

CNIC-01342

IAE-0190

宽量程发射度自动测量装置*

潘雨力 王国保 刘波 曾自强 王淑贤 史秀珍 杨真媛

(中国原子能科学研究院, 北京, 102413)

摘 要

该自动测量装置是根据原子能科学研究院自由电子激光 (FEL) 装置对电子束发射度测量的特殊要求而设计的, 该装置采用单孔取样, 用微机、步进电机和光栅尺组成闭环控制, 监控采样步长, 使取样孔从束剖面径向走过并在预定处取样, 避免了普通孔像法在荧光靶上产生的像斑迭加现象, 即便束径小到 $\phi 2.5 \text{ mm}$ 也能进行分析处理; 通过设计专门的电路, 实现了图像数据的抓取与脉冲电子束团的同步, 减小了随机抓图带来的测量误差。在结构设计上, 采用带滑键的外部轴向定位, 避免了传动部分在运行过程中出现卡死的隐患; 金属靶板上还带有水冷结构, 使得该系统可承受较大的功率。在实验中还对取样孔基板厚度引起使得电子散射的“管道效应”进行了研究, 证明了该装置对于 4 MeV 的电子束发射度测量的有效性。该测量系统在当前配置 ($L = 630 \text{ mm}$, 采样孔与荧光靶间距) 下相图测量的范围是: $(0.006 \sim 0.1) \text{ cm} \cdot \text{rad}$, 可分析的最小束径为: $\phi 2.5 \text{ mm}$, 金属靶板上取样孔的定位误差为: $\pm 0.02 \text{ mm}$, 系统的角分辨率为: 1.6 mrad 。

* 此项目获 863 强激光青年科学基金 (93-4) 及核工业科学基金 (J95D01056) 的支持

Wide Range Automatic Emittance Measurement System

(In Chinese)

PAN Yuli WANG Guobao LIU Bo ZENG Ziqiang
WANG Sbuxian SHI Xiuzhen YANG Zhenyuan
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

ABSTRACT

The presented system can process the high current pulsed electron beam of small diameter. The apparatus adopts a single hole to pick the data when the hole passes along the diameter of the electron beam. The PC, step motor, optic grate and image processing system consist of a close loop controls, which controls the sampling interval and makes the hole sample at a predetermined site. By this way it avoids the overlap of the light spots on the fluorescent screen. The apparatus can process a electron beam of which the diameter is as small as $\phi 2.5$ mm. With a special circuit, the synchronism of image grabbing and the pulse electron beam is realized, which diminishes the error of random grabbing of image. In its construction, outside axial positioning with a sliding key is adopted, which avoids the possibility of seizure when the transfer bar moves. The system is water-cooled, which enables it to endure high power. Some measures are adopted in image data processing, so that the data can be processed in two minutes. Besides the measurement of emittance, a meaningful research is also made on the effect of the thickness of the copper plate. It is demonstrated that the system is effective to deal with the 4 MeV electron beam. With a drift distance (from the hole to the fluorescent screen) of 630 mm, the measuring range of the system is $0.006 \sim 0.100 \text{ cm} \cdot \text{rad}$. The minimum processed beam diameter is 2.5 mm. The positioning of the hole is $\pm 0.02 \text{ mm}$, and the angle resolution of the system is 1.6 mrad .

引言

束流的发射度是标志加速器束流品质的重要参量之一,在自由电子激光(FEL)的研究工作中,对束流品质的要求很高,因此该参量的测量是很必要的。由于中国原子能科学研究院的FEL装置束流的特点(强流、脉冲、截面小及能量大),以往的测量方法都不太适用,国内外也未见有更好方法的报道,为此我们提出并设计了这种具有较宽量程的发射度自动测量系统。它采用单孔取样,避免了空间电荷对测量的影响,也避免了普通孔像法中的像斑叠加;采用步进电机及光栅尺构成的闭环控制,使得采样点定位精确;采用与脉冲束团同步的方式抓取图像数据,避免了随机抓图带来的误差。在处理图像数据中也采取了相应措施,使得数据的处理能在很短的时间里完成,从而满足了实测的要求。

