

惯性约束聚变的中子半影成像诊断系统的优化研究*

余波^{1)†} 应阳君²⁾ 许海波²⁾

1) (中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088)

2) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2009 年 8 月 26 日收到; 2010 年 1 月 22 日收到修改稿)

在激光驱动的惯性约束聚变实验中, 中子半影成像是重要的诊断方法. 基于分辨率的要求, 模拟了中子源与半影孔装置间不同距离、半影孔装置不同厚度、半影孔装置不同外径以及不同孔型的系统点扩展函数, 通过分析点扩展函数的尖锐性和等晕性优化诊断系统. 同时还给出了系统的装配误差要求, 并发现系统在线性重建时能达到 15 μm 分辨率, 而非线性重建时能满足 5 μm 分辨率的诊断要求.

关键词: 中子半影成像, Monte Carlo 方法, 系统优化, 分辨率

PACC: 5255M, 1420C, 5270

1. 引 言

中子半影成像是目前用于惯性约束聚变(ICF)实验中的重要诊断手段^[1-7]. ICF 内爆产生的 X 射线、 α 粒子、质子较难从高密度内爆核里面穿透出来, 而作为内爆产物的中子, 因不带电, 可轻易穿透. 内爆中子的发射空间分布反映了氘氚燃料压缩区的尺寸、形状、均匀性、氘氚燃料离子温度随半径的分布等信息. 中子在出射过程中, 除去与氘氚燃料的碰撞作用外, 受等离子状态影响小, 能真实反映热核反应区的原始情况.

ICF 的中子诊断图像是否实用, 取决于其所能达到的分辨率. 为在低产额下分辨内爆核结构, 要求分辨率好于 5 μm . 实验上, Ress 等^[1]于 1988 年得到了 80 μm 分辨率的内爆中子图像, 证实了中子成像技术的可行性. 随后, Disdier 等^[2,3]于 2002 年在 Omega 装置上实现了 20 μm 的分辨率, 而新近建成的美国国家点火装置 NIF 和即将建成的法国兆焦级激光器 LMJ 上要实现 5—10 μm 的分辨率. 理论上, 美国和日本等多国科学家对中子成像的模拟、解谱等方面进行了许多深入的研究, 其中也包括我国科研工作者的工作^[8-11].

中子半影成像系统的关键部件是半影孔装置.

本文利用 MCNP 程序模拟系统的点扩展函数 (PSF), 细致考虑中子源与半影孔装置间不同距离、半影孔装置不同厚度、半影孔装置不同外半径以及一些常见孔型的系统 PSF, 分析其尖锐性和等晕性, 优化中子半影成像系统. 分析系统装配误差的影响, 并通过模拟两个不同距离点源的成像, 分别使用线性方法和非线性方法重建, 测试系统的分辨率.

2. 中子半影成像原理及重建

中子半影成像作为编码成像技术的一种, 具有成像立体角大、灵敏度高、中子的收集效率高、统计噪声较小、对源中子产额要求较低的优点, 而且半影孔装置的制作也相对简单. 中子半影成像原理如图 1 所示. 一般情况下, 探测器尺寸为 16 cm \times 16 cm, $L_0 = 9$ cm, $L_1 = 900$ cm, $h = 50$ mm, $R_0 = 10$ mm, $R_1 = 0.6$ mm, $R_2 = 0.76$ mm, $R_3 = 1.07$ mm. 探测的像由中心的亮区、中间的环形半影区和外围的本底区组成, 实际有用的信息来自环形半影区, 从半影区重建源的强度分布, 即中子通量分布. 中子半影成像的半影孔材料一般选用钨^[9], 中子探测器一般采用氘化闪烁体探测器^[12].

* 中国工程物理研究院双百人才基金 (批准号: 42603) 资助的课题.

† E-mail: yubobnu@163.com

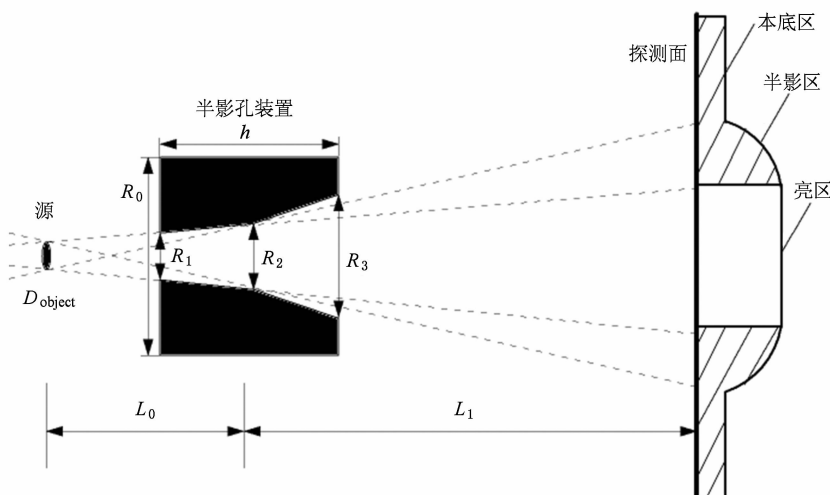


图 1 半影成像原理示意图

探测器探测到的强度分布 $g(x, y)$, 可以看作是源的强度分布 $f(x, y)$ 经过半影孔 PSF $h(x, y)$ 的卷积作用之后加上噪声 $n(x, y)$ 得到, 即

$$g(x, y) = \iint h\left(\frac{L_0}{L_0 + L_1}x, \frac{L_0}{L_0 + L_1}y\right) * f\left(-\frac{L_0}{L_1}x, \frac{L_0}{L_1}y\right) dx dy + n(x, y). \quad (1)$$

