

定量中子数字成像系统的散射校正 迭代算法研究

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 针对中子散射将直接影响在进行无损检测某种成分时的定量分析,研究分析了中子散射对定量中子数字成像系统图像降质原理,采用点扩展函数的叠加表征成像系统中子散射对图像降质的过程,并在构建中子成像点扩展函数模型的基础上,提出了对中子图像进行散射校正的空域迭代算法。研究结果表明,对于成分相同但几何形状不同的 H_2O 样品,在样品到探测器之间距离不同情况下所得到的中子数字图像,在利用该算法进行散射校正后,影响成像质量的散射成分能较好得到抑制,所恢复出的样品厚度趋近于实际厚度。

关键词 定量中子数字成像系统,中子散射校正,点扩展函数,迭代算法, H_2O 样品

中图分类号 O799

中子与物质相互作用时不直接产生电离,具有与 X 射线、 γ 射线吸收规律完全不同的特殊性质,在航空、航天、机械、石化、材料、核工业及医学等领域的无损检测中应用广泛^[1]。定量中子数字成像能从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,尤其受到人们的青睐。在燃料电池、核燃料的锆屏蔽层、建筑材料混凝土或木材等样品的含水量测定^[2]中,定量中子数字成像系统具有其他无损检测技术无可替代的优点。然而,中子与物质相互作用时的弹性散射与非弹性散射会影响中子数字成像的图像质量,如图像对比度下降,图像边缘的模糊导致图像空间分辨率降低等,对定量中子数字成像的定量分析尤为不利。

定量中子数字成像系统的中子图像散射校正的研究,国内外尚处于起步阶段。采用 MCNP(Monte Carlo N-Particle code)程序或理论分析方法,可研究样品内部散射中子随样品-探测器距离变化对中子成像的影响。增大被检样品-探测器距离可减小散射中子的影响^[3,4],从而进行样品厚度的定量分析^[5]。然而,样品与探测器距离加大,成像系统的几何不锐度也增大,造成图像模糊和几何失真。目前,用于校正中子散射的图像处理技术有两种^[6-8],即从原始图像中减去估计的散射成分,或利用反卷积法消除散射。二者都须对散射点扩展函数进行建模,并

通过实验估计模型参数,这些参数除与热中子源能谱、样品种类有关外,主要与样品的厚度 T 、样品-探测器距离 $S-D$ (Sample-Detector)有关。在模型建立上,采用经验的近似分布模型^[6],或模型参数只与 T 或 $S-D$ 有关^[7]。这些模型算法仅适合于简单几何样品,若复杂形状的物体,则散射校正会产生较大误差。

本文采用点扩展函数阐明中子成像过程,在构建点扩展函数解析模型基础上,提出了定量中子数字成像系统的散射校正迭代算法,以改善成像系统的性能指标。此算法能用于不同成像条件下的中子数字成像的图像散射校正,且不依赖样品几何,具有实用性。

1 成像系统的组成及图像降质原理分析

1.1 成像系统的组成

定量中子数字成像系统由中子源、中子转换屏及微光成像系统构成(图 1)。转换屏将中子转换成光子(可见光),微光成像系统实现对光子的探测与成像。

1.2 中子散射的图像降质原理分析

定量中子数字成像系统在中子数字图像生成的每个环节中,均有可能对图像进行调制,引起图像

国防预研基金(JW20*25056)和重庆市自然科学基金(CSTC2007BB3174)联合资助

第一作者:魏 彪,男,1963 年出生,1996 年于成都理工大学获博士学位,教授,主要从事 X、 γ 射线无损检测技术及光电检测与成像系统的工作

收稿日期:2008-03-10,修回日期:2008-06-25

边缘的模糊，导致图像降质，如图像分辨率降低等。图像分辨率由对比度(反差灵敏度，决定密度分辨率)和不锐度(图像边缘不清晰度，决定空间分辨率)来衡量。其中的不锐度主要包括几何不锐度 U_g 、转换

屏不锐度 U_f 和散射不锐度 U_s ，其总不锐度 U_t 为^[1]：

$$U_t = (U_g^3 + U_f^3 + U_s^3)^{1/3}$$

(1)

