

SESRI 300 MeV同步加速器注入线的传输效率与接受效率

赵良超

**Transmission efficiency and beam reception of the SESRI 300MeV synchrotron injection line**

Zhao Liang-Chao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 112901 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212112

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212112>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于3.5 MeV射频四极质子加速器硼中子俘获治疗装置的束流整形体设计

Design of beam shaping assembly based on 3.5 MeV radio-frequency quadrupole proton accelerator for boron neutron capture therapy

物理学报. 2018, 67(14): 142801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180380>

高品质激光尾波场电子加速器

High-quality laser wakefield electron accelerator

物理学报. 2021, 70(8): 084103 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201993>

医用回旋加速器回旋频率与磁场的调谐

Tuning of cyclotron resonant frequency and magnetic field of medical cyclotron

物理学报. 2019, 68(12): 122901 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190116>

PS3000-b-PAA5000球形胶束温度效应的原位小角X射线散射技术研究

Temperature dependence of spherical micelles of PS3000-b-PAA5000 studied by in-situ small angle X-ray scattering

物理学报. 2018, 67(4): 048301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172167>

工作参数对平行轨道加速器放电模式的影响

Influence of operating parameters on discharge mode of parallel-rail accelerator

物理学报. 2021, 70(20): 205205 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210484>

磁绝缘线振荡器中模式竞争的物理分析和数值模拟

Competitions among modes in magnetically insulated transmission line oscillator

物理学报. 2020, 69(19): 198401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200383>

# SESRI 300 MeV 同步加速器注入线的 传输效率与接受效率\*

赵良超†

(哈尔滨工业大学, 空间环境与物质科学研究院, 哈尔滨 150001)

(2021 年 11 月 16 日收到; 2022 年 2 月 5 日收到修改稿)

为了完成 SESRI 300 MeV 同步加速器的束流调试, 使用 Tracewin 软件和加速腔电磁场分布文件建立了该加速器注入线从离子源出口到注入点的全尺寸模型, 在多粒子模式下计算了两种典型粒子束 (质子、 $^{209}\text{Bi}^{32+}$ ) 在不同状态下的加速传输, 得到了注入线上束流相空间的变化过程和注入线的传输效率与接受效率. 研究表明, 300 MeV 同步加速器注入线在加速不同荷质比的离子束流时, 电磁场参数设置基本与荷质比成反比. 束流的接受效率主要由射频四极加速腔出口发射度决定. 质子束和重离子束的接受效率差别较大. 在射频四极加速腔出口发射度为  $0.1\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}$  时,  $^{209}\text{Bi}^{32+}$  束接收效率达到 92.13%, 质子束的接收效率为 68.18%. 分析束流传输过程表明, 当横向发射度过大时, 束流会因为纵向能散展宽和相位展宽而无法被最终接受. 在现有配置下, 质子束存在横向聚焦力不够、接受效率较低的问题. 通过额外增加 2 个四极铁能够将质子束的接受效率由 68.18% 提升至 83.61%.

**关键词:** 同步加速器, 注入线, 束流接受度, 传输效率**PACS:** 29.20.dk, 29.20.Ej, 29.27.Eg, 29.27.-a**DOI:** 10.7498/aps.71.20212112

## 1 引言

哈尔滨工业大学“空间环境地面模拟装置”是一项在地面模拟真空、高低温交变、粒子辐照、电磁辐射、粉尘、原子氧、弱磁、等离子体等空间环境, 研究航天器材料、器件、生命体等空间环境效应和物理本质的国家重大科技基础设施. SESRI 300 MeV 同步加速器是该设施中用于空间粒子辐照效应研究的关键设备, 设计能够产生从质子束 (加速  $\text{H}_2^+$  后剥离为质子束) 到铋束 ( $^{209}\text{Bi}^{32+}$ ) 的所有稳定离子束, 研究空间中高能粒子对航天器件和航天员身体的辐照损伤效应<sup>[1]</sup>. 该同步加速器主要由高电荷态离子源、低能注入线、同步环组成, 其中低能注入线将从离子源引出的质子束加速到

5.6 MeV、重离子束加速到 2 MeV/u, 注入到环中继续加速到设计能量, 如质子束最高为 300 MeV, 铋束最高为 7 MeV/u<sup>[2-4]</sup>. 在注入线末端的注入点, 要求质子束流强达到 250  $\mu\text{A}$ , 重离子束达到 50  $e\mu\text{A}$ , 束流的动量散度  $\Delta p/p$  要控制在  $\pm 0.2\%$ . 目前 SESRI 300 MeV 同步加速器已完成设备安装和设备独立调试, 在带束调试之前需要进行全尺寸多粒子跟踪计算, 分析发现注入线接受度的关键决定因素及其背后的物理机制, 解释束流调试过程并提高调束的效率.

注入线不但要保证较高的传输效率, 减少束损, 还需要保证注入点的离子束在一定的能散和相宽之内, 能够被同步环接受. SESRI 300 MeV 同步加速器注入线加速多种离子, 在加速段采用了多种加速腔完成束流加速, 质子束和重离子束分别使用

\* 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: FRFCU5710053321) 和国家自然科学基金青年基金 (批准号: 12005208) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaoliangchao@hit.edu.cn

不同的加速腔配置. 在加速不同离子束时, 配置不同的工作参数. 注入线的束流调试是同步环束流调试的前提. 国际上通用的加速器束流设计计算方法有两种, 束流包络法和多粒子跟踪法<sup>[5-11]</sup>. 其中束流包络法用于初步的物理设计, 可以快速给出注入线的加速聚焦结构. 多粒子跟踪用于物理设计完成后精细计算, 可以给出束流在传输过程中的六维相空间分布信息及束流损失信息. 为此发展了一些专用软件, 如 MAD, Parmila, Elegant, Tracewin 等, 这些软件大多采用传输矩阵描述束线上的元件, 可以进行包络计算和多粒子跟踪, 但对元件的场分布有较大近似. 另外有一些软件专用于特种加速腔的设计, 如用于射频四极场 (RFQ) 加速器设计的 RFQGEN、toutatis; 用于 IH-DTL 设计的 LORASR 等, 可以给出特定腔型的结构参数, 但需要其他的电磁场软件给出具体的场分布<sup>[12-15]</sup>. 还有通用的电磁场计算软件如 CST, HFSS, OPERA 等<sup>[16-18]</sup>, 可以针对单独的元件 (如加速腔、磁铁) 等给出高精度的仿真结果, 但束流设计分析的功能较弱. 这些软件的功能不同, 侧重点也不同. 通常的做法是针对不同的问题采用多个软件将加速器分为多段计算, 要么给出简略的全局分布, 要么给出局部的精确形貌, 难以实现从头至尾的精确束流计算, 从而难以从全局分析束流损失的关键因素和物理机制. 本文以 Tracewin<sup>[19]</sup> 软件为主要计算工具, 将 RFQ, IH-DTL 等加速腔统一转换为场文件代入, 实现全局计算和局部精确场分布的统一. 建立了包含实际电磁场分布的 SESRI 300 MeV 同步加速器注入线全尺寸模型, 尽可能全面准确地反映该注入线的真实性能.