半影成像的近轴条件为

$$2r_{\text{eff}} \frac{L_1 + L_0}{L_0} \geq D_{\text{object}} \frac{L_1}{L_0}, \quad (2)$$

其中 r_{eff} 为半影孔的有效半径, D_{object} 为源的直径, L_0 为中子源到半影孔中心的距离, L_1 为半影孔中心到探测面的距离, 且有 $L_1 \gg L_0$. 当满足(2)式的近轴条件时, 半影成像系统的 PSF 可以认为是空间不变的, 半影成像近似为线性过程,

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y). \quad (3)$$

此时可以采用维纳滤波进行线性重建. 重建公式为

$$F(u, v) = \left[\frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + S_n(u, v)/S_f(u, v)} \right] \times G(u, v), \quad (4)$$

其中 $F(u, v)$, $G(u, v)$ 分别为 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 的傅里叶变换, $H^*(u, v)$ 为 $H(u, v)$ 的复共轭, $S_n(u, v)$ 和 $S_f(u, v)$ 分别是噪声图像和探测器图像的功率谱密度.

在真实的成像过程中, PSF 是空间变化的. 我们可以使用分子动力学^[13] (MD) 方法进行非线性重建, 将中子半影成像反演过程看作一个多分子体系向平衡状态演化的优化过程, 优化目标是找到一个估计源使得它和真实源的差别最小. 该差别用目标函数 $O(f, h)$ 描述为

$$O(f, h) = \sum_x^{N_x} \sum_y^{N_y} \left[\sum_x^{N_x} \sum_y^{N_y} f(x, y) h(X, Y; \{x, y\}) - g(X, Y) \right]^2, \quad (5)$$

其中 $f(x, y)$ 为中子源强分布, $h(X, Y; \{x, y\})$ 为点中子源在探测器上的响应, 也即是 PSF, $g(X, Y)$ 表示探测器最终探测到的中子半影像. 将目标函数 $O(f, h)$ 表示为该体系的势函数

$$V(r_i) = O(f, h). \quad (6)$$

当该系统达到平衡状态时, 系统势能最小, 此时中子源的源强分布为最优解. 这样对中子半影像的反演就归结为求源平面上的源强分布, 使得该分布对应的系统势能最小. 因此, 我们可以根据系统势能求解各点的力, 各点在力的作用下随时间演化, 直到系统达到稳定状态.

3. 半影诊断系统的优化

中子半影成像过程实质上就是中子在空气和半影孔装置中的输运过程, 可用 Monte Carlo 方法^[14]来模拟. Monte Carlo 方法是一种随机抽样方法, 通过概率抽样对粒子进行跟踪, 并决定每次碰撞后次级粒子的运动方向和速率. MCNP 程序是美国 Los Alamos 实验室研制的用于计算复杂三维几何结构中的粒子输运的大型多功能 Monte Carlo 程序, 广泛应用于中子、光子、电子在物质中输运过程的计算. 在模拟过程中, 为了提高计算效率, 我们采用了偏倚抽样和指数变换. 偏倚抽样是调整中子的权重, 提高小概率事件的抽样数, 在感兴趣的角度加

大抽样,在其他角度禁止抽样,以提高中子抽样效率.指数变换法是通过调整总截面,加强中子向感兴趣方向运动的能力,增大深穿透概率,从而改善强吸收或深穿透问题的计算效率.

探测器的原理是高能中子在闪烁体中通过碰撞作用将能量传递给氙原子核,反冲氙核在闪烁体中的沉积能量转化为光子输出,然后由可见光 CCD 记录,实质是中子在材料中的能量沉积过程.在近似的情况下我们认为探测器记录的图像灰度与能量沉积成正比,进而与记录面的面通量成正比.将闪烁体探测器均匀分割成 $n \times n$ 个微单元,分别记录其面通量能量.根据文献[12]描述,新型的探测器阵列的像元分辨率能达到 $400 \mu\text{m}$,因而我们将 $16 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$ 的闪烁体探测器均匀分割为 400×400 的探测单元进行模拟.

空间分辨率是评定成像系统成像质量的重要指标,而系统 PSF 是影响空间分辨率的决定因素.PSF 将直接影响重建图像的质量.好的 PSF 要求具有尖锐性和等晕性^[15],如图 2 所示.尖锐性是指 PSF 的边缘尽量陡峭,即使 $x_3 - x_1$ 和 $x_6 - x_4$ 的值尽

量小,而等晕性是指应使 $x_5 - x_2$ 的值尽量保持不变.下面我们将利用 MCNP 程序,依次讨论源到半影孔装置间不同距离、半影孔不同厚度、半影孔不同外半径和不同孔型的 PSF,并分析 PSF 的尖锐性和等晕性,目的是找到最优的系统参数.

