



·惯性约束聚变物理与技术·

基于 Kirkpatrick-Baez 显微镜的芯部自发光 成像诊断不确定度评估*

蒋 炜^{1,2}, 董云松², 张 兴², 尹传盛², 孙传奎², 董建军², 尚万里²

(1. 中国科学技术大学, 合肥 230026; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 具备高分辨能力(约 5 μm)的 Kirkpatrick-Baez (KB) 显微镜大幅提升了芯部自发光诊断图像的空间分辨率, 准确评估诊断不确定度有利于开展内爆对称性调谐, 提高内爆性能。建立了针对 KB 显微镜的在线不确定度评估方法, 详细分析了其在线背光照相实验中的图像分辨率和噪声, 并对内爆物理实验中的芯部自发光数据进行了不确定度评估。结果显示, 芯部自发光 P_2 不确定度为 6%, P_4 不对称性的不确定度为 8%, 满足了现阶段内爆物理实验的诊断需求。

关键词: ICF; 内爆不对称性; KB 显微镜; 不确定度

中图分类号: O532^{*}.13

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220139

Uncertainty evaluate of core symmetry which observed by Kirkpatrick-Baez microscope

Jiang Wei^{1,2}, Dong Yunsong², Zhang Xing², Yin Chuansheng², Sun Chuankui², Dong Jianjun², Shang Wanli²

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The core emission was observed by Kirkpatrick-Baez (KB) microscope with about 5 μm space resolution. It is important to evaluate the uncertainty of core image thus to tune the implosion asymmetry. This article evaluates the spatial resolution and SNR of the backlight image got by KB microscope in the experiment, and calculates the uncertainty for the Legendre moments of core emission. The results show that the uncertainty of P_2 is about 6% that of and P_4 is about 8%.

Key words: ICF, ignition asymmetry, Kirkpatrick-Baez microscope, uncertainty

良好的内爆不对称性是实现高性能内爆的重要条件之一, 在高收缩比的情况下, 要求驱动不对称性好于 1%^[1]。从 20 世纪 90 年代开始, 国内外相继建立了多种内爆不对称性的诊断方法, 用于诊断不同阶段的内爆不对称性, 如芯部自发光^[2-3]、二维背光成像^[4-5]、高 Z 替代靶^[6-7]等。其中芯部自发光诊断是利用成像设备对内爆时刻的热斑 X 光发射进行成像, X 光图像的强度分布可以用于表征热斑的形状。NIC 目前采用最强发光强度的 17% 强度等高线来表征热斑最终压缩形状^[3], 而目前业内根据模拟和实验结果的对比, 一般采用 20% 强度等高线来表征热斑形状^[8]。

热斑的不对称性分析一般都采用球谐函数展开的方式进行描述。在假设黑腔驱动在绕黑腔腔轴方向旋转对称的前提下, 靶丸的形变量可退化为只与 θ (即靶丸上任意一点与黑腔腔轴的夹角) 相关。其形变量 $f(\theta)$ 可以简单的用 n 阶 Legendre 函数 P_n 展开。理论上当激光束的功率平衡, 弹着点都控制好之后, 奇数阶的 Legendre 分量完全可以消除; 而传统两端注入黑腔存在难以抵消的低阶 (P_2 及 P_4) 驱动不对称性且对内爆性能影响最大, 因此要求对低阶内爆不对称性进行精密的诊断。

NIC 内爆物理实验中靶丸收缩比超过 30 倍, 要求热斑的 P_2 和 P_4 不确定度分别好于 5% 和 7%^[9]。热斑直径通常为 60~100 μm , 常规针孔成像方式的图像分辨率一般在 20~30 μm 之间, 不能完全满足芯部自发光诊断需求。

* 收稿日期: 2022-05-05; 修订日期: 2022-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(12075219), 中物院创新基金项目(CX20210019)

联系方式: 蒋 炜, jwk8840@mail.ustc.edu.cn.

