

高速旋转物体的 CT 图像重建方法

陈德峰^{1,2}, 于 平^{1,2}, 张 朋^{1,2}

(1. 首都师范大学数学科学学院, 北京 100048; 2. 检测成像北京高校工程研究中心, 北京 100048)

摘 要: 高速旋转物体的 CT 成像是难点问题, 相关研究论文较少. 由于 CT 检测系统的单幅投影的数据采集时间无法足够短, 导致无法采集高速旋转物体准静止的 CT 扫描数据, 从而使得基于逐条射线的经典 CT 成像模型不再适用于高速旋转物体 CT 成像. 本文针对高速旋转物体 CT, 给出了数据采集准则, 建立了射线混叠 CT 成像模型, 并提出了相应迭代重建算法. 仿真数据和实际数据的实验结果表明, 本文提出的方法可以较好地对高速旋转物体进行 CT 成像.

关键词: 高速旋转物体; 射线混叠 CT 模型; 重建算法; 采样时间; 解调

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)09-1786-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.09.016

Image Reconstruction Algorithm for High-Speed Rotating Object Computed Tomography

CHEN De-feng^{1,2}, YU Ping^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}

(1. School of Mathematical Sciences, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Testing and Imaging, Beijing 100048, China)

Abstract: The computed tomography (CT) for high-speed rotating objects is a difficult problem. There are few papers published on this topic. Because the scanning time of CT systems is not short enough to capture the quasi-static projection data of a high-speed rotating object, the traditional ray-by-ray-based CT imaging model is not applicable. In this paper, we present a principle of choosing data sampling time, establish a ray-overlapped CT imaging model for high-speed rotating objects, and propose a related iterative reconstruction algorithm. Both simulation and realistic experiment results show that the proposed method can effectively reconstruct the image of high-speed rotating objects.

Key words: high-speed rotating object; ray-overlapped CT model; reconstruction algorithm; sampling time; demodulation

1 引言

国内外现有工业 X 射线 CT 还无法实现对高速旋转物体(如高速运转中的航空发动机、高速离心机、燃气轮机)的 CT 成像^[1,2]. 有关高速旋转物体 CT 成像的研究尚处在探索阶段. 2003 年宋征等^[3]提出了基于随机正交投影识别和重排的高速旋转物体 CT 成像方法, 并进行了仿真数据验证, 但该方法要求所采集的数据仍是准静止的, 不发生数据混叠. 2014 年常铭等^[4]分析了研制航空发动机在线成像 CT 系统面临的难点问题, 给出了系统设计、数据采集方案以及图像重建方法, 提出了降低由于数据混叠引起的图像模糊方法, 并构建高能 CT 系统进行了模拟成像测试. 高速旋转物体 CT 成像的主要难点在于, 受 X 射线源流强和探测器数据采集速度限制, 无法在物体高速旋转的条件下采集准静止的 CT 数据, 因此经典的 CT 成像模型不再适

用, 如仍采用经典 CT 成像模型将导致重建图像出现沿旋转方向的模糊.

本文在若干假设下, 针对高速旋转物体 CT 成像给出了数据采集时间的选取准则, 建立了射线混叠的 CT 成像数学模型, 并提出了相应的图像迭代重建算法. 在数据存在噪声时, 射线混叠的 CT 成像数学模型具有高病态性. 经模拟 CT 数据和实际 CT 数据验证, 本文算法在数值上具有较好的鲁棒性, 可以正确重建出高速旋转物体的 CT 图像, 而不产生沿旋转方向的图像模糊.

每个 CT 扫描数据 I_j 可以看作是入射流强 I 由被测物体 \mathbf{x} 经过一定调制过程 F_j 得到的, 即 $I_j = F_j(I, \mathbf{x})$; 而 CT 图像重建过程则可以看作是由一系列关系 $I_j = F_j(I, \mathbf{x})$, $j \in \mathcal{J}$, 解调出 \mathbf{x} , 其中 \mathcal{J} 是扫描数据指标集. 在此意义上, 本文思想与 Accorsi 等人^[5]利用编码孔径和 Yining Zhu 等人^[6]利用准直器提高分辨率的思想有相似

之处,而不同之处在于相应的调制过程和解调方法不同,类似的思想还可参见张慧滔等人^[7]基于虚拟焦点的超分辨重建方法.本文对高速旋转物体 CT 成像做了一些较为理想的假设,而实际系统可能会有旋转不均匀、旋转轴晃动的情况,但相应的 CT 成像问题本质上仍是调制解调问题,只是在调制关系 $I_j = F_j(I, \mathbf{x}, \Theta)$ 中增加了参数族 Θ ,因此需要同时研究 Θ 的测量或估计方法和图像重建(解调)算法.

