

# 基于 MATLAB 的 HLS 束流轨道慢反馈控制系统\*

宣科<sup>1)</sup> 王琳 王季刚 李为民 刘功发 李川 徐宏亮 鲍循

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

**摘要** 束流轨道稳定性是同步辐射光源的重要性能指标, 直接影响实验线站光通量的稳定性. 介绍了在合肥光源储存环上实现束流轨道慢反馈校正的研究与实验工作, 目前合肥光源的全环垂直轨道的稳定性为  $\Delta y < \pm 30\mu\text{m}$ , 从而使轨道的稳定性达到了国际同类机器先进水平.

**关键词** 同步辐射光源 束流轨道 慢反馈 SVD MATLAB

## 1 引言

合肥同步辐射光源(Hefei Light Source, HLS)是二代专用同步辐射光源, 光源主体装置是800MeV电子储存环, 束流发射度约  $160\text{nm}\cdot\text{rad}$ , 当横向耦合度为5%时, 束流尺寸  $\sigma_x : 0.45 \sim 1.87\text{mm}$ ;  $\sigma_y : 0.13 \sim 0.43\text{mm}$ . 因此, HLS 储存环垂直方向束流轨道漂移要求小于  $30\mu\text{m}$ , 除个别实验线站外, 绝大多数实验站对水平方向束流轨道稳定性没有特殊要求. HLS 是以真空紫外和软 X 射线为主的光源, 其同步辐射实验采样周期长, 因此主要需要抑制轨道慢漂. 由于 HLS 储存环采用低能注入模式, 在注入、慢加速及供光初期磁铁和电源的状态变化很大, 在无反馈校正情况下, 束流轨道再现性和稳定性均大于  $30\mu\text{m}$ , 无法满足用户实验需要.

通过对国外各类同步辐射光源束流轨道稳定性的调研、分析影响 HLS 束流轨道稳定性的各种因素, 要想实现 HLS 储存环束流轨道稳定运行在  $\Delta y < \pm 30\mu\text{m}$  的目标, 只有实现全环轨道慢反馈校正.

## 2 轨道慢反馈系统

### 2.1 轨道慢反馈理论<sup>[1-3]</sup>

对束流闭轨畸变进行校正的方法较多, 但它们的基本思想都是用束流位置探测器测量闭轨畸变, 然后用校正磁铁尽量将闭轨畸变消除掉.

在电子储存环中, 校正铁强度的变化可以改变束流轨道闭轨, 即而达到校正轨道偏差的目的, 二者之

间的关系表示为

$$X = R\Theta, \quad (1)$$

式中  $X$  为束流位置检测器(Beam Position Monitor, BPM)测量到的束流实际轨道与理想轨道之差,  $R$  是轨道校正磁铁响应矩阵,  $\Theta$  是校正铁强度矢量.

储存环状态变化导致的束流轨道漂移会破坏束流轨道的稳定性, 因此要想消除这种变化导致的束流轨道漂移, 校正铁的强度变化量应为

$$\Theta = -R^{-1}X, \quad (2)$$

式中  $R^{-1}$  为逆响应矩阵,  $R^{-1}$  可以用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)方法求解.

设束流轨道畸变为  $X$ , 则  $X$  与校正铁的强度  $\Theta$  之间的关系如式(1)所述. 通过 SVD 法可求出  $R$  的伪逆矩阵  $R^{-1}$ , 根据式(2)可求出实现束流轨道校正所需的校正铁强度变化矢量. 再通过校正铁控制系统改变校正铁电源设值, 达到轨道反馈目的.

### 2.2 束流轨道慢反馈控制系统硬件结构<sup>[3, 4]</sup>

图1为 HLS 束流轨道慢反馈控制系统硬件结构图. 它由3部分组成: 束流闭轨测量系统、校正铁系统和慢反馈控制系统. 束流轨道测量系统由24个 BPM 及相关的电子线路和计算机处理系统组成; 校正铁系统由32个校正铁及相关的电源系统组成. HLS 控制系统建立在 EPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)基础上, 束流轨道慢反馈控制程序位于作为操作员界面的工作站上, 通过控制系统专用局域网和输入输出控制器(IOC), 控制系统从束流轨道测量系统读取束流轨道位置, 然后控制校正铁, 实现

2008 - 01 - 07 收稿

\* 中国科学技术大学青年科学基金(KY231000006)资助

1) E-mail: xuanke@ustc.edu.cn

对束流轨道进行慢反馈控制.

