

ICF 激光装置靶场光束引导路径的优化研究

程宁波^{1,2} 李富全¹ 冯 斌¹ 贾怀庭¹ 向 勇¹ 魏晓峰^{1*}

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

²中国科学院自动化研究所, 北京 100190

摘要 为了缩短惯性约束聚变(ICF)激光装置在靶场区光束引导的总时间为基于光束引导传感器固定子区划分的光束引导方法,提供了引导路径的一种优化方法。通过优化预备子区中心到目标子区中心的角度,最小化对引导总时间有贡献的投射镜的角位移量的总和。以终端光学组件的一种布置为研究对象,以引导目标点为靶室中心的情况为例,介绍了引导路径的优化过程。引导总时间的估计表明,与普通的串行光束引导方法相比,该方法可以很大程度上缩短光束引导的总时间。当预备子区中心与目标子区中心之间的距离为 1 mm 时,引导总时间可以缩短为采用普通串行引导方法时的 0.518 倍。

关键词 激光器; ICF; 光束引导; 路径优化

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0202005

Research on Route Optimization for Laser Beam Alignment at Target Area of an ICF Laser Facility

Cheng Ningbo^{1,2} Li Fuquan¹ Feng Bin¹ Jia Huaiting¹ Xiang Yong¹ Wei Xiaofeng¹

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract To reduce the total time for aligning all laser beams of an inertial confinement fusion (ICF) laser facility at the target area, an alignment route optimization method is for the alignment method that based on the invariant sub-area configuration of the alignment sensor. The goal is to minimize the sum of the angle displacements of those reflecting mirrors which make contributions to the total alignment time. It can be implemented by optimizing the angle between the center of the preparative sub-area and that of the target sub-area. The optimization process is demonstrated through an example that one configuration of the final optics assemblies is considered and the expected aligning position is at the center of the target chamber. The estimations of the total alignment time show that the proposed method results in a much shorter time compared with the common serial alignment method. If the distance between the center of the preparative sub-area and the center of the target sub-area is 1 mm, the total time is reduced to 0.518 times of that adopting a common serial alignment method.

Key words lasers; ICF; laser beam alignment; route optimization

OCIS codes 140.3460; 350.4600; 350.2660

1 引 言

惯性约束聚变(ICF)激光装置是用于开展高能量密度物理、惯性约束聚变等物理实验的一种重要装置,如美国国家点火装置(NIF)^[1]、法国兆焦耳激光装置(LMJ)^[2]等。为了满足束靶耦合的精度要求^[3-4],需要在靶场区借助引导模拟光和光束引导传感器对激光束的远场位置进行精确调整,这就是靶场的光束引导^[5-6]。

收稿日期: 2014-08-01; 收到修改稿日期: 2014-09-19

作者简介: 程宁波(1983—),男,博士,助理研究员,主要从事机电控制方面的研究。E-mail: ningbo.cheng@ia.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: xfwei@caep.cn

NIF等激光装置采用了光束引导传感器(TAS)来实现靶场的光束引导^[5-7]。利用引导传感器的上电荷耦合器件(CCD)或下 CCD 传感器来检测引导模拟光的焦斑的位置和大小,通过对电动投射镜的两个姿态角的控制来调整焦斑的位置,通过对终端光学组件中的楔形透镜的位置控制来调整焦斑大小。目前采用的是普通的串行光束引导方法,采用该方法时光束引导总时间与光束路数近似成正比。而ICF等大型的激光装置往往包含一两百路甚至更多路的光束^[8-9]。这将导致光束引导总时间会随着激光路数的大幅度增加而变长。然而,打靶流程以及光束稳定性等多方面的因素对靶场光束引导总时间有严格的要求^[10-11],需要尽可能地缩短光束引导的总时间。

基于引导传感器固定子区划分的引导方法(简称基于子区的引导方法)是一种能够大幅度缩短靶场光束引导总时间、并且能够避免焦斑对应光路的辨识问题和焦斑重叠问题的引导方法。采用该方法时,对引导总时间起决定性作用的是预备子区中心到目标子区中心的引导路径,本文即讨论该引导路径的优化问题。

