

文章编号: 1001-4322(2004)05-0659-04

# 磁铁安装误差对束流轨道的影响\*

刁操政, 王琳, 徐宏亮, 李永军, 张善才, 冯光耀

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

**摘 要:** 采用数值方法系统地分析了 HLS 储存环磁铁安装误差对束流闭轨的影响, 发现造成闭轨畸变的主要原因是四极铁在横向位置的安装误差和二极铁在束流方向的旋转, 并给出了它们的放大因子; 同时对横向发射度的耦合进行了研究, 发现造成垂直方向发射度增加的主要原因是闭轨畸变; 在综合考虑各种误差的情况下, 提出了需要对各种磁铁进行进一步准直的要求。

**关键词:** 安装误差; 闭轨畸变; 放大因子; 耦合

**中图分类号:** TL594 **文献标识码:** A

合肥光源(HLS)储存环周长为 66m, 共 4 个周期, 每周期由 3 块弯铁, 8 块四极铁组成。由于各种原因造成了束流运行轨道与理想轨道存在一定的误差, 闭合轨道的畸变又会引起一些负面效应, 因而影响了光源的水平运行。在这些影响中, 磁铁的安装误差是造成轨道畸变的最主要原因。

本文由理论分析出发, 就 HLS 电子储存环各种磁铁的安装误差进行了讨论, 为磁铁的进一步准直及闭轨校正提供理论依据。

## 1 理论分析

### 1.1 闭轨畸变<sup>[1]</sup>

闭轨畸变方程为

$$u_0^2(s)^{1/2} = \begin{cases} \frac{(s)^{1/2}}{2\sqrt{2}|\sin|} u_{q,rms} \sqrt{(KL_q)^2} \\ \frac{(s)^{1/2}}{2\sqrt{2}|\sin|} [(B/B)_{b,rms} \text{ OR } \phi_{b,rms}] \sqrt{(L_b')^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_0(s)$  为轨道的畸变值,  $(s)$  是观测点的函数值;  $K$  为四极铁强度;  $L_q$  是四极铁长度;  $L_b$  是二极铁长度;  $(s)$  为误差发生处的函数;  $R$  为束流的弯转半径;  $u_{q,rms}$  为四极铁安装误差的均方根(rms)分布,  $\phi_{b,rms}$  为二极铁旋转误差的 rms 分布。

### 1.2 横向发射度耦合<sup>[2]</sup>

磁场误差导致的耦合主要来自两方面: (1) 由于束流的闭轨畸变, 导致  $y$  方向色散的产生, 因此产生了横向耦合; (2) 四极铁在束流方向的旋转误差。

由于闭轨畸变导致的耦合

$$= \frac{J_x H_y}{J_y H_x} \frac{J_x D_y^2 / y}{J_y D_x^2 / x} / \text{bending} \quad (2)$$

式中:  $J_x, J_y$  分别是  $x$  和  $y$  方向的衰减分配数;  $D_x, D_y$  分别是  $x$  和  $y$  方向的色散函数。

由四极铁在束流方向的旋转产生的耦合

$$= \frac{1}{1 + 1/2} \quad (3)$$

式中:  $\int_{ring} k_s(s) \sqrt{x y} \exp\{i[\mu_x(s) - \mu_y(s) - \frac{2s}{C}]\} ds, k_s = 2K, \mu_x, \mu_y = \text{Frac}(x - y)$ , 其中  $x, y$  为环的工作点,  $C$  为环长,  $\mu_x, \mu_y$  是误差发生处的相位,  $K$  为四极铁强度,  $\phi_{b,rms}$  是四极铁在束流方向的旋转误差。

## 2 数值模拟

误差模型的建立: 全环 12 块二极铁、32 块四极铁的安装误差独立分布, 并满足高斯分布。由于随机误差的

\* 收稿日期: 2003-07-03; 修订日期: 2003-09-22  
基金项目: 国家大科学工程“国家同步辐射实验室二期工程”资助课题  
作者简介: 刁操政(1965—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事加速器物理研究; 合肥市 6022 信箱; E-mail: dcz@ustc.edu.cn.

