

# 工业 CT 技术参数对性能指标的影响(续)

## ——兼谈如何选择工业 CT 产品

张朝宗

(清华大学, 北京 100084)

**摘 要:** 叙述了工业 CT 技术参数对性能指标的影响, 以便读者在选择和购买工业 CT 设备时, 能恰如其分地提出技术要求, 合理地在性能和价格之间取得折中。

**关键词:** 工业 CT; 技术参数; 性能指标

中图分类号: TG115.28      文献标识码: A      文章编号: 1000-6656(2007)02-0084-04

### Effect of Technical Data of an Industrial CT on Its Performance(Continuation): a Guide for Industrial CT System Selection

ZHANG Chao-zong

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The influence of technical specifications of industrial computed tomography (ICT) equipment on its application performance is discussed. So that the readers are able to put forward their technical requirement appropriately and make a reasonable trade-off between the performance and price, when they prepare to select or purchase a ICT equipment.

**Keywords:** Industrial computed tomography; Specification; Performance

## 2 工业 CT 技术参数对性能指标的影响

综上所述密度分辨能力比起空间分辨能力更为重要。然而人们通常总是特别关注空间分辨能力, 所以下面还是从空间分辨率开始介绍。众所周知, CT 的空间分辨率主要取决于射线源焦点的尺寸、探测器孔径和几何条件; 而整个机械系统的精度、数据采集系统和重建算法也有一定影响。前者决定了 CT 系统空间分辨能力的极限, 两者共同的作用决定了系统实际能够达到的空间分辨能力。

### 2.1 空间分辨率

首先自然想到的是尽量减小探测器的尺寸, 因为射线源的选择余地似乎不大。毫无疑问减小探测器尺寸或更精确地说减小探测器有效孔径可以使系统空间分辨率提高, 但是需要深入一点地定量考察各种参数的影响。可以从分析射线等效束宽计算公式开始, 因为射线等效束宽  $BW$  从物理上确定了系

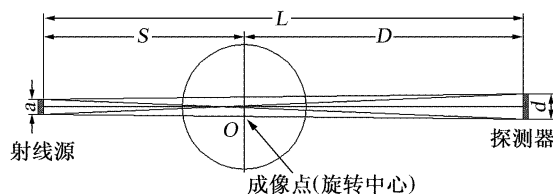


图 2 射线等效束宽计算

统可能达到的极限分辨率(图 2)。

$$BW \approx \frac{\sqrt{d^2 + [a(M-1)]^2}}{M} \quad (1)$$

可改写为

$$BW = a \left[ \left( \frac{D}{L} \right)^2 + \left( \frac{S}{L} \right)^2 \times \left( \frac{d}{a} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中  $a$ ——射线源尺寸;  
 $d$ ——探测器孔径;  
 $M$ ——几何放大倍数;  
 $M = \frac{L}{S}$ ;

$D$ ——探测器到旋转中心距离;

$L$ ——射线源到探测器距离;

收稿日期: 2006-04-28

作者简介: 张朝宗(1938—), 男, 研究员, 从事无损检测科研工作。

S——射线源到旋转中心距离。

$$\text{令 } A = \frac{D}{L} \quad B = \frac{S}{L} = \frac{1}{M} \quad C = \frac{d}{a}$$

式中 A——探测器的几何等效倍率；

B——射线源的几何等效倍率；

C——探测器孔径与射线源尺寸之比。

则式(2)可改写为

$$BW = a[A^2 + (BC)^2]^{1/2}$$

也可写成如下形式

$$BW = \sqrt{(aA)^2 + (dB)^2}$$

对各种参数的计算结果如表 1 所示。

表 1 不同几何条件下的射线等效束宽(BW/a)的值

C	不同 L/D 对应的 BW/a					
	2	4	5	8	10	20
1.00	0.71	0.79	0.82	0.88	0.91	0.95
0.50	0.56	0.45	0.45	0.46	0.46	0.48
0.20	0.51	0.29	0.26	0.22	0.21	0.20
0.10	0.50	0.26	0.22	0.15	0.13	0.11
0.05	0.50	0.25	0.20	0.13	0.11	0.07
0.02	0.50	0.25	0.20	0.13	0.10	0.05

