



·粒子束及加速器技术·

## 针孔法测量 X 光源焦斑尺寸\*

李 勤, 王 毅, 刘云龙, 祁双喜, 程晋明, 龙全红, 李天涛

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 脉冲功率科学与技术重点实验室, 四川 绵阳, 621900)

**摘 要:** 通过针孔成像法得到 X 光源强度空间分布图像, 直接读取图像数据得到 X 光源的半高宽焦斑 (FWHM) 尺寸, 对图像数据进行傅里叶变换得到调制传递函数, 并计算得到 X 光源的等效焦斑尺寸 (50%MTF)。应用针孔成像法测量多脉冲电子直线感应加速器产生的 X 光源焦斑尺寸, 测量结果表明, 加速器性能稳定。定义焦斑形状因子参数并用于描述 X 光源分布, 结果表明, 该加速器 X 光源分布在高斯分布和本涅特分布之间变化。

**关键词:** 高能 X 光焦斑; 焦斑尺寸; 针孔装置; 调制传递函数; 形状因子

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.200132

## X-ray spot size measurement with pinhole

Li Qin, Wang Yi, Liu Yunlong, Qi Shuangxi, Cheng Jinming, Long Quanhong, Li Tiantao

(Key Laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O.Box 919-106, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The high intense pulse electron beam emitted and accelerated by linear induction accelerator (LIA) is focused to heavy metal target to produce X-ray pulses via bremsstrahlung mechanism. The X-ray is applied to high energy flash radiography. The X-ray spot size is a critical parameter for LIA and the main factor which degrades resolution of the flash radiography. This paper describes a pinhole imaging system measuring the X-ray spot size. The full width at half maximum (FWHM) of the X-ray spot size can be obtained from the pinhole image data. The modulation transfer function (MTF) which is derived from the X-ray spot image by Fourier transform is applied to calculate the 50%MTF spot size. In the continuous experiments of multi-pulse electron linear induction accelerator (MPELIA), the X-ray spot size is measured and the results demonstrate reliable performance of MPELIA. The concept of form factor is introduced, and the measured results show that the MPLIA X-ray spot distribution changes between Gaussian and Bennett distribution.

**Key words:** high energy X-ray spot; spot size; pinhole; MTF; form factor

电子直线感应加速器产生的强流脉冲电子束被聚焦到一个很小的焦斑后打靶产生的韧致辐射, 主要应用于高能闪光 X 光照相。进行闪光照相时, X 光焦斑尺寸是影响闪光 X 光照相系统分辨率的主要因素, 是加速器的关键参数。高能 X 光的强穿透性和强辐射环境给焦斑测量带来一定困难。测量 X 光焦斑尺寸的方法主要有针孔法<sup>[1]</sup>、狭缝法<sup>[2]</sup>和刃边法<sup>[3-4]</sup>。针孔法是直接测量方法, 通过针孔成像获得 X 光源强度分布图像<sup>[5-6]</sup>; 狭缝法和刃边法是一种间接测量方法, 狭缝法得到 X 光源线扩展函数, 刃边法得到 X 光源边扩展函数, 边扩展函数微分后得到线扩展函数。线扩展函数通过函数变换得到点扩展函数和调制传递函数, 从而得到 X 光焦斑尺寸。针孔法可以得到 X 光源的二维分布, 狭缝法和刃边法只能得到 X 光源的一维分布。本文通过针孔成像得到高能 X 光源分布图像和焦斑尺寸。

### 1 X 光源焦斑分布和尺寸

强流脉冲电子束聚焦后与重金属靶相互作用产生 X 光。X 光在靶面的强度分布形成了具有一定大小的 X 光点光源, 用 X 光焦斑尺寸表征点光源性能, X 光焦斑尺寸是影响点光源成像系统分辨率的主要因素。X 光源可用点扩展函数 (PSF) 和线扩展函数 (LSF) 描述。点扩展函数是 X 光源在空间的强度分布, 线扩展函数是点扩展函数

\* 收稿日期: 2020-05-18; 修订日期: 2020-11-16

基金项目: 国防科技专项研究基金项目

作者简介: 李 勤 (1968—), 女, 副研究员, 主要从事电子直线感应加速器物理参数测量研究; liqin288@163.com。

的一维积分。点扩展函数可以用不同的分布函数描述,常用的分布函数有均匀分布(KV)、高斯分布(GS)和本涅特分布(BNT)等。光源调制传递函数表征 X 光源在空间频域的分布特性,对点扩展函数或线扩展函数进行傅里叶变换可以得到调制传递函数。

X 光焦斑尺寸常用的定义有两种:一种是半高宽焦斑(FWHM)尺寸定义,指 X 光源空间强度分布的半高宽,即点扩展函数的半高宽。另一种是等效焦斑(50%MTF)尺寸定义<sup>[7]</sup>,是由 X 光源的调制传递函数,得到调制度为 0.5 时的空间频率 $f_{0.5}$ ,定义均匀圆盘分布的半高宽与 $f_{0.5}$ 的关系计算得到的大小为等效焦斑尺寸。X 光焦斑尺寸与分布密切相关,表 1 给出了不同分布函数的点扩展函数及其半高宽(FWHM<sub>p</sub>)、线扩展函数及其半高宽(FWHM<sub>L</sub>)、调制传递函数以及调制度为 0.5 时的空间频率 $f_{0.5}$ 与 FWHM<sub>p</sub>的关系<sup>[8-9]</sup>。表中, $k = 2\pi f$ , $f$ 是空间频率( $\text{mm}^{-1}$ )。  $J_1(ka)$ 是一阶贝赛尔函数, $K_1(ka)$ 是一阶修正贝赛尔函数, $a$ 是各分布函数的长度参量。

