

基于示波器嵌入式IOC技术的逐束团位置监测系统研制

张 宁 冷用斌 陈之初 袁任贤 赖龙伟

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 为研究尾场引起的束团不稳定性,本工作开发了基于高速宽带示波器嵌入式IOC的逐束团位置测量系统。该系统通过直接获取加速器储存环中钮扣型电极的原始束流信号,进行在线计算独立的水平和垂直方向的逐束团位置。介绍了此系统的需求分析、硬件结构以及嵌入式IOC软件结构。利用在上海光源储存环上获取的逐束团位置数据,对系统性能进行了评估。实验显示,不同束团感应到的工作点及横向振荡振幅与束团编号间的依赖关系,结果证明该系统是一个有效的机器研究工具。

关键词 束团不稳定性,逐束团测量,束流诊断,尾场,上海光源

中图分类号 TL506

第三代光源的储存环中,由轨道噪声引起的工作点漂移以及尾场引起的束团不稳定性,是光源运行中束流诊断研究需重点关注的问题。具有逐圈束流位置测量能力的DBPM信号处理器^[1]的出现,为实现亚微米级束流轨道稳定性,以及在MHz量级带宽范围内研究加速器及束流的稳定性,提供了坚实的技术基础。但其处理方法是将储存环内的全部填充束团作为整体待测对象看待,仅提供填充束团的整体逐圈的位置信息,而非某个束团的位置信息。因此DBPM处理器无法应用于单个束团束腔以及束团间相互作用的研究。逐束团束流反馈系统的引入以治标的方式解决尾场引起的束团不稳定性问题^[2],但对于研究不稳定性的来源及束团间的相互作用,也不能提供足够的信息。

多通道示波器嵌入式IOC(Input/Output Controller)可由时域直接采样法获取BPM输出的束团耦合信号,其高带宽和高采样率可确保在采样过程中分辨每个束团的原始信号。处理A/D转换后的原始束流信号,可得到逐束团的水平和垂直位置信息。上海光源(SSRF)成功开发了这一系统,为搭建逐束团位置监测系统、定量研究束团间相互作用提供了新的选择。本文详细介绍此系统的需求分析、方案设计、系统性能带束评估结果及在束流不稳定性研究中的初步应用。

1 尾场和束流不稳定性的基本理论

带电粒子在加速器中受到外加磁场力和自身磁场力以及管道内激发的磁场力作用。在理想状况下,管道壁是连续光滑的理想导体,但实际上管道壁会有电阻存在且管道截面会发生改变。因此带电粒子会激发起电磁场,这也称尾场,用尾场函数表示^[3]。一般将尾场函数理解为真空管道对 m 阶极矩的函数型束流瞬时响应,类似于格林函数,即

$$w_{//m}(r,s) = \frac{\int_{-L}^L E_{//m}(r,z,t) dt}{Q} \Big|_{z=vt-s} \quad (1)$$

$$w_{\perp m}(r,s) = \frac{\int_{-L}^L [E_{\perp m}(r,z,t) + \vec{V} \times \vec{B}_m(r,z,t)] dt}{r_0 Q} \Big|_{z=vt-s} \quad (2)$$

式中, $w_{//}$ 和 $w_{\perp}$ 分别为纵向和横向尾场函数; m 为阶数; r 和 s 分别为检测电荷的横向坐标和纵向坐标; r_0 为激发电荷横坐标; Q 为激励电荷电量; E, B 分别为粒子激发的电磁场; $2L$ 为部件结构长度。此函数表示的是一个时域的量,由于束流动力学分析通常是在频域中进行的,此函数会通过傅立叶变换转换成对应的频域表达式,用来表示真空室耦合阻抗,即电磁场力的归一化傅立叶变换沿粒子轨迹的积分。

