

HLS 闭轨监测系统的升级与数据获取*

王筠华¹⁾ 刘建宏 卢平 孙葆根 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 描述了二期工程中 NSRL 电子储存环束流位置监测系统的升级及其数据获取. 介绍了 Bergoz BPM 电子学信号处理模块和基于 VXI 的数据获取模块以及网络互连技术在闭轨测量系统中的应用. LabVIEW 软件开发环境则提供了好的硬件控制, 提高了开发效率. 升级后的束流位置测量系统在线监测误差, 即它的长期可重复性 $\leq 10\mu\text{m}$, 处理电子学分辨率可达 $1\mu\text{m}$.

关键词 束流位置监测系统(BPM) 闭轨测量(COD) 钮扣电极(button)
色散函数 VXI LabVIEW

1 引言

HLS 电子储存环是专用的同步辐射装置, 对于光源的品质有较高的要求. 该光源是 200MeV 注入, 在 800MeV 能量、100—300mA 流强下运行, 高频频率是 204.035MHz. 二期工程结束后, HLS 储存流强应达 300—500mA, 轨道应稳定运行在 $30\mu\text{m}$ 以内. 由此看出, 束流位置稳定度是衡量光源质量的一个重要标志, 国际上各高能加速器实验室都很重视闭轨测量及闭轨反馈校正系统. 通常采用 COD 系统(Close orbit Distortion)来完成闭轨测量.

COD 系统可由信号检测(Pick-up)电极、信号处理和数据获取 3 个主要部分组成. 八五期间我们曾对 NSRL 储存环 BPM 进行了初步改造. 特别是采用了基于高频频率窄带滤波、单频处理电子学线路, 使得该设备在 1996 年以 $50\mu\text{m}$ 在线监测误差和 $10\mu\text{m}$ 分辨率投入了正常运行. 利用它完成了闭轨测量和局部凸轨校正的初步试验^[1,2]. 但它的系统分辨率和精度以及稳定性和可靠性仍远不能满足二期工程后高品质光源监测要求, 因此升级 COD 系统, 成为 NSRL 二期改造工程重要研究课题之一.

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、处理和数据获取系统, 而信号检测仍利用环上原安装的 Pick-up 电极. 在信号传输上, 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(详见第 2 节); 在信号处理上, 选择法国 Bergoz 公司生

2001-06-11 收稿

* 国家重大科学工程(NSRL)二期工程基金资助

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

产的 BPM Module 作为模拟信号处理器,这大大地提高了该监测系统的分辨率和精度;在数据获取上,采用基于 VXI 以及网络互连技术和 LabView 软件支持来完成.在此基础上,实现了稳定的远距离办公室控制和跟踪快速闭轨变化动态显示(详见节 3).

在以上技术措施的保障下,一套高精度和高稳定性的闭轨测量系统在今年上半年很好地投入了运行.它的长期可重复性 $\leq 10\mu\text{m}$,处理电子学分辨率达 $1\mu\text{m}$.在该系统所测数据的基础上,近期我们完成了基于束流准直(BBA)测量和闭轨反馈校正^[3,4],这对提高 HLS 光源品质,为用户提供高稳定的光源具有重要的意义.

2 信号检测和处理过程

HLS 储存环周长为 66m,目前沿圆形真空管道环上分布 27 个电容型钮扣式 BPM.每个 BPM 有 4 个与 x, y 方向呈 45° 分布拾取信号的 pick-up 电极.其直径为 25mm.它在环上的分布和单个 BPM 构造请参考文献[1]. HLS 横向自由振荡频率 $\nu_x = 3.54, \nu_y = 2.61$.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,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,同时也节约了经费.

2.1 模拟信号处理电子学

为了避免经过多个中间开关过程引起信号传输的复杂性和不可靠性,在升级的 BPM 系统中,选择了并行处理来自每个 BPM 信号的方案,即 BPM 和处理电子学模块一一对应,新系统完成一次数据获取时延小于 1ms(原线路需要 11s),这意味着所测轨道基本具有同时性.