本文首先根据物理设计参数计算了 RFQ, IH-DTL 等加速腔的结构参数, 使用 CST 计算了加速

腔的电磁场分布, 将不同的加速腔转换为相同类型的场文件. 然后根据注入线的布局使用 Tracewin 软件建立了注入线从离子源出口到注入点的全尺寸模型, 使用实际电场分布计算了束流从离子源出口到注入点的全过程加速传输. 研究了不同离子注入所需的参数配置和离子束在传输中的相空间演化过程, 获得了不同条件下注入线的接受效率, 并对束流损失的物理机制进行了探讨. 本文使用的方法可以将加速腔设计、束线设计、加速器整机调试等不同阶段、不同内容关联起来, 给出各种设计细节对束流的影响. 该方法不仅可用于同步加速器注入线的设计调试, 也可用于其他低能直线加速器设计调试.

## 2 注入线构成与加速聚焦元件

### 2.1 注入线构成

SESRI 300 MeV 同步加速器由中科院近代物理研究所设计, 其注入线从离子源出口至注入点全长 26.2 m, 布局如图 1 所示. 整个注入线的元件可以分为两大类: 横向聚焦传输元件 (3 个螺线管、2 个二极磁铁、30 个四极磁铁) 和纵向加速聚焦元件 (7 个射频加速腔). 横向聚焦传输元件实现束流的横向聚焦与导向传输, 纵向加速聚焦元件实现束流纵向相宽和能散的控制. 其中 2 个二极磁铁 (不含切割磁铁) 分别实现离子源出口束流电荷态的甄别和注入点前的束流偏转; 30 个四极磁铁构成了束线的聚焦结构, 提供束流的横向聚焦; 7 个射频腔中有 4 个加速腔, 1 个聚束腔和 2 个散束腔. 加速腔分别为 RFQ, IH-DTL1, IH-DTL2, IH-DTL3, 前三者将离子束 ( $H_2^+$ 、 $^{209}Bi^{32+}$  等) 分别加速到 300 keV/u, 1 MeV/u, 2 MeV/u. 除  $H_2^+$  外的离子束经过散束

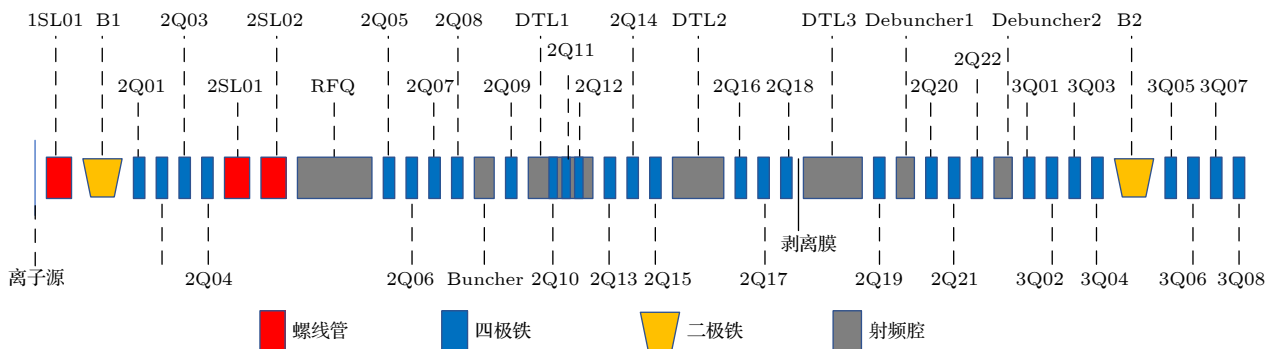


图 1 SESRI 300 MeV 同步加速器注入线布局

Fig. 1. Injection line layout of SESRI 300 MeV synchrotron.

腔 1 压缩能散后传输至注入点.  $H_2^+$  束在加速到 2 MeV/u 后, 还需要由位于 IH-DTL3 腔入口处的剥离膜转变成质子束, 经过 IH-DTL3 加速到 5.6 MeV, 然后经散束腔 2 压缩能散后传输至注入点. 聚束腔位于 RFQ 和 IH-DTL1 之间, 压缩加速腔 IH-DTL1 入口处束流的纵向相宽.

## 2.2 加速元件

注入线上的加速元件(射频电磁场)共 7 个, 可以分为 4 类: RFQ, IH-DTL1(分离聚焦结构), IH-DTL2、IH-DTL3(标准 IH 结构) 和双间隙聚束腔, 分别实现束流加速、相宽压缩及能散压缩功能. 为获得实际的电场分布, 首先根据物理设计参数使用不同的软件获得了所需的结构参数, 建立了四种加速腔的三维结构, 使用 CST 计算了实际电场分布. 根据 Tracewin 中束流传输的情况优化三维结构, 降低非理想场分量.

RFQ 加速腔的结构参数由 RFQGEN 生成, 腔长 2.6 m, 共 254 个加速单元, 实现直流连续束的聚束和加速. 在加速不同离子时, 馈入相应的功率可将离子束由 4 keV/u 加速到 300 keV/u. RFQGEN 计算结果显示, 在初始横向发射度  $\varepsilon = 0.1\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  时,  $^{209}\text{Bi}^{32+}$  束的传输效率大于 98%,  $H_2^+$  束的传输效率大于 99%. RFQ 单腔加速  $H_2^+$  束流如图 2 所示.

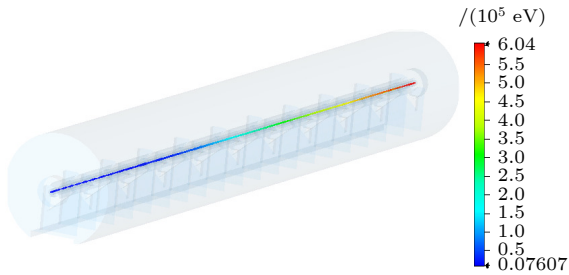


图 2 RFQ 结构及  $H_2^+$  束流加速  
Fig. 2. RFQ structure and  $H_2^+$  beam acceleration.