分布离散性很大,为了确保结果的可信度,我们做了 30 次计算,并对此求平均,每次计算的种子数由随机函数产生,这样可确保种子数产生的随机性,计算工具为 MAD 程序<sup>[3]</sup>。

我们对 10 次,20 次以及 30 次模拟的结果 ( $x = 0.1\text{mm}$ )进行了比较,见表 1 所示。由于 20 次和 30 次结果基本一致,因此认为做 30 次模拟的结果是可信的。

表中  $x_{,rms}$ 是  $x$  方向的均方根误差。

我们还将模拟结果同理论分析进行了比较,根据公式(1)可得到最大闭轨畸变值为 1.500mm,与模拟结果(1.566mm)基本一致。

表 1 10,20 及 30 次模拟结果的比较

Table 1 Comparison of the results in 10, 20 and 30 times

of numerical simulation times			
times	10	20	30
$x_{,rms}$	0.639 3	0.645 7	0.668 2

### 3 计算结果

在这些误差中,四极铁纵向(平移)的安装误差只影响束流的聚焦情况,对轨道不产生影响;同时四极铁绕横向方向( $x$  和  $y$  轴)的旋转对轨道影响很小,因此在计算中未加考虑。

#### 3.1 四极铁的影响

四极铁在  $x$  方向和  $y$  方向的安装误差对轨道均方根误差的影响如图 1 和图 2 所示。从图上可以看出,轨道均方根偏差随  $x$  方向和  $y$  方向的安装误差变化基本是线性关系,因此,我们对曲线进行拟合,可得到一放大因子,拟合结果为

$$x_{,rms} = - 0.001 79 + 6.408 \times x, \quad y_{,rms} = - 4.6 \times 10^{-5} + 6.2 \times y \tag{4}$$

$x$  方向的放大因子为 6.408,  $y$  方向的放大因子为 6.2。

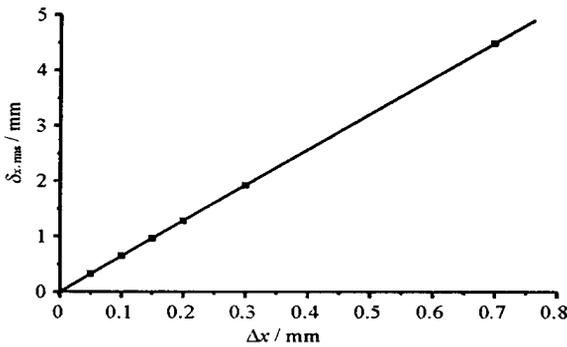


Fig. 1 Rms error with quadrupole misalignment in  $x$  direction

图 1  $x$  方向的安装误差  $x$  对轨道的影响

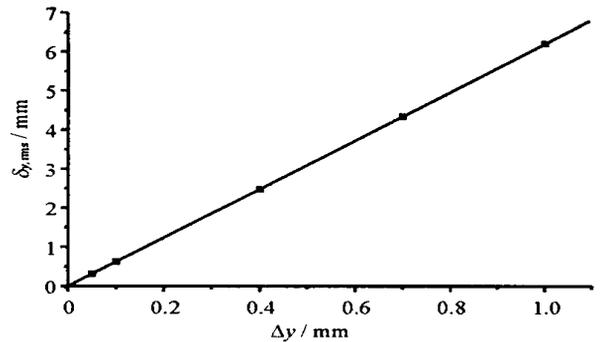


Fig. 2 Rms error with quadrupole misalignment in  $y$  direction

图 2  $y$  方向的安装误差  $y$  对轨道的影响

绕束流  $s$  方向的旋转误差对轨道的影响:四极铁绕束流方向的旋转误差对束流的  $x$  方向和  $y$  方向产生了耦合,在有横向误差存在的情况下,又对束流的轨道产生了影响。以下的计算,是在考虑了横向误差  $x = y = 0.1\text{mm}$  的情况下进行的。

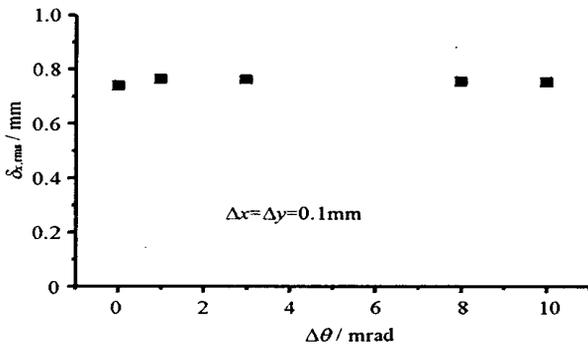


Fig. 3 Rms error of  $x$  direction with quadrupole roll misalignment ( $x = y = 0.1\text{mm}$ )

