

# 大型 ICF 装置靶场传输光路排布研究

王美聪 朱明智\* 陈刚 吴文凯 傅学农

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 大型惯性约束聚变(ICF)装置靶场将从主放大系统输出的平行激光阵列转换为靶室附近的球形阵列,并以特定的角度进入终端光学系统。靶场传输光路排布作为靶场光传输系统总体结构设计的依据,在满足物理和光学等要求的基础上,还应重点考虑工程建设成本和系统维护性能。随着 ICF 装置规模的增大,打靶激光光束数量增加,靶场传输光路排布难度增加。结合目前国内外大型 ICF 装置,分析了靶场传输光路排布的特点,讨论了传输光路排布与光传输系统布局、光机结构设计和系统维护性能的关系,为我国更多束激光打靶的 ICF 装置的靶场传输光路排布提出建议。

**关键词** 激光技术;传输光路排布;惯性约束聚变;靶场

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.011403

## Research of Transport Beams Arrangement in Target Area for Large Scale ICF Facility

Wang Meicong Zhu Mingzhi Chen Gang Wu Wenkai Fu Xuenong

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** In the target area of large inertial confinement fusion (ICF) facility, the rectangular beams arrangement at the main amplifier output is mapped to the spherical-geometry beams configuration near the target chamber. The beams are imported into the final optical assemblies with special angles. The beam transport system is designed based on the beams arrangement. The beams arrangement should meet physical and optical requirements. At the same time, the construction cost and the maintenance performance of the beam transport system should be seriously considered. In larger ICF facility, the beams arrangement is much more complex with the increase of beam number. The beams arrangements of the large facilities in the world are analyzed. The relationships between the beams arrangement and the layout of beam transport system, the opto-mechanical design and the maintenance performance are discussed. Some advices of the beams arrangement are given for the ICF facility with much more multiple beams.

**Key words** laser technique; transport beams arrangement; inertial confinement fusion; target area

**OCIS codes** 140.3460; 140.3580; 230.4040

## 1 引言

为获得高输出输入能量,用于惯性约束聚变(ICF)研究的大型激光器采用多束激光打靶。2009年建成的美国国家点火装置(NIF)<sup>[1]</sup>是当今输出能量最大的 ICF 激光器,在全部 192 束激光同步运行下,装置已成功输出 1.8 MJ 能量<sup>[2]</sup>。法国兆焦耳装置(LMJ)<sup>[3,4]</sup>是目前在建的大型 ICF 装置,装置设计的输出能量和 NIF 相当,采用 240 束激光打靶。我国在建的神光 III 主机装置为国内规模最大的 ICF 装置,装置输出能量设计为  $10^5$  J,采用 48 束激光打靶。

大型 ICF 激光器采用几十束甚至上百束激光打靶,在主放大系统<sup>[5]</sup>输出端激光光束为平行阵列排布。

**收稿日期**: 2012-09-20; **收到修改稿日期**: 2012-10-11; **网络出版日期**: 2012-11-21

**基金项目**: 国家 863 计划(2007AA804217)和中国工程物理研究院科学技术发展基金(2012B0203021)资助课题。

**作者简介**: 王美聪(1979—),女,硕士,工程师,主要从事惯性的约束聚变装置光机结构设计方面的研究。

E-mail: wangmc@caep.ac.cn

\* **通信联系人**。E-mail: zhumz@caep.ac.cn

根据打靶物理需要,在靶场需要将平行光束在靶球附近以球形排布注入终端光学系统(FOA)<sup>[6]</sup>,最终实现光束对靶面的均匀辐照<sup>[7]</sup>。因此在靶场需要对多束激光进行光路排布,即对激光光束在空间的路径走向进行设计,以实现将光束从主放大系统输出端的平行阵列排布转换为靶球附近的球形排布。靶场光传输系统是在光路排布的牵引下,采用多块传输反射镜实现光束的引导和传输,包括反射镜、镜架以及光束管道等光机结构。不同的光路排布将直接影响光传输系统的总体结构设计,包括布局、光机结构设计和系统维护性能等。

