

# 合肥光源束流闭轨局部调整和校正\*

宣 科, 王 琳, 李 川, 李为民, 王季刚,  
鲍 循, 刘功发, 徐宏亮, 刘祖平

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

**摘 要:** 针对特定实验站调整光源点位置的要求, 设计了合肥光源储存环束流闭轨局部调整和校正系统, 介绍了该系统的工作原理、硬件组成、软件设计及运行结果, 设计要求束流闭轨局部调整的最大幅度为 1~2 mm, 水平方向和垂直方向其余闭轨畸变均方根分别小于 50 和 30  $\mu\text{m}$ 。校正系统采用轨道设定法作为束流闭轨局部调整和校正算法, 由束流轨道测量系统、校正铁系统和控制系统组成。运行结果显示: 水平和垂直方向分别调节 2.0 和 1.5 mm, 水平方向和垂直方向其余闭轨畸变均方根分别为 45.14 和 27.62  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 同步辐射光源; 束流闭轨; 局部凸轨; 校正

**中图分类号:** TL503 **文献标志码:** A

合肥同步辐射光源(HLS)是 2 代专用同步辐射光源, 光源主体装置是 800 MeV 电子储存环。在储存环上, 通常在特定位置通过调整束流轨道的位置或变化方向来进行束流的注入、光源位置调整和闭轨校正等。这种局部轨道位置调整可以通过局部凸轨实现。很多同步辐射光源的储存环注入系统就是用凸轨来实现的<sup>[1]</sup>。但注入系统的凸轨都是在设计阶段经过周密计算并用特定元件形成, 而我们更关心的是用局部凸轨来做闭轨校正方面的工作。它可以是轨道的逐段校正, 如将许多局部凸轨组合起来以达到全环校正的目的<sup>[2]</sup>; 也可以是在实验站光束线端口调整轨道以改变发光点的位置, 如特定的实验站要求调整光源点的位置, 但同时又不能改变或尽量小地改变其它实验站光源点的位置。本文针对实验站要求调整光源点位置这种情况, 在实验室现有的条件下, 采用轨道设定法来实现束流闭轨的局部调整和校正, 以便在个别实验站附近调整轨道, 调节进入光束线光线的位置和方向。设计要求束流闭轨局部调整的最大幅度为 1~2 mm, 水平方向和垂直方向其余闭轨畸变均方根分别小于 50  $\mu\text{m}$  和 30  $\mu\text{m}$ 。

## 1 束流闭轨局部调整理论<sup>[2-6]</sup>

在理想情况下, 储存环中运动的电子相对于理想轨道作  $\beta$  振荡。假设电子在  $s_0$  处存在磁场的二极场误差, 使得束流产生偏角  $\theta$ , 束流在储存环中轨道也相应地产生变化。此时的束流轨道可以表示为

$$u(s) = \frac{\sqrt{\beta_s}}{2\sin\pi\nu} \sqrt{\beta_{s_0}} \theta \cos(\varphi_s - \varphi_{s_0} + \pi\nu) \quad (1)$$

式中:  $s$  为环上任一处纵向坐标;  $\beta_s, \beta_{s_0}$  和  $\varphi_s, \varphi_{s_0}$  分别为  $s$  和  $s_0$  处横向振荡的振幅函数和相位;  $\nu$  为横向振荡数。

二极场误差可以产生闭轨畸变, 为了实现束流闭轨局部调整, 可采用 1 组  $n$  个校正磁铁, 适当调节它们的强度, 使得在这几个校正铁之间的轨道发生偏移, 但其它地方的轨道位置不变, 相当于轨道在此处凸出一块。根据束流动力学, 至少要有 3 块校正铁才能形成 1 个凸轨。实际情况下, 产生凸轨的校正铁间强度之比可以用测量的响应矩阵计算得到。

常用的 3 种利用响应矩阵计算局部凸轨系数的方法是 SVD 法、最小二乘法、轨道设定法。前 2 种方法的优点是采用的校正铁少, 凸轨大小调节方便, 但往往会在凸轨以外产生小量多余的闭轨畸变; 轨道设定法采用的校正铁数量多, 但可以得到理想的局部凸轨。本系统采用轨道设定法进行束流闭轨的局部调整和校正。

轨道设定法是利用全环反馈校正的思想进行局部校正。首先根据需要设定 1 个束流的闭轨  $\mathbf{X}$ , 利用式(2)可以求得生成该轨道的校正铁的强度。

$$\mathbf{C} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{X} \quad (2)$$

\* 收稿日期: 2008-12-22; 修订日期: 2009-04-15

基金项目: 中国科学技术大学青年科学基金项目(KY2310000006)

作者简介: 宣 科(1975—), 男, 硕士, 工程师, 从事加速器控制方向研究; xuanke@ustc.edu.cn。

式中： $\Theta$  是校正铁强度矢量； $R^{-1}$  为轨道校正磁铁响应矩阵的逆矩阵。利用这种方法得到的束流轨道  $X'$ ，在凸轨外会有多余的畸变  $X - X'$ 。这些畸变可利用全环反馈校正的方法加以校正。

