

文章编号: 1007-4627(2017)04-0730-05

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

刘明^{1,2}, 柴伟平^{1,2,†}, 杨建成¹, 阮爽^{1,2}, 刘杰^{1,2}, 姚丽萍^{1,2}

(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)

摘要: 国家“十二五”工程将在哈尔滨工业大学建造一台空间辐射地面模拟装置 (SESRI), 该装置能够模拟空间辐照环境, 对研究离子辐照材料、生命体等具有重要意义。SESRI 主要由双 ECR 离子源, 直线注入器, 同步环和 3 个高能实验终端组成。周长为 43.9 m 的同步环作为装置的核心部分, 能够向 3 个实验终端输送离子种类多、能量范围广的粒子束。为了保证环内有足够的粒子数, 注入系统的设计至关重要, SESRI 同步环采用多圈注入方案, 并利用 ACCSIM 程序模拟粒子真实运动情况。结果表明, 粒子的注入效率为 85.5%, 离子数增益可达 17.1, 可满足设计要求。

关键词: 空间辐射地面模拟装置; 多圈注入; 注入效率; 离子数增益

中图分类号: O571.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.04.730

1 引言

宇宙中高能离子辐射会对航天器和生命体造成损伤, 严重威胁航天器在轨运行安全和航天员健康, 为此, 哈尔滨工业大学将建造一台离子加速器提供地面模拟辐照源, 即空间辐射地面模拟装置 (SESRI)。它以真实空间粒子辐射环境及科研需求为依据, 具有供应离子范围广、能量覆盖宽、终端扫描面积大等特点, 对于研究离子辐照材料, 生命体等具有至关重要的意义。重离子加速器可以用来模拟空间重离子辐射环境, 而我国重离子型加速器数量严重不足, 目前只有北京大学的串联加速器、中国原子能科学研究所的串联加速器和中国科学院近代物理研究所重离子加速器能够提供重离子束机时。SESRI 作为开展航天辐照地面模拟研究的专用应

用型加速器, 可以缓解国内航天辐照研究时加速器机时严重不足的矛盾, 是我国首个航天辐照专用的离子加速器, 对于迅速拉近我国与国外航天大国在航天辐照研究方面的差距有着重要的意义。它功能完善, 性能稳定, 操作简单, 性价比高, 运行维护成本低, 是我国航天辐照方面不可或缺的大型科研装置。

设计方案采用直线加速器作为注入器, 将束流注入到同步环中进一步加速, 最后引出至高能束线终端。图 1 为其布局图, 离子源提供从质子到铋之间的几乎所有稳定离子束, 质子(重离子)经直线加速器加速至 5 MeV/u(1 MeV/u) 后注入至同步环中, 继而进一步加速至最高能量 300 MeV/u, 最后引出至高能束线终端开展各种辐照实验。

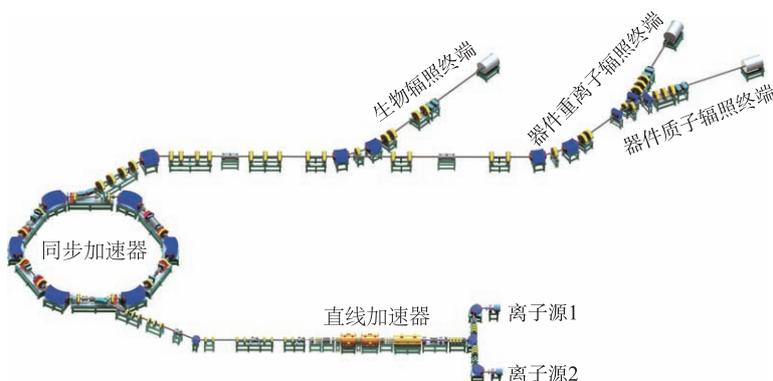


图 1 (在线彩图) 空间辐射地面模拟专用重离子加速器整体布局

收稿日期: 2016-11-23; 修改日期: 2017-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11505256)