随着输出能量的增加,光学元件的负载能力受到了挑战,大型 ICF 装置呈现出采用甚多束激光打靶的趋势,其靶场传输光路排布也将面临新的困难。本文分析了 NIF、LMJ 和神光 III 等大型 ICF 装置的靶场传输光路排布特点,在满足特定的物理和光学要求的前提下<sup>[8]</sup>,讨论了相关的总体布局、光束传输方式和光程等,同时还讨论了与光路排布密切相关的光传输系统布局、光机结构设计和系统维护等问题,以期为我国甚多束 ICF 装置的靶场传输光路排布提供参考。

## 2 大型 ICF 装置靶场传输光路排布

### 2.1 NIF

NIF 采用“U”型总体布局<sup>[1]</sup>,如图 1 所示,两个主放大系统的输出光束经过靶区两侧的编组站进入靶区,每个主放大系统输出两个激光簇,一个激光簇对应并列排布的 6 个束组,每个束组为  $4 \times 2$  光束阵列。图 2 为 NIF 靶场传输光路的下半部分<sup>[9]</sup>。NIF 靶场以集束( $2 \times 2$  光束阵列)为单位进行光束传输。在上下半球分四环注入,入射极角约为  $23.5^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $44.5^\circ$  和  $50^\circ$ ,每个人射角对应集束数量分别为 4、4、8、8。从传输空间滤波器输出至聚焦透镜的光程长为  $62 \sim 74$  m,光程差为  $12$  m<sup>[10]</sup>。

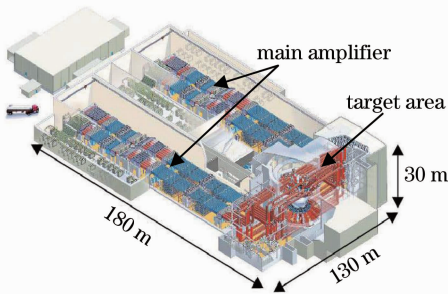


图 1 NIF“U”型总体布局

Fig. 1 U-shape general layout of NIF

如图 3 所示,NIF 从空间滤波器 SF4 输出的集束依次经过 LM4~LM8 等 5 块反射镜的引导,进入 FOA,最终到达靶室中心(TCC),其中  $y$  轴代表高度方向<sup>[9]</sup>。LM4 和 LM5 将集束引导至特定的高度和方位,LM5、LM6、LM7 和 LM8 位于一个高度平面内,LM7、LM8、FOA 和 TCC 共处在一个经线平面内。部分集束经过 LM5 的引导直接传输到 LM7,这样集束只需经过 4 块反射镜的引导即可从 SF4 到达 FOA。

NIF 靶场光传输系统布局如图 4 所示<sup>[11]</sup>,包含 832 块传输反射镜<sup>[9]</sup>以及沿光束走向分布的光束封装管道。根据光路排布,物理实验区的传输反射镜集中分布在位于靶室上下的两层空间内。如图 3 所示,NIF 光路排布将同一集束内 LM6、LM7 和 LM8 的相对距离设计得较小,以便于将这几组反射镜在线可更换单元(LRU)集中支撑在一个组合镜架上,有利于提高支撑结构的集成度,减小支撑结构所占空间,在有限的空间内对反射镜 LRU 进行支撑。这些反射镜支撑结构一部分正装在靶区建筑楼板上,另一部分则倒装在相应空间的天花板上,利于保证反射镜的维护空间需要。NIF 光路排布的各光束交叉较少,在物理实验区建筑楼板区域,利于各反射镜安装和维护通道设计。

NIF 光束以集束为单位进行传输,而集束内部间距较小,LM4 和 LM5 均设计成  $2 \times 2$  阵列式的反射镜

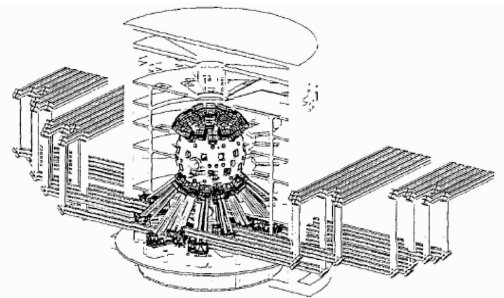


图 2 NIF 靶场传输光路(下半部分)

