

# SFC-CSRm的束流匹配与制备

张金泉 李智慧 马雷 尹全民

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 为了把HIRFL的注入器SFC的引出束流匹配到HIRFL-CSR的主环CSRm, 提出对SFC引出束流进行制备, 以减小其纵向能散和横向发射度. 给出了这种束流制备方法的原理及理论计算结果.

**关键词** 束流匹配 聚束器 三狭缝

## 1 引言

HIRFL由两台等时性回旋加速器SFC( $K=69$ )和SSC( $K=450$ )串级组成(图1), 兰州重离子加速器冷却储存环CSR由主环CSRm和实验环CSRc组成. 一般情况下, CSRm将注入由SSC引出的束流. 但对于一些轻的重离子, 也可以使用SFC单独注入, 它的优点是明显的. 首先, 由于不经过SSC, 束流强度将显著提高. 其次, 在CSRm的束流加速期间, 可以通过分时供束系统为其他实验终端供束, 同时, SSC可以加速PDF提供的质子用于其他实验, 提高了HIRFL的运行效率. 但是, 这种运行模式也存在束流适配问题.

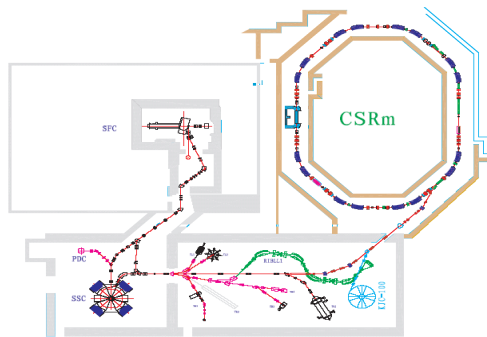


图1 HIRFL-CSRm布局图

首先, SFC的引出束流发射度(一般 $24\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 左右)超过了CSRm允许的束流的发射度( $20\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ). 其次, SFC引出束流的能散(0.7%—1.0%)超过了CSRm的能散要求(0.5%). 为此, 研究设计了用于SFC注入CSRm束流的能量匹配及CSRm采用多次多圈注入时横向相空间和纵向相空间的制备

方法. 基本思想是将SFC引出的轻的重离子束(C-Ar)采用前束线上的聚束器NB1对SFC引出束流纵向相空间进行调制, 用后束线上的三狭缝系统对束流的横向相空间进行限制, 从而改变束流的6维相空间的体积和形状, 提高束流的品质, 使其尽可能达到CSRm对注入束流的要求(能散要求和发射度要求).

## 2 能量匹配<sup>[1]</sup>

当SFC引出束直接注入CSRm时, 由于粒子能量低以及CSRm的最低注入磁刚度(约为 $1.1\text{T}\cdot\text{m}$ )所限, 粒子无法通过剥离膜剥离至高电荷态. 因此, 对于中等重离子和很重离子来说, 其最高能量受到离子源引出束流的限制. 表1为这种模式下SFC和CSRm所能加速离子的荷质比及能量范围(表1).

表1 SFC直接注入CSRm时可加速离子的荷质比范围及最高能量

SFC谐波数 $h$	1	3
离子荷质比 $Z/A$	0.2448—0.5	0.081—0.245
SFC高频频率 $f/\text{MHz}$	5.5—16.5	1.83—5.5
引出能量/(MeV/u)	SFC	3.496—14.5
	CSRm	284.31—915.5
		35.46—284.31

## 3 NB1对SFC引出束流纵向能散的调制

### 3.1 NB1简介及其对纵向能散的调制原理

NB1是一个用于SFC-SSC束流纵向匹配的聚束器, 它的主要设计参数为, 漂移空管长 $39.3\text{cm}$ , 聚束器

间隙宽度3cm, 全孔径5cm, 工作频段18—54MHz, 电压  $V_{\max}=100\text{kV}$ ,  $V_{\min}=5\text{kV}$ .

在聚束时, 它主要作用是减小其后束流的纵向相宽; 由于CSRm在采用多次多圈注入时, 并不考虑SFC与CSRm之间的高频频率之间的匹配. 因此, 在这里把NB1作为一个调制SFC引出束流能散的均能器, 即通过增大束流脉冲的纵向相宽为代价来减小束流能散.

### 3.2 NB1对SFC引出束流纵向能散调制的模拟计算

根据离子通过漂移空间和聚束器的纵向运动方程<sup>[2]</sup>, 对SFC引出束通过NB1的能量调制进行了理论计算(图2, 表2).

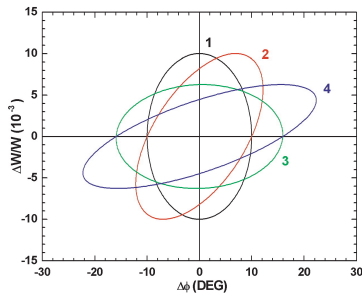


图2 束流通过聚束器前后的相图  
(1-SFC出口, 2-聚束器入口, 3-聚束器出口, 4-CSRm入口)

表2 束流通过聚束器前后的能散

离子种类	束流能量/ MeV/u	SFC出口束流		聚束器 电压/kV	聚束器 后能散(%)
		相宽/(°)	能散(%)		
$O_{16}^{5+}$	5.78	8	0.7	38.0	0.47
		10	1.0	44.0	0.63
$Ar_{40}^{15+}$	10.35	8	0.7	50.0	0.47
		10	1.0	57.0	0.63

