

# 高功率激光驱动器靶定位瞄准单元技术研究进展

任磊 赵东峰 朱健强

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

**摘要** 靶定位瞄准单元是高功率激光驱动器的核心单元之一, 承担靶位姿调整和激光瞄准等功能。结合装置定位瞄准精度要求以及物理方案的实施, 通过光机电设计和调试可以实现靶定位瞄准单元的基本功能, 满足高功率激光驱动器开展物理实验的要求。然而随着主激光路数的不断增多, 多束激光的快速瞄准和高精度定位已成为发展靶定位瞄准单元的目标。综述了国内外高功率激光驱动器靶定位瞄准单元的研究现状, 探讨了靶定位瞄准设计的普适性方法, 并分析了靶定位瞄准单元发展过程中面临的主要问题。

**关键词** 激光器; 靶定位瞄准; 空间定位; 坐标变换; 靶场

中图分类号 TN242 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.080001

## Advances in Target and Beam Alignment Unit Technologies of High Power Laser Drivers

Ren Lei Zhao Dongfeng Zhu Jianqiang

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

**Abstract** Target and beam alignment unit is one of the core parts of high power laser drivers and plays a crucial role in the adjustment of target position and pose, the laser pointing and so on. Combined the alignment accuracy requirements of the laser driver with the physics experiment implement, basic functions of the target and beam alignment unit can be acquired to meet the requirements of physics experiments using the design and adjustment of the optical-mechanical-electronic systems. However, with the increasing number of the main lasers, slewing of multi-beams and positioning with high accuracy have become the goal of developing target and beam alignment unit. Present studies on the target and beam alignment unit of both domestic and international high power laser drivers are reviewed, a universal method for the alignment unit design is investigated and main issues in the development of the target and beam alignment unit are also analyzed.

**Key words** lasers; target and beam alignment; space positioning; coordinates transformation; target area

**OCIS codes** 140.3460; 220.1140; 220.4830; 230.0040

## 1 引言

高功率激光驱动器是实现惯性约束聚变(ICF)<sup>[1]</sup>, 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。世界上最具有代表性的高功率激光驱动器有美国的国家点火装置(NIF)<sup>[2]</sup>和法国的兆焦尔激光计划(LMJ)<sup>[3]</sup>以及我国的神光系列装置(SG)<sup>[4-6]</sup>。靶场系统作为高功率激光驱动器的重要组成系统, 它是高能激光聚焦打靶开展物理实验以及最终点火产生可控核聚变的场所, 主要包括四个部分: 真空靶室、光束导引、终端光学组件以及靶定位瞄准单元。

靶定位瞄准的目的是实现在靶室(TC)中靶位姿以及激光焦斑的精确调整。物理实验中要求多路激光轰击位于靶室中心附近的毫米量级的靶, 例如NIF开展的间接驱动ICF实验<sup>[7]</sup>, 要求192路激光的落点均方

收稿日期: 2014-01-16; 收到修改稿日期: 2014-03-21; 网络出版日期: 2014-07-04

作者简介: 任磊(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率激光驱动器靶场方面的研究。E-mail: leir89@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率激光驱动器总体设计方面的研究。

E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

根误差小于  $50\ \mu\text{m}$  来对称压缩混合氘氚气体的靶丸,从而实现可控核聚变,这就对靶的定位和激光瞄准精度提出了非常苛刻的要求。因此,靶定位瞄准单元的设计直接影响了物理实验的质量,关系到 ICF 点火实验的成败。

靶定位瞄准单元可以分为调节部分和监测部分。其中靶通过靶架(TP)实现支撑和位姿的调节,激光经终端光学组件(FOA)聚焦到靶室内部,它的光斑形态由终端光学组件进行调节。监测系统可以实时观测靶和激光光斑在靶室中的状态,监测措施有很多种,一般采用直观的图像监视,它可以为调节系统提供反馈。在多路激光瞄准情况下,靶定位瞄准单元需要解决靶的高精度定位以及多路激光的快速瞄准问题,这需要统筹靶定位瞄准单元的设计以及准直流程的优化。

本文探讨了靶定位瞄准的普适性物理过程以及工程设施过程中误差产生的来源,对比了国内外高功率激光驱动器实现这一过程的工程实施流程和降低误差的方案。在此基础上归纳总结了我国高功率激光驱动器靶定位瞄准单元的设计思路,分析了单元设计在发展过程中面临的挑战。

## 2 靶定位瞄准的物理过程

### 2.1 坐标变换关系的建立

一个新建好的靶室如图 1(a)所示,只有半径和靶室中心位置两个参量,为了更准确地描述靶室中的靶和激光光斑的实际状态,引入以靶室中心(TCC)为坐标原点的靶室参考系统(RSTC)TCC-XYZ,如图 1(b)所示。由此,可以对靶定位瞄准各项技术要求进行具体描述。

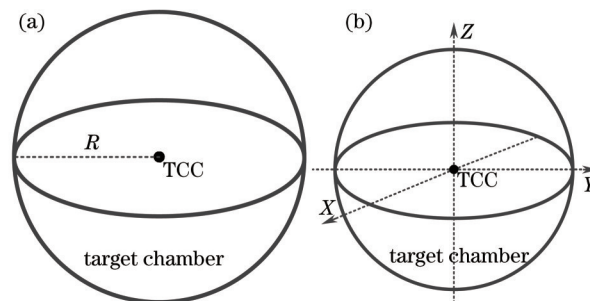


图 1 (a) 靶室; (b) 靶室参考系统

Fig.1 (a) Target chamber; (b) reference system of target chamber

例如,某次物理实验要求靶以图 2 所示的姿态进入靶室中,靶边缘处的某个特征点  $T$  恰好位于靶室中的  $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$  位置处。激光瞄准时要求所有激光束聚焦于靶侧面上一个开孔  $I_0$  处。

