

文章编号: 1007-4627(2019)03-0322-07

双平面多圈注入模拟优化程序TPIS的初步开发与验证

姚丽萍^{1,2}, 柴伟平¹, 杨建成^{1,†}, 夏佳文^{1,3}, 申国栋^{1,3}, 任航^{1,2},
刘杰^{1,2}, 阮爽^{1,3}, 王耿^{1,2}, 董自强^{1,2}, 蔡付成^{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: 为满足短时间内达到高累积流强要求, HIAF/BRing采用了一种新的注入方法——双平面相空间多圈注入。该注入方法与传统单平面多圈注入方法不同, 而且在国际上是首次在实际项目中采用, 尚无实际运行经验。因此, 对注入过程进行程序模拟研究是验证双平面多圈注入方案可行性的必要手段。为详细模拟研究BRing双平面多圈注入过程, 并克服已有程序跟踪速度较慢且注入参数修改不便的缺点, 本文根据双平面多圈注入的特点, 建立了双平面多圈注入模型, 编写了双平面多圈注入模拟优化程序TPIS(Two-Plane multiturn Injection Simulation)。通过与ORBIT程序模拟结果对比, 验证了TPIS程序模拟双平面多圈注入过程的正确性。在此基础上, 在TPIS程序中加入了粒子群优化算法, 并对BRing注入参数进行了优化。结果表明, TPIS程序可以对注入参数进行有效优化, 经过优化后, 束流损失减少了28%, 最终剩余累积粒子数满足BRing的流强设计指标要求, 进一步验证了双平面多圈注入设计的可行性。

关键词: HIAF/BRing; 双平面相空间多圈注入; TPIS; 注入参数优化;

中图分类号: TL56 **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.03.322

1 引言

具有国际领先水平的强流重离子加速器装置HIAF^[1](High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility)正处于设计优化阶段。增强器BRing(Booster Ring)(以下简称环)是HIAF的核心加速器, 其设计流强为每脉冲内粒子数 1.0×10^{11} ppp($^{238}\text{U}^{34+}$), 是现有兰州重离子加速装置HIRFL-CSR^[2]的1000倍以上。由于传统的单平面多圈注入方法获得的束流累积增益低, 即使考虑电子冷却后, 也可能因冷却时间太长造成束流因电子离子相互作用及空间电荷效应的影响而迅速损失, 无法满足BRing短时间内达到高累积流强的要求, 因此, BRing采用了一种新的注入方法——双平面相空间多圈注入^[3-4](以下简称双平面多圈注入)。该方法相比于传统的单平面多圈注入方法, 束流累积增益可以通过选择合适的机器接受度而大幅度提高。该方法是由Prior^[5]在1997年为HIDIF项目首次提出, 但由于最终工程未建使此法并未实际应用, 因此通过程序模拟双

平面多圈注入过程是验证双平面多圈注入设计可行性的重要手段。

ORBIT^[6]是由美国橡树岭国家实验室开发的动力学模拟程序, 也是国际上常用的注入模拟程序。虽然运用修改后的ORBIT程序可以实现对双向多圈注入过程的跟踪模拟, 同时模拟结果表明不同的注入参数对注入过程中的束流损失影响很大。由于在强流重离子加速器中, 注入过程中的束流损失会破坏加速器装置的真空系统, 引起动态真空效应^[7], 影响束流寿命, 并且造成机器的放射性污染, 影响机器正常维护。因此, 为了减小注入过程中的束流损失, 必须对注入参数进行优化。但在利用ORBIT程序实现运用优化算法对注入参数进行优化的过程中, ORBIT程序存在自身的局限性, 如注入参数调节不便, 计算速度较慢等导致优化无法进一步深入。因此, 利用C++语言开发了双平面多圈注入的模拟优化程序TPIS(Two-Plane multiturn Injection Simulation)。

本文将首先介绍TSIP程序的理论模型及计算流程,

收稿日期: 2018-12-18; 修改日期: 2019-02-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11705253); 广东省引进创新创业团队计划资助项目(2016ZT06G73)

