

北大 4.5 MV 静电加速器 束流脉冲化系统

吕建钦 全胜文

(北京大学重离子物理研究所, 100871)

4.5 MV 静电加速器是北大设计和建造的单级静电加速器。为了能够利用飞行时间法进行中子能量测量, 需要把连续束变成短脉冲束。为此, 在该器上配置了束流脉冲化系统。文章主要介绍 4.5 MV 静电加速器束流脉冲化系统所采用的 9 MHz 射频聚束器和 1.5 MHz 射频切割器及有关的电子学线路、粒子纵向运动的模拟、对横向聚焦的要求。实验结果表明, 可以获得的脉冲宽度为 1.8 ns。

关键词 切割 聚束 脉冲宽度 纵向运动

为了在静电加速器上产生短脉冲离子束, 常常采用两种方法: 第一种是由 Mobley 所提出的磁压缩系统^[1,2]。这种系统由一个偏转磁铁和一对高频扫描板组成。设置在物平面处的扫描板使走在前面的粒子在磁铁中飞过较长的路径, 而使走在后面的粒子在磁铁中飞过较短的路径。这样, 处在某一束段中的所有粒子几乎可以同时到达设在象平面处的靶上。一般, 磁压缩系统需放在加速器的高能端, 因此偏转磁铁就需要做得非常大, 高频扫描功率也要很大, 从而整个系统的造价较为昂贵。第二种为速调管聚束器^[3,4]。这种聚束器的基本思想是, 当粒子穿过聚束器的射频间隙时, 相位超前的粒子受到减速, 相位滞后的粒子受到加速。这样再经过一个适当的漂浮距离后, 所有粒子将会落在一个很小的相区间内, 形成短脉冲。速调管聚束器具有结构简单造价低廉之优点, 较为适合放在加速器的低能端。速调管聚束器也有不同的类型。一种是三电极双间隙聚束器。这种聚束器的结构简单, 但是聚束效率较低 (< 30%)。为了提高聚束效率, 有些加速器采用双漂移谐波聚束器^[5,6]。它是由两个三电极速调管组成。第一个速调管工作频率为 f , 第二个速调管的工作频率为 $2f$, 两个信号间的相位差约为 180° 。适当调整两个速调管之间的距离和它们到靶之间的距离之比, 可以大大增加聚束器的线性工作范围, 使聚束效率可达 60% 左右。但是这种聚束器较为复杂, 调整参数多, 而且占有较多的空间, 不适合装在高压电极头部。虽然我们已经在实验台上做过双漂移聚束器的实验^[7], 基于以上原因, 没有把它装到加速器的头部。还有一种单狭缝谐波聚束器^[8,9], 用四个谐波逼近锯齿波, 以便提高聚束效率。由于其结构上的复杂性, 工作频率高, 也不适合装在高压电极内。

收稿日期: 1993-11-22 收到修改稿日期: 1994-03-28

比较各种聚束系统的优缺点,该器采用了结构较简单的三电极聚束器。

1 束流脉冲化系统的描述

1.1 切割器

如上所述,三电极聚束器的效率只有 25%—30%,即只有那些相宽处在 $\pm 60^\circ$ 之内的粒子,才有可能聚在一起。因此,在系统中我们设置了切割器,先把连续束切割成具有一定相宽的束段,再进行聚束。因为聚束器的工作频率为 9 MHz,切割器产生的束流脉宽应能处在聚束器的线性工作范围,约为 37 ns。切割器的频率取 1.5 MHz,所需要的切割电压幅度 V_m 应满足以下关系:

$$V_m = 2E_0gb/[lS\sin(\omega\tau_c/2)] \quad (1)$$

式中, E_0 为粒子的能量; $b = r_0 + a$, r_0 为切割孔的半径, a 为切割孔处束流的半宽度; τ_c 为切割后的脉冲宽度。其它参数示于图 1。利用式(1)可求得切割电压幅度 $V_m \approx 1.44$ kV。

