



·粒子束及加速器技术·

电子照相技术成像模拟研究*

贾清刚, 杨波, 许海波, 余若谷

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘 要: 针对高能电子照相的关键物理过程开展蒙特卡罗照相模拟研究, 采用 Geant4 围绕 2.5 GeV 电子在四极透镜组内的运输、电子与物质相互作用衰减等照相基本过程展开研究。通过设计不同材料、不同厚度的含缺陷平板作为模拟照相客体, 开展放大型电子照相系统缺陷分辨能力模拟。此外, 采用不同材料、不同厚度的台阶样品, 模拟获得了电子束流穿过相应面密度材料后的线扩展函数, 进一步评估电子照相对实心客体的探测分辨能力。

关键词: 高能电子照相; 蒙特卡罗模拟; 台阶样品; 缺陷样品; 线扩散函数

中图分类号: TL632; TB302.5

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.200300

Study on imaging simulation of electronic photography

Jia Qinggang, Yang Bo, Xu Haibo, She Ruogu

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract: High energy electron radiography is a useful nondestructive method for density material diagnosis. The higher the kinetic energy, the stronger penetrability the electron has. Thus electron with GeV energy is considered for probing the density material. This paper aims at 2.5 GeV electron radiography. The key processes of radiography are studied by Monte Carlo simulation. All simulations are carried out by Geant4 code. Firstly, basic physical processes including the transport of electrons in the quadrupole lens group and the attenuation of the interaction between electrons and matter are constructed by Geant4 code. Some details about the physics setup are given. Four samples of different materials and thickness, with voids inside, are designed as the object of simulation radiography. Other necessary geometries for electronic photography such as quadrupole and pixel detector are built as well. Then a large-scale electronic photography is simulated. In addition to this, two step samples made of copper and tungsten, respectively, are employed as object for the radiography simulation. In the simulation, collimated line electron source radiates objects, then the line spread function of the electron beam passing through the different area density is obtained. Based on the simulated results, evaluation about the detection and resolution ability of 2.5 GeV electron radiography is shown.

Key words: high energy electron radiography; Monte Carlo simulation; step sample; defect sample; linear diffusion function

高能电子照相(HEER)是利用 GeV 量级能量、皮秒脉宽的电子束透射成像, 是高能质子照相外的另一种带电粒子无损检测及动态物理过程诊断技术^[1-2], 具有时间响应快、空间分辨率高等特点。相比高能质子照相^[3], GeV 放大型电子照相有可能实现更高的空间分辨率^[4], 有望进一步用于开展介观尺度的动态物理过程诊断, 在极端条件下材料特性研究、惯性约束聚变、高能量密度物理诊断等领域有着广阔的应用前景^[5-13]。本研究采用 Geant4 模拟了电子与物质相互作用衰减等基本过程, 设计了不同的含缺陷平板作为模拟客体, 开展了放大型电子照相系统缺陷分辨能力研究, 评估了电子照相对实心客体的探测分辨能力。

* 收稿日期: 2020-11-02; 修订日期: 2021-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(11675021); 国家自然科学基金青年科学基金项目(11805018)

作者简介: 贾清刚(1986—), 男, 博士, 副研究员, 从事辐射诊断研究。

通信作者: 杨波(1981—), 男, 博士, 副研究员, 从事核测试诊断研究。

1 基于开源蒙特卡罗 Geant4 电子照相模拟

1.1 电子照相关键物理过程

对于电子与物质相互作用主要考虑: 轫致辐射、多次库伦散射、电离这 3 个过程^[14], Geant4^[15] physics.cc 关键字如下:

```
pmanager->AddProcess ( new G4eMultipleScattering(), -1, 1, 1);
pmanager->AddProcess ( new G4eIonisation(), -1, 2, 2);
pmanager->AddProcess ( new G4eBremsstrahlung(), -1, 3, 3)。
```