模拟信号处理电子学线路,选择了法国 Bergoz 公司生产 BPM Module¹⁾.该 Module 的动态范围约 60dB,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.这大大提高了线路的信噪比和分辨率.该 Module 由低通滤波(1GHz),4 选 1 GaAs 开关,带通滤波,低噪声放大,混频系统和 中频放大等电路组成,最后在 Module 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.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. Module 的框图如图 1.

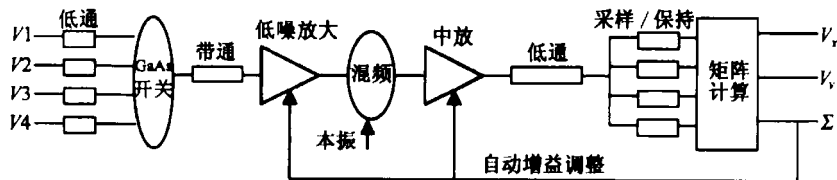


图 1 Bergoz Module 框图

1) Bergoz BPM module user manual 法国 Bergoz 公司 BPM 模块使用手册

上述信号处理电子学系统优点是动态范围宽(60dB),对应 HLS 储存流强 500mA 测量时而不需要编程衰减控制;测量精度高,桌上实验 Module 输出可重复性 $\leq 5\mu\text{m}$,分辨率可达 $1\mu\text{m}$;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.束流在真空室的位置偏移量, x, y 与 Module 输出 V_x, V_y 和系统增益关系可参阅文献[5].

2.2 信号处理过程

来自 22 个 BPM pick-up 的电极信号经过 GX03272 电缆分别送至 2 个 BPM Module 机箱. BPM Module 机箱与 VXI 机箱和用于控制的工控机及部分束流测量设备一起放置在储存环内侧的本地机柜中. Module 输出的模拟位置信号 V_x, V_y 首先经过 VXI-SC 信号调理板,该信号调理板放置在 VXI 机箱中并带有 200Hz 低通滤波. 板上适当地低通滤波的选取是至关重要的,因为它不仅需要滤除存在在 Module 输出信号中 2kHz(GaAs)开关工作频率信号,而且也要滤除信号谱中其他噪声信号. 滤波后的模拟信号经过 16 位精度 ADC 转换为数值信号再被送到 VXI 总线并传输到 Ethernet 和 EPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)数据总线,实现束流位置在线实时监测并用于闭轨反馈. BPM 系统的结构与信号过程见图 2,软件系统架构见图 3.

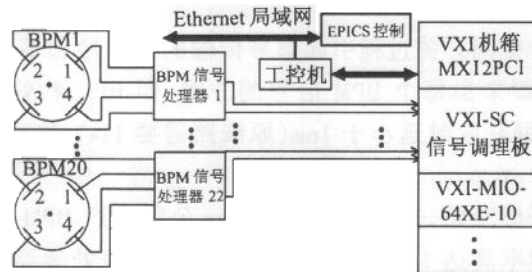


图 2 BPM 系统硬件结构

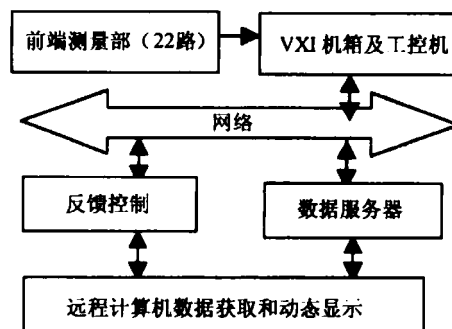


图 3 BPM 软件系统架构图

3 数据获取和系统控制

3.1 数据获取

HLS BPM 数据获取是由 VXI 硬件技术和 LabView 软件支持完成的。VXI 总线是 VME 总线在仪器领域里的扩展,由于它的标准开放,结构紧凑,具有数据吞吐能力强,可靠性强,定时和同步精确,模块可重复利用等优点,在近 10 年时间内,VXI 总线规范不断完善和发展,迅速在仪器测量和工业控制以及加速器等领域得到广泛的应用。

