场; 2) 兼容模式, 拥有接近 $12 \mu\text{m}$ 的成像分辨率与 24 mm 的视场; 3) 高分辨模式, 拥有 $4 \mu\text{m}$ 左右的成像分辨率以及 8 mm 左右的视场。不同的工作模式可以满足不同的靶定位实验需求。

2.3.3.2 TAS 观测系统

为了提升靶定位的观测精度, TAS 采用了另一种思路, 将观测器移动至靶室内进行近距离观测。如图 38(a) 所示, 观测系统位于 TAS 头部。由于 TAS 头部具有特殊的共轭光学设计结构, TAS 系统不仅可以用

于高精度靶定位, 还能够承担纳秒光束束靶耦合的任务。TAS 系统头部相机的成像分辨率接近 $2 \mu\text{m}$, 光路结构如图 38(b) 所示^[70]。

3 总结与展望

在实验室条件下实现可控核聚变并获得能量增益是科学家长期以来追求的伟大梦想, 也是当今世界上最具挑战性的重大科学工程之一。面向惯性约束聚变和高能量密度物理实验研究的高功率激光驱动器, 可输出脉冲能量为数兆焦耳的纳秒激光, 并根据物理方案的不同需求, 实现数万焦能量的皮秒激光及相应的百皮秒、飞秒或短波长激光脉冲输出。当前, 功能强大

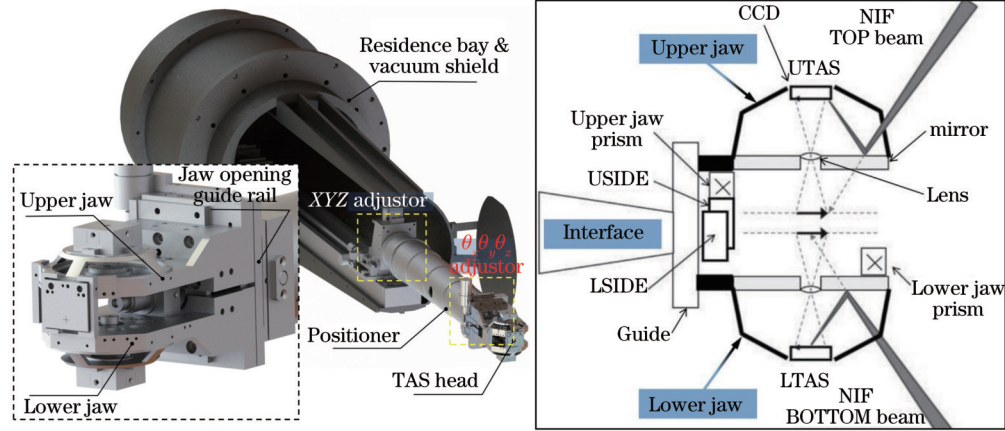


图 38 TAS 观测系统及光路结构^[70]。(a) 观测系统; (b) 光路结构

Fig. 38 TAS observing system and lightpath structure^[70]. (a) Observing system; (b) lightpath structure

的高功率激光装置是世界各大国强激光竞争的焦点之一。本文根据高功率激光驱动器的设计指标和设计特点,从总体光学设计、光束质量控制以及光束打靶精度控制方面,详细梳理了工程光学设计中的关键科学技术问题以及相应解决方法,为高功率激光驱动器的工程设计提供参考。

未来,以满足人类清洁能源需求为牵引,高功率激光驱动器体系将发生崭新的变化。聚变能源物理上需要高增益重复频率输出,高功率激光驱动器需要满足高精度重复频率打靶和高效能量转化、多档高品质重复频率激光脉冲输出、高稳定可靠性连续运行等功能需求。基于物理应用需求的变化,激光驱动器光学设计将考虑采用新体系开展工作,比如时空均匀光场设计、激光与新材料相互作用机理、深度饱和放大的重复频率泵浦和快速冷却、重复频率激光打靶、重复频率光场调控等。随着相关技术的迅速发展,高功率激光驱动器不仅能满足当前物理实验的需求,更是为未来的研究探索创造了条件。

