

中子半影成像的计算机断层重建技术

余 波 黄天暄 陈伯伦 苏 明 蒋 炜 刘慎业

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 实际用于中子半影成像重建的方法都是线性方法, 而计算机断层重建是一种能够用于中子半影成像重建的新方法。介绍了中子半影成像的断层重建原理, 将半影成像的诊断图像沿径向等角度提取、微分后就可以使用断层重建方法重建。给出了使用卷积反投影方法重建不同噪声诊断图像的结果, 并分析了断层重建的优缺点。重建结果表明, 断层重建方法能够重建出源分布, 且诊断图像的信噪比越高, 重建效果越好。断层重建方法不需全仿真模拟系统点扩展函数, 能够自动挑选探测图像有用的半影区数据, 删除探测图像中无用的亮区和本底区数据, 避免了无用数据的强干扰。

关键词 成像系统; 惯性约束聚变; 图像恢复; 中子半影成像; 计算机断层重建

中图分类号 O571.73; TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1111001

Computed Tomography Reconstruction Technology for Neutron Penumbra Imaging

Yu Bo Huang Tianxuan Chen Bolun Su Ming Jiang Wei Liu Shenye

(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The useful reconstruction technologies for neutron penumbral imaging are all linear method, and computed tomography (CT) is one of linear methods. The principle of the CT reconstruction for neutron penumbral imaging is introduced, and the detecting image with penumbral imaging, which is extracted and differentiated along radial direction, can be reconstructed by the CT method. The detecting imaging with different noises is decoded by convoluted backprojection method, and the advantages and disadvantages of the CT reconstruction are analyzed. According to the results, the source distribution can be reconstructed by the CT method, and the higher the signal-to-noise ratio of the detecting imaging is, the better reconstruction result is. The point spread function doesn't needs to be fully simulated before decoding, and the results will not be interfered by the useless data, because the useful data can be automatically picked from the penumbral region, and the useless data will be deleted in the bright and dark regions.

Key words imaging system; inertial confinement fusion; imaging reconstruction; neutron penumbral imaging; computed tomography reconstruction

OCIS codes 110.3020; 110.6960; 170.1630

1 引 言

中子半影成像^[1~4]是利用内爆产物的中子对热核反应区成像, 从而获取氘氚燃料压缩区的尺寸、形状、均匀性和氘氚燃料离子温度随半径的分布等信息。与 X 射线、 α 粒子和质子相比, 中子因不带电, 在出射过程中, 除去与氘氚燃料的碰撞作用外, 受等离子体状态影响小, 更能真实反映热核反应区的原始

情况。实验上, Ress 等^[5]于 1988 年利用圆弧型编码孔得到了 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。Disdier 等^[6,7]分别利用双锥型和环型编码孔在 Omega 装置上实现了 20 μm 的分辨率。2007 年, Grim 等^[8]利用多针孔阵列成像, 在 Omega 装置上实现了 14 μm 的空间分辨率。

惯性约束聚变的中子诊断图像是否有效, 依赖

收稿日期: 2011-05-06; **收到修改稿日期**: 2011-05-25

基金项目: 重点实验室基金(9140C680102002)资助课题。

作者简介: 余 波(1984—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事惯性约束聚变物理诊断及设备研发方面的研究。

E-mail: yubobnu@163.com

于其能达到的分辨率。为了在低产额下分辨内爆核结构,要求分辨率好于 $5 \mu\text{m}$,因而发展高精度的重建方法非常重要。由于加工误差、瞄准精度和计算机模拟方面的限制,实际能够用于反演的方法大多是线性方法,包括维纳滤波^[9]、自相关滤波^[10]和 R-L 算法^[11]。

本文介绍了一种全新的线性重建算法——断层重建方法,介绍了断层重建的原理,给出了使用卷积反投影方法重建诊断图像的结果,分析了断层重建的优缺点。

2 中子半影成像原理及重建

中子半影成像原理如图 1 所示。探测的像由中央的亮区、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。优化后的中子半影成像诊断系统的各参数如图 1 所示,中子半影成像的半影孔材料一般选用钨^[12],中子探测器一般采用氙化闪烁体探测器^[13]。