作者简介: 姚丽萍(1991-), 女, 甘肃定西人, 在读博士, 从事加速器物理研究; E-mail: yaoliping@impcas.ac.cn

† 通信作者: 杨建成, E-mail: yaoliping@impcas.ac.cn

并将该程序的模拟结果与 ORBIT 程序模拟结果对比，以验证 TPIS 程序进行双平面多圈注入过程模拟的正确性；然后介绍程序中的注入参数优化算法，并给出最终的优化注入参数和模拟结果。

2 理论模型

2.1 双平面多圈注入模型

双平面多圈注入方法不同于只在水平相空间填充的传统单平面多圈注入方法，该方法用到了一台倾斜放置的静电偏转板，以实现束流在水平和垂直平面相空间中以李萨如扫描的方式同时进行涂抹，从而充分利用环的垂直方向相空间，达到相比传统单平面多圈注入更高的注入圈数和累积流强增益。根据经验公式^[8]，BRing 最终选择了大的水平方向 $200 \pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 和垂直方向 $100 \pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 的接受度，以保证相空间的可填充空间。

图 1 给出了双平面多圈注入过程中水平方向和垂直方向注入束和循环束轨道，其中绿色线为发射度为水平方向 $200 \pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ (a) 和垂直方向 $100 \pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ (b) 的循环束包络，红色线为注入束包络，蓝色线为注入开始时刻循环束的瞬时局部凸轨^[9]，黑色线分别为切割磁铁 MS 和静电偏转板 ES。双平面多圈注入过程中，注入束首先在切割磁铁 MS 的偏转作用下进入到静电偏转板 ES 的电场间隙中，在注入开始时，环中的局部凸轨由两组水平方向和垂直方向的凸轨磁铁 (BPH1~BPH4 和 BPV1~BPV4) 凸起到靠近静电偏转板的位置。注入束在静电偏转板的偏转作用下首先填充到相空间的中心区域，随着注入过程的进行，局

部凸轨将逐步落回到中心轨道，在此过程中注入束会逐渐向外填充到环的水平方向和垂直方向接受度中，并避免循环回来的束流打到静电偏转板上损失。

基于以上双平面多圈注入的特点，首先建立了双平面多圈注入模型，如图 2 所示。图中尺寸均按照注入设计的实际束流尺寸标注，矩形由内向外依次表示环 BRing 的设计接受度，以及考虑了闭轨畸变裕量的接受度；右上角红色束团代表注入束流，其水平和垂直发射度均为 $5 \pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ ；斜线表示倾斜静电偏转板 ES，其与水平方向的夹角为 θ ；红色折线表示凸轨在注入过程中的变化情况。在本模型中，考虑到程序的计算速度优化，采用一个与实际凸轨变化相反的过程，即将局部凸轨随注入过程逐步下降至中心轨道的过程转化为注入束和静电偏转板从中心轨道逐步向外移动的过程，以使注入束逐步填充到环的水平方向和垂直方向接受度中。这样的转化不仅可以实现与实际凸轨变化相同的功能，而且简化了程序模型，大大提高了程序的计算速度。

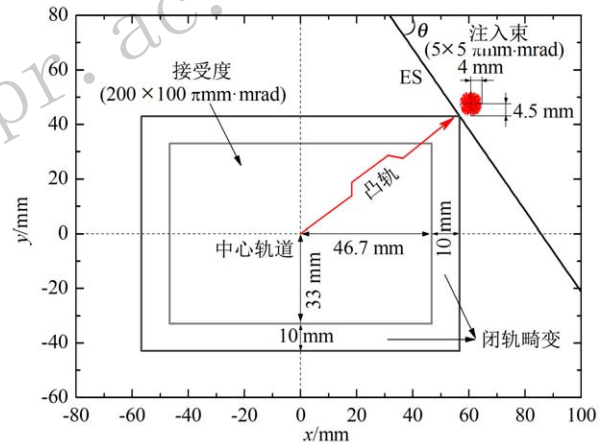


图 2 (在线彩图) 双平面多圈注入模型

上述模型注入过程中的束流损失主要考虑三种机制，一是注入束打到静电偏转板造成注入束损失；二是循环束打到静电偏转板造成循环束损失；三是束流尺寸超过环的接受度造成循环束损失。其中，静电偏转板处的束流损失是通过比较粒子的横向坐标与静电偏转板横向位置的大小，当粒子坐标在水平和垂直任一方向上超过静电偏转板时，即认为该粒子丢失。同时由于双平面多圈注入采用的是倾斜静电偏转板，因此，为了便于位置大小的判断，在进行静电偏转板处束流损失判断前，程序中先对粒子坐标与静电偏转板位置坐标进行了坐标旋转计算。

