

# SFC新引出系统的物理设计研究\*

王义芳<sup>1)</sup> 王兵 李炳生

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 兰州重离子加速器(HIRFL)是一个回旋加速器组合系统. 它的注入器是  $K=69$  的扇聚焦回旋加速器. 在十多年运行过程中, 曾做过两次较大的改进, 使加速的束流种类及流强都有了显著的改善. 但由于SFC的引出效率比较低, 只有30%左右, 一方面损失了大量束流, 另一方面许多束流损失在引出静电偏转板上, 造成了大量出气, 破坏了真空, 难以维持长期大束流运行. 文章重新对SFC引出系统进行物理设计研究, 在真实磁场的基础上做了大量计算工作, 得到了一个新的引出系统方案.

**关键词** 引出系统 静电偏转板 磁通道 SFC

## 1 问题的提出

SFC(Sector Focusing Cyclotron)是由原有的经典回旋加速器改建而来的(图1), 它作为HIRFL(Heavy Ion Research Facility at Lanzhou)的注入器已经运行了十多年, 其间曾做过两次较大的改进: 1992年使用了外离子源ECR源替代了内离子源PIG源, 并建造了相应的注入线, 使HIRFL可加速的离子由C, N, O等轻的重离子扩展到重的重离子, 例如Ar, Kr, Xe等; 针对SFC存在的真空度很低、杂散磁场过大及高频系统存在的一些问题所造成的束流效率低, Pb, U等重的重离子难以加速等情况, 2002年前后对SFC又做了一次大的改造, 重新设计加工了真空室, 使真空度达到了好于 $1 \times 10^{-5}$  Pa的要求, 重新加工了等时性线圈和谐波线圈, 增加了磁轭厚度及磁屏蔽以减少杂散磁场对束流轨道的影响, 对高频系统也做了许多细致有效的工作. 结果表明束流强度得到了极大的改善, C, N, O的引出流强达到了 $14 \mu\text{A}$ 以上, Pb束可以引出 $1 \mu\text{A}$ , 最近还成功地加速了U束. 运行表明, 由于SFC的引出效率仅有30%左右, 束流流强提高以后, 在引出偏转板损失的束流很大, 一方面浪费了许多束流, 另一方面对引出偏转板造成损害, 真空度也很快就掉下来, 以致造成引出偏转板打火不能正常运行. 此外, 由于偏转板上活性很强, 给检修带来许多困难. 目前SFC的运行要么降低ECR源的流强, 要么利

用ECR注入线上的斩波器(chopper)来减少流强. 因此, 如何提高SFC的引出效率是一个亟待解决的问题.

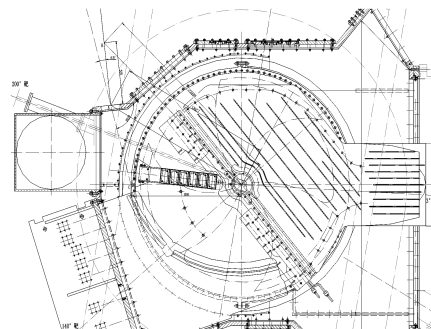


图1 SFC示意图

## 2 SFC引出存在的问题

(1) 原来引出轨道的设计计算是以引出半径平衡轨道在引出偏转板入口的束流条件为初始条件(包括磁刚度、半径及束流方向等)开始计算的. 而这与实际的加速轨道在该点(引出偏转板入口)的条件差别很大, 特别是为了实现单圈引出, 在加速过程中使用了谐波场产生进动, 其情况差异就更大.

(2) 为了解决由于计算得到的引出轨道与实际引出轨道的差异, 实际偏转板在运行过程中是可调位置的, 这尽管比较复杂(两段偏转板的入口、出口位置及入、出口极板间隙八个参数均可调), 但有利于提高

\* 兰州重离子加速器国家实验室资助

1) E-mail: wangyf@impcas.ac.cn

效率. 实际上, 由于结构非常复杂, 机械重复性差, 在引出不同种类的束流时, 偏转板位置经常保持不变, 导致引出效率的降低.

(3) 当计算的引出轨道通过SFC的引出法兰以后没有仔细研究与输运管道的轴线的匹配问题. 由于SFC周围的杂散磁场很强, 束流引出加速器外以后不是沿直线前进, 与束运管道的方向差距较大, 为此, 在调束的初期, 把束运管道的方向改变了 $4^\circ$ . 但如何使用校准磁铁达到好的匹配没有认真研究, 使束流造成一定损失.

