

扇聚焦等时性回旋加速器性能的改进和提高

叶 峰 马钟仁 尹全民 朱学正 乔庆文 郭敏燕 王义芳

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 安装了ECR离子源及其外注入系统后,增加了离子种类、提高了束流强度。扇聚焦等时性回旋加速器(SFC)主要工作点分布于三次谐波加速区域,为了匹配外注入系统,仔细地研究了中心区,重新设计加工了D盒及假D。为了改进SFC性能,提高运行效率,同时进行了其它改进工作。介绍了改进后的SFC的调束工作。

关键词 回旋加速器, ECR离子源, 中心区

兰州重离子研究装置(HIRFL)的注入器是一台由原1.5m经典回旋加速器改建而成的1.7m扇聚焦等时性回旋加速器(SFC),其能量常数 $K=69$ 。在使用径向插入的PIG离子源的情况下,于1987年先后调试引出 C^{4+} 和 O^{5+} 束流,并提供给主加速器SSC调束与运行。为了增加离子种类和束流强度,提高运行效率,安装了ECR离子源及其外注入系统,并于1992年5月投入运行;为匹配外注入系统,对SFC其他系统也进行了大量的改进工作。本文对SFC的改进设计、调试和调束进行了较详细的介绍。

1 ECR离子源及其束运线

从法国CENG实验室引进的ECR离子源是一种紧凑型的Caprice型(图1)。为了产生更重的离子,在认真调试的基础上,对该源的第一级进行了一些探索性修改。调试及计算结果均表明:圆锥形铁环在第一峰的形成中起着非常重要的作用,该环的位置沿轴向方向可以调节,以便对不同离子种类选取最佳位置,但是这种移动只能改变峰的位置而不能改变其形状。当我们把该环截短并变得更尖时,峰的形状变得更窄了(图2)。其结果是第一,第二级之间距离变得小了一些,使等离子体比较容易从第一级进入第二级。用He作为掺入气体的 Ar^{8+} 最佳谱分布示于图3,值得注意的是,其好处主要来源于第二级中等离子体电荷态分布的改善。这提示我们:由于两级之间距离变短而使第二级更容易从第一级得到更多的初步电离的等离子体。表1给出了用新环引出束流的结果,为了对照,用原来环产生的束流值也列于每个对应值的左上角。很显然,对于Ne、Ar离子束流值一般增加1.5—2倍^[1]。

束流从SFC的磁轭底部注入到中心平面。由于地下室空间及加速器地基的限制,给ECR源至SFC的束运线的设计、安装带来了许多困难。用TRANSPORT程序计算并设计了该束线,最后选取方案示于图4。该束运线中只选用了磁元件。首先用两个Glasser透镜将束流聚焦至 90° 垂直消色差偏转节,该节由两个 45° 偏转磁铁和一个3组合四极透镜组成。该节也作为电荷态选择装置,其分辨能力 $Q/\Delta Q$ 为20;之后4个四极透镜用于相空间匹配,再用

收稿日期:1992-10-21, 修回日期:1993-02-24

SFC磁极孔道中的四个螺旋管线圈来匹配SFC的接受度。最后,用螺旋形静电偏转器把束流送入初始加速轨道。束运线真空度好于 5×10^{-5} Pa,沿线装备了法拉第筒、多丝探测器等束流诊断元件。束运线的束流包络示于图5。

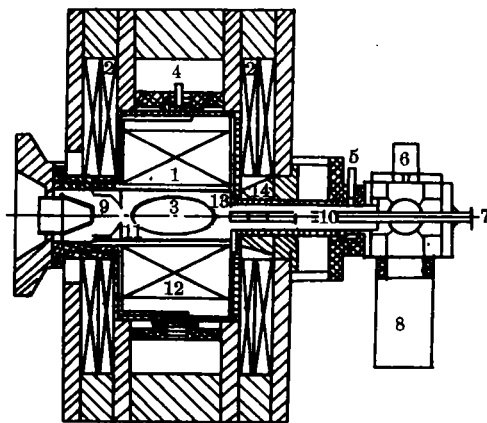


图1 ECR离子源

1. 磁铁, 2. 螺线管, 3. ECR源表面, 4,5. 冷却水进出口, 6. 波导管, 7. 工作气体入口, 8. 分子泵, 9. 引出, 10. 气体管, 11. 等离子腔, 12. 磁铁支座, 13. 石英管, 14. 锥形环

