

文章编号 1004-924X(2018)11-2662-07

激光聚变冲击波被动式测速光学系统设计

闫亚东*, 何俊华, 许瑞华, 韦明智

(中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要:针对激光聚变装置冲击波速度被动测量的需求,设计了一种测速光学系统。采用高紫外透过率的氟化玻璃,实现了透射式 300~800 nm 复消色差设计。系统光路具有前后两组镜头,中间为平行光,镜头间距可变,光路适应能力强。系统前端两侧的双目机器视觉能够完成自动寻的。平行光路中设置 5 个激光器,轴上的 1 个前向照明靶点用来观察条纹相机狭缝处的目标像质,轴外的 4 个与光轴平行后向传输用来标识系统光轴的位置,激光器部件可电动切入/切出。系统前组镜头 F/# 数为 4,宽谱工作物方分辨率优于 10 μm ,532 nm 单波长工作物方分辨率优于 5 μm 。该光学系统光路排布灵活,可单独被动测速,也可与主动测速系统 VISAR 耦合构成主被一体复合测速系统,满足激光聚变装置冲击波测速的需求。

关键词:光学系统设计;冲击波速度;多普勒频移;扫描高温计

中图分类号:O435;TH74 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182611.2662

Optical system for passive laser fusion shock wave velocity measurement

YAN Ya-dong*, HE Jun-hua, XU Rui-hua, WEI Ming-zhi

(Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

* Corresponding author, E-mail: yyd@opt.ac.cn

Abstract: To meet the increasing demands of Inertial Confinement Fusion (ICF) shock velocity passive measurement, an optical collection system was designed. The 300—800 nm apochromatic optical system was designed using fluoride optical glasses, which have high transmission in the ultraviolet band. The imaging system has two lenses. The light beams between the two lenses were parallel, and the distance between the lenses could be varied to meet the size demands for different assembly positions. The machine visions on both sides of the first lens permit the system to achieve automatic homing. Five parallel laser beams were produced with one of them being on axis and lighting the target to obtain a clear image on the slit of the streak camera, and the other four surrounding the axis, lighting the second lens and focused on the imaging plane. The position of the separated optical elements present after the second lens can be easily fixed with the focusing lasers. The five laser beams can be terminated or turned on automatically. The first lens has an aperture of F/# 4.0, and the collection system has a 10 μm object space resolution in 300—800 nm, and a 5 μm object space resolution in 532 nm. This optical system can passively measure the shock velocity by collecting the spectral radiance of the target. It can also act as the common path to transmit the probe laser and receive the Doppler-shift singles of VISAR simultaneously. This optical system could meet the demand of measuring the ICF shock velocity.

Key words: optical system design; shock velocity; Doppler shift; streaked optical pyrometer

收稿日期:2018-05-02;修订日期:2018-05-29.

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2017YFA0403300)

1 引言

在间接驱动惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)中,打靶激光注入高 Z 材料制作的黑腔,在黑腔内壁被吸收并转换为 X 射线,形成高温辐射场,利用辐射场烧灼靶丸、压缩聚变燃料实现聚变。黑腔的辐射温度直接关系到对靶丸的烧灼压力,因此辐射温度测量是非常重要的实验诊断内容。

黑腔辐射温度的测量方法主要有软 X 射线能谱仪测量法和低 Z 样品冲击波速度测量法。前者主要是通过对 X 射线能谱积分获得等效的辐射温度,此方法测量温度的不确定度上限约为 $\pm 5\%$,且测量数据还受测量方位选择的影响^[1];后者主要是通过测量样品中的冲击波速度,利用冲击波速度和辐射温度的定标关系求解辐射温度,其测量精度较高,尤其是通过 Al 样品冲击波速度的测量,给出的辐射温度不确定度可以达到 $\pm 5 \text{ eV}$ ^[2-3]。

