

张维国, 曹玉玲, 郭智敏, 等. 不同线对卡测试 CT 空间分辨率差异探讨 [J]. CT 理论与应用研究, 2014, 23(5): 815-820.  
Zhang WG, Cao YL, Guo ZM, et al. Explore of different line-pairs test spatial resolution CT[J]. CT Theory and Applications, 2014, 23(5): 815-820.

## 不同线对卡测试 CT 空间分辨率差异探讨

张维国<sup>1</sup>✉, 曹玉玲<sup>2</sup>, 郭智敏<sup>1</sup>, 倪培君<sup>1</sup>, 左欣<sup>1</sup>, 王晓艳<sup>1</sup>, 郝丽萍<sup>1</sup>

1. 中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103  
2. 北京控制工程研究所, 北京 100080

**摘要:** 空间分辨率是描述工业 CT 系统性能的重要指标, 目前测试方法有线对卡法和圆盘法, 而线对卡没有统一的制作标准, 常用的有条卡、圆孔形和方孔形等。本文通过理论分析和实验确定这些不同线对卡测试 CT 空间分辨率的结果差异及产生原因。

**关键词:** 工业 CT; 空间分辨率; 线对卡

文章编号: 1004-4140 (2014) 05-0815-06 中图分类号: TP 391.41 文献标志码: A

空间分辨率是描述工业 CT 系统性能的重要指标, 目前测试方法有线对卡法和圆盘法, 而线对卡也没有统一的制作标准, 常用的有条卡、圆孔形和方孔形等。近年来常有这两种方法之间的相关性研究报道, 我单位也在这方面进行了大量的研究工作。但近期从 BAM 公司的 Andreas STAUDE 研究结果表明线对卡法测出的空间分辨率比圆盘法测出的结果低<sup>[1-2]</sup>, 这与我们的研究结果完全相反。经过对比观察, 发现其所使用的线对卡类型不同, 该文章使用的是方孔形线对卡, 而我们使用的是条卡。从理论上深入地分析了各种线对卡的差异, 并经过实验验证其不同结果的产生原因。

### 1 理论分析

#### 1.1 工业 CT 基本原理

工业 CT 的物理原理可以用射线衰减公式 (见图 1 及公式 (1)) 描述, 即射线通过物体不同部位时, 由于穿过的厚度、材料等不同, 造成穿过射线强度发生改变; 数学原理用 Radon 变换逆变换来描述, 目前使用最多的是卷积反投影重建算法。反投影就是将所有的投影按照投影方向进行“回抹”操作, 实际算法中要在“回抹”前后经过卷积操作降低各种噪声提高图像质量<sup>[3-4]</sup>。

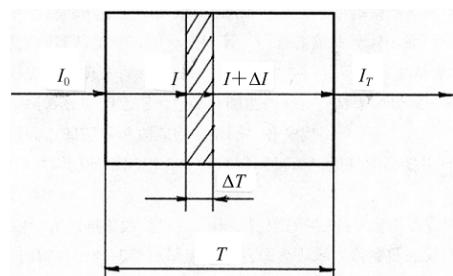


图 1 射线衰减示意图  
Fig. 1 Diagram of ray attenuation

$$I = I_0 \exp(-\mu T) \quad (1)$$

式中,  $I_0$  是入射射线强度,  $I$  是透射射线强度,  $T$  是吸收体厚度,  $\mu$  是线衰减系数, 单位  $\text{cm}^{-1}$ 。

