

多次改变聚焦强度法测量束流发射度

王书鸿¹⁾ 叶强 曹建社 马力 刘玉成 乐琪 裴国玺 张嘉菲

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 就“多次改变聚焦强度法测量束流发射度”,讨论了测量技术和测量装置的优化,包括薄透镜近似的合理采用,多点最小二乘拟合,截面测量靶轴向位置的优化选择,和测量软件系统的改进等,以提高发射度测量的准确性和可靠性.已将上述优化技术,应用于 BEPC 直线加速器上新建和改建的发射度测量装置,获得了满意的测量结果.

关键词 发射度 测量 优化 BEPC 直线加速器

1 引言

发射度椭圆由 3 个独立的参数来完整地描述,即面积(ϵ)和形状参数(α, β),后者又称 Twiss 参数.从已知的束流发射度可惟一地确定束流的截面尺寸.于是,只要多次(三次或更多)测出束截面,即可反算出发射度椭圆参数.一个最简单的发射度测量装置,可由一块四极透镜 Q(设其入口处在轴向位置 z_1)和一个束截面测量靶 PR(设其处在轴向位置 z_2)组成,它们相距一漂移段 L_d .只要多次改变 Q 的聚焦参数 k ,并相应测出束截面半径 σ ,就可由(1)式的方程组推算出在 z_1 位置的发射度椭圆参数 $\epsilon, \alpha, \beta^{1,2}$:

$$\sigma_{z_1}^2 = \epsilon (R_{11}^2 \beta_1 - 2R_{11}R_{12}\alpha_1 + R_{12}^2 \gamma_1), \quad (1)$$

式中 R_{ij} 是从透镜入口到截面靶的传输矩阵元

$$R = R_d R_Q = \begin{pmatrix} 1 & L_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \sqrt{k}L_Q & \frac{1}{\sqrt{k}} \sin \sqrt{k}L_Q \\ -\sqrt{k} \sin \sqrt{k}L_Q & \cos \sqrt{k}L_Q \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中聚焦参数 $k = \frac{1}{B\rho} \frac{\partial B}{\partial r} (1/m^2)$, 磁刚度 $B\rho (kG \cdot m) = 33.3564 P (GeV/c)$, $\frac{\partial B}{\partial r} (kG/m)$ 透镜的磁场梯度, L_Q 为透镜的有效长度(m), L_d 为从透镜出口到截面靶的距离(m).由(2)可得

$$R_{11} = \cos \sqrt{k}L_Q - \sqrt{k}L_d \sin \sqrt{k}L_Q,$$

2002-01-22 收稿

1) E-mail: wangsh@sun.ihep.ac.cn

$$R_{12} = \frac{1}{\sqrt{k}} \sin \sqrt{k} L_0 + L_d \cos \sqrt{k} L_0.$$

2 发射度测量技术和测量装置的优化

2.1 薄透镜近似

为避免求解方程(1)和(2)时,三角函数可能带来的不便,并使求解简化,采用薄透镜近似是一个好办法^[2].在薄透镜近似下,传输矩阵被简化为

$$R = R_d R_Q = \begin{pmatrix} 1 & L_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ k_1 & 1 \end{pmatrix},$$

其中 k_1 为透镜的聚焦强度 $k_1 = k L_Q = \frac{L_Q}{B\rho} \frac{\partial B}{\partial r} =$

$$\sigma_{11,x}^2 = \epsilon [(1 + k_1 L_d)^2 \beta - 2(1 + k_1 L_d) L_d \alpha + L_d^2 \gamma], \quad (4)$$

其中 $\gamma = (1 + \alpha^2)/\beta$,将(4)式写成

$$\sigma_{11,x}^2 = a(k_1 - b)^2 + c. \quad (5)$$

由(4)和(5)式,可解得在 x 平面(聚焦平面)的发射度参数:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{ac}{L_d^2}}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{a}{c}} \left(b + \frac{1}{L_d} \right), \quad \beta = \sqrt{\frac{a}{c}}. \quad (6)$$

为合理使用薄透镜近似,必须满足薄透镜近似条件.为简化讨论,设初始(在透镜入口处) $x'_0 = 0$ (即平行光束),则由(2)式可得在透镜出口处, $x_1 = x_0 \cos(\sqrt{k} L_Q)$, $\Delta x = x_1 - x_0 = x_0(1 - \cos \sqrt{k} L_Q)$,则近似条件为 $\frac{\Delta x}{x_0} \ll 1$,即 $(1 - \cos \sqrt{k} L_Q) \ll 1$,也就是 $\sqrt{k} L_Q \rightarrow 0$,要求 L_0 和 $\frac{\partial B}{\partial r}$ 均很小.