1 测量原理

束流的发射度 ϵ_2 表征着粒子代表点在Y-Y'空间里所占的相面积的大小^[1]

$$\epsilon_2 = V_2/\pi = (1/\pi) \iint_n dy dy'$$

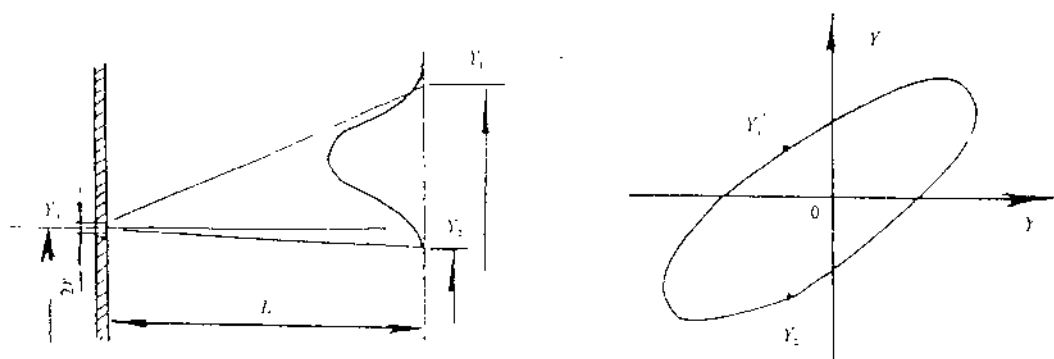


图1 系统的测量原理图

Fig. 1 Schematic representation of the principle

归一化发射度定义为: $\epsilon_{2n} = \beta\gamma\epsilon_2$, 其中 β, γ 为相对论因子。

这套系统的测量原理是:移动金属板使其上半径为 r 的小孔从束流直径上走过,在束流截面上取样,穿过小孔的粒子由于具有不同的横向速度分量,经过自由漂移 L 距离后散开打在荧光屏上形成某种明暗分布的光斑,然后在测量荧光靶上不断地抓图,再对图像数据进行分析处理,算出各处电子束发散角的大小,就能画出相图。这样测得的发射度为截面边发射度^[2]。如图1所示:穿过屏上位于 y_0 点的小孔而落在荧光靶上的粒子具有的发散角分量满足下式:

$$y_1 = (y_1 - y_0 - r)/L$$

$$y_2 = (y_2 - y_0 + r)/L$$

2 测量装置

本发射度测量装置如图 2 所示, 它由真空机械传动系统, 位移量判读系统, 控制系统及图像处理系统组成。

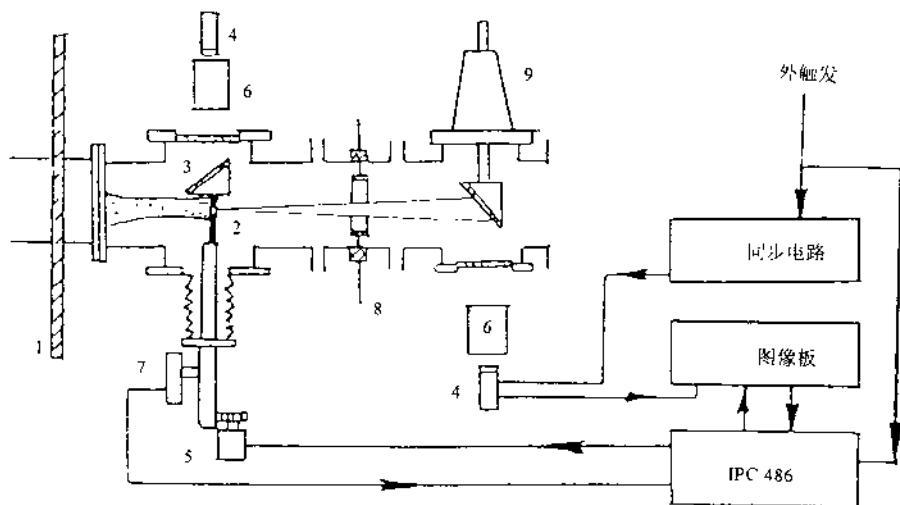


图 2 宽量程发射度测量系统测量框图

1. 磁屏蔽板; 2. 开孔靶板; 3. 监视荧光靶; 4. CCD 摄像机; 5. 步进电机;
6. 光路系统; 7. 光栅尺; 8. 二次电子抑制极; 9. 测量荧光靶提拉系统

Fig. 2 Schematic of measure faculty

1. Magnetic shielding 2. Copper plate with holes 3. Observation screen
4. CCD camera 5. Step motor 6. Optical system 7. Optic grate
8. Secondary electron suppressor pole 9. Measuring screen and its lifting system

真空机械传动由工控微机控制步进电机带动丝杠行走, 通过波纹管带动测量室中金属靶板运动, 由于采用带滑键的外部轴向定位, 使得传动部分行走稳定自如。在金属靶板的前部所带的荧光靶, 用以监测束流剖面的位置, 以保证金属靶板上小孔从束流剖面直径上走过。靶板上还带有水冷结构, 使得该系统可承受较大的功率。

