

文章编号: 1007-4627(2015)01-0050-04

## SSC-LINAC 重离子 RFQ 动力学模拟与研究

张小虎<sup>1, 2</sup>, 原有进<sup>1</sup>, 夏佳文<sup>1</sup>, 刘戈<sup>3</sup>, 殷学军<sup>1</sup>, 杜衡<sup>1, 2</sup>, 李钟汕<sup>1, 2</sup>, 陆元荣<sup>3</sup>, 何源<sup>1</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 北京大学重离子物理研究所, 北京 100871)

**摘要:** 采用多粒子跟踪程序 BEAMPATH 对 SSC-LINAC 重离子 RFQ 直线加速器进行动力学模拟, 分别对 RFQ 的接受度、高频特性、束流稳定性、空间电荷效应等进行了分析。该 RFQ 具有很大的纵向接受度, 有利于束流在 RFQ 中的传输; 高频特性研究表明, 翼间电压设定在理论值以上时, 该 RFQ 都能保持较好的束流特性; 束流稳定性分析结果表明, 该 RFQ 具有很大的束流失配容忍度; 空间电荷效应研究表明, 当束流强度低于 0.5 mA 时, 束流传输不受影响。综合研究结果表明, 53.667 MHz 重离子 RFQ 具有较好的动力学特性, 满足 SSC-LINAC 直线加速器的设计要求。

**关键词:** BEAMPATH; 接受度; 高频特性; 稳定性; 空间电荷效应

**中图分类号:** TL53      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.01.050

### 1 引言

SSC-LINAC<sup>[1]</sup>是中国科学院近代物理研究所在兰州重离子研究装置(HIRFL)<sup>[2]</sup>上新建的一台 CW 重离子直线加速器。作为分离扇回旋加速器(SSC)<sup>[3]</sup>的注入器, SSC-LINAC 将进一步提高整个 HIRFL 系统的运行效率。SSC-LINAC 直线注入器有 2 种运行模式: (1) 该直线注入器为 SSC 提供 1.025 MeV/u 的重离子束, 然后经 SSC 进一步加速到 10 MeV/u, 再注入到冷却储存环主环(CSRm)中开展更广泛的中能强流核物理实验; (2) SSC-LINAC 为 SSC 提供 0.58 MeV/u 的轻离子束, 经 SSC 加速到 6 MeV/u, 直接向实验终端供束, 可开展低能核物理、材料物理等实验。SSC-LINAC 建成后, SSC 的引出束流强度将提高 1~2 个量级, 束流品质也将得到大幅度改善, 这将有利于单粒子效应、材料辐照等实验的开展。

SSC-LINAC 重离子直线加速器由 ECR 离子源、低能束流传输线、53.667 MHz 重离子 RFQ、中能束流传输线、53.667 MHz IH-DTL 和高能束流传输线组成。SSC-LINAC 工作频率为 4 倍的分离扇回旋加速器高频频率, 从直线加速器中引出的每四个束团, 仅有一个束团可以被 SSC 俘获加速, 这个束团称之为束团。为了提高束团的俘获效率, 需要在 RFQ 前安装预聚束器

对从离子源引出的束流进行预聚束。该预聚束器采用双间隙结构, 工作频率为 13.417 MHz, 设计电压为 0.65 kV; 采用三次谐波合成技术, 对束流进行锯齿波形调制, 其聚束效率可以达到 80% 以上。

53.667 MHz 重离子 RFQ 是由中国科学院近代物理研究所和北京大学重离子研究所联合研制的, 其动力学设计<sup>[4]</sup>是由北京大学重离子研究所负责完成。该 RFQ 采用四杆型结构, 工作频率选择为 53.667 MHz, 是 SSC 回旋加速器高频工作频率的 4 倍; 工作电压为 70 kV, 功率损耗 26 kW, 引出同步相位为  $-30^\circ$ ; 可加速从 C 到 U 之间的所有离子, 注入能量为 3.728 keV/u, 引出能量为 143 keV/u, 设计束流强度为 0.5 mA。图 1 展示了 Parmteqm 对 RFQ 的模拟结果, 入口发射度为  $400 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ , 束流包络在 4.5 mm 以内。