我们采用一只泰克公司生产的智能 13 槽 VX4101 机箱服务 NSRL 束测系统:BPM 数据获取系统模块、DCCT 监测模块和光位置测试光位置测试都被集成在 VXI 机箱内。为了降低造价,保证控制能力的扩展性和可升级能力,我们采用了 VXI-MXI 外接式零槽控制器。MXI 总线是一种多系统扩展接口总线,可以实现多个 VXI 机箱间的 32 位数据交互,由于它可以直接映射 VXI 内存空间,因此在提高数据传输速率方面具有很大优势。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。束流闭轨校正系统要求能够抑制束流闭轨的十几 Hz 的振荡,这要求 COD 系统能够反映束流闭轨运动的十几 Hz 的信息,需要把束流闭轨运动情况以近 30Hz 的速率送给控制系统。现以 40Hz 的速率发送束流闭轨运动状况数据包,每个数据包包含 22 个 BPM 处的横向坐标 (x, y) ,每个 x 或 y 是平均近 50 次再经过计算而得到。采集率为 100K 的 AD 接近满负荷工作。

软件方面,采用 NI 公司的 LabView 开发平台。NI LabView 开发平台提供了强大的仪器控制,由于其数据流式编程过程具有丰富的功能模块和仪器驱动程序库,大大提高了开发速度,简化了程序设计。既保证了专业级的硬件驱动控制,又提高了运行效率和性能。所测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。获得的结果从工控机经 UDP 接口发送到 2 个服务器,其中一个为数据服务,另一个用于闭轨反馈。我们的工控机采用 INTEL PII CPU, Windows NT 4 操作系统。所有类型数据和控制信息经本地 Ethernet 送到中央控制室 EPICS 控制器和服务器。

3.2 系统控制

升级后的 BPM 系统控制具体编程采用中级的 VI 模块,VXI 模块驱动由 NI LabView 默认的驱动 VXI PLUG&PLAY 支持。利用循环结构做定时定点测量,结果送入数据处理模块。软件开发重要部分之一,由于此处要用到复杂的多项式运算,事先需要读入多达 440 个系数,然后对每个位置测量取 22 个做运算。为实现上述运算,采用 DLL(动态链接库)封装技术,将所有核心运算都包含在一个 DLL 文件中,在 LabView Diagram 中引用 Call Library Function 模块来调用库中的函数做运算,而且所有系数也可以直接作成数组封到库中去,用户只能看到几个外部接口。既简化了程序设计,提高了运行效率和性能,又保证了安全性和可靠性。

4 BPM 系统测试数据的分析

4.1 BPM 系统测试数据

从下面 1 号 BPM 运行历史曲线图 4 可看出,升级后 BPM 系统在线位置误差,即它的长期可重复性 $\leq 10\mu\text{m}$. 该偏差应该包括束流动量分散所引起的偏移和闭轨畸变以及 BPM 电子学系统测量精度 ($\leq 5\mu\text{m}$) 等. 在线长期位置重复误差 Δx 由下式表示:

$$\Delta x = \Delta x_{\beta} + \Delta x_e + \Delta x_c + \Delta x_n; \quad (1)$$

Δx_{β} 为 Betatron 振荡引起的位置移偏, Δx_e 为动量分散所引起的位置移偏, Δx_c 为闭轨畸变, Δx_n 为 BPM 电子学和数据获取系统所引起位置的偏移.