Fig.1 ECR ion source Caprice

1. Magnet, 2. Solenoids, 3. ECR surface, 4,5. Entrance and exit of cooling water, 6. Wave guide, 7. Entrance of working gas, 8. T.M.pump, 9. Extraction, 10. Gas tube, 11. Plasma cavity, 12. Assembler of magnet, 13. Quartz tube, 14. Conical ring

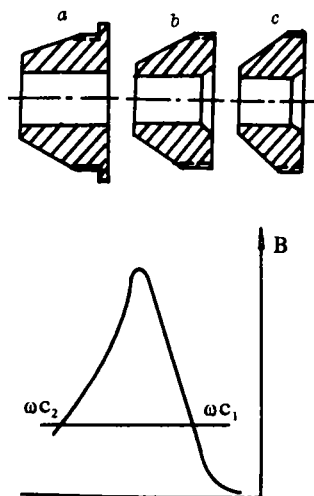


图2 锥型环和轴向磁场的分布

Fig.2 Conical iron ring and the axial field distribution

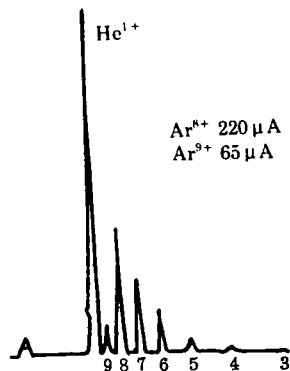


图3 掺入He气体的Ar⁸⁺谱分布

Fig.3 Ar⁸⁺ ion spectrum with He as a mixing gas

为了把ECR离子源中引出的连续束变成需要的束团,在束运线上SFC磁轭入口处设置了一台聚束器 B_0 。 B_0 是由两个平行的带有蜂房状孔洞的平板组成,两板形成了一个单加速间隙(间距5mm),它由输出锯齿波电压的RF功率源激励。其锯齿波不是由基波、二次和三

表1 用改进环得到的离子束流
Table 1 Beam current with the modified ring

	3+	4+	5+	6+	7+	8+	9+	11+	15+
O	315/390		220/220	206/205					
Ne		124/300		100/155	25.4/35				
Ar					108/183	110/220	56/105	8.2/15	
Xe									22/25