作者简介: 刘明(1991-), 男, 湖北黄石人, 硕士, 从事核能与核技术研究; E-mail: liuming114@impcas.ac.cn

† 通信作者: 柴伟平, E-mail: chaiwp@impcas.ac.cn。

2 注入系统设计

为了使同步环内流强达到辐照终端要求, 保证同步环累积足够的粒子数至关重要。重离子同步加速器的注入方法一般有三种: 多圈注入、多次多圈注入和剥离注入。考虑到多次多圈注入需要电子冷却装置, 需要长的直线节, 而本加速器为了控制成本采用的是紧凑型结构, 无足够空间用于安装电子冷却装置, 而且一套电子冷却装置造价不菲, 而剥离注入只能适用于有限几种较轻离子, 不能用于全离子的注入, 因此, 多圈注入是唯一的选择。在 SESRI 装置的设计中, 注入系统的设计要求及注入束参数如表 1, 注入束发射度为 $13 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。

表 1 同步环离子束设计要求以及注入束能量

离子种类	注入能量/(MeV/u)	注入流强/ μA	环内粒子数要求/ PPP
H^+	5	280	1×10^{11}
Bi^{32+}	1	25	1.2×10^8

2.1 注入段元件布局原理

同步加速器总长 43.9 m, 采用 6 个二极铁的 FODO 结构, 共 6 个超周期, 呈六边形。其中 1 个长直线节用于注入系统, 图 2 为注入系统布局图。注入束在 1 台切割铁 MS 和 1 台静电偏转板 ES 的偏转作用下进入到环里, 另有 4 台凸轨磁铁 BUMP1-BUMP4 将环的接受度凸起到靠近 ES。在注入期间, 凸轨幅度逐渐下降, 注入束在水平接受度内涂抹, 在相空间的不同位置不断填充^[1], 使环内离子达到期望的流强。

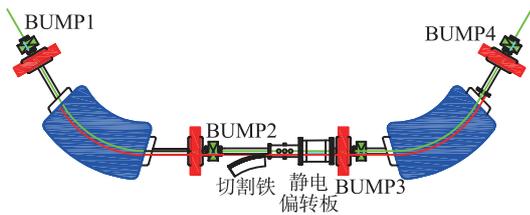


图 2 (在线彩图) 注入系统布局

2.2 注入轨道设计

在多圈注入时, 常用凸轨下降的方法, 使束流在水平相空间中涂抹^[2], 图 3 为设计的注入轨道, 其中红色为发射度为 $200 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 的循环束包络, 绿色为注入束包络, 蓝色为局部凸轨。

为了获得较大的离子数增益 (环中总粒子数与每圈注入粒子数之比), 我们需要选取合适的凸轨下降曲线。参考 HIRFL-CSR 冷却储存环装置^[3]和治癌专用重离子加速器装置 HIMM 的同步环注入经验^[4], 注入时凸轨

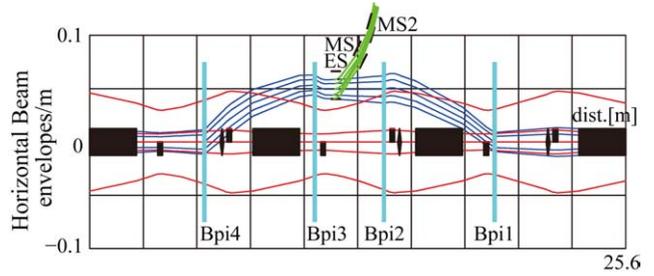


图 3 (在线彩图) 注入轨道设计局

幅度下降过程分两段进行, 第一段为直线下降, 第二段为指数下降, 直线段主要完成束流的注入和相空间的涂抹, 指数下降部分使循环束快速离开静电切割板以尽量减少循环粒子损失。下降曲线由以下分段函数定义:

$$d(n) = \begin{cases} d_0 - (d_0 - d_m) \frac{n}{n_m} & 0 < n \leq n_m \\ d_m \left[1 - \frac{1 - e^{-\lambda(n - n_m)}}{1 - e^{-\lambda(n_f - n_m)}} \right] & 0 < n \leq n_m \end{cases}, \quad (1)$$

