

合肥光源逐圈测量系统定标及其应用*

王筠华¹⁾ 刘建宏 孙葆根 李为民 刘祖平 杨永良

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 介绍合肥光源(HLS)逐圈测量系统和工作在408MHz的对数比率电子学处理系统的原理和性能. 利用逐圈测量系统可以测量HLS储存环的Damping率、注入效率、Beta振荡、 v 值瞬时变化等, 以此研究束流不稳定性, 为机器稳定高性能运行提供了一个强有力的测试手段. 在系统的设计中, 选择了新近受到广泛重视的对数比电路完成位置信号处理. 它不仅具有宽的动态范围和带宽以及好的线性度, 而且造价低廉易实现. 本文重点介绍了HLS逐圈测量系统的在线定标、灵敏度和它在升级后新注入调试中的重要应用. 实践证明, 该系统对新注入系统的调整是相当有用的. 它是开展储存环的非线性动力学研究, 观察动力学孔径不可缺少的设备.

关键词 束流位置监测系统 逐圈测量 对数比率线路

1 引言

束流位置监测系统(BPM)是储存环上非常重要的监测设备之一. 目前世界上大部分实验室对束流位置的检测, 一般采用三套系统用作多项课题的研究. 其一, COD系统(Close Orbit Distortion), 它主要是为检测Damping后的平均束流位置的偏移, 然后进行全闭环轨校正或局部凸轨的反馈校正^[1,2]. 其二, 逐圈测量(tum by tum)系统, 是测量一圈一圈束流轨迹信号. 它可用于监测注入时的束流位置, 判定注入效率、Damping率; 研究beta振荡; 采用两个BPM能够作相空间测量, 研究储存环上的束流不稳定性和动力学孔径等. 该系统正在现场实验中. 其三, 近几年来, 由于多束团不稳定性严重地影响储存流强不能达到预定的设计指标, 阻碍了高流强、高亮度的实现. 因此90年代中, 为了研究束流不稳定性, 并且抑制它, 世界上众多实验室先后开展了逐束团测量和快速反馈系统研制, 即通称Bunch by Bunch系统. 该系统HLS正在研制中. 本文主要介绍正在实验、改进和应用中的逐圈位置测量系统性能、它的定标和初步实验结果.

2 电子学框图及各部分的功能

HLS逐圈测量系统框图如图1. 它是由前端pick-up电极、对数比率电子学电路^[3,4]、时钟系统、ADC数据转换和采集模块以及激励系统组成. 时钟

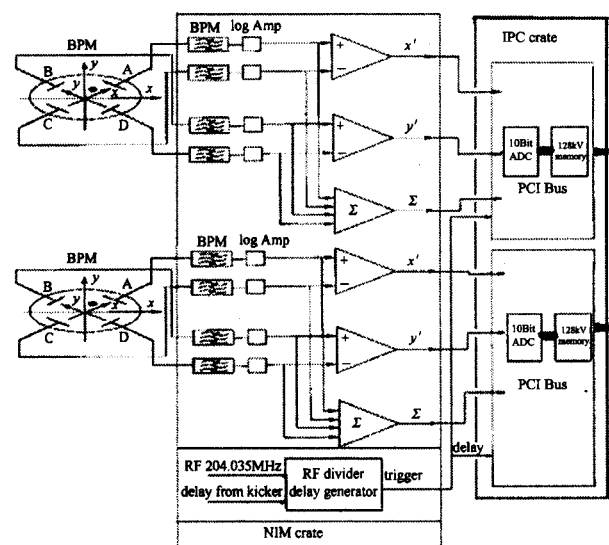


图1 Turn by turn系统示意图

2003-07-01 收稿, 2003-10-05 收修改稿

* 国家重点项目 NSRL 二期工程和国家自然科学基金(10175063)资助

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

系统置在 NIM 机箱中,数据转换和采集系统放置在工控机中. 利用注入 kicker 激励束. 该系统可用作逐圈和相空间两项函数测量^[5].

3 信号处理

3.1 对数比率信号处理器

因为对数比率线路具有两路输入的特点. 它很适合测量电极成对水平和垂直放置的 BPM. 而 HLS BPM 探测电极是倾斜水平和垂直轴 45°放置的(详见图 1). 为了满足高性能和低成本的要求,采用了 对数比率、窄带滤波、频域处理信号技术. 选择法国 Bergoz 公司的商业对数比率(log-ratio BPM)模块作为信号处理器. 它直接工作在 408MHz(2 × PF of HLS)频率下. 该 LP-BPM 模块由带通滤波、对数放大、差分放大等电路组成. 输出 ±2V 范围并带有轴旋转计算模拟信号功能. 它具有低噪声、高带宽、宽的动态范围和较低耗费等优点. 该处理器能工作在采样保持、跟踪保持和连续跟踪 3 种模式下^[6]. 处理器系统框图如图 2.