再用表 1 的数据分别画出  $BW/a - d/a$  和  $BW/a - L/D$  的关系曲线,如图 3 和 4 所示。

从图 3 中可看出,射线源尺寸一定时,减小探测器孔径  $d$  可以减小射线等效束宽  $BW$ ,也就是提高

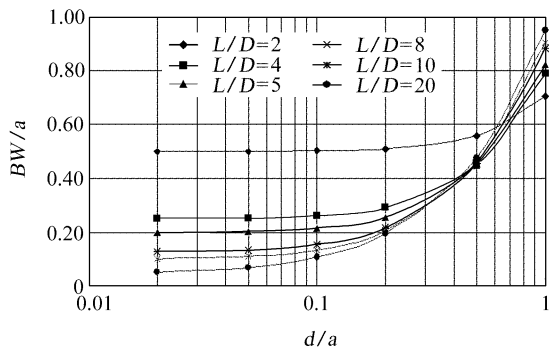


图 3 不同 L/D 时  $BW/a - d/a$  的关系曲线

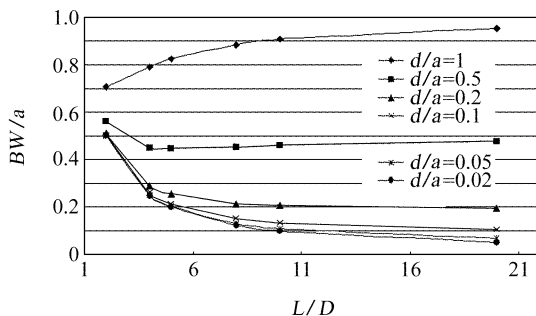


图 4 不同  $d/a$  时  $BW/a - L/D$  的关系曲线

了系统的空间分辨率。同时还可看出减小探测器孔径的时候,射线等效束宽  $BW$  减小的倍率与  $L/D$  密切相关。 $L/D$  较小时, $BW$  的减小并不显著;只有  $L/D$  较大时,探测器孔径减小, $BW$  才有显著的变化。即当样品的旋转中心远离探测器的时候,减小探测器孔径或者直接减小探测器的尺寸并不能有效地提高系统空间分辨率,只有当样品的旋转中心足够靠近探测器的时候,减小探测器孔径或者直接减小探测器的尺寸才能有效地提高系统空间分辨率。还有一个有趣的现象是,当  $d/a$  为 0.4~0.5 时且  $L/D \geq 4$  以后, $BW$  几乎与  $L/D$  没有关系,也就是说旋转中心的远近与空间分辨率几乎没有关系。

从图 4 中可以得到与图 3 同样的结论,当  $d/a \approx 0.5$  时  $BW/a$  随  $L/D$  的变化平缓,说明旋转中心的移动对空间分辨率影响不大。还有一个重要的现象是当  $d/a \leq 0.2$  以后,几条曲线几乎重合。这说明在射线源尺寸一定时,探测器孔径  $d$  减小到一定程度以后,对于提高系统的空间分辨率的作用将不再十分明显。

归纳一下从上述计算和图表得到的结论如下:

(1) 在射线源尺寸一定时,减小探测器孔径  $d$  可以减小射线等效束宽  $BW$ 。

(2) 减小探测器孔径时, $L/D$  较小时, $BW$  的减小并不显著;只有  $L/D$  较大时, $BW$  的变化显著。

(3) 当  $d/a \approx 0.5$  时, $BW$  几乎与  $L/D$  无关。

(4) 射线源尺寸一定时,探测器孔径  $d$  减小到一定程度(例如  $d/a \leq 0.2$ )以后,对于提高系统的空间分辨率的作用将不再十分明显。

若考虑一般 X 射线机或直线加速器的实际源点尺寸  $a \approx 2$  mm,当  $d/a \approx 0.5$  时,即探测器有效孔径  $d$  接近 1 mm, $BW$  几乎与  $L/D$  没有关系;当  $d/a \leq 0.2$  时,即探测器有效孔径  $d \approx 0.4$  mm 以后,继续减小探测器有效孔径对于提高系统的空间分辨率的作用将不再十分明显。

了解上述结果对于设计 CT 系统,合理选择 CT 的结构参数是非常必要的,可以避免盲目改变某些参数,既达不到改善希望提高某些性能的目的,反而影响了其它指标。

另外,根据采样理论投影采样间隔  $\delta$  应当  $\leq BW/2$ (有时候被误解为应当等于)。习惯上有时将  $\Gamma = 1/BW$  称为系统的截止频率。过分减小采样间隔  $\delta$  对于充分达到系统的极限空间分辨率虽然好处不大,但是射线源点的形状实际上并不是边界清

晰的,射线源的强度本身是一个分布,也就是说  $BW$  的计算并不是精确的,所以实际上在条件允许的时候,应当采用稍小于  $BW/2$  的采样间隔,才能得到最佳空间分辨率。

按照 GJB 5311—2004 标准推荐的方法<sup>[10]</sup>,定义系统调制传递函数(MTF)曲线上调制度为 10% 处对应的空间频率为 CT 系统的空间分辨率。通常这样规定的空间分辨率数值上要高于系统的截止频率,经验的统计数据说明前者大致是后者的 1.3~1.5 倍。还有一点值得注意的是,射线源点并不都是圆对称的,有的是接近长方形的,就是说射线源的放置方向也会影响系统的空间分辨率。

