

高功率激光装置中的靶定位及束靶耦合技术研究进展

林炜恒^{1,2,3*}, 朱健强^{1,2}, 任磊^{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联合实验室, 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 靶定位与束靶耦合技术是激光聚变实验过程中最为关键的技术之一,是关系整个激光聚变实验成败的重要技术。综述了从 20 世纪 70 年代至今较为有代表性的各高功率激光驱动装置的靶定位与束靶耦合技术方案,讨论了设计技术方案的基本原则,总结了已有方案各自的优势与缺陷,并对一些新方法进行了展望。

关键词 激光器; 惯性约束核聚变; 束靶耦合技术; 靶定位技术; 光束指向; 靶场

中图分类号 TN241

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0400001

Advances in Target Alignment and Beam-Target Coupling Technologies of Laser Fusion Facility

Lin Weiheng^{1,2,3*}, Zhu Jianqiang^{1,2}, Ren Lei^{1,2}

¹National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, 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 Target alignment and beam-target coupling technologies are the most critical technologies in laser fusion experiments, and they are the important with respect to the success of the laser fusion experiment. This study reviews the technical solutions pertaining to the target alignment and beam-target coupling of several representative high-power laser facilities from the 1970s to the present, discusses the basic principles of the technical solution design, summarizes the advantages and defects of different facilities' solutions, and suggests to some new methods.

Key words lasers; inertial confinement fusion; beam-target coupling technology; target alignment technology; beam pointing; target chamber

OCIS codes 140.3460; 350.2660; 220.1140; 220.4830

1 引言

高功率激光装置是用于实现惯性约束核聚变 (inertial confinement fusion)^[1] 研究、高能物理实验与其他基础科学实验的大科学装置。如图 1 所示, 高功率激光装置^[2] 可以分为如下几个组成部分^[3]: 1) 激光系统, 用于产生激光并对激光进行放大与整

形调节; 2) 反射镜面组, 用于引导光束进入靶室内; 3) 靶场系统, 开展实验并观测实验过程/结果的场所。

其中, 作为整个高功率激光装置的核心部分, 位于靶场系统中的靶室是发生聚变实验的关键场所, 而靶定位与束靶耦合单元是靶场系统的核心单元之一。

收稿日期: 2019-10-30; 修回日期: 2019-11-26; 录用日期: 2019-12-02

基金项目: 中国科学院国际合作局对外合作重点项目(181231KYSB20170022)

* E-mail: 1069612658@qq.com

在聚变实验中,为了保证对称地压缩靶丸,通常对靶在靶室中的位姿、光束辐照在靶上的位置与状态有着苛刻的精度要求。实现以上实验要求的过程

通常称为靶定位与束靶耦合,如图 2 所示。靶定位与束靶耦合的精度直接关系到物理实验的质量,甚至关系到激光聚变实验的成功与否。

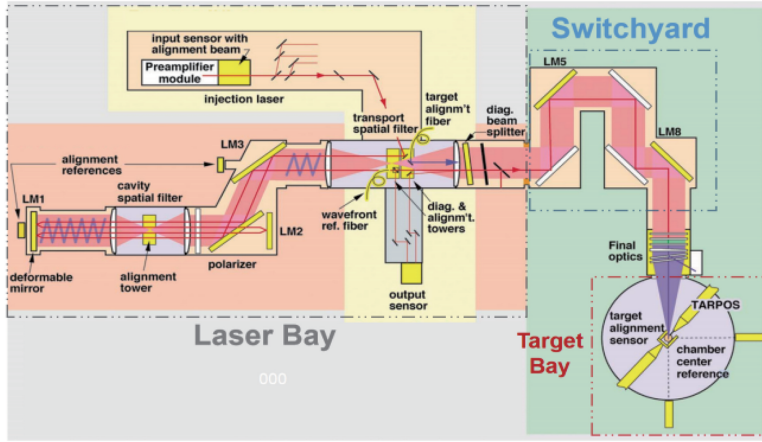


图 1 美国国家点火装置(NIF)一路激光的基本组成^[3]
Fig. 1 Basic components of NIF's one beampath^[3]

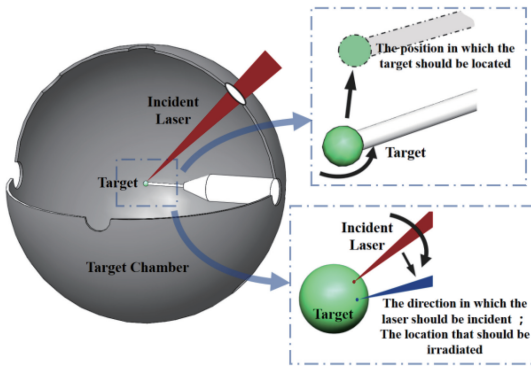


图 2 靶定位及束靶耦合示意图

Fig. 2 Target alignment and beam-target coupling diagram

靶定位一般可以视为观测系统和送靶机构^[4]共同作用的过程:观测靶的位姿,然后由送靶机构对靶位姿进行调整。同样地,束靶耦合可以视为光学监测系统与对应光路的调整系统的共同作用:前者监测束靶耦合的状态,然后反馈给后者进行光束聚焦/指向性的调整。随着高功率激光装置的发展,靶定位与束靶耦合技术也在不断地探索与更新,已从 20 世纪 70 年代 NOVA、SHIVA、OMEGA 等装置的简单的近距离成像方案,发展到了如今的 NIF、SG-II-U、LMJ 等更加集成化、更高效、更高精度的方案。

本文讨论了不同激光聚变装置靶定位与束靶耦合技术方案的设计,总结了不同技术方案的异同,归纳了面对不同实验条件的靶定位与束靶耦合方案的解。

2 靶定位与束靶耦合的基本过程

在靶定位及束靶耦合过程中,靶室系统一般由靶室、观测系统、送靶机构、终端光学组件(光路调整系统)组成。为了方便描述,引入几个坐标系。

1) 靶室坐标系,如图 3 所示。该坐标系以靶室上各法兰口加工基线的交点 O 为原点, O 点理论上是靶室的几何中心。靶室坐标系为其余坐标系提供了一个共同的参考基准 O ,便于装配在法兰口上的各个设备的向心性校准。

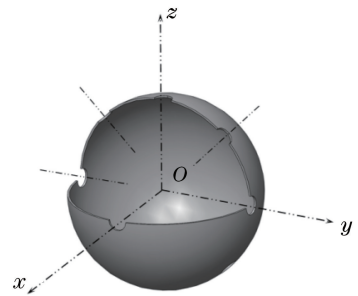


图 3 靶室坐标系
Fig. 3 Target chamber coordinate system

2) 观测系统坐标系,如图 4 所示。该坐标系以各观测系统光轴的交点 O' 为原点,可以方便地定量描述靶在观测系统中的位姿状态。

3) 靶坐标系,如图 5 所示。该坐标系以靶的几何中心 O'' 为原点,可以方便地定量描述光束辐照于靶上的位置。

4) 光路坐标系,如图 6 所示。该坐标系以各终端光学组件^[5]光轴基线交点 O''' 为原点,通过它可

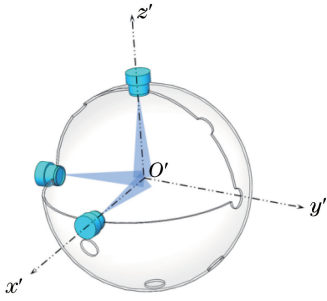


图 4 观测系统坐标系

Fig. 4 Viewing coordinate system

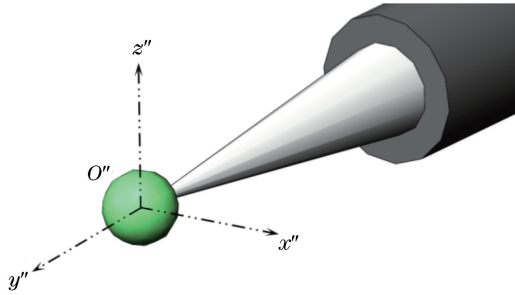


图 5 靶坐标系

Fig. 5 Target coordinate system

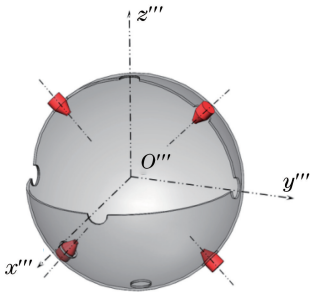


图 6 光路坐标系

Fig. 6 Beampath coordinate system

以定量调整辐照于靶上的光斑的落点与大小。

靶室系统的装配过程(各坐标系的耦合)可以视为坐标基准的转移过程,该过程如下:1)通过经纬仪、全站仪、激光跟踪仪等建立靶室坐标系(通常以多个法兰口中心线的交点为原点建立);2)在靶室坐标系中心放置一个观测基准(经纬仪、激光跟踪仪、毫米级金属球体、带定位基准的校准机构等);3)靶室系统各元素相对观测基准进行装配,如图 7 所示;4)退出观测基准。

理论上,当靶室系统装配好后,法兰口基线、观测系统光轴、送靶机构运动轴、终端光学组件光轴需以一定精度相交于一点,如图 8 所示。如果各基轴之间偏离较大,就会引起靶定位误差过大、靶位姿线性调整性差、各光束光程及相位不一致等问题,如图 9 所示。

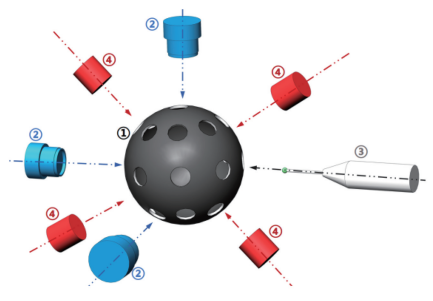


图 7 靶室系统各元素及其基线

Fig. 7 Components and their baseline in target chamber

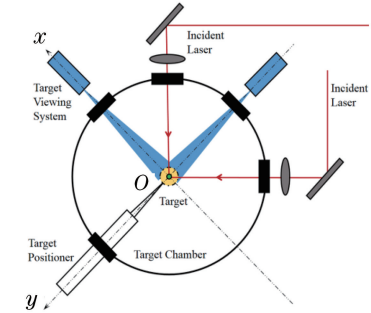


图 8 各基线相交于一点示意图(俯视截面)

Fig. 8 Baselines intersect at a point (top view)

靶室各基线尤其是观测系统的光轴需要定期校准,以保证观测系统坐标系与靶室坐标系的重合程度。较高的重合程度可以提升靶定位的精度。在完成靶室系统的装配及校准后才能进行靶定位与束靶耦合的工作。