在 Al 样品的冲击波速度测量中,用光学系统收集冲击波在 Al 台阶靶界面卸载时的发光信号,用条纹相机记录发光的时间历程,由台阶面的发光时间差以及已知的台阶厚度计算冲击波速度^[4-5]。由于发光信号较弱、光谱范围宽(覆盖近紫外-可见-近红外),信号收集系统的设计难度较大。在之前国内外激光聚变装置上应用的收光系统都是卡塞格林折反式光学结构^[6-9],由于反射镜无色差^[10],因此系统色差小,设计难度较小,但它存在次镜遮挡的问题,影响系统的集光效率,不利于弱信号探测。目前,美国 NIF 装置设计的测温系统因消色差困难仅在 $580 \sim 640 \text{ nm}$ 内消色差^[11],且成像质量较差,物空间分辨率还没有达到 $100 \mu\text{m}$,改进的测温系统在 $560 \sim 640 \text{ nm}$ 波段内消色差,物空间分辨也只达到 $12.5 \mu\text{m}$ ^[12]。而离轴多反式光学结构能够克服上述问题,但相对来说其体积较大,占用靶室立体角大,影响相邻诊断设备的正常工作。透射式同轴光学系统具有体积小、集光效率高等优点,但因缺乏紫外透射性材料,设计难度较大。

本文设计了一种透射结构的被动式冲击波测速光学系统,采用特殊的氟化物玻璃、石英、晶体实现了 $300 \sim 800 \text{ nm}$ 复消色差设计,物空间分辨率为 $10 \mu\text{m}$;成像光路具有前后两组镜头,中间为

平行光,镜头间距可变,光路适应能力强,既能独立工作,也可与主动式冲击波测速系统(Velocity Interferometer System for Any Reflector, VISAR)耦合,成为主被一体复合测速系统^[13-14];系统前端两侧的双目机器视觉使系统能够自动寻的^[15];平行光路中设置 5 个可电动移除/切入的点激光器,外围的 4 个激光器平行于光轴后向传输并经后组镜头聚焦于像面,用于指导后继分离光学零件的快速布置,轴上的 1 个激光器前向照明靶点,用于观察条纹相机狭缝处目标像的质量。

2 光学系统设计

2.1 光学材料选取

透射式显微成像光学系统实现 $300 \sim 800 \text{ nm}$ 复消色差的难度很大,因为绝大多数光学材料在 300 nm 处的透过率极低,而本系统属于弱信号探测,需要采用高透过率光学材料来提升信号强度。紫外波段常用的光学材料有石英, CaF_2 , MgF_2 等,但 MgF_2 存在双折射,不适合在精密光学仪器中使用。因此,为了消除二级光谱必须寻找第三种材料。在 P - v 图中,石英和 CaF_2 位于正常玻璃线的同一侧;原则上来说第三种材料应在正常玻璃线另一侧选取,使它与石英和 CaF_2 包围的三角形面积最大为宜,但紫外光学材料种类却很匮乏。Irrhotonics 公司研制的一款氟化物光学玻璃($n_d=1.4993$, $v_d=76.6452$)性能较好,紫外透过率较高($98.1\%/10 \text{ mm}$),适合应用于紫外成像系统。

2.2 成像系统初始参数计算

由于本成像系统需兼顾多种物像距离,并能与 VISAR 共光路形成主、被动一体复合式测速系统,因此采用前后两组镜头、中间为平行光的结构形式,如图 1 所示。前组镜头 L_1 将目标发出的信号光准直为平行光,后组镜头 L_2 将光束聚焦成像在条纹相机狭缝处, L_1 和 L_2 之间的距离可以任意改变,以适应多种物像距离的要求。在 L_2 的会聚光路中设置分束镜(被动式光路中需放置补偿镜消除像散)使一部分光进入 VISAR,即可形成主、被动一体复合式测速系统。