靶室参考系统虽然可以定量描述靶定位瞄准过程中的技术参数要求,但它只是一个虚拟的坐标系统,实际靶室中并不存在,因此,在对靶定位瞄准监测过程中需要在工程上构建一个监测参考系统(RSD)。

三维物体可以通过空间定位的方式确定它的位置和姿态,即通过三个独立的视场对物体进行成像,综合三个视场中物体的平面图像确定物体在空间的位姿。在靶室的外围安装三个长焦显微镜  $D_1, D_2, D_3$ ,分别对靶室内部成像,并通过电耦合传感器(CCD)显示,如图 3 所示。监测参考系统  $o-xyz$  与靶室参考系统

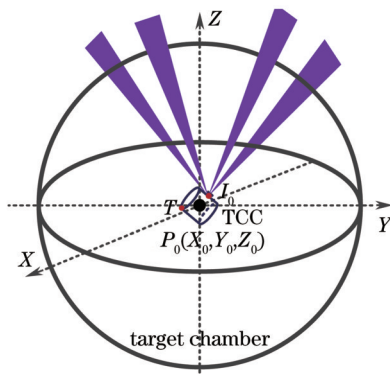


图 2 靶定位瞄准示意图

Fig.2 Schematic diagram of the target and beam alignment

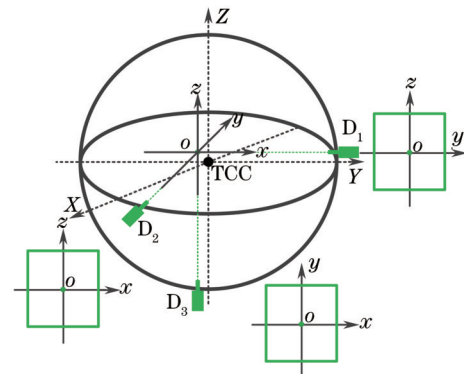


图 3 靶室监测参考系统

Fig.3 Reference system of detectors

TCC-XYZ可以通过坐标变换 $M(t, \theta)$ 实现转换。这样,靶定位瞄准在虚拟的靶室参考系统中的技术要求就可以通过变换关系 $M$ 转化为监测参考系统中的具体要求。

## 2.2 靶定位

通过坐标变换关系建立靶定位在监测参考系统中的具体参数要求,比对它在三个成像系统中的图像信息,调节靶架,直到靶位姿满足要求,整个过程如图4所示。部分物理实验中,激光瞄靶时不允许激光直接照射靶<sup>[7]</sup>,因此会引入与实际靶尺寸相同的模拟靶,先进行模拟靶的位姿调节,激光瞄靶后再更换实际靶,由于两个靶的尺寸相同,实际靶的调节直接使用模拟靶的调节参数即可。

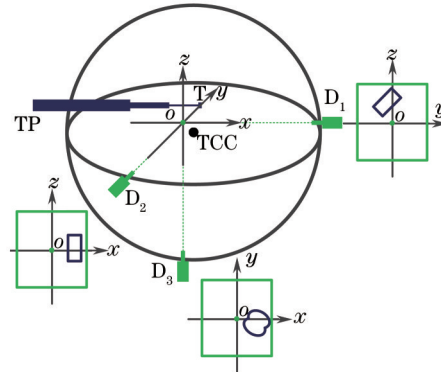


图4 靶定位示意图

Fig.4 Target positioning and posing

## 2.3 激光瞄准

激光瞄准是对激光焦点的定位,通过调整激光的指向以及聚焦,让其焦点落在激光入射点 $I_0$ 处。入射点的位置是在靶上的曲面或平面上,因而只需一个成像系统,对入射点和它所在曲面进行成像即能对激光瞄准进行监测,如图5(a)所示。考虑到靶的尺寸与位姿参数以及激光入射点在靶上的位置,可以换算出入射点在靶室中的空间坐标,通过调整架将探测器送到附近,直接探测入射到探测器表面的激光光斑,如图5(b)所示,这种直接监测的方式避免了实体靶的使用,但需要对探测器进行定位。

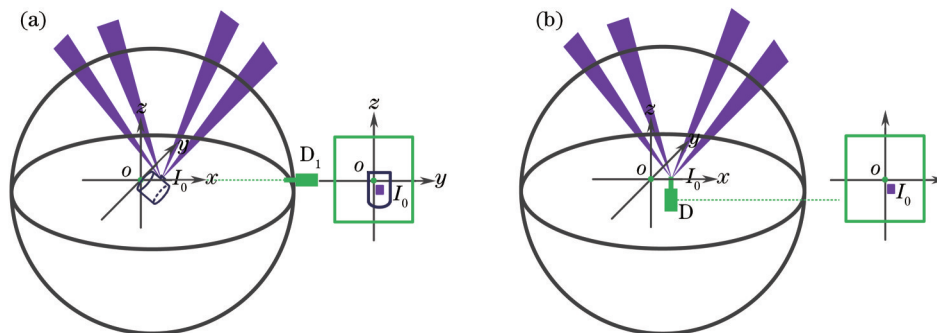


图5 激光瞄准示意图。(a)间接监测;(b)直接监测

Fig.5 Laser pointing and focusing. (a) Indirect way; (b) direct way

实际激光瞄准过程中,由于激光装置中主放大器需要冷却,无法连续产生主激光,因而需要引入模拟光代替主激光进行瞄准。模拟光系统安装时要求与主激光同光路,由于主激光存在光路漂移问题,激光打靶一段时间以后还需要重新校准模拟光系统。