## 2 束流闭轨局部调整和校正系统硬件结构<sup>[6-9]</sup>

图 1 为 HLS 束流闭轨局部调整系统硬件结构图。HLS 束流局部调整和校正系统由束流闭轨测量系统、校正铁系统和控制系统组成。束流闭轨测量系统是由分布在储存环上的 23 个束流位置探测器(BPM)以及相关的电子线路和计算机处理系统组成，BPM 测量精度为  $5 \mu\text{m}$ ，响应速度为 25 ms。校正铁系统由 32 个校正铁及相关的电源系统组成，校正铁电源动态范围为  $\pm 9 \text{ A}$ ，最小调节量为  $0.1 \text{ mA}$ ，对应轨道偏移小于  $1 \mu\text{m}$ 。因此，BPM 精度和电源控制精度不影响束流闭轨的局部调整品质。HLS 控制系统建立在实验物理工业控制系统(EPICS)基础上，闭轨的局部调整和校正程序位于作为操作员界面(OPD)的工作站上，通过控制系统专用局域网和输入输出控制器(IOC)，对束流轨道进行局部凸轨。

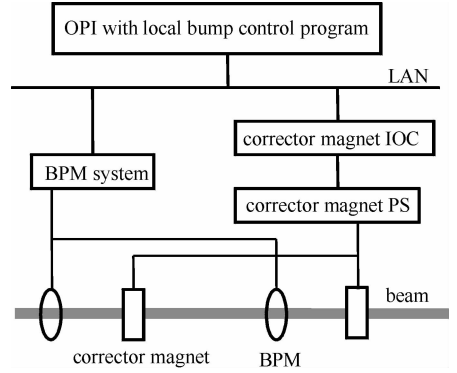


Fig. 1 Hardware structure of local bump system

图 1 束流闭轨的局部调整硬件结构图

## 3 束流闭轨局部调整和校正系统控制软件设计<sup>[8-10]</sup>

束流局部调整和校正控制软件基于 MATLAB 开发，由于控制系统采用以记录为驱动的 EPICS 系统，所有在线数据都以记录形式分布在 IOC 的实时数据库中，因此需要借助 EPICS 与 MATLAB 之间的接口软件 MCA。借助 MCA，MATLAB 程序可以将过程变量的名字与相应的 EPICS 的 IOC 记录建立联系，进而直接对 EPICS 系统中的记录进行读写操作，实现对设备进行控制。

图 2 为 HLS 束流闭轨的局部调整和校正系统控制软件流程图。在束流闭轨局部调整时，先根据实际轨道和需要局部调整闭轨的位置和幅度设计 1 个束流闭轨  $X_r$  为参考轨道， $X_m$  为 BPM 测到的实际轨道位置，则参考轨道和实际轨道会产生束流轨道畸变  $X$ ，根据式(2)可求出实现束流闭轨局部调整所需要的校正铁强度变化矢量。再通过校正磁铁控制系统改变校正磁铁电源设值，达到束流闭轨局部调整目的。为了在束流闭轨局部调整中尽量减小对其余闭轨的影响，系统带宽设计为  $0.5 \text{ Hz}$ ，最大校正磁铁变化步长设计为  $10 \mu\text{rad}$ 。

## 4 束流闭轨局部调整结果

HLS 通过 23 个双向 BPM 来监测全环轨道变化，图 3 是水平方向磁铁 CQ1S 处束流闭轨局部调整后的闭轨，调节幅度为  $2.0 \text{ mm}$ ，水平方向其余闭轨畸变均方根为  $45.14 \mu\text{m}$ 。图 4 是垂直方向 CQ8E 处束流闭轨局部调整后的闭轨，调节幅度为  $1.5 \text{ mm}$ ，垂直方向其余闭轨畸变均方根为  $27.62 \mu\text{m}$ 。

## 5 结 论

HLS 储存环束流闭轨局部调整和校正系统符合设计要求，投入运行能够满足实验站调整光源点位置的需求。虽然采用轨道设定法进行束流闭轨局部调整和校正可以得到较理想的局部凸轨，但是储存环上的一些光束线端口对光位置非常敏感，其附近闭轨可能会产生一些微小的畸变，对光束线产生不利影响，需要进一步完善系统予以消除。

