

# HLS 逐束团跟踪监测系统\*

郑凯<sup>1)</sup> 王筠华 刘建宏 刘祖平 李为民 孙葆根 周泽然 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** 介绍了合肥光源(HLS)逐束团跟踪监测系统,并且展示了相关的实验、数据分析结果.通过同相的门电路信号和RF的分频信号控制ADC的外触发,对该测量系统的可靠性、稳定性进行了验证.并且利用该系统,跟踪记录了完整的注入,慢加速,降频,校正轨道,扭摆磁铁充电,加斜四极铁以及正常供光运行的全过程.最后展示了该过程的横向工作点(tune值)漂移,多束团耦合不稳定性研究结果.

**关键词** Bunch-by-bunch 双平衡混频器 可靠性验证 tune值漂移 耦合束团不稳定性

## 1 引言

HLS电子储存环是专用的同步辐射装置.电子以200MeV注入储存环,在800MeV,100—300mA的流强下运行.合肥光源周长为66m,RF频率为204MHz,谐波数为45,用以探测束流位置信号的钮扣电极4个一组的以斜45°安装在真空室内.合肥光源采用多圈多次全束团注入方式.

逐束团测量系统是用于测量每个束团瞬时位置信

号的.在束团振荡信号正确检测的基础上对横向不稳定性模进行反馈抑制,称为横向反馈系统.逐束团的测量和逐束团宽带反馈统称Bunch-by-bunch(简称BxB)系统<sup>[1, 2]</sup>.图1为BxB测量和横向反馈系统的框图(预研),包括6大部分:信号探测、信号处理、信号采集、时钟系统、延时和滤波、反馈部件.可以用来完成横向和纵向振荡的测量,横向宽带反馈任务.图中的阴影部分即为现在服务于HLS的单个BPM(束流位置监测器)逐束团跟踪监测系统.

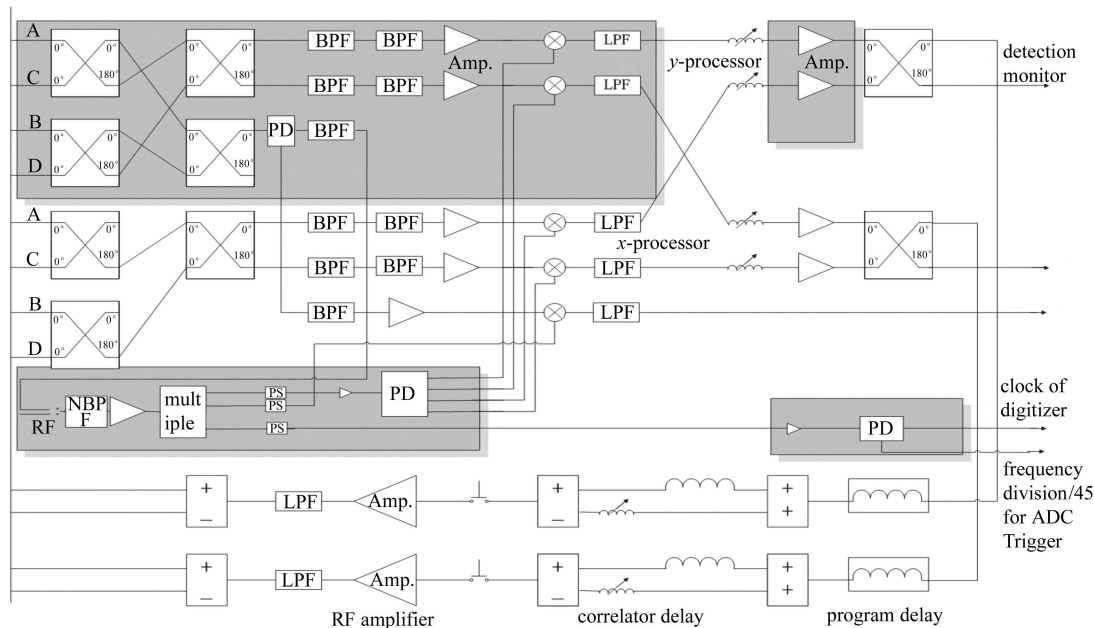


图1 HLS Bunch-by-bunch 横向反馈系统框图

2005-08-01 收稿

\* 国家自然科学基金(10175063)资助

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

该系统工作于3倍的RF频率,约为612MHz,系统带宽为102MHz.采用Acqiris公司的可以双通道同步采样的400MSPS的12bit ADC<sup>[3]</sup>,和MEN公司的PXI机箱.同步RF信号连接至ADC的外部时钟,同步回旋频率信号 $f_0$ 接至ADC的外部触发,使不同组记录的束团得以相互对应,从而完成束团的跟踪监测.

