

文章编号: 1007- 4627(2000)02-0095-05

HIRFL 改造中的加速器物理问题*

唐靖宇, 王义芳, 尹全民

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 73000)

摘要: 从加速器运行的角度对兰州重离子加速器 HIRFL 建成以来所存在的问题进行了总结, 结合放射束物理和冷却储存环 CSR 对 HIRFL 的新要求, 从加速器的物理设计方面提出了一些改进方案. 主要问题有: 超低能束流传输的空间电荷效应的影响, 扇聚焦回旋加速器 SFC 高频加速电压不对称对束流轨道的影响, 用半频聚束的方式补偿两台回旋加速器的纵向不匹配, 前束线上聚束器的工作模式的选取, 强杂散磁场对超低能和低能束流传输的影响, 分离扇回旋加速器 SSC 注入区过垫补磁场对注入束流轨道的影响, SFC 和 SSC 的单圈引出, 重离子通过剥离膜后的束流损失和束流品质的变坏等.

关键词: 空间电荷效应; 束流纵向匹配; 杂散磁场

中图分类号: TL56 文献标识码: A

1 前言

自80年代末以来, 国际上重离子核物理的研究前沿已从利用稳定核进行实验逐步转移到利用放射性核进行实验. 为了跟踪国际研究前沿和在国际重离子物理研究领域占有一席之地, 国家和中国科学院批准了在兰州重离子加速器(HIRFL)上建造兰州放射性束流线 RIBLL 和 HIRFL-CSR 冷却储存环的计划. 其中 RIBLL 已于1997年建成并投入使用, 大科学工程 HIRFL-CSR 冷却储存环仍在研制之中. 为了有效地在 RIBLL 上或 HIRFL-CSR 上利用次级束流进行实验, 要求 HIRFL 提供的初级束流必须在现在的基础上提高一至两个量级, 即要对 HIRFL 进行较大的改造, 从而提高它的总传输效率. 近几年来, 我们对 HIRFL 的各个影响传输效率和运行效率的环节重新进行了研究, 提出了一些改进方案, 这里主要对其中与加速器的物理设计有关的部分作一介绍.

2 束流的纵向匹配^[1]

HIRFL 重离子加速器包括两台等时性回旋加

速器和3条束运线, 为了保证整个加速器系统的束流传输效率, 包括加速器的各个传输段必须有较高的匹配效率, 包括传输段之间的相空间匹配. 束流传输线的作用是将束流高品质地传送到下一台加速器或实验终端. 为了保证束流在传输过程中不散开, 同时保证束流在加速器间的相空间匹配, 在横向相空间和纵向相空间都需要聚焦元件. 对于纵向相空间, 其聚焦元件就是聚束器. 从注入器 SFC 通过前束线(BL1)到主加速器 SSC 的匹配, 具体体现为束流能量的匹配和纵向相空间($\Delta E/E \sim \Delta \Phi$)的匹配. 前者要求从 SFC 引出的平均束流能量偏离不低于理论值的 5×10^{-3} , 这是由 SSC 注入系统的特性决定的, 一方面可以严格控制 SFC 的引出过程以得到合适的束流能量, 另一方面可以利用 BL1束线上聚束器 B2(作为加速腔使用)进行能量补偿. 为了保证 SSC 的注入和引出效率, 要求在 SSC 的注入点纵向相空间为腰, 需在前束线上安装一至两台聚束器进行纵向相空间匹配. SFC 的外离子源轴向注入束运线(BL0)上配备了两台线性聚束器, 用于将从 ECR 离子源引出的连续束流聚成纵向窄束团, 半频聚束模式(频率为 SFC 高频频率的一半)还可

* 收稿日期: 1999-10-11

* 基金项目: 国家大科学工程 HIRFL-CSR 冷却储存环项目资助

作者简介: 唐靖宇(1963-), 男(汉族), 安徽安庆人, 研究员, 从事加速器物理与技术研究.

