

# 利用正弦图自动校正 CT 投影中心

孟凡勇, 王维, 李静海

(中国科学院过程工程研究所, 北京 100190)

**摘要:** CT 投影中心位置的准确确定是精确二维重建的一个前提条件, 否则, 重建结果将出现伪影, 目前常用的投影中心确定方法有两种: 直接测量法和模体校正法。直接测量法确定投影中心在实际应用中难以精确实现, 模体校正法则需要专用针状模体, 且需进行二次扫描, 较为繁琐。本文通过分析, 提出了一种利用投影原始数据正弦图校正 CT 投影中心的方法, 本方法无需专用校正模体, 只要采集的数据未发生截断, 即可有效的校正投影中心, 而且本方法可编入前处理程序, 采集数据后自动完成校正。计算机模拟及实验均表明, 本方法可有效的校正投影中心, 消除因此而产生的伪影。

**关键词:** CT; 投影中心; 正弦图; 校正

计算机断层扫描术 (CT) 最早应用于医学影像, 随后被引入工业无损检测领域, 由于其非插入、无干扰的检测特性, CT 在农林业、地球物理、化工等领域也得到了很好的应用。根据射线源-探测器的运动采集数据方式的不同, 可以将 CT 分为五代, 目前较为常用的为平移-旋转的第一代扫描模式和旋转-旋转的第三代扫描模式。应用于医学领域的 CT, 以患者为检测对象, 因此往往患者不动, 转台带动固定于其上的射线源与探测器相对于患者做旋转一周, 同时采集衰减信号。多数应用于无损检测的工业 CT, 则正相反, 检测过程中, 源与探测器保持不动, 位于扫描中心的转台带动被测物旋转采集不同角度下的投影信息。无论是哪种检测方式, 精确重建出被测截面的二维信息的前提, 需要获得准确的 CT 投影几何参数, 其中一维投影的中心位置是非常重要的一项参数<sup>[1]</sup>。

理论上投影中心与探测器的中心单元是重合的, 但 CT 的安装过程中难以将二者完全调整一致, 因此, 实际应用中探测器中心与投影中心往往并不重合, 若不对该参数进行校正, 所得到的重建图像将存在伪影, 影响测量者真实的了解截面情况, 严重的甚至会造成假象, 致使测量者误判。

目前对投影中心的校正方法分为直接测量法和模型校正法<sup>[2-3]</sup>, 直接测量法是通过直接测量 CT 的源-探测器及转台的旋转中心来确定探测器的投影中心, 该方法受限于测量误差, 实际应用中较难实现; 模型校正法则采用专用的针状模型, 先对校正模型进行扫描, 通过迭代计算确定投影中心, 然后对被测物进行正式测量, 使用专用模型测量所得的投影中心数据来校正正式测量数据。对于 CT 应用于大型固定设备, 如化工领域的多相流反应器的测量, 专用模型方法的实施需要将被测管段从 CT 视场 (FOV) 中移除, 才能进行专用模体校正, 较为繁琐。使用模型校正的另一个缺点是增加了扫描次数和测量时间, 耗费了射线源及探测器的寿命。并且, 工业 CT 在一些工作条件下, 探测器或射线源会因为温度或其他原

因发生微移,肉眼难以从重建图像中分辨出此类异常,因此而形成的伪影,模型校正法无法自动完成投影中心的校正,造成失真的测量结果。

本文提出了一种自动完成投影中心校正的方法,该方法无需专用的校正模型,因此无需进行二次扫描,而且可将校正代码加入重建前处理程序中,每次扫描均可同时对投影中心进行校正,节省时间、人力、物力。计算机模拟及 CT 扫描实验结果均表明,本方法可有效的消除投影中心参数错误造成的伪影。

## 1 原理

第一代 CT 与第三代第五代 CT 扫描方式有所不同,但其重建基本原理是一样的,通过对第三代 CT 的扇束投影数据进行重排插值,即可得到一代平行束扫描数据。本文以平行束扫描方式为例,介绍投影中心自动校正原理以及相关的重建原理。

如图 1 所示,探测器位于  $x_r$  轴,源发射出的射线平行于  $y_r$  轴,探测器中心位于坐标原点。扫描空间上任一点  $f(x, y)$ , 在源-探测器旋转至第  $\theta$  个角度下,投影如下式所示:

$$P_{\theta}(x_r) = \int_{(\theta, x_r) \text{ line}} f(x, y) dy_r = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - x_r) dx dy \quad (1)$$