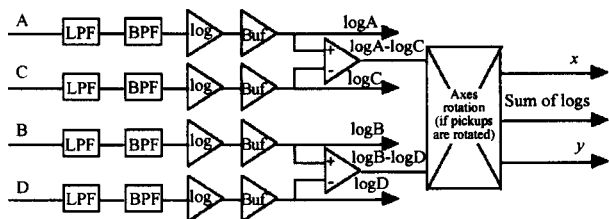


图 2 408MHz 对数比率处理器系统框图

3.2 LR-BPM 模块动态范围检测

LR-BPM 运行在连续跟踪模式下,就能完成逐圈测量任务. 检测 LR-BPM 模块动态范围的实验,采用正弦信号经一分四功分器后输入到 LR-BPM 的 4 个输入端 A, B, C, D. 其中 A 串接可编程衰减器,模拟束流在真空管道中的位置,用示波器接收到

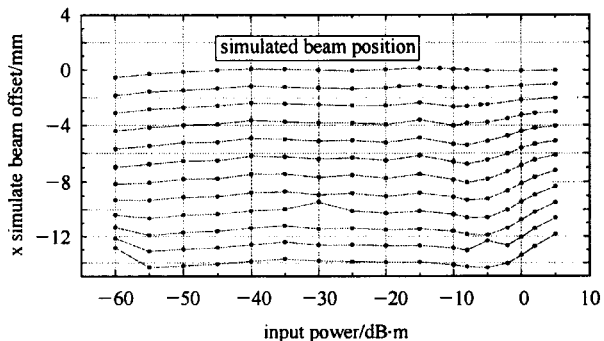


图 3 408MHz 对数比率电路的动态范围检测曲线

LR-BPM 输出近似直流 x 和 y 模拟电压信号,它正比于束流偏离管道中心的偏移量,获得的测量曲线如图 3. 从图 3 可以看出,LR-BPM 输出 x 和 y 在 ±5mm 之内时,线性动态范围约 65dBm. 而在 ±15mm 之内时,线性动态范围只有 45dBm. 其中,个别点由于判读误差所致.

4 系统的定标

根据 log-ratio 处理器性能,束流 x, y 位置是电极电压 log-ratio 的线性函数. 以 x' 为例,它由下式来表示:

$$x' = \frac{20}{SG_{ex}} \log \frac{A}{C} = \frac{1}{SG_{ex}} [20 \log A - 20 \log C] = \frac{1}{SG_{ex}} V_{out} = \frac{1}{G_x} V_{out} = K_x V_{out}, \quad (1)$$

s (dB/mm)为 BPM 探测电极灵敏度; A, C -探测电极电压; G_{ex} (mV/dB)是电子学增益,它包括对数放大器 and 差分放大器和系统其他的增益; G -系统总的灵敏度; K -比例系数; V_{out} -差分放大器输出. 由于对数放大器输出被归一化,所以该线路所计算的函数独立于束流的幅度.

考虑倾斜水平和垂直轴 45°放置的探测电极,两个坐标之间有以下关系:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}, \quad (2)$$

4.1 探测电极灵敏度

如果探测器管道半径 R ,假设束流(线电荷 η)在 45 度线上偏向电极 A 处,距离中心 r 处,根据镜像法,在管道外距离中心 i 处有一个线电荷 ($-\eta$),且保证边界零电势,即 $r \times i = R^2$.

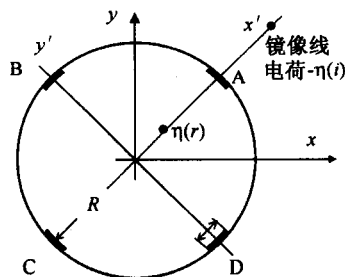


图 4 具有束流电荷和镜像电荷的位置检测器示意图

R 为真空室半径,用高斯定律可得两电荷在电极 A 和电极 C 处所产生的电场分别为

$$E_A = \frac{\eta}{2\pi\epsilon} \left(\frac{1}{R-r} + \frac{1}{i-R} \right);$$

$$E_c = \frac{\gamma}{2\pi\epsilon} \left(\frac{1}{R+r} - \frac{1}{R+i} \right), \quad (3)$$

电极上感应电荷密度 $\sigma = E^* \Delta B$, 假设电极嵌入管道表面足够小, 且 $r/R \ll 1$, 则

$$\ln\left(\frac{\sigma_A}{\sigma_c}\right) = \ln\left(\frac{1 + \frac{r}{R}}{1 - \frac{r}{R}}\right)^2 \approx 4 \frac{r}{R}, \quad (4)$$

即:

$$\begin{aligned} r &= X' = \frac{R}{4} \ln\left(\frac{\sigma_A}{\sigma_c}\right) \\ &= \frac{R}{80} \ln 10 \times 20 \log\left(\frac{\sigma_A}{\sigma_c}\right) = K'_x \log\left(\frac{\sigma_A}{\sigma_c}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

所以, 探测电极机械灵敏度:

$$S = \frac{80}{\ln 10} \frac{1}{R} \text{ (dB/mm)}, \quad (6)$$

4.2 电子学增益定标

电子学增益定标实验框图类似 LR-BPM 模块动态范围的检测实验. 图 5 是 x 方向定标拟合曲线, y 方向类同.

