

文章编号: 1001-4322(2008)09-1545-06

定量中子数字成像散射校正的蒙特卡罗模拟*

魏 彪¹, 马晓昕¹, 金 炜², 冯 鹏¹, 米德伶¹

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 宁波大学 信息科学与工程学院, 宁波 315211)

摘 要: 中子数字成像过程中, 散射中子可降低像质致使提取样品的定量信息变得困难。针对该情况, 分析了中子微光成像系统图像散射降质的原理, 采用点扩展函数的叠加来表征散射中子引起图像降质的过程, 借助于蒙特卡罗方法(MC)对点扩展函数进行模拟和建模, 将点扩展函数描述为样品厚度以及样品到探测器距离为参量的解析函数, 研究了点扩展函数的计算方法。研究结果表明, 借助于 MC 方法构建系统的点扩展函数之解析函数, 并利用该函数对中子图像进行散射校正, 是一种行之有效的定量中子数字成像散射校正方法。

关键词: 定量中子数字成像; 微光成像系统; 散射校正; 点扩展函数; 蒙特卡罗方法

中图分类号: O799 **文献标志码:** A

定量中子数字成像技术^[1-6]作为中子微光成像技术的一种衍生和发展, 因其能从微光成像的图像灰度信号中提取出被检测样品中某种成分的定量信息, 在无损检测与无损评价中尤其受到人们的青睐^[7]。然而, 由于中子与物质相互作用时将发生弹性散射、非弹性散射等现象, 且中子散射将直接影响中子微光成像系统的图像质量, 故急需寻找一种有效的中子散射校正技术。

采用 MCNP(Monte-Carlo N-Particle code)程序或理论分析的方法来研究样品内部散射中子随样品与探测器之间距离变化对中子微光成像的影响^[8-10], 是一种可行的中子微光成像用散射校正技术。然而, 由于当样品到探测器的距离较大时, 微光成像系统的几何不锐度(俗称几何不清晰度)也增加, 将进一步造成图像模糊和几何失真, 这就不适用于定量中子数字成像。目前用于校正中子散射的图像处理主要有两种^[11-13], 一种是从原始图像中减去估计的散射成分, 二是利用反卷积的方法消除散射。二者都需要对散射点扩展函数进行建模并通过实验估计模型参数, 这些参数除了与热中子源能谱、样品种类有关外, 主要与样品的厚度、样品到探测器距离有关。在模型建立上, 要么采用经验的近似分布模型^[11], 要么模型参数只与样品厚度或样品到探测器距离其中之一有关^[12]。基于这些模型确立的算法较适于简单几何的样品进行校正, 遇到复杂形状的物体则会产生较大误差。因此需要构建一种能够综合考虑样品厚度或样品到探测器距离两个参数的模型, 研究一种不依赖于样品几何的中子微光成像系统用散射校正算法。为此, 本文通过点扩展函数的叠加来表征散射中子引起的图像降质过程, 然后采用蒙特卡罗方法对点扩展函数进行模拟和建模, 旨在研究降低或减少中子散射射线对定量中子数字成像图像质量影响的技术及方法, 以此改善中子微光数字成像系统的性能指标。

1 中子微光成像系统的构成及工作原理

我们研制成的中子微光成像系统的原理见图 1, 它主要由光学系统快门、制冷型 CCD 数字摄像机、光纤传输接口和计算机控制及数据处理终端等构成。中子经过中子转换屏变成光子(可见光)进入微光成像的光学系统, 其主要由反射镜及特殊设计的大口径成像透镜组成, 反射镜用于改变光路方向, 避免中子射线直接穿透数字摄像机, 造成摄像机的损坏, 成像透镜将反射镜上的可见光成像于 CCD 靶面; 制冷型 CCD 数字摄像机是该系统的核心单元, 为确保在微光条件下的成像质量, 成像镜头的光谱特性须匹配且通光口径要大; 为实现计算机控制终端与前端摄像机的电隔离, 减小干扰, 提高可靠性, 采用光纤传输接口进行信号和控制命令的传输; 计算机

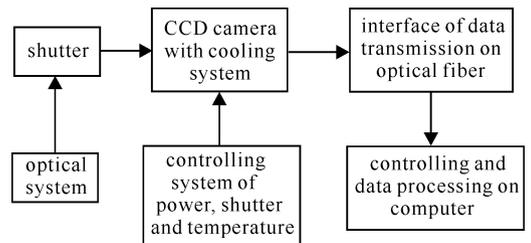


Fig. 1 Principle diagram of low light level neutron imaging system

图 1 中子微光成像系统原理框图

* 收稿日期: 2008-02-01; 修订日期: 2008-08-01

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题; 重庆市自然科学基金资助课题(CSTC2007BB3174)

作者简介: 魏 彪(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事 X 光、中子及可见光探测与成像技术研究工作; weibiao@cqu.edu.cn.

