

文章编号 1004-924X(2009)03-0542-07

惯性约束聚变束靶耦合的监测及精度分析

刘炳国, 刘国栋, 浦昭邦, 庄志涛, 陈凤东

(哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了提高惯性约束聚变实验中高功率激光驱动装置束靶耦合的精度, 介绍了几种束靶耦合监测方法, 包括靶室外直接监测, 靶室内直接监测, 靶室内基于共轭原理的传感器监测等。分析了各种方法的优缺点, 并重点对基于光学共轭原理的传感器的耦合精度进行了研究, 分析了图像测量误差, CCD 保护玻璃引入的误差, 调焦导轨运动时引入的误差及传感器标定装校时引入的误差。实验测试及精度分析表明, 共轭式传感器引入的束靶耦合误差为 $\pm 10 \mu\text{m}$ 。采用这种基于光学共轭原理的传感器, 可以实现大型激光驱动装置的快速、高精度束靶耦合。

关键词: 惯性约束聚变; 束靶耦合; 误差分析; 传感器

中图分类号: TL632 文献标识码: A

Measurement and precision analysis on alignment of laser and target in ICF

LIU Bing-guo, LIU Guo-dong, PU Zhao-bang, ZHUANG Zhi-Tao, CHEN Feng-Dong

(Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To improve the alignment precision of laser beam and target for high power laser driving device in Inertia Confinement Fusion(ICF), several kinds of laser beam aligning methods, such as inside chamber direct alignment method, outside chamber direct alignment method, and indirect alignment method with Laser and Target Alignment Sensor(LTAS) based on optical conjugate principle, were induced and their advantages and disadvantages were analyzed. Then, the precision of the last method including the image measuring error, the errors introduced by protective glass of CCD, the movement errors of guides and the calibration error of Laser and Target Alignment Sensor(LTAS) was discussed. The experiments and precision analysis indicated that the laser beam aligning precision induced by LTAS is $\pm 10 \mu\text{m}$, which shows proposed LTAS can rapidly and exactly align the laser and target of large-scale laser driving device.

Key words: Inertia Confinement Fusion(ICF); laser and target alignment; error analysis; sensor

收稿日期: 2008-06-04; 修订日期: 2008-07-23.

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(No. 200604008020); 黑龙江省攻关基金资助项目(No. 2006G0780-00)

1 引言

在惯性约束聚变(ICF)实验中,实现高精度的束靶耦合一直是高功率激光驱动装置中的一项关键技术。间接驱动方式中,入射激光并不是直接打到靶丸上,而是打到靶的内腔壁上,从而产生均匀的等离子来压缩靶丸,进而实现点火。随着ICF驱动装置的发展,对束靶耦合的精度要求也越来越高。美国是激光聚变研究技术最先进国家,先后建成了NOVA,OMEGA等大型激光装置。

1997年,美国又开始建设国家点火装置(简称NIF),该装置被称世界上最大的光学工程,为了达到点火的要求,NIF系统的光路总数为192路,共需要7500件大型精密光学元件,将1.8 MJ的能量聚焦到直径几毫米的靶上,峰值功率高达600 TW,能量的80%必须被控制在靶面直径约为250 μm 的范围内,单束光的瞄准精度优于50 μm ^[1]。据报道,2004年6月份,NIF用17束激光打靶,试验结果证明其束靶耦合精度 $<30 \mu\text{m}$ 。这一精度超出了设计精度。

我国先后建成的大型激光驱动装置有星光I,神光I,星光II,神光II等,现在正在建设神光III装置,如何实现多光束快速、高精度的引导,是当前急需解决的问题。本文主要介绍了几种监测方法。并重点分析了采用基于光学共轭原理的传感器来进行束靶耦合的可行性。

2 ICF束靶耦合的监测方法研究

2.1 在靶室外直接观测

这种方法在靶室外通过光学监测系统直接观察光斑和靶,并引导激光到靶点。

采用这种监测方式的装置,如我国星光II,它采用位于靶室正上方的卡塞格林反射式望远镜对靶室中心的目标进行监测。

神光II装置采用架设在靶室外部的3台光学监测仪器来分别监测靶的位置及模拟光斑的位置,实现束靶耦合。后期为适应三倍频激光打靶,又改进了光学系统,采用反射式光学系统,以便适应不同的波长打靶。这种耦合方法的主要优点是观测结果比较直接,消除了色差的影响^[2]。

但这种束靶耦合方式存在一些问题。主要如下:

(1)在靶室外部监测,监测仪器的工作距离势必大于靶室的半径,对于直径较大的靶室,要想提高监测仪器的分辨率势必需要增大光学元件的口径,使监测成本大大提高。

(2)对于多光束引导,引导效率较低。如美国的NIF装置,其入射激光达到192束,采用直接观测法无法实现光束的并行快速引导。

(3)对于黑腔靶,无法观测到光斑入射到腔内壁的位置和光斑形状,所以无法实现将多束激光光斑引导到靶的不同截面上。

2.2 直接观测式内置传感器

这种方法将监测仪器放置到靶室内部,即放到靶丸附近,直接观测束靶耦合情况。

为了提高光学系统分辨率和减小监测仪器尺寸,可以考虑将监测系统放置到靶室内部,在靶附近的位置进行靶定位及光束的引导,通过成像系统同时观测光斑和靶。图1是一种直接观测式传感器结构图。通过上、中、下3路图像监测系统,直接观测光斑和靶图像,进而实现靶定位和光束引导。耦合精度直接取决于图像测量系统的测量精度,减少了中间标定环节,耦合精度较高。

光学系统采用反射式光学设计,可以避免照明光源和入射激光波长不同带来的误差。这种监测方式大大减小了监测的工作距离,可以在保证较高光学分辨率的条件下,有效地减小光学系统通光孔径。但这种方法仍然无法实现多光束并行引导及在黑腔靶腔内光斑监测^[3]。

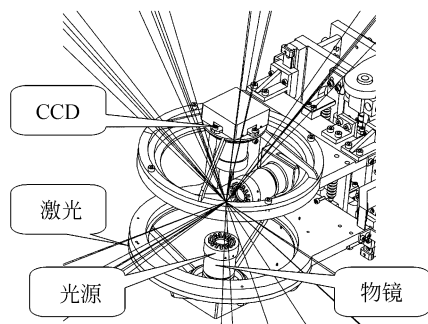


图1 直接观测型传感器结构示意图

Fig.1 Structure of direct observation sensor

2.3 基于光学共轭原理的传感器

为了实现多光束的快速引导及监测腔靶内不

同截面光斑形状监测,美国 NIF 装置采用一种基于光学共轭原理的传感器,可以观测黑腔靶内光斑的形状,而且可以并行、快速地实现多光束的引导。

根据这一原理,本文设计了一种基于光学共轭原理的传感器,该传感器已成功地运用于神光 III 原型装置。

传感器主要由上、中、下 3 路视觉系统组成,其工作原理如图 2 所示,每路系统由物镜和 CCD 相机组成。CCD 采集的图像送入计算机进行图像处理。入射激光照在反射镜上,反射到 CCD 的像面上,若满足共轭关系(即图 2 所示各段距离 d 相等),那么光点和靶可以同时成像在上、下 CCD 相机上,通过靶点和光点在 CCD 的成像位置,可以计算出束靶耦合关系。

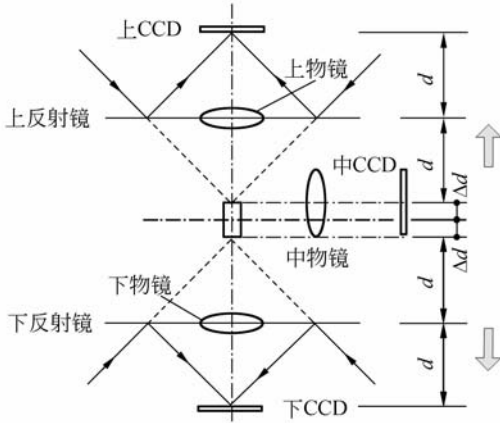


图 2 基于光学共轭原理的传感器原理

Fig. 2 LTAS based on optical conjugation principle

这种传感器直接置于靶室内,靶通过光学系统直接成像在 CCD 上。而入射激光通过反射镜反射直接成像在 CCD 像面,不经过物镜系统,这样光束引导位置与光束波长无关,可以适应不同波长激光打靶。多束激光引导时,可以将多束激光分散于不同打靶圆上^[4]。

该传感器的优点是可以实现激光的快速并行引导,还可以直接监测光斑在黑腔内的形状。而且引导时,入射激光不直接照射到靶上,减少模拟光对实验靶的影响。该传感器主要缺点是标定、装校比较复杂,标定精度直接影响束靶耦合精度。