2.1 靶定位

靶定位过程可以视为是靶坐标系与靶室坐标系的耦合过程。由于靶室坐标系与靶坐标系的相对位置关系无法直接进行观测,故需要引入一组观测系统(观测坐标系),通过其观测靶(靶坐标系)的位姿信息,以反映靶室坐标系与靶坐标系的耦合状态,如图 10 所示。

靶的定位过程一般可以描述为:由送靶机构将靶送入靶室内,通过观测系统获取的靶位姿信息来调整靶,以实现靶在观测坐标系内的定位;又因靶室的安装校准过程保证了观测坐标系与靶室坐标系的精密耦合,故最终实现了靶坐标系与靶室坐标系的耦合。

2.2 束靶耦合

束靶耦合过程可以描述为:通过各类监测手段捕捉、提取入射光束与靶的相对关系,以此作为参考来调节位于靶坐标系内光斑的位置、大小,如图 11 所示。

可以通过两套独立的方案来实现以上两个基本

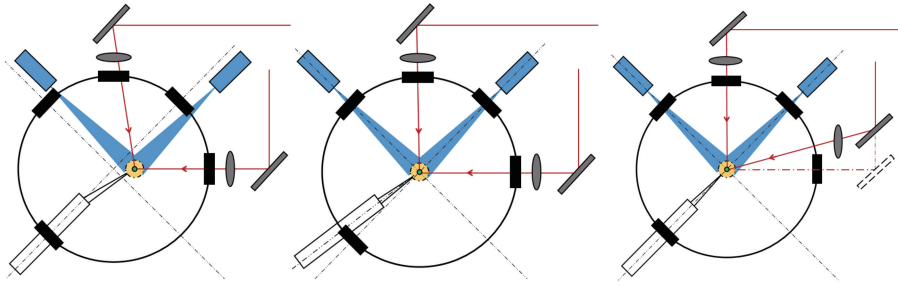


图 9 各基轴之间偏离较大时引起的问题。(a)观测系统光轴发生偏移引起的靶定位误差；

(b)送靶机构运动轴发生偏移引起的送靶机构线性调整性差；(c)光路调整系统基线发生偏移引起的各光束光程不一致

Fig. 9 Problems caused by large deviations between the base axis. (a) Target alignment error caused by the deviation of the optical axis of target viewing system; (b) nonlinear adjustment of the target position caused by the deviation of the motion axis of the target positioner; (c) optical path difference from each beam paths caused by the deviation of the baseline of the beampath adjustment system

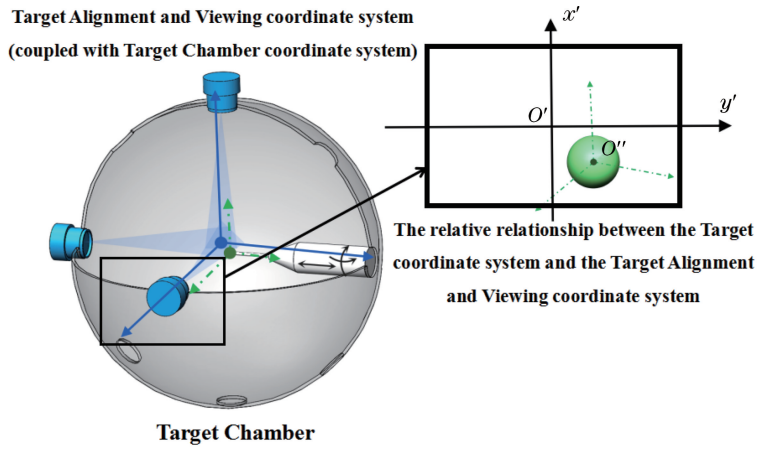


图 10 靶定位坐标的耦合过程

Fig. 10 Coordinate system coupling process of target alignment

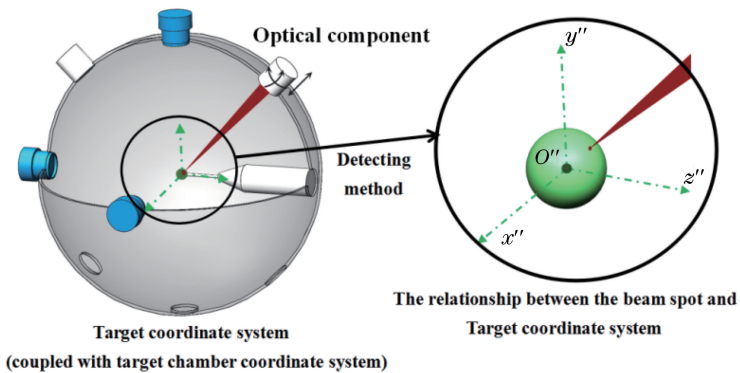


图 11 入射光束与靶坐标系进行匹配

Fig. 11 Incident beam is matched to the target coordinate system

物理过程:1)一套实现靶定位,一套实现束靶耦合,各自独立维护、安装,如 OMEGA 装置^[6];2)通过一套综合系统来同时实现靶定位及束靶耦合,如 NIF 装置^[7]。

此外,在进行靶定位及束靶耦合技术方案设计时,除了精度上的设计要求外(精度要求因不同装置的实验性质而异),还有一些应考虑的因素,如表 1 所示。

表 1 设计应考量的因素
Table 1 Design considerations

Process	Target alignment	Beam-target coupling
Design considerations	1) Precision;	1) Precision;
	2) The components participating in the process do not interfere with each other and are of appropriate size;	2) The components participating in the process do not interfere with each other and are of appropriate size;
	3) Suitable for working in a vacuum environment;	3) Suitable for working in a vacuum environment;
	4) Suitable for different types of target;	4) Suitable for different type of target;
	5) Automated and process simplified;	5) Automated and process simplified;
	6) Enough travel and resolution of target positioner;	6) Prevent the target from being preheated by the beam before the target is irradiated;
	7) Stability of target delivery process and vacuum process;	7) Suitable for working in different beam arrangement schemes;
	8) Small drift and high stiffness when the target positioner is stationary;	...
	9) Unconverted light and debris shield;	...
...		

3 国内外激光聚变装置中靶定位及束靶耦合的技术方案

从 20 世纪 70 年代的 SHIVA 到 80 年代的 NOVA、NOVETTA,再到 90 年代的 OMEGA,以及现在仍在进行实验的 NIF 等装置,美国激光聚变装置经历了近半个世纪的发展,其靶定位及束靶耦合的技术方案也在不停地发展,以适应更多波长、更短脉冲、更多点火方式、更多实验靶型等实验需求。

本节将对 SHIVA、NOVA、OMEGA (EP)、NIF (ARC)、LIL、LMJ、SG-II、SG-II-U 装置的技术方案设计进行讨论。

3.1 SHIVA 装置与 NOVA 装置

SHIVA 装置^[8]是 20 世纪 70 年代建成的第一代 ICF 装置。SHIVA 装置允许 20 束光束进行直接驱动实验,靶室半径小于 1 m,光束输出组件的焦距为 1200 mm。该装置的基本参数如表 2 所示,靶定位与束靶耦合精度分别为 10 μm 与 50 μm。

表 2 SHIVA 装置的基本参数^[8]
Table 2 Basic parameters of SHIVA facility^[8]

Parameter	Content
Drive method	Direct drive
Number of beams	20
Target chamber radius /m	<1
Final optical system focal length /mm	1200
Target alignment and viewing system	A pair of orthogonal viewing systems (7 μm imaging resolution)
Beam-target coupling's detecting scheme	Surrogate target+PSD spot monitoring system
Target alignment precision /μm	10
Beam-target coupling precision /μm	50

SHIVA 装置的靶定位及束靶耦合方案可归纳为: 1) 使用一对安装精度比较高的成像系统(TAVI,如图 12 所示)^[9]观测靶的位姿; 2) 引导光束至模拟靶上,然后光束反射回位敏(PSD)光斑监测系统,实现束靶耦合的监测^[10],如图 13 所示。靶定位及束靶耦合的流程如图 14 所示。

作为 SHIVA 装置的升级版本,1984 年建成的 NOVA^[11-13]装置将 SHIVA 束靶耦合技术方案进行了改进。因为基于 PSD 方案的 SHIVA 装置对光斑形状敏感程度低,所以 NOVA 装置引入了

一个新方案:使用 CCD 阵列组成的模拟靶对光斑的形状和位置进行记录,进而调节束靶预耦合的状态。

3.2 OMEGA 装置及 OMEGA-EP 装置

于 1995 年落成的新一代直接驱动点火的 ICF 装置——OMEGA^[6],目前仍然服役于各种物理实验中。OMEGA 装置拥有 60 束激光,靶室半径为 1.65 m,光束输出组件的焦距为 1800 mm。OMEGA 装置的基本参数如表 3 所示,靶定位精度为 20 μm。

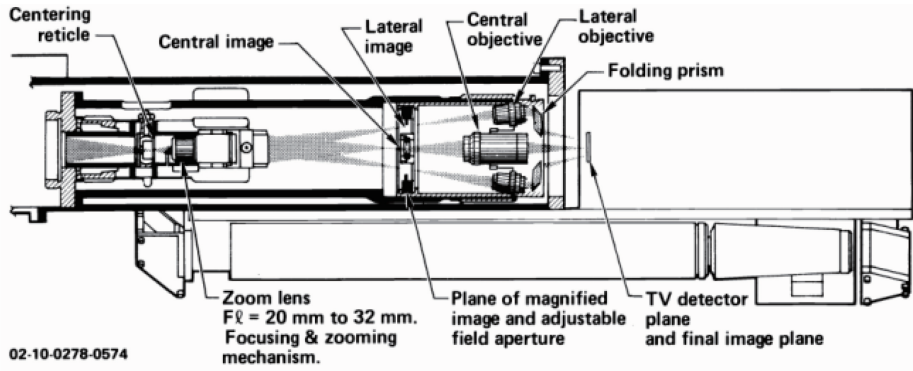


图 12 SHIVA 成像观测系统^[9]

Fig. 12 Target alignment and viewing instrument of SHIVA^[9]

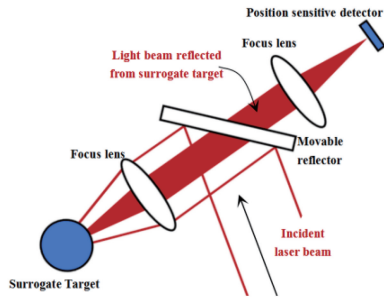


图 13 SHIVA 束靶耦合光斑监测系统简图^[10]