Kirkpatrick-Baez(KB)显微镜具有空间分辨率高、集光效率高、具备选能能力等优点,特别适用于内爆实验中的芯部自发光诊断。NIF研制了高能点带通KB显微镜(@10.2 keV),其理想最佳分辨率可以达到 $6\ \mu\text{m}$,与抗辐射加固门控X光相机(HGXD)耦合可以具备时间分辨能力^[10]。KB显微镜于2016年在国内首次正式应用于芯部自发光诊断并成功获得了实验数据,大幅度提高了芯部不自发光诊断中的图像分辨率,但尚未对其诊断不确定度进行系统评估^[11]。

目前KB显微镜的成像系统分辨率主要通过离线标定数据获得,受在线实验中激光瞄准精度、诊断系统瞄靶精度和记录介质差异等因素的限制,离线标定数据并不能完全反映实际实验中诊断系统的分辨率,需要开展在线标定实验获得成像及记录系统的分辨率;同时实验中图像的信噪比对分辨率也有一定程度的影响,也需要进一步准确评估。本文将基于KB显微镜的在线打靶实验结果,建立一套实现包含成像及记录系统、在线瞄靶精度、噪声等因素的不确定度评估方法。

1 KB 成像系统在线考核实验

对于芯部自发光来说, n 阶 Legendre 分量 P_n 的不确定度 σ_n 可表示为^[3]

$$\sigma_n = \frac{u\sqrt{2n+1}}{r\sqrt{N}} \quad (1)$$

式中: u 为图像分辨率, r 为芯部自发光图像的半径, N 为有效数据点数目。 r 和 N 可以由芯部自发光图像直接获得。可以看到,图像分辨率是影响芯部自发光诊断不确定度的最主要因素,而图像分辨率主要由成像系统的分辨率、记录系统的分辨率和噪声等共同决定。

1.1 KB 显微镜分辨率

利用四束激光驱动背光靶产生X光,对1000目Au网格靶进行了背光照相,成功对四通道KB显微镜进行了在线考核。通过该实验可以获得四通道KB显微镜的在线系统放大率、分辨率等一系列成像参数,此处的分辨率包含了成像系统(KB显微镜)分辨率和记录系统(IP板^[12])分辨率。

