

# 厚针孔成像动态监测高能加速器束斑系统\*

吴刚<sup>1;1)</sup> 李泉凤<sup>1;2)</sup> 程诚<sup>1</sup> 杜泰斌<sup>1</sup> 黑东炜<sup>2</sup> 罗剑辉<sup>2</sup>

1(清华大学工程物理系 北京 100084)

2(西北核技术研究所 西安 710024)

**摘要** 为了方便地测量封有内靶的高能电子加速器束斑,采用了一种基于厚针孔成像技术的动态监测系统. 本文给出了采用该系统在 15MeV 电子直线加速器束流打靶后的束斑测试结果,并简要介绍了成像原理和处理办法. 通常的“三明治”方法需要冲洗 X 光胶片,整机调试时更要多次冲洗,效率较低. 与之相比厚针孔成像方法可以实时成像,配合调机及时观察束斑的变化情况,使加速器参数调整有的放矢,提高了调机效率.

**关键词** 电子加速器 X 射线 厚针孔成像 靶面束斑 点扩散函数

## 1 引言

对无损检测系统用加速器而言,出口束斑的形状和大小对成像清晰度和分辨率有很大影响. 理想的状况是束斑成为点源,因此要求束斑尺寸尽量小.

无损检测用电子直线加速器采用内靶,只能从出射的 X 射线测量束斑(“焦点”)大小. 常用的测量方法是缝隙法,俗称“三明治”法<sup>[1]</sup>:利用 0.18mm 厚铜箔和 0.15mm 厚聚酯薄膜相间叠片平行地堆放在一起,用钢板夹紧. 在暗盒中装有 X 光胶片,利用 X 光透射过“三明治”拍片测试,由于它可以穿透聚酯薄膜而不能穿透足够长的铜箔,胶片上将产生均匀间隔的条纹,数出条纹数可换算相应方向的焦点尺寸. 在对加速器进行调试时,系统参数改变一个值就要测量一次,并且要冲洗 X 光胶片. 而且当束流剂量率很强时,该方法将不再适用(见后文).

光学系统中测量光源尺寸最简单的方法是小孔成像. 在惯性约束聚变和核医学诊断中多是采用薄

针孔成像及由其发展而来的编码孔成像. 但对于高能 X 射线,散射效应和小孔边缘效应严重,一般的小孔成像法不适用.

文献[2]采用一种用厚狭缝对束流成像的方法,原理与光学小孔成像类似,图像仍用 X 光胶片记录,得到的长条纹像将给出束流在垂直于狭缝方向的尺寸.

本文介绍了一种采用射线厚针孔成像技术的实时监测系统,可替代胶片拍摄且能边调试边观察束斑大小和形状,因而能提高加速器性能调试的工作效率.

## 2 原理与装置<sup>3)</sup>

厚针孔成像利用光学成像原理,但也有独特之处,下面简要介绍.

可见光的小孔成像原理如图 1 所示.

点光源发出的光线通过直径为  $d$  的小孔后在

2004-05-18 收稿

\* 国家自然科学基金(10135040)资助

1) E-mail: wugang00@mails.tsinghua.edu.cn

2) E-mail: liquanfeng@mail.tsinghua.edu.cn

3) 倪源兴. 脉冲射线测量和诊断技术(内部). 西安:西北核技术研究所,1997:316—330.

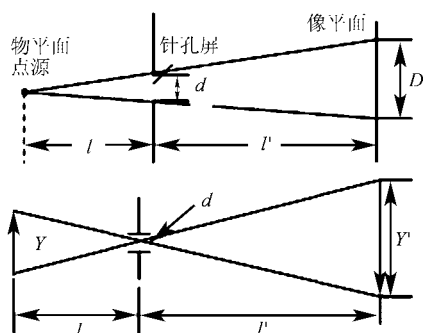


图 1 可见光小孔成像

像面上形成一个直径为  $D = d(1 + l'/l)$  的小光斑. 当小孔足够小时, 像平面上于物体各点对应的小光斑互不重叠, 这些小光斑的集合便构成物体的一个倒立实像. 像的放大倍数为

$$M = Y'/Y = l'/l. \quad (1)$$

小孔成像与透镜成像相比较, 其优点是几何畸变小, 景深大, 视场大; 缺点是有限的空间分辨和极小的能量孔径.

射线针孔成像的基本原理类似于可见光小孔成像. 射线对物质有一定的穿透能力, 因而只有足够厚度的针孔才能在像平面上形成具有一定对比度的射线源图像. 在像平面上的快速射线-光图像转换器将之转换成可见的荧光图像, 用 CCD 摄像机拍摄采集后可传输至显示器或计算机处理. 为了使图像转换器及前端电子设备避开射线辐照损伤, 采用了反射镜折转光路. 射线厚针孔成像原理图如图 2 所示.

