

# 工业 CT 中 MTF 曲线测量的 ASTM 方法

刘 力, 张英平

(中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049)

**摘 要:**介绍了美国 ASTM 标准中的工业 CT 的 MTF 曲线测量方法。用该方法对一台 X 光工业 CT 进行了 MTF 实验测量与计算, 获得其 MTF 曲线, 对其中的算法进行了改进并对计算结果进行了讨论。试验结果表明, 该方法具有一定优点, 可在工业 CT 整机性能测试时参考使用。

**关键词:**工业 CT; ASTM 标准; 调制传输函数

中图分类号: TG115.28; R814.42; R811.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2007)07-0399-03

## The ASTM Method of MTF Measurement in Industrial Computed Tomography

LIU Li, ZHANG Ying-ping

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A method to measure the modulation transfer function (MTF) suggested by ASTM standard was introduced and applied in the practical testing of an industrial X-ray CT. By using disc phantoms in the tomography scan, the MTF was obtained under certain acquisition conditions. The advantage of the method and some modified computing technical details were introduced and illustrated, the results were demonstrated and discussed. This method can be used in the performance test of the industrial CT.

**Keywords:** Industrial computed tomography; ASTM Standard; Modulation transfer function

CT 的调制传输函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线反映了系统的空间频率域的传输特性和极限分辨能力, 是其空间分辨率特性的定量描述。在医学 CT 中, 常用针模和条形模模型等方法进行空间分辨率测定及其 MTF 曲线计算<sup>[1,2]</sup>, 但工业 CT 通常具有很高的空间分辨率和较小的探测器阵列单元尺寸, 用上述方法会产生相对大的误差。ASTM (美国材料实验协会) 制定了一套较为科学的 CT 测试标准, 其中 ASTM E 1695—1995 标准建议的一种测量工业 CT 的 MTF 的方法<sup>[3]</sup>, 从理论上讲具有克服统计噪声误差的优点, 可获得较好的测量精度。笔者用该方法对一台工业 CT 进行了 MTF 实验测定与计算, 对其中的算法及计算结果作了一些说明与讨论。

## 1 MTF 曲线及测量

对一个成像系统, 单位强度的点的强度分布称为系统的点扩散函数 (PSF), 线的强度分布称为系统的线扩展函数 (LSF)。由于 PSF 和 LSF 描述的是经系统成像后点和线的弥散以及变化程度, 因而它们决定了系统的分辨率特性。调制传输函数 MTF 定义为 PSF 的傅里叶变换, 反映了系统的空间频率域的传输特性。对线性一致各向同性成像系统, PSF 具有旋转对称性, MTF 可用一维函数 (曲线) 描述, 通常以零频归一的傅里叶空间的曲线方式表示, 即系统对大的均匀物体成像时具有 100% 的对比度调制传输能力, 但随着频率增加 (对应于物体均匀结构尺寸逐渐变小), 此调制传输能力下降, MTF 曲线表现为单调下降。与 PSF 相比, MTF 曲线可直观地反映出空间分辨能力的更详细信息。通常取 MTF 值为 10% 对应的频率作为该成像系统的空间分辨率。

MTF 反映的是 CT 系统的整体属性, 与 X 光源

收稿日期: 2006-01-09

基金项目: 中国科学院创新基金资助 (KJCX1-SW-08)

作者简介: 刘 力 (1962—), 男, 博士, 副研究员, 从事射线成像技术的研发, 主要研究方向是射线成像中的图像重建、图像处理、校正与性能测试等。

焦点尺寸、物理模型正确性、探测器尺寸间隔、层厚、准直系统、散射程度、重建算法、运动及机械模糊、内插算法和图像处理方式甚至显示器分辨率等诸多因素有关,其中任一环节的恶化都会严重影响整个 CT 系统的传输特性,但某一环节上的精度提高并不一定提高 CT 系统的分辨率。

为保证 MTF 测量的客观准确性,应选择合适的扫描模式和处理参数,通常不同模式甚至不同材质物体会不同形状的 MTF。在以下的实际测量中,取高空间分辨、最小扫描口径模式,采用无平滑因子 Ramp 滤波器,以尽量获取反映 CT 固有整体空间分辨特性的 MTF。

例如在医学 CT 的 MTF 测量中,采用  $\phi 0.15$  mm 细不锈钢丝,选取层厚 2 mm,像素为  $0.25\text{ mm} \times 0.25\text{ mm}$ ,利用 CT 进行断层成像以获取点源的 PSF 图,进而利用旋转对称性和零频归一化傅里叶变换即得到系统的 MTF。上述 MTF 测量方法存在一定误差,主要是因为① 钢丝具有有限大小的尺寸。② 钢丝必须严格地水平轴向放置。③ 参与计算的有效探测单元数目有限,不易从统计学角度提高信噪比。尤其是在 ICT 中,上述原因会造成较大误差,因为 ICT 通常具有探测器尺寸非常小的特点,比如其单元截面为  $(0.083 \times 0.083)\text{ mm}^2$ ,这对钢丝的细度及加工精度有非常高的要求,同时其数据具有更大的统计涨落,对基于求导计算的 MTF 测量会带来较严重的误差。