## 2 BxB测量系统的可靠性验证

在BxB测量系统服务于HLS之前,我们完成了对该系统的理论分析<sup>[4]</sup>,和模拟信号验证.利用3个信号源(分别为:1输出RF信号;2输出脉冲信号;3输出待验证的基带有用信号),BxB的倍频模块和3个双平衡

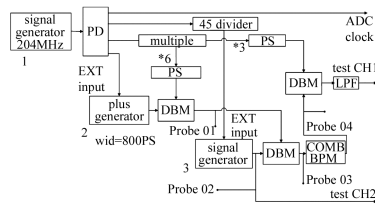


图2 BxB测量系统可靠性验证实验原理框图

混频器(DBM)模拟从BPM获取的束流信号,对于信号源3的有效检验是证明BxB测量系统可靠性的有力证据.该实验设计充分地应用了双平衡混频器的变

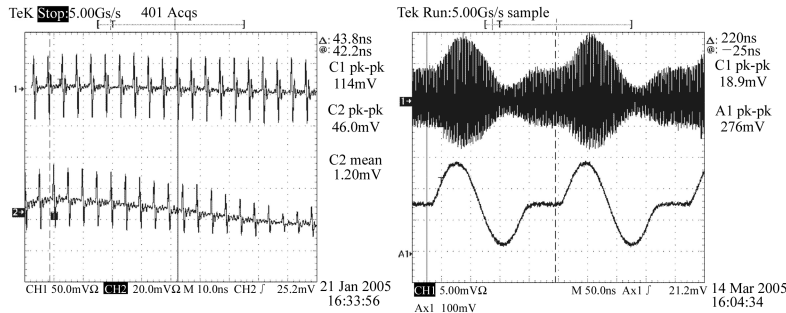


图3 可靠性实验中示波器采集波形

## 3 测量实验及数据分析

受到ADC的内存的限制,每次采样的深度最大为4,194,192.我们利用回旋频率来同步ADC的外触发,使得不同记录的相同束团可以对应起来,以便于跟踪某个长时间机器运行过程所有束团的变化及进行相关的研究.

以下的实验数据均来自于一次注入时的 $x$ 和 $y$ 方向的位置信号(从注入束流到正常供光的全过程).图4,图5(b),图6中的记录编号对应的机器状态皆如表1所示.这里有必要说明这些记录并非等时间间隔的.

频、电调衰减等功能,也是门电路应用于加速器束流测量的有益尝试.图2即为该验证电路的原理框图.

实验原理如下,将门宽800ps、间隔约为5ns(由外部触发RF决定)的脉冲信号通过DBM作用于6倍的RF正弦信号,产生一个等幅脉冲串(图3左上波形所示,从Probe 01处测得).信号源3产生与回旋频率同步的正弦波或者三角波,或者某种未经同步的任意频率的正弦波(图3右下波形所示,从Probe 02处测得)来调制该等幅脉冲串.经过调制的脉冲信号串就可以认为是一种可预知的待测束流信号(图3左下波形所示,从Probe 03处测得).这样的信号再经过梳状滤波器(图3右上波形所示,从Probe 04处测得)后与3倍的RF混频,经过低通,最后送往ADC的一个通道.信号源3的信号经过功分器送往ADC的另外一通道.对ADC的CH1和CH2两路信号进行同步的采样.采样长度均为4.2M/CH,对经过归一化两个通道的值求取均方误差,其中 $x$ 为CH1信号, $y$ 为CH2信号;得到

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - y_i)^2 = 1.49\%.$$

利用该套实验线路中,通过改变信号源3的输出信号模式可以分别对该系统的时间抖动,频率分辨率进行测量.