2.2 束流传输

对每一圈注入到环中的束流沿环进行传输，从而得到粒子在静电偏转板处的准确位置，是判断注入过程中

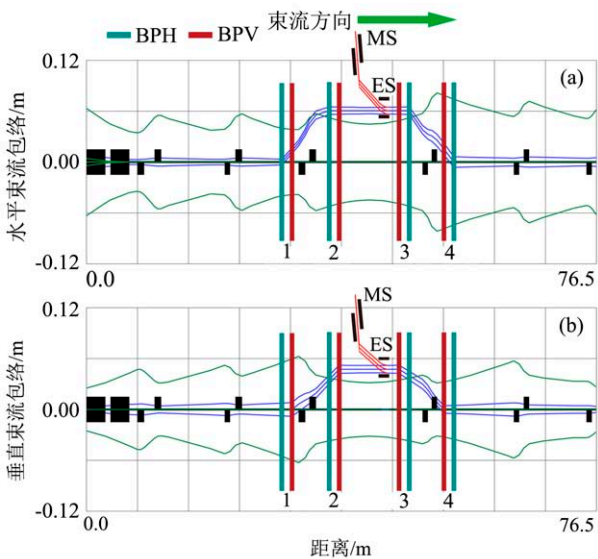


图 1 (在线彩图) 双平面多圈注入轨道

粒子损失的必要条件。考虑到注入参数优化对程序计算速度及计算效率的要求，不同于 ORBIT 程序中直接读取 MAD^[10] 光学文件获取每个元件的传输矩阵，并与

之相乘进行束流传输的方法。TPIS 采用单圈传输矩阵方程^[9]来描述粒子从注入点 s_0 到环上任意一点 s 处的运动，如公式 (1)~(2) 所示。

$$M(s, s_0) = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{\beta(s)}{\beta(s_0)}} (\cos \Delta\Phi + \alpha(s_0) \sin \Delta\Phi) & \sqrt{\beta(s)\beta(s_0)} \sin \Delta\Phi \\ \sqrt{\frac{1}{\beta(s_0)\beta(s)}} \begin{bmatrix} (\alpha(s_0) - \alpha(s)) \cos \Delta\Phi \\ -(1 + \alpha(s)\alpha(s_0)) \sin \Delta\Phi \end{bmatrix} & \sqrt{\frac{\beta(s_0)}{\beta(s)}} (\cos \Delta\Phi - \alpha(s) \sin \Delta\Phi) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\Delta\Phi = \Phi(s) - \Phi(s_0). \quad (2)$$

其中 $\Delta\phi$ 是 s_0 到 s 间的相移， $\alpha(s_0)$, $\beta(s_0)$ 为 BRing 在注入点处的 Twiss 参数。采用单圈传输矩阵方法最大的优点是可以省去程序中对加速器装置各类元件的定义，这样不仅可以大幅度提高了束流传输计算的速度，提高程序计算效率，而且使得注入参数的调节更加方便。

3 TPIS 程序设计与验证

基于以上理论模型，利用 C++ 语言编写了双平面多圈注入优化程序 TPIS，程序计算流程如图 3 所示。在程序设计上，考虑到后续程序其他功能的扩展，TPIS 程序采用模块化编程，主要的功能有参数初始化、注入元件定义、静电偏转板位置移动、粒子损失判断、束流传输、剩余粒子数计算以及文件输出。从计算功能

上看，TPIS 程序可针对某一组特定的输入参数完成双平面涂抹多圈注入过程的跟踪和模拟计算，实现注入参数的初步优化，且计算速度快，注入参数调节方便，但只考虑了线性光学的情况，未包含误差和空间电荷效应等影响，此部分功能会在后续编程中逐步完善。此外，为了提升程序的易操作性，TPIS 程序开发了图形化的人机交互界面，如图 4 所示。借助该界面可直观地对注入参数进行修改，并在模拟完成后可在界面上显示计算结果，绘制结果曲线，从而大幅度提高工作效率。