终端实现对 CCD 数字摄像机获取图像的控制、采集、存储及处理等功能。

2 中子数字成像过程的点扩展函数表达

设 x - y 平面为成像平面,中子束沿 z 轴方向。中子源和中子成像探测器以相同的尺度离散化。中子成像过程可以用系统对样品中 x - y 平面上每一质点所形成的点扩展函数(PSF)的叠加来描述,因此在不同实验条件设置下由中子散射引起的图像降质可以表征为不同的点扩展函数的叠加结果^[14]。点扩展函数描述了一个点中子源发出的中子束通过样品后在探测器上形成的像,如图 2 所示。

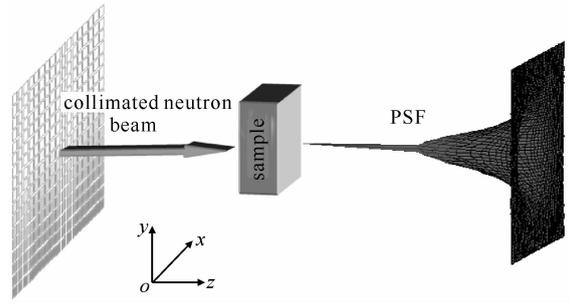


Fig. 2 Illustration of PSF due to scattering neutrons

图 2 中子散射的点扩展函数示意图

中子数字成像探测器接收到的信号 $I_s(i, j)$, 可以看成是 3 种不同机理信号的组合^[15]:

① 没有入射到样品内直接入射到探测器上的中子产生的信号 $I_{so}(i, j)$ 。

② 直接透过样品且没有和样品发生反应的中子产生的信号 $I_{su}(i, j)$, 表达式为

$$I_{su}(i, j) = I_{so} e^{-\Sigma d(i, j)}, \quad i, j \in A_{\text{sample}} \quad (1)$$

式中: A_{sample} 为探测器平面上样品的投影成像区域(以下若无特殊声明, i, j 均在这个区域内); I_{so} 为源中子束的强度, 且假设中子束在 x - y 平面是均匀的; $d(i, j)$ 为样品在 x - y 平面上的厚度分布函数。由式(1), 得到计算被检测物体在空间上厚度的离散分布矩阵的表达式

$$d(i, j) = -\frac{1}{\Sigma} \ln \frac{I_{su}(i, j)}{I_{so}} \quad (2)$$

③ 入射到样品内并发生碰撞而被散射的中子产生的信号 $I_{sc}(i, j)$, 表达式为

$$I_{sc}(i, j) = \sum_{k, l} F(i, j, k, l) = \sum_{k, l} f(i, j, k, l) I_{su}(k, l) \quad (3)$$

式中: $F(i, j, k, l)$ 为散射中子形成的点散射函数, 是中子与位于 (k, l) 点的样品作用后在 (i, j) 点产生的散射中子的信号强度; $f(i, j, k, l) = F(i, j, k, l) / I_{su}(k, l)$ 。

由于热中子与物质发生的弹性散射是各向同性的, 所以得到的点散射函数 F 对 z 轴旋转对称, 这样, 由式(1)、式(3)可得

$$I_s(i, j) = I_{su}(i, j) + I_{sc}(i, j) = I_{so} [e^{-\Sigma d(i, j)} + \sum_{k, l} f(i, j, k, l) e^{-\Sigma d(k, l)}] \quad (4)$$

又有

$$I_s = \sum_{k, l} G(i, j, k, l) = \sum_{k, l} g(i, j, k, l) I_{su}(k, l) = I_{so} \sum_{k, l} g(i, j, k, l) e^{-\Sigma d(k, l)} \quad (5)$$