本文采用最新的 BEAMPATH 程序<sup>[5]</sup>对 RFQ 的束流动力学进行了模拟。该程序是由美国劳斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)加速器科学部的 Yuri Batygin 先生编写的, 可以模拟束流在不同加速器结构中的多粒子跟踪过程。表 1 列出了 Parmteqm 和 BEAMPATH 计算出的匹配参数对比。图 2 展示了 BEAMPATH 对 RFQ 进行动力学模拟的结果, 入口发射度设定为  $122 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ , 对应的束流包络在 2.3 mm 以内。

收稿日期: 2014-03-14; 修改日期: 2014-05-10

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(11221064); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB845500)

作者简介: 张小虎(1986-), 男, 湖北云梦人, 博士, 从事直线加速器物理与应用研究; E-mail: zhangxiaohu@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>

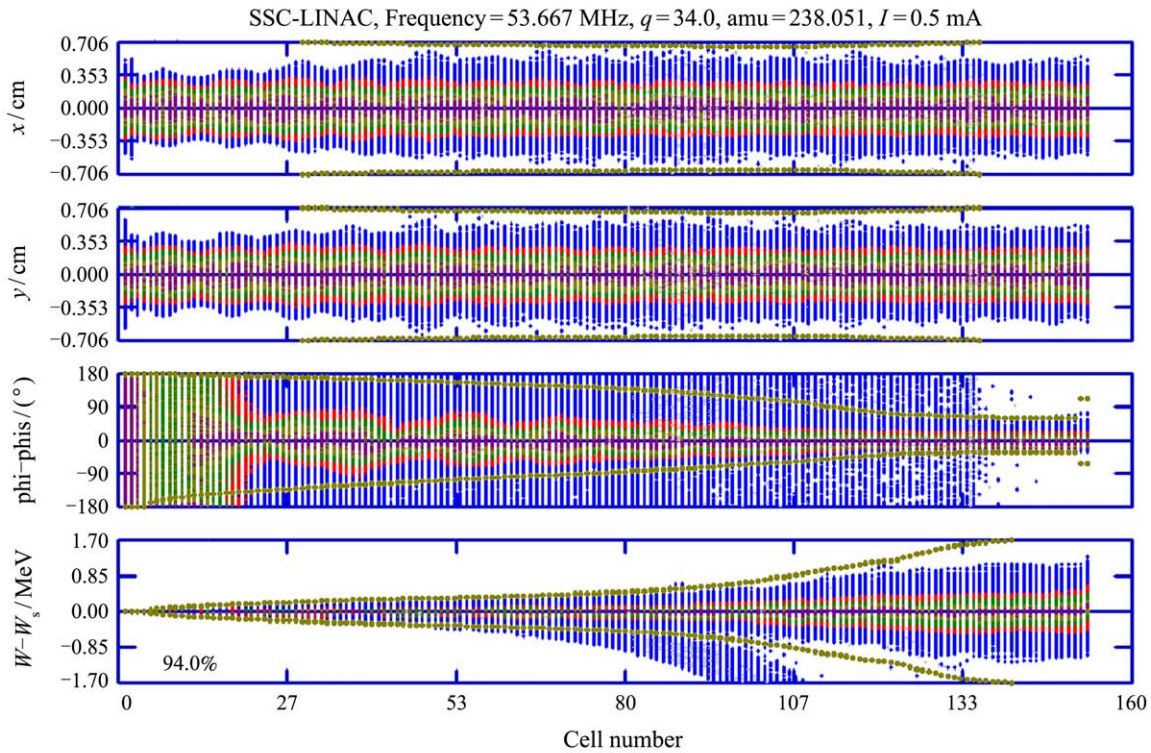


图 1 (在线彩图) Parmteqm 束流包络随 RFQ 纵向位置的分布

表 1 Parmteqm 与 BEAMPATH 匹配参数对比

Code	$\alpha_x$	$\alpha_y$	$\beta_x/(m/rad)$	$\beta_y/(m/rad)$
Parmteqm	0.9	0.9	0.05	0.051
BEAMPATH	0.95	0.93	0.05	0.053

