

BPL 750keV 束流运输系统的物理设计 和空间电荷效应研究

魏开煜 林震华

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文阐述了北京质子直线加速器(BPL) 750 keV 束流运输系统的物理设计和束流空间电荷效应的研究。该系统已于1982年12月建成出束,透镜系统的传输效率达到了66.7%(输入120mA,输出80mA);1983年启用了第一个聚束器,聚束效率稳定在60%左右。

一、引 言

北京质子直线加速器10MeV段,已于1982年12月在中国科学院高能物理研究所建成出束,它是由预注入器、750 keV束流运输系统和加速腔三部分构成的。750keV束流运输系统位于预注入器和加速腔之间,它的作用是把预注入器输出的能量为750 keV的质子束经过横向聚焦和纵向聚束传输和注入到加速腔中去,并且在注入时要完成束流横向和纵向发射度的匹配。

我们运用在文[1]中所阐述的低能强束流运输系统的设计理论和计算方法,对这一运输系统进行了具体的物理设计。为了使该系统具有较好的传输性能,在设计中我们对系统中的束流空间电荷效应及其补偿方法进行了较为详细的研究。在研究的基础上选取了优化的设计参数。

该系统于1982年12月实际建成出束,在初步调试中透镜系统的束流传输效率就达到了66.7%(输入120mA,输出80mA)。1983年启用了第一个聚束器,聚束效率稳定在60%左右。由此可见,该系统的设计是有较大潜力的。这里,我们将扼要地阐述一下该系统的物理设计和设计中所做的空间电荷效应的研究工作。

二、系统的设计和主要物理参数

系统的元件布置如图1所示,是由四组三合一四极磁透镜、五个单四极磁透镜和两个

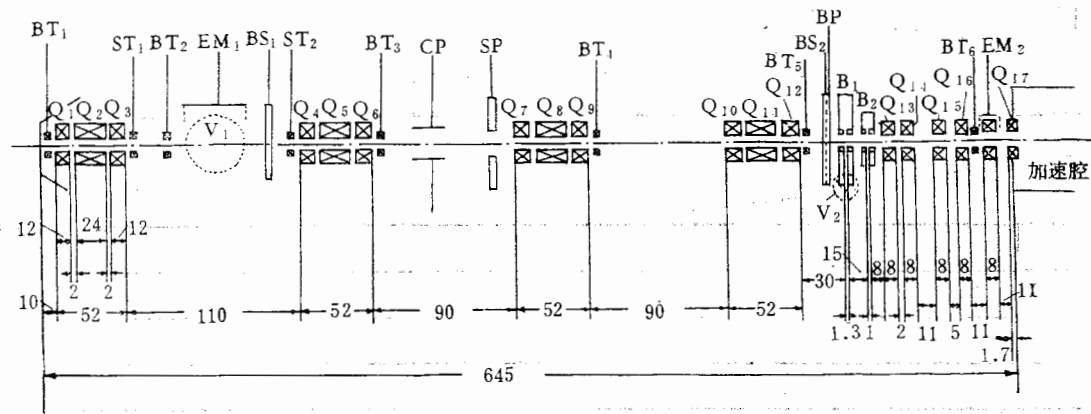


图 1 750keV 运输系统元件布置图

$Q_1, Q_2, Q_3; Q_4, Q_5, Q_6; Q_7, Q_8, Q_9; Q_{10}, Q_{11}, Q_{12}$: 四组三合一透镜

$Q_{13}, Q_{14}, Q_{15}, Q_{16}, Q_{17}$: 五个单四极磁透镜

EM: 发射度测量探头 BT: 束流强度测量装置 BP: 束流剖面测量靶 ST: 导向线圈 CP: 脉冲静电切割器 SP: 度束流吸收器 BS: 可伸入或退出的束流挡板 V: 真空抽气口 B: 聚束器

聚束器构成的。其中 $Q_1Q_2Q_3, Q_4Q_5Q_6, Q_7Q_8Q_9, Q_{10}Q_{11}Q_{12}$ 是三合一透镜, $Q_{13}, Q_{14}, Q_{15}, Q_{16}$ 和 Q_{17} 是五个单四极磁透镜, 这些透镜的设计参数都列在表 1 中。 B_1 和 B_2 是两个聚束器, 它们的设计参数列在表 2 中。在表 2 中还列出了两个聚束器电间隙中心之间的距离和第二聚束器电间隙中心到加速腔第一个磁透镜中心的距离。系统从预注入器加速管出口零电位点(以下简称预注入器出口)到加速腔第一个聚焦透镜中心(以下简称加速腔入口)的总长度是 6.45 米。其中各透镜和聚束间隙的有效长度以及它们之间的漂移节都

