

文章编号: 1001-4322(2004)03-0390-05

高能工业 CT 用新型 X 射线源焦斑测量*

陈 浩, 许 州, 金 晓, 黎 明, 单李军, 卢和平, 杨兴繁, 邓仁培, 张之福, 刘锡三

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为了获得较高的空间分辨率,设计了一种新型小束斑驻波电子直线加速器,该加速器取消了加速腔中的鼻锥结构,而在耦合腔中设置鼻锥结构。用狭缝法代替小孔法测得 X 射线源的焦斑尺寸为 1.4mm。讨论了射线源焦点对成像质量的影响,分析了在高能条件下小孔法不适合用于焦点测量的物理原因,用 4 种测量方法测量了该高能 X 射线源参数,测得该系统的成像极限分辨率为 2.5 lp/mm,最后对实验结果进行了分析。

关键词: 加速器; 工业 CT; X 射线; 焦斑尺寸; 调制传递函数

中图分类号: TL503 文献标识码: A

高能 X 射线源是高能工业 CT 系统的基础,而射线源焦斑尺寸直接决定了成像系统空间分辨率的优劣。能量超过 1.33MeV 的高能 X 射线,必须利用加速器加速电子来产生。高能电子束与高 Z 靶相互作用,由于靶原子核库仑场对高速运动电子的减速作用而产生具有强烈前冲性的韧致辐射(bremsstrahlung)。

电子束与高 Z 靶相互作用产生 X 射线,这是极其复杂的电子与核的非弹性碰撞过程。对单能电子束和薄靶, X 射线源强度的空间分布与电子束电流密度空间分布是近似一致的,因此电子束的有效击靶半径可用靶上 X 光半径来表示^[1],一旦给出了电子束流强度分布的半高宽值,也就确定了 X 射线源的焦斑尺寸。对于低能 X 射线源(如直流高压 X 光管),其尺寸在亚 mm 甚至 μm 量级,而且随着束流强度的增大,焦点尺寸也跟着增大。通过加速器产生的 X 射线源尺寸一般在 mm 量级。例如早期英国阿尔特玛斯顿的核武器研究中心高功率加速器闪光照相系统的 X 射线源尺寸是 7mm,近期美国 Los Alamos 实验室 DARHT 闪光机 X 射线焦斑尺寸达到 2mm。

1 CT 成像要求

为了保证 CT 成像的空间分辨率,对 X 射线源焦斑有严格要求。因为有两点:(1) X 射线源具有一定的横向尺寸(面源),它会引起几何不清晰度 U_g ,使图像的边界影像变得模糊,在射线检测中影响测量分辨率。利用几何关系,如图 1 所示,可得到几何模糊度

$$U_g = dL_2/L_1 = dM \tag{1}$$

式中: M 是成像系统的几何放大倍数; d 是 X 射线源的焦斑尺寸全宽。(2) 射线源尺寸与成像系统能检测的最小缺陷尺寸 x (空间分辨率)有密切关系,由图 2 可知,当缺陷的尺寸 x 足够小时,缺陷在成像平面上的像会缩成一点,只有减小 d 才能分辨此缺陷。

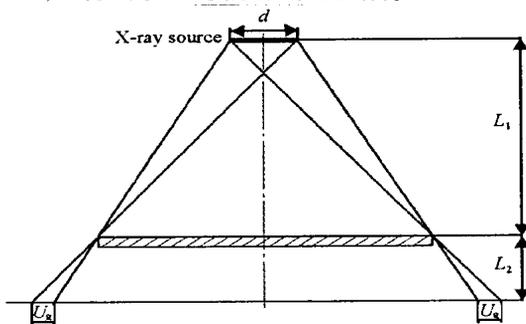


Fig. 1 Geometry blur
图 1 几何模糊度

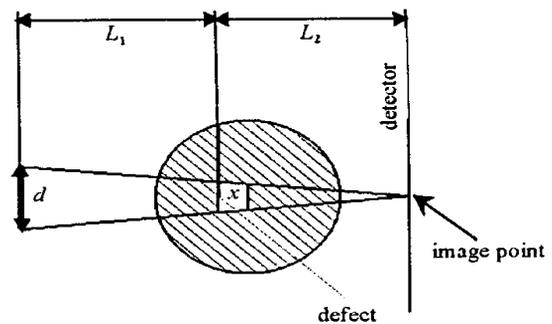


Fig. 2 Defect resolution
图 2 缺陷分辨率

* 收稿日期: 2003-09-10; 修订日期: 2003-12-02
作者简介: 陈 浩(1978—), 男, 硕士研究生, 主要从事射频加速器研究; 绵阳 919-1014 信箱。

