

激光驱动器靶场光路导引系统的排布

任 磊^{1,2,3} 朱健强^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理重点实验室, 上海 201800

²中国科学院中国工程物理研究院高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 靶场光路导引系统(BGS)具有两个功能,一是将主激光的列阵排布转变为满足打靶激光要求的球形辐照结构,二是保证所有光路等光程传输到靶室中心。主要研究了主激光和打靶激光的传输模型以及它们之间的编组方式。结合靶室入射法兰口分布的对称特性,提出传输子单元概念来简化系统的排布。首先,综合考虑反射镜的种类和数量以及靶场的空间大小,确定传输子单元的具体模型以及靶场的对称划分方式。再根据激光偏振态和光路无交叉限制,得到主激光和打靶激光两种可能的传输模型。通过分层定基线算法,结合物像传递关系,确定具体的编组方式,从而最终得到整个 BGS 的排布。

关键词 激光器; 惯性约束核聚变; 靶场; 光路导引系统

中图分类号 TN24 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.1101001

Arrangement of Beam-Guiding System in Target Area of Laser Driver

Ren Lei^{1,2,3} Zhu Jianqiang^{1,2}

¹Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²National Laboratory on High Power Laser and Physics, China Academy of Engineering Physics, Chinese Academy
of Sciences, Shanghai 201800, China

³University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract Beam-guiding system (BGS) has two functions, one shifts the array arrangement of the main laser to the spherical irradiation structure which meets the requirements of shooting laser, the other ensures that all the laser beams transmit to the target chamber center with the same light path length. Main issues are focused on the transmission models of the main lasers and shooting lasers and the switch manner between them. Combining the symmetric properties of the beam port distribution on the target chamber, the transmission sub-unit is proposed to simplify the system arrangement. Firstly, considering the quantity and style of the total mirrors and the space size of the target area, the specific transmission models in a transmission sub-unit and the symmetrical division of target area are determined. Then, two possible transmission models for main lasers and shooting lasers are obtained with the constraints of laser polarization and no intersection among beams during propagation. The switch manner is calculated with a stratified baseline algorithm and the relationship between the image and object of the propagation lasers. In this manner, the entire BGS geometric arrangement is figured out.

Key words lasers; inertial confinement fusion; target area; beam guiding system

OCIS codes 140.3460; 350.2660; 350.4600

收稿日期: 2016-02-01; **收到修改稿日期:** 2016-06-12

基金项目: 惯性约束聚变能源先期关键技术合作研究(2012DFG62040)

作者简介: 任 磊(1989—),男,博士研究生,主要从事驱动器靶场光学技术等方面的研究。E-mail: leir89@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—),男,博士,研究员,主要从事驱动器技术等方面的研究。

E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

高功率激光驱动器是实现惯性约束聚变、开展高能密度物理以及其他基础科学实验的大型激光装置^[1-3]。为了获得约 2 MJ 的能量输出,在提升单束激光能量的同时,可以通过增加激光路数来达到要求。更多的激光路数还可以满足激光压缩靶丸时的对称性要求^[4],保障装置运行时元器件的安全。然而,激光路数的增加势必会加大靶场光路排布的难度,这也是大型激光驱动器设计时需要解决的问题之一。

20 世纪 90 年代初,罗切斯特大学 OMEGA 装置在设计靶场光路过程中,提出了利用运筹学中非线性规划的求解思路^[5],得到了 60 束激光的靶场光路排布。在设计过程中,由于对反射镜入射角度限制较宽(不超过 57°),并且没有将激光的偏振态作为光路排布的约束条件,导致 OMEGA 装置的靶场光路的传播路径不够直观清晰^[5]。美国劳伦斯利福摩尔国家实验室(LLNL)在升级 Nova 装置以及法国原子能委员会(CEA)在升级 Phébus 装置的过程中,几乎同时提出了激光驱动器中主激光的两种构型,即直线型和转向型^[6]。国家点火装置(NIF)建设过程中延续了转向型思路,在应对多达 192 路激光排布时,提出了 2×2 束组传输的构思,简并了激光数量。在求解过程中,对反射镜入射角度要求更为严格(不超过 45°),并增加了激光在反射镜以及进入终端光学组件时偏振态的限制条件,从而使整个靶区光路整齐简洁^[7-8]。由于束组在进入终端之前,光路进行了迂回走向,导致靶室周围的操作空间较小。法国兆焦耳激光器(LMJ)初始设计为 240 束激光,延续了直线型的构型,同样采用 2×2 束组传输形式。由于终端中采用光栅进行色分离,靶室周围需要更大的操作空间,束组在入射到终端之前经过大角度反射,增加了空间^[9-10]。我国在 21 世纪初建成的神光-Ⅱ装置共有 8 束激光,光路较少但实现了双靶室可切换的光路排布^[11]。近期建成的 48 束神光-Ⅲ装置,采用序列二次规划算法求解非线性规划问题,实现了对靶区光路的排布设计^[12-15]。本课题组从靶场光路的基本功能和限制因素出发,提出了分层定基线的算法^[16],对靶场光路设计的理解上更加直观简洁,丰富了靶场光路设计的理论研究。