参 考 文 献

- [1] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, et al. National Ignition Facility laser performance status[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3276-3303.
- [2] Denis V, Nicolaizeau M, Néauport J, et al. LMJ 2021 facility status[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11666: 1166603.
- [3] Nakataska M, Azechi H, Jitsuno T, et al. Glass laser system, Gekko III upgrade for ICF ignition[J]. *Fusion Technology*, 1994, 26(3P2): 738-744.
- [4] Danson C N, Malcolm W, Barr J R M, et al. A history of high-power laser research and development in the United Kingdom[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9(18): e18.
- [5] Rozanov V B, Yu Gus'kov S, Vergunova G A, et al. Direct drive targets for the megajoule facility UFL-2M[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 688: 012095.
- [6] 朱健强, 陈绍和, 郑玉霞, 等. 神光 II 激光装置研制[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0100002.
Zhu J Q, Chen S H, Zheng Y X, et al. Review on development of Shenguang- II laser facility[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0100002.
- [7] 朱健强. 大型高功率激光装置设计与研制[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2021.
Zhu J Q. Design and development of large high-power laser device[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2021.
- [8] Zhu J Q, Zhu J, Li X C, et al. Status and development of high-power laser facilities at the NLHPLP[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6(4): e55.
- [9] 张小民, 魏晓峰. 中国新一代巨型高峰值功率激光装置发展回顾[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0100003.
Zhang X M, Wei X F. Review of new generation of huge-scale high peak power laser facility in China[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0100003.
- [10] English E R, Jr, Laumann C W, Miller J L, et al. Optical system design of the National Ignition Facility[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3482: 726-736.
- [11] Jr, Miller J L, Schweyen J C. Ghost reflection analysis for the main laser of the National Ignition Facility[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3482: 748-753.
- [12] Korniski R J, Jr, Miller J L. Spatial filter lens design for the main laser of the National Ignition Facility[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3482: 737-747.
- [13] 赵东峰, 华能, 章亚男, 等. “神光-II”装置第九路靶场终端光学组件的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(2): 245-248.
Zhao D F, Hua N, Zhang Y N, et al. Development of final optics assembly for additional beam in “Shenguang- II” laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(2): 245-248.
- [14] 乔战峰, 卢兴强, 赵东峰, 等. 神光 II 升级装置终端光学组件的排布设计[J]. *中国激光*, 2008, 35(9): 1328-1332.
Qiao Z F, Lu X Q, Zhao D F, et al. Arrangement design of the final optics assembly for the SG- II upgrading laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(9): 1328-1332.
- [15] 张燕, 张艳丽, 李小燕, 等. 高功率激光装置透镜误差对鬼像点位置的敏感性研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3568-3573.
Zhang Y, Zhang Y L, Li X Y, et al. Study on sensitivities of ghost images to lens fabrication errors in high power laser facilities[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3568-3573.
- [16] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, et al. Description of the NIF laser[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 125-145.
- [17] Jiao Z Y, Shao P, Zhao D F, et al. Design and performance of final optics assembly in SG- II Upgrade laser facility[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6(2): e14.
- [18] Hendrix J L, Schweyen J C, Rowe J, et al. Ghost analysis visualization techniques for complex systems: examples from the NIF final optics assembly[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3492:

- 306-320.
- [19] Campbell J H, Hawley-Fedder R A, Stolz C J, et al. NIF optical materials and fabrication technologies: an overview[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5341: 84-101.
- [20] Hunt J T, Renard P A, Simmons W W. Improved performance of fusion lasers using the imaging properties of multiple spatial filters[J]. Applied Optics, 1977, 16(4): 779-782.
- [21] Mainguy S, Toven-Pécault I, Le Garrec B. Propagation of LIL/LMJ beams under the interaction with contamination particles[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5991: 59910G.
- [22] 尤科伟, 张艳丽, 张雪洁, 等. 高功率激光系统中缺陷引起的近场调制分析[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0302002. You K W, Zhang Y L, Zhang X J, et al. Analysis of near-field modulations caused by defects in high power laser system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0302002.
- [23] Bespalov V I, Talanov V I. Filamentary structure of light beams in nonlinear liquids[J]. JETP Letters, 1966, 3(11): 471-476.
- [24] Hunt J T, Manes K R, Renard P A. Hot images from obscurations[J]. Applied Optics, 1993, 32(30): 5973.
- [25] Zhou J H, Li D H. Non-hot-image-plane intense fringe from double scatterers in an intense laser beam through cascaded Kerr medium disks[J]. Applied Optics, 2019, 58(2): 446-453.
- [26] You K W, Zhang Y L, Zhang X J, et al. Structural evolution of axial intensity distribution during hot image formation[J]. Applied Optics, 2017, 56(16): 4835-4842.
- [27] Wang H C, Jiao Z Y, Zhang Y L, et al. Defect edge steepness dependence of multiple nonlinear hot-image formation from a single phase defect[J]. Optics Express, 2020, 28(17): 25591-25605.
- [28] 李良钰, 王仕璠, 李银柱, 等. “神光”装置中空间滤波器的鬼点分析[J]. 中国激光, 2001, 28(9): 826-828. Li L Y, Wang S F, Li Y Z, et al. Ghosts analysis of the spatial filter in “SHENGUANG” facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(9): 826-828.
- [29] Laslandes M, Hugot E, Ferrari M, et al. Mirror actively deformed and regulated for applications in space: design and performance[J]. Optical Engineering, 2013, 52(9): 091803.
- [30] Lemaitre G R. Review on active optics methods: what can we do by elastic bending? [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7655: 76550A.
- [31] Ren Z Y, Liu Z G, Zhu J Q. Optimum support scheme with fringe moment on the large clear aperture of transmitting mirror [J]. Proceedings of SPIE, 2021, 12057: 120571Z.
- [32] Zhu J Q, Tao H, Pan X, et al. Computational imaging streamlines high-power laser system characterization[J]. Laser Focus World, 2015, 51(12): 39-42.
- [33] 潘兴臣, 陶华, 刘诚, 等. 基于相位调制的单次曝光波前测量在高功率激光驱动器中的应用[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0108001. Pan X C, Tao H, Liu C, et al. Applications of iterative algorithm based on phase modulation in high power laser facilities [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0108001.
- [34] Pan X, Veetil S P, Liu C, et al. On-shot laser beam diagnostics for high-power laser facility with phase modulation imaging[J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(5): 055001.
- [35] Pan X C, Veetil S P, Wang B S, et al. Ptychographical imaging with partially saturated diffraction patterns[J]. Journal of Modern Optics, 2015, 62(15): 1270-1277.
- [36] Tao H, Veetil S P, Pan X C, et al. Visualization of the influence of the air conditioning system to the high-power laser beam quality with the modulation coherent imaging method[J]. Applied Optics, 2015, 54(22): 6632-6639.
- [37] 陶华, 刘诚, 潘兴臣, 等. 相干调制成像技术测量高重复频率激光器光学元件热畸变[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1101002. Tao H, Liu C, Pan X C, et al. Measurement of thermal distortion of the optical element in high repetition rate laser with coherent modulation imaging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1101002.
- [38] Dorrer C, Zuegel J D. Design and analysis of binary beam shapers using error diffusion[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2007, 24(6): 1268-1275.
- [39] 谢杰, 范薇, 李学春, 等. 二元振幅型面板用于光束空间整形 [J]. 光学学报, 2008, 28(10): 1959-1966. Xie J, Fan W, Li X C, et al. Spatial laser beam shaping using binary panels[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(10): 1959-1966.
- [40] Fan W, Jiang Y E, Wang J F, et al. Progress of the injection laser system of SG- II [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6(2): e34.
- [41] Heebner J, Borden M, Miller P, et al. A programmable beam shaping system for tailoring the profile of high fluence laser beams[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7842: 78421C.
- [42] Awwal A A S, Leach R, Brunton G, et al. Image processing and control of a programmable spatial light modulator optic damage protection[EB/OL]. [2022-10-08]. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc830055/m2/1/high_res_d/1018821.pdf.
- [43] R&D World[EB/OL]. [2023-01-15]. <https://www.rdmag.com/article/2012/06/2012-r-d-100-award-winners>.
- [44] Di Nicola J M, Bond T, Bowers M, et al. The national ignition facility: laser performance status and performance quad results at elevated energy[J]. Nuclear Fusion, 2019, 59(3): 032004.
- [45] Huang D J, Fan W, Li X C, et al. An optically addressed liquid crystal light valve with high transmittance[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8556: 855615.
- [46] Huang D J, Fan W, Li X C, et al. Performance of an optically addressed liquid crystal light valve and its application in optics damage protection[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(7): 072301.
- [47] Huang D J, Fan W, Cheng H, et al. Applications of OALCLV in the high power laser systems[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10457: 104571P.
- [48] Wang C, Wei H, Wang J F, et al. 1 J, 1 Hz lamp-pumped high-gain Nd:phosphate glass laser amplifier[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(1): 011401.
- [49] Di Nicola J M G, Yang S T, Bond T C, et al. The National Ignition Facility laser performance status[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11666: 1166604.
- [50] 郭爱林, 朱海东, 杨泽平, 等. 神光 II 升级装置波前传输计算模型与验证[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0214001. Guo A L, Zhu H D, Yang Z P, et al. Wavefront propagation modeling and verification of the SG- II updated laser facility[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0214001.
- [51] 郭爱林, 朱海东, 杨泽平, 等. 基于驱动器位置相位校正的变形镜控制算法[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0311001. Guo A L, Zhu H D, Yang Z P, et al. Deformable mirror control algorithm based on the phase correction at the actuator position [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0311001.
- [52] 郭爱林, 朱海东, 唐仕旺, 等. 高功率激光驱动器波前残余像差研究[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0814002. Guo A L, Zhu H D, Tang S W, et al. Residual wavefront aberration of high-power laser facility[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0814002.
- [53] Lin Y, Kessler T J, Lawrence G N. Design of continuous surface-relief phase plates by surface-based simulated annealing to achieve control of focal-plane irradiance[J]. Optics Letters, 1996, 21(20): 1703-1705.
- [54] Skupsky S, Short R W, Kessler T, et al. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light[J]. Journal of Applied Physics, 1989, 66: 3456-3462.
- [55] 崔自若, 康俊, 谢兴龙, 等. 基于变焦像传递的飞秒拍瓦激光系统色差补偿[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0905001. Cui Z R, Kang J, Xie X L, et al. Compensation for chromatic aberration in femtosecond petawatt laser systems based on zoom image transfer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9):