3 个 IH-DTL 加速腔的结构及束流加速过程如图 3 所示. 加速腔 IH-DTL1 将离子束由 300 keV/u 加速到 1 MeV/u, 腔长 1.8 m. 采用分离聚焦结构, 腔体内部装有一组三组合四极磁铁, 实现腔内的束流聚焦. IH-DTL2 和 IH-DTL3 为标准 IH 加速结构, 其中 IH-DTL2 将离子束从 1 MeV/u 加速到 2 MeV/u, 腔长约 1.5 m; IH-DTL3 将质子束从 2 MeV 加速到 5.6 MeV, 腔长约 1.6 m. 在加速腔之间设置四极磁铁实现束流聚焦与匹配.

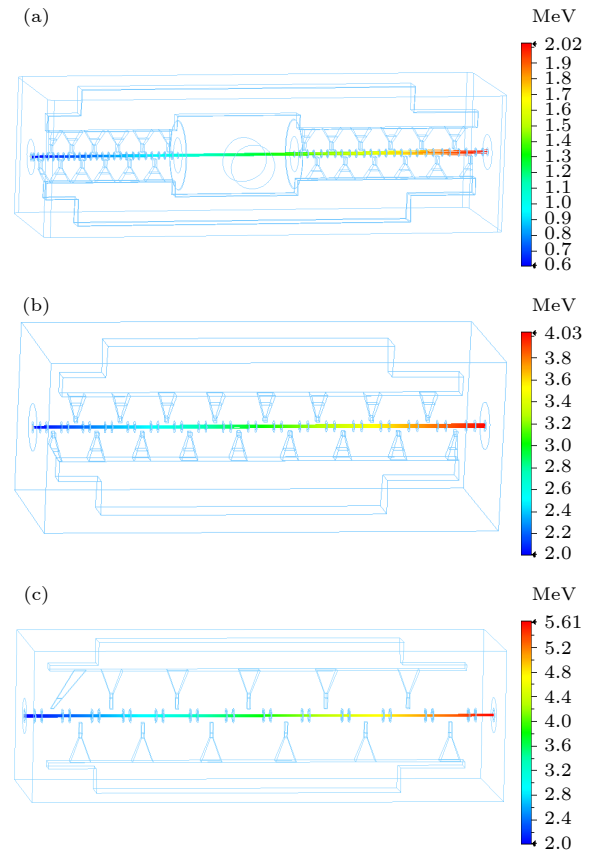


图 3 IH-DTL 加速腔结构及束流加速 (a) IH-DTL1 加速  $H_2^+$  束; (b) IH-DTL2 加速  $H_2^+$  束; (c) IH-DTL3 加速质子束  
Fig. 3. IH-DTL structure and beams acceleration: (a)  $H_2^+$  beam acceleration in IH-DTL1; (b)  $H_2^+$  beam acceleration in IH-DTL2; (c) proton beam acceleration in IH-DTL3.

聚束器及散束器均为 1/4 波共振 (QWR) 双间隙聚束结构 [20,21], 工作在  $-90^\circ$  相位, 对束流整体不起加速作用, 而是旋转束流的纵向相空间分布, 实现相宽压缩和能散压缩.

## 2.3 注入线上的聚焦元件

注入线上分布着 2 个偏转二极磁铁、3 个螺线管和 30 个四极磁铁, 实现束流的横向聚焦和腔间匹配. 螺线管和四极磁铁的场分布基本为标准分布, 束流物理计算软件中通常都将其视为标准元件. 本文使用 Tracewin 软件自带的标准单元结构产生相应的磁场.

## 2.4 注入线加速粒子的要求

SESRI 300 MeV 同步加速器理论上能够加速从质子到铋束的所有离子束 (仅受离子源引出粒子种类的制约), 要求注入线具备相应的加速能力. 注入线要求达到的束流指标如表 1 所列.



表 1 注入线粒子束的指标

Table 1. Beam parameters of the injection line.

指标	要求
粒子种类	$A/Q < 6.53$ 的任意粒子
能量	重离子束 2 MeV/u; 质子束 5.6 MeV
流强	重离子束 50 e $\mu$ A; 质子束 250 $\mu$ A
90% 自然发射度	$< 15\pi$ mm·mrad
$\Delta p/p$	$< \pm 0.2\%$

### 3 计算结果

根据注入线上元件的分布和 CST 计算得到的加速腔电磁场文件, 使用 Tracewin 软件建立了注入线的全尺寸模型. 由于 RFQ 接受直流束, 输出连续的束团, 而连续束团无法读取纵向相空间分布, 只能从输入的纵向束团中选择 1 个束团继续跟踪计算 (不考虑不同束团间的差异). 因而注入线的束流传输计算分为两段: 第一段为离子源出口至 RFQ 出口, 由离子源引出的直流束获得 RFQ 出口处的束团分布, 计算低能匹配段和 RFQ 的传输效率; 第二段为 RFQ 出口至注入点, 计算注入线的传输效率和接受效率. 两段之间通过 RFQ 出口束团的六维相空间分布衔接.

高电荷态离子源引出不同种类的束流性能略有不同.  $H_2^+$  束和  $^{209}Bi^{32+}$  束的归一化均方根 (root of mean square, RMS) 发射度分别为  $\varepsilon_{x(y)} = 0.2\pi$ ,  $0.12\pi$  mm·mrad. 束流 twiss 参数为  $\alpha_x = \alpha_y = -0.87$ ,  $\beta_x = \beta_y = 0.324$ . 计算  $^{209}Bi^{32+}$  束和  $H_2^+$  束在第一段结构中加速传输的束流包络如图 4 所示. 在调整四

极铁和螺线管的强度完成 RFQ 入口的束流匹配后, 统计 RFQ 出口处的粒子分布, 能量为 300 keV/u,  $^{209}Bi^{32+}$  束传输效率约为 97.81%, 80% 的粒子能散小于 1 MeV.  $H_2^+$  束传输效率约 89%, 75% 的离子能散小于 10 keV.  $H_2^+$  束在  $\varepsilon = 0.1\pi$  mm·mrad 时的传输效率为 96.53%. RFQ 输出不同束流的相空间分布如图 5 所示. 可以看出,  $H_2^+$  束与  $^{209}Bi^{32+}$  束的束流包络及相空间分布基本一致, 输出束流的参数为:  $H_2^+$  束  $\varepsilon_{x(y)} = 0.5\pi$  mm·mrad,  $^{209}Bi^{32+}$  束  $\varepsilon_{x(y)} = 0.4\pi$  mm·mrad;  $\alpha_x = \alpha_y = -0.58$ ;  $\beta_x = \beta_y = 0.068$ ;  $\varepsilon_z = 1.3\pi$  MeV·( $^\circ$ ). RFQGEN 计算结果表明, 该结构可以基本保持发射度不变, 这是在理想条件下的结果. 可以看到实际三维电磁场跟踪结果显示发射度增长了 4 倍, 这是由于实际 RFQ 结构优化的不够造成的 (如二极场优化、场平整度优化). 也反映出实际结构的束流参数可能与理论计算有较大区别, 使用实际结构的电磁场分布更能够反映实际情况, 有利于查找问题.