靶室中心诊断设备较为集中,为避免干涉,设备前端距靶点需大于 200 mm 。为提高信号收集能力, L_1 的物方 $F/\#$ 设为 4.0 (原卡塞格林系统

为 10.0), 焦距 f_1 设为 235 mm。因物方视场为 2 mm, 根据条纹相机狭缝长度确立的成像系统的

放大倍率为 $8\times$ 。由 $f_2 : f_1 = 8.0$, 可以计算出 $f_2 = 1\ 880\text{ mm}$ 。

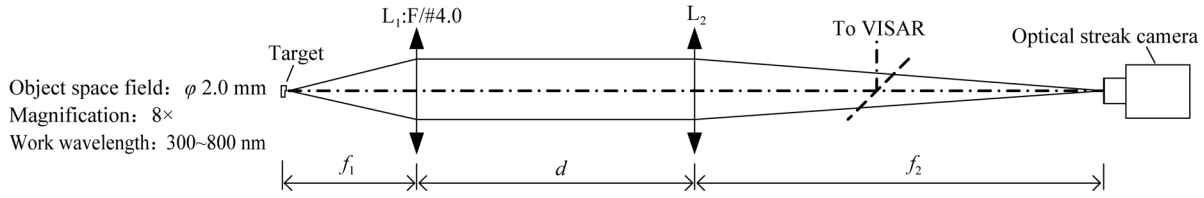


图 1 被动式冲击波速度测量系统原理图

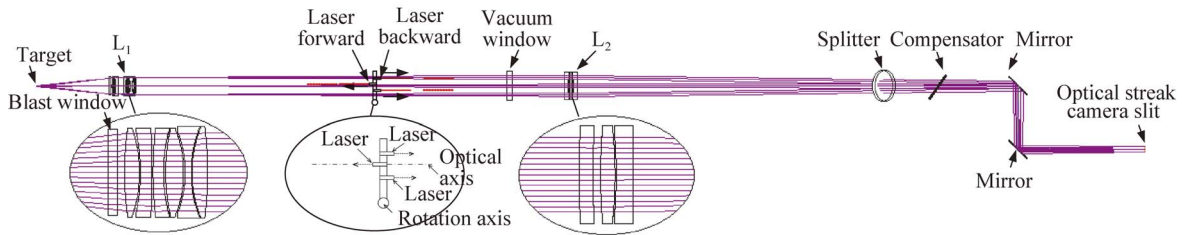
Fig. 1 Schematic diagram of fusion shock velocity passive measurement system

2.3 成像系统设计

采用石英、CaF₂、氟化玻璃设计的成像系统光路结构如图 2 所示。物方视场 $\varphi 2\text{ mm}$, 放大倍率为 $8\times$, 工作距离为 225 mm, 物方数值孔径为 0.124 (物方 F/# 4.0), 工作波段为 300 ~ 800 nm。

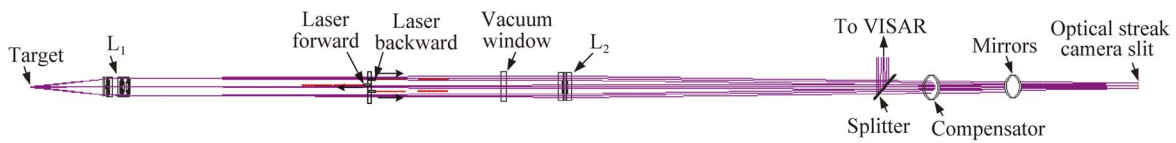
在图 2 中, 从靶点发出的信号光透过防护玻

璃, 经准直镜 L₁ 准直为平行光; 然后透过真空密封窗, 由会聚镜 L₂ 聚焦成像。在主被一体复合系统中, 多普勒信号光经分束镜进行光谱分离, (532 ± 3) nm 的光被反射进入 VISAR 主动式测速系统, 其余波段的光透射后进入被动式测速系统。透射光路中设置补偿镜补偿像散, 然后光束经一对可调反射镜折转后成像于条纹相机狭缝处。



(a) 正面图

(a) Front view of imaging system



(b) 俯视图

(b) Top view of imaging system

图 2 被动式成像系统光路结构

Fig. 2 Light path of passive imaging system

2.4 成像系统像质评价

被动式成像系统的像质评价如图 3 所示。其中: 图 3(a) 为系统点列图, 像点弥散斑 RMS 半径小于 $25\ \mu\text{m}$; 图 3(b) 为像面光学传递函数, 在 12.5 lp/mm 处传递函数大于 0.4, 对应于物方

