



300 MeV质子重离子同步加速器慢引出动力学研究

高韵哲 阮爽 石健 杨建成 夏佳文 李玥 周扬

Study on Slow Extraction Dynamics of 300 MeV Proton and Heavy Ion Synchrotron

GAO Yunzhe, RUAN Shuang, SHI Jian, YANG Jiancheng, XIA Jiawen, LI Yue, ZHOU Yang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022050>

引用格式:

高韵哲, 阮爽, 石健, 杨建成, 夏佳文, 李玥, 周扬. 300 MeV质子重离子同步加速器慢引出动力学研究[J]. *原子核物理评论*, 2023, 40(2):207–213. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022050

GAO Yunzhe, RUAN Shuang, SHI Jian, YANG Jiancheng, XIA Jiawen, LI Yue, ZHOU Yang. Study on Slow Extraction Dynamics of 300 MeV Proton and Heavy Ion Synchrotron[J]. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(2):207–213. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022050

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

300MeV质子同步加速器概念设计优化 (英文)

Optimization for the Conceptual Design of a 300 MeV Proton Synchrotron

原子核物理评论. 2017, 34(2): 158–163 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.02.158>

重离子治癌引出BUMP电源控制器设计

Design of Controller for Extraction BUMP Power Supplies in Medical Heavy-ion Facility

原子核物理评论. 2021, 38(2): 153–158 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020080>

空间辐射地面模拟装置(SESRI)同步加速器注入设计和模拟研究

Injection Design and Simulation Study of Synchrotron in SESRI

原子核物理评论. 2017, 34(4): 730–734 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.04.730>

重离子治疗装置同步加速器高频控制系统研制

Development of RF Control System for Heavy Ion Medical Machine

原子核物理评论. 2019, 36(1): 55–61 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.055>

IH型漂移管直线加速器的束流动力学研究 (英文)

Beam Dynamics Study of the IH-DTL New Injector for HIRFL-CSR

原子核物理评论. 2017, 34(2): 170–176 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.02.170>

重离子治癌装置4 MeV/u IH型漂移管直线注入器的动力学设计

Design of a 4 MeV/u IH-DTL Injector for Cancer Therapy

原子核物理评论. 2018, 35(1): 34–39 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.01.034>

文章编号: 1007-4627(2023)02-0207-07

300 MeV 质子重离子同步加速器慢引出动力学研究

高韵哲^{1,2,3}, 阮爽^{1,3,†}, 石健¹, 杨建成^{1,3}, 夏佳文^{1,2,3}, 李玥¹, 周扬^{1,2,3}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049;
3. 惠州离子科学研究中心, 广东 惠州 516003)

摘要: 300 MeV 质子重离子同步加速器是 SESRI (空间环境模拟研究装置) 的重要组成部分, 慢引出系统动力学研究是该同步环设计的关键。引出系统采用三阶共振慢引出与 RF-Knockout(RF-KO) 方案为终端提供 2~8 s 准连续束, 在引出静电偏转板处利用 3-bump 局部凸轨可适当调节螺距和引出角度, 但同时也会减小水平工作点, 缩小相空间稳定区面积, 影响束流正常引出。模拟结果表明, 凸轨内二极磁铁和六极磁铁会引起水平工作点减小, 造成引出初始阶段粒子大量溢出。因此, 基于自主编写的粒子追踪程序 SESP 对束流时间结构进行了分析, 并通过优化激励调幅曲线改善了束流时间结构的均匀性。

关键词: SESRI; 慢引出; RF-KO; 局部凸轨; 束流均匀性

中图分类号: TL73 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.40.2022050

0 引言

空间环境地面模拟装置 SESRI(Space Environment Simulation and Research Infrastructure) 是由哈尔滨工业大学负责建造的国家“十二五”科学装置集群, 其中委托中国科学院近代物理研究所设计的 300 MeV 质子重离子加速器是其重要组成部分^[1]。它是我国首台专用于航天器件辐照加速器装置, 为研究离子辐射与材料、器件及生命体的相互作用规律提供地面模拟辐照源。装置整体结构布局如图 1 所示, 由 ECR 离子源、直线加速器、注入线、同步加速器、高能线及三个实验终端构成, 可提供 100~300 MeV 的质子, 以及 7~80 MeV/u 的重离子。

同步加速器 lattice 为六边形结构, 具有 6 个超周期, 每个周期包含一块 60° 偏转角的二极磁铁与两块四极磁铁, 设计最大磁刚度为 2.8 Tm, 周长为 43.89 m。ECR 离子源可提供质子到铋之间的稳定束流, 并经过直线加速器后以 5.6 MeV (p)~2 MeV/u (²⁰⁹Bi³²⁺) 的能量通过多圈注入方式注入到同步环中, 随后由单个磁合金加载腔将束流加速到引出能量 300 MeV (p)~7 MeV/u (²⁰⁹Bi³²⁺), 谐波数为 1 (p)~4 (²⁰⁹Bi³²⁺)。慢引出系统用于提供秒量级的准连续束, 经高能线传输至实验终端以开展器件及生物辐照研究。同步环主要参数如表 1 所列。

