

神光 II 升级装置纳秒靶瞄准定位技术研究

周 洋¹ 邵 平¹ 赵东峰¹ 居玲洁¹ 任 磊¹ 章亚男² 华 能¹ 朱健强¹ 林尊琪¹

(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 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要 惯性约束聚变(ICF)研究中对实验靶的瞄准和定位具有很高的精度要求,设计了一套基于中心辅助参考系统、靶定位系统和靶准直器三个单元组合的技术方案,借助有限元法分析了系统静态变形和瞬态稳定性,提出了束靶耦合的高分辨率平行光管精密校准方法,实现了神光 II 升级装置优于 12 μm 的靶瞄准和定位精度。该方案使得装置成功实现了 $\Phi 800 \mu\text{m}$ 实验靶单路激光 97.5% 的穿孔效率,为后续相关物理实验的高精度靶瞄准和定位奠定了坚实的基础。

关键词 激光器;高功率激光;瞄准;靶定位;有限元分析;精密校准

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.1208002

Research on the System of the Nanosecond Target Aiming and Positioning of the SG-II Updated Laser Facility

Zhou Yang¹ Shao Ping¹ Zhao Dongfeng¹ Ju Lingjie¹ Ren Lei¹ Zhang Ya'nan²
Hua Neng¹ Zhu Jianqiang¹ Lin Zunqi¹

(¹ Joint Laboratory on High-Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract High accuracy of target aiming and positioning is required in the study of the inertial confinement fusion (ICF). A system based on the chamber center reference system, the target positing system and the target alignment sensor is designed. The finite element method is used for analyzing the static deformation and transient stability of this system, and it proposes a calibration method of the high resolution parallel light pipe to achieve the system coupling precision. It achieves target aiming and positioning precision better than 12 μm of the SG-II updated laser facility. Through the SG-II updated laser facility single laser beam across the $\Phi 800 \mu\text{m}$ hole target, the perforation efficiency is 97.5%. This provides a solid foundation for high accuracy targeting of the follow-up physical experiment's requirement.

Key words lasers; high power laser; aiming; target positioning; finite element analysis; precision calibration

OCIS codes 120.4570; 120.4820; 120.1680

1 引 言

惯性约束聚变(ICF)是实现可控热核聚变能源的主要途径之一,同时在国防、基础物理研究方面等有重要应用^[1]。当前 ICF 主要采用间接驱动方式,通过均匀等离子体来压缩靶丸,进而实现点火。随

着 ICF 驱动器的发展,对束靶耦合的精度要求也越来越高^[2-3],而高精度靶瞄准定位技术直接影响着打靶的成功。

国际上已有的激光核聚变装置有 NOVA、大坂“LFEX”、美国国家点火装置(NIF)、法国兆焦耳激光

收稿日期: 2014-05-14; 收到修改稿日期: 2014-06-16

基金项目: 国家重大科技专项(05010206.3)

作者简介: 周 洋(1985—),男,硕士,助理研究员,主要从事高功率激光靶定位瞄准方面的研究。

E-mail: zhouyang85@siom.ac.cn

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

装置(LMJ)等。典型的美国 NIF 装置光路共 192 路,在靶球中心采用共轭式束靶耦合系统,可实现靶高分辨率定位瞄准,且激光不会辐射到靶上,其靶瞄准定位精度达到 $8\ \mu\text{m}$,激光靶面落点精度均方根(RMS)为 $50\ \mu\text{m}$ ^[4-6]。法国 LMJ 共 240 路,采用 6 个长焦距显微望远镜,两两对称的分布在靶室外部,有利于冷冻靶的快速调整,其靶瞄准定位精度为 $15\ \mu\text{m}$ ^[7]。我国已先后建成神光系列装置,2001 年建成已稳定运行的神光 II 装置光路共 8 路^[8],采用三个长焦距反射式显微望远镜排布在靶球正北 90° 、正东偏下 45° 和正南偏东 30° 的位置,其靶瞄准定位精度为 $7\ \mu\text{m}$,实现 $20\ \mu\text{m}$ (RMS)的束靶耦合精度。