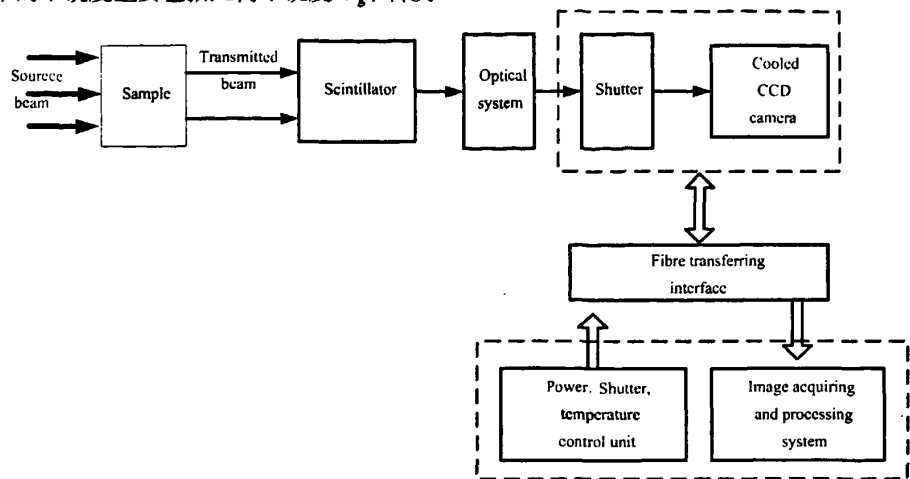


图 1 定量中子数字成像系统原理框图

Fig.1 The principle diagram of developed quantitative neutron imaging system

定量中子数字成像系统的发光屏很薄，可忽略 U_f 对成像质量的影响，则中子数字图像的模糊退化主要为几何结构引起的退化(U_g)和射线传输过程引起的退化(U_s)。

热中子(能量<0.5 eV)具有十分有利的衰减特性，成像较为直观和有效，目前大多数定量中子数字成像仪都用热中子。热中子通过被检测物体时，一部分与物体发生弹性散射(n,n)和辐射俘获(n,γ)反应；一部分透过被检测物，以原来的方向入射到成像探测器上，形成定量中子数字成像的有用图像；透射中子强度 I 与入射中子强度 I_0 满足以下关系：

式中， t 为样品在中子辐射方向上的厚度； Σ 为样品对中子的吸收系数或宏观截面。

经过被检测物体散射后的中子将改变原来的前进方向，入射到成像探测器上，但这些散射中子模糊了有用图像的信息。尤其对样品中的 C、H 等低原子序数，它们的热中子散射截面远远大于吸收截面，大量的散射中子被探测器接收，乃至无法从图像灰度中提取定量信息。由图 2，从一个楔形水样品的中子数字图像(图 2(a)中提取的水厚度信息(图 2(b)虚线)，与实际的水厚度(图 2(b)实线)存在很大误差。

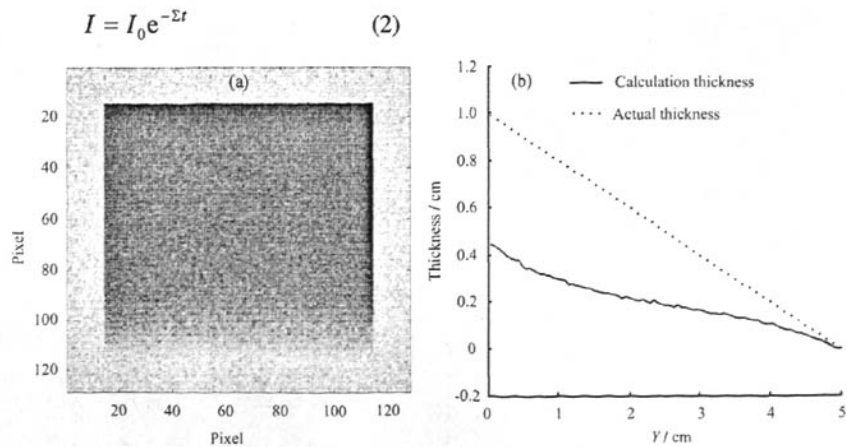


图 2 楔形水样品的中子图像(a)和样品实际厚度及其由图像算出的厚度(b)

Fig.2 Neutron image (a) of a water wedge, and curves (b) of specific thickness and evaluated thickness

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。中子成像过程可用系统对样品中每一质点所形成的点扩展函数的叠加来描述, 在不同实验条件设置下, 由中子散射引起的图像降质可表述为不同的点扩展函数的叠加结果^[9]。点扩展函数描述了平行中子束通过样品后在探测器上形成的像(图 3)。