在最佳放大倍数条件下可检出的最小缺陷尺寸为^[2]

$$x_{\min} = \frac{U_i}{[1 + (U_i/d)^2]^{2/3}} \tag{2}$$

式中：最佳放大倍数 $M_{\text{opt}} = 1 + (U_i/d)^2$ ； U_i 是成像系统的固有不清晰度。

因此在加速器设计中，设法减小电子束的横向尺寸即可减小 X 射线源的尺寸，这是提高成像分辨率的主要措施之一。在此要求下还要保证电子束达到一定的能量，较大的束流强度，以及打靶产生的 X 射线强度满足 CT 成像的要求。

加速器中产生高能高流强的电子束有两种途径：一是在现有加速器的基础上外加束流聚焦系统，理论计算与实验结果表明^[5]，由于加速器出口处束流发射度的影响，经外聚焦系统后传输到靶点的电子束流强度会减小；二是不外加聚焦系统，为高能工业 CT 系统设计新型的小型射频驻波直线加速器，它可以通过加速腔自身的聚焦能力来减小加速器出口处的束流尺寸。将靶材料直接焊接在加速管出口处就构成了高能 X 射线源。

2 高能工业 CT 用新型射频加速器

针对 CT 成像对高能 X 射线源的要求，我们设计了一种新型射频加速器，其加速结构如图 3 所示。

新型加速结构的主要特点是：取消加速腔中的鼻锥结构，而在耦合腔中设置鼻锥结构。其优点在于：(1)在加速腔中去掉鼻锥后，降低了加速腔中径向电场的强度，增强了加速电场自身的聚焦能力；(2)加速腔有效加速电子的距离增大，缩短了加速器的整体长度，(3)设置小鼻锥于耦合腔中，抑制了耦合腔中的电磁场，降低了加速腔与其相邻的耦合腔间的耦合系数。

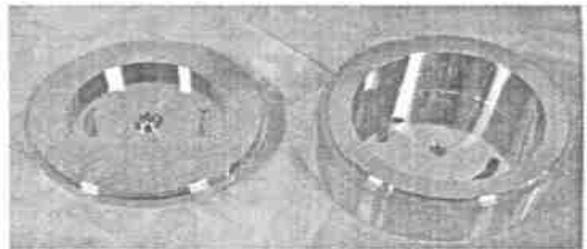


Fig. 3 New RF accelerating structure

图 3 新型加速结构

该加速器选用 S 波段磁轴耦合驻波加速结构，主要参数如下：加速管长度为 55cm，电子束能量为 9MeV，脉冲流强为 150mA，1m 处 X 射线强度为 34Gy/min。

3 新型加速器 X 射线源焦斑测量

3.1 狭缝法

测量光源尺寸最简单的方法是 小孔成像法，但在高能 X 射线条件下，这一方法有时并不适用，主要原因是：高能 X 射线能穿透小孔边缘，随着 X 射线强度的变化，穿透程度不相同，胶片上像的大小也不相同，同时像点边界模糊；像点尺寸比加速器束流孔尺寸(6)还要大，这是不合理的，如图 4、5 所示。另外，对小焦斑测量，小孔尺寸要比源的尺寸低一个数量级左右，机械加工和准直都比较困难。

