

文章编号: 1007-4627(2018) 03-0270-08

HIAF-SRing 的等时性模式光学设计

吴波^{1,2}, 杨建成^{1,†}, 葛文文^{1,2}, 夏佳文¹, 申国栋¹, 颜鑫亮¹

(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: 高精度环形谱仪 SRing 作为 HIAF 装置的核心之一, 是获取高品质放射性次级束, 并将束流用于加速器技术研究、原子物理及核物理实验的关键设备。SRing 有三种运行模式: 等时性模式、正常模式与内靶模式。等时性模式下, SRing 运行在特殊线性光学设置下, 可以精确测量寿命低至几十微秒的原子核的质量。介绍 SRing 等时性模式的线性光学及高阶项校正的设计方案。在使用程序 GICOSY 进行等时性高阶项校正数值计算后, 将得到的光学传输矩阵输入到程序 MOCADI 进行粒子跟踪模拟。以 $\gamma_t=1.43$ 的等时性模式为例, SRing 的动量接收度为 $\pm 0.20\%$, 粒子跟踪结果显示, 在仅满足一阶等时性条件时 SRing 的质量分辨能力 $R=1.6 \times 10^4$ 。在保证动量接收度不变的前提下, 考虑了等时性高阶项校正后 SRing 的质量分辨能力提高到 $R=1.2 \times 10^6$, 达到设计要求。

关键词: SRing; 等时性模式; 光学设计; 高阶项校正; 原子核质量测量

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.35.03.270

1 引言

强流重离子加速器装置 (High Intensity heavy-ion Accelerator Facility, HIAF) 是中国科学院近代物理研究所提出建造的“十二五”重大科技基础设施, 致力于开展核物理、原子物理、核天体物理以及相关加速器技术的研究^[1-2]。作为 HIAF 装置中最重要的实验平台, 高精度环形谱仪 (Spectrometer Ring, SRing) 接收放射性次级束分离器 (HIAF Fragment Separator, HFRS) 上产生的放射性束, 制备高品质的放射性次级束并用于各种储存环物理实验, SRing 在 HIAF 中的位置见图 1。

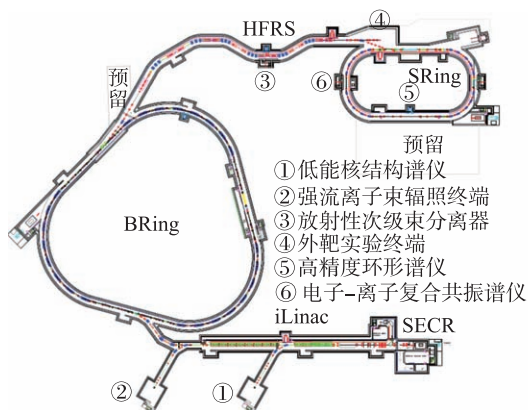


图 1 (在线彩色) HIAF 装置总体布局图

SRing 建造完成后, 质量测量将作为首要任务, 可以开展肖特基质量测量和等时性质量测量。肖特基质量测量的关键技术是利用随机冷却和电子冷却装置将离子的速度分散降低到 10^{-7} 量级, 以获得较高的回旋周期分辨能力^[3-5]。等时性质量测量的关键技术是利用储存环的等时性光学设置使得目标离子的回旋周期与动量分散无关, 从而获得较高的回旋周期分辨能力^[6]。等时性质量测量无需冷却离子束, 因而可以测量寿命低至几十微秒放射性核素的质量。等时性质量测量在中国科学院近代物理研究所的现有冷却储存环装置 (Cooler Storage Ring, CSRe) 上成功开展^[7]。SRing 的质量分辨能力设计指标 $R=1.0 \times 10^6$, 与 CSRe 相比, SRing 具有更大的接收度和更高的质量分辨能力^[8-9]。凭借 HIAF 提供的强流重离子束及 SRing 的高质量分辨能力, SRing 可以精确测量极端远离 β 稳定线的核素的质量。

2 等时性质量测量原理

储存环中离子的质荷比 m/q 与回旋周期 T 的关系如下:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{\gamma^2} \cdot \frac{\Delta(m/q)}{m/q} + \left(\frac{1}{\gamma_t^2} - \frac{1}{\gamma^2} \right) \cdot \frac{\Delta p}{p} + \frac{dT}{T}, \quad (1)$$

其中: γ 为离子的洛伦兹因子; γ_t 为储存环的临界能量;

收稿日期: 2018-03-20; 修改日期: 2018-04-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (11705253, 11605248)