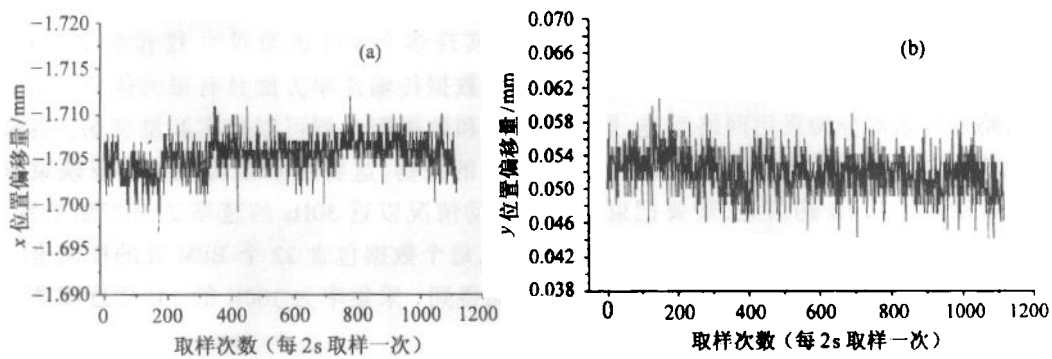


图 4 BPM 运行历史曲线

4.2 噪声引起位置的偏移

为了获得电子学热噪声所引起位置的偏移,我们首先估算信噪比. 对于频域信号处理系统,根据文献[6],Buttom 电极上所获得的感应电压为

$$V_b = \frac{2\pi a^2}{b\beta c} Z A_m f_b I_{avg}, \quad (2)$$

b 为真空管道半径, a 为 Buttom 半径, Z 为同轴阻抗, A_m 为系数(决定于束团形状和使用的谐波数), f_b 为束团频率, I_{avg} 为平均束流强度. 当谐波数 ($m=1$ 时, $A_m=1$), 当平均束流强度为 100mA 时, 感应信号的功率为

$$P_s = \frac{1}{2} \frac{V_b^2}{Z} = \frac{2\pi^2 a^4}{b^2 \beta^2 c^2} Z A_m^2 f_b^2 I_{avg}^2 = 6.026 \times 10^{-6} (\text{W}), \quad (3)$$

因为 BPM Module 线路带宽为 400kHz, 其噪声功率

$$P_N = 4K_B T B = 6.6 \times 10^{-15} (\text{W}), \quad (4)$$

K_B : 波耳兹曼常数, 则: $SNR = \frac{P_s}{P_N} = 89.8\text{dB}$.

由 4 个电极的感应电压经过处理电子学线路噪声引起的位置偏移为

$$\delta x = \frac{b}{2\sqrt{2}} \times \frac{1}{\sqrt{SNR}} = 0.5\mu\text{m}. \quad (5)$$

以上计算可以看出,理论计算的线路噪声引起的位置偏移是一小量.实际上,我们只考虑了热噪声,而电子学线路和器件还应该具有散弹噪声、分配噪声、1/f 噪声等,因此线路噪声引起的位置偏移是应远大于该量.通过对信号处理电子学线路检测实验得到,在测量动态范围内(-50—+10)dB_m,输出均方根噪声电平 $V_{\text{rms}} < 3\text{mV}$,它将引起的位置偏移约 $5\mu\text{m}$.其他位置偏移应考虑来自上述的其他因素.

5 BPM 系统测试的应用

随着 COD 系统在线测量的实现,众多课题相继开展成为可能.如为了存储轨道能稳定运行在平衡轨道,保证光源高流强和高品质的运行,基于束流准直(BBA)测量 BPM 相对于相邻四极磁铁中心的位置和闭轨反馈校正任何存储环研制和运行中是不可避免的.在升级后的 HLS 高精度 COD 系统测试数据基础上,利用局部凸轨和基于束流准直(BBA)技术,近期我们完成了 BPM 相对于相邻四极磁铁中心位置测量^[3],随后完成了相对于参考轨道的全环闭轨校正.校正后,所有 BPM 均方标准误差从 1.33 减到 0.034,最大的轨道误差从 3.419mm 减小到 0.079mm.校正后的轨道,几乎与参考轨道相重合^[4].