图1为四通道KB显微镜对网格背光照相获得的图像及相关数据分析,其中图1(a)为KB四个通道的网格背

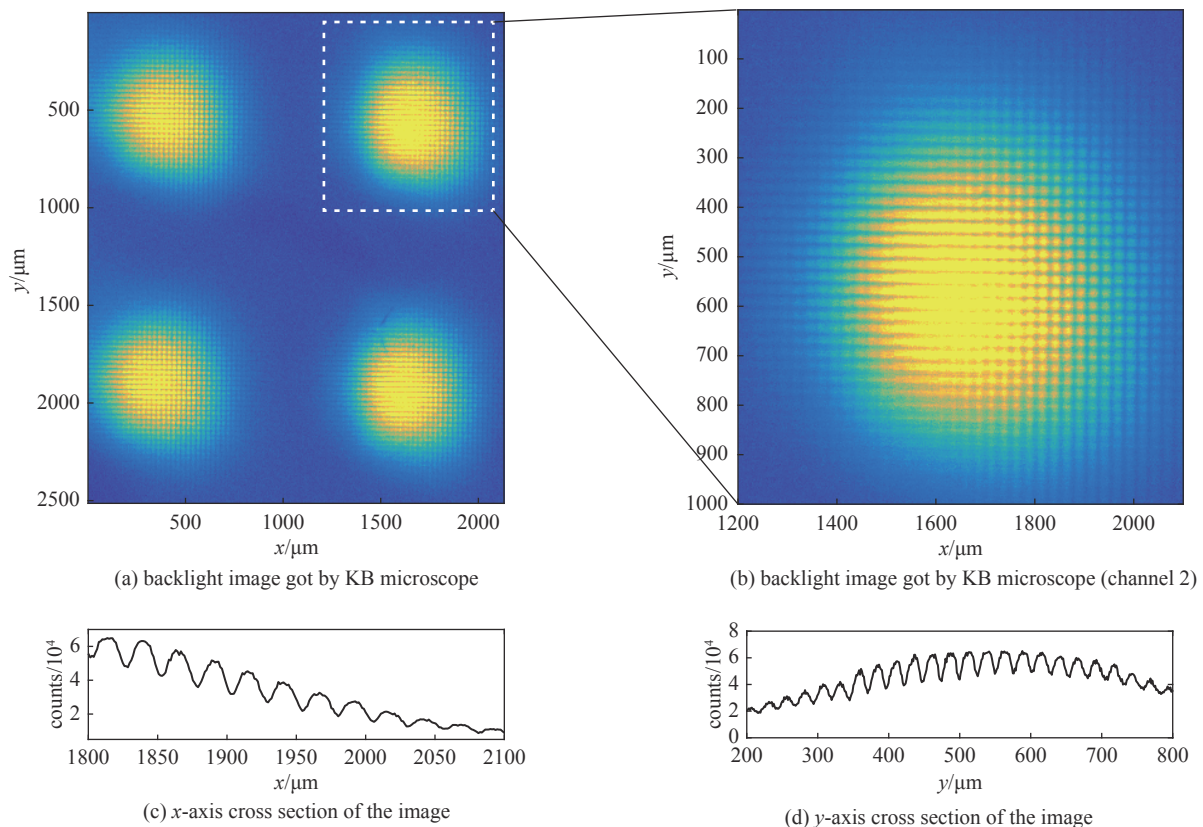


Fig. 1 Backlight image got by KB microscope and x-axis and y-axis cross section of the image

图1 四通道KB显微镜背光成像结果及横向和纵向截面曲线

光图像, 图 1(b) 为 1 象限的网格图像, 图 1(c) 和图 1(d) 分别为网格在 x 和 y 方向的截面图。可以看到: 该曲线随光强分布存在强度调制, 并且该截面曲线没有计数接近 0 的暗区, 这是由网格参数和成像系统分辨所共同决定的, 同时这意味着不能直接采用传统的刀口函数的方法计算调制传递函数(MTF), 否则会高估系统分辨。但我们同时注意到, 图像的分辨率的高低(图 1(b))与对应的截面峰谷对比度(图 1(c)和图 1(d))相关, 故可以通过模拟建立峰谷比与系统分辨率的关系, 再通过实验结果中的峰谷比来反推系统分辨率。

考虑到实验中存在的光强分布对曲线导致的调制, 故定义峰谷比为谷底强度与相邻两个峰值强度的平均值之间的比值

$$k = \frac{2V}{(P_1 + P_2)} \quad (2)$$

式中: k 为峰谷比, V 为谷底计数, P_1, P_2 为相邻峰值计数。

采用不同分辨率的线扩展函数(LSF)对 1000 目网格的透过率函数进行卷积, 并计算卷积后的峰谷比值(k), 可以获得不同分辨率下 1000 目网格图像的峰谷比, 从而建立分辨率和峰谷比之间的关系(如图 2)。从图 2 中可以看到, 峰谷比与系统分辨率一一对应, 且几乎呈线性关系。同时模拟计算结果显示背光强度的变化对峰谷比与分辨率之间的对应关系没有影响, 因此可以通过计算峰谷比来反推系统分辨率。