μA

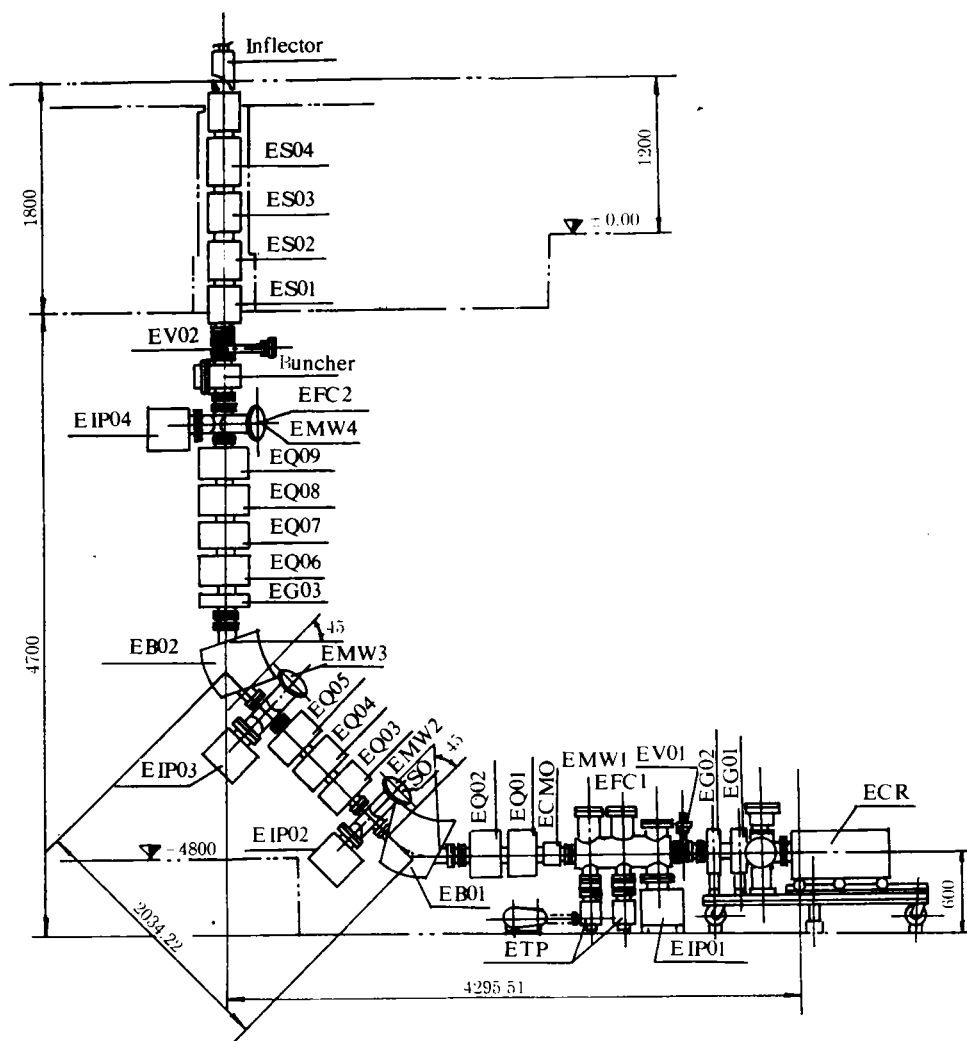


图4 从ECR离子源至静电偏转器的束运线

Fig.4 Beam line from ECR ion source to the inflector

次谐波合成, 而是直接用一个波形转换器, 把正弦波(6—18MHz)变成锯齿波。从而大大简化了相位、幅度稳定线路, 减少设备, 降低造价, 便于操作^[2]。

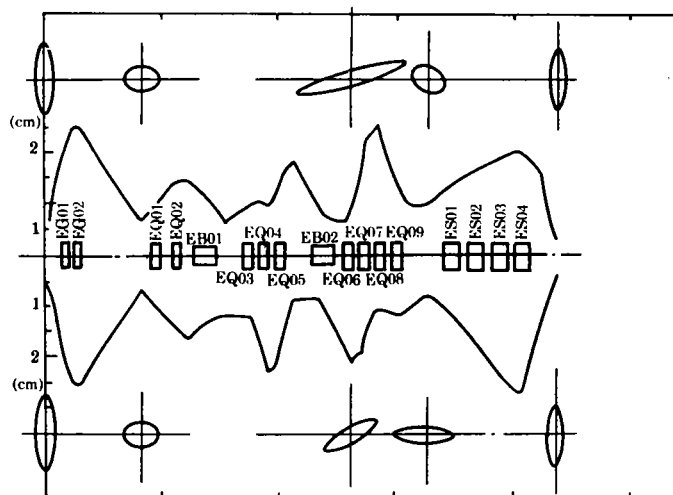


图5 ECR离子源至静电偏转器的束流包络

Fig.5 The beam envelopes from ECR ion source to the inflector

2 中心区和静电偏转器的设计

注入器SFC的主体机械结构简图示于图6。

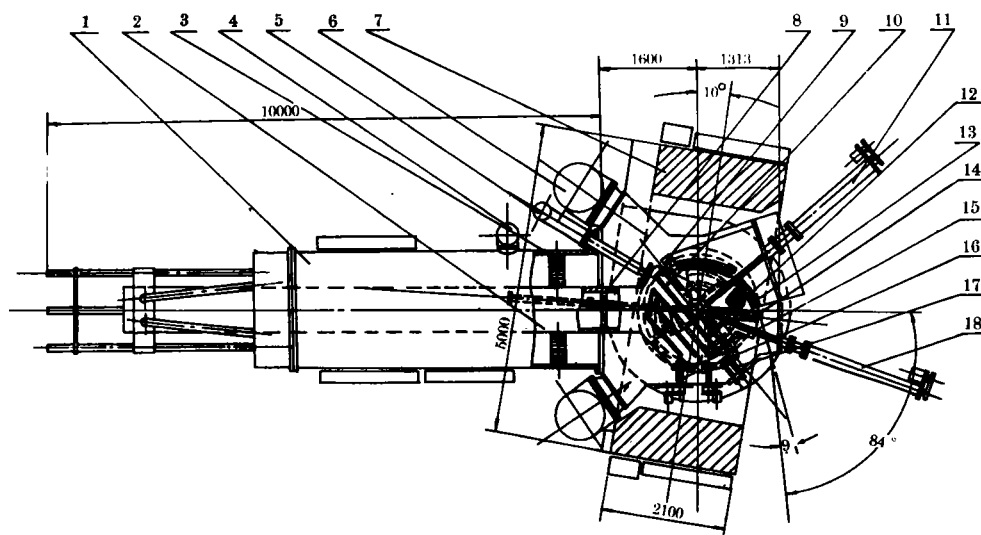


图6 SFC主体机械结构图

1. 共振线, 2. 内杆, 3. 短路片, 4. 分子泵, 5. 耦合电容, 6. 低温泵, 7. 磁铁, 8. 1号探针, 9. 假D, 10. D盒, 11. 2号探针, 12. 垫补线圈, 13. 静电偏转器, 14. 相位探针, 15. 谐波线圈, 16. 调谐电容, 17. 测量电容器, 18. 3号探针

Fig.6 The schematic of main mechanism