利用升级后的高精度 COD 系统,我们还进行了色散函数的测量.当改变高频频率时,利用测量轨道的变化得到色散函数^[7]

$$\eta(s) = -\alpha_c \frac{\Delta x(s)}{\Delta f_{\eta}/f_{\eta}}, \quad (6)$$

其中 α_c 是动量压缩因子,可以测量和计算得到,这里选择计算值 0.0461.利用升级后的 COD 系统,完成了 HLS 色散函数的测量^[3].从图 5 可以看出测量值和理论计算值是非常吻合的.

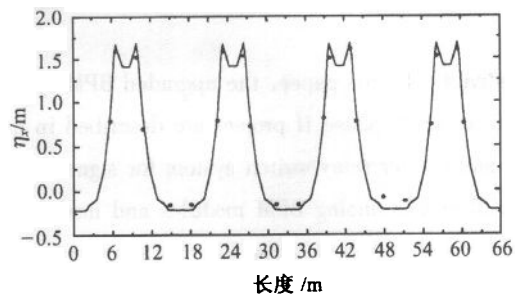


图 5 水平色散函数测量值与理论值的比较
——理论色散函数,·新 BPM 系统测量的色散函数.

6 结论

以上介绍可以看到,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.而且它还具有稳定、可靠运行性能,将为机器各个部件性能的研究和改造提供强有力的依据.

参考文献 (References)

- 1 WANG Jun-Hua, YIN Yan et al. A Closed Orbit Measurement with the NSRL BPM System, PAC99, Proceedings of the 18th PAC (PAC99), New York USA, 1999, 2048—2050
- 2 LI Jing-Yi, LIU Zu-Ping, WANG Jun-Hua. High Power Laser and Particle Beams, 1998, 10(2):291—295(in Chinese)
(李京祎, 刘祖平, 王筠华. 强激光与粒子束, 1998, 10(2):291—295)
- 3 SUN Bao-Gen, WANG Jun-Hua, LU Ping et al. Several New Beam Measurement systems for HLS. Proceedings of PAC'2001, 2001.6, Chicago, Illinois
- 4 LI Jing-Yi, LIU Gong-Fa, LI Wei-Min et al. Closed Orbit Correction of HLS Storage Ring, Proceedings of PAC'2001, 2001.6, Chicago, Illinois
- 5 WANG Jun-Hua, SHEN Lian-Guan, WANG Guei-Cheng et al. HEP & NP, 2001, 25(11):1120(in Chinese)
(王筠华, 沈连官, 王贵诚等, 高能物理与核物理, 2001, 25(11):1120)
- 6 Stephen R. Smith. Beam Position Engineering, BIW96 P50—65, New York, USA
- 7 Zimmermann F. Measurement and Correction of Accelerator Optics, Beam Measurement P21—107, Switzerland, May 1998

Upgraded COD System and Data Acquisition of HLS*

WANG Jun-Hua¹⁾ LIU Jian-Hong LU Ping SUN Bao-Gen LIU Zu-Ping

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

Abstract In this paper, the upgraded BPM system including the data acquisition instrumentation of HLS in NSRL phase II project are described in details. In the upgraded BPM system, we wash out the multiplexer relay switch system for signal transmit formerly and adopt paratactic signal processing. Bergoz's analog BPM modules and modular VXI instruments are adopted for BPM signal processing and data acquisition in order to provide stable and credible performance. The Lab VIEW development environment not only provides good hardware controls but also promotes the development efficiency. After upgrade the new COD system with repetition error $\leq 10\mu\text{m}$ and resolution $1\mu\text{m}$ is achieved in routine operation. Lately using the upgrade COD system we have completed the measurement of dispersion and one of magnetic field center for quadrupole magnet in beam based alignment(BBA) with local bump orbit, and have processed the experiment of global close orbit correction for HLS storage ring.

Key words beam position monitor (BPM), closed orbit distortion, button, dispersion function VXI, LabVIEW

Received 11 June 2001

* Supported by National Important Project on Science-Phase II of NSRL

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