

文章编号: 1007-4627(2018)02-0147-07

储存环 HIAF-SRing 等时性模式的非线性磁场影响研究

葛文文^{1,2}, 原有进^{1,†}, 杨建成¹, 吴波^{1,2}, 李钟汕¹, 陈瑞九¹, 颜鑫亮¹, 杜衡¹, 李小妮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(Spectrometer Ring) 是强流重离子加速器装置(HIAF)的重要组成部分, 其等时性模式为远离 β 稳定线的短寿命原子核质量和寿命的精确测量提供国际领先的科研条件。为了扩大短寿命原子核质量测量精度和范围, SRing 等时性模式设计了两种光学: $\gamma_t = 1.43$ 和 1.67。质量分辨是衡量等时性储存环的最重要参数。二极磁铁的高阶场以及磁铁的边缘场能强烈地引起束流光学高阶畸变, 对质量分辨产生影响, 因此需要高阶磁铁对其进行校正。介绍了 SRing 等时性模式的线性计算, 对非线性磁场的影响进行了详细研究。应用六极磁铁和八极磁铁对非线性场和发射度的影响进行了校正后, 离子的循环时间标准偏差 $\sigma(T)/T$ 达到 3.5×10^{-7} , 质量分辨 $\Delta m/m$ 达到 1×10^6 。

关键词: 等时性质量谱仪; HIAF-SRing; 非线性场; 等时性校正

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.35.02.147

1 引言

质量是原子核最基本的属性, 直接反映了原子核内部核子之间强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用之间相互平衡的结果, 在原子核质量模型检验、原子核结构演化和天体核物理等众多领域具有重要应用^[1, 2]。科学家在 20 世纪发展了各种直接和间接的原子核质量测量方法, 已经比较精确地测量了稳定核及靠近稳定线核素的质量^[3]。随后, 质量测量对象由稳定线附近的原子核延伸到远离 β 稳定线的短寿命原子核。截止到 2017 年, 研究人员共发现了 3200 多个核素, 其中已测质量的原子核 2469 个^[4]。然而, 对于很多质量已知的原子核, 仍然存在较大的实验误差, 针对各种重要的物理问题, 需要进一步提高质量精度。对于远离 β 稳定线原子核质量的精确测量, 成为研究研究原子核结构的演化和原子核的存在极限等现象的必要手段, 也为更加详细地研究大量微观过程、基本相互作用的机制和原子核质量模型的检验提供了新的途径。更由于远离 β 稳定线的原子核寿命短和产额低的特性, 其质量和寿命的精确测量成为核物理领域的重要研究课题之一。

储存环质量谱仪为精确测量短寿命原子核的质量和寿命提供了有效的方法^[5, 6]。其测量原理如公式(1)所示^[7]:

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

其中: γ 是洛伦兹因子; γ_t 是储存环的转变能(transition energy)。转变能的定义是: $\gamma_t = 1/\sqrt{\alpha_p}$, α_p 是动量压缩因子。 T , m/q 和 v 分别是参考离子在储存环中飞行的循环周期、质荷比和速度。

如果能使公式(1)右边第二项的影响减小, 则不同循环离子之间相对谱线距离在一阶近似的情况下, 公式(1)可表示为

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{\gamma_t^2} \frac{\Delta(m/q)}{m/q}, \quad (2)$$

而相对谱线宽度则可表示为

$$\frac{\sigma(T)}{T} = \left(\frac{\gamma^2}{\gamma_t^2} - 1 \right) \frac{\sigma(v)}{v}. \quad (3)$$

精确确定离子的 m/q 取决于如何很好地知道参考原子核的 m/q 以及如何精确测量循环时间信号的中心。识别离子循环时间信号的能力取决于其宽度 $\sigma(T)$ 。如果它们的平均循环时间间隔 ΔT 大于离子的全部时间宽度 $\sigma(T)$, 则可以将不同 m/q 的离子在循环时间谱上分开, 即必须使得 $\Delta T > \sigma(T)$:

$$\left| \frac{1}{\gamma_t^2} \frac{\Delta(m/q)}{m/q} \right| > \left| \left(\frac{\gamma^2}{\gamma_t^2} - 1 \right) \frac{\sigma(v)}{v} \right|, \quad (4)$$

收稿日期: 2018-03-19; 修改日期: 2018-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11705253)

作者简介: 葛文文(1987-), 男, 甘肃庆阳人, 博士研究生, 从事加速器物理研究; E-mail: gewenwen12@impcas.ac.cn

† 通信作者: 原有进, E-mail: yuanyj@impcas.ac.cn.