以改善 SFC 与 SSC 的纵向匹配。

3 超低能传输的空间电荷效应^[2]

带电粒子束除了与外部电磁场相互作用外,束流内部各带电粒子之间也存在着电磁相互作用,即库仑排斥作用和运动电荷的磁场吸引作用。一般情况下前者起决定作用,后者只有在相对论速度情况下才起明显作用。SFC 轴向注入束运线上束流只经过离子源吸极高压(8~25 kV)的加速,甚至几十 μA 的束流就可以造成强的空间电荷效应。特别是在有聚束器的情况下,在聚束过程的最后阶段束团密度成倍增加,空间电荷效应造成聚束效率降低和横向发射度匹配困难。空间电荷效应对横向运动的影响小于纵向运动,主要是横向聚焦元件多,可以得到较好的补偿。

3.1 横向空间电荷效应

对于均匀分布的长椭圆柱束流,由于空间电荷效应所产生的横向作用力为

$$F_x = \frac{Ze\rho}{\epsilon_0} \frac{a_x}{a_x + a_y} x \quad \text{和} \quad F_y = \frac{Ze\rho}{\epsilon_0} \frac{a_x}{a_x + a_y} y, \quad (1)$$

其中 a_x 和 a_y 为椭圆的两个半轴长度, ϵ_0 为真空介电常数, $\rho = I/\pi a_x a_y$ 为电荷密度, I 为束流电子流强, Z 为离子电荷态。粒子的横向运动方程(自由振荡方程)为

$$x'' - K_x^2 x = 0 \quad \text{和} \quad y'' - K_y^2 y = 0, \quad (2)$$

其中散焦力为

$$K_x^2 = \frac{ZeI}{\pi m \epsilon_0 U^3} \frac{1}{a_x(a_x + a_y)},$$

$$K_y^2 = \frac{ZeI}{\pi m \epsilon_0 U^3} \frac{1}{a_y(a_x + a_y)}. \quad (3)$$

在聚焦结构中,自由空间部分的散焦力就如(3)式所示。在聚焦元件中,若原有的聚焦力为 K_0^2 ,则在加入空间电荷效应的影响后,聚焦力变为 $K_0^2 - K^2$ (这里 K 为 K_x 或 K_y)。在散焦元件中,若原有的散焦力为 $-K_0^2$,加入空间电荷效应的影响后,散焦力变为 $-(K_0^2 - K^2)$ 。在多数情况下,可以简单地在

束运线的每一个小传输段之后增加一个薄散焦透镜来代替空间电荷效应的连续作用。而空间电荷效应作用力的大小又与束流当时的聚散情况相关(包络大小),所以最后的空间电荷效应对束流聚焦的影响可以采用在原聚焦结构的基础上逐渐增加束流流强和迭代的方法来得到。在 SFC 轴向注入束运线的情况下,横向空间电荷效应的作用可分为两段:一段为到达聚束器之前的束流传输,可以用长椭圆柱模型表示,其作用力也较弱(在几十 μA 的情况下通常可以忽略);另一段为通过聚束器后的束流传输,除了聚束过程开始的一段距离仍可以用长椭圆柱模型外,应该用椭球模型,因其电荷密度增加,空间电荷效应的作用力也大得多。横向空间电荷效应的作用导致束流横向包络增加,从而影响原设计的发射度匹配,其影响可通过改变束运线的聚焦四极透镜组的强度得到大部分的补偿。

3.2 纵向空间电荷效应

纵向空间电荷效应的讨论只有在束流被聚成束团的情况下才有意义,可以用椭球模型来计算它对束团相空间运动的影响,有时也采用一些更简单的模型如带电圆盘模型来计算。因为纵向聚焦元件(聚束器)的数量小,纵向空间电荷效应难以得到补偿,从而影响束流的注入匹配效率。

3.3 空间电荷效应的计算和克服

对于能量只有几个或几十个 keV/u 的超低能束流传输,空间电荷效应尤其是纵向作用对离子速度也即离子源的引出高压很敏感,设计应尽可能地提高引出高压(同时提高了注入半径)。为了减小纵向空间电荷效应,应尽可能地缩短聚束器的漂移距离。空间电荷效应对束流传输的影响,可采用作用矩阵法或者多粒子跟踪法进行研究。如在仅考虑横向空间电荷效应时,将传输元件分割成很小的单元并将空间电荷作用看作是薄透镜加在每个小单元之后从而计入其影响。

