



星光-III 激光装置 X 射线在线瞄准针孔相机研制*

杨 雷, 黄 征, 孙 立, 卢 峰, 陈 勇, 李 纲, 周凯南

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心 等离子体物理全国重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 基于针孔成像原理的针孔相机结构简单、使用方便, 在高能量密度物理实验中常用于监测激光与靶相互作用区域的形状与大小。为适应星光-III 激光装置的靶室结构与打靶方式, 研制了一种用于该装置的 X 射线在线瞄准针孔相机, 以解决传统针孔相机无法在线瞄准导致的信号采集失败问题。相机采用可见光 CCD 与 X 光 CCD 一体化设计, 通过优化调节结构, 实现了俯仰与侧摆方向的高精度在线指向调节, 调节精度达 15 μm 。利用可见光 CCD 实时采集靶面图像, 并结合精密调节盘上的不同孔径瞄准孔, 实现了 X 光针孔相机的高精度在线瞄准。在星光-III 激光装置上对该相机进行了激光打靶考核, 实验结果表明, 其性能满足该装置的使用要求。

关键词: 针孔相机; 在线瞄准; X 射线焦斑; 星光-III 激光装置

中图分类号: O437.4

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202638.250303

Development of X-ray online-aiming pinhole camera for Xingguang-III laser facility

Yang Lei, Huang Zheng, Sun Li, Lu Feng, Chen Yong, Li Gang, Zhou Kainan

(National Key Laboratory of Plasma Physics, Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: [Background] Pinhole cameras based on the principle of pinhole imaging are widely used in high-energy-density physics experiments to monitor laser-target interaction regions. However, traditional pinhole cameras often suffer from signal acquisition failures due to the lack of online aiming capability, especially for small targets such as wire targets in facilities like the Xingguang-III laser system. [Purpose] This study aims to develop an X-ray online-aiming pinhole camera for the Xingguang-III laser facility to address the challenge of precise target alignment under vacuum conditions and enhance the reliability of signal acquisition. [Methods] An integrated design combining a visible-light CCD and an X-ray CCD was implemented. A revolver-type pinhole adjustment device was developed to switch between aiming apertures and imaging pinholes with a concentricity error below 3.5 μm . High-precision two-dimensional pointing adjustments (pitch and tilt) were achieved using a motorized stage, with a targeting accuracy of 15 μm . The visible-light CCD enabled real-time target imaging, while different aperture sizes on a precision adjustment disk facilitated coarse-to-fine aiming. [Results] The camera was tested on the Xingguang-III laser facility using a Cu planar target irradiated by a picosecond laser. Clear X-ray spot images were obtained, with a peak intensity of 52 040 and a background noise of approximately 2 500. The full width at half maximum of the spot was 43 μm horizontally and 38 μm vertically, confirming successful online aiming and imaging performance. [Conclusions] The developed X-ray online-aiming pinhole camera fulfills the operational requirements of the Xingguang-III laser facility. It enables real-time, high-precision target alignment under vacuum, significantly improving the success rate of signal acquisition in high-energy-density physics experiments.

Key words: pinhole camera, online-aiming, X-ray focal spot, Xingguang-III laser facility

* 收稿日期: 2025-09-19; 修订日期: 2026-01-22

基金项目: 等离子体物理全国重点实验室基金项目(6142A04240302)

联系方式: 杨 雷, y19181@sina.com。

通信作者: 卢 峰, iufeng268@163.com。

超短超强激光可提供超过 10^{18} W/cm² 相对论聚焦峰值强度,极大拓展了超短脉冲激光应用领域,如二次辐射源(X射线、 γ 射线)产生^[1]、工业无损检测^[2]、自由电子激光^[3]、激光核物理^[4]、实验室天体物理^[5]等。在此背景下,国内外陆续建成并运行一系列大型超短脉冲激光装置,如美国的 NIF ARC、OMEGA EP,法国的 PETAL,英国的 Vulcan、Orion,以及中国的神光-II 升级装置、星光-III 激光装置等^[6]。星光-III 激光装置是世界首台“零抖动”输出三种波长、三种脉冲宽度激光的多功能激光装置,光束的多重组合可用于不同的高能量密度物理实验场景^[7]。