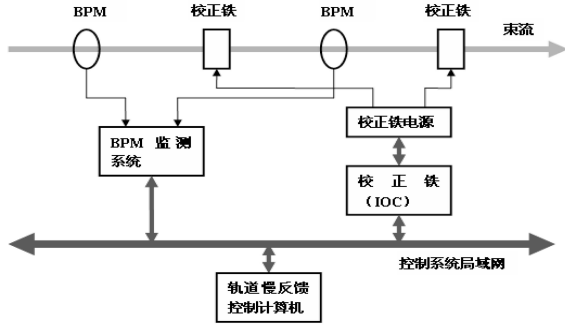


图 1 HLS束流轨道慢反馈控制系统硬件结构图

### 2.3 束流轨道慢反馈控制系统软件设计<sup>[5]</sup>

HLS束流轨道慢反馈控制系统的上层控制软件是基于MATLAB开发的, MATLAB强大的矩阵运算能力和丰富的数学函数使得编程简单, 程序运行可靠. EPICS系统是以记录为驱动的, 所有在线数据都以记录形式分布在IOC的实时数据库中. EPICS提供了与MATLAB的接口MCA. 借助MCA, MATLAB程序可以将过程变量(Process Variable)的名字与相应的IOC记录的域建立联系, 进而直接对EPICS系统中的记录进行读写操作, 实现对设备的控制.

为了在反馈中尽量减小对用户的影响, HLS束流轨道慢反馈程序采用连续运行模式, 运行频率为0.5Hz. 图2为HLS光源束流轨道慢反馈控制系统软件流程图.

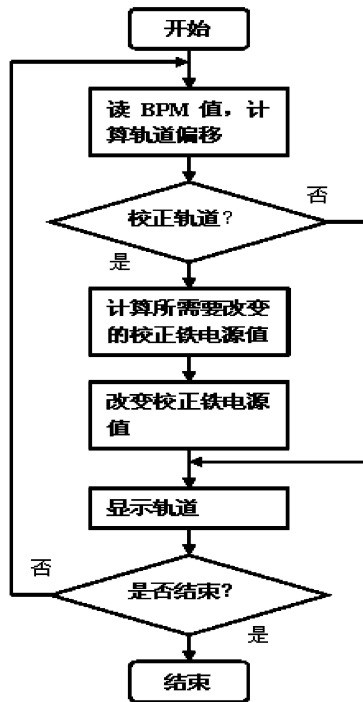


图 2 HLS光源束流轨道慢反馈控制系统软件流程图

### 3 轨道慢反馈控制系统运行结果

HLS应用轨道慢反馈控制系统进行束流轨道校正后, 储存环束流轨道稳定性得到明显改善. 图3是无轨道慢反馈时某个运行班次的全环垂直束流轨道, 在10个小时的运行期间垂直方向轨道漂移了 $-45\mu\text{m} < \Delta y < 95\mu\text{m}$ .

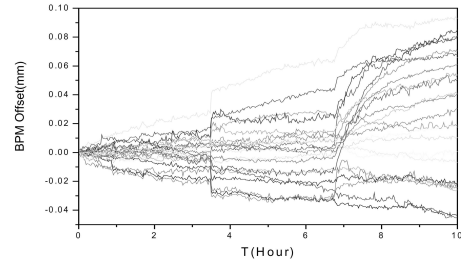


图 3 无轨道慢反馈时某个运行班次的全环垂直束流轨道

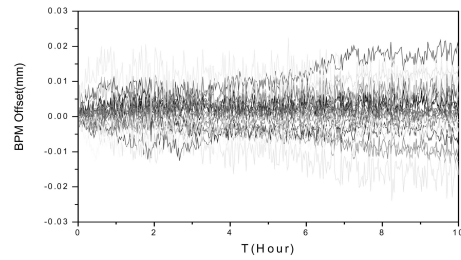


图 4 有轨道慢反馈时某个运行班次的全环垂直束流轨道

图4是有轨道慢反馈时某个运行班次的全环垂直束流轨道, 在10个小时的运行期间垂直方向轨道仅漂移了 $-25\mu\text{m} < \Delta y < 25\mu\text{m}$ , 满足了设计要求.