2 数学模型

假设:被检测物体是匀速转动的;旋转轴不发生晃动;探测器的采样时间是连续可选的;X 射线是单能的;忽略多次散射光子以及电子对淹没产生的光子.在此假设下,高速旋转物体断层 CT 成像可以描述为:

$$\bar{I}(u, \beta, t_0) = \int_0^{t_0} I_0(u)$$

$$\cdot \exp\left(-\int_{(x,y) \in L(u)} \mu((x,y) \mathbf{R}(\beta + v_0 t)) ds\right) dt \quad (1)$$

式中所使用的符号定义见表 1.

表 1 数学模型符号定义

符号	定义
$\mu(x, y)$	被测物体的线性衰减系数分布函数
β	被测物体绕 z 轴逆时针旋转的角度
$\mathbf{R}(\beta)$	绕 z 轴旋转 β 角的旋转矩阵, $\mathbf{R}(\beta) = ((\cos\beta, -\sin\beta), (\sin\beta, \cos\beta))$
v_0	物体绕 z 轴旋转的角速度
t	探测器的数据采样时间
$I_0(u)$	射线源流强分布,即单位时间内射线源发出的指向探测器坐标 u 的光子数
$\bar{I}(u, \beta, t)$	物体绕 z 轴从 β 角旋转 t 时间后,探测器单元 u 采集到的光子总数

式(1)相应的 CT 成像问题可以描述为:由已知的 $\bar{I}(u, \beta, t)$ 的一个采样集合,估计函数 $\mu(x, y)$ 在断层 Ω 上的取值分布,其扫描示意图如图 1 所示.

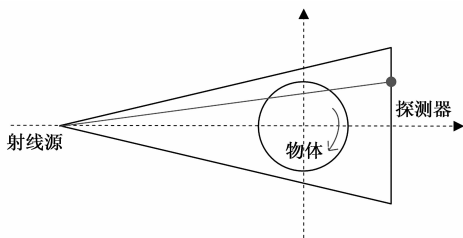


图 1 CT 扫描示意图

本文考虑上述 CT 成像问题的特殊情况,即探测器采样为

$$\bar{I}_{k,j} \stackrel{\text{def}}{=} \bar{I}(k\Delta u, jv_0 t_0, t_0)$$

$$= \int_0^{t_0} I_0(k\Delta u) \cdot \exp\left[-\int_{(x,y) \in L(k\Delta u)} \mu((x,y) \mathbf{R}(jv_0 t_0 + v_0 t)) ds\right] dt \quad (2)$$

其中, k 为探测器序号, Δu 为探测器单元长度, j 为探测器采集数据的帧序数.按定义, $\bar{I}_{k,j}$ 的含义为物体绕 z 轴从 $jv_0 t_0$ 角旋转时间 t_0 时,第 k 个探测器单元采集到的光子总数.令 $\alpha_0 = v_0 t_0, \alpha = v_0 t$,可将式(2)改写为

$$\bar{I}_{k,j} = \frac{1}{v_0} \int_0^{\alpha_0} I_0(k\Delta u) \cdot \exp\left[-\int_{(x,y) \in L(k\Delta u)} \mu((x,y) \mathbf{R}(j\alpha_0 + \alpha)) ds\right] d\alpha \quad (2a)$$

在此特殊情况下,高速旋转物体的 CT 问题可以描述为:对于给定的物体旋转角速度 v_0 ,如何选取采样时间 t_0 ,并由采集的数据集 $\bar{I}_{k,j} (k=0, 1, \dots, K-1; j=0, 1, \dots, N-1)$ 重建 $\mu(x, y)$ 在断层 Ω 上的值.

3 采样设计

物体旋转的角速度 v_0 是其固有属性,与成像设备无关.本节将说明角速度 v_0 以及采样时间 t_0 在满足某些关系时,才有可能从扫描数据中解调出重建图像 \mathbf{x} ;其次,针对给定的角速度 v_0 ,给出一种采样时间 t_0 的选取准则.

按上节定义, α_0 表示每次采样时物体旋转过的角度,假设 $0 < \alpha_0 < 2\pi$.我们考虑 $2\pi/\alpha_0$ 分别为有理数和无理数两种情形.

①如果 $2\pi/\alpha_0$ 为有理数,即 $2\pi/\alpha_0 = N/M$,其中 M 与 N 为互质整数.此时有

$$\mathbf{R}((j+N)\alpha_0 + \alpha) = \mathbf{R}((j+2\pi M/\alpha_0)\alpha_0 + \alpha) = \mathbf{R}(j\alpha_0 + 2\pi M + \alpha) = \mathbf{R}(j\alpha_0 + \alpha), \quad (3)$$

将此关系代入式(2)得

$$\bar{I}_{k,j+N} = \bar{I}_{k,j}, \quad \forall j=0, 1, \dots, N-1; k=0, 1, \dots, K-1 \quad (4)$$

即 $\bar{I}_{k,j}$ 关于 j 是周期的,且周期为 N .如图 2(a) 所示例子中, $\alpha_0 = v_0 t_0 = 6\pi/13$,此时相应的有 $N=13, M=3$.由 $(\cos(j\alpha_0), \sin(j\alpha_0))$ 到 $(\cos((j+1)\alpha_0), \sin((j+1)\alpha_0))$ 弦对应的角度为采集 $\bar{I}_{i,j}$ 时物体旋转过的角度.其中 N 为周期(即圆周节点数为 N), M 为弦每次跨过的节点个数.此时,数据可以重排成 N 个依次的、具有采样角度混叠的数据(参见图 2(a)).

