

文章编号: 1001-4322(2007)02-0245-04

“神光-Ⅱ”装置第九路靶场终端光学组件的研制*

赵东峰¹, 华能¹, 章亚男², 李朝东²,
戴亚平³, 孙麟治², 朱健强¹(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; 2. 上海大学精密机械学院, 上海 200436;
3. 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要: 针对“神光-Ⅱ”装置第九路系统主激光瞄准精度小于等于 $30\ \mu\text{m}$ 和大焦斑辐照均匀性优于 10% 的要求, 提出了靶场终端光学组件的设计结构。应用有限元法对组件关键机械元件和 ICF 靶室整体进行动静态分析, 优化了设计参数。同时与聚焦透镜配合进行数值分析列阵透镜, 确定了单元数、曲率和厚度以及单元长和宽等参数。经过实验测试, 主激光瞄准精度达到 $28.9\ \mu\text{m}$, 大焦斑辐照的形状为 $1\ 000\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$, 均匀性为 12.0%。

关键词: 高功率激光驱动器; 终端光学组件; 均匀性; 大焦斑; 列阵透镜
中图分类号: TN241 **文献标识码:** A

随着惯性约束聚变(ICF)研究的深入, 世界各国都在大力发展高功率激光驱动器, 使其更接近当前物理实验的需求^[1]。目前, 我国就在“神光-Ⅱ”装置八路的基础上增建一路, 即研制第九路作为原八路的配套系统, 它能提供输出能量及通量密度更大、总体性能更好、功能更多的大口径激光束作为物理实验的主动诊断手段, 更好地开展有关等离子体状态研究。

靶场终端光学组件(FOA)是高功率激光驱动器靶场终端光学系统的重要器件之一。组件中装夹均为大口径光学元件, 与真空靶室构成整体需达到高真空度, 并且组件的稳定性直接影响主激光瞄准精度, 为此各国都在开展靶场终端光学组件单元技术的研究。目前, 美国 NIF 装置应用有限元法和成组技术, 研制的组件为 4 路集成, 2×2 空间分布, 每路通光口径为 $400\ \text{mm} \times 400\ \text{mm}$, 其功能涵盖聚焦、谐波转换、束匀滑、测量、谐波分离、真空密封等^[2-3]。其它各国结合不同驱动器的特点, 靶场终端光学组件结构和功能上会有所差别。我国基于“神光-Ⅱ”装置特点, 开展的靶场终端光学组件单元技术研究, 其功能集聚焦、束匀滑、真空密封等于一体。第九路系统需将 $\phi 350\ \text{mm}$ 主激光精确、稳定地瞄准于实验靶上, 精度优于 $\pm 30\ \mu\text{m}$ (rms), 同时焦斑辐照均匀性需 $\leq 10\%$ (rms)。这样, 第九路靶场终端光学组件的研制在实现功能的同时, 更重要的是要优化设计结构, 使组件外接固定于 ICF 靶室的稳定性优于 $5\ \mu\text{rad}$ ^[4]。本文主要应用有限元法对组件设计结构中关键元件以及 ICF 靶室进行动静态分析, 确定设计参数。同时与聚焦透镜配合进行数值分析, 确定列阵透镜参数, 实现物理实验要求的可控大焦斑均匀辐照。

1 组件设计结构

“神光-Ⅱ”装置第九路系统聚焦透镜焦距达到 1.575 m, 而 ICF 靶室直径为 1.5 m, 这样靶场终端光学组件作为整体外接固定于真空靶室上, 其设计结构如图 1 所示。机械元件主要包括锥形真空套筒、聚焦透镜五维调节机构、窗口玻璃后罩和列阵透镜(LA)调节机构; 光学元件包括 $\phi 380\ \text{mm}$ 为聚焦透镜、 $\phi 400\ \text{mm}$ 的窗口玻璃和列阵透镜以及 $\phi 300\ \text{mm}$ 的防溅射板。其中锥形真空套筒一端与 ICF 靶室固定连接, 另一端固定着聚焦透镜五维调节机构和窗口玻璃后罩,

