

# BEPC II 直线加速器发射度测量

刘渭滨<sup>1)</sup> 王书鸿 叶强 汪林

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

**摘要** BEPC II 直线加速器采用改变四极磁铁励磁电流, 测量获取的束流横截面荧光图像得到束流包络, 进而通过对束流包络和励磁电流的拟合计算得到束流发射度和 Twiss 参数. 在 BEPC II 直线加速器的改进过程中, 发现并解决了影响发射度测量结果准确性的多个问题, 改进了束流横截面测量方法和发射度计算方法, 提高了测量结果的准确性. 根据 BEPC II 直线加速器的具体情况, 还编写了束流截面测量程序和发射度计算程序, 提高了发射度的测量和计算速度, 方便了发射度测量实验的使用.

**关键词** BEPC II 直线加速器 束流发射度 束流包络

## 1 引言

束流发射度是反映直线加速器束流品质的重要参数, 也是衡量和判断直线加速器状态的重要依据, BEPC II 直线加速器对正电子和电子束流均有着严格的发射度限制, 能够准确和迅速的进行发射度测量对 BEPC II 直线加速器有较为重要的意义.

BEPC 直线加速器曾经对束流发射度进行过测量实验, 取得一些经验和实验结果<sup>[1]</sup>, 但实验仍然存在一些问题, 实验结果误差较大. 在 BEPC II 直线加速器的改进过程中, 发现并解决了影响发射度测量结果准确性的多个问题, 并结合实际的测量经验, 我们对原来的测量方法进行了优化和改进, 编写了束流截面尺寸和发射度计算软件, 使得 BEPC II 直线加速器发射度测量不仅在测量速度上, 而且在测量结果的准确性上都得到了大幅度的提高.

## 2 BEPC II 发射度测量

在束流能量较高的情况下, 可以忽略掉束流内部粒子之间的相互作用、束流与真空管道中残余空气分子之间的相互作用等对束流的影响, 在保守场条件下,

根据刘维定理, 束流发射度  $\varepsilon$  保持不变, 束流包络  $\sigma$  的传输方程可以用传输矩阵的矩阵元  $R_{ij}$  和初始 Twiss 参数  $(\beta_0, \alpha_0, \gamma_0)$  表示为

$$\sigma^2 = R_{11}^2(\varepsilon\beta_0) - 2R_{11}R_{12}(\varepsilon\alpha_0) + R_{12}^2(\varepsilon\gamma_0). \quad (1)$$

按照图 1 所示的加速器出口处的元件布局, 束流包络可以通过计算束流在荧光靶上的横截面光斑尺寸获得; 四极磁铁入口到荧光靶的传输矩阵与四极磁铁聚

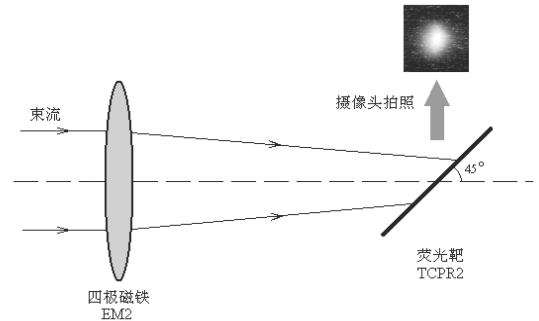


图 1 发射度测量元件布局

焦强度相关, 通过多次改变四极磁铁聚焦强度, 就可以得到一组束流包络  $\sigma$  随四极磁铁聚焦强度  $K$  变化的方程组,

$$\begin{pmatrix} \sigma_1^2 \\ \sigma_2^2 \\ \vdots \\ \sigma_n^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11}(K_1)^2 & -2R_{11}(K_1)R_{12}(K_1) & R_{12}(K_1)^2 \\ R_{11}(K_2)^2 & -2R_{11}(K_2)R_{12}(K_2) & R_{12}(K_2)^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{11}(K_n)^2 & -2R_{11}(K_n)R_{12}(K_n) & R_{12}(K_n)^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon\beta_0 \\ \varepsilon\alpha_0 \\ \varepsilon\gamma_0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

对上式求解, 可以解得 $\varepsilon\beta_0$ ,  $\varepsilon\alpha_0$  和 $\varepsilon\gamma_0$ , 利用 Twiss 参数 $\beta_0\gamma_0 - \alpha_0^2 = 1$ 的关系<sup>[2]</sup>, 就可以得到发射度 $\varepsilon = \sqrt{(\varepsilon\beta_0)(\varepsilon\gamma_0) - (\varepsilon\alpha_0)^2}$ , 进而计算出 Twiss 参数.