## 4 三狭缝系统对束流横向发射度的限制

### 4.1 三狭缝系统的限束原理

在SFC向CSRm供束时, SFC引出束流的发射度( $24\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ )大于CSRm的接收度( $20\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ), 通过调节后输运线上的三狭缝系统的狭缝宽度可以制备出符合CSRm横向发射度要求的束流. 首先, 通过前输运线及旁通线的四极铁参数的调节, 使得束流在SSC大厅三狭缝的中间狭缝处形成一个束斑直径8mm的束腰. 以这点作为此后输运线的起点, 将束流输运到CSRm. 其次, 调节三狭缝的狭缝宽度来限制束流的发射度, 经三狭缝后束流的实际相面积为六边形(图3), 取其内切椭圆作为经三狭缝后束流的初始

相椭圆(在此取高斯分布作为四维相空间中离子对应相点的分布模型, 图4), 计算出其相面积大小, 以满足CSRm对注入束流发射度的要求.

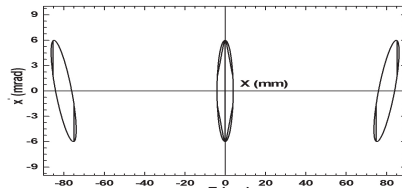


图3 束流通过三狭缝时的相图

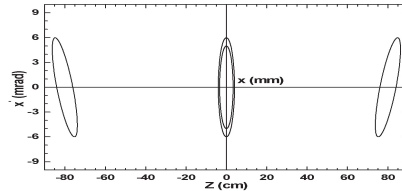


图4 束流通过三狭缝后经处理的相图

### 4.2 通过三狭缝系统后的束流发射度与离子通过率的计算

设束流中的离子在横向四维相空间中对应的相点满足高斯分布函数

$$f(x, x', y, y') = C e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{x'^2}{\sigma_{x'}^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{y'^2}{\sigma_{y'}^2} \right)}$$

其中  $C = \frac{1}{4\pi^2 \sigma_x \sigma_y \sigma_{x'} \sigma_{y'}}$  四维相空间的投影平面为相椭圆平面, 设相点在二维投影相椭圆平面内的离子占离子总数的95%, 且在三狭缝的中间狭缝处的横向投影相椭圆发射度分别为  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 24\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ,  $x_{\max} = y_{\max} = 4\text{mm}$ ,  $x'_{\max} = y'_{\max} = 6\text{mrad}$ 的束腰.

图5表示了离子在横向四维相空间中对应的相点满足高斯分布的束流通过狭缝时内外狭缝宽度及外狭缝宽度与束流通过狭缝后发射度的关系曲线. 图6表示了离子在横向四维相空间中对应的相点满足高斯分布的束流通过狭缝后的发射度与离子通过率的关系曲线.

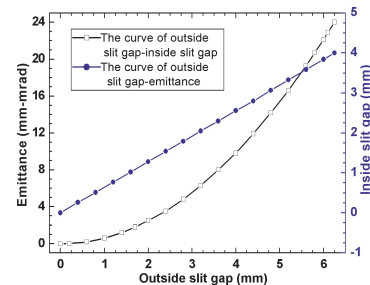


图5 内外狭缝宽度及外狭缝宽度与束流通过狭缝后发射度的关系曲线

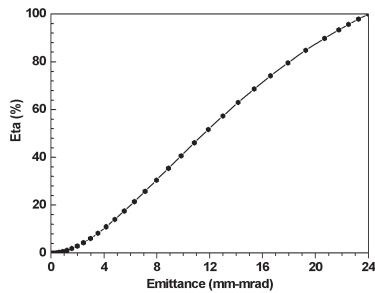


图6 束流通过狭缝后的发射度与最大离子通过率的关系曲线

## 5 结论

通过上面的分析计算可以得出, 对轻的重离子(C-Ar), SFC可以与CSRm的直接匹配, 且采用多次

多圈注入时, 可以通过对束流的纵向能散及横向发射度的调制来提高CSRm的注入效率.

在理想情况下, 对于最大能散为0.7%—0.8%的SFC引出束流, 通过聚束器的调制可使其降低到0.5%以内, 完全满足CSRm对注入束流能散的要求. 对于最大能散为0.8%—1.0%的束流, 通过聚束器的调制可使其降低到最大能散0.5%—0.63%, 使大部分的束流能满足CSRm对注入束流纵向能散的要求.

SFC的引出束流的横向发射度通过三狭缝系统后, 在损失束流尽可能小的情况下, 完全可以限制到CSR要求的发射度以内, 在离子的相点在四维横向相空间中满足高斯分布时, 符合CSRm横向发射度要求的束流通过三狭缝系统的最大理想传输效率为87.4%.

## 参考文献(References)

- 1 TANG Jing-Yu, LI Hao-Hu, YUAN You-Jin. HEP & NP, 2001, **25**(7): 684—688 (in Chinese)  
(唐靖宇, 李浩虎, 原有进. 高能物理与核物理, 2001, **25**(7): 684—688)
- 2 YIN Quan-Min, HE Yi. Lognitudinal Match of SFC-SSC Beamline. The Progress Report of HIRFL. 1984, **3**: 113—125

# Beam Match and Preparation of SFC-CSR

ZHANG Jin-Quan LI Zhi-Hui MA Lei YIN Quan-Min

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

**Abstract** In order to match the beam from the injection machine SFC of the HIRFL to the main ring of HIRFL-CSR, both beam emittance confining method and beam energy spread reducing method are proposed. The beam preparation principles and calculation results are presented.

**Key words** beam matching, buncher, three slits