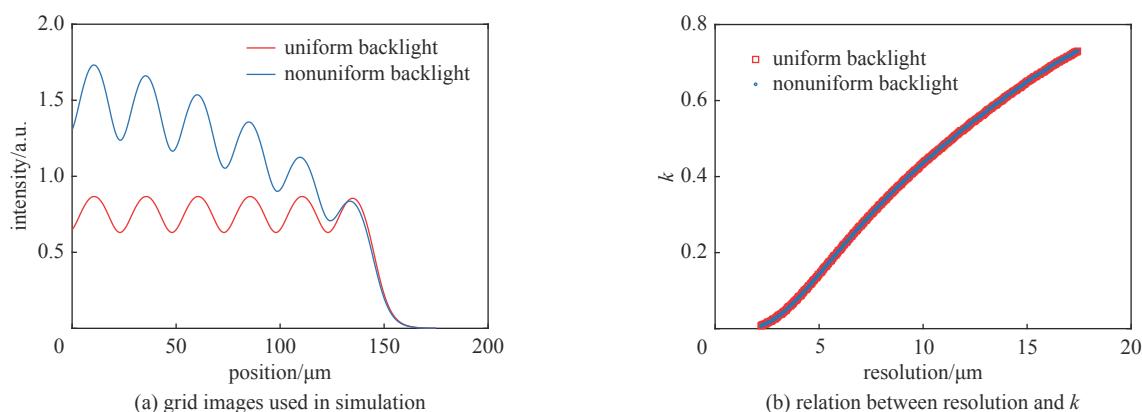


Fig. 2 Grid images used in simulation and relation between resolution and k

图 2 模拟计算中采用的网格函数及分别得到的峰谷比与系统分辨率之间的关系

图 3 为根据峰谷比反推获得的 KB 显微镜分辨率的二维分布。可以看到, 最佳系统分辨率为 $7.3 \mu\text{m}$ 。在实际的实验中, KB 显微镜的瞄准误差大约 $20 \mu\text{m}$, 靶丸的装配误差小于 $50 \mu\text{m}$ 。假设该误差均服从高斯分布, 通过计算可知芯部自发光偏离 KB 显微镜瞄准点 $54 \mu\text{m}$, 对应系统分辨率 $u_{\text{sys}} \approx 7.8 \mu\text{m}$ 。

该 KB 显微镜在同济大学实验室内的离线测试平台上进行了标定实验, 实验利用 KB 显微镜对四象限网格(四象限网格分别为 150、200、300、400 目)进行成像, 实验采用的光源尺寸为 $1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 利用 CCD 对成像结果进行记录, CCD 像素尺寸为 $6.45 \mu\text{m}$ 。实验结果及相应的空间分辨率如图 4 所示, 其中图 4(a) 为 KB 成像系统对分划板的成像结果, 图 4(b) 为图像 x 方向横截面和求解得到的 MTF; 图 4(c) 为图像 y 方向横截面和相应的 MTF。

这里采用了刀口函数法求得 KB 显微镜在最佳分辨区域的 x 方向分辨率 u_x 为 $4.4 \mu\text{m}$, y 方向分辨率 u_y 为 $3.8 \mu\text{m}$, 相应的合成分辨率 $u_{\text{KB}} = \sqrt{(u_x^2 + u_y^2)}/2 \approx 4.1 \mu\text{m}$ 。需要注意的是, 离线实验采用 CCD 记录, 记录系统的分辨率大约为 $0.4 \mu\text{m}$, 对图像分辨率的贡献可以忽略不计。

在线实验中采用的 IP 板作为记录介质, 在 20 倍放大率的条件下其物方分辨率大约为 $4.1 \mu\text{m}$ 。通过线扩展函数卷积的方法可以得到考虑 IP 板影响后的系统分辨率 $u_{\text{sys}} = 6.3 \mu\text{m}$, 略好于在线实验获得的图像分辨率。