为了实现高精度的靶瞄准定位精度^[9],若采用已有反射式靶瞄准定位系统,受限于系统距离目标靶的距离较远,不能实现高精度分辨率^[10-11]。故本文提出一种纳秒靶瞄准定位技术方案,由中心辅助参考系统(CCRS)、靶定位系统(TPS)和靶准直器(ATS)组成,用有限元法分析了其静态变形和瞬态稳定性,保证支撑结构具有较高的稳定性。并提出高分辨率平行光管耦合校准的方法对靶准直器进行耦合校准,通过靶准直器伸入靶室内对靶进行瞄准和定位,实现了高精度的束靶耦合。

2 纳秒靶瞄准定位技术单元

神光 II 升级装置纳秒靶瞄准定位技术单元要实现靶姿态的调整和精确定位,同时对 8 路激光的指向进行精密控制。其正交的靶室参考系统建立一

个稳定可靠的靶室中心参考坐标系,确定靶准直器和靶定位系统的位置。靶准直器实现靶姿态的成像和激光光束的耦合。而靶的位置和姿态的调整通过靶定位系统来实现。故纳秒激光靶瞄准定位技术单元由中心参考系统、靶定位系统和靶准直器三个系统组成,分布于真空靶室赤道面周围,如图 1 所示。

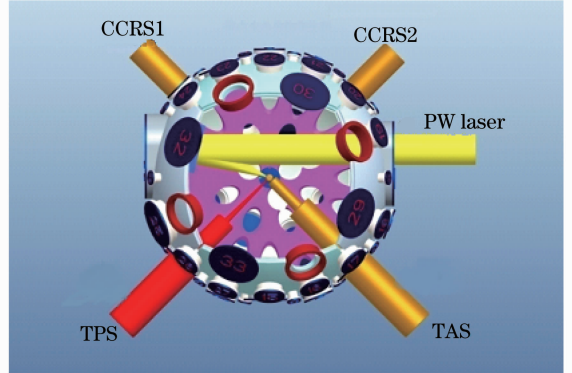


图 1 靶瞄准定位系统

Fig. 1 Target aiming and positioning system

2.1 中心辅助参考系统

靶室中心参考坐标系由两台正交的 CCRS 建立。该系统由卡塞格林望远镜和内调焦望远镜构成,如图 2(a)所示。主成像系统为卡塞格林望远镜,具有高分辨率、大视场成像的特点。自准直光源和十字标准线由内调焦望远镜系统提供,并由一套 1:1 的光学成像传递系统将两者结合起来。通过校准和测试^[12],此系统成像分辨率在 1 m 工作距离时为 $10\ \mu\text{m}$,视场范围为 4 mm,角分辨率为 $5''$ [实物图如图 2(b)所示],具有较高的分辨率。

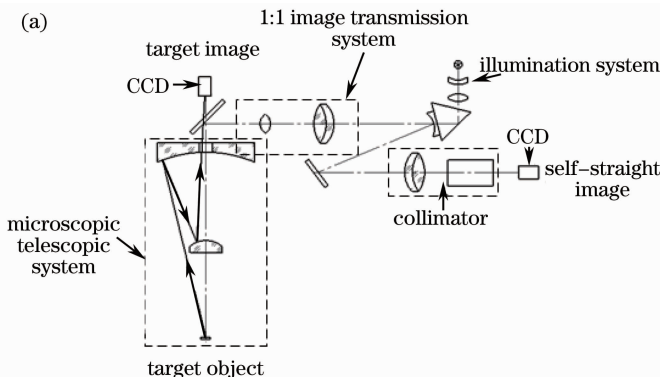


图 2 (a) 靶室中心参考系统原理图; (b) 靶室参考系统实物图

Fig. 2 (a) Schematic of chamber center reference system; (b) physical map of hamber center reference system

2.2 靶准直器

靶准直器需伸入靶室内对靶姿态进行成像,进一步提高靶的测量精度。设计靶准直器为水平支撑,具有六维调整功能,可以实现靶的精确成像和光束瞄准。其中三维角度调节范围为 $\pm 2^\circ$,分辨率为

$5''$,三维平移调节范围为 $\pm 5\ \text{mm}$,具有整体保护功能,避免受激光辐照。成像系统由三组二维正交的 CCD 组件完成,如图 3(a)所示,其中 A 与 B 同轴,C 与 A 和 B 处于同一平面,各自成像透镜光轴构成二维正交的直角坐标系,这样对于柱腔靶, A 和 B 构