②如果 $2\pi/\alpha_0$ 为无理数,则 $\bar{I}_{k,j}$ 关于 j 无周期性.对任意自然数 $i, j, i \neq j$,有 $(\cos(i\alpha_0), \sin(i\alpha_0)) \neq (\cos(j\alpha_0), \sin(j\alpha_0))$,即任意两个节点均不重合.如图 2(b) 为 $\alpha_0 = v_0 t_0 = 2\pi\sqrt{5}/13$ 时,节点 $(\cos(j\alpha_0), \sin(j\alpha_0)), j=0, 1, \dots, 20$ 在圆周上的分布示意图.此时,数据无法重排成 N 个依次的、具有采样角度混叠的数据.

为简单起见,本文以下仅考虑 $2\pi/\alpha_0$ 为有理数 N/M 的情形.事实上,在 v_0 给定时,我们总可以选择适

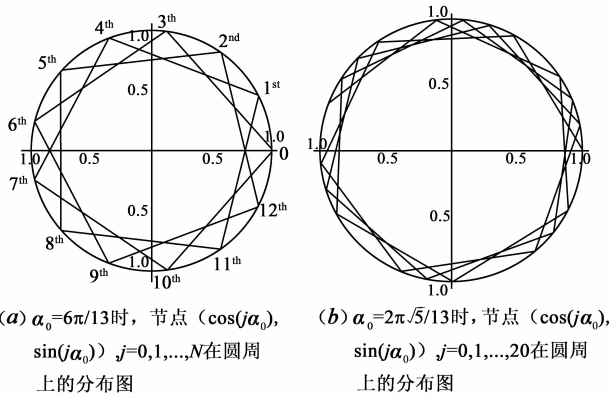


图2

当的采样时间 t_0 , 使得

$$2\pi/\alpha_0 = 2\pi/(v_0 t_0) = N/M \quad (5)$$

其中 $M < N$ 且 M 和 N 为互质整数。

为了后续求解, 我们将物体旋转 N 圈所采集的数据按相应弦节点在圆周上的顺序进行重排(参见图 2 (a)), 由式(5)得

$$\alpha_0 = M \frac{2\pi}{N}$$

将其代入式(2a), 并定义 $\hat{I}_{k, \text{mod}(jM, N)} = \bar{I}_{k, j}$, 于是有

$$\begin{aligned} \hat{I}_{k, \text{mod}(jM, N)} &= \bar{I}_{k, j} \\ &= \frac{1}{v_0} \int_0^{M \frac{2\pi}{N}} I_0(k\Delta u) \\ &\cdot \exp\left[-\int_{(x, y) \in L(k\Delta u)} \mu((x, y) \mathbf{R}(jM \frac{2\pi}{N} + \alpha)) ds\right] d\alpha \\ &= \frac{1}{v_0} \int_{\text{mod}(jM, N) \frac{2\pi}{N}}^{(\text{mod}(jM, N) + M) \frac{2\pi}{N}} I_0(k\Delta u) \\ &\cdot \exp\left[-\int_{(x, y) \in L(k\Delta u)} \mu((x, y) \mathbf{R}(\alpha)) ds\right] d\alpha \end{aligned}$$

记 $l = \text{mod}(jM, N)$, 则上式可改写为

$$\begin{aligned} \hat{I}_{k, l} &= \frac{1}{v_0} \int_{l \frac{2\pi}{N}}^{(l+M) \frac{2\pi}{N}} I_0(k\Delta u) \\ &\cdot \exp\left[-\int_{(x, y) \in L(k\Delta u)} \mu((x, y) \mathbf{R}(\alpha)) ds\right] d\alpha \quad (6) \end{aligned}$$

为一致起见, 以下仍用 j 替换 $\hat{I}_{k, l}$ 中下标 l , 并记

$$\begin{aligned} I_{k, m} &= \frac{1}{v_0} \int_{m \frac{2\pi}{N}}^{(m+1) \frac{2\pi}{N}} I_0(k\Delta u) \\ &\cdot \exp\left[-\int_{(x, y) \in L(k\Delta u)} \mu((x, y) \mathbf{R}(\alpha)) ds\right] d\alpha, m = 0, 1, \\ &2, \dots, \quad (7) \end{aligned}$$

于是 $\hat{I}_{k, j}$ 可表示为如下形式

$$\hat{I}_{k, j} = \sum_{m=j}^{j+M-1} I_{k, m}, j = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (8)$$

注意到 $I_{k, m} = I_{k, m+N}$, 所以上式中, 指标 m 的取值大于 N 时可以用 $I_{k, m-N}$ 代替 $I_{k, m}$.