针孔相机是超短超强激光高能量密度物理实验中重要的诊断设备之一,采用 X 光 CCD 可对激光等离子体 X 光辐射进行空间分辨测量,获得 X 光焦斑信息。事实上,在超短超强激光高能量密度物理实验中,由于激光聚焦峰值强度超过 10^{18} W/cm²,甚至可达 10^{23} W/cm²,通过可见光成像等常规光学测量手段获得强激光打靶的激光焦斑实时状态需要极其复杂的焦斑测量取样技术^[8],因此通常采用 X 光针孔相机测量靶面 X 光辐射的 X 光焦斑来间接测量激光打靶焦斑状态^[9]。X 射线针孔相机是目前监测超短超强激光实时打靶焦斑状态最重要的测量工具^[10]。

针孔相机主要由成像针孔、支撑调节机构和记录介质构成。在近年来关于针孔相机技术的研究中,国外重点拓展相机的应用场景,已经将其应用于高剂量率的硬 X 射线成像^[11]、X 射线密度分布测量^[12]和多光束瞄准精度监测^[13]等,国内则更关注提升相机性能,包括支撑调节机构设计^[14]、针孔相机信号强度计算^[15],以及高信噪比 X 射线成像^[16]等。为了实现 X 光焦斑有效测量,需要调节成像针孔的空间位置,使得靶点位于 X 光 CCD 成像视场内,即 X 光针孔相机需要对靶点进行高精度瞄准。星光-III 激光装置实验用靶为 5~10 μm 的丝靶,针孔相机成像针孔为 10~20 μm 直径的小孔,而针孔管长度超过 1 m,且传统 X 光针孔相机配备的 X 光成像 CCD,无法对靶点进行可见光成像,使得传统 X 光针孔相机对丝靶等特种靶的高精度瞄准具有极高的技术难度。传统 X 光针孔相机靶瞄准通常采用激光笔等光源,从 X 光 CCD 一侧传输至靶点对靶面进行照明,采用手调方式调节支撑调节机构,实现 X 光 CCD、针孔与靶点之间的瞄准^[14,17]。这种瞄准方式一方面瞄准精度低,时常导致信号偏出视场,造成信号采集失败,另一方面无法实现 X 光 CCD、针孔与靶点之间的实时在线瞄准和瞄准状态监测。鉴于此,本文研制一套应用于星光-III 激光装置的具备在线瞄准功能的 X 射线针孔相机,解决传统 X 光针孔相机瞄准难题,有效提升实验数据获取成功率。

相对于传统 X 光针孔相机,将可见光 CCD 与 X 光 CCD 进行一体化设计,通过优化针孔相机调节结构,实现针孔相机俯仰与侧摆角度二维高精度在线指向调节,调节精度 15 μm 。利用可见光 CCD 采集靶面图像,结合精密调节盘上不同孔径的瞄准孔,实现 X 光针孔相机高精度在线瞄准功能。对该针孔相机在星光-III 激光装置上进行激光打靶考核,实验结果表明,该针孔相机达到星光-III 激光装置使用要求。

1 系统原理

在线瞄准 X 光针孔相机原理示意图如图 1 所示,其中图 1(a)为针孔成像原理,图 1(b)为在线瞄准原理。针孔成像基于光沿直线传播定律,是一种无成像透镜的照相技术,成像基本条件为物尺寸远大于针孔直径。针孔成像空间分辨率可以表示为^[11]

$$\Delta = \left[d^2 \left(1 + \frac{1}{M} \right)^2 + \frac{k_f^2 \lambda^2 a^2}{d^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: d 为针孔直径; M 为相机的放大倍数, $M=b/a$, a 为针孔与靶间距离(物距), b 为针孔与像面距离(像距); k_f 为与衍射效率相关的系数,若取圆孔夫琅和费衍射图的第一极小值的夹角为衍射角,则 $k_f=2.44$; λ 为成像 X 光源的波长。根据式(1),为了获得最小空间尺寸分辨率,最佳针孔直径 d_{opt} 为

$$d_{\text{opt}} = \left(\frac{k_f \lambda a M}{1 + M} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

针对星光-III 激光装置物理实验研究中针孔相机的观察对象,我们感兴趣的是 1~10 keV 能区范围的 X 射线分布,因此取 5.0 keV 能点对针孔相机进行设计优化。针孔相机 X 光成像放大倍数设计为 4.2 倍,物距 a 设计为 430 mm,根据式(2),最佳针孔直径 d_{opt} 为 14.5 μm 。将 d_{opt} 代入式(1),X 光成像空间分辨率为 17.9 μm 。