## 3 国内外研究现状

### 3.1 神光II装置

神光II装置(SG-II)是八路大型激光装置,光束口径230 mm,靶室直径1.6 m,打靶过程中要求南北各四束光以 $45^\circ$ 角入射到靶上。激光的调焦精度为 $\pm 15 \mu\text{m}$ ,靶心瞄准精度为 $\pm 10 \mu\text{m}$ ,靶定位精度为 $\pm 8 \mu\text{m}$ 。

SG-II装置是南北方向入光,靶架采用竖直悬垂式,对靶进行六维调整,美国OMEAG装置的靶架也采用类似结构。激光光斑采用伺服反射镜和消色差聚焦靶镜对其位置和聚焦进行调节。监测方式上采用在

靶室的正北、正南以及垂直南北方向的下部安装三个相互正交的监测成像系统,采用非相干直接照明靶的方式提供定位瞄准过程中的照明光源,并用 CCD 记录图像信号,指导靶和激光的调节,整个单元如图 6 所示。

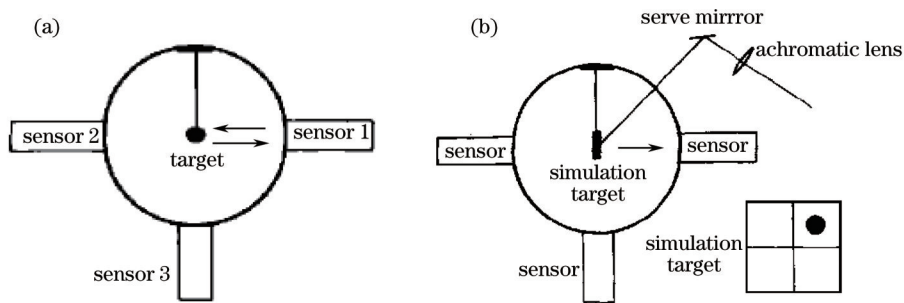


图 6 SG-II 置靶定位瞄准单元示意图。(a) 靶定位; (b) 激光瞄准

Fig.6 Target and beam alignment unit in SG-II. (a) Target position; (b) laser pointing and focus

工程实施过程中,坐标变换关系建立时要求两坐标系统的原点重合,这样在后期实际监测时更为直观。监测系统安装过程中要求三个成像系统的光轴与靶架的运动轴相交于靶室中心,这样靶室中心恰好成像于三个 CCD 视场的中心,从而保证精确的坐标变换关系。

靶定位时,首先综合三个 CCD 中靶的图像确定靶的位姿,完成模拟靶的定位。等激光瞄准结束后,撤出模拟靶,更换真实靶,只需保证靶架在进出靶室方向的重复精度即可并完成真实靶的调整,不需要再次调整。实际操作过程中图像的判断和调节都是人工进行,而且需要 2~3 人配合才能完成。

在激光瞄准上,根据物理实验的需求,分析南北方向 CCD 上的光斑图像,可以得到激光在靶面上的空间坐标,同时采用离焦定半径法确定光束焦点位置。为了排除八束激光光斑之间的相互干扰,八束光依次进入靶室进行瞄准准直。由于模拟光的使用,在实际打靶过程中,采用多次发射小能量的方式在模拟靶上确定主激光光束指向,从而调整模拟光的光源<sup>[8]</sup>。

分析上述的流程可以看到,SG-II 装置的坐标转换关系的建立精度完全依靠成像系统的安装精度,靶定位瞄准的精度受限于光学系统的分辨率,面对未来更大的靶室以及现有的对靶直接照明的方式都会大大降低分辨率。激光瞄准过程中模拟靶的使用、串行的采集方式以及人工的干预在应对更多束激光的情况下,准直的周期将更长,时间漂移也会相应增大,准直的精度会明显下降。监测系统采用三维望远镜实现对靶和激光的空间定位,这种方式对靶的形状大小没有要求,可以适应各种不同的靶型,对添加的额外打靶激光<sup>[9]</sup>也具有扩展兼容性。

### 3.2 NIF

NIF 共有 192 路激光,光束口径 400 mm,靶室直径 10 m,对于间接驱动使用的柱形腔靶,准直精度<sup>[10]</sup>要求圆柱形腔靶的中轴线必须与靶室的中垂线平行,夹角小于 4 mrad;上下 96 束光进入靶上下端面的激光入射口时,整个光斑的平均大小应在 25  $\mu\text{m}$  以内,均方根误差在 12  $\mu\text{m}$  以内;光束指向相对于瞄准点的均方根误差小于 50  $\mu\text{m}$ 。

单元设计上,靶室的直径相对较大并且采用上下注入激光方式,因此通过横向长机械臂靶架将靶送入

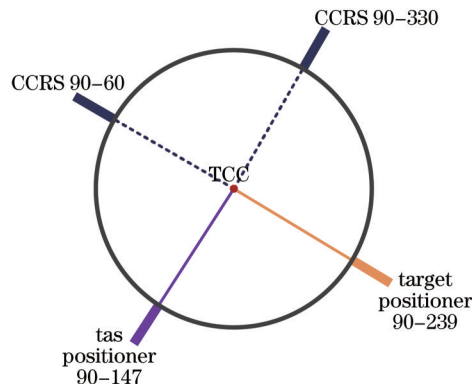


图 7 靶定位瞄准元件位置分布示意图

Fig.7 Relative positions of target and beam alignment elements in chamber



靶室;激光光斑的调节依靠终端光学组件<sup>[11]</sup>中的楔形透镜以及最后一块导光反射镜来实现。为了克服靶室直径过大导致的成像分辨率下降,NIF将成像监测系统靶准直传感器(TAS)<sup>[12]</sup>通过机械臂伸入到靶室中心附近实现对靶和激光的直接监测。通过在靶室赤道上安装一对正交的长焦显微镜系统,构建了靶室中心参考系(CCRS),实现对TAS位置的确定。靶架、TAS调整架和CCRS三者之间的位置关系如图7所示。