定义储存环的质荷比分辨本领 R (Resolving Power) 为^[8]

$$R(\text{FWHM}) = \frac{1}{2.355} \left| \frac{m/q}{\Delta(m/q)} \right|, \quad (5)$$

则其相应的分辨率为

$$R(\text{FWHM})^{-1} = 2.355 \left| \gamma_t^2 \frac{\sigma(T)}{T} \right|. \quad (6)$$

从公式 (1), (5) 和 (6) 可知, 为了提升储存环中循环离子质量分辨能力, 需要精确测量其循环周期 T , 并尽量减小公式 (1) 右边第二项的影响。由碎裂反应产生的次级束流在储存环中循环时仍然存在量级约为 1% 的动量分散, 因此公式 (1) 中右边的第二项不可忽略。有两种途径可以减小它的影响, 由此发展出两种储存环质量谱仪的方法^[9]。第一种方法是等时性质量谱仪 (Isochronous Mass Spectrometry), 使得滑相因子 η ($\eta = 1/\gamma^2 - 1/\gamma_t^2$) 尽量减小。通过调节储存环的光学设置, 使得具有特定 m/q 的目标离子满足“等时性条件”, 即 $\gamma = \gamma_t$, 此时目标离子满足“ $\eta = 0$ ”。速度大的离子飞行轨道长, 速度小的离子飞行轨道短, 不同速度的离子在储存环中的循环时间相等。IMS 的优点是不需要冷却束流。测量时间就是离子在储存环中的飞行时间, 因此非常适合于短寿命核素 (~ 几十微秒) 的质量和寿命测量。缺点是只有目标离子的分辨本领非常高, 一般等时性区间内的原子核的质量分辨本领 $\Delta m/m$ 约为 $10^5 \sim 10^6$ 量级。应用这种方法在 GSI 的 ESR 和中国科学院近代物理研究所 (IMP) 的 HIRFL-CSR_e 进行了大量的质量测量实验^[10-13]。另一种方法是肖特基

质量谱仪 (Schottky Mass Spectrometry), 使得速度分散 $\Delta v/v$ 尽量减小。循环离子与电子冷却装置发射的电子束通过库仑相互作用达到热平衡状态, 最终循环离子的速度趋于一个恒定值。一般能把离子的速度分散 $\Delta v/v$ 减小到 10^{-7} 量级。这种谱仪的优点是测量原子核的质量分辨本领 $\Delta m/m$ 约为 $10^6 \sim 10^7$ 量级, 比等时性质量谱仪的分辨本领高。缺点是电子冷却的过程一般需要几秒的时间, 因此不能用来测量寿命非常短的原子核质量和寿命。此种方法目前仅被应用在 GSI 的 ESR^[14-16]。

目前世界上正在运行的和计划的储存环质量谱仪如表 1 所列^[17-23], 表中列出了不同储存环的测量方法、质量分辨本领、测量精度和测量所需时间。为了进一步扩大短寿命原子核质量测量精度和范围, 高精度环形谱仪 SRing (Spectrometer Ring) 作为新一代的储存环质量谱仪将为鉴别新核素、研究弱束缚核结构和反应机制、特别是远离 β 稳定线的短寿命原子核质量和寿命的精确测量提供国际领先的科研条件。SRing 是强流重离子加速器装置 HIAF (High Intensity heavy-ion Accelerator Facility) 的核心设施之一。HIAF 是一台具有国际领先水平的强流重离子加速器装置, 通过增强器 BRing (Booster Ring) 可提供国际上峰值流强最高的低能重离子束流、最高能量达 4.25 GeV/u 的脉冲重离子束流。加速后的束流通过放射性束流线 HFRS (HIAF-Fragment Separator) 产生极端远离 β 稳定线的高电荷态原子核, 并将高品质放射性次级束流用于 SRing 以及各个试验终端。

表 1 目前世界上正在运行的和计划 (* 标记) 的储存环质量谱仪

设备	测量方法	质量分辨 $R(\text{FWHM})$	精度/keV	测量时间
GSI-ESR	SMS	$\sim 1 \times 10^6$	~ 30	~ 5 s
GSI-ESR	IMS	$\sim 2 \times 10^5$	$\sim (10 \sim 500)$	~ 10 μ s
HIRFL-CSR _e	IMS	$\sim 2 \times 10^5$	$\sim (10 \sim 500)$	~ 100 μ s
FAIR-CR*	IMS	$\sim 2 \times 10^6$		
HIAF-SRing*	SMS	$\sim 1 \times 10^7$		
HIAF-SRing*	IMS	$\sim 1 \times 10^6$		