SFC 采用常轨道参数设置,在注入半径 ρ_0 固定的情况下,注入电压 $V_{inj} = \frac{1}{2} \frac{q}{m} (B\rho_0)^2$ 随着荷质比 q/m 的减小而减小(B 为主磁场),因而在加速较重离子时空间电荷效应显著。在保持离子源最高引出电压不变的情况下,通过采用多套注入参数,提高

较重离子的注入电压,从而达到减弱空间电荷效应的目的,并因此重新设计和加工了新的 SFC 中心区. 目前,加速轻离子采用其波模式,注入半径为 $\rho_0 = 2.5 \text{ cm}$; 加速较重离子时采用三次谐波模式,注入半径增大为 $\rho_0 = 3.0 \text{ cm}$. 该中心区结构在1996年初安装使用后效果非常好. 为了加速超重离子如 Pb 和 U 等,正在设计可采用三套注入参数的更为复杂的新中心区,将第三套注入参数的注入半径提高到 $\rho_0 = 3.6 \text{ cm}$.

为了兼顾基波加速时对注入线上聚束器的电压要求高和三次谐波加速时空间电荷效应更为严重的实际情况. 聚束器系统设计为两个独立的聚束器 B01 和 B02, 分别工作在基波加速和三次谐波加速. B01 的漂移距离较长(5.4 m), 采用双聚束间隙以满足高聚电压要求. B02 的漂移距离较短(2.535 m) 以减弱空间电荷效应的影响, 采用栅网型单聚束间隙及锯齿波聚束波形.

为了减小空间电荷效应对注入束流品质的破坏, 采用一套水平狭缝和一套垂直狭缝对离子源引出束流的流强进行限制. 在加速离子源产额比较高的离子时, 通过狭缝的限制就可以减小流强的同时减小束流发射度, 而束流发射度的减小可以提高与加速器中心区的匹配效率, 即注入效率.

4 SFC 杂散磁场的影响

由于 SFC 是由原直径为 1.5 m 的经典回旋加速器改造为直径为 1.7 m 的扇聚焦回旋加速器, 而没有更换原有的大磁轭, 磁极头只进行了等 B 处理并加了扇块而没有增加直径^[3], 造成磁路设计不好, 一方面磁铁内部饱和程度较大, 另一面加速器周围的杂散磁场较为严重. 在 SFC 改器完成后调束时, 曾出现由于引出区的杂散磁场较大, 造成引出方向与原设计方向有 4° 的偏差, 通过改变与引出接口束运线的走向才得以解决, 但在不同的主磁场水平下, 杂散场对引出束流轨道的影响不同, 影响 SFC 的引出效率. 当 SFC 采用 ECR 离子源的外注入方式后该问题更为突出, 杂散磁场造成处在 SFC 下面的轴向注入束运线上的束流不能沿束流光轴行进, 通过安装在束运线上的荧光靶可以清楚地观察到束流在增加 SFC 主磁场时的偏离. 较强的杂散磁场造成该注入束运线上的磁元件和普通碳钢的支架或饱

和或失去原有的对称性, 使束流的传输效率下降和调束困难.

如果要对该问题做彻底的解决困难较大, 拟对轴向注入线采用磁屏蔽的方法, 在磁轭的下方用一层钢板来吸收主要的漏磁而减小在束运线上的杂散磁场, 并在空间允许的情况下加宽磁轭(约 30 cm) 以减小磁轭的饱和程度和漏磁. 对于 SFC 引出区的杂散磁场, 拟采用可以抗饱和的校正磁铁对引出方向进行校正.

5 SFC 中心区设计^[1]

为了解决 SFC 高频电压偏低、加速粒子种类多和能量范围宽, 且在某些情况下空间电荷效应严重的问题, 1996 年设计并加工了新的 SFC 中心区. 新的中心区采用两套注入参数(注入半径分别为 2.5 cm 和 3.0 cm), 分别对应于基波和三次谐波加速, 并采用以常轨道为基础加小范围变化的方式较好地解决了高频电压偏低的问题, 同时解决了加速圈数尽可能少(增加引出半径处的圈间距和减小束流在真空中的损失)与束流中心化的矛盾. 运行表明, 该中心区的投入使用起到非常好的作用.