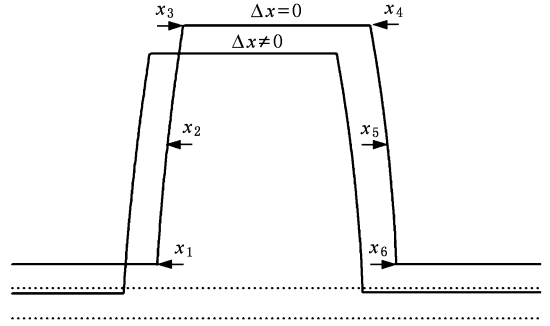


图 2 PSF 的尖锐性和等晕性示意图

3.1. 源到半影孔装置的距离 L_0

为了满足 $5 \mu\text{m}$ 的分辨率,我们设定中子半影成像系统的放大倍数 $M = L_1/L_0$ 为 100(这样探测器

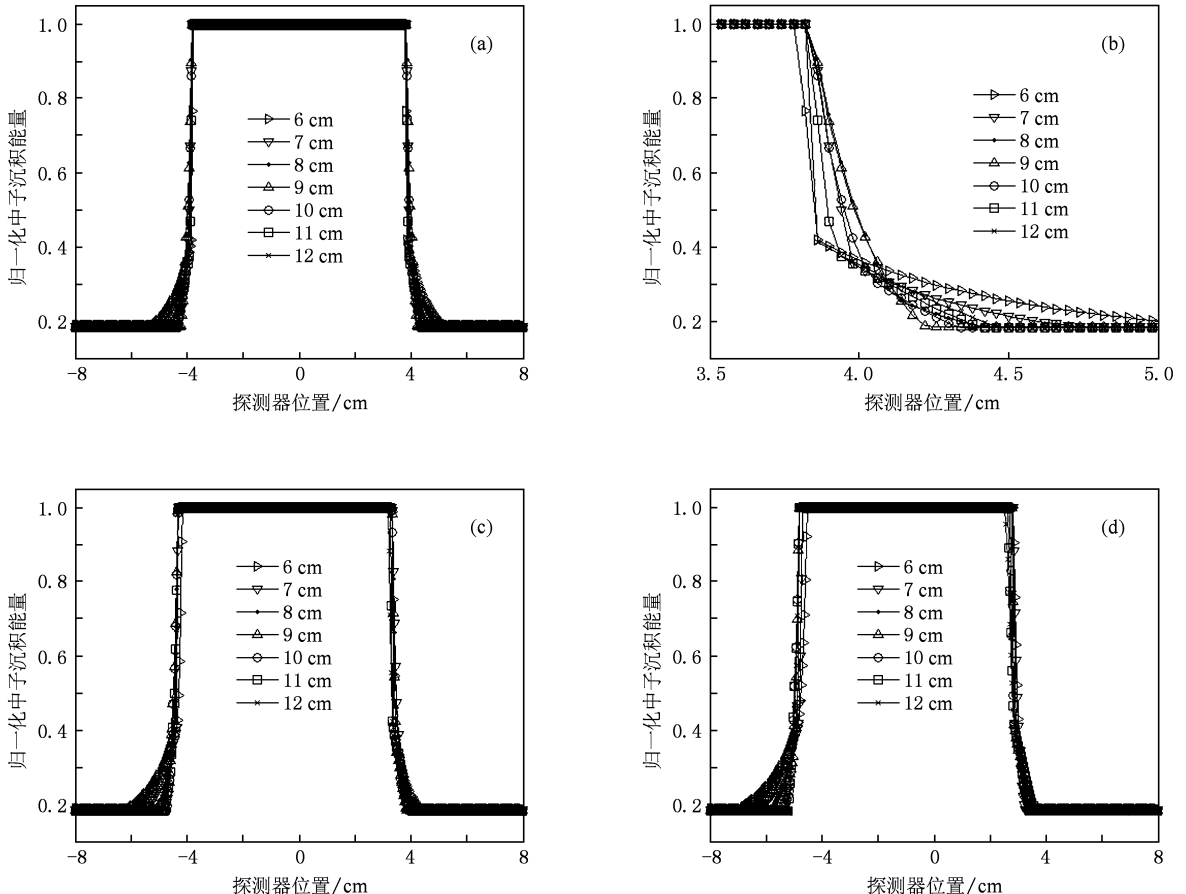


图 3 L_0 取不同值时系统的 PSF 比较 (a) $\Delta x = 0$, (b) $\Delta x = 0$ 的局部放大, (c) $\Delta x = 50 \mu\text{m}$, (d) $\Delta x = 100 \mu\text{m}$

对系统的分辨率贡献为^[12] $4 \mu\text{m}$). 以图 1 所示常用的双锥形孔为例, 固定其他参数, 模拟源到半影孔不同距离下的 PSF, 并根据尖锐性和等晕性, 对 L_0 取不同值时系统的 PSF 进行比较. 图 3 是偏离轴 $\Delta x = 0, 50, 100 \mu\text{m}$, L_0 取不同值时系统的 PSF.

从图 3 可以看出, 当 L_0 为 9 cm 时, 虽然 PSF 的等晕性不具有明显优势, 但 PSF 的尖锐性更好, 即使是 $\Delta x = 100 \mu\text{m}$, PSF 的对称性也比其他好, 比较利于线性与非线性重建. 因此, 当 $L_0 = 9 \text{ cm}$, $L_1 = 9 \text{ m}$ 时, 系统的 PSF 更好. 以神光 III 原型为例, 中子的产额约为 10^{14} 个, 到达每个探测单元上的中子数为 2800—15000, 满足统计的要求.

3.2. 半影孔装置的厚度

为了有较高的对比度或是更清晰的半影区图像, 穿透半影屏蔽体的中子越少越好, 这就要求半影孔装置要有若干个平均自由程的厚度. 根据实际情况, 取 2—3 个自由程比较合适. 14 MeV 中子对钨的平均自由程约为 3 cm, 因此半影孔最合适的厚度取 5—10 cm. 固定源到半影孔的距离、半影孔外半径及中心和两头内半径尺寸, 改变半影孔装置的厚度, 比较不同厚度下系统的 PSF, 结果如图 4 所示.

从图 4 可以看出, 装置厚度在 5 cm 时, 虽然本底会大一些, 但 PSF 的尖锐性更好, 更利于诊断图像重建.