式中: $G(i, j, k, l)$ 为点扩展函数; $g(i, j, k, l) = G(i, j, k, l) / I_{su}(k, l)$ 。

由于 $f(i, j, k, l) I_{su}(i, j) \ll I_{su}(i, j)$, 由式(4)、式(5)可得

$$g(i, j, k, l) = \begin{cases} 1 & k = i \text{ and } l = j \\ f(i, j, k, l) & \text{other} \end{cases} \quad (6)$$

由式(5)可知, $I_{su}(i, j)$ 为希望得到的有用信号。若把散射中子产生的信号叠加在有用信号上引起图像灰度变化这一过程看作一个独立的系统, 则 $I_s(i, j)$ 为系统输出信号, 如图 3 所示。

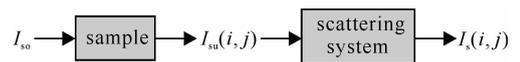


Fig. 3 Signal flow chart of neutron radiography

图 3 中子微光成像过程的信号流程图

令 $I_s(i, j) / I_{so} = y(i, j)$, $g(i, j, k, l) = h(i, j, k, l)$, $e^{-\Sigma d(k, l)} = x(k, l)$, 则式(5)变为

$$y(i, j) = \sum_{k, l} h(i, j, k, l) x(k, l) \quad (7)$$

式中: $h(i, j, k, l)$ 为散射叠加系统的冲击响应。假设加性噪声在之前的图像处理中已经去除, 由式(7)可见, 中子微光成像图像的散射校正, 实质上是一个已知 $y(i, j)$ 求 $x(i, j)$ 的反卷积问题, 其特点是: ① 信号从 $x(i, j)$ 到 $y(i, j)$ 是一个能量增大的过程, 由于散射中子的作用使输出信号能量增大; ② 卷积核 h 是输入信号幅度 $x(i, j)$

的函数,即 $h=f(x)$,且对于不同的样品-探测器距离值, $f(x)$ 也不一样,因此也是空间移变的;③ $h(x)$ 为图像恢复算法中需已知的模糊函数。

3 点扩展函数模型及计算

3.1 蒙特卡罗方法测量点扩展函数

为了求式(7)的解,须知道不同样品-探测器距离(L)条件下 h 与 x 的准确关系,选定一种样品如 H_2O ,测量不同样品厚度、样品到探测器距离下成像的点扩展函数。由于实际产生点中子源比较困难,在技术上是不可行的,因此采用蒙特卡罗(MC)方法模拟输入的点中子源形成点扩展函数的过程,并对成像的点扩展函数进行测量。MC方法主要是通过抽样的方法,追踪粒子的输运过程,以此模拟系统的真实情况,进而取得所需结果。采用该方法,通过在计算机上建立中子数字成像系统的模型进行模拟计算,以此计算不同实验条件下的点扩展函数。具体程序采用 MCNP,由于 MCNP 可以对物理模型在几何上进行非常精确地描述而不必采取任何近似,建立的探测器模型用于中子辐射成像,具有很高的计数精度。文中采用的计算模型如图 4 所示,其中 T 为样品厚度。

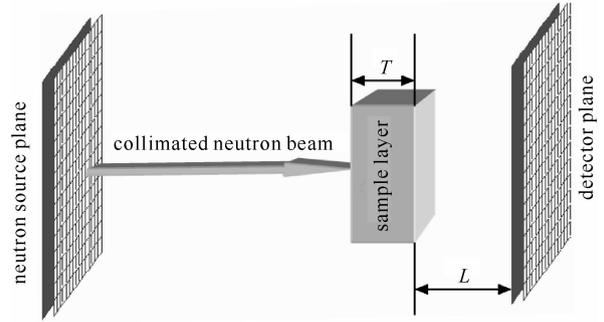


Fig. 4 Calculation model of PSF in neutron imaging
图 4 中子成像点扩展函数计算模型

为了突出中子散射对微光成像中图像降质造成影响的实质,该模型在实际成像参数设置的基础上进行了简化,故具有这样几个特点:①中子源沿 z 方向,采用 $0.05\text{ cm} \times 0.05\text{ cm}$ 的单方向面源,其大小与探测器像元大小一致,能量范围在 $0.005 \sim 0.500\text{ eV}$ 之间,中子能谱为 Maxwell 裂变能谱;②样品为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times T$ 的 H_2O 层,确保所测的 G 只与厚度有关;③探测器采用 F4 : N,测量每一个 $0.05\text{ cm} \times 0.05\text{ cm} \times 0.02\text{ cm}$ 像元内中子注量的大小。