由于电子能量较高, 考虑到模拟效率并未采用 Livermore 标准电磁模型。此外, 次级轫致辐射 X 射线产生的二次电子不计入内。穿透客体的电子最终到达探测器, 一般探测器均采用平板闪烁体记录电子二维空间分布, 将电子通量信号转化为荧光分布最终由 CCD 采集。考虑到对荧光模拟将占用大量计算资源, 提前计算不同能量电子入射闪烁屏时的能量沉积分布, 模拟成像时仅模拟电子穿过客体后的二维空间通量分布, 再卷积闪烁屏响应获得照相结果。电子在荧光平板闪烁体内呈各向同性分布, 如图 1 所示(左侧)。

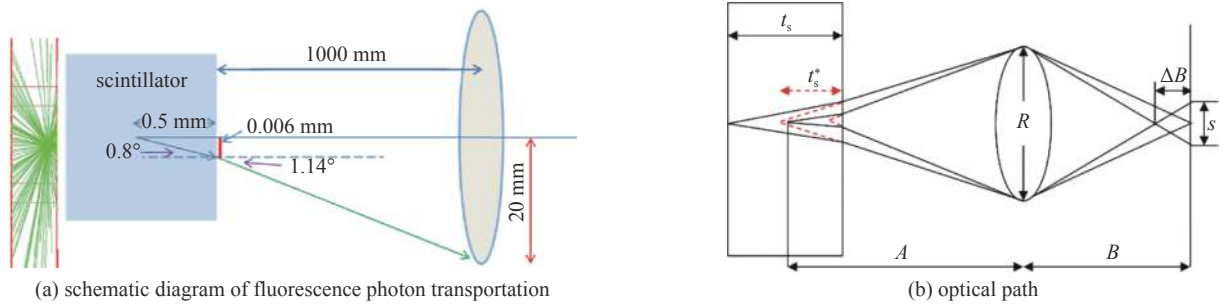


Fig. 1 Schematic diagram of blurring caused by light transport after electrons excited fluorescence in scintillator

图 1 电子在闪烁板内激发荧光后, 光输运所致景深模糊示意图

如图 1 所示, 由于闪烁板存在一定厚度, 最终光信息传输过程中将存在一定景深模糊, 模糊量为

$$s = -\frac{Rt_s M}{2A + t_s M} = \frac{Rt_s M}{2AN + t_s M} \propto \frac{Rt_s M}{2AN} = \frac{20 \times 0.5 \times M}{2 \times 1000 \times 1.58} \quad (1)$$

式中: R 为后端接收透镜的半径; t_s 为闪烁板半厚度; t_s^* ($\Delta A = t_s^*/2$) 为不考虑折射率时的替代厚度; N 为折射率 ($N = t_s/t_s^* = 1.58$); A 为闪烁板后断面至透镜距离; $M(B/A)$ 为透镜光路放大倍数。假设典型的参数如图 1(a) 所示, 对于图 1 所示景深模糊大致为 $0.003M$ mm。取 3 倍放大倍数即 $M=3$, 综合考虑 CCD 最小成像单元及景深模糊所致量化误差, 综合取虚拟电子探测器最小可分辨尺寸为 0.01 mm。

1.2 电子照相结构与束流参数

将四极透镜简化为圆柱结构, 不考虑四极透镜磁场边缘效应。电子在一段四极透镜内的运动径迹如图 2 所示。在虚拟探测平面上, 采用 Geant4 灵敏探测器 (SD-detector) 模块, 构建总尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 像素尺寸为 0.01 mm, 总像素单元 4000×4000 的灵敏阵列式探测器。

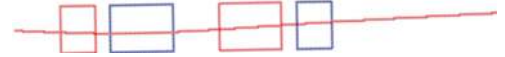


Fig. 2 Visualization of electron trajectories through quadrupole lenses (Geant4_openGl)

图 2 电子穿过四极透镜组的可视化轨迹 (Geant4_openGl 显示)

1.5 mm 半径均匀场, 1 mrad 弥散角, 能量 $2.5 \text{ GeV} \pm 2.5 \text{ MeV}$ 高斯分布, 到达探测器时通量为 10000/可分辨像素 ($0.01 \text{ mm} \times 0.01 \text{ mm}$)。