比较以上 3 种束靶耦合方法,只有基于共轭原理的传感器可满足现代的大型激光驱动装置快速高效的多光束快速引导要求。为了探讨其耦

合精度指标是否满足要求,以下主要对其耦合精度做出分析。

3 束靶耦合精度分析

对于传感器来说,最为重要的是把激光光斑引导到指定的靶点上,即实现高精度束靶耦合。美国国家点火装置耦合设计精度优于 $50 \mu\text{m}$,从目前的公布的实验结果来看,束靶耦合最大误差为 $26 \mu\text{m}$ 左右,而且这一误差包含了主激光与模拟光同轴误差,激光光路镜架和靶支撑架的稳定性误差等,因而传感器引入的误差应优于 $\pm 10 \mu\text{m}$ 。

本文以基于光学共轭原理的传感器为例,分析传感器各环节可能引入的误差,对传感器的综合耦合精度分析如下:

3.1 图像处理系统引入的误差

光学系统设计要求消像差,平场复消色差,并采用物方远心光路。放大倍数为 1 倍,光学设计结果如图 3,图 4 所示,光学分辨率弥散圆(80% 能量的集中度范围)为 $1.7 \mu\text{m}$ 左右。传递函数已经达到衍射限。

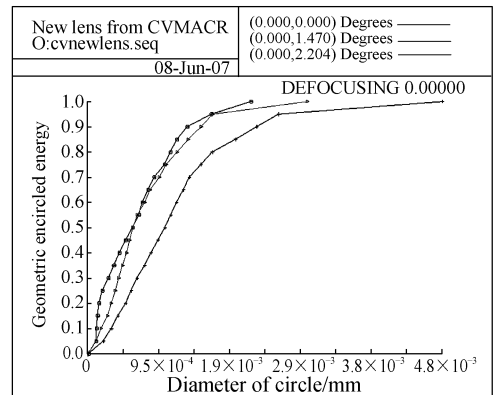


图 3 传感器光学成像系统分辨能力曲线

Fig. 3 Optical geometric encircled energy curve of LTAS

CCD 像元大小为 $8.3 \mu\text{m}$,通过基于空间矩的图像细分算法,图像分辨率可以优于 $2 \mu\text{m}$ ^[5]。通过试验,得出传感器对柱型靶及激光模拟光斑重复定位精度,见表 1 和表 2。

对柱腔靶模拟光斑定位重复性精度:

$$\Delta_z = \pm \sqrt{0.094^2 + 0.148^2} \times 8.3 = \pm 1.5 \mu\text{m} \quad (1)$$

对模拟光斑定位重复性精度:

$$\Delta_g = \pm\sqrt{0.058^2 + 0.124^2} \times 8.3 = \pm 1.1 \mu\text{m} \quad (2)$$

靶的定位精度受靶型及照明条件及靶的加工精度影响,不同条件下测的数据可能略有不同,总体上靶定位精度优于 $2 \mu\text{m}$ 。

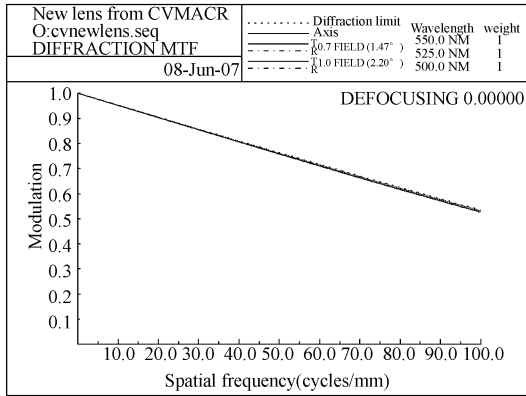


图 4 传感器光学成像系统传递函数曲线

Fig. 4 Optical MTF curve of LTAS

表 1 对柱腔靶定位的重复性试验

Tab. 1 Repeatability accuracy of microscope positioning for cylinder hohlraum target

圆心坐标	x/pixel	y/pixel
1	394.07	245.21
2	393.95	245.06
3	393.96	245.10
4	393.95	245.01
5	393.97	245.15
6	394.05	245.21
7	394.02	245.19
8	394.01	245.09
标准差(2 σ)	0.094	0.148

表 2 对模拟激光光斑定位的重复性试验

Tab. 2 Repeatability positioning accuracy for lasers

光斑质心坐标	x/pixel	y/pixel
1	392.26	276.24
2	392.31	276.2
3	392.28	276.15
4	392.32	276.14
5	392.34	276.08
6	392.31	276.09
7	392.28	276.23
8	392.26	276.11
标准差(2 σ)	0.058	0.124

