

硬化伪影的新型表现形式及其校正^{*}

陈云斌^{1,2}, 陈 思^{1,2}, 李 敬^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 国家 X 射线数字化成像仪器中心, 四川 绵阳 621000)

摘 要: X 射线硬化是导致工业 CT 重建图像质量下降的物理原因之一。硬化伪影通常表现为两种形式, 即杯状伪影和带状伪影。描述并证实了硬化伪影的一种新型表现形式, 这种伪影与真实结构相关, 且分布规则, 容易造成伪影与真实结构的混淆。采用线性校正方法对该伪影进行抑制, 提高了重建图像质量, 改善了通过 CT 重建图像进行几何测量的精度。

关键词: 工业 CT; 射束硬化; 杯状伪影; 带状伪影; 几何测量

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **doi:**10.11884/HPLPB201628.160047

工业 X-CT 作为一种高效的无损检测手段, 已广泛应用于缺陷探伤、属性分析, 并推广到精细的几何测量领域。对于 X-CT 无损检测技术手段, CT 重建图像的影像质量对于检测效果至关重要。而广泛用于获取重建图像的滤波反投影算法存在一个理想假设, 即 X 射线为单能射线。但在现实情况中, X 射线的能谱具有一定的带宽, 射线穿过物体并与物体相互作用时, 由于物体对不同能量的射线具有不同的衰减程度, 射线能谱会发生变化。具体地讲, 能谱谱峰会向高能方向偏移, 这种现象被称为射线硬化。这种存在于理想假设与现实情况中的偏差在重建图像中会以各种伪影形式表现出来, 导致 X-CT 重建图像质量的退化^[1]。

由射线硬化引起的伪影主要有两种表现形式。对于均匀材质扫描对象, 其重建图像灰度会呈现出四周高中间低的杯状伪影, 这种现象作为硬化伪影的显著特征, 在很多文献中均有报道^[2-3]; 对于密度差异较大的扫描对象, 比如存在金属填充物的牙齿, 高密度物体之间会产生带状伪影, 这种形式的伪影其校正较为复杂, 多采用二次重建法对低密度物质和高密度物质进行分别处理^[4-5]。上述两种常见伪影形式在重建图像中容易识别和区分, 不易造成伪影与真实结构的混淆。但是如果带状伪影按特定规律进行交叉、组合, 硬化伪影会以一种规则的结构形式表现出来。这种伪影具有规则的几何形状, 容易造成与扫描对象真实结构的混淆, 进而造成误判。本文描述了硬化伪影的这种新型表现形式, 并采取相应的硬化校正方法对其进行抑制。

1 射线硬化的物理原因和常用校正方法

真实情况下, X 射线的能谱为 $S(E)$, 则 X 射线的初始强度为

$$I_0 = \int_0^{E_m} S(E) dE \tag{1}$$

式中: E 表示光子能量, E_m 表示光子能量的积分上限。X 射线穿过物体后, 射线强度衰减为

$$I_1 = \int_0^{E_m} S(E) \exp \left[- \int_0^l \mu(x, E) dx \right] dE \tag{2}$$

式中: $\mu(x, E)$ 表示在射线能量为 E 时物体在坐标 x 处的衰减系数, l 表示射线的透射距离。则用于 CT 重建的多色投影表示为

$$p(l) = - \ln \left(\frac{I_1}{I_0} \right) = - \ln \left\{ \frac{\int_0^{E_m} S(E) \exp \left[- \int_0^l \mu(x, E) dx \right] dE}{\int_0^{E_m} S(E) dE} \right\} \tag{3}$$

可见多色投影和透射距离之间呈非线性关系。

CT 重建算法以单能射线为前提, 即假设

$$S(E) = \delta(E - E_0) \tag{4}$$

则式(3)可简化为

^{*} 收稿日期: 2016-01-28; 修订日期: 2016-03-28
基金项目: 中国工程物理研究院应用技术开发项目(JMZD201302)
作者简介: 陈云斌(1985—), 男, 硕士, 从事 CT 重建算法的工程应用研究; 284644485@qq.com。

$$m(l)=\int_0^l\mu(x,E_0)\mathrm{d}x$$

(5)