成的轴实现两维平移和两维俯仰、方位角度监视, C 垂直与 A 和 B 实现一维平移和一维旋转角度监视。

同时 TAS 系统设计两块环形平面反射镜(对应在 A 和 B 的位置), 模拟光经其反射到 CCD 成像面上, 靶上下两端入射端面位置图像通过微型放大镜头成像在上下两个共轭式的 CCD 上, 实现高精度束

靶耦合[实物图如图 3(b)所示]。这种瞄准方式不经过物镜系统, 且光束引导位置与光束波长无关, 可以进行不同波长激光打靶^[13-14]。进行多束激光引导时, 可以将多束激光分散于不同打靶圆上, 实现激光的快速并行引导。

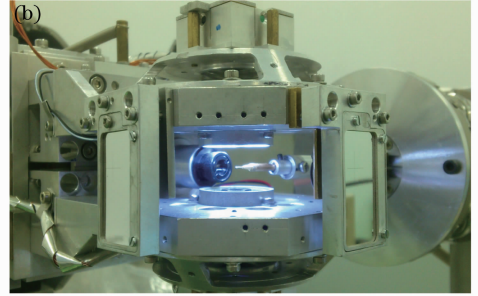
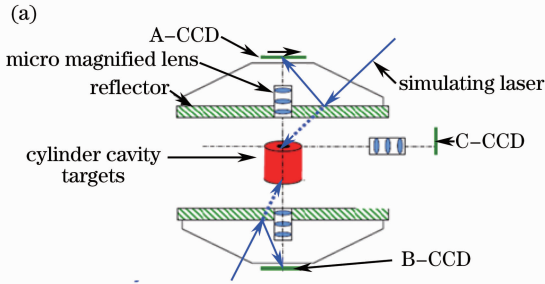


图 3 (a) 靶准直器组成; (b) 靶准直器实物图

Fig. 3 (a) Composition of target alignment sensor; (b) physical map of target alignment sensor

2.3 靶定位系统

靶定位系统为水平支撑, 串联结构, 具有六维调整功能, 可实现调整、插入、定位和稳定靶于特定位置和主激光辐照误差范围内。其位于赤道平面南偏东 45° , 从靶室中心开始占用的立体角不能超过 25° , 以便周围的空间或视场不受影响。

总体结构包括靶球内和靶球外两大部分: 靶球外由 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 三维偏摆运动的头部、中部 θ_z 旋转台、XYZ 三维平移工作台、上层 Z 方向移动台、下层 Z 方向移动台、内箱体、外箱体以及真空阀门等组成。靶球内包括滚轮架及其附带的磁性固定器组件(外部实物图如图 4 所示)。装靶时, 通过两台步进电机驱动上层 Z 方向和下层 Z 方向移动台的运动。换靶时, 将靶直接移送至球体外换靶位置, 关闭真空阀门后, 打开外箱体顶面上的门盖, 更换实验靶。重新开启真空阀门, 再由上下二层移动台的作用, 将新的实验靶球送回到靶球球心, 进行打靶。

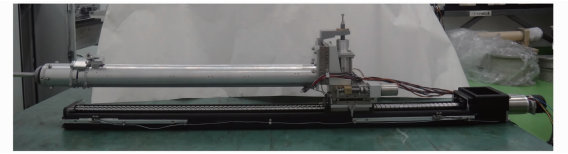


图 4 靶定位系统实物图

Fig. 4 Physical map of target positioning system

3 支撑瞄准定位系统的机械结构的形变分析

3.1 静力学分析

靶准直器和靶定位系统不受外力作用时, 通过有限元法分析机械结构静态变形量带来的误差值。靶定位系统其中间连接材料为铝合金材质(LY2), 管子尺寸为: 外径 55 mm, 内径 49 mm, 长 570 mm。靶定位系统是长悬臂结构, 在重力作用下靶定位系统末端变形如图 5(a)所示, 头部最大向下变形量为 $59.35 \mu\text{m}$ 。靶准直器其中间连接材料为铝合金材质,