为了适应 SFC 朝加速特重离子如 U 离子的方向发展, 有必要设计新的中心区, 将注入半径提高到 3.6 cm, 进一步提高注入电压从而减小空间电荷效应. 新的中心区要能同时适用于三套注入参数, 每次只需更换相应的螺旋式静电偏转镜. 新中心区的设计工作正在进行.

6 SFC 高频频段的下移

SFC 的高频系统工作在频率高端时, Dee 盒与内杆的连接卡环处接触电阻和电流密度较大造成局部过热, 腔体品质因数 Q 从频率低端的 8 000 下降到 3 000 左右, 造成功率消耗很大, 且此时由于 Dee 加速间隙与腔体的轴线成 50° 夹角造成电压沿加速间隙的变化相当大(引出半径处两个加速间隙的电压在高频率端最大可相差 10% 以上, 见图 1), 造成轨道中心化的困难和平均有效加速电压降低, 从而降低引出效率. 改进措施一是将 SFC 运行频率往低频端移, 从原来的 6.0~18.0 MHz 降为 5.5~16.5 MHz, 并保持 HIRFL 覆盖的能区不变, 且高频腔

体和发射机不进行大的改造；二是对连接卡环进行了改进，接触电阻和过热情况有明显的改善，同时 SFC 中心区的改进降低了对高频电压的要求，也对改善卡环过热有明显的益处。

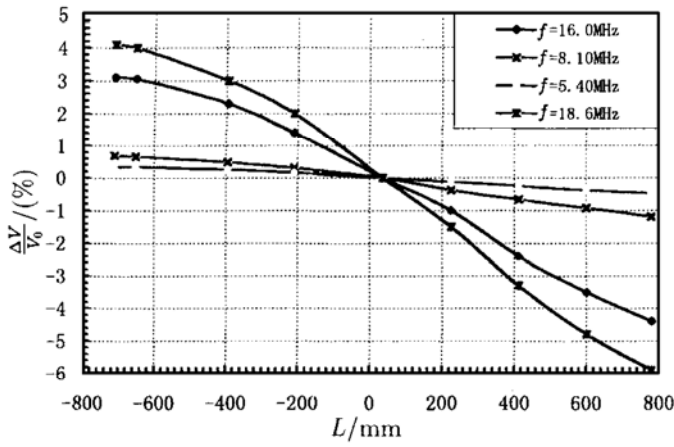


图1 高频电压沿 Dee 间隙的相对变化

V_0 为加速器中心的电压， L 为与加速器中心的径向距离，负值对应 Dee 盒远端。

7 SSC 的非剥离注入方式

为了提高 HIRFL 在加速较重离子时的传输效率，我们提出并成功地实现了不通过剥离膜而直接由 SFC 注入到 SSC 的方法，这样可以避免由剥离膜造成的 60%~90% 的束流损失。束流通过碳剥离膜和电荷交换作用可以提高离子的平均电荷态，从而降低 SSC 的主磁场，这对 HIRFL 加速较高能量的各种离子时是必要的，但通过剥离膜后的束流有一个电荷态分布，较重的离子最可几电荷态所占的比例也仅 15%~40% (见表 1)，大部分束流要损失掉。另外，剥离膜还会造成束流能量的降低和束流品质的变坏，前者要求进行能量补偿，后者会造成 SSC 注入效率的降低。

采用非剥离膜注入方式因为 SSC 主磁场的限制使 SSC 的引出能量降低 30% 左右，原则上可以用下式进行估计：

$$\frac{E'}{E} = \left| \frac{Q_1}{Q_2} \right|^2 = \left| \frac{B'_1}{B_1} \right|^2, \quad (4)$$

Q_1 和 Q_2 分别为剥离前后离子的电荷态， B_1 和 B'_1 为两种注入模式下 SFC 的主磁场。

实际上，SSC 的可使用最高磁场为 1.67 T，

SFC 为 1.57 T，考虑到 SSC 的注入半径为 SFC 引出半径的 4/3 倍，在非剥离注入和 SSC 采用最高磁场的情况下，SFC 的主磁场应为 1.252 5 T，SFC 的引出能量的改变为 0.636 (非相对论情况下，SSC 引出能量的改变是相同的)。如果适当提高 ECR 离子源的电荷态 (保证束流强度的降低在一倍以内)，则仍可使 SSC 引出能量仍有剥离注入模式的 70% 左右。