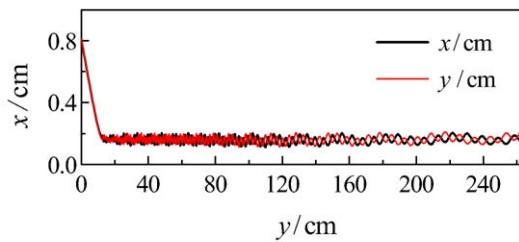


图 2 (在线彩图) BEAMPATH 束流横向包络随 RFQ 纵向位置的分布

## 2 RFQ 的束流动力学研究

为了更深入地探究 SSC-LINAC 重离子 RFQ 的物理性能, 本文从 SSC-LINAC 直线注入器的角度出发, 利用小发射度束流对 53.667 MHz 重离子 RFQ 的束流动力学特性进行了深入分析, 主要包括以下 4 个方面: (1) RFQ 入口接收度; (2) RFQ 高频特性; (3) RFQ 束流稳定性; (4) 空间电荷效应。利用小发射度束流进行束流动力学模拟分析更有利于探究束流在 RFQ 中的损失机制。

### 2.1 RFQ 入口接收度

在 RFQ 的动力学研究过程中, 首先要对其接收度进行分析, 以获得该 RFQ 的最佳匹配参数。在计算 RFQ 接收度时, 为了实现对 RFQ 入口束流的全俘获, RFQ 出口的限制条件设置为:  $|\Delta P/P| < 2.7\%$ ,  $|\Delta\phi| < 35^\circ$ 。图 3 分别展示了重离子 RFQ 的纵向接收度和经过预聚束器聚束后的束流在 RFQ 入口处的纵向相空间分布。可以看出, SSC-LINAC 重离子 RFQ 的纵向接收度很大, 其主束团的俘获效率可以达到 83.9%。

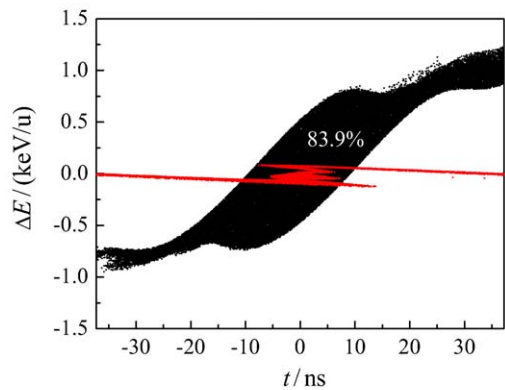


图 3 (在线彩图) RFQ 的纵向接收度和束流在入口的纵向空间分布

黑色为 RFQ 入口纵向接收度; 红色部分为经过预聚束器聚束后的束流在 RFQ 入口的纵向相空间分布。

### 2.2 RFQ高频特性

对于低能重离子直线加速器，都存在一条特定的同步粒子能量曲线：

$$W_s(z) = q(E_0T)_{\text{design}} \cos \phi_s \quad (1)$$

当带电粒子感受到不同的电场  $E_0T$  时，同步粒子能量曲线仍可保持不变，而新的同步相位  $\phi$  将由下式给出：

$$\cos \phi = q(E_0T)_{\text{design}} \cos \phi_s / (E_0T) \quad (2)$$

由此可以得到保持同步粒子能量曲线不变的条件为

$$E_0T \geq (E_0T)_{\text{design}} \cos \phi_s \quad (3)$$

对于 SSC-LINAC 重离子 RFQ，设计电压为 70 kV，引出同步相位为  $-30^\circ$ 。经多粒子跟踪程序 BEAMPATH 模拟发现：当翼间电压大于 62 kV 时，RFQ 引出能量保持不变。如图 4 所示，随着翼间电压的减小，RFQ 出口处的同步相位逐渐增大，其纵向稳定区随之变小。当翼间电压低于 62 kV 时，随着 RFQ 翼间电压的减小，RFQ 的传输效率随之减小；当翼间电压高于 62 kV 时，该 RFQ 便能正常工作。目前，RFQ 工作在设计电压 70 kV 时，对应的 Kilpatrick 值为 1.523；功率损耗为 33 kW，低于 RFQ 功率源的实测输出功率 52 kW。在加速较轻离子时，为了确保更好的束流状态，此 RFQ 可以工作在更高的电压下，此时在 RFQ 加速段的纵向稳定区更大，对束流的纵向俘获更容易，更有利于束流在 RFQ 中的稳定性传输。