2 基于引导传感器固定子区划分的光束引导

引导传感器的一个固定子区的划分如图1所示。子区(SA)和引导路径(AR)构成子区划分,由于引导过程中子区的大小和位置是固定不变的,所以又称为固定子区划分。图1包含了两种子区,第一类子区是引导传感器视场内正方形所围成的区域,它们是通过网络传输传感器有效图像的基本单元。正方形的内切圆所围成的区域称为对应子区的有效子区(ESA),是获得焦斑位置和大小等信息时图像处理的基本单元。第一类子区中,包含焦斑最终期望位置的子区称为目标子区(TSA);目标子区外围的第一层子区又称为预备子区(PSA),第二类子区是传感器视场外虚线所围成的不规则区域,是在引导开始前和引导过程中,未被引导的焦斑所停留的区域,所以又称为等待子区(WSA)。如图1中所示,从 WSA→SA₁→SA₂→SA₃→PSA→TSA 的一个线路称为一个引导路径,图1中绘制出了两条引导路径。

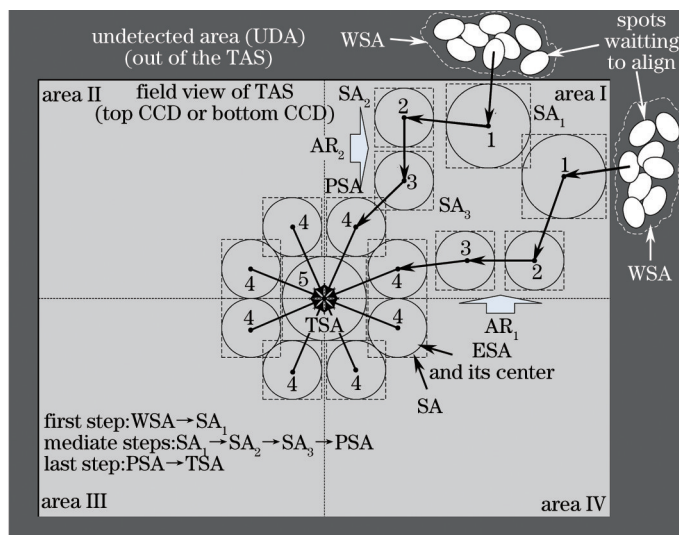


图1 光束引导传感器(上 CCD 或下 CCD)的一个固定子区划分

Fig.1 One invariant sub-area configuration of the beam alignment sensor (top CCD or bottom CCD)

引导过程包括3个步骤。第一步是根据前期准备工作中的信息将焦斑按组调整到对应的等待子区内。第二步是焦斑从等待子区到预备子区中心的引导。此步骤中,焦斑沿某一引导路径调整,从引导路径内的一个子区中心(等待子区不需从其中中心调整)依次调整到引导路径内的下一个子区中心,直到调整到对应的预备子区中心。另外,此步骤中各引导路径内的焦斑的调整是并行的。第三步是将焦斑从预备子区中心调整到目标子区中心,此时涉及到多个预备子区中焦斑的协调调整问题。需要按照顺时针或逆时针的顺序依次调整预备子区中的焦斑到目标子区中心。此过程虽然是一个串行的引导过程,然而在最后一步的调整中可以同时对其他焦斑进行前述的第二步的调整,所以最后一步的串行调整过程对引导总时间起到决定性作用。通过优化此步中的引导路径,可以缩短对引导时间有贡献的投射镜的机械响应耗时,从而达到缩短引

导总时间的目的。

3 引导路径的优化方法

由于投射镜的两个姿态可以并行调整,所以,将焦斑从预备子区中心调整到目标子区中心的时间与电动投射镜两个姿态角位移量绝对值的最大值直接相关。首先,建立引导模拟光的光传输模型,该模型描述了焦斑在靶室中心坐标系下的位置与投射镜的两个姿态角以及楔形透镜的位置之间的关系。基于此光传输模型可以求算焦斑从靶室中心坐标系的某一位置调整到下一个位置所需的投射镜两个姿态角的位移量。利用这种位移量的求算方法,可以实现单路光引导时间的优化和多路光引导时间的综合优化。