2 成像模拟客体设置

2.1 缺陷样品及其基本参数

设置一定厚度平板, 内含不同厚度空隙样品共 4 块, 横向尺寸均为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 其中 2 块厚度为 1 mm 纯钨, 对应面密度为 1.935 g/cm^2 , 2 块 1 mm 厚纯铜, 面密度为 0.89 g/cm^2 纯铜。相同材料钨板其含空隙宽度不同, 分别为 0.005 mm 与 0.001 mm, 7 条空隙厚度分别为 0.1, 0.25, 0.4, 0.55, 0.7, 0.85, 1 mm。两铜板内空隙设置与钨板一致, 4 块样品 Geant4_openGl 可视化如图 3 所示。入射电子束均匀覆盖整个样品。

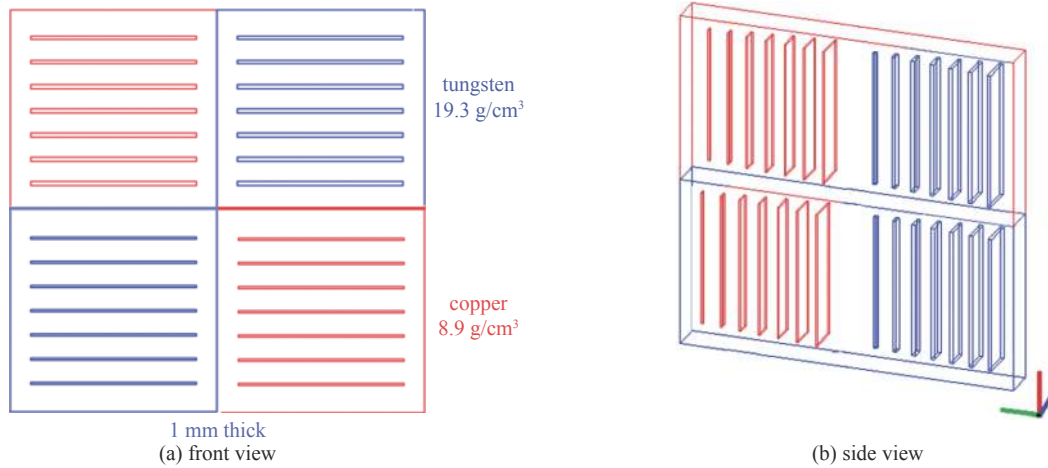


Fig. 3 Four samples with different voids (Geant4_openGl)

图3 4块含不同空隙样品(Geant4_openGl 显示)

2.2 台阶样品及其基本参数

设置4块台阶样品,材料分别为纯钨与纯铜各2块,相同材料的2块台阶样品台阶厚度分别为0.10, 0.25, 0.40, 0.55, 0.70, 0.85, 1.00 mm; 1.10, 1.25, 1.40, 1.55, 1.70, 1.85, 2.00 mm,模拟时相同材料台阶样品置于右上-左下(图4绿色与蓝色区域)或者左上右下(图4红色与黄色区域)。入射电子束为线源,水平投射至上下部台阶样品中心位置,以获得该成像条件下的线扩散函数。

3 Geant4 模拟电子照相结果

3.1 纯钨与纯铜板最小可分辨缺陷与面密度

使用 Geant4, openmpi, 32 线程 2680X2 计算约 80 h 得到,其中电子通量为 10000/可分辨像素(0.01 mm×0.01 mm),像素统计方差 < 3%,模拟得到投射图像如图 5 所示。