- 0905001.
- [56] 康俊, 崔自若, 朱坪, 等. 超短超强激光装置中消色差技术的研究与进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 090001.
Kang J, Cui Z R, Zhu P, et al. Research progress of achromatic technology in ultra-short and ultra-intense laser facility[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 090001.
- [57] Sommer S C, Bliss E S. Beam positioning[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3492: 112-135.
- [58] 徐嘉, 刘芳, 杨朋千, 等. 基于动态分布的高功率激光器光束指向稳定性分析[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1002001.
Xu J, Liu F, Yang P Q, et al. Beam pointing stability analysis based on dynamic distribution for high power laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(10): 1002001.
- [59] Liu F. Beam Positioning Stability Analysis and Improvements on High Power Laser Facility[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 36-55.
刘芳. 高功率激光装置光束指向稳定性分析及改进[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2012: 36-55.
- [60] Tietbohl G L, Sommer S C. Stability design considerations for mirror support systems in ICF lasers[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3047: 649-660.
- [61] 唐顺兴, 朱健强, 李学春, 等. 光束落点位置反馈装置: CN109901631A[P]. 2019-06-18.
Tang S X, Zhu J Q, Li X C, et al. Light beam drop point position feedback device: CN109901631A[P]. 2019-06-18.
- [62] Tang S X, Guo Y J, Yang P Q, et al. Stability improvement of multi-beam picosecond-petawatt laser system for ultrahigh peak-power applications[J]. Frontiers in Physics, 2023, 11: 1118254.
- [63] 高妍琦, 朱宝强, 刘代中, 等. 神光 II 升级装置远场准直系统研究[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 065204.
Gao Y Q, Zhu B Q, Liu D Z, et al. Far field auto-alignment system used in SG-II-Up system[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 065204.
- [64] Gao Y Q, Cui Y, Li H, et al. Alignment system for SGII-Up laser facility[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 100: 87-96.
- [65] 丁莉, 刘代中, 高妍琦, 等. 高功率激光装置光束准直系统新型远场监测技术[J]. 物理学报, 2008, 57(9): 5713-5717.
Ding L, Liu D Z, Gao Y Q, et al. New far-field detection technique for beam alignment system in high power laser facility[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(9): 5713-5717.
- [66] 刘代中, 丁莉, 高妍琦, 等. 基于同轴照明和光栅取样的激光束准直远场监测系统[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1101-1104.
Liu D Z, Ding L, Gao Y Q, et al. Far-field detection system of laser beams alignment based on gratings sampling and on-axial illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(5): 1101-1104.
- [67] Kalantar D H, Di Nicola P, Shingleton N, et al. An overview of target and diagnostic alignment at the National Ignition Facility[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8505: 850509.
- [68] Ren L, Shao P, Zhao D F, et al. Target alignment in the Shen-Guang II upgrade laser facility[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6(1): e10.
- [69] 林炜恒, 朱健强, 任磊. 高功率激光装置中的靶定位及束靶耦合技术研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0400001.
Lin W H, Zhu J Q, Ren L. Advances in target alignment and beam-target coupling technologies of laser fusion facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0400001.
- [70] 周洋, 邵平, 赵东峰, 等. 神光 II 升级装置纳秒靶瞄准定位技术研究[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208002.
Zhou Y, Shao P, Zhao D F, et al. Research on the system of the nanosecond target aiming and positioning of the SG-II updated laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(12): 1208002.