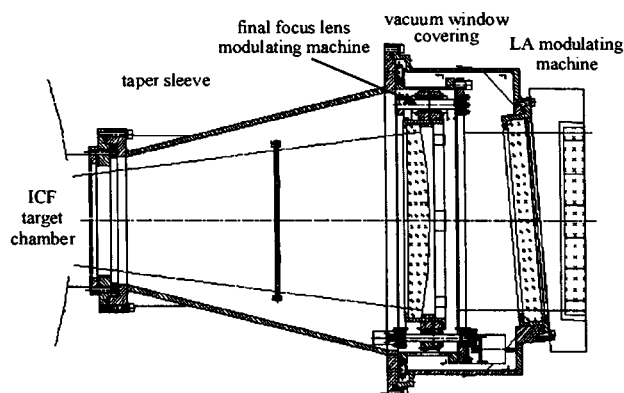


Fig. 1 Schematic of final optical assembly
图 1 终端光学组件示意图

* 收稿日期: 2006-09-22; 修订日期: 2007-01-16

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 赵东峰(1976—), 男, 江西人, 硕士生, 主要从事高功率激光装置靶场光学技术的研究, dfzha@siom.ac.cn.

同时防溅射板装夹在锥形真空套筒内,而列阵透镜调节机构固定在窗口玻璃后罩外侧。组件通光口径为 $\phi 370$ mm,外形尺寸达到 $\phi 700$ mm \times 1 100 mm。

2 关键元件设计分析

2.1 锥形真空套筒

用于终端光学组件与靶室相接的锥形真空套筒,需有足够的强度避免变形,同时保证组件的真空度达到 6×10^{-3} Pa。选择材料为钢,有限元建模分析时设置边界条件为与靶球接触的小法兰端面全部节点固定支撑,载荷条件为大法兰端部受 862.4 N 的承重力,沿内端面均匀分布^[5]。通过改变壁厚和加强筋分布,计算大法兰口处的最大挠度,最终确定锥形真空套筒的壁厚为 10 mm,其小法兰周围加 12 个厚度为 16 mm 的加强筋。

2.2 窗口玻璃后罩

窗口玻璃后罩位于组件的外端,要有足够的强度避免高真空状态下变形而影响窗口玻璃的面形,并尽量减少重量来提高组件的稳定性。选用材料为铝,窗口玻璃与竖直方向成 5° ,壁厚 8 mm,建立模型分析。在 0.1 MPa 作用下窗口玻璃最大的变形量达到 $59.22 \mu\text{m}$,同样铝壳接触应力最大达到 18.72 N/mm^2 ,如图 2 所示。根据设计结构,在罩壳后端面固定 30 kg 的列阵透镜调整机构,对最大应力有所改善,同时在装夹窗口玻璃处均匀分布 12 个 12 mm 加强筋,使玻璃最大变形量仅为 $5.37 \mu\text{m}$,铝壳最大应力为 6.91 N/mm^2 。

2.3 聚焦透镜调节机构支撑杆

在设计结构中用于固定前环和后环的支撑杆,其一端固定于锥形真空套筒的大法兰端面,另一端通过后环支撑着聚焦透镜装夹机构和自动调焦机构,这样由于支撑杆受力变形,直接影响到聚焦透镜的稳定性。有限元建模分析支撑杆分布对后环挠度的影响,如表 1 所示。由表可见,支撑杆为 9 根均布时后环挠度明显小于 6 杆和 3 杆均匀分布时的后环挠度。

2.4 ICF 靶室

将终端光学组件同时与 ICF 靶室的法兰 F_1 和 F_2 固定,如图 3 所示。通过受力分析,两组件相对靶室中心产生的扭矩为 $889.84 \text{ N} \cdot \text{m}$,为向西倾侧扭矩。而 ICF 靶室是由 4 个对称指向球心的底脚支撑,每个底脚有 4 个 $\phi 20$ mm 螺钉固定,其中每个螺钉受 112.72 N (螺钉到靶室中心轴距为 1 m)的拉力,由此 ICF 靶室不会发生倾斜。