表 1 透镜主要设计参数

透镜类型	透镜标号	透镜有效长度(厘米)	透镜有效磁场梯度的连续可调范围(高斯/厘米)	磁铁孔径(厘米)	真空管道内径(厘米)	透镜梯度正负号(正负可调)	三合一透镜组内两端透镜与中间透镜之间的有效间距(厘米)	
三合一	第一组	Q_1, Q_3	12	100~600	8	7.5	-	2
		Q_2	24	100~600	8	7.5	+	
	第二组	Q_4, Q_6	12	100~1000	8	7.5	+	2
		Q_5	24	100~800	8	7.5	-	
一	第三组	Q_7, Q_9	12	100~1000	8	7.5	-	2
		Q_8	24	100~800	8	7.5	+	
单四极磁透镜	第四组	Q_{10}, Q_{12}	12	100~1000	8	7.5	+	2
		Q_{11}	24	100~800	8	7.5	-	
单四极磁透镜	Q_{13}	8	300~1000	5.5	5	-		
	Q_{14}	8	300~1700	5.5	5	+		
	Q_{15}	8	300~1700	5.5	5	-		
	Q_{16}	8	300~2000	5.5	5	+		
	Q_{17}	8	300~2000	5.5	5	-		

以厘米为单位标在图 1 中。

表 2 聚束器主要设计参数

参数名	聚束器	
	B_1	B_2
工作频率(兆赫)	201.25	402.5
漂移管内孔径(厘米)	2	2
电间隙长度(厘米)	1.3	1
有效电压幅值 $V_0 T$ 的连续可调范围(千伏)	0~45	0~25
B_1 与 B_2 两聚束器电间隙中心之间的距离(厘米)	16.15	
B_2 电间隙中心到加速腔第一透镜中心的距离(厘米)	90.2	

除了透镜和聚束器外,在系统中还布置了一系列测量、校正及辅助元件。其中 EM 为发射度测量探头, BT 为束流强度测量装置, BP 为束流剖面测量靶, ST 为导向线圈, CP 为脉冲静电切割器¹⁾, SP 为废束流吸收器, BS 为可伸入或退出的束流挡板, V 为真空抽气口。

该系统的主导设计思想是:调节第一组和第二组三合一透镜的磁场梯度,可使不同初始条件的束流在 Q_6 和 Q_7 之间的长漂移节中形成一个固定尺寸的对称束腰,以便放置静电切割器 CP ,把预注入器输出脉冲两端不符合要求的束流偏掉。调节第三组和第四组三合一透镜的磁场梯度,可以使束流在两个聚束器之间形成另一个细长而对称的束腰,如图 3 所示。当腰位直径为 1.2 厘米时,束流在两个聚束器的孔道中的直径都不超过 1.6 厘米,而且是接近对称的。这样一来,一方面可以允许聚束器漂移管的孔径设计得很小,例如 2 厘米,以便提高腔的 T 系数因而也提高了聚束电压的利用率;另一方面,由于束流以近似圆形的截面通过聚束间隙,有可能减小横向发射度的增长率。为了工艺制造的方便,四组三合一透镜采用统一的结构尺寸,透镜的内孔径为 8 厘米,每组三合一透镜中,透镜与间隙的有效长度分配为 12—2—24—2—12 厘米。

五个单四极磁透镜都放在聚束器后面的聚束漂移节里,其中第一个透镜 (Q_{13}) 的梯度调到适当的数值可以减小后面透镜中束流包络的极大值,后面四个透镜 ($Q_{14} \sim Q_{17}$) 用来调节束流横向发射度的形状使之同加速腔的聚焦系统相匹配。五个单四极磁透镜也采用统一的型号,孔径为 5.5 厘米,有效长度为 8 厘米。

第一个聚束器 (B_1) 为基频聚束器,它的工作频率与加速腔相同为 201.25 兆赫;第二个聚束器 (B_2) 为倍频聚束器,工作频率为 402.5 兆赫。在表 2 中所列漂移距离的情况下,调节两个聚束器的电压,可使束流的聚束效率达到 75% 左右。假如只使用基频聚束器 B_1 ,聚束效率约为 60% 左右。