表 1 不同分布的点扩展函数、线扩展函数和调制传递函数

Table 1 PSF, LSF and MTF of different distribution

distribution	PSF(x, y)	LSF(x)	MTF(k)	FWHM <sub>p</sub>	FWHM <sub>L</sub>	
KV	$\begin{cases} 1/\pi a^2; x^2 + y^2 \leq a^2 \\ 0; x^2 + y^2 > a^2 \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{2}{\pi a^2} \sqrt{a^2 - x^2}; x < a \\ 0; x \geq a \end{cases}$	$2 \frac{ J_1(ka) }{ka}$	$2a$	$\frac{0.705}{f_{0.5}}$	$\sqrt{3}a$
GS	$\frac{1}{\pi a^2} e^{-(x^2+y^2)/a^2}$	$\frac{1}{a\sqrt{\pi}} e^{-x^2/a^2}$	$e^{-k^2 a^2/4}$	$2\sqrt{\ln 2}a$	$\frac{0.441}{f_{0.5}}$	$2\sqrt{\ln 2}a$
BNT	$\frac{1}{\pi a^2} \left(1 + \frac{x^2+y^2}{a^2}\right)^{-2}$	$\frac{1}{2a} \left(1 + \frac{x^2}{a^2}\right)^{-3/2}$	$kaK_1(ka)$	$2\sqrt{\sqrt{2}-1}a$	$\frac{0.257}{f_{0.5}}$	$2\sqrt{2^{1.5}-1}a$

由表 1 可知,只有高斯分布的点扩展函数和线扩展函数的半高宽相同。当高斯分布的 X 光源等效为均匀圆盘分布时,其等效焦斑大小是半高宽焦斑的 1.6 倍,对于本涅特分布是 2.74 倍。因此,在描述焦斑尺寸时,应明确焦斑定义。

## 2 测量原理

针孔法测量 X 光焦斑尺寸应用的是小孔成像原理。当小孔装置用于 X 光源成像时,由于 X 光的强穿透性,小孔装置必须有一定厚度,才能得到明暗对比分明的图像,此时的小孔装置称为针孔或厚针孔装置。图 1 是针孔成像示意图,针孔装置厚度为  $L$ ,孔径为  $d$ , $L_s$  是物距, $L_i$  是像距。

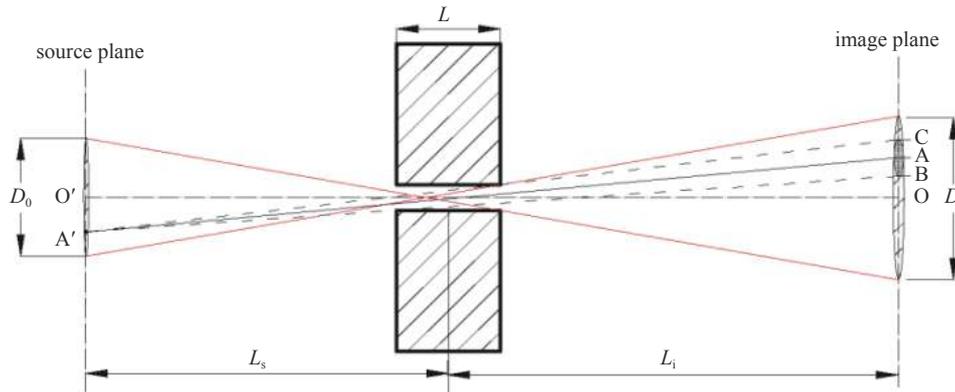


Fig. 1 Sketch of pinhole imaging setup

图 1 针孔成像示意图

应用针孔装置对 X 光源成像, X 光源轮廓为  $D_0$ , 在像平面得到图像  $D$ , 根据几何成像得到  $D$  与  $D_0$  的关系为

$$D = \frac{L_i - L/2}{L_s + L/2} D_0 + \left(1 + \frac{L_i - L/2}{L_s + L/2}\right) d \quad (1)$$

由于  $L_s \gg L$ ,  $L_i \gg L$ , 式(1)可近似为

$$D \approx \frac{L_i}{L_s} D_0 + \left(1 + \frac{L_i}{L_s}\right) d = M D_0 + (1 + M) d \quad (2)$$

式中:  $M$  是成像放大比。

按照针孔成像特性,物平面上一点在像平面上会扩散为一个圆斑,如图 1 所示,点  $A'$  在像平面上将扩散为  $BC$ , 而为了得到 X 光半高宽焦斑(FWHM)尺寸,必须知道光源内任一点在像平面的准确位置。当点扩散为一个均匀圆

