

SFC 轴向注入系统和中心区的研究和设计*

唐靖宇 蒋君章 李智慧 徐向阳 王义芳 尹全民

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 介绍了在 HIRFL 注入器 SFC 上进行的中心区、聚束器系统和轴向注入束运线的设计、加工和调试结果。中心区的设计采用了两种注入半径及相应的两套螺旋式静电偏转镜,解决了高频电压在某些工作区域偏低及三次谐波加速时轴向注入线上空间电荷效应较为严重的问题。新的锯齿波聚束器系统不仅可以提高聚束效率,而且还提出了采用半频聚束模式以提高 SFC 与主加速器 SSC 的纵向匹配效率。新设计的轴向注入束运线配备了两台在线 ECR 离子源,提高了电荷态分辨能力和注入相空间匹配能力,在提高注入效率的同时还改善了离子源及束运线的工作环境和调束手段。

关键词 螺旋式静电偏转镜 聚束器 半频聚束 轴向注入

1 引言

兰州重离子加速器 HIRFL 由两台等时性回旋加速器串级组成^[1],其注入器 SFC 由原来的 1.5m 直径的经典回旋加速器全面改造为 1.7m 直径的包括 3 对螺旋扇的扇聚焦回旋加速器。改造后的注入器采用内 PIG 离子源,为 HIRFL 的整个系统联合调束和第一批物理实验做出了重要贡献。

1992 年为了将 HIRFL 加速离子的范围扩大和提高运行效率,采用了当时已较为成熟的 ECR 离子源,建造了相应的外离子源轴向注入系统^[2]。该系统在此后几年的运行中起到了很好的作用,但在运行过程中也发现了不少问题。这里介绍 SFC 轴向注入系统及中心区的改进设计工作。

2 SFC 中心区^[3,4]

自从 SFC 采用外离子源(ECR 离子源)轴向注入系统以来,它可以工作在基波加速模式下($h=1$)和三次谐波加速模式($h=3$)下,且采用同样的中心区结构和常轨道加速^[5]。由于高频 Dee 电压未能达到设计指标,致使在注入电压较高时中心区加速困难,轨道中心

1999-10-08 收稿

* 国家自然科学基金资助(19675056)

化不能得到满足. 另外, 随着 SFC 朝着加速较重离子的方向发展, 按照以前的常轨道参数设置 $\rho_0 = 2.5\text{cm}$, 注入电压 $V_{\text{inj}} = \frac{1}{2} \frac{q}{m} (B\rho_0)^2$ 会随着荷质比 q/m 的减小而减小. 但注入电压(也即离子源引出电压)太小会导致离子源引出流强的减少, 而且空间电荷效应的影响会明显加剧.

综合以上考虑, 我们对 SFC 中心区进行了重新设计. 新的中心区结构可以同时满足 $h=1$ 和 $h=3$ 的谐波加速要求, 但要采用二组常轨道加速参数, 及两个不同的螺旋线静电偏转镜和相应的屏蔽罩. 采用螺旋式静电偏转镜可以较方便地调整出口处的轨道参数, 有较好的相空间接收度, 偏转电场要求不高, 可以沿对称轴注入, 体积也不大. 缺点是加工较困难, 且当注入半径 ρ_0 改变时需换用另一套偏转镜. 在采用 $h=3$ 模式时采用新设计的静电偏转镜, 其注入半径增大为 $\rho_0 = 3.0\text{cm}$, 这样注入电压增至为原先的 1.44 倍.

中心区的电极由固定在 Dee 上和假 Dee 上的触须电极和静电偏转器的屏蔽套组成, 新的中心区设计强调两个静电偏转镜的屏蔽套对中心区电场分布的作用, 屏蔽罩的束流出口所在面与假 Dee 电极平行. 适当减小头几个加速间隙的垂直高度, 有利于防止电场向 Dee 内部渗透, 从而提高加速效率. 我们采用三维场计算程序 RELAX3D 计算其静电场分布, 中心区轨道的计算和实际结果都表明新设计的中心区的轨道中心化较好.