3.1 单路光引导时间的优化

从预备子区中心 P 到目标子区中心 T 的路径如图 2 所示,可以用 ϕ 和 d_{PT} 两个参数表示。设焦斑从 P 调整到 T 对应的投射镜的两个姿态角的位移量分别为 $\Delta\tilde{\alpha}$ 和 $\Delta\tilde{\beta}$ 。 T 点和 P 点在靶室中心坐标系下的位置坐标分别为 $({}^c x, 0, 0)$ 和 $({}^c x, d_{PT} \sin \phi, d_{PT} \cos \phi)$ 。可知 $\Delta\tilde{\alpha}$ 、 $\Delta\tilde{\beta}$ 与 d_{PT} 成线性关系,而与 ϕ 成非线性关系。

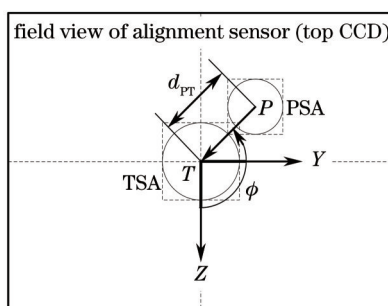


图 2 预备子区中心到目标子区中心的引导路径的两个参数

Fig.2 Two parameters of the route from the center of the PSA to the center of the TSA

投射镜某个姿态角位移量对应的机械调整时间可以认为与对应姿态角的位移量近似成正比关系,而且两个姿态角可以并行调整,所以焦斑从 P 点调整到 T 点的时间可以估算为

$$t_{PT} = k \max(|\Delta\tilde{\alpha}|, |\Delta\tilde{\beta}|), \quad (1)$$

式中 k 为一个常数。所以,为了确定 t_{PT} 的最小值,只需确定 $\max(|\Delta\tilde{\alpha}|, |\Delta\tilde{\beta}|)$ 的最小值即可。图 3 给出了 ${}^c x = 0$ 、 $d_{PT} = 1 \text{ mm}$ 时某一焦斑从 P 点调整到 T 点时所对应的 $\max(|\Delta\tilde{\alpha}|, |\Delta\tilde{\beta}|)$ 随 ϕ 的变化情况。可以看出,在选择 ϕ 等于如图 3 所示的 A 、 B 、 C 和 D 4 个角度时,可以使该焦斑从 P 点到 T 点的调整时间最短。

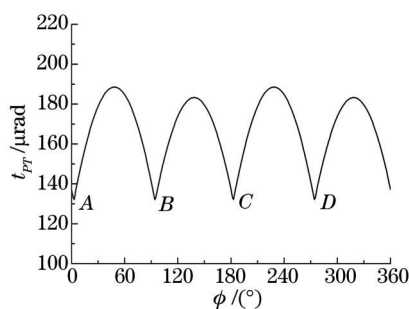


图 3 投射镜两个姿态角位移量绝对值的最大值随 ϕ 的变化情况(${}^c x = 0$, $d_{PT} = 1 \text{ mm}$)

Fig.3 Maximum value of the absolute values of the displacements of the two orientations of the reflecting mirror versus ϕ (${}^c x = 0$, $d_{PT} = 1 \text{ mm}$)

3.2 多路光的综合优化

为了使引导总时间尽可能小,需要考虑所有光路进行综合优化。标记 $y_i = \max(|\Delta\tilde{\alpha}|, |\Delta\tilde{\beta}|)$ 为第 i 路光所对应的投射镜两个姿态角位移量绝对值的最大值。绘制各路如图 3 所示的曲线,根据这些曲线可以将他们分为 4 组,可分别沿 4 个引导路径进行引导。对于某一个引导路径内的 N 个焦斑,可以利用他们对应 y_i 的均值和标准差进行优化,即

$$I = \arg \min_{\phi \in (0, 2\pi], d_{PT}=1} \left[\sum_{i=1}^N y_i / N \right], J = \arg \min_{\phi \in (0, 2\pi], d_{PT}=1} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \mu)^2 / N}. \quad (2)$$

均值最小意味着 N 个焦斑所对应的对引导总时间有贡献的姿态角位移量的总和最小。标准差最小意味着每个焦斑从 P 点到 T 点调整的时间消耗近似相等,这对于多个引导路径内焦斑的协调调整非常有利。