1) 实际上此部件尚未安装和使用。

三、束流空间电荷效应及其补偿

我们在文 [1] 中已经阐述了低能强束流输运系统中束流空间电荷模型及空间电荷影响的计算公式. 我们运用文 [1] 所阐述的普遍理论和计算公式, 对本系统进行了具体研究, 得到了如下的结果:

I. 空间电荷对横向聚焦和匹配的影响及其补偿方法

束流自身的空间电荷力是库仑斥力, 它对束流中偏离中心轨道的粒子是处处散焦的, 并且在水平和垂直方向同时散焦. 这种散焦力对束流有两种影响: (1) 使束流在系统中的包络增大. (2) 使束流发射度的形状随流强改变. 研究表明, 将透镜磁场梯度随着运行束流强度按一定规律增加, 可以保证在不同流强下束流发射度同系统接收度的完全匹配, 但是, 不能同时制止束流包络的增大. 这种现象我们称为空间电荷效应的部分补偿. 为了达到这种补偿, 透镜磁场梯度的设计值必须足以校正最高运行流强所引起的失配. 同时, 透镜和真空管道孔径的大小也必须能够容纳最高运行流强下的束流全包络.

在做本系统的设计时, 预注入器尚未建成, 无法知道它的输出束流性能. 在此情况下, 我们假定束流的初始规一化发射度为 $\varepsilon_{x0} = \varepsilon_{y0} = 0.28$ 厘米毫弧度, 初始横截面半径 (即初始半包络) 为 $a_{x0} = a_{y0} = 1.4$ 厘米, 散角为 $\theta_{x0} = \theta_{y0} = 14$ 毫弧度. 并且假定束流通过两个聚束器时, 横向发射度的增长系数^[1]为 $\alpha_x = \alpha_y = 1.25$. 在达到加速腔入口时,

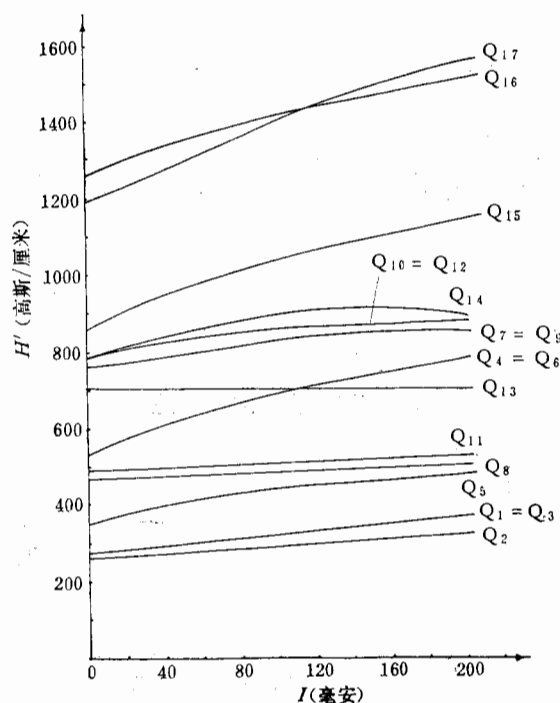


图 2 透镜磁场梯度随运行流强的调节曲线

以 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0.35$ 厘米毫弧度的规一化发射度值同加速腔的聚焦系统进行匹配。此外，我们还要求对各种运行束流强度，都在透镜 Q_6 与 Q_7 之间形成 $a_x = a_y = 0.8$ 厘米的固定束腰，在两个聚焦间隙之间的漂移节中心形成 $a_x = a_y = 0.6$ 厘米的固定束腰。计算结果表明，为了实现上述固定匹配，要求系统中各透镜的磁场梯度值按照图 2 中相应的曲线随运行束流强度增加。当束流强度为 200 毫安时，各透镜的磁场梯度值列在表 3 中。

表 3 运行流强为 200 毫安时所需的透镜梯度

透 镜	Q_1, Q_3	Q_2	Q_4, Q_6	Q_5	Q_7, Q_9	Q_8	Q_{10}, Q_{12}	Q_{11}
磁场梯度 (高斯/厘米)	362	323	785	481	859	512	886	529
透 镜	Q_{13}	Q_{14}	Q_{15}	Q_{16}	Q_{17}			
磁场梯度 (高斯/厘米)	713	891	1149	1517	1567			