1.2 聚束器

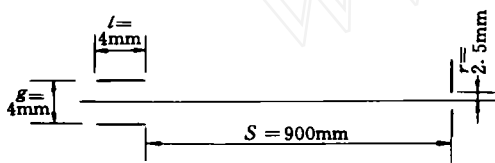


图 1 扫描切割器
Fig.1 Beam chopper

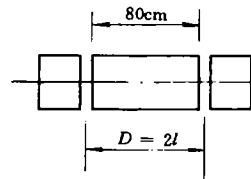


图 2 三电极聚束器
Fig.2 Three-electrode buncher

聚束器的结构示于图 2,中心电极的长度为 80 mm,两端电极的长为 20 mm,高频间隙的宽度为 3 mm。聚束器两间隙之间的距离应满足 $D = 2l = 0.5\beta cT$,其中 βc 为粒子的速度, T 为聚束信号的周期。根据二维线性聚束理论^[10],聚束后的束流脉宽为

$$\tau_b = T\epsilon_0/(\pi\epsilon_m) = \epsilon_0F/v_0 \quad (2)$$

其中, ϵ_0 为初始能散度, ϵ_m 为能量调制系数, F 为纵向焦距, v_0 为粒子的速度。在静电加速器中,束流经过聚束器的调制以后,要经过一个低能漂移段 L_1 ,再经过长为 L_a 的均匀电场的加速,然后还要经过一个高能漂移段 L_2 ,才到达靶点。因此,式(2)中的焦距 F 应当是总的等效漂移距离,即

$$F = L_1 + L_{ac} + L_{2c} \quad (3)$$

其中,

$$L_{ac} = [2L_aE_0/(E_t - E_0)](1 - \sqrt{E_0/E_t}) \quad (4)$$

式中, E_0 为初始能量, E_t 为加速后的能量。

$$L_{2c} = L_2 \cdot (E_0/E_t)^{3/2} \quad (5)$$

在该情况下, $L_1 = 24$ cm, $L_a = 348$ cm, $L_2 = 15$ m。若吸极电压为 25 kV,在不同加速电压下,聚束器的等效焦距列于表 1。

表1 聚束器的等效焦距

Table 1 The effective focusing length of the buncher

E_i/MeV	L_{11}/cm	L_{oc}/cm	L_{2c}/cm	F/cm
2.0	24	7.70	2.06	33.8
2.5	24	6.27	1.48	31.8
3.0	24	5.27	1.13	30.4
3.5	24	4.55	0.90	29.5
4.0	24	4.0	0.73	28.7

注: $E_0 = 25 \text{ kV}$

2 对横向聚焦的要求^[11]

束流脉冲化系统在加速器中的配置示于图3。从离子源引出的束,经过单透镜的聚焦,把光腰投在切割孔处。此切割孔同时也用作正交电磁场分析器的分析缝。束流经过聚束器射频电场的调制以后,在切割孔处切去多余的前沿和后沿,之后进入均匀加速场区。加速后的高能粒子穿过两个45°的偏转磁铁进入中子实验大厅。两个四极透镜对把束流输运并会聚到靶点处。从离子源到靶点的束流包络线示于图4。

3 粒子的纵向运动

3.1 计算机模拟

设参考粒子通过聚束器中心时的相位是 ϕ_s , 在第一个间隙处任意粒子的能量增益为

$$\Delta E = Q \cdot V_m \cdot T_{if} \cdot \cos(\phi_s + \pi/2 - \omega l/v + \phi_1) \quad (6)$$

其中, Q 为离子的电荷数, V_m 为聚束波的幅度, $T_{if} = [\sin(\omega g/2v)]/(\omega g/2v)$ 为渡越时间因子, ϕ_s 为参考粒子的相位(在余弦波的情况下取 $\phi_s = -90^\circ$), v 为粒子的速度, ω 为聚束波的频率, l 为两间隙之间距离的 $1/2$, ϕ_1 为任意粒子相对于参考粒子的初始相位。在上式中粒子的能量与其相位有关系,而相位又依赖于其能量(即速度 v)。因此,这是一个超越方程,可以用迭代法求解。从第一个间隙到第二个间隙粒子经过漂浮距离 $2l$,其能量不变,而相位的变化为 $2l\omega/v$ 。在第二个间隙上,粒子的能量增益为

$$\Delta E = Q \cdot V_m \cdot T_{if} \cdot \cos(\phi_s - \pi/2 + \omega l/v + \phi_2) \quad (7)$$