应用有限元法对固定装夹了组件的 ICF 靶室进行建模,同时将在“神光-Ⅱ”装置现场测试得到的 ICF 靶室相应法兰口在抽真空时的瞬态位移响应和高真空维持状态下的稳动态响应作为边界条件,约束在组件与靶室连接的法兰端面进行分析。静态变形最大的是 $\phi 200$ mm 法兰 F_1 接口,大小为 0.12 mm 。同时为显示整体动态响应,取抽真空过程的最大瞬态,即启动插板阀作为瞬态约束,最大响应集中在聚焦透镜调节机构后环处,大小为 $0.2 \mu\text{m}$ 。而聚焦透镜由于用 1.5 mm 厚硅胶装夹,其动态响应相对光轴横向位移量仅为 $0.12 \mu\text{m}$ 。

2.5 列阵透镜

列阵透镜由多个六角形或方形小透镜整齐排列而成,可将入射光分割成多个子光束,通过靶镜后再叠加聚焦,可实现对靶镜焦平面的同一区域照明。其焦斑属性为受多光束干涉调制的菲涅尔衍射花样,具有陡边、近似平顶的焦斑包络特点,从而达到焦斑整形和提高焦斑均匀性的要求^[6]。靶面的光场分布可写成

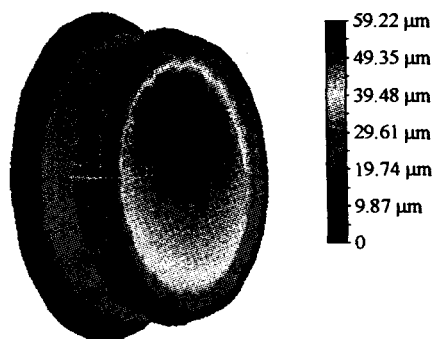


Fig. 2 Finite element method model of vacuum window covering in high vacuum

图 2 在高真空状态下窗口玻璃罩壳的模型

表 1 不同分布时的后环挠度

Table 1 Flexibility of back ring with the distribution of pillars

distribution of pillars	flexibility of back ring/ μm
3 pillars, symmetric	15.92
6 pillars, symmetric	7.55~4.90
9 pillars, symmetric	4.73~2.99

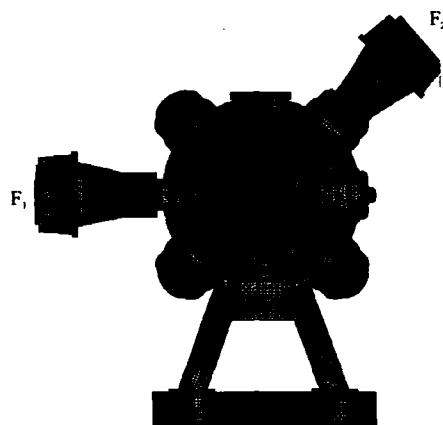


Fig. 3 Finite element method model of ICF target chamber in dynamic state

图 3 ICF 靶室动态响应

$$U(x, y) = -\frac{j}{\lambda z} \exp\left[\frac{jk}{2z}(x^2 + y^2)\right] \iint U_0(x', y') \times \exp\left\{\frac{jk}{2z}[(1 - z/f_0)(x'^2 + y'^2) - 2(xx' + yy')]\right\} dx' dy' \quad (1)$$

式中： f_0 为聚焦透镜的焦距； z 为聚焦透镜到靶面的距离； k 为波数； $U_0(x, y)$ 为入射激光通过列阵透镜后的复振幅。根据第九路主激光波长 $\lambda = 0.527 \mu\text{m}$ ，聚焦透镜焦距为 $1\,575 \text{ mm}$ ，和物理实验要求焦斑形状为 $1\,000 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ ，均匀性 $\eta \leq 10\%$ ，为此，进行数值分析确定列阵透镜设计参数，见表 2。