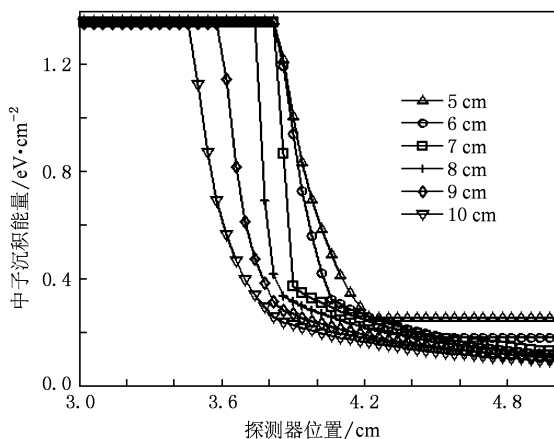


图 4 厚度取不同值时系统的 PSF 比较

3.3. 半影孔装置的外半径

中子在与半影孔材料碰撞后散射方向是随机的, 半影孔装置外半径的不同势必会影响散射中子数量, 也势必会影响到达探测阵列面的中子数量.

通过模拟不同外半径的 PSF, 比较不同外半径时的散射中子贡献和 PSF 的本底大小, 选择适合的装置外半径, 结果如图 5 所示.

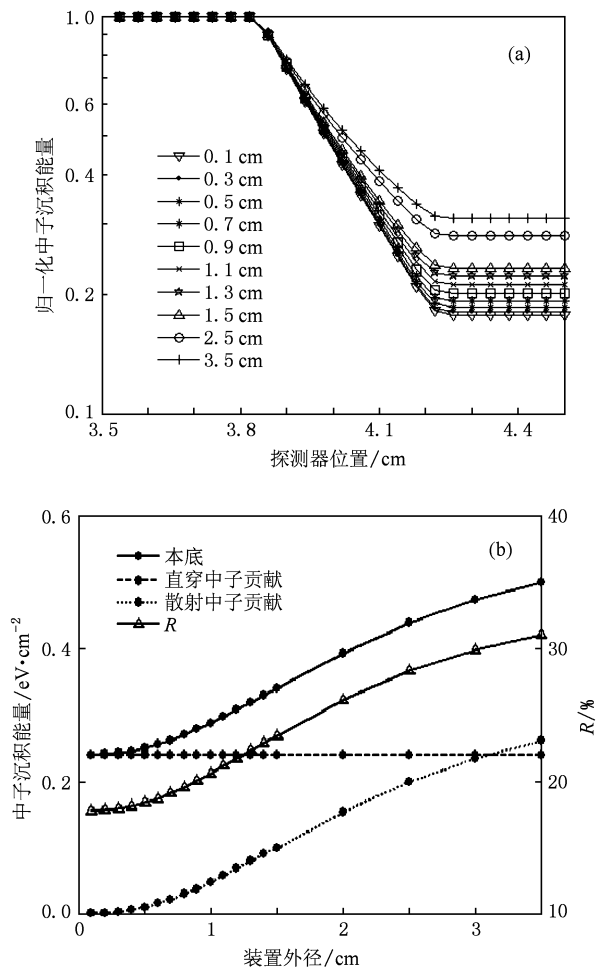


图 5 外径取不同值时系统的 PSF 比较 (a) 不同外半径的 PSF, (b) 不同外半径对应的本底大小

从图 5 可知, PSF 的本底随着半影孔装置外半径的增加而增加. 因为 ICF 产生的中子源为各向同性源, 增大半影孔的外半径会增加发生碰撞的中子数, 从而增大中子散射到探测面的概率, 在直穿中子贡献不变的情况下, 增加 PSF 的本底. 从图 5 还可以看到, PSF 的本底与中心亮区之比 R 在外半径小于 1 cm 时小于 20%, 且在外半径大于 0.5 cm 后散射中子贡献有增速加快的趋势. 结合加工和机械性能, 我们认为半影孔装置外半径选择 0.5 cm 比较适宜.

3.4. 半影孔的不同孔型

半影孔的孔型直接决定着 PSF 的曲线形状. 我们选择了 6 种典型的半影孔, 分别计算点源在轴上和偏离轴 50, 100 μm 时的 PSF, 结果如图 6 所示.