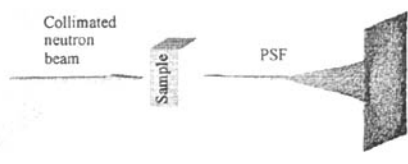


图 3 中子散射的点扩展函数示意图
Fig.3 Illustration of PSF due to scattering neutron

中子成像探测器接收到的信号 $I_s(i, j)$, 可看成是三种不同机理信号的组合^[10]:

- 1) 未入射到样品直接入射到探测器的中子产生的信号 $I_{so}(i, j)$ 。
- 2) 直接透过样品未与样品发生反应的中子产生的信号:

$$I_{su}(i, j) = I_{so} e^{-\Sigma d(i, j)} \quad (3)$$

式中, A_{sample} 为探测器平面上样品的投影成像区域(下文若无特殊声明, i, j 均在此区域内); I_{so} 为源中子束强度, 设其在 x - y 平面是均匀; $d(i, j)$ 为样品在 z 方向的厚度分布函数。由式(3), 可得到计算被检测物体在空间上厚度的离散分布矩阵:

$$d(i, j) = -\frac{1}{\Sigma} \ln \frac{I_{su}(i, j)}{I_{so}} \quad (4)$$

- 3) 通过样品内并发生碰撞而被散射的中子产生的信号:

$$I_{sc}(i, j) = \sum_{k, l} PScF(i, j, k, l) = \sum_{k, l} PScF'(i, j, k, l) \cdot I_{su}(k, l) \quad (5)$$

式中, $PScF(i, j, k, l)$ 为散射中子形成的点散射函数, 是中子在 (k, l) 点与样品作用后在 (i, j) 点产生的散射中子的信号强度; $PScF'(i, j, k, l) = PScF(i, j, k, l) / I_{su}(k, l)$ 。

由于热中子的弹性散射各向同性, 得到的 $PScF$ 对 z 轴旋转对称, 则由式(3)和(5)可得:

$$\begin{aligned} I_s(i, j) &= I_{su}(i, j) + I_{sc}(i, j) \\ &= I_{su}(i, j) + \sum_{k, l} PScF'(i, j, k, l) \cdot I_{su}(k, l) \quad (6) \\ &= I_{so} \cdot e^{-\Sigma d(i, j)} \sum_{k, l} PScF'(i, j, k, l) \cdot I_{su}(k, l) \end{aligned}$$

又:

$$\begin{aligned} I_s(i, j) &= \sum_{k, l} PSF(i, j, k, l) \\ &= \sum_{k, l} PSF'(i, j, k, l) \cdot I_{su}(k, l) \quad (7) \\ &= I_{so} \cdot \sum_{k, l} PSF'(i, j, k, l) \cdot e^{-\Sigma d(k, l)} \end{aligned}$$

式中, $PSF(i, j, k, l)$ 为点扩展函数, $PSF'(i, j, k, l) = PSF(i, j, k, l) / I_{su}(k, l)$ 。由于 $PSF'(i, j, k, l) \cdot I_{su}(k, l) |_{k=i, l=j} \ll I_{su}(i, j)$, 由式(6)和(7), 可得:

$$PSF'(i, j, k, l) = \begin{cases} 1 & k=i \text{ 且 } l=j \\ PScF'(i, j, k, l) & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

由式(7)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, 见图 4。

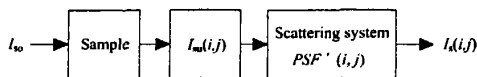


图 4 中子成像过程的信号流程图
Fig.4 The signal flow chart of neutron radiography
令 $I_s(i, j) / I_{so} = y(i, j)$, $PSF'(i, j, k, l) = h(i, j, k, l)$, $e^{-\Sigma d(k, l)} = x(k, l)$, 则(7)式变为:

$$y(i, j) = \sum_{k, l} h(i, j, k, l) \cdot x(k, l) \quad (9)$$

式中, $h(i, j, k, l)$ 为散射叠加系统的冲击响应。假设加性噪声在先前的图像处理中已经去除, 由式(9), 中子数字成像仪器系统图像的散射校正问题, 实质上是已知 $y(i, j)$ 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 S - D 值, $f(x)$ 亦不一样, 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 散射校正的迭代算法