国家自然科学基金(11075198)资助

第一作者:张宁,男,中国科学院上海应用物理研究所在读博士研究生,研究方向:分布式数据采集系统

通讯作者:冷用斌, leng@sinap.ac.cn

收稿日期:2012-02-29,修回日期:2012-04-08

通常尾场效应分为短程和长程尾场效应。短程尾场效应是指同一个束团内部不同部位之间的尾场效应,在频域中对应于窄带阻抗,具有很低的品质因数,因此随时间衰减很快;长程尾场效应是指束团之间的耦合尾场效应,在频域中对应于宽带阻抗,品质因数较高,随时间衰减也较慢。

由于长程和短程尾场对束团的作用,有可能导致束团串中不同位置的束团感应到的 lattice 参数不完全相同,从而使不同束团的横向振荡工作点及振幅不完全相同。反之,如果能够精确测量到束团串中每个束团的位置、工作点及横向振荡振幅等参数,则可依据信息对束团的尾场效应进行定量的研究。

2 逐束团位置监测系统设计

2.1 数据采集系统的需求分析

示波器嵌入式 IOC 逐束团采集系统的设计方案为:利用示波器对储存环中束流位置探测器(BPM)感应电极的输出信号进行时域上直接采样,A/D 转换后的数据被储存在示波器内存中指定位置,通过嵌入示波器的 IOC 软件包,对存储的束流位置数据进行获取和计算,得到水平和垂直方向独立的逐束团位置信息,因此所用示波器性能指标须有如下要求:

(1) 需要能够独立测量四电极信号,从而通过差比和算法得到独立的水平、垂直及电荷量信息,因此要求示波器独立的输入通道数不小于 4,且具有严格同步的触发时钟;

(2) 束团数据率为 RF 频率(上海光源为 499.654 MHz),现有数据采集设备无法实现严格的同步采样,需要后续的数字信号处理来获得信号峰值,因此要求实时数据采样率远高于 RF 频率;获取的束团脉宽为亚 ns,则时间分辨率为 ps 量级,初步估算采样率不低于 10 GHz;

(3) 工作点为是束流在每个回旋周期中横向振荡次数,在束流不稳定性研究中其变化量非常小,对于研究而言,工作点分辨率好于 0.001,其小数部分计算方法基于对位置数据做 FFT,工作点分辨率依赖于频率分辨率。因此需要每次获取逐束团的位置数据长度为千圈量级,由此估算示波器每个通道数据缓冲区要求大于 15 M 容量;

(4) 储存环多束团填充模式束流信号频谱见图 1。工作中心频率为束流 RF 频率或其高次谐波,对于逐束团测量,要求带宽不低于二分之一 RF 频率及示波器模拟带宽不低于 500 MHz;

(5) 需要安装配置 IOC 软件包以及编译运行相

关组件,需要示波器自带操作系统;

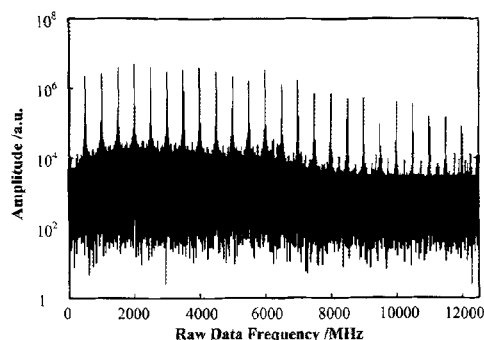


图 1 储存环多束团填充模式束流信号频谱
Fig.1 Beam signal spectrum of multi-bunch mode in the SSRF storage ring.

