

文章编号: 1001-4322(2003)08-0825-05

升级的合肥光源闭轨测量系统及其应用*

王筠华, 孙葆根, 李京祎, 刘祖平, 李为民, 刘建宏, 卢平

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

摘 要: 描述了合肥同步辐射光源二期工程中, 电子储存环升级的闭轨测量系统及其在设备研制中的应用。介绍了性能稳定可靠的 Bergoz 束流位置监测电子学信号处理器。升级后的闭轨测量系统中处理电子学电路的束流位置分辨率可达 $1\mu\text{m}$, 系统误差小于 $10\mu\text{m}$ 。整个测试系统的分辨率小于 $3\mu\text{m}$ 。利用该高精度闭轨测量系统和基于束流准直系统完成了束流准直四极铁磁中心的测量, 并和控制系统完成了储存环全环闭轨反馈校正试验。一个完整的束流位置监测系统已投入了在线运行, 保障了为用户提供高稳定高品质的光源。

关键词: 束流位置监测系统; 闭轨测量; 基于束流准直系统; 闭轨校正

中图分类号: TL506 文献标识码: A

合肥光源(HLS)是专用的同步辐射光源,对于光源的品质有较高的要求。该光源是 200MeV 注入而在 800MeV 能量、100~300mA 流强下运行。高频频率是 204.035MHz。储存环束流位置的在线检测,即在线的闭轨测量(COD)系统是设备研制、改造和调试中不可缺少的关键性测量设备。1995 年我们对一期工程中研制的束流位置监测(BPM)系统进行了关键性的改造,以 $50\mu\text{m}$ 精度和 $10\mu\text{m}$ 分辨率投入了正常运行,完成了 Damping 后的平均束流位置的测量和局部凸轨校正的初步试验^[1]。为进一步提高该系统的测试精度、可靠性和数据获取的灵活性,满足二期工程结束后, HLS 储存流强达 300~500mA, 轨道应稳定运行在 $30\mu\text{m}$ 以内的要求,我们升级了 HLS 储存环闭轨测量系统。

1 闭轨测量系统

1.1 BPM 系统结构

COD 系统由信号检测电极、模拟信号处理电子学模块系统、数字信号获取系统和数据处理和显示四大部分组成(见图 1)。为研制一套高精度和高稳定性的闭轨测量系统,我们升级了它的信号传输、处理和数字信号获取系统,而信号检测仍利用环上原安装的 Pick-up 电极。

在信号传输上,我们抛弃了机械式多路选通而采用并行处理来自每个 BPM 信号的方案,即每个 BPM 对应一个处理电子学模块,使得所测轨道具有同时性。

由于 HLS 横向自由振荡频率 $x = 3.54$, $y = 2.61$, 为满足存储环 3 倍自由振荡频率轨道测试,按照色散函数测量布局的要求,我们沿环选择了 22 个 BPM 作为合适的位置测量点来完成全环闭轨测量^[2]。BPM 系统的结构与信号过程见图 1, 软件系统架构见图 2。