IMS 和 SMS 方法都将应用于 SRing 进行短寿命原子核的质量和寿命的精确测量。运行等时性模式时, 调节 SRing 的光学设置使得确定质荷比 m/q 的目标离子满足等时性条件, 即“ $\gamma = \gamma_t$ ”。对于 SRing, IMS 方法的目标是质量分辨 $R(\text{FWHM})$ 高于 1×10^6 , 这就使得目标离子在设置“ $\gamma_t = 1.43$ ”下的时间分辨达

到 $\sigma(T)/T \sim 4.9 \times 10^{-7}$, 在设置“ $\gamma_t = 1.67$ ”下的时间分辨达到 $\sigma(T)/T \sim 3.6 \times 10^{-7}$ 。与 HIRFL-CSR_e 相比较, SRing 具有更大的接收度和更强的质量分辨能力。与其他储存环质量谱仪相比较, SRing 可以精确测量极端远离 β 稳定线原子核的质量和寿命, 特别是丰中子原子核。

2 SRing 等时性模式的线性光学设计

高精度环形谱仪 SRing 的等时性模式主要用于精确测量短寿命原子核的质量和寿命。SRing 是由两个长直线节和两个弧区组成的跑道形对称结构，总长度

为 273.5 m。等时性模式下设计的磁刚度范围是 8~13 Tm。如图 1 所示，它由 20 块二极磁铁和 44 块四极磁铁组成线性光学。20 块六极磁铁安和 24 组八极线圈用于高阶光学校正。电子冷却装置和两台飞行时间 TOF (Time of Flight) 探测器安装在 SRing 的直线段。

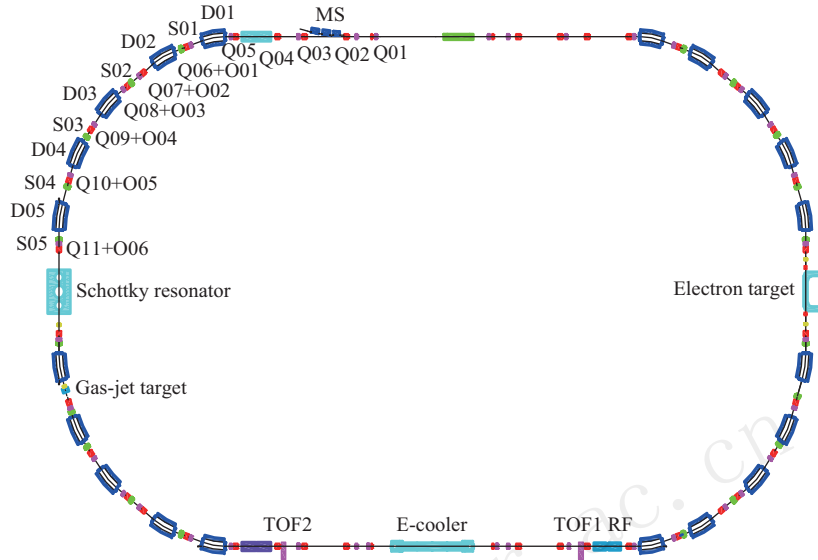


图 1 (在线彩图) SRing 总体布局图

蓝色、红色和绿色方块分别表示二极磁铁 (D)、四极磁铁和八极磁铁线圈 (Q+O) 和六极磁铁 (S)；TOF 探测器和电子冷却装置安装在同一段直线节。

SRing 等时性模式设计了两种光学： $\gamma_t = 1.43$ 和 1.67。它们的主要参数如表 2 所列。它们应用相同的注入条件，其 β 函数和色散函数如图 2 所示。由于两个 TOF 探测器需要安装在束流包络比较小的长直线段区域，这样可以保证 TOF 探测器 C 膜的孔径 $\phi < 100$ mm，且有较大的传输效率。SRing 等时性模式可以测量的离子荷质比范围如表 3 所列，覆盖了大部分质量未知的短寿命原子核。其中， $\gamma_t = 1.43$ 主要测量丰中子区域的核素， $\gamma_t = 1.67$ 则针对大多数丰质子的核素。

表 2 SRing 等时性模式的主要参数

参数	数值
传输能量 γ_t	1.43, 1.67
工作点 Q_x/Q_y	2.23/5.21, 2.23/5.21
自然色品 ξ_x/ξ_y	-7.26/-1.96, -3.59/-3.38
横向接受度 ϵ_x/ϵ_y	80/40, 80/40
$(\Delta p/p = 0)(\pi\text{mm} \cdot \text{mrad})$	
动量接受度 $\Delta p/p$	$\pm 0.2\%, \pm 0.28\%$
$(\epsilon_x/\epsilon_y = 40 \pi\text{mm} \cdot \text{mrad})$	

