

HIRFL 与 CSR 的匹配研究*

唐靖宇 李浩虎 原有进

(兰州 730000)

摘要 国家重大科学工程 HIRFL-CSR 冷却储存环计划主环 CSR_m 利用已有的 HIRFL 作为注入器,为了更好地利用 HIRFL 加速器的能力,对这两台加速器的匹配在原来的初步考虑的基础上进行了较为详细的研究,提出了分别利用 HIRFL 自己的注入器 SFC 单独注入到 CSR 以及 SFC 加上主加速器 SSC 注入到 CSR 的两套方案,既可以提高 HIRFL 与 CSR 的总传输效率,又可以在 SFC 与 CSR 联合运行的同时使 SSC 与另建的小回旋加速器组合加速质子,从而充分提高 HIRFL 的运行效率.

关键词 匹配 磁刚度约束 多圈注入 射频堆积

1 引言

兰州重离子加速器 HIRFL 由两台等时性回旋加速器 SFC(注入器, $K = 69$)和 SSC(主加速器, $K = 450$)组成,现正在建造的 CSR 冷却储存环^[1](由主环 CSR_m 和实验环 CSR_e 组成)利用这两台回旋加速器作为前级加速器,表 1 为 SFC, SSC 和 CSR_m 等 3 台加

表 1 SFC, SSC 和 CSR_m 的主要参数

	SFC	SSC	CSR _m	
			加速	累积
能量常数	69	450	—	
最高磁场(T)	1.6(平均)	1.6(磁隙)	1.4(二极铁)	
高频频率(MHz)	5.5—16.5	6.5—14	0.25—1.7	6.0—14.0
高频谐波数	1,3	2,4,6	1	16,32
注入半径(m)	0.025,0.03	1.0	—	
引出半径(m)	0.75	3.207	—	
周长(m)	4.71(引出)	20.15(引出)	161.00	
最小磁刚度(Tm)	0.6(引出)	(引出)	0.76	
最大磁刚度(Tm)	1.2(引出)	3.05(引出)	10.64	

2000-07-03 收稿

* 国家重大科学工程 HIRFL-CSR 冷却储存环项目资助

速器的主要参数. 为了更好地利用 HIRFL-CSR 加速器组合系统, 我们对它们之间的匹配模式进行了研究, 提出了加速粒子范围 C—U 和不同的能量要求的各种组合模式, 从而得到最好的束流传输效率、束流利用效率和加速器利用效率. 基本思想是 SFC 的引出束流可以直接注入到主环 CSR_m, 或者通过 SSC 的进一步加速再注入到 CSR_m, 以及通过采用或者不采用 SFC 与 SSC 间和 SSC 与 CSR_m 间的剥离膜来达到不同的匹配效果.

2 SFC 直接注入到 CSR_m

SFC 加速器的引出束流最大磁刚度为 1.2Tm, CSR_m 的注入束流的最小磁刚度最初设计为 1.4Tm, 经过综合考虑认为可以降到 1.1Tm. 这样, 从 SFC 引出的束流就可以不经过 SSC 的进一步加速而直接注入到 CSR_m 中, 既可以提高 CSR_m 的注入束流流强(束流经过 SSC 加速器的传输效率目前为 10%, 经过 HIRFL 系统的改进后估计能达到 40% 左右), 又可以省略 SSC 并用于同时加速中能重离子(SFC 引出束流可以分时送到 SSC 继续加速)或者加速质子^[2]. 因为束流通过剥离膜会造成磁刚度低于 CSR_m 的最小注入磁刚度, 而不能注入到 CSR_m 中, 所以, SFC 与 CSR_m 的匹配只能采用不通过剥离膜的方式, 这对轻离子没有影响或影响很小, 但对较重的离子会造成从 CSR_m 得到的最高能量的降低. 因此, 在物理实验或应用实验要求高能量的重离子时, 还是只有采用 SFC-SSC-CSR_m 的三级加速方式.

在采用 SFC 与 CSR_m 的直接匹配时, CSR_m 的注入可以采用多次多圈注入加电子冷却的方式, 此时可以不考虑两台加速器间高频系统的匹配; 也可以采用多圈注入、射频堆积和电子冷却相结合的方法, 此时 CSR_m 的累积高频腔的频率应是 SFC 高频频率的整倍数, 而 CSR_m 的周长正好是 SFC 引出点周长的 34 倍(通过微调 SFC 的引出半径), 即 CSR_m 累积腔可以采用 34 次谐波或其倍频数.