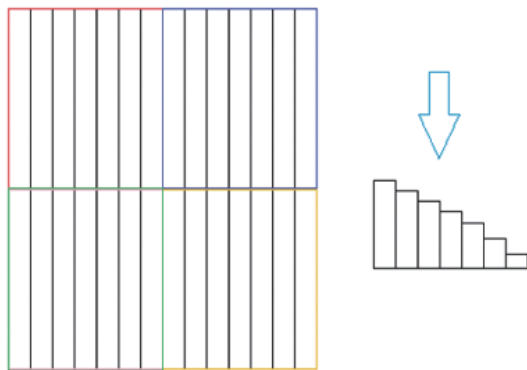


Fig. 4 Schematic diagram of tungsten and copper step samples

图4 钨与铜台阶样品示意图

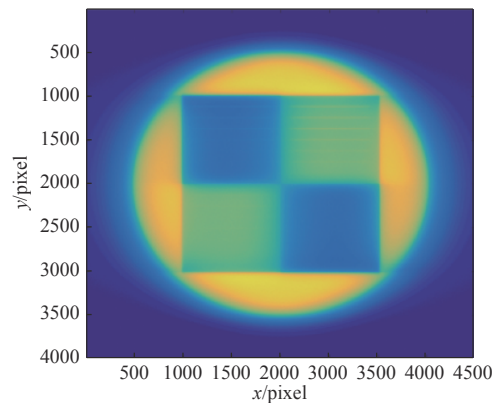


Fig. 5 Projection image of tungsten and copper defect plate

图5 钨与铜缺陷板投射图像

由于电子能量及出射角度均存在一定分布,假设电子束流为圆形均匀分布,实际到达探测面时成部分椭圆状并存在一定模糊,束流覆盖区域外仍有粒子分布。从对缺陷的诊断上讲,宽度为 0.01 mm,厚度在 0.4 mm 以上的空隙,在面密度为 1.935 g/cm² 的纯钨与 0.89 g/cm² 纯铜板投射图像上均有体现,而宽度为 0.005 mm 空隙,均难以直接用肉眼甄别。取左半侧(上半部分为狭缝宽 0.01 mm 的钨板,下半部分为狭缝宽度为 0.005 mm 铜板)中心处电子通量密度如图 6 所示。

由图 6 可知,若不存在客体,则电子通量分布应近似为矩形,由于分别阻挡了钨板与铜板(左与右),电子通量分别下降约 75% 与 40%。狭缝中最厚的为 1 mm,相当于对射线没有阻挡,理想情况下电子强度应没有下降。然而钨板最左侧狭缝(坐标 1180)对应电子强度峰值仅较附近钨阻挡区域电子通量高不足 20%,远小于 400% 这一理想值(达到 2×10⁶)。由于狭缝为 0.01 mm,厚度为 1 mm,长径比为 100,有部分电子可能穿过狭缝壁能量有所丢失,故

峰值强度比理想值小。另一方面,若电子能够通过磁场精确聚焦,所获得图像中对应狭缝处的峰值应与原电子束强度一致,其他区域模糊影响只会与该峰叠加,增加其半高宽而并不会明显影响峰强度。随着狭缝空隙厚度减小至 0.4 mm 以下,图像上就无法识别狭缝。此外,若狭缝宽度进一步缩至 0.005 mm,即使面密度较低的铜板,电子穿过造成的模糊已将微弱的投射信号湮灭,相对应狭缝显示毛刺状分布。

3.2 纯钨与纯铜台阶样品及束流线扩展函数

图 7 为台阶样品线源照相图,其中光色方框(0.7 mm×0.7 mm)对应铜台阶样品,右上为 0.1~1.0 mm,左下为 1.1~2.0 mm;白色方框对应钨台阶样品,左上为 0.1~1.0 mm,右下为 1.1~2.0 mm。由模拟结果可知,当台阶样品为钨且大于 1 mm 时,线扩散函数基本为分布展宽较大。而铜台阶样厚度大于 1 mm 时,线扩散函数也有较明显展宽,这里只给出 0.1~1.0 mm 的钨与铜台阶样品的线扩散函数,如图 8 所示。