(6) 为保证运算效率并支持多组件运行,示波器硬件配置(CPU、内存与硬盘容量)应较好。

综合上述性能要求并结合自身现有设备,选用美国 Tektronix DPO7000 示波器^[4](4 个独立输入通道;模拟带宽 ≥ 500 MHz;最高采样率 5–25 GHz;单通道最大存储容量为 50 M(对应每个束团的逐圈位置数据可缓存达 3 460 圈);CPU 主频 2.4 GHz;2 G RAM;80 G 硬盘)。

2.2 硬件结构设计及参数选择

BPM 感应电极获取的原始束团信号带宽可达数十 GHz,经信号电缆展宽后到达示波器输入端的时域脉宽也仅有几十 ps,即使做好四通道信号电缆的相位匹配,并用现有 DPO 系列示波器最大的不插值采样率 25 GHz 来采样,也很难保证采样点始终在原始信号的极大值附近,对触发信号的定时精度要求极高。为降低对触发信号定时精度的要求,降低可能耦合入系统的低频噪声的影响,须在感应电极和示波器输入端间插入一个带通滤波器(通常选择 RF 频率为中心频率)。由图 1,束流信号在 RF 频率 3、4 次谐波处幅值最大,为获得更佳信噪比,我们用接近 3、4 次谐波频率(1.5 和 2 GHz 带通滤波器)为中心频率进行带通滤波^[5]。但此举会使信号脉宽变窄,触发抖动而引入相位误差增大。此外,所选用的滤波器性能无法令人满意。经过综合评估,选用 500 MHz 的带通滤波器。但随着电子技术的发展,选取高次谐波的方法仍然值得期待。此逐束团束流位置数据采集系统结构示意图如图 2 所示。

2.3 软件结构设计

系统采样数据的后续处理是通过嵌入示波器的 EPICS (Experiment Physics and Industry Control

System) IOC^[6]软件包来实现的,主要任务是从示波器内存中读取 4 个通道采样后的束流信号原始数据,并从中提取每个束团激励起的感应电压值,对提取的 4 通道感应电压值进行在线运算,得到独立的水平和垂直方向束流位置信息,且发布给 EPICS 系统用户。此外还包括设置数据扫描频率、数据长度、通道获取权限等内容。

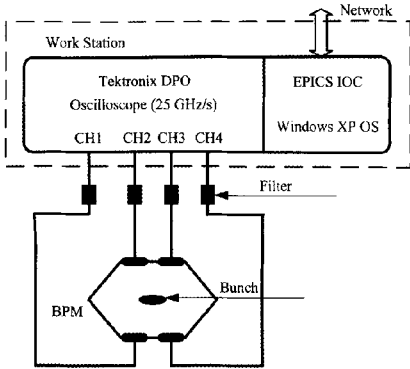


图 2 数据采集系统结构示意图
Fig.2 Diagram of data acquisition system.

束团激励起的感应电压值可用原始信号的脉冲峰值来表征,提取方法有原始数据最大值法和样条插值等效采样法。原始数据峰值法就是提取原始数据中每个束团脉冲的采样最大值,具有算法简单,计算效率高的特点,但实际上由于示波器采样率并

非 RF 频率整数倍,采样值存在一个周期性的采样相位误差,该误差会随采样率的增大而减小,如果采样率远高于 RF 频率,此误差就会维持在较低水平。样条插值等效采样法是对原始信号进行 3 次样条插值,以 RF 频率在理想的峰值位置进行插值,获得等效采样数据,用此法可得到低于最大值法相位误差的数据。但 3 次样条插值是较复杂的算法,计算量较大。因此在线处理选择最大值法,而样条插值等效采样法主要用于离线精确分析。

对于加速器储存环束流位置的精确测量,一般使用差比和法: $\Delta/\Sigma=(I_R-I_L)/(I_R+I_L)$,其中 I_R 和 I_L 是不同方向的感应电极信号,比值表示归一化的位置信息,通过乘以探头标定系数就可求出束流水平和垂直方向的真实位置。束流流强则通过对四个电极获取的输入信号求和,并用 DCCT 采集到的平均流强进行标定而得到。