其中, ϕ_2 为任意粒子到达第二个间隙时相对于参考粒子的相位。这时速度 v 是一个常数,故可以不经过迭代直接算出其能量增益。

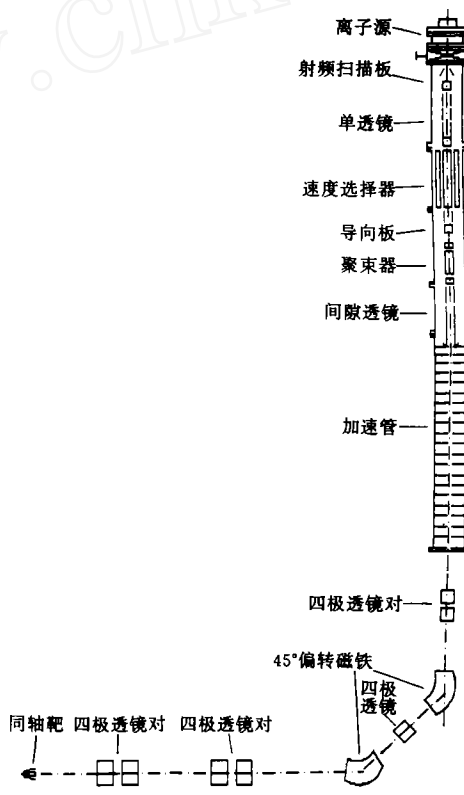


图3 4.5 MV 静电加速器光路简图

Fig. 3 Layout of the 4.5 MV electrostatic Accelerator

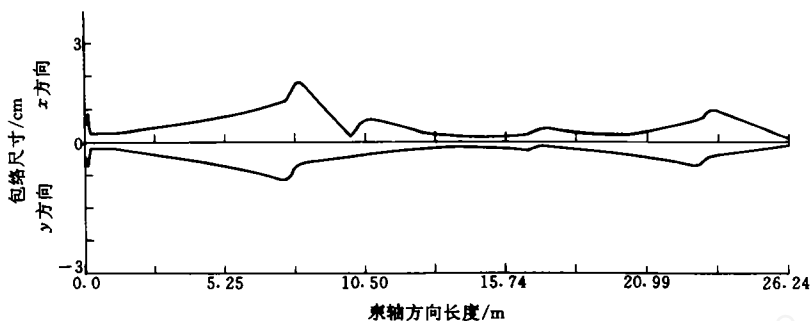


图 4 束流包络线
Fig.4 Beam envelopes

当粒子经过均匀加速场时,其渡越时间为

$$\tau = (2L_a/v) (1 + \sqrt{E_f/E_0})^{-1} \tag{8}$$

所以,在匀加速电场中,粒子的能量增益和相移为

$$\begin{aligned} \Delta E &= QE_a \cdot L_a \\ \Delta \phi &= \omega \tau \end{aligned} \tag{9}$$

其中, E_a 为加速电场, L_a 为加速管的长度。

根据以上公式,我们利用 LMOVE^[12] 程度较为详细地计算了粒子在整个加速器中的纵向运动。对于 D⁺ 束,当吸极电压为 25 kV、加速电压为 4 MV、初始能散为 ± 150 eV 时,在靶点处所得到的纵向相图、束流脉冲和能谱分布示于图 5。

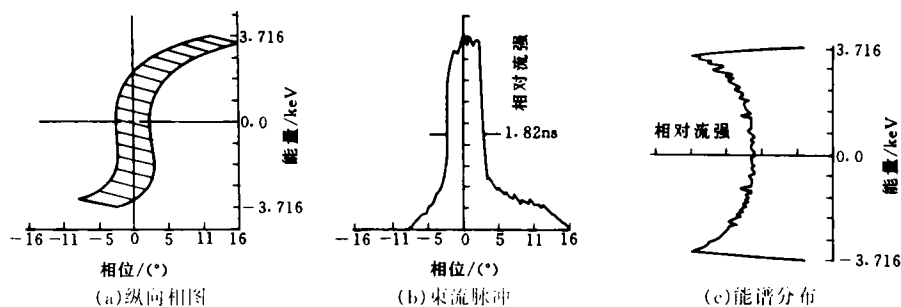


图 5 纵向运动的模拟

Fig.5 Simulations of the beam longitudinal motions

3.2 初始能散对脉宽的影响

从式(2)可以看出,聚束后的脉宽正比于束流的初始能散度 ϵ_0 。这种初始能散度来源于以下几个方面:离子源的能散,扫描切割器产生的能散,吸极和单透镜等部件的电源非稳定性所产生的能散。改善离子源的束流品质,提高各电源的稳定性,是减小脉冲宽度的有效途径之