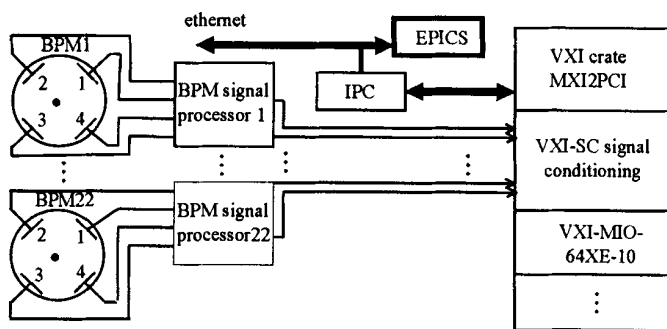


Fig. 1 Hardware structure of BPM system
图 1 BPM 系统硬件结构

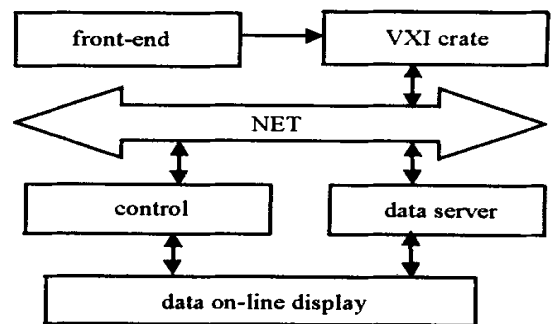


Fig. 2 Software structure of BPM system
图 2 BPM 软件系统架构图

* 收稿日期: 2003-02-21; 修订日期: 2003-05-15
基金项目: 国家自然科学基金资助课题(10275062)
作者简介: 王筠华(1944-), 女, 副研究员, 从事束流测量系统的研究; 合肥 6022 信箱; E-mail: wjwhua@ustc.edu.cn.

1.2 模拟信号处理电子学

我们选择法国 Bergoz 公司生产 BPM 模块作为模拟信号处理电子学线路,是因为它具有约 60dB 宽的动态范围,对应 HLS 储存流强 500mA 测量时可不需要编程衰减控制;分辨率高达 $1\mu\text{m}$ 外差式接收处理器,该处理器带有中心频率 204MHz(与环 RF 匹配)、带宽为 $\pm 200\text{kHz}$ 带通滤波,频域处理来自 Pick-up 的电极信号,这大大地提高了线路的信噪比和分辨率;带自动增益,可使电路在不同流强下始终工作在线性较好的区域,同时避免由于温度变化和器件老化引起增益的改变;使用方便、性能优良。该模块由低通滤波(1 GHz)、4 选 1 GaAs 开关、带通滤波、低噪声放大、混频系统和和中频放大等电路组成,最后在模块内完成和差矩阵计算,输出表征 x 、 y 位置的模拟电压信号 V_x 、 V_y 值^[3]。该模拟信号经过 ADC 转换后送到后一级数据获取系统,完成束流位置的测量任务。模拟信号处理模块的框图如图 3 所示。

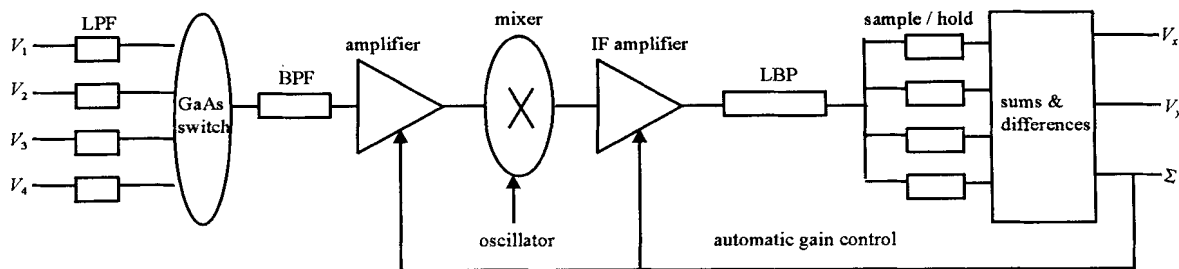


Fig. 3 Block diagram of Bergoz BPM module

图 3 Bergoz BPM 模块的方框图

1.3 数据获取系统

BPM 数据获取是由 VXI 硬件技术和 LabView 软件支持完成的。VXI 机箱采用泰克公司生产的智能 13 槽机箱 VX4101。BPM 数据获取系统模块与束流测量其他模块一起都被集成在 VXI 机箱内。VXI 采用外接式零槽控制器。除前端电路外其余部分均采用网络互连,即反馈控制和数据服务器可以远离测量现场。22 路前端测量模块将处理后的信号送入 VXF-SC-1102 调理模块,然后经 VXF-MIO-64XE-10 模数转换完成数据采集,采集率为 100kHz。获得的数据从工控机经 UDP 接口发送到两个服务器,一个为数据服务,另一个用于闭轨反馈。所测的数据经由网络接口发送到独立的数据服务器保存,同时提供网络开放访问(见图 2)。所有类型数据和控制信息经过本地 Ethernet 送到中央控制室 EPICS 控制器和服务器。由于控制系统采用 EPICS,因此需要在 EPICS 环境下开发以上软件的接口。在 EPICS 下,利用 ADC 记录读取闭轨位置的数据,每一个 BPM 利用两个通道分别读取 x 值和 y 值。