为了实现 X 光针孔相机在线瞄准功能,在 X 光 CCD 前插入可移动式可见光 CCD,将可见光 CCD 与 X 光 CCD 进行一体化设计,如图 1(b)所示。利用可见光 CCD 对靶点进行成像,解决 X 光相机不能直接瞄准靶点的问题,调节针孔相机的指向对准打靶点。瞄准时,可见光相机位于针孔和 X 射线相机所确定的光轴上,如图 1(b)中

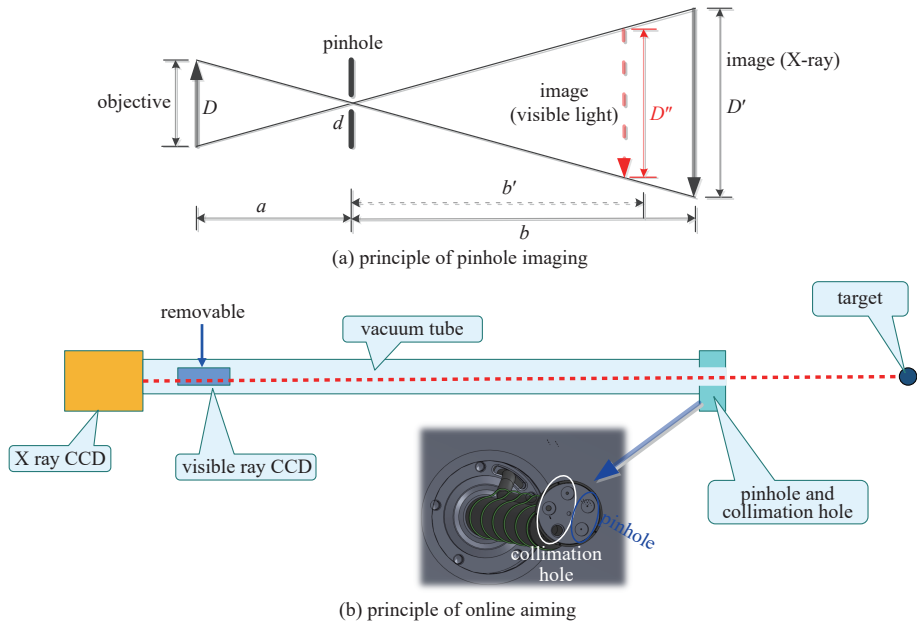


Fig. 1 Schematic diagram of the online-aiming pinhole camera principle

图 1 在线瞄准针孔相机原理示意图

红色虚线所示。为了解决瞄准过程中小尺寸针孔导致收光太弱不易成像的问题, 利用瞄准孔代替针孔开展靶瞄准工作。瞄准孔与针孔设计在同一个左轮精密调节机构上, 瞄准孔尺寸为 mm 量级, 且调换瞄准孔与针孔时, 孔之间的同心度误差优于 $3.5 \mu\text{m}$, 可实现 X 光针孔相机高精度在线瞄准。

2 系统结构及功能实现

在线瞄准针孔相机结构如图 2 所示, 其中 1 为左轮针孔调节装置, 2 为真空导管, 3 为安装法兰, 4 为精密调节结构, 5 为可见光 CCD, 6 为闸板阀, 7 为 X 光 CCD。左轮针孔调节装置可实现针孔与准直孔的同心调节, 同心度误差优于 $3.5 \mu\text{m}$ 。针孔(瞄准孔)与靶点距离 $300 \sim 450 \text{ mm}$ 可调, 可见光 CCD 镜头孔至瞄准孔的距离 $1300 \sim 1450 \text{ mm}$ 可调, 可见光 CCD 镜头孔至 X 光 CCD 镜头孔的距离为 200 mm 。