而引导激光定位受模拟光源稳定性及光点形状畸变影响。在模拟光源稳定性较好,且光点形状规矩的情况下,光点图像处理的定位误差可达到 $2 \mu\text{m}$ 左右。

综上,传感器图像测量系统所引入的误差

$$\Delta_1 = \pm\sqrt{2^2 + 2^2} = \pm 2.8 \mu\text{m} \quad (3)$$

3.2 CCD 保护玻璃引入的误差

根据传感器工作原理,入射激光直接照射到 CCD 像面上。

为了保护 CCD 像面,现有的 CCD 相机在 CCD 像面上都有一层保护玻璃。保护玻璃使光斑的入射位置发生了平移,从而引入误差。

选用的 CCD 芯片为 SONY 公司的 ICX415 芯片,其保护玻璃厚度为 0.75 mm ,材料折射率为 1.5 ,标定用的激光入射角度为 45° 。

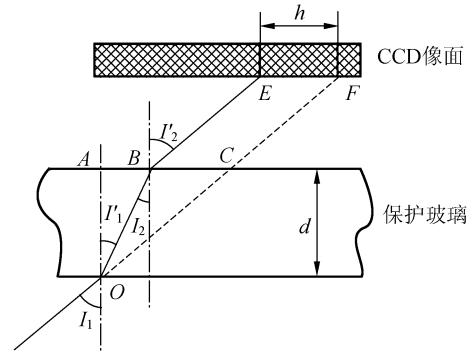


图 5 激光光斑位置偏移示意图

Fig. 5 Sketch of laser spot deflection

保护玻璃的存在,使得光斑位置从预想位置 F 点偏移到实际位置 E 点,这样引导光斑会产生误差,误差大小为 h ,由图 5 可知:

$$h = EF = BC = AC - AB \quad (4)$$

从而得到:

$$h = d(\tan I_1 - \tan I_1') = d(\tan I_1 - \frac{\sin I_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 I_1}}) \quad (5)$$

将已知条件代入得:

$$h = 0.349 \text{ mm} \quad (6)$$

可见由于保护玻璃平移引入的误差已达到几百微米,必须采取补偿措施。补偿的方法如下:预想的光斑位置为 F 点,其在 CCD 上的坐标位置为 (x_1', y_1') ,而实际引导的位置却为 E 点,在 CCD 上的坐标位置为 (x_1, y_1) ,参见图 6。补偿时,须知道入射激光在 CCD 像面坐标系内的方位

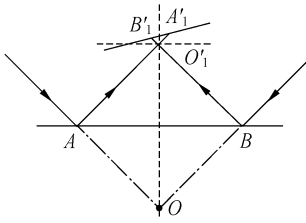


图8 反射镜与 CCD 像面不平行引入的误差
Fig. 8 Error produced by reflection and CCD

唯一确定,必须标定出光轴在 CCD 像面的位置,使光点和靶相对光轴对称分布,如图 9 所示,而光轴位置的标定误差直接影响耦合精度。

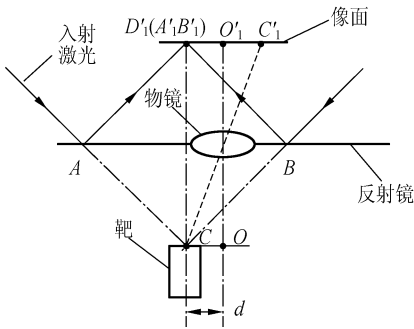


图9 光斑像位置、光轴位置及靶像位置对称关系
Fig. 9 Relationship between spot, optic axis and target image

(3) 其他误差主要指由于物镜光轴与反射镜不垂直产生的反射镜平面度误差,靶的平面度误

差及上下光轴不重合等引入的误差。根据试验结果,传感器的装校和标定误差经过修正和补偿后,最终总的标定误差:

$$\Delta_1 \approx 6 \mu\text{m}$$

3.5 传感器引入的束靶耦合总误差

将以上分析结果带入公式(15)可得:

$$\Delta_{L,TAS} = \pm\sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2} = \pm\sqrt{2.8^2 + 7.2^2 + 2.43^2 + 6^2} \approx \pm 10 \mu\text{m} \quad (15)$$