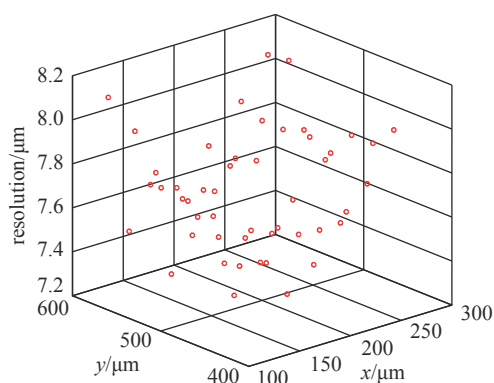


Fig. 3 Two-dimensional distribution of KB microscope resolution

图 3 KB 显微镜分辨率二维分布

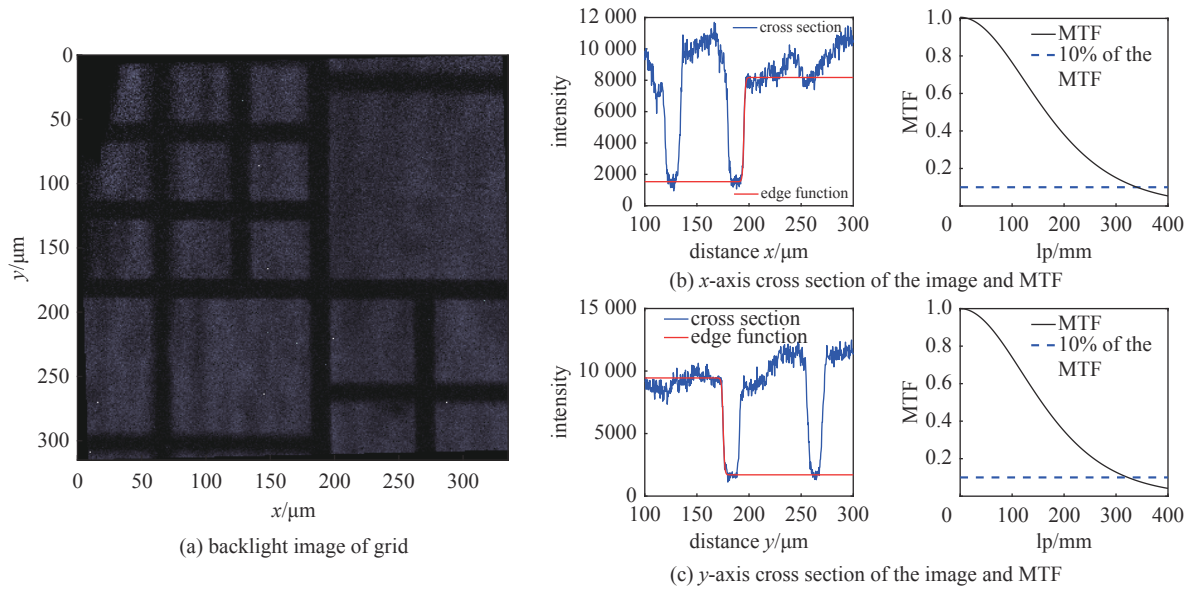


Fig. 4 Offline assessment results and resolution of KB

图 4 KB 显微镜离线考核结果及分辨率

1.2 信噪比评估

如前所述, 芯部自发光的形状是通过分析相应等高线的形状来评估的。噪声会导致芯部自发光的计数偏离真实数值, 进而造成等高线发生晃动, 影响对称性分析, 故而需要对信噪比进行分析。

忽略 IP 板读入过程所引入的噪声, 据相关文献预估噪声模型为泊松噪声^[13], 其信噪比公式为

$$\frac{1}{\delta_{\text{SNR}}} = \frac{\sigma}{\bar{n}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{n}}} \quad (3)$$

式中: δ_{SNR} 为信噪比, σ 为噪声, \bar{n} 为有效光子计数。

假设 \bar{n} 正比于 IP 板的计数^[12], 由于物理实验中采用的 IP 板完全一致, 那么其量子效率也是一样的, 即所有发次的噪声应该是同分布的。

需要注意的是受 IP 板扫描系统数据存储格式限制 (16 位 TIF), 当 IP 板中图像计数过高时会导致扫描系统将这部分数据进行灰度简并, 所以在最终统计中我们只对图像中计数在 60000 以下的进行了统计。