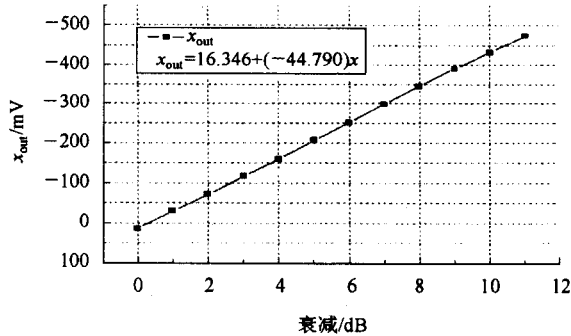


图 5 定标拟合曲线图

考虑到模块输出已经进行了 45 度翻转, 那么:

$X' = \sqrt{2}X$. 则系统总的定标系数:

$$K_x = \frac{1}{SG_{ex}} = \frac{1}{G_x} = 0.0195 \text{ (mm/mV)}.$$

4.3 系统的在线定标

为了检验桌上定标的可信性, 利用闭轨畸变系统 (COD 系统), 采用局部凸轨法对它们进行了相对定标. 当不断改变四极铁 Q7s 两边的校正铁电流, 这相当于束流在管道中不断改变的位置^[2] (见图 7), 然后分别测出在 Q7s BPM 处 COD 系统表现出的位置变化量和逐圈系统对数比输出的电压关系 (见图 6), 从而完成逐圈测量系统的在线定标.

从图 6 曲线可知, $K_{xl} = \frac{1}{G_x} = 0.0199 \text{ (mm/mV)}$,

两种定标是非常一致的, 它充分说明了定标的可靠性.

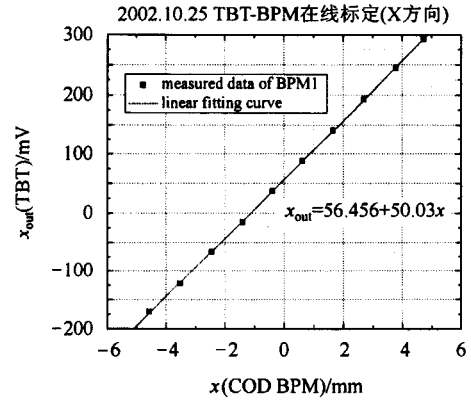


图 6 系统的在线定标曲线

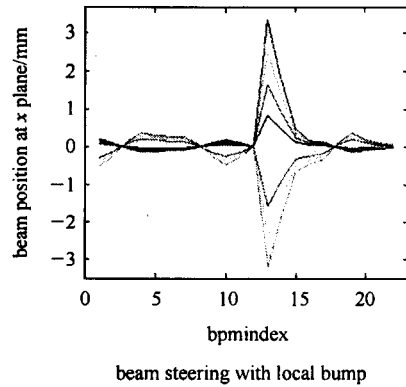


图 7 四极铁 Q7s 附近的局部凸轨

5 逐圈测量系统在注入调试中的应用

5.1 新注入 4 Kicker 磁场误差引起的电子振荡^[7]

升级的注入系统由 4 块 Kicker 磁铁组成一局布凸轨. 为了注入不影响外部运行轨道, 显然要求, $\theta_1 = -\theta_2 = -\theta_3 = \theta_4$, 即 $\sum \theta_i = 0$. 如果冲击磁场径向不均匀, 积分场不一致, 即当 $\sum \theta_i \neq 0$ 将引发 $\Delta x = \frac{\beta \cos \pi v_x}{2 \sin \pi v_x} \Delta x'$ 的横向振荡. 全环闭轨将受到扰动. 例如, 当 K_3 和 K_4 之间存在误差时, 引起闭轨角度扰动量 $\Delta x'$ 如图 8 所示.