表 2 列阵透镜设计参数
Table 2 Design parameters of LA

unit number	LA unit				major lens(aspheric lens)	
	long axis/mm	short axis/mm	thickness/mm	radius/mm	diameter/mm	focal length/mm
45	68.1	37	25	50 420	380	1 575

3 实验测试

在第九路系统开展了主激光瞄准精度的实验测试。主要采取 $\phi 350 \text{ mm}$ 主激光在 ICF 靶室 F_2 聚焦辐照 $\phi 70 \mu\text{m}$ 标志孔(材料为钛)，用 X 光针孔相机测量每发的瞄准偏差。共测试 9 发，每发的瞄准偏差如图 4 所示。对可控焦斑均匀性的实验测试，其结果显示：焦斑形状为 $1\,000 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ ，均匀性 $\eta = 12.0\%$ ，如图 5 和图 6 所示。

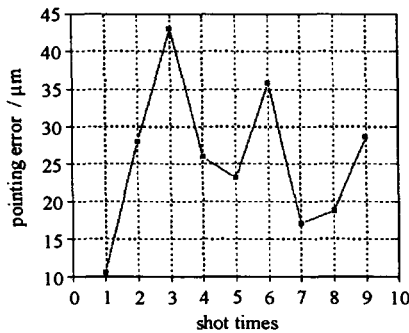


Fig. 4 Experimental datas of the pointing error of main laser

图 4 主激光瞄准精度实验测试数据

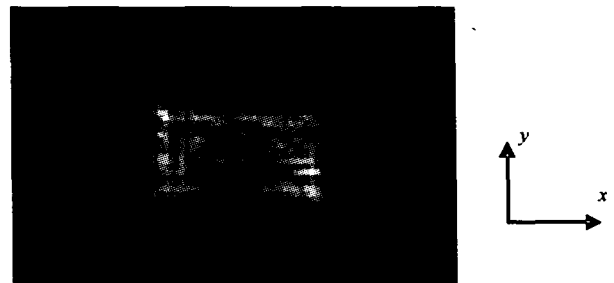


Fig. 5 Photograph of focal spot recorded by CCD

图 5 用 CCD 记录的焦斑照片

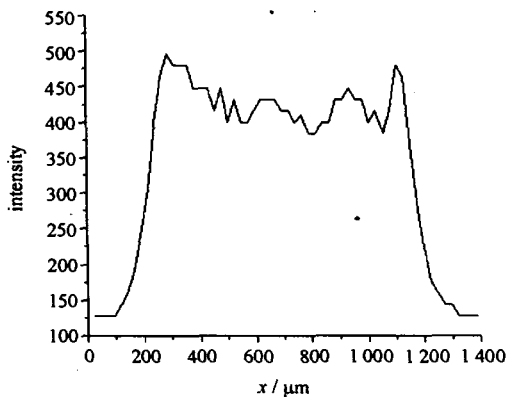
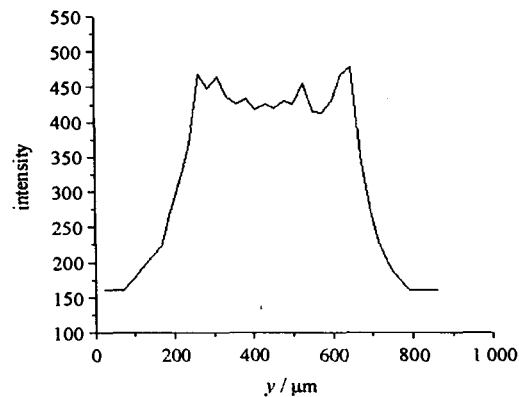