使用 RFQ 出口的束流六维相空间分布作为输入计算第二段加速结构, 加速  $^{209}Bi^{32+}$  的传输效率约为 72.16%, 接受效率 (动量散度在  $\pm 0.2\%$  内) 约为 46.72%. 加速质子束的传输效率仅为 24.19%, 接受效率 (动量散度在  $\pm 0.2\%$  内) 约为 17.84%. 第二段加速结构的束流包络如图 6 所示. 注入点处的束流相空间分布如图 7 所示.

计算结果表明, 为了获得较高的传输效率和接受效率, 需要在 RFQ 出口处对束流的横向发射度加以限制, 以过滤掉那些无法被接受的粒子. 为此,

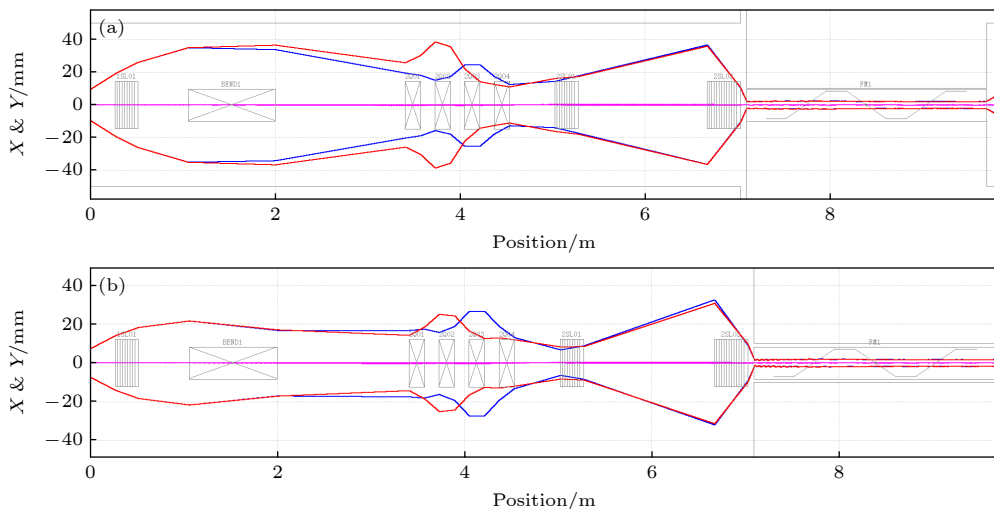


图 4 注入线第一段加速结构束流传输包络 (a)  $H_2^+$  束; (b)  $^{209}Bi^{32+}$  束

Fig. 4. Beam envelop in the first section of the injection line: (a)  $H_2^+$  beam; (b)  $^{209}Bi^{32+}$  beam.

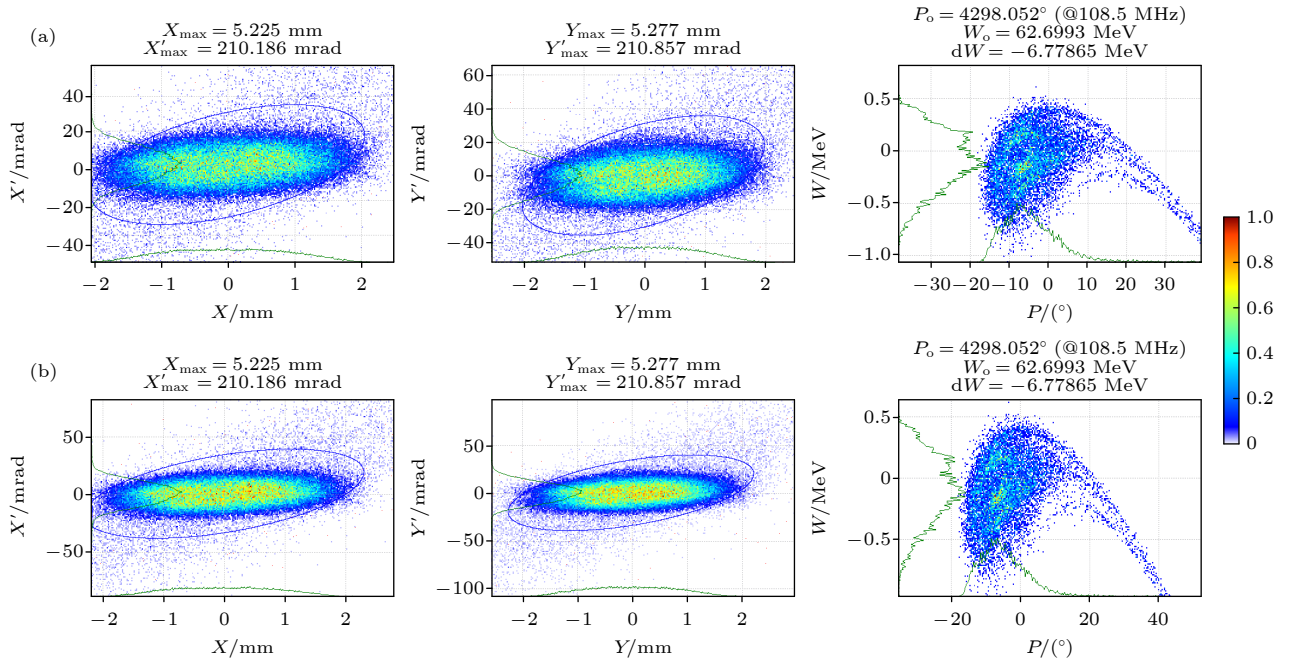


图 5 注入线第一段 RFQ 出口处束流的六维相空间的分布 (a)  $H_2^+$  束; (b)  $^{209}\text{Bi}^{32+}$  束  
Fig. 5. Phase space distribution of the beam output by RFQ: (a)  $H_2^+$  beam; (b)  $^{209}\text{Bi}^{32+}$  beam.