100 lp/mm , 可以达到物方 $10\ \mu\text{m}$ 的清晰分辨能力; 图 3(c) 为纵向像差, 受复消色差光学材料种类的制约, 系统仍存在较大的色球差, 但二级光谱得到较好的控制, 在一定程度上实现了复消色差。

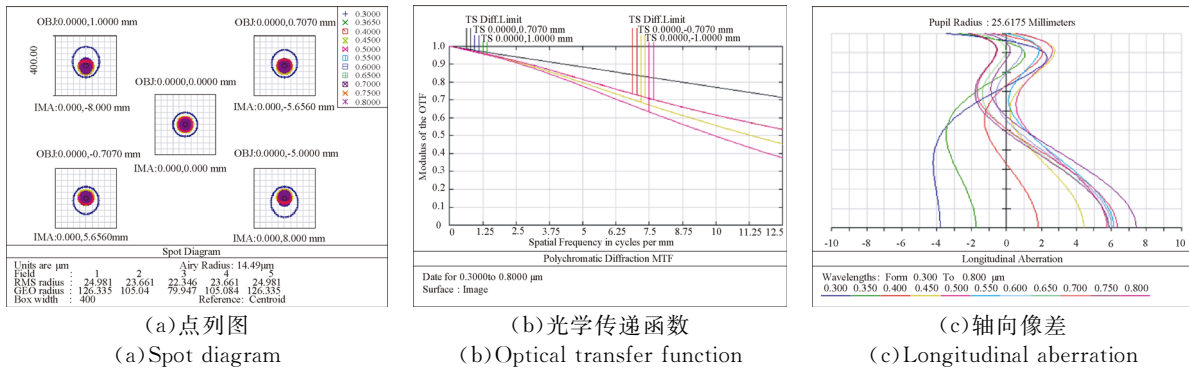


图 3 被动式成像系统的像质评价

Fig. 3 Image quality evaluation of passive imaging system

采用光学 1# 鉴别率板对被动式成像系统的分辨率进行检测,检测结果如图 4 所示。由图可见,第 13 组条纹的方向清晰可辨,1# 鉴别率板 13 组条纹对应的条纹宽度为 $5.0 \mu\text{m}$,一对线的宽度为 $10 \mu\text{m}$,可见系统能够达到物方 $10 \mu\text{m}$ 的清晰分辨能力。

若系统与 VISAR 耦合,VISAR 的工作波段为 $(532 \pm 0.3) \text{ nm}$,成像系统的像质评价如图 5 所示。由图可见,成像系统在单波长工作时,具有接近衍射极限的成像质量,图 5(a)中像点弥散斑小于衍射艾利斑,图 5(b)中传递函数在 30 lp/mm 处达到 0.35,对应于物方 240 lp/mm 处,系统能够达到 $4.2 \mu\text{m}$ 的分辨能力。

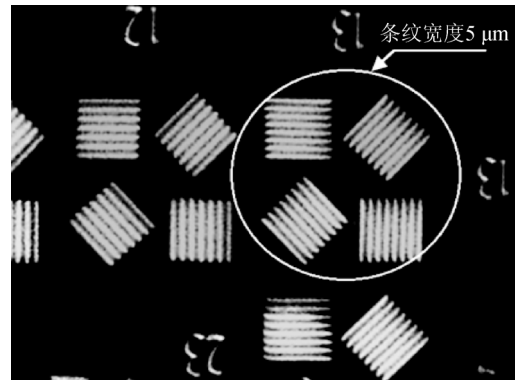


图 4 被动式成像系统物方分辨率检测结果
Fig. 4 Detection results of object space resolution of passive imaging system

