第 59 卷 第 8 期 2010 年 8 月
1000-3290/2010/59(08)/5351-07
物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA
Vol. 59, No. 8, August, 2010
2010 Chin. Phys. Soc.

中子半影成像的两种非线性重建方法研究*

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 11 月 11 日收到;2009 年 12 月 7 日收到修改稿)

对图象重建的分子动力学方法进行了改进,使用能更快收敛的蛙跳格式,并添加规整化项以保持图像细节;同时还对图像重建的共轭梯度方法进行了分析,揭示了它与分子动力学方法的联系和区别;比较了两种方法的重建结果,分析了两种方法对于有噪声图像重建时的优缺点.

关键词: 中子半影成像, 非线性重建, 分子动力学方法, 共轭梯度方法
PACC: 1420C, 5270, 5255M

1. 引　　言

中子半影成像是目前用于惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)实验中的重要诊断手段[1—7]. 作为内爆产物的中子,相对于 X 射线、α 粒子、质子等而言,可轻易穿透高密度内爆核,在揭示燃料压缩区的尺寸、形状、均匀性、DT 燃料离子温度随半径的分布等信息等方面具有先天的优势. 为了较好地分辨内爆核结构,理论上要求实验诊断的空间分辨率好于 5 μm. 实验上的分辨率已从 1988 年的 80 μm[1] 提高到 2002 年的 20 μm[2,3],而新近建成的美国 NIF 装置和即将建成的法国 LMJ 装置将要实现 5—10 μm[4,5] 的分辨率.

为了实现 5 μm 的分辨率,发展高精度的重建方法非常重要. 包括我国科研工作者在内的各国科学家对中子成像的解谱方法等方面进行了许多深入的研究,解谱方法也从最初的维纳滤波[8,9] 和自相关滤波(filtered autocorrelation, FAC)[10] 等线性方法,发展到遗传迭代算法(genetic algorithm, GA)[11]、禁忌搜索算法(tabu search, TS)[12] 和分子动力学(molecular dynamics, MD)[13] 等非线性重建方法.

本文对两种非线性重建方法进行了研究. 首先将对分子动力学方法做进一步的改进,使用更快收敛的蛙跳格式,并添加规整化项以保持图像细节;然后对图像重建的共轭梯度方法进行了分析,揭示了它与分子动力学方法的联系和区别;通过模拟不同源的中子半影成像,比较两种方法的重建结果,分析了两种方法对于有噪声图像重建时的优缺点.

2. 中子半影成像原理及重建

中子半影成像原理如图 1. 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[14],中子半影成像的半影孔材料一般选用钨[15],中子探测器一般采用氘化闪烁体探测器[16].

图 1　半影成像的原理

* 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

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

$$g(x,y) = \iint \frac{L_0}{L_0 + L_1}x, \frac{L_0}{L_0 + L_1}y$$

$$\times f\ -\frac{L_0}{L_1}x, \frac{L_0}{L_1}y\ \mathrm{d}x\mathrm{d}y + n(x,y). \quad (1)$$

使用如图 2 所示的两种源，正向模拟得到的中子半影成像测试图像如图 3 所示.

图 2 模拟所用源

(a) 等强度 E 源 (b) 不等强度 E 源 (c) 不等强度 E 源 40 dB 噪声 (d) 不等强度 E 源 20 dB 噪声

图 3 中子半影成像模拟结果

当满足如下近轴条件时，半影孔的点扩展函数可以认为是空间不变的，半影成像近似为线性过程

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

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 $L_1 \gg L_0$. 此时，

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

这样，源信息就可以通过维纳滤波、自相关滤波等等线性方法进行重建. 然而，真实的成像过程中，点扩展函数不是严格的空间不变. 为了得到高分辨率的反演诊断图像，空间不变性假设和线性重建方法显然不能满足要求，需要进行非线性重建的探索.

3. 分子动力学方法

分子动力学方法，目前是广泛用于材料科学领域，它是指对于粒子构成的多体系统，用计算机模拟粒子的运动过程，并从而计算系统的结构和性质. 粒子在固体材料中输运时，粒子和材料分子间存在分子力作用，粒子运动满足经典牛顿定律. 当粒子停止运动时，粒子所在的位置即是系统势能最低处.