作者简介: 吴波 (1990-), 男, 江苏徐州人, 博士研究生, 从事重离子加速器物理; E-mail: wubo@impcas.ac.cn

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

注入切割磁铁与注入踢轨磁铁之间的相移满足 $n \times 90^\circ$ (n 为奇数) 的要求; (5) 为保证束流的稳定性, 工作点应避免穿越一阶至五阶共振线; (6) 在不增大磁铁孔径的情况下, 尽可能提高储存环的接收度。

SRing 等时性模式的线性光学有三种 $\gamma = \gamma_t$ 设置, 分别为 $\gamma = \gamma_t = 1.43$, $\gamma = \gamma_t = 1.67$ 和 $\gamma = \gamma_t = 1.84$ 。通过调节 SRing 的磁刚度及 $\gamma = \gamma_t$ 参数, 这三种光学可测量的离子所覆盖的核素图区域如图 3 所示。在 $\gamma = \gamma_t = 1.43$ 设置下, SRing 能够测量极端远离 β 稳定线的丰中子核素的质量。

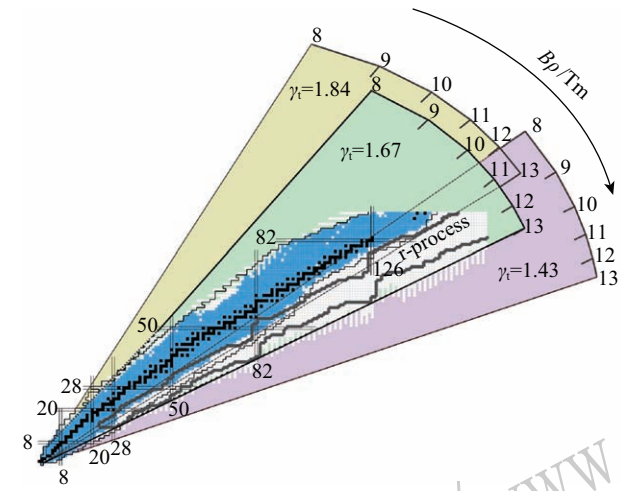


图 3 (在线彩图) 等时性模式三种光学可测量的离子在核素图上的分布
核素图的横坐标代表中子数目, 纵坐标代表质子数目; 黑色方块代表稳定核素, 蓝色方块代表已知质量的核素。

SRing 等时性模式三种线性光学由 MAD-X 程序^[13]进行计算, 得到的 Twiss 参数如图 4 所示。可以看出三种 γ_t 光学设置的 Twiss 参数曲线变化趋势相似, 并且在注入直线段的 Twiss 参数比较接近, 这样可以简化束流注入部分的设计。

$\gamma = \gamma_t$ 与光学参数中色散函数 D_x 有如下关系:

$$\frac{1}{\gamma_t^2} = \frac{1}{L} \cdot \oint \frac{D(s)}{\rho} ds, \quad (3)$$

其中: L 表示储存环的周长; ρ 表示二极铁的曲率半径; s 表示沿束流方向的运动距离。根据式 (3), 等时性模式要求的 $\gamma = \gamma_t$ 较小意味着弧区的色散函数 D_x 就相对较大, 从而导致等时性模式下储存环的动量接收度较小。等时性模式光学的设计难点在于找到合适的磁聚焦结构, 使弧区的色散函数 D_x 足够大以获得较小的 $\gamma = \gamma_t$ 值; 同时为提高储存环的接收度, 在弧区色散函数 D_x 较大的地方, 将 β_x 函数尽可能的压小。SRing 等时性模式光学参数见表 2。综合考虑 TOF 探测器孔径及磁铁的结构与造价的限制, 三种等时性光学设置下 SRing 设计的横向接收度均为 $\varepsilon_x/\varepsilon_y = 80/40 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。