Fig. 13 SHIVA beam-target coupling detecting system^[10]

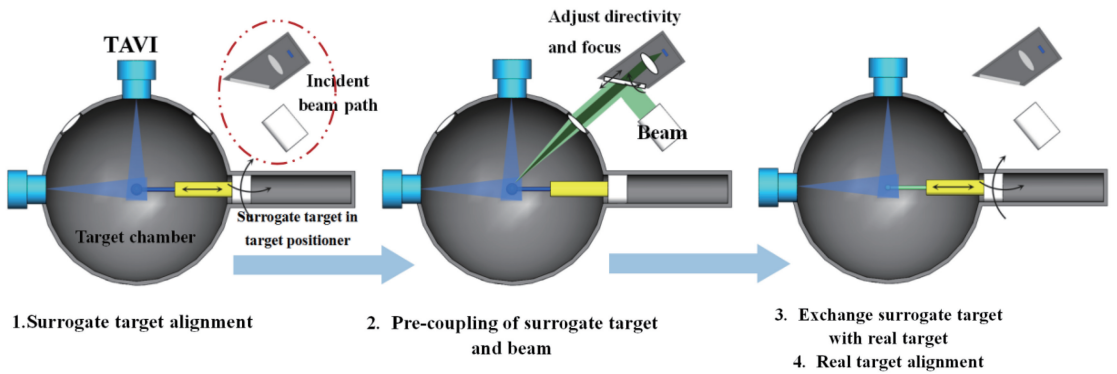


图 14 SHIVA 靶定位及束靶耦合方案流程图

Fig. 14 SHIVA target alignment and beam-target coupling scheme

表 3 OMEGA 装置基本参数^[6,14-15]

Table 3 Basic parameters of OMEGA facility^[6,14-15]

Parameter	Content
Drive method	Direct drive
Number of beams	60
Target chamber radius / m	1.65
Final optical system focal length / mm	1800
Target alignment and viewing system	A pair of orthogonal viewing systems (10 μm imaging resolution)
Beam-target coupling's detecting scheme	Surrogate target+diagnostic/alignment system (F-ASP&UVAT)
Target alignment precision / μm	20

与 SHIVA、NOVA 类似, OMEGA 的靶定位方案采用了一对正交的成像系统 (TVS) 进行观测, 如

图 15(a) 所示。束靶耦合方案采用了与 SHIVA 类似的反射形模拟靶方案, 即从校准系统 (UVAT/

IRAT)^[16]发出校准光束至模拟靶表面,然后,光束反射回诊断/校准系统(UVAT/F-ASP)采集光斑信

息^[17],如图 15(b)所示。其靶定位及束靶耦合流程如图 16 所示。

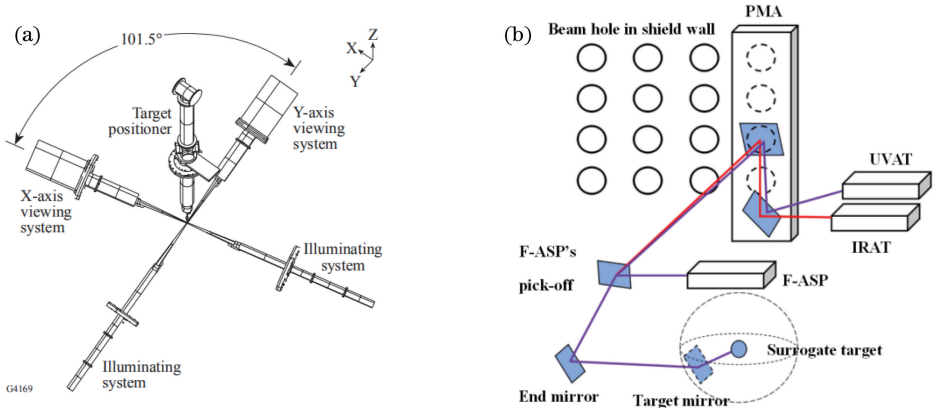


图 15 OMEGA 靶定位成像系统的空间分布以及束靶耦合校准系统。(a)成像系统的空间分布^[14]; (b)校准系统^[6]
 Fig. 15 Spatial layout of OMEGA's Target Viewing System and beam-target coupling alignment system. (a) Spatial layout of Target Viewing System^[14]; (b) beam-target coupling alignment system^[6]

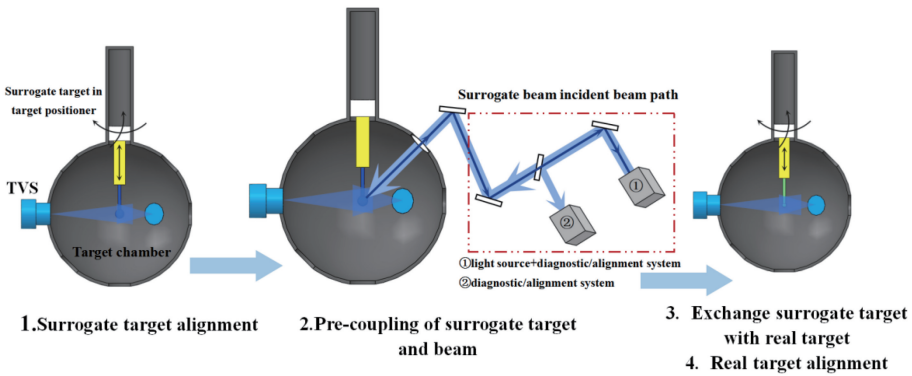


图 16 OMEGA 靶定位及束靶耦合方案流程图

Fig. 16 OMEGA target alignment and beam-target coupling scheme

2008 年 4 月落成的 OMEGA-EP^[18]装置引入了四束以 NIF 相同规格进行设计、建造的光路。其中的两束光可以压缩至皮秒级超短脉冲皮秒激光通过离轴抛物面镜(焦距为 1000 mm)瞄准并聚焦于靶上,如图 17 所示。靶定位方案与 OMEGA 装置一致,通过正交观测系统观测靶的位姿;纳秒光束的束靶耦合方案与 OMEGA 的方案类似,使用一个机械臂^[6](如图 18 所示)将光束诊断装置(PAD)移至皮秒光路的离轴抛物面镜焦点附近,通过 PAD 发射光束至皮秒光路中,然后再反射至 PAD 内的校准传感器中,对特定皮秒光路进行校准。

3.3 NIF 装置及 NIF-ARC 装置

NIF 装置^[7,19]是现阶段最先进的 ICF 装置之一,其独特的靶定位与束靶耦合方案设计在国际上被大量借鉴。NIF 装置拥有 192 束激光,可以进行包括间接驱动点火实验在内的多种物理实验,靶室半径为 5 m,终端光学组件的焦距为 7700 mm。其

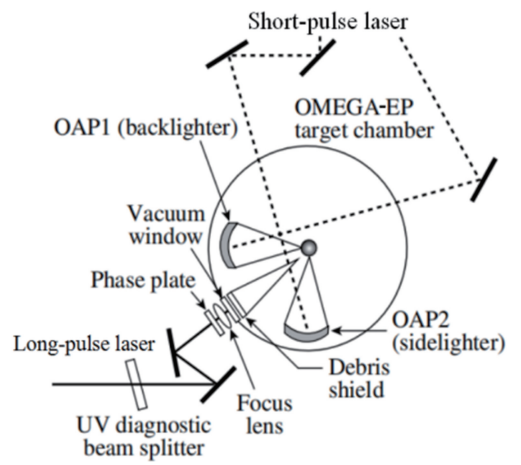


图 17 OMEGA-EP 装置靶室光路简图(俯视图)^[6]
 Fig. 17 OMEGA-EP target chamber beam path (top view)^[6]

基本参数如表 4 所示,靶定位与束靶耦合精度分别为 $6.8 \mu\text{m}$ 与 $48 \mu\text{m}$ 。

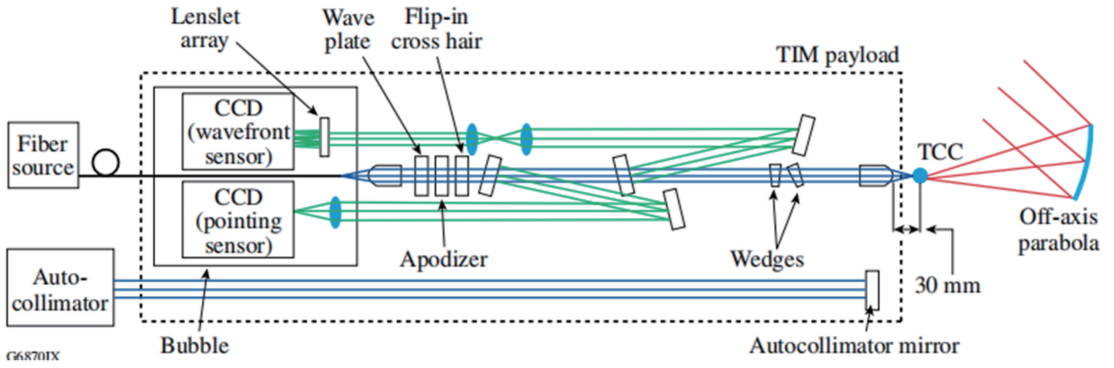


图 18 位于十英寸机械臂 (TIM) 上的抛物面校准诊断装置 (PAD) 光路简图^[6]

Fig. 18 Schematic of Parabola Alignment Diagnostic (PAD) on a Ten-Inch Manipulator (TIM)^[6]

表 4 NIF 装置基本参数^[3,20-21]

Table 4 Basic parameters of NIF facility^[3,20-21]

Parameter	Content
Drive method	Indirect drive
Number of beams	192
Target chamber radius / m	5
Final optical system focal length / mm	7700
Target alignment and viewing system	Conjugate imaging system moved into the target chamber (4.4 μm imaging resolution)
Beam-target coupling's detecting scheme	Conjugate imaging system moved into the target chamber (target alignment sensor)
Target alignment precision / μm	6.8
Beam-target coupling precision / μm	48

由于靶室^[22]半径增大到 5 m,故使用类似于 SHIVA、NOVA、OMEGA 的靶室壁上的成像系统进行靶定位。观测精度会因远场成像分辨率不足而降低,因此 NIF 采用了将成像系统^[19](TAS)移至靶室内进行观测的方法进行靶定位^[23]。其靶室观测系统与送靶机构的空间排布如图 19(a)所示。如图 19(b)所示,通过 TAS 内部的共轭光路设计^[24],可以在不使用模拟靶的情况下,对入射模拟光与靶