分子动力学方法最早用于图像处理的是 Hou 等人[17]，通过引入虚原子、虚团簇的方式，创造性地将分子动力学方法引入到射线治疗计划的优化处理上. 后来经过 Liu 等人的工作，分子动力学方法被引入到了中子半影成像的重建处理上，在重建等强度"E"源方面取得了良好的结果.

与遗传迭代等其他用于半影成像重建的非线性方法相比，分子动力学方法更具时间优势. 遗传迭代等方法均是从一个初始猜测的值开始，按扫描方式逐元进行随机微扰，再按价格函数判断是否接受，计算量巨大. 分子动力学方法与之相比，按力的方向扰动，搜索方向明确，计算量相应减少.

分子动力学方法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 $O(f)$ 描述为

$$O(f) = \sum_X^{N_x}\sum_Y^{N_y}\Big[\sum_x^{n_x}\sum_y^{n_y} f(x,y)\,h(X,Y;\{x,y\})$$

$$- g(X,Y)\Big]^2, \quad (4)$$

式中，$f(x,y)$ 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，也即是点扩展函数，$g(X,Y)$ 表示探测器输出的中子半影像. 中子半影

成像反演过程中, 此时的目标函数 $O(f)$ 表示该体系的势函数

$$V(r_i) = O(f). \tag{5}$$

当该系统达到平衡状态时, 系统势能最小, 此时的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, 可以根据系统势能求解各点各时刻的力, 各点在力的作用下随时间演化, 直到系统达到稳定状态. 于是便有

$$F_i = F(x_i, y_i) = m_i \frac{\mathrm{d}^2 f_i}{\mathrm{d}t^2} = -\frac{\mathrm{d}O(f)}{\mathrm{d}f_i}, \tag{6}$$

$$m_i = 2\sum_{x_j}^{n_x}\sum_{y_j}^{n_y}\sum_{X}^{N_X}\sum_{Y}^{N_Y} h(X, Y; \{x_i, y_i\}) \times h(X, Y; \{x_j, y_j\}). \tag{7}$$

式中, $F_i = F(x_i, y_i)$ 表示第 i 个分子处的源强, t 为虚拟演化时间, m_i 为第 i 个分子的质量.

$$\begin{aligned} F_i &= -\frac{\mathrm{d}O(f)}{\mathrm{d}f_i} \\ &= -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}f_i}\Big\{\sum_{X}^{N_X}\sum_{Y}^{N_Y}\Big[\sum_{x}^{n_x}\sum_{y}^{n_y} f(x, y) \\ &\quad \times h(X, Y; \{x, y\}) - g(X, Y)\Big]^2\Big\} \\ &= -2\sum_{x_j}^{n_x}\sum_{y_j}^{n_y} f(x_j, y_j) \\ &\quad \times \sum_{X}^{N_X}\sum_{Y}^{N_Y} h(X, Y; \{x_i, y_i\}) \\ &\quad \times h(X, Y; \{x_j, y_j\}) + 2\sum_{X}^{N_X}\sum_{Y}^{N_Y} g(X, Y) \\ &\quad \times h(X, Y; \{x_i, y_i\}). \end{aligned} \tag{8}$$

Liu 等使用了 Verlet 格式[13] 对(6)式差分, 但 Verlet 格式有收敛速度太慢、不稳定的缺点. 我们使用收敛速度更快的蛙跳(leap-frog)格式[18]. 蛙跳算法是 Verlet 算法的变化, 涉及半时间间隔的速度, 即

$$\begin{aligned} f_i(t + \Delta t) &= f_i(t) + \Delta t \cdot v_i(t + \Delta t/2), \\ v_i(t + \Delta t/2) &= v_i(t - \Delta t/2) + \Delta t \cdot F_i(t)/m_i. \end{aligned} \tag{9}$$

令 $\Delta t = h$, $t = nh$, 则有如下的迭代公式:

$$\begin{aligned} f_i^{(n+1)} &= f_i^{(n)} + \Delta t \cdot v_i^{(n+1/2)} \\ v_i^{(n+1/2)} &= v_i^{(n-1/2)} + \Delta t \cdot F_i^{(n)}/m_i. \end{aligned} \tag{10}$$