其中 n 为圈数变量, d_0 为初始凸轨幅度, n_m 和 d_m 分别为线性下降段结束时的圈数和凸轨幅度, n_f 为凸轨幅度下降到零时的圈数, λ 决定了指数下降的快慢。我们将用粒子跟踪模拟的方法确定合适的凸轨幅度曲线。

表 2~3 分别为注入系统相关的同步环和注入束关键参数。环的设计水平接收度为 $200 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。循环束在注入点处包络为 33.2 mm, 再考虑到 10 mm 左右的闭轨, 在确定注入束流中心位置时, 我们选取静电切割板水平方向的位置为 43.2 mm。直线注入器引出的束流发射度为 $13 \text{mm} \cdot \text{mrad}$, 动量分散小于 0.2%, 模拟时采用以上参数作为初始条件。

表 2 同步环关键参数

参数	数值
周长	43.9 m
注入磁刚度	0.94 Tm(Bi^{32+})
循环周期	3.16 μs
工作点	1.63(H)/1.62(V)
接受度(x):	$200 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$
接受度(y):	$30 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$

表 3 注入束关键参数

参数	数值
离子种类	p-Bi
动量分散	$\pm 0.2\%$
发射度(x)	$13 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$
发射度(y)	$13 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$
质子注入能量	5 MeV/u
重离子注入能量	1 MeV/u

2.3 束流参数匹配

在多圈注入时，水平方向接受度椭圆的面积要比注入束发射度大得多，如果我们采用 Twiss 参数相同的匹配注入，反而会造成相空间涂抹不均匀。所以，我们采用特殊的匹配方法^[5]：

$$\frac{\alpha_i}{\beta_i} = \frac{\alpha_m}{\beta_m} = \frac{x'_c - x'_o}{x_c - x_o}, \quad (2)$$

$$\frac{\beta_i}{\beta_m} \geq \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_m} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

其中 $\alpha_i, \beta_i, \varepsilon_i$ 为注入束末端 Twiss 参数及束流发射度， $\alpha_m, \beta_m, \varepsilon_m$ 为环注入点 Twiss 参数以及环接受度。 x_o, x'_o 表示注入束末端的束流中心在环坐标系下的相空间坐标， x_c, x'_c 表示注入点局部凸轨的坐标。满足以上两个条件，即可使得注入束最大限度地填满环的接受度，使发射度稀释因子最小，达到较大的注入增益。

根据表 2、3 中的同步环和注入束关键参数，以及公式 (2) 中的匹配方案，我们可以计算出切割铁入口处的光学匹配参数，如表 4 所列。

表 4 切割铁入口 Twiss 匹配参数

Twiss	X	Y
β_m	4.963	2.105
α	1.026 3	-1.172 0
D_m	1.658 2	0
D	0.939 1	0

3 注入过程粒子跟踪模拟

粒子跟踪模拟是利用计算机对加速器进行建模，然后用蒙特卡罗方法^[6-8]产生与实际束流类似的粒子分布来代替实际束流，使这些粒子在虚拟的加速器中传输，从而模拟粒子在实际机器中的运动状况。模拟跟踪的目的有 2 个：第一，研究和直观理解粒子在加速器中的运动规律；第二，进行设计参数的优化。

我们利用 ACCSIM 程序^[9]对注入过程进行粒子跟踪模拟，由于 ACCSIM 程序不支持重离子注入，所以先对 ACCSIM 程序功能进行了拓展补充。在粒子跟踪过程中，我们选取每圈注入粒子数为 $N_{inj}=2000$ 个，总共注入圈数为 $n_{inj}=20$ 圈，共计注入 40 000 个粒子。在确定凸轨曲线时，我们选取 $d_0=43.2$ mm， $d_m=0.6 d_0$ ， $n_m=20$ 圈， $n_f = n_{inj}=23$ 圈， λ 取 20。在确定注入束参数时，取水平方向和垂直方向都为抛物线分布、发射度为 $13 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 的 C^{6+} 粒子束，注入束中心偏离中心轨道 43.2 mm，随后在 ACCSIM 程序中进行粒子跟踪。