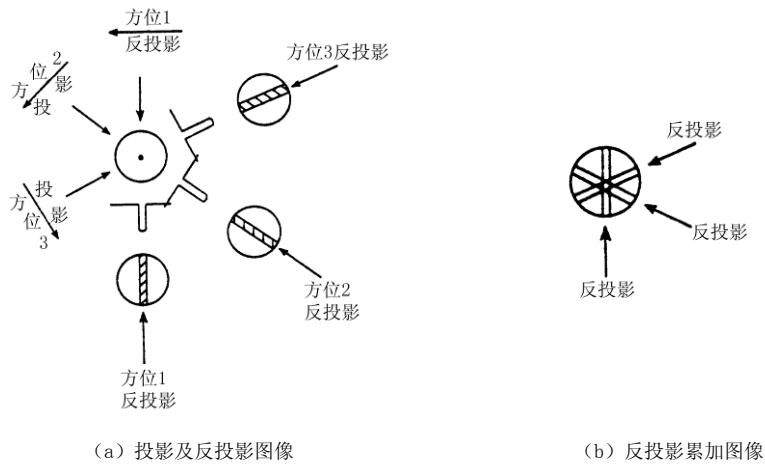


图 2 反投影法的图示说明

Fig. 2 Graphics of the backprojection

## 1.2 不同线对卡 CT 扫描时的差异分析

通常来说，一个细节特征能够被发现需要的条件主要有：

(1) 细节特征在射线方向上引起的射线变化能够被探测器发现, 此处发现的含义是该变化引起的探测器输出信号变化要高于噪声。细节特征与背景材料的线衰减系数差比较大, 在投影方向上的尺寸大, 探测器灵敏度高, 信噪比高, 散射线的散射比低等都有利于细节特征的发现。

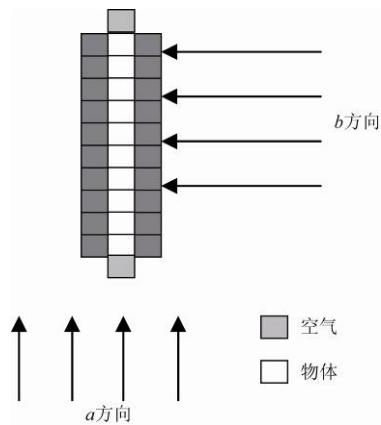


图 3 长条形重建示意图

Fig. 3 Diagram of elongated reconstruction

(2) 在多少个投影方向上能被发现, 如果在所有的投影方向上都被发现, 其“回抹”后的图像就很清晰, 可以认为图像上细节与背景的显示对比度就是线衰减系数的真实对比度; 反之如果只在部分投影方向上发现, 细节就会被模糊, 图像上细节与背景的显示对比度

度要低于细节材料本身线衰减系数与背景的真实对比度。随着能发现的投影方向数目减小，模糊的越来越严重，直到彻底发现不了。此时低密度的细节在 CT 图像上线衰减系数比实际增加，高密度的细节在 CT 图像上线衰减系数比实际降低。

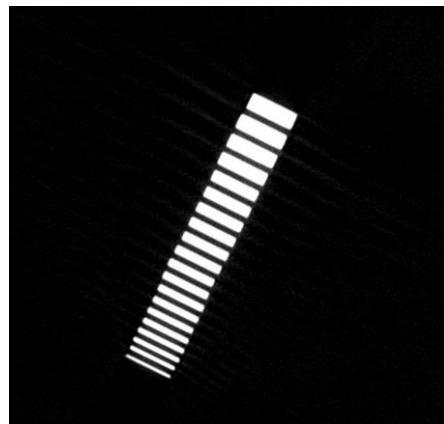


图 4 条形物体 CT 图像

Fig. 4 Bar object CT images

设 10 个正方形小单元组成的长条形物体，线衰减系数  $\mu$ ，每个小单元边长 1 mm，如图 3 所示。在忽略空气的线衰减情况下，在  $a$  方向投影为  $10\mu$ ，在其他方向，如  $b$  方向投影为  $\mu$ 。

用反投影重建时，在  $a$  方向的空气都被“回抹”上了  $10\mu$ ，而其他方向上空气都被“回抹”上  $\mu$ 。其中  $n$  是采集的投影方向数目。这样最终的结果是  $a$  方向上沿长条形的空气 CT 值为  $n\mu + 9\mu$ ，而其他方向空气 CT 值都为  $n\mu$ 。当物体线衰减系数较大时，会导致如图所示在物体长度方向上（尤其是接近物体部位）的空气比其他方向空气 CT 值高的现象。

虽然结论是从有限局部推出的，而且在实际重建过程中，还有滤波等其它处理过程，但这个趋势并没有改变，这在实际检测过程中得到了验证（图 4），为了方便观察这种现象，在该图像上调整了色阶。

