

电子直线加速器束截面测量 系统及其应用

袁勤良 吴钢

(中国科学院高能物理所应用部, 北京, 100080)

用于北京自由电子激光 30 MeV 电子直线加速器的注入及输出束的截面监测系统, 由可伸缩荧光屏束截面探头、摄象取样装置及图象采集卡和计算机处理系统构成。用此系统测量加速器注入 (≤ 1.2 MeV) 和输出 (≥ 20 MeV) 电子束的截面宽度、密度分布、发射度等参量。其硬件的空间分辨率好于 $110 \mu\text{m}$, 束宽测量精度好于 $50 \mu\text{m}$ 。经加速器在线使用 2 年以上考验, 性能可靠, 得到了满意结果。

关键词 加速器 束截面 荧光屏 图象

在自由电子激光中, 要求对电子直线加速器注入及输出的电子束参数进行准确的测量分析, 以便把加速器及束流输运系统调整到最佳工作状态, 研究电子束沿束线变化的原因, 分析调试效果, 以及为分析论证自由电子激光可否产生提供依据。这些重要参数的测量分析都可以通过束截面的测量来实现。为此, 考虑到测量的兼容性、快速高精度和总体要求, 建立起该在线束截面计算机监测系统, 它包括: 荧光屏束截面显示装置、摄象机、工业电视监视器、系统控制切换器、计算机和图象采集卡等, 以测量宏脉冲和平均束参量。其总体布局示于图 1, 系统框图示于图 2。本文将介绍该系统硬件、软件的构成和功能, 给出对 30 MeV 电子直线加速器输出束宽度、密度分布、束中心位置、发射度测量实例和结果。

1 系统描述及硬件构成

系统及硬件构成示于图 1—3。当束流打在荧光屏上, 屏发光强度正比于束能流密度显示束截面图象, 通过真空密封观察窗, 由摄象机取得屏上图象信息, 送入图象采集卡, 经 A/D 转换输入图象储存体再分成二路; 一路由 D/A 转换后输入 TV 显示图象, 另一路送入计算机进行数据处理, 结果由监视器或打印机输出。该系统与四极透镜配合作发射度测量, 与分析磁铁组合进行束能量、能谱测量。考虑到测量系统能抗高频干扰、快速数据采集和处理, 可在线实时测量和离线分析, 以确保一般束截面测量范围 $0.5—5 \text{ mm}$ (最大束径 $\leq \phi 15 \text{ mm}$) 时束宽测量好

收稿日期: 1991-11-01 收到修改稿日期: 1992-02-25

于 50 μm 。其硬件构成如下:

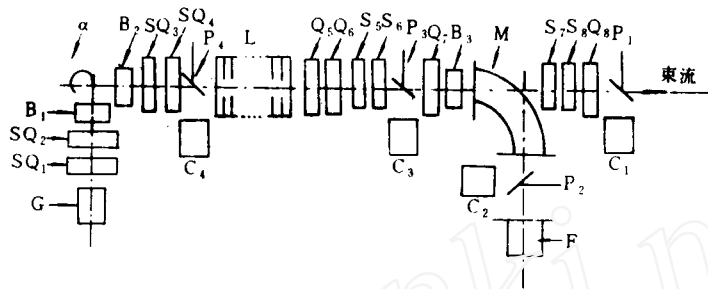


图 1 束截面测量装置总体布局图

Fig. 1 Layout of the device for beam profile measurements

G——电子枪;S——导向电磁铁;Q——四极磁透镜;B——束流监测器;P——束截面探头;C——摄像机;L——加速器;M——分析磁铁;F——法拉第筒; α —— α 磁铁。

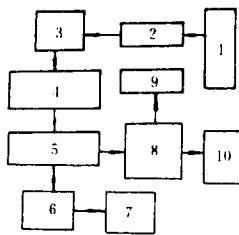


图 2 图象采样及计算机处理系统框图

Fig. 2 The fram of image system

1——摄像机;2——远控切换仪;3——A/D 转换;
4——图象存储体;5——视频查找表(即视图-视频
表);6——D/A 转换;7——TV;8——计算机;9——
打印机;10——终端显示器。

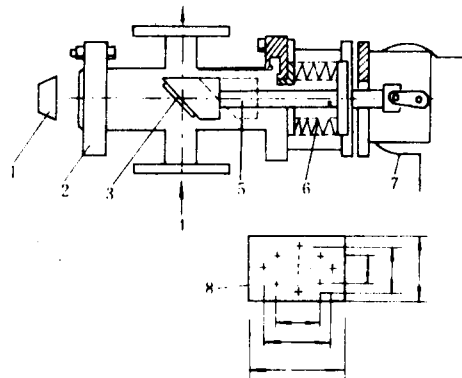


图 3 荧光屏束截面探头

Fig. 3 Schematic diagram of profile monitor

1——摄像机;2——真空密封窗;3——荧光屏;4——电子束;
5——伸缩杆;6——波纹管;7——电机;8——荧光屏。

1.1 荧光屏探头

装置如图 3 所示。荧光屏与束轴成 45° 夹角固定在伸缩杆的铝靶架上,杆的伸缩由改制后的雨刷电机实现远程控制,当电机转 180° 时将屏靶插入束线(进程 20 mm),电机转 360° 时屏复位,经实测屏的重复到位精度好于 $40 \mu\text{m}$ 。荧光屏采用抗强辐射、长寿命型掺 Cr 的 Al_2O_3 (AF995R),其发光波长 690 nm 左右,空间极限分辨率好于 $50 \mu\text{m}$,屏面积 $20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。为位置定标,屏上标有“+”字刻线,如图 3 所示。