(1)式即为数学上的 Radon 变换,理论上,求其逆变换即可得到被测物每一点的  $f(x, y)$  值。

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} d\theta \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{x \cos \theta + y \sin \theta - x_r} \frac{\partial P_{\theta}(x_r)}{\partial x_r} dx_r \quad (2)$$

实际重建时,根据中心切片定理<sup>[4]</sup>,

$$f(x, y) = \int_0^{2\pi} d\theta \int_{-\infty}^{\infty} S_{\theta}(w) |w| e^{j2\pi w x_r} dw \quad (3)$$

其中,  $S_{\theta}(w)$  为投影  $P_{\theta}(x_r)$  的傅利叶变换:

$$S_{\theta}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\theta}(x_r) e^{-j2\pi w x_r} dx_r \quad (4)$$

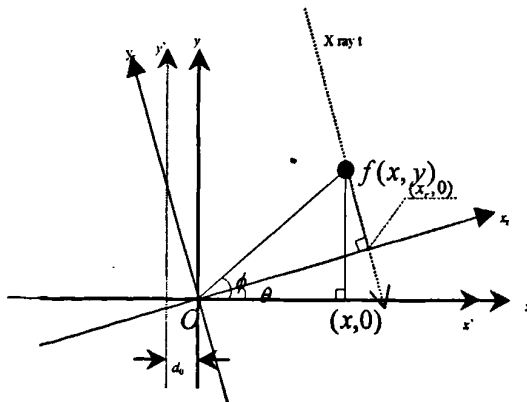


图 1 CT 扫描-重建示意图

理论上, CT 扫描坐标系  $x'-y'$  与重建坐标系  $x-y$  中心是重合的, 对于扫描坐标系  $x'-y'$ , 其默认的中心是探测器阵列的中心像素点, 但实际上, 该点往往与  $x-y$  坐标系的原点有一定误差  $d_0$ 。若按公式 3 与 4 中重建  $f(x, y)$  值时, 其所用投影位置  $P_\theta(x_r)$  未修正为  $P_\theta(x_r - d_0)$ , 则重建将产生误差, 重建图像也将因此而产生伪影。投影中心校正, 实际上也就是确定  $d_0$  的准确数值。

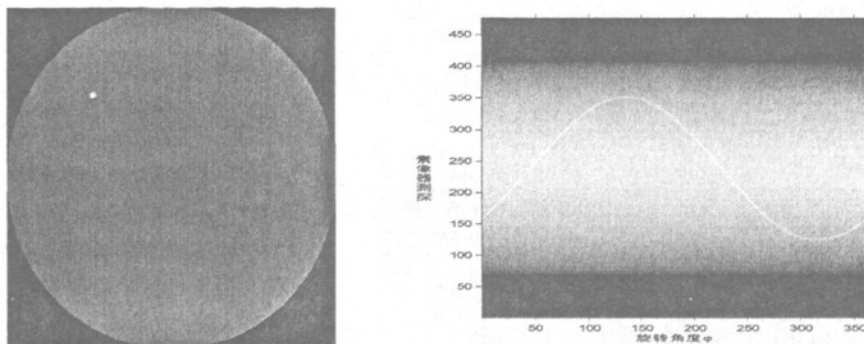


图 2 扫描空间中一点(左)及其投影图(右)