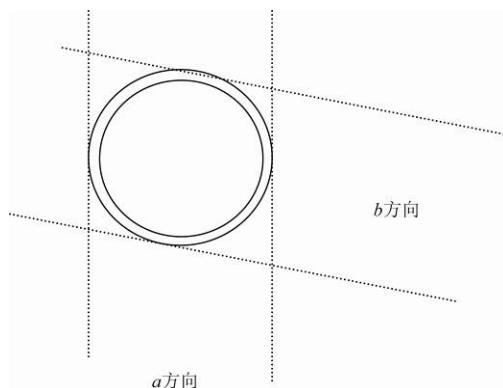


图 5 圆环或圆筒形物体重建图

Fig. 5 Circle or cylinder objects reconstruction

同样对于圆环或圆筒形物体（图 5），不管在  $a$  方向还是  $b$  方向，在两条虚线范围内的空气被“回抹” $2\mu$ ，虚线范围以外的空气都为 0。因此最终反投影的结果是圆环内部的空气 CT 值为  $2n\mu$ ，圆环外的空气 CT 值因为有若干投影方向为 0，其 CT 值要低于圆环内部的 CT 值，即圆环中心空气与物体的显示对比度要小于实际对比度，尤其当圆环内径较小时，这种现象更加明显。这同样在实际检测过程中得到了验证（图 6）。为了观察方便该图像，调整了色阶。

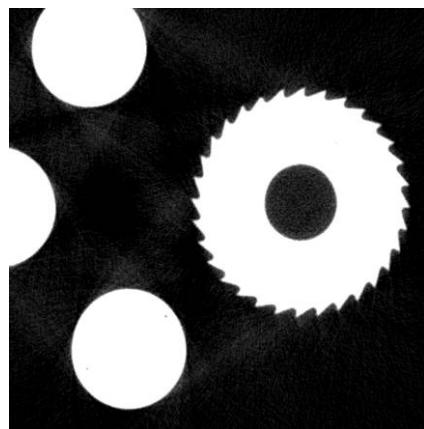


图 6 圆环物体 CT 图像  
Fig. 6 Circle objects CT images

对于条形线对卡，可以认为其是在低密度背景下检测高密度材料，其重建过程可以用图 7 进行模拟。

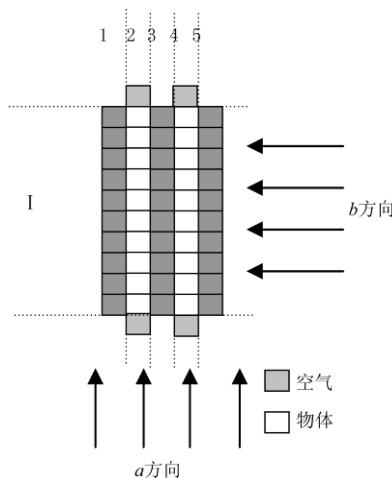


图 7 条形线对卡重建示意图  
Fig. 7 Diagram of line-pairs reconstruction signal

用两根 10 个正方形小单元组成的长条形物体，间距 1 个单元，线衰减系数  $\mu$ ，每个小单元边长 1 mm，在忽略空气的线衰减情况下，在  $a$  方向，1 区、3 区和 5 区情况相同，投影

为 0; 2 区和 4 区情况相同, 投影为  $10\mu$ ; 在其他方向, 如  $b$  方向, 投影为  $2\mu$ 。

用反投影重建时, 在  $a$  方向, 2 区和 4 区的空气都被“回抹”上了  $10\mu$ , 1、3 和 5 区被“回抹”上了 0, 而其他方向上空气都被“回抹”上  $2\mu$ 。

对于物体临近周围区域,  $a$  方向上, 2 和 4 区域(沿长条形方向)的空气 CT 值为  $2n\mu+8\mu$ , 而其他方向 (1、3、5 区域) 空气 CT 值都为  $2n\mu-2\mu$ 。其中  $n$  是采集的投影方向数目。

图 8 是条形线对卡 CT 图像和 CT 值, 从图上可以看出, 在低频 (线对数小) 部分, 线对中空气的 CT 值与外部空气 CT 值相差不大, 可以认为显示对比度与实际对比度相同。