一。高频离子源的能散约为 $\Delta E_1 = \pm 50$ eV。吸极电压一般设置为 ± 25 kV, 稳定度为 $\pm 0.3\%$, 所引起的能散为 $\Delta E_2 = \pm 75$ eV。设单透镜的聚焦电压为 20 kV, 稳定性为 $\pm 0.3\%$, 所引起的能散为 $\Delta E_3 = \pm 60$ eV。扫描切割器对能散的贡献可由下式算出:

$$\epsilon \approx 0.25(\tau_1/\tau_0)(b/s)^2 + (2A_t/v\tau_c)(1 + r_0/a) \quad (10)$$

其中, τ_1 为束流在切割板之间的渡约时间, τ_0 为切割后的时间半宽度, $b = r_0 + a$, r_0 为切割孔半径, a 为束流在切割孔处的半宽度, A_t 为束流的横向相面积。当吸极电压为 25 kV 时, 切割板产生的附加能散为 $\Delta E_4 = \pm 90$ eV。总的能散为以上各种能散的统计和, 即

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_1^2 + \Delta E_2^2 + \Delta E_3^2 + \Delta E_4^2} = 147 \text{ eV} \quad (11)$$

能散的实验测量值为 ± 150 eV。在表 2 中, 列出了在不同能散下所能获得的脉冲宽度。

表 2 不同能散下束流脉宽

Table 2 The pulse width under different energy spread

$\pm \Delta E/\text{eV}$	50	100	120	150	160	180
τ/ns	0.57	1.09	1.31	1.61	1.82	1.96
τ^*/ns	0.63	1.15	1.37	1.67	1.88	2.02

注: τ^* 为经过偏转磁铁后的脉宽

3.3 偏转磁铁束流脉宽的影响

偏转磁铁具有色散效应。它不但使得束流的横向位移加大, 还会影响束流的纵向运动, 使得脉冲宽度加大。当边缘角为零时, 若纵向相空间采用 $(\Delta\phi, \Delta E)$ 偏转磁铁的六维传输矩阵为^[13]

$$M = \begin{pmatrix} \cos\phi & R\sin\phi & 0 & 0 & 0 & R(1 - \cos\phi)/(2E_0) \\ \sin\phi/R & \cos\phi & 0 & 0 & 0 & \sin\phi/(2E_0) \\ 0 & 0 & 1 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\phi/v & R(1 - \cos\phi)/v & 0 & 0 & 1 & -R\sin\phi/(2vE_0) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

根据上式, 当能量 $E_0 = 4$ MeV, $\Delta E/E_0 = \pm 0.2\%$, $R = 40$ cm, $\phi = 45^\circ$ 时, 当束流经过两个偏转磁铁以后, 脉冲宽度的增加量约为 0.06 ns。

4 高频电子学线路

系统的高频电子学线路如图 6 所示。

从 1.5 MHz 晶体振荡器产生的信号, 经过放大后馈送到一个耦合谐振线路。耦合谐振线路的次级线圈接到扫描切割器的两个电极板上。

聚束器的功率源, 是把从晶振发出的 1.5 MHz 信号, 经过 2 倍频和 3 倍频放大, 变成 9 MHz 的信号, 再经过一个 0—360° 的移相电路, 最后再经过功率放大, 馈送到聚束器的谐振匹配回路。整个系统都采用 75 Ω 同轴电缆。

保持聚束器与切割器之间的正确相位差是非常重要的。这样可以使切割后的束段处在聚

束器的线性工作范围。这个相位差可以通过调节聚焦器高频电路中的0—360°移相器来实现。

5 实验结果

我们利用2 MeV的P⁺束来模拟4 MeV的D⁺束。在靶点处直流束的流强为10 μA。适当调节聚焦功率和切割功率以及两者之间的相位,可以获得重复频率为3 MHz、半高宽为1.8 ns的脉冲束,其结果示于图7。脉冲束的峰值流强为200 μA,大约为直流束高度的20倍。脉冲束的平均流强为1.2 μA。