图4和图5分别给出了某一引导路径内的焦斑所对应的 y_i 的均值和标准差随 ϕ 的变化情况。从图4可以看出,在两个角度处存在均值最小值,而且这两个角度相差 180° 。在每一个角度附近区域约 27° 的范围内均值的变化不大,若仅采用均值最小的指标来选择最优的 ϕ 值的话,则在这 27° 的范围内取值皆可。然而,从图5可以看出在此范围内标准差随 ϕ 的变化非常显著。考虑到多个引导路径中焦斑的协调调整问题,选择标准差最小值所对应的角度值,即选择 $\phi = 12.5^\circ$ 或者 $\phi = 192.5^\circ$ 。此时对应的均值和标准差分别为 $147.955 \mu\text{rad}$ 和 $0.340 \mu\text{rad}$ 。

同样,可以得到其他3个引导路径对应的最优角度,共计8个角度,如图6所示。为了便于其他子区的布置,每组可只选一个角度,如第一组焦斑所对应引导路径的角度选择 $\phi = 12.5^\circ$ 。其他3组分别选择 $\phi = 239^\circ$ 、 $\phi = 102.5^\circ$ 和 $\phi = 329^\circ$ 。

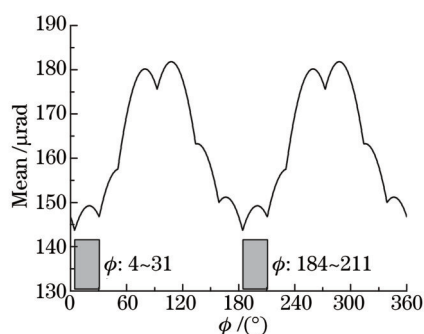


图4 某一引导路径对应 y_i 的均值随 ϕ 的变化情况
(${}^c x = 0, d_{PT} = 1 \text{ mm}$)

Fig.4 Average of y_i of an alignment route versus ϕ
(${}^c x = 0, d_{PT} = 1 \text{ mm}$)

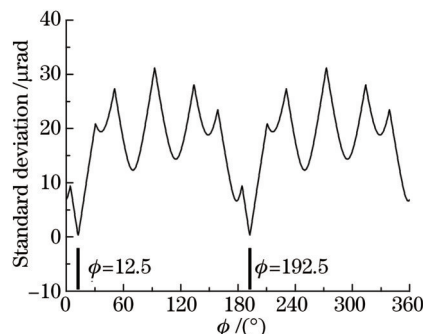


图5 某一引导路径对应 y_i 的标准差随 ϕ 的变化情况
(${}^c x = 0, d_{PT} = 1 \text{ mm}$)

Fig.5 Standard deviation of y_i of an alignment route versus ϕ
(${}^c x = 0, d_{PT} = 1 \text{ mm}$)

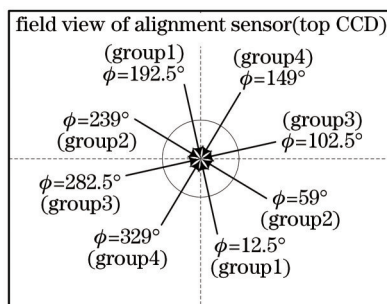


图6 从预备子区中心到目标子区中心的引导路径的最优角度(${}^c x = 0$)

Fig.6 Optimal angles for the routes from the centers of the PSA to the center of the TSA (${}^c x = 0$)

4 引导耗时的对比

根据结果可以求算,引导完所有引导路径内的焦斑所对应的对引导总时间有贡献的投射镜姿态位移量之和为 $D_{\text{new}} = 0.003539 \text{ rad}$ 。为估计采用普通的串行引导方法时引导完所有焦斑所对应的对引导总时间有贡献的投射镜姿态位移量之和 D_{seri} ,假设焦斑等概率地分布于传感器视场之中,则可以得到 $D_{\text{seri}} = 0.006830 \text{ rad}$ 。二者的引导耗时比为

$$\eta = D_{\text{new}} / D_{\text{seri}} = 0.518. \quad (3)$$

(3)式表明,若基于固定子区划分的光束引导方法,并且采用所得到的最优的引导角度,引导总时间缩短

为原来的0.518。另外, η 与 d_{PT} 成线性关系, 如图7所示。引导耗时比 η 越小, 说明与普通的串行引导方法相比, 该方法的引导时间越短。一般情况下, d_{PT} 可以取到 1.0 mm 以下, 所以, 采用固定子区划分的引导方法和优化后的引导路径可以很大程度上缩短光束引导的总时间。