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 $f(x, y)$ 经过半影孔点扩展函数 $h(x, y)$ 的卷积作用之后,加上噪声 $n(x, y)$ 得到,即

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

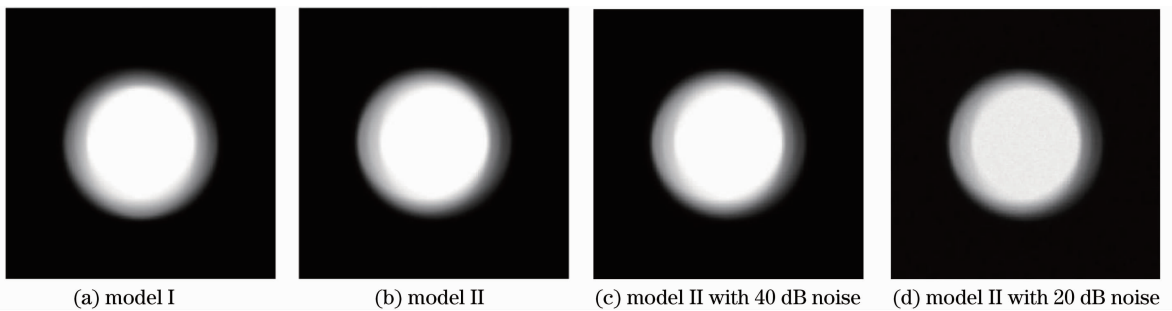


图 3 中子半影成像模拟结果

Fig. 3 Simulation result of neutron penumbral imaging

3 断层重建方法

为了便于诊断图像的线性重建,中子半影成像系统必须满足近轴条件。半影成像的近轴条件为

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

式中 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

选择如图 2 所示的两种源,使用蒙特-卡罗方法正向模拟得到的中子半影成像测试图像如图 3 所示。图 3(c)和(d)添加了泊松噪声,图像的信噪比分别为 40 和 20 dB。

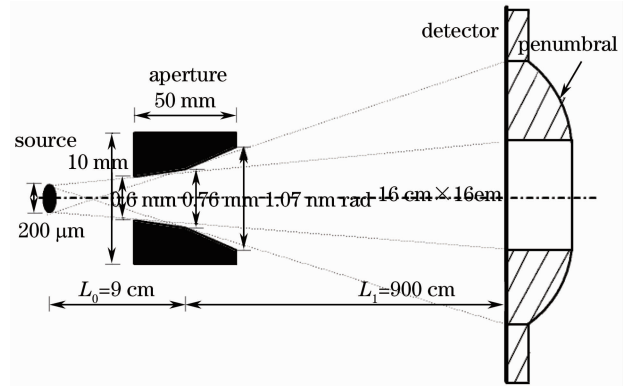


图 1 半影成像原理示意图

Fig. 1 Principle of penumbral imaging

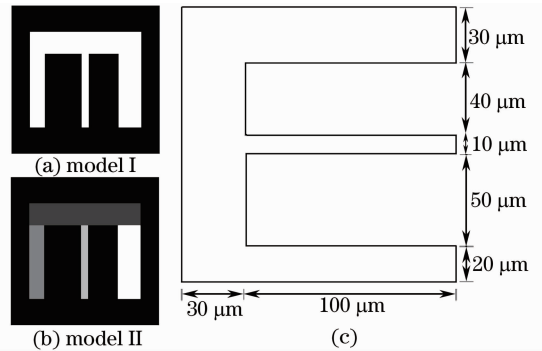


图 2 模拟所用源

Fig. 2 Source for simulation

探测面的距离,且有 $L_1 \gg L_0$ 。当满足近轴条件时,系统的点扩展函数可以认为是空间线性不变的,半影成像近似为线性过程

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

理论上,在系统点扩展函数 $h(x, y)$ 已知的情况下,源信息可以通过维纳滤波等线性方法进行重建。系统点扩展函数是影响空间分辨率的决定因素,通

常运用蒙特-卡罗方法模拟成像主轴上一个点源通过半影孔在探测器平面上成像而得。然而,点扩展函数模拟受装置和靶室的散射中子、统计噪声、装置的瞄准误差三个因素影响,特别是在系统的瞄准误差无法知晓的情况下,点扩展函数是很难准确模拟得到,重建精度势必会受到影响。