从 CSR_m 得到的最高束流能量只与 SFC 引出束流的荷质比 Q/A 有关, 而与 SFC 的其它参数无关(SFC 的主磁场要求大于 1.47T 以满足 CSR_m 最小磁刚度 1.1Tm 的要求). 由 CSR_m 的最高磁刚度 $B\rho = 10.64Tm$, 可以用下面的公式计算从 CSR_m 得到的不同种类离子的最高能量 E (单核能量, 单位为 MeV/u):

$$E = \sqrt{\epsilon_0^2 + (300B\rho Q/A)^2} - \epsilon_0, \quad (1)$$

其中 $\epsilon_0 = 931.478MeV/u$ 为单位核子的静止能量.

表 2 给出了 SFC 的加速范围与 CSR_m

最高能量范围的关系(为有射频堆积情况, 如采用多次多圈注入方式, 则不必考虑 CSR_m 高频与 SFC 高频的匹配). 图 1 给出了各不同元素离子的 CSR_m 最高能量

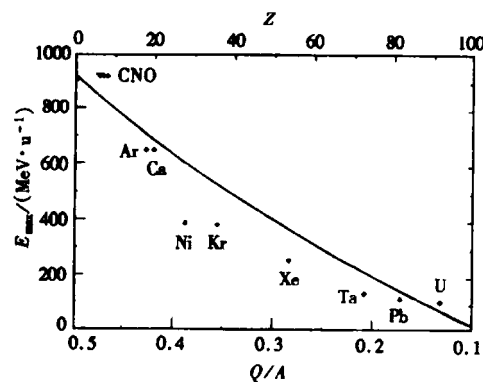


图 1 SFC 与 CSR_m 直接匹配的最高束流能量
 ——最高能量与荷质比的关系(下横坐标轴),
 ◆最高能量与原子序数的关系(上横坐标轴).

表 2 SFC 加速范围与 CSRm 的最高能量

h_{SFC}	h_{CSRm}	Q/A	f_{SFC} /MHz	E_{SFC} /(MeV·u ⁻¹)	f_{CSRm} /MHz	E_{CSRm} /(MeV·u ⁻¹)
1	34	0.255—0.5	6.0—11.773	4.18—16.37	6.0—11.773	305.1—915.5
1	68	0.234—0.255	5.5—6.0	3.50—4.18	11.0—12.0	262.2—305.1
3	17	0.198—0.234	14.0—16.5	2.52—3.50	7.0—8.25	193.9—262.2
3	34	0.085—0.198	6.0—14.0	0.46—2.52	6.0—14.0	38.7—193.9
3	68	0.078—0.085	5.5—6.0	0.39—0.46	11.0—12.0	32.6—38.7

h_{SFC} 为 SFC 加速谐波数, h_{CSRm} 为 CSRm 累积谐波数, f_{SFC} 为 SFC 高频频率, E_{SFC} 和 E_{CSRm} 分别为 SFC 和 CSRm 的引出能量. 计算中采用 SFC 引出磁刚度为 1.15Tm.

3 SFC - SSC - CSRm 匹配

对中低能加速器而言, 公式(1)中 $\epsilon_0 \gg 300B\rho Q/A$, 故从 CSRm 得到的最高束流能量与离子的荷质比平方近似成正比, 为了得到较高能量的重离子, 需要将 SFC 引出的束流经过 SSC 加速提高能量后再通过剥离膜以提高电荷态. 但通过剥离膜后, 一方面会造成束流流强的损失^[3], 另一方面会造成束流磁刚度的降低, 这就限制在 SSC 加速很低能量的束流并注入到 CSRm 中.