散射校正旨在从叠加了散射中子信号的数字图像中取出准确的灰度信息, 由此计算样品中物质的厚度分布函数。在前述讨论的基础上, 基于空域算

术迭代的图像复原思想, 提出了解决散射问题的算法, 步骤如下:

已知中子对样品的吸收系数 Σ , 样品的从原始图像中分割出的样品投影图像 $I_s^{(0)}(i, j)$, 没有入射到样品内直接入射到探测器的中子产生的信号 $I_{so}(i, j)$, 样品-探测器距离 $S-D(i, j)$, 样品的 PSF 解析形式 $f(T, S-D)$ 。

(1) 求 $d(i, j)$ 的第 1 次估计^[6]:

—估计散射中子对图像灰度的贡献: 设 $I_{su}^{(0)}(i, j) = I_s^{(0)}(i, j)$, 代入式(5), 计算 $I_{sc}^{(0)}(i, j)$;

—从原始图像中减去散射成分: 设 $I_{su}^{(1)} = I_s^{(0)}(i, j) - I_{sc}^{(0)}(i, j)$, 将 $I_{su}^{(1)}$ 代入式(4), 计算 $d(i, j)$ 的第 1 次估计 $d^{(1)}(i, j)$;

—计算估计图像: 将 $d^{(1)}(i, j)$ 代入(7), 计算 $I_s^{(1)}(i, j)$;

(2) 迭代过程:

—设 $I_{su}^{(n+1)} = I_{su}^{(n)} - \alpha(I_{su}^{(n)} - I_s^{(0)})$, α 为收敛因子, 并根据被测样品的厚度范围, 将 $I_{su}^{(n+1)}(i, j)$ 限制在可能的取值区间内;

—将 $I_{su}^{(n+1)}$ 代入(3), 计算 $d(i, j)$ 的第 $n+1$ 次估计 $d^{(n+1)}(i, j)$;

—计算第 $n+1$ 次估计图像: 将 $d^{(n+1)}(i, j)$ 代入(7), 计算 $I_s^{(n+1)}(i, j)$;

—将第 $n+1$ 次估计得到的图像与原始图像作比较, 如果

$$\frac{\sum_{i,j} (I_s^{(n+1)}(i, j) - I_s^{(0)}(i, j))^2}{\sum_{i,j} (I_s^{(0)}(i, j))^2} < \varepsilon \quad (10)$$

则停止迭代。

由于 I_s 与 I_{su} 同增减, 且当 $I_{su}^{(n)}$ 逼近 $I_s^{(0)}$ 时, $I_{su}^{(n)}$ 逼近真实的 I_{su} , 此时的 $d^{(n)}(i, j)$ 为 $d(i, j)$ 的最佳估计。

4 实验结果及讨论

为测试算法对中子图像散射校正的效果, 对一个含有各种几何形状集合的水样品进行模拟, 理论灰度图像和模拟得到的中子图像见图 5。图 5(a) 的水样品形状、尺寸和 $S-D$ 为:

A, 长方体, $T=0.2$ cm, $S-D=1$ cm

B, 圆柱体, $h=0.4$ cm, $r=0.75$, $S-D=1$ cm

C, 椭圆柱体, $h=0.6$ cm, 长半径为 1 cm, 短半径为 0.75 cm, $S-D=1$ cm

D, 圆锥体, $h=0.8$ cm, 底面半径为 0.75 cm, $S-D=1$ cm

E, 台阶样品, 厚度分别为(从左到右)0.1-0.9 cm, $S-D=1$ cm

F, 楔形样品, 厚度为 0~1 cm 均匀增加, $S-D=1$ cm

G, 长方体, 厚度为 0.7 cm, $S-D$ 分别为(从左到右)0.5、1、1.5、2、2.5 cm

H, 平行六面体, 厚度为 0.7 cm, $S-D$ 为 0~2 cm 均匀增加。

由图 5(b), 每一样品区域的灰度均大于理论灰度; 样品边缘的灰度小于中心的灰度; 台阶样品 E 在较大厚度比时, 不同厚度的灰度区别已不太明显, 图像中已不能分辨台阶边缘; 样品 G、H 厚度相同, 图像应该有相同的灰度, 但由于 $S-D$ 距离不同, 造成灰度不一样, $S-D$ 距离越大的样品区域, 受中子散射的影响越小, 灰度越小。图 5(b)还表明, 散射校正后的中子图像的样品区域的变暗, 散射成分得到了抑制。图 6~10 为校正后的样品厚度, 均趋近于真实厚度; 样品厚度较小的区域, 散射校正厚度和真实厚度较符合; 样品厚度较大的区域, 校正值和实际值相差较大, 原因是 T 越大, 图像灰度越小且随 T 的变化越缓慢, 图像灰度的细微变化就会造成厚度的较大波动。