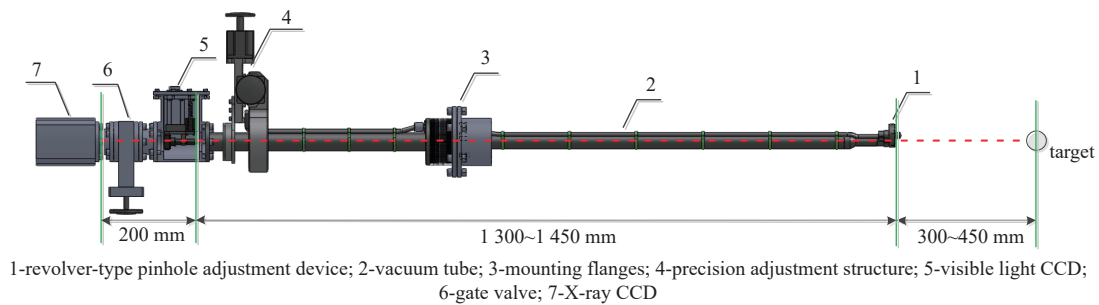


Fig. 2 Structure of the online aiming pinhole camera

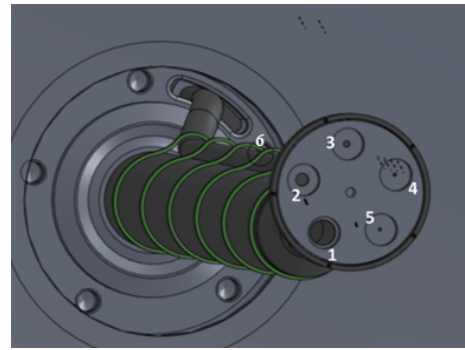
图 2 在线瞄准针孔相机结构

真空导管、安装法兰和调节结构共同组成了 X 光针孔相机的支撑与调节装置。支撑与调节装置采用的是球轴承结构, 将圆球底座、圆球压板压紧固定球心, 以固定球心为中心进行指向调节。通过二维精密平移电机调节实现相机俯仰与侧摆的指向调节, 平移电机的调节精度为 $5 \mu\text{m}$, 此对应至靶点位置的调节精度为 $15 \mu\text{m}$ 。考虑到星光-III 激光装置靶室法兰尺寸与位置公差, 要求靶点瞄准范围为 $\pm 20 \text{ mm}$ 。球轴承距离靶点距离设计为 1350 mm , 实际测量的相机指向调节为 $\pm 1.5^\circ$, 对应靶点 $\pm 35 \text{ mm}$ 的瞄准范围, 满足准直使用要求。

为了实现 X 光针孔相机在线瞄准功能, 在左轮针孔调节装置的轮盘上均匀加工 5 个安装孔位, 其中 3 个孔位安装不同直径(1: $\phi 8 \text{ mm}$; 2: $\phi 3 \text{ mm}$; 3: $\phi 1 \text{ mm}$)的瞄准孔, 另外 2 个孔位安装 2 个不同滤片组合的针孔板, 如图 3 所示。当瞄准孔调换时, 通过轮盘背后安装的光耦感应开关检测其同心度, 误差小于 $3.5 \mu\text{m}$, 满足 X 光针孔相机瞄准要求。精度调节在左轮针孔调节装置盖板上配备 LED 照明光源, 同时安装暗场补光片, 在有需要时可对瞄准孔进行补光。

针孔板的厚度会影响 X 光成像效果,理想的针孔板厚度无穷薄,且对 X 射线具有 100% 的吸收遮挡。然而任何材料制作的薄板都对 X 射线具有一定的透过率。透射的 X 射线将均匀分布在相机的记录平面上形成噪声本底,降低图像的对比度。为了减少这一影响,一方面选择原子系数 Z 较高的元素材料制作针孔板,另一方面将针孔板做得适当厚些,通过优化,选用 20 μm 厚的钽片作为星光-III 激光装置针孔相机的针孔板。

对上述 X 射线在线瞄准针孔相机开展瞄准性能验证测试,测试实验图如图 4 所示。用放置在纸杯上的针尖来模拟靶点,分别利用 $\phi 8\text{ mm}$ 、 $\phi 3\text{ mm}$ 和 $\phi 1\text{ mm}$ 的瞄准孔对靶点进行瞄准,可见光 CCD 采集的图像如图 5 所示。在 $\phi 1\text{ mm}$ 瞄准孔直径下,仍可对靶点进行清晰成像,且靶点均位于瞄准孔的中心,验证了瞄准的可靠性。在实际使用中,先通过离线装调将可见光 CCD、X 光 CCD 与瞄准孔调节在同一条直线上。当 X 光针孔相机需要瞄准靶点时,通过真空电机精准推入可见光 CCD 至管道中心,然后利用左轮针孔调节装置将瞄准孔调节至针孔位置。粗瞄时,可见光 CCD 通过大瞄准孔可以观察到靶点,利用电控调节装置调节真空密封管道指向,将靶点调节至瞄准孔中心。然后,转换至小尺寸瞄准孔($\phi 3\text{ mm}$ 和 $\phi 1\text{ mm}$),使靶点精确位于瞄准孔中心,这样确保靶点与 X 光 CCD、针孔都位于同一直线上。最后,退出可见光 CCD,让靶点位于 X 光 CCD 视场,即可实现 X 光 CCD、针孔和靶点的高精度瞄准,确保 X 光 CCD 数据采集成功率。由于可见光 CCD 切入切出、针孔相机姿态调节、瞄准孔与针孔切换均可按既定流程实现远程自动操作,因此相对于传统针孔相机的瞄准方式,可研制的星光-III 激光装置针孔相机可实现实时在线瞄准操作,并且具备随时监测瞄准状态的能力。