2.2 多点拟合

为使拟合的抛物线(5)式更精确,从而使所得的发射度参数更准确,采用尽可能多点的最小二乘拟合是必要的.原则上,测出3个束截面半径 σ 值,就可由(4)和(5)式解出3个发射度参数,这就是传统的三截面法测发射度.显然,由尽可能多点的拟合得到的发射度参数,要比三截面法准确得多.我们的测量结果表明,拟合点数为10—15是必要的.

2.3 截面靶轴向位置的最佳选择

为简化讨论,设透镜入口处 $\alpha = 0$,则由(4)式可得

$$\sigma_{11}^2 = \epsilon \beta (1 + k_1 L_d)^2 + \frac{\epsilon}{\beta} L_d^2, \quad (7)$$

测量时,为使聚焦强度 k_1 的调变范围最大,从而在确保 k_1 的改变次数足够多(如10—15次)的条件下,使 k_1 的调变步长足够大,进而使相应的束截面半径 σ 的变化量最大,即获

得尽可能准确和灵敏的 $\frac{\Delta\sigma}{\Delta k_1}$. 为此应使 k_1 为中间值时 (即透镜电源的电流值为中间值时), (7) 式抛物线有极小值 (如图 1 所示), 则有 $L_d = -\frac{1}{k_1} = f$. 这里 f 是透镜的焦距. 可见, 应将截面靶置于透镜的中间电流值所对应的焦距上.

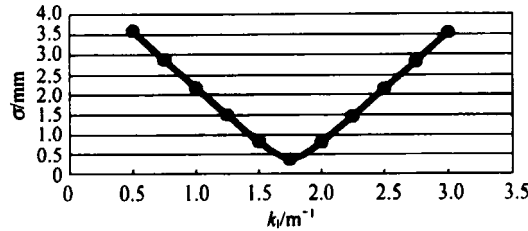


图 1 束截面半径 σ 与聚焦强度 k_1 的关系曲线

3 BEPC 电子直线加速器发射度测量装置的改进和测量结果分析

我们将上述发射度测量的优化考虑, 应用到北京正负电子对撞机 (BEPC) 的直线加速器上. 首先, 新建了在聚束段出口处的发射度测量装置, 用于实现电子束由螺线管磁聚焦系统向四极透镜聚焦系统的匹配; 同时改进了在直线加速器出口处的发射度测量装置, 用于实现正电子束和负电子束由直线加速器向束流运输系统的匹配 (运输系统将束流输送到对撞机储存环的注入点). 根据上述的优化条件, 并考虑在这两处的实际结构安排, 其发射度测量装置的参数列于表 1 中. 表 2 给出了发射度测量结果.

表 1 发射度测量装置的主要参数

测量位置	束流能量/MeV	透镜长度/cm	磁透镜电流/A	透镜出口至截面靶距离/m
聚束段出口		10	1—16	
加速器出口	1550	20	1—28	

表 2 测到的发射度参数

(I) 聚束段出口 (34 MeV)

测量时间	$\epsilon(x) / (\text{mm} \cdot \text{mrad})$	$\beta(x) / \text{m}$	$\epsilon(y) / (\text{mm} \cdot \text{mrad})$	$\beta(y) / \text{m}$
22/10/2001	3.8455	0.6024	1.138	5.6235
23/10/2001	3.3560	0.6688	1.118	5.4544

(II) 直线加速器出口 (1250 MeV)

测量时间	$\epsilon(x) / (\text{mm} \cdot \text{mrad})$	$\beta(x) / \text{m}$	$\epsilon(y) / (\text{mm} \cdot \text{mrad})$	$\beta(y) / \text{m}$
23/11/2001	0.2854	0.3951	6.926	0.5728
23/11/2001	0.2871	0.4480	7.051	0.5798

表中可见, 测量的重复性很好. 并由此可知, 束流从聚束段出口至直线加速器出口

(总长约 150m),其归一化发射度增长到:

$$\frac{\gamma\epsilon_x(1.25\text{GeV})}{\gamma\epsilon_x(34\text{MeV})} = 2.89; \quad \frac{\gamma\epsilon_y(1.25\text{GeV})}{\gamma\epsilon_y(34\text{MeV})} = 3.78,$$