TAS的结构如图8所示,它由一个用于CCRS定位的棱镜和两个可以上下调节的“腮”组成。每个“腮”包含一个成像透镜、反射镜以及端部CCD和侧面CCD。四个CCD共同构成了靶定位的监视系统,实现对靶的空间定位。激光瞄准时,靶的上下面通过成像透镜分别成像于上下两个端部CCD中,而两块反射镜不仅可以避免激光入射到靶腔内部,而且构成了CCD直接监测光斑的方式,不再借助模拟靶。正是TAS这种巧妙的结构实现了靶和激光的并行调节。

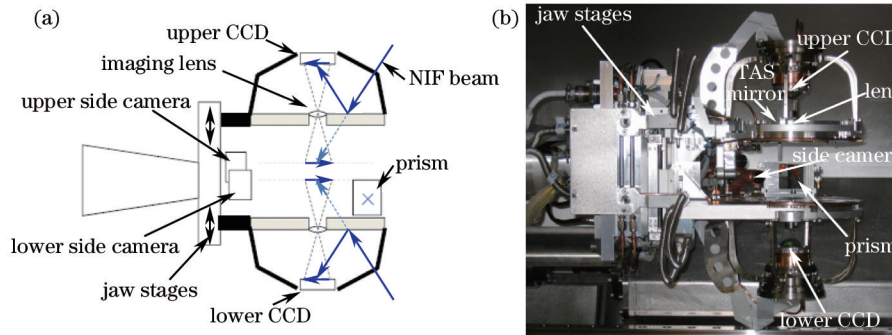


图8 TAS结构示意图。(a) 结构图; (b) 实物图

Fig.8 Target alignment sensor. (a) Sketch schematic; (b) sensor used at NIF

工程实施时,首先是CCRS长焦显微镜的校准和TAS位置的确定。在TAS调整架上安装一个准直标准具,结构如图9所示,通过激光跟踪仪和标准具上的反射角锥使得标准具中的球靶同靶室中心重合。CCRS的每个长焦显微镜都包含一个成像光路和一个自动准直光路,如图10所示,通过观察标准具上的球靶以及棱镜上的叉丝对CCRS进行校准。校准后的CCRS可以对靶室中心附近的较大物体进行定位,通过CCRS调整TAS,让其中心与靶室中心重合。这样,经两次标定建立了靶室参考系统RSTC与监测参考系统RSD之间的坐标变换关系。

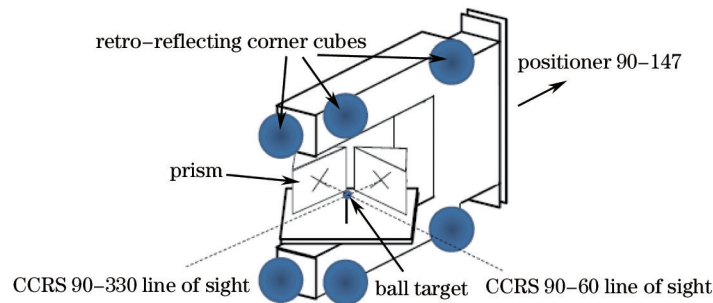


图9 准直标准具的结构示意图

Fig.9 Alignment metrology tool used for surveying target chamber center

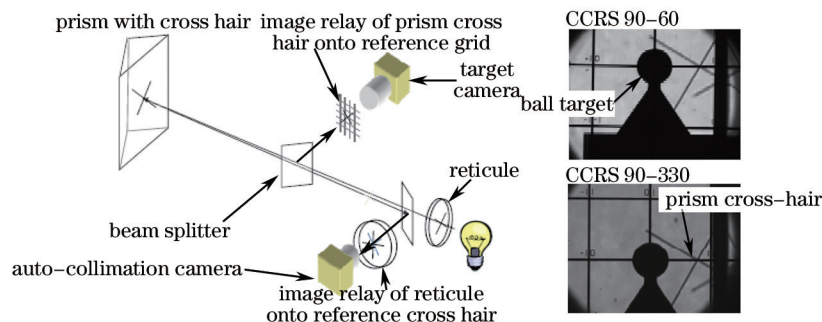


图10 CCRS校准示意图

Fig.10 Schematic of the functionality of the chamber center reference system

靶定位时,靶架将靶送入TAS中心附近,两个成像透镜对靶的上下端面成像,并分别由端部CCD监测,从而实现靶在水平方向上的调节,如图11(a)所示。竖直方向上的位置通过侧面的上下两个照相机进行监测,如图11(b)所示,综合4个CCD上的图像实现对靶位姿的精确调整。激光瞄准时,由于成像透镜周围是一个环形的平面镜,位于靶端面与其透镜所成像的对称中心处,模拟光经过反射到达上下端部CCD上,再根据光斑的位置以及大小进行相应的调节,基本原理如图11(c)所示<sup>[13]</sup>。