光电编码器(光栅尺)将靶板的位移量转换成 BCD 码后送入微机, 由微机判读是否到位(精度好于 0.02 mm), 若小孔到达预定位置, 则停下步进电机, 等待 CCD 摄像机抓取电子束在荧光屏上形成的光斑; 如此往复取样, 获得一系列图像数据。

同步电路是保证 CCD 摄像机正确抓取图像的关键。我们设定电子束的宏脉冲频率为视频的二分频(12.5 Hz), 并用它触发同步电路, 这样就能使得电子束出现时, CCD 正好场同步信号出现。然后用图像处理系统抓取 CCD 摄像机获得的光斑信号。

金属靶板用的是 4.0 mm 厚的无氧铜板, 用以阻挡 4.28 MeV 的电子束。其上开了二个孔, 用以研究取样孔径对测量的影响, 二个孔的直径分别为 $\phi 1.0$ mm 及 $\phi 1.4$ mm, 二孔间隔 10 mm。在金属靶板的下方 630 mm 处是测量荧光靶提拉系统, 荧光靶用 AF995R 瓷片, 它具有较好的分辨率, 发光强度的线性也较好^[3]。

光路系统及图像处理系统可参见文献 [4]。

我们这套测量系统在当前配置 ($L = 0.63 \text{ m}$) 下相图测量的范围是: $0.006 \sim 0.10 \text{ cm} \cdot \text{rad}$, 可分析的最小束径为: $\phi 5 \text{ mm}$, 金属靶板上取样孔的定位误差为: $\pm 0.02 \text{ mm}$, 系统的角分辨率: 1.6 mrad 。

3 数据获取及结果处理分析

在 L 波段 FEL 装置加速段出口, 我们测量了出口处束流的发射度。

CCD 摄像机抓取的图像经过高速 A/D 转换后成为 $512 \times 512 \times 8 \text{ bit}$ 的一帧数字图像存于图像板上的帧缓存器里, 进而以文件形式分别存于硬盘里。对这一系列图像数据所采取的处理方法是: 用图像叠加显示的方法确定数据采样纵坐标, 对每一帧图像采取局部抽取有效数据的手段, 然后再对所有数据统一处理, 算出各处小束斑的张角, 进而用数值插值方法画出相图, 算出发射度的量值。

图 3 是抓取的一帧图像数据。图 4 是将每一帧图像局部抽取的有效数据画在一起得到的束密度分布图。图 5 是由测量数据画出的相图。图 6 是同一组数据依三种阈值截算张角而画出的相图。图 7 是同一次实验中前后三次 (隔约 8 min) 抓取的图像数据经处理后画出的相图。

表 1 所示的是在实验中前后三次取得的数据算出的发射度, 从结果可见重复性是比较好的。从 B 孔与 A 孔的测量数据对比可看出, 我们开的取样孔还是比较合适的, 在此范围内孔径大小对测量的影响不大。另外, 通过在二次电子抑制极上加一负高压的实验也表明: 二次电子对本底的影响可以忽略。由此我们可以得出结论: 当取样孔开得合适时, 由于金属靶板的厚度 (4 mm) 引起的“管道效应”是很小的。这说明我们采用这种方法对 4 MeV 的电子束发射度的测量是可行的。

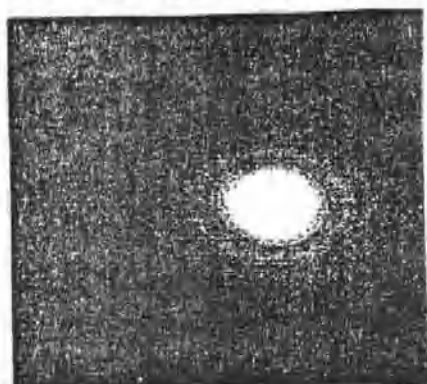


图 3 一帧图像数据

Fig. 3 A frame of light spot

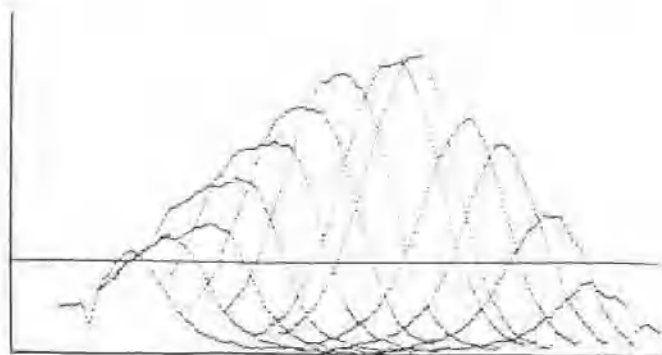


图 4 束密度分布图

Fig. 4 Density distribution of light spots

表 1 归一化发射度值 ($\text{cm} \cdot \text{rad}$) 随时间变化及取样孔径不同的对比 (阈值取 0.2 J_m)