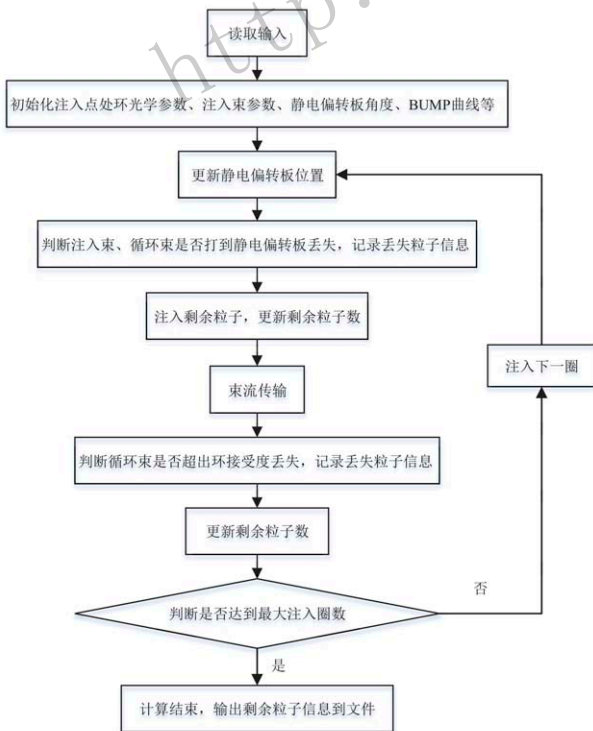


图 3 TPIS 程序计算流程

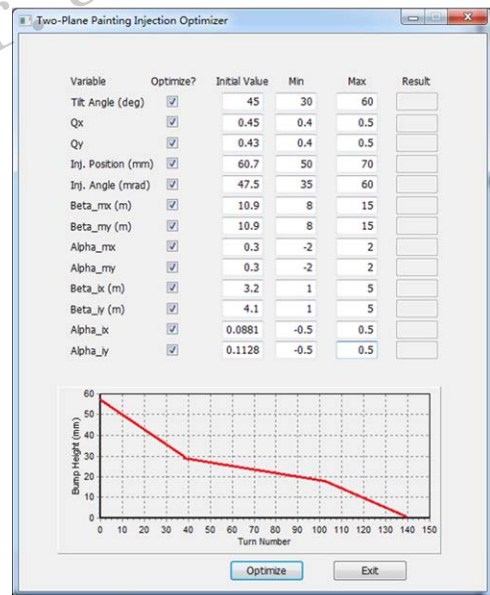


图 4 (在线彩图) TPIS 程序注入参数优化界面

为了验证 TPIS 程序中双平面多圈注入模型以及束流传输模型的正确性，以检验 TPIS 程序是否能满足模拟双平面多圈注入过程的要求，选取了一组 BRing 的注入设计参数进行模拟，并将模拟计算结果与 ORBIT 的计算结果做了比较。模拟采用的注入设计参数如表 1 所列，BUMP 曲线如图 5 所示。在模拟过程中，使用宏粒子来代表实际粒子，每圈注入 200 个宏粒子，每个宏粒子代表 7.65×10^6 个实际 $^{238}\text{U}^{34+}$ 粒子，总共注入圈数为 70 圈，共计注入 14 000 个粒子，横向分布采用 KV 分

布，纵向分布采用均匀分布，能量分布采用高斯分布。模拟计算结果如图 6 所示。

表 1 双平面多圈注入设计参数

参数	水平	垂直
ES倾斜角	45°	
ES中心位置/mm	57.7	43.7
注入束中心位置 x_i, y_i /mm	61.8	48.3
注入束尺寸/mm	8.2	9.2
工作点 Q_x, Q_y	8.176 3	8.303 7
同步环光学参数 β_{xm}, β_{ym} /m	11.364	11.364
同步环光学参数 α_{xm}, α_{ym}	0.231 8	0.231 8
注入束光学参数 β_{xi}, β_{yi} /m	3.4	4.2
注入束光学参数 α_{xi}, α_{yi}	0.069 4	0.085 7