在这种工作模式下，束流在系统中的传输包络如图 3 所示。这里我们只画出了弱束流 $I \approx 0$ 毫安、60 毫安和 120 毫安时的包络，其他束流强度下的包络曲线与此类似。在聚束器之前和之后，束流的最大半包络分别出现在透镜 Q_{11} 和透镜 Q_{16} 中，我们以 $a_{\max}^{(11)}$ 和 $a_{\max}^{(16)}$ 表示这两个最大半包络值。当运行流强从 $I \approx 0$ 增大到 $I = 200$ 毫安时，这两个最大半包络的变化如图 4 所示。为清楚起见，我们间隔 20 毫安取值列在表 4 中，由这些数

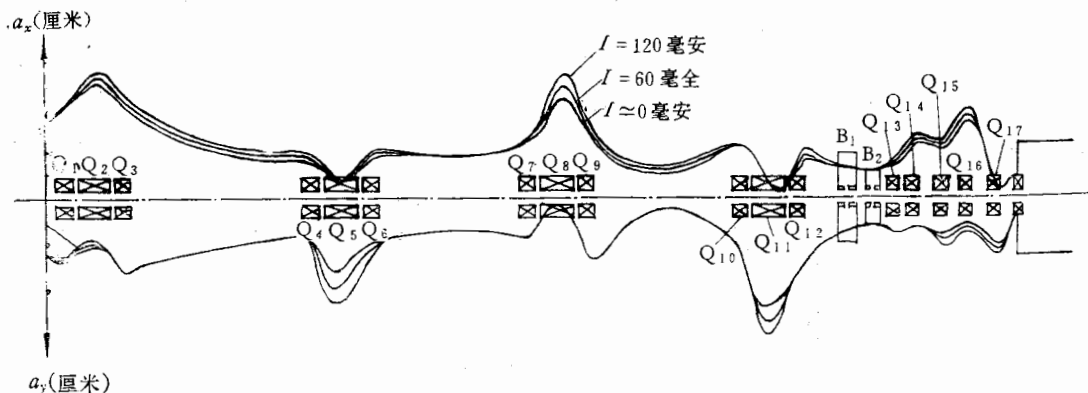


图 3 束流在系统中的传输包络

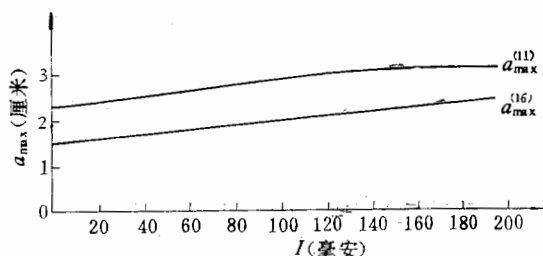


图 4 束流最大包络值与运行流强的关系

据可以看出,束流强度每增加 20 毫安时,束流最大包络的增长量同弱流包络之比大约为 5% 左右。

由表 3 和表 4 所列的数据可以看出,我们所设计的透镜孔径、真空管道内径以及透镜的磁场梯度范围足够容纳 200 毫安的束流强度。

表 4 束流最大包络的典型数据

I (毫安)	~0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$a_{\max}^{(11)}$ (厘米)	2.38	2.47	2.61	2.72	2.77	2.84	2.99	3.10	3.21	3.31	3.26
$a_{\max}^{(16)}$ (厘米)	1.51	1.59	1.68	1.76	1.84	1.92	2.01	2.10	2.17	2.28	2.40

II. 空间电荷效应对聚束的影响及其补偿方法

在纵向,我们以 Z 表示粒子的绝对坐标, Z_c 为标准粒子的纵向位置,非标准粒子相对标准粒子的规一化位置偏移为 $z = (Z - Z_c)\sqrt{r^3\beta}$. 其中 $r = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$; $\beta = \frac{v}{c}$, v 是标准粒子的速度, c 是光速. 在相平面 (z, z') 上描写粒子的聚束, $z' = \frac{dz}{dZ_c}$ 称为聚束