下面给出 $\hat{I}_{k, j}, j = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 的矩阵表示. 首

先定义如下记号

$$\hat{\mathbf{I}}_k = (\hat{I}_{k,0}, \hat{I}_{k,1}, \dots, \hat{I}_{k,j}, \dots, \hat{I}_{k,N-1})^T,$$

$$\mathbf{I}_k = (I_{k,0}, I_{k,1}, \dots, I_{k,j}, \dots, I_{k,N-1})^T$$

由式(8)知, $\hat{\mathbf{I}}_k$ 中的每个分量均为 \mathbf{I}_k 中相邻 M 个分量的和. 所以 $\hat{\mathbf{I}}_k$ 事实上是 \mathbf{I}_k 与 N 维向量 $[1, 1, \dots, 1, 0, \dots, 0]$ (前 M 个元素为 1, 其余元素为 0) 做循环卷积的结果. 根据以上分析, 我们可以将式(8)写成如下矩阵形式

$$\hat{\mathbf{I}}_k = \mathbf{A}(M, N) \mathbf{I}_k, k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (9)$$

其中 $\mathbf{A}(M, N)$ 为循环矩阵^[8].

4 求解理论

4.1 方程(9)的一般求解方法

方程(9)的左端项 $\hat{\mathbf{I}}_k$ 可以看做是 X 射线沿 M 条路径采样结果的混叠. 混叠的各分量如式(7)所述, 当其角度采样数 N 足够大时, 可做如下近似,

$$\begin{aligned} I_{k, m} &= \frac{1}{v_0} \int_{m \frac{2\pi}{N}}^{(m+1) \frac{2\pi}{N}} I_0(k\Delta u) \\ &\cdot \exp\left[-\int_{(x, y) \in L(k\Delta u)} \mu((x, y) \mathbf{R}(\alpha)) ds\right] d\alpha \\ &\approx \frac{t_0}{M} I_0(k\Delta u) \\ &\cdot \exp\left[-\int_{(x, y) \in L(k\Delta u)} \mu\left((x, y) \mathbf{R}\left(\left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{2\pi}{N}\right)\right) ds\right], \\ &m = 0, 1, 2, \dots, N-1 \end{aligned}$$

根据比尔定律有

$$\begin{aligned} p_{k, m} &= -\log\left(\frac{I_{k, m}}{I_0(k\Delta u) t_0/M}\right) \\ &\approx \int_{(x, y) \in L(k\Delta u)} \mu\left((x, y) \mathbf{R}\left(\left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{2\pi}{N}\right)\right) ds \end{aligned}$$

因此, 由投影向量 $\mathbf{p}_k = (p_{k,0}, p_{k,1}, \dots, p_{k,j}, \dots, p_{k,N-1})^T$, 利用经典的 CT 重建算法, 如滤波反投影 (FBP, Filter Back-Projection) 算法等, 即可重建出被测物体的图像 $\mu(x, y)$.

注意到方程(9)中的矩阵 $\mathbf{A}(M, N)$ 为 N 阶循环矩阵, 一种常用的解调方法是在频域进行反卷积滤波来求解方程. 以 $F(\cdot)$ 和 $F^{-1}(\cdot)$ 分别表示傅里叶变换和逆变换, 记 $\mathbf{A}(M, N)$ 的首行向量的离散傅里叶变换为 $\mathbf{W} = (w_0, w_1, \dots, w_{N-1})$, 那么有:

$$\mathbf{I}_k = F^{-1}(\mathbf{W}^{-1} \cdot F(\hat{\mathbf{I}}_k)) \quad (10)$$

其中 $\mathbf{W}^{-1} = (w_0^{-1}, w_1^{-1}, \dots, w_{N-1}^{-1})$ 为滤波核.

4.2 实际问题求解方法

由于实际的扫描数据存在统计误差(噪声)和转台的运动误差. 因此, 若直接按上节方法滤波操作, 将会放大数据中的误差, 导致重建图像产生严重伪影. 为了抑制噪声, 本文将采用陷波滤波器来降低滤波核特定频率的幅度, 由陷波滤波器滤波后的滤波核简称为修

正后的滤波器.

以 $M = 17, N = 720$ 为例,此时式(10)所对应的滤波核的幅度谱如图 3(a)所示.从图中可看出,在某些频率上幅度较高,这容易在滤波时放大处于该频率的误差或噪声.图 3(b)为由陷波滤波器滤波后的滤波核的幅度谱.