数学上,半径为 R ,空间线性不变的中子半影成像系统的点扩展函数可表示为

$$h(x, y) = \prod \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R} \right),$$

有
$$\prod (\rho) = \begin{cases} 1 \Rightarrow \forall \rho \leq 1 \\ \alpha \Rightarrow \forall \rho > 1 \end{cases}, \quad (4)$$

式中 α 为本底区的值。对 $h(x, y)$ 沿半径方向求导有

$$h_\theta(R) = \frac{\partial h(R, \theta)}{\partial R} = \frac{\partial h(x, y)}{\partial R} = \delta(\sqrt{x^2 + y^2} - R). \quad (5)$$

图4是对系统点扩展函数沿半径提取、求导的结果。理想的点扩展函数是半径为 R 的圆台,求导后在圆台边缘位置为脉冲型 δ 函数。但由于实际系

统点扩展函数的台阶边缘的尖锐性并不理想,因而求导后的结果并不是严格的 δ 函数。

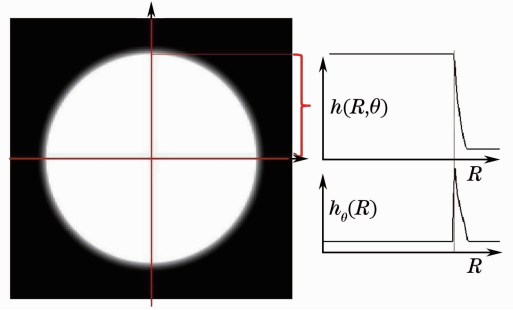


图4 点扩展函数的径向微分

Fig. 4 Radial differential of point spread function

从图4可以看出,半影成像实际上是厚刀口法的二维推广,半影孔可以看作是孔径台阶体,孔形台阶的直径远大于目标尺寸。半影成像和台阶法一样,要求台阶边缘足够陡峭,以便使系统点扩展函数的尖锐性足够好;同样需要考虑放大倍数、物距、台阶的厚度、台阶的瞄准精度对结果的影响。

忽略噪声,中子半影成像可以表示为

$$g(R, \theta) = g(x, y) = \iint f\left(-\frac{L_0}{L_1}x, \frac{L_0}{L_1}y\right) * h\left(\frac{L_0}{L_0 + L_1}x, \frac{L_0}{L_0 + L_1}y\right) dx dy = \iint f\left(-\frac{L_0}{L_1}x, \frac{L_0}{L_1}y\right) * \prod \left[\frac{\sqrt{\left(\frac{L_0}{L_0 + L_1}x\right)^2 + \left(\frac{L_0}{L_0 + L_1}y\right)^2}}{R} \right] dx' dy'. \quad (6)$$

对探测图像沿半径方向提取、微分有

$$g_\theta(R) = \frac{\partial g(R, \theta)}{\partial R} = \iint f\left(-\frac{L_0}{L_1}x, \frac{L_0}{L_1}y\right) * \delta\left(\sqrt{\left(\frac{L_0}{L_0 + L_1}x\right)^2 + \left(\frac{L_0}{L_0 + L_1}y\right)^2} - R\right) dx' dy'. \quad (7)$$

此时, $g_\theta(R)$ 可以看作是 $f(x, y)$ 拉东(Radon)变换的结果,重建 $f(x, y)$ 可以选择已发展数十年的计算机断层重建技术^[14,15] (CT)。CT 成像技术是20世纪60年代发展起来的一种广泛应用于医学检查和工业无损检测的诊断技术。CT 成像技术先对被检测物体投影,然后用反投影方法重建图像。