斑,则认为圆斑中心为物面一点在像平面上的准确位置,由于针孔很小,可以近似认为光源内所有点在像平面为均匀扩散,所以点  $A'$  在像平面的准确位置为  $BC$  的中点  $A$ 。因此, X 光源内的  $L_{O'A'}$ , 经针孔成像后的像为  $L_{OA}$ , 按图 1 所示几何关系得到

$$L_{OA} = L_{OB} + \frac{L_{BC}}{2} = \frac{L_{OC} + L_{OB}}{2} = \left( \frac{L_i - L/2}{L_s + L/2} + \frac{L_i + L/2}{L_s - L/2} \right) \frac{L_{O'A'}}{2} + \left( \frac{L_i - L/2}{L_s + L/2} - \frac{L_i + L/2}{L_s - L/2} \right) \frac{d}{4} \approx M \cdot L_{O'A'} \quad (3)$$

如上所述, X 光源经针孔成像后,用式(2)由图像大小计算得到 X 光源轮廓大小,而由图像半高全宽尺寸计算 X 光半高宽焦斑(FWHM)尺寸,则必须按式(3)计算。在实际应用中, X 光源一般没有清晰的边界,因此也难以得到 X 光源轮廓大小。

另一方面,根据光学函数传递特性,对于一个线性系统, X 光成像系统可描述为

$$i(x, y) = o(x, y) * s(x, y) * f(x, y) \quad (4)$$

式中:  $i(x, y)$  是结果图像,即 X 光对物体所成的像;  $o(x, y)$  是物体传递特性;  $f(x, y)$  是图像接收系统模糊函数;  $s(x, y)$  是 X 光源点扩展函数。式(4)经傅里叶变换可得

$$I(f) = O(f) \cdot S(f) \cdot F(f) \quad (5)$$

式中:  $I(f)$ ,  $O(f)$  分别是结果图像和物体传递特性的傅里叶变换;  $S(f)$ ,  $F(f)$  分别是 X 光源点扩展函数和图像接收系统模糊的傅里叶变换,即光源和接收系统的调制传递函数。针孔装置的传递特性近似为  $\delta$  函数,则  $O(f) \approx 1$ , 于是式(5)为

$$S(f) = I(f)/F(f) \quad (6)$$

由式(6)可知,只要知道图像接收系统调制传递函数,通过针孔成像能得到 X 光源调制传递函数,按表 1 均匀分布的半高全宽  $\text{FWHM}_p$  与  $f_{0.5}$  的关系计算得到 X 光源的等效焦斑(50%MTF)尺寸。

### 3 实验测量及结果

应用针孔成像法测量多脉冲电子直线感应加速器(MPELIA)产生的 X 光源焦斑尺寸。MPELIA 在同一轴线上产生 Pulse A、Pulse B、Pulse C 三个电子能量约为 18 MeV、束流约为 2 kA、脉冲宽度(FWHM)几十 ns、脉冲间隔几百 ns 的强流电子束,电子束聚焦后与重金属相互作用产生 X 光,用于闪光 X 光照相。按图 1 所示进行实验布局,在 X 光行程上布置针孔装置, X 光源经针孔成像后由图像接收系统记录。图像接收系统由闪烁晶体转换屏和高速分幅相机构成。

首先采用刃边法测量图像接收系统模糊。将刃边装置紧贴 X 光转换屏,得到半亮半黑模糊像,读取图像数据得到接收系统边扩展函数(ESF)并微分得到线扩展函数(LSF),进行傅里叶变换得到接收系统调制传递函数(MTF)。该调制传递函数可用于定量描述接收系统模糊,同时在 X 光焦斑尺寸测量中用于扣除接收系统模糊。测量结果如图 2 所示,其中图 2(a)是接收系统边扩展函数和线扩展函数,图 2(b)是接收系统调制传递函数,以及  $f_{0.5}$  同时的高斯分布、本涅特分布的调制传递函数。