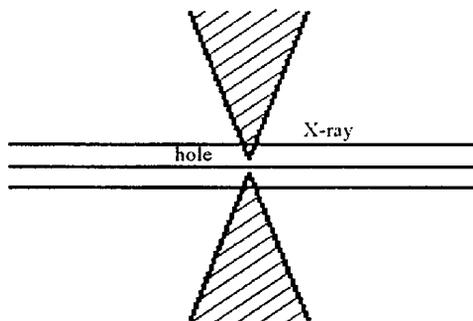


Fig. 4 X-ray penetration of the small hole edge

图 4 X 射线穿透小孔边缘

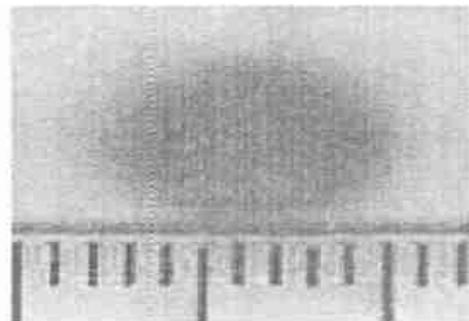


Fig. 5 Image of the X-ray source after the penetration on the film (scale:1mm)

图 5 X 射线穿透小孔后在胶片上成的像(标尺刻度为 1mm)

因此，我们采用钨-铜(Wu-Ni-Cu)合金制成的狭缝来代替小孔(钨-铜合金长 100mm，宽 50mm，厚 20mm；狭缝宽度 $t = 0.2\text{mm}$)。狭缝法测量原理如图 6 所示。

当 $a = b$ 时，由几何关系有

$$d = h - 2t \tag{3}$$

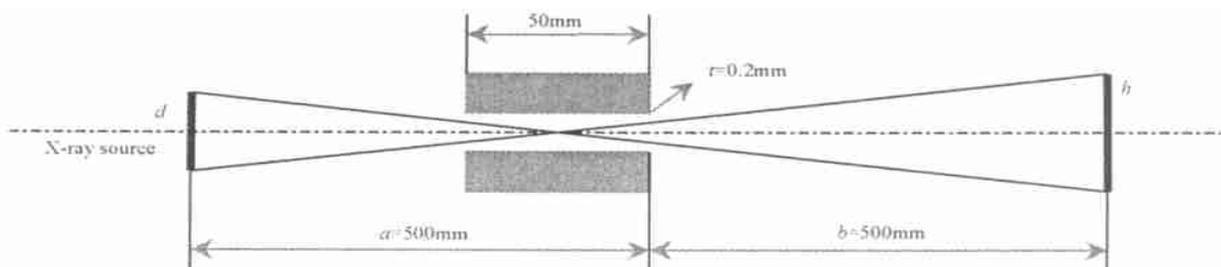


Fig. 6 Schematic plan view of slot method

图 6 狭缝法测量原理图

射线源经狭缝在胶片上(未加增感屏)成像如图 7 所示。对该成像用微光度计进行数字化处理,其结果如图 8 所示。由于胶片上光学密度(黑密度) D 与射线辐照量 X 之间有如下线性关系

$$D = D_0 + kX \tag{4}$$

式中 k 为斜率。从图 8 中可见黑密度曲线为高斯分布,因此射线源强度亦为高斯分布。由于射线源的强度分布与电子束电流密度的空间分布近似一致,所以电子束电流密度的空间分布也是高斯分布。直接测得焦斑全宽度 $d = 3\text{mm} - 2 \times 0.2\text{mm} = 2.6\text{mm}$ 。我们把高斯分布的半高全宽 d_{FWHM} 作为射线源的焦斑尺寸,由此计算出射线源焦斑大小约为 1.49mm 。

3.2 调制传递函数法(MTF)

理想点光源经客体(例如狭缝)上一点后所成的像也是一个理想的点(线);但实际的 X 射线源并不是理想的点光源,而是具有一定大小的面状光源,同时由于射线的散射作用,在客体上的一个点的成像将是一个斑。因而可用点扩展函数 $P(x, y)$ 和相应的线扩展函数 $L(x)$ 来描述。对于狭缝光栏,射线强度在沿着狭缝方向(y 方向)上不变,而垂直方向(x 方向)上则是变化的。狭缝成像的强度分布公式及线扩展函数 $L(x)$ 推导如下。