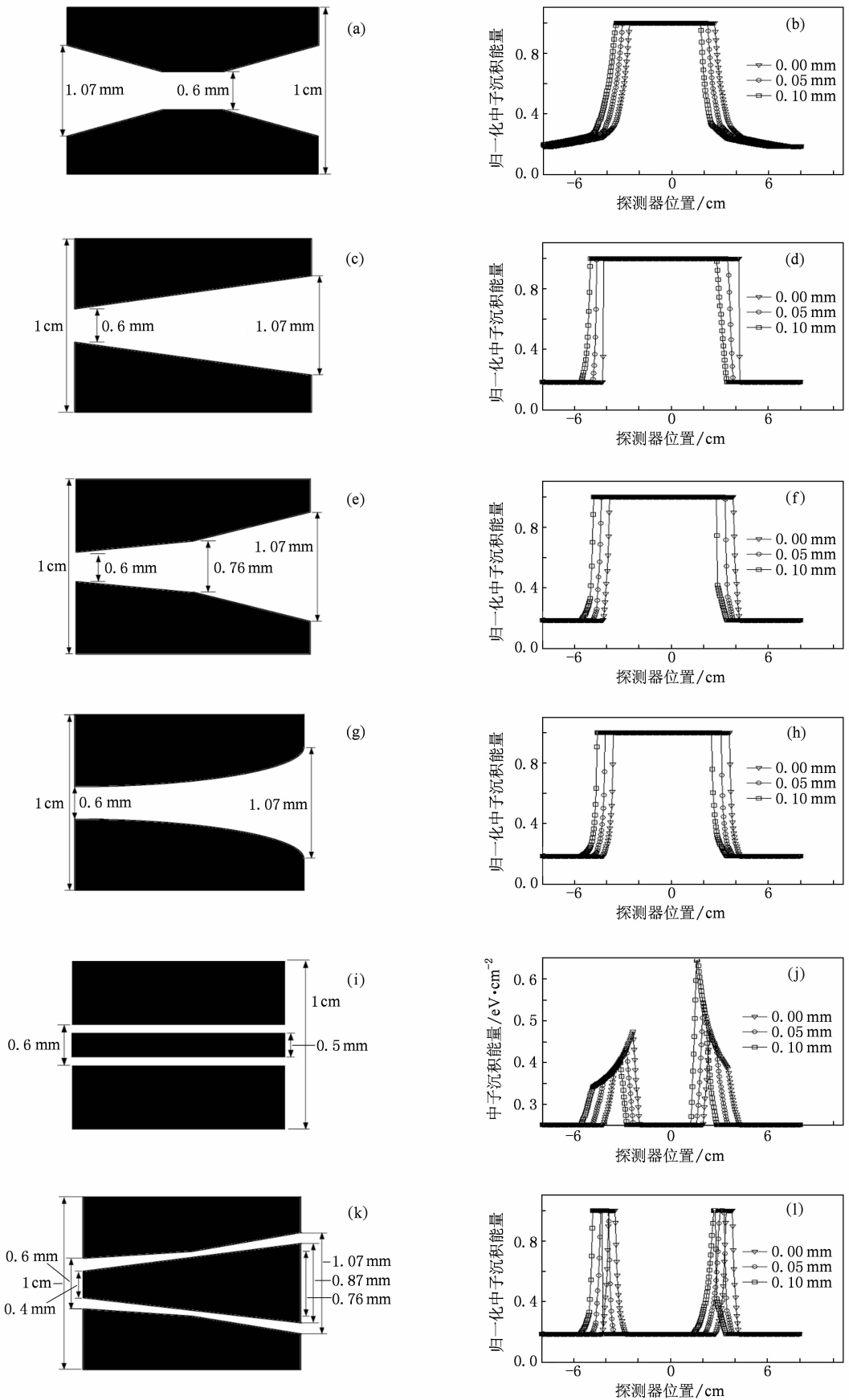


图6 一些常见孔型及其PSF 各孔型 h 均为50 mm. (a)孔I, (b)孔I的PSF, (c)孔II, (d)孔II的PSF, (e)孔III, (f)孔III的PSF, (g)孔IV, (h)孔IV的PSF, (i)孔V, (j)孔V的PSF, (k)孔VI, (l)孔VI的PSF

比较图 6 的结果可以看出: 孔 V 由于偏离轴不同位置时 PSF 出现明显差异, 不适用于线性重建, 仅适用于非线性重建的情况; 孔 VI 由于开口比较窄, 对中子的产额要求比较高, 不适用于低产额源; 孔 II、孔 III、孔 IV 在尖锐性方面明显优于孔 I; 孔 II 的尖锐性优于孔 IV, 但孔 II 在偏离轴不同位置时的 PSF 的差异比较大, 因而我们推荐选用孔 III. 孔 III 的具体参数如图 6(e) 所示, 其中最小内径 0.6 mm 是基于加工工艺限制的考虑.

4. 系统的装配误差容忍性

鉴于半影孔的内径和被成像内爆核的尺寸很小, 而探测面距离内爆核有 9 m 多, 中子半影成像系

统需要精确的安装. 我们利用 MCNP 程序, 模拟圆形平面源在经优化后的半影成像系统中成像, 即 L_0 为 9 cm、厚度为 5 cm、外半径为 0.5 cm 的双锥孔系统, 通过改变内爆核球心偏离轴 Δx 和沿轴前后偏移 ΔL_0 , 考察系统对装配误差的容忍性. 维纳滤波重建半影像得到的结果如图 7 所示.

从图 7 可以看到: 在内爆核偏离轴 40 μm 时边缘有微小的畸变, 60 μm 时非常明显; 而当内爆核往后远离半影孔 2 mm 时, 重建图像明显被压缩; 当内爆核往前靠近半影孔 2 mm 时, 重建图像被拉大. 因而在安装仪器时, 靶相对于轴的偏移要控制在 40 μm 内, 相当于半影孔的旋转角度要控制在 0.5 mrad 内^[16,17]; 沿轴前后的偏移要控制在 1 mm 内.