同时, 为了克服问题的病态, 也就是当数据带有误差时, 保证解在真解附近连续地依赖于数据, 不会把误差或噪声过分地放大, 我们在目标函数 $O(f)$ 中引入规整化项[19]

$$O(f) = \sum_{X}^{N_X}\sum_{Y}^{N_Y}\Big[\sum_{x}^{n_x}\sum_{y}^{n_y} f(x, y)\, h(X, Y; \{x, y\}) - g(X, Y)\Big]^2 + \frac{\alpha}{2} J_\alpha(f(x, y)), \tag{11}$$

式中, $J_\alpha(f)$ 是附加惩罚项, 它使问题得到规整化项, 参数 α 是两项的协调和折衷.

一般情况下, $J_\alpha(f)$ 可写成

$$J_\alpha(f(x, y)) = \sum_{x}^{n_x}\sum_{y}^{n_y} \phi(|\Delta f|), \tag{12}$$

式中, $\Delta f = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}\right) = (f_x, f_y)$, $|\Delta f| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}$ 是图像 f 的梯度场. 将 $J_\alpha(f)$ 对 f 作变分, 得到

$$\frac{\partial}{\partial f}\frac{\alpha}{2} J_\alpha(f) = \alpha \cdot \mathrm{div}\left(\frac{\phi'(|\Delta f|)}{2|\Delta f|}\Delta f\right). \tag{13}$$

Charbonnier[20] 给出的函数为 $\phi(t) = \sqrt{1 + t^2} - 1$, 这样

$$\frac{\partial}{\partial f}\frac{\alpha}{2} J_\alpha(f) = \alpha \cdot \mathrm{div}\left(\frac{1}{2\sqrt{1 + |\Delta f|^2}}\Delta f\right). \tag{14}$$

(a) 等强度 E 源 $n = 1527$　$P = 0.99999$

(b) 不等强度 E 源 $n = 6765$　$P = 0.99130$

(c) 不等强度 E 源 40 dB 噪声 $n = 1320$　$P = 0.97864$

(d) 不等强度 E 源 20 dB 噪声 $n = 285$　$P = 0.94762$

图 4　分子动力学方法重建结果

在使用蛙跳格式,规整化项,像素值非负和最大容忍值限制后,分子动力学方法 10000 步内的最优的重建结果如图 4 所示. 等强度 E 源的(a)图结果非常好,这是得益于像素最大容忍值限制,但其缺点在不等强度 E 源的图(b)表现出来;不等强度 E 源在信噪比为 40 dB 时的结果(c),对源形状保存还比较完好,但当信噪比下降到 20 dB 的结果(d)时,已经有严重的畸变. 分子动力学方法对图像背景的控制非常好,但即使使用蛙跳格式,收敛速度也很慢,因为计算时,需更新每一步的力 F_i, 时间花销巨大,重建过程通常需要数小时.

图中的 P 是为定量的反映散射中子对中子半影成像诊断系统的影响而引入的相关度. 设重建结果为 $f'(x,y)$, 参考结果为 $f(x,y)$, 二者相关度 P 定义为

$$P = \sum_{x,y} f(x,y) * f'(x,y) \Big/ \sum_{x,y} f^2(x,y) * \sum_{x,y} f'^2(x,y), \qquad (15)$$

当重建结果与参考结果完全一致时,相关度 P 为 1;两者差别越大, P 越小.

4. 共轭梯度方法

当探测器记录图像为 400 ×400 像素,发射源按 40 ×40 离散点描述时,中子半影成像的成像过程可以如下表示:

$$\sum_{x}^{n_x} \sum_{y}^{n_y} f(x,y)\, h(X,Y;\{x,y\}) = g(X,Y), \qquad (16)$$

展开即

$$\begin{aligned} & f_{1,1} h_{1,1}(1:400, 1:400) + f_{1,2} h_{1,2}(1:400,1:400) \\ & + \cdots + f_{40,39} h_{40,39}(1:400,1:400) \\ & + f_{40,40} h_{40,40}(1:400,1:400) \\ = {} & g(1:400,1:400). \end{aligned} \qquad (17)$$

经过数据重排,方程变形为 $Ax = b$. 其中, x 为 1600 ×1 的矩阵, b 为 160000 ×1 的矩阵, A 为 160000 ×1600 的矩阵. 此时矩阵 A 太大,重排 A 对内存要求过高,不易实现. 但幸运的是,实际有用的信息只来自于半影区,只占数据量的小部分,提取半影区的数据就足够重建源信息. 设 n 为半影区的数据量大小,则 b 为 n ×1 的矩阵, A 为 n ×1600 的矩阵. 一般而言, $n > 1600$, 方程有唯一解.