1.4 升级后的 BPM 系统测试精度和分辨率

从图 4 中 BPM 1 运行历史曲线图可以看出,升级后的 BPM 系统 x 、 y 位置偏移量长期稳定运行在 $10\mu\text{m}$ 以下,即测量系统误差 $x \approx 10\mu\text{m}$ 。该误差应该主要由信号接收、信号传输、处理电子学和数据获取系统等噪声所引起位置的偏移。我们通过对信号处理电子学线路检测实验得到,在动态范围内 ($-40 \sim +10$) dB 输出均方根噪声电平 $V < 3\text{mV}$,它将引起的位置偏移约 $5\mu\text{m}$,其它偏移量应考虑来自以上所提到的其他因素。

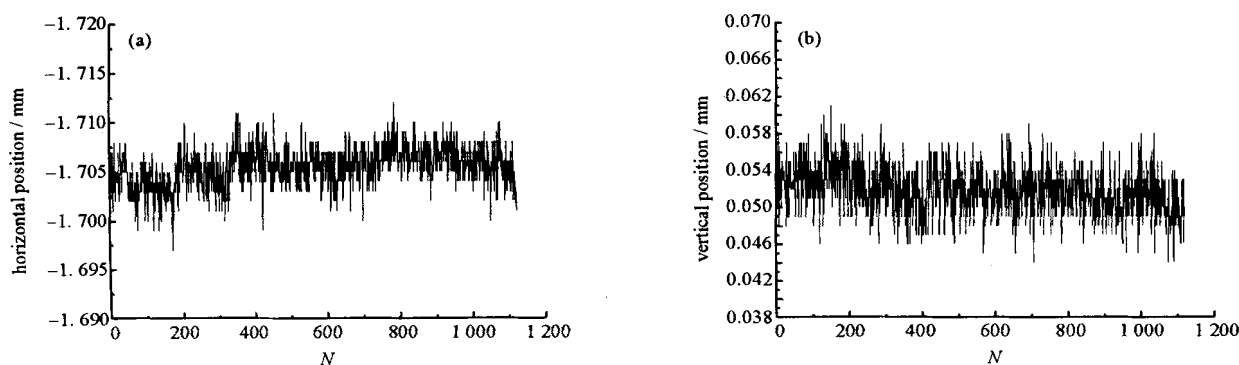


Fig. 4 History curves of BPM1

图 4 BPM1 运行历史曲线

为了估算新 BPM 系统的分辨率,可假定对于一个稳定束流(短时间),在测量期间,其轨道是一个确定不变的值,这相当于对探测电极有一个稳恒的输入信号。同时,考虑到系统在中心附近具有最好的机械和电子学线性,因此我们取系统在中心附近测量数据进行统计分析,可以看到由于系统本身的分辨能力而导致的分布。图 5 是取样率为 0.5Hz(N 为采样次数)的 BPM1 束流位置曲线。我们仍然取 BPM1 数据作误差分布图,从图 6 上可以大致推算系统分辨 FWHM 为 2.335 μm ,即系统分辨为 3.18 μm 。实际上输入该测量系统的输入信号并不是稳恒的,所以新 BPM 系统的分辨率应该好于 3 μm 。