本文从靶场光路导引系统的基本功能和组成出发,通过求解传输子单元,再结合靶场的对称特性,进而得到整个靶区光路导引系统(BGS)的排布。从实现功能和受限因素两方面,归纳出了传输子单元可能的几种模型,确定了靶场对称划分和传输子单元模型选择的依据。完善了分层定基线算法,从物像传递关系给出了基线的确定方法。最后以 NIF 为例,对比了不同的传输子单元以及靶场划分方式下得到的光路导引系统,并分析了它们的优缺点。

2 基本原理

2.1 基本功能与组成

BGS 具有两个基本功能,一是实现激光传输方向由主激光的列阵排布转变为相对靶室中心的球状均匀入射,二是保证所有光束等光程传输到靶。据此可以将 BGS 划分为 3 个部分,如图 1 所示。主激光部分包括束组(LQ)的数量和口径、束组之间的间距以及主激光传输模型(MTM)。打靶激光包含激光入射法兰口(BP)的分布方式,靶室大小,透镜焦距以及打靶激光传输模型(STM)。编组站主要由转换反射镜构成,通过对主激光与打靶激光的光路进行编组从而实现等光程。

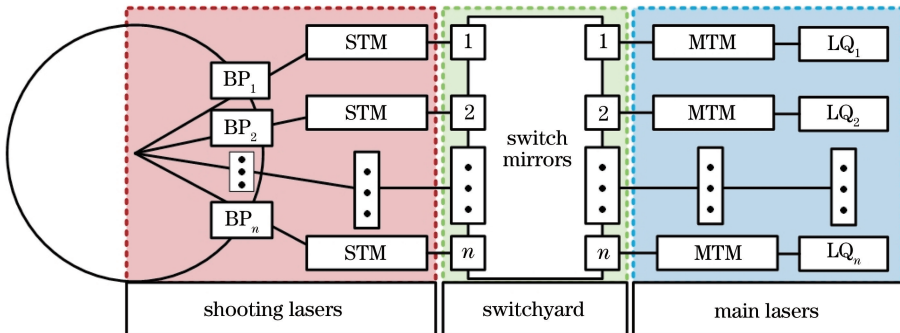


图 1 BGS 的基本组成示意图

Fig. 1 Basic components of the BGS

大型激光驱动器中,由于束组较多,可以根据入射法兰口的分布对称性简化 BGS 的排布设计。利用一套或两套光路传输子单元(BTU)通过对称操作得到 BGS。BTU 由若干个束组构成,它包含了 BGS 的 3 个基本部分。

2.2 核心问题与限制条件

采用 2×2 的形式进行组束,假设一套 BTU 中有 n 个束组。将束组抽象成一条过束组中心的光线,并用线上的一点和方向向量来表征它。每条光线通过 m 面反射镜导引,最终到达靶室中心。 $P_{i,j}(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j}), s_{i,j}(a_{i,j}, b_{i,j}, c_{i,j})$ 为经过第 j 面镜子反射后的反射光线, $P_{i,0}(x_{i,0}, y_{i,0}, z_{i,0}), s_{i,0}(a_{i,0}, b_{i,0}, c_{i,0})$ 分别表示主激光中最后一个空间滤波器出射面的中心坐标和方向向量, $d_{i,j}$ 表示第 j 面到第 $j+1$ 面镜子之间的距离, $d_{i,0}$ 表示主激光到第一面反射镜之间的距离,矩阵 $T_{i,j}$ 表示第 $j+1$ 面镜子的出射光线和第 j 面镜子的出射光线之间的变换关系^[16]。根据传输子单元的两个基本功能可以得到各变量需要满足的条件,用下式表示:

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{pmatrix} x_{i,m} \\ y_{i,m} \\ z_{i,m} \\ a_{i,m} \\ b_{i,m} \\ c_{i,m} \end{pmatrix} = \prod_{j=m-1}^0 T_{i,j} \begin{pmatrix} x_{i,0} \\ y_{i,0} \\ z_{i,0} \\ a_{i,0} \\ b_{i,0} \\ c_{i,0} \end{pmatrix} \\ \max(r_i + \sum_{j=0}^{m-1} d_{i,j}) - \min(r_i + \sum_{j=0}^{m-1} d_{i,j}) \leq \Delta \end{array} \right. , i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

式中 r_i 表示从最后一面反射镜到靶室中心的距离, Δ 表示驱动器前端能够提供的最大光程调节值。存在无穷多组解满足(1)式,因此还需要综合考虑实际建设过程中的限制因素,从而最终确定靶场 BGS 构型。

一般要求进入终端之前,打靶激光的偏振态平行于终端入射窗口的一条边;具体到每一面反射镜上,入射激光和反射激光应都是线偏振 p 光或者 s 光。反射镜的入射角度一般要求不超过 45° , 并且数量和种类越少越好。空间排布上,所有光路在空间传输上无交叉和重叠,并且整个光路传输系统限制在给定大小的空间内。