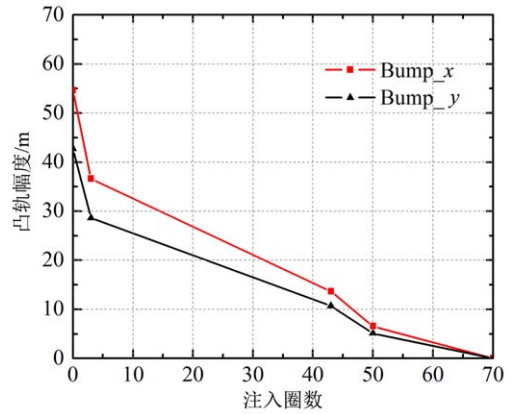


图 5 (在线彩图) BUMP曲线随注入圈数的变化

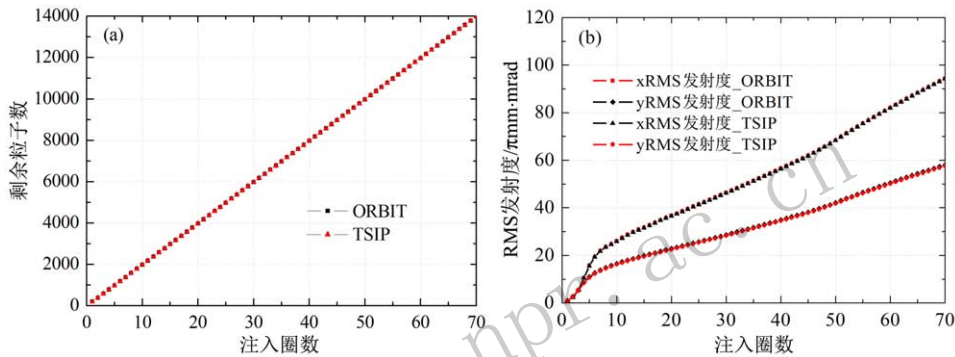


图 6 (在线彩图) TPIS程序与ORBIT程序模拟结果的对比

由图 6 可知，TPIS 程序的计算结果与 ORBIT 程序的计算结果吻合较好，其中，注入结束时的剩余粒子数与 ORBIT 计算结果基本一致，分别为 13976 与 13981，如图 6(a) 所示。此外，注入结束后束流的水平和垂