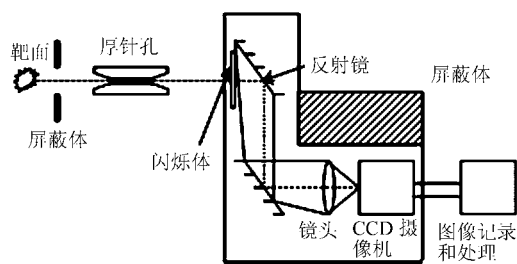


图 2 束斑动态监测系统

图像送至加速器调试间的计算机, 经专门标定和刻度, 可以反映加速器靶面束斑的形状和强度分布. 由于系统采用摄像机拍摄监测图像, 可以随加速器参数的调整实时反应束斑变化, 从而大大提高加速器性能调试的工作效率.

### 3 计算模型

由于小孔屏的不透明性, 可见光的小孔成像得到物体的放大率为  $M = l'/l$  的倒立实像, 像平面上的图像直接反映了物体发光强度分布.

射线针孔成像与可见光小孔成像相比, 存在 3 种特殊的效应: 穿透效应、散射效应和管道效应. 像面上的射线强度分布可以表示为

$$I_{\text{像面}} = I_{\text{直穿}} + I_{\text{穿透}} + I_{\text{散射}}, \quad (2)$$

$I_{\text{直穿}}$  为来自源物体的射线直接通过针孔在像面上产生的剂量率, 由它造成的像面强度分布与可见光成像效果一致;  $I_{\text{穿透}}$  为穿越针孔材料到达像面的射线剂量率;  $I_{\text{散射}}$  为经针孔材料散射而到达像面的射线剂量率. 这 3 种效应的存在使得厚针孔成像的空间分辨、物面视场的计算、像物换算关系变得复杂<sup>[3]</sup>.

由(2)式可知像面射线强度分布满足线性叠加关系, 厚针孔成像系统可以看作一个线性系统, 采用数字信号处理的思路, 设成像系统的传递函数为  $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}'')$ , 物面射线强度分布为  $f(\mathbf{r})$ , 则像面射线强度分布为

$$h(\mathbf{r}'') = \iint f(\mathbf{r}) g(\mathbf{r}, \mathbf{r}'') d\mathbf{r}. \quad (3)$$

将物面和像面区域离散化进行数字编码, 从而将方程离散化, (3)式积分采用最简单和式表示, 在  $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}'')$  已求出的情况下就可以根据成像即  $h(\mathbf{r}'')$ , 通过适当变换后, 作反演运算可得出感兴趣的物面射线强度分布  $f(\mathbf{r})$  (即靶面束斑截面).

定义物面上单位强度的各向同性的射线点源在像面上产生的射线剂量率随空间的分布为厚针孔成像系统的点扩散函数 (PSF, 为系统传递函数). 在厚针孔材料、孔径、厚度等参数已知的情况下, 利用专门编制的计算机程序, 可以计算出成像系统的 PSF 及其随空间的分布<sup>[3]</sup>. 利用各点的点扩散函数和像面分布, 设计一定的迭代反演算法可以求出源区 (靶面) 分布<sup>[1]</sup>.

通常, 电子加速器的靶面束斑强度分布近似于高斯分布, 我们关心的往往只是束斑截面直径这一个主要物理量, 在对精度要求不很高时, 不需要通过反演得到完整的物像, 而可以在进行一定的简化后直接推算出这一参数. 假定靶面束斑强度为高斯分布, 在经过厚针孔成像后, 除了因小孔几何成像 (直

1) 李宏云等. 试验与研究 (内部), 西北核技术研究所, 2003, 26(3): 60-67

穿效应)放大  $M = l'/l$  外,还有穿透和散射效应造成的展宽. 针孔点扩散函数也用高斯函数近似,半高宽取为  $\delta = d(1 + M)$ , 设测得图像上圆斑直径为  $d_1$ , 则以高斯分布半宽度表示的靶面束斑直径可表示为

$$D_1 = \sqrt{d_1^2 - \delta^2} / M. \quad (4)$$

在实际调机时要求出口束斑截面尽量小, 即  $D_1$  要小, 反映在计算机获取图样上即图像直径  $d_1$  最小时加速器参数最为理想. 由于能够实时成像, 可以在调试中直接观察图样来判断.

## 4 实验测试

### 4.1 实验与结果

为检验系统实际使用效果, 在一台无损检测用 15MeV 驻波电子直线加速器上进行了实验. 此加速器要求束斑直径小于 2mm. 利用“三明治”法测量, 结果为 3.2—3.5mm, 有必要重新调整加速器相应的参数. 现利用厚针孔成像系统进行动态监测, 实时观察调试结果并给出束斑尺寸, 使得调试有的放矢.