Key Optical Engineering Issues of High-Power Laser Facility

Zhu Jianqiang^{***}, Yang Pengqian^{*}, Zhang Yanli^{**}, Liu Cheng, Zhou Shenlei, Liu Zhigang, Tang Shunxing, Guo Ailin, Fan Quantang, Liu Daizhong, Zhang Guowen, Sun Mingying, Jiao Zhaoyang, Zhang Yan, Kang Jun, Jiao Xiang, Zhang Xuejie, Ren Zhiyuan, Pan Liangze, Huang Dajie, Zhang Xiaoqi, Zhu Ping, Hua Neng, Jiang Zhuocai, Wang Liangyu, Yang Xueying, Yang Fuli, Zhang Yanjia, Lin Weiheng

Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract

Significance The high-power laser facility (HPLF) is the most sophisticated active optical system, whose performance is required to approach the physical limits. There are three primary procedures in designing HPLFs for research on inertial confinement fusion (ICF), namely, physical design, optical design, and mechanical design, in which optical engineering plays an important role. Optical engineering of HPLFs needs to follow its specific design principles and key points to achieve high output energy and precision beam quality. Given the final goal and feature of the laser facility, this paper describes the crucial technical issues in optical engineering development and their corresponding solutions from the aspects of the techniques for beam quality control, system alignment, target positioning, and associated technologies.