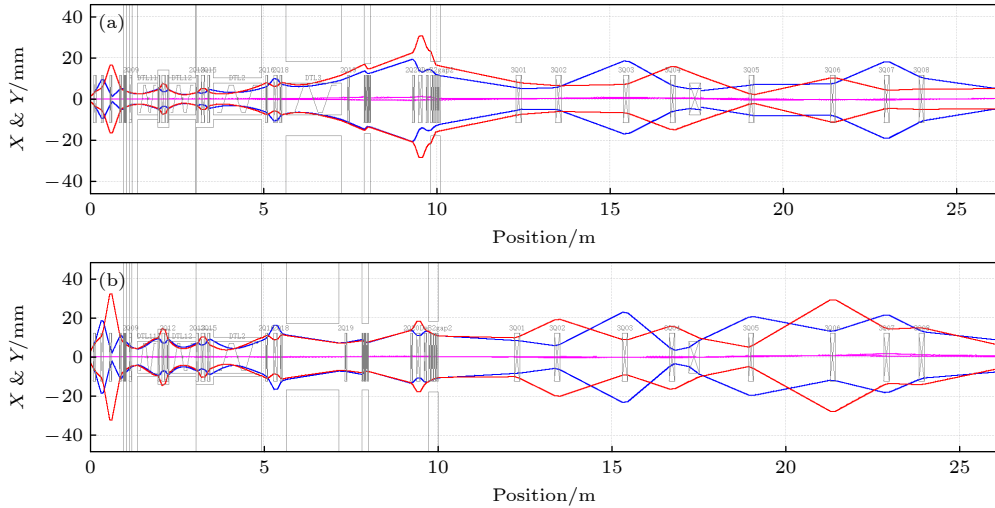


图 6 注入线第二段加速结构束流传输包络 (a)  $H_2^+$  (剥离为质子) 束; (b)  $^{209}\text{Bi}^{32+}$  束  
Fig. 6. Beam envelop in the second section: (a)  $H_2^+$  (proton) beam; (b)  $^{209}\text{Bi}^{32+}$  beam.

计算了第二段加速结构在不同初始横向发射度下的传输效率和接受效率, 结果见表 2. 可以看出, 将 RFQ 出口束流发射度限制在  $0.1\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  时,  $^{209}\text{Bi}^{32+}$  束的接受效率为 92.63%, 质子束的接受效率为 68.18%.

SESRI 300 MeV 同步加速器设计为多圈注入加相空间涂抹, 因而横向接受度远大于注入束流的发射度且设置了 8 个四极磁铁用于调节参数匹配, 可以近似认为满足传输要求和能散要求的粒子均可被注入到环中. 由环的接受度反推至注入

线末端 (切割铁入口), 以 RFQ 出口发射度为  $0.1\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  的质子束为例, 注入束发射度、环的接受度<sup>[2]</sup>及 twiss 参数对比如表 3 所列.

## 4 讨论

### 4.1 束流损失的物理机制

首先分析需要将 RFQ 出口发射度限制在  $0.1\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  的原因. 粒子束在传输过程中损失虽然都表现为横向碰壁损失, 但其损失机制有两种:

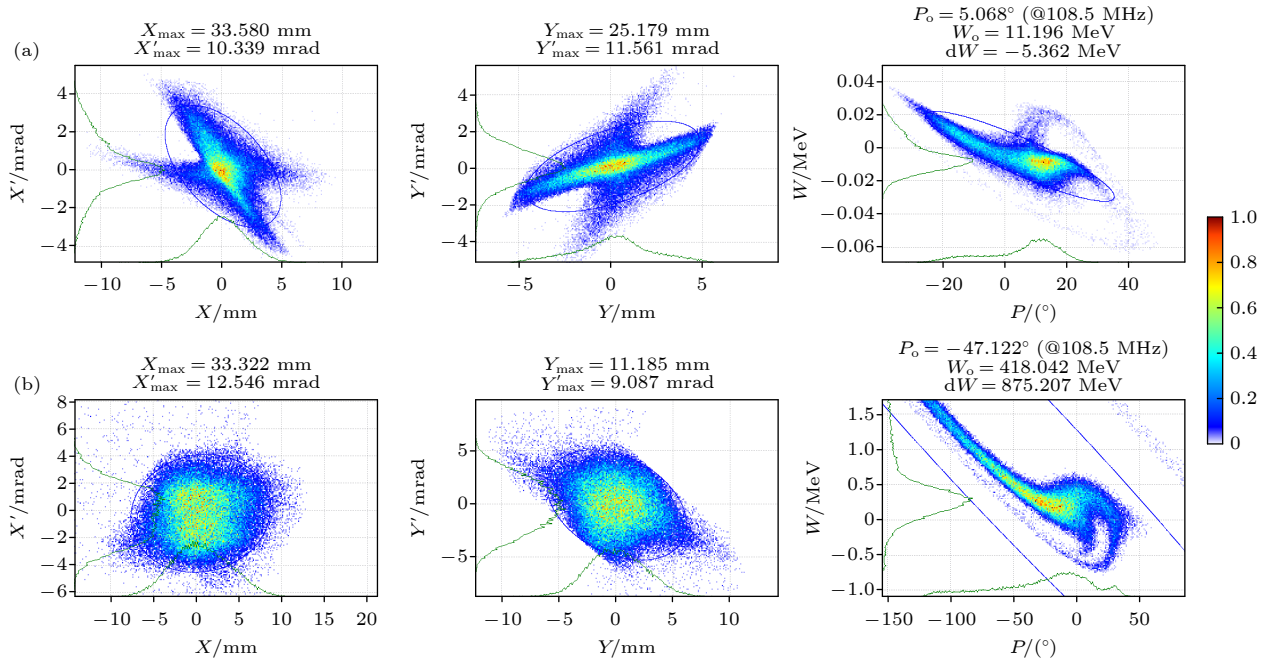


图 7 注入线出口处的束流相空间分布 (a) 质子束; (b)  $^{209}\text{Bi}^{32+}$ 束

Fig. 7. Phase space distribution of the beam in front of septum: (a) Proton beam; (b)  $^{209}\text{Bi}^{32+}$  beam.

表 2 RFQ 输出束团横向发射度对注入线传输效率和接受效率的影响

Table 2. Transmission ratio and beam acceptance of the injection line with different transverse emittance output by RFQ.

横向发射度 (mm·mrad)	质子束		$^{209}\text{Bi}^{32+}$ 束	
	传输 效率/%	接受 效率/%	传输 效率/%	接受 效率/%
$0.5\pi$	24.19	17.84	57.48	35.29
$0.4\pi$	31.26	24.37	72.16	46.72
$0.3\pi$	42.25	32.31	85.98	56.94
$0.2\pi$	56.80	47.56	95.86	74.00
$0.1\pi$	74.40	68.18	96.68	92.63

表 3 注入线束流发射度、环的接受度及 twiss 参数对比

Table 3. List of the injection beam emittance, ring acceptance and twiss parameters.