成像用厚针孔采用钨合金用专门工艺加工, 直孔段孔径为  $d = 0.5\text{mm}$ , 长度约 400mm, 两端锥孔段长约 300mm, 锥度约 400:1. 靶面距离针孔前端面为 1m 时可以成像的直径大于 3mm (考虑视场限制, 针孔离靶太近成像范围小, 不能对全部束斑成像, 太远像面剂量率降低影响图像对比度).

实验中, 靶面到针孔中心距离  $l = 139.6\text{mm}$ , 闪烁体到针孔中心距离为  $l' = 148.6\text{mm}$ , 几何成像放大倍数  $M = 1.06$ . 某加速器参数下, CCD 采集的束斑像输送至计算机得到图 3 所示图像. 图中黑白杂乱处是本底和噪声图像, 中间大圆斑是光阑的像, 小圆斑则是束靶斑成像. 经滤波去噪和本底消除后, 可提取出靶面束斑在闪烁体上成的像, 如图 4 所示. 也可以直接根据图 1 的强度分布(二维)判断束斑在两个垂直方向以像素个数表示的尺寸大小. 光阑几何尺寸已知, 可用于定标, 据此给出图上一个像素对应的物理尺寸, 这样就得到图中亮斑的物理尺寸.

已知光阑直径为 15mm, 对图像文件进行数据处理, 光阑图像直径为 158 点像素, 取中心亮斑最大灰度的 10% 为阈值, 以灰度值大于阈值的像素点数作为面积由此给出束斑直径用像素表示为 28 点, 可算出圆斑图像直径为  $d_1 = 15 \times 28 / 158 = 2.66\text{mm}$ .

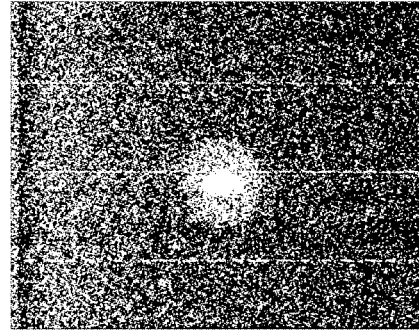


图 3 计算机采集到的束斑像

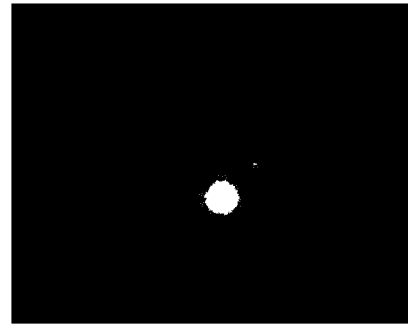


图 4 滤波去噪后的束斑像

$\delta = d(1 + M) = 1.03\text{mm}$ , 以高斯分布半宽度表示的靶面束斑直径为

$$D_1 = \sqrt{d_1^2 - \delta^2} / M = 2.31\text{mm}. \quad (5)$$

$d_1 - D_1 = 0.35\text{mm}$ , 因几何放大倍数  $M$  约为 1, 此值是射线穿透针孔材料及散射效应造成的展宽.

严格来说还需要考虑闪烁体的荧光弥散效应. 对射线的点入射, 闪烁体上形成的是有限尺寸的荧光弥散斑, 因此还要考虑闪烁体的点扩散函数造成的图像展宽. 记其半高宽为  $\Delta r$  (跟射线能量、种类及闪烁体材料、厚度有关),  $D_1$  应表示为

$$D_1 = \sqrt{[d_1^2 - (\Delta r)^2] - \delta^2} / M. \quad (6)$$

由于针孔的管道效应, 偏离轴线处点源的点扩散函数半高宽要比轴线处的小, 因此针孔系统的扩散函数半高宽实际值  $\delta' < d(1 + M) = \delta$ , 记  $\Delta r$  上限为  $\Delta r_{\max}$ , 则  $D_1$  的下限可由下式给出:

$$D_{1d} = \sqrt{[d_1^2 - (\Delta r_{\max})^2] - \delta^2} / M, \quad (7)$$

选用薄的闪烁体,  $\Delta r$  可减小到 0.5mm 以下, 对结果的影响很小.

$$D_{1d} \approx D_1 = 2.31\text{mm}, \quad (8)$$

不计针孔和闪烁体造成的非几何发散, 只考虑几何放大,  $D_1$  的上限可估计为

$$D_{1u} = d_1/M = 2.58\text{mm}. \quad (9)$$

针孔系统中源区各点的点扩散函数各不相同,实际上只有轴线处点源的扩散函数能表示为高斯分布,而且因为射线穿透效应其半高宽也略大于 $\delta = d(1 + M)$ .更准确的计算需要用离散的点扩散函数和像面分布重建出源区即靶面的二维分布,选取恰当的反演算法可以校正管道因子并降低噪声、对心偏差和针孔直径偏差等的影响<sup>[4]</sup>.