综上所述,基于光学共轭传感器的束靶耦合精度为 $\pm 10 \mu\text{m}$ 。

4 结论

现代的大型激光驱动装置,入射激光光束越来越多,传统的直接监测方法已无法实现多光束的快速、并行引导。

本文介绍了几种束靶耦合方法,包括在靶室外采用光学仪器直接监测,或在靶室内直接监测,虽然直接监测精度较高,但对于多光束引导,效率太低,无法实现并行引导。进而提出了一种基于光学共轭原理的传感器,介绍了其工作原理,分析了其引入的束靶耦合误差。实验和精度分析结果证明:该传感器可以实现并行、快速的束靶耦合,传感器引入的耦合误差约为 $\pm 10 \mu\text{m}$,可以满足现代大型激光驱动装置束靶耦合监测的要求。

参考文献:

- [1] BOEGE S J, BLISS E S, CHOCLE C J, et al.. NIF pointing and centering systems and target alignment using 351 nm laser source [J]. *SPIE*, 1997, 3047: 248-258.
- [2] 黄宏一, 顾震, 范滇元. 神光 II 装置的靶瞄准系统 [J]. *中国激光*, 1998, 25(8): 711-714.
HUANG H Y, GU ZH, FAN D Y. Target collimating system for ShenGuang II Device [J]. *Chinese Journal Lasers*, 1998, 25(8): 711-714. (in Chinese)
- [3] 刘炳国, 宫娜, 刘国栋, 等. ICF 靶场坐标系建立及其监测方法 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 1070-1076.
LIU B G, GONG N, LIU G D, et al.. The study for coordinate system of ICF shooting range and the monitoring instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*,

- 2007, 15(7): 1070-1076. (in Chinese)
- [4] 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.
LIU G D, CAI D, PU ZH B, et al.. A laser conjugation directing sensor based on differential focusing [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(5): 746-748. (in Chinese)
- [5] 张舞杰, 杨义路, 李迪, 等. 自动影像测量系统关键算法研究 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 294-301.
ZHANG W J, YANG Y L, LI DI, et al.. Key algorithms of automatic image measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 15(2): 294-301. (in Chinese)
- [6] 高策, 乔彦峰. 光电经纬仪实时误差的修正 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6): 846-850.
GAO C, QIAO Y F. Real-time error-correction

method for photoelectrical theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6):846-850. (in Chinese)

- [7] 刘万里, 王占奎, 曲兴华, 等. 机载光电跟踪测量设激光跟踪测量系统跟踪转镜的误差分析[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(4):585-590.

LIU W L, WANG ZH K, QU X H, *et al.*. Error analysis of tracking mirror for laser tracker system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4):585-590. (in Chinese)

作者简介:



刘炳国(1975—),男,博士研究生,哈尔滨工业大学自动化测试与控制系讲师,主要从事精密仪器设计、图像处理技术、二维视觉测量技术等方面的研究,并一直参与我国神光 III 激光驱动装置靶场监测系统的项目设计与研究。E-mail: liu-bingguo@hit.edu.cn



陈凤东(1977—),男,吉林通化人,博士研究生,讲师,2000年于中国石油大学获学士学位,2003年于哈尔滨工业大学获硕士学位。主要从事机器视觉,图像处理等方向的研究。E-mail: chenfd@hit.edu.cn

导师简介:



刘国栋(1974—),男,辽宁大连人,博士,教授,1996年,1998年,2005年于哈尔滨工业大学分别获学士、硕士、博士学位,主要研究方向为精密视觉测量技术、激光传感测量技术,侧重于其在国防领域、工业检测领域的应用研究。E-mail: lgd@hit.edu.cn



浦昭邦(1940—),男,教授,博士生导师,主要从事光电测量技术及光电测量仪器设计与控制系统等方面的研究。E-mail: zbp@hope.hit.edu.cn



庄志涛(1962—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,1982年毕业于哈尔滨工业大学获学士学位,主要从事光电检测技术,传感器及测控技术的研究。E-mail: zhuangzt121@hit.edu.cn

●下期预告

光电编码器 LED 光源准直特性研究

朱孝立, 陈军宁

(安徽大学 电子科学与技术学院, 安徽 合肥 230039)

发光二极管(LED)光束的准直度对光电编码器性能影响很大。通过分析光源辐射角对光栅光通量的影响,运用图像旋转理论和频域分析方法,导出莫尔条纹透光特性函数式并且获得与光束准直度相关的不同 a' 值下的莫尔条纹仿真波形,分析了光源准直特性指标对莫尔条纹对比度以及光栅间隙的影响,当 a' 值减小 $5 \mu\text{m}$ 时,莫尔条纹图像的对比度下降 17.66%,实验结果与理论仿真波形吻合。本文对高精度和高可靠性编码器设计和生产具有参考价值。