表 1 同步加速器设计参数

参数	数值
周长/m	43.886 4
磁刚度/(T·m)	0.32~2.80
运行周期/s	3~10
粒子种类	p~ ²⁰⁹ Bi ³²⁺
最高能量/(MeV·u ⁻¹)	300(p)/80(⁴ He ²⁺)/15(⁸⁴ Kr ¹⁸⁺)/7(²⁰⁹ Bi ³²⁺)
工作点 Q_x/Q_y	1.72/1.62(注入)1.674/1.62(引出)
动量分散 ($\Delta p/p$)	±0.5%
接受度 $A_x/A_y/(\pi\text{mm}\cdot\text{mrad})$	200/30
引出前发射度 $\epsilon_H/\epsilon_V/(\pi\text{mm}\cdot\text{mrad})$	26/4(p), 31/5(⁴ He ²⁺), 73/11(⁸⁴ Kr ¹⁸⁺), 107/15(²⁰⁹ Bi ³²⁺)
自然色品 Q'_x/Q'_y	-0.72/-0.94
累积粒子数(ppp)	²⁰⁹ Bi ³²⁺ :1.85×10 ⁸ ; p:2.3×10 ¹⁰
终端粒子数/(p-spill ⁻¹)	10 ⁶ ~10 ⁹



图 1 SESRI 装置布局图 (在线彩图)

收稿日期: 2022-04-19; 修改日期: 2022-05-08

基金项目: 中国科学院西部之光基金项目 (Y913030); 国家自然科学基金资助项目 (11905268)

作者简介: 高韵哲 (1993-), 男, 甘肃兰州人, 博士研究生, 从事加速器物理研究; E-mail: gaoyunzhe@impcas.ac.cn

† 通信作者: 阮爽, E-mail: ruanshuang@impcas.ac.cn

本文在同步加速器引出系统物理设计基础上, 探讨局部凸轨对慢引出的影响, 并通过自主编写的多粒子追踪程序 SESP(Slow Extraction Simulation Program)对束流时间结构进行模拟研究。

1 慢引出系统

1.1 设计概述

该同步加速器采用水平三阶共振^[2]和 RF-KO^[3]的慢引出方式, 利用六极磁铁驱动形成三角形相稳定区, 配合横向激励使粒子振荡幅度逐渐增大, 并沿特定界轨进入静电偏转板(ES)而被引出。系统元件主要包括用于驱动粒子运动至非稳定区而引出的横向激励, 1 块静电偏转板用于将粒子偏转至后续的切割铁之内, 3 台 Bump 磁铁用于在 ES 处形成局部凸轨, 8 块六极磁铁, 呈环中心对称分布, 以使共振驱动与色品校正相互独立。其中水平色品校正和垂直色品校正用于减小因动量分散导致的工作点漂移及引出时满足 Hardt 条件^[4]。共振驱动六极铁用于形成特定形状和大小相稳定区。同时环内布局了两台快四极磁铁用于抑制电源纹波, 调节束流引出均匀性, 引出元件布局如图 2 所示。

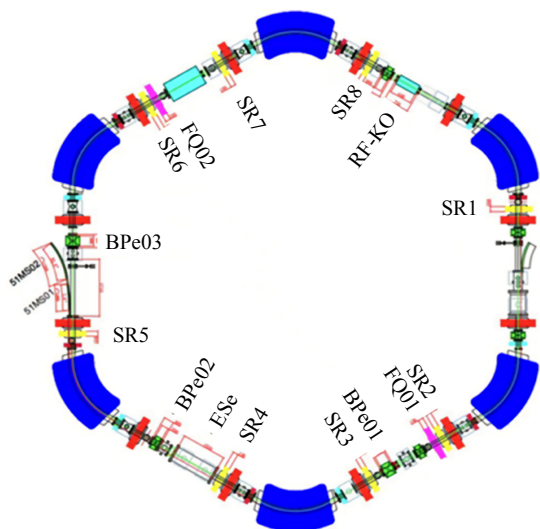


图 2 同步环引出系统元件布局(在线彩图)

以 300 MeV 质子束为例, 水平工作点设置为 1.671, 考虑到注入束的最大包络及闭轨余量, 引出静电偏转板将放置在水平位置 55 mm 处, 入口局部凸轨幅值为 10 mm 以确保合适的引出螺距。具体相图如图 3 所示: 引出螺距为 10.4 mm, 角度 -6.7 mrad。归一化相空间中界轨角度为 36.6°, 符合理论要求。动量分散为 0 及 ±1% 的粒子最后三圈轨道如图 4 所示, 由于色散函数为正, 因此各元件处横向位置远离中心轨道的粒子动量分散为 1%, 最靠近中心轨道的粒子动量分散为 -1%。