3 传输子单元

3.1 反射镜上入射和反射光的偏振态限制

线偏振光以入射角 i 入射到平面镜上,电场矢量的振动方向与入射平面的夹角为 α_i , 反射光束的电场矢量振动方向 α_r 可以用下式表示^[17]:

$$\begin{cases} \tan \alpha_r = -\frac{\cos(i-t)}{\cos(i+t)} \tan \alpha_i, \\ \sin i = n \sin t \end{cases} \quad (2)$$

式中 n 为反射镜面膜层介质的折射率, t 为折射角。(2)式中关于反射光束的电场矢量振动方向 α_r 存在 3 种特殊的情况,如(3)式所列,恰好能够满足出射光为线偏振 p 光或 s 光的要求。即:入射光为 $p(s)$ 偏振时,出射光也为 $p(s)$ 偏振;如果入射光满足布儒斯特角入射,那么不论入射光的振动方向与入射面之间的夹角如何,出射光均为 s 偏振。BGS 中关于反射镜偏振态的设计要求,都是基于下式中的前两种情况:

$$\begin{cases} \alpha_i = 0, \alpha_r = 0 \\ \alpha_i = \pi/2, \alpha_r = \pi/2 \\ i + t = \pi/2, \forall \alpha_i, \alpha_r = \pi/2 \end{cases} \quad (3)$$

即入射光为 $p(s)$ 偏振时,出射光也为 $p(s)$ 偏振。采取的措施就是限制反射镜的位置以及反射镜入射光线的偏振态,使其满足偏振要求。

3.2 打靶激光的传输模型

一般要求反射镜入射角度不超过 45° ，由于介质的折射率均大于 1，BGS 排布时将不考虑(3)式中的最后一种情况。因此，入射光的振动方向必须是垂直或者平行于反射镜的入射平面。

定义靶室中心为坐标原点，竖直向上为 z 轴正方向，通过球坐标的方式定义向量的位置，其中方向角 φ 和极向角 θ 分别为向量与 x 轴和 z 轴正方向的夹角， $\varphi \in [0, 2\pi], \theta \in [0, \pi]$ 。满足偏振要求的两种打靶激光传输模型如图 2 所示，束组通过最后一面反射镜 P_m 导引，穿过法兰口到达靶室中心，它的反射光线与 z 轴构成的平面在图中用阴影标识出来。主激光部分出来的束组线偏振方向一般都是垂直或者平行于 xOy 平面，根据反射镜上束组偏振态的要求，不论经过几面反射镜导引，在束组到达最后一面反射镜 P_m 之前，束组的偏振方向都是在 xOy 平面内或者垂直于 xOy 平面。结合打靶激光进入终端偏振态的要求，对于最后一面反射镜，它的入射平面只能是 P_mOz 所在平面，即图 2 中的阴影平面，并且入射光线必然也在该平面中。考虑到反射镜的入射角度以及使用最少数量的反射镜，只存在两种到达 P_m 的路径，如图 2 中标记的途径 1 和途径 2。在进入阴影平面之前，假设激光是沿着 x 正方向传播，途径 1 的偏振方向垂直于 xOy 平面，途径 2 的偏振方向平行于 xOy 平面。

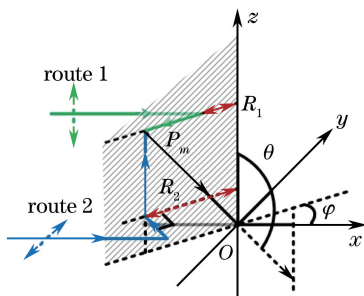


图 2 满足偏振要求的两种打靶激光传输模型示意图

Fig. 2 Two shooting laser transmission models schema satisfying polarization requirement

直观上看，途径 1 比途径 2 少用一面反射镜，但是从靶室周围留下的操作空间来看，途径 2 的半径 R_2 显然大于途径 1 的半径 R_1 ，这是因为途径 2 所有的光路都在以 P_mO 在 xOy 平面投影长度 R_2 为半径的圆柱外，而途径 1 需要进入这个圆柱内，迂回到最后一面反射镜。

3.3 打靶激光的空间受限

当方向角 φ 较小(接近 0°)时，图 2 中途径 1 的光路将会出现空间受限的情形，如图 3 所示。实际建设过程中，光路之间是不能相互叠加和交叉的，并且反射镜的镜架也不能遮挡光路。这就要求图 3 中最后一面反射镜到光路 1 的点 P_{m-1} 的距离 d_{1y} 至少大于反射镜镜架与束组尺寸之和的一半，记作 D_0 。为了给靶室周围留下足够的操作空间，倒数第二块反射镜的位置必须在圆柱 R_1 的外面。可以大致估算一下，要求 $R_1 = 5$ m, $D_0 = 1$ m, 最后一面反射镜到靶室中心的距离 $r = 14$ m, $\theta = 40^\circ, \varphi = 8^\circ$, 倒数第二面镜子到 z 轴的距离为 3.5 m, 已经进入到 R_1 的圆柱内，空间受限。