对于采用螺旋式静电偏转镜的中心区结构, 注入半径 ρ_0 是固定的, 一般都采用常轨道加速模式, 即 ρ_0 和通过第一加速间隙的曲率半径增量 $\Delta\rho$ 均为常数, 此亦即要求注入电压 V_{inj} 和 高频加速电压 V_D 都满足一定的关系: $V_{\text{inj}} = \frac{1}{2} \frac{q}{m} (B\rho_0)^2$ 和 $V_D = V_{\text{inj}} \left(2 + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{1}{T_1}$, 其中 T_1 为第一加速间隙的传输时间因子. 考虑到 SFC 加速粒子和能量范围很宽, 新的中心区的设计使低频率端平均曲率中心 Δx_c 略偏向正 x 轴, 而在高频率端使 Δx_c 略偏向负 x 轴, 且仍然保持较好的中心化, 但已不再是固定的常轨道加速. 这样可以尽量保持较小的加速圈数而降低了最高高频电压要求. 中心区设计参数见表 1.

从数值计算得到的径向接收度约为 $200\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$, 轴向接收度约为 $350\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$, 纵向接收度为能散 $\pm 1.5\%$ 和相宽 $\pm 8^\circ\text{—}10^\circ$ (中心区聚相后均为 $\pm 6^\circ$).

表 1 SFC 中心区参数

模式	$h=1$	$h=3$
注入半径(ρ_0)(cm)	2.5	3.0
电偏转半径(ρ_e 或 A)(cm)	6.0	7.2
曲率半径增量($\Delta\rho$)(cm)	2.355—2.925	2.402—3.036
传输时间因子(T_1, T_2)	0.92, 0.92	0.79—0.82, 0.79
最高注入电压(kV)	25	25
最高高频电压(kV)	75	75

注: $\Delta\rho$ 对应于第一加速间隙, T_1, T_2 对于第一、二加速间隙.

该中心区结构安装以后使用效果非常好, 对提高加速 Kr, Xe 等较重的离子时的束流流强起到了显著的作用, 约为 2—3 倍. SFC 引出 1.5MeV/u 的 Kr^{13-} 束达到 $1.5\mu\text{A}$, 0.77MeV/u 的 Xe^{18+} 束达到 $0.14\mu\text{A}$.

在加速比 Xe 更重的元素离子时, 希望进一步提高 SFC 注入半径(即离子源注入电压), 如 $\rho_0 = 3.6\text{cm}$. 但同一套中心区要与三套注入参数及相应的偏转镜匹配, 进一步的研究设计工作正在进行之中.

3 聚束器系统^[3,6]

原锯齿波聚束器 B0 装在 SFC 外离子源注入线上磁轭轴向孔入口处, 它用于把从 ECR 离子源引出的纵向连续束流聚成很短的束团, 从而提高注入效率. 但该聚束器系统的聚束效率不高, 经分析主要原因是基波加速时聚束电压不够和聚束波形的线性不好, 造成 SFC 引出效率下降和引出束流品质降低. 为了解决这些问题, 同时对聚束器系统重新进行了物理计算和设计.

在考虑空间电荷效应、杂散场等因素的影响时, 聚束过程的计算只能采用数值处理方法, 我们采用了带电圆盘模型编成的计算程序 SCEBUN 对聚束过程进行模拟, 同时还考虑了诸多影响聚束效率的因素, 如离子源引出能量分散的影响、空间电荷效应的影响、轴