式中： $m(l)$ 表示单色投影。在 CT 重建过程中,将多色投影(式(3))近似为单色投影(式(5)),导致了硬化误差的产生。

射束硬化校正的方法比较多,但真正用得比较广泛的还是线性化方法,包括多项式拟合^[1,6-8]、双峰能谱模型^[9]、指数拟合^[10]等。该类方法首先通过函数拟合建立起多色投影同透射距离的非线性关系,然后再将用于 CT 重建的多色投影校正为线性单色投影。本文选用多项式拟合方法进行多色投影的非线性校正。

2 硬化伪影的常见表现形式

对于均匀材质扫描对象,硬化伪影表现为杯状伪影,重建图像灰度呈现出四周高中间低的分布特征。图 1(a)显示了均匀模体受硬化影响的重建图像,图 1(b)显示了重建图像某一行的灰度分布曲线,可以发现杯状伪影比较明显。杯状伪影只是改变了重建图像的灰度分布特征,对物体结构的判读影响较小。

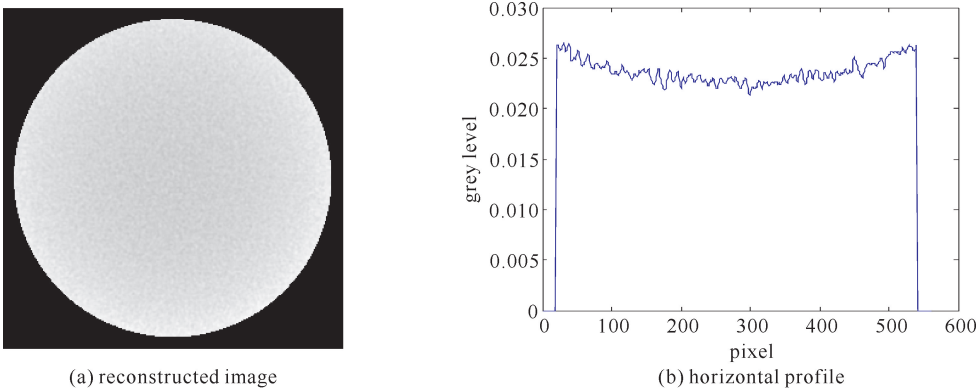


Fig. 1 Reconstructed image with beam hardening effect and horizontal profile of grey value in the reconstructed image

图 1 受硬化效应影响的重建图像及重建图像中某一行的灰度剖面曲线

对于密度差异比较大的多材质扫描对象,硬化伪影主要表现为带状伪影。图 2 为多材质模体的重建图像。该模体的背景材料由聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)组成,密度为 1.2 g/cm³;内嵌了三根直径为 5 mm 的钛圆柱体,密度为 4.5 g/cm³。由于受硬化影响,高密度钛圆柱体之间形成明显的暗条纹带状伪影,这种伪影也被称为金属伪影。带状伪影破坏了模体在重建图像上的结构信息,对重建质量影响较大。

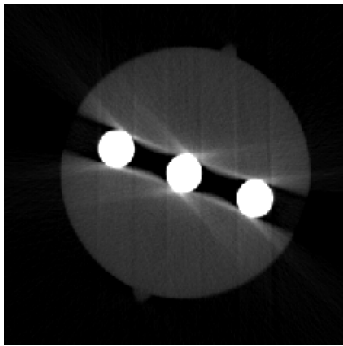


Fig. 2 Reconstructed image of a multi-material phantom with beam hardening effect

图 2 多材质模体受硬化效应影响的重建图像

3 硬化伪影的新型表现形式及其校正

3.1 新型伪影的表现形式

对于密度差异比较大的扫描对象,带状伪影如果按一定规律进行排列、组合,会形成一种具有规则几何分布的伪影结构,容易与物体真实结构混淆,进而造成误判。本文选取了一个自制的钛合金模体进行成像实验。该模体密度 4.5 g/cm³,用于几何精度的测量。其中外圆直径 25 mm,内圆直径 15 mm。模体环壁四周等间隔分布了圆形孔,圆孔直径 3 mm。选用国家 X 射线数字化成像仪器中心自主开发的低能 CT 对其进行成像实验。成像条件见表 1,重建图像如图 3 所示。