图 3 绕束流方向的旋转误差对  $x$  方向轨道的影响

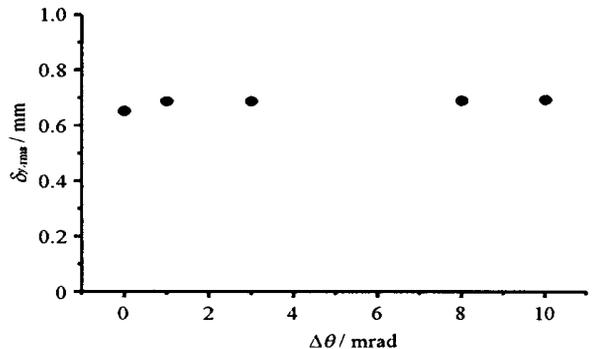


Fig. 4 Rms error of  $y$  direction with quadrupole roll misalignment ( $x = y = 0.1\text{mm}$ )

图 4 绕束流方向的旋转误差对  $y$  方向轨道的影响

从以上两图我们可以看到,四极铁绕束流方向的旋转误差对轨道的影响很小(有时的轨道变化同  $= 0$  时的基本一样)。

### 3.2 二极铁的影响

二极铁沿束流方向 ( $z$  轴) 平移和绕束流方向的旋转误差对轨道的影响如图 5 和图 6 所示。拟合结果为:  $x_{,rms} = - 4.77 \times 10^{-5} + 1.25 \times z$ ,  $y_{,rms} = - 4.35 \times 10^{-5} + 4.078 \times \Delta\theta$ , 放大因子分别为 1.25 和 4.078。

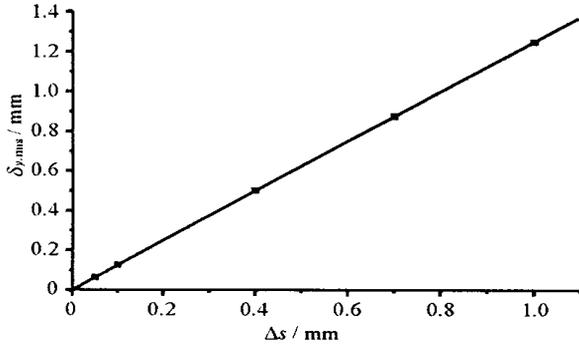


Fig. 5 Rms error with bend misalignment in  $z$  direction  
图 5 沿束流方向的平移对  $x$  方向轨道的影响

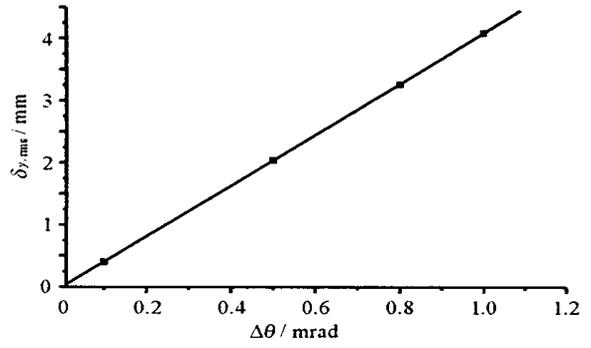


Fig. 6 Rms error with roll misalignment round  $y$  direction  
图 6 绕束流方向的旋转误差对  $y$  方向轨道的影响

为了全面地考虑磁铁误差对轨道的影响,我们还计算了二极铁中心磁场误差的影响,如图 7 所示,  $x_{,rms} = - 2.35 \times 10^{-3} + 2.58 \times 10^3 \times B/B$ 。

综合以上影响,所得结果见表 2。

表 2 各种误差造成的轨道畸变  
Table 2 Orbit due to various random errors

	errors	amplification factor (bend)	amplification factor (quadrupole)
misalignment	$x$	very small	6.408 ( $x_{,rms}$ )
	$y$	very small	6.2 ( $y_{,rms}$ )
	$s$	1.25 ( $x_{,rms}$ )	very small
roll misalignment	$x$		very small
	$y$		very small
	$z$	4.078 ( $y_{,rms}$ )	very small

在综合考虑了磁铁安装误差以及波荡器的磁场误差情况下得到的束流轨道如图 8 所示, ( $x_q = y_q = s_b = 0.1\text{mm}$ ,  $\theta_b = 0.1\text{mrad}$ ,  $B/B = 1 \times 10^{-4}$ , 波荡器的一次积分为  $1 \times 10^{-4}\text{Tm}$ , 二次积分为  $1 \times 10^{-4}\text{Tm}^2$ , 数据来自前一次准直的公差)。