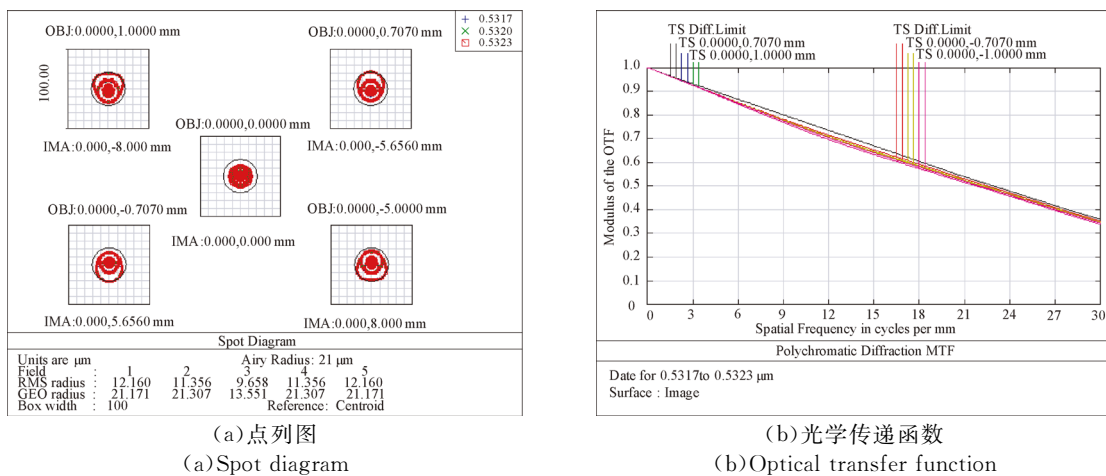


图 5 被动式成像系统的像质评价(@532 nm±0.3 nm)

Fig. 5 Image quality evaluation of passive imaging system(@532 nm±0.3 nm)

2.5 双目视觉系统设计

设备只有精密安装到位才能工作在最佳状态,

而对于探测器与镜头分离的透射式光学系统来说,难以判断成像镜头是否处在最佳位置。为解决这

个问题,在前组镜头两侧设计双目视觉系统^[16-17],其光路结构如图 6 所示。它是一对微型摄远型物镜,物方视场为 8 mm×6 mm,像面尺寸为 4.8 mm×3.6 mm,视觉镜头体积较小,减小设备占用空间。

双目视觉系统的成像质量评价如图 7 所示:图 7(a)为系统像面弥散斑点列图,可见弥散斑与衍射艾利斑大小相当;图 7(b)为系统传递函数,在 55.56 lp/mm 处传递函数大于 0.3,对应于物方 33.33 lp/mm 处,可以达到 30 μm 的分辨能力。通过双目视觉系统与设备搭载平台的闭环反

馈电动调节,可以实现设备的自动寻的。

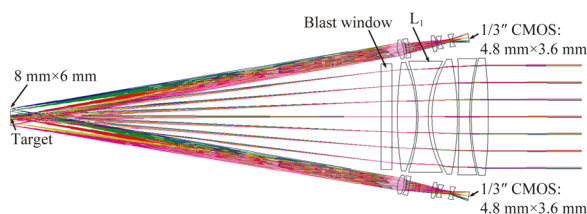
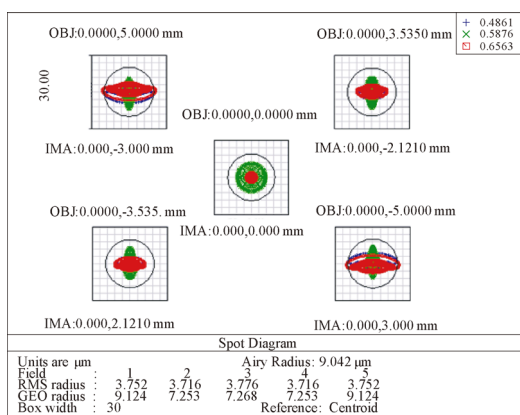