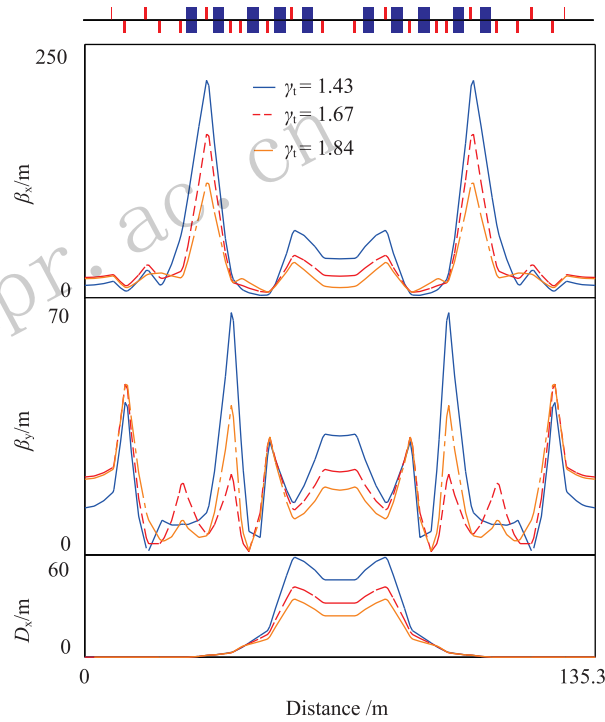


图 4 (在线彩图) 等时性模式一个超周期的 Twiss 参数
实线, 虚线, 点线分别表示 $\gamma = \gamma_t = 1.43$, $\gamma = \gamma_t = 1.67$ 和 $\gamma = \gamma_t = 1.84$ 光学的 Twiss 参数; 图中 Twiss 参数上方示意图中, 蓝色方块表示二极铁, 红色方块表示四极铁。

表 2 SRing 等时性模式的线性光学参数

参数	设置一	设置二	设置三
工作点	2.41/5.43	2.41/5.43	2.41/5.43
临界能量 $\gamma = \gamma_t$	1.43	1.67	1.84
自然色品 ξ_x/ξ_y	-1.23/-5.03	-5.91/-6.01	-4.20/-6.75
横向接收度 $\varepsilon_x/\varepsilon_y$ ($\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$) ($\Delta p/p = 0$)	80/40	80/40	80/40
纵向接收度 $\Delta p/p$	$\pm 0.20\%$	$\pm 0.28\%$	$\pm 0.36\%$
($\varepsilon_x/\varepsilon_y = 40/40 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$)			
最大 D_x 函数/m	58.8	41.8	34.1
最大 β_x 函数/m	214.8	175.9	120.0
最大 β_y 函数/m	66.4	53.9	50.0

5 等时性高阶项校正理论

由于质谱仪的临界能量 $\gamma = \gamma_t$ 在动量接收度范围内不是一个常数, 相同种类的粒子其洛伦兹因子 γ 也随着粒子动量分散的变化而变化, 所以在动量接收度下保证质谱仪满足等时性条件 $\gamma = \gamma_t$ 是储存环高精度等时性质谱仪设计的重点和难点。如图5所示, 仅在 $\Delta p/p = 0$ 这一点处 $\gamma = \gamma_t$ 的条件才能严格满足。储存环中大部分离子只是近似满足等时性条件, 并且离子的动量分散 Δp 越大, γ 与 γ_t 的偏离越大, 导致离子回旋周期分散变大, 最终导致储存环质量分辨能力下降。解决这个问题的一种方法是减小注入束的动量分散, 但这种方法会限制束线的传输效率, 使得注入储存环的离子数目降低, 不适用于产额较低的离子质量测量实验^[14-15]。另一种方法就是采用等时性高阶项校正, 在储存环动量接收度范围内让储存环的 $\gamma_t(\Delta p/p)$ 与目标核的 $\gamma(\Delta p/p)$ 的变化曲线足够地接近。这种方法即能保证等时性条件 $\gamma = \gamma_t$ 得到满足, 又不影响储存环的动量接收度, 不会降低储存环中稀有核素的产额, 因而更具有优势。

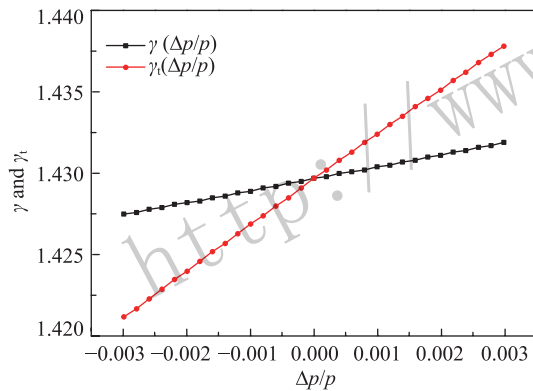


图5 (在线彩图)SRing 运行在等时性模式($\gamma = \gamma_t = 1.43$)下, 环中离子的洛伦兹因子 γ 和储存环的临界能量 $\gamma = \gamma_t$ 与离子动量分散 $\Delta p/p$ 的变化关系

对目标核来说, 式(1)离子循环周期分散的二阶展宽项为

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T}{T} = & \left(\frac{1}{\gamma = \gamma_t^2} - \frac{1}{\gamma^2} \right) \cdot \frac{\Delta p}{p} + \frac{dT}{T} \\ = & (t|\delta)_c \delta + (t|x)_c x + (t|a)_c a + (t|xx)_c x^2 + \\ & (t|xa)_c xa + (t|aa)_c a^2 + (t|yy)_c y^2 + (t|yb)_c yb + \\ & (t|bb)_c b^2 + (t|x\delta)_c x\delta + (t|a\delta)_c a\delta + (t|\delta\delta)_c \delta^2, \end{aligned} \quad (4)$$

