

BEPC II 储存环束团流强测量^{*}

邓庆勇, 曹建社, 叶 强, 岳军会, 张 丛, 王鹏飞

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 针对北京正负电子对撞机二期工程(BEPC II)原束团流强测量系统(BCM)不能稳定运行的问题, 对系统进行了升级。利用高速 ADC 对束流位置探头(BPM)信号直接采样, 在现场可编程门阵列(FPGA)内进行实时数字信号处理, 进而得到加速器储存环内的束团流强值。基于反射内存网络, 系统可以实现测量结果高速共享、实时显示。升级后系统实现了更高精度的测量, 实时显示精度到 0.1 mA, 最佳测量精度达到 10 μ A。通过对系统的触发时钟和算法结构调整, 系统实现了长时间的稳定工作, 正负电子储存环均实现了对束团流强的均匀性控制, 提高了加速器的对撞亮度。

关键词: 束团流强; 逐束团; 束流位置探头; 反射内存; 现场可编程门阵列

中图分类号: TL506 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB201426.075101

对于多束团储存环加速器, 束团流强测量是束流监测的重要手段, 是研究注入填充模式和束流不稳定性阈值的重要方法^[1-3]。大型加速器如 KEKB, NSLS-II 和 PEP-II 等, 均有原束团流强测量(BCM)系统^[4-7]。基于束团流强测量的结果, 注入控制系统可以选择流强最小的束团进行补注, 实现束团流强的均匀性控制。均匀的束团流强有助于束团串的稳定, 减小因为不稳定引起的丢束情况。尤其是先进光源在 top-off 模式下, BCM 更是不可或缺的。对于对撞机而言, 均匀的束团流强也有助于达到更高的对撞亮度。

BCM 系统有基于反馈系统设计的, 也有单独设计的。其前端信号拾取装置有 BPM、同步辐射光、快速电流变压器(FCT)和壁电流探头(WCM)等^[8], 后端多采用高速 ADC 采样, 再进行时域的束团信号分离, 通过数字信号处理得到每个束团流强的相对值。为了更高的分辨率, 基于同步辐射光和时间符合单光子计数技术(TCSPC)的系统也在研究和应用, 但是该类系统实时性较差, 无法实现测量结果的实时反馈。BEPC II 储存环在 2008 年建立了一套 BCM 系统^[9-11], 但该系统无法实现长时间稳定测量, 且系统的测量精度较低。针对更高精度测量和长时间稳定运行的需求, 在该系统的基础之上, 对该系统的数据采集系统和反射内存卡网络等主要部分进行了升级, 并改进了信号处理算法, 从而提高了系统精度和稳定性。在对撞模式下测量精度达 10 μ A/bucket, 显示精度达到 0.1 mA/bucket, 并且系统实现了长期稳定运行, 有助于有效控制束团流强的均匀性, 提高了对撞亮度。另外还对中央控制室的显示程序进行了优化改进, 方便了调束人员使用。本文介绍了系统的升级情况以及对实验结果的分析, 并且对系统如何长时间稳定工作进行了讨论。

1 束团流强测量系统主要参数

BEPC II 有电子同步辐射和正负电子对撞两种运行模式, 系统需要在两种模式下运行的, 且可以方便切换。电子同步辐射模式下只有电子的单环, 谐波数为 402; 对撞模式下有正电子和负电子两个储存环, 谐波数均为 396。表 1 列出了束团流强测量系统设计涉及的主要物理参数。

表 1 束团流强测量系统设计涉及的主要物理参数

Table 1 Main physics parameters for bunch current monitor system

parameter	RF frequency/ MHz	harmonic number	minimum bunch space/ns	injection rate/Hz	total beam current/mA	measurement range/(mA · bunch ⁻¹)
colliding mode	499.8	396	2	50	910	10
synchrotron radiation mode	499.8	402	2	12.5	250	20

* 收稿日期: 2013-10-22; 修訂日期: 2014-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1332108)

作者简介: 邓庆勇(1987—), 男, 博士, 主要从事逐束团测量研究; denqgy@ihep.ac.cn。

2 系统结构

BCM 系统包括四个部分:BPM 及前端、数据采集处理系统、显示系统和 Bucket 选择系统。模拟信号用同轴电缆传输,数字信号的传输是基于高速反射内存网路。系统框图如图 1。