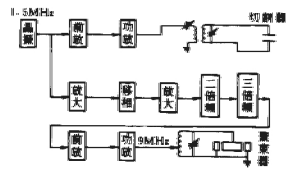


图6 高频电子学线路
Fig. 6 RF electronics system

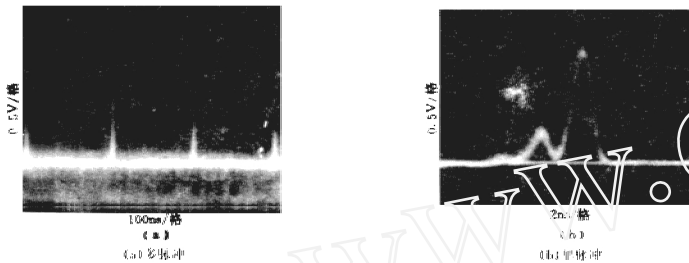


图7 脉冲波形
Fig. 7 Pulse wave forms

本项工作得到陈佳洱院士的指导,张胜群同志曾作过许多部件的制作和调整工作,张英侠、王建永、巩玲华、徐萍芳和谢大林等同志提供了许多帮助。在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Mobley RC. Variable-Path Magnetic Ion Buncher. Rev Sci Instr, 1963, 34(3):256.
- 2 Halland RE. The Designing of Bunching Magnets. Nucl Instrum Methods, 1961, 12:103.
- 3 Anderson JH. An Ion Bunching System for the 6 MV Van de Graaff Accelerator. AWRE Report O-53/66, 1966.
- 4 Arndt P, Bertchat D, Jenter W, et al. The New Van de Graaff Terminal for VICKSI. IEEE NS-24, 1977, (3):1162.
- 5 Milner WT. Double-Drift Beam Bunching Systems. IEEE NS-26, 1979, (1):1445.
- 6 Brennan JM, Chea CE, Noe JW, et al. Bunching System for the Stony Brook Tandem Linac Heavy Ion

- Accelerator. IEEE NS-30, Part 1, 1983, (4):2798.
- 7 蒋小平. 双漂移谐波聚束器的研制[硕士论文]. 北京:北京大学, 1985.
 - 8 Lynch FJ, Lewis IN, Bollinger LM, et al. Beam buncher for Heavy Ions. Nucl Instrum Methods, 1979, 159: 245.
 - 9 Storm DW, Amsbauch J, Van Wechel T. Pre-Tandem Pulsing System. NPL Annual Report. University of Washington: 1986. 121.
 - 10 陈佳洱. 静电加速器束流脉冲化系统及有关的束流品质问题. 北京大学技术物理系资料, 1978.
 - 11 吕建钦, 刘经之. 4.5 MV 静电加速器的光学特性. 第四次全国粒子加速器学术年会论文集. 北京: 1988. 182.
 - 12 吕建钦. 聚束系统计算程序. 原子能科学技术, 1992, 26:36.
 - 13 Lu JQ, Ben-Zvi I, Cramer JG. LYRAN: A Program for the Analysis of Linac Beam Dynamics, Nucl Instrum Methods, 1987, A 262: 200.

BEAM PULSING SYSTEM FOR THE 4.5 MV ELECTROSTATIC ACCELERATOR AT PEKING UNIVERSITY

LU JIANQIN QUAN SHENGWEN

(*Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing, 100871*)

ABSTRACT

The single stage 4.5 MV electrostatic accelerator was designed and constructed at Peking University, P. R. China. In order to measure the neutron energy with time of flight method, it is necessary to compress the continuous ion beams into pulsed beams. Therefore, a beam pulsing system is incorporated in this machine. The paper describes the 9 MHz rf bunching system, the 1.5 MHz rf chopping system, the relevant electronics, the simulations of particle longitudinal motions, the requirements to the transverse focusing system and the experimental results. 1.8 ns duration of beam pulse width (FWHM) at the target is observed.

Key words Chop Bunch Pulse width Longitudinal motions