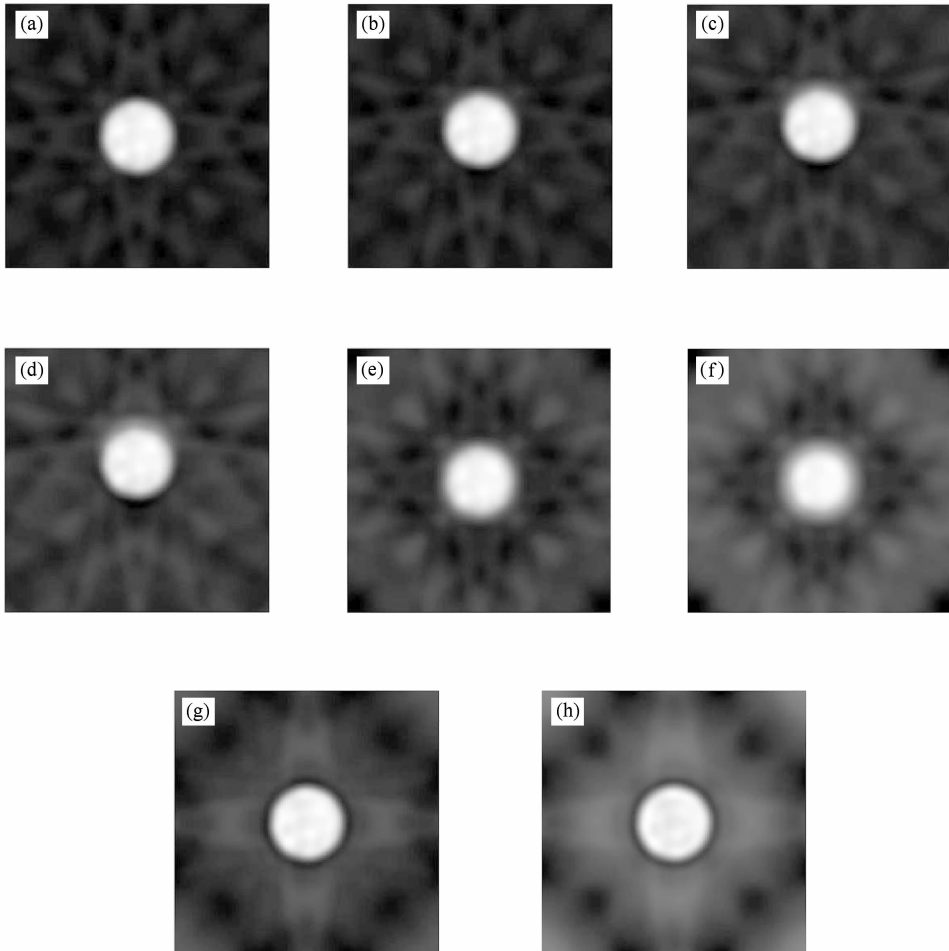


图 7 系统的装配误差容忍性模拟 (a) $\Delta x = 0$; (b) $\Delta x = 20 \mu\text{m}$; (c) $\Delta x = 40 \mu\text{m}$; (d) $\Delta x = 60 \mu\text{m}$; (e) 后移, $\Delta L_0 = 1 \text{ mm}$; (f) 后移, $\Delta L_0 = 2 \text{ mm}$; (g) 前移, $\Delta L_0 = 1 \text{ mm}$; (h) 前移, $\Delta L_0 = 2 \text{ mm}$

5. 优化后半影成像系统的分辨率

分辨率的传统定义如下: 测量相互靠近的两个理想等幅点源目标的成像幅度, 如果两个点源图像连线中心点上的幅度比点源处的最大幅度低于

19%, 两个点源目标的距离就表示成像系统的分辨率^[18]. 根据此定义, 我们利用 MCNP 程序分别模拟两相距为 5, 10, 15, 20 μm 的点源在优化后的中子半影成像系统中的成像, 并使用维纳滤波方法和 MD 方法进行重建, 测试系统的分辨率. 重建结果如图 8 和图 9 所示.