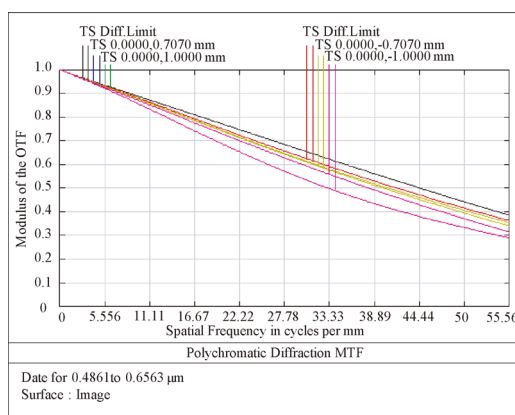
图 6 双目视觉系统光学结构

Fig. 6 Light path of binocular vision system



(a)点列图

(a)Spot diagram



(b)光学传递函数

(b)Optical transfer function

图 7 双目视觉系统像质评价

Fig. 7 Image quality evaluation of binocular vision system

2.6 光路基准的建立

在图 2 中,分束镜及其之后的器件与 L₁,L₂组成的成像系统是分离的,成像系统可通过双目视觉系统引导实现自动寻的,而后继器件的安装因缺乏必要的位置基准变得比较困难。为此,以成像系统光轴为基准,建立激光后向指示基准,在 L₁,L₂之间的平行光路中设置可移除的激光器组,外围 4 个激光器后向平行于光轴照射,透过真空窗,经 L₂会聚在成像系统像面上;中心的 1 个激光器与光轴重合,前向照明靶点,保证在成像系统像面上能够观察到靶点的清晰图像。

在后继元件的安装中,使激光器组切入光路并点亮外围的 4 个后向激光器,会得到聚焦于成像系统像面的 4 个激光束,在光学器件摆放时,4 个激光的中心即为成像系统的光轴位置,这样可以轻松将光学器件置于光路中。条纹相机摆放在 4 个激光聚焦的位置,使聚焦点位于条纹相机狭缝中心。关闭外围的 4 个激光器,点亮中心的

1 个前向照明激光器,这时在条纹相机狭缝处将得到靶点的像,调节条纹相机的轴向位置,使狭缝处靶点的像最清晰,即完成系统光路安装。该激光指示的定位精度为 0.5 mm,为分离光学元件的安装提供了大致位置基准,再根据系统成像质量进行精密微调。激光基准的建立,为后继分离光学器件及条纹相机的安装提供了依据。

3 结 论

本文详细论述了激光聚变冲击波被动式测速光学系统的设计,通过采用氟化物玻璃实现了 300~800 nm 透射式光学显微成像系统的复消色差,任意伸缩的平行光路使系统的适应能力很强;双目视觉系统使成像系统的瞄准实现了自动化;激光基准的建立解决了后继光学器件安装无据可依的问题。成像光学系统在 φ2 mm 视场内、NA 为 0.124 的条件下,300~800 nm 宽光谱成像实

现了物方 $10\ \mu\text{m}$ 清晰分辨的能力, (532 ± 0.3) nm VISAR 成像实现了 $4.2\ \mu\text{m}$ 的物方分辨能力; 双目视觉系统达到了 $30\ \mu\text{m}$ 的物方对准精

度。系统既能够单独工作, 也可与 VISAR 耦合成为主被一体复合式测速系统, 满足激光聚变物理诊断的需求。

参考文献:

- [1] JIANG S E, SUN K X, DING Y K, *et al.*. Radiation temperature scaling law for gold hohlraum heated with lasers at $0.35\ \mu\text{m}$ wavelength [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, 22(9): 2328-2331.
- [2] 江少恩, 李三伟. 辐射温度与其驱动 Al 冲击波速度的定标关系研究 [J]. *物理学报*, 2009, 58(12): 8440-8447.
JIANG S H E, LI S W. Investigation of scaling laws of radiation temperature with shock wave velocity in Al [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(12): 8440-8447. (in Chinese)
- [3] 贺芝宇, 周华珍, 黄秀光, 等. 激光加载下铝材料的冲击温度测量 [J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(4): 0420022-0420028.
HE ZH Y, ZHOU H ZH, HUANG X G, *et al.*. Measurements of aluminum shock temperature on SG-II high-power laser facility [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(4): 0420022-0420028. (in Chinese)
- [4] 章欢, 王哲斌, 杨冬, 等. 被动式冲击波速度数据处理技术 [J]. *核电子学与探测技术*, 2013, 33(1): 13-18.
ZHANG H, WANG ZH B, YANG D, *et al.*. Automatic data processing technique for passive shock wave velocity measurement [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2013, 33(1): 13-18. (in Chinese)
- [5] 王哲斌, 蒋小华, 李三伟, 等. 辐射驱动冲击波速度被动式测量 [J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(2): 375-380.
WANG ZH B, JIANG X H, LI S W, *et al.*. Passive measurement of radiation driven shock velocity [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(2): 375-380. (in Chinese)
- [6] MILLER J E, BOEHLY T R, MELCHIOR A, *et al.*. Streaked optical pyrometer system for laser-driven shock-wave experiments on OMEGA [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78: 0349031-0349037.
- [7] 闫亚东, 孙策, 何俊华, 等. 激光核聚变中冲击波观测镜密封结构改进设计 [J]. *润滑与密封*, 2007, 32(8): 118-120.
YAN Y D, SUN C, HE J H, *et al.*. The improved design of hermetically sealed construction for shock wave viewing lens used in laser fusion [J]. *Lubrication Engineering*, 2007, 32(8): 118-139. (in Chinese)
- [8] 闫亚东, 董晓娜, 何俊华, 等. 激光靶心冲击波观测镜折反式光学系统设计 [J]. *光子学报*, 2008, 37(3): 513-517.
YAN Y D, DONG X N, HE J H, *et al.*. Design of a catadioptric system for laser bullseye observation lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(3): 513-517. (in Chinese)
- [9] 闫亚东, 陈良益, 吴国俊, 等. 激光靶散射光观测镜杂散光抑制研究 [J]. *光电工程*, 2008, 35(6): 54-58.
YAN Y D, CHEN L Y, WU G J, *et al.*. Study of stray light reduction for laser target scattered light observation lens [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(6): 54-58. (in Chinese)
- [10] 闫亚东, 卢卫涛, 董晓娜, 等. 神光-III 主机汤姆逊散射诊断收光系统设计 [J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 06110021-06110025.
YAN Y D, LU W T, DONG X N, *et al.*. Design of collective optic system for Thomson scattering measurements on Shenguang III Facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 06110021-06110025. (in Chinese)
- [11] MALONE R M, FROGGET B C, KAUFMAN M, *et al.*. Design of an imaging VISAR diagnostic for the National Ignition Facility (NIF) [J]. *SPIE*, 2003, 5173: 26-37.
- [12] MANUEL A M, MILLOT M, SEPPALA L G, *et al.*. Upgrades to the VISAR Streaked Optical Pyrometer (SOP) system on NIF [J]. *SPIE*, 2016, 9591: 9591043-9591048.
- [13] 闫亚东. 成像型双灵敏度 VISAR 关键技术研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
YAN Y D. *Key Technical Researches on Double Sensitivity Imaging VISAR* [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [14] 闫亚东, 张法全, 何俊华, 等. 神光-III 原型装置用速度干涉仪的光学系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(11): 2355-2361.
YAN Y D, ZHANG F Q, HE J H, *et al.*. Design

- of VISAR optical system for Shen-Guang-III prototype [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2355-2361. (in Chinese)
- [15] 王维,何俊华,张敏,等. 物理诊断设备精确自动准直方法 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(3): 901-905.
WANG W, HE J H, ZHANG M, *et al.*. Automatic alignment method for diagnostic instrument [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3):901-905. (in Chinese)
- [16] 杨景豪,刘崴,刘阳,等. 双目立体视觉测量系统的标定 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2):300-308.
YANG J H, LIU W, LIU Y, *et al.*. Calibration of binocular vision measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2):300-308. (in Chinese)
- [17] 霍炬,张贵阳,崔家山,等. 测量误差不确定性加权的立体视觉位姿估计目标函数 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(4):834-842.
HUO W, ZHANG G Y, CUI J SH, *et al.*. A objective function with measuring error uncertainty weighted for estimation in stereo vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(4): 834-842. (in Chinese)

作者简介:



闫亚东(1979—),男,河南周口人,博士,研究员,主要从事强激光精密诊断与应用技术的研究。E-mail: yyd@opt. ac. cn



何俊华(1968—),男,江西人,研究员,博士生导师,主要从事水下光电成像与探测技术、强激光精密诊断与应用技术的研究。E-mail: hjh@opt. ac. cn