1. Resonant line, 2. Stem, 3. Short plate, 4. Molecular pump, 5. Coupling capacitor, 6. Cryopump, 7. Magnet, 8. No.1 probe, 9. Dummy Dee, 10. Dee, 11. No.2 probe, 12. Trim coil, 13. Electrostatic deflector, 14. Phase probe, 15. Harmonic coil, 16. Trim capacitor, 17. Measurement capacitor, 18. No.3 probe

SFC的主要参数:螺旋角 33° ;极面直径170cm;引出半径75cm;平均磁场强度1.6T;同轴线圈12对;谷线圈 4×3 对;D盒1个;D盒角度 180° ;扇块3个;频率范围6—18MHz;高频峰值电压100kV;高频功率200kW;真空度 5×10^{-5} Pa。

根据实际情况,我们使用自编的CO程序计算了SFC的中心区,同时我们又运用 GANIL的 CENTOM和 RCNP的 CENTER程序进行了计算,以此作为参考。图7给出了SFC在不同荷质比情况下的工作图。因为ECR离子源的引出电压一般限制在20kV以下,所以我们选取了A点作为典型粒子设计我们的注入系统。

为了满足静电偏转器安装和调节的要求以及计算被加速离子初始轨道的需要,我们用数值法(3D程序)计算了中心区的电场分布;还用电解槽测量了其电位分布以检验计算结果的可靠性。中心区设计结果示于图8。