### 3 束流包络计算原理

测量中使用的荧光靶是用 $Al_2O_3$  加以荧光材料制成的 AF995 靶片, 束流打在靶上的发光强度与束流流强成正比关系<sup>[3]</sup>. 经过摄像头成像后, 组成图像的每个像素的亮度与靶片上对应面积的发光强度成正比关系, 通过对图像所有像素的亮度进行统计(图 2), 就可以得到相应的束流粒子的分布.

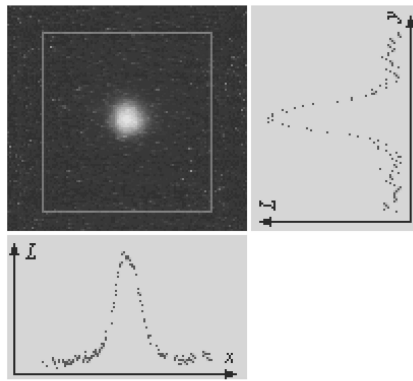


图 2 荧光靶产生的束流横截面图像及图像亮度的相对分布

BEPC II 直线加速器束流粒子在横向的分布可以用高斯分布来描述, 因此图像的亮度分布(非归一化)可以表示为

$$L(u) = L_0 + de^{-\frac{(u-u_0)^2}{2\sigma_u^2}}, \quad (3)$$

式中 $d$ 为常数;  $u$ 的取值为整数, 与图像 $x$ 或 $y$ 方向的像素一一对应;  $u_0$ 为亮度分布的中心位置;  $L_0$ 是由于图像本底亮度而引入的常数项,  $\sigma_u$ 是束流包络. 对图像所有像素的亮度进行统计, 求出在 $u$ 位置处与统计方向垂直的另一个方向的积分亮度 $L(u)$ , 就可以得到关于 $u$ 和 $L(u)$ 的方程组. 利用非线性最小二乘法求解这个非线性方程组, 就可以解出 $L_0$ 、 $d$ 、 $u_0$ 和 $\sigma_u$ , 其中束流包络 $\sigma_u$ 的结果是以像素为单位的, 把图像像素和对应的实际长度进行换算, 就得到了束流包络的实际大小.

## 4 发射度测量过程中遇到的一些问题

### 4.1 束流截面图像的横向条纹问题

在束流截面图像的实际拍摄中, 发现拍摄的图像存在明显的横向条纹现象, 严重影响了图像的拍摄质量和数据的处理. 经过实验研究发现图像采集卡隔行方式拍摄时, 得到的图像是两次奇场和偶场图像的叠

加, 两场图像采集的时间间隔约为 20ms, 但是荧光靶的余辉时间约为 10~15ms<sup>[3]</sup>, 从而造成两场图像亮度的差别, 形成横向条纹. 因此改为采用逐行采集方式, 虽然降低了垂直方向像素数量, 但仍然提高了计算精度.

### 4.2 束流截面图像的亮度问题

在对束流截面图像进行的数据处理过程中, 采集到的图像时常出现不同程度的亮度“饱和”现象, 得到的粒子分布在束流中心部分(即粒子密度较高、亮度较强的位置)出现了“截断”, 影响到束流截面尺寸计算结果的准确性, 这是由于图像采集系统对亮度的响应范围有限和束斑聚焦程度在测量过程中不断变化造成的. 通过给摄像头添加滤光片, 并在测量过程中适当调节光圈<sup>[4]</sup>, 使得亮度饱和现象得以消除.

### 4.3 束流截面图像的本底和“噪声”问题

图像拍摄不可避免的存在背景, 背景图像会直接影响到拍摄图像的质量和束流截面尺寸计算; 由于 CCD 摄像头处在较强的辐射环境下, 在工作了较长一段时间后, 拍摄的图像质量会有一定程度的下降, 出现很多“噪点”, 这些“噪点”和图像本底以及其它原因引起的“噪声”直接影响到图像质量, 给计算带来困难. 通过控制电子枪的触发, 测量没有束流时的本底图像, 对本底图像进行亮度统计, 在计算截面图亮度分布时进行本底扣除, 可以减小本底和“噪点”的影响, 改善测量和计算结果. 考虑到图像本底, (3)式可以改写为

$$L(u) = L_0 + de^{-\frac{(u-u_0)^2}{2\sigma_u^2}} - rL_{bg}(u), \quad (4)$$

式中 $L_{bg}(u)$ 是本底图像的积分亮度分布,  $r$ 是扣除的系数, 由本底图像和束流截面图像的亮度差异决定, 通常接近于 1, 实际大小可以根据数据拟合得到.