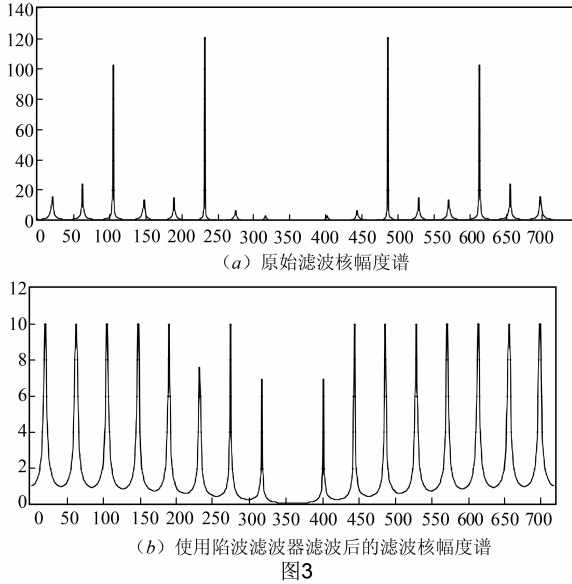


图3

此外,滤波计算过程中并未利用不同探测单元所采集的信号 $\hat{\mathbf{I}}_k (k = 0, 1, \dots, K - 1)$ 之间的相邻关系.而这种相邻关系可以用于提高图像重建算法的抗噪性.

基于上述分析,本文设计出一种基于反卷积解调的迭代重建算法,其基本思想是:用修正后的滤波器对混叠投影数据进行解调,将解调后的数据作为初始投影数据重建 CT 图像;对重建的 CT 图像进行降噪处理,并计算它的混叠投影数据;利用 CT 图像的混叠投影数据与实际采样数据之间的残差修正投影数据,并重建 CT 图像,直至误差满足要求.

本文迭代重建算法具体步骤如下,其中符号定义见表 2:

- ①由混叠投影数据 $\hat{\mathbf{I}}$ 解调得到初始投影数据 $\mathbf{I}^{(0)}$, 即 $\mathbf{I}^{(0)} = \hat{\mathbf{B}}\hat{\mathbf{I}}, n := 0$;
- ②由投影数据 $\mathbf{I}^{(n)}$ 重建得到 CT 图像 $\boldsymbol{\mu}^{(n)}$, 即 $\boldsymbol{\mu}^{(n)} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{I}^{(n)}$;
- ③对图像 $\boldsymbol{\mu}^{(n)}$ 降噪,并计算降噪后图像的正投影, 即 $\mathbf{R}\mathbf{N}\boldsymbol{\mu}^{(n)}$;
- ④计算当前图像的混叠投影数据与实际采样数据之间的残差, 即 $\hat{\mathbf{I}} - \mathbf{A}\mathbf{R}\mathbf{N}\boldsymbol{\mu}^{(n)}$;
- ⑤对残差数据解调,并用于更新投影数据, 即 $\mathbf{I}^{(n+1)} = \mathbf{I}^{(n)} + \omega\mathbf{B}(\hat{\mathbf{I}} - \mathbf{A}\mathbf{R}\mathbf{N}\boldsymbol{\mu}^{(n)})$;
- ⑥判断是否满足迭代停止条件,满足则完成迭代, 不满足则 $n := n + 1$ 并转入步骤②.

表 2 迭代算法符号定义

符号	定义
$\hat{\mathbf{I}}$	$\hat{\mathbf{I}} = (\hat{\mathbf{I}}_0, \hat{\mathbf{I}}_1, \dots, \hat{\mathbf{I}}_{K-1})$ 为采集的混叠扫描数据
n	迭代次数
$\mathbf{I}^{(n)}$	n 次迭代后的准静止投影数据
$\boldsymbol{\mu}^{(n)}$	n 次迭代后的重建图像
\mathbf{R}	正投影算子
\mathbf{R}^{-1}	重建算子(本文用滤波反投影算法)
\mathbf{N}	图像降噪算子(本文用 Non-Local Mean 算法 ^[9])
\mathbf{A}	循环矩阵
\mathbf{B}	由修正后的滤波器对混叠投影数据进行解调的算子,是 \mathbf{A} 的某种广义逆矩阵
ω	迭代松弛因子

5 数值实验

本节首先采用仿真数据验证本文提出的数据采集和重建算法的有效性;然后利用实际工业 CT 系统采集的数据,验证本文算法对多能 CT 数据的有效性.