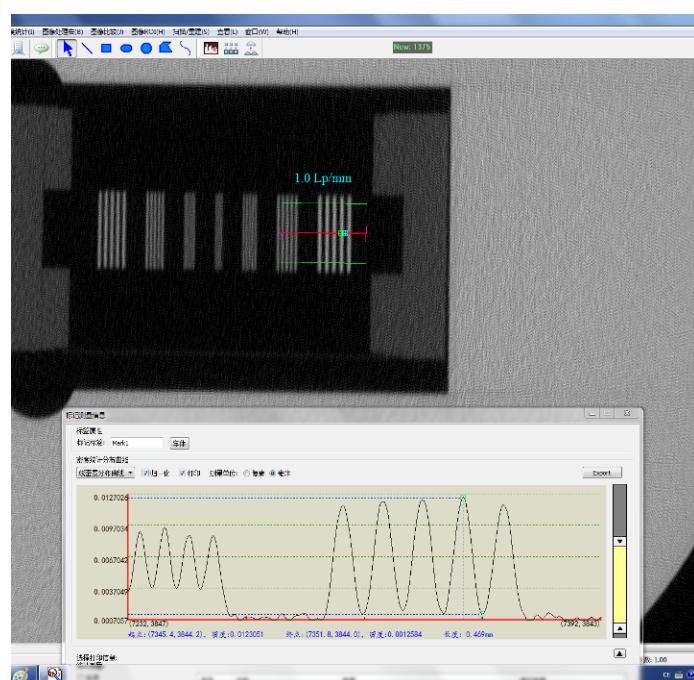


图 8 条形线对卡 CT 图像

Fig. 8 Line-pairs CT images

## 2 结论

Andreas STAUDE 中线对卡法测量空间分辨率使用的是 En 16016-3 标准, 标准规定使用方孔形线对卡; 我们测量空间分辨率方法执行 GJB5312-2004 标准中附录 A 的条形线对卡。两种方法在计算调制度时公式相同, 都是用线对卡与背景的对比度与背景之比<sup>[5-7]</sup>。

由以上分析可以看出条形卡与孔型卡的区别, 孔型卡由于重建算法原因, 其中的空气 CT 值要比外面空气的 CT 值高, 导致测试时显示对比度已经比材料本身的实际对比度低。而条形卡中间空气的 CT 值与外部空气的 CT 值差别不大, 显示对比度与材料本身实际对比度相差不大, 因此会导致在相同调制度下, 条形卡的值要比孔型卡的值高。最终造成 Andreas STAUDE 的结论与我们的实验结果相反。

## 参考文献

- [1] Andreas Staude, Jurgen Goebels. Determining the spatial resolution in computed tomography—comparison of MTF and line-pair structures. international symposium on digital industrial radiology and computed tomography[C]//France: Fraunhofer Development Center for X-Ray Technology EZRT, 2007: 141–150.
- [2] 国防科学技术工业委员会. GJB 5311-2004, 工业 CT 系统性能测试方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2004.
- [3] 叶云长, 倪培君. 计算机层析成像检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [4] 张朝宗, 郭志平. 工业 CT 技术和原理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [5] ASTM E1441 standard guide for computed tomography (CT) imaging[S]. American: American Society for Testing and Materials, 2005.
- [6] EN 16016-3 nondestructive testing—radiation methods—computed tomography—part3: Operation and interpretation[S]. German: ECISS, 2011.
- [7] 国防科学技术工业委员会. GJB 5312-2004 工业射线层析成像(CT) 检测[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2004.

## Explore of Different Line-pairs Test Spatial Resolution CT

ZHANG Wei-guo<sup>1</sup>✉, CAO Yu-ling<sup>2</sup>, GUO Zhi-min<sup>1</sup>, NI Pei-jun<sup>1</sup>,  
ZUO Xin<sup>1</sup>, WANG Xiao-yan<sup>1</sup>, HAO Li-ping<sup>1</sup>

1.The Ningbo Branch of Ordnance Science Institute of China, Ningbo 315103, China

2.Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100080, China

**Abstract:** The spatial resolution of a CT system is important, but the two established methods to measure the spatial resolution, MTF and line-pairs. Make the line-pairs no unified standard, commonly use line-pairs has bar, hole and quadratic shape. In this paper, through theoretical analysis and test to determine the different line-pairs to test the results of the spatial resolution of CT differences and reasons.

**Key words:** ICT; spatial resolution; line-pairs



**作者简介:** 张维国✉ (1972—), 男, 中国兵器科学研究院宁波分院研究员, 主要从事工业 CT、超声波、射线、磁粉和渗透等无损检测工作, Tel: 0574-87902348, E-mail: zwg1972@163.com。