SFC 与 SSC 组合加速的谐波匹配模式通常有 4 种^[4], 以 SFC 的加速谐波数 $h_{\text{SFC}} = 1, 3$ 和 SSC 的加速谐波数 $h_{\text{SSC}} = 2, 4, 6$ 组合而成. 考虑到 CSRm 并不需要注入高能量的轻离子, 所以, 只需要采用两套匹配模式: 1) $h_{\text{SFC}} = 3, h_{\text{SSC}} = 4$, 用以加速轻离子和中等重离子; 2) $h_{\text{SFC}} = 3, h_{\text{SSC}} = 6$, 用以加速很重的离子. 两套匹配模式在加速能区上有一定的重叠, 在重叠区 SSC 一般均采用高谐波数. SSC 加速倾向高谐波数的主要原因是 $h_{\text{SSC}} = 6$ 比 $h_{\text{SSC}} = 4$ 加速模式更易得到单圈引出, 引出效率和引出束流品质都较好, 而 $h_{\text{SSC}} = 2$ 模式很难得到单圈引出; 另外, 排除 $h_{\text{SSC}} = 2$ 模式(高能量模式)即只采用较低能量的注入束流的好处在于 CSRm 中束流所需要的电子冷却时间大大下降.

当注入束流来自 SSC 时^[5,6], CSRm 的注入方式同样也可以采用多次多圈注入加电子冷却的方式和多圈注入、射频堆积和电子冷却的组合方式, 要求累积高频腔与 SSC 的高频频率有倍数关系, 但频率范围选择的问题, CSRm 累积腔采用与 SSC 相同的高频频率范围. 这样, 第 1 套和第 2 套匹配模式的情况, CSRm 累积腔的谐波数应分别为 $h_{\text{CSRm}} = 32$ 和 48. 考虑到此时 SSC 高频为 SFC 高频频率的 1.5 倍, 通过 BL0 束线上 B02 聚束器采用半频聚束方式仍可以保证这两台加速器的良好匹配^[4], 因此, 对第 2 套匹配模式也可以取 $h_{\text{CSRm}} = 32$, 即 CSRm 累积腔的频率与 SFC 高频频率相同而不损失注入效率.

表 3 给出了 SFC, SSC 和 CSRm 组合加速的参数匹配. 根据 3 台加速器的磁刚度和频率范围限制以及剥离膜造成磁刚度的降低等约束条件, 编写了计算 HIRFL-CSR 加速不同离子的参数匹配关系的应用程序, 图 2 和图 3 分别给出了 3 台加速组合加速不同离子时 CSRm 的最高能量和加速离子种类范围, 图中的高电荷态上限代表了目前 ECR 源可

以达到的水平(流强在 μA 量级)^[7].

表 3 SFC,SSC 和 CSRm 组合加速的参数匹配

模式	$h_{\text{SFC/SSC/CSRm}}$	f_{SFC} /MHz	f_{SSC} /MHz	f_{CSRm} /MHz	E_{SFC} /(MeV·u ⁻¹)	E_{SSC} /(MeV·u ⁻¹)
1	3/4/32	6.50—14.00	6.50—14.00	6.50—14.00	0.54—2.52	5.61—26.9
2	3/6/32	6.00—9.33	9.00—14.00	6.00—9.33	0.46—1.12	4.77—11.67

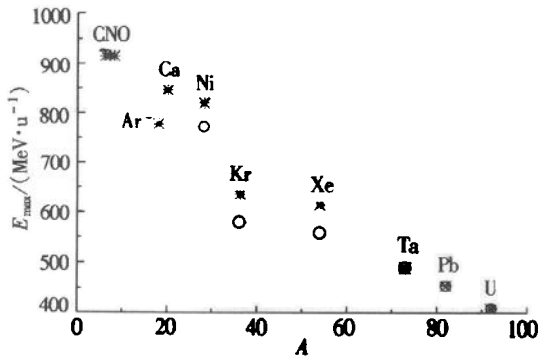


图 2 SFC,SSC 与 CSRm 组合加速的最高束流能量
* 模式 1 ($h_{\text{SFC/SSC/CSRm}} = 3/4/32$);
o 模式 2 ($h_{\text{SFC/SSC/CSRm}} = 3/6/32$).

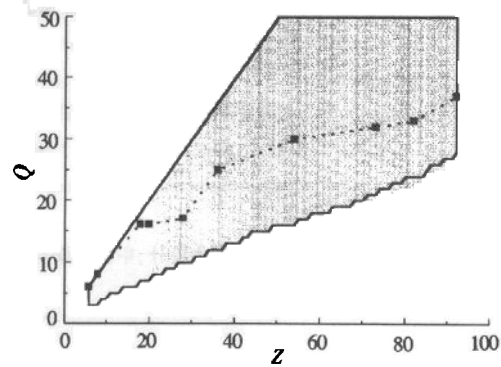


图 3 SFC,SSC 与 CSRm 组合加速的离子范围
实线内区域为模式 1 ($h_{\text{SFC/SSC/CSRm}} = 3/4/32$) 情况下可
加速粒子范围,阴影区域为模式 2 ($h_{\text{SFC/SSC/CSRm}} =$
 $3/6/32$) 情况下可加速粒子范围,虚线为目前
ECR 源可以达到的水平.