5.1 仿真数据验证

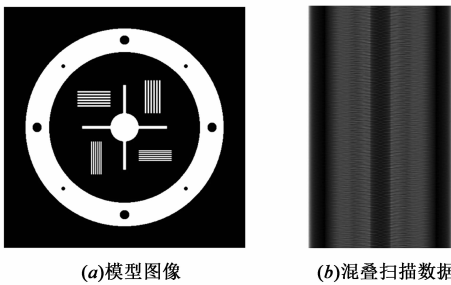
我们按如下条件模拟高速旋转物体的扇形束 CT 数据:射线源为能量 8MeV 的单能射线源;探测器为线阵列探测器,由 512 个探测器单元组成,各单元的尺寸为 0.6mm.被测物体模型为图 4(a)所示的铁材质工件,其中环形的外径为 208.30mm,内径为 158.70mm,其最长弦为 134.91mm,铁对 8MeV 的光子的线性衰减系数为 0.02363mm^{-1} .射线源到旋转中心的距离为 1000mm,射线源到探测器中心的距离为 1200mm.射线混叠数据由旋转 17 圈(6120°)采集的 720 个投影数据得到,即每旋转 8.5° 采集一幅投影数据.扫描数据中加入泊松噪声的方法为:由已知光子流强 I_0 和被测物体模型,按公式(6)数值计算出 $\hat{I}_{k,j}$;再以 $\hat{I}_{k,j}$ 为泊松分布的均值产生一个随机值,并用此随机值替换 $\hat{I}_{k,j}$. 易见数据的噪声水平与 I_0 和物体吸收率是相关的.对于给定物体, I_0 越小,数据噪声水平越高.

以下分别考察重建算法对无噪声数据和有噪声数据的重建效果.图 4(a)为物体模型,图 4(b)为按上述方法得到的无噪声混叠扫描数据.图 4(c), (d), (e)分别为用三种方法对无噪声的混叠扫描数据重建的 CT 图像,重建图像矩阵为 512×512 .其中图 4(c)为使用 FBP 算法直接重建的图像,图 4(d)为 4.1 节所述的直接解调算法重建的图像;图 4(e)为 4.2 节提出的迭代算法重建的图像.可以看到,图 4(c)存在着明显的沿旋转方向的图像模糊,远离旋转中心的像素模糊程度相应加重.在无噪声情况下,由直接解调方法和本文提出的

迭代算法均能重建出满意的图像。

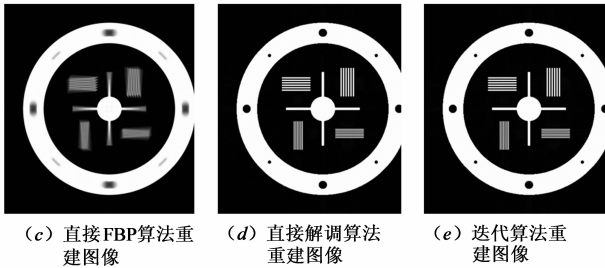
图 5 和图 6 分别是两组添加泊松噪声的混叠扫描数据由上述三种方法重建的图像,其中图 5 相应的 $I_0 = 10^8$,而图 6 相应的 $I_0 = 10^6$ 。 $I_0 = 10^8$ 时,扫描数据的噪声水平相对较低,由重建图像图 5(b), (c) 及其相应的放大图像图 5(e), (f) 可以看出,使用直接解调算法和本文迭代算法都可以重建图像,但后者较前者重建的图像信噪比要高一些。而当 $I_0 = 10^6$ 时,扫描数据的噪声水平相对较高,直接解调算法重建的图像图 6(b) 和 (e) 质量显著降低,而本文迭代算法重建的图像图 6(c) 和 (f) 仍保持较好的质量。

本文采用归一化均方根距离评价本文迭代重建算法



(a)模型图像

(b)混叠扫描数据

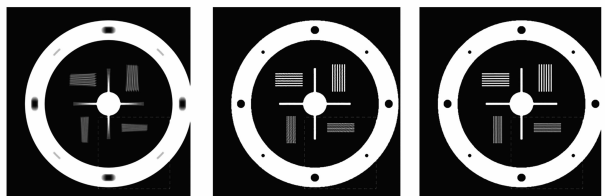


(c) 直接FBP算法重建图像

(d) 直接解调算法重建图像

(e) 迭代算法重建图像

图4 理想仿真数据以及重建图像



(a) 直接FBP算法重建图像

(b) 直接解调算法重建图像

(c) 迭代算法重建图像(迭代3次)



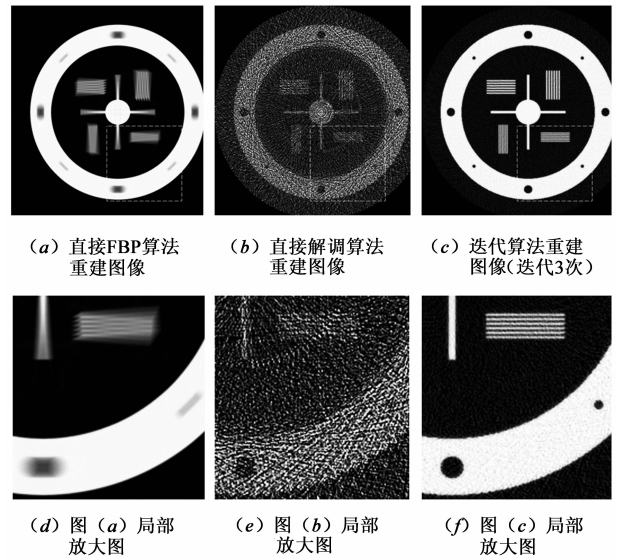
(d) 图(a)局部放大图

(e) 图(b)局部放大图

(f) 图(c)局部放大图

图5 当 $I_0 = 10^8$ 个光子时,由添加泊松噪声数据重建的图像(图像显示窗[0,0.025])