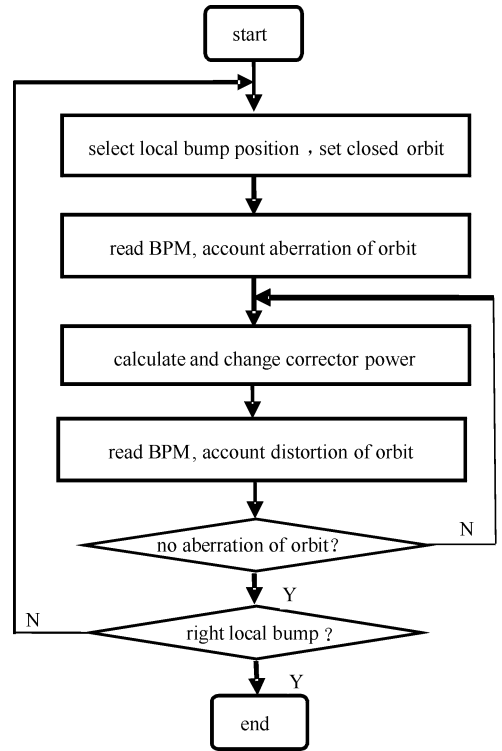


Fig. 2 Flow chart of local bump system program

图 2 束流闭轨的局部调整软件流程图

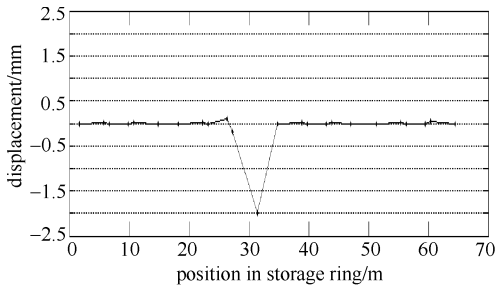


Fig. 3 Local bump in horizontal plane with BPM CQ1S

图 3 水平方向 CQ1S 处束流闭轨局部调整后的闭轨

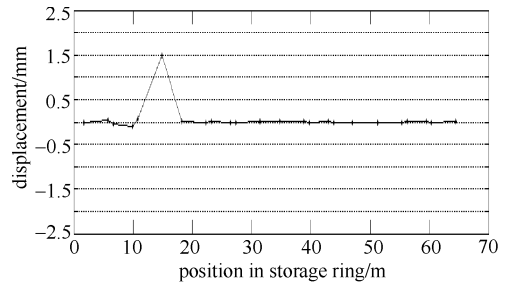


Fig. 4 Local bump in vertical plane with BPM CQ8E

图 4 垂直方向 CQ8E 处束流闭轨局部调整后的闭轨

## 参考文献:

- [1] 陈佳洱. 加速器物理基础[M]. 原子能出版社, 1993: 387-390. (Chen Jiaer. Basics of accelerator physics. Beijing: Atomic Energy Press, 1993: 387-390)
- [2] Parfenova A, Franchetti G, Franczak B, et al. SIS18 closed orbit correction using a local bump method[R]. GSI-Acc-Note-2006-11-001, 2006.
- [3] 金玉明. 电子储存环物理[M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 1994: 74-79. (Jin Yuming. Electron storage ring physics. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1994: 74-79)
- [4] Kuo C H, Hsu K T, Chen Jenny. Local feedback experiment in the Taiwan light source[C]//Proceedings of 1997 IEEE Particle Accelerator Conference. 1997: 2371-2373.
- [5] Chung Y, Decker G, Evans K Jr. Closed orbit correction using singular value decomposition of the response matrix[C]//Proceedings of 1993 IEEE Particle Accelerator Conference. 1993: 2263-2265.
- [6] 李京祎. HLS 控制系统及基于控制系统的物理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2002. (Li Jingyi. HLS control system and physical research based on control system. Hefei: University of Science and Technology of China, 2002)
- [7] 刘功发, 李京祎, 李为民, 等. 合肥光源储存环控制系统[J]. 核技术, 2004, 27(7): 501-504. (Liu Gongfa, Li Jingyi, Li Weimin, et al. HLS storage ring control system. Nuclear Techniques, 2004, 27(7): 501-504)
- [8] 丁石川, 刘功发, 宣科, 等. 基于 MATLAB 的合肥光源储存环束流位置校正[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(9): 1577-1580. (Ding Shichuan, Liu Gongfa, Xuan ke, et al. MATLAB based beam orbit correction system of HLS storage ring. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(9): 1577-1580)
- [9] 宣科, 王琳, 王季刚, 等. 合肥光源束流轨道慢反馈系统[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(4-5): 497-499. (Xuan Ke, Wang Lin, Wang Jigang, et al. The system of slow beam orbit feedback for HLS. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(4-5): 497-499)
- [10] Terebilo A. Accelerator toolbox for MATLAB[R]. SLAC-PUB-8732, 2001.

## Local bump of beam closed orbit in Hefei Light Source

Xuan Ke, Wang Lin, Li Chuan, Li Weimin, Wang Jigang, Bao Xun,  
Liu Gongfa, Xu Hongliang, Liu Zuping

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology  
of China, P. O. Box 6022, Hefei 230029, China)

**Abstract:** The local bump of beam closed orbit is designed for some specific beamline in the Hefei Light Source. The design demands local orbit adjustment of 1~2 mm, horizontal and vertical closed orbit distortion outside the bump orbit less than 50  $\mu\text{m}$  and 30  $\mu\text{m}$ . In this paper, the local bump principle, hardware components, software design and the results are described. The local bump system adopts the orbit setting algorithm, and consists of the beam orbit measure system, the corrector magnet system and the control system. The main operation results of the system show that maximum values of horizontal and vertical local orbit adjustment are 2 mm and 1.5 mm respectively, horizontal and vertical closed orbit distortion outside bump orbit are less than 45.14  $\mu\text{m}$  and 27.62  $\mu\text{m}$  respectively.

**Key words:** synchronous radiation light source; beam closed orbit; local bump; adjustment