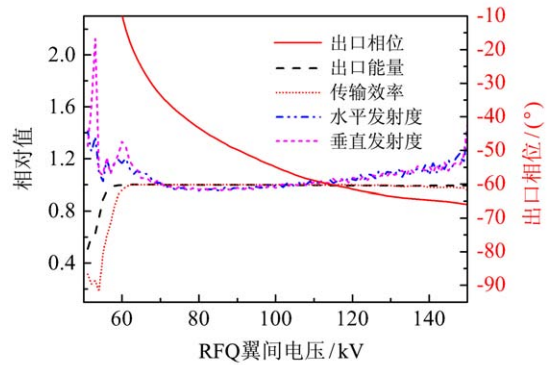


图 4 (在线彩图) 束流引出能量、传输效率、相对发射度增长和引出同步相位随 RFQ 翼间电压的变化

### 2.3 RFQ 束流稳定性

在重离子直线加速器中，从离子源引出的多电荷态混合离子束需经束流分析系统对其进行分析，选择出所需要的离子；然后再经匹配系统注入到 RFQ 中。在实际的加速器运行过程中，RFQ 的稳定性会受到入射束流稳定度的影响，因此研究入口束流的失配接受度，是对其稳定性评价的一个重要指标。图 5 中列出了入口束流参数对 RFQ 束流传输效率和横向相对发射度增长的影响。RFQ 入口束流发射度设定为  $122 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ，远小于该 RFQ 的横向接受度 ( $1000 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ )，入口束流参数的变化对传输效率几乎没有影响(图 5(a))；图 5(b) 反映了 RFQ 入口束流状态对发射度增长的映射关系。结果表明，束流发射度增长对  $\alpha_x$  的变化比  $\beta_x$  的变化更敏感；该 RFQ 有较大的束流失配容忍度(发射度增长低于 10% 的区域)，有利于束流的稳定性传输。

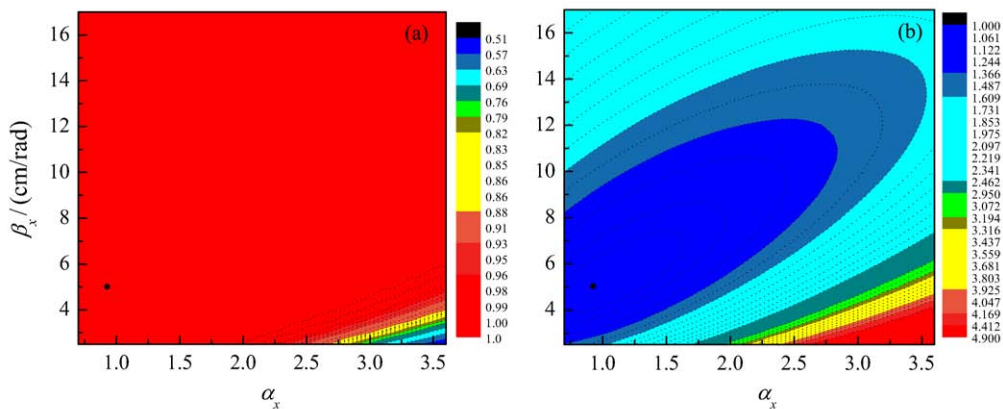


图 5 (在线彩图) RFQ 传输效率(a)、横向发射度增长(b)与 RFQ 入口束流参数之间的对应关系  
黑色点为设计匹配点

### 2.4 空间电荷效应

对于低能强流 RFQ 而言，研究空间电荷效应对束流品质的影响也是十分重要。这里采用 PIC(Particle-

In-Cell mode) 程序 BEAMPATH 对该 RFQ 进行了小发射度束流的空间电荷效应模拟。从图 6 可以看出，该 RFQ 工作在 0.5 mA 以下时，对 RFQ 出口的束流品质