实验中要注意的问题:

(1)闪烁体及整个摄像系统对环境中的射线要严格屏蔽,尤其在探伤扫描的厂房中,空间存在的射线不仅影响成像质量而且损伤元件.实际操作中采用的方法是在这部分装置周围堆放厚厚一层的铅砖,屏蔽效果较好.

(2)CCD摄像头等半导体器件抗辐照性较差,在高强度射线条件下工作极易受到损伤,屏蔽不好时要注意更换.

(3)厚针孔准直调节,以保证厚针孔中心轴线与物、像平面中心重合.

#### 4.2 不同测试方法比较

“三明治”法除了测量效率低,还受到射线剂量率的限制.这台15MeV加速器产生的X射线能量高,最低剂量率为30Gy/min,“三明治”法测量时很容易过分“曝光”,把胶片全部打黑,不能通过数条纹来读数.实际操作时只能搁置好胶片,开机出束后

又迅速关掉,冲洗出胶片后用黑度计判别束斑强度分布半高宽,但这样就不能测出整机稳态运行时的束流参数.

对于厚针孔成像,剂量率大则并无太大影响,但如果太小,需要在摄像机前装置图像增强器.它的优点在于,可以对加速器束斑进行实时成像,有利于动态调节工作参数使束流合乎要求,能提高整机调试效率.但用于实际测量,要快捷地给出较精确地给出测量结果还需要在数字图像处理和图像恢复的反演运算上进一步研究,编制专门的计算程序.

## 5 结束语

在无损伤检测用加速器的调试过程中,采用厚针孔成像的方法,在计算机上实时获取了加速器靶斑的图像,并根据靶斑图像动态调试加速器的工作参数,从而提高了加速器整机调试的效率.通过对束斑图像的采集和保存,取得了原始数据和图片文件,并在随后对实验数据的处理和计算中得到了加速器束斑直径为2.31mm.

射线厚针孔成像技术在诊断核辐射源空间信息方面发挥了重要作用,在脉冲反应堆、磁约束和惯性约束聚变、强流加速器等研究工作中应用广泛.这里尝试将它应用于微焦点无损检测用加速器的调试,提高了工作效率,取得了良好的实验效果.关于实验数据的后续处理方面,还有待开发专用的配套程序,以简化处理过程.

## 参考文献 (References)

- 1 CHENG Cheng et al. Electron Linear Accelerator Instruments for Container Examination. Beijing: Engineering Physics Department of Tsinghua University, 2000, 51(in Chinese)  
(程诚等.集装箱检查用电子直线加速器装置.北京:清华大学工程物理系,2000,51)
- 2 CHEN Hao, XU Zhou, JIN Xiao et al. High Power Laser and Particle Beams., 2004, 16(3):390—394(in Chinese)  
(陈浩,许州,金晓等.强激光与粒子束,2004,16(3):390—394)
- 3 Durrant P T, Dallimore M et al. Nucl. Instrum. Methods in Physics Research., 1999, A422(3):667—671
- 4 Wannoo Lee, Gyuseong Cho. Annals of Nuclear Energy, 2002, 29(17): 2029—2040

## A Real-Time System for Measuring Beam Spot Size of High Energy Accelerator Using Thick Pinhole Imaging<sup>\*</sup>

WU Gang<sup>1;1)</sup> LI Quan-Feng<sup>1;2)</sup> CHENG Cheng<sup>1</sup> DU Tai-Bin<sup>1</sup>  
HEI Dong-Wei<sup>2</sup> LUO Jian-Hui<sup>2</sup>

1 (Department Of Engineer Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2 (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract** In order to easily measure the beam spot size of high energy electron accelerators with internal target enclosed, a real-time system, based on thick pinhole imaging technique, is employed. The experimental result on a 15MeV electron linear accelerator is also presented. In this paper the principle of thick pinhole imaging and the processing of data are introduced. The usual “sandwich” method needs to develop X-ray films, while debugging the accelerator parameters it will take a lot of time. On the contrary, X-ray pinhole imaging method can make a real-time measuring; as the accelerator parameters change, we can observe the beam profile's variation on the computer screen. Then when debugging we can have a definite object in view, and adjust the accelerator parameters more efficiently.

**Key words** electron accelerator, X-ray, thick pinhole imaging, beam spot, point spread function

---

Received 18 May 2004

<sup>\*</sup> Supported by NSFC(10135040)

1) E-mail: wugang00@mails.tsinghua.edu.cn

2) E-mail: liquanfeng@mail.tsinghua.edu.cn