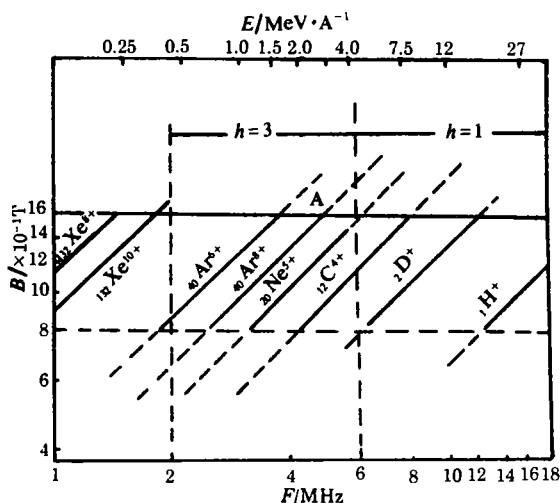


图7 SFC的运行图

Fig.7 Operation diagram of SFC

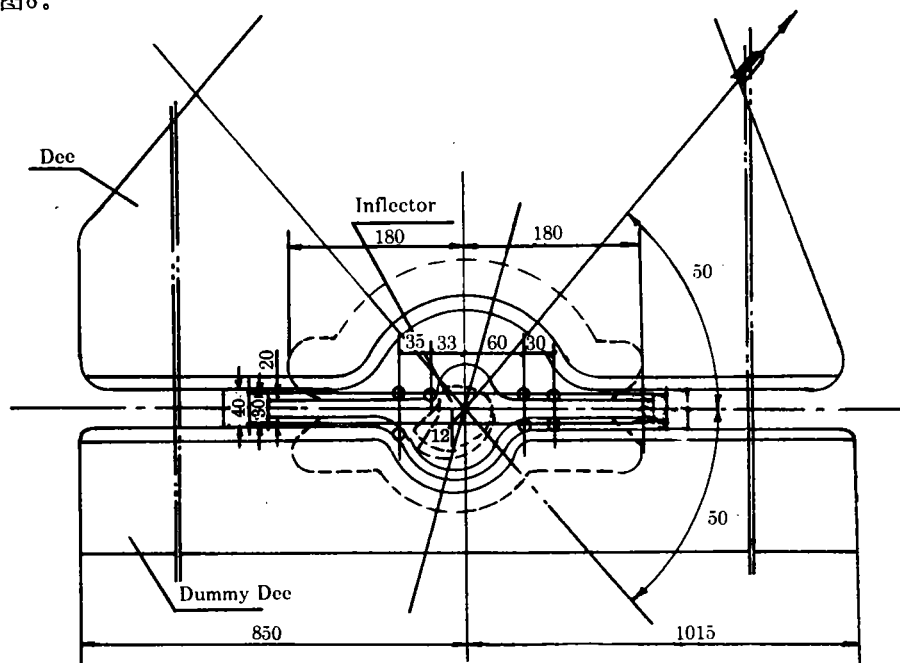


图8 SFC的中心区设计图

Fig.8 Design of the center region of SFC

在轴向注入系统设计中, 静电偏转器是一个非常关键的部件。考虑到具体情况, 采用了螺旋线型静电偏转器结构, 以便把注入的束流偏转 90° 而进入初始轨道和中心束流平面。遵循一般的设计原理^[3]和中心初始轨道运动方程, 我们设计并加工了此静电偏转器。其主要参

数如下: ECR源引出电压(最大)20kV;电半径(偏转器高度)6cm;磁半径2.5cm; $K=1.2$; $\beta=0$;电极间距0.8cm;电极宽度2.0cm; D_{cc} 电压60kV;注入半径4.5cm。

3 中心区初始轨道研究

中心区初始轨道研究的任务就是在确定中心区电极形状时考虑加速轨道的中心化和束流的轴向聚焦。我们使用SCDD方法(综合约束函数双下降法)对中心区带电粒子运动方程进行了研究,并获得了满意的结果。首先,在三次谐波加速情况下,加速轨道的旋转中心的偏移量可以得到很好的控制,一般偏离器中心在几个毫米之内;第二,被加速的粒子在跨越D盒和假D之间间隙引起的相位漂移可以控制在 $\pm 5^\circ$;第三,为了给中心区留下尽可能大的空间和改善轴向电聚焦,在粒子第一次跨越间隙时选取了较大的能量增益;再之,为了选取最佳初始相位和满足静电偏转器的光学要求,在中心区10cm范围内调节中心塞柱贡献量而引入了一个扰动磁场。中心区初始轨道对注入相位的依赖关系示于图9。