直 RMS 发射度也与 ORBIT 结果符合较好，如图 6(b) 所示。

图 7 给出了两个程序得到的注入结束时粒子在水平方向和垂直方向相空间及物理空间中的粒子分布，其中

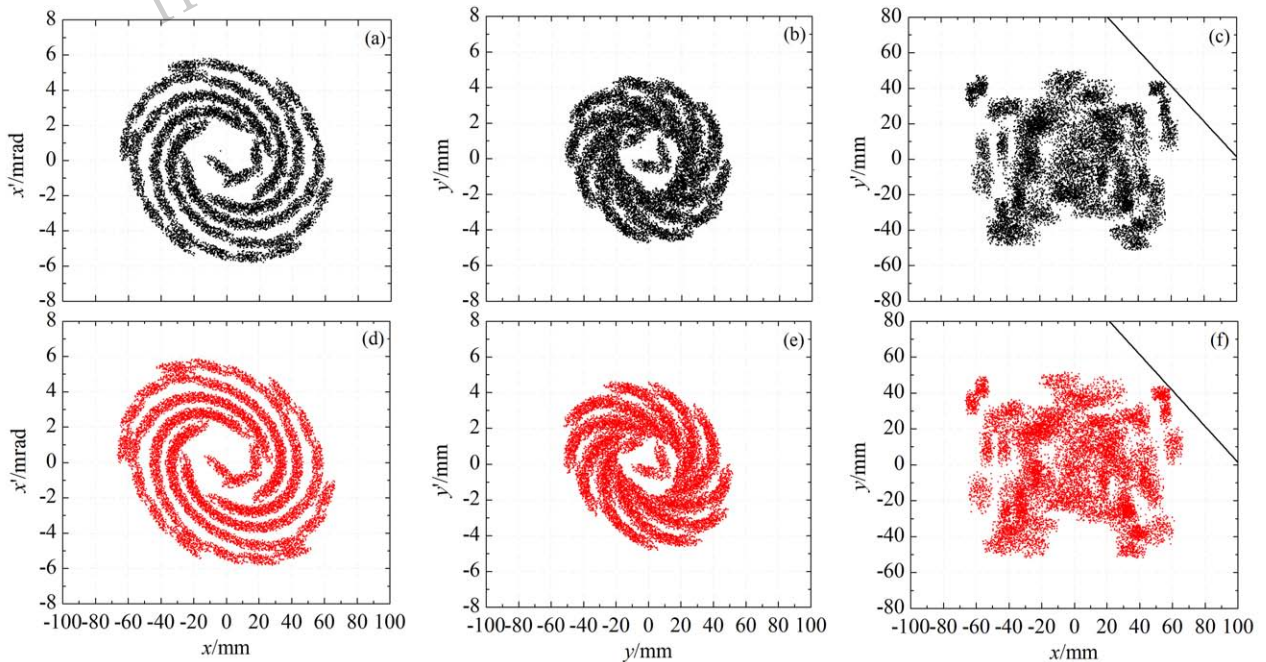


图 7 (在线彩图) TPIS程序与ORBIT程序粒子分布模拟结果的对比

(a)~(c)为ORBIT模拟结果, (d)~(f)为TPIS模拟结果, 可以看出, 束流在水平方向和垂直方向相空间都进行了填充, 粒子分布高度一致。以上结果表明, TPIS程序能对双平面多圈注入过程进行模拟, 且计算结果正确, 与ORBIT程序的计算结果吻合, 可以进一步用于注入参数优化。

4 双平面多圈注入优化

为了模拟更接近实际加速器环境的注入过程, 在上述模拟结果基础上, 考虑环接受度的限制后, 束流损失大幅度增加, 剩余粒子数由13980减少到9754, 束流损失高达31%, 相应的实际粒子数为 7.46×10^{10} , 远不能满足BRing的累积流强要求及真空系统的粒子损失要求。因此, 为保证能提供满足物理要求及累积流强要求的束流, 优化注入设计以获得尽可能高的累积粒子数及尽可能小的粒子损失是注入系统设计的最终目标。但由于双平面多圈注入方法中, 最终达到的粒子数增益和束流损失与多种注入参数相关, 包括静电偏转板的倾角 θ , 环的水平 and 垂直方向的工作点 Q_x, Q_y , 注入点处环的光学参数 $\alpha_{xm}, \beta_{xm}, \alpha_{ym}, \beta_{ym}$, 注入点处注入束的光学匹配参数 $\alpha_{xi}, \beta_{xi}, \alpha_{yi}, \beta_{yi}$, 注入束所处的位置和角度 x_i, x'_i, y_i, y'_i , BUMP磁铁下降曲线 $CO_x(t), CO_y(t)$ 。因此, 无法通过只调节其中一个注入参数来达到设计最优值, 必须对多个注入参数同时进行优化。

为了实现多个注入参数同时进行优化, 同时基于TPIS程序计算速度较快, 参数修改方便的特点,

提出在TPIS程序中加入粒子群优化算法^[11], 以下简称PSO(Particle Swarm Optimization)算法, 对注入参数进行优化。PSO算法, 是由Kennedy和Eberhart在1995年提出的是一种基于群体智能的全局搜索算法, 此方法通过粒子间的竞争和协作以实现在复杂搜索空间中寻找全局最优点。根据PSO算法的计算原理, 认为此处适用于解决双平面多圈注入参数优化问题。

在TPIS程序计算优化计算过程中, PSO优化算法将每一圈注入结束时的剩余粒子数设定为目标函数, 将需要优化的 N 个注入参数设定为优化变量, 并给定其初始值及最大最小限值。然后通过迭代在 N 维的搜索空间中寻找目标函数的最大极值, 当达到设定的最大迭代次数后参数优化过程结束。