在正负电子环上,BPM 分别选用 R4ISBPM1 和 R1OBPM16。前端电子学放置在隧道附近,主要完成 BPM 四路信号相加和低通滤波,使信号变成适合后端电子学处理的低频信号;数据采集系统对前端输出的模拟信号进行数字化和信号处理,得到相对束团流强值后写入反射内存卡中;在中央控制室的束团流强监测系统和 bucket 选择系统分别从各自的反射内存卡中读取数据,用于束团流强值显示和控制 bucket 注入。其中数据采集部分是整个束团流强测量系统的核心,直接关系到系统测量的稳定和精度。

2.1 BPM 和调理前端电路

系统选取 BEPC II 储存环中纽扣型 BPM 为待测信号源,利用功率合成器使 BPM 四路电极信号相加,得到 BPM 四路电极的和信号。之后通过 750 MHz 模拟低通滤波后,通过同轴电缆将信号传输到束测本地站作为待测信号。

2.2 数据采集和处理

国际上很多 BCM 系统的数据采集部分使用商用示波器,这样使得数据获取处理简单。但是由于 BEPC II 储存环周长短,数字示波器的扫描时间和死区时间使得它无法满足小储存环 BCM 系统对时间的要求,所以使用 FPGA 进行数字信号处理。数据采集处理系统位于束测本地站,结构框图如图 2。高速 ADC 采样得到的数据送入 FPGA 进行数字信号处理,通过 PCIE 总线将数据写入到本地反射内存卡中。同时对于 BEPC II 的两种运行模式,利用 FPGA 构建适合两种模式的数字信号处理算法,可以实现工作模式的快速切换。由于两种模式下要测量的动态范围不一致,需要可调节大小的衰减器,达到高精度的测量,限幅器用于保护后端数据采集系统。

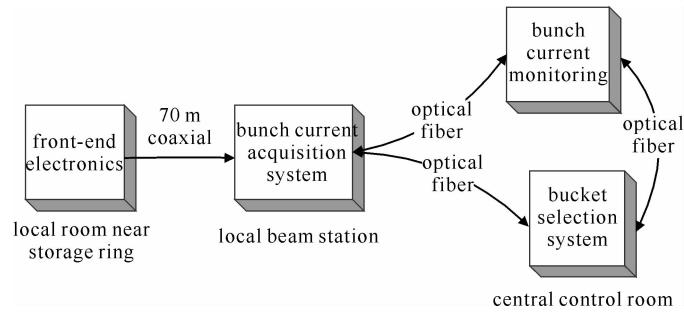


Fig. 1 Structural diagram of BCM system

图 1 束团流强测量系统结构框图

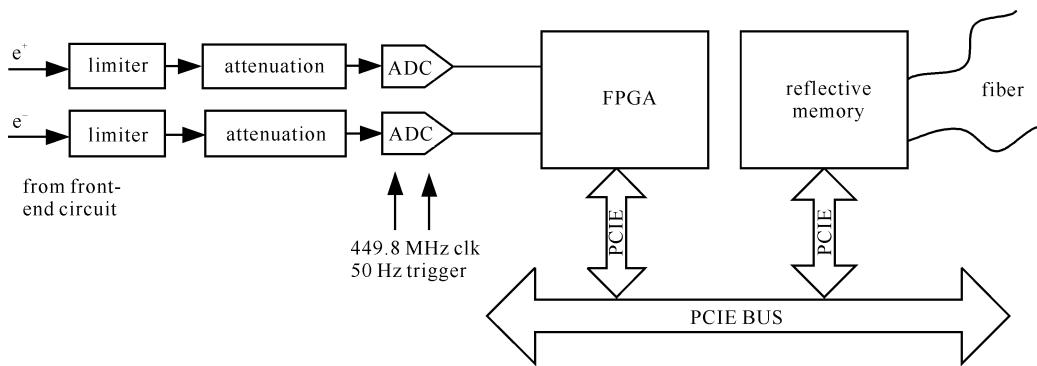


Fig. 2 Structural diagram of data acquisition system

图 2 数据采集系统结构框图

当束流和 BPM 相对位置无变化时候,BPM 的四路电极的电压之和在时域上的幅值,正比于该束团的流强值。但是当有横向和纵向振荡时,特别是纵向振荡的调制作用,使所得和信号的幅度会受到明显的影响,因此在分析时需要选取至少 1 个纵向振荡周期的信号。BEPC II 纵向工作点约 0.03,故系统在 FPGA 内设计了基于 256 圈数据的低通滤波器,以消除由于粒子纵向运动引起的 BMP 和信号的变化。整个核心算法在 FPGA 工作频率为 125 MHz 时完成时间为 2.75 ms。