## 2.2 密度分辨率

下面再来考察影响系统密度分辨率的因素。

按照 GJB 5311 标准推荐的方法,统计标准模体的 CT 图像上给定尺寸方块的 CT 值,求出标准偏差,采用三倍标准偏差为给定面积下的密度分辨能力,由此得到密度分辨能力相对于不同面积的关系曲线,也称作对比度辨别函数(CDF)。

或者用普通人眼以 50% 可信度能够发现的相对密度变化来定义系统密度分辨率,则

$$\frac{|\mu_t - \mu_b|}{\mu_b} \times 100\% = \frac{c\sigma\Delta p}{D\mu_b} \times 100\%$$

$$D \gg BW$$

式中  $\mu_t$ ——细节(缺陷)材料的衰减系数;

$\mu_b$ ——基体材料的衰减系数;

$c$ ——经验系数,  $2 \leq c \leq 5$ ;

$\sigma$ ——CT 图像噪声;

$\Delta p$ ——CT 像素宽度;

$D$ ——被观测细节(缺陷)的尺寸。

无论哪种表示方法都说明微小密度差别能否被可靠地识别取决于它们相对于噪声的幅度。换句话说,系统密度分辨率取决于系统的(广义)信号噪声比。广义概念上的系统噪声大致可以分为四个来源,即射线强度的统计涨落及射线源的不稳定,射线强度数据采集系统的噪声(包括探测器能量响应的不一致性、射线检测系统强度响应非线性和各类电子学噪声),位置测量系统的误差以及重建算法近似性。原则上说系统设计希望减小除射线强度的统计涨落以外的所有各项噪声。

## 2.3 照射时间和射线源强度

下面着重讨论一下在射线源强度一定的条件下如何提高信号幅度和质量。以闪烁体-光电二极管阵列列为典型,首先概要地分析一下信号形成的全过程。

射线从源点发出,进入单个探测器的射线强度取决于探测器孔径对源点所张的立体角。在射线源到探测器距离相同的条件下,探测器尺寸越小或者有效孔径越小,进入探测器的射线强度越低。也就是说为了得到高的空间分辨率,就会使探测器接受到的光子数减少,如果还要保持原来的人射光子数,就要延长测量时间。在探测器尺寸或者其有效孔径固定的条件下,射线源到探测器距离越远,进入探测器的射线强度越低,在源点尺寸相对于距离可以忽略的条件下,射线强度与距离平方成反比。这就是说在条件允许时,把系统设计得越紧凑越好。

射线穿过被检测样品,其强度要受到衰减。所以射线在检测样品中路径长或者穿透那些等效原子序数高的材料时,简单一点说就是检测大或者重的材料,射线要受到更多的衰减,接收到的信号就要减弱,射线强度的统计涨落大到一定程度就要严重影响 CT 图像的质量。顺便指出一点,目前普遍采用的反投影算法中,衰减大的(也就是统计涨落大的)那些投影数据对最后形成的 CT 图像数据有更大的“权重”。因此设计 CT 系统时,要适当选择射线源能量,避免射线受到过大的衰减。经验的数据指出,对于性能良好的分立探测器,射线强度在自己的投影路径上的衰减超过 500 倍时,图像质量将受到明显的影响。

检测大而重的样品对图像质量的影响还不仅在于统计涨落的加大。前面所说的衰减实际上是由 X 射线与物质的三种不同的相互作用组成的,在工业 CT 所用的能区,占优势的是康普顿效应,也就是说射线穿透检测样品时要产生大量的散射,由于检测样品就在探测器附近,这些散射源相对探测器所张的立体角大,散射线增加了探测器的“本底”,不仅减小了探测器的动态范围,同时由于散射“本底”并不稳定,随样品几何形状以及扫描位置而变化,这在“有用射线”受到较大衰减时就不一定能忽略,应当采用有效措施来抑制散射线的影响。

工业 CT 所用分立探测器一般都采用切片方向和垂直切片方向两个射线准直器,它们除了挡掉大部分散射线以外,切片方向准直器还决定了切片厚度和  $z$  方向的空间分辨率,垂直方向准直器主要影响  $x-y$  切片平面内的空间分辨率。从 CT 计算的角度看,把准直器看成射线探测器更为合适。穿过准直器的 X 射线首先到达闪烁晶体。X 光子的能量通过射线与物质的三种基本的相互作用被闪烁体