解决方法有两种，一种是通过增大 r ，这将导致靶场的空间变得更大；另一种是额外增加一面反射镜，从最后一面反射镜入射平面的另一个方向进入，如图 3 中途径 1' 所示。此时限制因素变多了，要求 d'_{1r} 和 d'_{1y} 同时大于 D_0 ，但是调节的空间也变大了。值得注意的是，虽然增加了一面反射镜，束组的偏振态并没有发生变化。

当 φ 较大(接近 90°)时，图 2 中途径 2 的光路将会出现空间受限的情形，如图 4 所示。为了保证最后一块反射镜到光路 2 的点 P_{m-1} 的距离 d_{2y} 大于 D_0 ， P_{m-1} 将会延伸到坐标轴的另一边，整个光路狭长。可以采用途径 2 的改进光路，增加一面反射镜，节省空间，同样不改变光路的偏振态。值得注意的是，改变后光路的限制条件和之前一样，并没有像途径 1 那样增加了更多的限制条件。

3.4 主激光的传输模型

假设图 2 中有两个束组采用途径 1 的方式进入到最后一面反射镜的入射平面中，其在 xOy 平面的投影如图 5 所示。根据主激光的传输方向是否和这两个束组的传播方向一致，可以将主激光的传输模型分为两

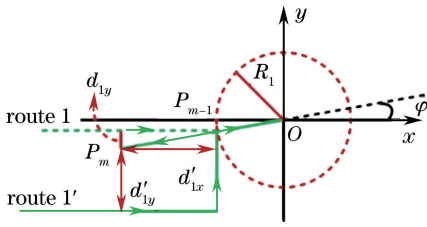


图 3 途径 1 的空间受限以及改进后的途径 1' 示意图
Fig. 3 Space constrained situation of route 1 and modified route 1'

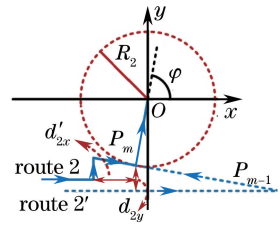


图 4 途径 2 的空间受限以及改进后的途径 2' 示意图
Fig. 4 Space constrained situation of route 2 and modified route 2'

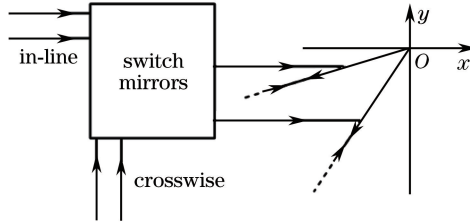


图 5 主激光的两种传输模型示意图

Fig. 5 Two possible transmission models of main lasers

种:直线型和转向型,转向型一般为 90° 转向^[6]。从图 5 中不难发现,如果从转换反射镜系统中进出的束组都在同一个水平面上,一般情况下,转向型的主激光只需要一面反射镜作为转换反射镜,而直线型需要两面反射镜。通常,会在转换反射镜中增加一面反射镜,以实现光路高度上的调节。

在光程调节方面,由于转向型构型中,主激光的位置差异在 x 方向上,而打靶激光的位置差异是 y 方向上,转换反射镜编组连接时,没有任何限制,打靶激光可以和任意的主激光连接。在直线型构型中,由于不同的主激光和打靶激光的位置差异都是在 y 方向上,为了给两个连接反射镜留出空间,即它们之间光路的长度必须大于一面反射镜的空间尺寸,以保证可以放置这两面反射镜。主激光不能和距离其一块反射镜的空间尺寸内的打靶激光连接,这是直线型构型编组时的一个制约因素。

3.5 避免光路的重叠与交叉

光路安排上,为了避免各束组的相互重叠与交叉,有两种解决思路,一种是在另一个维度上分层;另一种就是更换连接方式,即采用平行光路的方式。比如在 xOz 平面中光路交叉,必须在 y 方向上进行光路分层,或者在 xOz 平面采用平行光路,如图 6 所示。

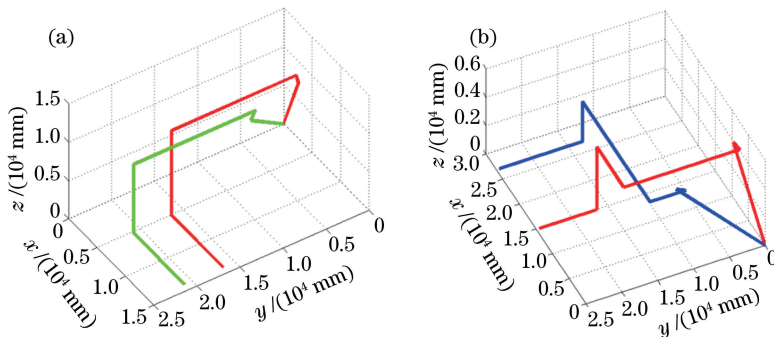


图 6 避免光路重叠交叉的两种解决方案。(a)转向型只能在 y 方向分层;(b)直线型采用平行光路

Fig. 6 Two solutions avoiding obscuring and intersection of light path. (a) Crosswise orientation: beams are in the different layers in Y direction; (b) in-line orientation: beams are parallel with each other