(4) 当束流进入SFC以后, 由于注入线上聚束器的作用, 束流有一定的相宽, 在加速过程中可以在SFC小半径观察到束流分布, 但加速到较大半径以后, 束流便模糊一片. 因此, 实现束流的单圈引出是不可能的. 如果在加速器的中心区加一相位狭缝, 则有利于单圈引出.

(5) 目前, 引出静电偏转板前尚未安装探针, 束流在引出前的状态不清楚, 也造成束流的引出效率不高.

### 3 解决问题的思路

本文的目的是想得到一个有较高引出效率的引出系统. 使束流在偏转板内及与束运线结合处束流损失尽量小; 简化引出系统的操作; 找出一个比较规范的、尽量简单的调束方法以适应加速不同离子的需要. 解决问题的思路是<sup>[1]</sup>:

(1) 对于不同的离子能否在SFC半径0.5m的地方找到一个较真实的进行加速轨道计算的初始条件.

(2) 使用较规范的谐波磁场在引出系统入口得到圈间距足够大的引出束.

(3) 在保证引出能量与要求能量差异不大的情况下固定引出半径实现单圈引出.

(4) 固定引出元件位置(两段静电偏转板或一段静电偏转板加一个磁通道), 适当加大元件孔径. 看能否在运行过程中始终固定元件位置.

(5) 引出束引出SFC后, 到达束运线上校准磁铁的中心, 并通过该磁铁校准到束运线的轴线上.

### 4 计算过程

#### (1) 加速轨道初始条件的确定

以实际测磁数据处理得到的等时性磁场分布为依据(也就是实际运行时使用的磁场), 从SFC的0.5m半径开始计算加速轨道直到引出静电偏转板的入口位置(其半径由所要求的能量定, 角度为 $68^\circ$ ).

在加速过程中, 中心化的加速轨道造成的能散最小, 是最理想的. 这也是在研究加速器的注入、引出轨道时经常使用的方法. 但在实际计算中表明, 对于SFC来说, 严格的中心化的轨道并不存在. 其原因是SFC是三扇的螺旋扇回旋加速器, 使用了 $180^\circ$ 的Dee盒, 它们的相对位置没有对称关系(图1). 为了对不同的加速离子给出一个比较规范的初始条件, 对不同的离子在半径0.5m,  $0^\circ$ 处计算了平衡轨道, 得到在该点相应的磁刚度和离子方向. 并以此点为始点, 开始加速轨道的计算.

计算了3种离子( $^{40}\text{Ca}^{12+}$  5.8MeV/u,  $^{16}\text{O}^{6+}$  8MeV/u和 $^{20}\text{Ne}^{7+}$  7.2MeV/u)的加速轨道. 结果表明, 第一圈加速轨道在 $3^\circ$ ,  $140^\circ$ 和 $200^\circ$ 处的径向位置对3种离子来说分别几乎相同. 就是说在调束时可以利用在这3个角度上的径向探针观测束流, 通过调节注入反射镜的电压及1#和2#谐波线圈(其半径范围都在0.5m以下)的电流、相角以达到所要求的径向位置. 此后所计算的加速轨道即为所要求的加速轨道.

#### (2) 在引出偏转板入口产生足够大的圈间距

SFC是扇聚焦等时性回旋加速器, 引出的平均半径为0.75m, 在4个半径位置各安装了一组谐波线圈, 用以改变束流轨道的形状. 加在3个谐波线圈上的电流满足关系式:

$$I_a = I \cos \varphi, \quad I_b = I \cos(120^\circ + \varphi), \quad I_c = I \cos(240^\circ + \varphi),$$

其中 $I$ 和 $\varphi$ 分别为需给出的电流和相位值,  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ 分别为3个线圈的实际电流值(a, b, c是从 $0^\circ$ 开始按顺时针方向定义的3个谷的位置). 当计算的第1个离子加速若干圈后在 $68^\circ$ 时达到所需要的能量后, 发现束流的圈间距很小, 不可能实现单圈引出, 此时投入位于大半径处的4#(半径范围为693—807mm)谐波磁场, 通过调节其电流大小及相位角, 以增加在偏转板入口的圈间距, 达到单圈引出的目的. 同样, 计算其它离子的轨道并使用4#谐波磁场, 使引出束有足够大的圈间距, 并微调Dee电压, 使束流在引出静电偏转板入口有相同的半径. 结果表明, 对于这3种离子使用了约100A的幅值电流,  $280^\circ$ 左右的相位角后, 在引出半径的圈间距均大于9mm, 完全可以实现单圈引出. 而且, 此时束流的引出能量与所要求能量之间的差异很小, 均在 $\pm 0.3\%$ 以内.