1, 2, and 3-collimation hole; 4 and 5-pinhole;
6-photocouplersensor switch

Fig. 3 Revolver-type pinhole adjustment device

图 3 左轮针孔调节装置

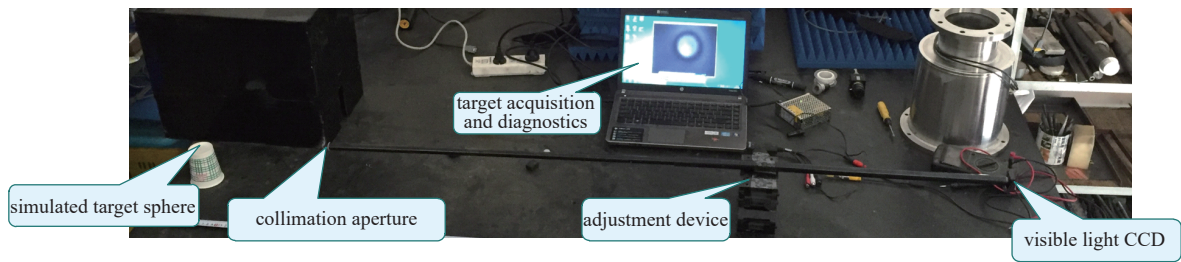


Fig. 4 Verification of aiming performance test

图 4 瞄准性能测试验证

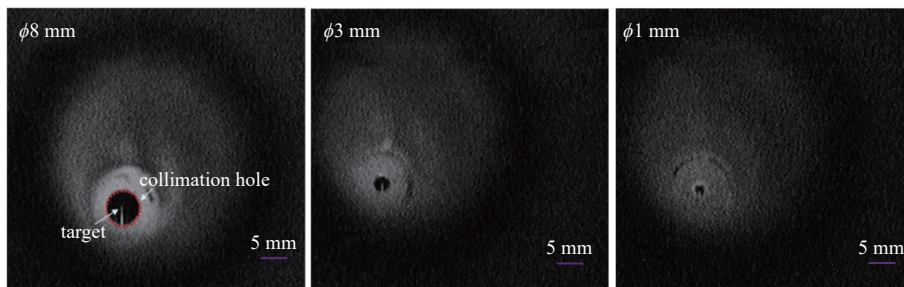


Fig. 5 Aiming performance test results

图 5 瞄准性能测试结果

3 在线瞄准实验考核

在星光 III 激光装置上对本相机进行考核,实验采用皮秒激光束与 15 μm Cu 平面靶相互作用,激光的脉宽 0.83 ps、中心波长 1053 nm、对比度优于 10^{-7} ,能量 95.3 J。针孔相机位于靶室西偏南 22.5°,与赤道面夹角 15°,与 Cu 平面靶法向水平夹角 10°,竖直夹角 15°。在真空中使用可见光 CCD 瞄准靶点,然后利用 X 光 CCD 采集 X 光发光信号。实验中滤片选用 6 μm 铝叠加 20 μm 铍,针孔板为 3 \times 3 的针孔阵列,图 6 为针孔相机的测量结果。图中 X 光焦斑

峰值强度 52040, 背景噪声约 2500, 焦斑水平方向半高全宽 $43\ \mu\text{m}$, 垂直方向半高全宽 $38\ \mu\text{m}$ 。实验成功使用在线针孔相机采集到皮秒激光的打靶图像, 表明针孔相机达到了使用要求, 可精确地在线瞄准靶点进行 X 光成像, 图像清晰。

4 结 论

针对星光 III 激光装置结构及运行要求, 成功研制出用于星光 III 激光装置的在线瞄准针孔相机。该相机包括左轮针孔调节装置、支撑与调节装置、X 光 CCD 和可见光 CCD, 可实现在线瞄准, 在线精确二维调节, 调节精度为 $15\ \mu\text{m}$, 解决了传统的 X 光针孔相机难以实时在线监测与精确瞄准的问题。在线 X 光针孔相机在 III 激光装置进行实验考核, 成功采集到清晰的打靶图像。目前该相机已参与多次打靶实验, 运行稳定可靠, 是星光 III 激光装置的基础诊断设备之一。