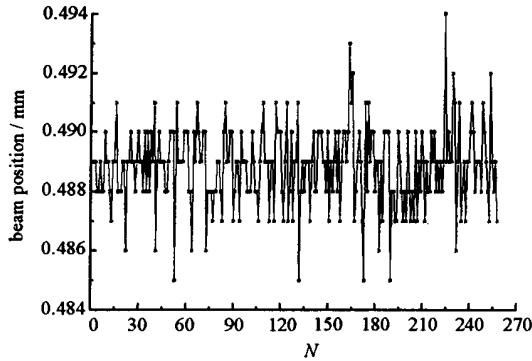


Fig. 5 Beam position curve of BPM1 at 0.5 Hz
图 5 取样率 0.5Hz BPM1 束流位置曲线

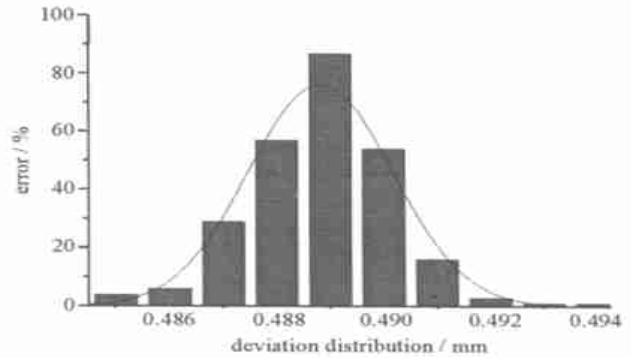


Fig. 6 Error histogram of BPM1
图 6 BPM1 误差分布图

2 新 BPM 测试系统的应用

2.1 色散函数的测量^[4]

利用升级后的 COD 系统,完成了 HLS 色散函数的测量。当改变高频频率时,利用测量轨道的变化得到色散函数

$$c(s) = -c \frac{x(s)}{f_{\text{H}}/f_{\text{H}}}$$
 (1)

其中 c 是动量压缩因子,可以测量和计算得到,这里选择计算值 0.046 1。

从图 7 可以看出测量值和理论计算值是非常吻合。这验证了我们测试系统的可靠性。

2.2 基于束流准直法测量四极铁磁中心的位置^[5]

由于有了精确的 COD 测量系统,我们才能完成基于束流四极铁磁中心的测量。四极铁的磁中心位置是一个重要的参数,它们在很大程度上代表了理想轨道,因此可作为参考轨道进行全环闭轨校正。

基于束流准直测量四极铁磁中心的原理为:当束流不是从四极铁的磁中心经过时,将会受到如下一个踢力

$$\begin{cases} x = -Kx l \\ y = Ky l \end{cases}$$
 (2)

其中 K 为四极铁的聚焦强度, x, y 分别为束流在横向离开四极铁中心的距离, l 为四极铁的长度。当 x 或 y 不为 0 时,如果 K 值有一个变化,束流轨道就会相对于原来的位置产生一个畸变。而当 x 或 y 为 0 时, K 值的变化在对应平面内不会影响束流的闭轨位置。因此就可以利用局部凸轨的方法在感兴趣的四极铁附近不断移动束流的位置,改变其 K 值,然后测量闭轨的畸变情况,就可以求出四极铁磁中心位置。考虑到非线性效应的影响,我们对于所测轨道作抛物线拟合。

$$r_{\text{ms}} = a_0 + a_1 u + a_2 u^2$$
 (3)

式中 u 代表 x 或 y 。求 r_{ms} 最小处的束流位置,令 $\partial r_{\text{ms}}/\partial u = 0$,则四极铁磁中心的位置为

$$u_q = -a_1/2 a_2$$
 (4)

根据以上分析可知,局部凸轨是在所感兴趣的四极铁附近产生,凸轨之外轨道的小量偏移不会给结果带来

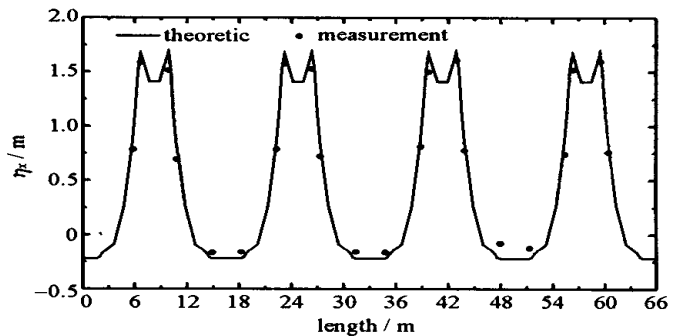


Fig. 7 Comparing the measurement dispersion with the theoretic dispersion

图 7 水平色散函数测量值与理论值的比较

很大的影响,因此这里只单纯的采用局部凸轨,其凸轨系数根据测量的响应矩阵采用奇异值分解(SVD)方法计算得到。

图 8 利用校正铁 CQ2W,CQ3W 和 CQ6W 在 Q4W 处形成的垂直方向局部凸轨。图 9 是四极铁 Q4W 中心的拟合结果。从图 9 中可以看出四极铁 Q4W 在垂直平面的中心在 1.693mm 处。