注入束流参数	环的接受参数	
$\varepsilon_x/(\text{mm}\cdot\text{mrad})$	$13.1\pi$	$200\pi$
$\varepsilon_y/(\text{mm}\cdot\text{mrad})$	$9.7\pi$	$30\pi$
$\beta_x/\text{m}$	1.63	4.963
$\beta_y/\text{m}$	1.69	2.105
$\alpha_x$	0.6143	1.0263
$\alpha_y$	-0.6558	-1.1720
$\Delta p/p/\%$	$\pm 0.2$	$\pm 0.3$
$D$	0.15	1.6582
$D'$	-0.20	0.9391

一是横向损失, 某些粒子的横向聚焦不够, 轨迹半径过大碰壁损失, 但这些粒子的纵向相位和能散都在纵向稳定区之内; 二是纵向损失, 部分粒子的纵向相位和能散超出了纵向稳定区, 这些粒子不能按照设计轨迹加速, 最终碰壁损失. 我们在加速腔相位选择时已经将束流的纵向相宽和能散进行了限制 (如采用聚束器和加速腔工作在 $-15^\circ$ 相位, 优化聚束腔的聚束电压), 理想束流 (横向发射度为 0 时) 均在注入线接受度内. 多粒子计算的传输效率与接受效率不同的原因为: 对于横向尺度较小的离子, 感受到加速间隙轴线上的电场, 确实是按照设计相位在加速前进; 但对于横向尺寸较大的离子, 感受

到加速间隙轴线外侧的电场. 轴线外侧电场高于轴线上的电场, 产生了能散展宽. 同时轴线外侧粒子的实际路径要长于轴线上的粒子, 产生了相位展宽.  $^{209}\text{Bi}^{32+}$ 束分别在  $0.4\pi$ ,  $0.1\pi$  mm·mrad 发射度下, IH-DTL2 腔出口束团的纵向分布如图 8 所示. 可以看到在发射度较大时, 能散增大一倍, 并且是非对称地向能量偏高的方向展宽, 这与偏离轴线的积分电场较强相吻合. 同时, 相位分布也非对称地向相位滞后方向展宽, 这与偏离轴线的粒子的传输路径较长相吻合. 对于质子束, 在 IH-DTL2 腔之前, 与  $^{209}\text{Bi}^{32+}$ 束的传输情况基本一样. 但之后需要经过 IH-DTL3 腔的加速, 并且仅在较远的聚束腔

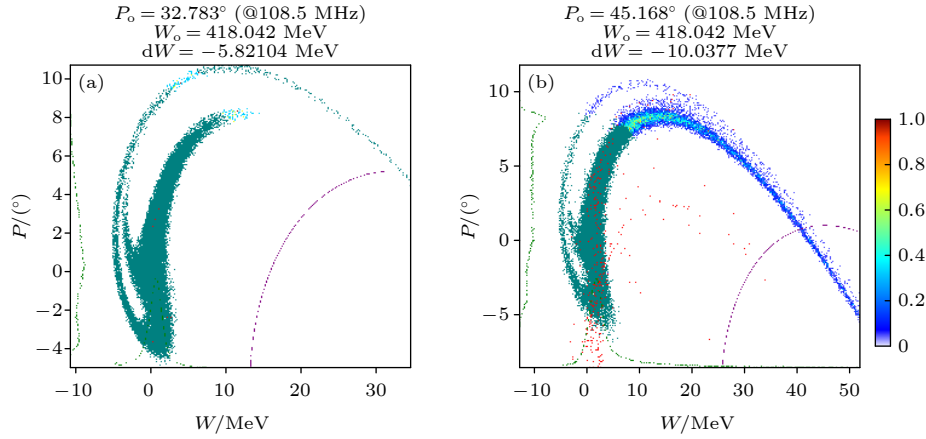


图 8  $^{209}\text{Bi}^{32+}$  在 IH-DTL2 出口处的纵向分布 (灰色粒子为注入线最终接受的粒子) (a)  $\varepsilon = 0.1\pi$  mm·mrad; (b)  $\varepsilon = 0.4\pi$  mm·mrad  
Fig. 8. Longitudinal distribution of  $^{209}\text{Bi}^{32+}$  beam output by IH-DTL2 (Gray particles are finally accepted by the injection line): (a)  $\varepsilon = 0.1\pi$  mm·mrad; (b)  $\varepsilon = 0.4\pi$  mm·mrad.

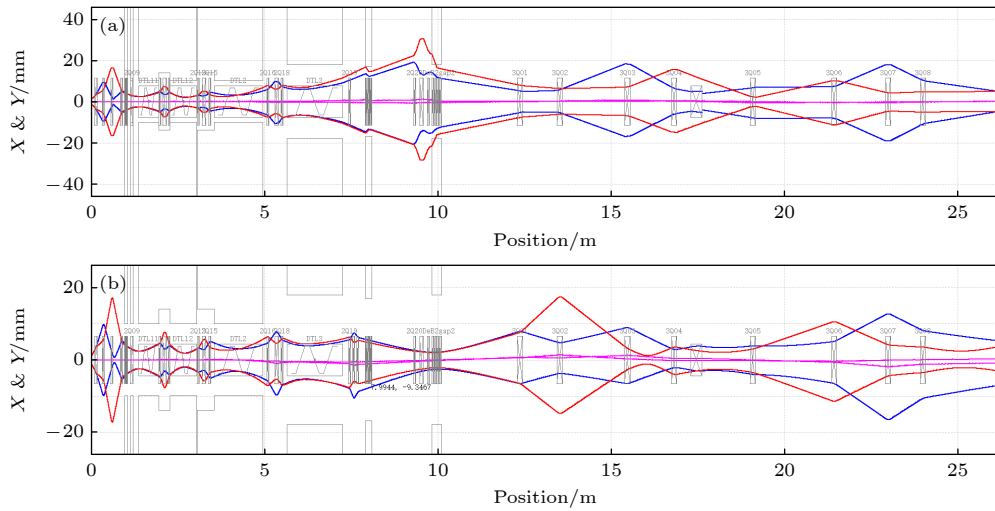


图 9 增加四极磁铁前后质子束的包络 ( $0.1\pi$  mm·mrad) (a) 增加前; (b) 增加后

Fig. 9. Proton beam envelop with and without additional quadrupoles ( $0.1\pi$  mm·mrad): (a) With additional quadrupoles; (b) without additional quadrupoles.