表 1 成像条件

Table 1 Scanning protocol

voltage/kV	current/mA	pixel size/mm	focal length/mm	field of view	voxel size/mm	frame	image size
95	5	0.254	820	φ8 cm×8 cm	0.16	500	480×480

由图 3 可以看出,模体内圆空腔内排列着多个类似于圆孔的结构。但是在模体设计原型里,这样的结构并不存在,故推断其为伪影,为了描述方便,将其称为圆孔伪影。进一步观察可发现,该伪影的分布具有如下特征:伪影呈环状分布,外围圆孔伪影与环壁内的真实圆孔数量、分布相同,且每个圆孔伪影的中心位于三条连接圆孔圆心的连线上,中心处有一个更加显著的圆孔伪影,其中心位于四条连接圆孔圆心的连线上。位于环壁内

的圆孔,其密度为 0,与钛合金具有较大密度差异,受射束硬化影响,环壁内圆孔之间会形成带状的硬化伪影。因此可以推测空腔内的圆孔伪影是由硬化带状伪影交叉组合而成。

3.2 新型伪影的形成原因

为了验证上述圆孔伪影形成的物理机制,采用计算机模拟的方式跟踪圆孔伪影的生成过程。首先按照实验中钛合金模体的尺寸、形状、密度生成扫描对象。注意到环壁内的 8 个真实圆孔可以分为 4 组,每组圆孔圆心的连线通过圆环中心。为了再现圆孔伪影的生成过程,在模拟扫描对象时,逐渐递增圆孔数量,如图 4 所示。

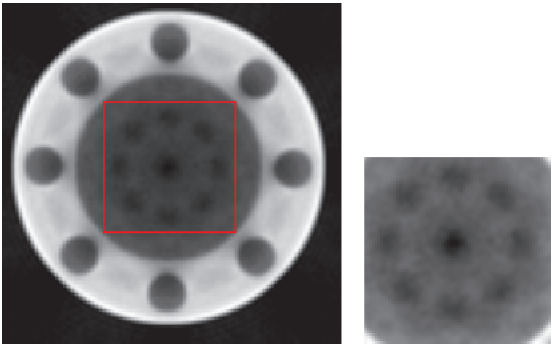


Fig. 3 Original reconstructed image of a phantom composed of Ti
图 3 钛合金模体原始重建图像

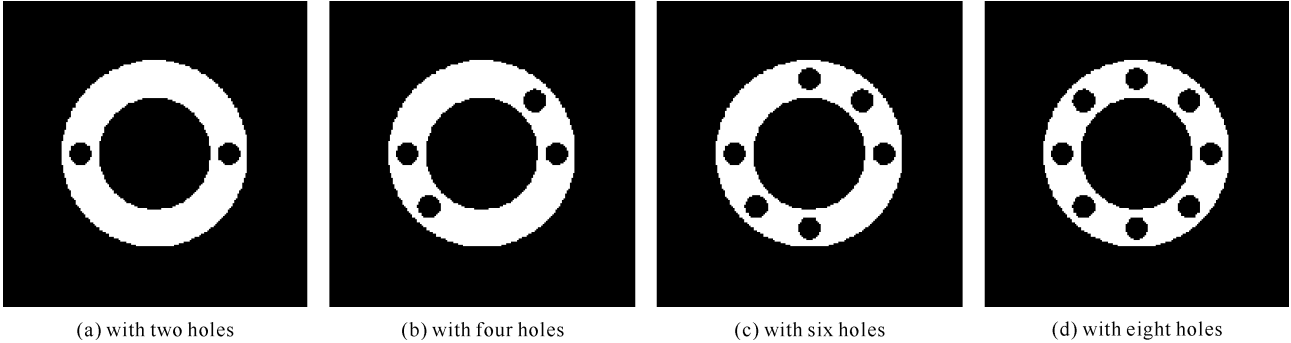


Fig. 4 Ti phantoms generated by computer simulation
图 4 模拟生成的钛合金扫描对象

如第 1 节所述,射线硬化是由于射线的宽能谱效应造成,进而造成实际的投影数据(多色投影)与透射距离呈非线性关系。为了模拟射线硬化效应,将线性单色投影表示成多色投影的 N 阶多项式