设源坐标为 (u, v) ,物坐标 (u, v) ,像坐标 (x, y) ,根据成像的几何关系有^[1]

$$\begin{cases} x = mu - M \\ y = mv - M \end{cases} \tag{5}$$

式中: m, M 分别是系统的放大倍数和几何放大倍数 ($M = m - 1$)。光源焦斑尺寸为 d ,狭缝横向尺寸为 l ,光源到成像平面的距离为 D_f 。由于 $d \ll l \ll a, b$,所以面源(光源平面)上每一个点到像平面上任一点的距离都近似为 D_f 。根据成像理论,像平面上一点 (x, y) 处光强 $I_f(x, y)$ 等于光源平面上每一点发出的光 $I_s(u, v)$ 经物平面(狭缝)作用后在像点 (x, y) 上贡献的求和,即有如下关系

$$I_f(x, y) = \frac{1}{D_f^2} \iint I_s(u, v) T(u, v) d u d v \tag{6}$$

式中: $T(u, v)$ 是光栏的透射函数,设狭缝位于 $u = u_0$ 处,则狭缝光栏的透射函数为

$$T(u, v) = C_s \delta(u - u_0) \tag{7}$$

将(7)式代入(6)式可得出狭缝成像的强度分布

$$I_f(x, y) = \frac{m C_s}{M D_f^2} I_s(u_0(x), y) \tag{8}$$

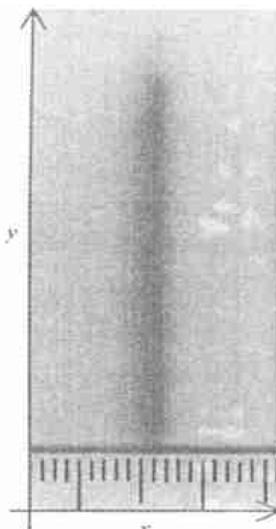


Fig. 7 Image of the X-ray source on the film through the slot

图 7 射线源经狭缝在底片上的成像

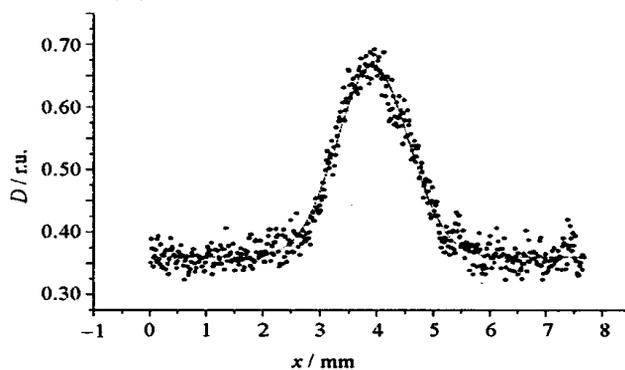


Fig. 8 Digital processing of the slot image using microphotometer

图 8 使用微光度计对狭缝成像的数字化处理

(8) 式表明像平面上 x 值相同的点对应的积分值相同,即垂直于 x 方向上的光强都相等。实际测量狭缝的黑密度曲线即为 $I_f(x, y)$,略去无关常数就可得到狭缝光栏的线扩展函数 $L(x)$ 。

$$L(x) = \int_{<(x)}^{>(x)} I_s [0(x),] d \tag{9}$$

由(8),(9)式可以看出,线扩展函数 $L(x)$ 与黑密度曲线(强度分布 $I_f(x, y)$)在形式上是一致的。由调制传递函数的定义对 $L(x)$ 进行离散 FFT 变换,即可确定面源-狭缝成像系统的 MTF(f),见图 9。

对于高斯分布的射线源其强度分布函数为

$$I_s(\cdot) = \frac{1}{\sqrt{a}} \exp\left[-\frac{2+}{a^2}\right], a \text{ 为长度参数,与半高宽的关系是}$$

$$d_{FWHM} = 2a \sqrt{\ln(2)} \tag{10}$$

根据成像理论,高斯分布时调制传递函数是^[11]

$$MTF(f) = \exp\{- [fa(m - 1)]^2\}$$

MTF(f) = 0.5 时的空间频率是

$$f_{1/2} = \sqrt{\ln(2)} / (m - 1) a \tag{11}$$

由(10),(11)式有

$$d_{FWHM} = 2\ln(2) / (m - 1) f_{1/2} \tag{12}$$

(12) 式即为传递函数法计算射线源焦斑尺寸的公式。实际面源-狭缝系统的 $f_{1/2} = 0.311\text{lp/mm}$, $m = 2$,由(12)式计算出焦斑尺寸 $d_{FWHM} = 1.42\text{mm}$,如图 9 所示。