Fig. 2 Transport beams of NIF target area (lower half)

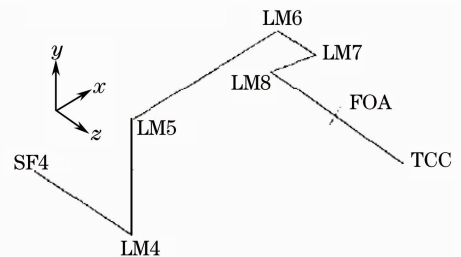


图 3 NIF 靶场光束传输路径

Fig. 3 Beam path in NIF target area

(LRU),而 LM6、LM7 和 LM8 则设计为  $1 \times 2$  阵列式的反射镜 LRU<sup>[12]</sup>,如图 5 所示。靶场各光束的反射角在  $12.2^\circ \sim 45^\circ$  的范围内变化,尽管反射镜数量众多,NIF 将全部反射镜 LRU 归为 11 类,以有利于结构的模块化设计<sup>[9]</sup>。

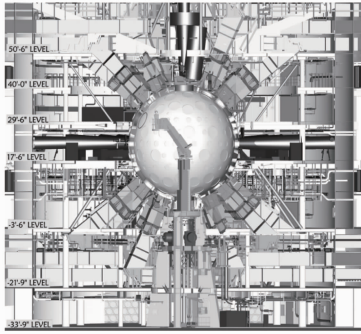


图 4 NIF 物理实验区光传输系统布局

Fig. 4 Layout of beam transport system in NIF experimental bay

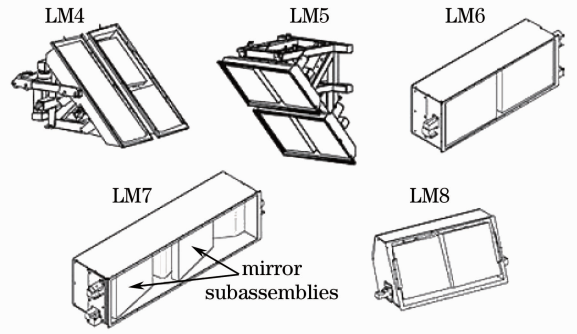


图 5 NIF 靶场光传输系统反射镜 LRU

Fig. 5 Laser mirror LRU of beam transport system in NIF target area

## 2.2 LMJ

LMJ 装置采用了“*In-line*”型的总体布局,如图 6 所示<sup>[13]</sup>,四个主放大系统两两分别位于靶场的两侧,以靶室中心呈近似对称排布。主放大系统输出  $4 \times 2$  阵列的激光束组,其中两个对角的主放大系统输出 7 个束组,为 3+4 前后交错排布;其他两个对角的主放大系统则输出 8 个束组,为 3+5 前后交错排布。

图 7 为 LMJ 靶场的上半部分传输光路排布<sup>[3]</sup>,采用  $2 \times 2$  阵列集束传输方式。60 个集束在进入靶场后分别从上下注入靶室,在每个半球分三环注入,入射极角分别约为  $33^\circ$ 、 $49^\circ$  和  $59.5^\circ$ ,每个入射角对应集束数量均为 10 个。各光路的光程相同,从传输空间滤波器输出到聚焦透镜的光程约为  $40 \text{ m}$ <sup>[4]</sup>。