为在线计算束流位置以及流强,开发了可处理多个长数据段并内置相关算法的新 EPICS 记录类型 Arrarcalc 以及相应的 record support 模块。此模块会触发底层原始数据驱动模块读取示波器存储区数据,并进行预处理提取每个脉冲波形最大值,然后计算最终结果。设定 Arrarcalc 的数据获取对象,扫描方式及数据长度,就可以相应的输出计算得到的束流位置或者流强参数。IOC 软件包结构见图 3。

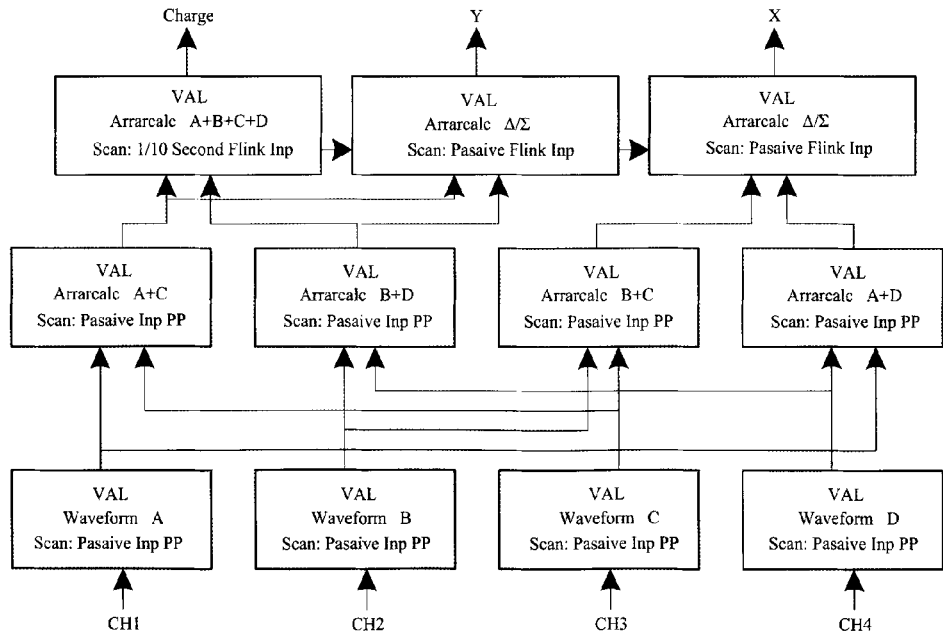


图 3 示波器嵌入式 IOC 软件结构框图
Fig.3 Diagram of the oscilloscope-embedded IOC software.

3 束流实验

为监测储存环中的束团运行情况，以研究分析束团不稳定模式，及对示波器嵌入式 IOC 逐束团测量方法进行测试和评估，在储存环供光运行阶段和束流注入阶段，利用该示波器嵌入式 IOC 采集了逐束团的多圈位置数据。实验时相关束流参数为：全环 500 个束团连续填充，分别从头至尾编号为 1-500。水平方向设计工作点 23.222，垂直方向设计工作点 11.291，注入前平均流强 140 mA，注入后平均流强 200 mA。

以束团串中编号为 011、211、411 的束团逐圈位置数据为例，注入阶段获取到的水平方向时域波形及相应频谱如图 4 所示。注入阶段被激励起的横

向振荡，不同束团其振荡振幅、振荡频率以及初始相位均有所不同，研究系统可有效地分辨出束团间的差异，可用于实时监测逐束团的位置、工作点、电荷量等的变化，从而研究束团间相互作用或束腔相互作用。

利用谐波分析的方法对每个束团的多圈位置数据进行处理，可获得注入过程中逐束团工作点随束团编号的分布。但在实际应用中，因不同束团间工作点的差异极小，通常在 0.0001 量级，因此需要采用在频域插值的方法来改善分辨率^[7]。用此方法处理得到的水平及垂直方向工作点、横向振荡振幅与束团编号之间的依赖关系如图 5 所示。