1.2 摄像机

采用日本松下公司 WV-1500E,其主要性能指标^[1]:摄像管,2/3in Vidicon;扫描制式,2:1 隔行;中心分辨率,垂直 350 线,水平 650 线;最小照度,3 LX;视频管靶面积,8.8(水平) \times 6.6

(垂直)mm²。配备10倍三可变调焦(12—120 mm)镜头,实际工作时采用定焦近距离取样,遥控光圈方式。当荧光屏中心点到摄象机距离为150 mm、镜头焦距 $f=50$ mm时,摄象机的水平与垂直分辨率^[1]分别为 $\delta H \approx 30.5 \mu\text{m}$, $\delta W \approx 75.4 \mu\text{m}$ 。摄象机安装时垂直于束轴,避开辐射角范围,同时进行铅屏蔽处理,以避免摄象机的辐射损伤。

1.3 图象采集卡和计算机

为保证实时脉冲采样的真实和可靠,用中科院自动化所的图象采集卡(CA5000),其A/D、D/A转换率为10 MHz,精度8位,分辨率 $512 \times 512 \text{bit}$,256灰级,有 $512 \times 512 \times 8 \text{ bit}$ 图象四幅的暂存器,实时采集实时显示为40 ms/幅。为去掉无用信号,提高数据利用率,进行小于 200×200 的开窗采样和隔行分析。在采样卡上也设置了束同步脉冲采样控制口,只要把束脉冲信号作为同步控制信号输入,再进行定时,就可做到单次宏脉冲同步采样。同时采集卡具有视频输出口,将采集的视频信号送到TV监视器显示,以实时监测所采集图象及束状态,亦可离线分析。计算机采用10 MHz时钟的AST-PC/286微机。其CRT和打印机可直接显示或输出最终结果。

在测量参数前,利用每个荧光屏“十”字线的精确距离作系统最终分辨率的实测标定得到: $\Delta x \approx 70 \mu\text{m}$ (水平); $\Delta y \approx 110 \mu\text{m}$ (垂直)。

2 软件设计与功能

由物理要求及硬件构成,提出软件设计要求如下:1)获得束截面位置测量结果;2)获得束发射度测量结果;3)上述参数能进行实时测量和离线分析,可连续监视束截面和测量参数的改变;4)进行图象图形管理。考虑软件扩充、开发、完善和互相调用的便利,程序用FORTRAN语言,模块方式编写而成,它分为主执行程序(PM53)和子程序库(BPM3)两个主要部分。为方便操作,程序采取批处理顺序文件方式,所有变量输入及功能选择都用屏幕菜单提示,实现人机对话和自动取样处理,由此只要根据提示就可完成全部操作。表1列出了主菜单和一个束处理的典型二级菜单。对其他单事例处理,另外编写了单事件模块,必要时可互相合并调用。其主要模块的在线与离线处理功能如下:

2.1 图表处理和管理模块

实时采样的变换处理,包括图象的连续采样保持与读写、移动、叠加、开窗显示、正负变换、数据输出和图形处理等。

2.2 束截面处理模块

束截面分析工作,包括束密度分布、束宽测量、高斯曲线最小二乘法拟合分析、多种方法自动找束中心并输出该中心的座标值和有关信息。在束宽测量中采用线性插值处理,使测量精度好于 $50 \mu\text{m}$ 。

2.3 束发射度测量模块

自动找束中心测束宽并命名存图(实时测量若对图象不满意,可更换新图象再继续处理)测发射度;任意卷号、序号的命名;测量所存图象的文件名、日期、结果(包括图形)一并打印机输出。并可进行高斯曲线拟合测量。

2.4 自动命名采样分析模块

对图象实现连续采样、存盘、自动写注记及测量处理、输出数据。

2.5 图象(束流)三维立体图显示分析模块

表1 PM53程序的主菜单和其中一个子菜单

Table 1 The main menu and one sub menu of PM53 code

MAIN MENU -----PM53UU5. FOR-----	Sub Menu 8 -----Emittance measure-----
1. Bank Manage	1. Fixd point for Em measurement
2. Find File	2. Find light point for Em measurement
3. Read & Write Graphics	3. Find two point for Em measurement
4. Graphics handle	4. Find average light Em measurement
5. Graphics & Figure handle (1) draw	5. Read disk & fixd point Em measurement
6. Graphics & Figure handle (2) profile	6. Read disk find point for Em measurement
7. Data output use block or line	7. Read disk find two point Em measurement
8. Emittance measurement	8. Read disk & find A. Light Em measurement
9. Time sampling	9. Input data computing Emittance
0. Quti to DOS	10. Read disk curve imitate Em measurement
	11. Draw Em Graphic
	0. Quit to Main Menu