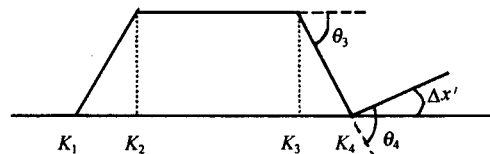


图 8 Kicker 冲击磁场径向不均匀性

5.2 逐圈测量结果的分析

在4块 Kickers 磁铁新的注入系统与装置联调时,虽然采用了很多方法,但是束流积累只能到80mA.注入过程中,由束流截面测量系统测出的束斑图像上看出有明显的暴散现象(BBU)发生.逐圈测量系统 LR-BPM 输出示波图如下.以下示波图 CH_1, CH_2 分别代表 x 和 y 方向,且垂直灵敏度同为 50mV/div ,水平扫描速度为 $2\mu\text{s/div}$.

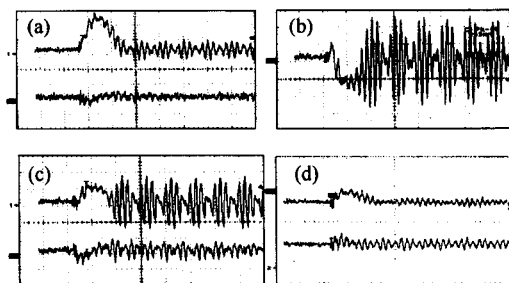


图9 LR-BPM 输出波形图

当 K_1 和 K_2, K_3 和 K_4 分别加上大小相等方向相反功率时,示波图分别如图9(a)和(b).而当4Kicker

磁铁线圈同时加功率时,如图9(c).从示波图明显看出,每一对的积分场不相等和不对称(尤其是 $\theta_3 \neq \theta_4$),进而引起注入过程中大的 β 残余振荡,使得束流不能很好的积累.在对磁场线圈进行精细的重新构造后,并且反复细心调整它们电感,使得它们磁场均衡后,4Kicker 同时加电时,LR-BPM 输出变成图9(d).这时, β 残余振荡下降之 30mV .注入束流积累迅速升至 200mA 以上,效果相当明显.

6 综述

从以上实验和初步的应用可以看出,新近研制的逐圈测量系统是 HLS 存储环机器调试运行和研究中不可缺少的设备.利用该系统还可开展储存环的非线性动力学研究,观察动力学孔径和 ν 值随时间的变化等.在线定标检验了桌上定标的可信性并进一步证明了系统的可靠性.通过实验中获得的数据和图形分析,证明该系统能精确、可靠很好的完成逐圈测量任务.

参考文献 (References)

- 1 WANG Jun-Hua et al. HEP & NP, 2002, 26(6): 632—638 (in Chinese)
(王筠华等.高能物理与核物理, 2002, 26(6): 632—638)
- 2 WANG Jun-Hua, SUN Bao-Geng, LI Jing-Yi et al. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(8): 825—829 (in Chinese)
(王筠华, 孙葆根, 李京祎等.强激光与粒子束, 2003, 15(8): 825—829)
- 3 Shafer R E. Log-Ratio Signal-Processing Technique for Beam Position Monitors, AIP conf. Proc. (1993): 120—128
- 4 Aiello G Roberto. Log-Ratio Technique for Beam Position Monitor Systems, AIP Conf. Proc. (1993): 301—310
- 5 WANG Jun-Hua, LI Wei-Min, SUN Bao-Geng et al. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(4): 485—488 (in Chinese)
(王筠华, 李为民, 孙葆根等.强激光与粒子束, 2002, 14(4): 485—488)
- 6 BERGOZ Instrumentation Company from France, Log-ratio Beam Position Monitor User's Manual
- 7 Shang Lei. The Physics Design and the Vacuum Duct Development of Ceramic Coat for New Injection System of HLS. Hefei: Doctor Thesis of USTC, October 1999 (in Chinese)
(尚雷. HLS 新注入系统的物理和陶瓷喷涂真空室的研制.合肥:中国科学技术大学博士论文, 1999. 10)

Calibration of Turn-by-Turn System of HLS and Its Application *

WANG Jun-Hua¹⁾ LIU Jian-Hong SUN Bao-Gen

LI Wei-Min LIU Zu-Ping YANG Yong-Liang

(NSRL, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract In this paper, the turn-by-turn system of Hefei Light Source (HLS), and the log-ratio electronics circuit with working frequency 408MHz ($2 * \text{RF}$ of HLS) are described. They are used to monitor the injection effectiveness, damping rate, β oscillation and v variation for research the instability of beam. The Log-ratio signal processor has low noise, high bandwidth and wide dynamic range, as well as linear response. The calibration of the system and its application in commissioning of the upgraded injection system of HLS is emphases. The practice proves the turn-by-turn BPM system is quite useful for the beam-injection adjusting and indispensable for machine research.

Key words beam position monitor system (BPM), turn-by-turn system, log-ratio signal processor

Received 1 July 2003, Revised 5 October 2003

* Supported by National Key Project on Science-Phase II of NSRL, National Natural Science Foundation of China(10175063)

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