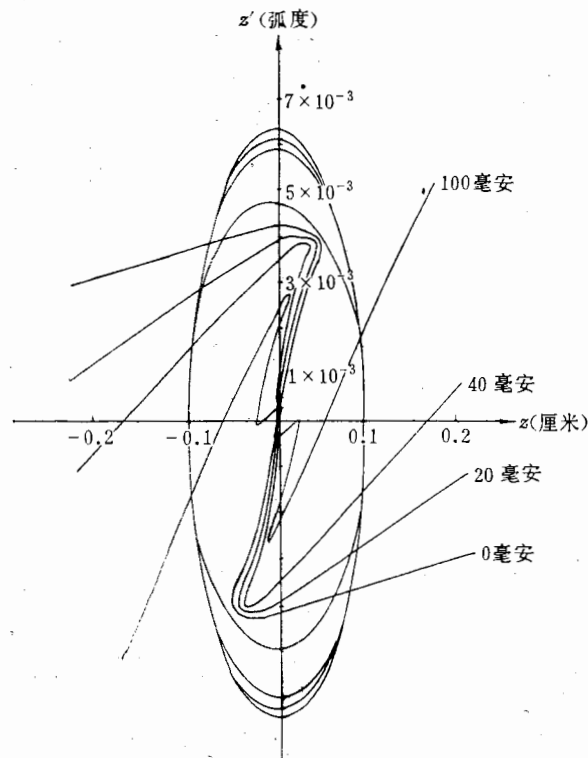


图 5 不同运行流强下的纵向注入匹配

的速度. 不难证明 z 和 z' 还可以表示为:

$$z = \frac{\gamma^{3/2} \beta^{3/2} \lambda}{2\pi} \Delta\phi; \quad z' = \frac{\gamma - 1}{\gamma^{3/2} \beta^{3/2}} \left(\frac{\Delta W}{W_c} \right). \quad (1)$$

其中 $\Delta\phi = \phi - \phi_c$ 、 $\Delta W = W - W_c$ 分别为非标准粒子与标准粒子之间的相位差和能量差.

在这里, $W_c = 750\text{keV}$, $\gamma = 1.0008$, $\beta = 0.03996$; 加速腔和基频聚束器的工作波长 $\lambda = 148.97$ 厘米 (频率为 201.25 兆赫); 加速腔的初始平衡相位为 $|\phi_c| = 35^\circ$, 初始平均加速场强为 1.55mV/m . 纵向线性接收度可以近似为一正椭圆, 半宽度为 $|\Delta\phi|_{\max} = 35^\circ$, 半高度为 $|\Delta W|_{\max} = 60\text{keV}$. 我们在设计中打了一个保险系数, 在线性接收度内取了一个较小的相椭圆作为弱流 ($I \approx 0$) 匹配发射度, 它的半宽度和半高度分别为 $|\Delta\phi| = 30^\circ$ 和 $|\Delta W| = 50\text{keV}$. 在考虑到加速腔的纵向接收度高度 $|\Delta W|_{\max}$ 随束流强度的增加而逐渐减小的条件下, 我们得到了如下的结果:

系统在弱流情况下的聚束效率为 $\eta = 80\%$. 当运行流强增大时, 在聚束漂移过程中, 束团边缘的粒子受到中心区越来越密的电荷的排斥而使聚束的速度 $|z'|$ 减小. $|\Delta\phi|$ 越大的粒子受到的排斥越强, $|z'|$ 减小得越快. 以致于当 $|\Delta\phi|$ 大到一定程度时, z' 会反转符号, 变为散束, 如图 5 所示. 为了补偿空间电荷造成的这种聚束速度的减小, 一方面要求聚束电压随运行流强而增加, 给粒子以较大的初始聚束速度; 另一方面, 聚束漂移距离不宜选得过长, 应尽量减少空间电荷的散束作用时间. 但是由于工艺上安放辅助元件对空间的要求. 我们的聚束漂移距离选得长了一些, 这对于克服空间电荷效应是一个不利因素. 计算结果表明, 在表 2 所列的漂移距离下, 使聚束器的有效聚束电压 V_1 和 V_2 按照图 6 所示的曲线随着通过聚束器的束流强度上升, 可以达到对空间电荷效应的最佳补

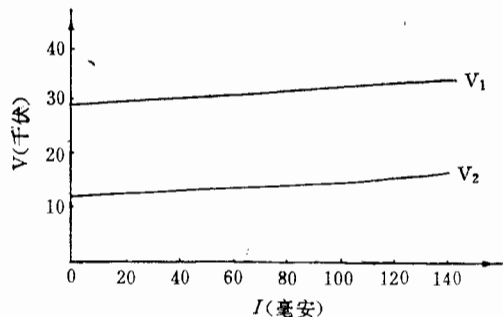


图 6 聚束电压随运行流强的调节曲线

$V = V_0 I$ 为有效聚束电压幅值.