Fig. 6 Experimental result of intensity distribution

图 6 光强分布测量结果



实验测试表明，主激光瞄准精度为 $28.9 \mu\text{m}$ ，小于第九路系统研制所要求的 $30 \mu\text{m}$ 。从而对终端光学组件和 ICF 靶室进行有限元分析，优化了组件的设计结构，能够保证其在高真空状态下稳定性优于 $5 \mu\text{rad}$ 。同时可控大焦斑的均匀性 $\eta = 12.0\%$ ，略大于要求的 10.0% ，这主要是实验测试的激光光束质量对其有直接的影响。

4 结论

第九路靶场终端光学组件是靶场系统重要的单元器件之一。在研制过程中，为实现组件的功能，同时使其

稳定性和焦斑均匀性达到系统要求,用有限元法对组件整体及其主要机械元件进行了动静态分析,同时数值分析设计了列阵透镜,优化设计了组件的设计结构。经过实验测试,主激光瞄准精度达到 $28.9 \mu\text{m}$,大焦斑辐照的形状为 $1000 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$,均匀性为 12.0% ,达到物理实验的要求。在已开展的多次物理实验中,靶场系统顺利完成了各项实验任务,说明所研制的靶场终端光学组件能够满足目前物理实验要求。

参考文献:

- [1] Van B M, Burkhart S C, Haynam C A, et al. National ignition facility commissioning and performance[C]//Proc of SPIE. 2004, **5341**: 55-65.
- [2] Wegner P, Auerbach J, Biesiada T, et al. NIF final optics system; frequency conversion and beam conditioning[C]//Proc of SPIE. 2004, **5341**: 180-189.
- [3] Larson D W. NIF laser line-replaceable units (LRUs)[C]//Proc of SPIE. 2004, **5341**: 127-136.
- [4] 赵东峰,戴亚平,尹宪华,等. 高功率激光装置靶场光学系统的误差分析[J]. 中国激光, 2004, **31**(12):1425-1428. (Zhao D F, Dai Y P, Yin X H, et al. Error analysis for the optical system of target area on high power laser facility. *Chinese J Lasers*, 2004, **31**(12):1425-1428)
- [5] 乔战峰,赵东峰,戴亚平,等. “神光-Ⅱ”第九路终端光学系统稳定性分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(3):419-422. (Qiao Z F, Zhao D F, Dai Y P, et al. The stability analysis for final optical system of the additional beam of “SG-Ⅱ” laser facility. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(3):419-422)
- [6] 傅思祖,孙玉琴,黄秀光,等. “神光-Ⅱ”装置靶面均匀辐照系统的优化设计[J]. 中国激光, 2003, **30**(2):129-133. (Fu S Z, Sun Y Q, Huang X G, et al. Optimizing design for uniform irradiation system on target surface of “Shenguang-Ⅱ” facility. *Chinese J Lasers*, 2003, **30**(2):129-133)

Development of final optics assembly for additional beam in “Shenguang-Ⅱ” laser facility

ZHAO Dong-feng¹, HUA Neng¹, ZHANG Ya-nan², LI Chao-dong²,
DAI Ya-ping³, SUN Lin-zhi², ZHU Jian-qiang¹

(1. *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,*
P. O. Box 800-211, Shanghai 201800, China;

2. *Fine Mechanics Academy, Shanghai University, Shanghai 200436, China;*

3. *Shanghai Institute of Laser Plasma, CAEP, P. O. Box 800-229, Shanghai 201800, China)*

Abstract: In order to realize less than $30 \mu\text{m}$ the pointing error of the main laser and the large focal spot irradiation uniform on target surface better than 10% of the additional beam in “Shenguang-Ⅱ” laser facility, a physical design of final optics assembly(FOA) has been proposed. Using finite element method, the static and dynamic states about the main machine components of FOA and the integral ICF target chamber are analyzed and the design of FOA is optimized. And using mathematics simulation, lens array has been analyzed and designed based on the focus lens about unit number, radius, thickness, long axis and short axis. Experimental results show that the pointing error of main laser on the target is $28.9 \mu\text{m}$, the large focal spot is $1000 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ and the large focal spot irradiation uniform is 12.0% .

Key words: High power laser facility; Final optical assembly; Uniform; Large focal spot; Lens array