3.2 点扩展函数模型

由于 MC 模拟实验只能测得有限 T 与 L 值组合的 G ,因此需要用解析函数对 G 进行拟合,以便能够得到任意条件下的 $G=G(T,L)$ 。由式(6)可知, G 可以从 f 得到。见图 5,在 x 方向上对 F 强度曲线进行拟合,然后用 $\sqrt{x^2+y^2}$ 替代 x 就可以得到 x - y 平面的 f 函数。考虑到 f 函数的复杂程度并不会明显增加散射校正算法的计算量,为提高拟合精度,使后续的校正更加精确,选拟合函数为两个高斯函数的叠加

$$f = a_1 e^{-(x/c_1)^2} + a_2 e^{-(x/c_2)^2} \quad (8)$$

式中: a_1, a_2, c_1 及 c_2 为与 T 和 L 有关的系数,它们影响点扩展函数的形状和强度。

图 5(a),(b)分别为 MC 模拟得到 $T=0.7\text{ cm}, L=1\text{ cm}$ 时, f 的强度图和 $x=0$ 时 y 方向上的 f 强度的拟合图。

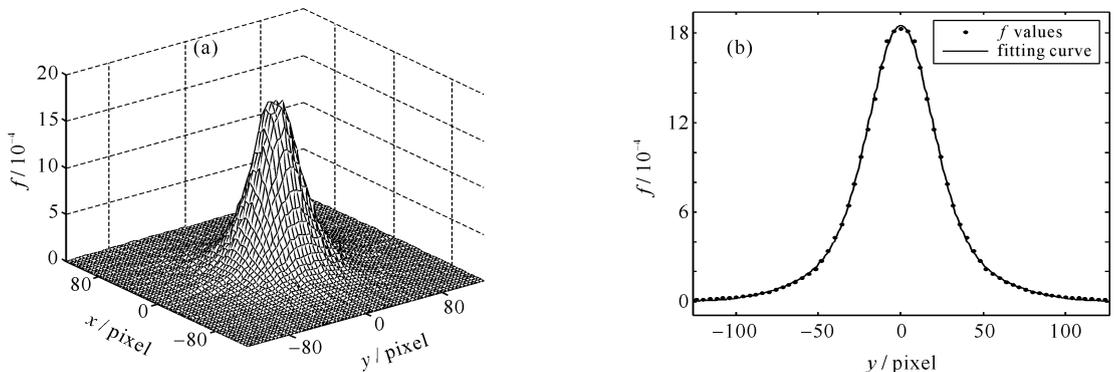


Fig. 5 Intensity and fitting curve of f function at sample's thickness of 0.7 cm and sample-detector distance of 1 cm

图 5 样品厚度为 0.7 cm ,样品-探测器距离为 1 cm 时的 f 函数强度及拟合图

在 L 为固定条件下,利用测得不同 T 时的 f ,可以将式(8)拟合成解析函数 $f(T)$ 的形式, a_1, a_2, c_1, c_2 分别为厚度 T 的解析函数,即