空间位置的相对关系进行观测^[25],以进行束靶耦合。同时,由于是并行的校准方案(靶定位过程与束靶耦合过程并列进行,每束光的校准相互并列进行),故校准流程十分高效(<30 min)。

靶定位及束靶耦合流程可以归纳为:1)借助辅助观测系统(CCRS)将共轭观测系统(TAS)定位于靶室内;2)使用共轭观测系统(TAS)进行靶定位与束靶耦合。NIF 靶定位及束靶耦合流程如图 20 所示。

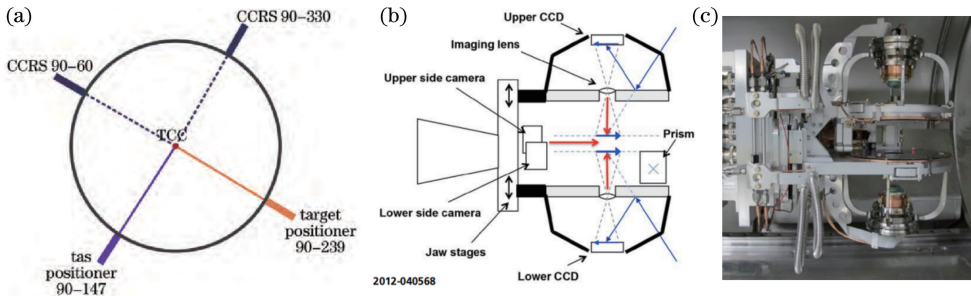


图 19 NIF 靶室、送靶机构、辅助观测系统俯视图以及 TAS 简图与实物图。

(a) 俯视图^[4]; (b) 简图^[24]; (c) 实物图^[24]

Fig. 19 Top view of NIF target chamber, target positioner, auxiliary alignment system (CCRS), as well as schematic diagram and photo of TAS. (a) Top view^[4]; (b) schematic^[24]; (c) photo^[24]

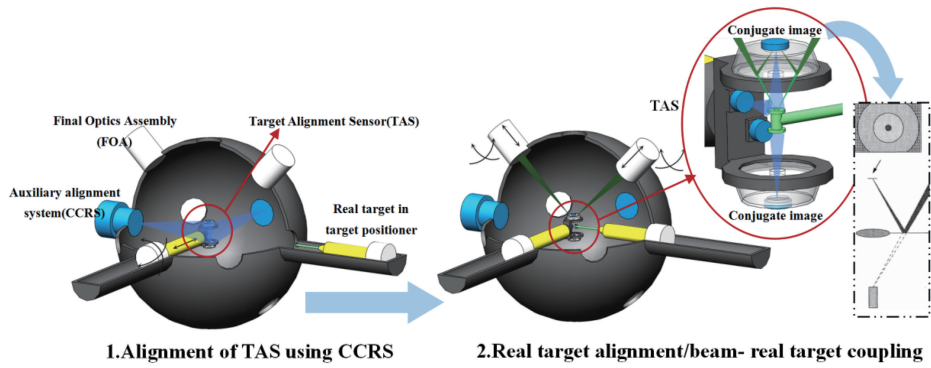


图 20 NIF 靶定位及束靶耦合方案流程图

Fig. 20 NIF target alignment and beam-target coupling scheme

2016 年末, NIF 在靶室内引入了多组靶和诊断装置操作器(TanDM)^[26], 并于 2017 年夏引入了一套由三个激光跟踪仪(其中一个安装在靶室法兰口上)组成的先进激光校准系统 ATLAS^[27-29], 如图 21 所示。NIF-ARC 装置^[30-32]为一个附加在 NIF 装置上的升级系统, 它将 NIF 中的 4 束光分束成 8 束并压缩, 以满足 NIC 皮秒超短脉冲光束实验的要求。

将 TanDM 与 ATLAS 结合使用可以实现 NIF-ARC 的靶定位与束靶耦合^[33]: 靶定位, 即将靶放置在 TanDM 末端, 通过 ATLAS (29 μm 跟踪精度^[29])跟踪附着在 TanDM 上的反射件(如图 21(b)所示), 监测 TanDM 在靶室内的位置与姿态, 进而调整 TanDM; 束靶耦合, 即使用 CCD 模拟靶(位于另一个 TanDM 上)来校准 NIF-ARC 的光束。

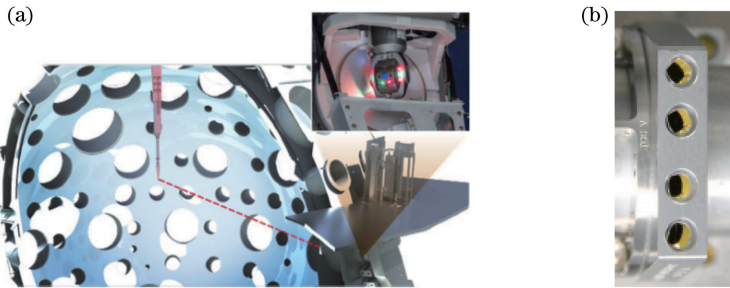


图 21 NIF-ARC 靶室上的先进激光校准系统 ATLAS 以及靶和诊断装置操作器 TanDM 上的反射件。(a) ATLAS^[29]; (b) 反射件^[29]

Fig. 21 Advanced Tracking Laser Alignment System (ATLAS) on the NIF-ARC Target chamber and reflectors on the Target and Diagnostic Manipulator (TanDM). (a) ATLAS^[29]; (b) reflectors^[29]

3.4 Astra-Gemini@CLF 装置

位于英国中央激光研究所, 于 2004 年建成的 Astra-Gemini^[34-36]装置是世界上最强烈的激光器之一, 其靶室为一个长 2.85 m、宽 1.5 m、高 1.3 m 的长方体, 拥有两束拍瓦光束, 用于光束聚焦的离轴抛

面镜的焦距为 300 mm。靶定位及束靶耦合基本参数如表 5 所示, 该装置使用背向成像系统(NRSIS)和 Mach-曾德耳干涉仪^[37](如图 22~23 所示)进行靶定位, 靶定位及束靶耦合精度分别为 8 μm 与 30 μm 。

表 5 Astra-Gemini 装置基本参数^[34,37]

Table 5 Basic parameters of Astra-Gemini facility^[34,37]

Parameter	Content
Number of beams	2
Size of target chamber /m	2.85×1.5×1.3
Final optical system focal length /mm	300
Target alignment and viewing system	New rear surface imaging system+ Mach-Zehnder interferometer (submicron resolution)
Beam-target coupling's detecting scheme	New rear surface imaging system
Target alignment precision / μm	<8
Beam-target coupling precision / μm	30

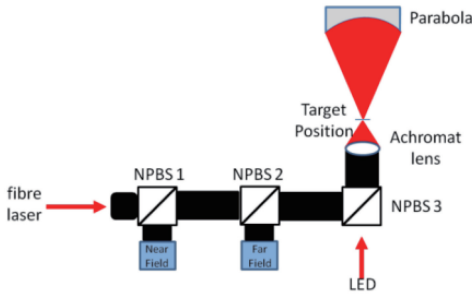


图 22 Astra-Gemini 上的靶定位(粗定位)与束靶耦合观测系统^[37]

Fig. 22 Target alignment (coarse aligning) and beam-target coupling detecting system on Astra-Gemini^[37]

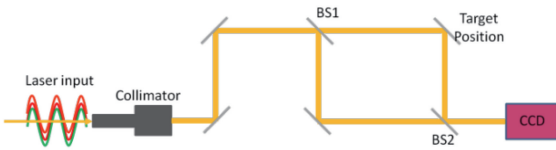


图 23 Astra-Gemini 装置上作靶定位装置的干涉仪^[37]
Fig. 23 Interferometer for a target positioning device on an Astra-Gemini facility^[37]

使用干涉仪进行平面靶定位,其理论精度能达到亚微米级,但其工作量程范围较小,需要与其他定位方案(NRSIS)相结合,以达到辅助精定位的作用。此外,这种定位方案的作用对象一般为易于处理干涉条纹的平面靶,在适用靶型上有所限制。

3.5 LIL 装置与 LMJ 装置

为 LMJ 验证性实验而设计的 LIL^[38] 装置于 2001 年建成。LIL 装置的靶室半径为 2.2 m,拥有 4 路与 LMJ 相同设计的激光,终端光学组件的焦距为 8000 mm。LIL 装置通过一对正交观测系统对位于送靶机构末端(接近靶的位置)的一组光学基准阵列

(如图 24 所示)进行观测,通过阵列的空间状态可以间接定位靶的位姿。束靶耦合采用一个包含激光光源、反射基准、CCD 阵列在内的“一体化模拟靶”(如图 25 所示)进行。模拟靶发出光束至待校准光路内,然后反射回模拟靶上的 CCD,将反射回 CCD 上的光斑信息为校准基准来调整光路^[39]。基本参数如表 6 所示,靶定位及束靶耦合精度分别为 50 μm 与 56 μm 。

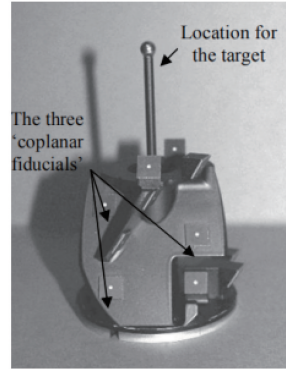


图 24 LIL 送靶机构上的反射基准^[39]
Fig. 24 Reflection reference on LIL positioner^[39]

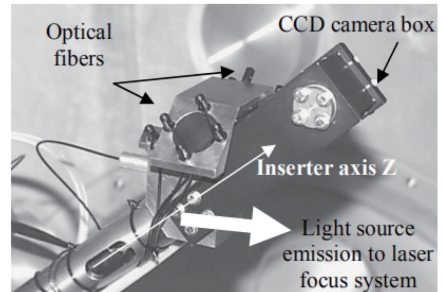


图 25 LIL 一体化模拟靶^[39]
Fig. 25 LIL integrated surrogate target^[39]

表 6 LIL 装置与 LMJ 装置的基本参数^[38-40]

Table 6 Basic parameters of LIL and LMJ facilities^[38-40]

Parameter	Content (LIL, LMJ)
Drive method	Not available, indirect drive
Number of beams	4, 176
Target chamber radius / m	2.2, 5
Final optical system focal length / mm	8000
Target alignment and viewing system	A pair of orthogonal viewing systems+optical fiducial, three sets of near mutual orthogonal imaging systems
Beam-target coupling's detecting scheme	Integrated surrogate target
Target alignment precision / μm	50, <10
Beam-target coupling precision / μm	56, 48