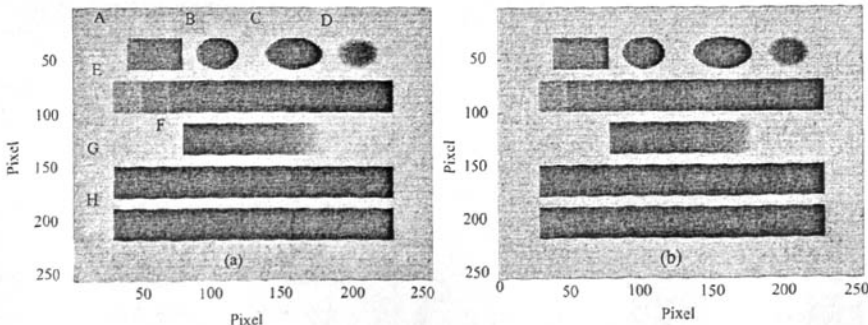


图 5 散射校正前(a)和校正后(b)的图像
Fig.5 Images before (a) and after (b) scattering correction

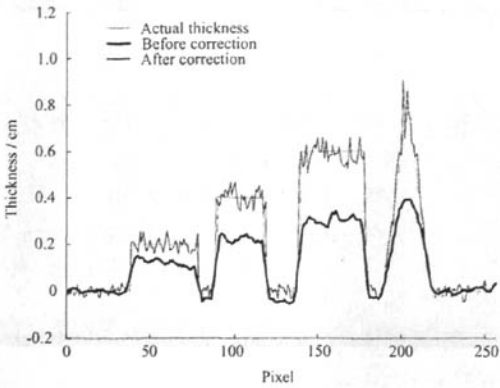


图 6 样品 A、B、C、D 散射校正前后的厚度比较
Fig.6 Thickness of Sample A, B, C and D before and after correction

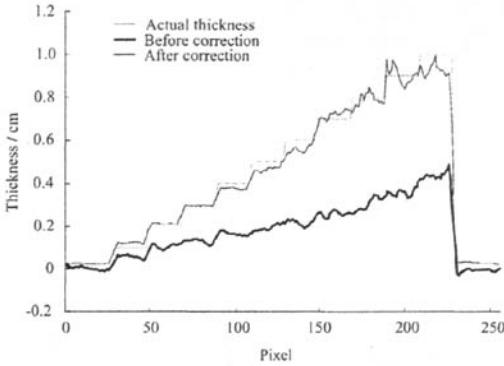


图 7 样品 E 散射校正前后的厚度比较
Fig.7 Thickness of Sample E before and after correction

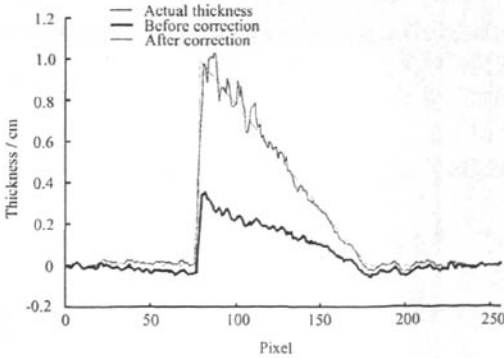


图 8 样品 F 散射校正前后的厚度比较
Fig.8 Thickness of Sample F before and after correction

5 结论

中子数字成像系统是一种重要的核成像技术，可对被检物进行无损检测，而开展中子散射校正技术是定量中子数字成像系统必不可少的。

散射校正后的灰度图像和模拟得到的原始中子图像相比较，校正后散射成分得到了抑制，且在样品厚度较小的区域，散射校正后的厚度和真实厚度比较吻合，表明中子散射校正迭代算法，对成分相同几何形状不同的样品，在样品与探测器距离不同情况下得到的中子数字图像，该散射校正算法是可行的、有效的。