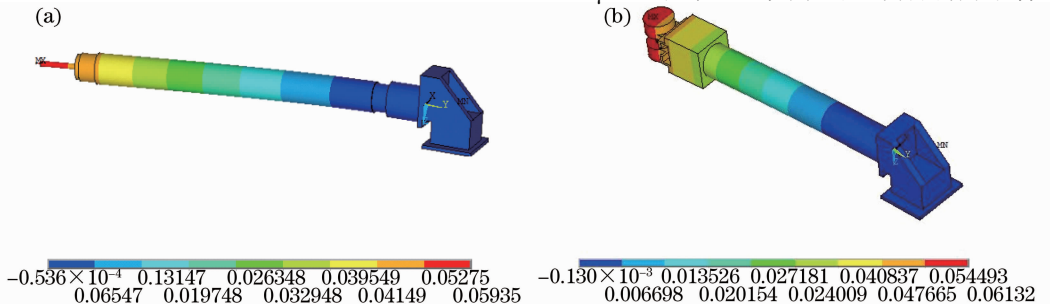


图 5 (a) 靶定位系统静态力学分析; (b) 靶准直器静态力学分析

Fig. 5 (a) Static mechanics analysis of target positioning system; (b) static mechanics analysis of target alignment sensor

管子尺寸为:外径 65 mm,内径 59 mm,长 380 mm。在重力作用下靶准直器末端变形如图 5(b)所示,靶准直器头部最大向下变形量为 61.32 μm 。靶定位系统和靶准直器组合对靶进行定位和瞄准,经静态学分析可知两者组合变形量小。

3.2 瞬态动力学分析

3.2.1 靶准直器瞬态动力学分析

对靶准直器的 A-CCD 和 B-CCD 产生相对位移处沿 Y 方向施加上升时间为 0.2 s,最大值为 22 N 的

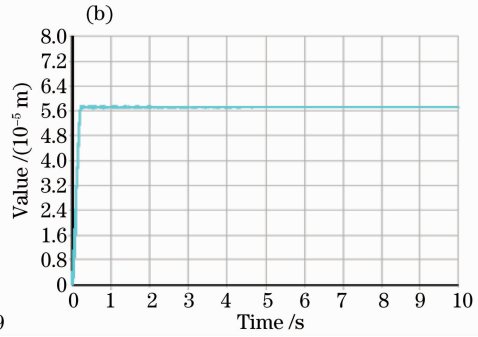
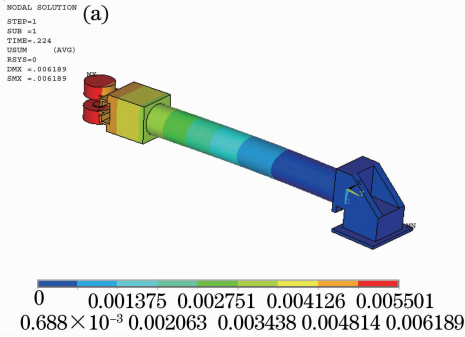


图 6 (a) 靶准直器变形图(Y 向,0.2 s,22 N); (b) A-CCD、B-CCD 变形时间曲线

Fig. 6 (a) Target alignment sensor deformation figure (exerted direction of Y, 0.2 s, 22 N);

(b) A-CCD and B-CCD deformation-time curve

3.2.2 靶定位系统瞬态动力学分析

靶定位系统具有六维调节功能,对其中 X 轴平移和 θ_z 轴旋转进行瞬态动力学分析。系统一端全约束,在 X 轴平移工作台电机作用处沿着 X 方向施加上升时间为 0.2 s,最大值为 22 N 的动载荷。靶定位系统的变形情况如图 7(a)所示,靶定位系统固定

动载荷。靶准直器变形如图 6(a)所示。由图可知,靶准直器固定机构和长悬臂支撑机构的变形量小于 34.38 μm 。靶准直器头部调节机构最大变形量为 61.89 μm 。A-CCD、B-CCD 变形时间曲线如图 6(b)所示,最大变形发生在 0.224 s,变形量为 57.698 μm ,末端 7.168 s 后变形量稳定在 57.15 μm 。由以上分析可知,靶准直器各机械机构变形量较小,A-CCD、B-CCD 头部精密调节机构在短时间内趋向稳定,实现了靶图像的高分辨率数据采集。