$$m(l) = \sum_{i=1}^N a_i p^i(l) \quad (6)$$

为了便于求逆,这里令 $N=2, a_2 = \frac{1}{64}, a_1 = \frac{1}{4}$, 则受射束硬化影响的非线性多色投影可通过反求式(6)得

$$p(l) = \sqrt{\frac{m(l)}{a_2} + \left(\frac{a_1}{2a_2}\right)^2} - \frac{a_1}{2a_2} \quad (7)$$

其中,单色投影 $m(l)$ 可通过正投影的方式获得。

针对模拟生成的具有不同圆孔数量的扫描对象,分别获得其多色投影,并采用滤波反投影算法进行重建,重建结果如图 5 所示。可以直观地发现,由于投影的非线性,位于环壁内的圆孔之间会形成带状伪影。随着圆孔数量的增加,带状伪影交叉组合,并最终形成了内圆空腔内的圆孔伪影。

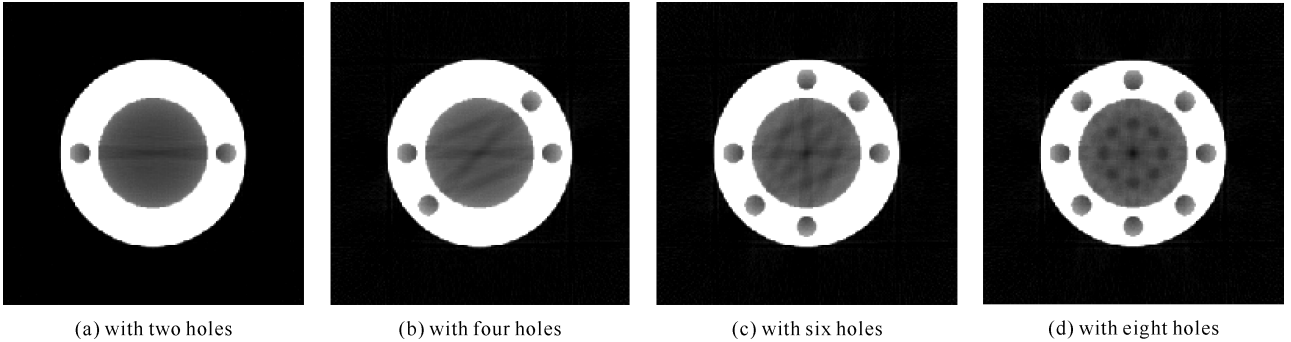


Fig. 5 Simulated reconstructed images of Ti phantom affected by beam hardening effect
图 5 模拟硬化效应生成的钛合金模体重建图像

通过模拟实验证明,图 3 中的圆孔伪影确是由射束硬化造成,可针对性地采取硬化校正方法对该伪影进行抑制。

3.3 新型伪影的校正

在明确了圆孔伪影是由射束硬化造成的物理事实之后,下面采用基于多项式拟合的线性化校正方法对该伪影进行抑制。线性化方法包含如下步骤:

- (1) 建立多色投影与透射距离的映射表。多色投影由探测器采集获得,如式(3),透射距离可通过对原始重建图像的二值化分割图像进行正投影获得。
- (2) 通过最小二乘拟合建立起多色投影与透射距离的多项式关系表达式。
- (3) 根据多项式关系表达式对多色投影进行线性化校正,得到单色投影。
- (4) 对校正后的投影进行重建,得到硬化校正后的图像。