转向型构型中,编组方式确定后,假设在 xOz 平面中光路交叉,由于平行光路会导致光程的增加,无法满足等光程的要求,因此只能采用 y 方向分层。而 y 方向是由倒数第二块反射镜中心的 y 坐标控制,这就要统筹该象限中所有束组的倒数第二块反射镜,保证它们之间的间隔大于一个光管道的宽度值。同时,在同一层中,还要考虑相邻光管道的间距。最终只能通过增大 r 值,带来更大空间,满足所有束组要求。

直线型构型中,束组光程的调节是依靠选择主激光的不同 y 坐标,因此,光路在 xOz 平面中交叉时,可以采用平行光路的方法避开交叉,对倒数第二面镜子的 y 坐标没有限制要求, r 相较于转向型构型会小很多,靶场空间也会相应减少。

3.6 固有光程差和参考光程值

至此,得到了传输子单元可能的 4 种构型组合方式,即主激光构型(直线型/转向型)+转换反射镜组+打靶激光构型(途径 1/途径 2)。以转向型+转换反射镜组(一面编组,一面调整束组高度)+途径 1 的组合方式为例,分析束组的光程值,从而得到束组的编组方式。这种组合方式最简单,但是方法同样适用于其他组合方式。

在图 7 所示的组合中,传输子单元包含了 4 面反射镜。其中方向角 φ_k 和极向角 θ_k 分别为向量与 x 轴和 z 轴正方向的夹角, r_k 为最后一面反射镜到靶室中心的距离。假设主激光沿着 y 轴正方向传播,所有主激光的坐标中, y 和 z 轴的位置相同,只是 x 方向的位置不同。过最后一面反射镜中心 M_4 做 M_2 、 M_3 的垂线,垂足为 A ,点 A 可以将光程分成两部分: BM_1M_2A 和 AM_3M_4O 。其中 AM_3M_4O 的光程由打靶激光决定,根据打靶激光入射法兰口的不同,长度不一样,但是光程的数值是确定的,它和主激光无关;前一部分是转换反射镜系统连接的两部分之间的光程,不同的编组方式将会导致不同的光程值。

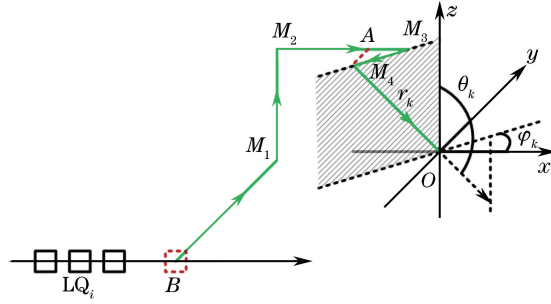


图 7 束组的光程计算示意图

Fig. 7 Calculation of the light path length of laser beams

下面对分层定基线算法^[16]进行简化和完善。假设存在一个虚拟的主激光 B,其他主激光 LQ_i 的 y 和 z 坐标值都和主激光 B 相同,但主激光 B 更加接近靶室,并且通过编组将其与所有打靶激光连接,由此可以得到每一个束组的光程值,按升序排列为 $\overline{PL}_1, \overline{PL}_2, \dots, \overline{PL}_n$,这些光程值与 \overline{PL}_n 之间的差值定义为固有光程差,分别记作 $\Delta \overline{PL}_1, \Delta \overline{PL}_2, \dots, \Delta \overline{PL}_n$ 。由定义可知,最大固有光程差为 $\Delta \overline{PL}_1$,而 $\Delta \overline{PL}_n = 0$ 。所有主激光 LQ_i 与主激光 B 之间的距离记作 $\overline{QB}_1, \overline{QB}_2, \dots, \overline{QB}_n$,最大值为 \overline{QB}_{\max} 。如果不考虑束组的宽度,那么只有当满足下式时才能在理论上实现所有光路等光程:

$$\overline{BQ}_{\max} \geq \Delta \overline{PL}_1. \quad (4)$$

此时,可以计算得到每一个主激光 LQ_i 的 x 方向位置,如下式所示:

$$x_i = x_B + \overline{QB}_i = x_B + \Delta \overline{PL}_i, i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

所有光程值均为 \overline{PL}_n 。

实际驱动器中,考虑到主激光的口径、束组之间的间距以及主激光的紧凑排布,通过分层定基线算法得到的 LQ 位置与工程上最终确定的位置会有一定的偏差,这就导致靶场这一段光路并不是严格等光程。这个偏差可以在前端注入时预先进行补偿。