方程 $Ax = b$ 的解是最小二乘解,即是使误差度量 $E = \| b - Ax \|^2$ 取最小的解. 由于

$$\begin{aligned} E &= \| b - Ax \|^2 = (b - Ax)^{\mathrm{T}} (b - Ax) \\ &= b^{\mathrm{T}} b - 2 b^{\mathrm{T}} A x + x^{\mathrm{T}} A^{\mathrm{T}} A x, \end{aligned} \qquad (18)$$

令 $\frac{\partial E}{\partial x} = -2A^{\mathrm{T}} b + 2A^{\mathrm{T}} A x = 0$, 得到计算最小二乘法的法方程 $(A^{\mathrm{T}} A) x = A^{\mathrm{T}} b$. 原方程中 A 不正定对称但列满秩,这时 $A^{\mathrm{T}} A$ 是正定对称的,这样求解 $(A^{\mathrm{T}} A) x = A^{\mathrm{T}} b$ 可以考虑使用共轭梯度方法[21], 并且在重建有噪声图像时适当添加规整化项.

用共轭梯度方法重建的结果如图 5. 当无噪声时,无论是等强度 E 源的图 5(a),还是不等强度 E 源的图 5(b),重建结果都相当满意;对信噪比较高的图 5(c),此方法与分子动力学方法相比,对源形状和强度也保持较好,但因对重建图像本底的控制不够,相关度上也得不到体现;当信噪比较低到 20 dB 的图 5(d),重建结果也明显比分子动力学要好. 而且更具优势的是计算时间,整个重建过程仅需几分钟. 不过仅仅从结果上来看,噪声对背景的影响非常大.

其实取完整的数据并对 A 做变形: $A = [A_1, A_2, \cdots, A_{1600}]$, A_n 为 160000 ×1 的矩阵,有

$$\begin{pmatrix} A_1^{\mathrm{T}} A_1 & A_1^{\mathrm{T}} A_2 & \cdots & A_1^{\mathrm{T}} A_{1600} \\ A_2^{\mathrm{T}} A_1 & A_2^{\mathrm{T}} A_2 & \cdots & A_2^{\mathrm{T}} A_{1600} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{1600}^{\mathrm{T}} A_1 & A_{1600}^{\mathrm{T}} A_2 & \cdots & A_{1600}^{\mathrm{T}} A_{1600} \end{pmatrix} x = \begin{pmatrix} A_1^{\mathrm{T}} b \\ A_2^{\mathrm{T}} b \\ \cdots \\ A_{1600}^{\mathrm{T}} b \end{pmatrix}. \qquad (19)$$

对比分子动力学里的 $F_i = F(x_i, y_i) = F_{x,y}$ 便可以发现

$$\begin{pmatrix} F_{1,1} \\ F_{1,2} \\ \cdots \\ F_{40,40} \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} h_{1,1}^{\mathrm{T}} g \\ h_{1,2}^{\mathrm{T}} g \\ \cdots \\ h_{40,40}^{\mathrm{T}} g \end{pmatrix} - 2 \begin{pmatrix} h_{1,1}^{\mathrm{T}} h_{1,1} & h_{1,1}^{\mathrm{T}} h_{1,2} & \cdots & h_{1,1}^{\mathrm{T}} h_{40,40} \\ h_{1,2}^{\mathrm{T}} h_{1,1} & h_{1,2}^{\mathrm{T}} h_{1,2} & \cdots & h_{1,2}^{\mathrm{T}} h_{40,40} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ h_{40,40}^{\mathrm{T}} h_{1,1} & h_{40,40}^{\mathrm{T}} h_{1,2} & \cdots & h_{40,40}^{\mathrm{T}} h_{40,40} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{1,1} \\ f_{1,2} \\ \cdots \\ f_{40,40} \end{pmatrix}$$