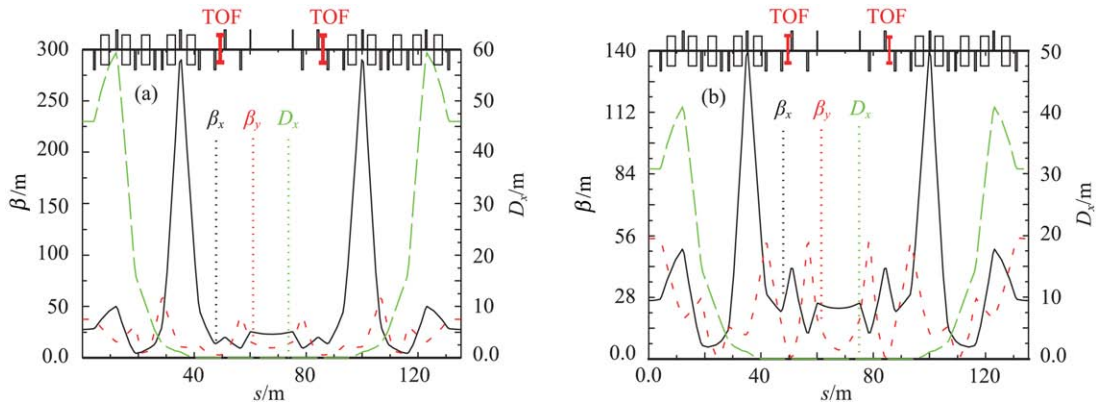


图 2 (在线彩图) SRing 等时性模式的 β 函数和色散函数

(a) 和 (b) 分别表示 $\gamma_t = 1.43$ 和 1.67 的光学设置； β_x 、 β_y 和 D_x 函数分别用黑色实线、红色点线和绿色虚线表示。

表 3 SRing 不同等时性模式测量的离子荷质比范围

γ_t	m/q
1.43	2.52 ~ 4.09
1.67	1.93 ~ 3.13

3 非线性磁场对 SRing 等时性模式的影响

在等时性模式下, 作为影响时间分辨的主要因素, 非线性磁场的影响是研究储存环等时性模式的重要组成部分^[24-27]。非线性磁场的影响因素主要来自二极磁铁的高阶场和磁铁的边缘场, 其严重影响了束流的非线性动力学, 使得动量分散比较大的离子轨道发生畸变, 飞行路径和中心轨道发生很大差异, 进而降低了时间分辨。这种影响可以通过在色散区域的安装高阶磁铁来校正。

对于非线性磁场的影响, 我们主要讨论 $\gamma_t = 1.67$ 设置下二极磁铁的高阶场和磁铁的边缘场对 γ_t 和 $(T - T_{\text{reference}})/T_{\text{reference}}$ 造成的影响, 及如何应用高阶磁铁来校正这些非线性磁场的影响。所有的计算是在 $\epsilon_x/\epsilon_y = 40 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 设置下进行的。磁铁的非线性场的引入会导致 SRing 的自然色品和等时性会发生变化, 因此需要重新计算四极磁铁的设置来调整 SRing 的等时性条件和色品。针对不同的非线性磁场对时间分辨的影响, 我们进行了一系列的数值计算。其中 γ_{t0} 和 $T_{\text{reference}}$ 分别表示在动量分散 $\Delta p/p = 0$ 时, SRing 的理论值。

二极磁铁产生的磁场可以用多极系数 (b_n) 来表示^[28]:

$$\frac{\Delta B}{B_0} = \sum b_n \left(\frac{x}{\rho} \right)^n, \quad (7)$$

其中: ρ 是二极磁铁弯曲半径; x 是偏离参考轨道的距离。在计算过程中, 二极磁铁设置 $B_0 = 1.382707 \text{ T}$, 二极磁铁归一化系数 $b_1 = 1.0 \times 10^{-4}$, $b_2 = 1.0 \times 10^{-4}$, $b_3 = 2.0 \times 10^{-4}$, $b_4 = 2.0 \times 10^{-4}$, $b_5 = 2.0 \times 10^{-4}$ 。