偿. 在此情况下, 聚束效率 η 随束流强度的变化曲线如图 7 所示. 在通过聚束器的束流强度不超过 140 毫安时, 聚束效率随着流强的增长很缓慢地下降. 流强每增加 20 毫安, 聚束效率大约只下降 1%, 例如在 $I = 100$ 毫安时, 还可以有 75% 的聚束效率. 由于本系统的聚束漂移距离受机械结构的限制不能缩短到最佳值, 估计在通过聚束器的束流强度超过 140 毫安时, 聚束效率会较快地下降, 不过这已超出了本直线加速器的预定指标.

此外, 我们还计算了预注入器输出能量的波动对束流注入的影响. 结果表明, 在束流强度为 100 毫安时, 预注入器输出能量波动 $\pm 0.1\%$ 左右将不会导致注入效率的下降, 这时的注入相图如图 8 所示.

本文计算所使用的计算程序叫《PL(1)》程序^[2]. 它是根据我们在文[1]中所阐述的理论和公式编写的, 孙广礼同志在程序编排和计算操作方面进行了很好的协作, 在此表示

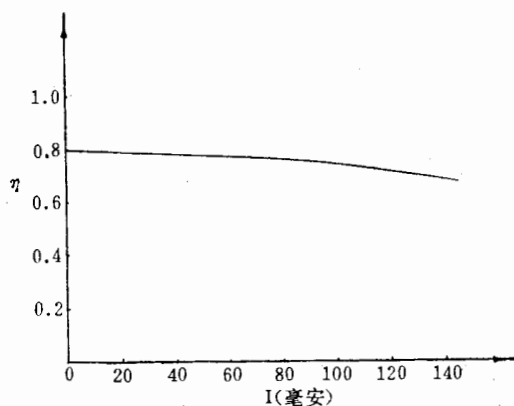
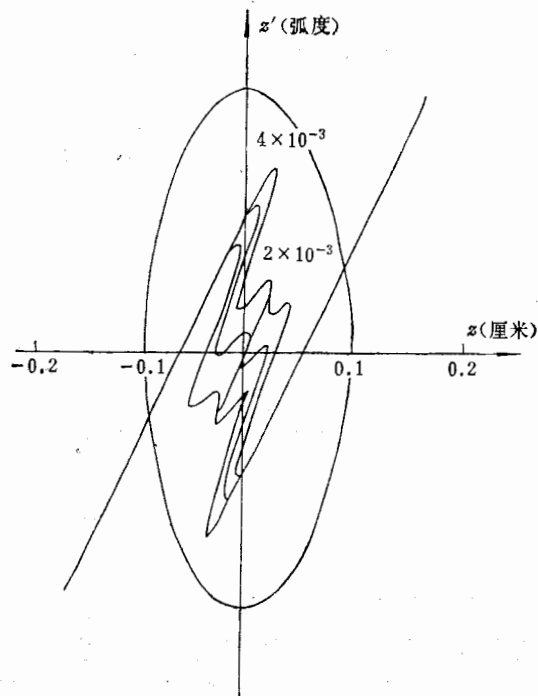


图 7 聚束效率随运行流强的变化

图 8 束流能量波动 $\pm 0.1\%$ 时的注入相图

感谢.

参 考 文 献

- [1] 魏开煜、林震华, 高能物理与核物理, 4(1980), 555.
 [2] 魏开煜、孙广礼、林震华, 低能强束流运输系统计算程序《PL(1)》汇编, 中国科学院高能物理研究所, 1981年9月. 中国粒子加速器学会第一次粒子动力学讨论会报告, 1981年11月.

THE DESIGN AND STUDY OF SPACE CHARGE EFFECT FOR THE BPL 750keV BEAM TRANSPORT SYSTEM

WEI KAI-YU LIN ZHEN-HUA

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The design of the BPL 750keV beam transport system and the study of beam space charge effect in this system are described. This system has been constructed and operated in December 1982. The beam-transfer efficiency of the quadrupole system reached 66.7%. The first buncher operated in 1983, and the beam bunching efficiency is about 60%.