	T_1	T_2	T_3
A 孔 ($\phi 1.4 \text{ mm}$)	0.058	0.056	0.055
B 孔 ($\phi 1.0 \text{ mm}$)	0.054	0.057	0.057

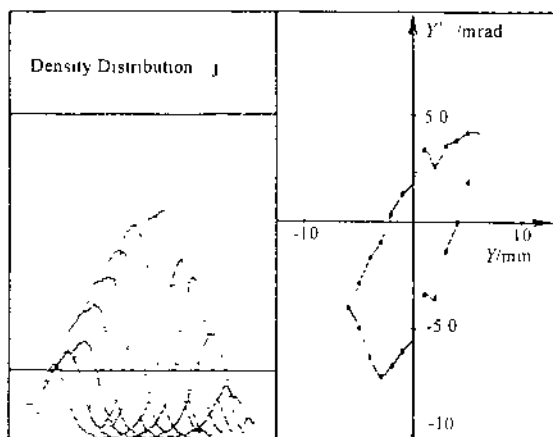


图 5 由测量数据画出的相图

Fig. 5 A measured phase plot

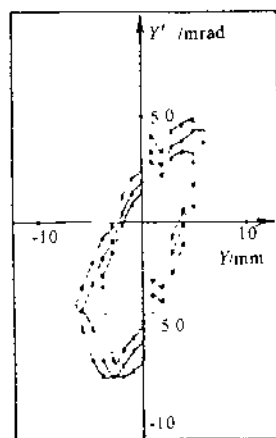
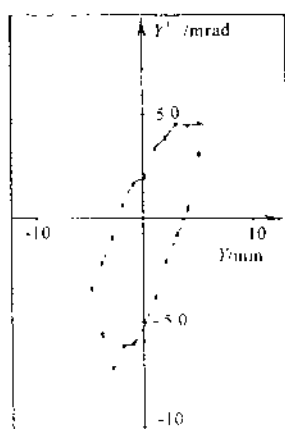
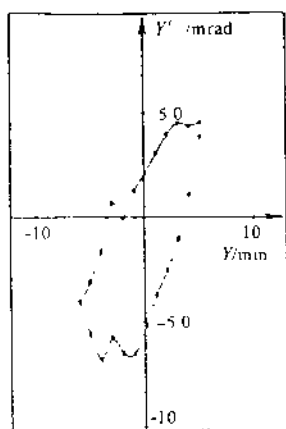


图 6 同一组数据三种阈值画出的相图

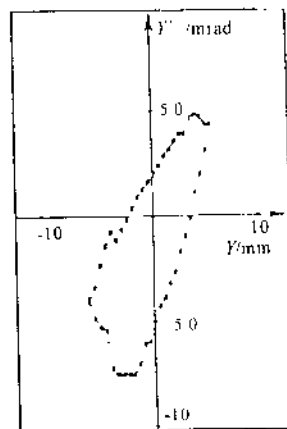
Fig. 6 Phase plots for 3 threshold



$T_1 = 0 \text{ min}$



$T_2 = 8 \text{ min}$



$T_3 = 16 \text{ min}$

图 7 前后三次 (隔 8 min) 抓取的图像数据经处理后画出的相图。

Fig. 7 Plots measured in three times with an interval of 8 min

当阈值取 $0.1 J_m$ 时, 所测得的发射度即为包含 90% 相点的截面边发射度, 对于我们的加速器, 在加速器出口测得的归一化发射度值为 $0.076 \text{ cm} \cdot \text{rad}$ 。

系统的测量误差^[5]主要由像斑测量误差及加速器不稳定等因素造成。其中像斑测量误差主要由 CCD 摄像机感光像素尺寸、光学系统分辨率及荧光靶颗粒度引起。加速器不稳定的影响可在开机实验中前后不同时间测得的相图看出, 因为相图的形状常常变化。综合各种因素, 我们这套系统的测量误差在 8% 左右。

本工作在设计过程中得到了孙琪、陈文奎教授及尹达中、乔冠琴同志的关心与支持, 并提出了许多宝贵的意见, 在此一并致谢。

参考文献

- 1 A. Sepstier (edited), Applied charged particle optics, Academic Press, New York, 1980, 159~259
- 2 张亚洲等, 强激光与粒子束 1991, 3 (1)
- 3 刘德康, 叶凯荣, 多功能图像数据处理系统, 全国第二次“束测与束控”学术交流会, 1988 年
- 4 X Z Shi, et al, Nucl. Instr. and Meth., A331, 1993, 809~816
- 5 严声清, 关于发射度和亮度的定义, 加速器“束测束控”学术交流会论文集, 1982 年