图 3 展示了在二极磁铁高阶场的影响下, 转变能 γ_t 和循环时间相对变化 $(T - T_{\text{reference}})/T_{\text{reference}}$ 随动量分散的变化。比较曲线 1 和 2 可以看出, SRing 二极磁铁的高阶分量对 $(T - T_{\text{reference}})/T_{\text{reference}}$ 有严重影响, 等时性条件在动量接受度之内并不完全满足, 因此必须对其进行校正。

二极磁铁产生的六极磁场 (b_2) 和八极磁场 (b_3) 影响可以通过相应的六极磁铁和八极磁铁获得完全的补偿。如曲线 3 所示, 在动量分散为 $\pm 0.2\%$ 范围内, 通过色

散区的一组六极磁铁和一组八极磁铁校正之后, $(\gamma_t - \gamma_{t0})/\gamma_{t0}$ 减小为 9.0×10^{-4} , $(T - T_{\text{reference}})/T_{\text{reference}}$ 减小为 4.5×10^{-7} 。为了进一步提高 SRing 的质量分辨能力, 可以在色散区域引入十二极磁铁来补偿 b_4 带来的影响。

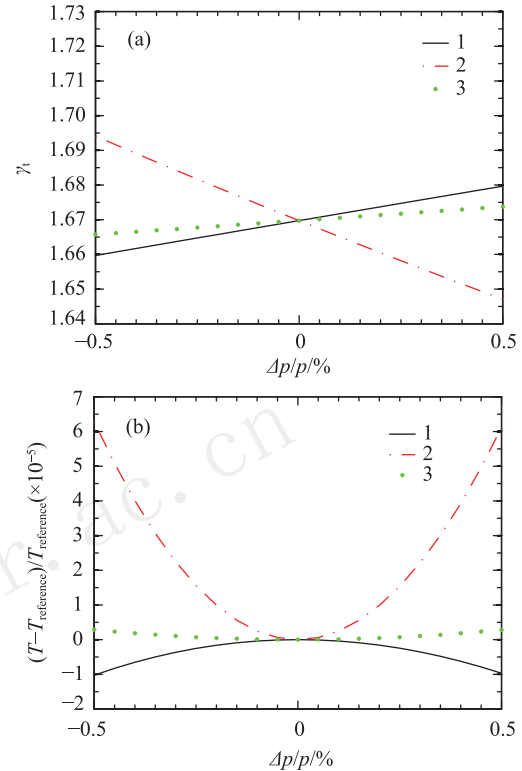


图 3 (在线彩图) 在二极磁铁高阶场影响下, SRing 转变能 γ_t (a) 和循环时间相对变化 $(T - T_{\text{reference}})/T_{\text{reference}}$ (b) 随动量分散的变化曲线

曲线 1: 线性计算; 曲线 2: 只存在二极磁铁高阶场的影响; 曲线 3: 应用一组六极磁铁和一组八极磁铁线圈校正二极磁铁高阶场的影响

磁铁边缘场为垂直方向提供了额外的一阶聚焦, 垂直方向聚焦的改变导致 y 方向的工作点和色品发生相应的变化。磁铁的边缘场可以改变动量分散较大离子的飞行轨道, 进而影响其在储存环内的循环时间。对磁铁边缘场的分析基于 GICOSY 代码^[29, 30]。

如图 4 所示, 在动量分散为 $\pm 0.2\%$ 范围内, 二极磁铁边缘场对 γ_t 和 T 的影响量级分别为线性计算的 10^{-7} 和 10^{-8} 倍, 而四极磁铁边缘场对 γ_t 和 T 的影响量级分别达到线性计算的为 10^{-3} 和 1 倍。二极磁铁边缘场对循环时间的影响远远小于四极磁铁, 但仍然值得注意并且予以考虑。与二极磁铁的高阶场可以用相应的高极磁铁补偿相反, 四极磁铁边缘场的影响很难得到补偿。