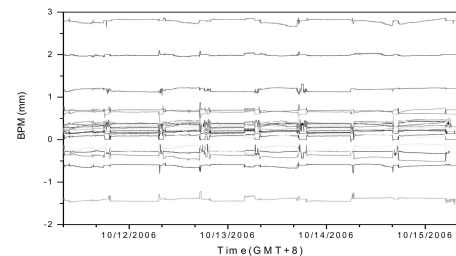


图 5 无轨道慢反馈时连续5天的全环垂直束流轨道

应用轨道慢反馈控制系统后, HLS储存环束流轨道再现性得到明显改善. 图5是无反馈系统时连续5天内不同运行周期束流轨道变化, 不同运行周期轨道变化约 $60\mu\text{m}$ , 这导致实验线站实验条件不重复. 图6给出有反馈系统时连续5天内不同运行周期中束流轨道, 可见不同运行周期束流轨道变化大大减小, 束流轨道变化约 $10\mu\text{m}$ .

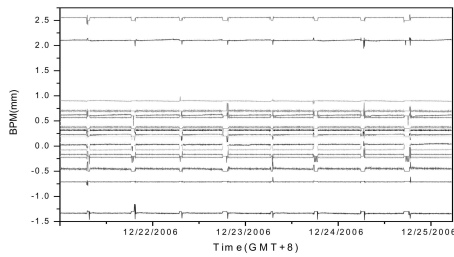


图 6 有轨道慢反馈时连续 5 天的全环垂直束流轨道

## 4 结论

HLS 储存环束流轨道慢反馈控制系统于 2006 年 10 月下旬投入运行后, 束流轨道的稳定性和再现性得到大幅度改善, 供光质量大幅改善, 满足了用户的要求。

## 参考文献(References)

- 1 Safranek J, Stanford, California. Orbit Control at Synchrotron Light Sources, International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems[C]. 1999, Trieste, Italy: 240—244
- 2 Chung Y, Decker G, Evans K. Jr. Closed Orbit Correction Using Singular Value Decomposition of the Response Matrix, PAC1993 [C]. 1993, Washington, D.C.USA: 2263—2265
- 3 LI Jing-Yi. HLS Control System and Physical Research Based on Control System [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2002 (in Chinese)  
(李京祎. HLS 控制系统改造及其物理应用研究[D]. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2002)
- 4 LIU Gong-Fa, LI Jing-Yi, LI Wei-Ming. Nuclear Technique, 2004, **27**(7): 501—505 (in Chinese)  
(刘功发, 李京祎, 李为民. 核技术, 2004, **27**(7): 501—505)
- 5 DING Shi-Chuan et al. High Power Laser and Particle Beams, 2006, **18**(9): 1577—1580 (in Chinese)  
(丁石川等. 强激光与粒子束, 2006, **18**(9): 1577—1580)

# Control System of Slow Beam Orbit Feedback on MATLAB for HLS\*

XUAN Ke<sup>1)</sup> WANG Lin WANG Ji-Gang LI Wei-Min LIU Gong-Fa  
LI Chuan XU Hong-Liang BAO Xun

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

**Abstract** In this paper, the slow orbit feedback system of HLS, including the feedback principle, the hardware, the software and the main operation results, is briefly introduced. With the help of slow orbit feedback system, the vertical orbit stability of HLS is better than 30 microns, which meets the requirement of synchrotron radiation users and is comparable with the international advanced level of orbit stability in the same kind of machines.

**Key words** synchronous radiation light source, beam orbit, slow feedback, SVD, MATLAB

Received 7 January 2008

\* Supported by Youth Science Foundation of University of Science and Technology of China (KY2310000006)

1) E-mail: xuanke@ustc.edu.cn