该方法已在调试 Xe 束时证明是可行的。如果能适当提高注入引出系统的最大磁刚度，使之达到与 SSC 主磁场相对应的水平 (1.7 T)，就可以保证 HIRFL 的加速能量不显著降低。

表 1 几种束流通过剥离膜后的电荷态分布^[4]

	Q	$F/(\%)$
Kr 1.39 MeV/u $\bar{Q}=21.8$ 膜厚 40 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	19+	7.53
	20+	13.4
	21+	17.9
	22+	19.6
	23+	17.4
	24+	11.3
Xe 1.39 MeV/u $\bar{Q}=29.5$ 膜厚 40 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	25+	6.04
	27+	8.91
	28+	16.1
	29+	21.5
	30+	21.4
	31+	14.9
Pb 1.39 MeV/u $\bar{Q}=37.8$ 膜厚 40 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	32+	8.25
	35+	8.18
	36+	13.4
	37+	17.3
	38+	16.6
	39+	14.4
	40+	11.0
	41+	6.33

8 SSC 的注入区谐波场

SSC 目前较低的注入效率尽管有上面提到的 SFC 引出束流品质差和聚束器 B1 与 B2 没有投入的原因，它本身也存在一些没有解决的问题，如注入阶段轨道上存在较大的对束流中心化不利的一次谐波磁场 (为 $(0.5 \sim 1.5) \times 10^{-3}$ T)，造成注入束流的

径向振荡而难以通过注入区,这在 SSC 采用二次谐波加速时特别严重,因为该情况下加速圈间距很小 ($< 10 \text{ mm}$). 该一次谐波场是为了对注入偏转磁铁 M_{i2} 的磁场扰动进行补偿而在邻近的两扇磁铁上加垫补铁,但垫补铁过量,该垫补铁被固化到扇铁上不能取出来修补. 另外,注入相空间匹配也不理想,造成注入效率很低. 要全面提高 SSC 的注入效率,这也是提高 SSC 传输效率的关键,一方面要完善注入区的束流诊断系统,从而可以对注入束流轨道和

相空间形状进行更好的控制. 同时对注入区的扰动磁场进行研究,如采用垫铁的方法部分消除该一次谐波场,以期最终将相空间匹配效率提高到 90% 以上,消除或减弱该一次谐波场,目前有两种方法可以考虑,一是在加了垫补铁的附近采用磁吸收垫铁使该局部的磁场降低,二是对偏转磁铁 M_{i2} 进行重新设计,增加其铁量并更靠近垫补铁,以加强磁场扰动并抵消一次谐波场.

参 考 文 献:

- [1] 唐靖宇. HIRFL 注入器系统改进 [J]. 原子核物理评论, 1997, 14(2): 79~ 87.
- [2] 唐靖宇. SFC 轴向注入线上的空间电荷效应 [J]. 中国学术期刊文摘, 1999, 5(6): 730~ 732.
- [3] 马钟仁. SFC 磁场的建立 [J]. 兰州重离子研究装置进展报告, 北京: 科学出版社, 1987, 6: 41~ 47.
- [4] Shima K, Mikumo T. Equilibrium Charge State Distributions of Ions ($Z \geq 4$) after Passage Through Foils: Compilation of data after 1972 [J]. Atomic Data and Nuclear Tables, 1986, 34: 357 ~ 391.

Problems of Accelerator Physics of Upgrading HIRFL^{*}

TANG Jing-yu, WANG Yi-fang, YIN Quan-ming

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

Abstract: From the viewpoints of the HIRFL operation and the new requirements to HIRFL by the study of radioactive beam physics and CSR project, the HIRFL upgrading program has been proposed after studying the existing problems found during the operation and new problems when increasing the beam intensity and ion variety. The accelerator physics problems of the upgrading program were discussed here, which include the space charge effect on the very low energy beam line, non-parity acceleration at the injector cyclotron SFC, longitudinal match between two cyclotrons, strong magnetic field leakage influence on the beam transfer at low and very low energy, residual first harmonic magnetic field in the main cyclotron SSC injection region, the low efficiency and beam quality of heavy ions after through stripper etc.

Key words: space charge effect; beam longitudinal match; stray magnetic field

* **Foundation item:** Foundation from National Large Science Project HIRFL-CSR