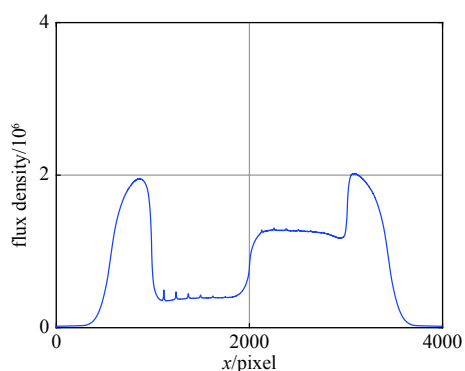


Fig. 6 Electron flux density

图 6 电子通量密度

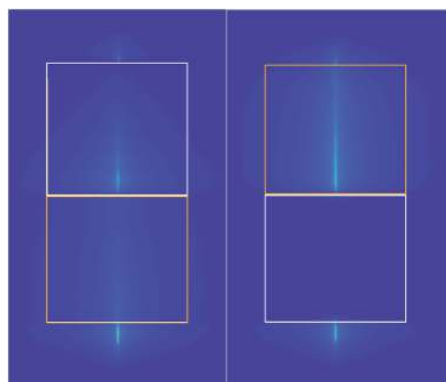
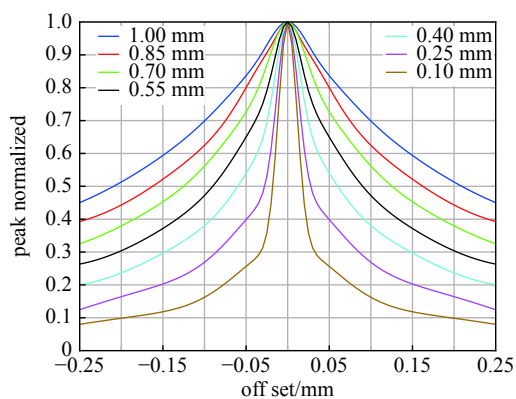
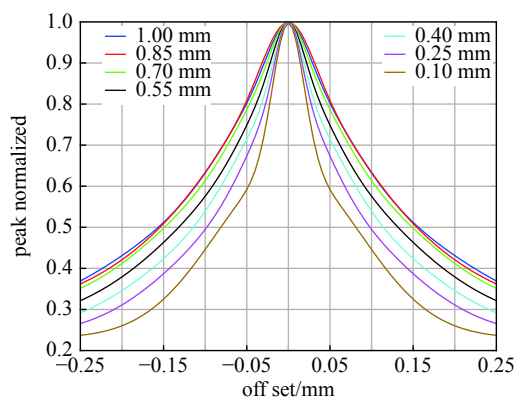


Fig. 7 Line source transmission image of tungsten and copper stepped samples

图 7 钨与铜台阶样品线源透射图像



(a) LSF for copper target with step geometry



(b) LSF for tungsten target with step geometry

Fig. 8 Diffraction efficiency map of a BSG pre-polishing and post-polishing at 532 nm

图 8 抛光前后光束取样光栅衍射效率分布图

对比图 8(a)与图 8(b)可知,随着台阶样品厚度增加,线扩展函数半高宽增大(图 8(b)中 0.85 mm 与 1.00 mm 扩展函数的特例是由于峰值归一化时噪声过大所致)。相同厚度台阶样品,密度越高其线扩散函数展宽/模糊越大。

图 8(a)中厚度为 0.1 mm 铜台阶线扩散函数半高宽约为 0.015 mm,即模糊宽度为 0.015 mm,而图 5 中对应缺陷宽度 0.01 mm 可以用肉眼识别,二者并不矛盾。首先,除半高宽外定义图像空间分辨率还有其它方法,如 10% 对比可见的瑞利判据,半高宽与分辨单元的关系对于严格三角形展宽分布是可以严格证明的,然而,实际线扩散函数均存在拖尾现象,半高宽只是对最小可分辨单元的估计。其次,直接线扩散函数针对电子束穿过实体样品后的弥散,而可分辨最小空隙受非空隙区域影响很大,且还与空隙长径比、磁场色散系数等相关(可能会出现边界锐化增强等现象)。因此,对于不同待测样品,应根据具体分辨需求模拟评估系统相应空间分辨能力。