重建低信噪比数据的结果.随着迭代次数的增加,归一化均方根距离逐渐减小,在迭代 3 次以后归一化均方根距离保持稳定(如图 7 所示),重建图像质量也几乎无变化。



(a) 直接FBP算法重建图像

(b) 直接解调算法重建图像

(c) 迭代算法重建图像(迭代3次)

(d) 图(a)局部放大图

(e) 图(b)局部放大图

(f) 图(c)局部放大图

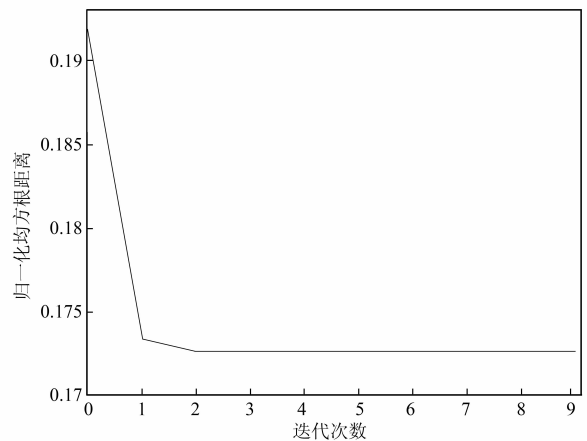
图6 当 $I_0 = 10^6$ 个光子时,由添加泊松噪声数据重建的图像(图像显示窗[0,0.025])

图7 归一化均方根距离随迭代次数的改变

5.2 实际数据验证

本文射线混叠 CT 数学模型中假设了射线是单能的,然而工业 CT 的射线源所发出的射线是多能的.为验证本文方法对多能射线的有效性,我们用工业 CT 设备扫描的数据进行了实验验证.我们采用延长探测器采样时间的方法来模拟扫描数据混叠.实验所用的工业 CT 系统探测器单元个数为 2604 个,探测器单元宽度为 0.25 mm,探测器的采样时间为 60 ms.射线源焦点到转台中心的距离为 600 mm,射线源焦点到探测器的距离为 1139 mm.将叶轮放置于转台旋转中心处进行 CT 扫描.转台共旋转 7 圈(即 2520°),探测器的采样角度数为 1800 个,即每旋转 1.4°采集一幅投影数据.叶轮实物照片和扫描数据如图 8 所示.我

们在叶轮中加入了四根铅笔芯作为标记物,以考察重建图像沿旋转方向的模糊程度。

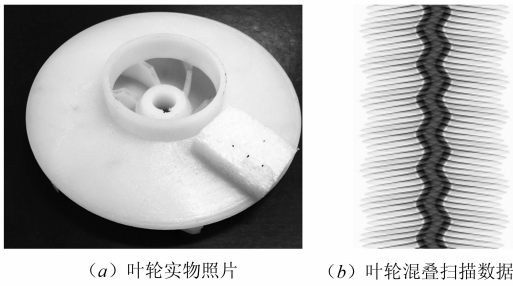


图8 叶轮实物照片和混叠扫描数据

图9(a),(c),(e)分别为直接FBP算法、直接解调算法和本文迭代重建算法重建的图像,图9(b),(d),(f)分别是它们的局部放大图像。由直接FBP算法重建的图像发生沿旋转方向的模糊,直接解调算法已难以重建出叶轮的信息,而本文迭代重建算法仍可以重建出质量较好的图像。