其中: (x, y) 为储存环中离子的横坐标; (a, b) 为离子横坐标沿束流方向的导数; $t = nT_0$ 为离子总的循环时

间; n 表示圈数; δ 为离子的动量分散 $p = p_0(1 + \delta)$ ^[10]; T_0 与 p_0 为理想离子的回旋周期及动量; c 表示的是对一个完整循环周期的归一化。式中 $(t|\delta)$, $(t|x)$ 和 $(t|a)$ 分别指的是一阶六维传输矩阵 R 中的 R56, R51 和 R52 矩阵元。 $(t|xx)$, $(t|xa)$, $(t|aa)$, $(t|yy)$, $(t|yb)$, $(t|bb)$, $(t|x\delta)$, $(t|a\delta)$ 和 $(t|\delta\delta)$ 分别是二阶六维传输矩阵 T 中的 T511, T512, T522, T533, T534, T544, T516, T526 和 T566 矩阵元。这些系数的大小与粒子回旋的圈数有关, 这里采用的是粒子回旋 100 圈的平均。在等时性测量实验过程中, 由于粒子不停地穿越 TOF 探测器的碳膜, 会导致其能量不断的减小最终其动量超出储存环接收度而丢失, 因而实验一般采用粒子在环中飞行前 100 圈的数据。SRing 满足一阶等时性条件时, $(t|\delta)$ 项为零。对于一阶消色散的储存环来说, 式(4)中一阶项 $(t|x)$ 和 $(t|a)$ 同时为零。对于二阶耦合项 $(t|x\delta)x\delta$ 及 $(t|a\delta)a\delta$ 对循环时间的影响非常小, 在这里忽略它们。因此, 在式(4)中需要考虑校正的二阶项有 $(t|xx)x^2$, $(t|xa)xa$, $(t|aa)a^2$, $(t|yy)y^2$, $(t|yb)yb$, $(t|bb)b^2$ 以及 $(t|\delta\delta)\delta^2$ 。水平与垂直方向的高阶项校正是一样的, 下面我们以水平方向的高阶项校正为例, 推导出等时性二阶项校正方案。

对于消色散的储存环来说, 二阶项 $(t|xx)x^2$, $(t|xa)xa$, $(t|aa)a^2$ 可以表示为

$$(t|xx) = \lambda [(x|x)(a|x\delta) - (a|x)(x|x\delta)], \quad (5)$$

$$(t|xa) = \lambda [(x|x)(a|a\delta) - (a|x)(x|a\delta)], \quad (6)$$

$$(t|aa) = \lambda [(x|a)(a|a\delta) - (a|a)(x|a\delta)], \quad (7)$$

其中 λ 是跟速度有关的量。式(5)~(7)中 $(x|x)$, $(x|a)$, $(a|x)$ 以及 $(a|a)$ 与全环的传输矩阵 M 有着以下关系:

$$\begin{aligned} M = & \begin{pmatrix} \cos \mu + \alpha \sin \mu & \beta \sin \mu \\ -\gamma \sin \mu & \cos \mu - \alpha \sin \mu \end{pmatrix} \\ = & \begin{pmatrix} (x|x) & (x|a) \\ (a|x) & (a|a) \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $\alpha(s)$, $\beta(s)$ 及 $\gamma(s)$ 是传输矩阵起点(终点)处 Twiss 参数, $\mu(s)$ 是离子经过的相移。直线节中点处的 $\alpha(s) = 0$, 且 $\beta\gamma = 1 + \alpha^2$, 那么 $\gamma = 1/\beta$, 式(8)可以写成

$$M = \begin{pmatrix} \cos \mu & \beta \sin \mu \\ -\frac{1}{\beta} \sin \mu & \cos \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (x|x) & (x|a) \\ (a|x) & (a|a) \end{pmatrix}, \quad (9)$$

由式(5)~(9)可以看出, 二阶项 $(t|xx)x^2$, $(t|xa)xa$ 与 $(t|aa)a^2$ 是随着离子的回旋圈数发生振荡的。经过

多圈之后 $(t|xx)x^2$, $(t|xa)xa$ 与 $(t|aa)a^2$ 的数值仍发生周期性振荡且数值趋于稳定, 而 $(t|xa)xa$ 的数值变得很小可以忽略不计^[10]。 $(x|a\delta)$ 与 $(a|x\delta)$ 有如下关系

$$(x|a\delta)(a|x) = (x|x)(a|a\delta) - (a|x\delta)(x|a) + (x|x\delta)(a|a), \quad (10)$$