质基本上没有影响。目前,从 ECR 离子源引出的重离子束流强度一般都不会超过 0.5 mA,因此,空间电荷效应对 SSC-LINAC 重离子 RFQ 中束流的影响可以忽略不计。

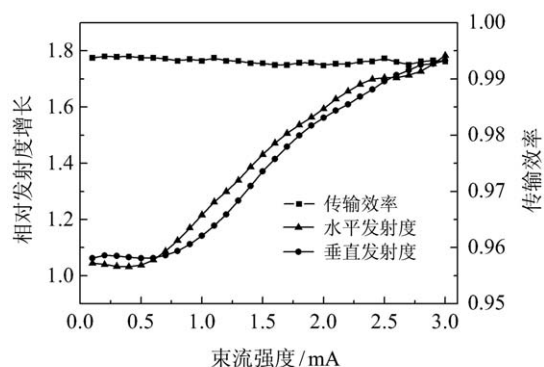


图 6 RFQ 束流传输效率和相对发射度增长随束流强度的变化

### 3 结论与展望

SSC-LINAC 重离子 RFQ 有着很大的束流接收度和束流失配容忍度,这都有利于束流在 RFQ 中的稳定性传输。当 RFQ 翼间电压高于 62 kV 时,该腔体就

可以正常工作;为了确保束流传输的稳定性,RFQ 将工作在更高的电压。当束流强度在 0.5 mA 以下,空间电荷效应对束流传输的影响可以忽略。综上所述,53.667 MHz 重离子 RFQ 满足 SSC-LINAC 的设计要求,目前 RFQ 已经成功加速了  $^{18}\text{O}^{5+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{8+}$  等束流,实验结果与动力学模拟结果具有很好的一致性。

尽管如此,RFQ 出口的纵向发射度增长依然较大,RFQ 前的预聚束器将被用于抑制束流纵向发射度的增长。

### 参考文献:

- [1] HE Y, WANG Z J, XIAO C, *et al.* Conceptual Design of Linear Injector For SSC Of HIRFL[C] //Proceedings of IPAC2011. San Sebastián: Spain, 2011: 2610.
- [2] XIA J W, ZHAN W L, WEI B W, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2002, **488**(1): 11.
- [3] ZHAN W L, XIA J W, ZHAO H W, *et al.* Nuclear Physics A, 2008, **805**(1): 533c.
- [4] LIU G, LU Y R, HE Y, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2013, **701**: 186.
- [5] BATYGIN Y K. Nucl Instr and Meth A, 2005, **539**(3): 455.

## Beam Dynamics Simulation and Research of SSC-LINAC Heavy Ion RFQ

ZHANG Xiaohu<sup>1, 2, 1)</sup>, YUAN Youjin<sup>1</sup>, XIA Jiawen<sup>1</sup>, LIU Ge<sup>3</sup>, YIN Xuejun<sup>1</sup>, DU Heng<sup>1, 2</sup>,  
LI Zhongshan<sup>1,2</sup>, LU Yuanrong<sup>3</sup>, HE Yuan<sup>1</sup>

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The RFQ beam dynamics of a heavy ion linac was investigated in this paper and the BEAMPATH code was employed in this study. The main research was focused on the beam performances depending on longitudinal acceptance, RF properties, beam instability and space charge effect. The RFQ has large longitudinal acceptance in design, which brings the beam performances well. In the RF parameter study, the beam can keep good transmission in the acceleration even the vane voltage is larger than the theoretical value. It is also shown that the RFQ has a large robustness for the mismatch of the input beam by the analysis of the beam instability. Furthermore, the beam evolution is independent on the space charge effect when the beam current is less than 0.5 emA. The preliminary analysis of the beam dynamics shows that the 53.667 MHz heavy ion RFQ has a promising performance, which meets the requirements of SSC-LINAC.

**Key words:** BEAMPATH; acceptance; RF performance; input beam instability; space charge effect

Received date: 14 Mar. 2014; Revised date: 10 May 2014

Foundation item: Foundation for Innovative Research Groups of National Natural Science Foundation of China (11221064); National Basic Research Program of China (973 Program)(2014CB845500)

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

<http://www.npr.ac.cn>