采用针孔法测量 X 光焦斑尺寸。针孔装置由重金属材料钨加工而成,厚度  $L=65$  mm、孔径  $d=0.47$  mm。通

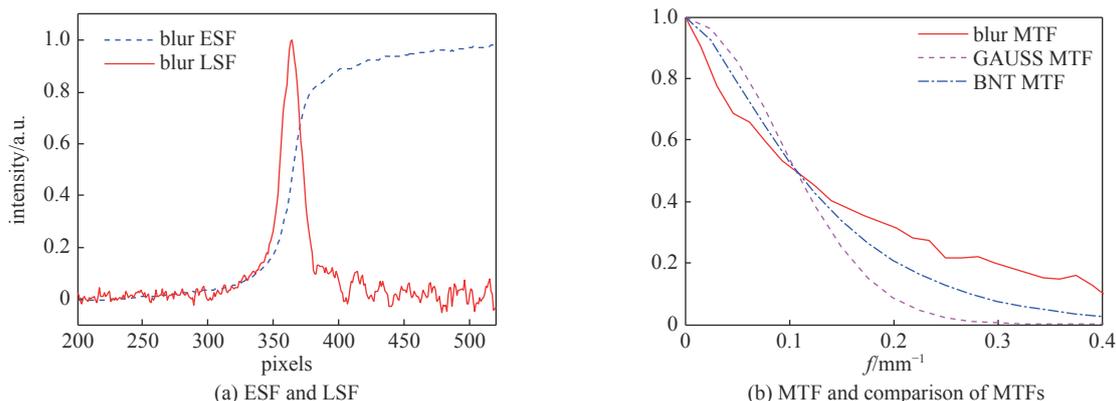


Fig. 2 Blurring of X-ray camera

图 2 X 光图像接收系统模糊

过针孔成像获得 X 光源空间强度分布图像,对强度分布进行归一化,读取强度为 0.5 的等高线,计算此等高线范围内所有像素点的质心位置,视其为焦斑中心,在圆周方向每隔 5° 读取焦斑直径,计算其均方根值,结果为焦斑图像 FWHM 大小,再按式(3)计算得到半高宽焦斑尺寸。图 3 是 No.525 实验获得的 X 光源图像。

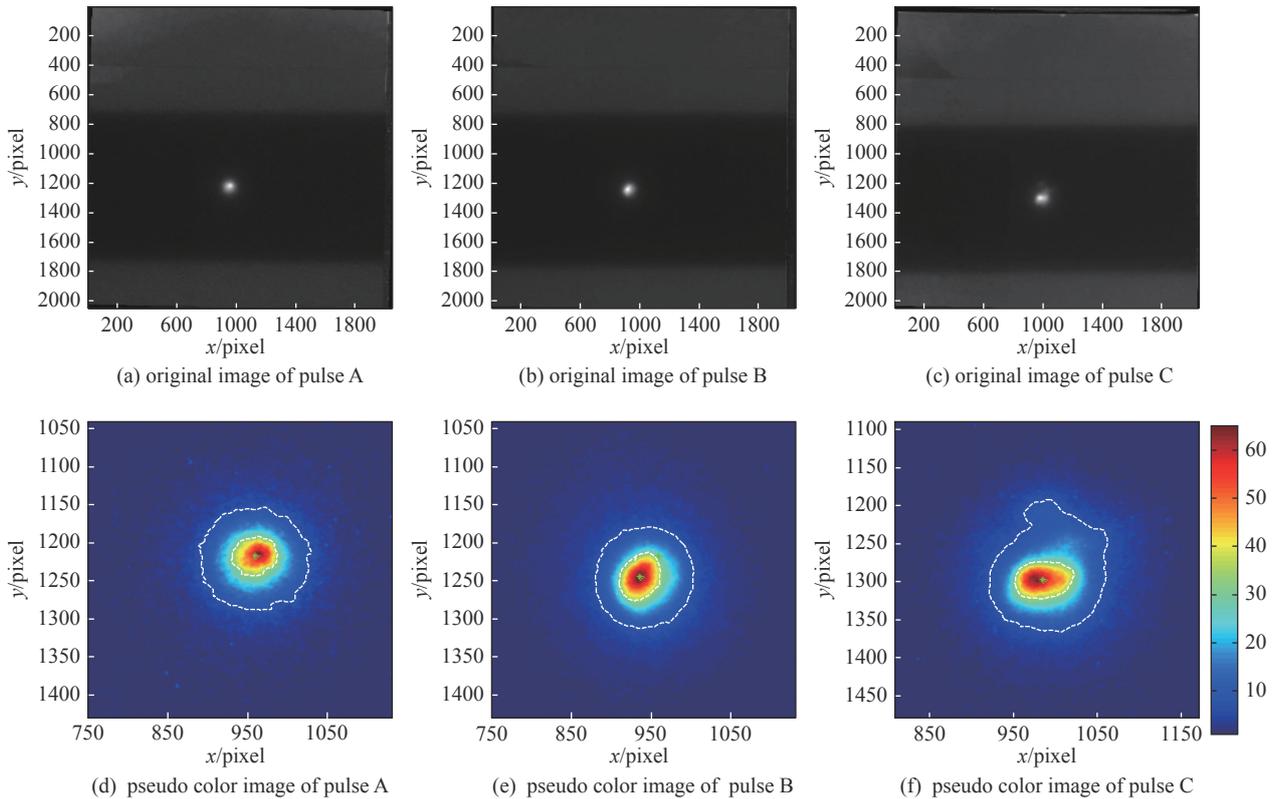
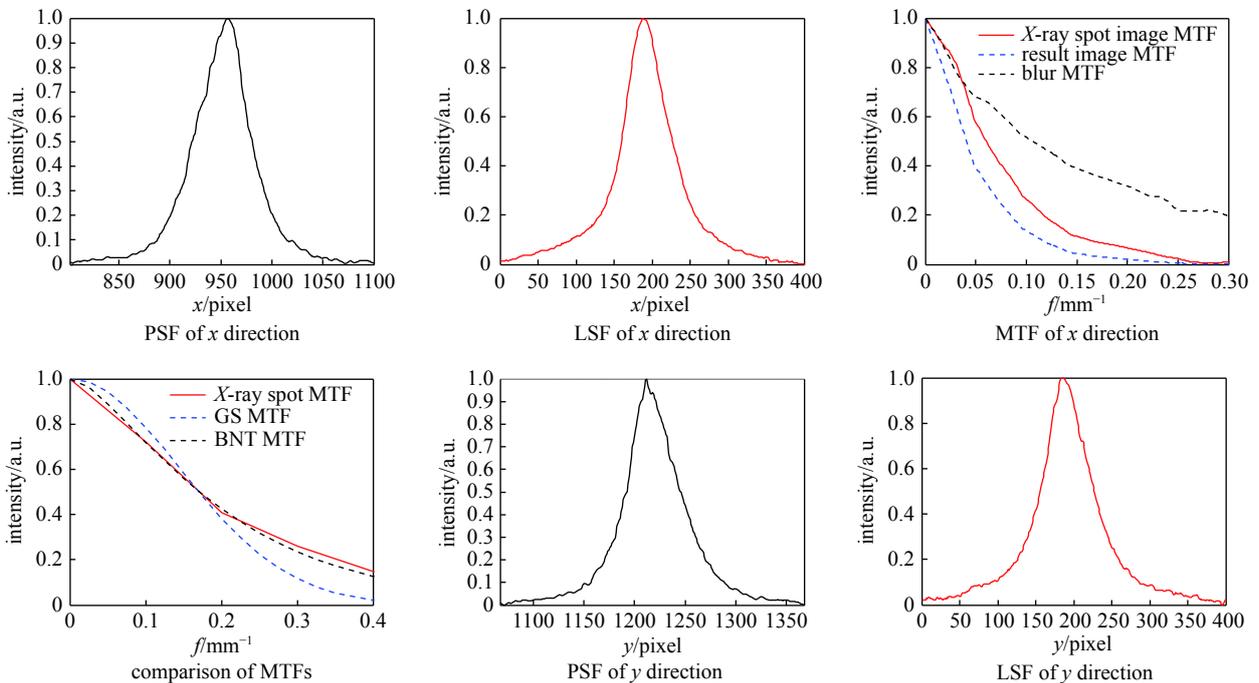
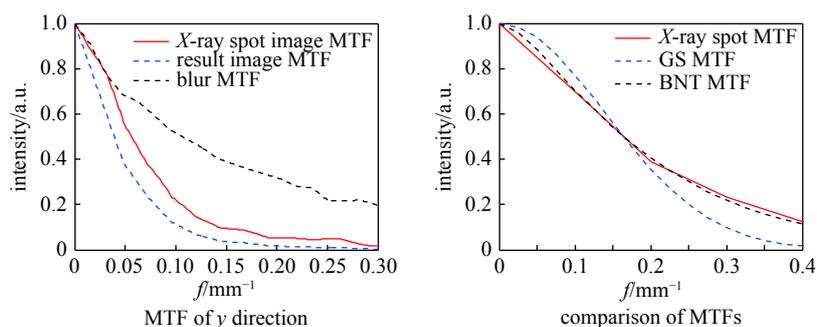