结合式(5,9,10)可以得到:

$$(t|aa) + \beta^2(t|xx) = \frac{\lambda\beta}{\sin\mu} [(x|x\delta) + (a|a\delta)]. \quad (11)$$

储存环的水平自然色品 ξ_x 与动量分散 δ 之间的关系为

$$\xi_x = \xi_{1x} + \xi_{2x}\delta + \xi_{3x}\delta^2, \quad (12)$$

其中 ξ_{1x} 表示一阶水平色品, ξ_{2x} 表示二阶水平色品, ξ_{3x} 表示三阶水平色品。一阶水平色品 ξ_{1x} 可以写成如下形式:

$$\xi_{1x} = -\frac{1}{4\pi Q_x \sin\mu} [(x|x\delta) + (a|a\delta)], \quad (13)$$

其中 Q_x 是储存环的水平工作点。结合式(11,13)可以得到:

$$(t|aa) + \beta^2(t|xx) = -4\pi\lambda\beta Q_x \xi_{1x}, \quad (14)$$

在直线节中点处 $\alpha(s) = 0$, 相椭圆的面积 $A = \pi\epsilon_x = \pi x a$, 那么 $\beta = x^2/\epsilon_x = x/a$ 。式(14)可以进一步表示为

$$(t|aa)a^2 + (t|xx)x^2 = -4\pi\lambda\epsilon_x Q_x \xi_{1x}. \quad (15)$$

由式(15), 通过使用一组六极铁校正一阶水平色品 ξ_{1x} 可以将公式(4)中的二阶项 $(t|xx)x^2$ 和 $(t|aa)a^2$ 校正到零。同理, 使用一组六极铁校正一阶垂直色品 ξ_{1y} 就可以将二阶项 $(t|yy)y^2$ 和 $(t|bb)b^2$ 校到零。同时, 还需要使用一组六极铁将二阶项 $(t|\delta\delta)$ 校到零, 这样式(4)右边各项式都可以认为是零。综上所述, 我们需要三组六极铁来进行等时性二阶项校正。等时性三阶项校正也相似, 理论结果直接给出: 使用三组八极铁同时校正二阶水平色品 ξ_{2x} , 二阶垂直色品 ξ_{2y} 及三阶项 $(t|\delta\delta\delta)$ 。

6 等时性高阶项校正模拟计算

等时性高阶项校正数值计算采用GICOSY程序。GICOSY程序以传输矩阵为基础, 可以方便地匹配一阶至五阶传输矩阵中的某一个或几个矩阵元^[16-17]从而得到等时性高阶项校正方案。使用GICOSY进行等时性二阶项校正后, 储存环中离子 $\gamma(\Delta p/p)$ 曲线与储存环的 $\gamma_t(\Delta p/p)$ 曲线如图6所示, 等时性二阶项校正后 $\gamma_t(\Delta p/p)$ 曲线与 $\gamma(\Delta p/p)$ 曲线更为接近。

为了分析经过等时性高阶项校正后, 储存环对离子回旋周期的分辨能力, 使用动力学模拟程序MOCADI^[18]对储存环中的离子进行跟踪。MOCADI可以将GICOSY输出的传输矩阵作为它的光学输入参数, 然后随机生成期望的高斯分布的离子束, 模拟离子

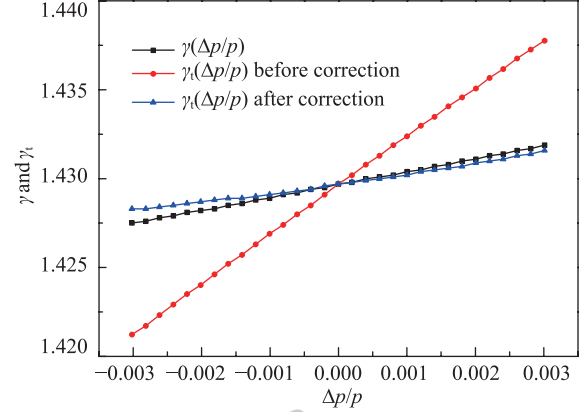


图6 (在线彩图)SRing运行在等时性模式($\gamma_t=1.43$)下, 等时性二阶项校正前后环中离子的洛伦兹因子 γ 、储存环的临界能量 γ_t 与离子动量分散 $\Delta p/p$ 的变化关系

在储存环中的回旋运动。每个离子每回旋一周的详细参数包括能量、飞行时间等都能记录下来进行分析^[19]。以 $\gamma_t=1.43$ 的光学设计为例, 等时性高阶项校正之后, 将束流传矩阵输入MOCADI, 模拟计算中设定离子数为 10^5 , 水平/垂直发射度 $\epsilon_x/\epsilon_y=80/40 \pi \text{mm}\cdot\text{mrad}(2\sigma)$, 动量分散 $\Delta p/p=0.2\%(2\sigma)$, 离子在环中飞行100圈。