CT 重建包括卷积反投影重建、滤波反投影重建、迭代重建、统计重建等。使用卷积反投影方法的重建公式为

$$\begin{cases} f(x, y) = \int_0^{2\pi} \omega g' [R_0 - (x \cos \theta + y \sin \theta), \theta] d\theta \\ R_0 = \sqrt{r_0^2 - (x \sin \theta - y \cos \theta)^2} \\ \omega = 1 - \frac{(x \cos \theta + y \sin \theta)}{R_0} \\ g'(r, \theta) = h(r) * F_{\text{smooth}}(r) * [C(r) \times g(r, \theta)] \end{cases}, \quad (8)$$

式中 r_0 是系统点扩展函数的半径; $h(r)$ 是卷积核; $F_{\text{smooth}}(r)$ 是除噪滤波函数,用于减小统计噪声;权重因子 ω 为源平面不同点不同投影角度给出不同的权重,以减小在远离半影区时的失真;权重因子 $C(r)$ 用于近似的补偿因积分路径而引起的投影误差,对于对称的源,常用的表达式为^[14]

$$C(r) = (1 - 0.22l) [(\pi/3) \sqrt{1 - l^2} / \arccos(r/2r_0)]^{1.4}, \quad l = r/r_0 - 1. \quad (9)$$

图5是中子半影诊断图像的卷积反投影重建结果。图5(a)即为图3(a)所示的等强度源模拟结果,图5(b)为间隔1度沿径向方向抽取的数据,图5(c)为数据对半径微分后得到的正弦图,图5(d)是滤波和权重调整后的正弦图,图5(e)为重建结果。从结果可以看出,重建结果能重现源的结构,效果令人满意。

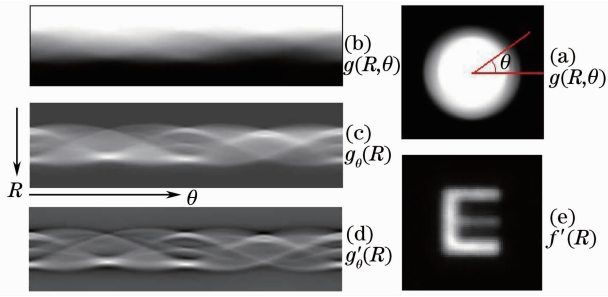


图 5 Model I 的重建结果

Fig. 5 Reconstruction results of model I

断层重建时,可以选择的方法多,方法成熟。重建时仅需知道系统点扩展函数的半径 r_0 即可,不用全仿真模拟系统点扩展函数。因为微分的作用,断

层重建能够自动挑选探测图像有用的半影区数据,删除无用的亮区和本底区数据,特别是亮区的强信号数据。通过权重因子 w 为源平面不同点不同投影角度给出不同的权重,减小半影区以外数据的干扰。另外,由于数据旋转提取时只能提取部分数据,如果能有更好的数据提取方式,重建的精度还能进一步提高。

图 6 是不等强度源在不同噪声时的卷积反投影重建结果。当信噪比较高时,重建结果能够重现源的信息,本底噪声小,重建效果较好;当信噪比减小时,源结构能分辨,但重建结果的本底噪声比较严重。由此可见,噪声对断层重建结果影响较大。