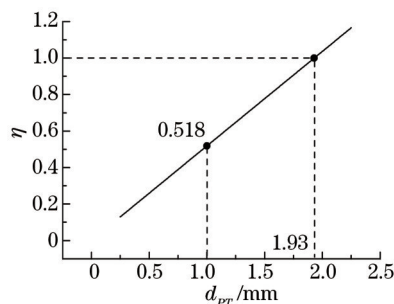


图7 采用两种引导方法时的引导耗时比 η 与 d_{PT} 之间的关系 (${}^c x = 0$)

Fig.7 Ratio η between the times consumed for aligning all the laser beams while adopting two alignment methods versus d_{PT} (${}^c x = 0$)
当 ${}^c x$ 取其他值时, 利用上面所介绍的方法同样可以很大程度上缩短光束引导的总时间。

5 结 论

介绍了基于光束引导传感器固定子区划分的光束引导方法。由于预备子区中心与目标子区中心之间的路径对引导时间起决定性作用, 以一种终端光学组件的布置为研究对象, 以引导目标点为靶室中心的情况为例, 介绍了引导路径的优化过程。优化结果表明, 可以将光路分成 8 个组或者 4 个组进行引导, 分别沿 8 个引导路径或者 4 个引导路径进行引导, 优先考虑分成 4 组分别沿 4 个引导路径进行引导。

当采用基于固定子区划分的引导方法时, 引导总时间与预备子区中心到目标子区中心的距离 d_{PT} 成正比。分析结果表明, 优化后当 d_{PT} 为 1 mm 时, 引导时间缩短为采用普通串行引导方法时的 0.518。一般情况下, d_{PT} 可以取到 1.0 mm 以下, 所以, 光束引导总时间能够得到大幅度的缩短。对于引导目标点不在靶室中心的情况, 所提出的方法仍然适用。

参 考 文 献

- 1 Christopher J S. The national ignition facility: the world's largest optical system[C]. SPIE, 2007, 6834: 683402.
- 2 Luttmann M, Denis V, Lanternier C, *et al.*. Laser mégajoule alignment to target center[C]. SPIE, 2011, 7916: 79160N.
- 3 Burkhart S C, Bliss E, Nicola P D, *et al.*. National Ignition Facility system alignment[J]. Applied Optics, 2011, 50(8): 1136-1157.
- 4 Zacharias R A, Beer N R, Bliss E S. Alignment and wavefront control systems of the national ignition facility[J]. Optical Engineering, 2004, 43(12): 2873-2884.
- 5 Kalantar D H, Nicola P D, Shingleton N, *et al.*. An overview of target and diagnostic alignment at the National Ignition Facility[C]. SPIE, 2012, 8505: 850509.
- 6 Nicola P D, Kalantar D H, Mccarville T, *et al.*. Beam and target alignment at the national ignition facility using the target alignment sensor (TAS)[C]. SPIE, 2012, 8505: 85050B.
- 7 Liu Guodong, Pu Zhaobang, Zhang Zhuo, *et al.*. Study on the method of multi-path laser directing in ICF[J]. Optical Technique, 2004, 30(2): 232-234.
刘国栋, 浦昭邦, 张 琢, 等. 聚变多路打靶激光光束引导方法的研究[J]. 光学技术, 2004, 30(2): 232-234.
- 8 Wang Meicong, Zhu Mingzhi, Chen Gang, *et al.*. Research of transport beams arrangement in target area for large scale ICF facility [J]. Lasers & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 011403.
王美聪, 朱明智, 陈 刚, 等. 大型 ICF 装置靶场传输光路排布研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 011403.
- 9 Zhu Mingzhi, Wang Meicong, Chen Xiaojuan, *et al.*. General layout and structure design of ICF facility[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(3): 701-708.
朱明智, 王美聪, 陈晓娟, 等. 惯性约束聚变装置总体布局和结构设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 701-708.
- 10 Zhou Wei, Hu Dongxia, Zhao Junpu, *et al.*. Optimizing on algorithm and flow of beam alignment in high power solid-state laser driver[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 78-81.

- 周 维, 胡东霞, 赵军普, 等. 高功率固体激光器光路自动准直算法与流程优化[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 78-81.
- 11 Zeng Peiying, Liu Daizhong, Peng Zengyun, *et al.*. Research of auto-alignment system based on Ethernet[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0302009.
- 曾沛颖, 刘代中, 彭增云, 等. 基于以太网的自准直系统研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0302009.

栏目编辑: 张 雁