比较图 3 和图 4 的 (b) 可以看到, 二极磁铁的高阶场和磁铁的边缘场都对循环时间有着重要影响。在离子

动量分散为正时, 两者的影响是相反的, 但是当在离子动量分散为负时, 两者的影响是相同的。

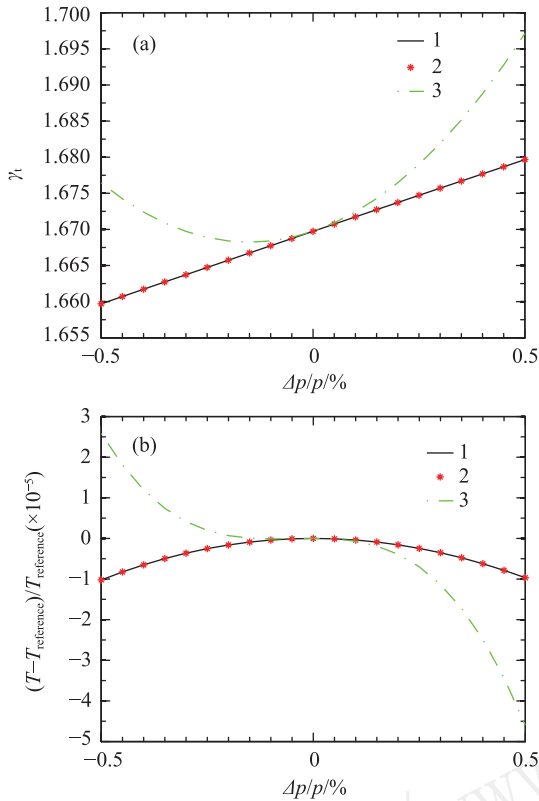


图 4 (在线彩图) 在磁铁边缘场影响下, SRing 转变能 γ_t (a) 和循环时间相对变化 $(T - T_{\text{reference}})/T_{\text{reference}}$ (b) 随动量分散的变化曲线
曲线 1: 线性计算; 曲线 2: 只存在二极磁铁边缘场的影响; 曲线 3: 只存在四极磁铁边缘场的影响

4 非线性磁场影响的校正

非线性磁场对时间分辨产生的影响促使我们必须使用高阶磁铁对 SRing 等时性模式进行校正。这也对磁铁的实际设计将提出更高要求, 需要尽量减小磁铁的缺陷。六极磁铁和八极磁铁的应用意味着纵向和横向运动的耦合对高阶的时间分辨本领产生了影响。在校正计算中, 应用了设置在色散区域的三组六极磁铁和一组八极磁铁线圈来校正这些影响^[31]。分析图 5 中曲线 3 可以得到, 通过高阶磁铁校正, 在动量分散为 $\pm 0.2\%$ 范围内, $(\gamma_t - \gamma_{t0})/\gamma_{t0}$ 达到 9.82×10^{-4} , 循环时间相对变化 $(T - T_{\text{reference}})/T_{\text{reference}}$ 达到 4.6×10^{-7} 。

考虑到所有非线性磁场的影响, 目标离子的循环时间标准偏差 $\sigma(T)/T$ 和循环圈数的关系如图 6 所示。只用一组六极磁铁和一组八极磁铁线圈校正二阶和三阶等时性如曲线 1 所示。在此基础上, 增加两组六极磁铁校正发射度的影响如曲线 2 所示。再次增加两组八极磁铁

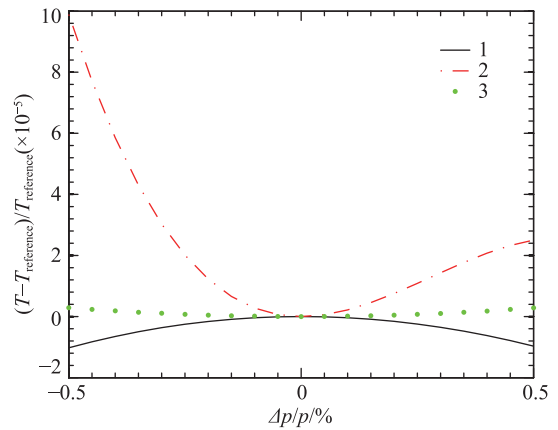


图 5 (在线彩图) 在非线性磁场情况下, SRing 循环时间相对变化 $(T - T_{\text{reference}})/T_{\text{reference}}$ 随动量分散的变化图
曲线 1: 线性计算; 曲线 2: 综合考虑二极磁铁高阶场和磁铁边缘场分布; 曲线 3: 应用三组六极磁铁和一组八极磁铁校正非线性磁场。

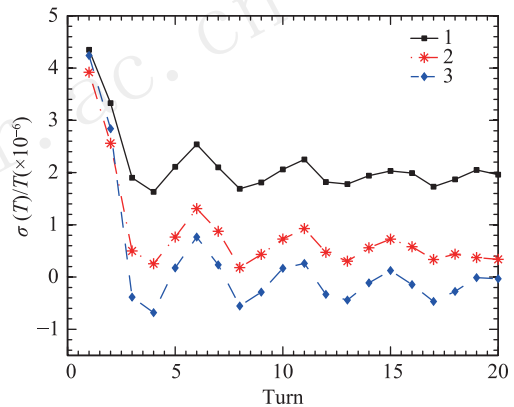


图 6 (在线彩图) 在非线性磁场情况下, SRing 的循环时间标准偏差 $\sigma(T)/T$ 随循环圈数的变化关系
曲线 1: 一组六极磁铁和一组八极磁铁校正二阶和三阶等时性; 曲线 2: 3 组六极磁铁和一组八极磁铁分别校正二、三阶等时性和发射度对时间分辨的影响; 曲线 3: 3 组六极磁铁和 3 组八极磁铁分别校正二、三阶等时性、发射度对时间分辨的影响和其他三阶光学偏差。