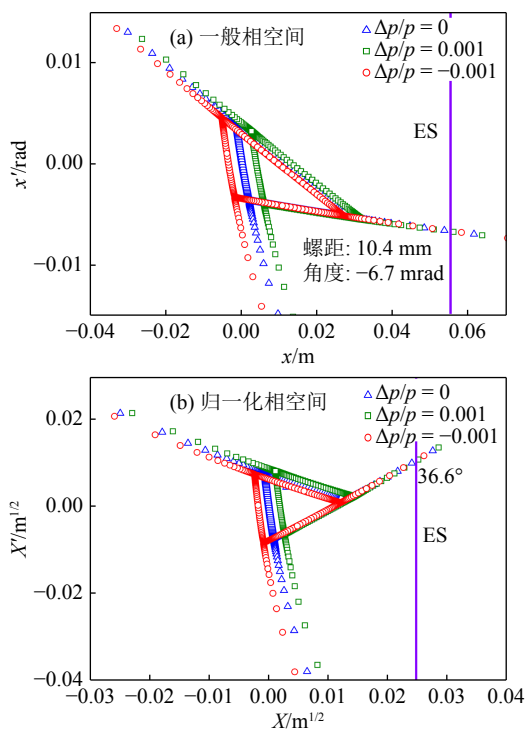


图 3 ES 入口引出相图(在线彩图)

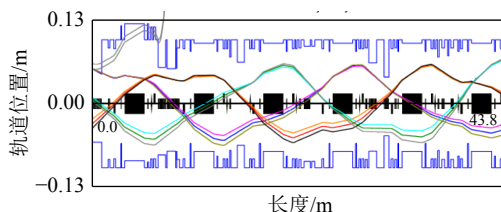


图 4 不同动量分散粒子最后三圈轨道(在线彩图)

1.2 局部凸轨对慢引出的影响

局部凸轨是慢引出设计中很重要的一部分, 对于引出发射度较小的束流而言, 粒子通过界轨进入 ES 时螺距往往较大, 甚至会超过极板间隙而造成束流损失。而局部凸轨的引入会整体移动相稳区使其靠近 ES 阳极丝, 适当减小引出螺距, 提高引出效率, 同时改变引出角度, 降低 ES 极板电压。此外, 在局部凸轨的辅助下, 束流最后三圈轨道包络也能够相应减小。

值得注意的是, 局部凸轨内部往往包含了其它的磁铁元件, 且每个元件处的参考轨道均发生了变化, 从而改变全环工作点影响束流慢引出。有无 10 mm 局部凸轨时静电偏转板入口处相稳区大小如图 5 所示, 局部凸轨的存在将使相稳区面积由原来的 31.7 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 减小为 14.3 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$, 导致引出起始段大量粒子溢出, 造成束流引出不均匀, 因此凸轨对慢引出的影响需要进行详细研究。

由于慢引出工作点设置在三阶共振线附近, 相稳区

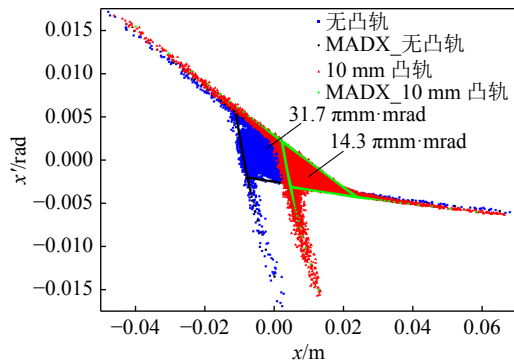


图 5 有/无凸轨时 ES 入口束流相空间分布 (在线彩图)

面积、激励参数均与此有关，而不同元件处局部凸轨的存在使得工作点产生偏移从而影响束流引出。对于漂移节，闭轨畸变不影响整个束流光学。在四极铁中，大的轨道偏差将使得粒子受到二极场分量，对束流光学产生影响，但在单个磁铁中，该影响却非常微小。而在二极铁中，当局部凸轨引入附加角度时，会导致较大的工作点变化，相当于改变了二极铁的边缘角。对于六极铁，传输过程中存在 x, y 方向的耦合，会使局部凸轨转变成全环闭轨畸变，进一步影响工作点。如图 6 所示，ES 入口 10 mm 局部凸轨内部同时包含了二极铁 (RB)、四极铁 (QF) 和六极铁 (SR/SCH/SCV)，它们共同引起的工作点变化近似等于单个元件引起的变化线性叠加。将局部凸轨内元件分为 5 部分，各自引入的工作点变化如表 2 所列。线性叠加之后总的工作点变化约为 -4.75×10^{-4} 。

工作点的变化同样会影响六极铁相移和总的归一化强度。如图 7 所示，在共振矢量图上各位置处六极铁相移在有凸轨时会明显改变，等效六极铁强度 S_{virt} 相

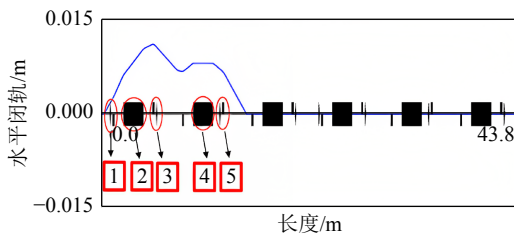


图 6 SESRI 中静电偏转板处局部凸轨 (在线彩图)