Fig. 3 Images of X-ray spot by pinhole method

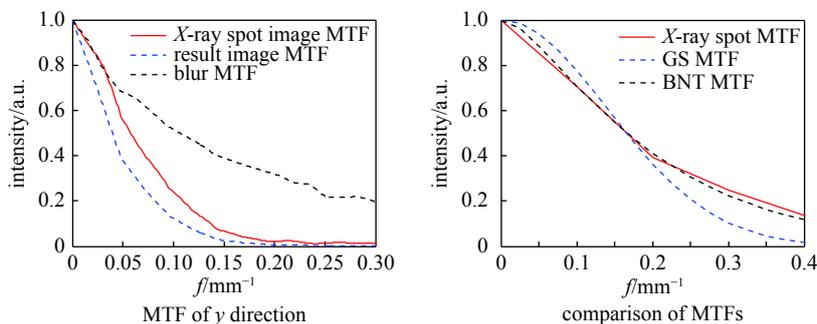
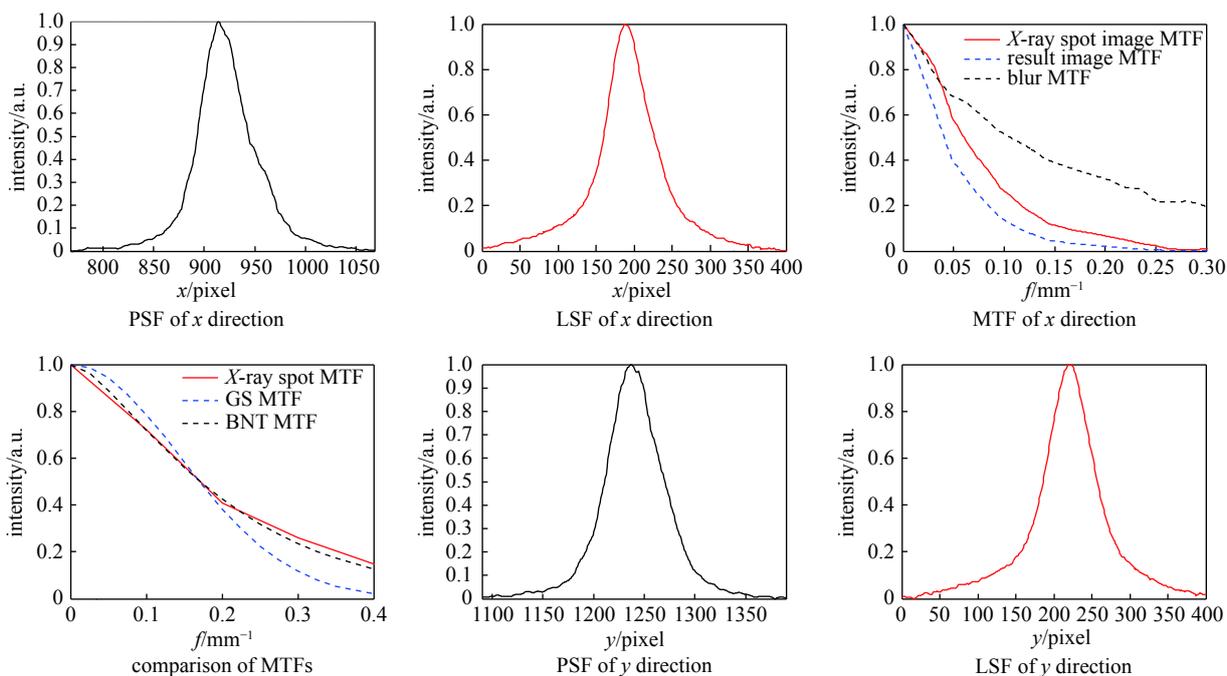
图 3 针孔成像法获得的 X 光焦斑图像