## 2 ASTM 测量 MTF 的方法简介

ASTM 推荐的 MTF 测量方法是,选用高精度加工的圆盘物品(如铝圆柱、有机玻璃圆柱等),在垂直柱轴的平面内作 ICT 断层扫描,用 Ramp-FBP 重建图像,用图像重心法确定圆心,以圆心为中心原点拉出若干条过原点的剖面曲线并加以合并,得到边响应函数(ERF),微分得 LSF,经傅里叶变换并取零

频归一即得到 MTF 曲线。取 MTF 值为 0.1 处对应的分辨频率为系统的最高空间分辨率,整个过程如图 1 所示。

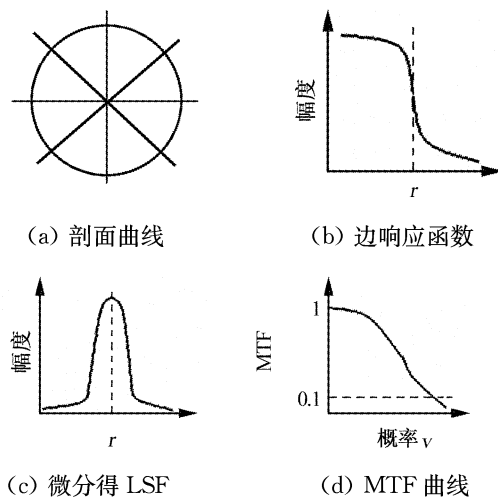


图 1 ASTM 法测量 MTF 过程示意图

在实际测量计算中需要注意:

(1) 圆盘尽量不用较重金属,圆盘尺寸大小适中,以便在获取较大信噪比的同时避免 XCT 射束硬化的影响。若采用较重金属圆盘,则要考虑作硬化校正。

(2) 圆盘重心计算要精确,避开环状伪影等干扰的影响。重心计算准确时,所得 PSF 曲线通常具有典型的高斯波包形状。

(3) 拟合与内插是必要的,但使用时要避免由此产生的高频偏差。

## 3 MTF 曲线的实验制作

笔者采用 ASTM 标准推荐的测量 MTF 方法,对  $\phi 30$  mm 铝柱横断面进行 CT 断层测量。测量 X 光 ICT 仪器功率为 450 kV,焦点为 1.25 mm,采用三代扇束扫描。将铝柱置于视野中心附近,电压取 400 kV 并加 2 mm 铜箔滤波片,选用放大因子为 1.04,经 Ramp-FBP 滤波重建的图像见图 2a。经目

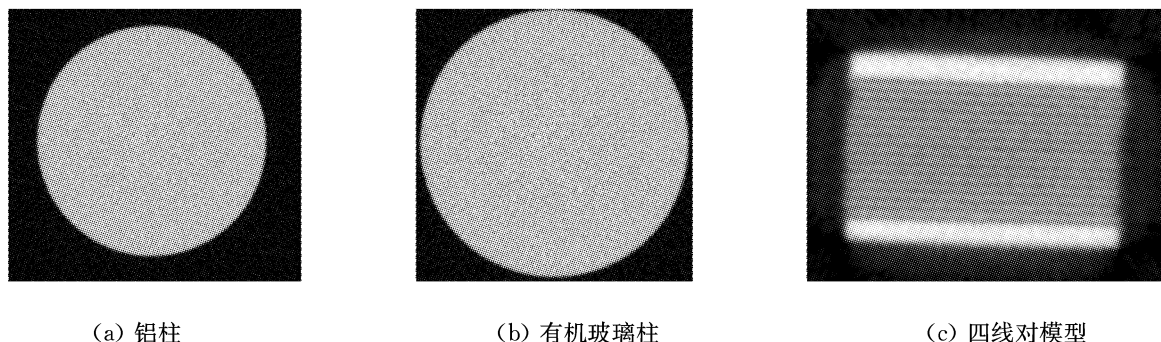


图 2 实际测量物品的横断层图像

测和计算确认,该图像无明显硬化伪影。因此,MTF 测量结果精确地反映了 CT 系统在此测量条件下对此类较轻物体(如大小相近的铝件等)的空间分辨能力。具体计算步骤如下。

### 3.1 计算 ERF

在铝柱 CT 图像中,选取宽度为 30 像素的同心圆环,并关于半径(以重心为圆心)进行合并,以得到原始 30 点像素的 ERF 曲线。这与 ASTM 推荐的用若干过重心的 profile 合并得到 ERF 的做法不尽一致,在此利用了所有像素,因而可更加有效地消除统计噪声影响。所得铝柱的 ERF 曲线见图 3a。