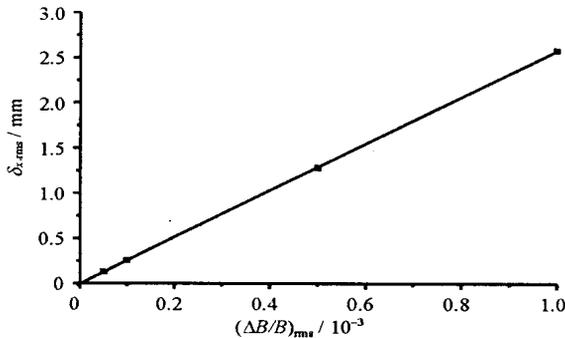


Fig. 7 Rms error with bend error  $B/B$   
图 7 二极铁中心磁场误差对  $x$  方向轨道的影响

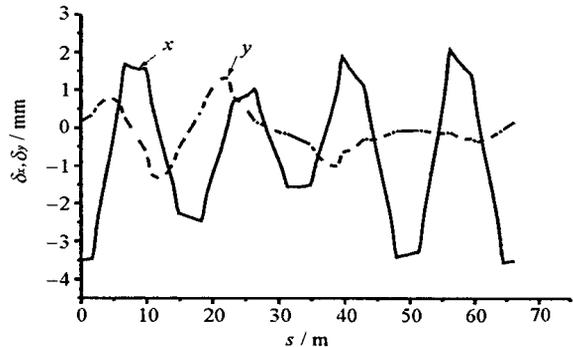


Fig. 8 Rms error with all errors  
图 8 磁铁安装误差以及振荡器的磁场误差影响下的束流轨道图

根据实测结果, HLS 储存环的闭合轨道最大畸变大于 10mm, 因此我们认为现在的磁铁安装误差已大于准直的公差, 有必要进行进一步的准直。

### 3.3 横向发射度耦合

下面就磁铁的安装误差对束流发射度的横向耦合进行分析,由  $x_q = y_q = s_b = 0.1\text{mm}$ ,  $\theta_b = 0.1\text{mrad}$ ,  $\theta_q = 0.5\text{mrad}$ ,  $B/B = 1 \times 10^{-4}$ , 可得到耦合系数为:  $\epsilon = 2.18\%$ 。所以,误差导致的耦合主要来自于闭轨畸变。

## 4 结 论

磁铁的安装误差将引起束流的闭轨畸变以及横向发射度的耦合,其中影响较大的是四极铁在横向位置的安装误差和两极铁在束流方向的旋转误差。对 HLS 储存环,轨道均方根偏差随四极铁  $x$  方向的安装误差变化放大因子为 6.408;  $y$  方向的放大因子为 6.2。两极铁沿束流方向 ( $z$  轴) 旋转误差的放大因子为 4.078。根据计算结果,目前的安装误差已过大,有必要进行进一步的准直。

### 参考文献:

- [1] Wiedemann H. Particle accelerator physics I and II (2nd edition) [M]. Berlin: Springer, 1998.
- [2] Planner C W, Prior C R. Horizontal-vertical coupling in the ESRF storage ring [R]. Report number: COLL/RAL/ESRF-05/R06. France, 1998.
- [3] Grote H, Iselin F. The MAD Program [R]. Report number: CERN/SL/90-13(AP). Geneva, 1995.

## Effects of alignment errors on the orbit function in HLS storage ring

DIAO Cao-zheng, WANG Lin, XU Hong-liang, LI Yong-jun, ZHANG Shan-cai, FENG Guang-yao

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China,

P. O. Box 6022, Hefei 230029, China)

**Abstract:** The orbit functions for HLS storage ring have been studied using the simulation code MAD. The effects of alignment errors of the quadrupole, dipole magnets were simulated. The effects of these errors on the orbit distortion and coupling are then graphically analyzed to show the rms spread of the functions. The studies show that the most significant closed orbit distortion was caused by displacement of the quadrupole magnets, and the amplification factors are presented, while providing the opportunity of future upgrade in alignment. In addition, the coupling between the horizontal and vertical emittance is analyzed, and the main coupling is due to the orbit distortion.

**Key words:** Misalignment; Orbit distortion; Amplification factor; Coupling