经过TPIS程序优化后, 得到了一组新的注入参数, 如表2所列。优化后的粒子在水平方向和垂直方向相空间如图8(a)和8(b)及物理空间8(c)中的粒子分布, 优化后的BUMP曲线8(d)所示, 可以看出, 粒子在相空间填充得更加紧密、更加均匀, 亦即累积增益更高。

表 2 优化后的双平面多圈注入参数

参数	水平	垂直
ES倾斜角	59.3°	
ES中心位置/mm	26	24.8
工作点 Q_x, Q_y	8.5334	8.2785
注入束中心位置 x_i, y_i /mm	30.1	29.4
同步环光学参数 β_{xm}, β_{ym} /m	7.042	12.425
同步环光学参数 α_{xm}, α_{ym}	-0.0441	-0.2078

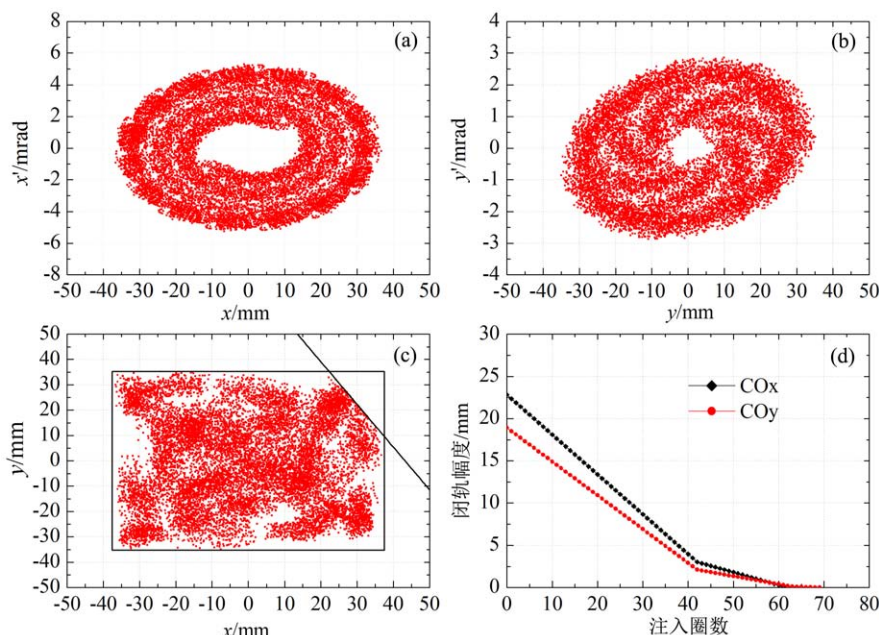


图 8 (在线彩图) 优化后注入结束时水平(a)、垂直相空间(b)和物理空间(c)中的粒子分布及注入过程中BUMP磁铁下降曲线(d)

图9给出了注入参数优化前后, 剩余粒子数与损失粒子数的变化。可以看出, 不考虑空间电荷效应影响时, 通过TPIS程序进行注入参数优化后, 粒子损失大幅度减小, 最终得到存活粒子数为13 433, 粒子损失为4%, 相应的实际累积粒子数可满足BRing流强要求。以上结果验证了TPIS进行双平面多圈注入参数优化的有效性, 也证明了双平面多圈注入方案的可行性。但上述模拟中尚未包含空间电荷效应的影响, 为了保证BRing注入系统获得高的注入效率和注入增益, 下一步会在该优化结果的基础上考虑空间电荷效应的影响, 进一步优化注入参数。