激光在进入终端聚焦前,为了获得较好的波前,应该让其与进入最后一个空间滤波器之前的波面满足物像传递关系^[18]: $d_2 = 2f_{\text{TSF}} - d_1$,式中 d_1 为波面到空间滤波器第一个透镜的距离, d_2 为波面到空间滤波器第二个透镜的距离, f_{TSF} 为最后一个空间滤波器中透镜的焦距。假设终端中聚焦透镜的焦距为 f_{FOA} ,那么束组的光程为 $d_2 + f_{\text{FOA}}$ 。考虑到带有小孔的空间滤波器的景深非常长,在几十米到百米之间,束组的光程值可以远大于这个值,然而光程过大会导致靶场空间巨大,不够经济。定义一个参考光程值 $\overline{PL}_{\text{ref}}$ 作为靶场光路排布过程的等光程值:

$$\overline{PL}_{\text{ref}} = 2f_{\text{TSF}} + f_{\text{FOA}} \quad (6)$$

参考光程值的作用是确定主激光基线的位置,即 B 点的 y 坐标值。在距离靶室适当的位置先确定一个 B 点,据此计算得到最大的光程值 \overline{PL}_n 。再根据其与 $\overline{PL}_{\text{ref}}$ 之间的差距,重新确定 y 坐标值,让这两个光程相等。

3.7 传输子单元构型组合的选择原则

束组较少时,不同构型组合之间的差别不是很大,实际靶场空间大小和靶室周围空间的利用可以作为选择恰当构型组合的依据。更多束组(比如 60 或者 60 以上)的转向型构型在避免 xOz 平面光路交叉时,需要更大的靶场空间,主激光构型选择时应该考虑采用直线型构型。为了给靶室周围创造更多的操作空间,便于终端中元件的更换,以及面向多种辐照方式之间光路的切换^[16],打靶激光的构型建议采用途径 2。当然采用途径 2 和直线型的构型组合也有缺陷,单个束组导引所需要的反射镜数量为 6 面,比途径 1 和转向型组合多了两面,因此,波前控制的难度将会加重。同时,在考虑 BGS 总体构型时,应当尽量避免束组空间受限的问题,不采用途径 2,以减少反射镜的使用。

4 总体构型

根据上述分析,靶场对称划分时,尽量保证高对称性,这样可以只使用一套传输子单元,整个光路的一致性好。传输子单元中束组最好能够少一些,方向角范围划分时应当避开束组空间受限的情况,保证单个束组导引时采用的反射镜是这种构型组合下最少的。

以 NIF 的靶室入射法兰口分布为例^[19],如图 8 所示。采用途径 2 和直线型组合进行靶场传输光路的排布,并与 NIF 的排布进行对比。再根据不同的对称划分方式,得到不同形状的 BGS 排布,对决定靶场形状的因素进行分析。

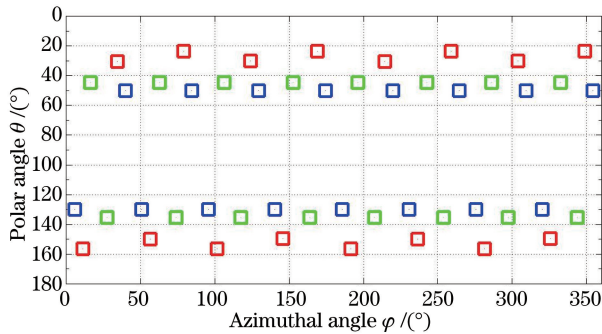


图 8 NIF 靶室激光入射法兰分布示意图

Fig. 8 Beam port distribution on the target chamber of the NIF

4.1 二分法与 I 形状的靶场

根据对称性划分原则,可以将靶场按 x 轴一分为二。合理分布主激光,整个靶场只有一套 BTU,所有部分都可以按照 y 正方向的传输子单元进行中心对称以及旋转 180° 得到。这和 NIF 的划分方式一样,但 NIF 由两套 BTU 构成。靠近 x 轴附近的打靶激光存在空间受限,采用途径 2 进行转换。由此可以得到 y 正方向的传输子单元,如图 9 所示。再通过对称操作,可以得到整个靶场 BGS 的排布,如图 10 所示。

从图 9 中可以看出,虽然直线型构型理论上比转向型构型多一面反射镜,但是可以通过合理安排主激光的位置,使得进出转换反射镜系统的束组具有相同的 x 坐标,部分束组可以省下一面反射镜,12 个束组共使用了 276 面反射镜。整个靶场空间大小为 $40 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,如果主激光长度按 130 m 估算,驱动器占地面积为 $300 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。光程范围(LPL)为 $38.5 \sim 45.9 \text{ m}$,最大光程差($\Delta_{\text{LPL,max}}$)为 7.4 m ,共使用反射镜 1104 面。

4.2 四分法与 X 形状的靶场

二分法中存在空间受限的情况,可以合理划分,避开受限的空间。按直线 $y = |x|$ 将靶场一分为四,整个靶场只有一套光路传输单元,其他部分都可以按照 y 正方向的传输子单元进行中心对称以及旋转 90° 得