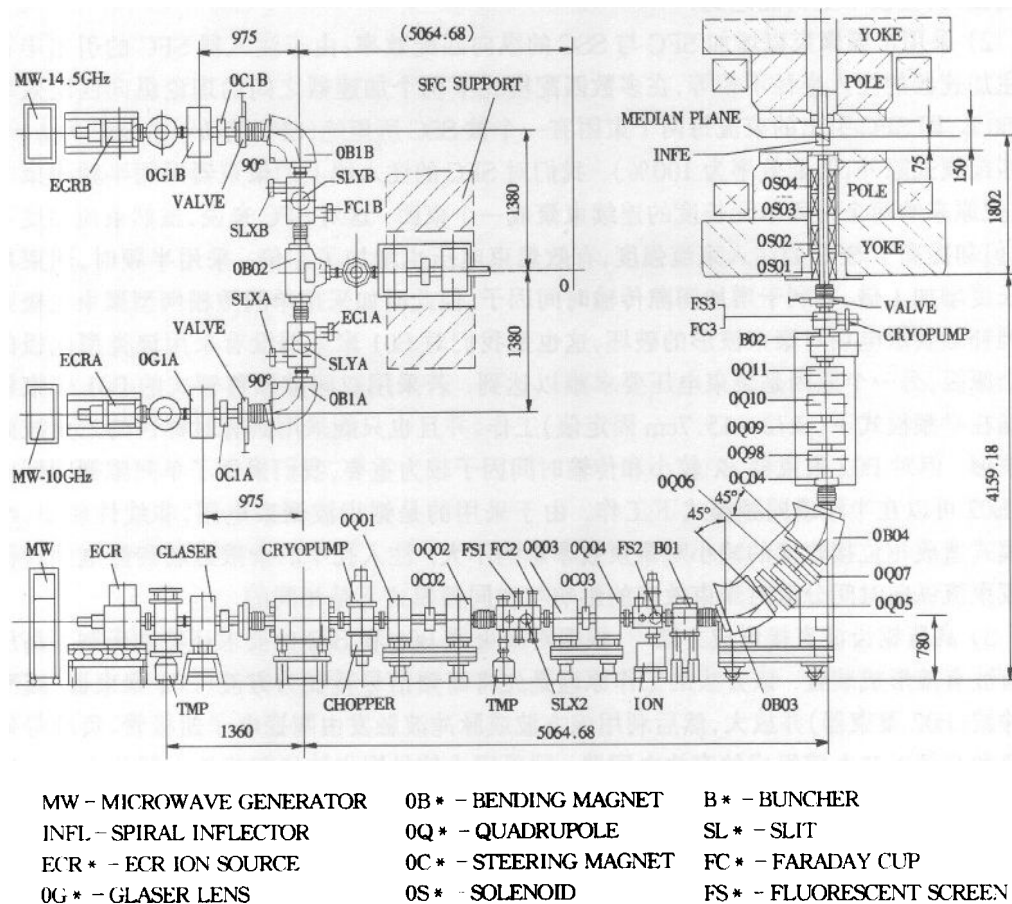


图 1 新的 SFC 轴向注入束运线

* 表示尾部字母或数字.

向孔中杂散磁场的影响、螺旋式静电偏转器的纵向相空间与横向相空间的耦合、聚束器电极杂散电场的影响等。

锯齿波聚束器的电压幅值可以表示为： $V_b = \frac{\beta\lambda}{L}\eta V_{inj}$ ，其中 L 为聚束距离， η 为聚束段占整个周期的比例。为了降低对聚束电压的要求（大幅度提高聚束电压需要较高的代价，且由于能量分散提高也不利于注入效率的提高），这里同时设计和安装了 2 台聚束器 B01 和 B02，参见图 1。 $h=1$ 时采用长聚束距离（ $L=5.4\text{m}$ ）以降低聚束电压要求， $h=3$ 时采用短聚束距离（ $L=2.535\text{m}$ ）以减小空间电荷效应的影响。在 $h=1$ 时 $\beta\lambda$ 较大，传输时间因子 $T\approx 1$ ，聚束器 B01 采用双聚束间隙漂移管式结构，这不仅增加了有效聚束电压，而且减少了由于束流打在栅网上造成的损失，但不能使用聚束效率较高的锯齿波聚束波形，而只能采用对称的三角波聚束波形。在 $h=3$ 时用的聚束器 B02 仍采用栅网电极结构，但对聚束器腔体做了重新设计。另外，新设计的聚束器系统还有以下新的优点：