以下为注入过程模拟结果。图 4 为第 60 圈时粒子在水平方向的相空间分布。随着圈数的增加，注入点处局部凸轨逐渐回落，先注入环里的粒子逐渐运动至相空间中心，后注入的粒子在相空间外侧填充，最后形成图 4 的相空间分布。图 5 为第 60 圈垂直方向的相空间分布，由于垂直方向没有涂抹，因此粒子发射度很小，呈现相空间椭圆形状。

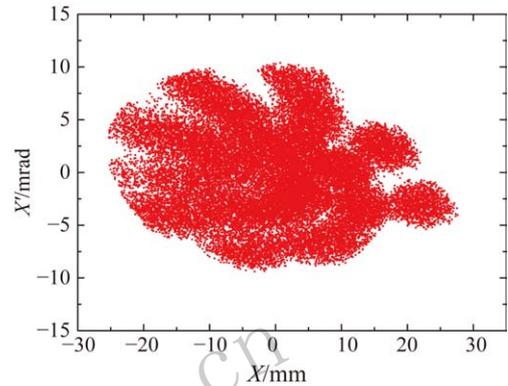


图 4 (在线彩图) 第 60 圈水平相空间分布

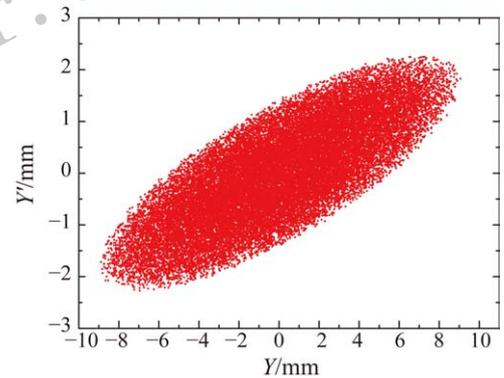


图 5 (在线彩图) 第 60 圈垂直相空间分布

图 6 为横向发射度随圈数的变化，同时绘出了凸轨幅度下降曲线(绿线)用于区分粒子注入阶段和循环束跟踪阶段。在注入阶段，由于只在水平相空间涂抹，所以水平发射度在不断变大，在 20 圈以后不再有新粒子注入，发射度不再变化，注入结束后，水平方向发射度为 $34.9 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。而垂直方向没有涂抹，所以发射度几乎一直不变。

图 7 为每圈粒子的存活率随圈数变化，其中，绿线表示凸轨随圈数变化，第 8 圈至第 16 圈注入期间，凸轨从 30 mm 降至 16 mm，粒子几乎全部存活，每圈注入效率几乎接近 100%。图 8 为离子数增益随着循环圈数的变化，从图中可以看出第 50 圈以后粒子数不再变化，这是因为 20 圈以后，Bump 已经降为 0，被机器捕获的粒子基本上不再丢失。统计结果可知，最终离子数增益