就本次实验而言,建立起单色投影与多色投影的三阶多项式关系为

$$m(l) = [0, 1, -0.380\ 023, 0.077\ 463] [1, p(l), p^2(l), p^3(l)]^T \quad (8)$$

式中: $m(l)$ 表示单色投影, $p(l)$ 表示多色投影,“T”表示转置, $[0, 1, -0.380\ 023, 0.077\ 463]$ 表示多项式拟合系数,与扫描条件、实验对象、采样的拟合数据有关。最后将多色投影按式(8)逐一进行硬化校正,并用于 CT 重建。经过硬化校正后的重建图像如图 6 所示。硬化校正前后重建图像的灰度值剖面曲线对比如图 7 所示。可以发现,模体内圆空腔内分布的圆孔伪影得到明显抑制。另外,模体环壁内分布的圆孔,其重建图像在经过校正后,圆孔形状更加规则,如图 8 所示。

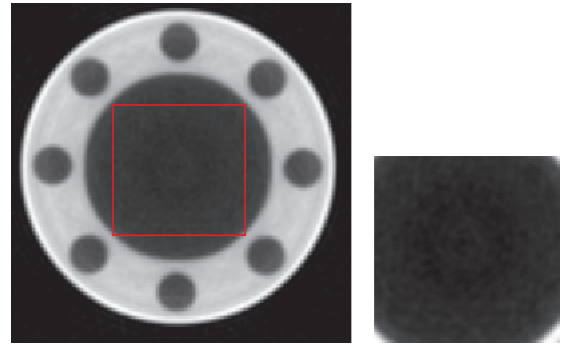
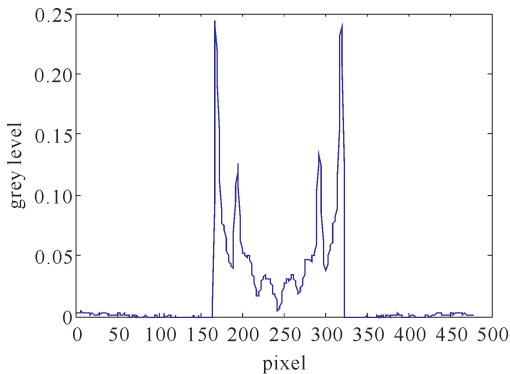
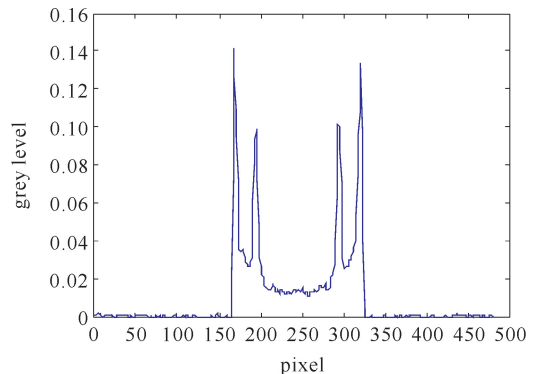


Fig. 6 Reconstructed image of Ti phantom with beam hardening correction

图 6 经过硬化校正后的钛合金模体重建图像



(a) without beam hardening correction



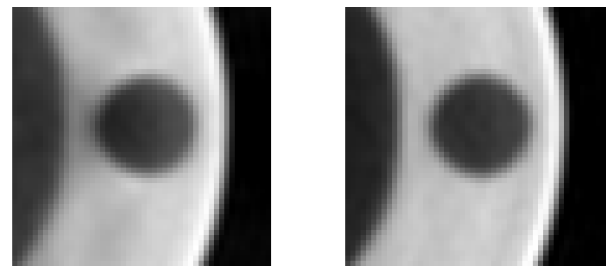
(b) with beam hardening correction

Fig. 7 Horizontal profile comparison of grey value in the reconstructed images without and with beam hardening correction

图 7 硬化校正前后的灰度值剖面曲线对比

4 结 论

本文借助圆环形扫描模体描述了一种伪影的新型表现形式。该伪影与扫描对象结构相关,形成排列规则的几何结构,容易与扫描对象真实结构混淆。通过计算机模拟,证实了该伪影是由射束硬化造成,并采用对应的硬化校正方法对伪影进行了抑制,提高了重建图像质量,改善了图像测量精度。另外,通过本文的验证和测试,可提高对类似伪影结构的判别能力,并采取针对性的校正措施。



(a) original reconstructed image

(b) reconstructed image with beam hardening correction

Fig. 8 Reconstructed image of a local hole

图 8 环壁内圆孔的重建图像

参考文献：

[1] Herman G T. Correction for beam hardening in computed tomography[J]. *Phys Med Biol*, 1979, **24**(1): 81-106.