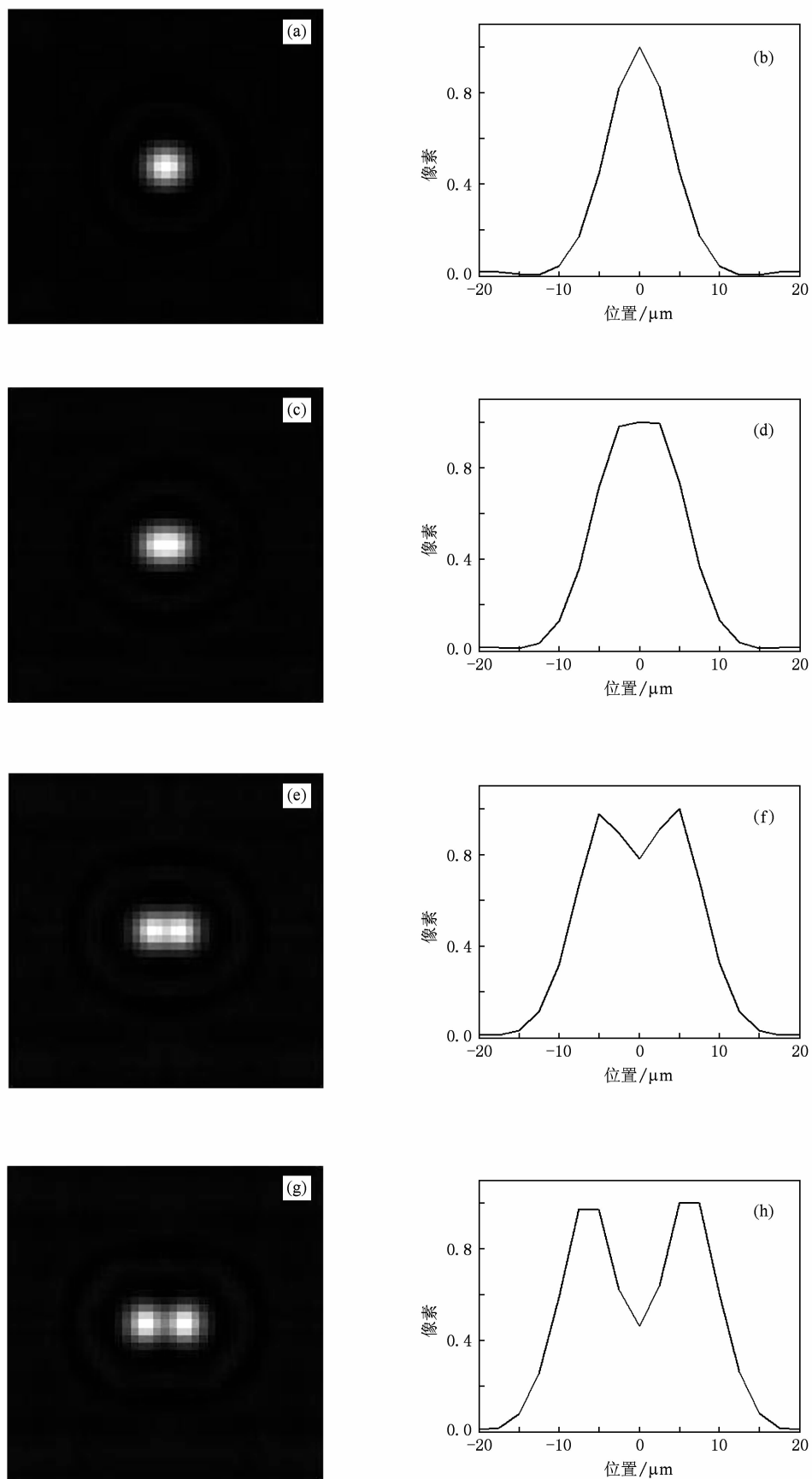


图8 不同间隔点源的维纳滤波重建结果 (a)5 μm , (b)5 μm 时的剖面, (c)10 μm , (d)10 μm 时的剖面, (e)15 μm , (f)15 μm 时的剖面, (g)20 μm , (h)20 μm 时的剖面

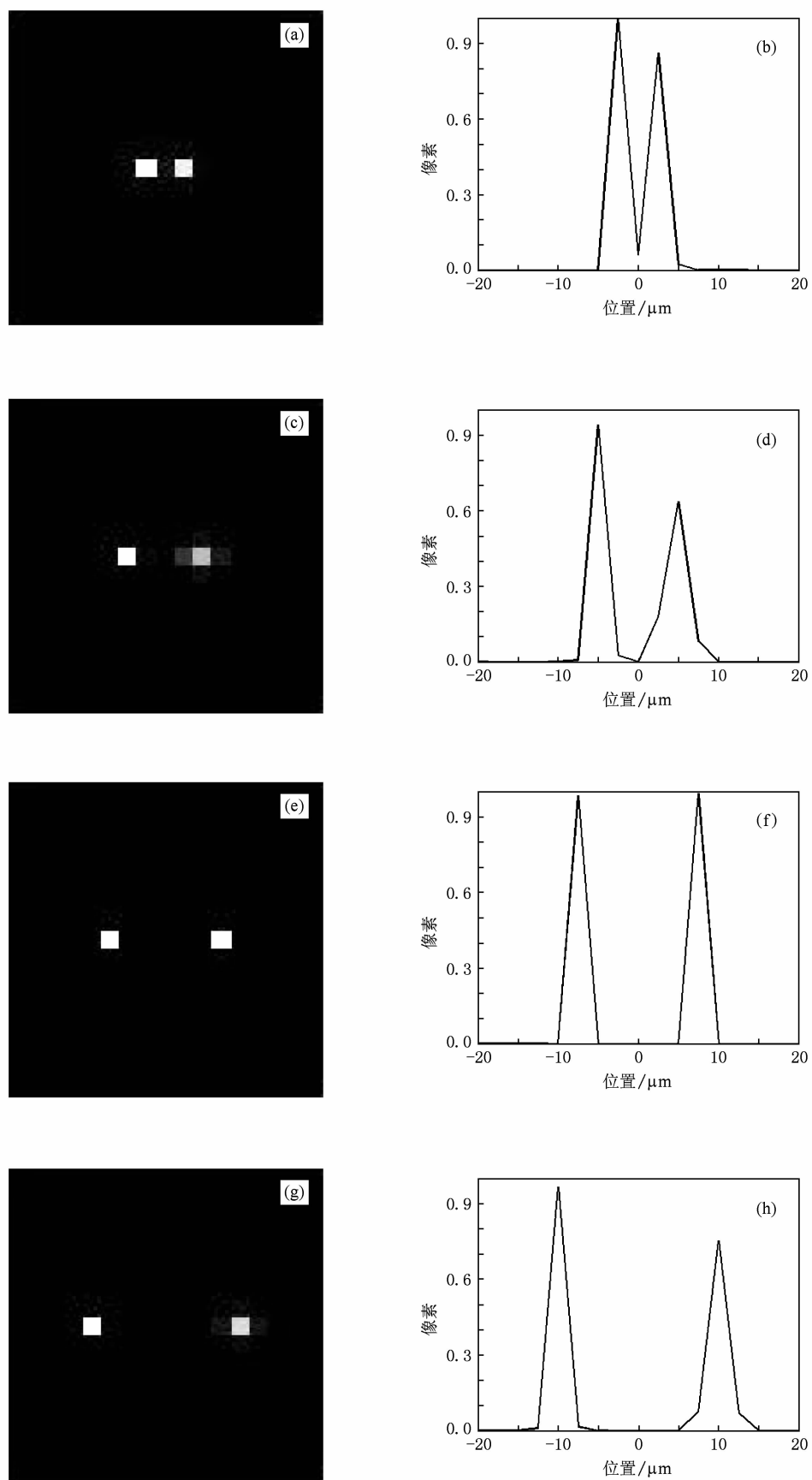


图9 不同间隔点源的 MD 方法重建结果 (a)5 μm , (b)5 μm 时的剖面, (c)10 μm , (d)10 μm 时的剖面, (e)15 μm , (f)15 μm 时的剖面, (g)20 μm , (h)20 μm 时的剖面

从图 8 和图 9 可知,维纳滤波方法的重建只能达到 $15\ \mu\text{m}$ 的分辨率,而 MD 方法能重建出满足诊断要求的 $5\ \mu\text{m}$ 分辨率的图像,而且还可以根据需要得到更高的分辨率. 需特别说明的是,我们编写了半影成像数值模拟的 MATLAB 程序,并与 MCNP 程序模拟的 PSF 做了比较,发现他们之间的差异小于 0.4%,因此在做 MD 方法重建时为减少计算量,源平面各点的 PSF 是由 MATLAB 模拟得到,故 MD 方法中的剖面会出现双峰值大小不严格相同的现象.