Progress The high-power neodymium glass laser driver is internationally recognized as the most mature laser driver for physical research on ICF. It is also an indispensable and important platform for studies of high-energy-density physics and extreme-condition physics problems, as well as basic research on astrophysics. As one of the most representative giant optical projects in the world, the laser driver integrates advanced optics, laser technology, precision machinery, and

computer control. Its scale and overall performance represent a country's highest level of laser technology and engineering. Many great powers of science and technology all over the world have carried out research on laser fusion and implemented the development plans of laser drivers, and several generations of HPLFs have been successively developed and built. The United States built the world's largest experimental device for laser fusion, i. e. , the National Ignition Facility (NIF), in 2009. France is building a large-scale laser nuclear fusion device LMJ, which is similar to the NIF, and 56 laser beams in it have been operating at full power since 2019. Japan, the United Kingdom, and Russia have also built or are building smaller laser fusion devices. At the same time, China has successively built large-scale single-channel laser devices, six-channel laser devices, and ShenGuang (SG) series laser devices, playing a vital role in the international arena of ICF. With the development of HPLFs in China, the research on the laser driver, unit technology, and component technology has also been rapidly enhanced.

HPLFs mainly include nanosecond (ns) laser devices and picosecond (ps) petawatt laser devices. The former outputs a ten-thousand-joule-level high-energy ns laser in a single channel, and the latter outputs a kilojoule-level high peak power ps laser in a single channel. The design of HPLFs consists of energy flow design and beam transmission design. The laser physics design of a laser driver is the first stage, followed by the optical engineering design and precision optical-mechanical structure design, and the final stage focuses on the development of the laser driver. This design logic indicates the important role of engineering optics in the development of laser drivers. An HPLF should meet the requirements of the output ability, beam quality, and beam-control ability proposed by physics. The device mainly contains several core indicators: energy, power, beam quality (focus spot distribution), waveform (time distribution), energy balance and power balance, as well as synchronization and target-hitting accuracy. Among them, beam quality and target-hitting accuracy are closely related to optical engineering design. Due to the large scale of HPLFs, long laser links, and large-caliber optical components, the various development processes need to be combined to satisfy the requirements of the above indicators, and the indicators of each subsystem must be reasonably allocated and strategically controlled throughout the system.

The engineering optics of an HPLF has its particular traits. The device contains not only traditional static components but also dynamic components such as laser amplification and control components. Due to the thermal effect, the beam quality will be degraded after the laser passes through the amplifying element, and control measures are required to ensure the beam quality of the system. In addition, the high output energy of the device may cause damage to optical elements, and corresponding measures must be taken to minimize the risk of damage to ensure safe operation. Starting from the main considerations of engineering optics, i. e. , optical design and ways to ensure the beam quality and target-hitting accuracy of the system, this paper summarizes the key scientific and technical issues concerning the engineering optics of the existing device. The overall optical design of the device is mainly to "set up the frame", establish the overall optical transmission chain of the device, and give the indicator requirements of components. The beam quality control is a "construction method", and linear and nonlinear transmission run through the entire laser device, which requires a whole picture of consideration. Specifically, the relationship between optical component indicators and beam quality should be clarified; the design, processing, and detection methods of special optical components should be determined; the corresponding optical detection means and active control methods should be matched; the residual wavefront and intensity unevenness of the system should be precisely controlled. In this way, the beam quality can be guaranteed. Target-hitting accuracy is the "foundation", which mainly provides decomposition methods for indicators and effective optical-axis control methods, and it cooperates with precise guidance and alignment technology.

Conclusions and Prospects Achieving controllable nuclear fusion and energy gain under laboratory conditions has long been a great dream pursued by scientists, and it is the most challenging major scientific project in the world today. The high-power laser driver for ICF and high-energy-density physical experiments has a powerful output ability of several megajoules of ns laser pulse energy, and it is equipped with tens of kilojoules of ps laser and corresponding output capabilities of 100 ps, femtoseconds (fs), or short wavelength laser pulses according to different physical demand. At present, powerful HPLFs are one of the focuses of the strong laser competition among the world's major countries. According to the design indicators and design characteristics of high-power laser drivers, this paper sorts out the key scientific and technical problems and corresponding solutions in optical engineering design in detail from the aspects of overall optical design, beam quality control, and target-hitting accuracy control. The research is expected to provide a reference for the engineering design of high-power laser drivers.

Key words optical design; inertial confinement fusion (ICF); SG laser facility; engineering optics; laser optics