#### (3) 引出轨道的计算

对于引出系统的设计, 进行了两个方案的计算:

a) 使用两段静电偏转板: 放置两段静电偏转板, 计算了几种离子的引出轨道使其通过校准磁铁中心.

从半径为 0.5m 开始计算到引出系统入口的 3 种离子束的 6 条轨道 (Ne, Ca, O 的加速圈数分别为 76 圈和 88 圈) 相对于静电偏转板孔径中心的偏离. 两段偏转板的有效孔径分别为 10mm 和 11mm, 在两段偏转板内的最大轨道偏离分别约为 3.5 和 10mm. 对于第一段还可以接受, 第二段则不可能, 而且此时加在第二段静电偏转板上的电压有时要达到近 140kV 也是不可接受的.

b) 使用一段静电偏转板和一个磁通道<sup>[2]</sup>: 同样, 我们放置了一段静电偏转板和一个磁通道, 做了引出轨道的计算, 所有引出轨道最后通过了校准磁铁中心. 3 种离子的轨道相对于静电偏转板和磁通道机械中心的偏离分别如图 2 所示. 可见, 当静电偏转板和磁通道有效孔径分别为 10mm 和 25mm 时, 3 种离子的引出束的中心轨道偏离元件中心的尺寸还是可以接受的. 计算了两个元件都没有加径向聚焦梯度, 静电偏转板

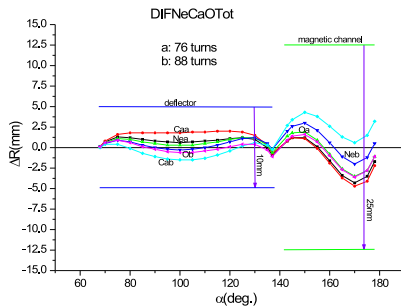


图 2 几种束流在引出元件中的轨道与元件中心的偏离

加 0.1kV/mm<sup>2</sup>、磁通道加 0.05Tesla/m 梯度时束流在进出口的接受度. 表明当两个元件有梯度场存在时, 引出系统的接受度增加了许多, 约有 30πmm·mrad, 大于 SFC 引出束 24πmm·mrad 发射度, 不需要移动引出元件位置, 就能得到较好的引出效率. 此时, 3 种束流经过引出法兰时偏离法兰中心左侧约 7mm, 而且在校准磁铁中心与束运线轴线之间的夹角很小 (< 1°), 很容易被该磁铁校正过来.

## 5 总结

在实际场下对 3 种离子的加速轨道和引出系统进行了设计计算. 结果表明, 在使用了 4# 谐波线圈后, 在一个固定的引出半径, 在保证引出能量的情况下, 有足够的圈距实现单圈引出; 引出系统由一个静电偏转板和一个磁通道组成, 由于其有较大的间隙, 且有一定的梯度, 以至于有较大的接受度, 这一方面可以有较高的引出效率, 另一方面在以后的运行中有可能使引出元件位置固定, 方便调束; 这个设计考虑了与束流输运线的匹配, 减少了束流损失; 新设计中考虑了在静电偏转板入口前安装一个活动的微分靶, 并在两元件入口各安装一固定探针, 对调束也是有好处的.

结合 SFC 的垂直注入线与 SFC 的六维相空间匹配、中心区的接受度及引出系统的接受度等考虑, 下一步应进行多离子跟踪计算研究 SFC 的引出效率.

## 参考文献(References)

- 1 WANG Y F. Designing Calculation of Injection and Extraction System of SSC. In: Proceedings of the Third Japan-China Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications. 1986, 181—183
- 2 Goto A, Hatanaka K, Ikegami K et al. Injector AVF Cyclotron for RIKEN Ring Cyclotron. In: RIKEN Accelerator Progress Report. 1987, 21: 210—211

# Physical Design of the New Extraction System for SFC\*

WANG Yi-Fang<sup>1)</sup> WANG Bing LI Bing-Sheng  
(Institute of Morden Physics, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** The HIRFL (Heavy Ion Research Facility at Lanzhou) is a cyclotron complex. Its injector is a sector focusing cyclotron with  $K=69$ . Since the HIRFL started the operation in 1989, two bigger items of improvements have been finished, the species and intensity of the accelerated particles are increased obviously. But due to the lower extraction efficiency of the SFC, on one hand, a lot of beam lost, and on other hand, outgas from the surface of the electrostatic deflector is serious because of beam hitting. Even sometimes the vacuum press is destroyed. In the paper a new physical design is made to get an extraction system of the SFC with a higher efficiency.

**Key words** extraction system, electrostatic deflector, magnetic channel, SFC

\*Supported by National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou

1) E-mail: wangyf@impcas.ac.cn