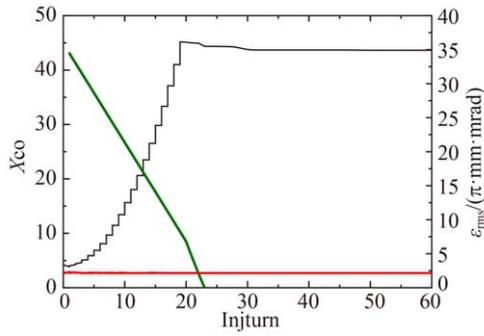


图 6 (在线彩图) 横向发射度随圈数的变化

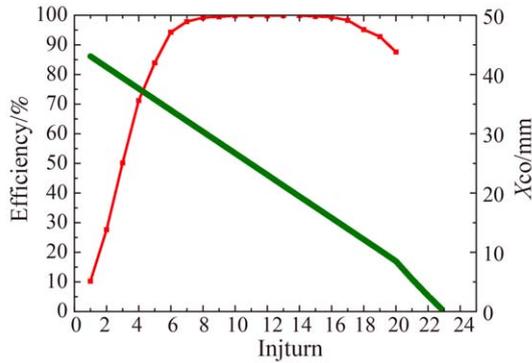


图 7 (在线彩图) 每圈粒子存活率随圈数的变化

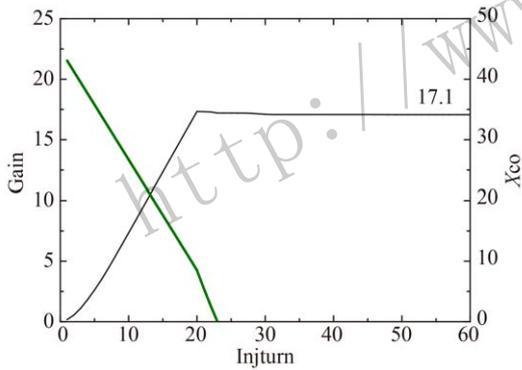


图 8 (在线彩图) 离子数增益随着循环圈数的变化

可以达到 17.1, 注入效率可达 85.5%, 粒子损失大都来源于注入过程, 循环束不可避免地打在静电偏转板上。

4 总结

本文研究了哈尔滨工业大学空间辐射地面模拟装置的同步环注入系统, 对束团粒子在真实加速器中的多圈注入过程进行了跟踪计算。模拟结果表明, 在多圈注入时, 凸轨的变化对于注入效率特别敏感, 凸轨从 30 mm 降至 15 mm 这段过程中, 注入效率极高, 凸轨较大或较小时都会造成注入束损失。最终束流从直线加速器注入的效率可高达 85.5%。最后总的离子数增益高达 17.1, 在物理设计方面, 能够达到设计指标。

参考文献:

- [1] LEE S Y. Accelerator Physics[M]. 2nd Ed. Singapore: World Scientific, 1999: 85.
- [2] Accelerator Complex Study Group, BADANO L, BENEDIKT M, *et al.* Proton Ion Medical Machine Study (PIMMS)-Part II[C]. CERN/PS, 2000: 177.
- [3] XIA Jiawen, ZHAN Wenlong, WEI Baowen, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2002, **25**(11): 488.
- [4] CHAI Weiping, XIA Jiawen, YANG Jiancheng, *et al.* High Power Haser and Particle Beams, 2013, **25**(4): 994.
- [5] BEEBE-WANG J, PRIOR C R. Injection Mismatch for the SNS Accumulator Ring[C]. BNL/SNS Tech Note No.080, 2000.
- [6] WANG Jiansheng, SWENDSEN R H. Journal of Statistical Physics. 2002, **106**(1-2): 245.
- [7] CHRISTOPHE A, ARNAUD D, ROMAN H. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Statistical Methodology), 2010, **3**: 269.
- [8] MCGREEVY R L. Journal of Physics: Condensed Matter, 2001, **46**: R877.
- [9] JONES F W. User's Guide to Accsim[C]. TRIUMF Design NoteNo. 073, 1990.

Injection Design and Simulation Study of Synchrotron in SESRI

LIU Ming^{1,2}, CHAI Weiping^{1,2}, YANG Jiancheng¹, RUAN Shuang^{1,2}, LIU Jie^{1,2}, YAO Liping^{1,2}

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

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Space Environment Simulation and Research Infrastructure (SESRI), which is one of the large-scale scientific projects proposed in National Twelfth Five-Year Plan of China, will be constructed in Harbin Institution of Technology. The SESRI project dedicated to space radiation consists of two ECR ion sources, a high intensity ion linac, a synchrotron and 3 research terminals. As the key part of the complex, a 43.9 m synchrotron can provide broadest energy range and variable ion beam for each terminal. To obtain required intensity in the synchrotron, the injection system is significant. A multi-turn injection scheme is adopted in the synchrotron and the injection process is simulated by ACCSIM with multi-particle tracking method. The results show that the injection efficiency and intensity gain factor can reach 85.5% and 17.1 respectively. The multi-turn injection system can meet the design requirement.

Key words: SESRI; multi-turn injection; injection efficiency; intensity gain factor

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

Received date: 23 Nov. 2016; **Revised date:** 22 Feb. 2017

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11505256)

Corresponding author: CHAI Weiping, E-mail: chaiwp@impcas.ac.cn