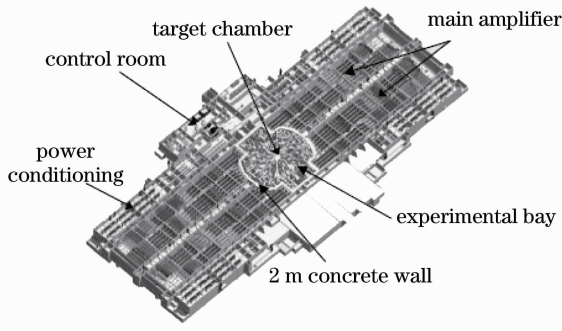


图 6 LMJ“*In-line*”型总体布局

Fig. 6 “*In-line*” general layout of LMJ

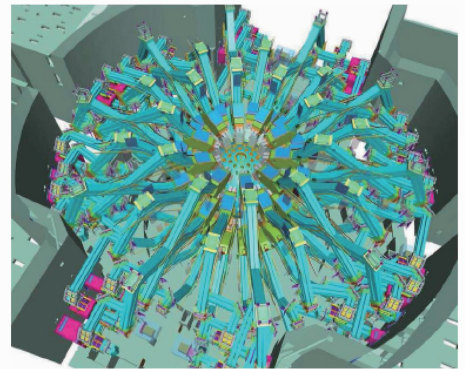


图 7 LMJ 靶场传输光路模型(上半部分)

Fig. 7 Transport beams model of LMJ target area (upper half)

LMJ 靶场光束传输路径如图 8 所示<sup>[14]</sup>,从主放大系统输出的激光光束经过 MT1~MT6 等 6 块反射镜的引导传输。其中 MT2、MT3、MT4 和 MT5 共在一个高度平面内,这个高度方向上的中间层介于 MT1 和 MT6 之间。MT4、MT5、MT6 和靶心则共在一个经线平面内,MT5 将集束在此经线面内引导至特定的高度,MT6 将集束引导至频率转换聚焦系统。在主放大系统采用前后交错排布方式利于实现相同光程的基础上,通过调整 MT3、MT4 和 MT6 的位置,实现各光路的光程相同。

图 9 为 LMJ 靶场光传输系统布局<sup>[15]</sup>,LMJ 的激光光束数量较多,反射镜数量达上千块。LMJ 靶场采用了高度方向上分层的光路排布,其中间层内的反射镜数量相对较为密集,同时,这些反射镜位于距离靶室中心较远的圆环内,可以在较大的空间内进行光传输系统布局,因此,中间层内的 MT3、MT4 和 MT5 之间的距离可以不按最小距离设计,实现光程调节。

LMJ 的靶场光路排布中,占总数量  $2/3$  的集束之间以两个为一组发生交叉,相互交叉的两个集束从同

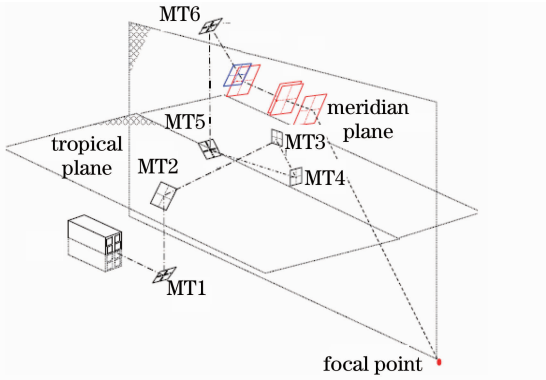


图 8 LMJ 靶场光束传输路径  
Fig. 8 Beam path in LMJ target area

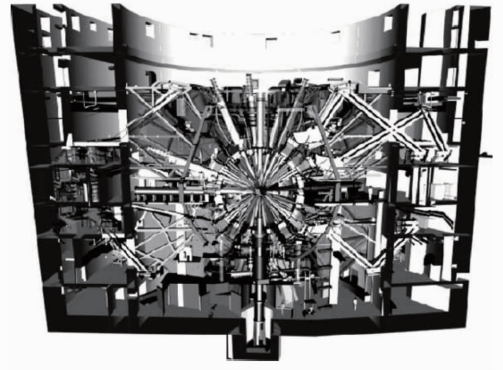


图 9 LMJ 靶场光传输系统布局  
Fig. 9 Layout of beam transport system in LMJ target area

一经线平面内注入靶室,如图 7 所示。除此以外,所有光路在靶场区域基本没有交织。光路设计排布为反射镜在线维护提供了良好的可达性。

### 2.3 神光 III 主机装置

如图 10 所示,神光 III 主机装置采用“L”型的总体布局<sup>[16]</sup>。主放大系统位于靶场的一侧,输出并列排布的 6 个 4×2 阵列的激光束组,激光束组经靶场一侧的编组站编组后进入物理实验区。