1) 提高三次谐波加速时的注入电压： $h=3$ 模式时注入电压提高到原来的 1.44 倍，从而使在该模式下的抗空间电荷效应能力明显增加。尽管 B02 聚束器的电压要求也因此随之提高，但技术上仍能达到。

2) 采用半频聚束以增加 SFC 与 SSC 的纵向匹配效率：由于注入器 SFC 的引出半径和主加速器的注入半径不相等，在多数匹配模式下两个加速器之间的理论纵向匹配效率为 50%，即 SFC 引出的束流每两个束团有一个被 SSC 所拒绝（SFC 为 $h=3$ ，SSC 为 $h=4$ 的匹配模式除外，匹配效率为 100%）。我们对 SFC 的注入线上的聚束器采用半频聚束方法，把原来的两个束团单元长度的连续束聚成一个束团。这对 SFC 来说，虽然束流强度不变，但却提高了 SSC 的注入束流强度，有效聚束电压也增加了 1 倍。采用半频时，聚束单元长度增加 1 倍，有利于增加间隙传输时间因子，但此时如采用单间隙栅网型聚束电极则很难补偿杂散电场对聚束波形的破坏，这也是我们对 B01 聚束器没有采用该类型电极的一个原因，另一个原因是聚束电压要求难以达到。若采用双间隙漂移管式的 B01 聚束器只能在半频模式下（ $\beta\lambda/2=15.7\text{cm}$ 固定值）工作，并且也只能采用具有对称性的三角波聚束波形。但对 B02 聚束器 $\beta\lambda$ 较小和传输时间因子较为重要，我们采用了单间隙栅网型电极，B02 可以在半频或同频模式下工作。由于采用的是锯齿波聚束电压，非线性较小，半频模式造成相位接收度的减小对聚束效率影响不大。注入孔中的杂散磁场和静电偏转镜造成束流纵向时间分散对聚束效率的影响与在同频模式下是相同的。

3) 高压锯齿波直接形成方法^[7]：根据对聚束器 B01 和 B02 的要求还特别研制了高压锯齿波直接形成装置。该方法的工作原理是先将高频信号转变为方波（B01 聚束器）或窄脉冲波（B02 聚束器）并放大，然后利用该方波或脉冲波触发由陶瓷电子四极管、负载等效电容和高压磁芯电感组成的充放电回路。同采用小信号锯齿波经宽频放大器放大的方法相比，直接形成方法在造价相当的情况下可以得到更高的聚束电压和更好的线性指标，而且聚束段比例也可以做得比较高。

在采用新设计的轴向注入线和聚束器系统后，SFC 的注入效率得到明显地提高，在横向匹配没有改善的情况下从 3%—7% 提高到 15%—25%，聚束因子为 4—6 倍。并有更好的内束流品质，还证明了半频聚束的可行性。

4 ECR 源轴向注入束运线^[3]

原轴向注入束运线在最近几年的运行中起到了一定的作用,且在运行过程中已经对它们做了一些改进,但整个轴向注入系统还存在一些缺陷,不能满足对 HIRFL 不断提高的束流指标及粒子种类扩展的要求. 根据在加速器上的运行经验和对系统进行的全面分析,我们采取了以下改进措施:

a) 利用两块较小的 45° 偏转磁铁(曲率 $\rho = 30\text{cm}$)代替原来的($\rho = 50\text{cm}$),新的垂直偏转磁铁仅作消色差传输,而不再起电荷态分析作用.

b) 将离子源束运线调转 180° ,放到 SFC 加速器的另一侧,并同时配备 2 台 ECR 离子源(如分别是强调产生气体离子和固体离子的)和两台独立的分析磁铁、分析狭缝和测量法拉第筒,以提高运行效率. 采用 90° 的分析磁铁($\rho = 50\text{cm}$)可将电荷态分辨率提高到 $1/65$ (与偏转磁铁 0B02 配合可达到 $1/125$).