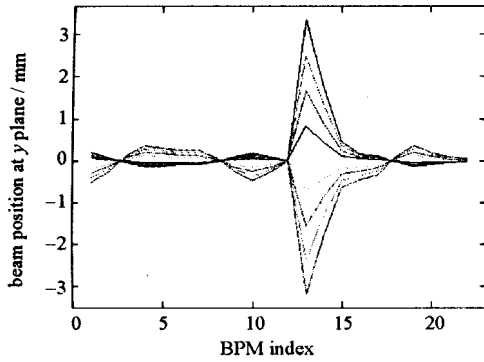


Fig. 8 Local bump at Q4W

图 8 四极铁 Q4W 附近的局部凸轨

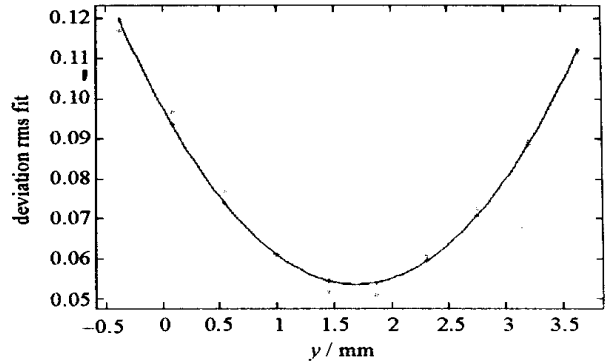


Fig. 9 Measurement results of BBA at Q4W

图 9 四极铁 Q4W 中心的拟合结果

2.3 全环闭轨校正^[6,7]

在储存环中,由于存在各种非理想因素,如磁铁的加工或安装误差、磁铁磁场误差和磁铁电源的抖动、磁铁支架的固有振动等,使得束流的运动轨道偏离原来设计的理想闭合轨道,这种轨道的偏移称为束流闭轨的畸变。这儿我们首先考虑磁场误差对电子的轨道的影响。假设电子在 s_0 处存在磁场的二级误差,使得束流产生一个偏角 θ ,束流在储存环中轨道也就相应地产生变化。这时其运动轨迹方程可以表示为

$$u(s) = \frac{\sqrt{\cos(s)} \sqrt{\cos(s_0)}}{2\sin} \cos[(s) - (s_0) - \theta] \tag{5}$$

由(5)式可知闭轨畸变的大小不仅取决于偏角的大小,而且还与误差处和观察处的 θ 值以及它们之间的相位差有关。为了消除闭轨畸变,我们利用新的高精度 COD 系统和在基于束流四极铁磁中心的测量的基础上,根据机器运行和研究的需要,对 HLS 储存环束流闭轨进行了多种形式的调整和相对于理想轨道的全环闭轨反馈校正。

为了满足特殊实验站的特定光源点位置的要求,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,我们首先利用局部凸轨和 SVD 方法调整特定光源点的位置,然后再利用全环校正的方法将凸轨之外的轨道畸变消除掉。全环的反馈校正正是采用比例积分微分(PID)方法进行的。图 10 是一个利用 PID 方法对束流轨道进行反馈校正的典型系统结构。

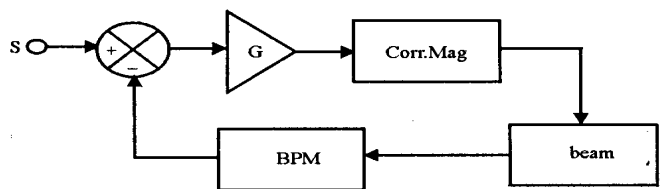


Fig. 10 Structure of PID correction of beam orbit

图 10 PID 束流轨道校正系统结构示意图

图 11 和图 12 分别显示出校正前和校正后的水平、垂直两个方向的轨道位置,其中横坐标为沿储存环的长度 L。校正结果将轨道在水平方向从最大偏移 - 4.965mm 减小到 - 0.260mm,轨道畸变均方差减低至 0.132mm。垂直方向从最大值 - 3.646mm 减小到 0.172mm,轨道畸变均方差降低到 0.082mm。校正之后,轨道的抖动被控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 之内。