[2] 叶侠娟, 张朋. CT 系统的能谱估计及射束硬化校正算法[J]. CT 理论与应用研究, 2003, **12**(2): 10-15. (Ye Xiajuan, Zhang Peng. Estimation of energy spectra of CT system and beam hardening correction algorithm. *CT Theory and Applications*, 2003, **12**(2): 10-15)

[3] 李岭, 高富强, 周钦, 等. 低能 X 射线工业 CT 图像杯状伪影校正[J]. 强激光与粒子束, 2014, **26**: 059004. (Li Ling, Gao Fuqiang, Zhou Qin, et al. Cupping artifact correction for low-energy X-ray industrial CT images. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, **26**: 059004)

[4] Prell D, Kalender W A, Kyriakou Y. Development, implementation and evaluation of a dedicated metal artifact reduction method for interventional flat-detector CT[J]. *The British Journal of Radiology*, 2010, **83**: 1052-1062.

[5] Prell D, Kyriakou Y, Beister M, et al. A novel forward projection-based metal artifact reduction method for flat-detector computed tomography[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2009, **54**: 6575-6591.

[6] 杨民, 路宏年, 路远. CT 重构中射线硬化的校正研究[J]. 光学技术, 2003, **29**(2): 177-178. (Yang Min, Lu Hongnian, Lu Yuan. Method of beam hardening correction for CT reconstruction. *Optical Technique*, 2003, **29**(2): 177-178)

[7] 张全红, 路宏年, 杨民. 基于重投影的多项式拟合校正射束硬化[J]. 光学技术, 2005, **31**(4): 633-635. (Zhang Quanhong, Lu Hongnian, Yang Min. Beam hardening correction using polynomial fitting based on reprojection. *Optical Technique*, 2005, **31**(4): 633-635)

[8] 李寿涛, 陈云斌, 陈浩, 等. 单材质物体锥束 CT 成像的硬化校正[J]. 光电工程, 2012, **39**(1): 135-139. (Li Shoutao, Chen Yunbin, Chen Hao, et al. Beam hardening correction of single-material objects in CT imaging. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(1): 135-139)

[9] Van de Casteele E, Van Dyck D, Sijbers J. An energy-based beam hardening model in tomography[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2002, **47**(23): 4181-4190.

[10] 彭光含, 蔡新华, 韩忠, 等. X 射线 TICT 在复合材料工件检测中的射束硬化拟合校正研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, **27**(9): 1882-1885. (Peng Guanghan, Cai Xinhua, Han Zhong, et al. Beam hardening simulated correction research for X-ray TICT in testing composites workpiece. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(9): 1882-1885)

[11] Hsieh J, Molthen R C, Dawson C A. An iterative approach to the beam hardening correction in cone beam CT[J]. *Med Phys*, 2000, **27**(1): 23-29.

Form and correction of a new type of artifact induced by beam hardening

Chen Yunbin^{1,2}, Chen Si^{1,2}, Li Jing^{1,2}

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. National X-ray Digital Imaging Instrument Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: X-ray beam hardening is one of the physical processes that degrade the quality of ICT reconstructed images. Commonly, beam hardening artifacts perform as cupping artifacts and streak artifacts. This paper illustrates and demonstrates a new type of beam hardening artifact. It is closely related to the structure of object. In addition, it is obscure between artifacts and real structures due to regular distribution of artifacts. Linear correction method was applied to suppress artifacts. The quality of reconstructed image is increased, and the accuracy of dimensional metrology is also improved.

Key words: industry CT; beam hardening; cupping artifact; streak artifact; dimensional metrology

PACS: 29.30.Kv; 87.57.cp; 87.57.nf