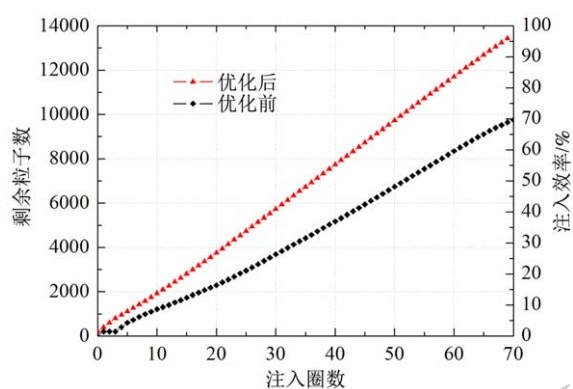


图9 (在线彩图) 注入参数优化前后, 剩余粒子数与粒子损失随注入圈数的变化

5 结论

本文开发了可进行双平面多圈注入过程模拟和注入参数优化的程序TPIS, 经过对比, 本程序基于双平面多圈注入模型计算的粒子损失、束流发射度和粒子

分布与ORBIT模拟结果吻合较好, 验证了TPIS双平面多圈注入模拟程序的正确性。同时, TPIS程序中加入PSO优化算法后, 可以用于注入参数的优化。优化结果表明, 在不考虑空间电荷效应影响时, 最终得到的束流损失为4%, 累积粒子数在BRing流强设计指标以上, 此模拟结果初步验证了TPIS程序进行注入参数优化的可行性与有效性, 同时也验证了双平面多圈注入方案的可行性。

参考文献:

- [1] YANG J C, XIA J W, XIAO G Q, *et al.* *Nucl Instr and Meth B*, 2013, **317**: 263.
- [2] XIA Jiawen, ZHAN Wenlong, WEI Baowen, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2002, **488**(1): 11.
- [3] PRIOR C R, REES G H. *Nucl Instr Meth A*, 1998, **415**: 357.
- [4] QU Guofeng, XIA Jiawen, YANG Jiancheng, *et al.* *Nucl Phys Rev*, 2018, **35**(1): 28. (in Chinese)
(曲国锋, 夏佳文, 杨建成, 等. *原子核物理评论*, 2018, **35**(1): 28.)
- [5] PLASS G. *Nucl Instr Meth A*, 1998, **415**: 204.
- [6] GALAMBOS J, HOLMES J, OLSEN D. ORBIT User Manual, V.1.0. SNS-ORNL-AP Tech. Note 11, 1999: 39.
- [7] GRÖBNER O, CALDER R S. *IEEE Tran Nucl Sci*, 1973, **20**(3): 760.
- [8] CHAO A. *Handbook of Accelerator Physics and Engineering*[M]. Singapore: World Scientific, 1999: 497.
- [9] LEE S Y. *Accelerator Physics*[M]. 2nd ed. Singapore: World Scientific, 1999: 85.
- [10] GROTE H, ISELIN F C. *The MAD Program*, Version 8.19. (1996).
- [11] KENNEDY J, EBERHART R C. *IEEE*, 1995, **4**: 1942.

Development and Validation of TPIS Program for Two-plane Multiturn Injection and Optimization

YAO Liping^{1,2}, CHAI Weiping¹, YANG Jiancheng^{1,†}, XIA Jiawen^{1,3}, SHEN Guodong^{1,3}, REN Hang^{1,2},
LIU Jie^{1,2}, RUAN Shuang^{1,3}, WANG Geng^{1,2}, DONG Ziqiang^{1,2}, CAI Fucheng^{1,2}

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

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

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

Abstract: In order to meet the high requirement of beam intensity in a short time, a new injection method named two-plane multiturn injection is proposed for HIAF/BRing. This method is different from the traditional single-plane multiturn injection, and it has no practical operation experience. This will be the first time to be used in a practical project. Therefore, it is necessary to verify the feasibility of the two-plane multiturn injection scheme through program simulation. In order to simulate and study the injection process in detail, and to overcome the disadvantages of existing programs such as slow tracking speed and inconvenient modification of injection parameters, the injection model and TPIS (Two-Plane multiturn Injection Simulation) program are developed. By comparing with the simulation results of ORBIT program, it proves that the TPIS program is correct to simulate the two-plane multiturn injection process. On this basis, particle swarm optimization algorithm is added into the TPIS program, and the injection parameters are optimized. The results show that the TIPS program can be used for injection parameter optimization. After the optimization, the injection beam loss is reduced by 28%, and the final accumulate particle number can meet the requirement of design beam intensity. It also verifies the feasibility of two-plane multiturn injection.

Key words: HIAF/BRing; two-plane multiturn injection; TPIS; injection parameter optimization;

Received date: 18 Dec. 2018; **Revised date:** 19 Feb. 2019

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11705253); Special Funding for the Introduced Innovative R&D Team of Guangdong(2016ZT06G73)

† **Corresponding author:** YANG Jiancheng, E-mail: yangjch@impcas.ac.cn.