$$f(T) = a_1(T)e^{-[x/c_1(T)]^2} + a_2(T)e^{-[x/c_2(T)]^2} \quad (9)$$

图 6 为样品-探测器距离 1 cm 时, a_1, a_2, c_1 及 c_2 对 T 的拟合结果。

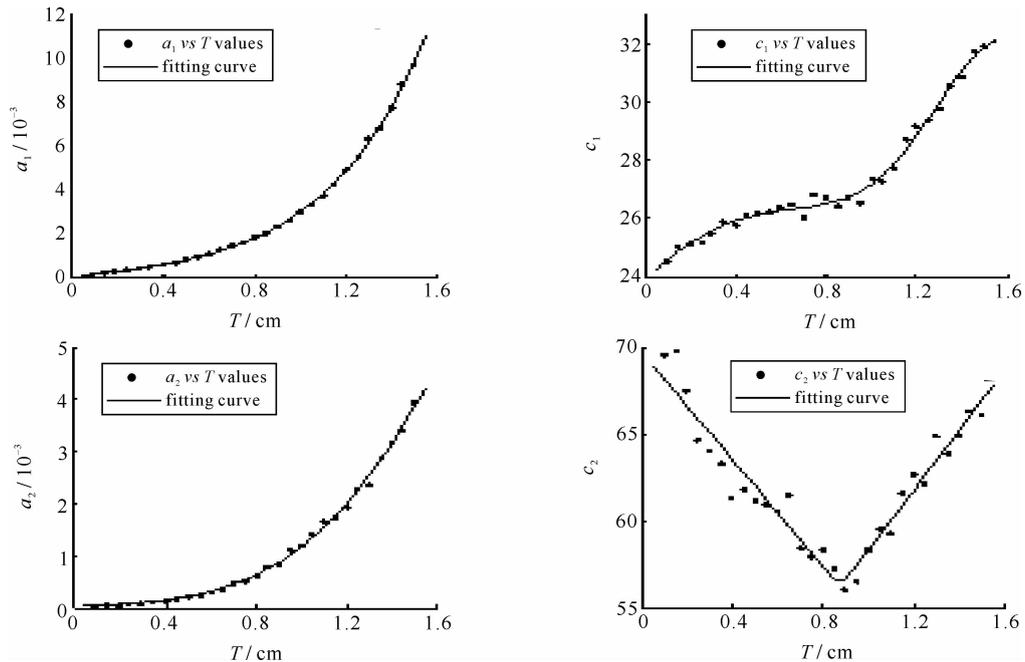


Fig. 6 Fitting curves of a_1, c_1, a_2, c_2 vs sample's thickness at sample-detector distance of 1 cm

图 6 样品-探测器距离 1 cm 时, 各系数 a_1, c_1, a_2, c_2 对样品厚度的拟合

在 T 为固定条件下, 利用测得不同 L 时的 f 函数, 用同样的方法, 可以将式(8)拟合成解析函数 $f(L)$ 的形式。由拟合出来的 $f(L)$ 函数, 可以得到 f 的峰值 $f_{\max}-L$ 曲线, 并将该曲线拟合成解析形式, 即

$$f_{\max} = f_{\max}(L) = b_1 e^{d_1 L} + b_2 e^{d_2 L} \quad (10)$$

图 7 为样品厚度为 0.7 cm 时的 f_{\max} 与样品-探测器间距的关系曲线拟合图。然后, 利用测得有限个 T 值的 $f_{\max}(L)$ 函数, 把其中的参数 b_1, d_1, b_2, d_2 拟合成 T 的解析函数。

3.3 点扩展函数的计算

利用上述拟合得到的点扩展函数解析形式, 就可以计算出不同样品厚度 T 、样品-探测器距离下的点扩展函数。考虑到对于同一样品厚度, 改变样品-探测器距离的大小并不会改变散射中子的强度。例如: 增大距离 L , 只会使散射中子在探测器上的分布范围更广, 由散射中子产生的信号总能量是守恒的, 即

$$\iint_{x_1, y_1} f_1(x_1, y_1) dx_1 dy_1 = \iint_{x_2, y_2} f_2(x_2, y_2) dx_2 dy_2 \quad (11)$$

近似认为: $f_2(x_2, y_2)$ 可按峰值比例由 $f_1(x_1, y_1)$ 拉伸或压缩后得到, 即

$$f_2(x_2, y_2) = f_1'(x_1, y_1) f_{1\max} / f_{2\max} = \alpha f_1(x_1, y_1) \quad (12)$$

式中: $f_{1\max}$ 为 L_1 时的峰值, $f_{2\max}$ 为 L_2 时的峰值, 由 $f_{\max}(L)$ 计算得到。将式(12)代入式(11)得

$$x_2 = x_1 / \sqrt{\alpha}, \quad y_2 = y_1 / \sqrt{\alpha} \quad (13)$$

已知 $T = T_0$ 时, L_1 的点扩展函数 $f_1(x_1, y_1) = f(T_0, L_1)$, 通过坐标变换, 可以近似求出 $T = T_0$ 时 L_2 的点扩展函数 $f_2(x_2, y_2) = f(T_0, L_2)$ 。图 8 为用此方法计算出的 f 和 MCNP 模拟得出的 f 函数的对比, 可以看出, 二者能够很好地吻合。