3 测量应用

3.1 束轴定标及中心位置偏离的确定

先用激光束标定束轴位置,再将屏插入束线,取荧光屏激光图象及十字刻度线信号,经计算机分析处理后确定束轴与十字刻度线的坐标关系,以此作基准存入计算机。只要测出束中心相对十字刻线位置,就可精确获得束中心位置和束轴的实际偏离状况。

3.2 束宽测量

经实验定标后,在线束截面取样,计算机处理,直接在 CRT 上输出束中心位置坐标,横向 (x, y) 密度分布图和束宽,该结果同时由打印机输出。图4给出了对 25 MeV 电子束截面实测的结果和图形。

3.3 单透镜法测束发射度

由束流传输理论^[2]可知,束流相椭圆矩阵 σ_1 与初始矩阵 σ_0 满足

$$\sigma_u = M_u \sigma_{u0} M_u^T (u = x, y, z) \quad (1)$$

束等效发射度为

$$\epsilon_{u0} = \sqrt{\sigma_{u011} \sigma_{u022} - \sigma_{u012}^2} \quad (2)$$

由式(1)得到矩阵元: $\sigma_{u11} = M_{u11}^2 \sigma_{u011} + 2M_{u11} M_{u12} \sigma_{u012} + M_{u12}^2 \sigma_{u022}$ (3)

其中 M_{uij} 是传输矩阵元,此为四极透镜的函数,由实验确定, $\sigma_{u11} = x^2$ (或 y^2) 是束宽测量值。从式(3)可见,只要改变透镜函数3次,测得对应的 σ_{u11} , 就可解得 $\sigma_{u011}, \sigma_{u012}, \sigma_{u022}$, 由式(2)计算获得等效发射度 ϵ_{x_0, y_0} 。而归一化等效发射度为:

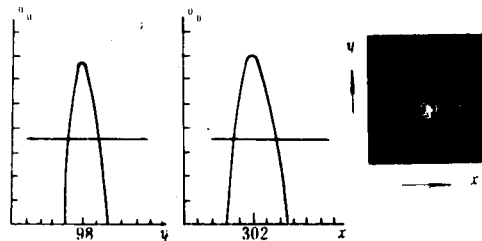


图4 束截面测量图形和图象

Fig. 4 The distribution of beam density

束斑比例: x 为 5.0:1, y 为 3.8:1。

$$\varepsilon_{n(x,y)0} = \beta\gamma\varepsilon_{x_0,y_0} \quad (4)$$

其中, β ——相对论速度; γ ——电子相对论能量。图5是以此法获得的实测结果:

$$\varepsilon_{nx_0} = 48(\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}) \quad \varepsilon_{ny_0} = 36(\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad})$$

4 讨论

该系统经2年多加速器运行的在线监测和高频高压调制器的强干扰环境及摄像机长期处于辐射场工作的考验,性能稳定。在30 MeV 直线加速器整机调试运行,直至电子束流通过 Wiggler 磁铁,均及时有效地提供了定性、定量的数据、图象、图形,从而成为加速器整机调试及束输运监测中不可缺少的测量系统。从运行结果看,该系统与原设计要求也是符合的。

本系统在建立初期得到谢家麟先生的关心和支持,也曾得到叶凯荣、汤城、刘德康、滕克俭等同志的帮助。BFEL 室的同志参加了本系统的运行,提出了有益的建议,在此特致深切的谢意。

参 考 文 献

- 1 National WV-1500E Operating Instructions, Japan: YFV8QA0055AN.
- 2 魏开煜. 带电束流传输理论, 北京: 科学出版社, 1986. 20—132.

BPM SYSTEM OF ELECTRON LINAC AND IT'S APPLICATION

YUAN QINLIANG WU GANG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing, 100080)

ABSTRACT

The beam profile measurement (BPM) system of 30 MeV linac in Beijing Free Electron Laser Laboratory (BFELL) is described. The BPM consists of remote control phosphor screen, four TV cameras, an image video signal processor and a computer system. The profile, position, emittance and distribution of electron beam for injection and output of the linac have been measured with it. The spatial resolution of the system is approximately 0.1 mm. The precision of measurement of beam width is about 0.05 mm that meets the requirement of BFEL. The system have been used on line over two years and have metted the needs for test of BFEL.

Key words Accelerator Beam profile Phosphor screen Image

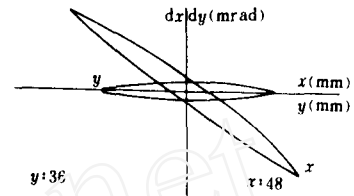


图5 束发射度测量图形

Fig. 5 The beam emittance

$E = 20 \text{ MeV}; i = 50 \text{ mA}$.