图 11 为主机装置靶场光路排布的 Pro/E 模型<sup>[17]</sup>。靶场以东为单位进行光束传输。光束在上下半球分四环注入,入射极角分别约为 28.5°、35°、49.5°和 55°,分别对应的光束数量为 4、4、8 和 8。主机装置靶场采用等光程传输,即 48 束激光从主放大器输出到聚焦透镜的传输长度相同,约为 86 m。

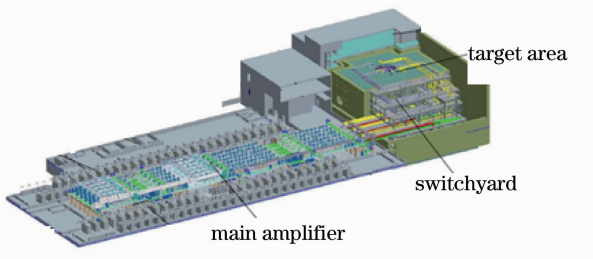


图 10 神光 III 主机装置总体布局  
Fig. 10 L-shape general layout of SG-III main setup

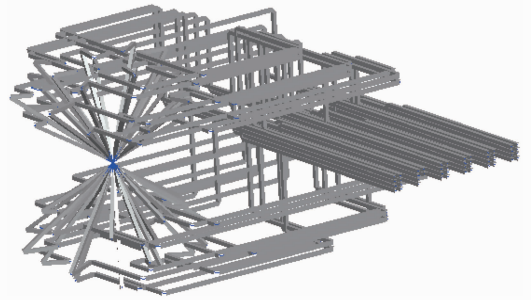


图 11 神光 III 主机装置靶场传输光路排布  
Fig. 11 Transport beams arrangement of SG-III main setup target area

从主放大系统输出的光束经 5~7 块反射镜的引导和传输进入 FOA。图 12 所示为途经 7 块反射镜的典型光束传输路径,其中 LM2~LM7 均处在同一高度平面上,LM6、LM7 和靶心共在一个经线平面内。LM1 将光束引导至特定的高度,然后光束在 LM2~LM5 的引导下进入特定的经线平面,最后两块反射镜将光束引导至 FOA。通过调整 LM3、LM4 和 LM5 在光路中的位置,实现对光程的调整。在部分光路中,在满足等光程的条件下,可以省去 LM5 或者同时省去 LM4 和 LM5,这样通过 5 块或 6 块反射镜即可完成光束的引导和传输。

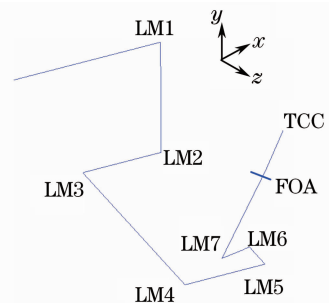


图 12 神光 III 主机装置靶场典型光束传输路径  
Fig. 12 Typical beam path in SG-III main setup target area

图 13 为神光 III 主机装置靶场光传输系统布局,包括 276 块反射镜,其中 96 块反射镜安装在编组站的七层平台上,180 块反射镜分布在物理试验区建筑的四层楼板上,反射镜采用正装和倒装相结合的方式。靶场大部分反射镜 LRU 采用单独支撑结构,但在光路较

为密集处,为满足空间需要,将多个反射镜 LRU 共同支撑在一个支撑架上。主机装置靶场光路排布在物理试验区存在一些交织,部分反射镜的维护通道被光束管道阻挡。将这些光束管道设计为快拆快联结构,可以进行临时快速拆除,以保证反射镜维护通道的通畅性。