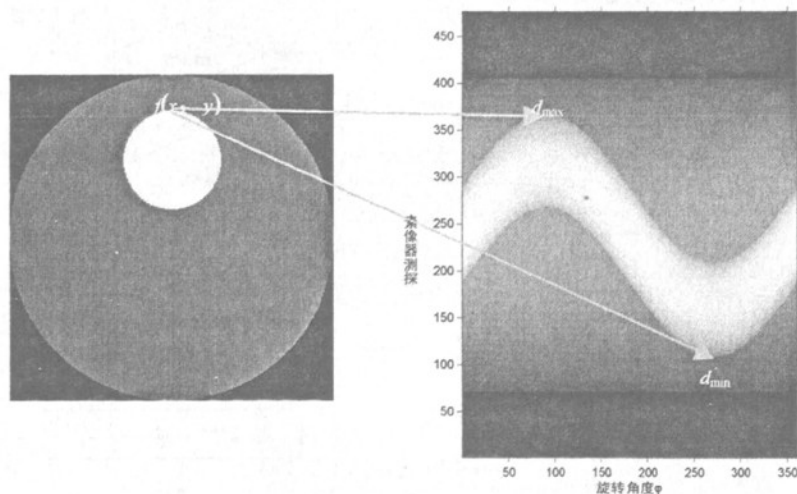


图 3 任意扫描对象中及其投影正弦图

对于图 1 所示的扫描坐标系与重建坐标系中心未重合这一情况, 扫描空间中的任一点  $f(x, y)$ , 在不同扫描角度下在探测器上  $x'$  上的投影遵循下列公式,

$$d = r \times \cos(\phi - \theta) + d_0 \quad (5)$$

$r$  为该点到坐标原点的距离, 即该余弦曲线的振幅。对于扫描对象为密度很大, 体积无限小的一点, 如图 2 左所示, 其扫描原始数据组成的正弦图如图 2 右所示, 根据公式 5, 可以计算出  $d_0$  值, 甚至拟合出该曲线, 这也正是针模法确定投影中心的原理。对于常见的测量对象, 其体积远较针模大, 因此, 投影原始数据形成的是一簇余弦曲线, 相互叠加, 难以直接计算或拟合出公式 5。但对于投影中心校正, 目的是求出  $d_0$ , 公式中其他信息是冗余的。对于公式 5,  $x_r$  的极大值与极小值分别为:

$$d_{\max} = r + d_0 \tag{6}$$

$$d_{\min} = -r + d_0 \tag{7}$$

因此

$$d_0 = (d_{\min} + d_{\max})/2 \tag{8}$$

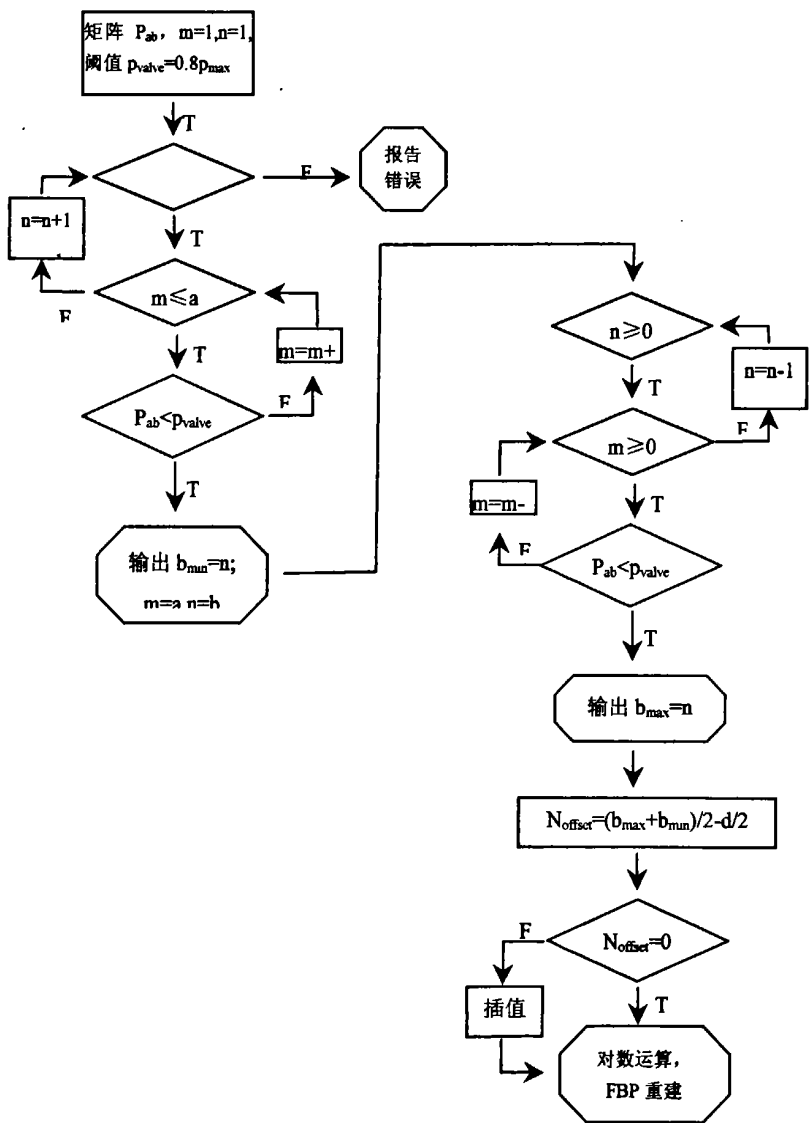


图 4 投影中心校正程序流程图

对于未发生截断的扫描数据（FOV 可以完全包覆住被测物），总可以找到距原点（即扫描中心）最远点  $f(x, y)$ ，当旋转角度  $\varphi$  分别为  $\arctan(y/x)$  和  $\arctan(y/x) + \pi$  时，该点在探测器轴上的投影分别为  $d_{\max}$  与  $d_{\min}$ 。

因此，通过对投影原始数据进行计算，找出图 3（右）中的  $d_{\max}$  与  $d_{\min}$ ，即可计算出投

影中心校正值  $d_0$ 。

## 2 实现方法

将所采原始数据以二维矩阵形式保存，其中  $a$  代表角度， $b$  代表探测器像素：

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1b} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2b} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{a1} & p_{a2} & \cdots & p_{ab} \end{bmatrix}$$

用将矩阵转为灰度图，即为扫描正弦图。

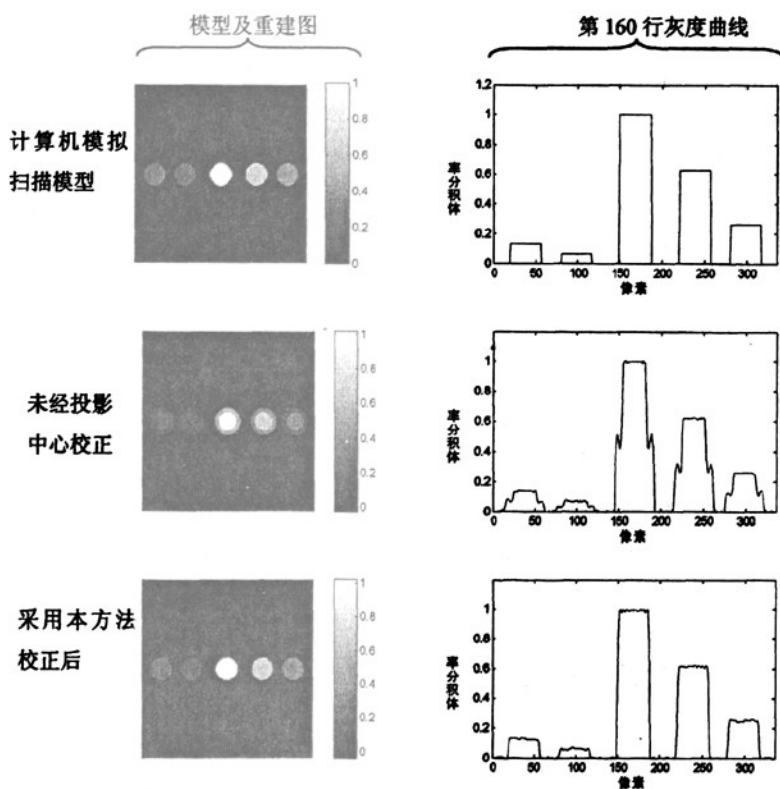


图 5 计算机模拟原理验证结果

求该矩阵的最大元素值  $p_{\max}$ ，该值对应未经被测物衰减的射线强度  $I_0$ ，阈值  $p_{\text{valve}} = 0.8p_{\max}$ ，遍历矩阵，求出符合条件  $p_{ab} \leq p_{\text{valve}}$  矩阵元素中， $b$  的最小值  $b_{\min}$  与最大值  $b_{\max}$ 。

投影中心与校正偏移量按下列公式求取：

$$p_{\text{center}} = (b_{\min} + b_{\max}) / 2$$

$$N_{\text{offset}} = p_{\text{center}} - d_{\text{center}}$$

$N_{offset}$  为需插值列数,即需要插入  $a \times N_{offset}$  矩阵,矩阵元素的值等于未经被测物衰减的射线强度值。 $N_{offset}$  为正时,需在投影矩阵右端插值,  $N_{offset}$  为负时,需在左端插值。