$$= 2\begin{bmatrix} A_1^{\mathrm{T}} b \\ A_2^{\mathrm{T}} b \\ \cdots \\ A_{1600}^{\mathrm{T}} b \end{bmatrix} - 2\begin{bmatrix} A_1^{\mathrm{T}} A_1 & A_1^{\mathrm{T}} A_2 & \cdots & A_1^{\mathrm{T}} A_{1600} \\ A_2^{\mathrm{T}} A_1 & A_2^{\mathrm{T}} A_2 & \cdots & A_2^{\mathrm{T}} A_{1600} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{1600}^{\mathrm{T}} A_1 & A_{1600}^{\mathrm{T}} A_2 & \cdots & A_{1600}^{\mathrm{T}} A_{1600} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdots \\ x_{1600} \end{bmatrix}. \tag{20}$$

(a) 等强度 E 源 $n = 808$　$P = 0.99999$

(b) 不等强度 E 源 $n = 800$　$P = 0.99999$

(c) 不等强度 E 源 40 dB 噪声 $n = 402$　$P = 0.96893$

(d) 不等强度 E 源 20 dB 噪声 $n = 107$　$P = 0.92267$

图 5　数据提取 + 共轭梯度方法重建结果

可见,分子动力学每次迭代计算的力实际也是当次结果残差量的 2 倍. 重建过程中, 分子动力学方法先根据残差量求解力, 然后在力的微扰下求解源信息; 而共轭梯度法是在残差量的梯度方向求解, 理应共轭梯度法的收敛比分子动力学方法快, 且更准确.

图 6 为全部数据的共轭梯度方法重建结果. 对比图 5 表明, 当无噪声时, 即数据为精确值时, 均能准确的重建结果; 但更多的有误差的数据并不意味着能得到更准确的重建结果, 因为 $A^{\mathrm{T}}A$ 能带入更多的病态.

(a) 等强度 E 源 $n = 585$　$P = 0.99999$

(b) 不等强度 E 源 $n = 608$　$P = 0.99999$

(c) 不等强度 E 源 40 dB 噪声 $n = 257$　$P = 0.95412$

(d) 不等强度 E 源 20 dB 噪声 $n = 42$　$P = 0.90534$

图 6　全部数据的共轭梯度方法重建结果

5. 结　　论

在模拟得到不同源的中子半影成像的探测图像基础上, 分别使用改进的分子动力学方法和共轭梯度方法进行非线性重建, 考察分析了重建效果. 用蛙跳格式代替 Verlet 格式改善了重建图像的收敛速度; 添加规整化项可以适当的抑制图像边缘的扩散. 分子动力学方法能很好地能抑制重建图像的背景噪声, 但当探测图像信噪比较低时结果会产生较严重的失真. 共轭梯度方法重建速度相对于分子动力学方法占明显优势, 在信噪比较高时重建结果非常理想, 但当信噪比降低后, 重建图像的背景噪声会显著的提高. 目前的重建方法对高噪声的探测图像还有待改进, 这将是我们以后研究的重点.

[1] Ress D, Lerche R A, Ellis R J, Nugent K A 1998 *Science* **241** 956

[2] Disdier L, Rouyer A, Wilsonb D C, Fedotoffa A, Stoecklc C, Bourgade J L, Glebovc V Y, Garonneta J P, Sekac W 2002 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* A **489** 496

[3] Disdier L, Rouyer A, Fedotoff A, Bourgade J L, Marshall F J, Glebov V Y, Stoeckl C 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 1832

[4] Murphy T J, Barnes C W, Berggren R R, Bradley P, Caldwell S E, Chrien R E, Faulkner J R, Gobby P L, Hoffman N, Jimerson J L, Klare K A, LeeC L, Mack J M, Morgan G L, Oertel J A, Swenson F J, Walsh P J, Walton R B, Watt R G, Wilke M D, Wilson D C, Young C S, Haan S W, Lerche R A, Moran M J, Phillips T W, Sangster T C, Leeper R J, Ruiz C L, Cooper G W, Disdier L, Rouyer A, Fedotoff A, Glebov V Y, Meyerhofer D D, Soures J M, St ckl C, Frenje J A, Hicks D G, Li C K, Petrasso R D, Seguin F H, Fletcher K, Padalino S, Fisher R K 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 773