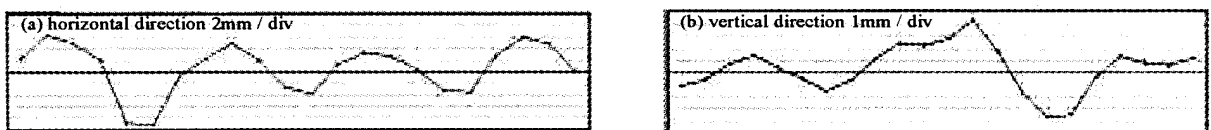


Fig. 11 Closed orbit without orbit correction

图 11 水平、垂直方向校正前的轨道位置



Fig. 12 Closed orbit with orbit correction
图 12 水平、垂直方向校正后的轨道位置

3 结 论

综上所述,可以看到升级后的 HLS 系统具有宽的动态范围,高的测量精度,远程控制和显示带来了使用方便等优点。小于 $10\mu\text{m}$ 在线位置检测误差和高达 $1\mu\text{m}$ 分辨率完全满足合肥同步辐射光源二期工程结束后高的储存流强和高品质光源检测要求,而且运行性能稳定、可靠。在此基础上采用局部凸轨所做的 BBA 的测量和随后所做全环闭轨校正获得了令人满意的结果。2003 年初一个完整的 BPM 系统投入了运行,为机器运行性能的提高取得了很好的实验成果。

参考文献：

- [1] Wang J H, Yin Y, Li J Y, et al. A closed orbit measurement with the NSRL BPM system[A]. Proceedings of PAC '99[C]. New York. 1999. 2048—2050.
- [2] Wang J H, Liu J H, Sun B G, et al. Control of NSRL BPM system and VXFBASED application of LabVIEW development environment[A]. Proceedings of PCaAPAC 2000[C]. Hamburger: 2000. 88.
- [3] 王筠华, 刘建宏, 刘祖平, 等. 注入段束流位置探头定标电场的拟合和误差计算[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(5):521—525. (Wang J H, Liu J H, Liu Z P, et al. The electric field fit and error calculation of the calibration system for BPMs in HLS injection segment. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(5):521—525)
- [4] Sun B G, Wang J H, Lu P, et al. Several new beam measurement systems for HLS[A]. Proceedings of PAC2001[C]. Chicago: 2001. 2317—2319.
- [5] 孙葆根, 何多慧, 卢平, 等. 合肥光源利用电阻分流法的基于束流准直系统的研制[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(6):777—780. (Sun B G, He D H, Lu P, et al. Development of beam-based alignment system using a switchable shunt resistor for HLS. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(6):777—780)
- [6] 李京祎, 刘祖平, 王筠华. 合肥光源电子储存环束流闭轨的局部校正[J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(2):38—41. (Li J Y, Liu Z P, Wang J H. Local correction of COD for electron storage ring of HLS. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10(2):38—41)
- [7] 李京祎. HLS 控制系统改造及其物理应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2002. 30—35. (Li J Y. Improvement of control system and application research of HLS. Hefei: University of Science and Technology of China, 2002. 30—35)

Upgraded closed orbit distortion system and its application in Hefei light source

WANG Jun-hua, SUN Bao-gen, LI Jing-yi, LIU Zi-ping, LI Wei-min, LIU Jian-hong, LU Ping
(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China,
P. O. Box 6022, Hefei 230029, China)

Abstract: The paper presents an upgraded close orbit distortion(COD) system and its application in phase II project of HLS, and introduces Bergoz's modules for COD signal process. The upgraded COD system, with resolution of processing electronics circuit up to $1\mu\text{m}$ and repetition error of system not greater than $10\mu\text{m}$, is operated in routine. The measurement of dispersion validated the reliability of upgraded COD system. We have completed to position the beam in the magnetic center of a quadrupole using the high precision COD system and the beam based alignment system. We have accomplished global close orbit correction system and its application on line. The improved beam quality can provide a stable light source for users.

Key words: Beam position monitor(BPM); Closed orbit distortion(COD); Beam based alignment system; Global close orbit correction system