之前排列才有聚焦磁铁. 质子束在较长距离内都无法获得聚焦力, 还需承受加速腔在  $-15^\circ$  相位带来的横向散焦力. 质子束的损失要比  $^{209}\text{Bi}^{32+}$  束更加严重, 不但有纵向损失, 还有较大的横向损失.

## 4.2 加速质子束的问题及解决方案

RFQ 出口束流的发射度限制在  $0.1\pi$  mm·mrad 时, 质子束的接受率仅为 68.18%, 这可能为加速器长期工作带来隐患. 一种解决方案是将 IH-DTL3 的加速相位由  $-15^\circ$  增加至  $0^\circ$  以增加横向聚焦力, 但同时也降低了纵向聚焦力. 虽然传输效率可达 90%, 但在注入点达到动量散度  $\pm 0.2\%$  要求的离子百分比基本不变, 不能提高接受效率. 经过分析束流的聚散焦情况, 提出另一种解决方案: 在 IH-DTL3

加速腔出口处, 2Q19 磁铁与散束腔之间增加 2 个四极磁铁, 与 2Q19 磁铁组成一组三组合透镜, 提供横向聚焦力. 增加透镜后, 在  $0.1\pi$  mm·mrad 的限制下, 质子束的传输效率达到 90.73%, 接受效率达到 83.61%. 增加透镜前后的束流包络如图 9 所示, 束流包络在 IH-DTL3 加速腔之后得到了较好的控制. 该方案对注入线的变动极小, 现有的空间也足以安装 2 个新增的四极铁.

为了更清晰地看到束线增加四极铁的必要性, 对比增加四极铁前后的  $\beta$  函数分布如图 10 所示. 在不增加四极铁时, 散束腔处的  $\beta$  函数太大造成了束流损失. 原因是从 IHDTL3 至四极铁 2Q20 之间接近 4 m 的距离内, 只有一块四极磁铁 (2Q19). 对于 IHDTL3 出口的轴对称束, 2Q19 无法单独使用.



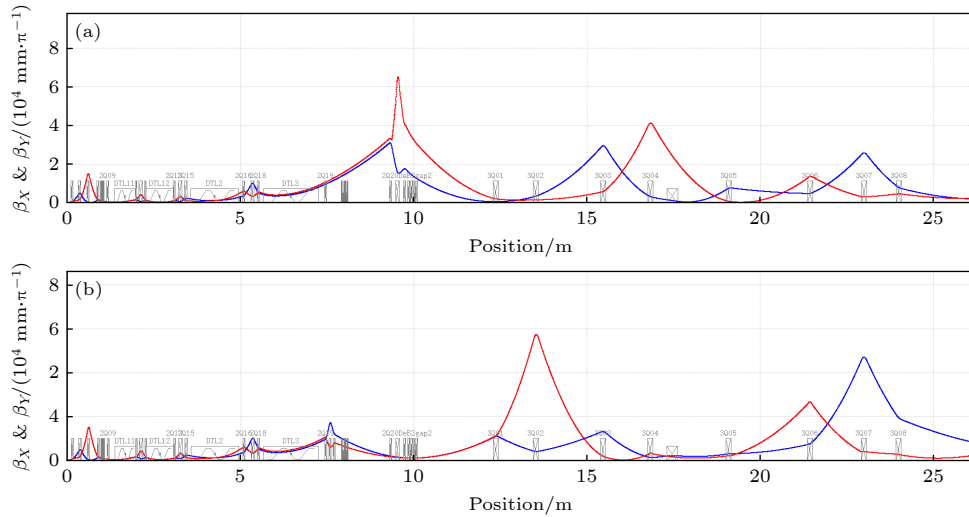


图 10 增加四极磁铁前后质子束的  $\beta$  函数 ( $0.1\pi$  mm·mrad) (a) 增加前; (b) 增加后

Fig. 10.  $\beta$  function of proton beam envelop with and without additional quadrupoles ( $0.1\pi$  mm·mrad): (a) Without additional quadrupoles; (b) with additional quadrupoles.

散束腔的漂移管孔径仅有 34 mm, 造成了束流大量丢失. 而增加四极铁后很好地控制了散束腔处的  $\beta$  函数, 使束流损失大为减小. 虽然在匹配段  $\beta$  函数略大, 但匹配段的束流管道孔径接近 100 mm, 束流基本不丢失. 从  $\beta$  函数分布来看, 在 2Q19 处增加四极磁铁是必须且有效的.

## 5 结 论

使用加速腔三维结构计算的电磁场分布完成了 SESRI 300 MeV 同步加速器注入线的全尺寸建模, 在多粒子跟踪模式下计算了两种典型束流 (最轻的质子束和最重的  $^{209}\text{Bi}^{32+}$  束) 在注入线上的传输过程, 获得了束流在不同条件下的传输效率和接受效率. 得到如下结论.

1) 注入线的传输效率不等于接受效率. 较高的接受效率需要同时满足横向聚焦条件和纵向聚焦条件. 在发射度较大时, 束团尺寸超出动力学孔径, 引起纵向能散增加和纵向相位展宽, 使离子超出接受度范围. 为了获得较高的接受效率, 需要在 RFQ 出口将束流发射度限制在  $0.1\pi$  mm·mrad.

2) 该注入线在加速质子束时, 存在横向聚焦力不够的问题. 这是加速腔的横向散焦力和较长距离上未排布聚焦四极铁共同造成的. 仅仅通过改变加速腔的横向相位虽然可以增加传输效率, 但不能增加接受效率. 通过增加 2 个四极磁铁可以将接受效率由 68.18% 提高至 83.61%. 从增加四极铁前后

的束流包络和  $\beta$  函数分布可以直观地看出束流包络的改善.

3) 使用加速腔的电磁场进行多粒子跟踪, 能够最大程度地模拟真实加速器的工作情况, 辅助判断加速腔的各种非理想场引起的束流畸变、偏心、发射度增长等问题, 为束流调试提供支持. 在本文计算过程中就发现 RFQ 结构优化不够会造成发射度成倍增长. IH-DTL 的二极场会引起束流偏轴, 通过优化 IH-DTL 腔的结构将减小二极场分量, 减弱偏轴效应. 此外, 后期将与实际束流调试的结果进行对比.

感谢四川大学李智慧研究员、中国工程物理研究院流体物理研究所魏涛及李一丁的讨论. 感谢兰州近代物理研究所提供的资料.