2.3 反射内存网络

由于注入频率为 50 Hz,为了达到反馈效果,对于测量和反馈的时间均有比较严格的要求。BCM 系统设

计指标是测量和反馈的时间不大于 20 ms, 测量结果的传输使用反射内存网络, 可以很好地达到设计要求。反射内存网络是一种高速、实时、确定性的网络, 可以较好地解决实时系统中数据传输的实时性问题。系统反射内存网络采用环形组网方式, 如图 3 所示。控制计算机获得束团流强数据后直接写入本地的反射内存网络节点 1。反射内存卡通过光纤, 快速将数据传输到其它两块反射内存卡里, 即位于中央控制室的节点 2 和节点 3。显示系统和 bucket 选择系统分别读取节点 2 和节点 3 反射内存卡中数据。

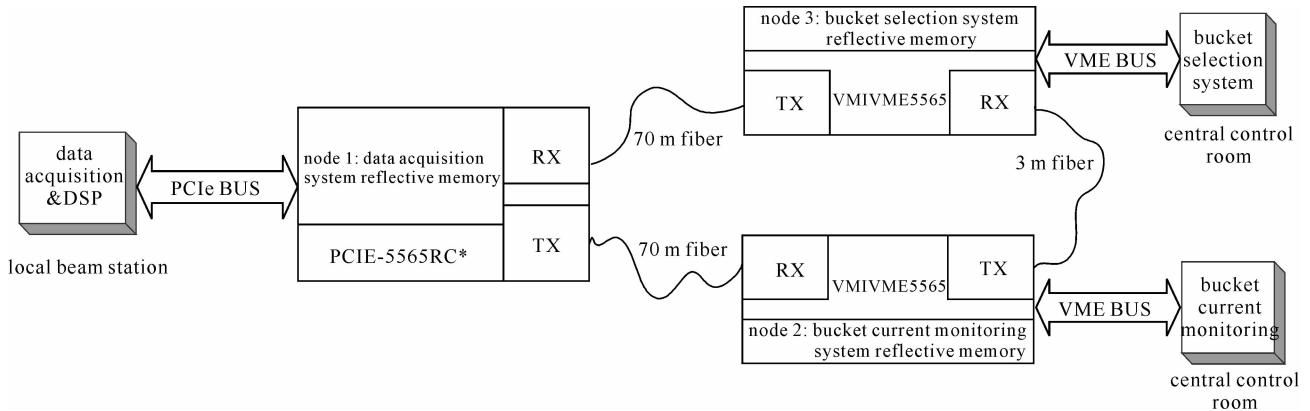


Fig. 3 Structural diagram of reflective memory network

图 3 反射内存网络结构框图

2.4 显示系统

束团流强显示系统在中央控制室, 从反射内存网络中读取束团流强数据, 用于束团流强值的实时显示, 提供给调束人员观测使用。系统采用柱状图显示每个束团流强值, 图 4 为对撞模式下的系统显示界面。上两排显示电子环束团流强值, 下面两排为正电子环束团流强值。

3 系统标定和系统长期稳定性

3.1 实验标定

为了得到束团流强的绝对值, 以方便在 BEPC II 的实际应用, 系统对测量数据进行了标定。常用的标定方法有两种: 使用实时直流流强变压器(DCCT)的值动态标定; 利用实验数据拟合系数进行静态标定。在系统的线性度较好的情况下采用两种标定均可以, 但是如果线性度较差, 适合采用高阶的静态标定拟合方法。本系统同时设计了两种标定方法, 第一种是实时读取 DCCT 测得的全环流强值, 动态计算得到单束团的流强值, 束团流强标定值可表示为

$$I_i = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{I_{DCCT}} A_i \quad (1)$$