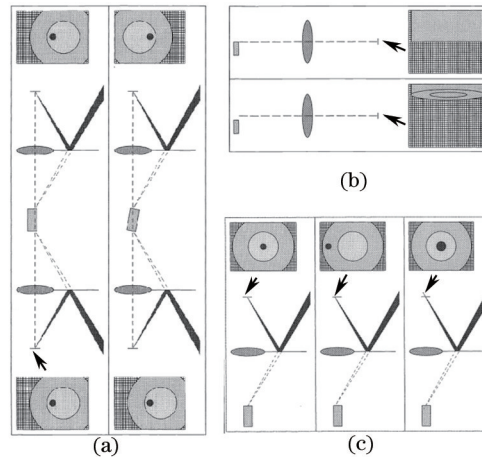


图11 利用TAS实现靶定位瞄准示意图。(a)靶水平方向调节;(b)靶竖直方向调节;(c)激光位置和聚焦调节

Fig.11 Target and beam alignment using the TAS. (a) Target alignment in horizontal direction; (b) target alignment in vertical direction and (c) laser alignment

考察NIF的靶定位瞄准单元,最大的特色就是TAS的使用,带来了三方面的优点:通过机械臂将TAS这个成像监测系统伸入到靶附近,解决了靶室太大造成的成像分辨率降低的问题;其次是完全不需要模拟靶,使得流程更加简单;最重要的是实现了靶定位与多路激光准直的并行处理,使得准直效率大大提升。当然,TAS在适应性上存在一些短板,由于这套准直方案是专门针对体型较小的柱形腔靶设计的,如果靶的体型较大,超过TAS内部尺寸或者形状不规则,需要调节更多的维度,单纯使用TAS就无法实现靶的定位。另外,如果需要结合额外的激光进行打靶,特别是水平方向附近入射的激光,无法使用TAS中的反射镜进行瞄准,此时就需要借助其他的辅助设备。

### 3.3 LMJ

LMJ共有240路激光,光束大小为 $370\text{ mm}\times 360\text{ mm}$ ,靶室直径 $10\text{ m}$ ,根据物理实验的要求,准直的精度要求<sup>[14]</sup>为每组激光(4束为一组)落点均方根误差有效期小于 $50\text{ }\mu\text{m}$ ;靶定位的均方根误差小于 $15\text{ }\mu\text{m}$ 。

单元设计上,靶架采用同NIF相同的横向长悬壁结构,由于LMJ终端采用光栅实现聚焦与色分离,必须通过位于FOA上部的聚焦和位置调节驱动器,整体移动FOA从而实现了对激光的调整,如图12所示。

LMJ的靶定位和激光瞄准是分开进行的。靶的监测同SG-II装置一样,采用空间定位的方式,靶壁上安装了三对长焦显微镜,构成用于监视靶位姿的SOPAC系统<sup>[15]</sup>。其中两对长焦显微镜分别位于靶室赤道面

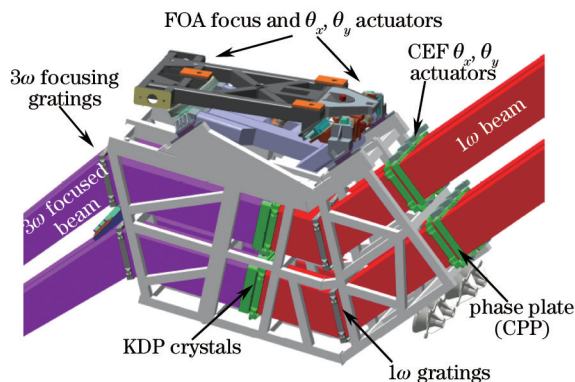


图12 FOA结构示意图

Fig.12 Schematic diagram of the LMJ final optics assembly

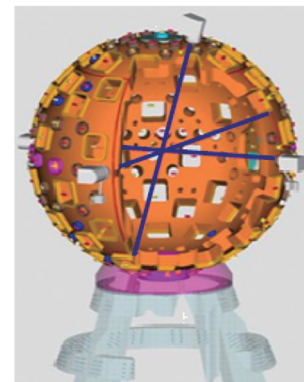


图13 SOPAC长焦显微镜分布示意图

Fig.13 SOPAC viewer position around the target chamber

上,且相互正交,另一对位于偏离极点连线 $16^\circ$ 的位置处,它们的分布如图13所示。每个长焦显微镜配备了4个反射光源,用于对靶直接照明成像,一个用于暗场成像的相对较弱的光源,从而减少低温靶准直过程中照射到靶上的光强。低温靶准直时,一对长焦显微镜配合工作,一个提供照明,一个用于成像。所有光源的工作波长均为 $532\text{ nm}$ 的绿光。长焦显微镜无论在像空间还是物空间都是远心系统,视场的景深非常大(达到 $10\text{ }\mu\text{m}$ ),并且它的点扩展函数达到衍射极限,内部自行设计了坐标系统,这些都是它设法提高成像分辨率的途径。

激光瞄准是通过通用参考系(CR)<sup>[14]</sup>实现监测的,它的结构如图14所示。末端光纤产生点光源作为模拟光,经过两个消色差透镜成像在反射镜上,反射镜的两个旋转轴相互垂直而交点恰好位于点光源的像点处,通过旋转反射镜,可以照亮靶室内部所有的位置。物体反射回来的光同样通过旋转反射镜收集,经分束器到达位于第三块消色差透镜焦平面的CCD上。