6. 结 论

我们利用 MCNP 程序细致模拟了中子半影成

像诊断系统的 PSF,考虑了中子源与半影孔装置间不同距离、半影孔装置不同厚度、半影孔装置不同外径以及一些常见孔型的系统 PSF,通过分析 PSF 的尖锐性和等晕性发现:当源与半影孔装置间的距离为 $9\ \text{cm}$ 、装置厚度为 $5\ \text{cm}$ 、外半径为 $0.5\ \text{cm}$ 、半影孔为双锥形时,系统用于中子半影成像诊断效果最好;经过优化的系统在安装时,半影孔的旋转误差要控制在 $0.5\ \text{mrad}$ 内,沿轴前后的偏移要控制在 $1\ \text{mm}$ 内. 通过模拟和重建相隔不同距离的两点源图像,得出系统在线性重建情况下能达到 $15\ \mu\text{m}$ 分辨率,而非线性重建能达到 $5\ \mu\text{m}$ 分辨率. 研究更好的非线性重建方法将是我们下一步的工作.

- [1] Ress D, Lerche R A, Ellis R J, Nugent K A 1988 *Science* **241** 956
- [2] Disdier L, Rouyer A, Fedotoff A, Bourgade J L, Marshall F J, Glebov V Y, Stoeckl C 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 1832
- [3] Disdier L, Rouyer A, Lantuéjoul I, Landoas O, Bourgade J L, Sangster T C, Glebov V Y, Lerche R A 2006 *Phys. Plasmas* **13** 56317
- [4] Morgan G L, Berggren R R, Bradley P A, Cverna F H, Faulkner J R, Gobby P L, Oertel J A, Swenson F J, Tegmeier J A, Walton R B, Wilke M D, Wilson D C 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 865
- [5] Christensen C R, Barnes C W, Morgan G L, Wilke M D, Wilson D C 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 2690
- [6] Christensen C R, Barnes C W, Morgan G L, Wilke M D, Bradley P A, Gobby P L 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 1705
- [7] Disdier L, Rouyer A, Wilson D C, Fedotoff A, Stoeckl C, Bourgade J L, Glebov V Y, Garçonnetta J P, Sekac W 2002 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **489** 496
- [8] Zhao Z Q, Ding Y K, Liu D J, Tang C H, Wen S H, Pu Y K 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 1203 (in Chinese) [赵宗清、丁永坤、刘东剑、唐昶环、温树槐、蒲以康 2006 强激光与粒子束 **18** 1203]
- [9] Chen F X, Zhen J, Yang J L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5947 (in Chinese) [陈法新、郑 坚、杨建伦 2006 物理学报 **55** 5947]
- [10] Liu D J, Tang C H, Zhao Z Q, Dong J J, An Z 2006 *High*

Power Laser and Particle Beams **18** 1199 (in Chinese) [刘东剑、唐昶环、赵宗清、董建军、安 竹 2006 强激光与粒子束 **18** 1199]

- [11] Jiang M, Hu B Q, Ma Q L, Tang S B, Fang Z Y, Zeng D M 2008 *Acta Photon. Sin.* **37** 310 (in Chinese) [蒋 敏、胡炳全、马庆力、唐世彪、方祯云、曾代敏 2008 光子学报 **37** 310]
- [12] Disdier L, Lerche R A, Bourgade J L, Glebov V Y 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 2134
- [13] Liu D J, Zou L, Tang C H, Zhao Z Q, Hou Q, An Z 2007 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **578** 537
- [14] Pei L C, Zhang X Z 1980 *Monte Carlo Methods and Their Application to Particle Transport Problems* (Beijing: Science Press) pp123,270 [裴鹿成、张孝泽 1980 蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用(北京:科学出版社)第 123,270 页]
- [15] Chen Y W, Nakao Z 1996 *Bull. Faculty Eng. Univ. Ryukyus* **52** 157
- [16] Ghilea M C, Sangster T C, Meyerhofer D D, Lerche R A, Disdier L 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 023501
- [17] Zhao Z Q, Ding Y K, Hao Y D, Yuan Y T, Pu Y K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5756 (in Chinese) [赵宗清、丁永坤、郝轶聃、袁永腾、蒲以康 2008 物理学报 **57** 5756]
- [18] Zhou M Y 2001 *Deconvolution and Signal Recovery* (Beijing: National Defense Industry Press) p188 [邹谋炎 2001 反卷积和信号复原(北京:国防工业出版社)第 188 页]

Optimization of diagnostic system for neutron penumbral imaging in inertial confinement fusion *

Yu Bo^{1)†} Ying Yang-Jun²⁾ Xu Hai-Bo²⁾

1) (*Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China*)

2) (*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

(Received 26 August 2009; revised manuscript received 22 January 2010)

Abstract

Penumbral imaging of the neutron production in laser-driven inertial confinement fusion experiment is an important diagnostic technique. In order to meet the resolution requirement, we simulate the point spread function (PSF) under the conditions of different source-aperture distances, different thicknesses, different outer radii, and different shapes of the aperture. Base on the sharpness and the isoplanaticity of PSF, the diagnostic system can be optimized. According to the simulation results, tolerant misalignment of system is analysed; a resolution of 15 μm can be satisfied by the linear reconstruction method, and a resolution of 5 μm can be achieved by using the nonlinear reconstruction method.

Keywords: neutron penumbral imaging, Monte Carlo method, system optimizing, resolution

PACC: 5255M, 1420C, 5270

* Project supported by the Foundation of Double-Hundred Talents of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 42603).

† E-mail: yubobnu@163.com