该算法在图像信噪比较高的情况下，能得到较好的校正效果，因此在进行散射校正前，需预先对原始中子数字图像进行去噪。由于受空域迭代的局限性，用该算法处理一幅中子图像耗费的时间较长（处理一幅 256×256 分辨率下的中子图像需要大约 30 min），尚需进一步的研究改进。

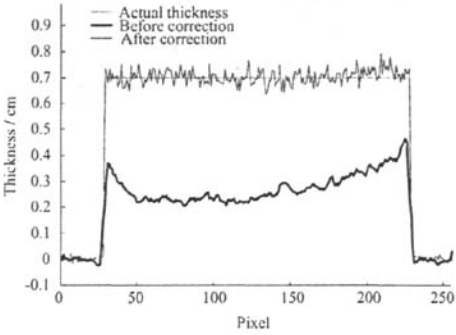


图 9 样品 G 散射校正前后的厚度比较
Fig.9 Thickness of Sample G before and after correction

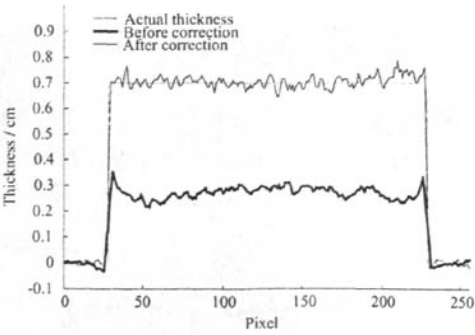


图 10 样品 H 散射校正前后的厚度比较
Fig.10 Thickness of Sample H before and after correction

参考文献

- 1 翁大卫, 刘以思, 金光宇, 等. 中子照相. 北京: 原子能出版社, 1996. 141-185
MO Dawei, LIU Yisi, JIN Guangyu, et al. Neutron radiography. Beijing: Atomic Energy Press, 1996. 141-185
- 2 Lehmann E H, Vontobel P. Rome Proc 15th World Conference on Non-destructive testing, 2000

- 3 张松宝, 卢铁城, 唐 彬. 核电子学与探测技术, 2007, 27(2): 409–411
ZHANG Songbao, LU Tiecheng, TANG bin. Nucl Electron Detect Technol, 2007, 27(2): 409–411
- 4 陈 亮, 蒋诗平, 万里飏, 等. 原子核物理评论, 2006, 23(3): 310–314
CHEN Liang, JIANG Shiping, WAN Libiao, *et al.* Nucl Phys Rev, 2006, 23(3): 310–314
- 5 霍合勇, 唐 彬, 吴 洋. 核技术, 2007, 30(4): 273–276
HUO Heyong, TANG Bin, WU Yang. Nucl Technol, 2007, 30(4): 273–276
- 6 Hassanein R, Lehmann E, Vontobel P. Nucl Instr Meth A, 2005, 542: 353–360
- 7 Kardjilov N, de Beer F, Hassanein R, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2005, 542: 336–341
- 8 Hassanein R, de Beer F, Kardjilov N, *et al.* Physica B, 2006, 385-386: 1194–1196
- 9 Kardjilov N, Lehmann E, Vontobel P. Appl Phys A, 2002, 74 (Suppl.): S228–S230
- 10 Pleinert H, Korner S, Lehmann E, *et al.* Nucl Instr Meth A, 1999, 424: 177–182

An iterative algorithm of scattering correction for quantitative neutron digital imaging system

WEI Biao¹ MA Xiaoxin¹ JIN Wei² FENG Peng¹ MI Deling¹

¹ (Key Laboratory of Opto-Electronics Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

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

Abstract Quantitative neutron digital imaging is an important means of NDT (Non-destructive Testing) and NDE (Non-destructive Evaluation). Scattering neutrons have an adverse effect to quality of neutron images when quantitative analysis has to be made in NDT. For quantitative neutron imaging instrument, the principle of imaging degradation caused by neutron scattering is analyzed, and the scattering degradation process is represented by the supposition of PSF (Point Spread Function) superposition. On the basis of constructed PSF model of neutron imaging, a space-domain iterative algorithm applied to scattering correction for this instrument is proposed. The result shows that after correction, for different shapes of H₂O samples at different sample-to-detector distances, the scattering component affecting imaging quality of the instrument is apparently restrained, and thickness of the samples evaluated from the processed image approaches their real thickness. This algorithm proves to be practical and effective.

Key words Quantitative neutron imaging instrument, Neutron scattering correction, Point spread function, Iterative algorithm, H₂O sample

CLC O799