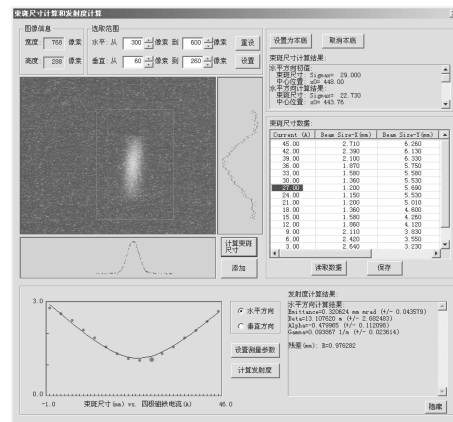


图 3 束流截面尺寸和发射度计算程序界面和测量结果

## 5 束流截面尺寸和发射度计算程序

根据前面束流包络和发射度计算的方法, 采用

VC++ 语言编写了束流发射度测量和计算软件(图3). 软件能够对采集到的束流截面图像进行范围选取、本底扣除和束流包络分析计算, 并能够根据得到的束流包络结果进行束流发射度和 Twiss 参数的拟合计算, 在目前 BEPC II 直线加速器的实际运行中已经投入使用, 取得了较好的使用效果.

## 6 BEPC II 直线加速器出口发射度测量

根据前面提到的方法, 对 BEPC II 加速器出口的束流发射度进行了多次测量, 获得了一些测量结果.

表 1 注入涂沫凸轨磁铁脉冲电源参数

	水平方向	垂直方向
$\varepsilon/\text{mm}\cdot\text{mrad}$	$0.32\pm 0.04$	$0.24\pm 0.06$
$\beta\text{m}$	$13.1\pm 2.6$	$19.5\pm 5.8$
$\alpha$	$-0.48\pm 0.11$	$-0.84\pm 0.26$
$\gamma/\text{m}^{-1}$	$0.09\pm 0.02$	$0.09\pm 0.03$

2006年4月15日对能量为1.89GeV、流强为30mA的正电子束流在直线加速器出口处的发射度进行了测量, 图4是测量水平方向发射度时, 在TC-PR2荧光靶上获取的束流截面随EM2四极磁铁励磁电流的变化, 图3左下方显示的是计算得到的水平方向束流包络的计算值和理论值随EM2四极磁铁励磁电流的变化图. 表1是拟合得到的束流发射度和 Twiss

参数(置信度95%).

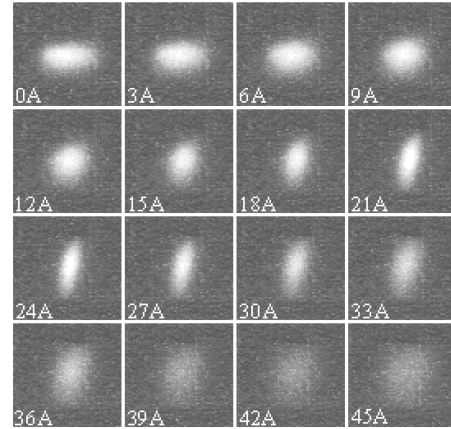


图 4 TC-PR2上的束流截面随EM2四极磁铁励磁电流的变化

## 7 总结

我们目前采用的发射度测量方法, 在测量时需要调整和使用荧光靶, 影响到储存环对束流的使用, 今后 BEPC II 直线加速器将考虑采用多丝法, 对束流进行无阻拦的发射度测量, 以便迅速实时的获取测量数据, 提高 BEPC II 储存环对直线束流的使用效率.

## 参考文献(References)

- 1 WANG Shu-Hong, YE Qiang et al. HEP & NP, 2002, **26**(11): 1184—1188 (in Chinese)  
(王书鸿, 叶强等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(11): 1184—1188)
- 2 XIA Hui-Qin, LIU Chun-Liang. Theory of Beam Transportation. Xi'an: Xi'an JiaoTong University Press, 1991. 30—35 (in Chinese)  
(夏慧琴, 刘纯亮. 束流传输原理. 西安: 西安交通大学出版社, 1991. 30—35)
- 3 YE Kai-Rong. Performance and Calibration of AF995R Beam Profile. BEPC Inner Note, 1994 (in Chinese)  
(叶恺容. AF995R 荧光靶用于束测的性能及其定标. BEPC 内部报告, 1994)
- 4 WANG Lin, JIANG Hao, WANG Shu-Hong. Remote Optical Attenuation Control System of TC-PR2. The 11th BEPC Commission Meeting, 2006. 387—389 (in Chinese)  
(汪林, 江浩, 王书鸿. TC-PR2 光路衰减遥控装置. BEPC'06 第十一届年会文集)

# Emittance Measurement at BEPC II Linac

LIU Wei-Bin<sup>1)</sup> WANG Shu-Hong YE Qiang WANG Lin  
(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

**Abstract** Further studies on beam emittance measurement have been made to improve the emittance measurement precision at BEPC II linac. Some problems in the measurement are solved and a code for beam emittance calculation is developed. With these improvements, the emittance measurement precision was upgraded.

**Key words** BEPC II Linac, emittance, beam envelope

Received 7 January 2008

1) E-mail: liuwb@mail.ihep.ac.cn