### 3 讨 论

作为大型 ICF 装置的神光 III、LMJ 和 NIF 主机装置,其靶场传输光路排布各有特点。在总体布局方面,NIF 和 LMJ 的对称性较强,神光 III 主机装置由于考虑到后续工程的潜在需求,采用了 L 型的总体布局。神光 III 主机装置采用单束传输,NIF 和 LMJ 由于光束数量多,均采用  $2 \times 2$  集束传输。在光程方面,NIF 为不等光程传输,光束从靶区两边进入,光程为  $62 \sim 74$  m; LMJ 和神光 III 主机装置为等光程传输,LMJ 主放大系统为交错排布,光束基本直接进入靶区,因此光程短为  $40$  m,神光 III 主机装置由于全部 48 束激光从靶区的一边进入,光程较长,约  $86$  m。从反射镜数量来看,NIF 通过数量最少的反射镜完成各光束的引导和传输,而 LMJ 和神光 III 主机装置为了实现等光程,均采用了数量相对较多的反射镜。在典型光束传输路径方面,神光 III 主机装置和 NIF 均在同一纬度平面内对光束进行引导和传输,反射镜集中分布在同一高度平面内;而 LMJ 在经线平面内增加了最后一块反射镜,这种光束传输路径设计在调节光程的同时,也实现了反射镜在高度方向的分层排布,分散了同一平面内过于密集的反射镜。

大型 ICF 装置由于光束数量多,光传输系统布局以及各反射镜的安装和维护的通道和空间均比较紧张。在更多束激光打靶情况下,靶场传输光路排布将受到更大的挑战,单纯地照搬已有大型 ICF 装置的设计方法,已经不能适应更多束激光打靶情况的需要。例如:对于较小的入射角度,若采用 NIF 的传输光路设计,由于其靶球上方平台空间有限,则可能出现在这一空间内光束过于密集的情况;LMJ 反射镜集中于中间层,如果光束数量进一步增加,同时继续采用其传输光路设计,那么中间层内实现多个反射镜的布局则非常困难。

尽管如此,我们仍然可以从 NIF、LMJ 和神光 III 主机装置的光路排布中得到启发,为更多束激光打靶的 ICF 装置的靶场传输光路排布提供建议:

- 1) 光束光程和等光程要求对靶场传输光路排布有较大的影响。当传输光束数量较多时,等光程的要求一方面导致传输路径的设计灵活度降低,光路之间的交叉增多;另一方面也会增加反射镜的数量,光传输系统的复杂度增加。
- 2) 对称性较强的装置总体布局有利于采用数量较少的反射镜实现对光程长度的控制。
- 3) 靶场光束传输采用集束传输方式。和单束传输方式相比,集束传输可以成倍地提高光传输系统的集成度,有利于光传输系统的布局,提高系统维护性能。
- 4) 光路排布应考虑光传输系统布局和结构设计。借鉴 LMJ 的传输路径,光路排布在高度上设计多个中间层,以解决单独中间层空间紧张的问题;同时,传输光路排布设计应保证光机结构设计的适度集成。

### 4 结 论

本文探讨了 NIF、LMJ 和神光 III 主机装置的靶场光路排布。在甚多束激光打靶的 ICF 装置中,需要进行合理的靶场甚多束光路排布,在明确装置输出能量、光束数量和光束打靶入射方式等光学和物理要求的前提下,靶场光路排布应综合考虑各个因素,主要包括装置总体布局、光束传输方式、光程和光程差。同时传输光路排布作为光传输系统的设计输入,其排布也应考虑光传输系统布局、光机结构设计和系统维护性能等因素。

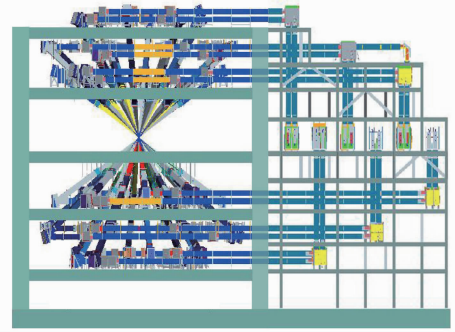


图 13 神光 III 主机装置靶场光传输系统布局  
Fig. 13 Layout of beam transport system in SG-III main setup target area