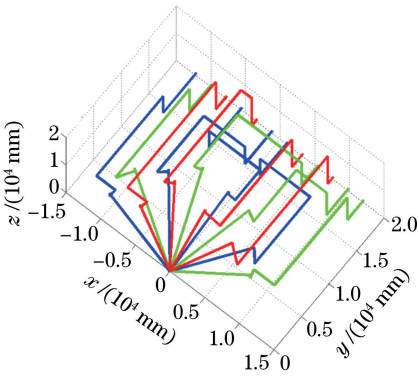


图 9 I 形状 BGS y 正方向传输子单元排布示意图

Fig. 9 BTU in y positive direction of the I-shaped BGS

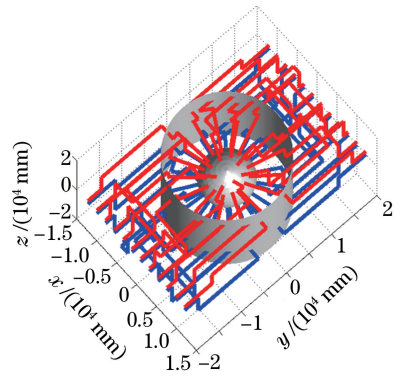


图 10 I 形状靶场 BGS 示意图

Fig. 10 Entire BGS of the I-shaped target area

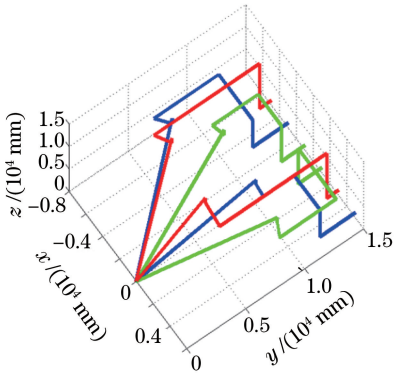


图 11 X 形状 BGS y 正方向传输子单元排布示意图

Fig. 11 BTU in y positive direction of the X-shaped BGS

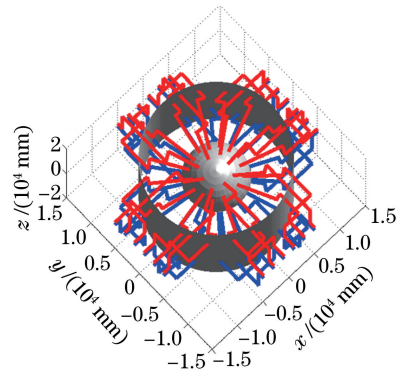


图 12 X 形状靶场光路导引系统示意图

Fig. 12 Entire BGS of the X-shaped target area

到。由于方向角在 $45^\circ \sim 135^\circ$ 之间,远离了 x 轴,因此不存在空间受限的情况。由此可以得到 y 正方向的传输子单元,如图 11 所示。同样,经过对称操作得到整个靶场 BGS 的排布,如图 12 所示。

传输子单元中,6 个束组共使用了 136 面反射镜。整个靶场空间大小为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,驱动器占地面积 $4 \times 130 \text{ m} \times 30 \text{ m} + 30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。光程范围为 $29.1 \sim 36.0 \text{ m}$,最大光程差为 6.9 m ,共使用反射镜 1088 面。

4.3 对比分析

将上述两种靶场 BGS 排布与 NIF 现有的途径 1+转向型组合所得到的 U 型靶场进行对比,如表 1 所示。其中,NIF 的靶场尺寸^[19]为 $80 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,光程范围计算时已经包含了 7.7 m 的楔形透镜的焦距,此处忽略三倍频和基频导致的光程差异,只计算空间长度,而不是光学长度。

表 1 不同靶场构型相关参数对比

Table 1 Comparison of different target area configurations

Model	Shape	Volume / m^3	Area / m^2	Quantity	LPL / m	$\Delta_{\text{LPL,max}} / \text{m}$
NIF	U	72000	12800	832	69.7~81.7	12
New 1	I	36000	9000	1104	38.5~45.9	7.4
New 2	X	27000	16500	1088	29.1~36.0	6.9

两种新构型中传输子单元均采用途径 2 和直线型的组合方式,相比于 NIF,这种组合方式使用了更多的反射镜,但在节省了靶场空间的同时,大大缩短了光程,有利于传输过程中能量损耗的降低。随着驱动器规模的扩大,束组数量的增加,转向型构型需要的靶场空间更大,直线型构型的优势将会更大。

两种新构型对比发现,X 型由于对称性高,其靶场空间更小,反射镜的数量更少,一致性更高,光程也更短。但是由于划分数量过多,主激光分布在 4 个方向,占地面积将非常大。相比于 NIF 和 I 型的主激光都是一维分布,X 型主激光的二维分布对光路以及打靶的稳定性需要被进一步分析^[20-21]。

5 结 论

从 BGS 基本功能出发,得到光路排布的一般规律,并将无穷多种的排布可能最终确定为有限的 4 种构型选择。从靶场空间大小和靶室周围空间的利用两方面考虑,直线型和途径 2 的构型组合更加适合 60 或者更多束组的驱动器。对称划分方式和传输子单元的构型共同决定了靶场的整体形状。对比分析了 U 型、I 型和 X 型 3 种 BGS,在设计更大规模的驱动器靶场时,建议采用 I 型和 X 型,如果占地面积和光路稳定性均不受影响,对称性最好的 X 型更加合适。物像传递关系的建立不仅为分层定基线算法提供了参考光程值,同时将靶场设计与驱动器空间传输滤波器联系起来,光程值与滤波器透镜的焦距值之间相互制约。