表 2 局部凸轨内不同元件导致的工作点变化

序号	元件	工作点变化
1	SCV+QD	0.00
2	RB	5.27×10^{-4}
3	QF+SR4	-2.49×10^{-3}
4	RB	3.27×10^{-4}
5	SCH+QF	1.16×10^{-3}
总的工作点变化		-4.75×10^{-4}

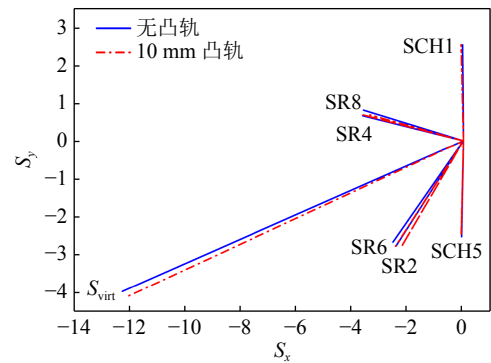


图 7 同步环六极铁共振矢量图 (在线彩图)

应变化了 -0.13 。根据相稳区面积计算公式： $S_{\Delta} = \frac{48\sqrt{3}\pi^2}{S^2} (q + \xi \frac{\Delta p}{p})^2$ ，可得动量分散 $\frac{\Delta p}{p}$ 为 0 的粒子凸轨引起的相稳区面积将减小至 $23.4 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。其中 Δp 为非同步粒子相对同步粒子的动量偏差， p 为同步粒子动量， S 为等效六极铁强度， q 为工作点与三阶共振线的偏差， ξ 为全环色品。此时计算得出的相稳区面积仍大于 MADX^[5] 粒子跟踪所得面积 ($14.3 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$)，表明在有局部凸轨时全环色品也发生了变化，从而进一步调节相稳区面积。

综上所述，慢引出特性决定了该过程对于工作点变化是非常敏感的，轨道扰动和束流光学变化均会对引出造成影响。局部凸轨就是最常见的一种扰动源，对于相稳区面积的改变主要有两个方面：第一，当局部凸轨内部包含二极磁铁、六极磁铁时会导致工作点的显著变化，等效六极铁相移、强度均会随之改变；第二，对于束流而言，凸轨的作用使得色品项发生变化，进一步改变相稳区面积。

2 引出束流均匀性研究

2.1 SESP 程序

整个慢引出过程采用自行编写的 C++ 程序 SESP (Slow Extraction Simulation Program) 进行模拟^[6]。其特点是可以实现慢引出过程中束流动力学的完整模拟，并具有较高的可靠性。加速器物理元件和相关物理模型均被封装成一个个独立的类模块，通过特定的类对象完成定义和调用。由 C++ 编译即可执行，具有很高的效率，因此适用于多粒子的长期追踪计算，同时模块化的程序结构又利于改写和扩展，具有很强的适应性。SESP 的整体框架结构如图 8 所示，对于不同加速器，可以灵活定义相关类对象，形成不同的元件组合。

针对束流慢引出，跟踪圈数往往在几十万到几百万圈，且包含非线性元件六极铁，这就要求束流传输应是

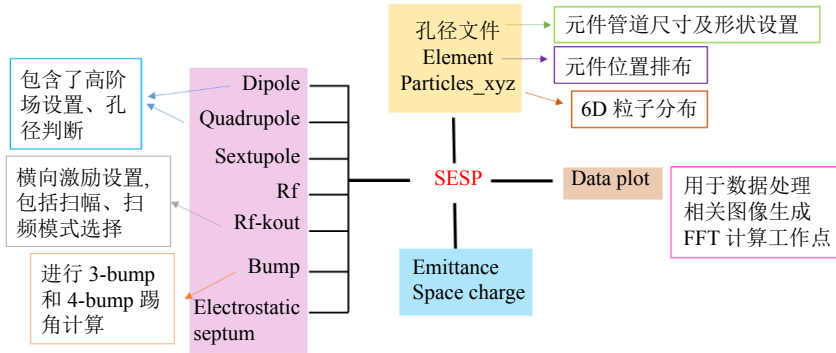


图 8 SESP 程序框架 (在线彩图)

保辛的, 以避免发射度由于跟踪误差而变化。因此, 为了提高粒子传输精度, 在跟踪模拟上采用基于 Hamiltonian 体系的逐元件传输。在曲率坐标系中可表示为如下形式 [7]:

$$H = \frac{\delta}{\beta_0} - (1 + hx) \times \sqrt{\left(\delta + \frac{1}{\beta_0} - \frac{q\phi}{cP_0}\right)^2 - (p_x - a_x)^2 - (p_y - a_y)^2 - \frac{1}{\beta_0^2 \gamma_0^2} - (1 + hx)a_z}, \quad (1)$$