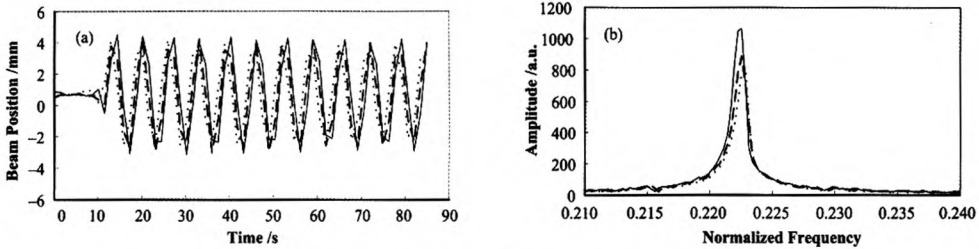


图 4 注入阶段水平方向逐束团位置波形(a)及对应频谱(b)
Fig.4 Bunch-by-bunch beam position wave (a) and spectrum (b) in horizontal direction during beam injection.

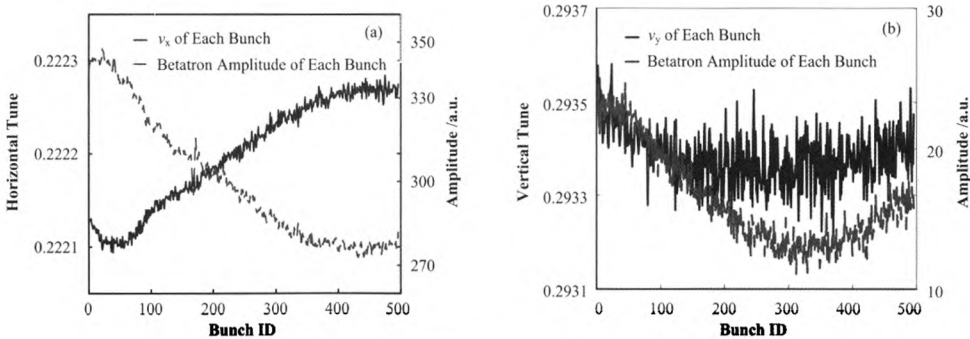


图 5 工作点和横向振荡振幅沿束团分布：水平(a)；垂直(b)
Fig.5 Distribution of tune and betatron oscillation on bunches. (a) horizontal; (b) vertical.

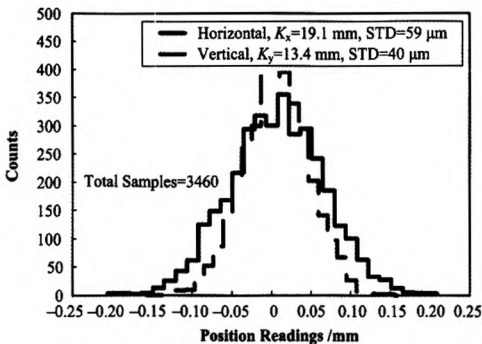


图 6 系统随机噪声统计直方图
Fig.6 Histogram of system random noise.

可用 SVD^[8]分解按模式独立分析 (Mode Independent Analyze, MIA)方法^[9]处理所有束团多圈位置数据构成的矩阵，提取具有物理含义的真实振荡模式后，对残余噪声矩阵中的数据进行统计分析，即可评估逐束团位置测量系统的位置分析率。因在接近示波器满量程(8-bit)的情况下获取数据，此时测量到的信噪比为 83，在此条件下得到的系统随机噪声统计直方图如图 6 所示。该系统用于 SSRF 储存环中的 BPM 探头(水平方向位置因子 19.1 mm，垂直方向位置因子 13.4 mm)，水平和垂直方向逐圈

位置分辨率分别为 59 和 40 μm 。示波器不同量程下位置分辨率与束团电荷量间近似呈线性单减关系见图 7, 其随示波器 ADC 有效位数(量程倒数)而减小, 与预期相符。