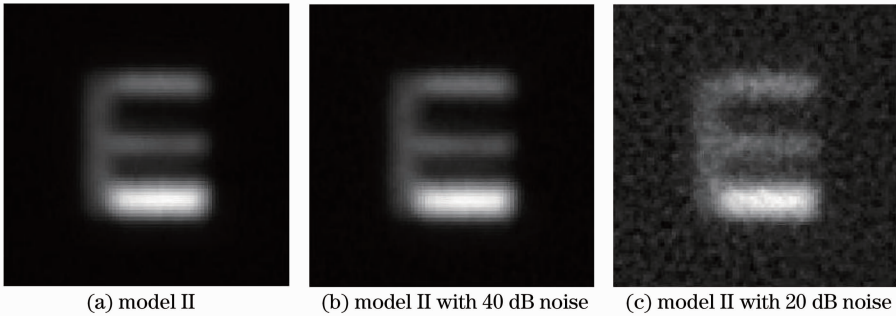


图 6 Model II 的重建结果

Fig. 6 Reconstruction results of Model II

4 结 论

介绍了一种新的线性重建算法,把常用于医学检查和工业无损检测的断层重建技术引入到中子半影成像的重建。详细推导了中子半影成像的断层重建原理,将半影成像的诊断图像沿径向等角度提取、微分后,就可以用断层重建方法重建。通过使用卷积反投影方法对不同噪声诊断图像进行重建可以看出,断层重建方法适用于半影成像重建,能够重建出源分布,且诊断图像的信噪比越高,重建效果越好。断层重建方法不需全仿真模拟系统点扩展函数,能够自动挑选探测图像有用的半影区数据,删除无用的亮区和本底区数据,避免了无用数据的强干扰。另外,由于等角度旋转提取数据时只能提取部分数据,如果能有更好的数据提取方式,重建的精度还能进一步提高。而对除噪滤波函数的选择和断层重建方法的选择同样还能进一步的探讨。

参 考 文 献

1 J. D. Lindl, P. Amendt, R. L. Berger *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 O. Delage, J. P. Garconnet, D. Schirmann *et al.*. Neutron penumbral imaging of inertial confinement fusion targets at Phébusa[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(2): 1205~1209

3 T. J. Murphy, C. W. Barnes, R. R. Berggren *et al.*. Nuclear diagnostics for the National Ignition Facility [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(1): 773~779

4 V. Y. Glebov, D. D. Meyerhofer, T. C. Sangster *et al.*. Development of nuclear diagnostics for the National Ignition Facility[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(10): 10E715-1~7

5 D. Ress, R. A. Lerche, R. J. Ellis *et al.*. Neutron imaging of inertial confinement fusion targets at Nova [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **59**(8): 1694~1696

6 L. Disdier, A. Rouyer, A. Fedotoff *et al.*. Neutron imaging of ICF target plasmas [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, **74**(3): 1832~1836

7 L. Disdier, A. Rouyer, I. Lantuéjoul *et al.*. Inertial confinement fusion neutron images [J]. *Phys. Plasmas*, 2006, **13**(5): 056317-1~7

8 G. P. Grim, R. D. Day, D. D. Clark *et al.*. Neutron Imaging Development for MegaJoule scale inertial confinement fusion experiments[C]. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2008, **112**: 032078

9 C. A. Barrera, E. C. Morse, M. J. Moran. Image reconstruction algorithms for inertial confinement fusion neutron imaging[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(10): 10E716-1~3

10 A. Rouyer. A new simple method for decoding penumbra image: the filtered autocorrelation [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, **74**(3): 1234~1329

11 Zhao Zongqing, Ding Yongkun, Dong Jianjun *et al.*. Richardson-Lucy method for decoding X-ray ring code image[J]. *Plasma*

- Phys. Control. Fusion*, 2007, **49**(8): 1145~1150
- 12 Chen Faxin, Zheng Jian, Yang Jianlun. Numerical simulation of neutron thick aperture imaging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(11): 5947~5952
陈法新, 郑 坚, 杨建伦. 中子厚针孔成像数值模拟研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(11): 5947~5952
- 13 L. Disdier, R. A. Lerche, J. L. Bourgade *et al.*. Capillary detector with deuterated scintillator for inertial confinement fusion neutron images[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(6): 2134~2139
- 14 F. H. Séguin, J. L. DeCiantis, J. A. Frenje *et al.*. D³ He-proton emission imaging for inertial-confinement-fusion experiments[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(10): 3520~3525
- 15 Zhuang Tiange. *The Principle and Application of CT* [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1992. 34~37
庄天戈. *CT原理与算法* [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. 34~37

栏目编辑：李文喆