其中: h 为曲率半径; β_0 、 γ_0 为相对论中的 β 和 γ ; a_x 、 a_y 、 a_z 为矢量势在各坐标轴上的分量; δ 为动量分散; c 为光速。当半径 $\rho \rightarrow \infty$ 时, $h \rightarrow 0$, 式 (1) 将变为直线段的 Hamiltonian 表达式。值得注意的是, 静态磁场中, 标量势 $\phi = 0$, 因此 $\frac{q\phi}{cP_0}$ 可以忽略。在已知矢量势的情况下即可求解出不同磁场元件中粒子的运动方程。在 SESP 中, 漂移节采用 Hamiltonian 的精确解, 二极铁则是对式 (1) 做二阶近似后得到传输矩阵, 四极铁和六极铁均利用四阶辛积分得到传输解 [8], 对于更高阶的磁场, 则采用薄透镜近似的方法来描述 [9]。慢引出核心元件 RF-KO 主要有扫频、扫幅工作模式, 其具体的表达式如下 [10-12]:

1) 单频模式:

$$V_{\text{RKO}} = V_0 \sin \theta(t), \quad (2)$$

$$\theta(t) = 2\pi f_k t + \pi \frac{\Delta f_k}{T_{\text{FM}} t (t - T_{\text{FM}})}, \quad 0 \leq t \leq T_{\text{FM}}, \quad (3)$$

$$f(t) = \frac{d\theta(t)}{2\pi dt} = f_k + \frac{\Delta f_k}{T_{\text{FM}}} \left(t - \frac{T_{\text{FM}}}{2}\right), \quad 0 \leq t \leq T_{\text{FM}}; \quad (4)$$

2) 双频模式:

$$V_{\text{RKO}} = \begin{cases} 2V_0 \cos\left(\frac{\pi}{2} \Delta f_k t\right) \sin\left[2\pi f_k t + \pi \Delta f_k \left(f_{\text{FM}} t - \frac{1}{2}\right) t\right], & 0 \leq t \leq \frac{T_{\text{FM}}}{2}; \\ 2V_0 \cos\left(\frac{\pi}{2} \Delta f_k t\right) \sin\left[2\pi f_k t + \pi \Delta f_k (f_{\text{FM}} - 1) \left(t - \frac{T_{\text{FM}}}{2}\right)\right], & \frac{T_{\text{FM}}}{2} \leq t \leq T_{\text{FM}}; \end{cases} \quad (5)$$

3) 扫幅模式:

$$V_0 = \sqrt{\frac{(1 - \exp)r_0^2}{k f_{\text{rev}} [t_{\text{ext}} \exp + t(1 - \exp)] \ln^2 \left[\exp + \frac{(1 - \exp)t}{t_{\text{cut}}}\right]}}, \quad (6)$$

$$\exp = e^{-\frac{r_0^2}{\sigma_0^2}}; \quad (7)$$

其中: V_0 为电压幅值; $\theta(t)$ 为相角; f_k 为激励中心频率; Δf_k 为频率带宽; T_{FM} 为扫频周期; f_{FM} 为重复频率; f_{rev} 为束流的回旋频率; t_{ext} 为束流引出时间; σ_0 为初始束团径向瑞利分布标准偏差; r_0 为引出界轨稳定边界; k 为相关常数。

图 9 是利用 SESP 和 MADX 对同一慢引出做相关模拟的结果对比。可以看到, 在有六极铁作用下相稳区面积、引出角度、螺距和束流时间结构与 MADX 吻合较好。因此, SESP 程序多粒子跟踪具有很好的可信度, 能够用于慢引出时长期粒子追踪的模拟与分析。

2.2 引出流强稳定性优化

由于同步环加速粒子种类多, 能量范围广, 引出束流发射度变化较大, 因此在慢引出设计中采用三组不同的参数设置, 分别用于引出小 ($\leq 30 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$)、中 ($> 30 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 且 $\leq 73 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$) 和大发射度 ($> 73 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$) 的束流。

对于小发射度而言 (水平工作点为 1.671, 主要引出质子束流), 整个相稳定区较小, 束团中心粒子距稳定区边界较近, 容易引出, 激励幅度的变化对于束流均匀性的影响也将更加敏感。图 10 是模拟 20 000 个粒子在

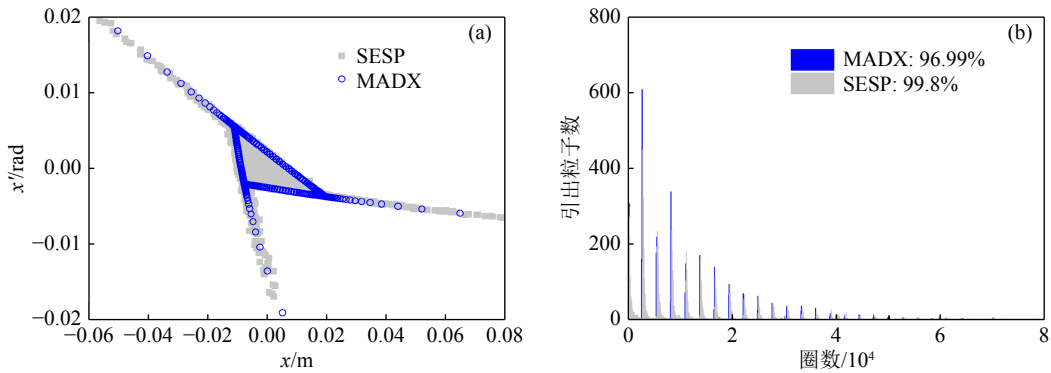


图 9 慢引出相图、束流时间结构与 MADX 的对比(在线彩图)