增长的主要原因是束团(其电荷量为 1.1nC)偏轴的横向尾场效应导致 Beam blow-up,这与我们在测量时观察到的截面靶上的束中心位置的偏轴相符;且观察到在垂直方向(y)束中心偏轴要比水平方向(x)大得多,所以在 y 方向的发射度和归一化发射度增长都比 x 方向大得多.这与用 LIAR 程序³模拟结果也基本相符.如设束流在聚束段出口的初始偏轴为 0.15mm(x)—0.20mm(y),在目前 BEPC 直线加速器尚未建立轨道校正系统的情况下有:

$$\frac{\gamma\epsilon_x(1.25\text{GeV})}{\gamma\epsilon_x(34\text{MeV})} = 3.03; \quad \frac{\gamma\epsilon_y(1.25\text{GeV})}{\gamma\epsilon_y(34\text{MeV})} = 3.96.$$

上述模拟计算中,同时计入了单束团的短程尾场和多束团的长程尾场效应.

4 发射度测量软件系统的改进

我们在进行上述优化改进的同时,还改进了截面靶的照明系统;重新安装准直了测量用的四极透镜和截面靶,并对发射度测量软件做了较大的改进.使束截面半径(1σ)的采集精度达 0.1mm,使发射度(1σ)的测量精度达约 5%—10%.

发射度测量软件采用了软件工程方法中的快速原型方法,采用了模块化设计,由束流图像采集模块、图像处理模块、以及发射度计算模块构成.针对各个模块的性能和需求,分别采用了 C 语言与 MATLAB 环境,既保证了采集的及时性、数据的实时传输,又充分利用了 MATLAB 的数学计算能力、图像处理工具箱和丰富的图形显示接口,确保了计算过程的准确性和工作效率.

其中图像采集模块采用短时间内对束流图像的多帧连续采集,保证了束流图像的稳定性和数据的相关性.为精确地远程遥控磁铁电流值,使用了现场总线的远程控制模块,避免了低电平模拟信号的远距离传输带来的干扰,从而最大程度地降低了电流不准确而引入的误差.

图像分析处理模块主要用于束流图像的提取:用图像减影除去靶片背景;对图像进行低通滤波以除去随机噪声的干扰;对图像的亮度信号进行 x, y 方向的投影,并对投影信号的分布进行高斯拟合,分别求出其半高全宽和 σ 值.

发射度计算模块主要根据测到的多组束截面值 σ ,及其对应的聚焦强度 k_1 、各束流光学原件的参数、束流的能量等,用最小二乘法解方程组,求出束流传输矩阵中的其他参数,从而计算出束流发射度、Twiss 参数和相椭圆图形.

5 结论

本文就“多次改变聚焦强度法测量束流发射度”,讨论了测量技术和测量装置的优化,包括薄透镜近似的合理采用,多点最小二乘拟合,截面测量靶轴向位置的优化选择,和测

量软件系统的改进等,以提高发射度测量的准确性和可靠性.

已将上述优化技术,应用于 BEPC 直线加速器上. 新建了在聚束段出口的发射度测量装置;同时改进了在直线加速器出口的发射度测量装置. 实测表明,测量结果稳定可靠,重复性很好. 首次测到了在聚束段出口的发射度,并与加速器出口的发射度比较,获得了在该加速器上的归一化发射度增长因子,并分析了增长的原因. 这些测量和分析,对于北京正负电子对撞机二期工程(BEPC-II)中直线加速器的束流光学和轨道校正系统的设计很有参考意义.

参考文献 (References)

- 1 Ross M et al. PAC 87, 1987. 725
- 2 Sceman J T. Handbook of Accelerator Physics and Engineering. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1999, 560
- 3 Asmann R et al. LIAR-A Computer Program for the Modeling and Simulation of High Performance Linacs. SLAC/AP - 103, April 1997

Emittance Measurement by Multi-Changing Focusing Strength

WANG Shu-Hong¹⁾ YE Qiang CAO Jian-She MA Li
LIU Yu-Cheng LE Qi PEI Guo-Xi ZHANG Jia-Fei

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Some advanced techniques to optimize the emittance measurement devices have been studied, such as thin lens approximation, multi-changing focusing strength, optimizing the position of the profile monitor and software improvement for accurate data acquisition and effective processing. By applying these techniques to the emittance measurement for electron beam of BEPC Linac, the satisfactory measurement results have been obtained.

Key words emittance, measurement, optimization, BEPC, linac

Received 22 January 2002

1) E-mail: wangsh@sun.ihep.ac.cn