机构和长悬臂支撑机构的最大变形量小于 59.9 nm;靶定位系统头部调节机构最大变形量为 78.9 nm。变形时间曲线如图 7(b)所示,最大变形发生在 0.336 s,变形量为 78.87 nm,末端在 7.924 s 后变形稳定在 77.25 nm。

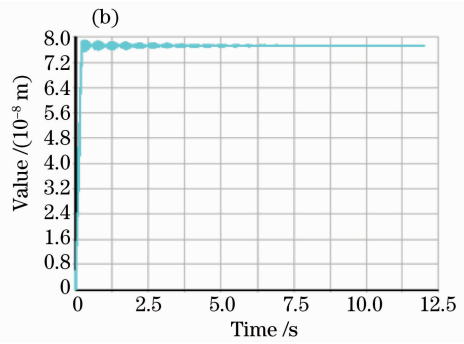
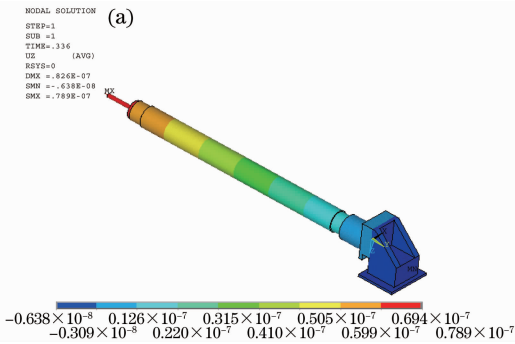


图 7 (a) 靶定位系统变形图(X 向,0.2 s,22 N); (b) X 方向作用力变形时间曲线

Fig. 7 (a) Target positioning system deformation figure (exerted direction of X, 0.2 s, 22 N);

(b) force of X direction deformation-time curve

在 θ_z 电机作用处承受上升时间为 0.2 s,绕着 Z 方向最大转矩为 195 N · mm 的动载荷时,变形量如图 8(a)所示。靶定位系统固定机构和长悬臂支撑机构的最大变形量小于 -4.62 μm ,靶定位系统头部调节机构最大变形量为 -5.2 μm 。变形时间

曲线如图 8(b)所示,末端最大变形发生在 0.224 s,变形量为 -5.192 μm ,末端在 6.412 s 后变形稳定在 -5.15 μm 。由此可知,靶定位系统在瞬态施力时,各机械机构变形量较小,头部精密调节机构在短时间内趋向稳定,实现了靶的高精度调整。

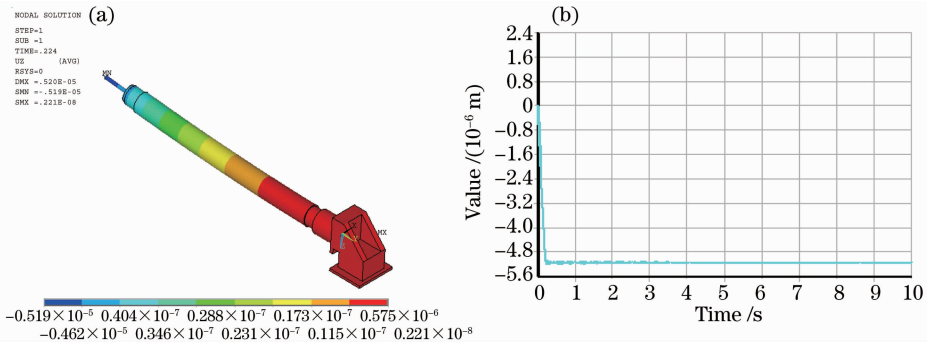


图 8 (a) 靶定位系统变形图(θ_z 向, 0.2 s, 195 N·mm); (b) θ_z 方向作用力变形时间曲线

Fig. 8 (a) Target positioning system deformation figure (exerted direction of θ_z , 0.2 s, 195 N·mm);

(b) force of θ_z direction deformation-time curve

4 精密校准方法

靶瞄准定位单元中靶定位系统的六维调整精度和靶准直器的靶图像提取的精度是影响靶瞄准定位精度的关键要素之一。

4.1 靶定位系统的精密装校

靶定位系统是一个精密六维调节机构,精调每一维精度达到要求后,联调六维调整精度,并在两侧分别安置垂直度和平面度小于 $2 \mu\text{m}$ 的标准十字玻璃板,建立自校准系统。通过 CCRS 系统实现靶球中心与靶定位系统中心重合。