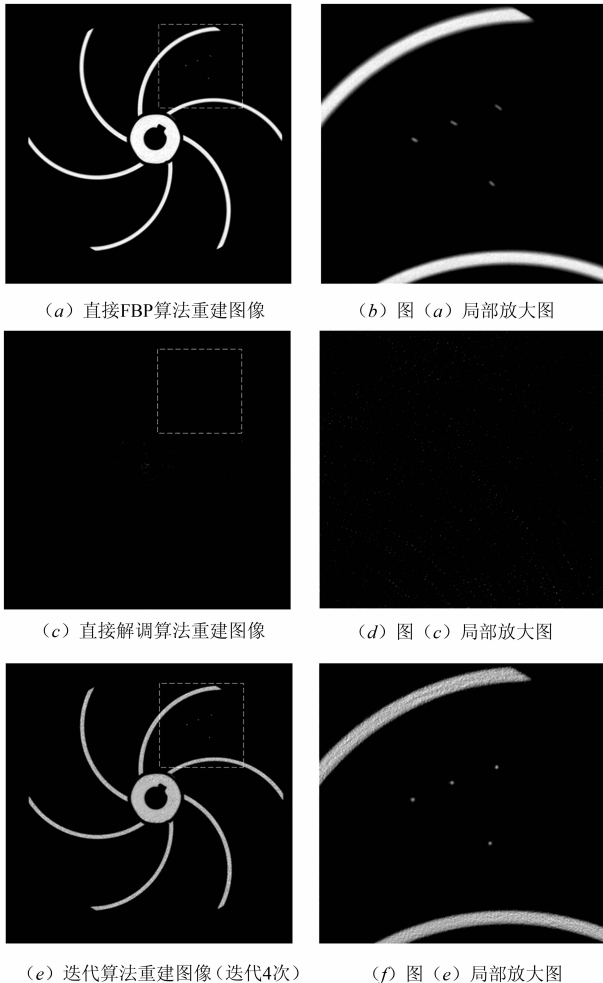


图9 叶轮实际扫描数据重建图像

6 总结

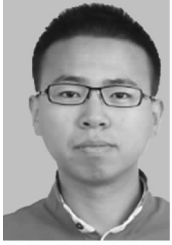
本文在若干假设下,针对高速旋转物体的CT成像问题,建立了射线混叠的CT数学模型,提出了CT采样时间的选取准则及其相应的迭代重建算法,并通过仿真数据和实际数据验证了该方法的可行性。尽管该方法做了射线单能的假设,但实际工业CT数据验证表明,该方法用于多能数据也具有很好的近似性。本文仅是对高速旋转物体CT的初步研究,在物体转速有扰动以及旋转轴有晃动等情况下,如何重建高速旋转物体CT图像还需进一步深入研究。

参考文献

- [1] 张朝宗,郭志平,张朋,王贤刚.工业CT原理和技术[M].北京:科学出版社,2009.31-50.
Zhang Chao-zong, Guo Zhi-ping, Zhang Peng, Wang Xian-gang. Principles and Techniques of Industrial CT[M]. Beijing: Science Press, 2009.31-50. (in Chinese)
- [2] 白英铎.航空发动机高能X射线检测系统[J].航空发动机,2002,(4):22-32.
Bai Ying-duo. Highenergy X-Ray instrumentation system for aeroengine test[J]. Aeroengine, 2002, (4): 22-32. (in Chinese)
- [3] 宋征.数字化X射线高速成像技术研究及应用[D].北京:清华大学,2003.
Song Zheng. Research and Application of Digital X-ray High-speed Imaging Technology [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003. (in Chinese)
- [4] Ming Chang, Yongshun Xiao, Zhiqiang Chen. An industrial CT system for monitoring a running aero-engine[J]. Nuclear Science and Techniques, 2014, 25(6): 60202-60202.
- [5] Accorsi R, Gasparini F, Lanza R C. A coded aperture for high-resolution nuclear medicine planar imaging with a conventional anger camera: experimental results [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001, 48(6): 2411-2417.
- [6] Yining Zhu, Defeng Chen, Yunsong Zhao, Hongwei Li, Peng Zhang. An approach to increasing the resolution of industrial CT images based on an aperture collimator[J]. Optics Express, 2013, 21(23): 27946-27963.
- [7] 张慧滔,于平,赵星,张朋.虚拟焦点的超分辨重建方法[J].无损检测,2010,32(5):332-337.
Zhang Hui-tao, Yu Ping, Zhao Xing, Zhang Peng. A virtual-focal-spot-based method for high-resolution image reconstruction on X-ray ICT[J]. Non-destructive Testing, 2010, 32(5): 332-337. (in Chinese)
- [8] Gray R M. Toeplitz and Circulant Matrices: A Review[M]. America: Now Publishers Inc, 2009.31-34.

- [9] Buades A, Coll B, Morel J M. A non-local algorithm for image denoising [A]. Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition[C]. San Diego: IEEE Computer Society, 2005. 60-65.

作者简介



陈德峰 男, 1985 年出生于江苏. 首都师范大学数学科学学院博士研究生, 检测成像北京高校工程研究中心成员. 主要研究方向: CT 理论与应用、计算机图形学.

E-mail: chendf@cnu.edu.cn



于平 女, 1979 年出生于河北. 首都师范大学数学科学学院博士研究生, 检测成像北京高校工程研究中心成员. 主要研究方向: CT 理论与应用, 图像处理, 应用数学.

E-mail: yuping@cnu.edu.cn



张朋 男, 1957 年出生于陕西. 首都师范大学数学科学学院研究员、博士生导师, 检测成像北京高校工程研究中心主任. 主要研究方向: CT 理论与应用, 图像处理, 应用数学.

E-mail: pzhang@cnu.edu.cn