图 5 为 5 发内爆实验的 KB 成像数据噪声统计结果。图中曲线为采用最小二乘法对数据点进行的数据拟合, 其中黑色实线是泊松噪声公式拟合, 虚线为加入了常数项修正的泊松噪声公式。从图 5 中的数据统计和曲线拟合结果可以看到, 所有发次的噪声分析结果均基本符合泊松噪声的信噪比分布。其中需要注意的是, SN20190920220 有两次曝光结果, 分别对应图中 SN20190920220-1 和 SN20190920220-2。其中第一次曝光结果大面积饱和, 第二次曝光结果相对较弱, 但两次曝光结果获得的信噪比数据点均符合泊松分布。这说明在计算 IP 板获得图像的信噪比时, 只需要关注计数水平, 不需要考虑过程 (如初始计数高低/衰减时间长短/曝光次数多少等)。这样我们可以用统一的噪声模型对所有发次的噪声分布进行描述分析。另外, 从图 5 还可以看到, 拟合曲线 1 在高计数情况下几乎所有数据点都位于拟合曲线上方, 这意味着如果采用泊松噪声模型拟合, 在高计数条件下低估了噪声。在引入了常数项之后, 拟合曲线 2 与数据点符合得比较好。这意味着两种可能: (1) 可能存在一部分未考虑到的噪声, 比如 IP 板扫描系统的读入噪声; (2) 系统响应非线性, 在高计数的情况下, IP 板量子效率变低, 造成信噪比变差。

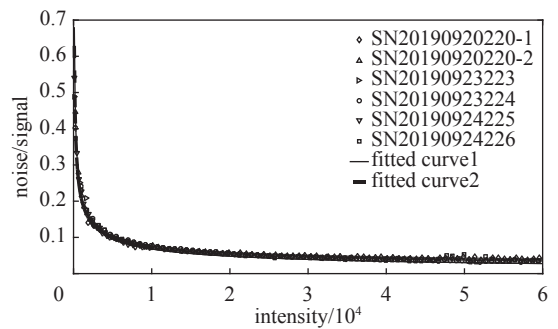


Fig. 5 SNR of image plate and fitted curve

图 5 IP 板信噪比统计及数据拟合

2 芯部自发光不确定度评估结果

以 SN20190924225 实验结果为例, 在 20% 等高线位置, 计数约 4700, $\delta_{\text{SNR}} \approx 9.8$ 。在此信噪比之下, 通过模拟可以

获得等高线的变化并统计获得噪声对分辨率的影响 $u_{\text{noise}} \approx 1.2 \mu\text{m}$ 。结合 KB 显微镜的分辨率可以得到总的分辨率 $u = \sqrt{u_{\text{sys}}^2 + u_{\text{noise}}^2} \approx 7.9 \mu\text{m}$ 。将分辨率带入式(1),可以得到相应的二阶及四阶 Legendre 不对称性的不确定度分别为: $\sigma_2 = 6.2\%$, $\sigma_4 = 8.3\%$, 基本满足内爆不对称性调谐中对热斑形变的诊断要求。