3.3 成像系统的极限分辨率

以该新型 X 射线源为基础研制成功了 9MeV 高能工业 CT 集成检测系统,它是目前国内基于面阵探测器的第一台高能工业 CT 系统。使用分辨率刻度盘测出该系统的极限分辨率约为 2.5lp/mm,如图 10 所示。

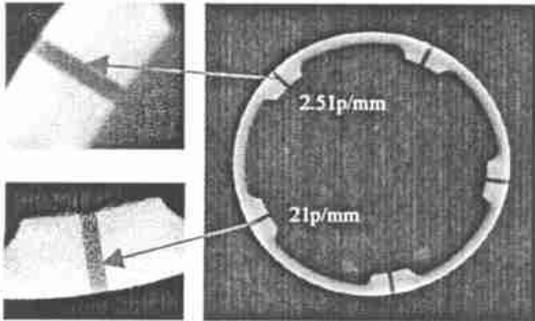


Fig. 10 Limit resolution of the system by experiment
图 10 实验测得系统的极限分辨率

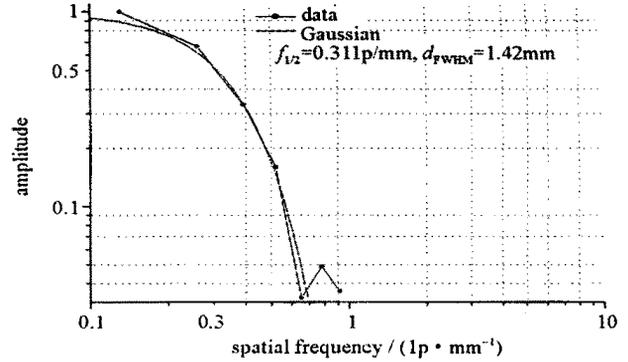


Fig. 9 MTF of flat source-slot imaging system
图 9 面源-狭缝成像系统的调制传递函数

成像分辨率公式为

$$R = m/2 \sqrt{c^2 + [d_{FWHM}(m - 1)]^2} \tag{13}$$

式中: R 为成像系统空间分辨率, m 为本系统的放大倍数, c 是面阵探测器探元尺寸, d_{FWHM} 射线源焦点尺寸。对于 9MeV 系统, $m = 1.13$, $c = 0.127\text{mm}$, $R = 2.5\text{lp/mm}$, 可得 $d_{FWHM} = 1.438\text{mm}$ 。这与用 MTF 方法得到的焦斑尺寸是基本一致的。当取不同的放大倍数时,本系统空间分辨率随射线源焦斑大小的变化如图 11 所示。

4 结 论

本文主要以 4 种方法研究了新型加速器 X 射线源的焦斑测量问题。其中常用的小孔法在超高能 X 射线条件下已不再适用。我们用狭缝代替小孔,经测量该新型加速器 X 射线源的焦斑尺寸约为 1.4mm。以该新型 X 射线源为基础,我们研制成功了国内第一台基于面阵探测器的高能工业 CT 集成检测系统,测量得到该系统的成像极限分辨率为 2.5lp/mm。测量结果表明新型 X 射线源使用的新型射频加速器性能达到预期设计指标。工业 CT 用新型射频加速器的研制成功为我国高能工业 CT 的迅速发展奠定了良好的基础。

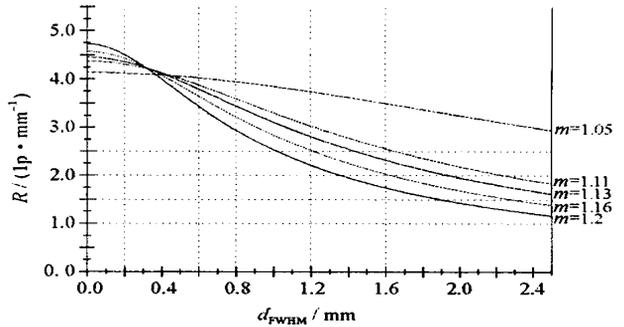


Fig. 11 Relation between the space resolution of imaging system and the spot size of source with the different magnification
图 11 取不同放大倍数时,成像系统空间分辨率与源焦斑尺寸的关系

