

# CSRm 闭轨畸变及其校正的模拟研究

刘胜利 张文志 夏佳文 魏宝文

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 在给定的磁铁安装误差和磁场加工误差的条件下,对兰州重离子加速器冷却储存环主环的闭轨畸变及其校正进行了计算机模拟研究.在典型的误差分布下,校正前的水平方向及垂直方向的最大闭轨畸变分别为 3.08mm 和 2.73mm,校正模拟的结果显示 CSRm 的闭轨畸变可以控制在足够小的范围内.

**关键词** 储存环 闭轨畸变 闭轨校正

## 1 引言

在兰州重离子加速器冷却储存环主环(CSRm)<sup>[1]</sup>的设计研究中,为了对各类误差存在的情况下储存环的束流动力学有更深入的了解,首先需要对闭轨畸变进行计算机模拟.由于各类磁铁在安装时都不可避免地存在校准误差及磁铁加工误差,从而使束流中心轨道发生畸变即闭轨畸变(COD).四极磁铁和六极磁铁的位移误差,二极磁铁的场差及旋转误差,以及磁铁电源的不稳定性均可能在水平和(或)垂直方向产生沿闭轨分布的二极场差,从而导致两个方向的闭轨畸变.这种畸变会造成动力学孔径的缩小,靶段和电子冷却段内束流中心轨道的准直变差.因而必须予以校正.

CSRm 周长 161.2m,由 16 个超周期的 FODO 结构及两个分别用于电子冷却装置和内靶的长直线节组成. CSRm 在线性磁聚焦结构下的横向振荡波数分别为:  $Q_x = 3.63$ ,  $Q_y = 1.615$ ,按照一个<sup>[2]</sup>较保守的估计,要校正 90% 的闭轨畸变,位置探测器或校正磁铁的数目约为  $4Q + 5$ ,即水平方向为 21 个,垂直方向为 13 个.

## 2 闭轨畸变

当沿束流中心轨道存在二极场差  $\Delta B(s)$  时,单粒子运动方程<sup>[3]</sup>可写为:

$$\frac{d^2y}{ds^2} + K_y(s)y = F(s) = \frac{\Delta B(s)}{B} \frac{1}{\rho(s)}, \quad (1)$$

从而粒子的横向运动可表示为如下矩阵变换:

$$\begin{pmatrix} y(s) \\ y'(s) \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S(s) & C(s) & U(s) \\ S'(s) & C'(s) & U'(s) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y(s_0) \\ y'(s_0) \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中  $y(s)$  为粒子相对于中心轨道的横向位置坐标,  $S(s)$  和  $C(s)$  是当运动方程不存在非齐次项时 ( $F(s) = 0$ ) 的矩阵元,  $U(s)$  是运动方程 (1) 的一个特解. 由方程 (2) 可得到决定闭轨的方程为:

$$(M(s) - I) \cdot \begin{pmatrix} y(s) \\ y'(s) \\ 1 \end{pmatrix} = 0, \quad (3)$$

其中  $M(s)$  是单圈的变换矩阵,  $I$  是单位矩阵. 若不存在二极场差, 即  $\Delta B(s) = 0$ , 则  $F(s) = 0$ ,  $U(s) = 0$ , 由方程 (2) 及 (3) 可知, 闭轨就是中心轨道  $y(s) = 0$ .