作为世界上最大的高功率激光装置之一,于 2010 年建成的 LMJ 装置拥有 176 束高功率激光,同时它的靶室^[41]与 NIF 靶室的尺寸都相当大(半径

为 5 m)。为了提高靶定位的精度,LMJ 进行了如下设计^[42-44]:1)特殊设计了观测系统的光路结构;2)在观测系统内自行设计了坐标系;3)多对、多角度观

测系统共同定位^[45],如图 26(a)所示;4)在靶附近设计了 4 个定位基准^[41,43],如图 26(b)所示。

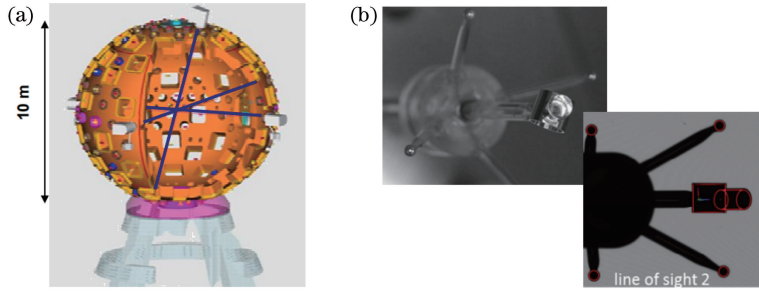


图 26 LMJ 靶室内壁上的三组观测系统(蓝色视场)以及带有 4 个定位基准的靶与观测系统中的图样。

(a)观测系统^[45]; (b)靶(上)^[41]和图样(下)^[41]

Fig. 26 Three sets of viewing systems(SOPAC) (blue field of view) in LMJ's target chamber, target with 4 aligning fiducials and its pattern in the viewing system. (a) Viewing systems^[45]; (b) target (top)^[41] and pattern in the viewing system (bottom)^[41]

靶定位及束靶耦合方案^[45]引入了类似 LIL 的一体化模拟靶(通用参考系统 CR^[42,45],如图 27 所示):1)CR 发出光束至观测系统内,将 CR 预定位;2)CR 发射模拟光束至终端光学组件(FOA)^[46],经过 FOA 内的反射结构,光束反射回 CR 内的 CCD 上,将 CCD 上的光斑信息作为校准基准来调整光路;3)退出 CR,使用 SOPAC 对送入的实际靶进行定位。靶定位及束靶耦合流程如图 28 所示,靶定位及束靶耦合精度分别为 $10\ \mu\text{m}$ 与 $48\ \mu\text{m}$ 。

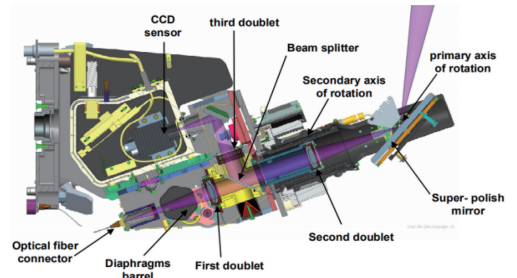


图 27 LMJ 一体化模拟靶:通用参考系统(CR)^[45]

Fig. 27 LMJ integrated surrogate target-Common Reference (CR)^[45]

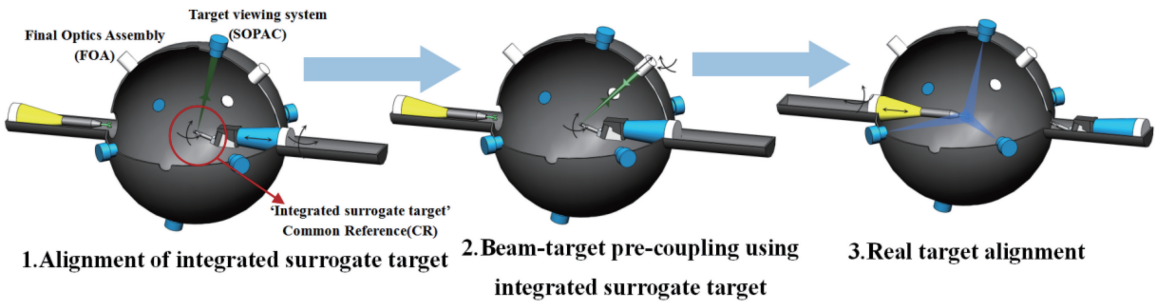


图 28 LMJ 靶定位及束靶耦合方案流程图

Fig. 28 LMJ target alignment and beam-target coupling scheme

3.6 SG-II 装置和 SG-II-U 装置

2001 年落成的 SG-II 装置^[47,49]的靶室半径为 $0.75\ \text{m}$,拥有 8 路高功率激光,可以进行包括直接驱动聚变点火实验在内的多种物理实验,终端光学组件的焦距为 $750\ \text{mm}$ 。其靶定位方案为:使用三组观测系统(如图 29 所示)对靶位姿进行观测^[50]。束靶耦合方案为:辐照光束于模拟靶上,通过观测系统观察束靶预耦合的状态^[50](如图 30 所示)。其基本参数如表 7 所示,靶定位及束靶耦合精度分别为 $5\ \mu\text{m}$ 与 $15\ \mu\text{m}$ 。

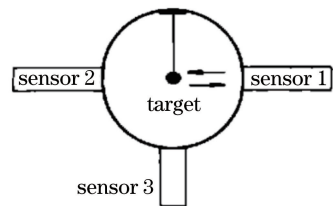


图 29 SG-II 中位于靶室壁上的观测系统^[50]

Fig. 29 Target viewing system in target chamber of SG-II^[50]

SG-II-U 装置作为 SG-II 的升级装置,拥有更大的靶室尺寸(半径为 $1.2\ \text{m}$)。此外,该装置不仅

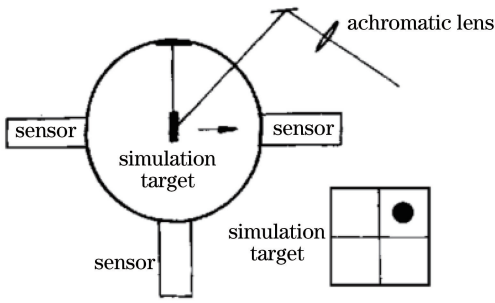


图 30 SG-II 束靶耦合状态示意图^[50]

Fig. 30 Schematic of SG-II's beam-target coupling^[50]

可以进行间接驱动点火实验,在引入第九路皮秒光

束之后还能够进行快点火实验。快点火靶定位及束靶耦合方案^[51-52]如下:1)通过位于靶室壁上的CCRS观测系统对带有锥孔的模拟靶进行定位;2)通过第九路辅助瞄准系统(AAS),如图31右下所示,进行锥孔的朝向定位;3)通过AAS注入模拟光,以进行皮秒激光的束靶预耦合;4)撤出模拟靶,引入实际靶;5)用CCRS对TAS(如图31中上所示)进行校准,然后使用已经校准好的TAS对实际靶进行定位及纳秒光束靶耦合,并使用AAS对锥孔进行定位。靶定位及束靶耦合流程如图32所示,靶定位及束靶耦合精度分别为 $8\ \mu\text{m}$ 与 $20.6\ \mu\text{m}$ 。

表 7 SG-II 和 SG-II-U 装置的基本参数^[49-53]

Table 7 Basic parameters of SG-II and SG-II-U facilities^[49-53]

Parameter	Content (SG-II, SG-II-U)
Drive method	Direct drive, indirect drive+fast ignition
Number of beams	8, 8+1
Target chamber radius / m	0.75, 1.2
Final optical system focal length / mm	750/1900@ns (800@ps)
Target alignment and viewing system	Three sets of viewing systems($10\ \mu\text{m}$ imaging resolution), conjugate imaging system moved into the target chamber ($2\ \mu\text{m}$ imaging resolution)
Beam-target coupling's detecting scheme	Surrogate target+viewing systems, conjugate imaging system(TAS)
Target alignment precision / μm	5, 8
Beam-target coupling precision / μm	15, 20.6

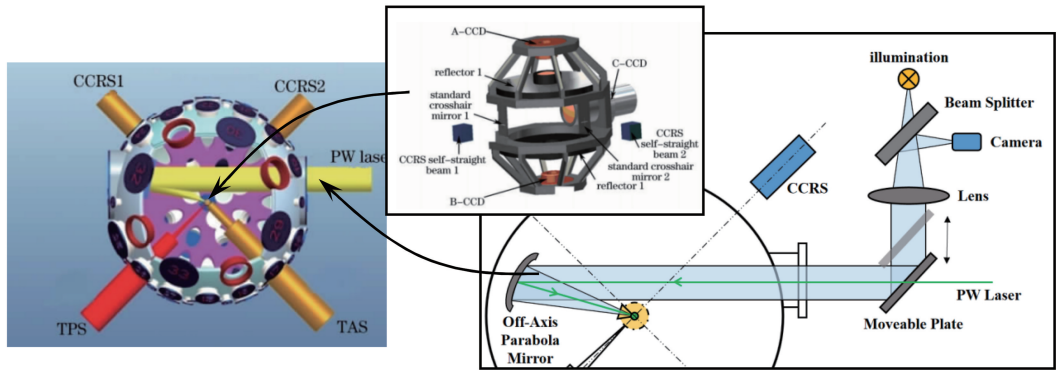


图 31 SG-II-U 靶室内壁上的辅助观测系统 CCRS 与可以伸入靶室中心附近的观测系统 TAS(左)^[51],

靶定位传感器 TAS 结构简图(中)^[51]以及第九路辅助瞄准系统 AAS(下)^[52]

Fig. 31 Auxiliary alignment system (CCRS) in target chamber and the viewing system TAS (left)^[51] that can extend into the vicinity of the center of target chamber, the structure diagram of the target alignment sensor TAS (middle)^[51], and the ninth beampath auxiliary alignment system AAS (bottom)^[52]

4 技术方案总结

根据不同的实验条件与实验要求,各装置的靶定位与束靶耦合方案各有异同,本节总结了不同方案之间的差异与适用面。

4.1 观测坐标系与靶室坐标系的匹配、耦合

在进行靶定位和束靶耦合之前,需要将靶定位

过程中引入的观测坐标系与靶室坐标系进行匹配。结合 NIF 和 LMJ 等方案,典型方案^[24,45,54]如下:1)使用激光跟踪仪、经纬仪、全站仪等对靶室建立坐标系;2)引入一个包含定位基准的校准机构(NIF 和 LMJ 校准机构及定位基准分别如图 33~34 所示),通过激光跟踪仪将其移动至靶室坐标系中心;3)使用观测系统观察位于靶室坐标系中心的基准结构,