1) 建立靶室中心参考坐标系

以靶球两侧法兰口为参考基准,在靶球赤道面对应角度的两侧分别安置十字叉丝,通过粗调 CCRS 系统三维平移机构,使其视场可见两侧十字叉丝。通过精调三维旋转使 CCRS 系统自带的自准直光中的十字线与两侧十字叉丝重合,完成一台 CCRS 系统的准直。利用两台角度成 90° 的 CCRS 系统建立靶室中心空间参考坐标系,完成大视场的坐标系建立。

2) 精密校准靶定位系统中心与靶室中心重合

精调靶定位系统六维结构,使每一维 CCRS 系统的自准直光与相对应的靶定位系统的十字分划板的自准直像和瞄准像重合,完成靶定位系统的精密耦合。

4.2 靶准直器的精密装校

为保证靶准直器机械精度、光学同轴和物像共轭的要求,以及靶准直器在靶室中自身位置调整的需要,提出一套基于平行光管的精密装校方案。

每组 CCD 组件的成像面要求精度小于 $2 \mu\text{m}$,其中 CCD 组件的物像共轭距为 40 mm,成像倍率为 2 倍,设计工作波长为 632.8 nm,视场为 $2.75 \text{ mm} \times$

2 mm,成像透镜景深为 $3 \mu\text{m}$ 。三组两维正交的 CCD 组件中:A 与 B 沿轴向相对运动;C 轴垂直于 A 和 B 轴,可沿自身轴向运动,但垂直于自身轴向固定不动,即该方向与 A 构成整体。为避免模拟光在瞄靶过程中对实验靶直接辐照,TAS 应提供两块小反射镜,使模拟光经其反射后直接照射在 CCD 成像面上。其中小反射镜尺寸需保证模拟光经其反射后直接照射在 CCD 成像面上,其法线与 A 和 B 轴平行误差不大于 $75 \mu\text{rad}$ 。头部外侧安装两块带十字叉线的反射镜与 A 轴、B 轴、C 轴垂直,中心通过 A 轴、B 轴和 C 轴,垂直度为 $10 \mu\text{rad}$ 。

1) A-CCD、B-CCD 与 C-CCD 垂直度调整

将 A-CCD 基座、B-CCD 基座与 C-CCD 基座安装在工作台上,其中 A-CCD 基座与 B-CCD 基座利用 A 芯棒校正 A-CCD 与 B-CCD 的同轴度,安装在 C-CCD 基座中的 B 芯棒插入 A 芯棒,达到校正 C-CCD 的轴线与 A-CCD 与 B-CCD 轴线的垂直度并共面,并移动导轨,使导轨移动方向与芯棒轴线平行(如图 9 所示)。

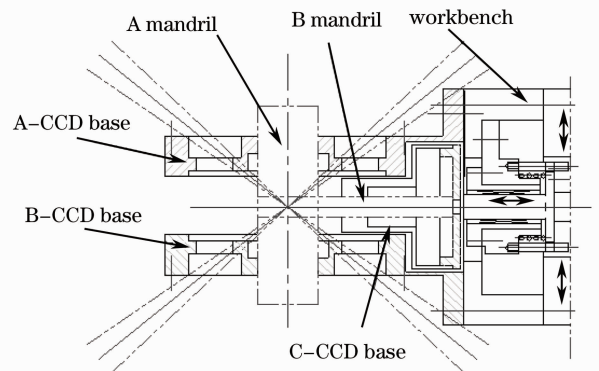


图 9 靶准直器 CCD 垂直度调整

Fig. 9 Target alignment sensor CCD vertical adjustment

2) A-CCD、B-CCD 与 C-CCD 光学同轴调整

通过两台精度为 2" 的内调焦平行光管和精度为 2" 的标准立方体建立光学同轴调整系统。以 A-CCD、B-CCD 基座孔为基准, 调准平行光管 1, 装 A-CCD 显微物镜, 并调准 A-CCD 显微物镜与导轨运动轴线平行(如图 10 所示)。再加上标准立方体, 建立平行光管 2 基准, 保证平行光管 1 和平行光管 2 的光轴在同一平面内, 并相互垂直, 用平行光管 2 检测调整 C-CCD 显微物镜, 再用平行光管 1 检测调整 B-CCD 显微物镜, 利用定位销对 CCD 基座进行定位, 以便再一次安装。