SRing满足一阶等时性条件及等时性二阶项校正后, 环中离子的回旋周期随离子动量分散的分布图见图7。在满足一阶等时性条件下, SRing的时间分辨率为 $\Delta T/T = 3.0 \times 10^{-5}$ ($R = 1.6 \times 10^4$), 见图7中蓝色方块。使用一组六极铁S05校正二阶项 $(t|\delta\delta)$ 后, SRing的时间分辨率为 $\Delta T/T = 8.5 \times 10^{-6}$ ($R = 5.7 \times 10^4$), 见图7中粉红色方块。使用三组六极铁S03-S04-S05同时校正一阶色品和二阶项 $(t|\delta\delta)$ 后, SRing的时间分辨率为 $\Delta T/T = 1.8 \times 10^{-6}$ ($R = 2.7 \times 10^5$), 见图7中绿色方块。结果显示在使用三组六极铁进行等时性二阶项校正后, SRing的质量分辨能力从 1.6×10^4 提高到 2.7×10^5 。

等时性模式光学的色散函数 D_x 非常大, 引入较高的高阶场后非线性效应会导致较大的束流损失。选择S03-S04-S05六极铁的校正方案有两个原因: 一是校正后SRing的时间分辨率较高; 二是引入的六极场强度相对较小, 其导致的束流损失也较小。从SRing弧区5

组六极铁中选择3组六极铁进行等时性二阶项校正, 共有10种组合方案。用MAD-X^[13]程序对这10种方案进行动力学孔径跟踪计算, 分析筛选处最佳的设计方案。动力学孔径计算中仅考虑高阶项校正引入的六极场, 设置粒子的动量分散为零, 跟踪圈数为100圈。跟踪结果见图8, S03-S04-S05组合下的动力学孔径最大, 并且大于SRing的物理孔径, 见图8中带五边形的折线。最终设计中选择S03-S04-S05组合作为等时性二阶项光学校正方案。

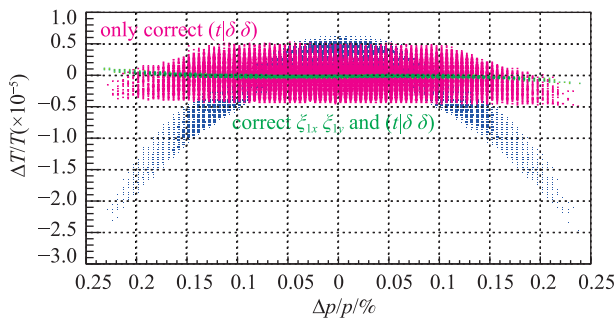


图7 (在线彩图) 离子回旋周期展宽随离子动量分散的分布图

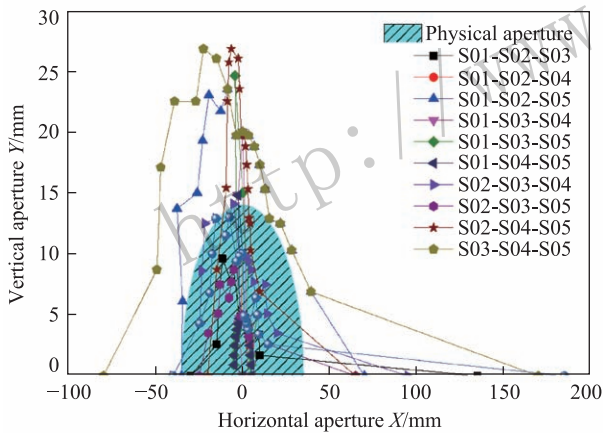


图8 (在线彩图) 不同六极铁校正方案下的动力学孔径

为了进一步提高分辨能力, 需要用到等时性三阶项校正。等时性三阶项校正需要用到三组八极铁校正三阶项($t|\delta\delta\delta$), 二阶水平色品 ξ_{2x} 及二阶垂直色品 ξ_{2y} 。继续使用GICOSY程序和MOCADI程序组合来得到等时性三阶项方案。SRing弧区四极铁内均安装八极线圈, 用于等时性三阶项校正。在使用三组六极铁S03-S04-S05做等时性二阶项校正的基础上, 做等时性三阶项校正, 校正结果见图9。在等时性二阶项校正后, SRing的时间分辨率 $\Delta T/T = 1.8 \times 10^{-6}$ ($R = 2.7 \times 10^5$), 见图9中绿色方块。在使用一组八极线圈OC05校正三阶项($t|\delta\delta\delta$)后, SRing的时间分辨