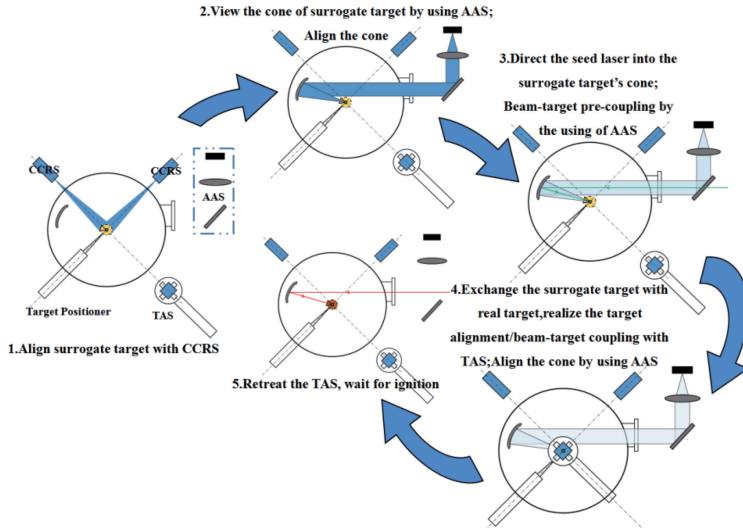


图 32 SG-II-U 靶定位及束靶耦合方案流程图

Fig. 32 SG-II-U target alignment and beam-target coupling scheme

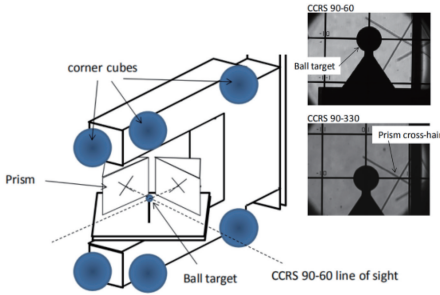


图 33 NIF 校准机构(左)^[24]及 CCRS 上观察校准机构的基准结构(右上)^[24]

Fig. 33 Alignment metrology tool of NIF (left)^[24] and fiducial structure of alignment metrology tool in the view of CCRS (right top)^[24]

定位方案。根据已有的装置,靶定位方案大致可以分为成像观测法、相干光学法、间接定位-激光跟踪法。

4.2.1 成像观测法

成像观测法即采用一对或多对成像系统,对靶室内部进行观测成像,观察靶的位姿,进而调整送靶机构,实现靶位姿的精确定位,即实现靶坐标系与观测坐标系的匹配。

当靶室尺寸较小(直径 $D < 5\text{ m}$)时,位于靶室壁上的成像系统可以较为清晰地对靶室中心附近的物体进行成像,进而精确观测靶的位姿。一般情况下采用一对正交的成像系统,以满足观测三维物体时的自由度要求。这种简单、直接的靶定位方案在靶室尺寸较小的情况下,可使保证成像系统的观测分辨率满足实验要求的靶定位精度。表 8 所示为近距离成像方案。

当靶室尺寸增大到一定程度时,位于靶室壁上的观测系统的成像分辨率就会大大降低,故成像系统口径需要增大,此时通过简单的成像系统无法满足靶定位的精度要求。表 9 为解决远距离成像导致的分辨率不足的方案。

不同的装置采用了不同的解决远距离成像的方案设计,例如法国的 LMJ 装置采用了如下方案设计:1)增加成像系统的成像方向;2)在靶附近增加一系列观测基准,使观测系统在定位靶本身的位姿外,还进行观测基准的定位;3)在成像系统内设计了坐标系。而美国的 NIF 与中国的 SG-II-U(ns)装置采用的方案是:将成像系统(靶定位传感器 TAS)移至靶室内部中心附近,进行靶位姿的观测,从而有效地将远距离成像问题转化成近距离成像问题。

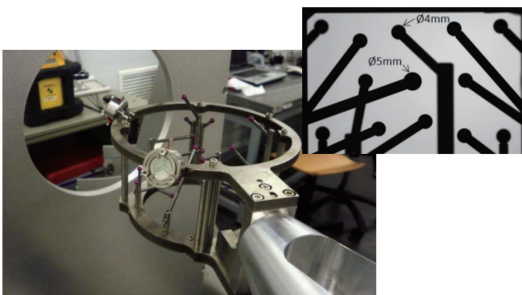


图 34 LMJ 的校准机构 RAX(左)^[54]以及于 SOPAC 上观察到的校准机构 RAX 的基准结构(右上)^[54]

Fig. 34 Center chamber axis reference (RAX) of LMJ (left)^[54] and fiducial structure of RAX in the view of SOPAC (right top)^[54]

校准放大率与方向,以实现观测坐标系与靶室坐标系的匹配。

4.2 靶定位方案的设计

在不同的实验条件下,不同的装置有着不同的靶

表 8 简单近距离成像方案
Table 8 Simple close-range imaging scheme

Facility	SHIVA	NOVA	OMEGA	SG-II	SG-II-U(ps)
Target chamber radius /m	<1	2.13	1.65	0.75	1.2
Number of viewing systems	A pair, orthogonal	A pair, orthogonal	A pair, orthogonal	Three sets (Fig.29)	A pair, orthogonal
Resolution of viewing systems / μm	7	7	10	10	12
Target alignment precision / μm	10	<10	20	5	Not available

表 9 解决远距离成像的方案
Table 9 Scheme to solve long-range imaging

Facility	LMJ	NIF	SG-II-U(ns)
Target chamber radius /m	5	5	1.2
Number of viewing systems	Three sets of near mutual orthogonal imaging systems	Two pairs, orthogonal to each other each pairs	Three sets (Fig.31)
Resolution of viewing systems / μm	10	4.4	2
Target alignment precision / μm	11	6.8	8

4.2.2 相干光学法

位于英国中央激光研究所的 Astra-Gemini 激光装置采用相干光学法对其所使用的平面靶进行靶定位,该装置的靶定位精度理论上可以达到亚微米级。

4.2.3 间接定位-激光跟踪法

间接定位法的主要思路是:在靶附近设计一系列定位基准,通过观测基准的位置来反演靶的位姿,以间接实现靶坐标系与观测坐标系的匹配。间接定位激光跟踪法方案如表 10 所示。

表 10 间接定位-激光跟踪法方案
Table 10 Indirect alignment-laser tracking scheme

Facility	LIL	NIF-Upgrade (ARC)
Target chamber radius /m	2.2	5
Number of alignment systems or laser trackers	A pair, orthogonal	Three laser trackers
Resolution of alignment systems / μm	10	29
Target alignment precision / μm	50	Not available

法国 LIL 装置在送靶机构末端(靶附近)设计了一系列光学反射基准,通过一对正交的成像系统(SYVIC)对反射基准进行观测;而美国 NIF-ARC 系统则通过靶室壁上的激光跟踪仪系统(ATLAS),对附着反射件的送靶机构(TanDM)进行定位,从而推算出靶的位姿信息。

4.3 束靶耦合方案设计

根据适用靶型、光束数量、点火方式(光束排布方式)等的不同,不同的装置采用了不同的束靶耦合方案设计。束靶耦合方案大致可以根据是否引入模拟靶进行区分。

4.3.1 使用模拟靶

对于在打靶前不预热靶的前提下实现束靶耦合(激光瞄准)的情况,部分装置引入了模拟靶并将其作为束靶预耦合的基准,步骤如下:1)通过靶定位方案将模拟靶移至所需位置;2)将光束(模拟光、小功率种子光等)引导至模拟靶上的特定位置,以达到束

靶预耦合;3)撤出模拟靶,将实验靶引入到之前记录的模拟靶位姿处。采用上述步骤即可达到束靶耦合的效果,即光束与靶坐标系匹配。表 11 给出了使用模拟靶的束靶耦合方案。

反射形模拟靶,即将光束引导至模拟靶上,通过观测从模拟靶上反射出来的光束的光斑信息,对光束的指向和聚焦进行校准。SHIVA 和 OMEGA 采用了反射形模拟靶。

记录形模拟靶是一个由 CCD 阵列组成的模拟靶,用于记录光束在靶上的方位与聚焦信息。NOVA 采用的是记录形模拟靶。同样地,为了记录光束与复杂靶(背向照射实验用靶等)的相互耦合关系,美国 NIF-ARC 装置也引入了 CCD 模拟靶,用于复杂靶的束靶耦合。

SG-II 装置采用了平面模拟靶,通过成像系统观测模拟靶上的光束落点,以此为指导进行束靶耦合,即采用了“成像系统+模拟靶”的形式。在 SG-

表 11 使用模拟靶的束靶耦合方案

Table 11 Beam-target coupling scheme with using of surrogate target

Form	Reflective surrogate target		Recording type surrogate target		Viewing systems+ surrogate target		Integrated surrogate target	
Facility	SHIVA	OMEGA	NOVA	NIF-ARC	SG-II	SG-II-U(ps)	LIL	LMJ
Target chamber radius /m	<1	1.65	2.13	5	0.75	1.2	2.2	5
Use of surrogate target	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Multifunction	
Laser spot recording form	Reflected back on PSD	Reflected back to alignment systems	A CCD array used as surrogate target	CCD board on surrogate target	Viewing systems	Viewing systems	CCD unit in target	
Final optical system focal length /mm	1200	1800	3000	892.9 or 952.6	750	800	8000	8000
Beam-target coupling precision / μm	50	Not available	<50	Not available	15	17.62	56	48

II-U 装置皮秒光束的准直方案中引入了一个开锥孔的模拟靶,引导光束至锥孔中,通过与光束同轴的成像系统观测锥孔,可以得到锥孔与光束的相对位置关系图样,以此为指导图样进行束靶预耦合。

法国的 LMJ 及其前身 LIL 都采用了一体化模拟靶的方案。LIL 采用了一个包含多组光源、CCD 成像板以及诊断瞄准基准在内的一体化模拟靶作为束靶耦合的核心结构,模拟靶发射光束至光路中,然

后光束反射回模拟靶上的 CCD,可以达到指导束靶预耦合的作用。类似地,LMJ 将靶定位、束靶耦合、诊断装置瞄准等功能整合在一个通用的参考系统(CR)上,也可以起到相同的作用。