式中: A_i 为系统测的束团流强相对值; I_{DCCT} 为 DCCT 测得的全环流强值。

第二种是利用实验的数据进行拟合系数静态标定。为了对系统的增益系数进行标定测量, 同时可以排除束团之间可能存在的耦合影响, 在单束团的情况下, 用 20 组数据进行系统标定, 结果如图 5(a)。单束团大流强的情况下, 束团长度会拉伸, 由于纽扣型 BPM 探测的是束流信号的微分形式, 所以束团长度拉伸时信号的峰值减小, 测量所得数值偏小。小信号时, ADC 的非线性情况比较严重, 所以一阶拟合系数会有一个常量。除去小流强情况下, 一阶线性拟合的误差在 0.5% 以内。

基于单数团的标定系数, 在单数团流强为 2 mA 的情况下, 连续测量 50 次, 测量结果直方图如图 5(b), 计算数据得到系统的精度达到 10 μ A/bucket。由于显示程序对数据位宽进行了裁剪, 最低位即为的分辨率, 由图 5(a)标定系统系数可知为分辨率为 0.1 mA/bucket。

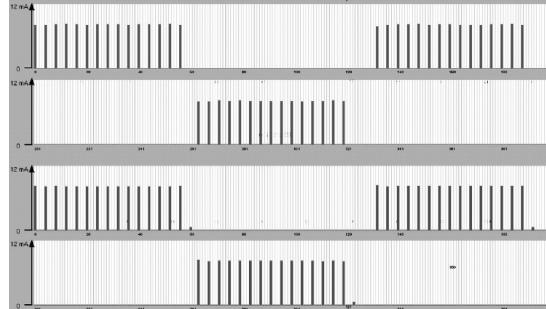


Fig. 4 Display of bunch current monitor system in colliding mode

图 4 束团流强测量系统在对撞模式下的显示

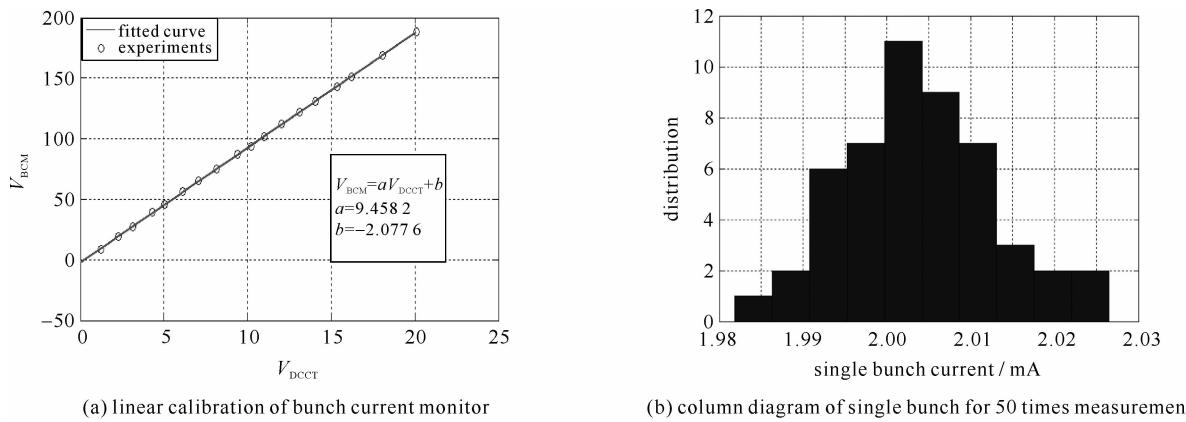


Fig. 5 Single bunch calibration for BCM

图 5 束团流强测量系统单数团标定

3.2 系统长期稳定性

BCM 系统是一个闭环反馈系统,系统稳定性是非常重要的。如果系统运行不稳定,极易造成某些束团注入流强过大,导致注入出现阈值,甚至出现注入时丢束。系统长期稳定性的因素包括数据采集卡的长期稳定性、采样和触发时钟的稳定性、采样和触发时钟之间的相位稳定性和电源纹波等。

通过采用以下四种方法,解决了系统长期的不稳定性问题,实现了系统半年的稳定运行:(1)测量系统的电源和信号放大器等有源器件,务必使用纹波小抗干扰的器件;(2)系统的触发时钟和采样时钟的抖动之和应小于一个采样周期;(3)通过移相器错开触发时钟和采样时钟,防止出现触发不稳定引起偶尔的测量错位;(4)FPGA 程序设计成开环系统,即每次触发后重置系统,避免单次触发异常导致系统瘫痪。