表 1 磁场误差和安装误差范围

误差	二极磁铁	四极磁铁	六极磁铁
$\Delta x(\text{mm})$	$\pm 0.15 - \pm 0.2$	$\pm 0.15 - \pm 0.2$	$\pm 0.15 - \pm 0.2$
$\Delta y(\text{mm})$	$\pm 0.13 - \pm 0.15$	$\pm 0.13 - \pm 0.15$	$\pm 0.13 - \pm 0.15$
$\Delta z(\text{mm})$	$\pm 0.2 - \pm 1.1$	$\pm 0.2 - \pm 1.1$	$\pm 0.2 - \pm 1.1$
$\Delta \theta(\text{mrad})$	$\pm 2.9 \times 10^{-2} - \pm 4.9 \times 10^{-2}$	$\pm 2.9 \times 10^{-2} - \pm 4.9 \times 10^{-2}$	$\pm 2.9 \times 10^{-2} - \pm 4.9 \times 10^{-2}$
$\Delta \phi(\text{mrad})$	$\pm 2.9 \times 10^{-2} - \pm 4.9 \times 10^{-2}$	$\pm 2.9 \times 10^{-2} - \pm 4.9 \times 10^{-2}$	$\pm 2.9 \times 10^{-2} - \pm 4.9 \times 10^{-2}$
$\Delta \psi(\text{mrad})$	$\pm 2.9 \times 10^{-2} - \pm 4.9 \times 10^{-2}$	$\pm 2.9 \times 10^{-2} - \pm 4.9 \times 10^{-2}$	$\pm 2.9 \times 10^{-2} - \pm 4.9 \times 10^{-2}$
$\Delta B/B$	$2.0 \times 10^{-5}$		

束流位置监视器读出误差设置为  $\pm 0.25\text{mm}$ .

采用 MAD 程序<sup>[4]</sup>对 CSRm 的闭轨畸变及其校正进行了计算机模拟. 引入的校准误差及场差的根据在于 HIRFL 束流输运线安装的公差标准以及磁铁加工公差, 并考虑了磁铁电源的不稳定性. 表 1 列出了 CSRm 各类磁铁的校准误差及场差. 对各类安装校准误差及场差首先进行随机分布抽样, 然后由方程 (3) 计算闭轨. 对于各类不同误差引起的闭轨畸变进行模拟的结果显示出了四极磁铁的校准误差造成的闭轨畸变最为严重. 原因是: 四极磁铁中有较强的梯度场 ( $\partial B_y / \partial x \neq 0$ ), 它对位置误差很敏感; 其二, 某方向的  $\beta$  函数常在同方向聚焦的四极磁铁中取极大值; 其三, 四极磁铁的数量较多. 对校准误差及场差的分布进行了 10 余次抽样模拟, 在最不利的误差分布下, CSRm 闭轨畸变的最大值  $X_{co}(\text{max}) = 3.08\text{mm}$ ,  $Y_{co}(\text{max}) = 2.73\text{mm}$ , 闭轨分布的均方根

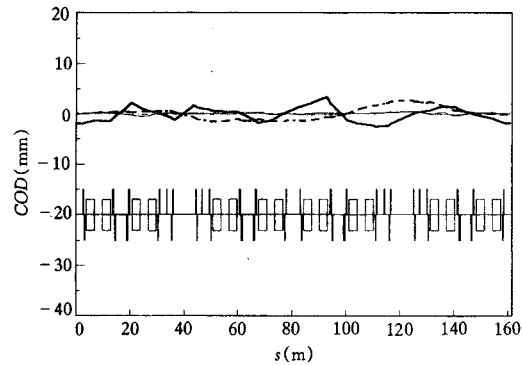


图 1 CSRm 的闭轨分布

— 水平方向, 校正前; ——— 水平方向, 校正后;  
 ···· 垂直方向, 校正前; - · - · 垂直方向, 校正后.

值  $X_{co}(rms) = 1.3mm, Y_{co}(rms) = 1.14mm$ , 闭轨分布见图 1.

### 3 闭轨校正

闭轨畸变在沿环布置的  $m$  个束流位置监视器 (PUs) 处的值可表为矢量  $\mathbf{b}$ :

$$\mathbf{b}^{(m)} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$l$  个轨道校正磁铁的强度  $\delta(BI)$  可用矢量  $\mathbf{x}^{(l)}$  表示:

$$\mathbf{x}^{(l)} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_l \end{pmatrix}, \quad (5)$$

第  $j$  个单位强度的校正磁铁在第  $i$  个 PU 处产生的闭轨修正系数为  $a_{ij}$ :

$$a_{ij} = \frac{\sqrt{\beta_i \beta_j}}{2\sin(\pi\nu)} \cos(|\mu_i - \mu_j| - \nu\pi), \quad (6)$$

其中  $\mu$  为横向振荡相移,  $\nu$  为波数,  $\beta$  为包络函数.  $a_{ij}$  作为元素的矩阵为  $A$ , 校正磁铁在 PUs 处对闭轨的修正为  $A\mathbf{x}^{(l)}$ . 总的闭轨为:

$$\mathbf{r}^{(m)} = \mathbf{b}^{(m)} + A\mathbf{x}^{(l)}. \quad (7)$$

用基于最小二乘法的迭代过程<sup>[5]</sup>使  $\|\mathbf{r}^{(m)}\|^2$  最小, 即达到了闭轨校正的目的.