4 结论

模拟研究了 2.5 GeV 电子照相的关键物理过程,采用 Geant4 构建了运输、电子与物质相互作用衰减等基本过

程,设计了不同材料、不同厚度的含缺陷平板作为模拟客体,开展了放大型电子照相系统缺陷分辨能力模拟研究。此外模拟获得了电子束流穿过相应面密度材料后的线扩展函数,进一步评估了电子照相对实心客体的探测分辨能力。

由于电子照相空间分辨率除电子在物体中的多次库伦散射外,能量弥散所致色差也会影响实际分辨效果,采用线扩散函数仅能大致估计其空间分辨率,涉及复杂样品空隙分辨时还需对样品进行实际全物理过程照相模拟予以评估。

参考文献:

- [1] Merrill F, Harmon F, Hunt A, et al. Electron radiography[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2007, 261(1/2): 382-386.
- [2] Maenchen J E, Menge P R, Rovang D C, et al. Intense electron beams for radiography[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2000.
- [3] Merrill F E. Flash proton radiography[J]. [Reviews of Accelerator Science and Technology](#), 2015, 8: 165-180.
- [4] 卢亚鑫, 杨国君, 魏涛, 等. 高能电子照相成像模糊模拟研究[J]. [强激光与粒子束](#), 2016, 28: 014002. (Lu Yaxin, Yang Guojun, Wei Tao, et al. Image blur in high energy electron radiography[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2016, 28: 014002)
- [5] 卢亚鑫, 杨国君, 魏涛, 等. 2.5 GeV高能电子照相实验束线设计及成像能力研究[J]. [高能量密度物理](#), 2017, 3(1): 25-30. (Lu Yaxin, Yang Guojun, Wei Tao, et al. [J]. [High Energy Density Physics](#), 2017, 3(1): 25-30)
- [6] 赵全堂, 张子民, 曹树春, 等. 高能电子成像研究进展[J]. [原子能科学技术](#), 2019, 53(9): 1651-1655. (Zhao Quantang, Zhang Zimin, Cao Shuchun, et al. Status and progress of high energy electron radiography[J]. [Atomic Energy Science and Technology](#), 2019, 53(9): 1651-1655)
- [7] 卢亚鑫. 基于Geant4的高能电子照相模拟研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2016. (Lu Yaxin. Charged particle radiography study by using Geant4[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2016.)
- [8] 肖家浩. 高能电子成像技术在高能量密度物质诊断中的应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019. (Xiao Jiahao. The application of high energy electron radiography in high energy density materials diagnosis[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.)
- [9] 王致远. 高能电子成像方法的初步研究[D]. 北京: 清华大学, 2014. (Wang Zhiyuan. The preliminary research of imaging diagnostic by high energy electron beam[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.)
- [10] 肖渊, 王晓方, 滕建, 等. 激光加速电子束放射照相的模拟研究[J]. [物理学报](#), 2012, 61: 234102. (Xiao Yuan, Wang Xiaofang, Tengjian, et al. Simulation study of radiography using laser-produced electron beam[J]. [Acta Physica Sinica](#), 2012, 61: 234102)
- [11] Xiao Jiahao, Zhang Zimin, Cao Shuchun, et al. Areal density and spatial resolution of high energy electron radiography[J]. [Chinese Physics B](#), 2018, 27: 035202.
- [12] Zhu Yunliang, Yuan Ping, Cao Shuchun, et al. Design and simulation of a LINAC for high energy electron radiography research[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 911: 74-78.
- [13] Rong Qi, Ye Tian, Zhang Guoqing, et al. High-energy electron radiography of microstructures in a dense material[J]. [The European Physical Journal Applied Physics](#), 2016, 75(3): 30701.
- [14] Knoll G F. Radiation detection and measurement[M]. 4th Ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2010.
- [15] Allison J, Amako K, Apostolakis J, et al. Geant4 developments and applications[J]. [IEEE Transactions on Nuclear Science](#), 2006, 53(1): 270-278.