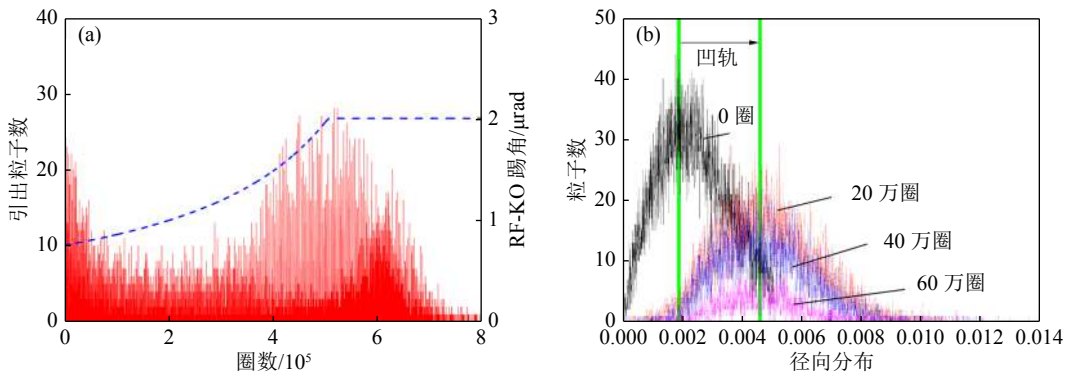


图 10 引出束流时间结构及循环束径向分布(在线彩图)

0.18 s 内的慢引出过程。在双频扫幅模式下由沿横向半径方向的分布可看出，在 40 万~60 万圈之间激励踢角增大，束核中心的粒子显著减少并被大量引出，时间结构呈现出明显的不均匀性。

如图 11 所示，以束流均匀性为准，分段调节激励引出波形，可见，在得到一个较好束流均匀性的情况下，激励波形的增益并不是一直增大的而是呈现时大时小的特点。尤其在 20 万~70 万圈之间，激励斜率明显小于理论曲线，在这一区间中，相稳区面积小，粒子数较多，所以较小的激励踢角即可让粒子进入非稳定区而引出。

由此可见，RF-KO 的激励慢引出与束流发射度是息息相关的，对于更重的粒子，引出能量更低，如 15 MeV/u 的 $^{84}\text{Kr}^{18+}$ ($73 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$) 和 7 MeV/u 的 $^{209}\text{Bi}^{32+}$

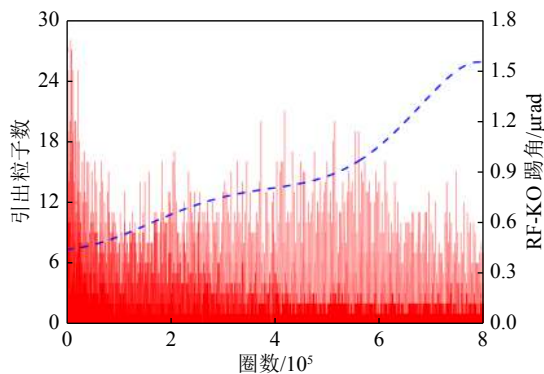


图 11 调节激励曲线后引出束流均匀性(在线彩图)

($107 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$)，束流发射度更大，慢引出工作点将分别相应增大至 1.674 和 1.676 用于扩大相稳区面积。此时束核粒子距离相稳区边界较远，它们的引出也更加适配理论激励曲线。由式 (5) 和 (6) 可知，调节 f_k 、 Δf_k 、 f_{FM} 、 r_0 、 σ_0 、 k 和 t_{ext} 可以优化慢引出曲线。扫频频率相关的参数主要用于控制频率范围及扫描速度，而调幅参数则主要控制扫幅曲线波形。如图 12 所示，是改变不同扫幅系数后激励波形的变化趋势， t_{ext} 主要决定了激励的最大踢幅及变化斜率。值得注意的是， t_{ext} 和实际的引出时间可以不相等，它仅仅是作为一个调节量。 r_0 、 σ_0 和 k 则主要是曲线的上下平移，而对斜率的改变是很微小的。图 13 和图 14 则是增大工作点时 1 s 内激励参数优化前后束流引出时间结构对比。可以看到，相关参数调节对于慢引出均匀性是非常重要的。

由于激励调幅曲线的理论模型假设整个引出过程中粒子横向分布为高斯型，同时推导过程做了相应简化，因此与实际的束流引出有一定偏差，主要体现在束流的扩散速率明显小于理论值。其次，不同发射度也对调幅曲线的适应性做了限制，即对于中和大发射度的束流，可以通过调节扫频、扫幅参数改变激励曲线，优化束流均匀性。而对于小发射度束流而言，简单的理论曲线更容易引起束流的不均匀性，需要借助反馈系统来进一步调节。