4.3.2 无模拟靶

为了防止束靶耦合过程引入的光束使实际靶被预热,部分装置对光路结构进行了设计,在靶不受到激光辐照的情况下也能进行束靶耦合。无模拟靶的束靶耦合方案如表 12 所示。

表 12 无模拟靶的束靶耦合方案

Table 12 Beam-target coupling scheme without using of surrogate target

Form	Conjugate beam-path scheme		Reflected beam-path scheme	
Facility	SG-II-U(ns)	NIF	Astra-Gemini	OMEGA-EP
Target chamber radius /m	1.2	5	<0.5	1.65
Primary alignment system	TAS	TAS	NRSIS	PAD-TIM
Description	Conjugate beam-path drops the laser spot in the target image plane	Conjugate beam-path drops the laser spot in the target image plane	The beam from the alignment systems enters the laser path and is reflected back into the alignment systems	The beam from the alignment systems enters the laser path and is reflected back into the alignment systems
Final optical system focal length /mm	1900	7700	300	1000@ps
Beam-target coupling precision / μm	20.6	38	30	<50

SG-II-U 纳秒激光束靶耦合与 NIF 装置的束靶耦合方案类似,采用一个近距离成像系统实现靶定位与束靶耦合的并行进行,该方案即共轭光路法。共轭成像的原理如图 35 所示,将需要校准的光引导到靶的共轭像面上,将光束与共轭像耦合,即可达到束靶耦合的效果。但是如果赤道面附近存在入射光束,在

已有的 TAS 光路设计下就难以进行束靶耦合。

反射光路法:在激光出射终端附近相对地放置一个光源+检测的光路结构,发出光至需要校准的光路中,然后光束反射回该结构中的检测器,就可以检测需校准光路的指向和聚焦。采用这种方法的有 Astra-Gemini 装置的 NRSIS 系统和 OMEGA-EP

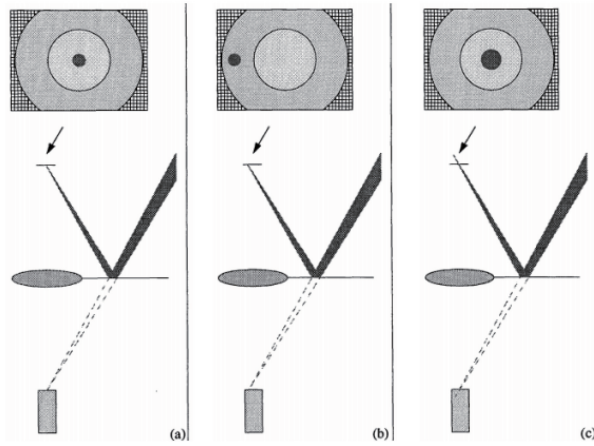


图 35 NIF 上的 TAS 束靶耦合示意图^[25]。(a)靶位姿正确的情况下,光束也校准正确;

(b)靶位姿正确的情况下,光束指向发生了偏移;(c)靶位姿、光束指向正确的情况下,光束聚焦程度发生偏移

Fig. 35 NIF's beam-target coupling diagram on the view of TAS^[25]. (a) Beam is aligned correctly if the target is aligned;

(b) in the case where the target is aligned, the beam pointing is drifted; (c) when the position of the target and the beam are directed correctly, the focus of the beam is shifted

装置的 PAD-TIM 系统。这种方案仅在实验光束较少的情况下适用。

4.4 靶定位与束靶耦合方案的总结

将 4.2 与 4.3 所有靶定位及束靶耦合技术方案进行归纳总结,如表 13 所示。

由表 11 可知,靶定位及束靶耦合方案的一般设计为观测系统与调整机构共同作用的过程,通过观测系统直接或间接获取靶的位姿信息以及光束与靶的空间关系信息,进而反馈给调整机构,进行相应组件的调整。

通过图 36 可知,靶定位与束靶耦合方案设计具有以下特点:1)在目前已有的靶定位与束靶耦合方案中选择符合实验要求并且不互斥的方案;2)在目前已有的方案分类中探索新的方案。如图 37 所示,对已有装置的方案进行整合分类,以便对不同的靶定位、束靶耦合方案进行对比。

4.4.1 靶定位方案总结

靶定位方案的通解:采用成像或非成像观测系统对靶进行直接或间接观测,以此为基准调整送靶机构进行靶坐标系与观测坐标系的匹配,即靶定位。

表 13 靶定位及束靶耦合方案的总结

Table 13 Target alignment and beam-target coupling scheme summary

Form and scheme		Facility	
Target alignment	Imaging system	Simple close-range	SHIVA, NOVA, OMEGA(EP), SG-II, SG-II-U(ps), LIL
		Long-range	LMJ, NIF, SG-II-U(ns)
	Non-imaging system	Coherent optics	Astra-Gemini
		Laser tracking	NIF-ARC
Beam-target coupling	Using surrogate target	Reflective surrogate target	SHIVA, OMEGA
		Recording type surrogate target	NOVA, NIF-ARC
		Viewing systems+surrogate target	SG-II, SG-II-U(ps)
	No surrogate target	Integrated surrogate target	LIL, LMJ
		Conjugate beam-path	SG-II-U(ns), NIF
		Reflected beam-path	Astra-Gemini, OMEGA-EP

如图 38 所示,当使用观测系统进行观测时,若观测精度不足,成像系统可以通过以下四种方法来提升观测精度:1)缩短成像距离,提高分辨率;2)增加多对多角度观测系统,过定义靶的图样,过约束靶的空间自由度,以减小任一观测角度的观测误差;3)

增加靶上的参考基准,观测靶、参考基准集合体的图样,过拟合靶的位姿;4)优化算法,从软件上提高分辨率。

非成像系统(例如以激光跟踪仪为基础的靶定位方案)可以通过以下三种方法来提升靶定位精度:

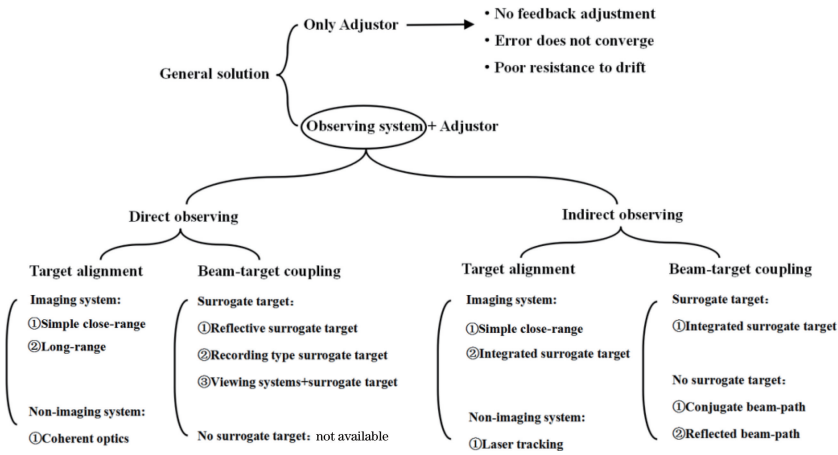


图 36 靶定位及束靶耦合的通解

Fig. 36 General solution of target alignment and beam-target coupling

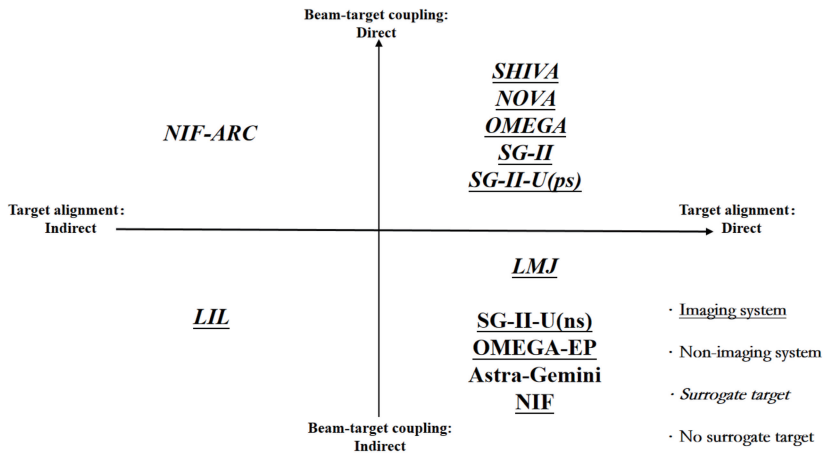


图 37 靶定位及束靶耦合分类

Fig. 37 Classification of target alignment and beam-target coupling

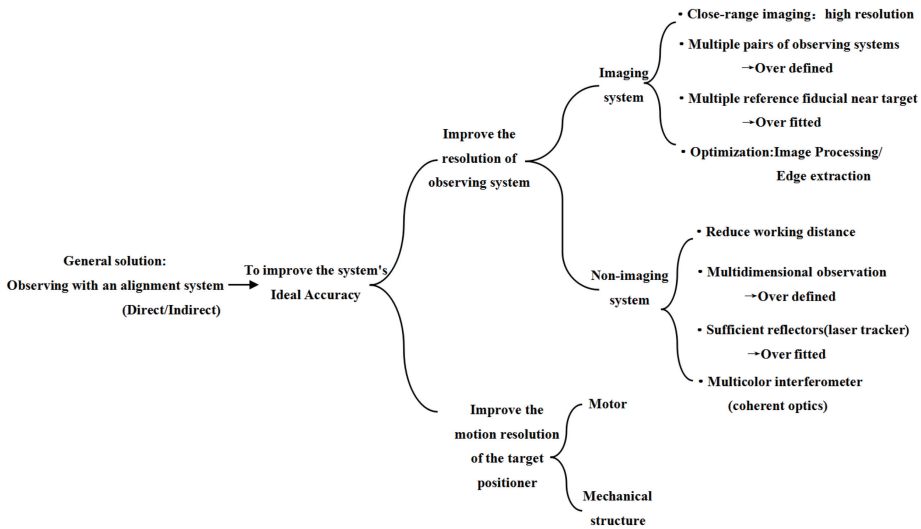


图 38 靶定位方案

Fig. 38 Target alignment scheme

1)减小工作距离以提高分辨率;2)增加不同方位的激光跟踪仪进行过定义探测;3)增加定位机构上的反射件,以进行过拟合观测等。

4.4.2 束靶耦合方案总结

不同的物理实验条件下适配的束靶耦合方案也不同,如表 14 所示。

表 14 不同实验条件下的束靶耦合适配方案

Table 14 Beam-target coupling adaptation scheme under different experimental conditions

Experimental condition		Beam-target coupling scheme
Target type	Plane target	Reflective surrogate target is not applicable
	Cylindrical target	Reflective surrogate target is not applicable
	Spherical target	No limit
	Cone shaped target	No limit
	Unconventional target	Reflective surrogate target and conjugate beam-path method are not applicable
Beam arrangement	With incident beams near the equatorial plane	Conjugate beam-path method based on TAS is not applicable
	No incident beams near the equatorial plane	No limit
Number of beams	>4	Reflected beam-path method
	<4	No limit