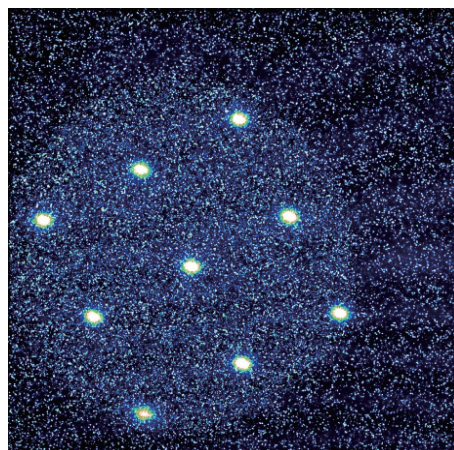


Fig. 6 Experimental results of the pinhole camera
图 6 针孔相机的实验结果

参考文献:

- [1] Dong Kegong, Zhang Tiankui, Yu Minghai, et al. Micro-spot gamma-ray generation based on laser Wakefield acceleration[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 123: 243301.
- [2] Wu Y C, Zhu B, Li G, et al. Towards high-energy, high-resolution computed tomography via a laser driven micro-spot gamma-ray source[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 15888.
- [3] Emma C, Van Tilborg J, Assmann R, et al. Free electron lasers driven by plasma accelerators: status and near-term prospects[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9: e57.
- [4] 张高维, 矫金龙, 齐伟, 等. 拍瓦激光与铜靶作用产生光核中子的数值模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 102002. (Zhang Gaowei, Jiao Jinlong, Qi Wei, et al. Numerical simulation study of photonuclear neutron generation by PW laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 102002)
- [5] 仲佳勇, 安维明, 平永利, 等. 强激光实验室天体物理介绍[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 092003. (Zhong Jiayong, An Weiming, Ping Yongli, et al. Introduction of laboratory astrophysics with intense lasers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 092003)
- [6] Danson N C, Haefner C, Bromage J, et al. Petawatt and exawatt class lasers worldwide[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7: 03000e54.
- [7] Zhu Qihua, Zhou Kainan, Su Jingqin, et al. The Xingguang-III laser facility: precise synchronization with femtosecond, picosecond and nanosecond beams[J]. Laser Physics Letters, 2018, 15: 015301.
- [8] Yoon J W, Kim Y G, Choi I W, et al. Realization of laser intensity over $10^{23}\ \text{W}/\text{cm}^2$ [J]. Optica, 2021, 8(5): 630-635.
- [9] Lindl J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. Physics of Plasmas, 1995, 2(11): 3933-4024.
- [10] An H H, Wang W, Xiong J, et al. Accelerated protons with energies up to 70 MeV based on the optimized SG-II Peta-watt laser facility[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2023, 11: e63.
- [11] Sueoka K, Kataoka J, Takabe M, et al. Development of a new pinhole camera for imaging in high dose-rate environments[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 912: 115-118.
- [12] Finocchiaro G, Naselli E, Mishra B, et al. Space-resolved electron density and temperature evaluation by x-ray pinhole camera method in an ECR plasma[J]. Physics of Plasmas, 2024, 31: 062506.
- [13] Stoeckl C, Cao D, Ceurvorst L, et al. Beam-pointing verification using x-ray pinhole cameras on the 60-beam OMEGA laser[J]. Review of Scientific Instruments, 2022, 93: 103524.
- [14] 侯立飞, 韦敏习, 袁永腾, 等. 神光 II 升级装置 X 光针孔相机研制[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(9): 2313-2316. (Hou Lifei, Wei Minxi, Yuan Yongteng, et al. Development of X-ray pinhole camera on Shengguang II-up equipment[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(9): 2313-2316)
- [15] 董建军, 刘慎业, 杨国洪, 等. 实时测量的 X 射线针孔相机信号强度估算[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(9): 1347-1350. (Dong Jianjun, Liu Shenye, Yang Guohong, et al. Estimation of signal intensity for online measurement X-ray pinhole camera[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(9): 1347-1350)
- [16] Wang C, An H H, Xiong J, et al. A pinhole camera for ultrahigh-intensity laser plasma experiments[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88: 113501.
- [17] 江少恩, 于燕宁. 用于神光 II 激光装置的 X 光针孔相机[J]. 科学技术与工程, 2005, 5(22): 1713-1716. (Jiang Shaoen, Yu Yanning. X-ray pinhole camera used on Shengguang II facility[J]. Science Technology and Engineering, 2005, 5(22): 1713-1716)