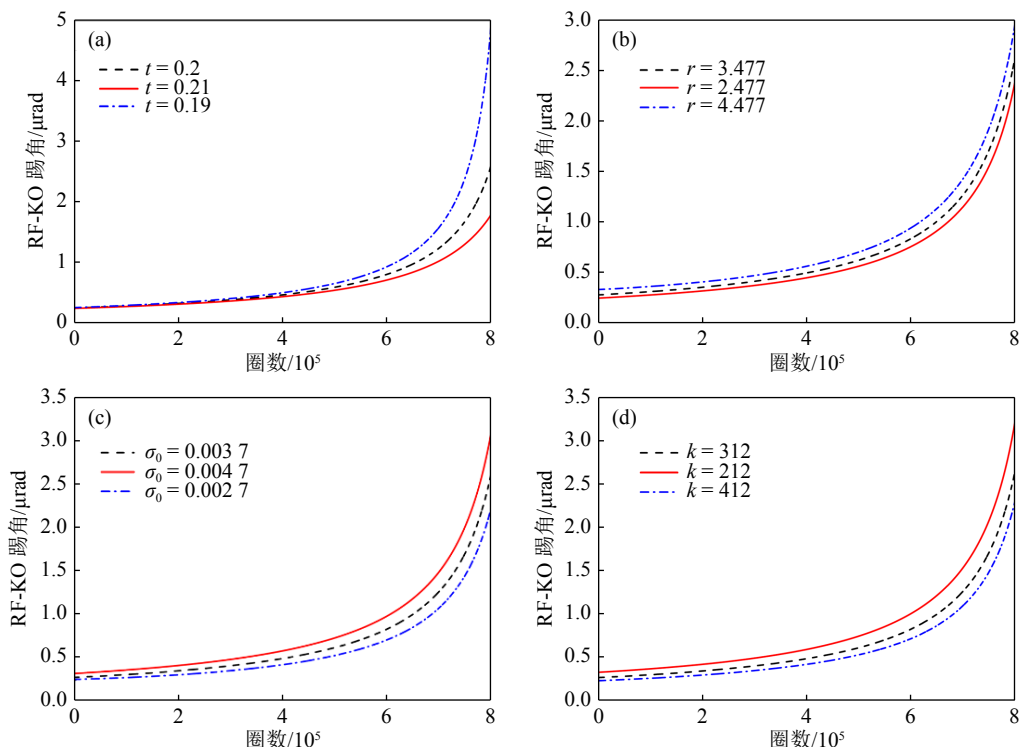


图 12 不同调幅参数对激励曲线的影响 (在线彩图)

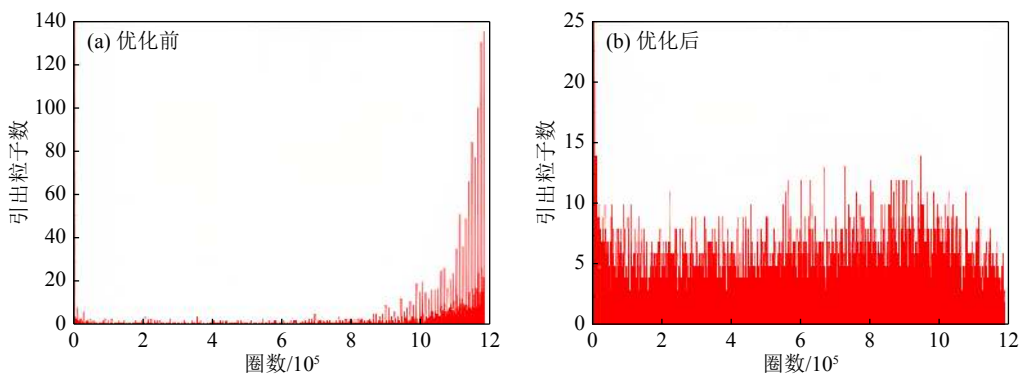


图 13 水平工作点为 1.674 时激励参数优化前后束流慢引出时间结构 (在线彩图)

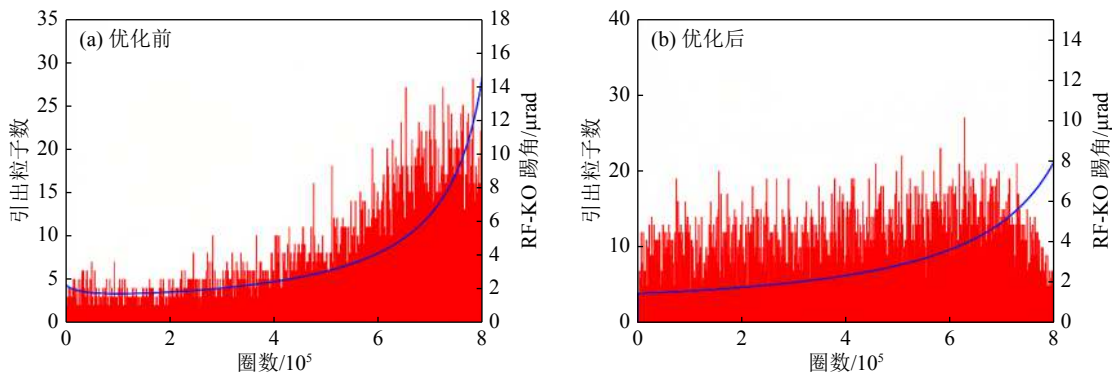


图 14 水平工作点为 1.676 时激励参数优化前后束流慢引出时间结构 (在线彩图)