3 结 论

本文基于 KB 显微镜成像系统的在线网格背光考核实验结果,提出了一种新的在线图像分辨率分析方法,进一步分析了成像结果中的噪声模式,建立了针对 KB 显微镜的不确定度评估方法。通过分析实验结果证明,KB 显微镜成像系统的在线图像分辨率由传统针孔成像的 $20 \mu\text{m}$ 提升至 $7.8 \mu\text{m}$,在考虑瞄准精度影响的情况下与离线标定实验结果吻合。在芯部自发光实验中对内爆不对称性中的二阶和四阶 Legendre 分量诊断不确定度分别达到了 6.2% 和 8.3% ,大幅提高了实验诊断精度,基本满足了当今物理实验的对芯部自发光诊断精度的需求。未来可以继续改进 KB 显微镜成像系统设计并利用 CCD(1 像素= $9.5 \mu\text{m}$)代替 IP 板(1 像素= $25 \mu\text{m}$)作为记录介质,预期可以进一步提高系统分辨率。同时目前 KB 显微镜成像系统尚不具备时间分辨能力,而芯部自发光的不对称性在发光持续时间内存在变化(比如多台阶整形脉冲驱动下可能存在不对称性晃动^[14])。未来 KB 显微镜成像系统将进一步提高与现有的分幅相机结合,可以获得具备时间分辨(约 70ps)的芯部自发光图像,提高诊断结果的可信度。

参考文献:

- [1] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. *Phys Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.
- [2] Murphy T J, Wallace J M, Delamater N D, et al. Hohlräum symmetry experiments with multiple beam cones on the Omega laser facility[J]. *Phys Rev Lett*, 1998, 81(1): 108-111.
- [3] Kyrala G A, Kline J L, Dixit S, et al. Symmetry tuning for ignition capsules via the symcap technique[J]. *Phys Plasmas*, 2011, 18: 056307.
- [4] Pollaine S M, Bradley D K, Landen O L, et al. National Ignition Facility scale hohlraum asymmetry studies by thin shell radiography[J]. *Phys Plasmas*, 2001, 8(5): 2357-2364.
- [5] Kirkwood R K, Milovich J, Bradley D K, et al. Sensitivity of ignition scale backlit thin-shell implosions to hohlraum symmetry in the foot of the drive pulse[J]. *Phys Plasmas*, 2009, 16: 012702.
- [6] Dewald E L, Milovich J, Thomas C, et al. Experimental demonstration of early time, hohlraum radiation symmetry tuning for indirect drive ignition experiments[J]. *Phys Plasmas*, 2011, 18: 092703.
- [7] 陈伯伦, 蒋炜, 景龙飞, 等. 再发射技术测量SGII黑腔靶早期对称性[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(2): 385-388. (Chen Bolun, Jiang Wei, Jing Longfei, et al. Re-emission technique for early time, hohlraum radiation symmetry measurements on SG II facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(2): 385-388)
- [8] Dong Yunsong, Kang Dongguo, Jiang Wei, et al. Study of the asymmetry of hot-spot self-emission imaging of inertial confinement fusion implosion driven by high-power laser facilities[J]. *Plasma Sci Technol*, 2020, 22: 084003.
- [9] Town R P J, Bradley D K, Kritcher A, et al. Dynamic symmetry of indirectly driven inertial confinement fusion capsules on the National Ignition Facility[J]. *Phys Plasmas*, 2014, 21: 056313.
- [10] Pickworth L A, McCarville T, Decker T, et al. A kirkpatrick-baez microscope for the National Ignition Facility[J]. *Rev Sci Instrum*, 2014, 85: 11D611.
- [11] 穆宝忠, 吴雯靓, 伊圣振, 等. 4.75 keV能点四通道Kirkpatrick-Baez显微镜[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(4): 903-907. (Mu Baozhong, Wu Wenliang, Yi Shengzhen, et al. 4.75 keV four-channel Kirkpatrick-Baez microscope[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(4): 903-907)
- [12] Meadowcroft A L, Bentley C D, Stott E N. Evaluation of the sensitivity and fading characteristics of an image plate system for X-ray diagnostics[J]. *Rev Sci Instrum*, 2008, 79: 113102.
- [13] Pawley C J, Deniz A V. Improved measurements of noise and resolution of X-ray framing cameras at 1-2 keV[J]. *Rev Sci Instrum*, 2000, 71(3): 1286-1295.
- [14] Callahan D A, Meezan N B, Glenzer S H, et al. The velocity campaign for ignition on NIF[J]. *Phys Plasmas*, 2012, 19: 056305.