致谢:感谢中物院流体物理研究所管永红博士在胶片图像数字化处理上的协助,施将君研究员在 X 射线源焦斑概念上的指导;北京航空航天大学路宏年教授在成像系统极限分辨率测量上的协助!

参考文献:

- [1] 施将君. 高能闪光照相引论[M]. 绵阳:中物院流体物理研究所,1998. 202—215. (Shi J J. The introduction of high energy FXR. Mianyang: Institute of Fluid Physics, CAEP, 1998. 202—215)
- [2] 曾祥照. X 射线实时成像检测图像最佳放大倍数和最小检出缺陷[R]. 广东:南海市粤海钢制品有限公司,2002. (Zeng X Z. The optimum magnification and the smallest inspected defect in X-ray real time imaging. Guangdong: Yuehai Steel Ware Corp, Nanhai, 2002)
- [3] 吴世法. 近代成像技术与图像处理[M]. 北京:国防工业出版社,1997. 72—114. (Wu S F. Modern imaging technology and image disposal. Beijing: National Defense Industrial Press, 1997. 72—114)
- [4] Muelier K H. Measurement and characterization of X-ray spot size (U) [R]. M-4 Hydrodynamics, Los Alamos National Laboratory, New Mexico. 87545.
- [5] 李泉凤,杜泰斌,刘谓滨. 在电子直线加速器上获得小束斑电子束[J]. 原子能科学技术,1996,30(6):545—549. (Li Q F, Du T B, Liu W B. Getting small spot electron beam from linac. Atomic Energy Science and Technology, 1996, 30(6):545—549)
- [6] Gonzalez R C, Woods R E. 数字图像处理(第二版)[M]. 北京:电子工业出版社,2003. 463—471. (Gonzalez R C, Woods R E. Digital image disposal (2nd version). Beijing: Electronic Industrial Press, 2003. 463—471)
- [7] Greiner W, Reinhardt J. 量子电动力学[M]. 北京:北京大学出版社,2001. 139—149. (Greiner W, Reinhardt J. Quantum electricity dynamics. Beijing: Beijing University Press, 2001. 139—149)
- [8] 麦伟麟. 光学传递函数及其数理基础[M]. 北京:国防工业出版社,1979. 247—336. (Mai W L. Optic modulation transfer function and mathematic foundation. Beijing: National Defense Industrial Press, 1979. 247—336)
- [9] 庄天戈. CT原理与算法[M]. 上海:上海交通大学出版社,1992. 8—37. (Zhuang T G. The CT principle and arithmetic. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1992. 8—37)
- [10] 顾本广. 低能电子直线加速器(下)[M]. 北京:北京医疗器械研究所,1990. (Gu B G. Low energy electron linear accelerator. Beijing: Beijing Medical Instrument Institute. 1990)

Spot size measurement of new type X-ray source designed for high energy industrial CT

CHEN Hao, XU Zhou, JIN Xiao, LI Ming, SHAN Li-jun, LU He-ping, YANG Xing-fan,
DENG Ren-pei, ZHANG Zhi-fu, LIU Xi-san
(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1014, Mianyang 621900, China)

Abstract: The X-ray source based on electron accelerator is the foundation of high energy industrial CT(ICT). A new type of small spot size SW electron linac was designed with high space resolution. This paper discusses that spot size of radial source influence on the imaging quality, and analyzes the physical reason that at high energy the small hole method wasn't suit for the measurement of spot size, it also gives four kinds of measurement method for this type of high energy Xray source spot size and the analysis of the experiment results. The measurement results show that spot size of the new type accelerator X-ray source is about 1.4mm, and the limited space resolution is 2.5lp/mm.

Key words: Accelerator; Industrial CT; X-ray; Spot size; Modulation transfer function(MTF)