将针孔成像获得的 X 光源图像即点扩展函数积分得到线扩展函数,进行傅里叶变换得到焦斑图像的调制传递函数,按式(6)扣除接收系统模糊后得到 X 光源调制传递函数并计算得到 X 光源的等效焦斑(50%MTF)尺寸。图 4 是对 No.525 实验的 X 光源图像处理得到的 x 方向和 y 方向的点扩展函数、线扩展函数、调制传递函数以及

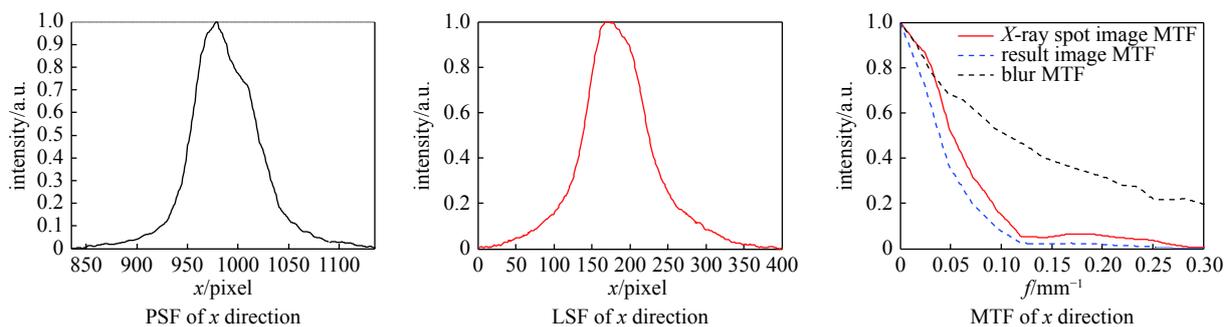




(a) pulse A



(b) pulse B



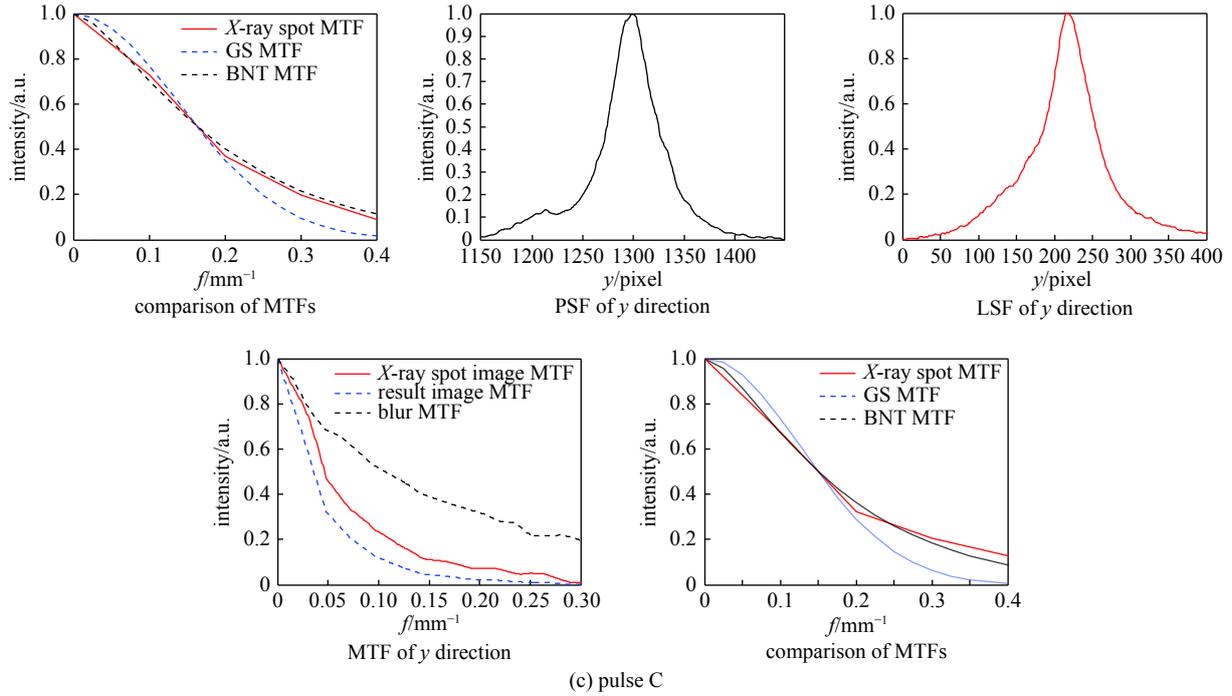


Fig. 4 PSF, LSF and MTF of X-ray spot

图 4 X 光源 PSF、LSF、MTF 曲线(No.525)

$f_{0.5}$  相同时的光源调制传递函数与高斯分布、本涅特分布的调制传递函数的比较。

表 2(其中:  $E_e$  是电子能量,  $I_e$  是电子束流强度)是 MPELIA 进行 5 次实验,应用针孔成像法测量得到的 X 光焦

表 2 MPELIA X 光焦斑尺寸测量结果

Table 2 X-ray spot size measurement results of MPELIA

No.	$E_e$ / MeV	$I_e$ / kA	FWHM size/ mm	std of FWHM/ mm	direction	FWHM <sub>xy</sub> size/ mm	result image $f_{10.5}/(\text{mm}\cdot\text{lp}^{-1})$	X-ray spot $f_{50.5}/(\text{mm}\cdot\text{lp}^{-1})$	50%MTF size/mm
516A	19.0	2.03	1.18	0.08	x	1.33	0.0380	0.0511	3.18
					y	1.11	0.0402	0.0575	2.83
516B	19.0	2.06	1.44	0.22	x	1.71	0.0389	0.0527	3.09
					y	1.18	0.0418	0.0619	2.63
516C	18.9	2.04	1.24	0.10	x	1.12	0.0371	0.0494	3.29
					y	1.29	0.0319	0.0418	2.89
518A	19.0	2.02	1.33	0.07	x	1.34	0.0405	0.0579	2.81
					y	1.40	0.0392	0.0566	2.88
518B	19.0	2.04	1.33	0.11	x	1.18	0.0408	0.0620	2.62
					y	1.44	0.0366	0.0492	3.30
518C	19.0	2.06	1.50	0.23	x	1.43	0.0369	0.0496	3.28
					y	1.66	0.0286	0.0365	4.45
523A	18.9	2.04	1.32	0.06	x	1.38	0.0424	0.0617	2.73