4 结论

通过上面的分析计算可以得出,HIRFL-CSRm 组合加速的匹配方式可以根据不同的加速离子和要求的能量进行不同组合,以达到最佳的束流匹配效率和加速器利用效率.

1) 对于轻离子(C—Ar)而言,由于 ECR 离子源可以直接剥离至较高电荷态,因此可以采用 SFC-CSRm 的匹配方式,即 SFC 的引出束流不经过 SSC 和剥离膜直接注入 CSRm.

2) 对于较重离子(Ar—Xe)和很重离子(Xe—U)而言,可以由 CSRm 引出能量要求采用不同的匹配方式. 能量要求较低时,可以用 SFC-CSRm 的匹配方式;能量要求较高时,则采用 SFC-SSC-CSRm 的匹配方式,即 SFC 引出束流经 SSC 加速并进一步剥离至高电荷态后,再注入 CSRm.

3) 无论是采用 SFC-CSRm 的二组合匹配,还是采用 SFC-SSC-CSRm 的三组合匹配方式,CSRm 都可以采用多圈注入、射频堆积和电子冷却的注入方式,因而可以得到较高的累积流强.

参考文献(References)

1 Preliminary Design of HIRFL-CSR Project, Beijing Academe of Construction Design and Research, 1999(in Chinese)

- (兰州重离子加速器冷却储存环 HIRFL-CSR 初步设计文件, 中国科学院北京建筑设计研究院, 1999)
- 2 TANG J Y, YIN Q M et al. Scheme of Accelerating Protons at HIRFL. Proceedings of Cyclic Accelerators and Their Applications, 2000, 83—88(in Chinese)
(唐靖宇, 尹全民等. HIRFL 加速质子方案. 圆形加速器及其应用学术交流会, 2000, 83—88)
 - 3 TANG J Y, WANG Y F, YIN Q M. Nuclear Physics Review 1999, 17(2):95—99(in Chinese)
(唐靖宇, 王义芳, 尹全民. 原子核物理评论, 1999, 17(2):95—99)
 - 4 TANG J Y, YIN Q M. High Power Laser and Particle Beams, 1999, 11(6):765—770(in Chinese)
(唐靖宇, 尹全民. 强激光与粒子束, 1999, 11(6):765—770)
 - 5 YUAN Y J et al. Simulation of RF Stacking and Multiple Single-turn Injection and Multi-turn Injection, Proceedings of 14th International Conference on Cyclotron and their Application, Cape Town, South Africa, World Scientific Publishing Co., 1995, 10
 - 6 YUAN Y J et al. Simulation of RF Stacking Combined with Cooling Effects, Proceedings of 5th European Particle Accelerator Conference (EPAC), Sitges, Barcelona, 1996, 6
 - 7 Preliminary Design of Superconducting High Charge-State ECR Ion Source, Institute of Modern Physics, Internal Report, 2000(in Chinese)
(超导高电荷态 ECR 离子源初步设计, 中国科学院近代物理研究所内部报告, 2000)

Study of Matching between HIRFL and CSR*

TANG Jing-Yu LI Hao-Hu YUAN You-Jin

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

Abstract ‘HIRFL-CSR Cooler Storage Ring’ makes use of existing HIRFL as its pre-accelerator. In order to take the full capability of HIRFL, we have studied in detailed the matching modes between HIRFL and CSR. It is proposed to use two matching modes: direct matching between SFC (HIRFL injector cyclotron) and CSRm (CSR main ring); three-cascade matching of SFC, SSC (HIRFL main cyclotron) and CSRm. With these combinations, better beam transmission efficiency, better beam utilization efficiency of HIRFL-CSR accelerator complex and better operation efficiency of HIRFL can be obtained. In the first case, SSC can be used simultaneously in other purposes, either to accelerate medium energy heavy ions or to accelerate protons combined with another small cyclotron.

Key words matching, magnetic rigidity constraint, multi-turn injection, RF stacking

Received 3 July 2000

* Supported by National Key Scientific Project “HIRF-CSR Cooler Storage Ring”