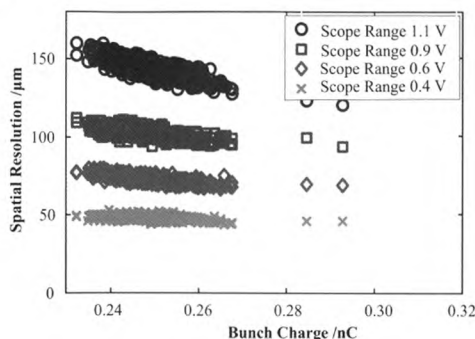


图 7 分辨率与束团电荷量间依赖关系

Fig.7 Spatial resolution vs beam bunch charge.

4 结语

基于示波器嵌入式 IOC 的逐束团位置监测系统, 可实现水平、垂直方向束团位置的精确测量, 位置分辨率好于 50 μm , 每个束团的数据长度可达 3,000 圈以上, 束流实验中观察到了工作点及横向振荡振幅与束团位置的明确依赖关系, 结果证明此系统是束团不稳定性研究的一个有力工具。因数据量及计算量较大, 实时性能欠佳, 后续工作将重点优化算法及代码, 提高实时性能。

参考文献

- 1 冷用斌, 易星, 赖龙伟, 等. 新型数字 BPM 信号处理器研制进展[J]. 核技术, 2011, 34(5): 326–329
LENG Yongbin, YI Xing, LAI Longwei, *et al.* The development of a new digital BPM processor[J]. Nucl

- Tech, 2011, 34(5): 326–329
- 2 韩立峰. 横向反馈数字处理系统研究. 中国科学院博士学位论文. 中国科学院上海应用物理研究所, 2009
HAN Lifeng. The development of transverse feedback processing system. Ph degree thesis. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Science, 2009
- 3 刘乃泉. 加速器理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
LIU Naiquan. Accelerator Theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004
- 4 <http://www.tek.com/oscilloscope/> (December 2010)
- 5 Zhang N, Leng Y B, Embedded Epics Ioc Data Acquisition System for Beam Instability Research IPAC'11
- 6 <http://www.aps.anl.gov/epics/> (December 2010)
- 7 冷用斌, 阎映炳, 袁任贤, 等. 上海光源储存环工作点测量系统. 强激光与粒子束, 2010, 22(10): 2412–2416
LENG Yongbin, YAN Yingbing, YUAN Renxian, *et al.* Betatron tune measurement system for SSRF storage ring. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(10): 2412–2416
- 8 赵学智, 叶邦彦. SVD 和小波变换的信号处理效果相似性及其机理分析[J]. 电子学报, 2008, 36(8): 1582–1589
ZHAO Xuezhi, YE Bangyan. The similarity of signal processing effect between SVD and wavelet transform and its mechanism analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(8): 1582–1589
- 9 Gasior M, Gonzalez J L. Improving FFT frequency measurement resolution by parabolic and Gaussian spectrum interpolation, 2004 Beam Instrumentation Workshop, AIP Conf. Proc. 2004, 732: 276–285

A bunch-by-bunch beam position monitor based on scope embedded IOC

ZHANG Ning LENG Yongbin CHEN Zhichu YUAN Renxian LAI Longwei

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A bunch-by-bunch beam position monitor system, based on a broadband oscilloscope embedded EPICS IOC, has been developed at SSRF to study the beam instabilities driven by the wake-field effects. The horizontal and vertical beam positions of each bunch could be located independently in this system by using the original signals from the button-type pickups on the storage ring. In this article, we report the hardware and software architecture of this system. The bunch-by-bunch data of the storage ring are used to evaluate performance of the system. Dependency of the tune, and the betatron oscillation amplitude of different bunch on the corresponding bunch ID, is also detected. The system is an effective tool for machine-study of SSRF.

Key words Beam instability, Bunch-by-bunch measurement, Beam diagnostics, Wake-field, SSRF

CLC TL506