表1 记录编号及其对应的机器状态

记录编号	机器状态
001—046	注入(injection)
047—123	慢加速(ramping)
124—160	降频, RF频率从204.0554MHz降至204.016MHz
161—200	闭轨校正(correcting closed orbit)
201—267	扭摆磁铁充电(wiggler charging)
268—305	加斜四极铁(adding skew-quadrupole)
306—400	用户供光(open for users)

### 3.1 Tune值漂移的测量

利用BxB测量系统测得的数据,可以短程或者长程的对tune的漂移进行跟踪,本例中即为整个注

入过程中  $y$  方向的 tune 值漂移曲线(如图 4 所示), 每记录的采样长度为  $45(\text{束团总数}) \times 2048(\text{每束团采样数}) = 92160(\text{总采样数})$ . 图中的 No.12 和 No.28 记录处所出现的两个峰值对应的是注入过程中出现的束流突然崩溃; 在 wiggler 充电的过程中, 对应 No.201 到 No.267 记录, 由于 wiggler 强磁场的影响, tune- $y$  连续增长; 变化趋势同理论计算相同, 但是同时测量到的  $\Delta\nu$  却大于理论值. 我们还可以注意到该图中还有几处记录的 tune 值在 0.55 左右, 这是因为  $x$  方向的振荡在  $y$  方向耦合, 在  $y$  方向检测到了明显的 tune- $x$  频率分量, 其幅度甚至高于 tune- $y$  本身. 从 No.306 到 No.400 是对用户开放的供光过程, tune- $y$  在该过程中相对稳定, 漂移为 0.0014.

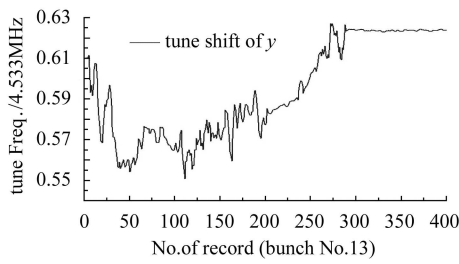


图 4 注入全过程中的 tune- $y$  的漂移

### 3.2 多束团耦合不稳定性模的分析

利用 BxB 测量系统的所获取的数据可以进行多束团耦合不稳定性模的分析. 横向和纵向的不稳定性模在频谱上对应的分量分别如公式 1 和公式 2 所示<sup>[5, 6]</sup>

$$f_{nmp} = (n + p \cdot M) \cdot f_0 + f_\beta + m \cdot f_s, \quad -\infty \leq p \leq \infty, \quad (1)$$

$$f_{nmp} = (n + p \cdot M) \cdot f_0 + m \cdot f_s, \quad (2)$$

$f_0$ ,  $f_\beta$ ,  $f_s$  分别为回旋频率,  $\beta$  振荡频率, 同步振荡频率.

$M$  代表谐波数, 第一个模式系数  $n$  即代表耦合束团模式, 代表着两个相邻束团的相位差  $\Delta\varphi$ , 其定义为

$$\Delta\varphi = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{M}, \quad 0 \leq n \leq M - 1. \quad (3)$$

第二个模式系数  $m$  表示的是某一束团内部的粒子的相位振荡, 以横向振荡举例来说,  $m = 0$  代表的是二极振荡, 束团在横向表现为一个节点,  $m = 1$  代表的是四极振荡, 束团表现为两个节点.

考虑到频谱变换中有正频率和负频率, 每种耦合模式都在  $Mf_0$  的区间里出现两次. 所以, 所有模式都会在  $pMf_0$  到  $(p+1/2)Mf_0$  这段区间内出现一次.

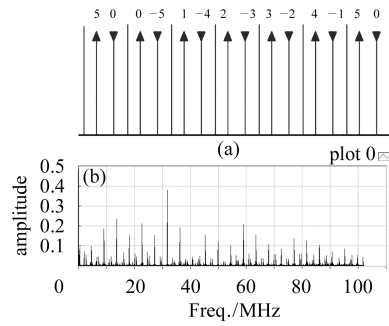


图 5 (a) 多束团耦合不稳定性模(6束团示意图); (b) 针对注入过程中 3 号记录所作的束流信号频谱分析

以 6 个束团为例,  $\blacktriangle$  表示的是正频率部分的频谱分量,  $\blacktriangledown$  代表的负频率的频谱分量, 成组出现在一段  $f_0$  的区间内(见图 5(a)). 在一段  $Mf_0$  区间内, 所有的模式都出现两次.

在图 5(b) 中, 可以明显的看到横向的多束团耦合模所对应的频谱分量, 在  $n \times 4.533\text{MHz}$  到  $(n+1) \times 4.533\text{MHz}$  的回旋频率中间可以明显的观测到两条  $\beta$  振荡的谱线, 依次为 No. $M-1-n$  和 No. $n$  的振荡模式. 除此之外, 还可以看到  $m \neq 0$  所对应的谱线.