吸收并发光。人们首先注意的是闪烁体在射线入射方向上的长度,从而算出所谓的探测效率。实际上只是算出了对射线的“阻挡”效率。因为 CT 用的探测器大多数是长方体,为了保证一定的空间分辨率,在垂直于射线的两个方向上尺寸要小得多,尤其是应用高能加速器的情况下差距更大。这样 X 光子虽然被闪烁晶体所阻挡,但是并不是全部能量都能被闪烁体吸收,一部分能量“逃逸”出闪烁体,其中一部分还会形成对相邻探测单元的射线窜扰。射线能量越高,闪烁体越薄,这个问题越严重。问题还不止于此,由于 X 射线是连续谱分布,要求各探测单元之间的能量响应尽可能一致,稍加思考就可以理解薄的探测单元的能量响应一致性要比厚的探测单元差。所以信号幅度降低、射线窜扰增加和能量响应不一致是为了提高空间分辨率所付出的代价。

#### 2.4 光电转换

光电转换问题的第一步是光电二极管的收集效率问题。闪烁晶体内每一个发光点都可以看成一个微光源,向  $4\pi$  方向发光,光收集的效率应当考虑的是几何收集效率(光电二极管对微光源所张立体角)和光的传输效率(应考虑光在闪烁体内的传输损失和在边界反射的损失)。在这里薄闪烁体同样处在不利的地位,考虑方法与射线吸收过程类似,即降低信号幅度、可能引起光窜扰和加剧能量响应不一致。闪烁体的发光光谱应当与光电二极管敏感波长相匹配,闪烁体发光效率和光电二极管的光电转换效率等因素自然都会影响输出电信号幅度。

对于其它类型的探测器虽然各有不同,但是基本考虑方法是一样的。

总的说来,为了 CT 系统最后获得良好的性能,仔细考虑各个细节才能取得最佳的信号噪声比。

最后笔者试图把各种影响因素分为两类,一类因素对提高某些技术指标有好处,但是却导致另外一些技术指标的降低。这是因为 CT 系统的技术指标是互相牵制的,不可能在同一系统上或同样的工作条件下使各项技术指标能同时达到最佳。最典型的是空间分辨率、密度分辨率和一个断层图像的平均产生时间这三项技术指标,设计者或使用者只能根据实际需要在三者中间寻找折中。将这一类因素称为第一类因素。

另一类因素没有或者基本没有这种互相牵制的关系。改善了这些因素只会对系统的性能带来好处,将它们称为第二类因素。假如能够找到功率密度更大的射线源,可以保持射线源焦点不变,而射线束流强度更大,这样就既不会降低空间分辨率,又能改善密度分辨率或缩短扫描时间。

其它例子如系统的机械精度不够或者说位置测量系统的误差较大,会带来额外的系统噪声,只会降低系统的技术指标;探测器在射线方向长度不够,只能降低探测效率,降低了系统的技术指标;性能较差的电子元件,引起更大的电子学噪声,降低了系统的技术指标;小的细节,如闪烁体外表面涂敷良好的光学反射层,只对改善系统性能有好处;探测器前面的射线准直器,如果没有减小探测器孔径对射线源的张角,挡掉了散射线只对改善系统性能有好处。

此类例子还可以举出很多。第二类因素也可统称为系统优良度,设计制造者的任务就是根据实际情况可能尽量提高系统优良度。(未完待续)

### 上海无损检测学会开拓无损检测专项培训

上海无损检测学会最近为外资和中外合资企业 MTS 机械科技有限公司(中国)和 Meterra 集团(中国)成功举办两期无损检测专项培训。

应 MTS 公司(中国)要求举办的 ASME 阀门磁粉和渗透检验专业培训,按照 SNT-TC-1A 标准 NDT II 级人员的要求,培训 40 教时,进行了通用、专业和实际考试以及视力检查,考试合格者颁发结业证书。应 Meterra 集团(中国)要求举办的 ASTM 铸钢件射线底片读片专业培训,参照 SNT-TC-1A 标准,培训内容含磁粉检验、超声检验、目视检验、钢铸件射线照相技术、钢铸件和焊接缺陷及其产生原因、钢铸件验收标准和 ASTM SE-1030 金属

铸件射线照相检验的标准试验方法等,培训 40 教时,进行了通用考试和读片考试以及视力检查,考试合格者颁发结业证书。

美国无损检测学会中央认证程序认为,持有学会证书的无损检测人员虽然满足了 SNT-TC-1A 标准有关资格鉴定和认证实施细则的要求,但仍需进行针对具体被检产品的专项无损检测培训。由于被检产品质量由雇主负责,因此,雇主也应负责对检测产品质量的无损检测人员进行针对性培训。上海无损检测学会可提供专项无损检测培训服务。

(上海无损检测学会 张国城)