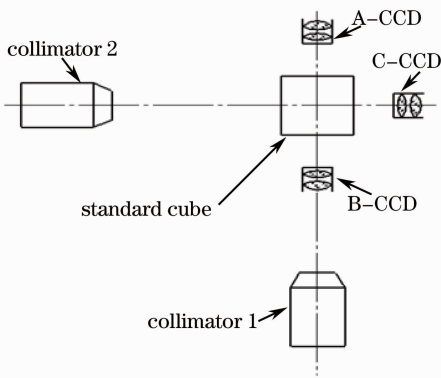


图 10 靶准直器 CCD 光学同轴调整

Fig. 10 Target alignment sensor CCD optical coaxial adjustment

CCD 基座安装在工作台上总体检测校准精度是否符合要求。CCRS1 和 CCRS2 系统内自带的内调焦平行光管产生准直光经标准十字线反射镜 1、2 反射后, 返回自准直十字像。对 TAS 进行六维调整, 使反射镜 1、2 的自准像和瞄准像相交于基准点, 此时 TAS 基准传递到两个 CCRS 系统上, 完成 TAS 基准的校准(如图 11 所示)。为了检验靶准直器的耦合精度, 在线通过靶定位系统和模拟光进行束靶耦合调整。靶定位系统将腔靶放置靶准直器中心, 模拟光引入到环形反射镜上, 通过三台 CCD 观测模拟光在靶面上的位置精度, 精调靶准直器和靶定位系统结构, 从而实现高精度束靶耦合。

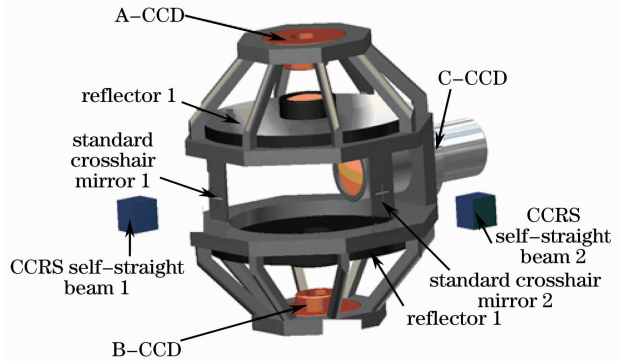


图 11 靶准直器校准示意图

Fig. 11 Schematic of target alignment sensor calibration

3) A-CCD、B-CCD 共轭物像点的调整

① 装入模拟光反射镜, 用千分表测得环形反射镜与显微物镜后表面的距离, 并进行修正, 然后用 2" 内调焦平行光管调整反射镜面与显微物镜光轴垂直, 调整后锁紧。

② 安装 CCD, 用平行光管检测, 同时物方放置分划板, 通过 CCD 的前后调整找到像面。

③ 用模拟光 50° 入射的方式来验证调试结果。

注: 以上三个步骤需重复调整。

完成以上步骤后, 同理对 C-CCD 进行调整, 在反射镜下方安装 LED 照明光源, 将 A-CCD 基座、B-

5 实 验

为验证单路光束的指向精度和靶瞄准定位精度, 利用神光 II 升级装置开展单路三倍频激光穿孔实验, 对比穿孔前与穿孔后激光能量的变化, 并计算出穿孔效率。神光 II 升级装置第 4 路全路通光, 激光穿过实验靶为 $\Phi 800 \mu\text{m}$ 的铜制孔靶, 结果如表 1 所示。结果表明激光光束在穿过 $\Phi 800 \mu\text{m}$ 孔靶时, 穿孔效率为 97.5%, 除去杂散光的损耗, 主激光全部穿过孔靶, 证明激光弹着点高精度的落在靶上, 此单元的靶瞄准定位精度优于 12 μm 。

表 1 神光 II 升级装置单路穿孔结果

Table 1 Single perforation results of the SG-II updated laser facility

	1 ω energy before perforation /J	3 ω energy after perforation /J	Reading of the BSG
Perforation experiment ($\Phi 800 \mu\text{m}$)	4488.5	2095	202
Calibration before perforation ($\Phi 2 \text{mm}$)	4531	2243.4	211
Perforating ratio	$2095 \times 211 / 2243.4 / 202 \times 100\% = 97.5\%$		