[5] Glebov V Y, Meyerhofer D D, Sangster T C, Stoeckl C, Roberts S, Barrera C A, Celeste J R, Cerjan C J, Dauffy L S, Eder D C, Griffith R L, Haan S W, Hammel B A, Hatchett S P, Izumi N, Kimbrough J R, Koch J A, Landen O L, Lerche R A, MacGowan B J, Moran M J, Ng E W, Phillips T W, Song P M, Tommasini R, Young B K, Caldwell S E, Grim G P, Evans S C, Mack J M, Sedillo T J, Wilke M D, Wilson D C, Young C S, Casey D, Frenje J A, Li C K, Petrasso R D, Séguin F H, Bourgade J L, Disdier L, Houry M, Lantuejoul I, Landoas O, Chandler G A, Cooper G W, Leeper R J, Olson R E, Ruiz C L, Sweeney M A, Padalino S P, Horsfield C, Davis B A 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 10E715

[6] Morgan G L, Berggren R R, Bradley P A, Cverna F H, Faulkner J R, Gobby P L, Oertel J A, Swenson F J, Tegtmeier J A, Walton R B, Wilke M D, Wilson D C, Disdier L 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 865

[7] Disdier L, Rouyer A, Lantuéjoul I, Landoas O, Bourgade J L, Sangster T C, Glebov V Y, Lerche R A 2006 *Phys. Plasmas* **13** 056317

[8] Barrera C A, Morse E C, Moran M J 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 10E716

[9] Ghilea M C, Sangster T C, Meyerhofer D D, Lerche R A, Disdier L 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 023501

[10] Rouyer A 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 1234

[11] Chen Y W, Nakao Z, Arakakik K 1997 *Opt. Rev.* **4** 209

[12] Nozaki S, Chen Y W 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3980

[13] Liu D J, Zou L, Tang C H, Zhao Z Q, Hou Q, An Z 2007 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* A **578** 537

[14] Yu B, Ying Y J, Xu H B 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 4100 (in Chinese) [**余 波、应阳君、许海波** 2010 **物理学报** **59** 4100]

[15] 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]

[16] Disdier L, Lerche R A, Bourgade J L, Glebov V Y 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 2134

[17] Hou Q, Wang Y G 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 168101

[18] Wen Y H, Zhu R Z, Zhou F X, Wang C Y 2003 *Adv. Mech.* **33** 65 (in Chinese) [**文玉华、朱如曾、周富信、王崇愚** 2003 **力学进展** **33** 65]

[19] 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**]

[20] Charbonnier P, Blance-Feraud L, Aubert G, Barlaud M 1997 *IEEE Trans. Image Proc.* **6** 298

[21] Xu S F 1995 *Theory and methods of matrix calculation* (Beijing: Peking University Press) P149 [**徐树方** 1995 **矩阵计算的理论与方法** (**北京: 北京大学出版社**) **第** 149 **页**]

[22] 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]

Two nonlinear reconstruction methods of neutron penumbral imaging*

Yu Bo[1)] Ying Yang-Jun[2)] Xu Hai-Bo[2)]

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

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

(Received 11 November 2009; revised manuscript received 7 December 2009)

Abstract

Neutron penumbral imaging is an important diagnosis technique in laser-driven inertial confinement fusion experiment. In order to refine the resolution of 5 μm, it is necessary to develop nonlinear methods in reconstructing the detected imaging. In this paper, the authors improve the molecular dynamics method by using the Leap-frog format to increase convergence, and adding the edge-preserving regularization to suppress the edge-diffusion. Furthermore, the conjugate gradient method is also studied, and the relationship and differences between these two methods are revealed. Comparing the reconstruction results of the two methods, the advantages and disadvantages are analyzed for detecting images with noise.

Keywords: neutron penumbral imaging, nonlinear reconstruction, molecular dynamics method, conjugate gradient method

PACC: 1420C, 5270, 5255M

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

E-mail: yubobnu@ 163. com