					y	1.39	0.0428	0.0630	2.68
523B	18.9	1.98	1.35	0.10	x	1.24	0.0403	0.0607	2.78
					y	1.45	0.0374	0.0503	3.35
523C	18.8	2.07	1.45	0.25	x	1.27	0.0404	0.0567	2.97
					y	1.58	0.0327	0.0414	4.07
524A	19.0	2.03	1.26	0.08	x	1.27	0.0415	0.0589	2.86
					y	1.20	0.0414	0.0594	2.83
524B	18.8	2.04	1.36	0.10	x	1.27	0.0405	0.0603	2.79
					y	1.52	0.0402	0.0579	2.91
524C	18.7	2.08	1.40	0.15	x	1.51	0.0393	0.0526	3.20
					y	1.22	0.0356	0.0458	3.68
525A	19.0	2.05	1.32	0.06	x	1.47	0.0419	0.0597	2.82
					y	1.32	0.0412	0.0594	2.84
525B	19.0	2.08	1.41	0.13	x	1.26	0.0414	0.0614	2.74
					y	1.48	0.0410	0.0600	2.81
525C	18.9	2.09	1.49	0.19	x	1.67	0.0399	0.0533	3.16
					y	1.26	0.0364	0.0469	3.59

斑尺寸,其中 No.516 和 No.518 的成像放大比  $M=4.336$ ,其它三次的  $M=4.183$ 。针孔成像结果表明 MPELIA 产生的 X 光源分布不是旋转对称的,焦斑尺寸随实验变化,同一发实验 Pulse A、Pulse B、Pulse C 三个脉冲的焦斑也有差异,这是由 X 光源的产生机理所决定。在强流电子直线感应加速器中,影响 X 光焦斑尺寸的因素较多,主要有电子初始发射状态、电子能量、电子束流强度、电子束能散度、发射度、聚集磁场强度、靶材状态等,因此,焦斑测量结果真实可信。另外,实验结果表明,MPELIA 性能稳定。

#### 4 焦斑形状因子

在闪光 X 光照相系统中,X 光焦斑尺寸和分布是影响图像分辨率的主要因素。由表 1 公式可以看出,对于一种确定分布,其点扩展函数半高宽 FWHM 和 50%MTF 大小的比值是确定的,为了描述 X 光源分布特性,我们定义 X 光源的等效焦斑(50%MTF)和半高宽焦斑(FWHM)尺寸的比值为焦斑形状因子,用参数  $C$  表述,即

$$C = \delta_{50\%MTF} / \delta_{FWHM} \quad (7)$$

式中: $\delta_{50\%MTF}$ 为等效焦斑, $\delta_{FWHM}$ 为半高宽焦斑。计算实验测量结果得到 MPELIA 的 X 光源的焦斑形状因子,如表 3 所示。