## 参考文献

- [1] Qian C, Sun L T, Jia Z H 2020 *Rev. Sci. Instrum.* **91** 023313
- [2] Liu M 2017 *M. S. Dissertation* (Lanzhou: Institute of Modern Physics) (in Chinese) [刘明 2017 硕士学位论文 (兰州: 近代物理研究所)]
- [3] Yu J W, Yang Y Q, Lü M B, Cheng W J, Zheng Y J, Xu X W, Lu H J, Pan Y X 2021 *High Power Laser and Particle Beams* **33** 054001 (in Chinese) [喻九维, 杨雅清, 吕明邦, 陈文军, 郑亚军, 许小伟, 陆海娇, 潘永祥 2021 强激光与粒子束 **33** 054001]
- [4] Li Z S 2017 *Ph. D. Dissertation* (Lanzhou: Institute of Modern Physics) (in Chinese) [李钟汕 2017 博士学位论文 (兰州: 近代物理研究所)]
- [5] Ren H T, Pozdeyev E, Lund M S 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 02B919

- [6] Akagi T, Bellan L 2020 *Rev. Sci. Instrum.* **91** 023321
- [7] Clemente G, Ratzinger U, Podlech H, Groening L, Brodhage R, Barth W 2011 *Phys. Rev. Spec. Top. Ac.* **14** 110101
- [8] Yang Y, Dou W P, Sun L T 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 02B910
- [9] Thuillier T, Angot J, Barue C 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 02A733
- [10] Benedetti S, Bellodi G, Kuchler D 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 123301
- [11] Ullmann C, Berezov R, Fils J 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 02A952
- [12] Yan X Q, Lu Y R, Wu Y, Zhang H L, Gao S L, Fang J X 2002 *Universitatis Pekinensis* **38** 1 (in Chinese) [颜学庆, 陆元荣, 吴瑜, 张宏林, 高淑丽, 方家训 2002 北京大学学报 (自然科学版) **38** 1]
- [13] Wu Y 1999 *Universitatis Pekinensis* **35** 3 (in Chinese) [吴瑜 1999 北京大学学报 (自然科学版) **35** 3]
- [14] Wang K D 2017 *Ph. D. Dissertation* (Lanzhou: Institute of Modern Physics) (in Chinese) [王科栋 2019 博士学位论文 (兰州: 近代物理研究所)]
- [15] Winklehner D, Hammond R, Alons J 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 02B929
- [16] Otani M, Mibe T, Yoshida M 2016 *Phys. Rev. Accel. Beams* **19** 040101
- [17] He T, Lu L, He Y, Hang Y L, Ma W, Tan T, Zhang Z L, Yang L, Xing C C, Li C X, Sun L P 2021 *Nuclear Inst. Meth. Phys. Research A* **1010** 165466
- [18] Wang K D, Yuan Y J, Yin X J, Yang J C, Li Z S, Du H, Li X N, Kong Q Y, Wang K, Dong Z Q, Liu J, Xia J W 2019 *Nuclear Inst. Meth. Phys. Research A* **927** 375
- [19] Uriot D 2003 *Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference*, Portland, USA, May 12–16, 2003 p3491
- [20] Lv J Q 2003 *The Optics of Charged Particle Beams* (Beijing: Higher Education Press) p267 (in Chinese) [吕建钦 2003 带电粒子束光学 (北京: 高等教育出版社) 第267页]
- [21] Chen J Er 2019 *Foundment Physics of Accelerator* (Beijing: Peking University Press) p353 (in Chinese) [陈佳洱 2019 加速器物理基础 (北京: 北京大学出版社) 第353页]

# Transmission efficiency and beam reception of the SESRI 300 MeV synchrotron injection line<sup>\*</sup>

Zhao Liang-Chao<sup>†</sup>

(School of Space Environment and Material Science Research, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

( Received 16 November 2021; revised manuscript received 5 February 2022 )

## Abstract

SESRI 300 MeV synchrotron in Harbin Institute of Technology is now under construction and the whole equipment has been installed and tested. Before commissioning beam, the beam transport through the injection line is simulated by using a full-scale model through the Tracewin code. The field distribution of RFQ cavity is calculated with CST, and the results are substituted into the Tracewin code to generate the accurate results. The envelop mode and multi-particles mode are used in the beam simulation with two typical beams ( $H_2^+$  and  $^{209}Bi^{32+}$ , the lightest beam and the heaviest beam). Both beams are accelerated from 4 keV/u to 2 MeV/u by an RFQ cavity and two IH-DTL cavities. Then the  $H_2^+$  beam is stripped into a proton beam by a carbon foil and accelerated to 5.6 MeV with the third IH-DTL cavity. Simulation results show that the strength of the magnetic field and the acceleration field are proportional to the mass charge ratio. The beam transmission efficiency and the injection line reception are inversely proportional to the beam transverse emittance. The  $^{209}Bi^{32+}$  beam transmission efficiency and beam reception (momentum spread less than  $\pm 0.2\%$ ) are 72.16% and 46.72% with transverse emittance  $\varepsilon = 0.12\pi$  mm·mrad (ECR source output) and  $\varepsilon = 0.4\pi$  mm·mrad (RFQ output).  $H_2^+$  beam transmission ratio and beam reception are 24.19% and 17.89% with  $\varepsilon = 0.2\pi$  mm·mrad (ECR source output) and  $\varepsilon = 0.5\pi$  mm·mrad (RFQ output). In order to obtain high transmission efficiency and beam reception, the transverse emittance should be limited to  $0.1\pi$  mm·mrad after the RFQ. With this limitation, the  $^{209}Bi^{32+}$  beam transmission efficiency and the reception are increased to 96.68% and 92.63%, respectively, and the  $H_2^+$  beam transmission efficiency and the reception rise to 74.40% and 68.18%, respectively. If two additional quadrupole magnets are added, the  $H_2^+$  beam transmission efficiency and beam reception can be increased to 90.73% and 83.61%, respectively, which will fulfill the requirement for long-time operation. The phase space change process shows that loss of  $^{209}Bi^{32+}$  beam is caused mainly by longitudinal defocusing (energy spread and phase width spread), the loss of proton beam is caused both by the longitudinal defocusing and by the transverse defocusing (beam envelop spreading), that is why two additional focusing magnets should be added in proton beam acceleration. Results also show that by using field distribution calculation in the simulation process the greater influence of the cavity design details can be confirmed such as beam off-axis caused by dipole field in the IH-DTL cavity and beam loss caused by unperfect field in the RFQ. Tracking with field distribution is shown to be a useful method to link the cavity design process, beam line design process, and beam commission process.

**Keywords:** synchrotron, injection line, transmission ratio, beam reception

**PACS:** 29.20.dk, 29.20.Ej, 29.27.Eg, 29.27.-a

**DOI:** 10.7498/aps.71.20212112

<sup>\*</sup> Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. FRFCU5710053321) and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12005208).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zhaoliangchao@hit.edu.cn](mailto:zhaoliangchao@hit.edu.cn)