在 CSRm 闭轨校正的模拟过程中, 在水平方向和垂直方向分别配置了 19 个和 11 个

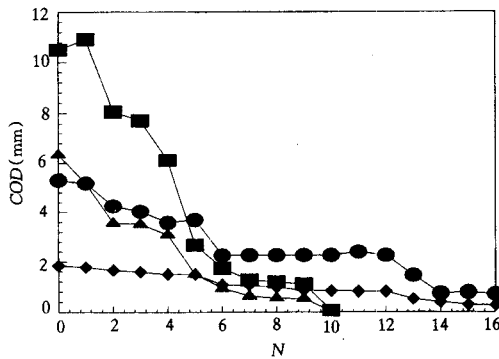


图 2 CSRm 校正磁铁数量与校正效果的关系  
 ● 水平方向, 最大值; ◆ 水平方向, 均方根值;  
 ■ 垂直方向, 最大值; ▲ 垂直方向, 均方根值.

PU. 为了优化校正磁铁的数量, 在上述最不利的误差分布下, 对不同数目的校正磁铁的校正效果进行了模拟 (见图 2), 最佳的校正磁铁数目分别为 16 个和 9 个. 校正后的闭轨分布示于图 1, 水平方向最大值为  $0.56mm$ , 均方根值  $0.20mm$ , 垂直方向最大值为  $0.39mm$ , 均方根值为  $0.14mm$ . 换以其它不同的校准误差及场差分布, 此最佳校正磁铁的校正结果好于上述值.

在模拟过程中, 还观察了安装校准误差和场差的引入对横向振荡波数和一些

插入节 (如 RF 段, 内靶段, 电子冷却段) 的  $\beta$  函数及色散函数的影响, 与大动量色散效应相

比(CSRm 被设计为具有较大的动量接收度), 这些参数变化很小.

## 4 结论

闭轨畸变及其校正的计算机模拟结果显示了在所给的误差标准下, CSRm 的闭轨畸变可以控制在足够小的范围内.

### 参 考 文 献

- [1] Xia J W, Rao Y N, Yuan Y J et al. HIRFL-CSR Plan. In: Sun Guanqing, Li Zhengda. The 6th China-Japan Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications. Chengdu: Institute of Nuclear Science and Technology, 1996. 24—27
- [2] Bryant P J. Design of a Ring Lattice. CERN 91-04. 1991. 251—268
- [3] Liu N Q. The Theory of the Accelerator (in Chinese). Beijing: Nuclear Energy Press, 1990. 235—236  
(刘乃泉. 加速器理论. 北京: 原子能出版社, 1990. 235—236)
- [4] Hans Grote, Christoph Iselin F. The MAD Program User's Reference Manual. CERN/SL 90-13. 1990. 79—82
- [5] Autin B, Marti Y. Closed Orbit Correction of A. G. Machines Using a Small Number of Magnets, CERNISR-MA 73-17. 1973. 1—3

## Simulation Study of the Closed Orbit Distortion and Its Correction for CSRm

Liu Shengli    Zhang Wenzhi    Xia Jiawen    Wei Baowen

(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000)

**Abstract** The closed orbit distortion (COD) and its correction in the presence of field and alignment errors of magnets, for the heavy ion cooling storage ring (named CSRm), have been simulated on the basis of linear lattice of CSRm. In a typical case, the maximum COD before correction is 3.08mm and 2.73mm for horizontal plane and vertical plane, respectively. The simulation shows that the COD of CSRm can be limited with in a sufficiently small range.

**Key words** storage ring, closed orbit distortion, closed orbit correction