表 3 MPELIA X 光源焦斑形状因子  
Table 3 X-ray spot form factor of MPELIA

No.	FWHM <sub>x</sub> /mm	FWHM <sub>y</sub> /mm	50%MTF <sub>x</sub> /mm	50%MTF <sub>y</sub> /mm	C <sub>x</sub>	C <sub>y</sub>
516A	1.33	1.11	3.18	2.83	2.39	2.55
516B	1.71	1.18	3.09	2.63	1.81	2.23
516C	1.12	1.29	3.29	2.89	2.94	2.24
518A	1.34	1.40	2.81	2.88	2.10	2.06
518B	1.18	1.44	2.62	3.30	2.22	2.29
518C	1.43	1.66	3.28	4.45	2.29	2.68
523A	1.38	1.39	2.73	2.68	1.98	1.93
523B	1.24	1.45	2.78	3.35	2.24	2.31
523C	1.27	1.58	2.97	4.07	2.34	2.58
524A	1.27	1.20	2.86	2.83	2.25	2.36
524B	1.27	1.52	2.79	2.91	2.20	1.91
524C	1.51	1.22	3.20	3.68	2.12	3.02
525A	1.47	1.32	2.82	2.84	1.92	2.15
525B	1.26	1.48	2.74	2.81	2.17	1.90
525C	1.67	1.26	3.16	3.59	1.89	2.85

由表 1 可知,高斯分布的形状因子为 1.6,本涅特分布为 2.74。表 3 结果表明,MPELIA 产生的 X 光源分布在高斯分布和本涅特分布之间变化。形状因子参数的提出为 X 光源性能确定增加了一个定量参数,与 X 光源焦斑尺寸、剂量、能谱等参数结合,能更全面地反映 X 光源特性。

#### 5 结 论

采用针孔法测量多脉冲强流电子直线感应加速器 X 光焦斑尺寸,通过针孔成像得到 X 光源图像,直接读取图像数据得到 X 光半高宽焦斑尺寸。对图像数据进行傅里叶变换得到调制传递函数,可以计算得到 X 光等效焦斑尺寸。实验测量了多脉冲电子直线感应加速器(MPELIA)产生的 X 光源焦斑尺寸,测量结果表明,其性能稳定。在点光源成像系统中,图像分辨水平不仅与 X 光焦斑大小密切相关,还与 X 光焦斑分布有关。本文提出的焦斑形状因子参数,可用于描述 X 光分布,是描述 X 光性能参数的有益补充。应用针孔法测量 MPELIA 的 X 光焦斑大小时,在读取 FWHM 焦斑尺寸时,未考虑图像接收系统模糊的影响,而等效焦斑尺寸处理结果表明图像接收系统模糊对测量结果有一定影响,因此,还需分析图像接收系统模糊对 X 光半高宽焦斑尺寸测量结果的影响,在数据处理过程中对图像接收系统模糊进行补偿,以改进系统的测量精度和分辨率。

#### 参考文献:

- [1] 宋顾周,朱宏权,韩长材,等.杆箍缩二极管X射线焦斑的成像法测量[J].强激光与粒子束,2011,23(2):531-535. (Song Guzhou, Zhu Hongquan, Han Changcai, et al. Imaging measurement of X-ray spot of rod-pinch diode radiographic source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(2): 531-535)
- [2] 李勤,石金水,禹海军,等.狭缝法测量X射线斑点大小[J].强激光与粒子束,2006,18(10):1691-1694. (Li Qin, Shi Jinshui, Yu Haijun, et al. Slit X-ray spot

- size measurement technique[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(10): 1691-1694)
- [3] Richardson R A, Houck T L. Roll bar X-ray spot size measurement technique[C]//*Proceedings of the Nineteenth International Linac Conference*. 1998: 908-910.
- [4] 李勤, 王毅, 李成刚, 等. 滚边法测量高能X射线源焦斑大小[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 045106. (Li Qin, Wang Yi, Li Chenggang, et al. High energy X-ray spot size measurement with rollbar[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 045106)
- [5] Stephen M M. A pinhole for producing a close-in image of an extended 14-MeV neutron source[R]. UCRL-51860, 1975.
- [6] Wilson D C, Christensen C R, et al. Goals for and design of a neutron pinhole imaging system for ignition capsules[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(3): 1705-1708.
- [7] Muller K H. Measurement and characterization of X-ray spot size[R]. LA-OR-89-1886, 1989.
- [8] 施将君. 闪光照相光源尺寸和分布特性的确定[J]. *爆轰波与冲击波*, 1997(4): 17-23. (Shi Jiangjun. The study of radiographic X-ray size and its distribution[J]. *Detonation and Shock Waves*, 1997(4): 17-23)
- [9] Ekdahl C. Characterizing flash-radiography source spots[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(12): 2501-2509.