3 结论

300 MeV 质子重离子同步加速器的慢引出物理设计

采用了三阶共振和横向 RF-KO 的方法。通过 MADX 和自主编写的模拟程序 SESP 对慢引出进行详细分析, 发现局部凸轨的引入会造成相稳区面积的收缩, 使得引出

起始阶段大量粒子溢出。同时激励调幅曲线的理论模型和引出发射度的不同制约着束流均匀性, 在不同引出工作点设置下, 需要通过激励参数调节来进一步改善束流时间结构, 对于较大束流发射度, 理论激励曲线更加适配, 因此, 参数优化可以获得较好的束流均匀性。

局部凸轨的影响主要体现在对束流光学造成影响, 改变工作点。尤其在小型加速器中, 引出直线节往往无法做到消色散, 会使这种效应更加明显。对于该同步环而言, 10 mm 的凸轨将引入 5.21×10^{-4} 的工作点变化以相面积收缩, 使得引出起始段大量粒子溢出。因此, 慢引出的设计需要充分考虑局部凸轨的影响, 适当减小六极铁强度, 以保证合适的相稳区面积。

参考文献:

- [1] JIANG H P, LIU J L, HAO H F, et al. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1350: 012081.
- [2] KOBAYASHI Y. *Nucl Instr and Meth*, 1970, 83: 77.
- [3] NODA K, KANAZAWA M, ITANO A, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 1996, 374: 269.
- [4] HARDT W. Ultraslow Extraction out of LEAR (transverse aspects)[R]. Genève: CERN PS/DL/LEAR Note 81-6, 1981.
- [5] GROTE H, SCHMIDT F. MAD-X-An upgrade from MAD8[R]. Genève: CERN-AB-2003-024 ABP, 2003.
- [6] RUAN Shuang. Extraction System Design and Beam Dynamics Study of the HIAF-BRing[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
(阮爽. HIAF-BRing引出系统总体设计与动力学研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.)
- [7] WOLSKI A. Beam Dynamics in High Energy Particle Accelerators [M]. London: Imperial College Press, 2014.
- [8] FOREST E, RUTH R D. *Physical D: Nonlinear Phenomena*, 1990, 43(1): 105.
- [9] MARIA R D. Sixtrack Physics Manual[EB/OL]. [2022-04-20]. <http://sixtrack.web.cern.ch/SixTrack/>.
- [10] NODA K, FURUKAWA T, SHIBUYA S, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2002, 492: 241.
- [11] NODA K, FURUKAWA T, SHIBUYA S, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2002, 492: 253.
- [12] FURUKAWA T, NODA K, MURAMATSU M, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2004, 522: 196.

Study on Slow Extraction Dynamics of 300 MeV Proton and Heavy Ion Synchrotron

GAO Yunzhe^{1,2,3}, RUAN Shuang^{1,3,†}, SHI Jian¹, YANG Jiancheng^{1,3}, XIA Jiawen^{1,2,3}, LI Yue¹, ZHOU Yang^{1,2,3}

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

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

3. Huizhou Research Center of Ion Sciences, Huizhou 516003, Guangdong, China)

Abstract: The 300 MeV proton and heavy ion accelerator is an important component of the SESRI(Space Environment Simulation and Research Infrastructure), and the study on slow extraction dynamics is the key part of the accelerator. The third order resonance and RF-Knockout(RF-KO) scheme is adopted to provide quasi-continuous beam in 2~8 s for slow extraction system. 3-bump are used to adjust the spiral step and extraction angle at the electrostatic septum. However, the horizontal tune can be reduced due to the bump orbit, and the stable area in the phase space is shrunk during the extraction flattop. Simulation results show that the bump orbit produced in the dipole and sextupole magnet will reduce the horizontal tune, and a large number of particles are extracted at the initial extraction stage. Therefore, the spill structure should be analyzed and optimized based on the self-written particle tracking program SESP. The extracted beam uniformity is improved by modulating the amplitude of the extraction exciter.

Key words: SESRI; slow extraction; RF-KO; bump orbit; beam uniformity

Received date: 19 Apr. 2022; Revised date: 08 May 2022

Foundation item: West Light Foundation of Chinese Academy of Sciences(Y913030); National Natural Science Foundation of China(11905268)

† Corresponding author: RUAN Shuang, E-mail: ruanshuang@impcas.ac.cn