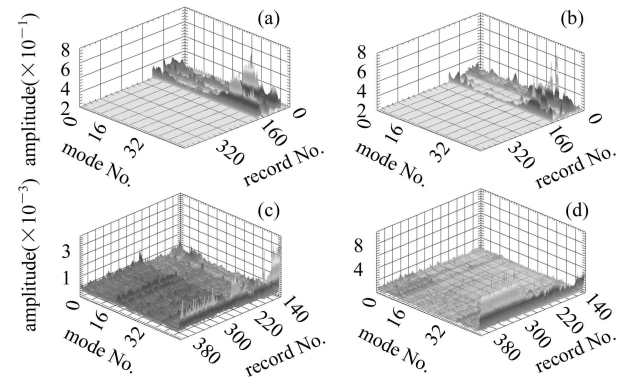


图 6 多束团耦合不稳定性模分析 (a) 耦合不稳定性模分析( $x$ 方向); (b) 耦合不稳定性模分析( $y$ 方向); (c) 耦合不稳定性模分析( $x$ 方向)(No.140-No.400); (d) 耦合不稳定性模分析( $y$ 方向)(No.140-No.400).

图 6 即为典型的不稳定性模的分析(图 6(a), (b) 两图所示), 注入, 慢加速, 降频的过程中, 不稳定性模式振荡很剧烈. 在后面的闭轨校正、wiggler 充电、加斜四极铁和正常供光过程中, 不稳定性还是时有发生, 不过就其幅度而言和前面的有量级上的差别(图 6(c), (d) 两图所示). 通过观察 4 幅图, 可以看到在振荡相对稳定之后, 原来振荡剧烈的 No.32 和 No.34 已经不显著, 反而 No.44 号模一直保持其振荡幅度而并未出现

明显的衰减趋势,  $y$  方向在记录号 300 后反而有加强的趋势.

## 4 结论

本文介绍了针对 HLS 的 Bunch-by-Bunch 测量系统的系列实验, 创新的提出了一种行之有效的模拟束流信号源的方法, 验证了该 BxB 测量系统的可靠性. 并将该系统用于 HLS 的实际测量中, 对于 HLS 的注

入过程进行了全程的跟踪测量, 对其 tune 值漂移, 多束团的耦合不稳定性都做了定性的分析. 在同北京高能物理研究所的联合实验中, 该系统在 BEPC 配合完成环上各种条件改变对阻尼时间, tune 值漂移的影响, 也表现出良好的性能.

作者感谢北京高能物理研究所的马力研究员, 王九庆研究员, 曹建设研究员很多有益的讨论和无私帮助, 同时感谢岳军会, 焦毅, 张磊等研究生的愉快合作.

## 参考文献(References)

- 1 HUANG W H, KANG H S, Kim D T et al. Transverse Feedback System for PLS Storage Ring. Proceeding of APAC. Beijing, China, 2001, 302—304
- 2 LIU Jian-Hong, WANG J H, PEI Y J et al. Bunch-by-Bunch Measurement System in HLS. Proceeding of PAC, Knoxville. Tennessee, USA, 2005
- 3 User Manual of 12 bits Digitizers by Acqiris
- 4 LIU Jian-Hong. The Development of Beam Detect System and the Research of Instability in HLS Thesis, Doctor Degree. University of Science and Technology of China. (in Chinese)  
(刘建宏. HLS 测量系统研制及不稳定性初步研究. 博士论文, 中国科学技术大学)
- 5 Mario Serio. Multi bunch Instabilities and Cures. Proceeding of PAC. New York, 1999
- 6 Balewski K. Review of Feedback System. Proceeding of EPAC. Stockholm, 1998

# Bunch-by-Bunch Tracing-Measurement System in HLS<sup>\*</sup>

ZHENG Kai<sup>1)</sup> WANG Jun-Hua LIU Jian-Hong LIU Zu-Ping LI Wei-Min  
SUN Bao-Gen ZHOU Ze-Ran YANG Yong-Liang

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

**Abstract** In this paper, we introduce the Bunch-by-bunch tracing-measurement system in HLS, and describe some results of experiments and analyses. Using an in-phase gate signal for simulating beam signal and a frequency divided signal of RF for supplying external trigger of ADC, we test the reliability and the stability of this system. By this system, we trace and record a full process of injection, ramping, RF decreasing, closed orbit correcting, wiggler charging, adding skew-quadrupole and opening for users. The tune shift and the coupled bunch instability during the full process have been shown in the end.

**Key words** Bunch-by-bunch, double balance mixer (DBM), reliability test, tune shift test, coupled bunch instability

Received 1 August 2005

\*Supported by National Natural Science Foundation of China (10175063)

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