## 参 考 文 献

- 1 Edward I. Moses. The National Ignition Facility (NIF): a path to fusion energy [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, **49**(7): 1795~1802
- 2 C. Haynam. NIF Laser Capabilities [R]. Livermore; Lawrence Livermore National Laboratory, 2012
- 3 J. Ebrardt, J. M. Chaput. LMJ Project status [J]. *J. Physics: Conference Serie*, 2008, **112**(3): 032005
- 4 Michel L. Andre. The French megajoule laser project (LMJ) [J]. *Fusion Engineering and Design*, 1999, **44**(1-4): 43~49
- 5 Li Ping, Liang Yue, Xu Bing *et al.*. Study on gain stability of main amplifier in high power laser facility [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0102007  
李 平, 梁 越, 徐 冰 等. 高功率激光装置主放大器的增益稳定性研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(1): 0102007
- 6 Zhao Dongfeng, Wang Li, Lin Zunqi *et al.*. Experimental study of 351 nm propagation with high fluence on No. 9 system of SG-II laser facility [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702001  
赵东峰, 王 利, 林尊琪 等. 在神光 II 装置第九路系统开展 351 nm 波长激光高通量传输的实验研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(7): 0702001
- 7 Zhou Yuliang, Sui Zhan, Liu Lanqin *et al.*. Research on beam smoothing technology for high-power laser system [J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2011, **48**(10): 101407  
周煜梁, 隋 展, 刘兰琴 等. 高功率激光装置光束匀滑技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(10): 101407
- 8 Ma Chi, Wang Chengcheng, Feng Bin. General Technic Research on the Target Area of SG-III Laser Facility (2004 Annual Report) [R]. China Defense Science and Technology Report, 2005  
马 驰, 王成程, 冯 斌. 神光 III 激光装置靶场总体技术研究(2004 年度总结)[R]. 中国国防科学技术报告, 2005
- 9 J. L. Miller, R. E. English, R. J. Kornowski *et al.*. Optical Design of the NIF Main Laser and Switchyard/Target Area Beam Transport Systems [R]. Livermore; Lawrence Livermore National Laboratory, 1998
- 10 S. M. Pollaine, S. W. Haan. Optimization of Beam Angles for the National Ignition Facility [R]. Livermore; Lawrence Livermore National Laboratory, 1998, UCRL-LR-105821-98-1. 15~22
- 11 R. H. Sawicki. The National Ignition Facility: laser system, beam line design and construction [C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 43~54
- 12 Douglas W. Larson. NIF laser line-replaceable units (LRUs) [C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 127~136
- 13 Ph. Joyer, M. Dupont, H. P. Jacquet. Safety issues on laser megajoule facility [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2003, **69**(1-4): 625~629
- 14 Laurent Hilsz, Jean-Christophe Benoit, Florence Poutriquet *et al.*. Redesign of the image processing techniques used for the alignment of the LMJ beams transportation section [C]. *SPIE*, 2010, **7797**: 77970D
- 15 Noel Fleurot, Claude Cavailler, J. L. Bourgade. The laser Mégajoule (LMJ) project dedicated to inertial confinement fusion: development and construction status [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2005, **74**(1-4): 147~154
- 16 Chen Gang. Structural design of target area for SG-III facility [J]. *Annual Report of China Academy of Engineering Physics*, 2009, **65**:  
陈 刚. “神光 III”装置靶场结构设计[J]. 中国工程物理研究院科技年报, 2009, **65**:
- 17 Xiang Yong, Chen Gang, Feng Bin *et al.*. Introduction to method of target area beam path parameter design with Pro/E family table [J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(1): 13~14  
向 勇, 陈 刚, 冯 斌 等. 利用 Pro/E 族表进行靶区光路参数设计的方法介绍[J]. 激光杂志, 2009, **30**(1): 13~14