c) 从离子源引出后立即进行电荷态分析,使后面的束流管道可较少受到离子溅射污染,有利于提高真空度,并可减小空间电荷效应的影响.

d) 将束流管道平均真空度提高到动态 $1.5 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 水平,有利于较重和很重离子的传输^[8].

e) 在注入束运线的水平段增加一台脉冲束流调制器(Chopper),可以对束流占空比进行调制,以满足某些物理实验及加速器调束和安全控制的需要.

f) 束流发射度限制:用于电荷态分析的水平限制狭缝和一个相邻的垂直狭缝还可以用来对离子源引出束流的发射度进行限制. 当引出束流特别高时,空间电荷效应将限制束运线所能接收的流强. 此时通过减小狭缝不但可以减小流强,同时可减小束流发射度,还可以提高与加速器中心区的匹配效率,即注入效率.

束运线的布局见图 1. 初步的运行显示新的注入束运线基本达到了设计目标. 但还存在一些问题有待解决,如 SFC 杂散磁场对从 ECR 源到垂直注入段的束流传输效率影响较大(目前仅为 $40\%—60\%$,理想是 $60\%—80\%$),轴向注入孔中的 4 台螺线管的设计有待进一步改进.

参考文献(References)

- 1 WEI B W. In: Martin B, Ziegler K ed. Proceedings of 12th International Conference on Cyclotrons and Their Applications. Singapore: World Scientific Publishing Co., 1989. 9—12
- 2 YE F, MA Z R, YIN Q M et al. In: Dutto G, Craddock M K ed. Proceedings of 13th International Conference on Cyclotrons and Their Applications. Singapore: World Scientific Publishing Co., 1993. 78—81
- 3 TANG J Y. Ph. D. Thesis. Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences(in Chinese), 1997. 2
(唐靖宇. 博士论文. 中国科学院近代物理研究所, 1997 年 2 月)
- 4 TANG J Y, ZHAO X Q. In: Cornell J ed. Proceedings of 14th International Conference on Cyclotrons and Their Applications. Singapore: World Scientific Publishing Co., 1995. 206—209
- 5 MA Z R. In: WEI B W ed. Proceedings of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, Vol. 10. Beijing: Atomic Press(in Chinese), 1993. 35—40
(马钟仁. 见:魏宝文主编. 兰州重离子加速器进展报告,第 10 卷. 北京:原子能出版社. 1991. 35—40)

- 6 TANG J Y, LEI W, WANG Y F. In: CORNELL J C ed. Proceedings of 14th International Conference on Cyclotrons and Their Applications. Singapore: World Scientific. 1995. 265—268
- 7 JIANG J Z, SHI A M, XU Z et al. In: SUN G Q, LI Z D ed. Proceedings of 6th China-Japan Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications. Chengdu: Sichuan Union University. 1996. 337—340
- 8 TANG J Y, LEI W, WANG Y F. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1998, 22(7): 745—754
(唐靖宇, 雷文, 王义芳. 高能物理与核物理, 1998, 22(7): 745—754)

Study and Design of the Axial Injection System at SFC *

TANG JingYu JIANG JunZhang LI ZhiHui XU XiangYang
WANG YiFang YIN QuanMin

(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract The article presents the study and new development at SFC, the HIRFL injector cyclotron. It includes the new central region, the new buncher system and the new axial injection line. It introduces the half-frequency bunching method to increase the longitudinal matching efficiency between the injector and the main cyclotron and the special treatment for the space charge effect by using two injection parameters. The constant orbit acceleration with small variation is introduced to solve the contradiction of the lower RF voltage and less turn number. Two on-line ECR ion sources, high charge state resolving power and other improvements on the injection line have been included.

Key words spiral inflector, saw-tooth buncher, half-frequency bunching method, axial injection

Received 8 October 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China(19675056)