经过投影中心校正后,对采样数据进行对数运算、硬化校正等处理,然后采用滤波反投影法(FBP)进行二维重建,重建图尺寸为  $1024 \times 1024$  像素。

本方法的程序流程图如图 4 所示。

3 计算机模拟及实验结果

为验证本文提出的方法的有效性,进行了计算机模拟并在三代等距 CT 上进行了扫描实验。模拟第三代等距扇束 CT,探测器共 512 个像素点,旋转 360 度采样。重建图尺寸为  $335 \times 335$  像素。测量对象为不同体积分率的玻璃珠,如图 5(上)所示,五个试管中玻璃珠的体积分率自左至右依次为 0.134、0.065、1、0.622、0.257。

图 5(中)为未经投影中心校正的重建结果,从重建图上可以明显看到试管周围出现环形扩散,边缘出现模糊。重建图的第 160 行灰度曲线显示,在每个玻璃珠试样的周围,均出现灰度值约为玻璃珠灰度值一半的伪影。图 5(下)为采用本文方法后的重建图。可以看出,投影中心错误造成的伪影基本上被消除。

图 6 为以圆盘模型为实验对象,在 X-射线 CT 上的实验结果。与计算机模拟中的 CT 相似,实验采用的也是第三代等距扇束 CT,探测器共有 1536 个像素点,X-射线工作电压为 65kVp,电流为 6.5mA,旋转 360 度采样。重建图尺寸为  $1024 \times 1024$  像素。可以看出,经过中心投影校正的重建图像质量明显高于未经校正的重建图像,因投影中心参数错误造成的轮廓伪影也得到了消除。

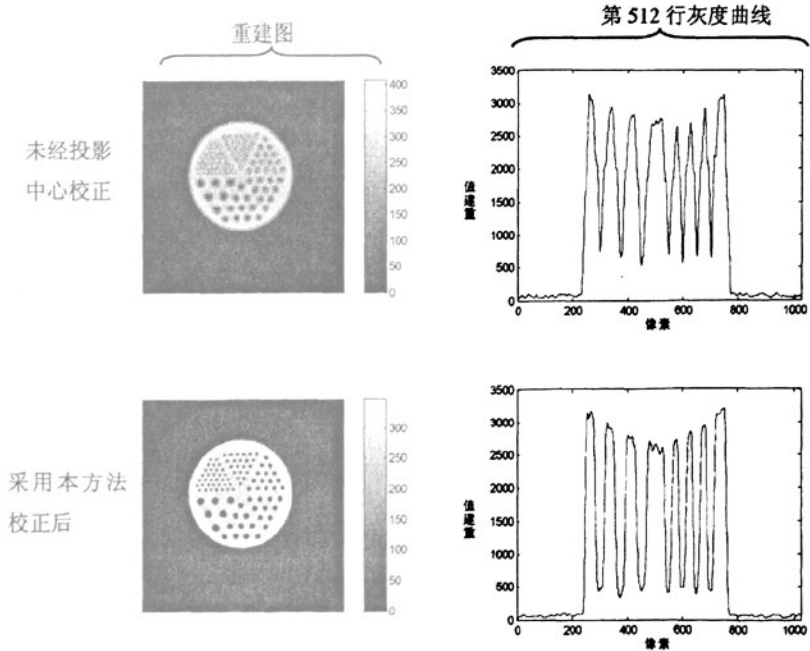


图 6 CT 扫描实验验证结果

## 4 结论

计算机模拟实验及 CT 实物扫描均表明, 基于原始扫描正弦图的投影中心自动校正法可以快速有效的校正投影中心, 由于该方法无需采用专用的校正针状模体, 因此无需进行二次校正扫描, 并且, 本方法可以方集成于前处理程序, 每次扫描后, 可以自动的完成原始数据的校正, 省时而且经济。

## 参考文献

- [1] 王召巴. 旋转中心偏移对 CT 重建图像质量的影响. 兵工学报, 2001, 3(22): 323-326.
- [2] 刘晓鹏, 张定华, 张丰收, 刘远. 锥束 CT 系统安装参数确定技术研究. 计算机工程与应用, 2006, 42(20): 170-173
- [3] 孙海宁, 楼珊珊, 刘晋军, 李双学. 一种 CT 机几何参数校正方法. 发明专利, CN1657009A.
- [4] Kak, A. C. and Slaney, M. (1988) Principles of computerized tomographic imaging, IEEE press, New York.