率 $\Delta T/T = 9.5 \times 10^{-7}$ ($R = 5.2 \times 10^5$), 见图9中浅蓝色方块。在使用三组八极线圈OC03-OC04-OC05同时校正二阶色品和三阶项($t|\delta\delta\delta$)后, SRing的时间分辨率 $\Delta T/T = 4.2 \times 10^{-7}$ ($R = 1.2 \times 10^6$), 见图9中红色方块。结果显示使用八极线圈进行等时性三阶项后, SRing的质量分辨能力从 2.7×10^5 提高到 1.2×10^6 。

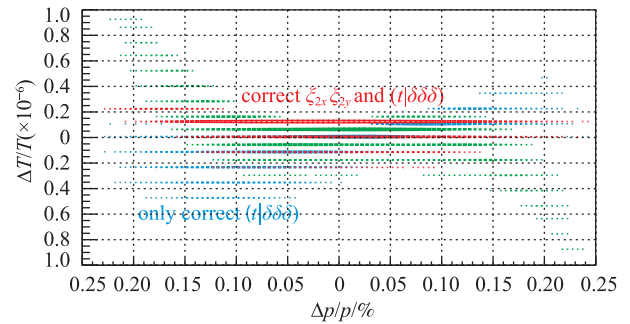


图9 (在线彩图) 离子回旋周期展宽随离子动量分散的分布图

用MAD-X程序对等时性三阶项校正后的光学进行动力学孔径跟踪, 跟踪结果如图10中红色折线所示。等时性三阶项校正后, SRing的动力学孔径略小于其物理孔径, 这意味着环中有一小离子会因为非线性效应的影响而丢失。不过, 考虑到等时性三阶项校正对质量分辨能力的提升作用, 可以容忍这部分离子的损失。

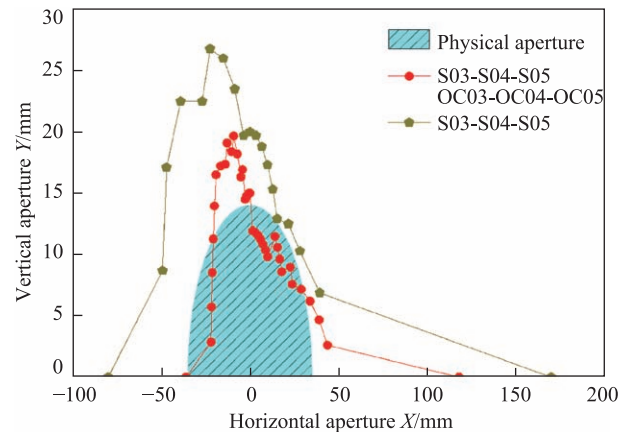


图10 (在线彩图) 采用八极线圈校正后SRing的动力学孔径

7 结果分析与讨论

本文详细地讨论了SRing一阶等时性条件、等时性二阶项校正与三阶项校正方法。使用MAD-X程序进行了等时性模式线性光学的计算。在线性光学的设计基础上, 使用GICOSY程序进行了等时性二阶项校正、三阶项校正的数值计算。将GICOSY的高阶项校

正计算得到的束流传输矩阵输入 MOCADI 进行粒子跟踪模拟。粒子跟踪结果显示, 在满足一阶等时性条件下 SRing 的质量分辨能力 $R = 1.6 \times 10^4$, 在等时性二阶项校正后 SRing 的质量分辨能力 $R = 2.7 \times 10^5$, 在等时性三阶项校正后 SRing 的质量分辨能力 $R = 1.2 \times 10^6$, 达到 SRing 质量分辨能力的设计要求。这样 SRing 的质量分辨能力已经超越 CSRe^[7, 20], 并和日本理化学研究所的储存环 Rare-RI Ring 及德国重离子研究中心的储存环 CR 的设计分辨能力在同一水平上^[10, 21]。为进一步地提升 SRing 的质量分辨能力, 可以考虑安装更高阶的磁铁, 比如十极铁和十二极铁。在中国科学院近代物理研究所的现有装置 CSRe 上, 我们初步测试了六极磁铁对 CSRe 的等时性二阶项校正的效果, 使用八极磁铁进行等时性三阶项校正也在进一步规划中, 为 SRing 的成功设计和建造积累经验。

等时性质量谱仪的质量分辨能力受到诸多因素的影响, 比如 TOF 探测器的时间分辨性能、储存环磁铁电源的稳定性、磁铁高阶场分量及磁铁的边缘场效应等。本文从加速器物理设计层面, 通过调整储存环的高阶束流光学设计, 来提高 SRing 等时性质量谱仪的质量分辨能力。此工作为 SRing 高精度等时性质谱仪的设计奠定了重要的理论基础。

参考文献:

- [1] YANG J C, XIA J W, XIAO G Q, *et al.* *Nucl Instr Meth B*, 2013, **317**: 263.
- [2] MA X, WEN W Q, ZHANG S F, *et al.* *Nucl Instr Meth B*, 2017, **408**: 169.
- [3] RADON T, KERSCHER T, SCHLITT B, *et al.* *Phys Rev Lett*, 1997, **78**(25): 4701.
- [4] LITVINOV Y A, GEISSEL H, RADON T, *et al.* *Nucl Phys A*, 2005, **756**(1-2): 3.
- [5] FRANZKE B, BECKERT K, EICKHOFF H, *et al.* *Phys Scri*, 1995, **T59**(1995): 176.
- [6] HAUSMANN M, ATTALLAH F, BECKERT K, *et al.* *Nucl Instr Meth A*, 2000, **446**(3): 569.
- [7] XU X, ZHANG P, SHUAI P, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2016, **117**(18): 182503.
- [8] WU B, YANG J C, XIA J W, *et al.* *Nucl Instr Meth A*, 2018, **881**: 27.
- [9] XIA J W, ZHAN W L, WEI B W, *et al.* *Nucl Instr Meth A*, 2002, **488**(1): 11.
- [10] LITVINOV S, TOPREK D, WEICK H, *et al.* *Nucl Instr Meth A*, 2013, **724**: 20.
- [11] DOLINSKII A, LITVINOV S, STECK M, *et al.* *Nucl Instr Meth A*, 2007, **574**: 207.
- [12] DOLINSKII A, GEISSEL H, LITVINOV S, *et al.* *Nucl Instr Meth B*, 2008, **266**: 4579.
- [13] GROTE H, SCHMIDT F. *Pac 2003. Proceedings of the. IEEE*, 2003: 3497.
- [14] GEISSEL H, LITVINOV YU A. *J Phys G*, 2005, **31**, S1779.
- [15] SUN B, KNOBEL R, LITVINOV YU A, *et al.* *Nucl Phys A*, 2008, **812**(1): 1.
- [16] BERZ M, HOFFMANN H C, WOLLNIK H. *Nucl Instr Meth A*, 1987, **258**(3): 402.
- [17] WOLLNIK H, HARTMANN B, BERZ M. *AIP*, 1988, **77**: 74.
- [18] IWASA N, GEISSEL H, MÜNZENBERG G, *et al.* *Nucl Instr Meth*, 1997, **126**(1-4): 284.
- [19] IWASA N, WEICK H, GEISSEL H. *Nucl Instr Meth B*, 2011, **269**(8): 752.
- [20] ZENG Q, WANG M, ZHOU X H, *et al.* *Phys Rev C*, 2017, **96**(3): 031303.
- [21] ABE Y, YAMAGUCHI Y, WAKASUGI M, *et al.* *Phys Scripta*, 2015, **T166**: 014047.

Ion Optics Design of the Isochronous Modes for the HIAF/SRing

WU Bo^{1,2}, YANG Jiancheng^{1,†}, GE Wenwen^{1,2}, XIA Jiawen¹, SHEN Guodong¹, YAN Xinliang¹

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

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

Abstract: The Spectrometer Ring, as the most important experiment terminal of the High Intensity heavy-ion Accelerator Facility (HIAF) project, is a key device to obtain high-quality radioactive ion beams (RIBs) for atomic physics, nuclear physics experiments and accelerator technology researches. Three operation modes including the isochronous mode, the normal mode and the internal target mode, have been designed for the SRing. In the isochronous mode, the SRing operates under a special ion optics and could be used for precision mass measurement of short-lived nuclei with half-life shorter than several tens of microseconds. This study aims to design the ion optics for the isochronous mode and improve the mass resolving power of the SRing with higher-order ion-optical correction scheme for isochronism while preserve a large momentum acceptance of SRing. The ion optics and the higher-order correction for the isochronous mode are calculated with the code MAD-X and GICOSY respectively. Three ion optics with $\gamma_t = 1.43, 1.67, 1.83$ settings have been calculated. The code MCOADI which utilizes the matrixes generated by the code GICOSY is used for particles tracking to verify the correction results. For the ion-optical setting of $\gamma_t = 1.43$ with a momentum acceptance of $\pm 0.20\%$, the mass resolving power of the SRing could be improved from $R = 1.6 \times 10^4$ to $R = 1.2 \times 10^6$, after isochronous higher-order corrections.

Key words: SRing; isochronous mode; ion optics design; higher-order correction; nuclear mass measurement

Received date: 20 May 2018; **Revised date:** 25 Apr. 2018

Foundation item: Youth Funds of National Natural Science Foundation of China (11705253, 11605248)

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