组束方式是基于 2×2 方式的,其他形式的组束以及决定组束方式的因素并未考虑到。束组中 4 个光束的偏振态是一致的,是否可以通过改变部分光束的导引方式,使得上下两个光束的偏振态相互垂直,是下一步需要研究的内容。本文提出光路排布的思路虽不同于二次规划法,但算法的自动求解和优化能力有待进一步提高,后续将结合两种求解思路进行完善。

参 考 文 献

- Moses E I. Ignition on the National Ignition Facility: a path towards inertial fusion energy[J]. Nuclear Fusion, 2009, 49(10): 104022.
- Xiao Kaibo, Yuan Xiaodong, Jiang Xinying, *et al.* Research status of conceptual designs of diode-pumped solid-state laser driver for HiPER[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080005.
肖凯博, 袁晓东, 蒋新颖, 等. 欧洲 HiPER 项目激光驱动器概念设计研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080005.
- Xiao Kaibo, Yuan Xiaodong, Jiang Xinying, *et al.* Research status of conceptual design of diode-pumped solid-state laser driver for LIFE[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 040001.
肖凯博, 袁晓东, 蒋新颖, 等. 美国 LIFE 计划激光驱动器概念设计研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 040001.
- Kline J L, Callahan D A, Glenzer S H, *et al.* Hohlraum energetics scaling to 520 TW on the National Ignition Facility [J]. Physics of Plasmas, 2013, 20(5): 056314.
- Genberg V L. Beam pathlength optimization[C]. SPIE, 1990, 1303: 48.
- Rabeau M, Pitts J H, Mengue J F, *et al.* Geometric arrangement of beamlets in large laser fusion facilities[J]. Fusion Technology, 1993, 23(3): 337-341.
- English R E, Laumann C W, Miller J L, *et al.* Optical system design of the National Ignition Facility[C]. SPIE, 1998, 3482: 726.
- Miller J L, English R E, Korniski R J, *et al.* Optical design of the National Ignition Facility main laser and switchyard/target area beam transport systems[C]. SPIE, 1999, 3492: 294.
- Fleuret N, Cavailler C, Bourgade J L. 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.
- Hilsz L, Benoit J, Poutriquet F, *et al.* Redesign of the image processing techniques used for the alignment of the LMJ beams transportation section[C]. SPIE, 2010, 7797: 77970D.
- Huang H, Qiu Y, Fan D. Beam-targeting system for ShenGuang II[C]. SPIE, 1995, 2633: 596.
- Tan J, Wei X, Cheng Z, *et al.* Geometric arrangement with multiplicity of laser beams in target area[J]. Chinese Journal of Lasers, 1998, 7(1): 46-50.
- Tan J, Wei X, Zhong Q, *et al.* Geometric arrangement of laser beams in target area[C]. SPIE, 1999, 3492: 866.
- Shi Zhiqian, Tan Jichun, Wei Xiaofeng, *et al.* Beam configuration design in target area with successive quadratic programming method[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1998, 10(1): 17-20.
师智全, 谭吉春, 魏晓峰, 等. 用序列二次规划法设计 ICF 靶区光路[J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(1): 17-20.
- Chen Xiaojuan, Wang Meicong, Wu Wenkai, *et al.* Structural design of beam transport system in SG-III facility target area[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(10): 200-204.
陈晓娟, 王美聪, 吴文凯, 等. 神光-III 主机装置靶场光传输系统结构设计[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(10): 200-204.
- Ren L, Zhao D F, Zhu J Q. Beam guiding system geometric arrangement in the target area of high-power laser drivers [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2015, 3(1): e12.

- 17 Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 36-41.
玻 恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 36-41.
- 18 Wang Guiying, Zhao Jiuyuan, Zhang Mingke, *et al.* Basic study on spatial filter used in Nd-Glass high power laser system [J]. Acta Physica Sinica, 1985, 34(2): 171-181.
王桂英, 赵九源, 张明科, 等. 钕玻璃高功率激光系统中的空间滤波器的基本研究[J]. 物理学报, 1985, 34(2): 171-181.
- 19 Lawrence Livermore National Laboratory. National ignition facility user guide[Z/OL]. [2016-06-30]. https://lasers.llnl.gov/for_users/pdfs/2012user_guide.pdf.
- 20 Liu Fang, Xu Jia, Zhang Yan, *et al.* Analysis on beam directing stability problem caused by micro-vibration of optical components[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1120001.
刘 芳, 徐 嘉, 张 燕, 等. 光学器件微振动引起的光束指向稳定性分析[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1120001.
- 21 Ren Lei, Zhao Dongfeng, Zhu Jianqiang. Advances in target and beam alignment unit technologies of high power laser drivers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 080001.
任 磊, 赵东峰, 朱健强. 高功率激光驱动器靶定位瞄准单元技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 080001.