反射形模拟靶的表面形状不同,故其表现也不同。当存在光束斜入射至平面时(可能情况包含平面靶、柱形靶上下表面、背向照射实验使用的异形靶等),反射光路不沿原入射光路返回光敏器件中,从而影响了光斑的观测效果。

记录形模拟靶的适用性良好,但在制备上需要较高的工艺水平。

成像系统+模拟靶与记录形模拟靶方案类似,差别在于模拟靶的制备工艺水平要求低于前者,但是需要观测系统的空间观测角足够大,能够观测到所有光斑的辐照状态。

一体化模拟靶可看作是记录形模拟靶的另一种表现形式,能够实现包括靶定位、束靶耦合、诊断定位在内的多种功能的高度集成,对精密制造的工艺水平要求更高。在精密机械技术不断提升的当下,该方法是束靶耦合方案设计的趋势。

共轭光路法在面对不同角度入射的光束时,可以设计出不同的共轭光路方案。其优势在于束靶耦合(即靶定位流程并行处理),且耦合精度高。但是以TAS为例,一种束靶耦合的共轭光路无法适用于所有的入射光路排布方案,存在盲区。

反射光路法多被应用于拥有反射设计的光路结构中。当光束数量较少时,通过增加检测器的数量可以减少检测器的运动自由度,进而提高检测器自身的定位精度。当光束数量增加时,移动检测器容易导致其定位精度降低,从而致使束靶耦合精度下降。

5 结束语

靶定位(即束靶耦合方案的通解)为观测系统与调整机构的共同作用。靶定位方案一般分为成像与

非成像系统,而束靶耦合方案则以是否使用模拟靶进行分类。在不同的实验条件和实验需求下,应设计符合要求的靶定位与束靶耦合方案,以达到靶的精确定位,使入射激光与靶在物理空间上精确耦合。

此外,除了使用已有的方案进行设计以外,还应考虑新方案,例如细光束定位法、结构光定位法、单目视觉定位等。在保证设计要求的前提下,应尽量简化流程,提升效率和向上的兼容性(以面对不断更替、进化的实验条件,即更短的脉冲和更高的能量等),并提出特定实验条件下的方案最优解。

参 考 文 献

- [1] Miller G H, Moses E I, Wuest C R. The national ignition facility[J]. Optical Engineering, 2004, 43(12): 2841-2853.
- [2] Paisner J A, John D, Kumpan S A, et al. Conceptual design of the national ignition facility[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2633: 2-12.
- [3] Burkhart S C, Bliss E, di Nicola P, et al. National Ignition Facility system alignment [J]. Applied Optics, 2011, 50(8): 1136-1157.
- [4] Ren L, Zhao D F, Zhu J Q. Advances intarget 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.
- [5] Wegner P J, Auerbach J M, Thomas A, et al. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5341: 180-189.
- [6] Laboratory for Laser Energetics. Mega laser facility users' guide [EB/OL]. <http://www.lle.rochester.edu>

- edu/about/nluf.php.
- [7] Lawrence Livermore National Laboratory. National ignition facility user's guide [EB/OL]. <https://nifuserguide.llnl.gov/home>.
- [8] Speck D, Bliss E, Glaze J, et al. The Shiva laser-fusion facility [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1981, 17(9): 1599-1619.
- [9] Monjes J A, Manes K, O'Neal W, et al. Shiva target alignment and viewing instrument[J]. *Proceedings of SPIE*, 1978, 143(6): 878-882.
- [10] Bliss E, Suski G. Alignment of the twenty-beam Shiva laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1979, 15(9): 1040-1041.
- [11] Simmons W W, Godwin R O. Novalaser fusion facility: design, engineering, and assembly overview [J]. *Nuclear Technology-Fusion*, 1983, 4(1): 8-24.
- [12] Simmons W W. NOVA laser facility for inertial confinement fusion[C] // 10th Symposium on Fusion Engineering. Pennsylvania, USA: [s. n.], 1983: 15034789.
- [13] Paul J, Frederick W, McGuigan D L, et al. Nova laser alignment control system [J]. *Proceedings of SPIE*, 1984, 483: 54-64.
- [14] Laboratory for Laser Energetics. LLE review 71[EB/OL]. http://www.lle.rochester.edu/publications/lle_review/index.php?review=71.
- [15] McKenty P W, Sangster T C, Alexander M, et al. Direct-drive cryogenic target implosion performance on OMEGA[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(5): 2790-2797.
- [16] Okishev A V, Boni R, Millecchia M, et al. Unique high-bandwidth UV fiber delivery system for the OMEGA diagnostics applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, 7(3): 471-474.
- [17] Boles J, Pessel D, Forsley L. Omega automated laser control and data acquisition [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1981, 17(9): 1903-1908.
- [18] Maywar D N, Kelly J H, Waxer L J, et al. OMEGA EP high-energy petawatt laser: progress and prospects[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008, 112(3): 032007.
- [19] Aikens D M. Origin and evolution of the optics specifications for the National Ignition Facility [J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2536: 1-12.
- [20] Nicola P D, D. K, McCarville T, et al. Beam and target alignment at the national ignition facility using the target alignment sensor (TAS) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8505: 85050B.
- [21] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, et al. Description of the NIF Laser [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 25-145.
- [22] Richard J, Victor P, Chris H, et al. Design of the target area for the National Ignition Facility [J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 331-342.
- [23] Zacharias R A, Beer N R, Bliss E, et al. National Ignition Facility alignment and wavefront control [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5341: 168-179
- [24] Kalantar D H, Nicola P D, Shingleton N, et al. An overview of target and diagnostic alignment at the National Ignition Facility [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8505: 850509.
- [25] Boege S J, Erlan S, Clifford J, et al. NIF pointing and centering systems and target alignment using a 351-nm laser source [J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3047: 248-258.
- [26] Lawrence Livermore National Laboratory. Two world-class lasers combine to power applications [EB/OL]. <https://str.llnl.gov/2018-09/martinez>.
- [27] Lawrence Livermore National Laboratory. Mighty ATLAS supports precise alignment [EB/OL]. <https://str.llnl.gov/march-2017/larson>.
- [28] Bowers G, Brunton G, Casey A, et al. Status of the National Ignition Facility (NIF) integrated computer control and information systems [C] // 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems. Barcelona, Spain: [s. n.], 2013: 14-18.
- [29] Wilson R, Fedorov M, Hoffman J, et al. Experiences with laser survey instrument based approach to National Ignition Facility diagnostic alignments [C] // 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems. Barcelona, Spain: [s. n.], 2017: 52-58.
- [30] Randy S, Abdul A, Erlan S, et al. Automated alignment of the advanced radiographic capability (ARC) target area at the national ignition facility [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9598: 959814.
- [31] Abdul A, Erlan S, Kamm V M, et al. Detecting fiducials affected by trombone delay in ARC and the main laser alignment at the National Ignition Facility [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9598: 959812.
- [32] Chen H, Hermann M R, Kalantar D H, et al. High-energy (> 70 keV) X-ray conversion efficiency measurement on the ARC laser at the National Ignition Facility [J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(3): 033112.
- [33] Lawrence Livermore National Laboratory. National Ignition Facility's dual-purpose positioner is proving its worth [EB/OL]. <https://www.llnl.gov/news/national-ignition-facilitys-dual-purpose-positioner-proving-its-worth>.

- [34] Hooker C J, Collier J L, Chekhlov O, et al. The Astra Gemini project-A dual-beam petawatt Ti:Sapphire laser system [J]. *Journal De Physique IV (Proceedings)*, 2006, 133: 673-677.
- [35] Science and Technology Facilities Council. Gemini is a high power, ultra-short pulse laser system delivering dual beams of 15 J, 30 fs laser pulses, at a rate of one shot every 20 seconds[EB/OL]. <https://www.clf.stfc.ac.uk/Pages/The-Astra-Gemini-Facility.aspx>.
- [36] Science and Technology Facilities Council. Gemini target area 3 [EB/OL]. <https://www.clf.stfc.ac.uk/Pages/Gemini-Target-Area.aspx>.
- [37] Booth N, Ettlinger O, Neely D, et al. Target positioning and alignment on the Astra-Gemini facility [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8850: 885002.
- [38] Cavailler C, Noel A, Nicola J M D. LIL and LMJ laser facility status[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5580: 443-454.
- [39] Mangeant M, Jean-Luc D, Raphaël A, et al. Target alignment on the LIL laser facility[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6584: 65840M.
- [40] Néauport J, Ribeyre X, Daurios J, et al. Design and optical characterization of a large continuous phase plate for Laser Integration Line and laser Megajoule facilities[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(13): 2377-2382.
- [41] Luttmann M, Denis V, Gendeau P, et al. Overview of LMJ alignment to target chamber center and very first results [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 717: 012106.
- [42] Geitzholz M, Lanternier C. Review of laser megajoule target area: design and processes [J]. *Journal De Physique IV (Proceedings)*, 2006, 133: 631-636.
- [43] Vivini P, Nicolaizeau M. The LMJ: overview of recent advancements and very first experiments [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9345: 934503.
- [44] Laser MegaJoule. User guide [EB/OL]. http://www-lmj.cea.fr/docs/2017/LMJ_PETAL_Users_guide_v1.3.pdf.
- [45] Michel L, Vincent D, Lanternier C, et al. Laser Mégajoule alignment to target chamber center [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7916: 79160N.
- [46] Alain H, Eric J, Raphaël F, et al. New design of the laser megajoule final optics assembly[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6665: 66650U.
- [47] Zhu J Q. Shenguang-II high power laser facility [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2005, 20(1): 42-44, 85.
朱健强. 神光 II 高功率激光实验装置研制 [J]. *中国科学院院刊*, 2005, 20(1): 42-44, 85.
- [48] Zhu J Q, Zhu J, Li X C, et al. High power glass laser research progresses in NLHPLP [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10084: 1008405.
- [49] 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 [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(12): 1425-1428.
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.
- [50] Huang H Y, Gu Z, Fan D Y. Shenguang-target pointing system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, 25(8): 711-714.
黄宏一, 顾震, 范滇元. 神光-装置的靶瞄准系统 [J]. *中国激光*, 1998, 25(8): 711-714.
- [51] 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.
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.
- [52] 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: 58-66.
- [53] 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.
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.
- [54] Eric C, Maquet P, Thierry K, et al. Very high stability systems: LMJ target alignment system and MTG imager test setup [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9626: 962623.