同时,为了了解在SFC内被加速粒子的运动状态,我们还研究了束流加速的全过程。图10给出了SFC中心区的接受度。

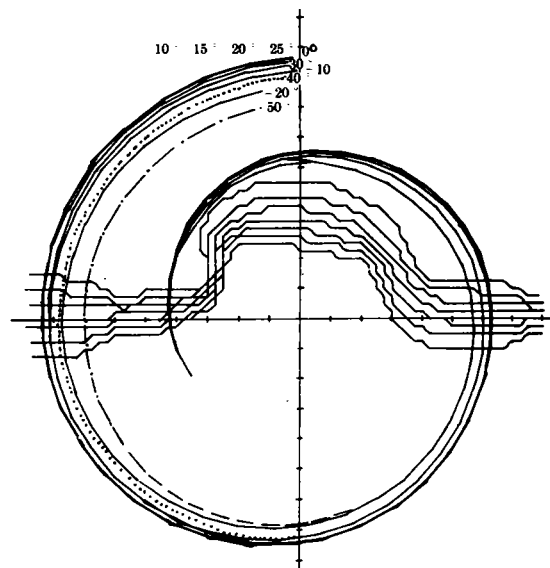


图9 中心区初始轨道对注入相位的依赖关系

Fig.9 Dependence of trajectories on the injection phase

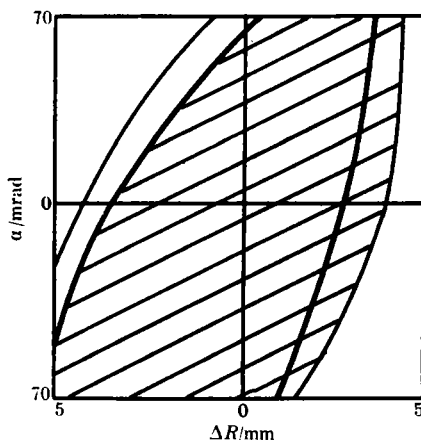


图10 SFC中心区的接受度

Fig.10 Acceptance of SFC center region

4 磁场测量及其它改进工作

由于SFC的原主线圈已用了近30年,绝缘层有的部位已失效,必须更换;而且径向插入PIG源由外注入的ECR源取代,磁场必须重新测量,并重新进行等时场垫补。磁场测量是在安装了真空室的情况下进行的。为了保证数据精度,所有的测量工作均在主线圈电源采用同一大循环程序下完成。测磁臂长每隔2cm安装一个Hall片,从-4—108cm共有57片。在励磁电流为300、400、500、600、700、800、900、1000、1100、1200A共10个水平下,在 $0^\circ-359^\circ$ 范围内,每隔 1° 取数,测量了沿径向的磁场分布。在相同场水平下,测量了同轴线

圈的垫补贡献量。为了获得中心区场形的最佳值,我们特别致力于测量中心塞柱在几个场水平下的贡献量。磁场测量精度为 $\pm 0.2\text{mT}$,对于 Ar^{8+} (2.345MeV/u),沿径向分布的实测等时场与所要求的等时场之间偏差为 5×10^{-4} 。为了更好地了解中心区的场形分布,在中心区0—45cm范围内,沿轴向用10个Hall片,在励磁电流为800A的场水平下,测量了中心区的三维场分布。在励磁电流为300、800、1100A三个场水平下,测量了磁轭中心孔洞中磁场的轴向分布。为了给引出系统设计提供更可靠的依据,还在几个场水平下测量了沿引出方向的边缘场分布。

与此同时,还对其它系统进行了大量的改进工作,为了匹配新的外注入系统和新的中心区设计,重新设计并加工了D盒和假D盒。为了提高引出效率,重新设计加工了引出静电偏转板及其调节系统,重新研制了新的高压电源。为了提高磁场稳定度,用一台1200A/220V稳定度为 $2 \times 10^{-5}/8\text{h}$ 的直流稳流电源取代了原来机组电源。为了提高真空度,用自己研制的两台HIRFL-800低温泵取代原来的油扩散泵。改造了SFC控制室,用微机-CAMAC系统控制SFC各系统及ECR源的束运线。新安装了束流相位探针,改进了原径向束流探针系统。这些工作大大地改进了SFC的性能。

5 调 束

改进后的SFC首次调束是用3次谐波加速 Ar^{8+} ,引出能量为 2.345MeV/u 。总的来说,ECR源工作稳定。从ECR离子源至静电偏转器的传输效率好于60%。当主磁场从设定值降低约0.005T,静电偏转器从预置值调 2° 后, Ar^{8+} 束流到达引出半径,引出静电偏转板的传输效率好于60%,引出 Ar^{8+} 束流大于 $1\mu\text{A}$ 。随后,很顺利地加速了 Ne^{4+} ,引出束流强度也大于 $1\mu\text{A}$ 。加速 O^{5+} (8.469MeV/u)对ECR离子源及SFC更是较大的考验。ECR源的引出电压必须为24kV,高于耐压值;而要求SFC高频电压、磁场及引出静电偏转板高压均接近于极限值;在进行了一段时间准备后,加速成功,引出束流在 $1\mu\text{A}$ 左右,为HIRFL加速 O^{8+} (100MeV/u)提供了条件。

参 考 文 献

- 1 Wei B W, Liu Z W, *et al.* Study on the magnetic field of Caprice type ECR ion source. 13th International Conference on Cyclotrons and Their Application, Vancouver, B.C., Canada, 1992
- 2 Jiang J Z, Zhou X H, *et al.* Buncher in the beamline from ECR to SFC, 13th International Conference on Cyclotrons and Their Application, Vancouver, B.C., Canada, 1992
- 3 Belmont J. Axial injection and central region of the AVF cyclotron, Lecture notes of 1986 RCNP KIKUCHI summer school on accelerator tech., 1986

Upgrading of the SFC

Ye Feng Ma Zhongren Yin Quanmin Zhu Xuezheng Qiao Qingwen Guo Minyan
Wang Yifang

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

Abstract

The ECR ion source, beam line from ECR to SFC and electrostatic inflector have been designed and installed to increase ion species and beam intensity. The working points are mainly located in the third harmonic accelerating region. The central region was studied carefully, and the Dee and dummy Dee were rebuilt to match the external injection system. Other improvements were adopted to improve the performance and operation efficiency of SFC. The commissioning of the upgraded SFC is also described.

Key words Cyclotron, ECR ion source, Central region