6 结 论

1) 提出一套基于神光 II 升级装置的高精度纳秒靶瞄准定位单元。利用有限元对单元核心器件靶

定位系统和靶准直器长悬臂结构进行静力学和瞬态动力学分析, 计算结果表明: 机械结构在静态情况下变形量小于 61.32 μm , 在瞬时响应情况下稳定时间

小于 7.924 s,长悬臂结构变形量小,稳定时间短。

2) 提出一种基于平行光管的高精度精密装校方法,实现了高精度的束靶耦合。实现神光 II 升级装置单路激光穿过 $\Phi 800 \mu\text{m}$ 实验靶,其穿孔效率为 97.5%,实验证明了该装校方法的靶定位和瞄准精度优于 $12 \mu\text{m}$ 。

3) 神光 II 升级装置还包括单路皮秒激光系统,因物理实验对激光条件和靶型的要求与纳秒激光系统不同,所以此单元只适用于纳秒激光系统。针对皮秒激光的高精度靶瞄准定位技术,后续将对其做进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Lin Zunqi. Progress of laser fusion[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2202—2207.
林尊琪. 激光核聚变的发展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2202—2207.
- 2 Liu Bingguo, Liu Guodong, Pu Zhaobang, *et al.*. Measurement and precision analysis on alignment of laser and target in ICF[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 542—548.
刘炳国, 刘国栋, 浦昭邦, 等. 惯性约束聚变束靶耦合的监测及精度分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 542—548.
- 3 E T Alger, J Kroll, E G Dzonitios, *et al.*. Target assembly metrology methodology and results [J]. Fusion Science and Technology, 2011, 59(1): 78—86.
- 4 S C Burkhart, Bliss E, Di Nicola P, *et al.*. National ignition facility system alignment [J]. Applied Optics, 2011, 50(8): 1136—1157.
- 5 Wegner P, Auerbach J, Biesiada T, *et al.*. NIF final optics system frequency conversion and beam conditioning [C]. SPIE, 2004, 5341: 180—189.
- 6 Pittenger L. National Ignition Facility Subsystem Design Requirements Target Positioning Subsystemal [R]. Washington, DC: USDOE, 1996.
- 7 Michel Luttmann, Denis V, Lanternier C, *et al.*. Laser Mégajoule alignment to target center [C]. SPIE, 2011, 7916: 79160N.
- 8 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.
- 9 Zhao Dongfeng, Dai Yaping, Yi Xianhua, *et al.*. Error analysis for the optical system of target area on high power laser facility [J]. Chinese J 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.
- 10 Zhang Shaodi, Sun Honghai. High precision method of long-ranged laser spot positing measurement [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0708003.
孙少迪, 孙宏海. 远距离激光光斑位置高精度测量方法 [J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0708003.
- 11 Duan Yaxuan, Chen Yongquan, Zhao Jianke, *et al.*. Focal length testing method of long focal length laser optcal system [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0408005.
段亚轩, 陈永权, 赵建科, 等. 长焦距激光光学系统焦距测试方法 [J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0408005.
- 12 Han Juan, Duan Jiayou, Chen Jianjun, *et al.*. An alignment of primary and secondary mirrors for optical system in large telescopic [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0716001.
韩娟, 段嘉友, 陈建军, 等. 大口径望远系统中主次镜系统的装调方法 [J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0716001.
- 13 Liu Guodong, Cai Dan, Pu Zhaobang, *et al.*. Laser conjugation directing sensor based on differential focusing [J]. Optical Technique, 2005, 31(5): 746—748.
刘国栋, 蔡丹, 浦昭邦, 等. 一种基于差动调焦的激光共轭引导传感器 [J]. 光学技术, 2005, 31(5): 746—748.
- 14 Wang Liquan, Li Tianen, Feng Bin, *et al.*. Optical and mechanical design of beam-target coupling sensor [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(7): 1709—1714.
王礼权, 李天恩, 冯斌, 等. 束靶耦合传感器光学及机械设计 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(7): 1709—1714.

栏目编辑:史敏