最后, 对样品到探测器距离 $L = 0.5, 1.0$ 和 1.5 cm, 厚度分别为 $0.3, 0.6$ 和 0.9 cm 的 H_2O 样品, 用拟合 f 函数算出的 G 作卷积计算图像, 和 MCNP 模拟得到的图像相比较, 由图 9 可见, 二者在样品区域沿 y 方向的灰

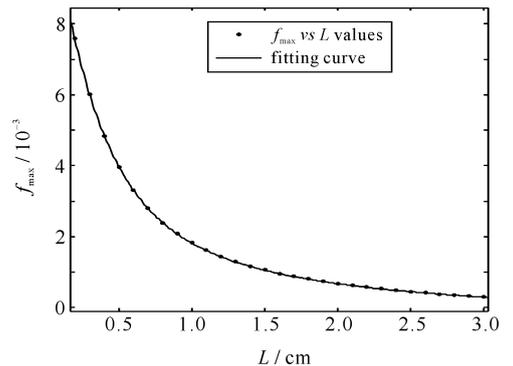


Fig. 7 Curve of f_{\max} vs sample-detector distance at sample's thickness of 0.7 cm

图 7 样品厚度为 0.7 cm 时, f_{\max} 与样品-探测器间距的关系曲线

度变化曲线基本一致。

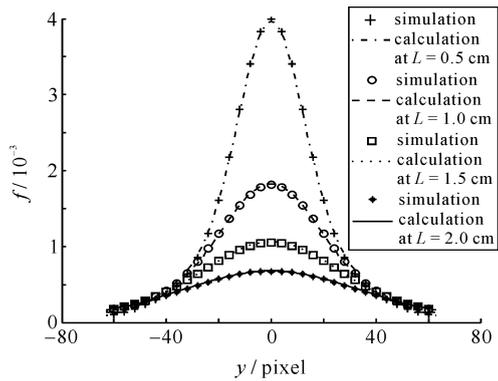


Fig. 8 Comparison of f function between calculation and simulation with different sample-detector distance at sample's thickness of 0.7 cm

图8 样品厚度为 0.7 cm 时,不同样品-探测器距离下计算和模拟的 f 函数

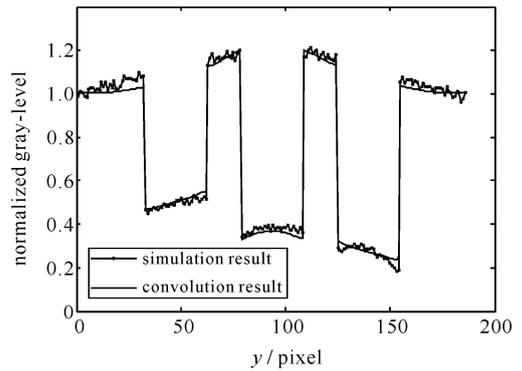


Fig. 9 Comparison between gray-levels of the convolution image and the simulation image of H_2O samples

图9 H_2O 样品的卷积图像和模拟图像灰度对比

4 结 论

不同厚度样品的计算图像和模拟图像相比较,通过解析函数计算出的 PSF 叠加图像和 MCNP 模拟中子图像能够很好地吻合,表明利用 MC 方法构建中子成像的点扩展函数解析函数,继而将该函数用于定量中子数字成像进行中子散射校正,是一种行之有效的技术。为使计算模型更接近实际,所建立的中子散射点扩展函数模型将样品厚度、样品到探测器距离作为影响 PSF 的因素;因此,对于某种样品可以直接利用建立 PSF 的解析函数模型计算出不同条件下的 PSF,无需重复建模,既节省大量时间又具有很高的精度。除 H_2O 之外,中子散射点扩展函数模型还需建立多种强散射材料的 PSF 库,如 D_2O 、油、塑料等。

参考文献:

- [1] 翁大卫,刘以思,金光宇,等. 中子照相[M]. 北京:原子能出版社, 1996:141-185. (Mo D W, Liu Y S, Jin G Y, et al. Neutron radiography. Beijing: Atomic Energy Press, 1996:141-185)
- [2] Vontobel P, Lehmann E H, Ellenberger A, et al. Neutron tomography setup at SINQ: status and first results[R]. PSI Scientific and Technical Report 1999. 2000, **4**:64-66.
- [3] Yoneda K. Neutron computed tomography using the neutron television system, neutron radiography[C]//Proc of the Second World Conference. 1986:134-196.
- [4] Zanarini M, Chirco P, Rossi M, et al. Evaluation of hydrogen content in metallic samples by neutron computed tomography[J]. *IEEE Trans on Nucl Sci*, 1995, **42**(4):580-583.
- [5] Treimer W. Review about coherent and incoherent imaging signals for computed neutron tomography[C]//Proc of 16WCNDT. 2004:245-250.
- [6] Baechlor S, Materna T. Set-up of a CCD based detection system at the NCR beamline(PSD)[R]. STSM Report 15, 2001.
- [7] Lehmann E H, Vontobel P. Investigation of hydrogen distributions in various base materials by neutron radiography methods[C]//Proc 15th World Conference on Non-destructive Testing. 2000:316-325.
- [8] 张松宝,卢铁城,唐彬. 热中子照相的 MCNP 数值模拟初步研究[J]. 核电子学与探测技术, 2007, **27**(2):409-411. (Zhang S B, Lu T C, Tang B. MCNP numerical simulation pilot study of thermal neutron radiography. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2007, **27**(2):409-411.
- [9] 陈亮,蒋诗平,万里飏,等. 中子散射对快中子照相质量影响的分析[J]. 原子核物理评论, 2006, **23**(3):310-314. (Chen L, Jiang S P, Wan L B, et al. Analysis of neutron scattering in fast neutron imaging. *Nuclear Physics Review*, 2006, **23**(3):310-314)
- [10] 霍合勇,唐彬,吴洋. 中子照相 Σ 定量测量方法[J]. 核技术, 2007, **30**(4):273-276. (Huo H Y, Tang B, Wu Y. Quantitative Σ -scaling method of neutron radiography. *Nuclear Technology*, 2007, **30**(4):273-276)
- [11] Hassanein R, Lehmann E H, Vontobel P. Methods of scattering corrections for quantitative neutron radiography[J]. *Nucl Instr and Meth A*, 2005, **542**:353-360.
- [12] Kardjilov N, De Beer F, Hassanein R, et al. Scattering corrections in neutron radiography using point scattered functions[J]. *Nucl Instr and Meth A*, 2005, **542**:336-341.
- [13] Hassanein R, De Beer F, Kardjilov N, et al. Scattering correction algorithm for neutron radiography and tomography tested at facilities

with different beam characteristics[J]. *Physica B*, 2006, **385-386**:1194-1196.

- [14] Kardjilov N, Lehmann E H, Vontobel P. Representation of the image formation in applied neutron radiography in terms of a PSF superposition[J]. *Appl Phys A*, 2002, **74**(s1):228-230.
- [15] Pleinert H, Korner S, Lehmann E H, et al. Neutron signal transfer analysis[J]. *Nucl Instr and Meth A*, 1999, **424**:177-182.

Monte-Carlo simulation of scattering correction for quantitative neutron imaging system

WEI Biao¹, MA Xiao-xin¹, JIN Wei², FENG Peng¹, MI De-ling¹

(1. *The Key Laboratory of Optoelectronics Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;*

2. *College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China*)

Abstract: Neutron digital imaging is a low light level imaging technique. It is difficult to extract the quantitative information of samples due to the image degradation caused by scattering neutrons in the imaging process. In this situation, the principle of so-called scattering degradation of the low light level neutron imaging system is analyzed, and the degradation process in this system is characterized by point spread function(PSF) superposition. Using Monte Carlo method, the PSF is simulated and modeled as an analytical function of two parameters, the thickness of sample and the distance from sample to detector, and then the calculation method of PSF is presented. The result shows that constructing the PSF of this system and applying it to scattering correction for neutron images is an effective scattering correction method for quantitative neutron radiography, which has the theoretically guiding significance for reducing the adverse effect on imaging quality induced by scattering neutrons.

Key words: Quantitative neutron imaging; Low light level imaging system; Scattering correction; Monte-Carlo method; Point spread function