校正其他三阶光学偏差如曲线 3 所示。曲线 1 和 2 之间的间距是发射度对时间分辨产生的影响, 通过另外两组六极磁铁校正后, 循环时间标准偏差 $\sigma(T)/T$ 从 2×10^{-6} 变为 3.5×10^{-7} , 提升约一个量级, 质量分辨 $\Delta m/m$ 达到 1×10^6 。曲线 2 和 3 之间的间距是校正二、三阶等时性和发射度的影响之后, 其他三阶光学偏差对时间分辨产生的影响, 通过两组八极磁铁线圈校正后, 循环时间标准偏差 $\sigma(T)/T$ 从 3.5×10^{-7} 变为 1×10^{-7} , 质量分辨 $\Delta m/m$ 达到 3.5×10^6 。如 3 条曲线所示, 目标离子的循环时间标准偏差 $\sigma(T)/T$ 随着束流循环圈数的增加而振荡, 多圈循环后趋于一个稳定值。比较曲线 2 和 3 可知, 随着八极磁铁校正线圈的增加, 八极磁铁对目标离

子的循环时间标准偏差 $\sigma(T)/T$ 的影响会降低, 也会趋于一个稳定值。

5 结论

高精度环形谱仪 SRing 的等时性模式是用于精确测量远离 β 稳定线短寿命原子核的质量和寿命。在等时性模式下, 二极磁铁高阶场以及磁铁的边缘场能强烈地引起高阶光学畸变, 对飞行离子的循环时间产生严重影响。在 $\gamma_t = 1.67$ 的设置下, 应用三组六极磁铁和一组八极磁铁对非线性磁场产生的影响进行了校正, 在动量分散为 $\pm 0.2\%$ 范围内, 循环时间相对变化 $(T - T_{\text{reference}})/T_{\text{reference}}$ 达到 4.6×10^{-7} 。循环离子的时间标准偏差 $\sigma(T)/T$ 随着循环圈数的变化而振荡, 循环几圈后趋于一个稳定值。应用三组六极磁铁和一组八极磁铁校正二、三阶等时性和发射度的影响后, 循环时间标准偏差 $\sigma(T)/T$ 达到 3.5×10^{-7} , 质量分辨达到 1×10^6 。鉴于对等时性的高要求, 以及其他非线性因素对加速器的影响, SRing 可以考虑加入更高阶的磁场校正。

参考文献:

- [1] LUNNEY D, PEARSON J M, THIBAUT C, *et al.* *Review of Modern Physics*, 2003, **75**(3): 1021.
- [2] SCHEIDENBERGER C. *Nuclear Physics*, 2005, **751**(1): 209.
- [3] MYERS E G. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2013, **349-350**(5): 107.
- [4] WANG M, AUDI G, KONDEV F G, *et al.* *Chinese Phys. C*, 2017, **41**: 030003.
- [5] LITVINOV Yu A, GEISSEL H, KNÖBEL R, *et al.* *Acta Physica Polonica B*, 2010, **41**(2): 511.
- [6] BOSCH F, LITVINOV YU A, STÖHLKER T, *et al.* *Prog Part Nucl Phys*, 2013, **73**(6): 84.
- [7] WOLLNIK H. *Nucl Instr and Meth A*, 1987, **258**(3): 289.
- [8] BLAUM K. *Physics Reports*, 2006, **425**(1): 1.
- [9] FRANZKE B, GEISSEL H, MÜNZENBERG G. *Mass Spectrometry Reviews*, 2008, **27**: 428.
- [10] GEISSEL H, LITVINOV Yu A, ATTALLAH F, *et al.* *Nuclear Physics A*, 2004, **746**(40): 150.
- [11] ZHANG Y H, XU H S, LITVINOV YU A, *et al.* *Physical Review Letters*, 2012, **109**(10): 102501.
- [12] YAN X L, XU H S, LITVINOV YU A, *et al.* *Astrophysical Journal*, 2013, **766**(1): L8.
- [13] XU H S, ZHANG Y H, LITVINOV YU A. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2013, **349-350**(1): 162.
- [14] STECK M, BELLER P, BECKERT K, *et al.* *Nucl Instr Meth. A*, 2004, **532**: 357.
- [15] NOLDEN F, BECKERT K, BELLER P, *et al.* *Nucl Instr Meth. A*, 2004, **532**: 329.
- [16] LITVINOV Yu A, GEISSEL H, NOVIKOV Y N, *et al.* *Nuclear Physics A*, 2003, **734**(11): 473.
- [17] HAUSMANN M, ATTALLAH F, BECKERT K, *et al.* *Nucl Instr Meth. A*, 2015, **446**(3): 569.
- [18] LITVINOV Yu A, GEISSEL H, RADON T, *et al.* *Nuclear Physics*, 2005, **756**(1): 3.
- [19] LITVINOV S, TOPREK D, WEICK H, *et al.* *Nucl Instr Meth. A*, 2013, **724**(10): 20.
- [20] XU H S, ZHANG Y H, LITVINOV Yu A. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2013, **349-350**: 162.
- [21] KNÖBEL R, DIWISCH M, GEISSEL H, *et al.* *European Physical Journal A*, 2016, **52**(5): 1.
- [22] XU X, ZHANG P, SHUAI P, *et al.* *Physical Review Letters*, 2016, **117**(18): 182503.
- [23] WU B, YANG J C, XIA J W, *et al.* *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A*, 2017, **881**: 27.
- [24] LITVINOV S, DOLINSKII A, WEICK H, *et al.* Proceedings of EPAC2006, 2006.
- [25] DOLINSKII A, GEISSEL H, LITVINOV S, *et al.* *Nucl Instr Meth B*, 2008, **266**(19-20): 4579.
- [26] LITVINOV S, DIMOPOULOU C, DOLINSKII A, *et al.* RUPAC2012, TUPPB037, 2012: 400.
- [27] LITVINOV S, DOLINSKII A, GORDA O, *et al.* Proceedings of Ipac, 2015, **64**(7): 153.
- [28] WOLLNIK H, HARTMANN B, BERZ M, *et al.* *American Institute of Physics*, 1988, **177**(1): 74.
- [29] BERZ M, HOFFMANN H C, WOLLNIK H. *Nucl Instr Meth A*, 1987, **258**(3): 364.
- [30] HARTMANN B, BERZ M, WOLLNIK H. *Nucl Instr Meth A*, 1991, **297**(3): 343.
- [31] LITVINOV S, TOPREK D, WEICK H, *et al.* *Nucl Instr Meth A*, 2013, **724**(10): 20.

Effects of Field Imperfections in the Isochronous Mode of the HIAF-SRing

GE Wenwen^{1,2}, YUAN Youjin^{1,†}, YANG Jiancheng¹, WU Bo^{1,2}, LI Zhongshan¹, CHEN Ruijiu¹,
YAN Xinliang¹, DU Heng¹, LI Xiaoni¹

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

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

Abstract: The isochronous mode of the Spectrometer Ring at the High Intensity heavy-ion Accelerator Facility (HIAF) project in China offers the capacity of measuring the mass and half-life of short-lived nuclides. The transition energy settings of the SRing are 1.43 and 1.67, which have been calculated in the same injection scheme. The resolution of mass or revolution time is the most important parameter of the isochronous mode design of a storage ring. The nonlinear magnetic field errors, including high-order magnet field of dipole, fringe field of magnets, have strongly effect to the resolution of revolution time. High-order corrections are required to improve the resolution of revolution time and mass. In this paper, the SRing linear isochronous optical were shown. The influence of nonlinear magnetic field errors on the revolution time resolving power were investigated. With 3 sextupole families and 1 octupole family corrections, the relative variation of revolution time reaches 4.6×10^{-7} with the momentum spread of $\pm 0.2\%$. The relation of the relative standard revolution time deviation $\sigma(T)/T$ and revolution turns was researched. With corrections of high-order isochronous condition and emittance influence by 3 sextupole families and 1 octupole family, one can reach a resolution of up to $\sigma(T)/T = 3.5 \times 10^{-7}$, which corresponds to the mass resolution of $\Delta m/m = 1 \times 10^6$.

Key words: isochronous mass spectrometry; HIAF-SRing; nonlinear field; isochronous correction

Received date: 19 Mar. 2018; **Revised date:** 22 May 2018

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11705253)

† **Corresponding author:** YUAN Youjin, E-mail: yuanyj@impcas.ac.cn.