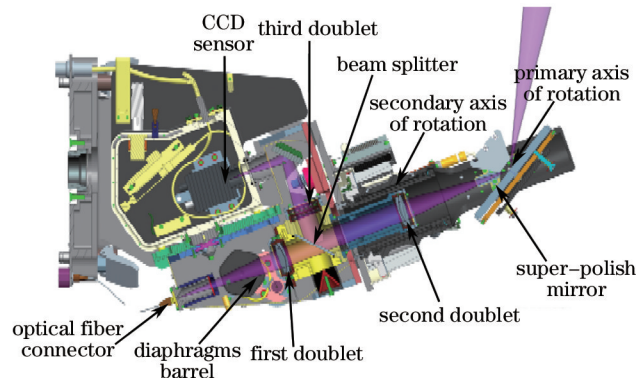


图14 CR结构示意图

Fig.14 Schematic diagram of common reference

工程实施时,首先进行SOPAC长焦显微镜的校准和CR位置的确定。每次通过靶架将参考轴(RAX)送入靶室中心,并使它的朝向与离线测量坐标系匹配。RAX是一个测量标准具,它有21个圆弧度非常高的毫米级小球构成,如图15所示,各小球之间的相对位置事先经过测量坐标系标定。SOPAC系统中的每个长焦显微镜可以观测到其中的13个小球,分别对RAX成像,从而确定每个长焦显微镜的方向以及放大率。校准后的SOPAC系统对CR中发射点进行成像,与实验要求的激光入射点坐标重合,确定为CR的位置。

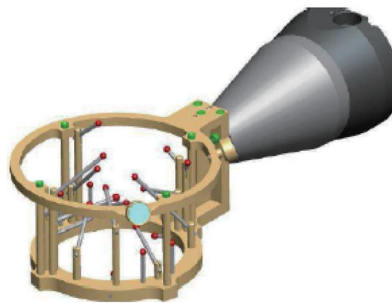


图15 RAX结构示意图

Fig.15 Schematic diagram of reference axis

激光瞄准时,定位后的CR反射点与物理实验要求的激光入射点重合,从其中发出模拟光,经反射镜旋转反射,逐次扫描每个终端,经终端反射回到CCD中得到光斑图像,通过分析光斑的位置以及大小,从而调节FOA让激光满足指向和聚焦的精度要求。LMJ同样采用直接监测的方式,没有使用模拟靶,简化了准直的流程。

靶定位时,SOPAC系统中的三个长焦显微镜先对CR中的发射点成像,作为各视场内建坐标系的原点,实现坐标变换关系的建立。然后撤出CR,将实际靶送入到靶室中进行定位。同样没有使用模拟靶,但三个长焦显微镜自带的坐标系中已经分别存储了靶的三维模型,通过计算实际靶的边缘与模型像之间的距离,从而进行靶的调节,直到两者之间距离在误差容许的范围内,靶的定位工作就完成了,靶定位的过程如图16



所示,其中黑色轮廓分别为实际靶在不同视场中的暗场像,红色代表模拟靶的3D模型像,蓝色坐标代表监测系统参考系,绿色坐标代表靶室参考系。

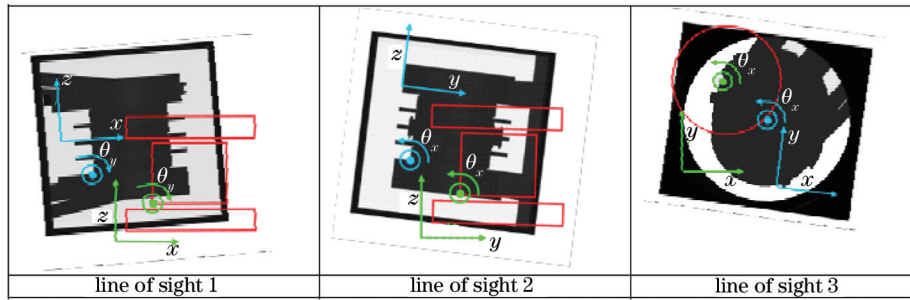


图 16 SOPAC 系统对靶监测示意图

Fig.16 Images of a target on three SOPAC viewers

分析 LMJ 的靶定位瞄准单元,有两个创新点:首先,LMJ 将靶的模型图像直接用于监测系统中,为靶定位终点的判定带来了方便,虽然成像的距离较远,但是靶模型的使用在图像处理中大大降低了识别的误差。同样 LMJ 采用了空间定位的方式,对大体积异形靶以及额外激光的增加都具有很好的适应性,这是优于 NIF 的地方。其次,CR 系统的引入,在激光瞄准中逆向使用了模拟光规避了模拟靶的使用,开创了激光瞄准新思路。但是,LMJ 的靶定位瞄准仍然是串行方式进行的,激光瞄准与靶定位依次进行,而且在激光瞄准过程中,CR 也是逐个扫描 60 个终端并依次进行采集与处理,整个流程花费长达 75 min。串行的流程以及图像采集方式是制约 LMJ 靶定位瞄准的最大障碍。

#### 4 对比与启发

根据上述对 SG-II、NIF 和 LMJ 各自组件以及流程的分析,可以归纳靶定位瞄准过程中的误差来源,如图 17 所示。建立 RSTC 和 RSD 之间的坐标变换关系时,由于监测系统安装的原因,导致实际的变换关系与设计值之间的偏差,记为  $\Delta m$ 。靶室中的靶位姿(激光焦斑)  $S_{CR}$  在监测系统中本应为  $S_{CD}$ ,由于成像系统分辨率以及图像识别的误差,将其判断为  $S_{DR}$ ,引入误差记为  $\Delta d$ 。在对比判断实际状态  $S_{DR}$  与目标状态  $S_{DT}$  过程中,由于算法等人为因素导致得到的反馈信号  $G_D$  时存在误差,记为  $\Delta g$ 。调节系统自身存在误差,记为  $\Delta a$ 。另外,如果有模拟系统的引入,模拟靶与实际靶、模拟光和主激光光路之间也存在一定误差,同时也会使准直的流程变得更加繁琐。表 1 给出了上述三个激光装置的靶定位瞄准单元具体性能对比,考察它们的优缺点,在建设我国的更多束、更高功率激光驱动器的靶定位瞄准单元,解决关键问题时可以得到一些启发:

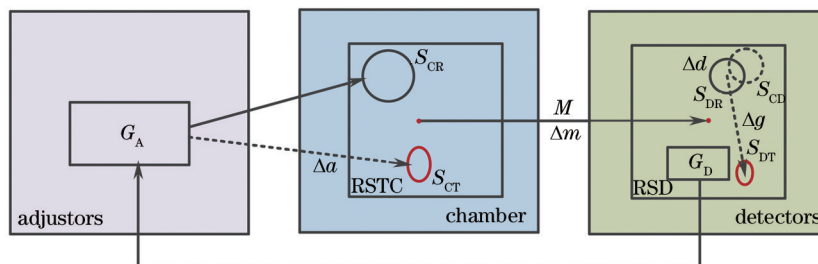


图 17 靶定位瞄准流程中误差引入示意图

Fig.17 Introduced errors in the target and beam alignment

首先,在调节系统上,随着靶室直径的不断增大,横向长悬臂靶架是可以选择的结构,但是工程应用时,必须解决它的受力以及振动问题,从而保证靶位置的稳定性,同时也要提高机械结构的重复精度,减少靶调节过程中的误差。

其次,在监测系统上,对比三个激光驱动器装置,从 CCD 布置的构型上都非常相似,只是在应对成像距离增加导致分辨率降低而采取的措施有所不同,NIF 依靠机械精度减少成像距离,LMJ 通过采用暗场照明以及内建靶模型优化图像处理算法等提高成像精度。因此,高分辨率成像系统的设计,包括其中照明方式的改进、图像处理的优化<sup>[16-18]</sup>以及借鉴远距离高分辨激光成像雷达技术<sup>[19]</sup>等都可以降低监测系统误差。另外,



监测系统不仅是单一的成像系统,非成像监测系统也是另一条可供参考的途径,例如激光测量<sup>[20]</sup>、深空探测中的无线电测量<sup>[21]</sup>等技术可以考虑应用到靶室中。若采用首先要构建一个三维参考系统,然后就是要解决信号采集和处理问题。

表1 SG-II、NIF和LMJ靶定位瞄准性能对比

Table 1 Comparison of SG-II, NIF and LMJ in target and beam alignment

	SG-II	NIF	LMJ
Surrogate light	3 sensors	TAS	CR
Beam and target coupling	yes	no	no
Adaptability	serial	parallel	serial
Automation	strong	weak	strong
Beam alignment	from FOA to TC		from TC to FOA to TC
Target alignment	lens and mirrors		FOA
Surrogate target	imaging		model
Flow design	in the same CCD		in the separate CCDs
RSTC to RSD	vertical direction		horizontal direction
Target adjustor	low		high

最后,在流程设计上,考虑到以后装置的光束准直的自动化<sup>[22]</sup>和流程的合理精简,必须采用无模拟靶的方案,这就要求建立一个TAS或者CR这种巧妙的组件。另外,结合表1中的“束靶耦合”与“流程设计”的组合方式,还有一种组合方案未被使用,即靶与激光在不同的监测系统中,采用并行的准直方式,并行不仅包括监测的并行,多束激光的瞄准也应并行处理。这个思路是在建设我国更多束、更高功率激光驱动器靶定位与瞄准组件时应该考虑的。

## 5 发展与挑战

根据当前靶定位瞄准单元的设计现状,结合现有物理实验对单元技术的实际需求,考虑到未来惯性约束聚变的开发利用,靶定位瞄准单元在发展过程中面临以下三方面的挑战:

1) 多路高能拍瓦激光的准直。随着快点火方案<sup>[23-24]</sup>的开展以及高能超短激光脉冲作为探针光在相关物理实验中<sup>[25-26]</sup>的应用,例如NIF上正在开展的ARC激光<sup>[27-28]</sup>等,根据不同的实验要求,拍瓦激光的入射方向以及数量变化非常灵活,因而多束高能拍瓦激光的准直以及它与常规纳秒激光的配合是一个方向。

2) 普通纳秒激光打靶时,对称压缩精度要求更高。间接驱动中,激光对靶进行对称压缩时,柱型腔靶中光场的时空演变非常复杂<sup>[29]</sup>,根据NIC实验结果分析<sup>[30]</sup>,使用的柱形腔靶并非提供最佳对称压缩的靶型,需要根据对称压缩进行柱形腔靶的优化设计<sup>[31]</sup>,产生新的靶型<sup>[32]</sup>,常规的监测手段无法进行定位。因而异型靶的定位以及它与多路拍瓦激光的配合是另一个亟待解决的问题。

3) 重复频率条件下,靶的快速更换与准直。劳伦斯利福摩尔国家实验室(LLNL)的LIFE(Laser Inertial Fusion Energy)计划<sup>[33]</sup>正在积极探索点火成功后可控聚变能的开发利用。在电厂中根据实际的生产需求,打靶的频率会更快。这时就需要设计快速的换靶装置以及相应的快速准直流程,快速换靶是否会影响准直精度以及中子产量和效率,这是未来必将面临的巨大挑战。

## 参考文献

- 1 E I Moses. Ignition on the National Ignition Facility: a path towards inertial fusion energy[J]. Nuclear Fusion, 2009, 49(10): 104022.
- 2 C A Haynam, R A Sacks, P J Wegner, *et al.*. The national ignition facility 2007 laser performance status[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 112(3): 032004.
- 3 N Fleurot, C 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(14): 147-154.
- 4 Gangyao Xiao, Dianyuan Fan, Shiji Wang, *et al.*. SG-II solid-state laser ICF system[C]. SPIE, 1999, 3492: 890-895.
- 5 Z Wanguo, Z Xiaomin, W Xiaofeng, *et al.*. Status of the SG-III solid-state laser facility[J]. Journal of Physics:

- Conference Series, 2008, 112(3): 032009.
- 6 Gao Yanqi, Ma Weixin, Zhu Baoqiang, *et al.*. Status of the SG-II-UP laser facility[C]. IEEE Photonics Conference (IPC), 2013. 73-74.
- 7 J D Lindl, P Amendt, R L Berger, *et al.*. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the national ignition facility[J]. Physics of Plasmas, 2004, 11(2): 339.
- 8 Huang Hongyi, Gu Zhen, Fan Dianyuan. Shengguang-target pointing system[J]. Chinese J 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.
- 9 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.
- 10 D H Kalantar, P Di Nicola, N Shingleton, *et al.*. An overview of target and diagnostic alignment at the national ignition facility[C]. SPIE, 2012, 8505: 850509.
- 11 P Wegner, J Auerbach, T Biesiada, *et al.*. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning [C]. SPIE, 2004, 5341: 180-189.
- 12 P Di Nicola, D Kalantar, Mccarville T, *et al.*. Beam and target alignment at the national ignition facility using the target alignment sensor (TAS)[C]. SPIE, 2012, 8505: 85050B.
- 13 S J Boege, E S Bliss, C J Choccol, *et al.*. NIF pointing and centering systems and target alignment using a 351-nm laser source[C]. SPIE, 1997, 3047: 248-258.
- 14 M Luttmann, V Denis, C Lanternier, *et al.*. Laser megajoule alignment to target center[C]. SPIE, 2011, 7916: 79160N.
- 15 M Geitzholz, C Lanternier. Review of laser mega joule target area: design and processes[J]. Journal de Physique IV (Proceedings), 2006, 133: 631-636.
- 16 Huang Hongyi, Qiu Yue, Fan Dianyuan. Image processing in target pointing[J]. Chinese J Lasers, 1998, 25(7): 649-652.  
黄宏一, 丘悦, 范滇元. 靶瞄准中的图像处理[J]. 中国激光, 1998, 25(7): 649-652.
- 17 Dai Yaping, Huang Guanlong, Li Xuechun, *et al.*. Precision target positioning by digital speckle correlation measurement [J]. Chinese J Lasers, 2000, 27(2): 135-139.  
戴亚平, 黄关龙, 李学春, 等. 用相关测量技术实现精确靶定位技术研究[J]. 中国激光, 2000, 27(2): 135-139.
- 18 R R Leach, A Conder, O Edwards, *et al.*. Hohlräum target alignment from X-ray detector images using starburst design patterns[C]. SPIE, 2011, 7916: 791616.
- 19 Jin Xiaofeng, Zhang Peng, Liu Chunhua, *et al.*. Techniques on long-range and high-resolution imaging lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 050002.  
金晓峰, 张鹏, 刘春华, 等. 远距离高分辨激光成像雷达技术[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 050002.
- 20 Jin Guofan, Li Jingzhen. Laser Metrology[M]. Beijing: Science Press, 1998.  
金国藩, 李景镇. 激光测量学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- 21 Tang Geshi. Radiometric Measuring Techniques for Deep Space Navigation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.  
唐歌实. 深空测控无线电测量技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- 22 Li Hong, Wang Dongfang, Zou Wei, *et al.*. Design of high power laser beam automatic alignment system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1002003.  
李红, 王东方, 邹伟, 等. 高功率激光装置光束自动准直系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002003.
- 23 R Kodama, PA Norreys, K Mima, *et al.*. Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition [J]. Nature, 2001, 412(6849): 798-802.
- 24 K A Tanaka, R Kodama, H Fujita, *et al.*. Studies of ultra-intense laser plasma interactions for fast ignition[J]. Physics of Plasmas, 2000, 7(5): 2014-2022.
- 25 Jiayong Zhong, Yutong Li, Xiaogang Wang, *et al.*. Modelling loop-top X-ray source and reconnection outflows in solar flares with intense lasers[J]. Nature Physics, 2010, 6(12): 984.
- 26 X Liu, Y T Li, Y Zhang, *et al.*. Collisionless shockwaves formed by counter streaming laser produced plasmas[J]. New Journal of Physics, 2011, 13(9): 093001.
- 27 C P J Barty, M Key, J Britten, *et al.*. An overview of LLNL high-energy short-pulse technology for advanced

- radiography of laser fusion experiments [J]. Nuclear Fusion, 2004, 44(12): S266–S275.
- 28 J K Crane, G Tietbohl, P Arnold, *et al.*. Progress on converting a NIF quad to eight, petawatt beams for advanced radiography[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2010, 244(3): 032003.
- 29 Zhaoyang Jiao, Yanli Zhang, Junyong Zhang, *et al.*. Spatio-temporal evolution of the optical field on a hohlraum wall at the rising edge of a flat-topped pulse[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2013, 1(2): 88–93.
- 30 J L Kline, D A Callahan, S H Glenzer, *et al.*. Hohlraum energetics scaling to 520 TW on the National Ignition Facility[J]. Physics of Plasmas, 2013, 20(5): 056314.
- 31 S W Haan, J D Lindl, D A Callahan, *et al.*. Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility[J]. Physics of Plasmas, 2011, 18(5): 051001.
- 32 Ke Lan, Jie Liu, Dongxian Lai, *et al.*. High flux symmetry of the spherical hohlraum with octahedral 6LEHs at hohlraum-to-capsule radius ratio of 5.14[J]. Physics of Plasmas, 2014, 21(1): 010704.
- 33 A Bayramian, S Aceves, T Anklam, *et al.*. Compact, efficient laser systems required for laser inertial fusion energy[J]. Fusion Science and Technology, 2011, 60(1): 28–48.