4 结 论

本文系统地介绍了 BCM 系统的升级后的各个部分,对系统标定结果进行了分析。根据实验结果,BCM 系统升级后,系统精度提高到 $10 \mu\text{A}$ 。同时基于长期稳定性方面的需求,对系统的长期运行稳定性进行相关的研究。经过一段时间系统运行,根据一些不稳定性问题采取相关的改进措施,提高了系统长期工作稳定性,使整个束团流强反馈控制系统可以长期正常的工作。目前整个系统实现了在线稳定运行,有效地控制了束团的均匀性,实时地为调束人员提供了可靠的束团流强信息。

参考文献:

- [1] 陈园博,王筠华,刘祖平,等. 小波分析方法在合肥光源逐束团测量系统中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2012, **24**(5):1155-1159. (Chen Yuanbo, Wang Junhua, Liu Zuping, et al. Application of wavelet analysis in Hefei Light Source bunch-by-bunch system. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(5):1155-1159)
- [2] 阎映炳,冷用斌,赖龙伟,等. 用束流位置监测器测量上海光源束流寿命[J]. 强激光与粒子束, 2012, **24**(1):189-192. (Yan Yingbing, Leng Yongbin, Lai Longwei, et al. Beam lifetime measurement using beam position monitor in SSRF. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(1):189-192)
- [3] 郑凯,王筠华,刘祖平,等. 改进的合肥光源逐束团流强测量方案[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(7):1178-1182. (Zheng Kai, Wang Junhua, Liu Zuping, et al. Improvement of bunch-by-bunch beam current detection system in Hefei Light Source. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(7):1178-1182)
- [4] Kehrer B, Hiller N, Hofmann A, et al. Filling pattern measurements at the ANKA storage ring[C]//Proc of IPAC. 2011:1209-1211.
- [5] Wu C Y, Hu K H, Chen Jenny, et al. Filling pattern measurement for the Taiwan Light Source[C]//Proc of EPAC. 2008:1137-1139.
- [6] 张磊, BEPC II 储存环束团流强测量系统的研制[D]. 北京:中国科学院高能物理研究所, 2008:22-35. (Zhang Lei. Development of bunch current monitor for BEPC II storage. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008:22-35)
- [7] Zhang Lei, Ma Huizhou, Yue Junhui, et al. Design of BEPC II bunch current monitor system[J]. *Chinese Physics C*, 2008, **32**(3):218-221.
- [8] Kikutani E, Akiyama A, Katoh T, et al. Bucket selection system of the KEKB rings[C]//Proceedings of APAC1998. 1998:525-527.
- [9] Yang Yongliang, Ma Tianji, Sun Baogen, et al. Bunch-by-bunch beam current monitor for HLS[C]//Proceedings of IPAC10. 2010:1035-1037.
- [10] 邓庆勇,曹建社,岳军会,等. BEPC II 束团流强测量系统升级[C]//高能物理 BEPC 年会. 2012:98-100. (Deng Qingyong, Cao Jianshe, Yue Junhui, et al. An upgrade for the bunch current measurement system of BEPC II //Annual Conference of BEPC II in IHEP. 2012:98-100)

[11] Yong H, Leo Bob D, Kiman H, et al. NSLS-II filling pattern measurement[C]//Proc of ICAL EPCS. 2011:735-737.

Bunch current measurement system for BEPC II storage ring

Deng Qingyong, Cao Jianshe, Ye Qiang, Yue Junhui, Zhang Cong, Wang Pengfei

(Institute of High Energy of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The BCM (Bunch Current Measurement) system was developed at BEPC II (Beijing Electron-Positron Collider II) for solving the instability. In order to measure the bunch current in accelerator storage rings, the signal of beam position monitor (BPM) was sampled by the high-speed ADC, and the digital signal was processed in field-programmable gate array (FPGA). Based on the reflective memory network, the system realized sharing of the results in high-speed and displayed the results in real-time. The system achieved higher precision, the accuracy of real-time display was 0.1 mA/bucket, and the best measurement resolution reached $10 \mu\text{A}/\text{bucket}$. Since the trigger and the algorithm structure for system were adjusted, the system realized stably work for a long time, the positron and the negative electron storage ring could control the uniformity of the bunch current, which improved the luminance of accelerator collisions.

Key words: bunch current; bunch-by-bunch; beam position monitor; reflective memory; field programmable gate array

PACS: 42.60.Jf; 41.85.Qg; 07.05.Hd