为进一步提高计算精度,ASTM 标准中建议采用如下内插法对铝柱原始 ERF 曲线进行平滑,即按更细的采样间距(0.1 像素)对原始 ERF 进行重新采样,在加密采样后的 ERF 上以 21 个精细采样点为一个区间,在该区间内进行 3 次方最小二乘拟合,取出拟合后的区间中点值,对这些中点值给出平滑的 ERF 曲线(图 3b)。

### 3.2 计算 PSF

用拟合后的 ERF 多项式进行逐区间解析求导运算,取出每个区间的中点的导数值,对其峰值进行归一,这些中间导数值构成了 PSF 曲线(图 3c)。

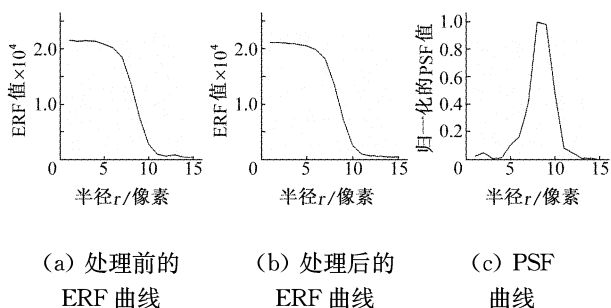


图 3 铝柱的 ERF 和 PSF 曲线

### 3.3 计算 MTF

对 PSF 作傅里叶变换。计算时取最大频率为系统最高截止频率  $\nu_{\max}$  (对应于 0.5 lp/像素)的 5 倍,相当于对原始 PSF(采样间距为 1 像素)进行 5 倍密集再采样。求出频域系数的模并以零频归一,作出零频到  $\nu_{\max}$  之间的 MTF 频率曲线,即得到 CT 系统的 MTF 曲线,MTF 为 10% 处对应于  $\nu = 0.9\nu_{\max}$  (图 4)。

若取 10% 的 MTF 值对应的采样频率作为系统的空间分辨率测量结果,考虑到图像像素 1 单元为 0.08 mm,则有(铝)的系统空间分辨率为  $0.5 \times 0.9 = 5.6$  lp/mm,即该 CT 系统对铝件具有 5 lp/mm

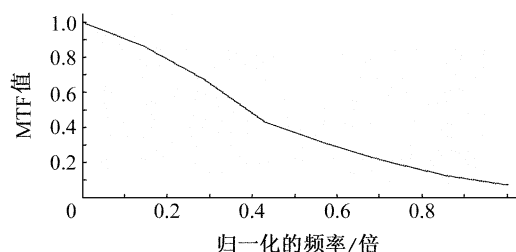


图 4 CT 系统的 MTF 曲线

以上的空间分辨率。同一测量条件下,对  $\phi 40$  mm 有机玻璃柱进行了测量(图 2b),MTF 计算(有机玻璃)系统空间分辨率为  $0.5 \times 0.68 = 4.2$  lp/mm。

以上 MTF 计算结果说明该台 CT 设备具有较高的空间分辨率,与用钢制四线对模型的直接成像结果相符合。

## 4 结果与讨论

借鉴 ASTM 标准推荐的测量 MTF 的方法,完成了对一台工业 CT 的 MTF 曲线测量,由于使用所有的像素参与计算,最大限度地提高了信噪比,排除了统计噪声的影响,测量结果可靠性好且具有较高的精度,与其他方法测量的结果相吻合。建议在对工业 CT 整机性能测试时参考使用该方法。

致谢:感谢中国科学院高能物理研究所研发中心图像组全体工作人员在 CT 数据采集等方面所做的工作与支持。

### 参考文献:

- [1] 闫 昱,董双立,孙 璐,等. X-CT 机空间分辨率测试规范的探讨[J]. CT 理论与应用研究,1998,7(1):38—42.
- [2] 胡曙光,吕仁民,冯小刚,等. CT 的 MTF 测量和评价[J]. 中国医学物理学杂志,1997,14(1):30—32.
- [3] ASTM E 1695—1995 (Reapproved 2001) Standard Test Method for Measurement of CT System Performance[S].

(上接第 398 页)

- pulses; application for thin film ultrasonic measurements[J]. Applied Physics Letters,1984,45(5):510.
- [5] Cielo P F, Nadeau, Lamontgne M. Laser generation of convergent acoustic waves for materials inspection[J]. Ultrasonics,1985,23(2):55—62.
- [6] Hutchins D, Hu J, Lundgren K. A comparison of laser and EMAT techniques for noncontact ultrasonics[J]. Materials Evaluation,1986,44(10):1244—1253.